# خازن‌های قدرت

شرکت فراکوه

# فهرست مطالب


فصل ۱ : معرفی ..... ۸
۱-۱- تاریخچهٔ خازن ..... ۸
۱-۲- خازن‌های صنعتی ..... ۱۱
۱-۳- فصل‌های کتاب ..... ۱٤
فصل ۲ : اصول خازن ..... ۱۸
۲-۱- ظرفیت خازن‌های مسطح و کُروی ..... ۱۸
۲-۲- خازن‌های استوانه‌ای ..... ۲۲
۲-۳- انرژی ذخیره شده در خازن ..... ۲۳
۲-٤- شارژ و دشارژ شدن خازن ..... ۲٤
فصل ۳ : اصول اصلاح ضریب توان ..... ۲۸
۳-۱- ضریب توان ..... ۲۸
۳-۲- کندانسور سنکرون ..... ۳۲
فصل ٤ : استانداردهای صنعتی ..... ۳۵
٤-۱- مؤسسات تهیه کنندهٔ استاندارد ..... ۳۵
٤-۲- استانداردهای مربوط به خازن ..... ۳۷
٤-۳- مؤخره ..... ٤۰
فصل ۵ : خصوصیات خازن ..... ٤۱
۵-۱- انواع بانک خازنی ..... ٤۱
۵-۲- خصوصیات خازن‌ها ..... ٤٤
۵-۳- انواع دیگر خازن ..... ۵٤
فصل ٦ : آزمایش‌های خازنی ..... ۵۷
٦-۱- آزمایش‌های طراحی ..... ۵۷
٦-۲- آزمایش‌های روتین ..... ۵۹
٦-۳- آزمایش‌های نصب (میدانی) ..... ٦۱
فصل ۷ : مکان‌یابی خازن‌های شانت ..... ٦٤

۷-۱- معرفی ..... ٦٤
۷-۲- ملاحظات انتخاب محل خازن ..... ٦٥
۷-۳- نکات مهم در مورد بانک‌های خازنی در پست‌های برق ..... ۷۱
۷-٤- انواع اتصالات بانک خازنی ..... ۷٤
۷-٥- کابل‌های مخصوص خازن قدرت ..... ۷۸
فصل ۸ : بهبود ضریب توان ..... ۸۱
۸-۱- معرفی ..... ۸۱
۸-۲- خازن ثابت و خازن سوییچ‌شونده ..... ۸۲
۸-۳- کاربرد خازن‌های ثابت و خازن‌های سوییچ‌شونده ..... ۸۹
فصل ۹ : اثرات مثبت خازن بر شبکه ..... ۹۱
۹-۱- معرفی ..... ۹۱
۹-۲- تأمین توان راکتیو ..... ۹۱
۹-۳- بهبود پروفایل ولتاژ ..... ۹۲
۹-٤- کاهش تلفات ترانس و خط ..... ۹٥
۹-٥- آزادشدن ظرفیت سیستم ..... ۹۷
۹-٦- مؤخره ..... ۹۸
فصل ۱۰ : خازن‌های سری ..... ۹۹
۱۰-۱- معرفی ..... ۹۹
۱۰-۲- خازن‌های سری در فیدرهای شعاعی ..... ۱۰۰
۱۰-۳- خازن‌های سری برای خطوط انتقال ..... ۱۰۲
۱۰-٤- محدودیت‌های کاربری خازن سری ..... ۱۰۳
۱۰-٥- کاربردهای دیگر خازن‌های سری ..... ۱۰۷
۱۰-٦- مؤخره ..... ۱۱۰
فصل ۱۱ : خازن‌های ضربه ..... ۱۱۱
۱۱-۱- معرفی ..... ۱۱۱
۱۱-۲- استقامت عایقی ..... ۱۱۱
۱۱-۳- منشأ ضربه های سریع ..... ۱۱٤
۱۱-٤- سیستم حفاظت ..... ۱۱٤
۱۱-٥- خازن‌های مخصوص مدارشکن‌ها ..... ۱۱۸

۱۱-٦- مؤخره ..... ۱۲۰
فصل ۱۲ : خازن‌های موتوری ..... ۱۲۱
۱۲-۱- معرفی ..... ۱۲۱
۱۲-۲- نیاز به توان راکتیو ..... ۱۲۲
۱۲-۳- اثرات دیگر خازن‌ها ..... ۱۲۳
۱۲-٤- انتخاب خازن مناسب ..... ۱۲٤
۱۲-٥- راه‌اندازی موتور و مشکلات مربوط ..... ۱۲۸
فصل ۱۳ : کاربردهای دیگر خازن ..... ۱۳٥
۱۳-۱- معرفی ..... ۱۳٥
۱۳-۲- کورهٔ قوس الکتریکی ..... ۱۳٥
۱۳-۳- جوش مقاومتی نقطه‌ای ..... ۱۳۷
۱۳-٤- خازن‌های روشنایی ..... ۱۳۹
۱۳-٥- خازن‌های تک‌فاز موتوری ..... ۱٤۱
۱۳-٦- کاربرد در ترانس‌های فرورزونانس ..... ۱٤۲
۱۳-۷- خازن‌های منبع تغذیهٔ پالسی ..... ۱٤۳
۱۳-۸- خازن‌های فوق فشار قوی ..... ۱٤۸
۱۳-۹- خازن‌های مخصوص ذخیرهٔ انرژی ..... ۱٥۱
فصل ۱٤ : جبران‌سازهای استاتیک ..... ۱٥۲
۱٤-۱- معرفی ..... ۱٥۲
۱٤-۲- اصول جبران‌سازی ..... ۱٥۲
۱٤-۳- اثرات جبران‌سازی ..... ۱٥۳
۱٤-٤- مشخصات یک SVC ..... ۱٥٥
۱٤-٥- تلفات و هارمونیک‌ها در SVC ..... ۱٦۰
۱٤-٦- اثرات SVC بر سیستم‌های قدرت بزرگ ..... ۱٦۳
۱٤-۷- مؤخره ..... ۱٦٤
فصل ۱٥ : حفاظت از بانک‌های خازنی ..... ۱٦٥
۱٥-۱- معرفی ..... ۱٦٥
۱٥-۲- حفاظت اضافه‌جریان ..... ۱٦٦
۱٥-۳- حفاظت در برابر خرابی در تابلو ..... ۱٦٦

۱۵-٤- حفاظت عدم تعادل ..... ۱٦۷
۱۵-۵- مؤخره ..... ۱۷٦
فصل ۱٦ : حفاظت اضافه‌جریان ..... ۱۷۷
۱٦-۱- معرفی ..... ۱۷۷
۱٦-۲- روش‌های نصب فیوز ..... ۱۷۷
۱٦-۳- فیوزهای مخصوص خازن ..... ۱۷۸
۱٦-٤- انتخاب فیوز لینک مناسب ..... ۱۸۱
۱٦-۵- تأثیر فیوزهای باز ..... ۱۸۸
۱٦-٦- مؤخره ..... ۱۹۰
فصل ۱۷ : مدارشکن‌ها ..... ۱۹۱
۱۷-۱- معرفی ..... ۱۹۱
۱۷-۲- انواع مدارشکن‌ها ..... ۱۹۱
۱۷-۳- پارامترهای مختلف مدارشکن ..... ۱۹۵
۱۷-٤- عملکرد مدارشکن‌ها ..... ۱۹۹
۱۷-۵- مدارشکن‌های مخصوص خازن ..... ۲۰۱
۱۷-٦- مؤخره ..... ۲۰۷
فصل ۱۸ : حفاظت ضربه ..... ۲۰۸
۱۸-۱- معرفی ..... ۲۰۸
۱۸-۲- ضربههای ناشی از صاعقه ..... ۲۰۸
۱۸-۳- انواع ضربه های صاعقه ..... ۲۰۹
۱۸-٤- برق‌گیرها ..... ۲۱۱
۱۸-۵- مشخصهٔ برق‌گیرها ..... ۲۱۵
۱۸-٦- مشخصهٔ اضافه‌ولتاژهای گذرا ..... ۲۲۰
۱۸-۷- هماهنگی در حفاظت ..... ۲۲۲
۱۸-۸- مؤخره ..... ۲۲۷
فصل ۱۹ : نگهداری و عیب‌یابی ..... ۲۲۹
۱۹-۱- معرفی ..... ۲۲۹
۱۹-۲- نگهداری ..... ۲۲۹
۱۹-۳- عیب‌یابی ..... ۲۳۳

فصل ۲۰ : فیلتر کردن هارمونیک‌ها ..... ۲٤۲
۲۰–۱– معرفی ..... ۲٤۲
۲۰–۲– منابع هارمونیک ..... ۲٤۳
۲۰–۳– پاسخ سیستم به هارمونیک‌ها ..... ۲٤٦
۲۰–٤– مقادیر مجاز ..... ۲٤۷
۲۰–۵– فیلترهای هارمونیکی ..... ۲٤۹
۲۰–٦– تغییر در پاسخ سیستم ..... ۲۵۱
۲۰–۷– طراحی فیلتر ..... ۲۵٤
۲۰–۸– خلاصه و مؤخره ..... ۲۵٦
فصل ۲۱ : حالت‌های گذرا در ترانس بانک خازنی ..... ۲۵۷
۲۱–۱– معرفی ..... ۲۵۷
۲۱–۲– برق‌دار کردن بانک به همراه ترانس ..... ۲۵۷
۲۱–۳– کلیدزنی بانک و گذراهای ترانس ..... ۲۵۹
۲۱–٤– کاهش گذراهای ولتاژ ..... ۲٦۲
۲۱–۵– مؤخره ..... ۲٦۵
فصل ۲۲ : کلیدزنی خازن‌ها ..... ۲٦٦
۲۲–۱– معرفی ..... ۲٦٦
۲۲–۲– انواع کلیدزنی ..... ۲٦٦
۲۲–۳– حدود مجاز ولتاژ ..... ۲۷۸
۲۲–٤– هماهنگی عایقی ..... ۲۷۹
۲۲–۵– مؤخره ..... ۲۸۰
فصل ۲۳ : ولتاژهای القایی در کابل‌های کنترل ..... ۲۸۱
۲۳–۱– معرفی ..... ۲۸۱
۲۳–۲– منابع القاء ولتاژ ..... ۲۸۱
۲۳–۳– حدود مجاز ولتاژهای القایی ..... ۲۸٤
۲۳–٤– سیستم مورد مثال ..... ۲۸٤
۲۳–۵– محاسبهٔ ولتاژهای القایی ..... ۲۸٦
۲۳–٦– اثر صاعقه بر کابل‌های کنترل ..... ۲۸۸
۲۳–۷– مؤخره ..... ۲۹۰

فصل ۲٤ : تحلیل اقتصادی ..... ۲۹۱
۲٤-۱- معرفی ..... ۲۹۱
۲٤-۲- اساس اقتصاد مهندسی ..... ۲۹۱
۲٤-۳- تقسیم‌بندی هزینه ..... ۲۹۳
۲٤-٤- اثر اصلاح ضریب توان بر مالیات بر درآمد ..... ۲۹٦
۲٤-٥- تحلیل‌های اقتصادی ..... ۳۰۰
۲٤-٦- مؤخره ..... ۳۰٤
فصل ۲٥ : ضمائم ..... ۳۰٥
۲٥-۱- اصول اولیهٔ مدارهای خازنی ..... ۳۰٥
۲٥-۲- تعاریف ..... ۳۰۸
۲٥-۳- اطلاعات مدارشکن‌ها ..... ۳۱۲
۲٥-٤- مشخصهٔ برق‌گیرها ..... ۳۱۷
۲٥-٥- مشخصهٔ فیوزها ..... ۳۲۰

# فصل ۱ : معرفی

## ۱-۱- تاریخچهٔ خازن

اولین بار ویلیام گیلبرت[1] در قرن هفدهم از کلمهٔ الکتریسیته برای نامیدن نیروی ناشی از سایش برخی اجسام استفاده کرد. او همچنین تفاوت الکتریسیته و مغناطیس را درک نمود. در سال ۱۷۲۹، استفان گِری[2] هادی الکتریکی را شناسایی کرد. چارلز دوفِی[3] در سال ۱۷۳۳ برای اولین بار ایدهٔ میدان الکتریکی دافع را تشریح کرد.

در سال ۱۷٤٥، دانشمند دیگری[4] در زمینهٔ ریاضی و فیزیک در دانشگاه لِیدِن در هلند، نگهدارندهٔ بار الکتریکی را اختراع کرد. او آزمایش خود را با یک پارچ شیشه‌ای انجام داد که بعدها «پارچ لِیدِن» نام گرفت (تصویر ۱-۱). برخی معتقدند که مخترع خازن، یک آلمانی[5] بوده است. اولین خازن، پارچی شیشه‌ای بود که نصف آن با آب پر می‌شد و دَرِ آن با یک چوب‌پنبه مسدود می‌گشت. از بین چوب‌پنبه سیمی فلزی به درون پارچ می‌رفت. سیم فلزی با منبع تولید الکتریسیتهٔ ساکن تماس پیدا می‌کرد و پارچ باردار می‌شد. قرار گرفتن هر هادی‌ای در نزدیکی سیم یا تماس با آن باعث تخلیه شدن خازن می‌شد.

**تصویر ۱-۱: پارچ لِیدِن، اولین خازن**

بنجامین فرانکلین[6]، دولتمرد آمریکایی، به آزمایش با پارچ لِیدِن پرداخت و نشان داد که بار الکتریکی را می‌توان از صاعقه نیز به دست آورد. در سال ۱۷۵۲، فرانکلین تئوری سیال الکتریکی را ارائه داد تا ثابت کند صاعقه پدیده‌ای الکتریکی است. فرانکلین برای اولین بار از علامت‌های مثبت و منفی برای نیروهای الکتریکی جاذب و دافع استفاده کرد. اکتشافات او با پارچ لِیدِن ثابت کرد که از یک قطعهٔ صاف شیشه‌ای هم می‌توان برای تولید خازن

[1] William Gilbert
[2] Stephan Gray
[3] Charles Dufay
[4] Pieter van Musschenbroek
[5] Ewald Georg von Kleist
[6] Benjamin Franklin

استفاده کرد. به این خازن‌ها، خازن‌های مسطح یا «مربع‌های فرانکلین» گفته می‌شد. آزمایش‌های بعدی او منجر به اختراع روشی برای اندازه‌گیری ظرفیت خازن شد. خازن‌های صفحه‌ای که او به کار می‌برد، حدود ۱۳۰ سانتیمتر قطر داشتند و دو عدد لاستیک با آن تماس داشت. هادی‌های اصلی دو استوانهٔ برنجی بود که به استوانهٔ سومی وصل می‌شد و طول آنها به ٤ متر می‌رسید. سطح تماس خازن حدود ۱ متر مربع بود. در شرایط بهینه، هر دور گردش صفحه ۱۰ تا ۱۲ جرقه به طول ۲/۵ سانتیمتر ایجاد می‌کرد. به راحتی می‌توان جرقه‌هایی به طول ۲۵ تا ۳۵ سانتیمتر به وجود آورد.

اولین بار، فاراده[1] متوجه شد که حرکت آهنربا در یک سیم‌پیچ باعث تولید جریان می‌شود. این کشف منجر به تولید ماشین‌های دوار مانند دینام، ژنراتور، و موتور شد. واحد ظرفیت خازن، به یاد او فاراد انتخاب شد. برخی از اختراعاتی که منجر به تولید خازن شد در جدول ۱-۱ آورده شده است. چند صده طول کشید تا خازن اختراع شود.

ساختمان ساده یک خازن از دو صفحه فلزی که با لایه‌ای عایق ( دی‌الکتریک) از هم جدا شده‌اند تشکیل می‌شود.

**جدول ۱-۱: وقایع تاریخی منجر به اختراع خازن**

| | |
|---|---|
| قرن هفدهم | ویلیام گیلبرت آزمایش‌هایی در مورد الکتریسیته و مغناطیس انجام داد |
| سال ۱۷۲۹ | استفان گِری هادی الکتریکی را کشف کرد |
| سال ۱۷٤٥ | اختراع خازن (پارچ لِیدِن) |
| سال ۱۷۵۲ | اثبات الکتریکی بودن صاعقه، اختراع خازن مسطح توسط بنجامین فرانکلین |
| سال ۱۷۸۵ | اثبات دفع بارهای هم‌نام توسط چالز کولن[2] |
| سال ۱۸۲۰ | اورستِد[3] و آمپر[4] با میدان الکتریکی میدان مغناطیسی ایجاد کردند |
| سال ۱۸۳۱ | اختراع اصول القاء توسط فاراده |
| سال ۱۹۱۵ | اختراع فیلترهای نردبانی LC |
| سال ۱۹۳۸ | اختراع پلی‌پروپیلن و استفادهٔ آتی آن در خازن‌ها |
| سال ۱۹۷۰ | طراحی خازن‌های فیلمی |
| دههٔ ۸۰ | تحریم استفادهٔ PCB[5] در خازن‌ها<br>تولید مدارشکن[6]های خلأ و SF6 و استفادهٔ آنها برای قطع و وصل خازن |

### ۱-۱-۱- خازن‌های دیگر

خازن‌ها، کُندانسور[1] هم نامیده می‌شوند و کاربرد گسترده‌ای در صنعت به منظور تصحیح ضریب توان الکتریکی دارند. در صنایع الکترونیک، خازن‌ها اغلب در مدارهای الکترونیکی با کاربری کنترلی وکوپلینگ استفاده می‌شوند.

[1] Michael Faraday
[2] Charles Coulomb
[3] Hans C. Oersted
[4] André M. Ampère
[5] Polychlorinated Biphenyls
[6] circuit breaker

این خازن‌ها در اشکال و اندازه‌های مختلف تولید می‌شوند. مواد مورد استفاده در آنها می‌تواند آلومینیوم، پلی‌پروپیلن، پلی‌استر، پلی‌کربنات، میکا، رزین‌های اپوکسی، تفلون، و تانتالوم باشد. ظرفیت خازن‌ها از چند دهم پیکوفاراد (یک بیلیون‌ام فاراد) تا چند میلی‌فاراد (یک‌هزارم فاراد) متغیر است. مدارهای الکترونیکی معمولاً با ولتاژهای مستقیم (DC) از ۵ تا ۱۰ ولت کار می‌کنند. قطعات چنین مدارهایی به راحتی بر روی بوردها لحیم می‌شوند. خازن‌های الکترولیتی در برخی مدارهای DC و راه‌اندازی موتورها کاربرد دارند.

### ۱-۱-۲- خازن‌های قدرت

در خازن‌های اولیه از کاغذ کرافت به عنوان دی‌الکتریک و از آسکارل به عنوان مایع نفوذی استفاده می‌شد. این خازن‌ها که تا ۱۰۰ کیلووار[2] هم تولید می‌شدند، به خازن کاغذی معروف بودند. با تولید فیلم‌های پلاستیکی عایق از جنس پلی‌پروپیلن، طراحی خازن تحول یافت و با ترکیب کاغذ کرافت و پلاستیک فوق، تولید خازن‌های بزرگ‌تر میسر شد. امروزه، به دلیل تجزیه نشدن PCBها[3] در محیط زیست، استفاده از آن در تولید خازن ممنوع گردیده است. خازن‌های تمام‌فیلم، اتلاف کمتری دارند و به ندرت دچار ترکیدگی می‌شوند و ایمن‌تر هستند. در ضمن در دمای پایین‌تری کار می‌کنند. در تصویر ۱-۲ و تصویر ۱-۳ می‌توان یک دید کلی نسبت به نقش دی‌الکتریک در خازن‌های کاغذی و تمام‌فیلم به دست آورد. در ضمن اتلاف توان بر حسب کیلووار برای خازن‌های مختلف در جدول ۱-۲ آمده است.

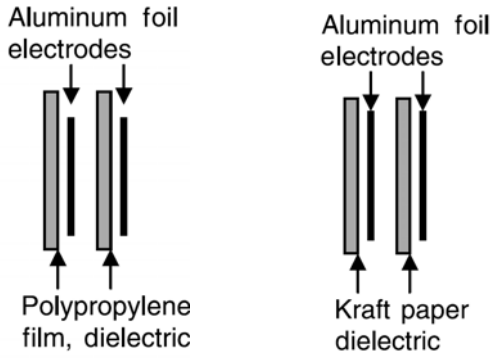
**جدول ۱-۲: میزان تلفات خازن‌های مختلف**

| نوع خازن | میزان اتلاف توان (وات در هر کیلووار) |
|---|---|
| کاغذ آغشته به روغن | 2-2.5 |
| کاغذ آغشته به PCB | 3-3.5 |
| کاغذ/پلاستیک آغشته به PCB | 0.5-1 |
| پلاستیک آغشته به روغن | 0.5-1 |
| فیلم با بخار فلز | <0.5 |
| فیلم پلاستیکی | <0.2 |

[1] condenser

[2] KVAR واحد اندازه‌گیری توان راکتیو

[3] Polychlorinated biphenyls



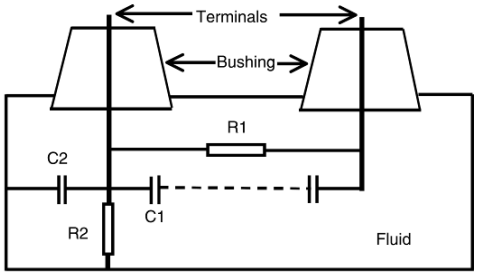

تصویر ۱-۳: خازن تمام‌فیلم

تصویر ۱-۲: خازن کاغذی

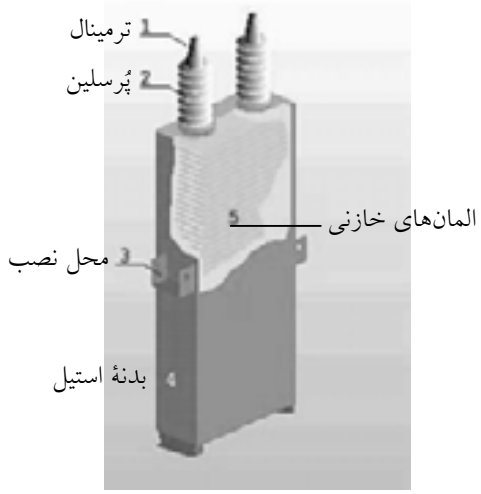
## ۱-۲- خازن‌های صنعتی

اصلی‌ترین وظیفهٔ خازن‌های شانت در شبکهٔ قدرت، تصحیح ضریب توان است. از مزیت‌های تصحیح ضریب توان می‌توان به کاهش اتلاف خطوط و ترانسفورمرها، بهبود پروفایل ولتاژ، کاهش ماکزیمم دیماند، و تصحیح کیفیت توان اشاره کرد. خازن‌ها در سیستم توزیع بر روی تیر برق، بانک‌های درون پست، و در بخش فشار قوی و توان‌های بالا نصب می‌شوند. در سیستم‌های صنعتی خازن‌های اصلاح ضریب توان، برای بارهای گروهی یا تکی مورد استفاده هستند.

خازن‌ها درون یک تابلو قرار می‌گیرند و اغلب نیازی به نگهداری ندارند. قطعات اصلی یک خازن در تصویر ۱-٤ نشان داده شده است. برش یک خازن فشار قوی با دو ترمینال در تصویر ۱-۵ آورده شده است. المان‌های خازنی مطابق با استانداردهای صنعتی طراحی و آزمایش می‌شوند. مشخصهٔ خازن‌ها شامل کیلووار، ولتاژ و فرکانس نامی، دمای محیط از ٤٠- تا ٤٦+ درجهٔ سانتیگراد است. خازن‌های تک‌فاز در سایزهای ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، و ٤۰۰ کیلوار موجود هستند. ولتاژ آنها از ۲/٤ تا ۲۳ کیلوولت متغیر است. در بخش‌های بعدی اجزاء مختلف خازن را بررسی می‌کنیم.




تصویر ۱-٤: اجزاء اصلی خازن




**تصویر ۱-۵: نمای یک خازن واقعی و اجزاء آن**

### ۱-۲-۱- الکترودها

الکترودها اغلب صفحات نازکی به ضخامت ٦ میکرون و از جنس آلومینیوم ساخته شده هستند. الکترودها با صفحات دی‌الکتریک از هم جدا شده‌اند و به دور یک محور پیچیده شده‌اند. ترمینال‌ها با لحیم یا جوش به الکترود متصل می‌شوند. در خازن‌های تک‌فاز معمولاً دو الکترود به کار می‌روند.

### ۱-۲-۲- دی‌الکتریک

دی‌الکتریک یا مادهٔ عایق در خازن‌ها برای جدا کردن الکترودها به کار می‌رود. دی‌الکتریک‌های رایج در تولید خازن در جدول ۲-۱ (فصل ۲) آمده است. این مواد استقامت دی‌الکتریکی بالا، ثابت دی‌الکتریک بزرگ، و تلفات اندکی دارند. در ابتدا در تولید خازن از کاغذ کرافت استفاده می‌شد، ولی امروزه از فیلم‌های پلی‌پروپیلن استفاده می‌شود. کاغذ مورد استفاده چگالی کم (حدود ۰/۸ گرم بر سانتیمتر مکعب) دارد. ثابت دی‌الکتریکی وابسته به نوع روغن مورد استفاده در کاغذ دارد. فیلم‌های پلی‌پروپیلن در دههٔ ۳۰ اختراع شدند و در دههٔ ٦۰ در صنعت خازن به کار گرفته شدند. این ماده تلفات بسیار کم و ثابت دی‌الکتریک بزرگی دارد که در فرکانس ۵۰ هرتز تا ۱ مگاهرتز حدود ۲/۲۵ است. ضخامت فیلم بسیار اندک (در حدود ۱۰ میکرون)، و در نتیجه خازن تولیدی بسیار کم‌حجم خواهد بود. برخی از خصوصیت فیلم‌های رایج در تولید خازن در جدول ۱-۳ آمده است.

**جدول ۱-۳: خصوصیات فیلم‌های مورد استفاده در خازن**

| نوع فیلم | ثابت دی‌الکتریک | تلفات $(W/kVAR)$ | استقامت دی‌الکتریکی $(MW/m)$ |
|---|---|---|---|
| پلی‌پروپیلن | 2.25 | 0.0005 | >32 |
| پلی‌کربنات | 2.7 – 3.1 | 0.0005 | 120 |
| پلی‌اتیلن ترفتالات[1] | 3 – 3.2 | 0.03 | 100-160 |

[1] Polyethylene Terephthalate

### ۱-۲-۳- بدنه

مجموعهٔ الکترودهای آلومینیومی و دی‌الکتریک در یک محفظهٔ فلزی قرار داده می‌شود و بین این دو با عایق پر می‌گردد. از ماده‌ای دی‌الکتریک برای پر کردن محفظه استفاده می‌شود. سپس بدنه آب‌بندی شده و الکترودها به بوشینگ‌ها[1] متصل می‌شوند. در خازن‌های فشار قوی، بدنه را می‌توان از جنس فولاد ضد زنگ ساخت (تصویر ۱-۵).

### ۱-۲-٤- بوشینگ‌ها

در خازن‌های فشار ضعیف، ترمینال‌های عادی استفاده می‌شود. در ولتاژهای بالاتر، ترمینال در درون بوشینگ‌های پرسلین قرار داده می‌شود. بوشینگ‌ها زبانه‌های فلزی دارند. برای پر کردن منافذ موجود در کویل از مایع عایقی استفاده می‌شود که اهمیت بسزایی دارد، زیرا هر منفذی می‌تواند باعث تخلیهٔ الکتریکی بین الکترودها و درون دی‌الکتریک گردد و خازن را خراب کند. در طراحی‌های قبل از ۱۹۷۵، از PCB به عنوان نافذ اصلی استفاده می‌شد. بعدها ثابت شد که این ماده تجزیه‌پذیر نیست و هم برای محیط زیست و هم سلامت افراد خطرناک است. سپس سازندگان خازن مجبور شدند برای این ماده جایگزینی پیدا کنند. برخی از خصوصیات این مواد در جدول ۱-٤ آمده است. خازن‌هایی با تکنولوژی فیلم و فلز نشانی بر روی

عایق و بدون PCB تولید شدند. سپس فیلم‌های فلزی و کاملاً خشک در اواخر دههٔ ۷۰ ظاهر شدند. ولی PCB ماده‌ای ضد آتش با خصوصیات برتری است که هیچ یک از مواد جایگزین آن خصوصیات را یکجا ندارند.

### ۱-۲-۵- مقاومت تخلیه

بخشی از خازن، مقاومت تخلیه‌ای است که بین الکترودها قرار می‌گیرد تا خازن را در هنگام قطع شدن از منبع، دشارژ کند.

**جدول ۱-٤: مایعات مورد استفاده در خازن**

| ماده | ثابت دی‌الکتریک | استقامت دی‌الکتریکی ($MW/m$) | نقطهٔ ریزش[2] (ºC) | نقطهٔ اشتعال[3] (ºC) | نقطهٔ آتش‌گیری[4] (ºC) |
|---|---|---|---|---|---|
| Dioctyl phthalate | 5.26 | 10.6 | -45 | 225 | 251 |
| Diisononyl phthalate | 4.68 | 11.8 | -48 | 221 | 257 |
| Isopropyl biphenyl | 2.83 | 56 | -55 | 155 | 175 |
| Benzyl neocaprate | 3.8 | 76 | -60 | 155 | 165 |
| PCB | 6 | 74 | -23 | – | – |

[1] Bushing ترمینال فشار قوی

[2] pour point

[3] flash point

[4] fire point

### ۱-۳- فصل‌های کتاب

در این کتاب، اصول خازن‌ها و جزییات مربوط به کاربرد خازن‌های شانت (موازی با شبکه) و سری به صورت قدم به قدم بیان خواهند شد. فواید خازن‌ها در سیستم قدرت به صورت کیفی و کمّی توضیح داده می‌شود. مسائل پیچیدهٔ خازن‌ها در فشار ضعیف و فشار قوی ( ولتاژهای بالاتر از ۱۰۰۰ ولت) نیز بیان می‌شود.

در فصل ۲، اصول ساختاری خازن، خازن‌های مسطح، خازن‌های کُروی، و خازن‌های کامپوزیت، و خازن‌های استوانه‌ای معرفی می‌شوند. انرژی ذخیره شده در خازن‌ها، شارژ و دشارژ کردن خازن‌ها، محدودیت زمانی و اصول مربوط به آن بیان می‌شوند.

مفاهیم جریان حقیقی، موهومی، و جریان کل در فصل ۳ آورده شده است. مفهوم کلی ضریب توان، تصحیح ضریب توان با مثال‌های عددی توضیح داده می‌شوند.

در فصل ٤، مؤسسات مسؤول تهیه و ویرایش استانداردهای صنعتی مربوط به خازن معرفی می‌شوند. استانداردهایی برای طراحی، تولید، و مصرف تجهیزات خازنی گفته می‌شوند. این استانداردها، راهنماهایی برای مشخصات خازن، حفاظت، و روش‌های رایج و کاربردهای مختلف، اتصال به زمین، تشخیص عدم تعادل در بانک، روش انتخاب مدارشکن‌ها برای کلیدزنی خازن، برق‌گیر برای حفاظت از صاعقه و کلیدزنی، فیوز برای حفاظت از اضافه‌جریان، و دیگر موارد گفته خواهد شد.

المان‌های خازنی برای سیستم‌های تصحیح ضریب توان تولید، آزمایش، و مصرف می‌شوند. دقت در پارامترها برای عملکرد ایمن و بهینه بسیار مهم است؛ مانند ولتاژ، فرکانس، کلاس عایقی، مقادیر لحظه‌ای، کیلووار نامی، و شرایط کاری مجاز. این پارامترها در فصل ۵ آمده است.

در فصل ٦، آزمایش‌های مختلف خازنی گفته می‌شود. این‌ها شامل آزمایش‌های طراحی، آزمایش‌های روتین، و آزمایش‌های در محل است. آزمایش‌های روتین توسط سازنده و بر روی همهٔ خازن‌های تولیدی انجام می‌شود. آزمایش‌های در محل بعد از نصب در محل مورد نظر انجام می‌گیرند. این آزمایش‌ها اغلب بر اساس استانداردهای صنعتی صورت می‌پذیرند.

بانک‌های خازنی شانت را می‌توان در سیستم‌های توزیع، نزدیک بار، فیدرها، سیستم‌های فشار قوی، و فوق فشار قوی نصب کرد. به علاوه، بانک‌های خازنی را می‌توان برای بارهای تکی، روی شاخه‌های توزیع، و یا بارهای گروهی به کار برد. در ضمن، بانک‌ها می‌توانند ثابت یا سوییچ‌شونده باشند. روش‌های مختلفی برای قطع و وصل کردن بانک‌ها وجود دارد. بانک‌های شانت معمولاً در توزیع و سیستم‌های فشار قوی استفاده می‌شوند که نیاز مبرمی به توان راکتیو وجود دارد. در این موارد، مقدار حداکثر و حداقل مجاز ولتاژ تعیین می‌شود. باید در نظر داشت که با خرابی یک خازن، ولتاژ خازن‌های سالم هم افزایش می‌یابد و باید آن را در محدودهٔ مجاز نگه داشت. این موارد در فصل ۷ بحث خواهد شد.

در فصل ۸، اصول اولیهٔ بهبود ضریب توان گفته می‌شود. ضریب توان متوسط برای برخی بارها ارائه می‌شود. با استفاده از نمودارهای ماکزیمم دیماند برای توان راکتیو، نحوهٔ انتخاب بانک خازنی ثابت و سوییچ‌شونده بیان می‌شود. جدولی نیز بر اساس توان مصرفی موجود (بر حسب کیلووات)، و ضریب توان مطلوب آورده شده است. با استفاده از ثابت جدول، ظرفیت خازن مورد نیاز محاسبه می‌شود. برای مثال صرفه‌جویی به دست آمده از بانک خازنی هم محاسبه می‌شود.

در فصل ۹ مزایای نصب بانک خازنی از دید سیستم گفته می‌شود. بهبود پروفایل ولتاژ، افزایش ولتاژ به دلیل وجود خازن در خطوط کم‌بار، و محاسبات مربوط بررسی می‌شود. کاهش بارگذاری ترانسفورمر و ژنراتور بعد از نصب خازن نیز با مثال‌های عددی بیان می‌گردد. در پایان، هزینهٔ صرفه‌جویی شده به دلیل خازن‌ها محاسبه می‌شود.

خازن‌های سری در خطوط طولانی و خطوط توزیع به منظور جبران خط و افزایش توان انتقالی استفاده می‌شوند. حفاظت از این خازن‌ها، نکتهٔ مهمی است. روش‌های مختلف حفاظتی نشان داده می‌شوند. محدودیت‌ها و مشکلات ناشی از ترکیب موتورهای القایی و خازن‌های سری توضیح داده می‌شوند. مثال‌های عملی خازن‌های سری در سیستم‌های توزیع و خطوط انتقال در فصل ۱۰ آورده می‌شود.

در فصل ۱۱، خازن‌های ضربه[1] برای ماشین‌های گردان آمده است. ماکزیمم ولتاژ مجاز برای عایق به صورت منحنی بیان شده است. حفاظت ضربه برای ماشین‌های گردان شامل یک برق‌گیر و خازن ضربه است که در ترمینال ماشین نصب می‌شوند. برق‌گیر مقدار اضافه‌ولتاژ را کنترل می‌کند و خازن ضربه نرخ افزایش ولتاژ ($dv/dt$) را کنترل می‌نماید. مثال‌های عددی برای محاسبهٔ حفاظت ضربه موتور و ژنراتور بیان شده است.

در فصل ۱۲، اصول مهم استفاده از خازن در ترمینال‌های موتور شرح داده شده است. نیاز به توان راکتیو برای انواع موتورهای القایی بیان شده است. به منظور جبران توان راکتیو، خازن‌های شانت در ترمینال‌های موتور استفاده می‌شوند. مشکلات فنی به دلیل خود تحریکی و گشتاورهای مقطعی نیز با هدف حل مشکل بیان شده‌اند. راه‌اندازی موتور با استفاده از خازن‌های شانت بحث شده است. محل استقرار خازن‌های شانت بر اساس شرایط سیستم انتخاب می‌شود. حالت‌های گذرای موتور در هنگام راه‌اندازی با مثال‌های عملی برای حالت با خازن و بدون خازن گفته شده است. اثر خازن‌های شانت بر شکل موج ولتاژ و جریان بر اساس یافته‌های آزمایشگاهی بیان شده است. همچنین در فصل ۱۲، خازن راه‌انداز موتور و خازن ضربه برای موتورهای بزرگ گفته شده است.

کاربردهای بسیاری در صنعت برای خازن نظیر اصلاح ضریب توان یا ذخیرهٔ انرژی وجود دارد؛ مانند کوره‌های قوس، جوش‌های مقاومتی، راه‌اندازهای تک‌فاز، خازن‌های موتوری، و روشنایی. در روشنایی، خازن برای جبران‌سازی لامپ‌های فلورسنت، بخار جیوه، بخار سدیم، و دیگر موارد مشابه به کار می‌رود. خصوصیات این خازن‌ها در فصل ۱۳ بحث می‌شود.

[1] Surge

در فصل ١٤، اصول اولیهٔ جبران‌سازهای استاتیک[1] (SVC) بیان می‌شود. توضیح مختصری از آنها به همراه انواع آنها داده شده است. اثرات وجود این تجهیزات در سیستم‌های توان بالا بر روی میرایی[2]، انتقال توان، تأمین توان راکتیو، و بهبود ولتاژ بحث می‌شود.

برای حفاظت عمومی خازن‌های شانت باید برای خطا در باس، ضربه ولتاژی در سیستم، جریان‌های هجومی، جریان دشارژ بانک‌های موازی، اضافه‌جریان، و خرابی در تابلو تدابیری اندیشید. در فصل ١٥، بررسی کلی از حفاظت عدم تعادل[3] برای بانک‌های زمین‌شده و زمین‌نشده بیان می‌شود.

در فصل ١٦، حفاظت اضافه‌جریان بانک‌های خازنی با استفاده از فیوز بحث می‌شود. فیوزهای انفجاری نوع K و T بسته به جریان حالت ماندگار انتخاب می‌شوند. فیوزهای نوع T از نوع آهسته‌سوز و فیوزهای نوع K از نوع تُندسوز هستند. در صورتی که جریان خطا بسیار بزرگ باشد، از فیوزهای محدودکنندهٔ جریان استفاده می‌شود. دیگر ملاحظات انتخاب فیوز، مانند اضافه‌جریان‌های گذرا، جریان‌های خطا، و جریان‌های کلیدزنی هم در این فصل بحث می‌شوند.

تجهیزات کلیدزنی برای بانک‌های خازنی به دلیل نوسان‌های فرکانس‌بالا نیازمند توجه خاص هستند و انواع مختلف مدارشکن بحث خواهد شد. خصوصیات لازم برای کلیدزنی خازن‌ها و عملکرد آنها در فصل ١٧ بیان می‌شود.

در فصل ١٨، مشکلات حفاظت ضربه از بانک‌های خازنی بحث می‌شود. انواع صاعقه‌های منجر به اضافه‌ولتاژ در شبکه بیان می‌شوند؛ مانند ضربهٔ مستقیم، ضربهٔ برگشتی، و ضربهٔ چندتایی. خصوصیات واریستورهای اکسید فلز در برق‌گیرها گفته می‌شود. انواع برق‌گیرها، اعم از توزیع، انتقال، و پست که در سطوح مختلف ولتاژ به کار می‌روند، بیان می‌شود. منشأ اضافه‌ولتاژها مانند کلیدزنی برای وصل، قطع، رفع خطا، رفع خطا با رلهٔ پشتیبان، وصل مجدد، اتصال مجدد[4] (نا خواسته)، بریدگی جریان، اضافه‌ولتاژهای ماندگار، فرورزونانس، و خطاهای زمین گفته می‌شود. همچنین نحوهٔ انتخاب برق‌گیر مناسب برای بانک خازنی عنوان می‌شود.

در فصل ١٩، مشکلات نگهداری بانک‌های خازنی بیان می‌شود. علل احتمالی خرابی بانک خازن گفته می‌شود. عموماً تشخیص علت خرابی بانک خازنی از روی آثار باقیمانده غیرممکن است. روش‌های مختلف شناسایی علت خرابی به همراه راه‌حل احتمالی بیان شده است. همچنین ادوات اندازه‌گیری مورد نیاز در بانک خازنی شرح داده می‌شوند.

در فصل ٢٠، جریان‌های هارمونیکی ناشی از مبدل‌های DC، AC، پهنای باند، سیکلو کانورتر[5]، استاتیک، و منبع تغذیه‌های سوییچینگ بحث می‌شوند. استانداردهای صنعتی مورد استفاده در طراحی فیلترهای هارمونیکی، حدود

[1] Static VAR Compensator
[2] damping
[3] unbalance protection
[4] restrike
[5] cycloconverter

مجاز اعوجاج ولتاژ و جریان بحث می‌شوند. فیلترهای هارمونیکی رایج و استفادهٔ همزمان از چند فیلتر بیان می‌شود. مثالی از طراحی فیلتر هارمونیک هم گفته می‌شود.

در کاربردهای خاص، ترانسفورمر و خازن شانت همراه هم کلید زده می‌شوند، مانند کورهٔ قوس که در آن خازن شانت و ترانس کوره با هم قطع و وصل می‌شوند. گاهی این ترکیب باعث تولید پدیدهٔ رزونانس[1] (تشدید) می‌شود. در سیستم‌های فشار قوی و فوق فشار قوی، خازن‌های شانت در پست‌ها نصب می‌شوند و انتهای خطوط ترانس‌های کاهنده قرار دارد. وصل شدن خازن‌های شانت باعث ایجاد حالت‌های گذرای شدید در محل ترانس می‌شود. دو مشکل اصلی و راه حل آنها در فصل ۲۱ بحث می‌شوند.

اتصال خازن‌ها باعث ایجاد اضافه‌ولتاژ می‌شود. مشکلات مربوط در فصل ۲۲ بحث می‌شوند. به طور خاص، اثرات وصل، قطع، رفع خطا، رفع خطا با رلهٔ پشتیبان، وصل مجدد، اتصال ناخواسته[2]، مرحلهٔ قبل از وصل، جریان‌های کلیدزنی، تقویت ولتاژ[3]، جریان‌های تخلیهٔ هجومی به دلیل خطاهای داخلی، و اضافه‌ولتاژهای ماندگار گفته می‌شود. هماهنگی عایقی برای حالت‌های گذرای کلیدزنی نشان داده می‌شود.

ولتاژ القایی در کابل‌های کنترلی پست‌ها ممکن است سبب تریپ دادن ناخواستهٔ رله یا مدارشکن شود. در صورت وجود بانک خازنی، گذراهای کلیدزنی بزرگ‌تر می‌شوند و بنابراین باید ولتاژهای القایی در کابل‌های کنترلی کاهش داده شوند. روش‌های محاسبه و حل مشکل در فصل ۲۳ بیان می‌شوند.

بررسی اقتصادی پروژه‌های تصحیح ضریب توان در فصل ٢٤ بیان می‌شود. اصول اولیه مانند ارزش فعلی و ارزش آیندهٔ سرمایه بررسی می‌شوند. هزینه‌های اصلی یک پروژهٔ تصحیح ضریب توان به همراه صرفه‌جویی‌های احتمالی در انواع تعرفه‌ها گفته می‌شوند. بررسی اقتصادی بر اساس ارزش فعلی سرمایه، مالیات، استهلاک، و اثرات تورم بررسی می‌گردد. بررسی اقتصادی چنین پروژه‌ای را می‌توان با زمان بازگشت سرمایه، تحلیل سود و زیان، نرخ بازگشت سرمایه، و تحلیل سر به سری انجام داد.

[1] resonance
[2] restrike
[3] voltage magnification

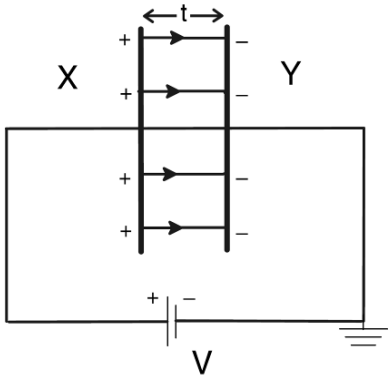
# فصل ۲ : اصول خازن

خازن شامل دو صفحهٔ هادی است که با مادهٔ عایقی به نام دی‌الکتریک از هم جدا شده‌اند. صفحات هادی می‌توانند گرد یا مربع باشند. وظیفهٔ خازن ذخیرهٔ انرژی الکتریکی است. در این فصل، ظرفیت خازن‌های مسطح، کُروی، کرهٔ توخالی، و مسطح با دی‌الکتریک بیان می‌شود.

## ۲-۱- ظرفیت خازن‌های مسطح و کُروی

نمونهٔ یک خازن مسطح در تصویر ۲-۱ نشان داده شده است. یکی از صفحات خازن به قطب مثبت منبع تغذیهٔ DC، و دیگری به قطب منفی وصل شده، زمین می‌گردد. وقتی یک خازن به دو سر یک باتری وصل می‌شود، به طور لحظه‌ای بارها از نقطهٔ X به نقطهٔ Y می‌روند. با جذب الکترون‌ها از X، این نقطه مثبت می‌شود و با تجمع الکترون‌ها در Y، این نقطه منفی شده، اختلاف پتانسیلی بین صفحات ایجاد می‌شود. عبور لحظه‌ای الکترون‌ها باعث ایجاد یک جریان می‌گردد. این جریان وقتی ماکزیمم است که صفحات کاملاً بی‌بار باشند. هنگامی که ولتاژ ناشی از بارهای صفحات برابر با ولتاژ باتری شود، این جریان صفر می‌شود. ظرفیت یک خازن میزان باری است که لازم است اختلاف پتانسیل «۱ ولت» بین صفحات ایجاد کند. اگر $Q$ کولن بار به یکی از صفحات خازن داده شود و اختلاف پتانسیل $V$ بین صفحات برقرار گردد، خواهیم داشت:

$$C = \frac{Q}{V}$$




**تصویر ۲-۱: نمایی از یک خازن مسطح**

بنابراین، ظرفیت خازن مقدار باری است که می‌تواند «۱ ولت» در اختلاف پتانسیل بین صفحات تغییر ایجاد کند. دانشمندی هلندی مفهوم ظرفیت خازن را بیان کرد و مایکل فاراده روش اندازه‌گیری آن را اختراع کرد. واحد ظرفیت خازن کولن بر ولت که به یاد مایکل فاراده، فاراد هم گفته می‌شود.

۱ فاراد ظرفیت خازنی است که برای اختلاف پتانسیل ۱ ولت نیاز به ۱ کولن بار داشته باشد. در واقع، ۱ فاراد واحد بسیار بزرگی است، بنابراین در عمل از واحدهای کوچک‌تری مانند میکروفاراد، نانوفاراد، و پیکوفاراد استفاده می‌شود. ۱ میکروفاراد، $10^{-6}$ فاراد، ۱ نانوفاراد $10^{-9}$ فاراد و ۱ پیکوفاراد $10^{-12}$ فاراد است.

### ۲-۱-۱- خازن با صفحات موازی

یک خازن با صفحات موازی در نظر بگیرید که شامل دو صفحهٔ X و Y، هر یک به مساحت $A$ متر مربع و به فاصلهٔ $t$ متر از هم است و بین صفحات با دی‌الکتریکی با ضریب گذردهی (پرمیتیویته) نسبی $\varepsilon_r$ پر شده است (تصویر ۲-۱). اگر $Q$ کولن بار به صفحهٔ X داده شود، شار عبوری از دی‌الکتریک، چگالی شار $B$ تولید خواهد کرد:

$$B = \frac{Q}{A}$$

$$E = \frac{V}{t}$$

$$B = \varepsilon E = \varepsilon_0 \varepsilon_r E$$

$$\frac{Q}{A} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r V}{t}$$

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{t}$$

در اینجا $\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}\ F/m$ ضریب گذردهی مطلق (خلا) و $\varepsilon_r$ ضریب گذردهی نسبی است. برای اندازه‌گیری ضریب گذردهی نسبی، خلأ به عنوان مرجع انتخاب شده است. ضریب گذردهی نسبی خلأ برابر واحد است. ضریب گذردهی نسبی چند ماده و قدرت دی‌الکتریک بر حسب کیلوولت بر میلی‌متر در جدول ۲-۱ آمده است.

**جدول ۲-۱: ثابت دی‌الکتریک و قدرت دی‌الکتریک**

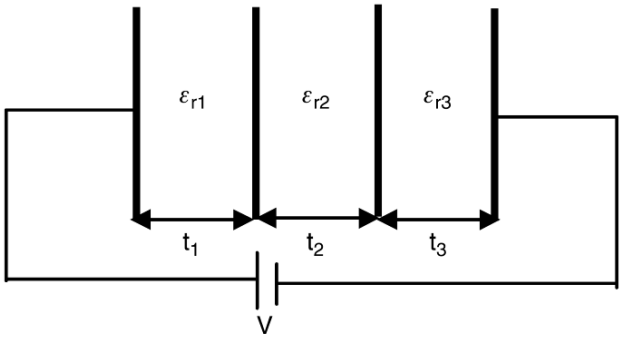
| مادهٔ عایق | ضریب گذردهی نسبی ($\varepsilon_r$) | قدرت دی‌الکتریک ($kV/mm$) |
|---|---|---|
| هوا | 1 | 3.2 |
| شیشه | 5-12 | 12-20 |
| چوب | 4-6 | 20-60 |
| میکا | 2.5-6.7 | - |
| کاغذ | 4.6-6 | 25-35 |
| موم | 1.8-2.6 | 30 |
| پُرسلین | 1.7-2.3 | 15 |
| کوارتز | 4.5-4.7 | 8 |

### ۲-۱-۲- ظرفیت خازن‌های ترکیبی

خازنی را در نظر بگیرید که از سه دی‌الکتریک مختلف با ضخامت‌های $t_1$، $t_2$، و $t_3$ تشکیل شده باشد (تصویر ۲-۲). اگر ولتاژ $V$ به آن اعمال شود، ولتاژهای $V_1$، $V_2$، و $V_3$ بر روی دی‌الکتریک‌ها قرار می‌گیرد.

$$V = V_1 + V_2 + V_3 = E_1 t_1 + E_2 t_2 + E_3 t_3 =$$
$$= \frac{B}{\varepsilon_0 \varepsilon_{r1}} t_1 + \frac{B}{\varepsilon_0 \varepsilon_{r2}} t_2 + \frac{B}{\varepsilon_0 \varepsilon_{r3}} t_3 =$$
$$= \frac{Q}{\varepsilon_0 A}\left(\frac{t_1}{\varepsilon_{r1}} + \frac{t_2}{\varepsilon_{r2}} + \frac{t_3}{\varepsilon_{r3}}\right)$$
$$C = \frac{Q}{V} = \frac{\varepsilon_0 A}{\left(\frac{t_1}{\varepsilon_{r1}} + \frac{t_2}{\varepsilon_{r2}} + \frac{t_3}{\varepsilon_{r3}}\right)}$$

در اینجا $\varepsilon_{r1}$، $\varepsilon_{r2}$، و $\varepsilon_{r3}$ ضرایب گذردهی نسبی برای دی‌الکتریک‌ها هستند.




**تصویر ۲-۲: خازن ترکیبی**

**مثال**

خازنی دو الکترود مسطح آلومینیومی به ابعاد ۸ در ۸ سانتیمتر دارد. اگر فاصلهٔ الکترودها ۱ سانتیمتر و ضریب گذردهی نسبی دی‌الکتریک ۱ باشد، ظرفیت خازن بر حسب پیکوفاراد چیست؟ اگر بین الکترودها با میکا (ضریب گذردهی نسبی ۵) پر شود، ظرفیت چیست؟ اگر به این خازن ۳۰۰ پیکو کولن بار داده شود، اختلاف پتانسیل الکترودها چقدر خواهد بود؟

**پاسخ**

در حالت اول:

$$\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}\ F/m, \varepsilon_r = 1$$
$$A = 8 \times 8 = 64 cm^2 = 0.0064 m^2$$
$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{t} A = \frac{8.85 \times 10^{-12} \times 1}{0.01} 0.0064 = 5.66\, pF$$

در حالتی که دی‌الکتریک میکا باشد:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{t} A = \frac{8.85\times10^{-12}\times5}{0.01}0.0064 = 28.3pF$$
$$V = \frac{Q}{C} = \frac{300pC}{28.3pF} = 10.6V$$

**مثال**

خازنی مسطح که مساحت صفحات آن ۱/۵ متر مربع است، سه دی‌الکتریک دارد. ضرایب گذردهی نسبی آنها به ترتیب ۳، ٤، و ٦ است. ضخامت‌های دی‌الکتریک‌ها به ترتیب ۰/٦، ۰/۸، و ۰/۳ میلی‌متر است. ظرفیت حاصل از ترکیب این سه و شدت میدان در صورت اعمال ولتاژ ۵۰۰ ولتی چقدر خواهد بود؟

**پاسخ**

$$\varepsilon_0 = 8.85\times10^{-12}\ F/m$$
$$\varepsilon_{r1} = 3, \varepsilon_{r2} = 4, \varepsilon_{r3} = 6$$
$$A = 1.5m^2$$
$$t_1 = 0.6mm, t_2 = 0.8mm, t_3 = 0.3mm$$
$$V = 500V$$

با استفاده از رابطهٔ به دست‌آمده:

$$C = \frac{8.85\times10^{-12}\times1.5}{\left(\frac{0.6}{3}+\frac{0.8}{4}+\frac{0.3}{6}\right)\times10^{-3}} = 29.5nF$$
$$Q = CV = 29.5nF\times500V = 14.75\mu C$$

خواهیم داشت:

$$B = \frac{14.75\mu C}{1.5m^2} = 9.83\,\mu C/m^2$$
$$E_1 = \frac{B}{\varepsilon_0\varepsilon_{r1}} = \frac{9.83\,\mu C/m^2}{8.85\times10^{-12}\times3} = 370\,kV/m$$
$$E_2 = \frac{B}{\varepsilon_0\varepsilon_{r2}} = \frac{9.83\,\mu C/m^2}{8.85\times10^{-12}\times4} = 277.6\,kV/m$$
$$E_3 = \frac{B}{\varepsilon_0\varepsilon_{r3}} = \frac{9.83\,\mu C/m^2}{8.85\times10^{-12}\times6} = 185\,kV/m$$

### ۲-۱-۳- خازن کُروی

کُره‌ای باردار به شعاع $r$ متر در نظر بگیرید که با $Q$ کولن در محیطی با ضریب گذردهی نسبی $\varepsilon_r$ قرار گرفته باشد. پتانسیل سطح این کره نسبت به زمین برابر است با:

$$V = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon_r r}$$

پس ظرفیت برابر است با:

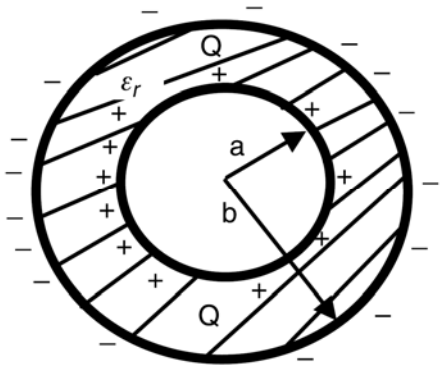
$$C = \frac{Q}{V} = 4\pi\varepsilon_0\varepsilon_r r$$

خازنی کُروی شامل دو کرهٔ هم‌مرکز به شعاع‌های $a$ و $b$ در نظر بگیرید (تصویر ۲-۳). اگر به کرهٔ درونی $Q$ کولن بار مثبت داده شود، در کرهٔ بیرونی $Q$ کولن بار منفی القاء می‌کند که به زمین خواهد رفت. در این صورت اختلاف پتانسیل برابر است با:

$$V = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon_r r}\left(\frac{1}{a} - \frac{1}{b}\right) = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon_r r}\frac{b-a}{ab}$$

ظرفیت با دانستن $a$، $b$، و $\varepsilon_r$ محاسبه می‌شود:

$$C = 4\pi\varepsilon_0\varepsilon_r r\frac{ab}{b-a}$$




**تصویر ۲-۳: خازن کُروی**

## ۲-۲- خازن‌های استوانه‌ای

خازنی استوانه‌ای شامل دو استوانهٔ هم‌محور و شعاع‌های $a$ و $b$ در نظر بگیرید (تصویر ۲-٤). یک کابل کواکسیال را می‌توان با این شکل ساده مدل کرد. اگر استوانهٔ بیرونی $Q$ کولن بار مثبت در واحد طول داشته باشد، $Q$ کولن بار منفی بر استوانهٔ درونی القاء می‌کند. ضریب گذردهی نسبی مادهٔ بین استوانه‌ها $\varepsilon_r$ است. برای محاسبهٔ چگالی شار، میدان الکتریکی، و ظرفیت کابل استوانه‌ای، استوانه‌ای به شعاع $x$ فرض کنید. مساحت واحد طول این استوانه برابر است با:

$$A = 2\pi x$$

شدت میدان الکتریکی در سطح استوانهٔ فرضی برابر است با:

$$B = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{2\pi x}$$

میدان الکتریکی:

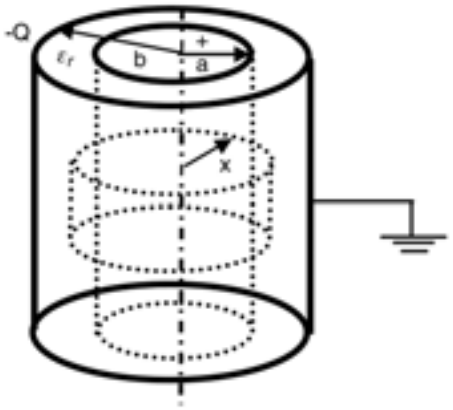
$$E = \frac{B}{\varepsilon_0\varepsilon_r} = \frac{Q}{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r x}$$

بنابراین:

$$dV = -Edx$$

$$V = \int_a^b -Edx = \int_a^b \frac{Q}{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r x}dx = \frac{Q}{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r}\ln(b/a)$$

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r}{\ln(b/a)}$$




**تصویر ۲-٤: خازن استوانه‌ای**

**مثال**

یک کابل کواکسیال دارای هادی مسی به قطر ٤ میلی‌متر و عایقی به ضخامت ٤ میلی‌متر و ضریب گذردهی نسبی ۳ است. ظرفیت ۱۰۰ متر از این کابل چقدر خواهد بود؟

**پاسخ**

$$a = 2mm, b = 2+3 = 5mm, L = 100m$$

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r L}{\ln(b/a)} = \frac{2\pi\times 8.85\times 10^{-12}\times 3\times 100}{\ln(5/2)} = 18.225nF$$

## ۲-۳- انرژی ذخیره شده در خازن

انرژی خازن در یک میدان الکترواستاتیکی ذخیره می‌شود و باعث شار و چگالی شار می‌گردد. تولید چنین میدانی نیازمند صرف انرژی است. انرژی ذخیره شده در دی‌الکتریک در محاسبات مختلفی اهمیت دارد. هنگام دشارژ کردن خازن، انرژی آزاد می‌شود. برای محاسبهٔ انرژی ذخیره شده در خازن، اختلاف پتانسیل بین الکترودها ( $V$ ) برابر است با مقدار انرژی لازم برای حرکت ۱ کولن بار از یک الکترود به الکترودی دیگر. اگر بار منتقل شده را بسیار کوچک فرض کنیم ( $dq$ )، می‌توانیم کار انجام شده را حساب کنیم:

$$dW = vdq$$

$$q = Cv \Rightarrow dq = Cdv$$

با استفاده از معادلات فوق، کل کار حساب می‌شود:

$$W = \int_0^V Cvdv = \frac{1}{2}CV^2$$

بنابراین:

$$W = \frac{1}{2}CV^2 = \frac{1}{2}QV = \frac{Q^2}{2C}$$

اگر ظرفیت خازن بر حسب فاراد، بار بر حسب کولن، و ولتاژ بر حسب ولت در رابطهٔ بالا قرار گیرند، کار انجام شده بر حسب ژول به دست خواهد آمد.

**مثال**

یک خازن ۱۰ میکروفارادی به مداری با ولتاژ مستقیم ۱۰۰ ولت متصل شده است. خازن از منبع جدا شده و در روغنی با ضریب گذردهی نسبی ۲ غوطه‌ور می‌گردد. انرژی خازن قبل و بعد از ورود به روغن چقدر است؟

**پاسخ**

$$C = 10nF, V = 100V$$

$$W = \frac{1}{2}CV^2 = 50\mu J$$

پس از ورود به روغن، ظرفیت خازن ۲ برابر می‌شود. بار خازن ثابت است، پس ولتاژ خازن نصف می‌شود. پس:

$$C = 20nF, V = 50V$$

$$W = \frac{1}{2}CV^2 = 25\mu J$$

پس انرژی خازن نصف می‌شود.

## ۲-۴- شارژ و دشارژ شدن خازن

شارژ و دشارژ شدن خازن در مدارهای الکتریکی اهمیت زیادی دارد. هر دو پدیده، تابع ثابت زمانی[1] مدار هستند که وابسته به ظرفیت خازن است. برای توضیح مفهوم ثابت زمانی، یک مدار سادهٔ RC (تصویر ۲-۵) استفاده شده است. زمانی که کلید به نقطهٔ X متصل است، خازن توسط باتری شارژ می‌شود. معادلهٔ ولتاژ را می‌توان در هر لحظه نوشت:

[1] time constant

$$V = v + Ri$$

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{d}{dt}(Cv) = C\frac{dv}{dt}$$

در اینجا $V$ ولتاژ اعمالی، $v$ ولتاژ خازن، $q$ بار خازن، و $R$ مقاومت است.

$$V = v + RC\frac{dv}{dt} \Rightarrow -\frac{dv}{V-v} = -\frac{dt}{RC}$$

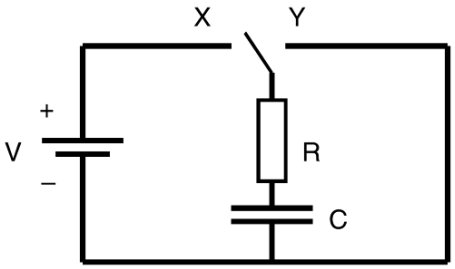
با انتگرال‌گیری از دو طرف داریم:

$$-\int \frac{dv}{V-v} = -\frac{1}{RC}\int dt \Rightarrow \ln(V-v) = -\frac{t}{RC} + K$$

با توجه به این که در ابتدا ($t = 0$)، ولتاژ صفر بوده است، می‌توان گفت:

$$K = \ln V \Rightarrow v = V\left(1 - e^{-t/RC}\right)$$

در این معادله، ثابت زمانی برابر با $RC$ است.

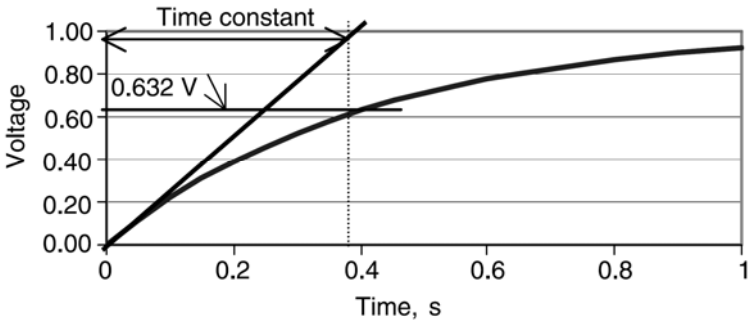



**تصویر ۲-۵: مدار معادل شارژ و دشارژ خازن**

ثابت زمانی، به زمانی گفته می‌شود که در آن ولتاژ دو سر خازن به ٦٣٪ ولتاژ ماکزیمم می‌رسد، در صورتی که نرخ افزایش اولیه را حفظ کند. این مفهوم در تصویر ۲-٦ نشان داده شده است. در زمانی برابر با ثابت زمانی خواهیم داشت:

$$v = V\left(1 - e^{-1}\right) = 0.632V$$

پس می‌توان گفت ثابت زمانی، مدت زمانی است که در آن ولتاژ خازن به ٦٣/٢ درصد مقدار نهایی خود می‌رسد.




**تصویر ۲-٦: مفهوم ثابت زمانی**

### ۲-٤-۱- شارژ خازن

می‌دانیم که در هر لحظه از شارژ شدنِ خازن، رابطهٔ زیر برقرار است.

$$v = q/C$$

می‌توان گفت:

$$\frac{dq}{dt} = i = Q\frac{d}{dt}\left(1-e^{-t/\tau}\right) = I_m e^{-t/\tau}$$

### ۲-٤-۲- دشارژ خازن

اگر در تصویر ۲-۵، کلید در وضعیت Y باشد، منبع قطع می‌گردد و خازن در مقاومت دشارژ می‌شود. با قطع شدن باتری، $V$ برابر صفر خواهد شد:

$$0 = v + RC\frac{dv}{dt} \Rightarrow \frac{dv}{v} = -\frac{dt}{RC}$$

می‌توان نوشت:

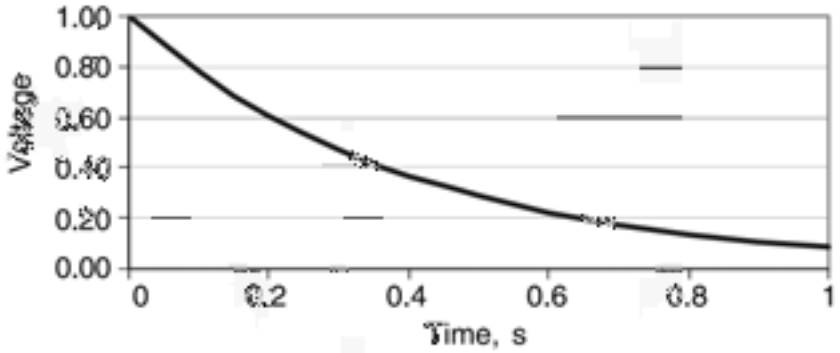
$$\int\frac{dv}{v} = -\frac{1}{RC}\int dt \Rightarrow \ln v = -\frac{t}{RC} + K$$

از آنجا که در ابتدا ($t = 0$)، ولتاژ ترمینال برابر $V$ بوده، داریم:

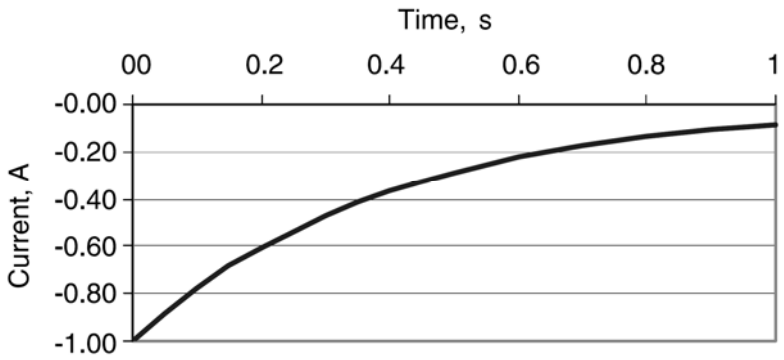
$$v = Ve^{-t/\tau}$$

ولتاژ خازن به طور نمایی کاهش می‌یابد؛ منحنی مربوط در تصویر ۲-۷ نشان داده شده است. جریان خازن نیز به طور نمایی کاهش می‌یابد (تصویر ۲-۸):

$$i = -I_m e^{-t/\tau}$$




**تصویر ۲-۷: ولتاژ خازن هنگام دشارژ**




**تصویر ۲-۸: جریان خازن هنگام دشارژ**

**مثال**

یک خازن ۵ میکرو فارادی از طریق یک مقاومت ۱۰۰ کیلو اهمی شارژ می‌شود. (الف) ثابت زمانی مدار را حساب کنید. (ب) زمان لازم که خازن تا ۹۰٪ شارژ شود، چقدر است؟

**پاسخ**

$C = 5\mu F, R = 100k\Omega$

$\tau = RC = 0.5s$

$q = 0.9Q = Q\left(1 - e^{-t/\tau}\right) \Rightarrow e^{-t/\tau} = 0.1 \Rightarrow t = 1.15s$

# فصل ۳ : اصول اصلاح ضریب توان

## ۳-۱- ضریب توان

جریان مورد نیاز ادوات الکتریکی مانند موتورها، روشنایی، و کامپیوترها از دو مؤلفهٔ حقیقی (اکتیو) و موهومی (راکتیو) تشکیل شده است. تقسیم جریان به دو مؤلفهٔ فوق برای درک جریان خازنی بسیار مفید است. مصرف کننده‌هایی مانند هیترها تنها به مؤلفهٔ حقیقی نیاز دارند. برخی بارها مانند موتورهای القایی به هر دو مؤلفه نیاز دارند.

مؤلفهٔ اکتیو، مؤلفه‌ای است که توسط مصرف‌کننده به کار مفید تبدیل می‌شود مانند حرارت در یک هیتر. واحد اندازه‌گیری این جریان آمپر ( $A$ ) و توان آن، توان حقیقی ( $P$ ) با وات ( $W$ ) نشان داده می‌شود.

مؤلفهٔ راکتیو، مؤلفه‌ای است که در ادوات القایی، شار مورد نیاز را تولید می‌کند. این جریان با آمپر ( $A$ ) اندازه گرفته شده، توان آن، توان راکتیو ( $Q$ ) با وار ( $VAR$ ) نشان داده می‌شود.

### ۳-۱-۱- جریان کل

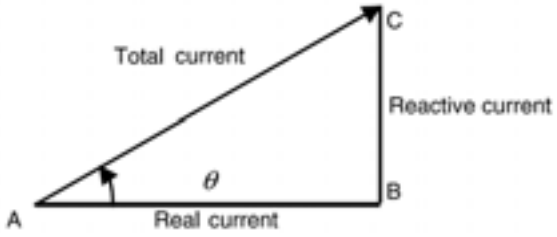
جریان کل، جمع بُرداری جریان‌های اکتیو و راکتیو است که بر حسب آمپر بیان می‌شود. حاصل ضرب ولتاژ و جریان، ولت‌آمپر نام دارد. رابطهٔ بین جریان اکتیو، راکتیو، و جریان کل (تصویر ۳-۱) به صورت زیر است:

$$\text{Total Current}=\sqrt{(\text{Active Current})^2+(\text{Reactive Current})^2}$$

در این رابطه، توان دو به دلیل رابطهٔ فیثاغورث در مثلث جریانی ظاهر می‌شود. می‌توان دو جریان اکتیو و راکتیو را از روابط زیر به دست آورد:

$$\text{Active Current}=\sqrt{(\text{Total Current})^2-(\text{Reactive Current})^2}$$

$$\text{Reactive Current}=\sqrt{(\text{Total Current})^2-(\text{Active Current})^2}$$




**تصویر ۳-۱: جریان‌های اکتیو، راکتیو، و برآیند آنها**

### ۳-۱-۲- ضریب توان

ضریب توان را می‌توان به صورت نسبت جریان اکتیو به جریان کل در یک مدار تعریف کرد. به طرز مشابه، ضریب توان نسبت کیلو وات به کیلو ولت‌آمپر است. به این ترتیب زاویهٔ ضریب توان، زاویهٔ $\theta$ در تصویر ۳-۱ است؛ زاویهٔ بین جریان اکتیو و جریان کل. کسینوس این زاویه به ضریب توان معروف است.

**مثال**

در یک مدار با ولتاژ ۱۱۰ ولت متناوب، جریان‌های اکتیو و راکتیو به ترتیب ٤٠ و ۳۰ آمپر هستند. جریان کل را حساب کنید. توان ظاهری، اکتیو، و راکتیو چقدر هستند؟ نتایج را بررسی کنید. ضریب توان در این مدار چقدر است؟ زاویهٔ ضریب توان را به دست آورید.

**پاسخ**

$$\text{Total Current}=\sqrt{40^2+30^2}=50A$$

$$S=\frac{110\times 50}{1000}=5.5kVA$$

$$P=\frac{110\times 40}{1000}=4.4kW$$

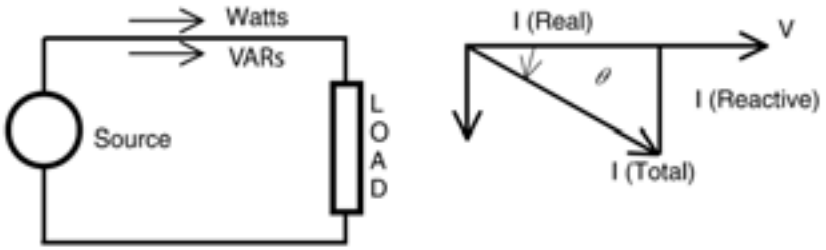
$$Q=\frac{110\times 30}{1000}=3.3kVAR$$

$$pf=\frac{40}{50}=0.8$$

$$\theta=\cos^{-1}0.8=36.8^{\circ}$$

### ۳-۱-۳- ضریب توان سلفی

بار نشان داده شده در تصویر ۳-۲ را در نظر بگیرید. در این مدار توان اکتیو و راکتیو هر دو توسط منبع تأمین می‌شوند. از دیاگرام فازوری نتیجه می‌شود که زاویهٔ ضریب توان در اینجا منفی است و بنابراین ضریب توان سلفی[1] است.

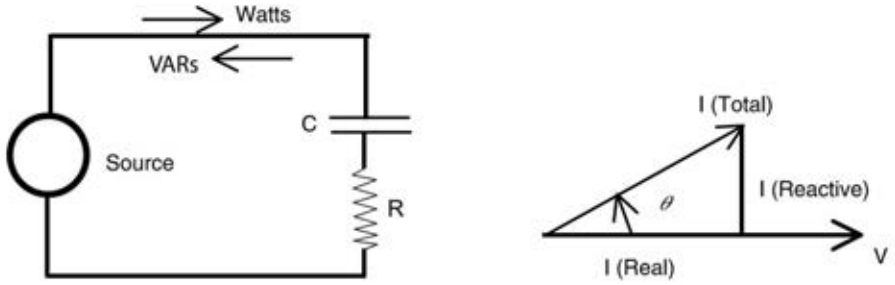



**تصویر ۳-۲: مفهوم ضریب توان سلفی**

[1] lagging

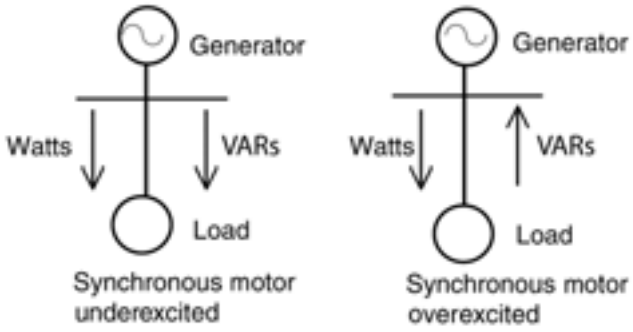
### ۳-۱-٤- ضریب توان خازنی

بار نشان داده شده در تصویر ۳-۳ را در نظر بگیرید. در این مدار توان اکتیو توسط منبع تأمین می‌شود و توان راکتیو از بار به سمت منبع حرکت می‌کند. از دیاگرام فازوری نتیجه می‌شود که زاویهٔ ضریب توان مثبت و ضریب توان خازنی[1] است. برای درک بهتر این موضوع به مدارهای ژنراتور و بار در تصویر ۳-٤ دقت کنید.




**تصویر ۳-۳: مفهوم ضریب توان خازنی**

انتقال توان بین ژنراتور و بار در تصویر ۳-٤ شرح داده شده است. در صورتی ضریب توان سلفی است که بار نیازمند توان راکتیو باشد و در صورتی خازنی است که بار مولد توان راکتیو باشد. ضریب توان بارهای گروهی نیازمند توجه بیشتر است و در یک مثال بررسی خواهد شد.




**تصویر ۳-٤: انتقال توان در یک موتور سنکرون**

**جدول ۳-۱: توان اکتیو و راکتیو در موتور سنکرون**

| بار | ژنراتور | | | بار | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | kW | KVAR | pf | kW | KVAR | pf |
| موتور سنکرون (زیر تحریک) | تولید | تولید | سلفی | مصرف | مصرف | سلفی |
| موتور سنکرون (روی تحریک) | تولید | مصرف | خازنی | مصرف | تولید | خازنی |

[1] leading

**مثال**

یک پست صنعتی بارهای روشنایی، موتور القایی، و موتور سنکرون را به شرح زیر تغذیه می‌کند:

روشنایی: ٤٠ کیلووات با ضریب توان ۱

موتور القایی: ۱۰۰ کیلووات با ضریب توان ۷۰٪

موتور سنکرون: ۲۰۰ کیلووات با ضریب توان ۹۰٪

توان راکتیو و ظاهری هر بار را پیدا کنید. همچنین توان اکتیو، راکتیو، ظاهری، و ضریب توان را در محل پست بیابید.

**پاسخ**

| بار | kW | pf | kVA | kVAR | زاویهٔ ضریب توان |
|---|---|---|---|---|---|
| روشنایی | 40 | 1.0 | 40 | 0 | 0 |
| موتور القایی | 100 | 0.7 | 143 | 71.4 | 45.6 |
| موتور سنکرون | 200 | 0.9 | 222 | 87.1 | 25.8 |
| مجموع | 340 | | | 158.5 | |

$$S = \sqrt{340^2 + 158.5^2} = 375kVA$$

$$pf = \frac{340}{375} = 0.907 \ (\text{lagging})$$

**۳-۱-۵- بهبود ضریب توان**

بسیاری از شرکت‌های برق ضریب توانی در حدود ۹۵٪ را ترجیح می‌دهند. بارهای صنعتی مانند موتورهای القایی در ضریب توان‌های بسیار پایین‌تری کار می‌کنند و در نتیجه ضریب توان کلی کارخانه‌های صنعتی پایین می‌آید. برای بهبود ضریب توان باید از کندانسورهای سنکرون یا خازن استفاده کرد.

در صورتی ماشین‌های سنکرون با ضریب توان خازنی به کار برده شوند، توان راکتیو تولید می‌کنند و به همین دلیل به آنها «کندانسورهای سنکرون» گفته می‌شود. این ماشین‌ها نیازمند حضور اپراتور و تعمیرات دوره‌ای هستند. خازن‌های اصلاح ضریب توان ادواتی استاتیک هستند که قطعات گردان در آنها وجود ندارد و تعمیرات کمتری نیاز دارند. بنابراین، خازن‌های شانت به طور گسترده در بهبود ضریب توان استفاده می‌شوند. این خازن‌ها کیلووار مورد نیاز را تأمین کرده، ضریب توان کلی را بهبود می‌دهند.

**مثال**

در مثال قبل، مطلوب است که ضریب توان با استفاده از خازن به ۹۵٪ افزایش یابد. چند کیلووار خازن نیاز است؟ دیاگرام تک‌خطی مدار و فازورهای آن را رسم کنید.

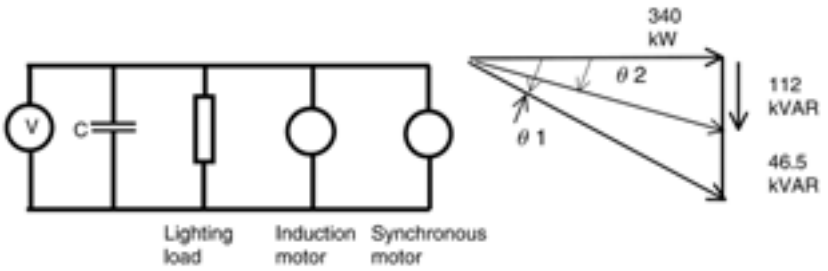
**پاسخ**

$$P = 340kW, Q_1 = 158.5kVAR,\ pf_1 = 0.907,\ pf_2 = 0.95$$

$$Q_2 = 340kW \frac{\sin\left(\cos^{-1} 0.95\right)}{0.95} = 112kVAR$$

$$\Delta Q = 46.5kVAR$$

دیاگرام تک‌خطی مدار و دیاگرام فازوری در تصویر ۳-۵ نشان داده شده است.




**تصویر ۳-۵: دیاگرام تک‌خطی مدار و دیاگرام فازوری**

از مثلث‌های تصویر ۳-۱ و تصویر ۳-۵ می‌توان روابط توان را نوشت. معمولاً توان اکتیو ثابت می‌ماند و توان‌های راکتیو و ظاهری با تغییر ضریب توان، تغییر می‌کنند. با دانستن ضریب توان فعلی و ضریب توان مطلوب می‌توان مقدار راکتیو مورد نیاز از خازن را محاسبه کرد:

$$pf = \cos\theta = \frac{P}{S} = \frac{\text{Active Power}}{\text{Total Power}}$$

$$\tan\theta = \frac{Q}{P}, \sin\theta = \frac{Q}{S}$$

$$Q_{\text{Capacitor}} = P\left[\tan\theta_1 - \tan\theta_2\right]$$

## ۳-۲- کندانسور سنکرون

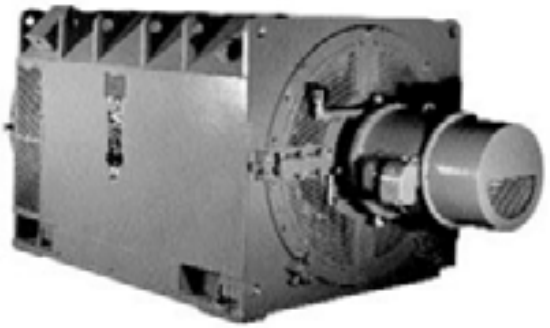
ضریب توان بار را می‌توان با استفاده از ماشین‌های سنکرون با ضریب توان خازنی بهبود دارد. در این حالت به ماشین سنکرون، کندانسور سنکرون اطلاق می‌شود (تصویر ۳-۶). برای توضیح مفهوم اصلاح ضریب توان، فرض کنید که ماشین سنکرون بدون تلفات کار می‌کند. ولتاژ ترمینال ماشین $V$ و منبع درونی ماشین $E$ است. اگر نیروی مقاومی به روتور ماشین اعمال شود، سرعت آن کاهش می‌یابد تا به سرعتی برسد که در آن گشتاور ماشین با گشتاور مقاوم برابر است. در این هنگام ماشین در وضعیت ژنراتوری کار می‌کند و بین $V$ و $E$ اختلاف فاز وجود خواهد داشت. جریان ناشی از این اختلاف فاز برابر است با:

$$I = \frac{V - E}{\sqrt{3}Z}$$

که در آن $Z$ امپدانس معادل ماشین در هر فاز است. از آنجا که این امپدانس عمدتاً سلفی است، جریان عقب‌تر از ولتاژ اعمالی خواهد بود. توان ورودی به موتور سنکرون در این حالت برابر است با:

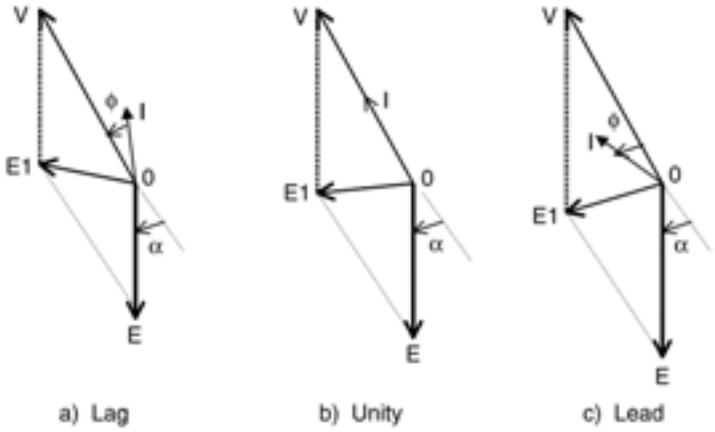
$$P = VI\cos\phi$$

که در آن $\phi$ اختلاف فاز بین $V$ و $E$ است. این وضعیت در تصویر ۳-۷ (چپ) نشان داده شده است. اگر جریان تحریک افزایش یابد، ضریب توان واحد خواهد بود (تصویر ۳-۷ وسط). منبع درونی ماشین افزایش می‌یابد و مقدار و زاویهٔ آن تغییر می‌کند. جریان ماشین هم‌فاز با ولتاژ ترمینال می‌شود و در نتیجه ضریب توان ۱ است.



**تصویر ۳-٦: کندانسور سنکرون**

بنابراین می‌توان از کندانسور سنکرون همانند بانک خازنی برای بهبود ضریب توان مدار استفاده کرد. ولی، تفاوت‌هایی میان خازن و کندانسور سنکرون وجود دارد (جدول ۳-۲). به دلیل هزینه‌بر بودن نصب و نگهداری کندانسورهای سنکرون، استفاده از آنها رایج نیست. از سوی دیگر، نصب و نگهداری بانک‌های خازنی ساده‌تر است و بنابراین در بهبود ضریب توان کاربرد گسترده دارند.




**تصویر ۳-۷: دیاگرام فازوری موتور سنکرون در ضریب توان‌های مختلف**

**جدول ۳-۲: تفاوت‌های کندانسور سنکرون و خازن شانت**

| کندانسور سنکرون | خازن شانت |
|---|---|
| ماشین گردان | تجهیز استاتیک |
| کنترل دقیق توان راکتیو با کنترل جریان تحریک | کنترل توان راکتیو به صورت پله‌ای |
| اثر پایدارساز | بی‌اثر |
| تأمین توان راکتیو بیش از ظرفیت در کوتاه مدت | اضافه‌بار توصیه نمی‌شود |
| تلفات بسیار زیاد | تلفات بسیار کم |
| نصب در یک محل | نصب در نقاط مختلف سیستم توزیع |
| ثابت بودن توان راکتیو نامی | قابلیت کم و زیاد کردن بانک |
| خرابی کل کندانسور را از سرویس خارج می‌کند | ادامهٔ کار بانک در صورت خرابی چند یونیت |
| ادامهٔ کار در زمان اضافه‌ولتاژ | تحمل محدود اضافه‌ولتاژ |
| بدون هارمونیک | امکان تولید هارمونیک و ایجاد تشدید |
| پاسخ سریع | سرعت پاسخ به سیستم مربوط است |

# فصل ۴ : استانداردهای صنعتی

## ۴-۱- مؤسسات تهیه کنندهٔ استاندارد

مؤسسات متعددی مسؤولیت تهیهٔ استانداردهای صنعت خازن را بر عهده دارند. این مؤسسات نقشی اساسی در برپایی سمینارها و کنفرانس‌ها، انتشارات، و پخش مطالب فنی در شرکت‌ها و دانشگاه‌ها دارند. چنین فرآیندی به توسعه و گسترش استانداردهای ادواتی مانند خازن کمک می‌کند. این استانداردها راهنمایی‌هایی برای طراحی، ساخت، آزمایش، نصب، و نگهداری خازن‌های قدرت فراهم می‌کند. مؤسسات اصلی مسؤول تهیهٔ این استانداردها به همراه استانداردهای مصوب در زیر آورده شده است. رسالت، دید، هدف، و خدمات هر یک از این مؤسسات به طور مفصل در سایت اینترنتی‌شان موجود است.

### ٤-۱-۱- مؤسسهٔ مهندسان برق و الکترونیک[1] (IEEE)

مؤسسهٔ مهندسان برق و الکترونیک، یکی از مؤسسات بین‌المللی تخصصی و فنی است. اهداف فنی این مؤسسه متمرکز بر پیشرفت تئوری و عملی در زمینهٔ برق، الکترونیک، مهندسی کامپیوتر، و علوم کامپیوتر است. عضویت در این مؤسسه برای همهٔ متخصصان برق و کامپیوتر و دانشجویان آزاد است. این مؤسسه حامی تولید، توسعه، تلفیق، اشتراک، و اعمال دانش در مورد الکتریسیته، فناوری‌های اطلاعاتی، و علوم مفید برای این حرفه است. استانداردهای این مؤسسه توسط کمیته‌های فنی در بخش‌های مختلف این مؤسسه تهیه می‌شوند. مؤسسه از طریق اعضاء خود، به برترین مقام زمینه‌های فنی مانند مهندسی کامپیوتر، مهندسی پزشکی، مخابرات، قدرت، هوا فضا، و لوازم مصرفی الکترونیک رسیده است. فعالیت‌های استاندارد این مؤسسه از طریق کنفرانس‌ها و کمیته‌های مشغول به کار در زمینه‌های مختلف فنی هماهنگ می‌شوند. این مؤسسه از طریق نشر، کنفرانس‌ها، و فعالیت در زمینهٔ استاندارد:

- تولید حدود ۳۰ درصد انتشارات مهندسی برق در جهان
- برپایی کنفرانس‌ها و نمایشگاه‌های فنی در زمینه‌های مختلف
- بیش از ۹۰۰ استاندارد مصوب به همراه ۷۰۰ استاندارد تحت بررسی
- ایجاد بستر برای ملاقات و همفکری متخصصان
- فرصت‌های تحصیلی برای بازآموزی مهندسان
- انتشار مقالات در زمینه‌های مربوط به برق و کامپیوتر
- اهداء جوایز به موفقیت‌های فنی و حرفه‌ای

[1] Institute of Electrical and Electronics Engineers

### ٤-١-٢- کمیسیون بین‌المللی الکتروتکنیکی[1] (IEC)

این مؤسسهٔ بین‌المللی به منظور بررسی استانداردهای الکتروتکنیکی تشکیل شده و محلی است برای تهیه و تصویب استانداردهای داوطلبانهٔ بین‌المللی به منظور تسهیل تجارت بین‌الملل در زمینه‌های مربوط و کمک به بهبود کیفیت زندگی. اعضاء فعلی ۵۲ کمیتهٔ ملی، و نمایندهٔ همهٔ زمینه‌های الکتروتکنیکی مورد علاقهٔ اعضاء، از صنایع تولید و خدمات تا مجموعه‌های دولتی، علمی، تحقیق و گسترش، دانشگاهی، و مصرفی هستند. در استانداردهای علوم فناوری، ISO و IEC کمیته‌ای مشترک تشکیل داده‌اند و IEC مؤسسهٔ پیشرو برای آماده‌سازی و انتشار استانداردهای بین‌المللی برای فناوری‌های الکتریکی، الکترونیکی، و مربوط به آن است. این‌ها به عنوان پشتوانهٔ استانداردسازی ملی و مرجع برای تهیهٔ پیش‌نویس قراردادها و مناقصات بین‌المللی به کار می‌آیند. این مؤسسه با کمک اعضای خود، به مشکلات نوشتن استانداردهای الکتروتکنیکی و موارد مربوط به آن مانند بررسی سازگاری با دیگر استانداردهای الکتریکی، الکترونیکی، و مانند آن می‌پردازد. مؤسسه، علوم الکتروتکنیکی مانند الکترونیک، مغناطیس، الکترومغناطیس، الکترو آکوستیک، مالتی‌مدیا، مخابرات، تولید انرژی، توزیع، سازگاری الکترومغناطیسی، اندازه‌گیری، قابلیت اعتماد، طراحی و توسعه، ایمنی، و محیط زیست را طبقه‌بندی می‌کند. اهداف اصلی عبارتند از:

- رسیدن به اهداف بازار جهانی به طور مؤثر
- اطمینان از استفادهٔ صحیح و به‌جا از استانداردهای مصوب
- بررسی و بهبود کیفیت محصولات نام‌برده شده در استانداردها
- رسیدن به شرایط لازم برای تعامل بین سیستم‌های پیچیده
- بهبود سلامت انسان و ایمنی
- همکاری و کمک به حفاظت از محیط زیست

استانداردهای بین‌المللی IEC با رفع موانع فنی تجارت به تجارت جهانی کمک می‌کنند و منجر به بازارهای جدید و رشد اقتصادی می‌شود. استانداردهای IEC از آن جهت حائز اهمیت‌اند که هستهٔ توافق‌نامهٔ مؤسسهٔ تجارت جهانی در مورد موانع فنی تجارت هستند. دولت‌ها می‌دانند که استانداردهای بین‌المللی نقشی حیاتی در ارتقاء بازده و توسعهٔ تجارت جهانی دارند. استانداردهای IEC چارچوب طرح‌های اقتصادی، کیفیت بالاتر برای محصولات و خدمات، تعامل بیشتر، و بهبود بازده در تولید و عرضه را برای صنایع و اشخاص مشخص می‌کنند. در عین حال، استانداردهای IEC همچنین کیفیت زندگی را با تشویق ایمنی، سلامت انسان، و حفاظت از محیط زیست بالا می‌برند.

[1] International Electrotechnical Commission

### ٤-١-٣- مؤسسهٔ ملی سازندگان تجهیزات برقی[1] (NEMA)

مؤسسهٔ NEMA در پاییز سال ١٩٢٦ از تلفیق کلوپ برق قدرت و انجمن سازندگان تجهیزات برقی ایجاد شد. این مؤسسه محل بحثی است برای استانداردسازی تجهیزات برقی که به مصرف‌کنندگان امکان انتخاب از میان محصولات الکتریکی امن، کاری، و سازگار می‌دهد. این مؤسسه همچنین با جمع‌آوری، بررسی، و تحلیل آمار بازار و اطلاعات اقتصادی توانسته خدمات بزرگی به صنعت برق انجام دهد. مؤسسهٔ NEMA می‌کوشد رقابت بین شرکت‌های عضو خود را با تشکیل مأمنی با اهداف زیر تقویت کند:

- توسعهٔ استانداردها برای صنعت و مصرف‌کنندگان تولیدات صنعتی
- تصویب و حمایت از سیاست‌های صنعتی در امور حقوقی و قانونی که ممکن است بر صنعت و استفاده‌کنندگان آن تأثیر بگذارد
- جمع‌آوری، بررسی، و نتیجه‌گیری از اطلاعات صنعتی

شرکت NEMA بیش از ٥٠٠ استاندارد به علاوهٔ استانداردهای خاص که با کمک ANSI یا IEC تنظیم شده، منتشر نموده است. این مؤسسه حامی ایمنی در تولید و استفاده از محصولات الکتریکی است و اطلاعات سودمندی در اختیار رسانه‌ها و عموم مردم قرار می‌دهد و از فناوری‌های جدید و در حال توسعه که مورد علاقهٔ صنعت است حمایت می‌کند.

مؤسسهٔ NEMA بیش از ٤٠٠ شرکت عضو دارد که محصولات مورد استفاده در تولید، انتقال، توزیع، کنترل، و استفادهٔ عادی برق را تولید می‌کنند. این مؤسسه، مرکزی تجاری است که از طریق آن صنعت برق می‌تواند بر استانداردها و قوانین دولتی اعمال نظر کند. همچنین، اعضاء می‌توانند در مورد صنعت و اقتصاد بازار اطلاعات کسب کنند. مأموریت NEMA ارتقاء رقابت شرکت‌های عضو است با فراهم کردن خدمات با کیفیتی که اثر مثبتی بر استانداردها، قوانین دولتی، و اقتصاد بازار دارد.

### ٤-١-٤- مؤسسهٔ ملی استاندارد آمریکا[2] (ANSI)

مؤسسهٔ ANSI یک مؤسسهٔ خصوصی و غیر انتفاعی است که سیستم استاندارد و سازگاری آمریکا را مدیریت و هماهنگ می‌کند. هدف این مؤسسه بهبود رقابت‌پذیری تجارت آمریکا و کیفیت زندگی با بهبود و حمایت از سیستم استانداردها و کنترل کیفیت است. اکنون این مؤسسه بیش از ٢٧٠ استاندارد ثبت کرده و نمایندگان حدود ٢٠٠ مؤسسهٔ خصوصی و دولتی عضو آن هستند. این گروه‌ها با همکاری هم استانداردهای ملی را توسعه می‌دهند.

## ٤-٢- استانداردهای مربوط به خازن

چهار استاندارد زیر به خصوصیات، کاربرد، و حفاظت از خازن‌های شانت و سری می‌پردازند:

[1] National Electrical Manufacturers Association
[2] American National Standards Institute

استاندارد IEEE Standard 18 شامل تعاریف، خصوصیات، و روش‌های آزمایش خازن‌های اصلاح ضریب توان شانت است. همچنین جدول انتخاب ظرفیت‌های خازن بر اساس ولتاژ در آن آمده است.

استاندارد IEEE Standard 1036، اهداف خازن‌های شانت، ابعادشان، استفادهٔ کاربردی در خطوط توزیع، خازن‌های شانت در پست‌ها، و مسائل مربوط را بررسی می‌کند. کاربردهای خاص برای فیلترهای هارمونیک، موتور، و خازن‌های ضربه هم بحث می‌شوند. راهنمای ایمنی و حفاظت پرسنل، بررسی اولیه، اندازه‌گیری، و برق‌دار کردنِ خازن در این استاندارد موجود است. بازرسی دوره‌ای، نگهداری، و مشکلات عملی هم در این استاندارد آورده شده است.

استاندارد ANSI/IEEE Standard C37.99 اصول اولیه‌ای مانند ابعاد خازن، آرایش‌های بانک مانند مثلث یا ستاره، ابعاد بانک، مسائل حفاظتی، اثر حفاظت عدم تعادل، و مسائل سیستمی مانند هارمونیک‌ها را بررسی می‌کند.

استاندارد IEEE Standard 824، حاوی راهنمای استفاده از خازن‌های سری در سیستم قدرت است. جبران‌سازی سری کاربرد بسیار خاصی از خازن است و باید دقت فراوانی در آن لحاظ گردد.

استاندارد ANSI/IEEE Standard C37.06، ابعاد استاندارد مدارشکن‌های مختلف را ارائه می‌کند:

- ابعاد توصیه شده برای مدارشکن‌های[1] indoor
- ابعاد توصیه شده قطع جریان خازنی برای مدارشکن‌های indoor و بدون روغن
- ابعاد توصیه شده (برای ۷۲/۵ کیلوولت به پایین) برای مدارشکن‌های outdoor برای پست‌های گازی
- ابعاد توصیه شده برای قطع و وصل جریان خازنی (برای ۷۲/۵ کیلوولت به پایین) در مدارشکن‌های پست‌های گازی
- ابعاد توصیه شده برای مدارشکن‌های outdoor (برای ۱۲۱ کیلوولت به بالا) شامل مدارشکن‌های پست‌های گازی
- ابعاد توصیه شده برای قطع و وصل جریان خازنی (برای ۱۲۱ کیلوولت به بالا) شامل مدارشکن‌های پست‌های گازی

این استاندارد همچنین مقادیر به دست آمده از آزمایش بر روی دی‌الکتریک‌ها، عایق مدارشکن‌های فشار قوی، و پست‌های گازی را در خود دارد. انتخاب مدارشکن برای کلیدزنی خازن‌ها بسیار حائز اهمیت است.

استاندارد ANSI/IEEE Standard C37.09، شامل توضیحاتی در مورد آزمایش‌های طراحی، ساخت، آزمایش‌های بعد از تحویل، آزمایش‌های در محل، و آزمایش‌های سازگاری بر روی مدارشکن‌های مختلف است. این استاندارد مقادیر مجاز ولتاژ بازیافت گذرا[2] (TRV) را برای شرایط مختلف مانند کلیدزنی خازن بیان می‌کند.

[1] Circuit breaker
[2] Transient Recovery Voltage

استاندارد ANSI/IEEE Standard C37.010 راهنمایی‌هایی در مورد کاربردهای مدارشکن‌های فشار قوی دارد. این موارد شامل زمان قطع، تأخیر مجاز تریپ، زمان بست مجدد، نرخ TRV، سوییچینگ جریان خازنی، سوییچینگ راکتور، و ملاحظات مربوط به اتصال کوتاه است.

استاندارد ANSI/IEEE Standard C37.011، مفاهیم مربوط به TRV را بررسی می‌کند. محاسبات ولتاژ بازیافت گذرا در سیستم‌های خازنی مختلف و محاسبات TRV در هنگام خطا هم بحث می‌شوند. مفهوم TRV پارامتری مهم در انتخاب و عملکرد هر مدارشکن است. مقادیر متعارف خازن برای تجهیزات مختلف مانند ژنراتور، باس، خط انتقال، و ترانس‌های صنعتی در این استاندارد آمده است.

استاندارد ANSI/IEEE Standard C37.012، در اصل به مشکلات سوییچ‌کردن جریان خازنی مانند زمان قطع، اضافه‌ولتاژهای گذرا، و اثر بست مجدد می‌پردازد. همچنین ملاحظات لازم برای جریان خازن و ولتاژ بازیافت گذرا در هنگام خطا در این استاندارد آمده است.

استاندارد IEEE Standard 519 در مورد هارمونیک است و به مسائل مختلفی نظیر تولید هارمونیک، مشخصهٔ پاسخ سیستم به هارمونیک‌ها، و اثرات آنها بر قطعات مختلف سیستم مانند موتورها، ژنراتورها، کابل‌ها، و خازن‌ها می‌پردازد. تأثیر جبران‌سازی توان راکتیو و کنترل هارمونیک به دقت بررسی شده است. روش‌های تحلیلی، اندازه‌گیری، و راه‌حل‌های توصیه شده برای مصرف‌کنندگان در این استاندارد آمده است. استاندارد همچنین توصیه‌هایی از دید شرکت برق مطرح می‌کند. به علاوه، استاندارد روش‌هایی برای بررسی منابع هارمونیکی جدید ارائه می‌دهد. در انتها، چند مثال عملی ارائه شده است. با استفاده از خازن می‌توان به طور همزمان ضریب توان و وضعیت هارمونیک‌ها را بهبود داد؛ این استاندارد از این جهت هم حائز اهمیت است.

استاندارد ANSI Standard 141، راهنمایی‌هایی برای طراحی سیستم، ملاحظات ولتاژ، حفاظت از ضربه ولتاژ، هماهنگی سیستم‌های حفاظتی، محاسبات خطا، زمین‌کردن، مسائل مربوط به ضریب توان، سوییچ کردن توان، ادوات و تجهیزات، کابل‌ها، باس‌ها، و صرفه‌جویی در مصرف انرژی آمده است. استفاده از خازن‌های شانت برای بهبود ضریب توان بارهای صنعتی در بخش ضریب توان آمده است. همچنین استفاده از خازن شانت در موتورهای القایی از نظر بازده و ایمنی بحث شده است. استاندارد ANSI Standard 399 نیز در مورد تحلیل شبکه با استفاده از کامپیوتر است.

استاندارد IEEE Standard C62.11، سطوح ولتاژی، مقادیر اضافه‌ولتاژ مجاز در حالت ماندگار، و روش‌های آزمایش عملکرد برای برق‌گیرها، به علاوهٔ آزمایش‌های طراحی، نکات ساخت، و مشخصهٔ حفاظتی برق‌گیرهای اکسید فلزی را بیان می‌کند.

استاندارد IEEE Standard C62.22، ملاحظات کلی استفاده از برق‌گیر مانند اضافه‌ولتاژ، اثرات جداسازی، و هماهنگی عایقی را از دید سیستم بحث می‌کند. حفاظت از سیستم انتقال، روش‌های انتخاب برق‌گیر، و یافتن محل مناسب آنها بحث شده است. در تجهیزات تکی مانند ترانسفورمر، خازن‌های شانت، کابل‌های زیر زمینی، پست‌های

گازی، ماشین‌های گردان، عایق‌کاری خط، خازن‌های سری، و روش‌های کنترل TRV در مدارشکن‌ها آورده شده است. روش‌های لازم برای انتخاب برق‌گیر در سیستم‌های توزیع نیز در این استاندارد موجود است.

استاندارد ANSI Standard C37.40، در مورد فیوزها و کات‌اوت‌هایی[1] است که در مدارهای الکتریکی کاربرد دارند. تعاریف و خصوصیات فیوزهای انفجاری و فیوزهای محدود کنندهٔ جریان در این استاندارد آورده شده است.

استاندارد ANSI Standard C37.42، در مورد فیوزها و کات‌اوت‌های مناسب بانک‌های خازنی بحث می‌کند. خصوصیات کات‌اوت‌های مناسب برای نصب فیوز به همراه روش‌های آزمایش آورده شده است. سطح ولتاژ، جریان نامی، جریان قطع، سطوح ولتاژی گذرا، و سطوح عایقی ابتدایی کات‌اوت‌ها در ولتاژهای ۵/۲ تا ۱۸ کیلو ولت بیان شده است که شامل کات‌اوت‌های indoor و outdoor است. جریان ذوب کنندهٔ فیوزهای انفجار سریع (K) و آهسته (T) در جدول‌هایی به صورت سطوح جریانی رایج، سطوح جریانی متوسط و سطوح جریانی کم‌تر از ٦ آمپر آورده شده است.

در استاندارد ANSI Standard C37.47، خصوصیات سوییچ‌های قطع‌شونده با فیوز در سطح توزیع به خصوص نگهدارنده‌های فیوز و فیوزهای محدود کنندهٔ جریان بحث می‌کند. سطوح ولتاژ و جریان فیوزهای محدود کنندهٔ جریان در این استاندارد آمده است.

مؤسسهٔ IEC استانداردهای متعددی در مورد خازن‌ها دارد. این خازن‌ها عمدتاً در اروپا استفاده می‌شوند. مؤسسهٔ NEMA نیز استانداردهایی در مورد خازن‌ها دارد.

### ۴-۳- مؤخره

همان‌طور که بیان شد، استانداردهای متعددی در مورد طراحی، ساخت، نصب، و آزمایش خازن‌های شانت وجود دارد. استانداردهای متفرقهٔ دیگری هم کاربرد دارد، مانند استانداردهای مورد استفاده از کانادا و انگلیس. ممکن است راهنمایی‌های ارائه‌شده در این استانداردها با هم سازگار نباشند. حتی مقادیر عددی یک نسخه از استاندارد با نسخهٔ بعدی متفاوت است. مثلاً، استاندارد ANSI Standard 18، حاوی جدولی در مورد سطوح رایج ولتاژ و توان راکتیو خازن‌ها دارد که در نسخهٔ سال‌های ۱۹۸۰، ۱۹۹۲، و ۲۰۰۲ تغییر کرده است. این تغییرات نشانگر تغییر در روند ساخت و کاربری خازن‌های شانت است. توصیه می‌شود که کاربر همیشه از آخرین نسخهٔ استاندارد استفاده کند؛ ولی نسخه‌های قبلی همچنان برای محاسبه و تحلیل بانک‌های خازنی قدیمی لازم هستند. علاوه بر خازن‌ها، استانداردهای زیادی در مورد ادوات جانبی مانند مدارشکن، برق‌گیر، و فیوز موجود است.

[1] cut-out

# فصل ۵ : خصوصیات خازن

## ۵-۱- انواع بانک خازنی

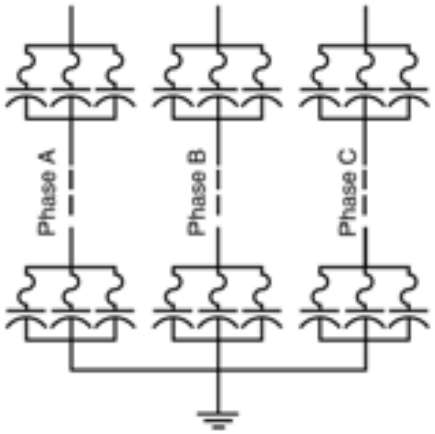
یونیت‌های خازنی به صورت یونیت‌های تک‌فاز تولید می‌شوند. در کاربردهای سه‌فاز، یونیت‌ها به صورت ستاره یا مثلث به هم وصل می‌شوند. برخی سازنده‌ها خازن‌های سه‌فاز نیز تولید می‌کنند. بسته به نوع فیوزگذاری، بانک‌های خازنی را می‌توان به سه دسته تقسیم کرد:

- بانک‌های خازنی با فیوز بیرونی
- بانک‌های خازنی با فیوز درونی
- بانک‌های خازنی بدون فیوز

خصوصیات هر یک از این بانک‌ها در زیر آورده شده است.

### ۵-۱-۱- بانک‌های خازنی با فیوز بیرونی

در این بانک‌ها فیوزها در بیرون از یونیت به یونیت‌های خازنی متصل می‌شود. فیوزها یونیت معیوب را در بانک خازنی جدا می‌کنند تا بدنهٔ خازن دچار ترکیدگی نشود و باقی یونیت‌ها بتوانند به کار خود ادامه دهند. هر فاز این نوع بانک خازنی از ترکیب سری یک یا چند شبکه با تعداد زیادی خازن موازی تشکیل شده است (تصویر ۵-۱).




**تصویر ۵-۱: بانک‌های خازنی با فیوز بیرونی**

با قطع یک یونیت خازنی، ظرفیت فازهای دیگر زیادتر می‌شود و در نتیجه ولتاژشان بالاتر می‌رود. برای محدود کردن اضافه‌ولتاژ ناشی از قطع یک یونیت خازنی، ظرفیت یونیت خازنی در این طراحی‌ها از مقدار خاصی نمی‌تواند فراتر رود. یونیت خازنی معیوب را می‌توان با بازدید چشمی تشخیص داد ولی نمی‌توان خرابی کل خازن

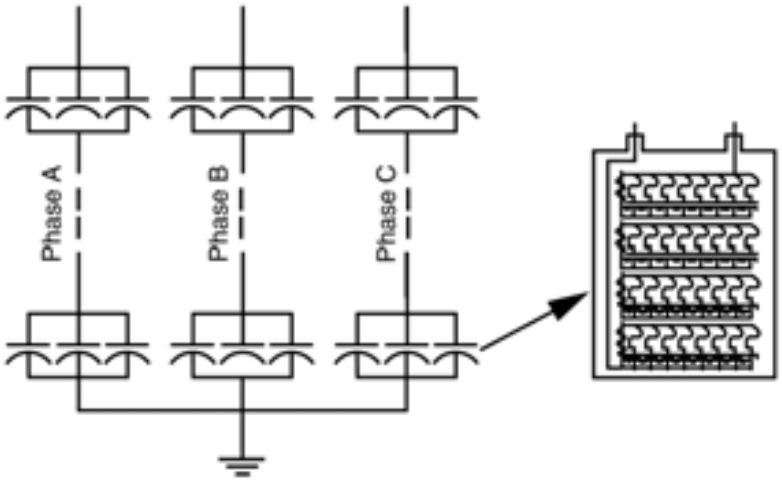
را از روی آن فهمید. به علاوه، فیوز بیرونی ممکن است به دلیل آلودگی یا دیگر عوامل محیطی افت داشته باشد. این بانک‌های خازنی در سیستم‌های توزیع و خازن‌های روی تیر استفاده می‌شوند. مشخصات عمومی این خازن‌ها عبارتند از:

- سایز خازن از ۵۰ تا ٤۰۰ کیلووار متغیر است
- بانک ترکیبی از خازن‌های سری و موازی است
- با عمل کردن فیوز، ولتاژ فازهای دیگر افزایش می‌یابد
- با عمل کردن فیوز یا عدم تعادل در نوترال می‌توان خرابی در یک یونیت را تشخیص داد

### ۵-۱-۲- بانک‌های خازنی با فیوز درونی

در این طراحی، هر فاز بانک خازنی از ترکیب سری تعداد زیادی شبکه از خازن‌های موازی تشکیل شده است. نمونهٔ این طراحی در تصویر ۵-۲ آمده است. معمولاً در این بانک‌ها از فیوزهای محدود کنندهٔ جریان استفاده می‌شوند و بانک خازنی قادر است در صورت خرابی یک یونیت، به کار خود ادامه دهد. خرابی یک یونیت اثر کمی بر اضافه‌ولتاژ دارد و برای بانک مشکلی ایجاد نمی‌کند. برخی سازنده‌ها ادعا می‌کنند که بانک در صورت خرابی چند یونیت هم می‌تواند بدون مشکل به کار خود ادامه دهد. مزایای زیر برای این بانک‌ها برشمرده شده‌اند:

- عدم تشکیل قوس پایدار و در نتیجه عدم وجود خطر سوراخ شدن بدنهٔ خازن
- نصب و نگهداری آسان
- عدم تماس فیوز با محیط بیرون
- قابلیت آزمایش همزمان خازن و فیوز در هنگام ساخت
- مناسب برای پست، HVDC، SVC، و فیلترها
- تشخیص عمل کردن فیوز از عدم تعادل جریان‌ها فاز یا جریان نوترال

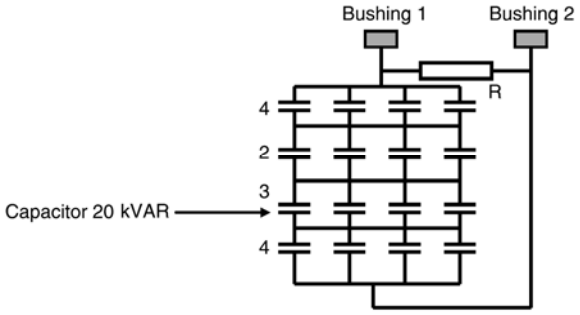



**تصویر ۵-۲: بانک‌های خازنی با فیوز درونی**

محدودیت این بانک‌ها در این است که کاربر خود نمی‌تواند خازن یا یونیت خراب را تشخیص دهد. اگر تعداد زیادی از فیوزها عمل کرده باشند، بانک خازنی باید عوض شود.

### ۵-۱-۳- بانک‌های خازنی بدون فیوز

در یک بانک خازنی بدون فیوز، تعدادی یونیت خازنی با هم سری شده‌اند؛ به یک مجموعه خازن سری یک شاخه گفته می‌شود. سپس شاخه‌ها با هم موازی می‌شوند (تصویر ۵-۳). به این ترتیب با قطع یکی از یونیت‌های خازنی اضافه‌جریان حاصل و در نتیجه اضافه‌ولتاژ بسیار کوچک است و یونیت مورد نظر می‌تواند مدت‌ها در سرویس بماند. این اصل مهم بانک‌های خازنی بدون فیوز است.




**تصویر ۵-۳: بانک خازنی بدون فیوز (۳۲۰ کیلووار در هر فاز)**

بانک‌های خازنی بدون فیوز، چند مزیت نسبت به بانک‌های با فیوز دارند، ولی محدودیت‌ها و مشکلات خود را دارند. گرچه بانک‌ها، اعم از با فیوز و بدون فیوز، در صورت طراحی صحیح به درستی کار می‌کنند، قبل از خرید باید تفاوت‌های آنها را در نظر گرفت. برخی از مزایای بانک‌های بدون فیوز نسبت به بانک‌های خازنی با فیوز بیرونی عبارتند از:

- فضای لازم برای آنها نصف بانک‌های با فیوز است
- معمولاً ارزان‌تر هستند
- در مقابل ورود حیوانات به سیستم ایمن‌تر هستند، زیرا امکان عایق‌کردن اتصالات وجود دارد.

برخی مشکلات مربوط به بانک‌های خازنی بدون فیوز نسبت به بانک‌های خازنی با فیوز بیرونی:

- در صورت بروز خطاهای درونی و خطای بوشینگ، بانک باید فوراً قطع شود، چون فیوزی برای حفاظت آن وجود ندارد
- یونیت‌های خازنی یدکی باید از ابتدا و مشابه یونیت‌های داخل سرویس سفارش داده شوند، زیرا یونیت‌های عادی قابل استفاده نیست
- در صورت قطع برق رلهٔ کنترلی، باید بانک تریپ داده شود. خرابی خازن از طریق جریان نوترال قابل تشخیص است

- جریان‌های گذرا در خازن‌ها بزرگ‌تر است، احتمال نیاز به نصب راکتور محدود کنندهٔ جریان

زمان لازم برای تعمیر و یافتن محل خطا در این نوع بانک‌ها بیشتر از بانک‌های خازنی با فیوز بیرونی است. گرچه کارکرد آنها جالب توجه و نصب آنها آسان است، در صورت بزرگ بودن بانک یافتن محل خطا و تعمیر آن زمان‌بر است.

## ۵-۲- خصوصیات خازن‌ها

خصوصیات و قابلیت‌های خازن‌ها در استانداردها مشخص شده است. این موارد شامل تلرانس‌ها و دامنه کاری مجاز است. خازن‌ها باید همواره بتوانند این شرایط کاری را تحمل کنند:

- ۱۰ درصد اضافه ولتاژ مؤثر[1]
- ۲۰ درصد اضافه جریان مؤثر
- ۳۵ درصد اضافه توان راکتیو (نسبت به توان راکتیو نامی)
- ۸۰ درصد اضافه جریان مؤثر بسته به توان راکتیو و ولتاژ نامی

موارد مهم دیگر در اینجا ذکر می‌شود.

### ۵-۲-۱- ولتاژ

ولتاژ نامی سیستم به صورت خط به خط داده می‌شود. یونیت‌های خازنی تک‌فاز هستند و باید ولتاژ فازی مناسب استفاده شود. خازن‌ها باید بتوانند ۱۰٪ اضافه ولتاژ مؤثر را تحمل کنند و پیشانی موج ولتاژ نباید از ۱۴۰٪ ولتاژ نامی بیشتر شود. ماکزیمم ولتاژ خازن‌های شانت در جدول ۵-۱ آمده است.

**جدول ۵-۱: مقادیر مجاز ولتاژ برای خازن‌های شانت**

| ولتاژ خازن (ولت) | حداکثر ولتاژ مجاز (ولت) |
|---|---|
| 230 | 253 |
| 460 | 506 |
| 575 | 633 |
| 2,400 | 2,640 |
| 4,160 | 4,575 |
| 6,900 | 7,590 |
| 7,200 | 7,920 |
| 7,970 | 8,767 |
| 12,000 | 13,200 |
| 13,800 | 15,180 |

[1] rms

### ۵-۲-۲- توان راکتیو نامی

توان یونیت‌های خازنی برحسب کیلووار سنجیده می‌شود. معمولاً خازن‌ها در ابعاد ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۳۰۰، و ٤۰۰ کیلوواری موجود هستند. خازن‌ها باید همواره بتوانند تا ۳۵٪ بیشتر از توان نامی خود تأمین کنند. مقادیر نامی توان در جدول ۵-۲ آمده است. اگر ولتاژ خازن‌ها نسبت به ولتاژ نامی کاهش یا افزایش داشته باشد، توان راکتیو خروجی هم تغییر خواهد کرد:

$$\text{Reactive Power} = \text{Nominal Power}\left(\frac{\text{System Voltage}}{\text{Nominal Voltage}}\right)^2$$

**جدول ۵-۲: ولتاژ و توان راکتیو یونیت‌های خازنی**

| ولتاژ مؤثر خط به خط (ولت) | توان راکتیو (کیلووار) | تعداد فازها | سطح عایقی BIL (کیلوولت) |
|---|---|---|---|
| 216 | 5, 7.5, 13.3, 20, 25 | یک و سه | 30 |
| 240 | 2.5, 5, 7.5, 10, 15, 20, 25, 50 | یک و سه | 30 |
| 480 | 5, 10, 15, 20, 25, 35, 50, 60, 100 | یک و سه | 30 |
| 600 | 5, 10, 15, 20, 25, 35, 50, 60, 100 | یک و سه | 30 |
| 2400 | 50, 100, 150, 200 | یک | 75 |
| 2770 | 50, 100, 150, 200 | یک | 75 |
| 4160 | 50, 100, 150, 200 | یک | 75 |
| 4800 | 50, 100, 150, 200 | یک | 75 |
| 6640 | 50, 100, 150, 200, 300, 400 | یک | 95 |
| 7200 | 50, 100, 150, 200, 300, 400 | یک | 95 |
| 7620 | 50, 100, 150, 200, 300, 400 | یک | 95 |
| 7960 | 50, 100, 150, 200, 300, 400 | یک | 95 |
| 8320 | 50, 100, 150, 200, 300, 400 | یک | 95 |
| 9540 | 50, 100, 150, 200, 300, 400 | یک | 95 |
| 9960 | 50, 100, 150, 200, 300, 400 | یک | 95 |
| 11400 | 50, 100, 150, 200, 300, 400 | یک | 95 |
| 12470 | 50, 100, 150, 200, 300, 400 | یک | 95 |
| 13280 | 50, 100, 150, 200, 300, 400 | یک | 95, 125 |
| 13800 | 50, 100, 150, 200, 300, 400 | یک | 95, 125 |
| 14400 | 50, 100, 150, 200, 300, 400 | یک | 95, 125 |
| 15125 | 50, 100, 150, 200, 300, 400 | یک | 125 |
| 19920 | 100, 150, 200, 300, 400 | یک | 125 |
| 20800 | 100, 150, 200, 300, 400 | یک | 150, 200 |

| ولتاژ مؤثر خط به خط (ولت) | توان راکتیو (کیلووار) | تعداد فازها | سطح عایقی BIL (کیلوولت) |
|---|---|---|---|
| 21600 | 100, 150, 200, 300, 400 | یک | 150, 200 |
| 22800 | 100, 150, 200, 300, 400 | یک | 150, 200 |
| 23800 | 100, 150, 200, 300, 400 | یک | 150, 200 |
| 23940 | 100, 150, 200, 300, 400 | یک | 150, 200 |
| 4160 GrdY/2400 | 300, 400 | سه | 75 |
| 4800 GrdY/2770 | 300, 400 | سه | 75 |
| 7200 GrdY/4160 | 300, 400 | سه | 75 |
| 8320 GrdY/4800 | 300, 400 | سه | 75 |
| 12470 GrdY/7200 | 300, 400 | سه | 95 |
| 13200 GrdY/7620 | 300, 400 | سه | 95 |
| 13800 GrdY/7960 | 300, 400 | سه | 95 |
| 14,400 GrdY/8320 | 300, 400 | سه | 95 |

**مثال**

خازنی با توان نامی ۲۰۰ کیلووار، ولتاژ نامی ۲/٤ کیلوولت (٦۰ هرتز) در ولتاژ ۲/۵۲ کیلوولت کار می‌کند. توان راکتیو تحویلی در این ولتاژ چقدر است؟ اگر ولتاژ کاری به ۹۵٪ ولتاژ نامی کاهش یابد، توان راکتیو چقدر خواهد بود؟

**پاسخ**

$$Q = 200kVAR, V = 2.4kV$$

$$Q_{@2.52kV} = 200\left(\frac{2.52}{2.4}\right)^2 = 220.5kVAR$$

$$Q_{@0.95p.u.} = 200\left(\frac{0.95}{1}\right)^2 = 180.5kVAR$$

در این مثال، با کاهش ۵ درصدی ولتاژ توان راکتیو نزدیک به ۱۰ درصد کاهش یافت. حد مجاز عایقی خازن‌های معمولی در استاندارد تعریف شده است (جدول ۵-۲).

**۵-۲-۳- فرکانس**

بانک‌های خازنی برای کار در فرکانس ۵۰ یا ٦۰ هرتز طراحی شده‌اند. توان راکتیو خروجی با فرکانس سیستم نسبت مستقیم دارد. اگر بانک خازنی در فرکانس دیگری کار کند، توان راکتیو آن تغییر خواهد کرد:

$$\text{Reactive Power} = \text{Nominal Power}\left(\frac{\text{System Frequency}}{\text{Nominal Frequency}}\right)$$

**مثال**

خازنی که توان نامی ۲۰۰ کیلووار در ۲/٤ کیلوولت (٦۰ هرتز) دارد، به شبکهٔ ۵۰ هرتزی وصل شده است. توان راکتیو خروجی چقدر است؟

**پاسخ**

$$Q = 200kVAR, V = 2.4kV,\ f = 60Hz$$

$$Q_{@50Hz} = 200\left(\frac{50}{60}\right) = 166.6kVAR$$

بنابراین کاهش ۱۷ درصدی در فرکانس، باعث کاهش ۱۷ درصدی در توان راکتیو خروجی می‌شود.

### ۵-۲-٤- دمای محیط

خازن‌ها طوری طراحی شده‌اند که هنگام کار عادی یا سوییچینگ در شرایط محیطی با تهویهٔ کامل و تابش مستقیم خورشید و دمای محیط را در وضعیت‌های مختلف نصب تحمل کنند. دمای مجاز برای محیط در شرایط مختلف نصب در جدول ۵-۳ آمده است. باید نکات زیر در مورد دمای محیط و دمای کاری خازن در نظر گرفته شود:

- تابش از خورشید یا منابع دیگر تابشی مانند کوره‌ها
- با افزایش توان راکتیو تحویلی، تلفات توان هم افزایش می‌یابد
- اگر خازن‌ها هنگام نصب بسیار نزدیک به هم قرار داده شوند، امکان خنک شدن کاهش می‌یابد. نصب صحیح و تهویهٔ مناسب برای طول عمر خازن بسیار مفید است

برخی از روش‌های بهبود خنک‌سازی، خنک کردن با دمیدن هوا، افزایش فضا بین خازن‌ها، و نصب خازن در محیط‌های سردتر است.

**جدول ۵-۳: ماکزیمم مجاز دمای محیط**

| روش نصب | دمای میانگین در ۲٤ ساعت (°C) | دمای متوسط سالیانه (°C) |
|---|---|---|
| خازن ایزوله | ٤٦ | ۳۵ |
| تک ردیفی | ٤٦ | ۳۵ |
| چند ردیفی | ٤۰ | ۲۵ |
| درون محفظهٔ فلزی | ٤۰ | ۲۵ |

### ۵-۲-۵- شرایط کاری خازن‌ها

بانک‌های خازنی باید در شرایط ذکر شده روی بدنه‌خازن‌ها کار کنند و شرایط زیر باید برای آنها رعایت شود:

- دمای محیط در محدودهٔ مجاز باشد

- ارتفاع محل نصب از ۱۸۰۰ متر بالاتر از سطح دریا تجاوز نکند
- ولتاژ اعمال‌شده به ترمینال و بدنه از حد عایقی تجاوز نکند
- ولتاژ اعمال‌شده بیش از حد مجاز هارمونیکی نباشد
- فرکانس شبکه برابر با فرکانس نامی باشد

هر گونه شرایط نامناسب مانند همجواری با شعله، گردهای انفجاری، لرزش و شوک مکانیکی، همجواری با منابع حرارتی، دشواری نصب، محدودیت‌های دما در بیرون از بانک، نقاط مرتفع، و حالت‌های گذرای سخت باعث وارد آمدن فشار به خازن‌ها می‌شود.

### ۵-۲-٦- انواع بوشینگ

خازن‌ها به صورت تک‌فاز یا سه‌فاز تولید می‌شوند. خازن‌های تک‌فاز با بوشینگ تکی یا دوبله عرضه می‌شوند. خازن‌های outdoor و بوشینگ تکی تنها روی یک ترمینال بوشینگ دارند و ولتاژ الکترود دیگر با بدنه یکی است. در خازن‌های با دو بوشینگ، دو ترمینال هر کدام یک بوشینگ دارند و بدنه از آنها عایق شده است. هزینهٔ تولید این خازن‌ها بیشتر از خازن‌ها تک بوشینگ است. خازن‌های رایج تک‌بوشینگ و دو بوشینگ به ترتیب در تصویر ۵-۵ و تصویر ٥-٦ نشان داده شده‌اند. یونیت‌های خازنی فشار ضعیف و یونیت‌های خازنی توزیع معمولاً تک‌فاز هستند و توان آنها از ۲۰ تا ۱۰۰۰ کیلووار متغیر است. این یونیت‌ها ممکن است:

- با دو بوشینگ با ترمینال باز و بدنهٔ بدون ولتاژ[1] باشند
- با دو بوشینگ با ترمینال بسته و بدنهٔ بدون ولتاژ باشند
- با یک بوشینگ با ترمینال باز و بدنهٔ دارای ولتاژ[2] باشند

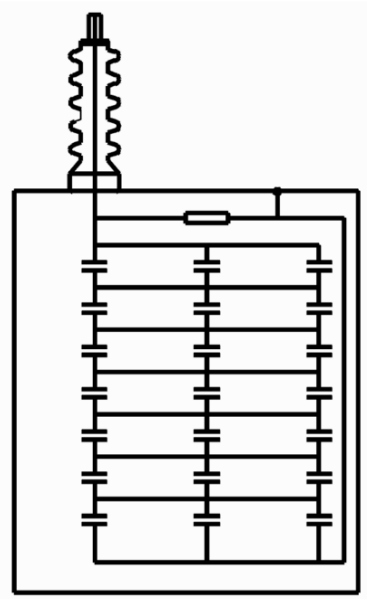
این یونیت‌ها هم به صورت indoor و outdoor موجود هستند. یونیت‌های خازنی سه‌فاز از یک تا ٢٤ کیلوولت موجود هستند. توان آنها از ۲۰ تا ۸۰۰ کیلووار متغیر است. این یونیت‌ها می‌توانند:

- سه بوشینگه، با ترمینال باز، و بدنهٔ بدون ولتاژ به صورت indoor و outdoor باشند
- سه بوشینگه، با ترمینال بسته به صورت indoor و outdoor باشند

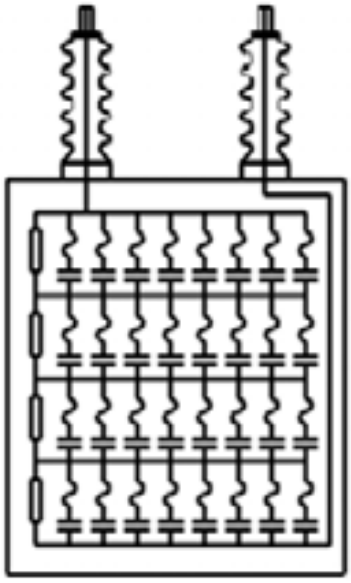
یک خازن سه فاز در تصویر ٥-٤ نشان داده شده است. این یونیت سه ترمینال دارد و فاقد ترمینال نوترال است.

[1] dead casing
[2] live casing

**تصویر ۵-٤: خازن سه‌فاز یک‌پارچه**



**تصویر ۵-۵: خازن با یک بوشینگ**



**تصویر ۵-٦: خازن با دو بوشینگ**

### ۵-۲-۷- ولتاژ ضربه

خازن‌های قدرت باید بتوانند ضربه‌های ولتاژ مشخص شده در جدول ۵-٤ را تحمل کنند.

**جدول ۵-٤: سطوح مجاز ولتاژ ضربه بر اساس استاندارد IEEE Standard 18**

| ولتاژ نامی خازن (مقدار مؤثر خط به خط بر حسب ولت) | سطح ولتاژ ضربه (مقدار پیک خط به خط بر حسب کیلوولت) |
|---|---|
| 216-1199 | 30 |
| 1200-5000 | 75 |
| 5001-15000 | 95 |
| 13200-25000 | 125 |

### ۵-۲-۸- دشارژ خازن

معمولاً خازن‌ها دارای قطعه‌ای درونی برای دشارژ هستند که باید بر طبق استاندارد IEEE بتواند در زمان مشخص شده در جدول ۵-۵ ولتاژ خازن را بعد از قطع شدن از منبع به ۵۰ ولت یا کمتر کاهش دهد. این قطعات نمی‌توانند بهد از قطع شدن از منبع، ولتاژ خازن را تا حد مطلوب پایین بیاورند، بنابراین باید از مقاومت‌های بیرونی برای دشارژ استفاده کرد. طبق استاندارد IEC، خازن باید بتواند ولتاژ منبع را به ۷۵ ولت یا کمتر کاهش دهد.

**جدول ۵-۵: زمان مطلوب برای دشارژ خازن پس از قطع شدن**

| استاندارد | ولتاژ مؤثر خازن (خط به خط) | زمان مجاز برای دشارژ | ولتاژ مورد نظر |
|---|---|---|---|
| IEEE | ۶۰۰ ولت و کمتر | ۱ دقیقه | ۵۰ ولت |
| | بیشتر از ۶۰۰ ولت | ۵ دقیقه | |
| IEC | ۶۰۰ ولت و کمتر | ۳ دقیقه | ۷۵ ولت |
| | بیشتر از ۶۰۰ ولت | ۳ دقیقه | |

### ۵-۲-۹- اضافه‌ولتاژهای گذرا (با فرکانس شبکه)

خازن‌ها در طول عمر عادی خود در حدود ۳۰۰ بار اضافه‌ولتاژ با فرکانس شبکه (بدون هارمونیک یا حالت‌های گذرا) دچار می‌شوند. مقادیر و زمان مجاز در جدول ۵-۶ آمده است.

**جدول ۵-۶: مقادیر و زمان مجاز اضافه‌ولتاژ با فرکانس شبکه**

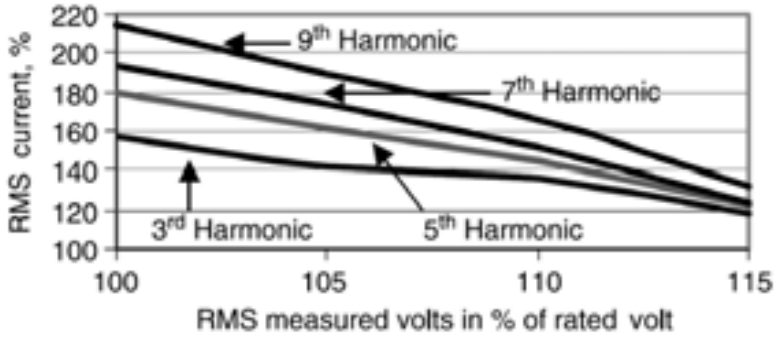
| مدت زمان | مقدار مجاز اضافه ولتاژ (بر حسب per unit) |
|---|---|
| ۶ سیکل | 2.2 |
| ۱۵ سیکل | 2 |
| ۱ ثانیه | 1.7 |
| ۱۵ ثانیه | 1.4 |
| ۱ دقیقه | 1.3 |

### ۵-۲-۱۰- اضافه‌جریان‌های گذرا

خازن‌های قدرت در هنگام قطع و وصل، و کلیدزنی‌های مشابه دچار اضافه جریان می‌شوند. مقادیر اضافه‌جریان و زمان‌های مجازشان در جدول ۵-۷ آمده است. مقدار مؤثر ولتاژ و جریان یک مدار را می‌توان با استفاده از ولت‌مترها و آمپرمترهای عادی به دست آورد. به طور تقریبی، می‌توان جریان مؤثر مجاز را از ۳۵٪ توان راکتیو مجاز اضافی از منحنی‌های تصویر ۵-۷ به دست آورد.

جدول ۵-۷: مقادیر و زمان مجاز اضافه‌جریان

| تعداد تقریبی اضافه‌جریان‌ها در یک سال | مقدار مجاز اضافه جریان (بر حسب per unit) |
|---|---|
| 4 | 1500 |
| 40 | 1150 |
| 400 | 800 |
| 4000 | 400 |




تصویر ۵-۷: حد حرارتی خازن‌های استاندارد

**مثال**

جریان ماکزیمم در یک بانک ۵۰۰ کیلوواری و ٤/۸ کیلوولت چیست؟ اگر به بانک ۵٪ اضافه‌ولتاژ داده شود، جریان مجاز چقدر است؟ آیا احتمال تخطی از محدودیت حرارتی وجود دارد؟

**پاسخ**

$$I_{\text{rated}} = \frac{500kVAR}{\sqrt{3}\times 4.8kV} = 60.14A$$

اگر فرض کنیم که اضافه‌ولتاژ مزبور به صورت هارمونیک سوم باشد، ۵٪ اضافه‌ولتاژ منجر به ٤٦٪ اضافه‌جریان در بانک خازنی خواهد شد (تصویر ۵-۷).

$$I = 60.14\times 1.46 = 87.81A$$

اگر جریان خازن از جریان فوق (۸۷ آمپر) کمتر باشد، مشکلی پیش نخواهد آمد.

### ۵-۲-۱۱- اتصالات بانک‌های خازنی سه‌فاز

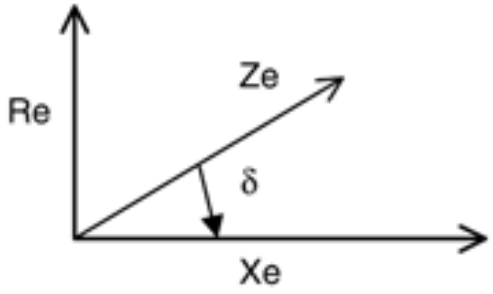
برای ساخت خازن‌های سه فاز، آرایش‌های مختلفی از خازن‌های تک‌فاز کنار هم قرار می‌گیرند: مانند ستارهٔ زمین‌نشده، ستارهٔ زمین‌شده، مثلث، ستارهٔ دوبل زمین‌نشده، و ستارهٔ دوبل زمین‌شده (یا آرایش H). برای جلوگیری از فرورزونانس در سیستم، اتصال زمین در این بانک‌ها باید به دقت بررسی شود.

### ۵-۲-۱۲- جریان نشتی

جریان نشتی، جریانی است که از خازن به بدنهٔ آن نشت می‌کند. جریان نشتی را می‌توان با اعمال ولتاژ به ترمینال‌ها و بدنه به دست آورد. یا این که ولتاژ را به ترمینال و بدنه متصل کرد و جریان نشتی را اندازه گرفت.

### ۵-۲-۱۳- ضریب تلفات

در همهٔ خازن‌ها اندکی مقاومت به دلیل مقاومت الکترودها، اتصالات بدنه و اتلاف در دی‌الکتریک وجود دارد. مجموع تلفات را می‌توان با یک مقاومت معادل مدل کرد ($R_e$). ضریب تلفات به تانژانت زاویهٔ $\delta$ بین راکتانس ($X_e$) و امپدانس خازن ($Z_e$) گفته می‌شود. دیاگرام فازوری ضریب تلفات در تصویر ۵-۸ نشان داده شده است. ضریب تلفات با دما و فرکانس سیستم تغییر می‌کند.




**تصویر ۵-۸: دیاگرام فازوری ضریب تلفات**

**مثال**

برای یک بار با ولتاژ ٤/١٦ کیلوولت، سه فاز، ٦٠ هرتز نیاز به خازن اصلاح ضریب توان است. خازن‌های موجود خازن‌های تک‌فاز ۱۵۰ کیلوواری هستند. خازن مناسب را انتخاب کرده، با جدول ۵-۲ بررسی کنید.

**پاسخ**

$$V_{line-line} = 4.16kV, V_{Phase} = \frac{4.16kV}{\sqrt{3}} = 2.4kV$$

$$V_{Peak/Phase} = 2.4kV \times \sqrt{2} = 3.396kV$$

نزدیک‌ترین ولتاژ را از جدول ۵-۲ انتخاب می‌کنیم:

$$V_{\text{operation}} = 2.77kV, V_{\text{peak,operation}} = 2.77kV \times \sqrt{2} = 3.917kV$$

$$V_{\text{nominal}} = 2.77kV, V_{\text{operation}} = 2.4kV$$

$$Q = 150kVAR\left(\frac{2.4kV}{2.77kV}\right)^2 = 112.8kVAR$$

$$I = \frac{112.8kVAR}{2.4kV} = 46.96A$$

حال مقادیر را بررسی می‌کنیم:

| پارامتر | حد مجاز | حد فعلی |
|---|---|---|
| مقدار مؤثر ولتاژ | 110% | $\frac{2.4kV}{2.77kV}\times 100 = 86.7\%$ |
| مقدار ماکزیمم ولتاژ | 120% | $\frac{3.396kV}{3.917kV}\times 100 = 86.7\%$ |
| جریان | 180% | $\frac{46.96A}{52.4A}\times 100 = 86.7\%$ |
| توان راکتیو | 135% | $\frac{112.8kVAR}{150kVAR}\times 100 = 75.2\%$ |

می‌بینیم که مقادیر بانک خازنی در حد مقادیر مجاز است.

**مثال**

یونیت‌های مناسب بانک خازنی ۷۵ مگاوار، سه‌فاز، ۱۳۸ کیلوولت، ٦۰ هرتز را انتخاب کنید.

**پاسخ**

$$Q_{3\phi} = 75MVAR, Q_{1\phi} = 25MVAR$$

$$V_{line-line} = 138kV \Rightarrow V_{Phase} = 138kV/\sqrt{3} = 79.7kV$$

نزدیک‌ترین ولتاژ و توان را از جدول ۵-۲ انتخاب می‌کنیم:

$$q = 400kVAR, V = 20.8kV, BIL = 200kV$$

برای تولید ۷۹/۷ کیلوولت ولتاژ، باید ٤ عدد از خازن‌های فوق را سری کرد:

$$n_{series} = 79.7kV/20.8kV = 3.8 \approx 4$$

$$V_{line-line} = 4\times 20.8kV \times \sqrt{3} = 144kV$$

برای تولید ۲۵ مگاوار توان راکتیو در هر فاز باید تعداد ١٦ عدد از این خازن‌های سری را با هم موازی کرد:

$$n_{parallel} = 25MVAR/(4\times 400kVAR) = 15.6 \approx 16$$

خواهیم داشت:

$$Q_{1\phi} = 16\times 4\times 400kVAR = 25.6MVAR$$

$$Q_{3\phi} = 3\times 25.6MVAR = 76.8MVAR$$

$$Q_{\text{delivered}} = (138/144)^2 \times 76.8MVAR = 70.5MVAR$$

توان خروجی بانک به دست می‌آید.

## ۵-۳- انواع دیگر خازن

انواع دیگر خازن که در صنعت استفاده می‌شوند شامل خازن‌های الکترولیتی، خازن‌های با کاغذ متالیزه، خازن‌های فیلم فلزی خشک، خازن‌های اولترا، و خازن‌های فرکانس بالا هستند. برخی از قابلیت‌های این خازن‌ها در زیر بحث می‌شود:

### ۵-۳-۱- خازن‌های الکترولیت

خازن‌های الکترولیت از فویل‌های آلومینیومی استفاده می‌کنند. یک الکترود آلومینیومی است و برای خازن‌های تک‌قطبی، آلومینیوم خالص استفاده می‌شود. برای خازن‌های AC، فویل دومی به عنوان الکترود دوم استفاده می‌شود. فویل‌ها با عایق‌های کاغذی آغشته به الکترولیت از هم جدا می‌شود. آلومینیوم را می‌توان کشید تا سطح مقطع افزایش یابد. در برخی خازن‌ها، آلومینیوم روی پارچه اسپری می‌شود تا سطح مقطع بیشتر شود. به این ترتیب ظرفیت خازن بسیار افزایش می‌یابد. این خازن‌ها برای کاربردهای کوتاه استفاده می‌شوند. مثلاً، خازن‌های الکترولیتی با ولتاژ ۱۲۵ تا ۳۵۰ ولت برای راه‌اندازی موتور تنها ۳۰ ثانیه در مدار هستند. خازن‌های راه‌انداز برای موتورهای تک‌فاز کاربرد دارند. خازن‌های الکترولیتی را نمی‌توان همواره در مدار نگه داشت. تصویر این خازن‌ها در تصویر ۵-۹ آمده است. معمولاً خازن‌های الکترولیتی بدنهٔ آلومینیومی و استوانه‌ای دارند.

**تصویر ۵-۹: خازن‌های الکترولیتی برای راه‌اندازی موتور**

### ۵-۳-۲- خازن‌های کاغذ متالیزه

برای کاهش ابعاد خازن می‌توان از الکترودهای نازک استفاده کرد یا عایق را نازک‌تر ساخت. با استفاده از تکنیک‌های نشاندن فلز روی سطح، می‌توان ضخامت الکترودها را کاهش داد. در این خازن‌ها به جای دو لایه عایق از یک لایه استفاده می‌شود. عایق کاغذی باید برای تحمل ولتاژ اضافی اشباع شده باشد. این خازن‌ها نیز برای راه‌اندازی موتور به کار می‌روند و همواره در مدار نیستند. همچنین بسیار سنگین‌تر از خازن‌های الکترولیتی هستند ولی عمر طولانی‌تر و تلفات کمتری دارند. این خازن‌ها را می‌توان روی قاب موتورها نصب کرد.

### ۵-۳-۳- خازن‌های فیلم فلزی خشک

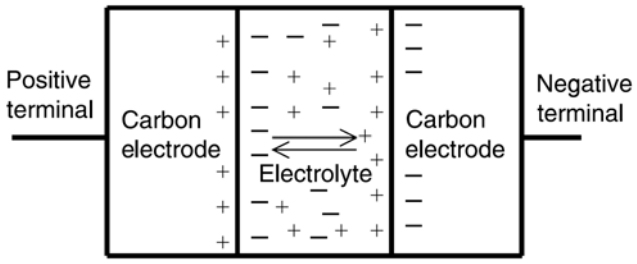
ضریب توان لامپ‌های فلورسنت و لامپ‌های تخلیه‌ای حدود ۰/٤ است و باید جبران‌سازی شود. این یونیت‌های خازنی باید ارزان و مطمئن باشند. از آنجا که این خازن‌ها در محل روشنایی نصب می‌شوند، باید بتوانند دماهای بالا را تحمل کنند. خازن روشنایی از یک فیلم پلی‌پروپیلن نازک تشکیل شده که یک طرف آن فلز نشانده شده است. دو حلقه از چنین فیلمی به دور هم پیچیده می‌شوند تا یک المان استوانه‌ای درست کنند. این خازن‌ها تا ٤٤۰ ولتی موجود هستند.

### ۵-۳-٤- خازن‌های کاغذ/فویل اشباع‌شده

با استفاده از کاغذ اشباع‌شدع به جای کاغذ به عنوان عایق می‌توان خازن را کوچک‌تر ساخت. این روش برای ساخت خازن‌های راه‌انداز موتور استفاده می‌شود. این خازن‌ها دیگر جای خود را به طرح‌های جدیدتری مانند خازن‌های کاغذ متالیزه داده‌اند.

### ۵-۳-۵- خازن‌های اولترا

خازن اولترا وسیله‌ای الکتروشیمیایی است که از دو الکترود متخلخل تشکیل شده که درون الکترولیت قرار گرفته‌اند که بار الکترواستاتیک در خود ذخیره می‌کند (تصویر ۵-۱۰). دو الکترود متخلخل معمولاً از کربن فعال‌شده ساخته می‌شود. الکترولیت معمولاً هیدروکسید پتاسیم یا اسید سولفوریک است. به این ترتیب با هر الکترود خازن تشکیل می‌شود، و خازن‌ها با هم سری می‌شوند. واکنش شیمیایی خازن‌های اولترا مانند باتری‌ها است ولی روش کارکرد این است که آنها را در محدودهٔ ولتاژی به کار برد که باعث ذخیرهٔ بار در آنها شود. مقاومت بین سلول‌ها به خاطر وجود الکترولیت بسیار کوچک‌تر از باتری است، بنابراین انرژی ذخیره شده در آنها می‌تواند ده‌ها برابر باتری‌ها باشد.



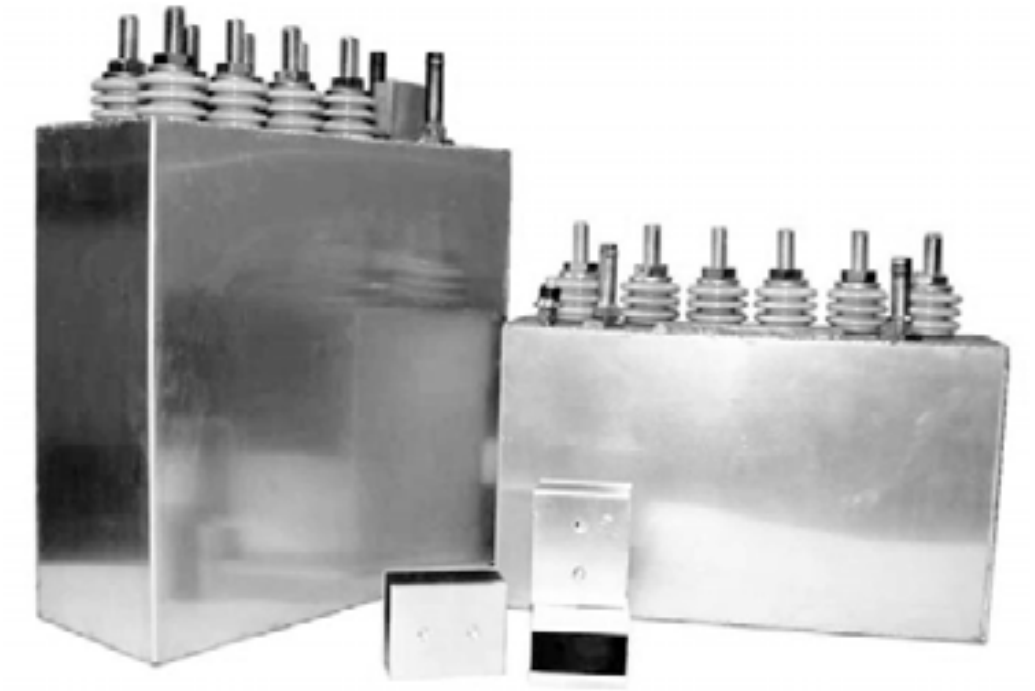

**تصویر ۵-۱۰: یک خازن اولترا**

### ۵-۳-٦- خازن‌های کموتاسیون

یکی از کاربردهای خازن کموتاسیون در چاپرهای کنترل‌شده با تایریستور در مدارهای اینورتر است. وقتی که تایریستور شروع به هدایت می‌کند، برای خاموش شدن (کموتاسیون) باید جریان عبوری با استفاده از منبع یا جریان مخالف ناشی از خازن کموتاسیون به صفر برسد. خازن‌های اشباع‌شده، کاغذ متالیزه، و فیلم پلاستیکی با دی‌الکتریک مخلوط می‌توانند این کار را انجام دهند. ولتاژ کاری می‌تواند بین ۲۰۰ تا ۱۲۰۰ ولت مستقیم باشد. این خازن‌ها در فرکانس منبع شارژ و دشارژ می‌شوند، بنابراین در انتخاب آنها باید دقت کرد.

### ۵-۳-۷- خازن‌های فرکانس بالا

در فرکانس‌های بالا، حرارت تولید شده در خازن بیشتر است و باید مورد توجه قرار گیرد. خازن‌های فرکانس بالا برای حرارت دادن القایی، پالس، کموتاسیون، مخابرات، درایوها، تجهیزات بای‌پَس، مبدل‌های فرکانسی، فیلترها، منبع تغذیهٔ ولتاژ بالا، اسنابرها[1]، مبدل جرقه، و فیلترهای هارمونیک کاربرد دارند. ولتاژ کاری بین ۱ تا ۳۰۰ کیلوولت و ظرفیت آنها بین ۱۰۰ پیکو فاراد تا ۵ فاراد متغیر است (تصویر ۵-۱۱). این خازن‌ها با روغن پر می‌شوند و روغن نقش عایق الکتریکی و خنک‌کننده را دارد.



**تصویر ۵-۱۱: خازن‌های فرکانس بالا با چند تَپ**

[1] snubbers

# فصل ۶ : آزمایش‌های خازنی

خازن‌های قدرت بر اساس استانداردهای صنعتی تولید و آزمایش می‌شوند. مؤسساتی چون ANSI، IEEE، NEMA، و IEC استانداردها و راهنماهایی برای سطوح ولتاژ و جریان، آزمایش، کاربری، و شرایط کاری منتشر کرده‌اند. اعضاء این مؤسسات مهندسان سیستم، صنعت، شرکت‌های برق، و سازندگان تجهیزات هستند. تمامی جوانب در طراحی آزمایش‌های لازم برای تجهیزات برقی در نظر گرفته شده است. آزمایش‌ها به چند گروه آزمایش طراحی، آزمایش تولید (روتین)، آزمایش‌های میدانی تقسیم می‌شوند:

## ۶-۱- آزمایش‌های طراحی

سازنده آزمایش‌های طراحی را روی تعدادی از یونیت‌های تولید انجام می‌دهد که از تطابق آنها با استاندارد مطمئن شود. این آزمایش‌ها تنها در صورت تغییر اساسی در طراحی یونیت که منجر به تغییر در خصوصیات آن شود تکرار خواهد شد. آزمایش‌های زیر در هنگام طراحی انجام می‌شود:

### ٦-١-١- آزمایش استقامت در برابر ولتاژ ضربه[1]

آزمایش استقامت ولتاژ ضربه بین ترمینال و بدنه انجام می‌شود و ترمینال‌ها به هم متصل می‌شوند. خازن‌هایی که دارای بوشینگ‌هایی با BIL متفاوت هستند، آزمایش روی بوشینگ با BIL کوچک‌تر انجام می‌شود. خازن‌های تک‌بوشینگ که یک الکترود دارند در معرض این آزمایش قرار داده نمی‌شوند. ولتاژ توصیه‌شده برای این آزمایش موج 1.2/50µs با خطای ۳٪ روی پیشانی موج است. خازن باید بتواند ۳ ولتاژ ضربهٔ متوالی را تحمل کند. مقادیر ولتاژهای آزمایش در جدول ٦-١ آمده است.

**جدول ٦-١: آزمایش استقامت عایقی (بر اساس IEEE Standard 18)**

| مقدار BIL (کیلوولت) | حداقل فاصلهٔ خزشی عایق[2] (میلی‌متر) | ولتاژ آزمایش | | |
|---|---|---|---|---|
| | | ٦٠ هرتز، خشک، ١ دقیقه (مقدار مؤثر کیلوولت) | ٦٠ هرتز، مرطوب، ١٠ ثانیه (مقدار مؤثر کیلوولت) | موج ضربهٔ 1.2/50µs (کیلوولت) |
| 30 | 51 | 10 | 6 | 30 |
| 75 | 140 | 27 | 24 | 75 |
| 95 | 250 | 35 | 30 | 95 |
| 125 | 410 | 42 | 36 | 125 |
| 150 | 430 | 60 | 50 | 150 |
| 200 | 660 | 80 | 75 | 200 |

[1] impulse withstand test
[2] insulation creepage distance

### ٦-١-٢- آزمایش بوشینگ

این آزمایش در فرکانس شبکه انجام می‌شود. در صورتی که با سه آزمایش اول هیچ‌گونه تخلیه رخ ندهد، آزمایش موفق ارزیابی می‌شود. اگر تخلیه رخ دهد، سه بار دیگر آزمایش انجام می‌شود. اگر این بار تخلیه رخ ندهد، آزمایش موفق است.

### ٦-١-٣- آزمایش پایداری حرارتی

خازن مورد آزمایش باید از نظر حرارتی پایدار باشد، یعنی دمای نقاط داغ خازن در عرض ٢٤ ساعت به حد پایدار برسد و بیش از ٣ درجهٔ سانتیگراد نوسان نکند. یک نمونه به عنوان خازن «تست» انتخاب می‌شود، دو خازن دیگر با همان مشخصات به عنوان خازن‌های «مانع تهویه» انتخاب می‌شوند؛ این خازن‌ها در طول آزمایش همواره مجاور خازن مورد آزمایش نصب می‌شوند.

می‌توان به جای خازن‌های مانع، از مدل‌های مقاومتی با همان تلفات، مشخصهٔ حرارتی، و ابعاد فیزیکی استفاده کرد. خازن آزمایش در محفظه‌ای بین دو خازن مانع و با رعایت فاصلهٔ توصیه‌شده توسط سازندهٔ خازن نصب می‌شود و طوری انتخاب می‌شود که بیشترین حرارت را در داخل خازن ایجاد کند. دمای هوای درون محفظه در حدود ٤٦ درجهٔ سانتیگراد تثبیت می‌شود و نباید با فن تهویه شود. اجازه داده نمی‌شود که دمای بدنهٔ محفظه بیش از ٥ درجه گرم‌تر از محیط شود. دمای محیط با یک ترموکوپل روی بدنه اندازه‌گیری می‌شود. محل ترموکوپل طوری انتخاب می‌شود که کم‌ترین تأثیر را از تشعشع حرارتی خازن‌ها دریافت کند. هر سه نمونه با این ولتاژ آزمایش برق‌دار می‌شوند:

$$V_T = 1.1 V_R \sqrt{\frac{W_M}{W_A}}$$

که در آن $V_T$ ولتاژ آزمایش، $V_R$ ولتاژ نامی خازن، $W_M$ مقدار ماکزیمم مجاز تلفات، و $W_A$ مقدار تلفات واقعی خازن آزمایش است. ولتاژ آزمایش محاسبه شده به مقدار ولتاژی که در آن خازن ١٤٤٪ توان راکتیو خود را تولید می‌کند محدود می‌شود (مقدار این ولتاژ ٢٠٪ بیشتر از ولتاژ نامی است). این ولتاژ با خطای ٢٪ به مدت ٢٤ ساعت به خازن اعمال می‌شود.

### ٦-١-٤- آزمایش ولتاژ اثر رادیویی

این آزمایش در فرکانس نامی و با ولتاژ ١٥٪ بیشتر از ولتاژ نامی انجام می‌شود. در خازن‌های دو بوشینگه که بوشینگ از بدنه عایق شده، بدنه زمین می‌شود. خازن‌هایی که تنها یک بوشینگ در هر فاز دارند و بدنه خود ترمینال است، آزمایش نمی‌شوند. موارد زیر برای اندازه‌گیری ولتاژ اثر رادیویی باید لحاظ شود:

- دمای خازن باید برابر با دمای محیط باشد
- بوشینگ خازن باید تمیز و خشک باشد

- خازن باید در وضعیت توصیه‌شده توسط سازنده نصب شود

با شرایط مذکور، ولتاژ اندازه‌گیری شده در فرکانس ۱ مگاهرتز نباید از ۲۵۰ میلی‌ولت تجاوز کند.

### ٦-۱-۵- آزمایش میرایی ولتاژ[1]

در این آزمایش خازن با ولتاژ مستقیم برابر با پیکِ ولتاژ نامی شارژ می‌شود. در هنگام قطع از منبع، میرایی ولتاژ خازن اندازه‌گیری می‌شود. زمان افت ولتاژ به ۵۰ ولت یا کمتر برای خازن‌های بیشتر از ٦۰۰ ولت نباید از ۵ دقیقه تجاوز کند. ولتاژ خازن‌های ٦۰۰ ولت یا کمتر باید در مدت ۱ دقیقه به ۵۰ ولت یا کمتر برسد.

### ٦-۱-٦- آزمایش دشارژ با اتصال کوتاه

هدف از آزمایش دشارژ با اتصال کوتاه بررسی صحیح بودن اتصالات و هادی‌های داخلی در هنگام کار عادی خازن است. این آزمایش توسط سازنده بر روی طراحی خاصی یا طرح مشابه که هادی‌هایی با سایز برابر یا کوچک‌تر دارد انجام می‌شود. بنابراین، یک آزمایش خاص می‌تواند بر روی خازن‌هایی با پارامترهای مختلف انجام شود. یک یونیت با ولتاژ مستقیم تا ۲/۵ برابر ولتاژ نامی شارژ و سپس دشارژ می‌شود. این عمل پنج بار تکرار می‌شود. قبل و بعد از این عملیات، ظرفیت خازنی بین در ترمینال با ولتاژ کم اندازه‌گیری می‌شود. مدار دشارژ نباید هیچ المان مقاومتی یا سلفی داشته باشد و می‌تواند یک سوییچ یا فاصلهٔ هوایی با فاصلهٔ ۱ متری از خازن باشد. طول کل مدار دشارژ می‌تواند به ۳ متر برسد. هادی‌های رابط خازن و مدار دشارژ باید مسی باشند و سطح مقطع‌شان حداقل ۱۰ میلی‌متر مربع باشد. افت ظرفیت خازنی بعد از آزمایش باید کمتر از میزان افت ناشی از خرابی یک المان خازنی یا سوختن یک فیوز داخلی باشد.

## ۶-۲- آزمایش‌های روتین

آزمایش‌های روتین، آزمایش‌های زمان تولید هستند که توسط سازنده و بر روی همهٔ خازن‌ها انجام می‌شوند. در هنگام آزمایش، باید از خازن‌های نو و تمیز استفاده کرد. دمای محیط باید با خطای ۵ درجه در ۲۵ درجهٔ سانتیگراد تثبیت شود. آزمایش‌های زیر انجام می‌شود:

### ٦-۲-۱- آزمایش اضافه‌ولتاژ کوتاه مدت

دمای خازن با خطای ۵ درجه در ۲۵ درجهٔ سانتیگراد تثبیت می‌شود و هر خازنی باید یکی از آزمایش‌های ولتاژی زیر را به مدت حداقل ۱۰ ثانیه تحمل کند:

- ولتاژ مستقیم ( $V_{DC} = 4.3V_{rms}$ )
- ولتاژ متناوب دو برابر ولتاژ نامی

[1] voltage decay test

برای یونیت‌های سه‌فاز ستاره، که بوشینگ نوترال جدا دارند یا نوترال به بدنه وصل شده است، آزمایش‌های فوق بین ترمینال و نوترال انجام می‌شود و علاوه بر آن باید آزمایشی با $\sqrt{3}$ برابر ولتاژهای فوق بین بوشینگ‌ها انجام گیرد. این آزمایش باید برای سنجش عایق بین فازها انجام شود. برای یونیت‌های سه‌فاز ستاره که بوشینگ نوترال ندارند و نوترال به بدنه وصل نشده، ولتاژ نامی ولتاژ فاز به فاز خازن است. برای آزمایش همزمان عایق فاز به فاز و آزمایش هر شاخهٔ اتصال ستاره در ولتاژ صحیح، ولتاژ آزمایش بین دو بوشینگ باید ۱۶٪ بیشتر از ولتاژ آزمایش باشد ($2/\sqrt{3}=1.16$). برای خازن‌های سه‌فاز و اتصال مثلث، ولتاژ آزمایش ولتاژ فاز به فاز خازن است. ولتاژ آزمایش باید بین دو بوشینگ اعمال شود.

ظرفیت خازنی باید قبل و بعد از انجام آزمایش اندازه‌گیری شود. اندازه‌گیری اولیه با ولتاژ کم انجام می‌شود. تفاوت ظرفیت خازنی باید ۲٪ ظرفیت اولیه یا معادل از دست دان یک المان خازنی (هر یک کوچک‌تر است)، باشد.

### ٦-٢-٢- آزمایش ترمینال و بدنه

این آزمایش برای خازن‌هایی که یک ترمینال‌شان به بدنه وصل است، انجام نمی‌شود. آزمایش‌های ترمینال و بدنه بر روی خازن‌هایی انجام می‌شود که ترمینال‌های آنها از بدنه‌شان عایق شده است. ولتاژ آزمایش مناسب (جدول ٦-٢) حداقل به مدت ۱۰ ثانیه بین ترمینال‌ها و بدنه انجام می‌شود. برای خازن‌هایی که بوشینگ‌هایی با BIL متفاوت دارند، آزمایش بر روی بوشینگ با BIL کوچک‌تر انجام می‌شود.

**جدول ٦-٢: ولتاژهای آزمایش برای آزمایش اضافه‌ولتاژ کوتاه مدت**

| ولتاژ مؤثر ترمینال به ترمینال (ولت) | پیشانی BIL (کیلو ولت) | ولتاژ مؤثر ترمینال و بدنه (ولت) | |
|---|---|---|---|
| | | indoor | Outdoor |
| 216-300 | 30* | 3,000 | 10,000 |
| 301-1199 | 30* | 5,000 | 10,000 |
| 1,200-5,000 | 75* | 11,000 | 26,000 |
| 1,200-15,000 | 95 | - | 34,000 |
| 1,200-20,000 | 125 | - | 40,000 |
| 1,200-25,000 | 150 | - | 50,000 |
| 1,200-25,000 | 200 | - | 60,000 |
| *: outdoor | | | |

### ٦-٢-٣- آزمایش ظرفیت خازنی

آزمایش‌های ظرفیت خازنی بر روی هر خازن برای اطمینان از قدرت تأمین توان راکتیو و عدم تجاوز از ۱۰٪ اضافه توان راکتیو در ولتاژ و فرکانس نامی در دمای ۲۵ درجهٔ سانتیگراد انجام می‌شود. آزمایش‌های انجام‌شده در دماهای دیگر با لحاظ کردن اثر دما به دمای ۲۵ درجه تبدیل می‌شوند.

### ٦-٢-٤- آزمایش نشت

آزمایش دیگری بر روی خازن‌ها انجام می‌شود تا از عدم وجود نشت در آنها اطمینان حاصل شود. یونیت‌های خازنی تولید شده در یک کوره گرم می‌شوند تا فشار درونی آنها افزایش یابد؛ در صورت وجود نشت مایع درون آنها خارج می‌شود. این آزمایش برای اطمینان از کیفیت درزها، بوش‌ها، و حفره‌های پر شده انجام می‌شود.

### ٦-٢-٥- آزمایش دشارژ با مقاومت

با این آزمایش که بر روی همهٔ خازن‌ها انجام می‌شود، می‌توان از دشارژ صحیح خازن مطمئن شد. ولتاژ خازنی که تا ولتاژ نامی شارژ شده ( $\sqrt{2}$ برابر ولتاژ مؤثر) باید در زمان خاصی به ۵۰ ولت یا کمتر برسد.

### ٦-٢-٦- آزمایش اندازه‌گیری تلفات

در این آزمایش با اندازه‌گیری تلفات اطمینان حاصل می‌کنیم که تلفات کمتر از حد مجاز برای هر یونیت است. آزمایش اندازه‌گیری تلفات به این منظور انجام می‌شود.

### ٦-٢-٧- آزمایش قابلیت فیوز برای خازن‌های دارای فیوز درونی

خازن‌های دارای فیوز درونی در مورد آزمایش دشارژ اتصال کوتاه قرار می‌گیرند. در این آزمایش یک ولتاژ مستقیم برابر با $\sqrt{3}$ برابر ولتاژ نامی به خازن اعمال می‌شود و در یک فاصلهٔ هوایی در نزدیکی خازن دشارژ اتفاق می‌افتد. امپدانس دیگری نباید در مدار باشد. ولتاژ مستقیم به این ترتیب تولید می‌شود که خازن با یک منبع متناوب که پیک آن $\sqrt{3}$ برابر ولتاژ نامی است، شارژ شده و در زمانی که جریان از صفر عبور می‌کند، قطع می‌شود. سپس خازن با ولتاژ پیک دشارژ می‌شود. روش دیگر این است که اگر ولتاژ خازن اندکی بیشتر از ولتاژ مورد نیاز باشد، قدری تأمل می‌کنیم تا مقاومت دشارژ خازن، ولتاژ را به $\sqrt{3}$ برابر ولتاژ نامی برساند.

ظرفیت خازن قبل و بعد از آزمایش اندازه‌گیری می‌شود. افت ظرفیت باید کمتر از مقدار افت در اثر عملکرد یک فیوز داخلی باشد. آزمایش دشارژ را می‌توان قبل یا بعد از آزمایش ولتاژ بین ترمینال‌ها انجام داد؛ ولی اگر بعد از آزمایش ولتاژ انجام شود، اندازه‌گیری ظرفیت برای آزمایش ولتاژ نامی باید بعد از آزمایش دشارژ انجام شود.

## ۶-۳- آزمایش‌های نصب (میدانی)

بعد از نصب خازن‌ها در محل مورد نظر، آزمایش‌های خاصی باید انجام شود تا از نصب صحیح خازن‌ها و تطابق آنها با نیاز مورد نظر اطمینان حاصل شود. آزمایش‌های زیر قبل از برق‌دار کردن بانک‌های خازنی انجام می‌شود:

### ٦-٣-١- اندازه‌گیری ظرفیت

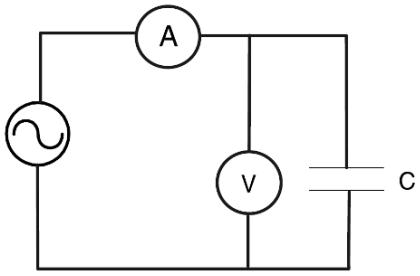
از یک مالتی‌متر برای اندازه‌گیری ظرفیت مؤثر بانک خازنی استفاده می‌شود تا از درستی نصب اطمینان حاصل شود. ولتاژ مورد استفاده کسری از ولتاژ نامی است. هر گونه خرابی در برابر این ولتاژ امپدانس کوچکی از خود نشان می‌دهد و می‌توان آنها را تشخیص داد. با ۱۰٪ افزایش ظرفیت می‌توان تقریب زد که یک یونیت خازنی خرابی دارد. با همین روش می‌توان خرابی خازن‌های کاغذی یا فیلمی را با دقت خوبی تقریب زد. هر خازنی که باد کرده باشد، خازن خراب محسوب می‌شود.

### ٦-٣-٢- آزمایش برق‌دار کردن با ولتاژ کم

در این آزمایش، راکتانس خازنی با اعمال ولتاژ کوچکی به بانک خازنی اندازه‌گیری می‌شود. دیاگرام مدار این آزمایش در تصویر ٦-١ آمده است. ولتاژ اعمال‌شده برای این آزمایش در حدود ۱۲۰ ولت است که از طریق فیوزها به بانک داده می‌شود. اگر اتصال کوتاه یا خطای زمین وجود داشته باشد، فیوز عمل می‌کند و از منبع محافظت می‌کند. ولتاژ خازن و جریان آن به این ترتیب اندازه‌گیری می‌شوند:

$$C = \frac{I}{\omega V}$$

در اینجا، $C$ ظرفیت خازن (فاراد)، $I$ جریان (آمپر)، $V$ ولتاژ (ولت)، و $\omega$ برابر با $2\pi f$ است.




**تصویر ٦-١: دیاگرام مدار اندازه‌گیری راکتانس**

### ٦-٣-٣- آزمایش‌های ولتاژ بالا برای سنجش استقامت عایقی

آزمایش‌های عایقی فشار قوی بر اساس استاندارد NEMA CP-1 انجام می‌شوند. ولتاژهای مناسب در جدول ٦-٣ آمده است. این آزمایش‌ها باید با احتیاط انجام شود زیرا ولتاژ بالا است و خازن وسیله‌ای است برای ذخیره سازی الکتریسیته. با استفاده از فیوز می‌توان از ترکیدن بدنهٔ خازن جلوگیری کرد. جریان خطا در زمان آزمایش باید محدود شود. ممکن است انرژی خازن در زمان آزمایش جریان مستقیم باعث ترکیدگی خازن شود.

در زمان انجام آزمایش جریان متناوب، خازن باید در مقادیری برابر یا کمتر از ولتاژ نامی سوییچ شود. ولتاژ به آرامی تا سطوح ولتاژ جدول ٦-٣ افزایش می‌یابد. در انتهای آزمایش، ولتاژ باید تا ولتاژ نامی یا کمتر از آن کاهش یابد و سپس مدار آزمایش باز شود. زمانی که خازن در معرض ولتاژ بالا قرار می‌گیرد نباید از ۲۰ ثانیه تجاوز کند.

در زمان انجام آزمایش جریان مستقیم، جریان آزمایش شارژ و دشارژ باید به یک آمپر محدود شود. برای این منظور می‌توان یک مقاومت با خازن آزمایش سری کرد. خازن باید بعد از آزمایش با مقاومت مناسب دشارژ گردد. اتصال کوتاه کردن خازن باعث خرابی آن می‌شود.

**جدول ٦-٣: آزمایش ولتاژ میدانی خازن (NEMA Standard CP-1)**

| ولتاژ آزمایش ترمینال به ترمینال (کیلوولت) | | BIL (کیلوولت) | ولتاژ ترمینال به ترمینال (کیلوولت) | | ولتاژ نامی خازن (ولت) |
|---|---|---|---|---|---|
| DC | AC | | DC | AC | |
| 28.5 | 19.5 | 75 | 7.74 | 3.6 | 2,400 |
| | | | 8.93 | 4.15 | 2,700 |
| | | | 13.4 | 6.24 | 4,160 |
| | | | 15.4 | 7.2 | 4,800 |
| 39 | 25.5 | 95 | 21.4 | 9.96 | 6,640 |
| | | | 23.2 | 10.8 | 7,200 |
| | | | 24.5 | 11.4 | 7,620 |
| | | | 25.6 | 11.9 | 7,960 |
| | | | 32.1 | 14.9 | 9,960 |
| | | | 40.2 | 18.7 | 12,470 |
| 39/45 | 25.5/30 | 95/125 | 42.8 | 19.9 | 13,280 |
| 45 | 30 | 125 | 44.5 | 20.7 | 13,800 |
| | | | 46.4 | 21.6 | 14,400 |
| | | | 64.2 | 29.8 | 19,920 |
| | | | 69.6 | 32.4 | 21,600 |

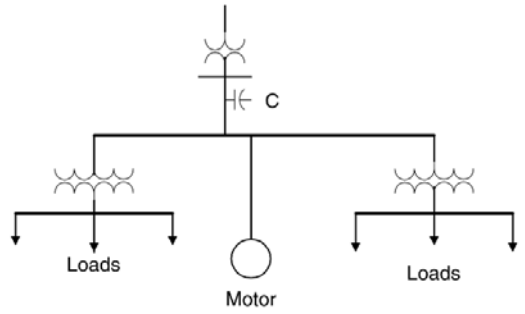
# فصل ۷ : مکان‌یابی خازن‌های شانت

## ۷-۱- معرفی

خازن‌های اصلاح ضریب توان را می‌توان در نقاط مختلفی مانند باس‌های فشار قوی، توزیع، یا در کنار بار نصب کرد. روش‌های زیر در انتخاب محل رایج است:

### ۷-۱-۱- بانک خازن گروهی

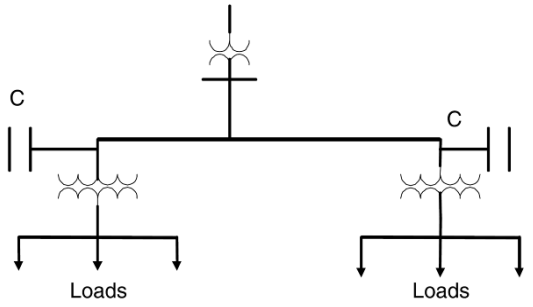
در تصویر ۷-۱ می‌توانید یک بانک خازن گروهی را ببینید. در این روش، ضریب توان چند بار در یک محل اصلاح می‌شود. این تکنیک برای شرکت‌ها یا کارخانه‌هایی که بار توزیع‌شده دارند مناسب است. اگر همهٔ بار با هم وارد یا خارج شود، منطقی است که از این روش استفاده شود. اگر بخشی از بار پیوسته خاموش و روشن می‌شود، این روش مناسب نیست. داشتن یک بانک خازنی بزرگ به صرفه‌تر از چند بانک خازنی کوچک است.




**تصویر ۷-۱: بانک خازنی گروهی**

### ۷-۱-۲- بانک خازنی انشعابی

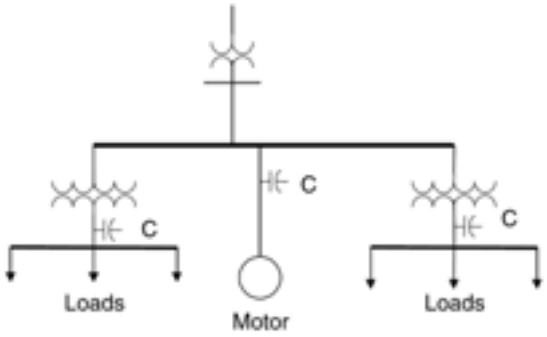
در برخی موارد، بار در شیفت‌های مختلف روشن و خاموش می‌شود. بار می‌تواند فیدر یا مدارهای چند شاخه باشد. بنابراین، می‌توان بانک خازنی را همراه آن بارها خاموش و روشن کرد (تصویر ۷-۲). این نوع بانک خازنی تلفات در مدار اولیه را کاهش نمی‌دهد.




**تصویر ۷-۲: بانک خازنی انشعابی**

### ۷-۱-۳- بانک خازنی محلی

دیاگرام بانک خازنی را می‌توان در تصویر ۷-۳ مشاهده کرد. در این نوع جبران‌سازی، بارها هر یک بانک خازنی خود را دارند. این نوع بانک برای بارهای صنعتی مناسب است. از معایب این روش هزینهٔ زیاد آن است.




**تصویر ۷-۳: بانک خازنی محلی**

## ۷-۲- ملاحظات انتخاب محل خازن

خازن‌های شانت به طور محلی توان راکتیو تأمین می‌کنند و باعث کاهش تقاضا برای کیلووار، بهبود پروفایل ولتاژ، کاهش تلفات فیدر و خط، و کاهش هزینهٔ انرژی می‌شوند. بهترین بازده زمانی حاصل می‌شود که خازن در محل بار نصب شود. به دلایلی مانند ابعاد بار، توزیع بار در نقاط مختلف، و سطوح ولتاژ این امر همیشه میسر نیست. بسته به نیاز، بانک خازنی را می‌توان در فوق فشار قوی (بالاتر از ۲۳۰ کیلوولت)، فشار قوی (٦٦ تا ١٤٥ کیلوولت)، و فیدرهای ۱۳/۸ و ۳۳ کیلوولتی نصب کرد. در سیستم‌های صنعتی و توزیع، بانک‌های خازنی در سطح ٤/١٦ کیلوولت نصب می‌شوند.

### ۷-۲-۱- بانک‌های خازنی روی تیر

در سیستم‌های توزیع، خازن‌های اصلاح ضریب توان مانند ترانس‌های توزیع روی تیر نصب می‌شوند. قطعات زیر روی یک سکو روی تیر نصب می‌شوند: خازن، فیوز، کلید روغن یا خلأ، ترانس کنترل، رلهٔ قطع و وصل، برق‌گیر، و محدود کنندهٔ جریان یا راکتور فیلتر هارمونیک. اتصالات توسط کابل‌های روکش‌دار انجام می‌شود. بانک‌های خازنی روی تیر می‌توانند بسته به نوع بار ثابت یا سوییچ‌شونده باشند. ولتاژ آنها از ٤٦٠ ولت تا ۳۳ کیلوولت متغیر است. توان بانک خازنی از ۳۰۰ تا ۳۰۰۰ کیلووار است. یک نوع رایج این بانک‌ها در تصویر ۷-٤ نشان داده شده است.

**تصویر ۷-٤: بانک خازن روی تیر با فیلتر هارمونیک**

### ۷-۲-۲- بانک‌های خازنی فوق فشار قوی

اغلب بانک‌های خازنی در سطح فوق فشار قوی برای انتقال حجیم توان از نیروگاه‌های دور دست به مصرف‌کننده‌ها است. این خطوط طویل معمولاً افت ولتاژ قابل توجهی در هنگام اوج مصرف دارند. بنابراین، از بانک‌های خازنی برای تأمین توان راکتیو در این خطوط استفاده می‌شود. برخی اوقات این خازن‌ها در صورت لزوم وارد مدار می‌شوند (تصویر ۷-۵).

**تصویر ۷-۵: بانک خازنی فشار قوی با فیلتر**

### ۷-۲-۳- بانک‌های خازنی در پست‌ها

در صورت نیاز به توان راکتیو زیاد در سطح فشار قوی و متوسط، بانک‌های خازنی در پست‌ها نصب می‌شوند. این بانک‌های خازنی در ولتاژهای ۲/٤ تا ۷٦٥ کیلوولت موجود هستند. به دلیل باز بودن و در معرض بودن این بانک‌ها، حفاظت زیادی در پست‌ها مورد نیاز است. این پست‌ها شامل بانک خازنی، یونیت‌های کات‌اوت با فیوز،

مدارشکن‌ها، برق‌گیرها، کنترلرها، عایق‌های فشار قوی، و اتصالات مربوط است (تصویر ۷-٦). در فشار قوی، بانک‌های خازنی برای تأمین توان راکتیو، بهبود پروفایل ولتاژ، و کاهش تلفات خط و ترانس استفاده می‌شوند. در برخی موارد بانک‌های خازنی بعد از تحلیل‌های دقیق در پایداری شبکه در پست‌های خاصی نصب می‌شوند.

**تصویر ۷-٦: بانک خازنی درون پست**

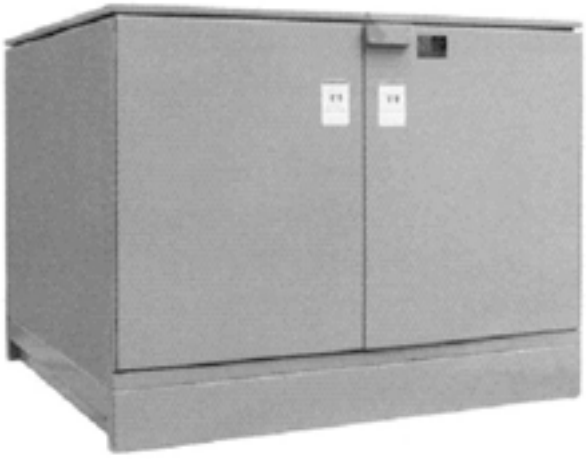
### ۷-۲-٤- بانک خازنی درون تابلو

اگر بانک خازنی در پست‌های صنعتی یا پست‌های کوچک و سر بسته نصب شود، درون محفظهٔ فلزی قرار می‌گیرد. این یونیت‌ها کم‌جا هستند و نیاز کمی به تعمیر و نگهداری دارند (تصویر ۷-۷). طول عمر این خازن‌ها بیشتر است، چون در معرض شرایط سخت محیطی مانند حرارت، سرما، رطوبت، یا گرد و غبار نیستند.

**تصویر ۷-۷: بانک خازنی داخل تابلو با فیلتر**

### ۷-۲-۵- بانک‌های خازنی در سطح توزیع

خازن‌های توزیع در نزدیکی بار، روی تیر، یا در پست‌ها نصب می‌شوند. گرچه این بانک‌ها توان راکتیو بارهای محلی را تأمین می‌کنند، ولی ممکن است نتوانند تلفات فیدر و ترانس را کاهش دهند. یونیت‌های خازنی فشار ضعیف ارزان‌تر از بانک‌های خازنی فشار قوی هستند. حفاظت بانک‌های خازنی در سطح توزیع در برابر انواع خطاها دشوار است. برخی اوقات برای خازن‌های توزیع فشار ضعیف یا متوسط از نصب بر روی سکو (pad) استفاده می‌شود (تصویر ۷-۸). گرچه این نوع نصب مناسب فضای آزاد است، برای حفاظت درون تابلو قرار می‌گیرند؛ مشابه ترانس‌های نصب شده روی سکو (pad).



**تصویر ۷-۸: بانک خازنی ۱۲۰۰ کیلوواری، ۱۵ کیلوولت، سه‌فاز بر روی سکو**

### ۷-۲-۶- بانک‌های خازنی ثابت (Fixed)

در سطح توزیع و برای بارهای خاصی، توان راکتیو مورد نیاز همواره ثابت است. در چنین مواردی، بانک‌های خازنی ثابت استفاده می‌شوند. گاهی این بانک‌ها همراه بار سوییچ می‌شوند. اگر بار همواره و به طور شبانه‌روزی در مدار است، نیازی به خاموش و روشن کردن بانک نیست.

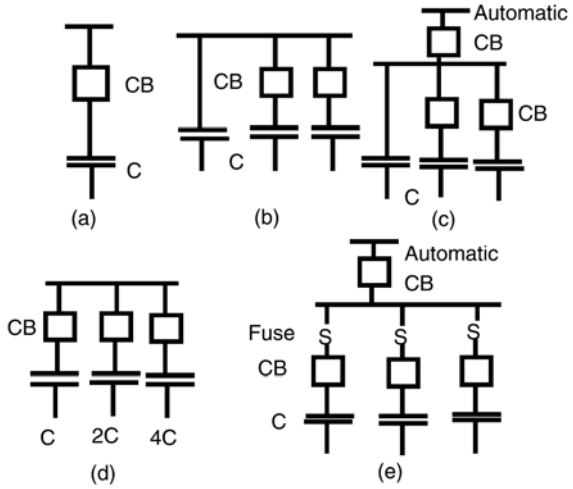
### ۷-۲-۷- بانک‌های خازنی سوییچ‌شونده

در فشار قوی و فیدرها، توان راکتیو در زمان اوج مصرف لازم می‌شود. بنابراین، بانک‌های خازنی در زمان اوج مصرف روشن و در دیگر مواقع خاموش هستند. با سوییچ کردن مناسب بانک توان راکتیو کنترل شده، ضریب توان مطلوب به دست می‌آید. همچنین از اضافه‌ولتاژ در زمان کم‌باری جلوگیری شده، از تلفات ترانس‌ها و فیدرها کاسته می‌شود. با یکی از سیگنال‌های زیر می‌توان بانک را کنترل کرد:

- ولتاژ: با تغییر در بار، ولتاژ تغییر می‌کند.
- جریان: هنگام سوییچ شدن بار
- توان راکتیو: با افزایش نیاز به توان راکتیو، بانک خازنی وارد مدار شده، با کاهش آن از مدار خارج می‌شود.

- زمان: می‌توان با استفاده از یک تایمر در ابتدای شیفت کارخانه بانک را روشن و در انتها آن را خاموش کرد.

روش رایج برای سوییچ کردن بانک، سوییچ کردن در پله‌های مختلف است تا بتوان به نیازهای مختلف بار پاسخ داد. روش‌های مختلف سوییچ کردن بانک در تصویر ۷-۹ نشان داده شده است. در شکل a، بانک خازنی با مدارشکن سوییچ می‌شود. در شکل b، یک خازن ثابت است و دو خازن به طور اتوماتیک سوییچ می‌شوند. مدارشکن‌ها باید طوری انتخاب شوند که بتوانند جریان هجومی ناشی از برق‌دار کردن و سوییچینگ همزمان چند بانک را تحمل کنند.

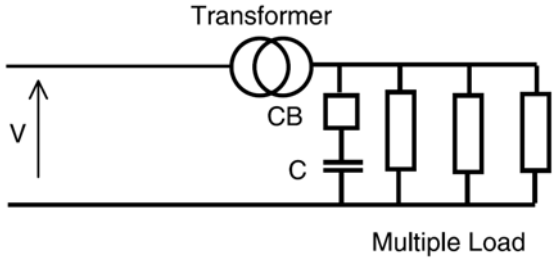



**تصویر ۷-۹: انواع روش‌های سوییچ‌کردن بانک خازنی**

در شکل c، یک مدارشکن اتوماتیک و دو مدارشکن غیر اتوماتیک هستند. در برخی موارد که توان راکتیو بار ماهیت تصادفی دارد، خازن‌ها با الگوریتم‌های منطقی وارد و خارج می‌شوند (شکل d). این امر توسط رله‌های هوشمند (رگولاتور) انجام می‌شود. در شکل e، روش دیگری بیان شده که یک مدارشکن اتوماتیک سه بانک خازنی حفاظت‌شده با فیوز و مدارشکن‌های غیر اتوماتیک را سوییچ می‌کند.

### ۷-۲-۸- بانک‌های خازنی در سمت فشار ضعیف ترانس

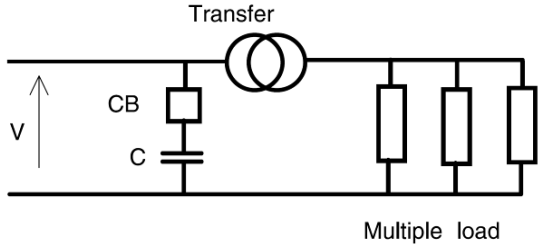
بانک خازنی در نزدیکی بار نصب می‌شود تا توان راکتیو مورد نیاز را در محل تأمین کند. در سیستمی که تجهیزات متعددی نیاز به توان راکتیو دارند، توان راکتیو بسته به نوع بار نوسان می‌کند. در زمان کم‌باری، بانک خازنی باعث ایجاد اضافه‌ولتاژ می‌شود و باید از جبران‌سازی اضافی جلوگیری شود. بنابراین، نصب بانک خازنی سوییچ‌شونده در سمت فشار ضعیف ترانس روش مناسبی به نظر می‌رسد. علاوه بر این، باید هارمونیک‌های سیستم بررسی شوند تا بانک خازنی خازن با راکتانس ترانس ایجاد رزونانس نکند (تصویر ۷-۱۰).




**تصویر ۷-۱۰: نصب بانک خازنی در سمت فشار ضعیف ترانس**

### ۷-۲-۹- بانک‌های خازنی در سمت فشار قوی ترانس

این نوع نصب همانند نصب در سمت فشار ضعیف ترانس می‌تواند توان راکتیو مدار را تأمین کند. بسته به نیاز توان راکتیو مدار می‌توان بانک را خاموش و روشن کرد و از اضافه‌ولتاژ جلوگیری نمود. هزینهٔ خازن فشار قوی بیشتر است. همانند خازن فشار ضعیف، مسایل مربوط به جبران‌سازی اضافه و رزونانس بررسی شود. دیاگرام در تصویر ۷-۱۱ نشان داده شده است. برخی اوقات ممکن است که بتوان ضریب توان بار را در محل تصحیح کرد. مزایا و معایب این روش در جدول ۷-۱ آمده است.




**تصویر ۷-۱۱: نصب بانک خازنی در سمت فشار قوی ترانس**

**جدول ۷-۱: مقایسهٔ تصحیح ضریب توان در سمت فشار قوی با تصحیح ضریب توان در محل بار**

| تصحیح ضریب توان در اولیهٔ ترانس | تصحیح ضریب توان در محل بار |
|---|---|
| یک بانک خازنی نیاز است | سه بانک خازنی نیاز است |
| نصب بانک در یک محل | نصب بانک در سه محل |
| outdoor روی قفسه یا indoor در تابلو | indoor در تابلو یا روی تیر |
| تعمیر و نگهداری آسان | نیاز بیشتر به تعمیر و نگهداری |
| می‌توانند نقش فیلتر تیون‌شده را بازی کند | ترانس نقش فیلتر را بازی می‌کند |
| نقطهٔ رزونانس کنترل می‌شود | چند نقطهٔ رزونانس وجود دارد |
| امپدانس دیده شده از محل فیلتر پایدار است | امپدانس سیستم چند نقطهٔ رزونانس می‌بیند |
| هزینهٔ کمتر به دلیل نصب در یک محل | هزینهٔ بیشتر به دلیل نصب در چند محل |
| امکان سوییچ کردن بر اساس بار وجود ندارد | با تغییرات بار انعطاف‌پذیر است |
| برای سوییچ کردن خازن یک مدارشکن نیاز است | برای سوییچ کردن خازن چند سوییچ نیاز است |

### ۷-۲-۱۰- بانک‌های خازنی سیار

گاهی لازم می‌شود که به طور موقت خازن‌های شانت در سیستم توزیع نصب شود تا مشکل اضافه‌بار برطرف شود تا زمانی که تغییرات سیستم نهایی شود. در این صورت از بانک‌های خازنی سیار استفاده می‌شود. این بانک‌های خازنی به صورت یونیت‌های تک‌فاز و سه‌فاز موجود هستند. نمونهٔ این بانک‌ها در تصویر ۷-۱۲ نشان داده شده است.

**تصویر ۷-۱۲: بانک خازنی سیار**

## ۷-۳- نکات مهم در مورد بانک‌های خازنی در پست‌های برق

خازن‌های شانت برای بهبود ضریب توان در پست‌های توزیع و انتقال نصب می‌شوند. این خازن‌ها برای تأمین کیلووار لازم در سمت فشار قوی ترانس‌ها نصب می‌گردند. به این ترتیب ضریب توان در سمت فشار قوی ترانس بهبود می‌یابد. خازن‌های سطح انتقال بر اساس ضریب توان و پایداری شبکه انتخاب می‌شوند. بانک خازنی برای بهبود ضریب توان، کاهش تلفات، افزایش ولتاژ سیستم، و بهبود پایداری نصب می‌شود.

### ۷-۳-۱- ماکزیمم ابعاد بانک خازنی

ماکزیمم سایز بانک خازنی بر اساس تغییر در ولتاژ حالت ماندگار، حدود مجاز گذراهای سوییچینگ، و قابلیت‌های مدارشکن انتخاب می‌شود. با قطع و وصل شدن بانک خازنی، ولتاژ ماندگار افزایش یا کاهش می‌یابد. برای آن که اثر تغییر ولتاژ از دید مصرف‌کننده به حداقل برسد، میزان مجاز تغییرات ولتاژ در حد ۲ تا ۳ درصد محدود می‌شود. این تغییر ولتاژ (بر حسب درصد) از معادلهٔ زیر به دست می‌آید:

$$\Delta V = \left( \frac{MVA_C}{MVA_{SC}} \right) \times 100$$

در اینجا $MVA_C$ سایز بانک خازنی، و $MVA_{SC}$ سطح اتصال کوتاه در محل بانک است. جریان نامی مدارشکن بانک خازنی فاکتور مهمی در انتخاب ماکزیمم سایز بانک خازنی است. مقدار این جریان برای بانک‌های زمین‌نشده ۲۵٪ بیشتر از جریان نامی، و برای بانک‌های زمین‌شده ۳۵٪ بیشتر از جریان نامی است.

**مثال**

بانک خازنی در پستی با این مشخصات در نظر بگیرید: ۱۱۵ کیلوولت، سه‌فاز، ٦۰ هرتز. سطح اتصال کوتاه شبکه در محل پست ٤۰ کیلوآمپر است. بانک خازنی مورد نظر از دو بانک ۳۰ مگاواری با اتصال ستاره تشکیل شده است. در پیشنهاد اول، دو بانک با استفاده از یک مدارشکن سوییچ می‌شوند. در پیشنهاد دیگر، هر بانک با یک مدارشکن مجزا و مجهز به تأخیر زمانی سوییچ می‌شود. در مورد نکات فنی این پروژه بحث کنید.

**پاسخ**

یکی از پارامترهای مؤثر بر تغییر ولتاژ در هنگام وصل سایز بانک خازنی است. بنابراین تغییر ولتاژ ناشی از بانک ۳۰ مگاواری و ٦۰ مگاواری محاسبه می‌شوند:

$$MVA_{SC} = \sqrt{3} \times 115kV \times 40kA = 7967MVA$$

$$\Delta V_{30MVAR} = \frac{30MVAR}{7967MVAR} \times 100 = 0.38\%$$

$$\Delta V_{60MVAR} = \frac{60MVAR}{7967MVAR} \times 100 = 0.75\%$$

در هر دو مورد تغییر ولتاژ قابل توجه نیست، بنابراین هر دو روش قابل قبول هستند. با یک مدارشکن تنها یک بانک را می‌توان سوییچ کرد ولی با داشتن دو مدارشکن، دو بانک در اختیار داریم که انعطاف بیشتر و قابلیت اطمینان بهتری به دست می‌دهد.

### ۷-۳-۲- مینیمم ابعاد بانک خازنی

مقدار مینیمم بانک خازنی تحت تأثیر روش تشخیص عدم تعادل بانک و هماهنگی فیوزها است. با عمل کردنِ یک فیوز در خازن، عدم تعادلی در بانک پیش می‌آید که سبب اضافه‌ولتاژ می‌شود. این اضافه‌ولتاژ به ۱۰٪ ولتاژ نامی محدود می‌شود. به این منظور باید تعداد حداقلی از المان‌های خازنی با هم موازی شده باشند (جدول ۷-۲). برای عمل کردن صحیح و ایمن بانک رعایت این اعداد لازم است. وقتی یک المان خازنی اتصال کوتاه شود، تا موقعی که فیوز عمل کند، دیگر خازن‌هایی که با آن خازن سری هستند دچار اضافه‌ولتاژ می‌شوند. فیوز باید به سرعت عمل کند تا دیگر خازن‌ها آسیب نبینند. اضافه‌ولتاژهای مجاز در جدول ٥-٦ (فصل ٥) آمده‌اند. در جدول ۷-۳ ولتاژ مجاز خازن‌های سری دیگر در صورت اتصالی کردن خازن فاز A آمده است. مقادیر دو جدول فوق، به همراه جدول سایز فیوز تعداد حداقل خازن‌های بانک را تعیین می‌کنند. بانک خازنی باید طوری طراحی شود که از مقادیر جدول ۷-۳ تخطی نشود. عوامل مؤثر در این مسأله، اتصالات بانک، تعداد المان‌های سری، تعداد المان‌های موازی، و مشخصهٔ فیوز است.

**جدول ۷-۲: تعداد حداقل خازن‌های سری در هر گروه**

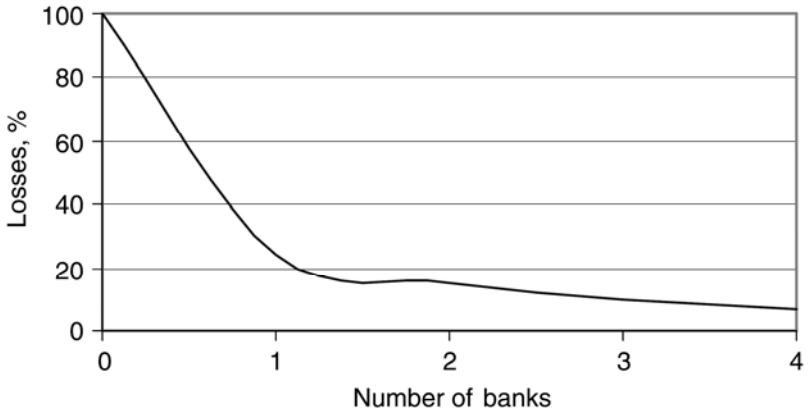
| تعداد خازن‌های سری | ستارهٔ زمین‌شده یا مثلث | ستارهٔ زمین‌نشده | ستارهٔ دوبل زمین‌نشده |
|---|---|---|---|
| 1 | - | 4 | 2 |
| 2 | 6 | 8 | 2 |
| 3 | 8 | 9 | 8 |
| 4 | 9 | 10 | 9 |
| 5 | 9 | 10 | 10 |
| 6 | 10 | 10 | 10 |
| 7 | 10 | 10 | 10 |
| 8 | 10 | 11 | 10 |
| 9 | 10 | 11 | 10 |
| 10 | 10 | 11 | 11 |
| 11 | 10 | 11 | 11 |
| <12 | 11 | 11 | 11 |

**جدول ۷-۳: ولتاژ (per unit) خازن‌های سالم**

| تعداد المان‌های سری | ستارهٔ زمین‌شده یا مثلث | | | ستارهٔ زمین‌نشده | | | ستارهٔ دوبل زمین‌نشده | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $V_A$ | $V_B$ | $V_C$ | $V_A$ | $V_B$ | $V_C$ | $V_A$ | $V_B$ | $V_C$ |
| 1 | - | 1 | 1 | - | 1.73 | 1.73 | 0 | 1.73 | 1.73 |
| 2 | 2 | 1 | 1 | 1.5 | 1.15 | 1.15 | 1.71 | 1.08 | 1.08 |
| 3 | 1.5 | 1 | 1 | 1.29 | 1.08 | 1.08 | 1.38 | 1.04 | 1.04 |
| 4 | 1.33 | 1 | 1 | 1.2 | 1.05 | 1.05 | 1.26 | 1.03 | 1.03 |
| 5 | 1.25 | 1 | 1 | 1.15 | 1.04 | 1.04 | 1.2 | 1.02 | 1.02 |

### ۷-۳-۳- ابعاد بانک و کاهش تلفات

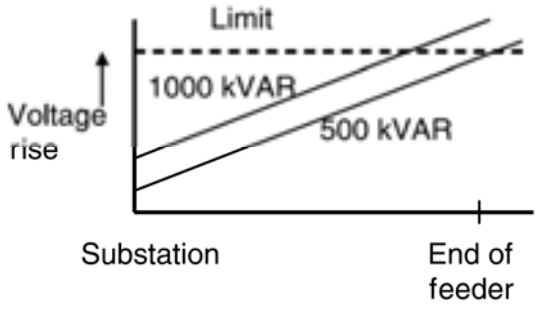
یکی از مزایای نصب بانک خازنی کاهش تلفات خط و ترانس است. از نظر هزینه بانک خازنی بزرگ‌تر به صرفه‌تر است. داشتن چند بانک در یک محل انعطاف بیشتری ایجاد می‌کند چون بسته به نیاز سوییچ می‌شوند. در تصویر ۷-۱۳ می‌توان اثر کاهش تلفات را برای باری که توزیع یکنواخت دارد، مشاهده کنید. در یک بار خاص، می‌توان با بهینه کردن محل خازن‌ها تلفات را به حداقل رساند؛ وگرنه کاهش تلفات به دست آمده در برابر هزینهٔ بانک بسیار ناچیز خواهد بود.




**تصویر ۷-۱۳: میزان کاهش تلفات برای یک بار خاص**

### ۷-۳-٤- اثر محدود کردن افزایش ولتاژ[1] بر خازن‌ها

محدود کردن افزایش ولتاژ باعث محدودیت در مقدار خازن قابل سوییچ کردن می‌شود. به دلیل مشکلاتی مانند فلیکر، محدود کردن افزایش ولتاژ باعث می‌شود که ماکزیمم سایز بانک خازنی در محل مورد نظر محدود شود و یا لازم شود که بانک به پست نزدیک‌تر گردد (تصویر ۷-۱٤).



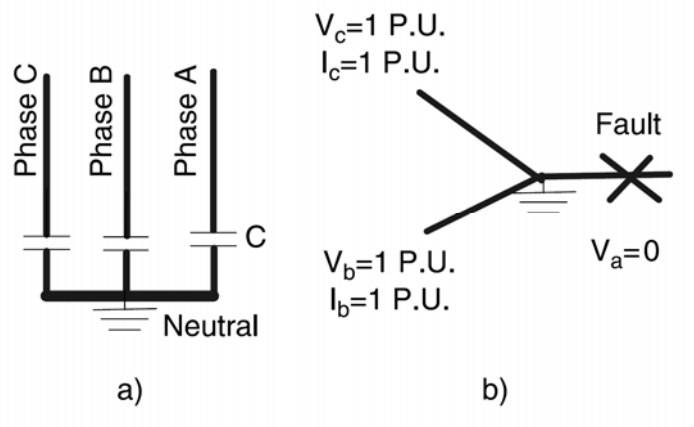

**تصویر ۷-۱٤: محدودیت‌های ناشی از محدود کردن افزایش ولتاژ**

## ۷-۴- انواع اتصالات بانک خازنی

### ۷-٤-۱- ستارهٔ زمین‌شده

در تصویر ۷-۱۵ (a) نمونهٔ بانک خازنی با اتصال ستارهٔ زمین‌شده نشان داده شده است. مزیت‌های این اتصال نسبت به ستارهٔ زمین‌نشده این است که هزینهٔ کمتری دارد. زیرا لازم نیست نقطهٔ نوترال تا حد BIL عایق شود، گذراهای مدارشکن کمتر و فشار مکانیکی بر تابلو و اتصالات مکانیکی کمتری است. معایب این نوع اتصال نسبت به ستارهٔ زمین‌نشده جریان هجومی بیشتر و جریان زمین بالاتر است. جریان زمین باعث اختلال در خطوط تلفن می‌شود. برای حفاظت این بانک‌ها مسیری با امپدانس کم برای جریان خطا پیش‌بینی می‌شود و نیاز به رلهٔ نوترال وجود دارد. در بانک‌های ستارهٔ زمین‌شده، به دلیل جریان خطای خط به زمین نیاز به فیوزهای محدود کنندهٔ جریان داریم. در صورتی که در فاز خطا رخ دهد، پیش از عمل کردن فیوز ولتاژ فاز مذکور به صفر می‌رسد (تصویر ۷-۱۵ راست). از آنجا که نقطهٔ نوترال زمین شده است، ولتاژ فازهای دیگر همچنان مقدار خود را حفظ می‌کنند و جریان در آنها تغییر نمی‌کند. به همین دلیل خازن‌های آن فازها سالم می‌مانند.

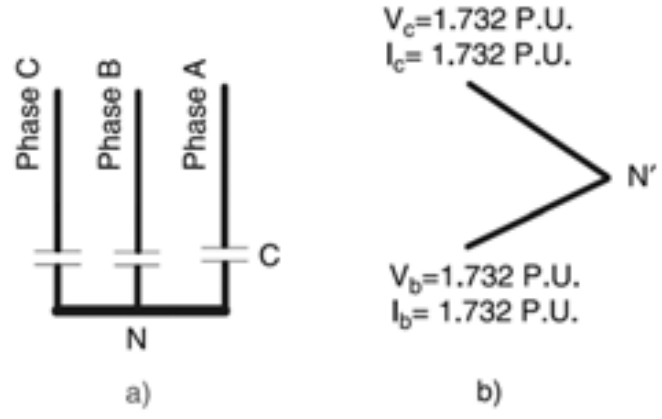
[1] voltage rise limit




**تصویر ۷-۱۵: (a) اتصال ستارهٔ زمین‌شده، (b) خطا در یک فاز**

### ۷-٤-۲- ستارهٔ زمین‌نشده

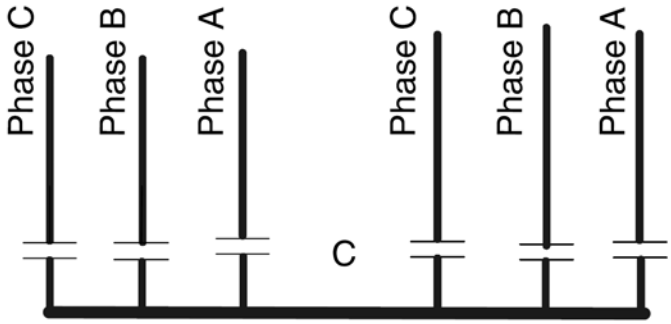
نمونهٔ این بانک خازنی در تصویر ۷-۱٦ (a) نشان داده شده است. در این حالت اگر خازنی خراب شود، قبل از آنکه فیوز آن را قطع نماید، ولتاژ نوترال تا ولتاژ فاز افزایش می‌یابد (تصویر ۷-۱٦ راست). بنابراین ولتاژ فازهای دیگر برابر با ولتاژ خط به خط می‌شود. این باعث می‌شود که جریان آن فازها تا $\sqrt{3}$ برابر جریان نامی افزایش یابد. در این حالت ۳ برابر جریان نامی وارد نقطهٔ خطا می‌شود. این افزایش ولتاژ و جریان باعث خرابی‌های بیشتر می‌شود. بانک‌های خازنی ستارهٔ زمین‌نشده اجازهٔ عبور جریان توالی صفر، هارمونیک سوم، یا جریان‌های بزرگ دشارژ در زمان خطاهای زمین را نمی‌دهد. همچنان احتمال خطاهای فاز به فاز وجود دارد. مزیت دیگر این است که اضافه‌ولتاژهایی که در ثانویهٔ ترانس‌های جریان رخ می‌دهد به اندازهٔ بانک‌های زمین‌شده نیست. ولی باید نقطهٔ نوترال تا حد ولتاژ خط عایق شود، زیرا در هنگام سوییچ‌شدن بانک یا خرابی یک خازن به طور لحظه‌ای ولتاژ این نقطه با ولتاژ خط برابر می‌شود. برای بانک‌های بالاتر از ۱۵ کیلوولت این آرایش گران تمام می‌شود.




**تصویر ۷-۱٦: (a) اتصال ستارهٔ زمین‌نشده، (b) خطا در یک فاز**

### ۷-٤-۳- ستارهٔ دوبل زمین‌نشده

نمونهٔ این بانک در تصویر ۷-۱۷ نشان داده شده است. این اتصال معادل ستارهٔ زمین‌نشده است. این اتصال از آن جهت رایج است که به سادگی می‌توان عدم تعادل در نوترال را تشخیص داد. اگر با سوییچ‌های تک‌پل بخواهیم خازن‌های ستارهٔ زمین‌شده، ستارهٔ زمین‌نشده، و مثلث را همراه ترانس سوییچ کنیم، باعث فرورزونانس و اضافه‌ولتاژ می‌شود. اگر نوترال ترانس زمین شده باشد یا چند ترانس تک‌فاز در فیدر وجود داشته باشد، در صورتی که در بالادست فیدر سوییچ تک‌پل وجود داشته باشد در بانک‌های خازنی زمین‌نشده ایجاد فرورزونانس می‌کند. در چنین صورتی ترانس و برق‌گیر هر دو آسیب می‌بینند. اگر ترانس سه‌فاز زمین‌نشده باشد، به دلیل مشابه باید از بانک‌های خازنی زمین‌شده دوری کرد. گرچه احتمال بروز فرورزونانس در این مدارها وجود دارد، حضور بار مقاومتی بزرگ در ترانس می‌تواند از آن جلوگیری کند.




**تصویر ۷-۱۷: اتصال ستارهٔ دوبل زمین‌نشده**

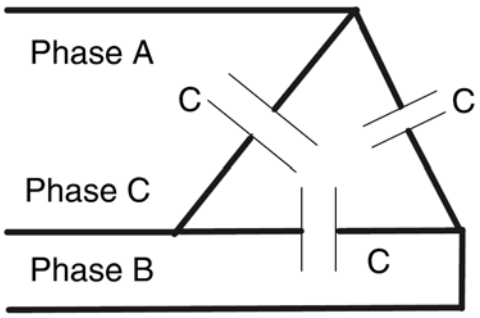
### ۷-٤-٤- ستارهٔ دوبل زمین‌شده

وقتی بانک بسیار بزرگ می‌شود، باعث می‌شود که خازن‌های سری زیاد شوند (بیش از ٤٦٥٠ کیلووار)، در نتیجه حفاظت بانک با فیوزها دشوار می‌شود. به همین دلیل بانک به دو ستاره تقسیم می‌شود. خصوصیات بانک ستارهٔ دوبل مانند ستارهٔ زمین‌شدهٔ تکی است. هر دو نوترال باید با اتصالی واحد به زمین وصل شوند. در این طرح می‌توان با یک رلهٔ معمولی عدم تعادل را تشخیص داد، زیرا توالی صفر هر دو ستاره را تحت تأثیر قرار می‌دهد، ولی خرابی خازن به صورت عدم تعادل در نوترال دیده می‌شود. برای عملکرد صحیح فیوز خازنی باید تمهیداتی مانند تأخیر زمانی اندیشید. اگر خازن‌ها بدون فیوز هستند، تأخیر را می‌توان کوتاه کرد زیرا نیازی به هماهنگی فیوزی نیست. اگر جریان عبوری از هر شاخه بیشتر از جریان نامی خازن باشد، باید خازن‌های بیشتری با هم موازی کرد.

### ۷-٤-۵- مثلث

بانک‌های خازنی با اتصال مثلث عمدتاً در ولتاژهای پایین استفاده می‌شود (تصویر ۷-۱۸). در این اتصال از خازن‌های دو بوشینگی با بدنهٔ زمین‌شده یا تک‌بوشینگه با بدنهٔ ایزوله استفاده می‌شود. به دلیل آنکه تنها یک گروه

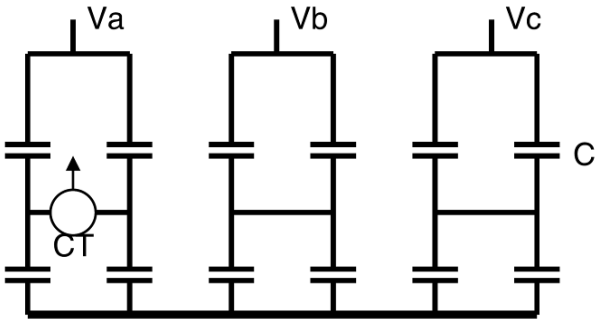
خازن سری موجود است، عدم تعادل باعث اضافه‌ولتاژ بر خازن نمی‌شود و نیازی به این نوع حفاظت نیست. در اتصال مثلث امکان حرکت هارمونیک سوم وجود دارد. برای هر خازن باید از فیوز استفاده شود تا سیستم را از خطای فاز به فاز حفاظت کند. به این دلیل باید از فیوزهای محدود کنندهٔ جریان استفاده کرد که گران‌تر از فیوزهای انفجاری هستند.




**تصویر ۷-۱۸: اتصال مثلث**

### ۷-٤-٦- اتصال پُل (H)

این نوع اتصال در تصویر ۷-۱۹ نشان داده شده است. در این اتصال، خازن‌های هر فاز به یک پل تقسیم شده‌اند و یک ترانس جریان در مرکز پل نصب می‌شود. از جریان عدم تعادل که از مرکز پل رد می‌شود برای تشخیص تغییر در ظرفیت خازن استفاده می‌شود. این نوع اتصال در اروپا و استرالیا کاربرد دارد.




**تصویر ۷-۱۹: اتصال H در سیستم سه‌فاز**

**مثال**

همهٔ ترکیب‌های ممکن برای اصلاح ضریب توان باری سه‌فاز، ٦۰ هرتز، و در سطح ۱۳/۸ کیلوولت را پیدا کنید. مشخصات بار به شرح زیر است:

$$P = 1800kW, Q = 1400kVAR$$

**پاسخ**

پاسخ در جدول ۷-٤ آمده است.

جدول ۷-٤: پاسخ مثال

| کیلووار | کیلوولت | تعداد | کیلووار کل | کیلووار تحویلی | کیلووار منتج | کیلو ولت‌آمپر | جریان | ضریب توان |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1400 | 2280.35 | 95.41 | 0.79 |
| 50 | 15.125 | 3 | 150 | 124.87 | 1275.13 | 225.89 | 92.29 | 0.82 |
| 100 | 15.125 | 3 | 300 | 249.74 | 1150.26 | 2136.14 | 89.36 | 0.84 |
| 150 | 15.125 | 3 | 450 | 374.61 | 1025.39 | 2071.58 | 86.67 | 0.87 |
| 200 | 15.125 | 3 | 600 | 499.48 | 900.52 | 2012.69 | 84.21 | 0.89 |
| 300 | 15.125 | 3 | 900 | 749.22 | 650.78 | 1914.03 | 80.08 | 0.94 |
| 50 | 15.125 | 6 | 300 | 249.74 | 1150.26 | 2136.14 | 89.37 | 0.84 |
| 100 | 15.125 | 6 | 600 | 499.48 | 900.52 | 2012.69 | 84.21 | 0.89 |
| 150 | 15.125 | 6 | 900 | 749.22 | 650.78 | 1914.03 | 80.08 | 0.94 |
| 200 | 15.125 | 6 | 1200 | 998.96 | 401.04 | 1844.13 | 77.16 | 0.98 |

## ۷-۵- کابل‌های مخصوص خازن قدرت

معمولاً برای اتصال خازن‌های اصلاح ضریب توان به شبکه از کابل‌های سه‌فاز استفاده می‌شود. این خازن‌ها پیوسته جریان می‌کشند. ممکن است به دلیل خطاهای مختلف لازم شود کابل جریان زیادی حمل کند؛ مانند:

- افزایش ولتاژ شبکه به میزان ۱۰ درصد
- افزایش فرکانس شبکه به میزان ۰/۵ درصد
- افزایش ظرفیت خازن (خطای سازنده) به میزان ۱۰ درصد
- هارمونیک‌های جریان

برای در نظر گرفتن خطاهای فوق، حاشیهٔ امنیتی ۲۵ تا ۳۰ درصد برای انتخاب کابل در نظر گرفته می‌شود.

### ۷-۵-۱- انتخاب کابل برای بانک خازنی

اتصالات کابلی متنوعی برای بانک خازنی وجود دارد. کابل‌های بر اساس سطح ولتاژ، نوع هادی (مس یا آلومینیوم)، نوع عایق، نوع شیلد، و نحوهٔ نصب طبقه‌بندی می‌شوند. برای درک بهتر اصول اولیهٔ انتخاب کابل، یک کابل مسی ۵ کیلوولتی و بدون شیلد در نظر بگیرید. پارامترهای رایج این کابل برای نصب روی سینی غیر مغناطیسی در جدول ۷-۵ آمده است. سایز کابل، سطح مقطع هادی، مقاومت واحد طول، راکتانس واحد طول، و جریان نامی این مقادیر برای محاسبهٔ افت ولتاژ و جریان اتصال کوتاه مفید هستند. افت ولتاژ هر فاز به دلیل عبور جریان از رابطهٔ زیر به دست می‌آید:

$$V_d = I\left(R\cos\theta + X\sin\theta\right)$$

در اینجا $\theta$ ضریب توان، و $R$ و $X$ به ترتیب مقاومت و راکتانس کابل هستند. افت ولتاژ باید در محدودهٔ مجاز باشد. همچنین کابل باید بتواند جریان اتصال کوتاه را در مواقع خطا حمل کند. جریان اتصال کوتاه برای هادی مسی از این رابطه حساب می‌شود:

$$I_{SC} = A\sqrt{\frac{0.0297}{t}\log\left[\frac{T_2 + 234.5}{T_1 + 234.5}\right]}$$

در اینجا، $t$ زمان برطرف شدن خطا، $A$ سایز کابل بر حسب میلی‌متر، $T_1$ و $T_2$ دمای کابل قبل و بعد از خطا (درجهٔ سانتیگراد) است.

**جدول ۷-۵: اطلاعات کابل‌های ۵ کیلوولتی بدون شیلد**

| KCMIL | میلی‌متر مربع | مقاومت (هر ۱۰۰۰ فوت) | راکتانس (هر ۱۰۰۰ فوت) | جریان (آمپر) |
|---|---|---|---|---|
| 8 | 8.37 | 0.817 | 0.0374 | 55 |
| 6 | 13.2 | 0.514 | 0.0353 | 84 |
| 4 | 21.15 | 0.323 | 0.0334 | 109 |
| 2 | 33.62 | 0.203 | 0.0317 | 140 |
| 1 | 44.21 | 0.161 | 0.0317 | 160 |
| 1/0 | 53.49 | 0.128 | 0.0308 | 182 |
| 2/0 | 67.43 | 0.102 | 0.0302 | 207 |
| 3/0 | 85.01 | 0.0809 | 0.0294 | 235 |
| 4/0 | 107.2 | 0.0644 | 0.0288 | 267 |
| 250 | 127 | 0.0546 | 0.0293 | 291 |
| 350 | 177 | 0.0395 | 0.0279 | 350 |
| 500 | 253 | 0.0286 | 0.027 | 419 |
| 750 | 380 | 0.0202 | 0.0267 | 505 |
| 1000 | 507 | 0.0164 | 0.026 | 568 |

**مثال**

یک بانک خازنی سه‌فاز، ٤/١٦ کیلوولت، ٦٠ هرتز با ١٨٠٠ کیلووار توان در نظر بگیرید که با کابلی ٣٠٠ فوتی (٩١ متر) تغذیه می‌شود. بانک با مدارشکن باز و بسته می‌شود. کابل مناسب این بانک را انتخاب کنید.

**پاسخ**

$$Q = 1800kVAR$$
$$V_{line-line} = 4.16kV, V_{phase} = 2.402kV$$
$$I = 249.8A$$

با فرض ضریب توان ۰/۹ و ۳۰٪ حاشیهٔ امنیتی داریم:

$$pf = 0.9 \Rightarrow \theta = 25.8^\circ$$
$$I_{cable} = 1.3 \times 249.8 = 324.8A$$

از جدول ۷-۵، کابل 350 KCMIL، با جریان ۳۵۰ آمپر را انتخاب می‌کنیم:

$$Z_{1000\,ft} = (0.0395 + j0.0279)\Omega$$
$$Z_{300\,ft} = (0.01185 + j0.00837)\Omega$$
$$V_d = 324.8\left(0.01185\cos 25.8^\circ + 0.00837\sin 25.8^\circ\right) = 46.3V$$
$$\frac{46.3V}{2401.8V} \times 100 = 1.9\%$$

اگر فرض کنیم دمای کابل در حالت عادی ۹۰ درجهٔ سانتیگراد و در زمان خطا ۲۵۰ درجهٔ سانتیگراد باشد، و خطا در عرض ۳ سیکل (یک‌بیستم ثانیه در سیستم‌های ٦۰ هرتزی) رفع گردد:

$$I_{SC} = A\sqrt{\frac{0.0297}{t}\log\left[\frac{T_2 + 234.5}{T_1 + 234.5}\right]} = 112.5kA$$

$$\text{Symmetrical } I_{SC} = 40kA$$

$$\text{Asymmetrical } I_{SC} = 1.6 \times 40kA = 64kA$$

جریان خطای متقارن[1] و نامتقارن[2] کمتر از جریان خطای کابل است، پس این طراحی قابل قبول است.

[1] Symmetrical
[2] Asymmetrical

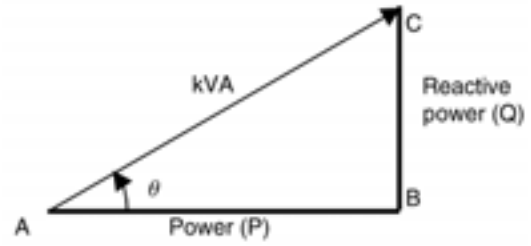
# فصل ۸ : بهبود ضریب توان

## ۸-۱- معرفی

اغلب بارهای صنعتی مانند موتورهای القایی با ضریب توان پایین کار می‌کنند. بیش از ٦٠ درصد بار شامل موتورها است و بنابراین ضریب توان سیستم پایین است. بسته به اندازه و شرایط کاری موتور، ضریب توان آنها از ۰/۳ تا ۰/۹۵ متغیر است. بنابراین ضریب توان در کارخانه‌های صنعتی و شرکت‌های برق دغدغهٔ مهمی است. با اصلاح ضریب توان می‌توان شبکه را بهبود داد. ضریب توان از رابطهٔ زیر به دست می‌آید (تصویر ۸-۱):

$$pf = \frac{P}{S}$$

که در آن $P$ توان اکتیو (کیلووات) و $S$ توان ظاهری (کیلو ولت‌آمپر) است.




**تصویر ۸-۱: مثلث توان**

رابطهٔ بین ضریب توان و نسبت توان راکتیو به اکتیو در جدول ۸-۱ آمده است.

**جدول ۸-۱: ضریب توان و نسبت $Q$ به $P$**

| نسبت $Q$ به $P$ | زاویهٔ توان (درجه) | ضریب توان (درصد) |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 100 |
| 0.2 | 11.4 | 95 |
| 0.48 | 26.8 | 90 |
| 0.62 | 31.8 | 85 |
| 0.75 | 36.8 | 80 |
| 1 | 45 | 70.7 |
| 1.33 | 53.1 | 60 |
| 1.73 | 60 | 50 |

می‌توان دید که حتی در ضریب توان ۹۰٪، توان راکتیو مورد نیاز حدود ٤٨٪ توان اکتیو است. در ضریب توان‌های پایین توان راکتیو بسیار بیشتر است. بنابراین اصلاح ضریب توان لازم است. ضریب توان هر سیستم می‌تواند سلفی یا خازنی باشد. از روی جهت حرکت توان اکتیو و راکتیو می‌توان نوع ضریب توان را تشخیص داد.

اگر توان اکتیو و راکتیو در یک جهت حرکت کنند، ضریب توان سلفی است، وگرنه خازنی است. نمونهٔ رایج ضریب توان سلفی موتور القایی است. برخی ضریب توان‌ها معمول انواع مصرف‌کننده‌ها در جدول ۸-۲ آمده است.

**جدول ۸-۲: ضریب توان صنایع رایج**

| صنعت | ضریب توان (درصد) | صنعت | ضریب توان (درصد) |
|---|---|---|---|
| شیمیایی | 80-85 | جوش با قوس | 35-60 |
| معدن زغال سنگ | 65-80 | قطعه‌سازی | 45-60 |
| آب فلزکاری | 65-70 | کورهٔ قوس | 75-90 |
| بیمارستان | 75-80 | رنگ‌رزی | 60-65 |
| ساختمان تجاری | 80-90 | نساجی | 60-75 |
| سیمان | 80-85 | پوشاک | 30-60 |
| پارچه‌بافی | 65-75 | ماشین‌کاری | 40-65 |
| پالایشگاه | 75-80 | پلاستیک | 75-80 |

**مثال**

ضریب توان بار ۱۰۰ کیلوولت‌آمپری حدود ۸۰ درصد است. مطلوب است که ضریب توان به ۹۵٪ بهبود یابد. بانک خازنی مورد نظر را بیابید.

**پاسخ**

$$S = 100kVA, P = 100 \times 0.8 = 80kW$$
$$\theta_1 = \cos^{-1} 0.8 = 36.8^\circ, Q_1 = 100 \sin 36.8^\circ = 60kVAR$$
$$\theta_2 = \cos^{-1} 0.95 = 18.2^\circ, Q_2 = 100 \sin 18.2^\circ = 31kVAR$$
$$Q = Q_1 - Q_2 = 29kVAR$$

خازن‌های اصلاح ضریب توان را می‌توان در باس فشار قوی، توزیع، یا در کنار بار نصب کرد. خازن‌ها را می‌توان برای گروهی از بارها، روی انشعاب، یا در کنار بار نصب کرد. از فواید این امر از دید شرکت برق، آزاد شدن ظرفیت سیستم، ترانس، کاهش تلفات خط، و بهبود پروفایل ولتاژ است. فواید این امر از دید مصرف‌کننده، کاهش تلفات، کاهش دیماند، کاهش مصرف انرژی، و افزایش سطح اتصال کوتاه سیستم است.

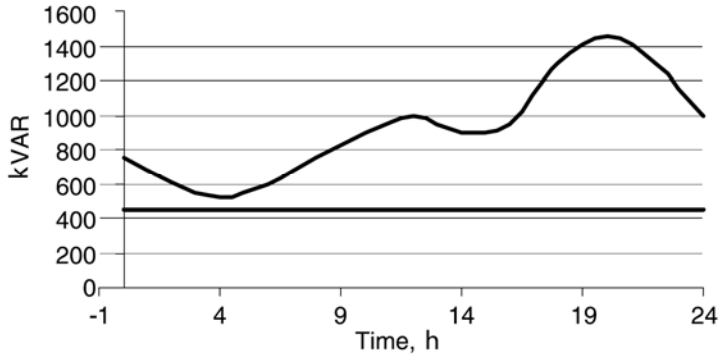
## ۸-۲- خازن ثابت و خازن سوییچ‌شونده

خازن‌های سیستم توزیع معمولاً روی خطوط یا در پست‌ها نصب می‌شوند. خازن‌های توزیع را می‌توان روی تیر، روی سکو، یا پست‌های در معرض آب نصب کرد. این بانک‌ها اغلب شامل ۳ تا ۹ خازن سه‌فاز ستارهٔ زمین‌شده، زمین‌نشده یا مثلث هستند. خازن‌های توزیع به طور محلی توان راکتیو تأمین می‌کنند و ضریب توان را

اصلاح و از تلفات می‌کاهند. بسته به شرایط بار، این خازن‌ها می‌توانند ثابت یا سوییچ‌شونده باشند. این نکات حائز اهمیت هستند:

- خازن‌های ثابت برای حداقل بار استفاده می‌شوند
- خازن‌های سوییچ‌شونده برای بارهای بزرگ‌تر از حداقل بار و کوچک‌تر از ماکزیمم بار استفاده می‌شوند

در تصویر ۸-۲ توان راکتیو مورد نیاز یک شبکهٔ توزیع در طول یک شبانه‌روز نشان داده شده است. این بار پایه و بار ماکزیمم در اغلب موارد مشترک است. معمولاً، خازن‌های ثابت بار پایه را جبران می‌کنند و خازن‌های سوییچ‌شونده، نیاز اوج بار را برطرف می‌کنند.




**تصویر ۸-۲: منحنی بار پایه و بار متغیر راکتیو**

### ۸-۲-۱- ابعاد و محل بانک‌های خازنی

برای به دست آوردن بهترین نتایج، خازن‌های شانت باید در محلی قرار گیرند که بیشترین کاهش تلفات ایجاد شود، پروفایل بهتری برای ولتاژ به دست آید و در عین حال نزدیک به بار باشند. اگر همهٔ این موارد امکان‌پذیر نبود، از روش زیر استفاده می‌شود:

- برای بارهایی که توزیع متقارن دارند، خازن در دو سوم فاصله از پست نصب می‌شود.
- برای بارهایی که از بزرگ به کوچک مرتب شده‌اند، خازن در نصف فاصله از پست نصب می‌شود.
- برای بیشترین افزایش ولتاژ، خازن در کنار بار نصب می‌شود.

اغلب، با اندازه‌گیری ولتاژ، جریان، کیلووات، کیلووار، و کیلو ولت‌آمپر برای محاسبهٔ ماکزیمم و مینیمم بار، بانک‌های خازنی در محل‌هایی نصب می‌شوند که کمترین ضریب توان را دارند. معمولاً ضریب توان ۹۵٪ مطلوب است. تغییرات و نوسان‌های توان راکتیو نصب خازن ثابت را مشکل می‌سازد؛ اگر در زمان اوج بار، ضریب توان به ۱ تصحیح شود، در زمان کم‌باری اضافه جبران‌سازی رخ می‌دهد. این امر مشابه ضریب توان سلفی، باعث افزایش تلفات در سیستم می‌شود. اضافه‌ولتاژ به وجود آمده به تجهیزات آسیب می‌زند. بنابراین ضریب توان خازنی اصلاً مطلوب نیست. برای رسیدگی به این مشکل، خازن‌های ثابت تنها بار راکتیو پایه را تأمین می‌کنند و خازن‌های سوییچ‌شونده در زمان اوج بار سوییچ می‌شوند. نحوهٔ محاسبهٔ خازن مورد نیاز در اینجا نشان داده شده است:

$$Q = S\left(\sin\theta_1 - \sin\theta_2\right)$$

که در آن $S$ توان ظاهری سیستم، $\theta_1$ زاویهٔ ضریب توان فعلی، و $\theta_2$ زاویهٔ ضریب توان مطلوب است. فرمول فق را می‌توان به صورت ذیل بازنویسی کرد.

$$Q = P\left(tg\theta_1 - tg\theta_2\right) = P(K)$$

برای محاسبهٔ توان راکتیو مورد نیاز، فاکتور(K) را که مربوط به ضریب توان فعلی و ضریب توان مطلوب را از جدول ۸-۳ و جدول ۸-٤ انتخاب می‌کنیم و در توان اکتیو بار ضریب می‌کنیم. سپس نزدیک‌ترین ظرفیت موجود خازن بدست آمده را انتخاب می‌کنیم .

**جدول ۸-۳: جدول انتخاب اصلاح ضریب توان**

| ضریب توان فعلی | ضریب توان مطلوب | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0.8 | 0.81 | 0.82 | 0.83 | 0.84 | 0.85 | 0.86 | 0.87 | 0.88 | 0.89 |
| 0.55 | 0.768 | 0.794 | 0.820 | 0.846 | 0.873 | 0.899 | 0.925 | 0.952 | 0.979 | 1.006 |
| 0.56 | 0.729 | 0.755 | 0.781 | 0.807 | 0.834 | 0.860 | 0.886 | 0.913 | 0.940 | 0.967 |
| 0.57 | 0.691 | 0.717 | 0.743 | 0.769 | 0.796 | 0.822 | 0.848 | 0.875 | 0.902 | 0.929 |
| 0.58 | 0.655 | 0.681 | 0.707 | 0.733 | 0.759 | 0.785 | 0.811 | 0.838 | 0.865 | 0.892 |
| 0.59 | 0.618 | 0.644 | 0.67 | 0.696 | 0.723 | 0.749 | 0.775 | 0.802 | 0.829 | 0.856 |
| 0.60 | 0.583 | 0.609 | 0.635 | 0.661 | 0.687 | 0.714 | 0.740 | 0.767 | 0.794 | 0.821 |
| 0.61 | 0.549 | 0.575 | 0.601 | 0.627 | 0.653 | 0.679 | 0.706 | 0.732 | 0.759 | 0.787 |
| 0.62 | 0.515 | 0.541 | 0.567 | 0.593 | 0.620 | 0.646 | 0.672 | 0.699 | 0.726 | 0.753 |
| 0.63 | 0.483 | 0.509 | 0.535 | 0.561 | 0.587 | 0.613 | 0.639 | 0.666 | 0.693 | 0.720 |
| 0.64 | 0.451 | 0.477 | 0.503 | 0.529 | 0.555 | 0.581 | 0.607 | 0.634 | 0.661 | 0.688 |
| 0.65 | 0.419 | 0.445 | 0.471 | 0.497 | 0.523 | 0.549 | 0.576 | 0.602 | 0.629 | 0.657 |
| 0.66 | 0.388 | 0.414 | 0.440 | 0.466 | 0.492 | 0.519 | 0.545 | 0.572 | 0.599 | 0.626 |
| 0.67 | 0.358 | 0.384 | 0.410 | 0.436 | 0.462 | 0.488 | 0.515 | 0.541 | 0.568 | 0.596 |
| 0.68 | 0.328 | 0.354 | 0.380 | 0.406 | 0.432 | 0.459 | 0.485 | 0.512 | 0.539 | 0.566 |
| 0.69 | 0.299 | 0.325 | 0.351 | 0.377 | 0.403 | 0.429 | 0.456 | 0.482 | 0.509 | 0.537 |
| 0.70 | 0.270 | 0.296 | 0.322 | 0.348 | 0.374 | 0.400 | 0.427 | 0.453 | 0.480 | 0.508 |
| 0.71 | 0.242 | 0.268 | 0.294 | 0.320 | 0.346 | 0.372 | 0.398 | 0.425 | 0.452 | 0.480 |
| 0.72 | 0.214 | 0.240 | 0.266 | 0.292 | 0.318 | 0.344 | 0.370 | 0.397 | 0.424 | 0.452 |
| 0.73 | 0.186 | 0.212 | 0.238 | 0.264 | 0.290 | 0.316 | 0.343 | 0.370 | 0.396 | 0.424 |
| 0.74 | 0.159 | 0.185 | 0.211 | 0.237 | 0.263 | 0.289 | 0.316 | 0.342 | 0.369 | 0.397 |
| 0.75 | 0.132 | 0.158 | 0.184 | 0.210 | 0.236 | 0.262 | 0.289 | 0.315 | 0.342 | 0.370 |
| 0.76 | 0.105 | 0.131 | 0.157 | 0.183 | 0.209 | 0.235 | 0.262 | 0.288 | 0.315 | 0.343 |
| 0.77 | 0.079 | 0.105 | 0.131 | 0.157 | 0.183 | 0.209 | 0.235 | 0.262 | 0.289 | 0.316 |
| 0.78 | 0.052 | 0.078 | 0.104 | 0.130 | 0.156 | 0.183 | 0.209 | 0.236 | 0.263 | 0.290 |
| 0.79 | 0.026 | 0.052 | 0.078 | 0.104 | 0.130 | 0.156 | 0.183 | 0.209 | 0.236 | 0.264 |
| 0.80 | - | 0.026 | 0.052 | 0.078 | 0.104 | 0.130 | 0.157 | 0.183 | 0.210 | 0.238 |
| 0.81 | - | - | 0.026 | 0.052 | 0.078 | 0.104 | 0.131 | 0.157 | 0.184 | 0.212 |
| 0.82 | - | - | - | 0.026 | 0.052 | 0.078 | 0.105 | 0.131 | 0.158 | 0.186 |
| 0.83 | - | - | - | - | 0.026 | 0.052 | 0.079 | 0.105 | 0.132 | 0.160 |
| 0.84 | - | - | - | - | - | 0.026 | 0.053 | 0.079 | 0.106 | 0.134 |
| 0.85 | - | - | - | - | - | - | 0.026 | 0.053 | 0.080 | 0.107 |
| 0.86 | - | - | - | - | - | - | - | 0.027 | 0.054 | 0.081 |
| 0.87 | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.027 | 0.054 |
| 0.88 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.027 |

**جدول ۸-٤: جدول انتخاب اصلاح ضریب توان (ادامه)**

| ضریب توان فعلی | ضریب توان مطلوب | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0.90 | 0.91 | 0.92 | 0.93 | 0.94 | 0.95 | 0.96 | 0.97 | 0.98 | 0.99 |
| 0.55 | 1.034 | 1.063 | 1.092 | 1.123 | 1.156 | 1.190 | 1.227 | 1.268 | 1.315 | 1.376 |
| 0.56 | 0.995 | 1.024 | 1.053 | 1.084 | 1.116 | 1.151 | 1.188 | 1.229 | 1.276 | 1.337 |
| 0.57 | 0.957 | 0.986 | 1.015 | 1.046 | 1.079 | 1.113 | 1.150 | 1.191 | 1.238 | 1.299 |
| 0.58 | 0.920 | 0.949 | 0.979 | 1.009 | 1.042 | 1.076 | 1.113 | 1.154 | 1.201 | 1.262 |
| 0.59 | 0.884 | 0.913 | 0.942 | 0.973 | 1.006 | 1.040 | 1.077 | 1.118 | 1.165 | 1.226 |
| 0.60 | 0.849 | 0.878 | 0.907 | 0.938 | 0.970 | 1.005 | 1.042 | 1.083 | 1.130 | 1.191 |
| 0.61 | 0.815 | 0.843 | 0.873 | 0.904 | 0.936 | 0.970 | 1.007 | 1.048 | 1.096 | 1.157 |
| 0.62 | 0.781 | 0.810 | 0.839 | 0.870 | 0.903 | 0.937 | 0.974 | 1.015 | 1.062 | 1.123 |
| 0.63 | 0.748 | 0.777 | 0.807 | 0.837 | 0.870 | 0.904 | 0.941 | 0.982 | 1.030 | 1.090 |
| 0.64 | 0.716 | 0.745 | 0.775 | 0.805 | 0.838 | 0.872 | 0.909 | 0.950 | 0.998 | 1.058 |
| 0.65 | 0.685 | 0.714 | 0.743 | 0.774 | 0.806 | 0.840 | 0.877 | 0.919 | 0.966 | 1.027 |
| 0.66 | 0.654 | 0.683 | 0.712 | 0.743 | 0.755 | 0.810 | 0.847 | 0.888 | 0.935 | 0.996 |
| 0.67 | 0.624 | 0.652 | 0.682 | 0.713 | 0.745 | 0.779 | 0.816 | 0.857 | 0.905 | 0.966 |
| 0.68 | 0.594 | 0.623 | 0.652 | 0.683 | 0.715 | 0.750 | 0.787 | 0.828 | 0.875 | 0.936 |
| 0.69 | 0.565 | 0.593 | 0.623 | 0.654 | 0.686 | 0.720 | 0.757 | 0.798 | 0.846 | 0.907 |
| 0.70 | 0.536 | 0.565 | 0.594 | 0.625 | 0.657 | 0.692 | 0.729 | 0.770 | 0.817 | 0.878 |
| 0.71 | 0.508 | 0.836 | 0.566 | 0.597 | 0.629 | 0.663 | 0.700 | 0.741 | 0.789 | 0.849 |
| 0.72 | 0.480 | 0.508 | 0.538 | 0.569 | 0.601 | 0.635 | 0.672 | 0.713 | 0.761 | 0.821 |
| 0.73 | 0.452 | 0.481 | 0.410 | 0.541 | 0.573 | 0.608 | 0.645 | 0.686 | 0.733 | 0.794 |
| 0.74 | 0.425 | 0.453 | 0.483 | 0.514 | 0.546 | 0.580 | 0.614 | 0.658 | 0.706 | 0.766 |
| 0.75 | 0.398 | 0.426 | 0.456 | 0.487 | 0.519 | 0.553 | 0.590 | 0.631 | 0.679 | 0.739 |
| 0.76 | 0.371 | 0.400 | 0.429 | 0.460 | 0.492 | 0.526 | 0.563 | 0.605 | 0.652 | 0.713 |
| 0.77 | 0.344 | 0.373 | 0.403 | 0.433 | 0.466 | 0.500 | 0.537 | 0.578 | 0.626 | 0.686 |
| 0.78 | 0.318 | 0.347 | 0.376 | 0.407 | 0.439 | 0.474 | 0.511 | 0.552 | 0.599 | 0.660 |
| 0.79 | 0.292 | 0.320 | 0.350 | 0.381 | 0.416 | 0.447 | 0.484 | 0.525 | 0.573 | 0.634 |
| 0.80 | 0.266 | 0.294 | 0.324 | 0.355 | 0.387 | 0.421 | 0.458 | 0.499 | 0.547 | 0.608 |
| 0.81 | 0.240 | 0.268 | 0.298 | 0.329 | 0.361 | 0.395 | 0.432 | 0.473 | 0.521 | 0.581 |
| 0.82 | 0.214 | 0.242 | 0.272 | 0.303 | 0.335 | 0.369 | 0.406 | 0.447 | 0.495 | 0.556 |
| 0.83 | 0.188 | 0.216 | 0.246 | 0.277 | 0.309 | 0.343 | 0.380 | 0.421 | 0.469 | 0.530 |
| 0.84 | 0.162 | 0.190 | 0.220 | 0.251 | 0.283 | 0.314 | 0.354 | 0.395 | 0.443 | 0.503 |
| 0.85 | 0.135 | 0.164 | 0.194 | 0.225 | 0.257 | 0.291 | 0.328 | 0.369 | 0.417 | 0.477 |
| 0.86 | 0.109 | 0.138 | 0.167 | 0.198 | 0.230 | 0.265 | 0.302 | 0.343 | 0.390 | 0.451 |
| 0.87 | 0.082 | 0.111 | 0.141 | 0.172 | 0.204 | 0.238 | 0.275 | 0.316 | 0.364 | 0.424 |
| 0.88 | 0.055 | 0.084 | 0.114 | 0.145 | 0.177 | 0.211 | 0.248 | 0.289 | 0.337 | 0.397 |
| 0.89 | 0.028 | 0.057 | 0.086 | 0.117 | 0.149 | 0.184 | 0.221 | 0.262 | 0.309 | 0.370 |
| 0.90 | - | 0.029 | 0.058 | 0.089 | 0.121 | 0.156 | 0.193 | 0.234 | 0.281 | 0.342 |
| 0.91 | - | - | 0.030 | 0.060 | 0.093 | 0.127 | 0.164 | 0.205 | 0.253 | 0.313 |
| 0.92 | - | - | - | 0.031 | 0.063 | 0.097 | 0.134 | 0.175 | 0.223 | 0.284 |
| 0.93 | - | - | - | - | 0.032 | 0.067 | 0.104 | 0.145 | 0.192 | 0.253 |
| 0.94 | - | - | - | - | - | 0.034 | 0.071 | 0.112 | 0.160 | 0.220 |
| 0.95 | - | - | - | - | - | - | 0.037 | 0.078 | 0.126 | 0.186 |
| 0.96 | - | - | - | - | - | - | - | 0.041 | 0.089 | 0.149 |
| 0.97 | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.048 | 0.108 |
| 0.98 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.061 |
| 0.99 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |

**مثال**

ضریب توان سیستمی ۶۰٪ و ضریب توان مطلوب ۹۵٪ است. توان مصرفی سیستم ۱۰۰ کیلووات است. خازن مورد نیاز سیستم را حساب کنید.

**پاسخ**

$pf_1 = 0.6, pf_2 = 0.95$

$factor = 1.005$

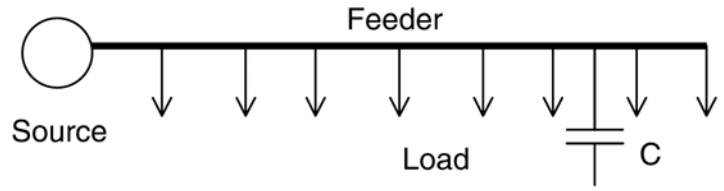
$P = 100kW$

$Q = 100 \times 1.005 = 100.5kVAR$

۱۰۰ کیلووار خازن مورد نیاز است.

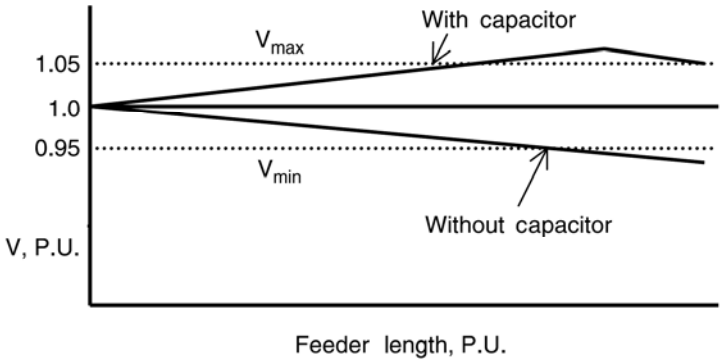
### ۸-۲-۲- اثر خازن بر فیدرهای شعاعی

خازن‌های ثابت را می‌توان در فیدرهای شعاعی برای بهبود ضریب توان به کار برد. خازن را می‌توان در سمت بار یا سمت مولد نصب کرد. در یک سیستم شعاعی می‌توان مانند تصویر ۸-۳ خازن را بسیار نزدیک به بار نصب نمود.

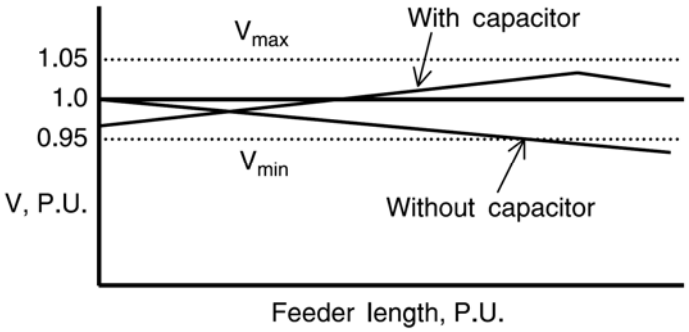



**تصویر ۸-۳: سیستم توزیع شعاعی**

پروفایل ولتاژ هنگام کم‌باری در طول فیدر برای دو حالت با خازن و بی‌خازن در تصویر ۸-٤ نشان داده شده است. در صورت عدم حضور خازن، افت ولتاژ در طول فیدر قابل توجه است. در صورت حضور خازن، هنگام کم‌باری اضافه‌ولتاژ مشاهده می‌شود. پروفایل ولتاژ هنگام اوج بار در طول فیدر برای دو حالت با خازن و بی‌خازن در تصویر ۸-۵ آمده است. پروفایل ولتاژ با حضور خازن در محدودهٔ مجاز قرار می‌گیرد. بنابراین، همواره لازم است که محل بهینهٔ نصب خازن انتخاب گردد.




**تصویر ۸-٤: پروفایل ولتاژ در طول فیدر (زمان کم‌باری)**




**تصویر ۸-۵: پروفایل ولتاژ در طول فیدر (زمان اوج بار)**

### ۸-۲-۳- خازن‌های سوییچ‌شونده

خازن‌های سوییچ‌شونده قابلیت انعطاف لازم برای کنترل ولتاژ سیستم، ضریب توان، و تلفات را دارند. این خازن‌ها معمولاً با رله‌های اتوماتیک و هوشمند سوییچ می‌شوند. این رله‌ها با درک شرایط سیستم دستور لازم را به سوییچ‌های بانک خازنی می‌دهند. اغلب پارامترهای زیر مورد توجه هستند:

- ولتاژ: تنظیم ولتاژ از اهمیت خاصی برخوردار است
- جریان: معمولاً جریان بار با توان راکتیو نسبت مستقیم دارد
- توان راکتیو: نیاز به توان راکتیو سیستم با ورود برخی بارها افزایش و با خروج آنها کاهش می‌یابد
- زمان سوییچینگ: روشن و خاموش کردن بانک خازن در زمان مناسب
- دما: در برخی بارها مانند تهویه‌های مطبوع با گرم شدن هوا، نیاز به توان راکتیو بیشتر می‌شود

بانک‌های خازنی ثابت همواره در مدار هستند. در برخی موارد، بانک‌های خازنی را می‌توان بسته به شرایط فصلی خاموش و روشن کرد. در برخی مناطق سوییچینگ از دور کنترل می‌شود.

نمونهٔ رلهٔ هوشمند در تصویر ۸-٦ نشان داده شده است. این رله‌ها برای انواع بانک‌های خازنی مناسب است. سوییچینگ به منظور کنترل توان راکتیو و با توجه به ولتاژ سیستم انجام می‌شود. این نوع کنترلر، کنترل دقیق و اقتصادی بر بانک‌های خازنی دارد و همچنین در طول عمر مفید خود سرویس قابل اطمینانی ارائه می‌کنند. برخی از این کنترلرها قابلیت ثبت اطلاعات و انتقال آنها به نرم‌افزارهای کامپیوتری و نمایش نمودارهای گرافیکی را دارند. صفحهٔ نمایش روی کنترلر خواندن اطلاعات را آسان می‌کند. تنظیمات رگولاتور از طریق دگمه‌های روی دستگاه، یا به صورت نرم‌افزاری و از راه دور میسر است.

**تصویر ۸-٦: نمونهٔ رله‌های هوشمند کنترل توان راکتیو (شرکت FRAKO)**

### ۸-۲-٤- ظرفیت آزادشدهٔ سیستم

اصلاح ضریب توان باعث کاهش توان ظاهری (کیلو ولت‌آمپر) در خط، کابل، ترانس، و ژنراتور می‌شود. به این ترتیب می‌توان از خازن‌ها برای کاهش اضافه‌بار بر تجهیزات استفاده کرد. این امر در مثال زیر نشان داده شده است.

**مثال**

از یک ترانس سه‌فاز مثلث/ستارهٔ 4.16 kV/440 V، با ظرفیت ۳۰۰ کیلو ولت‌آمپری برای تغذیهٔ باری با ضریب توان ٦٥٪ استفاده شده است. ترانس تحت حدود ۱۰٪ اضافه‌بار است. وضعیت را بررسی کرده، راه حل مناسب با استفاده از خازن شانت ارائه دهید.

**پاسخ**

$$S = 300kVA,\ pf = 0.65 \Rightarrow \theta = 49.5^{\circ}$$
$$S_{load} = 300kVA \times 1.1 = 330kVA$$
$$P = S_{load} \times 0.65 = 214.5kW$$
$$Q_1 = S_{load} \times \sin\theta = 250.8kVAR$$
$$S_{compensated} = 300kVA \Rightarrow Q_2 = \sqrt{300^2 - 214.5^2} = 210kVAR$$
$$\Delta Q = 250.8 - 210 = 40.8kVAR$$

پس دست کم ٤١ کیلووار خازن لازم است. اگر خازن ٦٠ کیلوواری انتخاب کنیم، خواهیم داشت:

$$Q = 250.8 - 60 = 190.8kVAR$$
$$S = \sqrt{214.5^2 + 190.8^2} = 287kVA$$
$$pf = \frac{214.5}{287} = 0.75$$

با نصب ٦٠ کیلووار خازن، ضریب توان از ٦٥٪ به ۷۵٪ بهبود یافت و میزان توان ظاهری ترانس از ۳۱۰ کیلو ولت‌آمپر به ۲۸۷ کیلو ولت‌آمپر کاهش یافت.

## ۸-۳- کاربرد خازن‌های ثابت و خازن‌های سوییچ‌شونده

برای بهبود پروفایل ولتاژ، از خازن‌های ثابت در فشار قوی و در فاصلهٔ دوسوم خط از منبع استفاده می‌شود. سایز خازن‌های شانت بسته به میزان افزایش ولتاژ در زمان کم‌باری است. اگر خازن زیادتر از نیاز باشد، در زمان کم‌باری تلفات بیشتر می‌شود.

پس از افزودن خازن‌های ثابت، خازن‌های سوییچ‌شونده به میزان دوسوم توان راکتیو مدار طراحی می‌شوند. خازن‌های سوییچ‌شونده باید به منظور اصلاح ولتاژ و اغلب در یک‌سوم انتهای خط و نزدیک به بار نصب شوند. سوییچینگ را می‌توان از راه دور انجام داد.

اگر از خازن‌های شانت برای بهبود پروفایل ولتاژ استفاده شود، خازن‌های ثابت نباید در زمان کم‌باری ولتاژ را از حدود مجاز بیشتر کنند. با سوییچ‌کردن خازن‌های بیشتر می‌توان ضریب توان بار نامی را به ۹۵٪ رساند. در مثال زیر استفادهٔ خازن‌های ثابت و شانت نشان داده شده است:

**مثال**

بار ماکزیمم در یک شبکهٔ فشار قوی ۵ مگا ولت‌آمپر و ضریب توان اولیه ۸۵٪ است. حداقل بار شبکه ۲۵٪ بار ماکزیمم با ضریب توان ۸۰٪ است. حداقل توان راکتیو مورد نیاز ۶۰٪ ماکزیمم توان راکتیو مورد نیاز است. ضریب توان مجاز در زمان کم‌باری ۹۵٪ است. مقدار خازن ثابت و سوییچ‌شونده را تعیین کنید.

**پاسخ**

$$S_{\max} = 5MVA,\ pf_{\max} = 0.85 \Rightarrow \theta_{\max} = 35.3^{\circ}$$
$$P_{\max} = 5 \times 0.85 = 4.25MW$$
$$Q_{\max} = 5 \times \sin\theta_{\max} = 2.635MVAR$$
$$S_{\min} = 5MVA \times 0.25 = 1.25MVA$$
$$pf_{\min} = 0.8 \Rightarrow \theta_{\min} = 41^{\circ}$$
$$P_{\min} = 1.25 \times 0.8 = 1MW$$
$$Q_{\min} = 1.25 \times \sin\theta_{\min} = 0.75MVAR$$

انتخاب خازن ثابت:

$$pf_{allowed} = 0.95 \Rightarrow \theta = 20.2^{\circ} \Rightarrow Q = 328kVAR$$
$$\Delta Q = 750 - 328 = 422kVAR$$

خازن ثابت باید حداقل ۴۲۲ کیلووار باشد. در اینجا خازن ۶۰۰ کیلوواری انتخاب می‌کنیم:

$$Q = 750 - 600 = 150kVAR \Rightarrow pf = \cos\left(\tan^{-1}\frac{150}{1000}\right) = 0.989$$

انتخاب خازن سوییچ‌شونده:

$$Q_{\max,switching} = 2.635MVAR - 600kVAR = 2.035MVAR$$

حال اگر مقدار خازن سوییچ‌شونده را ۱۸۰۰ کیلووار انتخاب کنیم، خواهیم داشت:

$$Q_{bank} = 1.8MVAR + 600kVAR = 2.4MVAR$$

$$Q = 2.635MVAR - 2.4MVAR = 235kVAR$$

$$S = \sqrt{4.25^2 + 0.235^2} = 4.257MVAR$$

$$pf = \frac{4.25}{4.257} = 0.998$$

با بانک فوق می‌توان ضریب توان را به بالاتر از ۹۵٪ بهبود داد. برای کاهش تلفات، خازن‌های ثابت در فاصلهٔ دوسوم از منبع و خازن‌های سوییچ‌شونده در یک‌سوم آخر خط نصب می‌شوند.

# فصل ۹ : اثرات مثبت خازن بر شبکه

## ۹-۱- معرفی

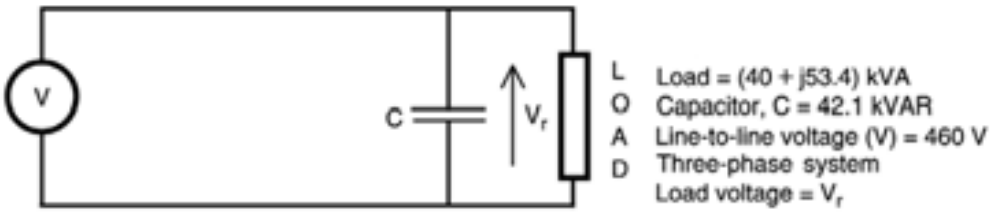
استفاده از خازن‌های شانت برای تأمین توان راکتیو برای ژنراتورها مفید است زیرا دیگر ناگزیر از تأمین جریان القایی بار نیستند. مزایای خازن‌های شانت از دید سیستم عبارتند از:

- تأمین توان راکتیو
- بهبود پروفایل ولتاژ
- کاهش تلفات خط و ترانس
- آزادسازی ظرفیت سیستم
- صرفهٔ اقتصادی به دلیل کاهش تلفات

این محاسن هم در توزیع و هم در انتقال قابل توجه هستند.

## ۹-۲- تأمین توان راکتیو

در سیستم‌های توزیع، ولتاژ بار به دلیل کمبود توان راکتیو افت می‌کند. در چنین مواردی، با استفاده از خازن‌های شانت در کنار بار توان راکتیو تأمین می‌شود. در مورد خطوط انتقال طویل، در زمان اوج بار در انتهای خط به توان راکتیو زیادی نیاز است که توسط خازن‌های شانت تأمین می‌شود. مزیت تأمین توان راکتیو در محل را با یک مثال توضیح می‌دهیم. فرض کنید که سیستمی سه‌فاز و شعاعی با ولتاژ ٤٦٠ ولت داریم و آن را یک بار با خازن و بار دیگر بدون خازن بررسی می‌کنیم (تصویر ۹-۱). در انتهای فیدر ٤٠ کیلووات توان اکتیو و ٥٣/٤ کیلووار توان راکتیو مورد نیاز است. مشاهده می‌کنید که بار مورد نظر توان راکتیو زیادی نیاز دارد. در اینجا توان راکتیو با خازن تأمین شده است. دو حالت با خازن و بدون خازن در جدول ۹-۱ مقایسه شده‌اند. دیده می‌شود که توان راکتیو کشیده شده از منبع بسیار کمتر، و در نتیجه توان ظاهری و جریان کوچک‌تر است. در این حالت ضریب توان بهبود یافته است.




**تصویر ۹-۱: مدار تک‌فاز یک سیستم توزیع شعاعی**

جدول ۹-۱: مقایسهٔ دو حالت در فیدر مورد مثال

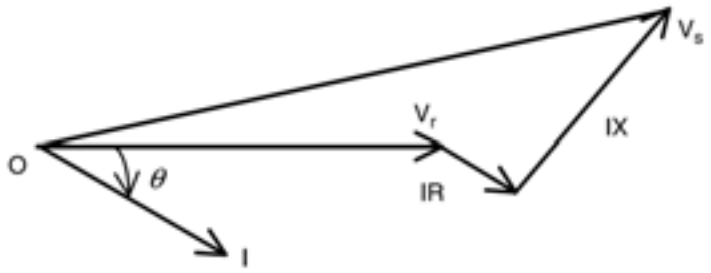
| پارامتر | بدون خازن شانت | با خازن شانت |
|---|---|---|
| توان اکتیو (کیلووات) | 40 | 40 |
| توان راکتیو (کیلووار) | 53.4 | 13.1 |
| توان ظاهری (کیلو ولت‌آمپر) | 66.7 | 42.1 |
| ضریب توان | 0.6 | 0.95 |
| جریان (آمپر) | 83.7 | 52.8 |

## ۹-۳- بهبود پروفایل ولتاژ

خازن‌های شانت باعث کاهش جریان راکتیو در مدار می‌شوند. این کاهش جریان باعث کاهش افت ولتاژ روی مقاومت و القاءگرهای مدار می‌شود و در نتیجه سطح ولتاژ مدار در مسیر منبع تا بار افزایش می‌یابد. در سیستم‌های توزیع و انتقال، خطای مجاز ولتاژ حدود ۵٪ است. افت ولتاژ در موتورهای القایی سبب می‌شود که جریان آنها از جریان نامی بیشتر شود. بنابراین، نگه داشتن ولتاژ در سطوح مجاز از اهداف مهم در شبکه است. دیاگرام تک‌خطی سیستم در تصویر ۹-۱ آمده است. دیاگرام فازوری سیستم در صورت عدم حضور خازن در تصویر ۹-۲ آمده است. روابط ولتاژ از قرار زیر است:

$$V_R = V_S - I\left(\cos\theta \pm j\sin\theta\right)\left(R + jX\right)$$

در اینجا $V_S$ ولتاژ در سمت منبع، $V_R$ ولتاژ در سمت بار، $I$ جریان، $R$ مقاومت، $X$ راکتانس، و $\theta$ زاویهٔ ضریب توان است.

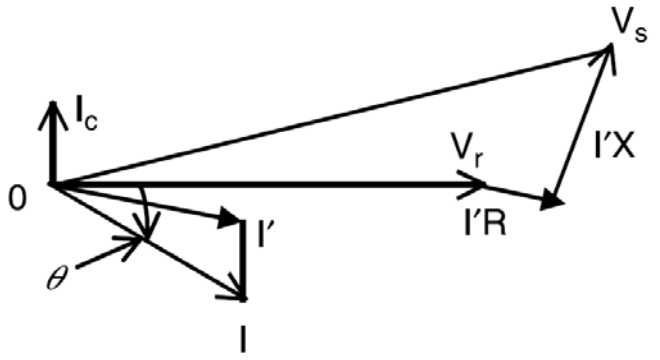



تصویر ۹-۲: دیاگرام فازوری سیستم بدون خازن

دیاگرام فازوری سیستم در صورت حضور خازن در تصویر ۹-۳ آمده است. روابط جریان به شرح زیر است:

$$I' = I\left(\cos\theta \pm j\sin\theta\right) - jI_C$$

در اینجا $I_C = V/X_C$ است. بهبود پروفایل ولتاژ در محل بار به دلیل کاهش جریان خط و کاهش افت ولتاژ است. برای درک بهتر مثال بعدی را ببینید.




**تصویر ۹-۳: دیاگرام فازوری سیستم با خازن**

**مثال**

دیاگرام تک‌خطی سیستم نشان داده شده در تصویر ۹-۱ را در نظر بگیرید. بار سه‌فاز ٤٦٠ ولت، ٤٠ وات، و دارای ضریب توان ٦٠٪ است. امپدانس خط $(0.1+j0.3)\Omega$ است. اگر با استفاده از خازن ضریب توان را به ٩٥٪ بهبود دهیم، از افت ولتاژ چقدر کاسته می‌شود؟

**پاسخ**

افت ولتاژ بدون تصحیح ضریب توان:

$$I_{rms}=\frac{40kW}{\sqrt{3}\times 460\times 0.6}=83.7A$$
$$I=83.7(0.6-j0.8)$$
$$V_{drop}=83.7(0.6-j0.8)(0.1+j0.3)=25.1+j8.4$$

افت ولتاژ با تصحیح ضریب توان:

$$I_{rms}=\frac{40kW}{\sqrt{3}\times 460\times 0.95}=52.9A$$
$$I=52.9(0.95-j0.31)$$
$$V_{drop}=52.9(0.95-j0.31)(0.1+j0.3)=10+j13.4$$
$$\Delta V=15.1-j5$$

مشاهده می‌شود که ۱۵/۱ ولت افت ولتاژ روی مقاومت کاهش یافته است که از تلفات اهمی کم می‌کند. در مجموع حدود ١٦ ولت از افت ولتاژ کاسته شده است.

### ۹-۳-۱- اضافه‌ولتاژ به دلیل حضور خازن

افزودن بانک خازنی باعث افزایش ولتاژ در محل نصب می‌شود. معادلات افت ولتاژ بدون حضور خازن ($VD_1$) و با حضور خازن ($VD_2$) به شرح زیر است:

$$VD_1 = \frac{S_1}{10V^2}\left(R\cos\theta_1 - jX\sin\theta_1\right)$$

$$VD_2 = \frac{S_2}{10V^2}\left(R\cos\theta_2 - jX\sin\theta_2\right)$$

$$VD_1 - VD_2 = \frac{1}{10V^2}\left[R\left(S_1\cos\theta_1 - S_2\cos\theta_2\right) + jX\left(S_1\sin\theta_1 - S_2\sin\theta_2\right)\right]$$

در اینجا $\left(S_1\cos\theta_1 - S_2\cos\theta_2\right)$ تغییر در بار اکتیو است که معمولاً صفر فرض می‌شود. در ضمن $\left(S_1\sin\theta_1 - S_2\sin\theta_2\right)$ میزان تغییر در بار راکتیو است که برابر با ظرفیت بانک است؛ پس:

$$VD_1 - VD_2 = \frac{Q_{Bank}}{10V^2}X$$

### ۹-۳-۲- افزایش ولتاژ در ترانس

با افزودن بانک خازنی همهٔ ترانس‌های مسیر تا منبع دچار افزایش ولتاژ می‌شوند. از آنجا که امپدانس ترانس قابل توجه است، افت ولتاژ به دلیل راکتانس ترانس در صورت حضور خازن به شرح زیر محاسبه می‌شود:

$$VD_1 - VD_2 = \frac{Q_{Bank}}{10V^2}X_{trans}$$

$$V_{trans} = \frac{Q_{Bank}}{S_{trans}}X_{trans}$$

در اینجا $X_{trans}$ و $S_{trans}$ به ترتیب راکتانس (per unit) و توان نامی ترانس است. اگر ولتاژ از حد مجاز بالاتر برود، با استفاده از تَپ‌های ترانس ولتاژ را تنظیم می‌کنند.

**مثال**

ترانس ۵۰۰ کیلو ولت‌آمپری با اتصال مثلث/ستاره و امپدانس ۷٪ فرض کنید. خازنی با ۱۰۰ کیلووار ظرفیت در سمت فشار قوی نصب شده است. افزایش ولتاژ ناشی از بانک خازنی را محاسبه کنید:

**پاسخ**

$$S = 500kVA, X_{trans} = 0.07\,p.u., Q_{bank} = 100kVAR$$

$$V_{trans} = \frac{Q_{Bank}}{S_{trans}}X_{trans} = \frac{100kVAR\times 0.07}{500kVA}\times 100 = 1.4\%$$

**مثال**

سیستمی ٦۰ هرتزی با ولتاژ ۳٤۵ کیلوولت با بانک خازنی ۱۳۵ مگاواری در نظر بگیرید. جریان اتصال کوتاه منبع ۲ کیلوآمپر است. افزایش ولتاژ ناشی از بانک خازنی را محاسبه کنید (توان نامی سیستم را ۱۰۰ مگا ولت‌آمپر فرض کنید).

**پاسخ**

$$V = 345kV, Q = 135MVAR$$

$$X_{SC} = \frac{345kV}{\sqrt{3} \times 2kA} = 100\Omega$$

$$X_C = \frac{(345kV)^2}{135MVAR} = 881\Omega$$

$$\Delta V = \frac{X_{SC}}{X_C - X_{SC}} \times 100 = \frac{100\Omega}{881\Omega - 100\Omega} \times 100 = 12.8\%$$

## ۹-۴- کاهش تلفات ترانس و خط

با نصب خازن‌های شانت، اندازهٔ جریان در خط کاهش می‌یابد. در نتیجه تلفات اهمی و سلفی نیز کاهش می‌یابد. در سیستم‌های صنعتی، تلفات اهمی حدود ۳ تا ۸ درصد جریان نامی هستند و مقدار دقیق آن به چند پارامتر بستگی دارد؛ تعداد ساعاتی که سیستم در بار کامل است، اندازهٔ هادی، طول کابل فیدر، و امپدانس ترانس. اغلب، میزان بار در طول روز متغیر است. برای میانگین گرفتن، فاکتور بار تعریف می‌شود:

$$\text{Load Factor}(LDF) = \frac{P_{\text{average}}(kW)}{P_{\max}(kW)}$$

جریان نیز در ساعت‌های مختلف متفاوت است. فاکتور تلفات نیز برای تخمین تلفات سیستم تعریف می‌شود. این فاکتور، تابعی از فاکتور بار است:

$$\text{Loss Factor}(LF) = 0.15LDF + 0.85LDF^2$$

$$Loss = 3(RI^2) \times LF$$

**مثال**

سیستمی با ولتاژ ٤/١٦ کیلوولت و امپدانس $(1.5 + j7.0)\Omega$ در نظر بگیرید. اوج بار ۵ مگاوات با ضریب توان ۸۰٪ و فاکتور بار ٦۰٪ است. مصرف‌کننده می‌خواهد ضریب توان را به ۹۵٪ ارتقاء دهد. سالانه چه میزان صرفه‌جویی خواهد شد؟ برای اصلاح ضریب توان چه مقدار خازن نیاز است؟

**پاسخ**

بدون خازن:

$$V = 4.16kV, pf = 0.6, P = 5MW$$

$$I = \frac{5MW}{\sqrt{3} \times 4.16kV \times 0.8} = 857.4A$$

$$LF = 0.15 \times 0.6 + 0.85 \times 0.6^2 = 0.396$$

$$Loss = 1.5 \times 857.4^2 \times 0.396 = 436.7\,kW/phase$$

با خازن:

$$pf = 0.95, I = \frac{5MW}{\sqrt{3} \times 4.16kV \times 0.95} = 730.5A$$
$$Loss = 1.5 \times 730.5^2 \times 0.396 = 316.9\,kW/phase$$
$$saving = 3(436.7 - 316.9) = 359.4kW$$

### ۹-٤-۱- صرفه‌جویی ناشی از کاهش تلفات

اگر در فیدری اصلاح ضریب توان انجام شود، جریان عبوری از آن و ترانس کاهش می‌یابد. فرض کنید که $I_1$ و $I_2$ به ترتیب جریان فیدر قبل و بعد از خازن‌گذاری و $R$ مقاومت مدار باشد. در این صورت میزان صرفه‌جویی در هزینهٔ برق ($C_L$) در هر سال برابر است با:

$$C_L = 3(C_W)\left(I_1^2 - I_2^2\right)R(8,760) \times LF \times 10^{-3}$$

که در آن $LF$ فاکتور تلفات، ۸۷٦۰ تعداد ساعات در یک سال، و $C_W$ هزینهٔ هر کیلووات ساعت برق است.

**مثال**

سیستمی با خازن شانت را در نظر بگیرید. جریان هر فاز بدون خازن ۸۰ آمپر و با خازن ۵۰ آمپر است. مقاومت فیدر ۰/۲ اهم و هزینهٔ برق ٦ سنت به ازاء هر کیلووات ساعت است. فاکتور تلفات نیز ٦۰٪ است. مقدار صرفه‌جویی در هر سال را محاسبه کنید.

**پاسخ**

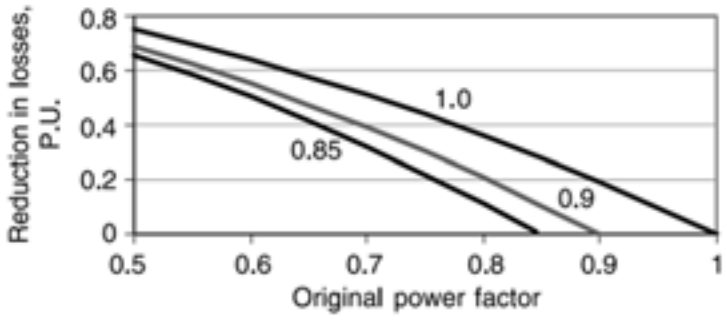
$$I_1 = 80A, I_2 = 50A, R = 0.2\Omega, LF = 0.6, C_W = 0.06\$/kWh$$
$$S = 3(0.6)\left(80^2 - 50^2\right) \times 0.2 \times (8,760) \times 0.06 \times 10^{-3} = 738\$$$

### ۹-٤-۲- کاهش تلفات با تصحیح ضریب توان

در کارخانجات صنعتی، تلفات اهمی حدود ۲ تا ۷ درصد بار را بسته به زمان زمان کم‌باری و اوج بار در بر می‌گیرد. به علاوه تلفات وابسته به مقاومت و طول فیدر است. با نصب خازن شانت، جریان خط کاهش می‌یابد. می‌توان روابط زیر را با فرض‌های فوق نوشت:

$$loss \propto \left(\frac{pf_{before}}{pf_{after}}\right)^2$$
$$\Delta loss = 1 - \left(\frac{pf_{before}}{pf_{after}}\right)^2$$

منحنی این رابطه در تصویر ۹-٤ با فرض ثابت بودن توان اکتیو رسم شده است.




**تصویر ۹-٤: کاهش تلفات با نصب خازن**

**مثال**

توان سالانه‌ای که از طریق یک پست به یک بار گروهی داده می‌شود ۱۲۰ مگاوات ساعت با ضریب توان ۷۲٪ است. مطلوب است که با نصب خازن ضریب توان به ۸۷٪ بهبود داده شدو با فرض این که تلفات ۵٪ از کل توان باشد، در صورت نصب خازن سالانه چقدر در مصرف صرفه‌جویی خواهد شد؟

**پاسخ**

$$E = 120MWh$$
$$Loss = 120MWh \times 0.05 = 6MWh$$
$$pf_1 = 0.72,\ pf_2 = 0.87$$
$$\Delta Loss = 1 - \left(0.72/0.87\right)^2 = 0.315$$
$$\text{Reduction} = 6MWh \times 0.315 = 1.89MWh$$

## ۹-۵- آزادشدن ظرفیت سیستم

خازن‌های اصلاح ضریب توان، توان راکتیو لازم را در محل تأمین کرده، جریان خط را کاهش می‌دهند. کاهش جریان خط، توان ترانس و فیدر را آزاد می‌کند. بنابراین، جبران‌سازی، احتمال گرم‌شدن ترانس، خطوط انتقال، ژنراتور، و کابل‌ها را کاهش می‌دهد.

**مثال**

جریان نامی کابلی سه‌فاز با ولتاژ ٤/١٦ کیلوولت، ۲۰۰ آمپر است ولی ۲۵۰ آمپر با ضریب توان ٦٠٪ حمل می‌کند. چقدر خازن لازم است تا جریان کابل به جریان نامی کاهش یابد؟

**پاسخ**

$$V = 4.16kV, I = 250A,\ pf_1 = 0.6$$
$$S = \sqrt{3} \times 4.16kV \times 250 = 1.8MVA$$
$$P = 1.8MVA \times 0.6 = 1.08MW$$
$$S_{cable} = \sqrt{3} \times 4.16kV \times 200 = 1.44MVA$$
$$pf_2 = 1.08/1.44 = 0.75$$
$$Q = 1.08\left(\tan\theta_2 - \tan\theta_1\right) = 488.7kVAR$$

نزدیک‌ترین کیلووار به مقدار محاسبه شده ۵۰۰ کیلووار است. با نصب این مقدار خازن، جریان کابل به کمتر از مقدار نامی خواهد رسید.

### ۹-۵-۱- آزادسازی ظرفیت ژنراتور

ژنراتورهای سنکرون علاوه بر محدودیت توان اکتیو، بر توان ظاهری هم محدودیت دارند. توان ظاهری مجاز ژنراتور با ضریب توان واحد حساب شده است. اگر بار با ضریب توان کم کار کند، ژنراتور هم باید توان اکتیو را در ضریب توان پایین‌تر تحویل دهد. اما خروجی ژنراتور نمی‌تواند از توان ظاهری مجاز بیشتر شود. با تصحیح ضریب توان در محل ژنراتور می‌توان از این مشکل جلوگیری کرد.

**مثال**

ژنراتوری سنکرون و سه‌فاز، ۵۰۰ کیلووات، ٦٢٥ کیلوولت‌آمپر با ضریب توان ۸۰٪ در حال کار است. به ضرورت می‌خواهیم باری ۱۰۰ کیلووات با ضریب توان ۹۰٪ را موقتاً به این ژنراتور وصل کنیم. مقدار خازن لازم برای نگه‌داشتن خروجی ژنراتور در محدودهٔ مجاز چقدر است؟

**پاسخ**

| پارامتر | کیلووات | کیلووار | کیلو ولت‌آمپر | زاویهٔ ضریب توان |
|---|---|---|---|---|
| بار اولیه | 500 | 375 | 625 | 38.6 |
| بار اضافی | 100 | 48 | 111 | 25.8 |
| مجموع | 600 | 423 | 734 | 35.2 |

$$pf_{allowed} = 600/625 = 0.96, \theta = 18.1^{\circ}$$
$$Q_{allowed} = 625\sin\theta = 175kVAR$$
$$Q_{bank} = 423 - 175 = 248kVAR$$

### ۹-۶- مؤخره

در این فصل، مزایای اصلاح ضریب توان بیان شد. تأمین توان راکتیو در محل، بهبود پروفایل ولتاژ، کاهش تلفات ترانس و خط، آزاد شدن ظرفیت سیستم، و افزایش توان تحویلی به کمک خازن شانت میسر است. به علاوه مثال‌های متعددی برای نشان دادن مزایای خازن شانت ارائه گردید.

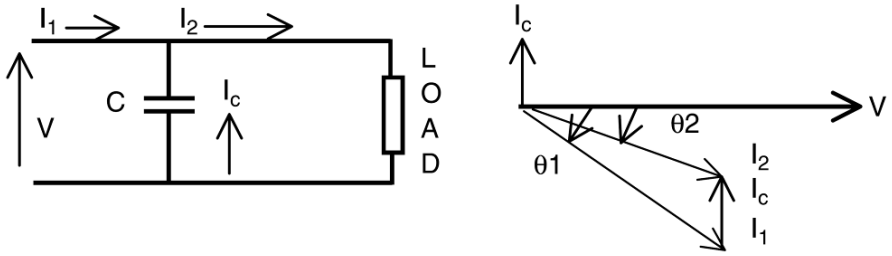
# فصل ۱۰ : خازن‌های سری

## ۱۰-۱- معرفی

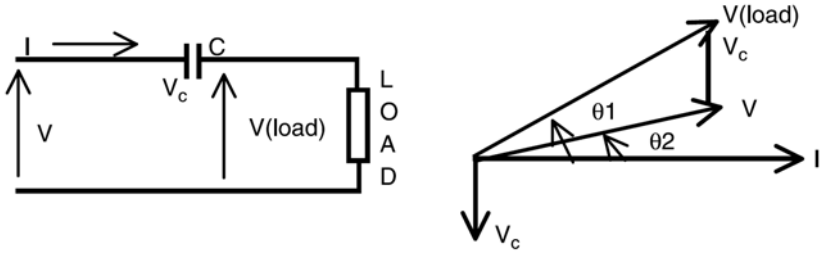
خازن‌های شانت بین فاز و زمین یا در کنار بار نصب می‌شوند. خازن‌های سری به صورت سری با مدار نصب شده، همهٔ جریان خط را تحمل می‌کنند. بنابراین ولتاژ خازن شانت ثابت است ولی افت ولتاژ خازن سری به بار وابسته است. این نکته اهمیت خازن سری را در جبران‌سازی خط انتقال و توزیع بیش از پیش می‌افزاید.

خازن سری راکتانسی منفی است که با خط انتقال سری می‌شود. ولتاژ خازن تابعی از جریان مدار است و مانند تنظیم‌کنندهٔ ولتاژ (رگولاتور) عمل می‌کند. ولتاژ خازن سری، افت ولتاژ ناشی از بار راکتیو را جبران می‌کند. این اثرات در فیدرهای شعاعی برای کاهش افت ولتاژ و اثرات فلیکر[1] بسیار اهمیت دارد. در خطوط انتقال، در صورت استفاده از خازن سری، انتقال توان به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد.

نمونهٔ رایج مدار با جبران‌سازی موازی (شانت) و دیاگرام فازوری آن در تصویر ۱۰-۱ آمده است. در اینجا توان راکتیو توسط جریان خازنی با ۹۰ درجه اختلاف فاز تأمین می‌شود. نمونهٔ مدار با جبران‌سازی سری در تصویر ۱۰-۲ آمده است. در جبران‌سازی سری، تصحیح ضریب توان با استفاده از ولتاژ با اختلاف فاز ۹۰ درجه انجام می‌شود. در عمل، توان راکتیو خازن‌های سری ناچیز و برا ی بهبود ضریب توان ناکافی است.




تصویر ۱۰-۱: جبران‌سازی موازی




تصویر ۱۰-۲: جبران‌سازی سری

[1] flicker

## ۱۰-۲- خازن‌های سری در فیدرهای شعاعی

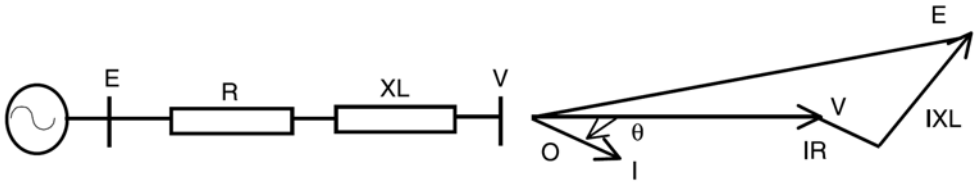
یک فیدر شعاعی (تصویر ۱۰-۳) در نظر بگیرید. امپدانس فیدر برابر است با:

$$Z = R + jX_L$$

افت ولتاژ خط، به طور تقریبی برابر است با:

$$VD = I\left(R\cos\theta + X_L \sin\theta\right)$$

که در آن $I$ جریان مدار، $R$ مقاومت، $X_L$ راکتانس مدار، و $\theta$ زاویهٔ ضریب توان است.




**تصویر ۱۰-۳: فیدر شعاعی**

حال اگر مدار مانند تصویر ۱۰-٤ با خازن سری ( $X_C$ ) جبران‌سازی شود، امپدانس مدار برابر است با:

$$Z' = R + j\left(X_L - X_C\right)$$

و افت ولتاژ خط برابر خواهد بود با:

$$VD' = IR\cos\theta + I\left(X_L - X_C\right)\sin\theta$$

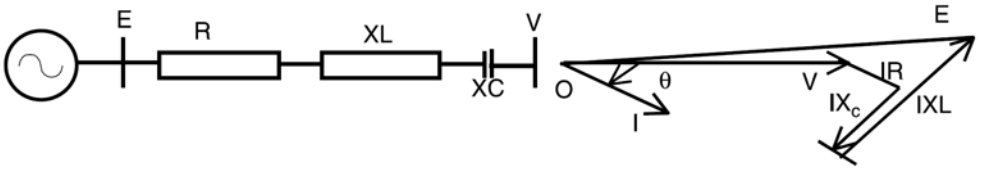
اگر خط به طور کامل جبران شود (یعنی $X_L = X_C$ )، افت ولتاژ با $IR\cos\theta$ برابر خواهد بود. در عمل $X_C$ را اندکی کوچک‌تر از $X_L$ انتخاب می‌کنند تا از اضافه جبران‌سازی جلوگیری شود. با دانستن توان ظاهری ابتدا و انتهای خط، می‌توان رابطهٔ ولتاژ را نوشت:

$$\frac{S_{Load}}{S_{Source}} = \frac{V_{Load}}{V_{Source}} = \frac{\sqrt{P^2 + Q_{bank}^2}}{\sqrt{P^2 + \left(Q - Q_{bank}\right)^2}}$$

در اینجا $Q_{bank}$، توان راکتیو خازن سری است که از رابطهٔ زیر به دست می‌آید:

$$Q_{bank} = \left|I_C\right|^2 X_C$$

مجموع توان راکتیو تولید شده توسط یک خازن سری سه‌فاز، سه برابر مقدار فوق است.




**تصویر ۱۰-٤: فیدر شعاعی با خازن سری**

**مثال**

توان تحویلی در انتهای یک فیدر شعاعی ۱ مگاولت‌آمپر در ضریب توان ۶۰٪ است. ولتاژ سیستم ۱۳/۸ کیلوولت و ۶۰ هرتز است. امپدانس خط $(0.03+j7.2)\Omega$ است. خازن سری با راکتانس ۶ اهم در انتهای خط نصب می‌شود تا پروفایل ولتاژ را بهبود دهد. ولتاژ چقدر بهبود می‌یابد؟ توان تحویلی توسط خازن چقدر است؟

**پاسخ**

بدون خازن سری:

$$V_{line-line}=13.8kV, V_{phase}=7.967kV$$

$$I=\frac{1MVA}{\sqrt{3}\times 13.8kV\times 0.6}=69.74A$$

$$VD=69.74A(0.6-j0.8)(0.03+j7.2)=(402.9-j299.6)V/phase$$

$$V_{Load}=7967V-(402.9-j299.6)=(7564+j299.6)V/phase$$

$$|V_{Load}|=7571V/phase$$

$$\text{Voltage Regulation}=100\times(7967-7571)/7967=4.98\%$$

با خازن سری:

$$VD=69.74A(0.6-j0.8)(0.03+j7.2-j6)=(69.78+j68.2)V/phase$$

$$V_{Load}=7967V-(69.78+j68.2)=(7897-j68.2)V/phase$$

$$|V_{Load}|=7900V/phase$$

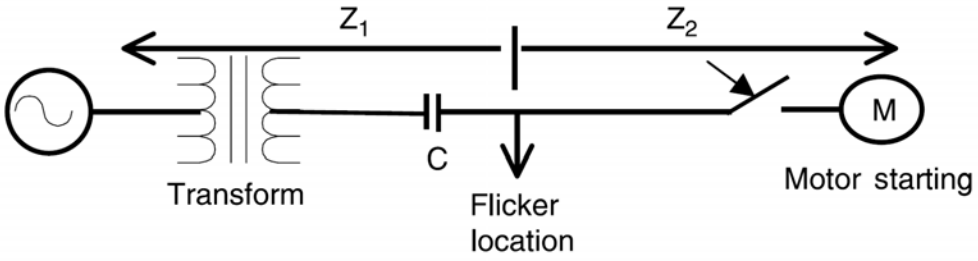
$$\text{Voltage Regulation}=100\times(7967-7900)/7967=0.85\%$$

می‌بینیم که با افزودن ۶ اهم خازن، ولتاژ به میزان قابل توجهی بهبود می‌یابد. مقدار توان راکتیو برابر است با:

$$Q=3|I_C|^2 X_C=3\times 69.74^2\times 6=87.5kVAR$$

### ۱۰-۲-۱- خازن سری در سیستم‌های توزیع

موتورها در هنگام راه‌اندازی جریان زیاد با ضریب توان کم می‌کشند که باعث افت ولتاژ در مسیر فیدر می‌شود. این افت ولتاژ ناگهانی است و چند ثانیه طول می‌کشد تا موتور به سرعت نامی برسد. این فلیکر ولتاژ در برخی موارد قابل قبول نیست، مانند موتورهای بزرگ، جوشکاری، کوره‌ها، و دیگر بارهای نوسان‌دار. راه حل سنتی برای فلیکر تعویض هادی‌های فیدر، ارتقاء ولتاژ سیستم، نصب فیدر جدید، پست جدید یا نصب جبران‌سازهای دیگر در مسیر است. خازن سری راه حلی مناسب برای مشکل فلیکر است. جریان خازن سری می‌تواند مؤلفهٔ اصلی جریان راه‌اندازی موتور را جبران کند. بنابراین، میزان فلیکر در نزدیکی بار به شدت افت می‌کند. اثر خازن سریع و خودکار است. برای به دست آوردن نتایج بهتر، محل نصب خازن سری باید به دقت انتخاب شود. به علاوه، راکتانس خازن سری باید کمتر از راکتانس خط باشد تا اضافه جبران‌سازی رخ ندهد. دیاگرام تک‌خط چنین سیستمی در تصویر ۱۰-۵ آمده است.



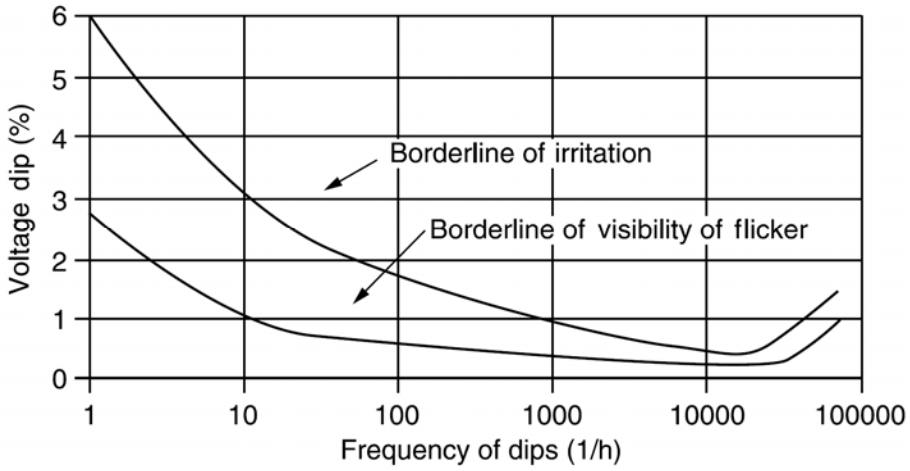

**تصویر ۱۰-۵: دیاگرام تک‌خط تکنیک کاهش فلیکر**

$$\text{flicker} = \left[1 - \left|\frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}\right|\right] \times 100$$

$$Z_1 = R_1 + j\left(X_1 - X_C\right)$$

$$Z_2 = R_2 + jX_2$$

در اینجا $Z_1$ امپدانس ترانس، فیدر، و خازن سری، $Z_2$ امپدانس فیدر و راه‌اندازی موتور است. مقدار فلیکر محاسبه شده باید با مقادیر مجاز تصویر ۱۰-٦ مقایسه شود.




**تصویر ۱۰-٦: مقادیر مجاز فلیکر**

## ۱۰-۳- خازن‌های سری برای خطوط انتقال

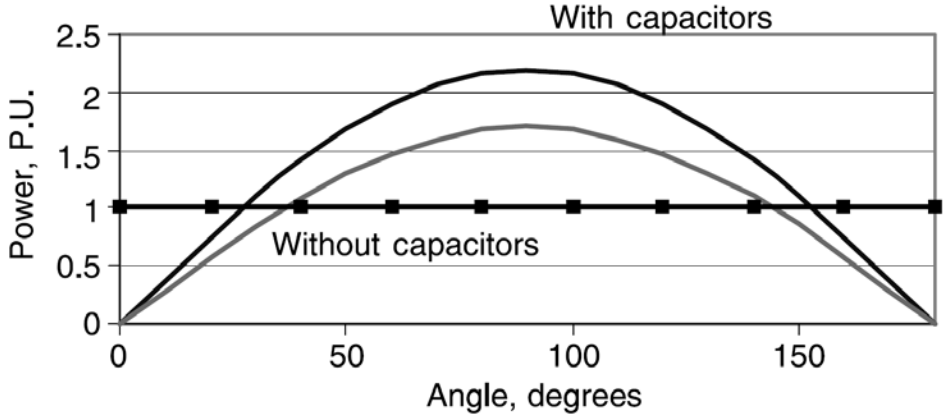
محدودیت‌های حرارتی و حالات گذرا و ماندگار ماکزیمم توان قابل انتقال از خط انتقال را محدود می‌کنند. خازن‌های سری در خطوط انتقال طویل می‌توانند توان انتقالی ماکزیمم را افزایش داده، پایداری سیستم را بهبود بخشند. انتقال توان از یک خط انتقال برابر است با:

$$P = \frac{EV \sin\delta}{X_L}$$

در اینجا $E$ و $V$ ولتاژ ابتدا و انتهای خط و $\delta$ زاویهٔ میان ولتاژ ابتدا و انتهای خط است. با افزودن خازن سری خواهیم داشت:

$$P = \frac{EV \sin \delta}{X_L - X_C}$$

بنابراین با افزودن خازن سری، توان منتقل‌شده افزایش می‌یابد. به علاوه، انتقال توان در درازمدت و توان سنکرون عبوری در حالت‌های گذرا بیشتر شده، پایداری سیستم بهبود می‌یابد. در تصویر ۱۰-۷، توان انتقالی یک خط بدون خازن و با خازن مقایسه شده است. با حضور خازن سری، توان ماکزیمم انتقالی به شدت افزایش می‌یابد. به علاوه، انتقال همان توان قبلی با زاویهٔ کوچک‌تری میسر است که باعث بهبود پایداری می‌شود.




**تصویر ۱۰-۷: توان انتقالی خط بدون خازن و با خازن**

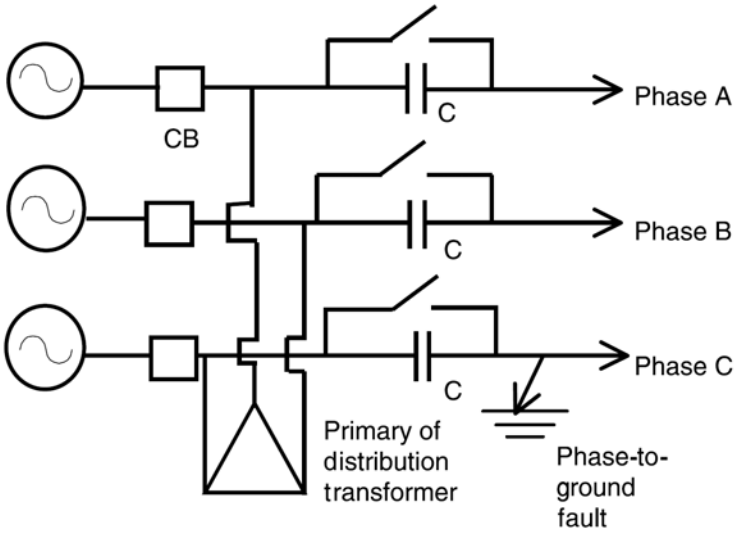
## ۱۰-۴- محدودیت‌های کاربری خازن سری

اغلب، خازن‌های سری می‌توانند عملکرد سیستم را بهبود دهند. ولی در چند مورد، باعث ایجاد مشکلات پیش‌بینی نشده گردیده‌اند، مانند فرورزونانس، شکار ماشین‌های سنکرون[1]، و رزونانس‌های زیر سنکرون[2].

### ۱۰-٤-۱- فرورزونانس

معمولاً ترانس‌های بی‌بار موقع برق‌دار شدن جریان هجومی زیادی می‌کشند. خازن‌های سری ممکن است با اندوکتانس ترانس ایجاد رزونانس نموده، جریان بزرگی تولید کنند. به این پدیده فرورزونانس می‌گویند. به علاوه، در مورد خازن‌های سری بدون حفاظت MOV (واریستورهای اکسید فلزی)، هر گونه خطای فاز به زمین می‌تواند تولید فرورزونانس کند. نمونهٔ این مدار در تصویر ۱۰-۸ آمده است. این وضعیت به خرابی ترانس توزیع می‌انجامد. برای جلوگیری از این مشکل، می‌توان از برق‌گیرهای MOV، کلیدهای بای‌پس، مقاومت میرا کننده، یا کنترلرهای مناسب استفاده کرد. نصب خازن سری در مدارهای طویل با ترانس‌های کم‌بار می‌تواند در فرکانسی برابر با فرکانس جریان هجومی رزونانس کند. برخی اوقات ممکن است هنگام برق‌دار شدن ترانس، بارهای نوسان‌دار به رزونانس بیفتند. در بسیاری موارد، مقاومت میراکننده در دو سر خازن راه حل مناسبی است.

[1] hunting of synchronous machines
[2] subsynchronous resonance




**تصویر ۱۰-۸: فرورزونانس در اثر خطای فاز به زمین**

### ۱۰-٤-۲- شکار موتورهای سنکرون

سیستم‌های قدرت از ماشین‌های سنکرون به عنوان موتور یا ژنراتور استفاده می‌کنند. ماشین‌های سنکرون کم‌بار به دلیل نوسان‌های سیستم مانند کلیدزنی یا تغییرات بار یا تحریک می‌توانند به حالت «شکار[1]» بروند. شکار در ماشین‌های سنکرون به نوسان‌های میرا نشده در روتور گفته می‌شود که پس از نوسان در بار ماشین پیش می‌آید. حضور خازن‌های سری در فیدر راکتانس را کاهش داده و این مشکل در موتورها بیشتر دیده می‌شود. موتور سنکرونی که با خط طویل جبران‌شده تغذیه می‌شود، اگر در زمان کم‌باری استارت شود ممکن است به این شکار برود. به این دلیل خازن‌های سری نباید در مدارهایی تغذیهٔ موتورهای سنکرون و القایی با بارهای نوسانی مانند پمپ‌ها و کمپرسورها استفاده شوند. در هر حال، مشکلاتی نظیر شکار و فلیکر ولتاژ مشاهده خواهد شد.

### ۱۰-٤-۳- رزونانس زیر سنکرون

یک ماشین سنکرون یا القایی در نظر بگیرید که با خازن سری تغذیه می‌شود. ممکن است روتور قفل شود و در سرعتی کمتر از سرعت نامی بچرخد. به این وضعیت رزونانس زیر سنکرون گفته می‌شود. سرعت چرخش بستگی به فرکانس رزونانس ناشی از خازن سری و اندوکتانس مدار دارد. این مدار رزونانس جریان زیادی می‌کشد و می‌تواند با حرارت زیاد و لرزش به موتور آسیب بزند. فرکانس این رزونانس برای یک موتور ٦٠ هرتزی معمولاً در حدود ۲۰ تا ۳۰ هرتز است. برای میرا کردن این رزونانس، می‌توان مقاومت میرا کننده روی خازن سری بست. مقدار این مقاومت باید بالا باشد تا تلفات در حالت عادی کم باشد. باید احتمال وقوع رزونانس زیر سنکرون برای همهٔ موتورهای بزرگ که خازن سری دارند، بررسی شود. برخی شرکت‌های برق با نصب رله‌های تشخیص رزونانس زیر سنکرون در کنار ژنراتورها، این مشکل را به سرعت تشخیص داده، به ژنراتور تریپ می‌دهند.

[1] hunting

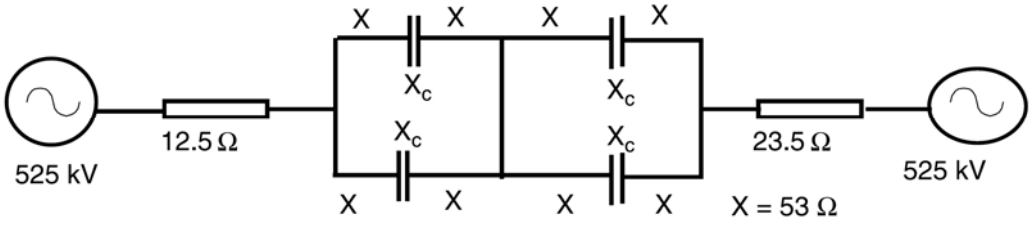
### ۱۰-٤-٤- خود تحریکی موتورهای القایی

یک موتور القایی در نظر بگیرید که با خط دارای خازن سری تغذیه می‌شود. در برخی شرایط، موتور می‌تواند مانند ژنراتور القایی عمل کند و جریانی با فرکانس کمتر از فرکانس نامی تولید کند. این جریان فرکانس پایین تنها با امپدانس مدار تغذیه محدود می‌شود و می‌تواند اندازهٔ زیادی پیدا کند. این جریان بزرگ نه تنها باعث ضربههای جریان و نوسان ولتاژ می‌شود بلکه روتور را نیز به نوسان‌های مکانیکی درمی‌آورد. این پدیده همواره رخ نمی‌دهد و می‌توان آن را با مقاومت خط یا شانت مناسب یا قرار دادن خازن در محل مناسب برطرف کرد. این پدیده با ماشین‌های سنکرون نیز پیش می‌آید.

**مثال**

دیاگرام تک‌خط یک خط انتقال به طول ۵۸۰ کیلومتر، دومداره و دو تکه با ولتاژ ۵۲۵ کیلوولت در تصویر ۱۰-۹ آمده است. برای سادگی محاسبه، اثر مقاومت و خازن شانت را در نظر نگیرید. توان انتقالی ماکزیمم بین دو نقطه را در حالت‌های زیر به دست آورید:

- $X = 53\Omega, X_C = 0$ (بدون خازن سری)
- $X = 53\Omega, X_C = 53\Omega$
- $X = 53\Omega, X_C = 0$ (یک بخش از خط خارج از سرویس است)
- $X = 53\Omega, X_C = 53\Omega$ (یک بخش از خط خارج از سرویس است)




**تصویر ۱۰-۹: دیاگرام تک‌خطی مثال**

**پاسخ**

حالت اول:

$$X = 53\Omega, X_C = 0$$

$$X = (53\times 4)/2 + 12.5 + 23.5 = 142\Omega$$

$$P_{\max} = \frac{V^2}{X} = \frac{525^2}{142} = 1941MW$$

حالت دوم:

$$X = 53\Omega, X_C = 53\Omega$$
$$X = (53\times 2)/2 + 12.5 + 23.5 = 89\Omega$$
$$P_{\max} = \frac{V^2}{X} = \frac{525^2}{89} = 3097MW$$

حالت سوم:

$$X = 53\Omega, X_C = 0$$
$$X = 53\times 4 + 12.5 + 23.5 = 248\Omega$$
$$P_{\max} = \frac{V^2}{X} = \frac{525^2}{89} = 1111MW$$

حالت چهارم:

$$X = 53\Omega, X_C = 53\Omega$$
$$X = 53\times 2 + 12.5 + 23.5 = 142\Omega$$
$$P_{\max} = \frac{V^2}{X} = \frac{525^2}{142} = 1941MW$$

افزایش توان ماکزیمم انتقالی با نصب خازن سری به میزان قابل توجهی بالا می‌رود.

برای یافتن محل مناسب نصب خازن باید افت ولتاژ را در دو حالت بدون خازن و با خازن محاسبه کرد. ابتدا فرض می‌کنیم که خازن سری در وسط فیدر نصب شده است. ولتاژ در نقاط مختلف فیدر بدون خازن و با خازن در هنگام راه‌اندازی موتور در جدول ۱۰-۱ آمده است. از این جدول می‌توان دید که افت ولتاژ در حالت بدون خازن از حد مجاز بیشتر است. با نصب خازن سری، افت ولتاژ به حد مجاز می‌رسد. در جدول ۱۰-۲ دیده می‌شود که افت ولتاژ بدون خازن سری در زمان کار عادی موتور غیر قابل قبول است. با نصب خازن سری، این افت ولتاژ به حد مجاز می‌رسد.

**جدول ۱۰-۱: افت ولتاژ هنگام راه‌اندازی موتور (بدون خازن و با خازن)**

| محل | افت ولتاژ بدون خازن سری (درصد) | افت ولتاژ با خازن سری (درصد) |
|---|---|---|
| ابتدای فیدر | 2.68 | 2.68 |
| میان فیدر (۵۰٪) | 7.42 | 7.42 |
| در محل خازن سری | - | -10.49 |
| خط | 14.83 | -3.07 |
| ترانس | 26.19 | 8.28 |

**جدول ۱۰-۲: افت ولتاژ هنگام کار عادی موتور (بدون خازن و با خازن)**

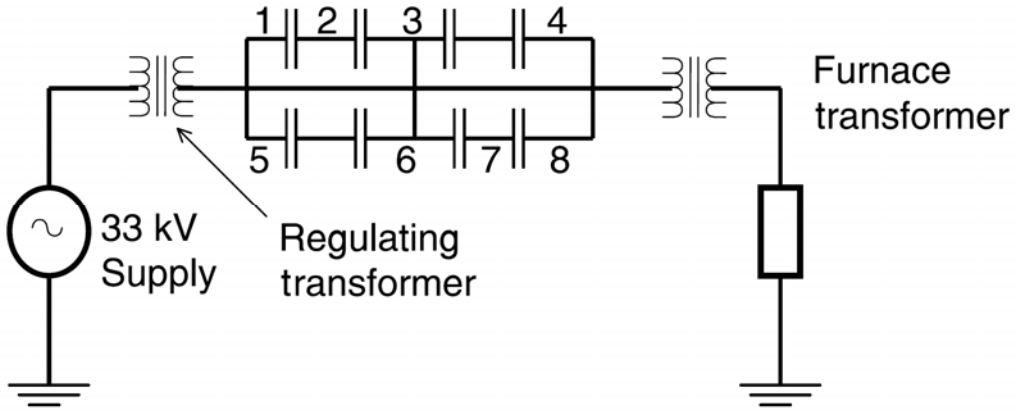
| محل | افت ولتاژ بدون خازن سری (درصد) | افت ولتاژ با خازن سری (درصد) |
|---|---|---|
| ابتدای فیدر | 0.84 | 0.84 |
| میان فیدر (۵۰٪) | 2.59 | 2.59 |
| در محل خازن سری | - | -3.04 |
| خط | 5.19 | -0.44 |
| ترانس | 8.87 | 3.24 |

## ۱۰-۵- کاربردهای دیگر خازن‌های سری

خازن‌های سری در موارد متعدد دیگری هم کاربرد دارند، مانند زمانی که بار نوسان می‌کند: جوشکاری مقاومتی، کوره‌های قوسی، چوب‌بری، ورقه‌سازی، کراشر[1]، ترابری، توربین‌های بادی همراه با ژنراتورهای القایی، و جوش‌کاری قوسی. برخی از این کاربردها در اینجا بحث می‌شوند:

### ۱۰-۵-۱- خازن سری در کوره‌های قوسی

دیاگرام تک‌خط چنین سیستمی در تصویر ۱۰-۱۰ آمده است. کورهٔ قوسی ۳۰ مگا ولت‌آمپر ظرفیت دارد و از طریق ترانسی با همین توان تغذیه می‌شود. خازن سری با اتصال H نصب شده و با یک مدارشکن بای‌پس به همراه فاصلهٔ هوایی محافظت می‌شود. به این ترتیب اگر ولتاژ فاصلهٔ هوایی از مقدار امن بیشتر شود، بلافاصله عمل می‌کند. بنابراین، ولتاژ خازن سری همواره در حد مجاز می‌ماند. جریان مورد نیاز کوره برای ذوب کردن، نوسانی است و خازن سری دامنه این نوسانات را کاهش می‌دهد.

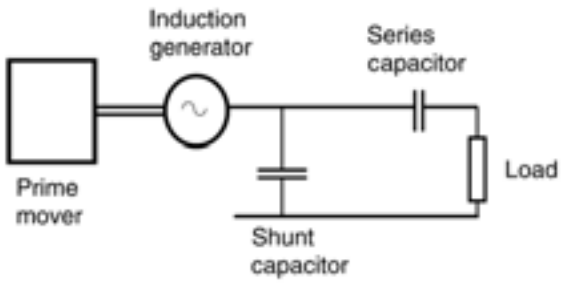



**تصویر ۱۰-۱۰: دیاگرام تک‌خط خازن سری در کورهٔ قوسی**

[1] crusher

### ۱۰-۵-۲- خازن سری در ژنراتورهای القایی

ماشین‌های القایی ادوات ساده و مطمئنی هستند. در حالت موتوری بسیار خوب عمل می‌کنند و در حالت ژنراتوری، به دلیل نبود تحریک محدودیت‌هایی دارند. این جریان تحریک را می‌توان با خازن شانت تأمین کرد ولی خود تحریکی، ابعاد خازن را محدود می‌کند. همچنین برای عملکرد بهتر، باید خازن سوییچ شود. ترکیب خازن شانت و خازن سری می‌تواند خود تحریکی و خود تنظیمی را انجام دهد. محرک (Prime Mover) می‌تواند موتور دیزل، توربین آبی یا بادی باشد. تنظیم ولتاژ ژنراتورهای تکی را می‌توان با خازن‌های سری انجام داد. دیاگرام تک‌خط چنین سیستمی در تصویر ۱۰-۱۱ آمده است.

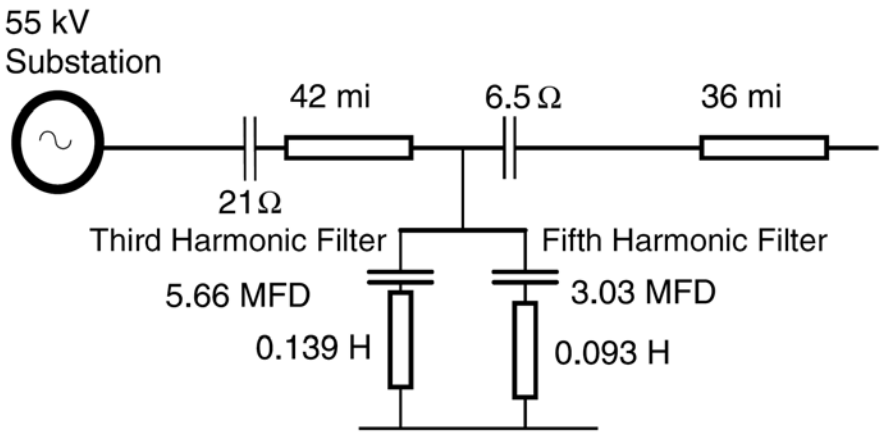



**تصویر ۱۰-۱۱: ژنراتور القایی با خازن شانت و خازن سری**

### ۱۰-۵-۳- خازن‌های سری در ترابری

در سیستم‌های ترابری، به دلیل وجود تونل، پل، و مانند آن ولتاژ تغذیه محدود می‌شود. به طور شهودی، برای خط ۲۵ کیلوولت فاصلهٔ مجاز ۳۲ کیلومتر، و برای خط ۵۰ کیلوولت ٦٤ کیلومتر در نظر گرفته می‌شود. اگر فاصلهٔ پست‌ها کوتاه و بار قطار سنگین باشد، افت ولتاژ باعث محدودیت عملکرد لوکوموتیو می‌شود. بار سنگین در خطوط طویل نیز به دلیل افت ولتاژ عملکرد محدود می‌شود. از راه‌حل‌های رفع این مشکل افزودن چند پست، خازن‌های شانت، یا خازن‌های سری است.

در صنعت معادن زغال، جبران‌سازی با خازن شانت و خازن سری برای تثبیت ولتاژ انتهای فیدر به کار می‌رود. خازن سری در سیستم ۵۰ کیلوولتی راه‌آهن دریاچهٔ پاول استفاده شد. در این خط ریلی، دو قطار کار می‌کردند که هر یک با ۳ لوکوموتیو ٦ هزار اسب بخار کشیده می‌شد. فیدر به صورت شعاعی و به طول ۱۲۵ کیلومتر از یک پست تغذیه می‌کند. بار ۳٦ مگا ولت‌آمپری برای یک پست بار بسیار بزرگی است. بنابراین از خازن‌های شانت و سری برای جبران‌سازی خط استفاده شد (تصویر ۱۰-۱۲). بانک خازنی شانت به همراه فیلتر در ۷۰ کیلومتری پست نصب گردید.

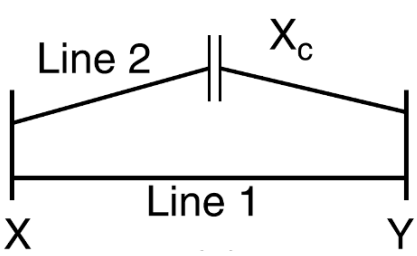



**تصویر ۱۰-۱۲: جبران‌سازی با خازن‌های شانت و سری**

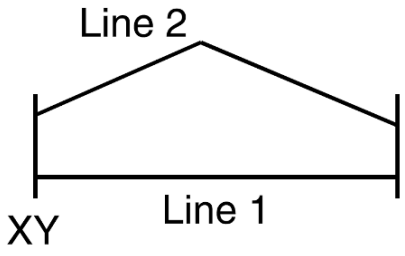
فیلترها، هارمونیک‌های مرتبهٔ ۳ و ۵ را فیلتر می‌کنند. خازن‌های سری با امپدانس ۲۱ و ٦/٥ اهمی به ترتیب در پست و در فاصلهٔ ۷۰ کیلومتری از پست نصب شدند.

### ۱۰-۵-٤- تقسیم بار بین فیدرها

یک خط انتقال یا توزیع را در نظر بگیرید. می‌خواهیم با افزودن خط دیگری (دو مداره کردن) ظرفیت انتقال توان را افزایش دهیم. اگر طول و امپدانس خط دوم متفاوت باشد، تقسیم بار بین این دو دچار اشکال خواهد شد (تصویر ۱۰-۱۳). برای اطمینان از تقسیم صحیح بار، در خط طویل‌تر یا دارای امپدانس بیشتر، از خازن سری استفاده می‌کنیم (تصویر ۱۰-۱٤).




**تصویر ۱۰-۱٤: تقسیم بار بین دو فیدر (با خازن)**




**تصویر ۱۰-۱۳: تقسیم بار بین دو فیدر (بدون خازن)**

**مثال**

یک خط سه‌فاز، ۱۱ کیلوولت (٦۰ هرتز) در نظر بگیرید. راکتانس خط ۱، برابر با ٤ اهم در هر فاز است. راکتانس خط دوم، ٦ اهم در هر فاز است. بار منتقل شده ۵ مگا ولت‌آمپر است. جریان هر خط را حساب کنید. برای تقسیم صحیح بار، می‌خواهیم خازنی در وسط خط ۲ نصب کنیم. راکتانس خازن سری را حساب کنید.

**پاسخ**

$$X_1 = 4\Omega, X_2 = 6\Omega$$

$$I = \frac{5MVA}{\sqrt{3}\times 11kV} = 262A$$

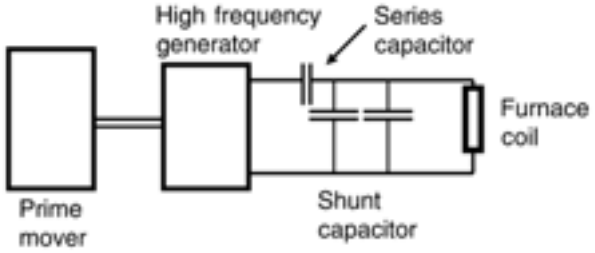
$$I_1 = 262A\frac{6\Omega}{4\Omega + 6\Omega} = 157.2A$$

$$I_2 = 262A\frac{4\Omega}{4\Omega + 6\Omega} = 104.8A$$

برای تقسیم صحیح بار، باید جریان در هر دو خط برابر نصف جریان کل شود. در این صورت جریان هر خط ۱۳۱ آمپر می‌شود. راکتانس خازن سری نیز باید برابر با ۲ اهم در هر فاز باشد.

### ۱۰-۵-۵- خازن‌های سری برای هیترهای القایی

کوره‌های القایی برای گرم کردن مواد فلزی یا غیر فلزی به کار می‌روند. دیاگرام تک‌خط مدار تغذیهٔ این کوره-ها در تصویر ۱۰-۱۵ آمده است. با استفاده از یک موتور/ژنراتور ولتاژ با فرکانس بالا تولید می‌شود. سیم‌پیچ کوره با خازن سری تغذیه می‌شود. ضریب توان هیتر القایی همواره پایین است و با استفاده از خازن شانت می‌توان آن را بهبود داد. خازن سری هم پروفایل ولتاژ را بهبود می‌دهد. محدودهٔ ولتاژ رایج برای این کوره‌ها از ۲/۵ تا ٦ کیلوولت تک‌فاز یا سه‌فاز است. توان آنها هم از ۱/۵ تا ٤ مگاوات متغیر است.




**تصویر ۱۰-۱۵: تغذیهٔ هیتر القایی با خازن سری**

## ۱۰-۶- مؤخره

در این فصل اصول خازن‌های شانت و سری با استفاده از دیاگرام فازوری بیان شد. با استفاده از خازن‌های سری در شبکه‌های شعاعی می‌توان پروفایل ولتاژ را بهبود داد. اصول اولیهٔ استفاده از خازن‌های سری در شبکه‌های شعاعی بیان شد. تئوری نصب خازن سری در خطوط انتقال برای افزایش توان انتقالی گفته شد. مثال‌های عددی برای افزایش توان انتقالی حل گردید. کاربردهای دیگر خازن‌های سری مانند کوره‌های قوس، ژنراتورهای القایی، و سیستم‌های ترابری بحث شد.

# فصل ۱۱ : خازن‌های ضربه

## ۱۱-۱- معرفی

در مدارشکن‌ها و ترانس‌ها از روغن به عنوان عایق استفاده می‌شود تا فشار ناشی از ولتاژ الکتریکی را کاهش دهند. در مورد ماشین‌های گردان مانند موتورها و ژنراتورها، عایق روغنی وجود ندارد و سیم‌پیچی‌ها با عایق خشک محافظت می‌شوند. بنابراین، ماشین‌های گردان، نسبت به ترانس‌ها و مدارشکن‌ها بیشتر در خطر استرس ولتاژ و خرابی هستند. گذراهای سریع می‌توانند در سیم‌پیچی‌ها نوسان ایجاد کرده، به عایق صدمه بزنند. برخی ماشین‌ها بدون واسطه به شبکه متصل هستند و در معرض ضربههایی مانند صاعقه قرار می‌گیرند. ماشین‌های دیگر از طریق ترانس متصل می‌شوند و موج‌های سیار ناشی از ضربهٔ صاعقه وارد آنها می‌شود. در اثر خرابی عایق موتور، اضافه‌ولتاژهایی تولید می‌شود. این موارد بر کارکرد صحیح موتور اثر می‌گذارند. تقریباً همهٔ ماشین‌های گردان در معرض ضربه‌های صاعقه، کلیدزنی، و ضربههای ولتاژ درونی قرار می‌گیرند.

## ۱۱-۲- استقامت عایقی

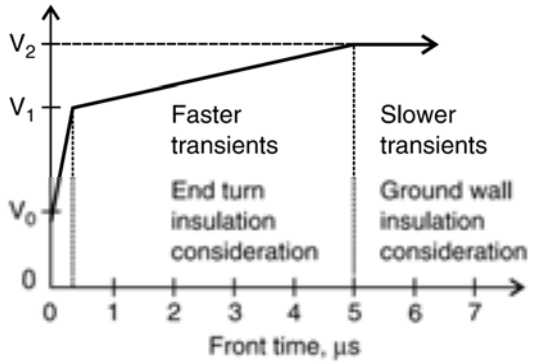
فاصله‌های هوایی ماشین‌های گردان بسیار کوچک هستند و بنابراین استقامت عایقی درونی ماشین کوچک است. در هر شکاف روتور و استاتور چندین دور سیم‌پیچی قرار می‌گیرد و در نتیجه سطح عایقی بین سیم‌پیچی‌ها بسیار کوچک‌تر از سطح عایقی شکاف است. با سری شدن سیم‌پیچی‌های موتور، خازن بین هادی‌های هر سیم‌پیچی افزایش می‌یابد. در جدول ۱۱-۱، سطح عایقی اولیهٔ موتورهای AC، ترانس‌ها، و سوییچ‌ها برای مقایسه آمده است. گذراهای سریع می‌توانند گرادیان‌های ولتاژ بین سیم‌پیچ‌ها پدید آورند و در نتیجه باید اندازه و نرخ افزایش ولتاژهای ضربه را که وارد ماشین می‌شوند کنترل کرد.

**جدول ۱۱-۱: سطح عایقی اولیهٔ چند تجهیز با نرخ افزایش مجاز برای ولتاژهای ضربه**

| ولتاژ نامی (ولت) | سطح عایقی اولیه (کیلو ولت) | | | |
|---|---|---|---|---|
| | کلاس ولتاژ | موتور AC | ترانس | سوییچ |
| 480 | 0.6 | 3.4 | 45 | 30 |
| 2,300 | 2.5 | 10 | 60 | 60 |
| 4,000 | 5 | 16 | 75 | 60 |
| 12,000 | 15 | 44 | 110 | 95 |

شکل موج رایج برای استقامت ماشین‌های گردان بر اساس استاندارد IEEE در تصویر ۱۱-۱ آمده است. استقامت عایقی یک ماشین گردان با توجه به موارد زیر به دست می‌آید. مقدار مجاز رایج برای استقامت عایقی

برابر با یک‌دهم مقدار مجاز ولتاژ ضربهٔ فاز به زمین به ازای هر میکرو ثانیه است (کل شکل موج ۱۰ میلی‌ثانیه می‌باشد). مقادیر مختلف ولتاژی تصویر ۱۱-۱ در جدول ۱۱-۲ آمده است.




**تصویر ۱۱-۱: استقامت ماشین‌های گردان در برابر ولتاژ ضربه**

**جدول ۱۱-۲: ولتاژهای احتمالی در منحنی استقامت عایقی**

| (p.u.) $V_2$ | (کیلوولت) $V_2$ | (کیلوولت) $V_1$ | (کیلوولت) $V_0$ | ولتاژ نامی (کیلو ولت) |
|---|---|---|---|---|
| 9 | 3.4 | 0.75 | 0.375 | 0.46 |
| 8.1 | 3.8 | 0.94 | 0.470 | 0.575 |
| 5.27 | 9.9 | 3.8 | 1.9 | 2.3 |
| 4.87 | 15.9 | 6.5 | 3.3 | 4 |
| 4.8 | 18.1 | 7.5 | 3.8 | 4.6 |
| 4.66 | 25.1 | 10.8 | 5.4 | 6.6 |
| 4.49 | 48.4 | 21.6 | 10.8 | 13.2 |
| 4.45 | 65.4 | 29.4 | 14.7 | 18 |
| 4.44 | 72.5 | 32.7 | 16.3 | 20 |
| 4.42 | 90.2 | 40.8 | 20.4 | 25 |

از منحنی استقامت عایقی می‌توان موارد زیر را استنباط کرد:

- پیشانی موج (شبیه تابع پله)، نباید از ولتاژ پیک نامی ماشین تجاوز کند. معمولاً این مقدار ۱۰٪ بیشتر از ولتاژ نامی ماشین در نظر گرفته می‌شود.
- برای ولتاژهای ضربه کوتاه‌مدت، ولتاژ پیک نباید از دو برابر ولتاژ پیک لحظه‌ای تجاوز کند. این مقدار برابر $V_1$ در تصویر ۱۱-۱ است.
- نرخ افزایش پیشانی موج ضربه ولتاژ، بعد از ولتاژ پلهٔ اولیه، نباید از مقدار متناظر با حداقل زمان اوج[1] ۵ میلی‌ثانیه تجاوز کند. این مقدار برابر $V_2$ در تصویر ۱۱-۱ است.

استقامت عایقی یک ماشین گردان به مواردی نظیر پیک ولتاژ، زمان کل، زمان اوج، و میزان تکرار آن ضربه بستگی دارد. مقدار مجاز استقامت عایقی و مقدار مجاز نرخ اوج ضربه در ترمینال‌های ماشین در جدول ۱۱-۳ آمده

[1] rise time

است. این مقادیر کمی با مقادیر جدول ۱۱-۱ متفاوت است که در آن BIL ماشین‌های AC، ترانس، و سوییچ‌ها آمده است. برق‌گیرهای مناسب برای کلاس‌های مختلف ولتاژی در جدول ۱۱-٤ آمده است.

**جدول ۱۱-۳: تحمل ولتاژ ضربه و نرخ افزایش مجاز ضربه در ترمینال‌های موتور**

| ولتاژ ماشین (کیلو ولت) | تحمل ولتاژ ضربه (کیلو ولت) | خازن (میکرو فاراد) |
|---|---|---|
| 0.65 | 4 | 0.4 |
| 2.4 | 10 | 1 |
| 4.16 | 16 | 1.3 |
| 4.8 | 19 | 1.9 |
| 6.9 | 21 | 2.1 |
| 11.5 | 42 | 4.2 |
| 13.8 | 50 | 5 |

**جدول ۱۱-٤: برق‌گیرهای نوع پُست برای ماشین‌های گردان**

| ولتاژ ماشین (کیلو ولت) | سیستم زمین‌نشده | | | سیستم زمین‌شده | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | برق‌گیر (کیلوولت) | ولتاژ جرقه (کیلو ولت پیک) | ولتاژ دشارژ (کیلو ولت پیک) | برق‌گیر (کیلوولت) | ولتاژ جرقه (کیلو ولت پیک) | ولتاژ دشارژ (کیلو ولت پیک) |
| 0.6 | 0.75 | 2.8 | 2.6 | 0.75 | 2.8 | 2.6 |
| 2.4 | 3 | 12 | 5 | 3 | 12 | 5 |
| 4.16 | 4.5 | 16 | 7.4 | 3 | 12 | 5 |
| 7.2 | 7.5 | 25 | 12.2 | - | 20 | 9.8 |
| 12 | 12 | 39 | 19.4 | 9 | 30 | 14.6 |
| 13.8 | 15 | 48 | 24.2 | 12 | 39 | 19.4 |

برق‌گیرهای نوع پُست برای کلاس‌های ولتاژی جدول ۱۱-٤ استفاده می‌شوند. سیستم زمین‌شده به سیستمی گفته می‌شود که در آن نسبت راکتانس $X_0/X_1$ مثبت و کوچک‌تر از ۳ و نسبت $R_0/X_1$ مثبت و کوچک‌تر از ۱ باشد. این مقادیر پیشنهاد شده هستند. برای انتخاب برق‌گیر باید محاسبات دقیق انجام داد. خازن‌های ضربه مناسب برای ماشین‌های گردان در جدول ۱۱-۵ آمده است. در اینجا نیز باید با محاسبات لازم خازن مورد نیاز را تعیین کرد.

**جدول ۱۱-۵: خازن‌های ضربه نوع پُست برای ماشین‌های گردان**

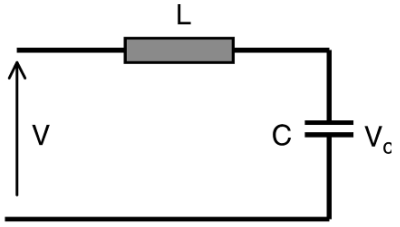
| ولتاژ ماشین (کیلو ولت) | سیستم زمین‌نشده | | | سیستم زمین‌شده | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | برق‌گیر (کیلوولت) | ولتاژ جرقه (کیلو ولت پیک) | ولتاژ دشارژ (کیلو ولت پیک) | برق‌گیر (کیلوولت) | ولتاژ جرقه (کیلو ولت پیک) | ولتاژ دشارژ (کیلو ولت پیک) |
| 0.6 | 0.75 | 2.8 | 2.6 | 0.75 | 2.8 | 2.6 |
| 2.4 | 3 | 12 | 5 | 3 | 12 | 5 |
| 4.16 | 4.5 | 16 | 7.4 | 3 | 12 | 5 |
| 7.2 | 7.5 | 25 | 12.2 | - | 20 | 9.8 |
| 12 | 12 | 39 | 19.4 | 9 | 30 | 14.6 |
| 13.8 | 15 | 48 | 24.2 | 12 | 39 | 19.4 |

## ۱۱-۳- منشأ ضربه های سریع

منشأ اضافه‌ولتاژهای وارد شده به ماشین‌های گردان می‌تواند صاعقه یا کلیدزنی باشد. ضربهٔ ضربه صاعقه می‌تواند از خط عبور کرده، ایجاد اضافه‌ولتاژ در یک ماشین گردان کند. ممکن است صاعقه مستقیم برخورد کند یا روی یک عایق تخلیه شود. در هر صورت، موج صاعقه پیشانی تیزی دارد و باید ماشین‌های گردان را در برابر آن حفاظت کرد. خصوصیات موج‌های مختلف صاعقه در فصل ۱۸ آمده است. ضربهٔ ضربه های کلیدزنی منبع دیگری از اضافه‌ولتاژ در سیستم هستند. اینها ناشی از عملکردهای مختلف مدارشکن مانند برق‌دار کردن، بی‌برق کردن، رفع خطا، بست مجدد، پشتیبانی رفع خطا، کلیدزنی خازن، مرحلهٔ قبل از اتصال[1]، اتصال مجدد[2] (نا خواسته)، و دیگر عملیات مدارشکن است. طبیعت این اضافه‌ولتاژها و شکل موج‌های ناشی از آن در فصل ۲۲ بحث می‌شود. امکان دارد ولتاژهای ضربه به دلیل کلیدزنی یا خطای خارج از ماشین در درون ماشین رخ دهند. کلیدزنی و یا خرابی عایق می‌تواند موج‌های پر شیب تولید کند. جرقه در برق‌گیرها اضافه‌ولتاژهایی تولید می‌کند که برای سیم‌پیچی ماشین‌ها خطرناک است. خرابی عایق باعث اضافه‌ولتاژ در فازهای سالم می‌شود. در راه‌اندازی موتور نیز به دلیل اندوکتانس موتور و خازن کابل تغذیه و راه‌انداز، نوسان‌های ولتاژ دیده می‌شود.

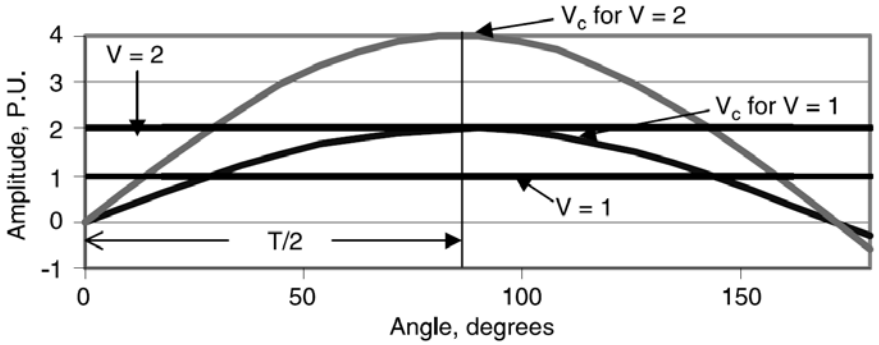
## ۱۱-۴- سیستم حفاظت

برای کنترل نرخ افزایش ولتاژ در یک مدار LC، ولتاژ اعمالی باید محدود شود. یک مدار LC مانند تصویر ۱۱-۲ در نظر بگیرید که ولتاژ V به آن اعمال شده است. ولتاژ خازن ( $V_C$ ) نوسانی است. دورهٔ تناوب این موج برابر است با: $T = 2\pi\sqrt{LC}$. ولتاژ خازن بعد از زمان $T/2$ به پیک می‌رسد. با انتخاب مناسب L و C، می‌توان نرخ افزایش ولتاژ را کنترل کرد. ولی ممکن است اندازهٔ ولتاژ ضربه بیشتر شود. در این صورت، سه پارامتر کنترل نرخ افزایش ولتاژ و پیک ولتاژ، خازن، القاءگر، و روشی برای محدود کردن اندازهٔ ولتاژ خواهد بود. در عمل، ولتاژ را می‌توان با یک برق‌گیر محدود کرد. در تصویر ۱۱-۳، ولتاژ خازن و ولتاژ اعمالی در دو حالت نشان داده شده است. ولتاژ خازن می‌تواند تا دو برابر ولتاژ اعمالی افزایش یابد و طبیعت نوسانی دارد. در عمل، میرایی بیشتر است و بنابراین ولتاژ کمتر می‌شود. ولی قلهٔ ولتاژ خازن می‌تواند بسیار بیشتر از ولتاژ اعمالی شود. برای محدود کردن ولتاژ خازن، از یک برق‌گیر استفاده می‌شود که ولتاژ دو سر خازن را در صورت تجاوز از حد مجاز برش می‌دهد.

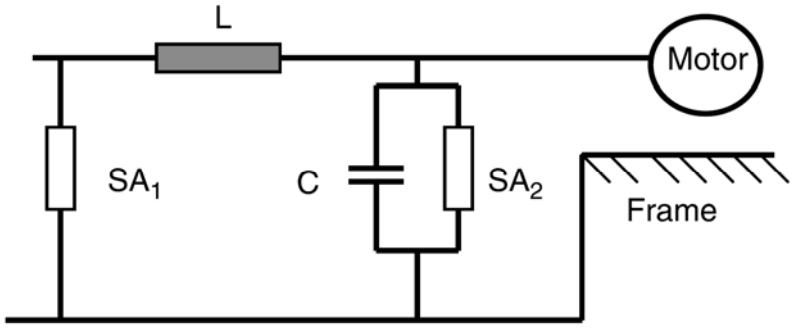



**تصویر ۱۱-۲: مدار رزونانس LC**

[1] pre-strike
[2] restrike

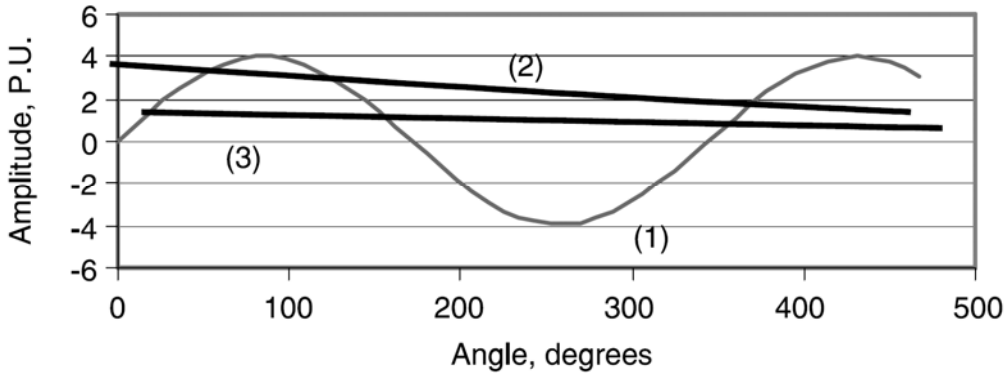



تصویر ۱۱-۳: ولتاژ دو سر خازن در تصویر ۱۱-۲




تصویر ۱۱-٤: حفاظت با برق‌گیر و خازن ضربه

نمونهٔ مدار حفاظت بر اساس موارد بالا در تصویر ۱۱-٤ آمده است. اندوکتانس را می‌توان در کابل یا هادی‌های خط توزیع کرد. برق‌گیر SA1 در سمت فشار قوی ترانس نصب می‌شود. خازن ضربه و برق‌گیر SA2 در ترمینال‌های موتور نصب می‌شوند. شکل موج‌های مختلف این مدار در تصویر ۱۱-۵ آمده است. برق‌گیر ولتاژ موتور را محدود می‌کند و نرخ افزایش ولتاژ با خازن کنترل می‌شود.




تصویر ۱۱-۵: (۱) ولتاژ موتور بدون حضور برق‌گیر دوم، (۲) ولتاژ برق‌گیر اول، (۳) ولتاژ موتور با حضور برق‌گیر دوم

**مثال**

خازنی با ظرفیت ۱۲۵ نانو فاراد در ترمینال یک موتور سه‌فاز، ٦۰ هرتز، ٤/۲ کیلوولت، و ۲ مگا ولت‌آمپری به همراه یک برق‌گیر نصب شده است. جریان حالت ماندگار خازن ضربه را حساب کنید. همچنین جریان خازن ضربه را در صورت وقوع ضربه ولتاژ با فرکانس ۱۰ کیلوهرتز محاسبه کنید. نتیجه را تفسیر کنید.

**پاسخ**

$$C = 125nF$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi \times 60 \times 125 \times 10^{-9}} = 21.23k\Omega$$

$$I_{steady-state} = \frac{4.2kV}{\sqrt{3} \times 21.23k\Omega} = 0.11A$$

جریان در هنگام ضربه ولتاژ ۱۰ کیلوهرتزی:

$$C = 125nF$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi \times 10kHz \times 125 \times 10^{-9}} = 127.4\Omega$$

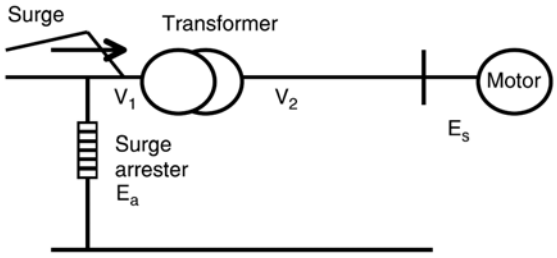
$$I = \frac{4.2kV}{\sqrt{3} \times 127.4\Omega} = 19A$$

ملاحظه می‌کنیم که جریان خازن در حالت عادی بسیار کوچک است، در حالی که در هنگام ضربه جریان قابل توجهی از خازن ضربه عبور می‌کند.

### ۱۱-٤-۱- محاسبهٔ پیک ولتاژ ضربه در موتور

در تصویر ۱۱-٦ موتوری به ترانس متصل شده است. برق‌گیر در اولیهٔ ترانس، ترانس را از ضربه های ورودی مانند صاعقه و کلیدزنی حفاظت می‌کند. برای محاسبهٔ ماکزیمم اضافه‌ولتاژهایی که به ترمینال موتور می‌رسند، پارامترهای زیر را در نظر بگیرید:

توان ظاهری ترانس، ولتاژ اولیهٔ ترانس ($V_1$)، ولتاژ ثانویهٔ ترانس ($V_2$)، امپدانس ترانس، ضریب تصحیح ترانس ($K$ در تصویر ۱۱-۷)، ولتاژ جرقهٔ برق‌گیر ($E_a$)، امپدانس ضربه موتور ($R$)، تعداد حداقل موتورهای روشن ($A$)، طول کابل بین مدارشکن و موتور ($B$)، خازن هر ۱۰۰ فوت کابل ($C_f$)، خازن ضربه ($C_s$ در جدول ۱۱-۵)، و اندوکتانس ترانس ($L$).




**تصویر ۱۱-٦: موتور و ترانس تغذیه**

دورهٔ تناوب موج، ولتاژ ضربه موتور، و نرخ افزایش ولتاژ برای بررسی نیاز به خازن ضربه محاسبه شده‌اند.

$$L_{trans} = \frac{26.5ZV_2^2}{S}$$

$$T = 2\pi\sqrt{LC}$$

$$M = \frac{\sqrt{LC}}{2RC}$$

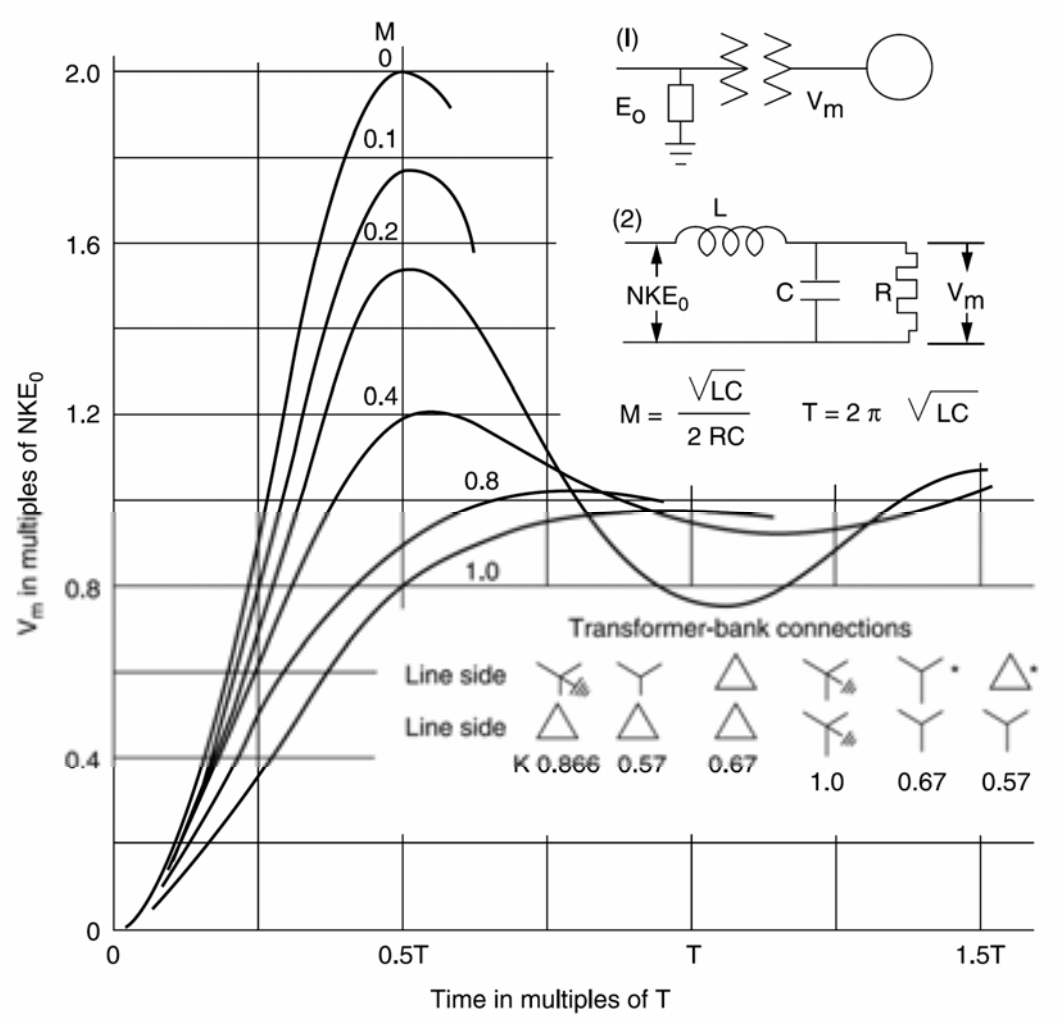
ولتاژ ضربه ترانس ( $E_s$ ) به این صورت حساب می‌شود:

$$E_s = \frac{V_2}{V_1} KE_a$$

با دانستن M، فاکتور متناظر برای ولتاژ را می‌توان از تصویر ۱۱-۷ به دست آورد.

$$V_m = (\text{factor}) \times E_s$$

سپس نرخ افزایش ولتاژ ضربه برابر خواهد بود با $V_m/(0.5T)$.




**تصویر ۱۱-۷: ضریب اضافه‌ولتاژ**

اگر ولتاژ پیک کمتر از BIL موتور باشد و اگر نرخ افزایش ولتاژ ضربه کمتر از مقدار مجاز باشد، احتیاجی به حفاظت اضافی وجود ندارد. اگر این پارامترها از مقادیر مجاز تجاوز کنند، باید با خازن ضربه از تجهیز حفاظت کرد.

**مثال**

موتوری را در نظر بگیرید که با ترانسی مثلث/مثلث ۱۲ کیلوولت به ۲/٤ کیلوولت و توان ۵ مگا ولت‌آمپر و امپدانس ۵/۵ درصد تغذیه می‌شود. طول کابل ٦۰ متر و نوع کابل 500 kcmil و بدون شیلد است. برق‌گیر اولیهٔ ترانس ۱۲ کیلوولت است و ولتاژ جرقهٔ آن ٤۵ کیلوولت است. آیا این موتور نیازی به حفاظت ضربه دارد یا نه.

**پاسخ**

$S = 5MVA, V_1 = 12kV, V_2 = 2.4kV$
$Z = 5.5\%, K = 0.67, R = 1000\Omega$
$A = 2, B = 60m, C = 32nF, L = 167.9\mu H$
$R_a = 500\Omega, T = 14.557\mu s$
$M = 0.072, E_a = 45kV, E_s = 6.03kV$
$factor = 1.85, V_{\max} = 11.16kV$
$BIL = 10kV$

ولتاژ ماکزیمم، از BIL تجاوز می‌کند، بنابراین باید خازن ضربه نصب شود. اگر برق‌گیر ۲/٤ کیلو ولتی به همراه با خازنی با مشخصات زیر نصب شود، خواهیم داشت:

$C_s = 125nF, C_{total} = 157nF, T = 32.24\mu s$
$M = 0.033, E_a = 12kV, E_s = 1.608kV$
$\text{factor} = 1.9, V_{\max} = 3.06kV, BIL = 10kV$

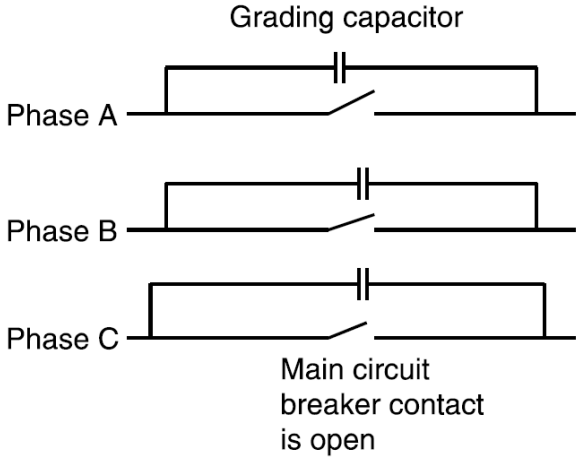
حال ماکزیمم ولتاژ کمتر از BIL است. در ضمن نرخ افزایش ولتاژ برای ۰/۰۹۵ کیلو ولت بر میکرو ثانیه است که کمتر از مقدار مجاز ۱ کیلو ولت بر میکرو ثانیه می‌باشد. محاسبهٔ برق‌گیر در فصل ۱۸ بیان می‌شود. نصب برق‌گیر مناسب به همراه خازن ضربه در ترمینال موتورها بسیار ضروری است. کابل متصل‌کنندهٔ برق‌گیر و خازن ضربه به موتور باید تا حد امکان کوتاه باشد.

## ۱۱-۵- خازن‌های مخصوص مدارشکن‌ها

### ۱۱-۵-۱- خازن‌های توزیع ولتاژ برای مدارشکن‌های فوق فشار قوی

در مدارشکن‌های فوق فشار قوی، در زمان باز بودن مدارشکن، ولتاژ زیادی روی تیغه‌ها می‌افتد. برای توزیع یکنواخت ولتاژ روی قطع‌کننده‌ها (در حالت مدار باز)، از خازن‌های توزیع ولتاژ استفاده می‌شود (تصویر ۱۱-۸). این خازن‌ها همچنین نرخ افزایش ولتاژ بازیافت گذرا را کنترل می‌کند. این خازن‌ها در هنگام مدار باز بودن مدارشکن، اتصالی غیر مستقیم میان بار و منبع ایجاد می‌کنند. برخی اوقات این خازن‌ها و راکتانس مغناطیسی

ترانس مدار تشدید ساخته، ایجاد فرورزونانس می‌کنند. مدار تشدید توسط این خازن‌ها با فرکانس شبکه تحریک می‌شود. مقدار رایج این خازن‌ها در شبکهٔ ۵۰۰ کیلوولتی حدود ۷۰۰ پیکوفاراد در هر فاز است. نمونهٔ این خازن در تصویر ۱۱-۹ آمده است. این خازن‌ها معمولاً با عایق‌های پرسلین موازی می‌شوند.



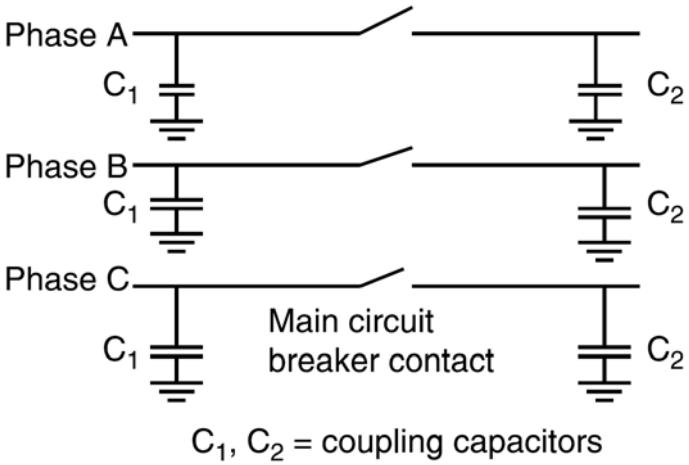

**تصویر ۱۱-۸: خازن‌های توزیع ولتاژ در یک مدارشکن**

**تصویر ۱۱-۹: نمونهٔ تجاری خازن‌های توزیع ولتاژ**

### ۱۱-۵-۲- خازن‌های ضربه برای مدارشکن‌ها

وقوع خطا در پست تولید باعث ایجاد جریان اتصال کوتاه بزرگی می‌شود. مدارشکن‌های مورد استفاده برای رفع این خطا دچار حالت گذراهای شدیدی مانند ولتاژ بازیافت گذرا (RRV) و نرخ افزایش ولتاژ بازیافت[1] (RRRV) می‌شوند. برای کنترل TRV و RRRV در تیغه‌های مدارشکن، از خازن‌های ضربه در دو طرف مدارشکن استفاده می‌شود (تصویر ۱۱-۱۰). خازن رایج شبکه‌های ۱۳/۸ کیلوولتی در نزدیکی ژنراتور در حدود ۱۳۰ تا ۲۵۰ میکروفاراد بسته به جریان اتصال کوتاه و عوامل دیگر است. در اصطلاحات مدارشکن‌ها، برخی اوقات خازن ضربه را خازن کوپلینگ می‌نامند. این خازن‌ها شبیه خازن‌های توزیع ولتاژ هستند.

[1] Rate of Rise of Recovery Voltage




**تصویر ۱۱-۱۰: خازن‌های ضربه جفتی در مدارشکن‌ها**

### ۱۱-۵-۳- خازن‌های مخصوص GIS

اخیراً از مدارشکن‌های نوع گازی (GIS) به کثرت در شرکت‌های برق و صنایع استفاده شده است. این امر به دلیل عملکرد برتر این تجهیزات و مزایای دیگر است. مدارشکن‌های گازی در شرایط سخت و دمای متغیر، گرد و غبار، آلودگی، و فضای کم با استفاده از خازن‌های توزیع ولتاژ نرخ افزایش ولتاژ در هنگام کلیدزنی را کنترل می‌کنند. حداقل خازن مورد نیاز در مدارشکن‌های ۵۰۰ کیلوولت حدود ۲۰۰ پیکوفاراد در هر فاز است.

## ۱۱-۶- مؤخره

سیم‌پیچی‌های ماشین‌های گردان با عایق‌های خشک پیچیده شده و در نتیجه تحمل آنها در برابر ولتاژ ضربه کمتر از ترانس‌ها و مدارشکن‌های روغنی است. قابلیت تحمل ولتاژ ضربه در ماشین‌های گردان با منحنی‌های خاصی تعیین می‌شود. اساس حفاظت ضربه در ماشین‌های گردان نصب خازن ضربه برای کاهش نرخ افزایش ولتاژ و نصب برق‌گیر برای محدود کردن دامنهٔ ولتاژ است. در این فصل نمونهٔ یک مدار حفاظت ضربه معرفی شد. استفاده از خازن‌های توزیع ولتاژ در مدارشکن‌های فوق فشار قوی نیز باعث توزیع یکنواخت ولتاژ در تیغه‌ها می‌شود. خازن‌های توزیع ولتاژ همچنین در مدارشکن‌های گازی استفاده می‌شوند. اغلب از خازن‌ها برای کنترل نرخ افزایش ولتاژ اتصال کوتاه استفاده می‌شود.

# فصل ۱۲ : خازن‌های موتوری

## ۱۲-۱- معرفی

موتورها توسط NEMA به کلاس‌های مختلفی مانند A، B، C، D، F، و روتور سیم‌پیچی شده تقسیم می‌شوند. موتورهای کلاس A دارای روتورهای کم‌مقاومت هستند که مشخصهٔ خوبی دارند، ولی جریان راه‌اندازی بالایی دارند. روش مناسب برای راه‌اندازی این موتورها، راه‌اندازی با ولتاژ کم است. کاربرد این موتورها در دمنده‌ها، فن‌ها، ابزار ماشین، و پمپ‌های سانتریفیوژی است.

موتورهای کلاس B موتورهای قفسی دوبله هستند و با ولتاژ کامل راه‌اندازی می‌شوند. گشتاور راه‌اندازی آنها مانند کلاس A است ولی جریان راه‌اندازی آنها سه‌چهارم جریان کلاس A است. کاربرد این موتورها مانند کلاس قبلی می‌باشد ولی رایج‌تر هستند.

موتورهای کلاس C هم قفسی دوبل با شکاف‌های عمیق روی روتور و مقاومت بیشتر از کلاس B هستند. این موتورها گشتاور راه‌انداز بیشتری دارند ولی بازده کمتر و لغزش بیشتر از کلاس B دارند. این موتورها برای بارهای سرعت ثابت و نیازمند گشتاور اولیهٔ زیاد مناسب هستند و جریان راه‌اندازی کمی دارند. کاربردهای رایج این موتورها در کمپرسورها، تسمهٔ نقاله، کراشر، و پمپ‌های رفت و برگشتی است.

موتورهای کلاس D بیشترین گشتاور اولیه را دارند. روتور آنها قفس تکی است که گشتاور اولیه را تأمین می‌کند ولی لغزش زیاد و بازده کمی دارند. این موتورها برای بارهایی با اینرسی زیاد مانند بولدوزر، ماشین‌های قالب‌گیری، پرس‌های ضربه‌ای، و فلزبری کاربرد دارند.

موتورهای کلاس F معمولاً سرعت بالا و مخصوص بارهایی با گشتاور اولیهٔ کوچک مانند فن‌ها یا پمپ‌های سانتریفیوژی هستند. روتور کم‌مقاومت است و لغزش کوچک و بازده بالا دارد ولی گشتاور اولیهٔ آنها هم کوچک است.

موتورهای با روتور سیم‌پیچی دارای حلقه‌هایی در مدار روتور هستند. این موتورها را می‌توان با استفاده از مقاومت متغیر یا کنترلرهای حالت جامد[1] کنترل کرد.

### ۱۲-۱-۱- اثر تغییر ولتاژ بر مشخصهٔ موتورهای القایی

مشخصهٔ معمول یک موتور القایی و وابستگی آن به تغییرات ولتاژ در جدول ۱۲-۱ آمده است. مهم‌ترین اثر ولتاژ پایین، کاهش گشتاور اولیه و افزایش دما در بار نامی است. اثرات قابل توجه در هنگام افزایش ولتاژ، افزایش

[1] solid state

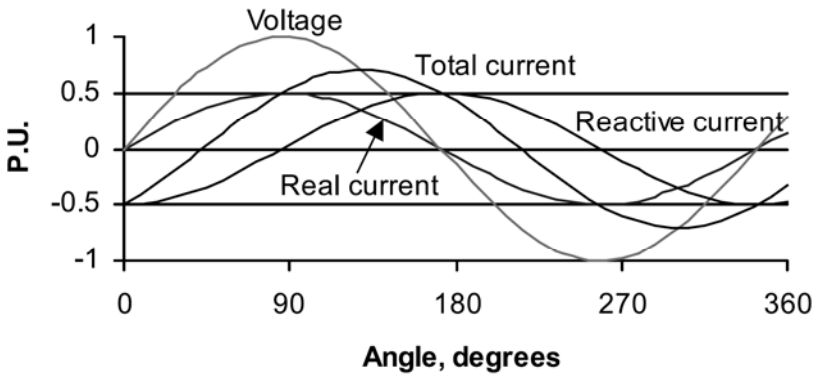
گشتاور اولیه، افزایش جریان راه‌اندازی، و کاهش ضریب توان است. افزایش گشتاور اولیه می‌تواند باعث اعوجاج کوپلینگ یا خرابی بار شود.

**جدول ۱۲-۱: اثر تغییرات ولتاژ در مشخصهٔ موتور القایی**

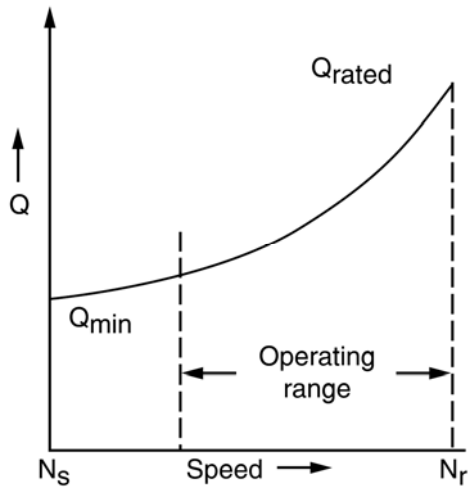
| پارامتر | رابطه با ولتاژ | ۱۰٪ کاهش ولتاژ | ۱۰٪ افزایش ولتاژ |
|---|---|---|---|
| گشتاور | مجذور ولتاژ | ۱۸٪ کاهش | ۲۰٪ افزایش |
| لغزش | معکوس مجذور ولتاژ | ۲۰٪ افزایش | ۱۷٪ کاهش |
| سرعت در بار نامی | سرعت لغزش | ۱٪ کاهش | ۱٪ افزایش |
| بازده در بار نامی | – | ۲٪ کاهش | ۱٪ افزایش |
| بازده در نصف بار نامی | – | ۲٪ کاهش | ۱٪ افزایش |
| توان در بار نامی | – | ۱٪ افزایش | ٤٪ کاهش |
| توان در نصف بار نامی | – | ٤٪ افزایش | ۵٪ کاهش |
| جریان در بار نامی | – | ۱۰٪ افزایش | ۷٪ کاهش |
| جریان راه‌اندازی | مستقیم | ۱۰٪ کاهش | ۱۰٪ افزایش |
| افزایش دما | – | ٦ درجه افزایش | ۲ درجه کاهش |
| اضافه‌بار در بار نامی | مجذور ولتاژ | ۱۹٪ کاهش | ۲۰٪ افزایش |

## ۱۲-۲- نیاز به توان راکتیو

جریان کل، جریان اکتیو، و جریان راکتیو برای یک سیستم پس‌فاز در تصویر ۱۲-۱ آمده است. ملاحظه می‌کنید که جریان راکتیو ۹۰ درجه با جریان اکتیو اختلاف فاز دارد. در زمان عبور از صفر ولتاژ، جریان راکتیو به ماکزیمم خود می‌رسد. موتورهای القایی در انواع تجهیزات مانند پمپ‌ها، فن‌ها، و درایوهای صنعتی کاربرد دارند. بیش از ٦۰٪ بارهای صنعتی موتور القایی است. مشخصهٔ رایج توان راکتیو این موتورها در تصویر ۱۲-۲ آمده است. مشخص است که توان راکتیو در زمان بی‌باری حداقل است، زمانی که سرعت بسیار به سرعت سنکرون نزدیک است. با افزایش بار، سرعت موتور می‌افتد و مصرف توان راکتیو بیشتر می‌شود.




**تصویر ۱۲-۱: مؤلفه‌های جریان در یک سیستم پس‌فاز**



**تصویر ۱۲-۲: مشخصهٔ توان راکتیو یک موتور القایی**

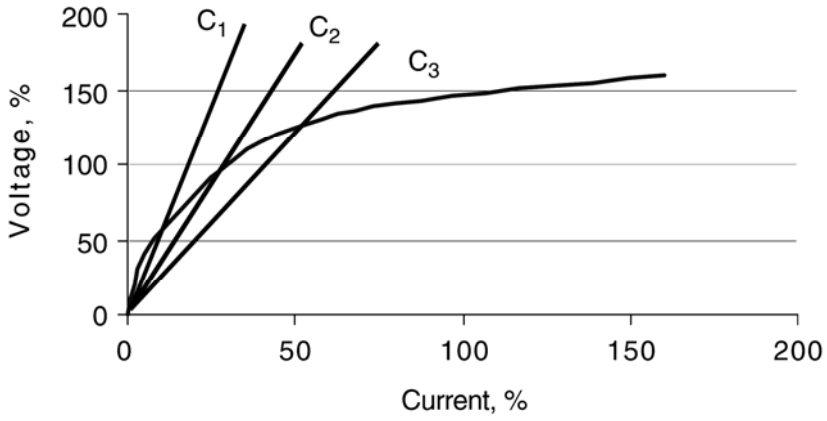
ضریب توان موتور القایی در بار نامی بین ۲۵٪ تا ۹۰٪ بسته به اندازه و سرعت موتور متغیر است. در بارهای سبک، ضریب توان پایین است. در عمل، بسیاری از موتورهای القایی پایین‌تر از سرعت نامی خود کار می‌کنند و در نتیجه ضریب توان ضعیفی دارند. به علاوه، توان راکتیو این موتورها اغلب ثابت است. این خصوصیات، موتورهای القایی را نیازمند خازن‌های شانت می‌کند. افزودن خازن به موتور بیش از حد نیاز باعث اضافه‌ولتاژ ناشی از خود تحریکی هنگام خاموش شدن همزمان موتور و خازن می‌شود.

## ۱۲-۳- اثرات دیگر خازن‌ها

### ۱۲-۳-۱- خود تحریکی

جریان مغناطیس‌کنندگی موتورهای القایی بسیار وابسته به طراحی آنها است. برای مثال، موتورهای با بازده بالا با چگالی شار کم کار می‌کنند و در نتیجه جریان مغناطیس‌کنندگی کوچکی دارند. می‌توان از خازن برای تأمین بخشی از این جریان استفاده کرد. وقتی کنتاکتور باز و جدا از تغذیه است، خازن شانت جریان مغناطیس‌کنندگی را تأمین می‌کند و موتور یا خود تحریک می‌شود یا به حالت ژنراتوری می‌رود. اندازهٔ ولتاژ تولیدی به جریان خازن و سرعت موتور بستگی دارد. در تصویر ۱۲-۳، منحی تحریک موتور و خود تحریکی برای چند خازن آمده است. ولتاژ خود تحریکی با کمک یک ولت‌متر و در ترمینال موتور قرائت می‌شود. اگر منحنی ولتاژ–جریان خازن منحی مغناطیس‌کنندگی موتور را قطع نکند، ولتاژی از خود تحریکی تولید نمی‌شود. این وضعیت با خازن $C_1$ در تصویر ۱۲-۳ آمده است. خود تحریکی زمانی رخ می‌دهد که راکتانس خازن برابر یا کوچک‌تر از راکتانس موتور باشد. خازن $C_2$ تقریباً سایز مناسب برای تصحیح ضریب توان بی‌باری موتور است. خازن $C_3$ به قدری بزرگ است که می‌تواند ضریب توان بار نامی موتور را جبران کند. ولتاژ خود تحریکی در حدود ۱/٤ برابر ولتاژ نامی است. این اضافه‌ولتاژها قابل قبول نیستند. اندازهٔ ولتاژ خود تحریکی وابسته به طرح موتور، سرعت، و اینرسی روتور است.

ولی، موتور بلافاصله بعد از باز شدن کلید و کاهش سریع ولتاژ القایی سرعت خود را کم می‌کند. ولتاژ خود تحریکی در عرض چند ثانیه با کاهش سرعت موتور میرا می‌شود. در بارهای با اینرسی زیاد، ولتاژ خود تحریکی تا چند دقیقه ادامه می‌یابد.




**تصویر ۱۲-۳: منحنی مغناطیس‌کنندگی خازن و موتور (خود تحریکی)**

### ۱۲-۳-۲- گشتاورهای حالت گذرا

حتی اگر خازن از نظر اضافه‌ولتاژ صحیح انتخاب شده باشد، ممکن است در برخی موتورها که بار با اینرسی زیاد دارند (مانند کمپرسورهای بزرگ و تهویه‌های مطبوع)، گشتاورهای بزرگ تولید کند. اگر در حالی که هنوز روتور می‌چرخد، آن را مجدداً به بار وصل کنیم، ممکن است فشار مکانیکی زیادی به کوپلینگ و شَفت وارد شده، ایجاد ولتاژ خود تحریکی کند. اندازهٔ ولتاژ خط و موتور، زاویهٔ بین این دو، و امپدانس موتور میزان گشتاور ماکزیمم را تعیین می‌کند. در موتورها، گشتاور گذرا نباید از ماکزیمم مقدار مجاز گشتاور تجاوز کند.

## ۱۲-۴- انتخاب خازن مناسب

خازن مناسب برای تصحیح ضریب توان موتور القایی نباید ایجاد خود تحریکی و گشتاورهای نامطلوب کند. اغلب، جریان خازن نباید از جریان بی‌باری موتور تجاوز کند. خازن‌های مناسب برای موتورهای مختلف در جدول ۱۲-۲ تا جدول ۱۲-۵ آمده است:

**جدول ۱۲-۲: ماکزیمم خازن موتورهای القایی کلاس B (Pre-U Frame)**

| توان موتور (اسب بخار) | کیلووار موتور 3,600 rpm | کیلووار موتور 1,800 rpm | کیلووار موتور 1,200 rpm | کیلووار موتور 900 rpm | کیلووار موتور 720 rpm | کیلووار موتور 600 rpm |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 3 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 2.5 | 3.5 |
| 5 | 2 | 2 | 2 | 2 | 4 | 4.5 |
| 7.5 | 2.5 | 3 | 3 | 4 | 5.5 | 6 |
| 10 | 3 | 3.5 | 3.5 | 5 | 6.5 | 7.5 |
| 15 | 4 | 5 | 5 | 6.5 | 8 | 9.5 |
| 20 | 5 | 5 | 6.5 | 7.5 | 9 | 12 |
| 25 | 6 | 6 | 7.5 | 9 | 11 | 14 |
| 30 | 7 | 7 | 9 | 10 | 12 | 16 |
| 40 | 9 | 9 | 11 | 12 | 15 | 20 |

| کیلووار موتور 600 rpm | کیلووار موتور 720 rpm | کیلووار موتور 900 rpm | کیلووار موتور 1,200 rpm | کیلووار موتور 1,800 rpm | کیلووار موتور 3,600 rpm | توان موتور (اسب بخار) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 24 | 19 | 15 | 13 | 11 | 12 | 50 |
| 27 | 22 | 18 | 15 | 14 | 14 | 60 |
| 32.5 | 26 | 21 | 18 | 16 | 17 | 75 |
| 40 | 32.5 | 27 | 25 | 21 | 22 | 100 |
| 47.5 | 40 | 32.5 | 30 | 26 | 27 | 125 |
| 52.5 | 47.5 | 37.5 | 35 | 30 | 32.5 | 150 |
| 75 | 70 | 47.5 | 42.5 | 37.5 | 40 | 200 |
| 75 | 70 | 57.5 | 52.5 | 45 | 50 | 250 |
| 87.5 | 80 | 65 | 60 | 52.5 | 57.5 | 300 |
| 95 | 87.5 | 75 | 67.5 | 60 | 65 | 350 |
| 105 | 95 | 85 | 75 | 65 | 70 | 400 |
| 110 | 100 | 92.5 | 80 | 67.5 | 75 | 450 |
| 115 | 107.5 | 97.5 | 82.5 | 72.5 | 77.5 | 500 |

**جدول ۱۲-۳: ماکزیمم خازن برای موتورهای القایی کلاس B (U Frame)**

| کیلووار موتور 600 rpm | کیلووار موتور 720 rpm | کیلووار موتور 900 rpm | کیلووار موتور 1,200 rpm | کیلووار موتور 1,800 rpm | کیلووار موتور 3,600 rpm | توان موتور (اسب بخار) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| - | - | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 |
| - | - | 2 | 1 | 1 | 1 | 3 |
| - | - | 2 | 2 | 2 | 2 | 5 |
| - | - | 4 | 4 | 2 | 1 | 7.5 |
| 5 | 5 | 5 | 4 | 2 | 2 | 10 |
| 5 | 5 | 5 | 4 | 4 | 4 | 15 |
| 10 | 10 | 5 | 5 | 5 | 4 | 20 |
| 10 | 10 | 5 | 5 | 5 | 5 | 25 |
| 10 | 10 | 10 | 5 | 5 | 5 | 30 |
| 15 | 10 | 10 | 10 | 10 | 5 | 40 |
| 20 | 15 | 15 | 10 | 10 | 5 | 50 |
| 30 | 20 | 15 | 10 | 10 | 10 | 60 |
| 30 | 25 | 20 | 15 | 15 | 15 | 75 |
| 45 | 40 | 25 | 25 | 20 | 15 | 100 |
| 45 | 45 | 30 | 30 | 25 | 20 | 125 |
| 50 | 45 | 40 | 30 | 30 | 25 | 150 |
| 60 | 55 | 55 | 60 | 40 | 35 | 200 |
| 100 | 60 | 80 | 60 | 40 | 40 | 250 |
| 120 | 80 | 80 | 80 | 45 | 45 | 300 |
| 120 | 80 | 80 | 80 | 70 | 60 | 350 |
| - | - | 80 | 80 | 70 | 60 | 400 |
| - | - | - | - | 100 | 70 | 450 |
| - | - | - | - | - | 70 | 500 |

**جدول ۱۲-٤: ماکزیمم خازن برای موتورهای القایی کلاس B (T-Frame)**

| کیلووار موتور 600 rpm | کیلووار موتور 720 rpm | کیلووار موتور 900 rpm | کیلووار موتور 1,200 rpm | کیلووار موتور 1,800 rpm | کیلووار موتور 3,600 rpm | توان موتور (اسب بخار) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 3 | 3 | 3 | 2.5 | 1.5 | 1.5 | 3 |
| 4 | 4 | 4 | 3 | 2.5 | 2 | 5 |
| 5 | 5 | 5 | 4 | 3 | 2.5 | 7.5 |
| 8 | 7.5 | 6 | 5 | 4 | 4 | 10 |

| توان موتور (اسب بخار) | کیلووار موتور 3,600 rpm | کیلووار موتور 1,800 rpm | کیلووار موتور 1,200 rpm | کیلووار موتور 900 rpm | کیلووار موتور 720 rpm | کیلووار موتور 600 rpm |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 15 | 5 | 5 | 6 | 7.5 | 8 | 10 |
| 20 | 6 | 6 | 7.5 | 9 | 10 | 12 |
| 25 | 7.5 | 7.5 | 8 | 10 | 12 | 18 |
| 30 | 8 | 8 | 10 | 14 | 15 | 22.5 |
| 40 | 12 | 13 | 16 | 18 | 22.5 | 25 |
| 50 | 15 | 18 | 20 | 22.5 | 24 | 30 |
| 60 | 18 | 21 | 22.5 | 26 | 30 | 35 |
| 75 | 20 | 23 | 25 | 28 | 33 | 40 |
| 100 | 22.5 | 30 | 30 | 35 | 40 | 45 |
| 125 | 25 | 36 | 35 | 42 | 45 | 50 |
| 150 | 30 | 42 | 40 | 52.5 | 52.5 | 60 |
| 200 | 35 | 50 | 50 | 65 | 68 | 90 |
| 250 | 40 | 60 | 62.5 | 82 | 87.5 | 100 |
| 300 | 45 | 68 | 75 | 100 | 100 | 120 |
| 350 | 50 | 75 | 90 | 120 | 120 | 135 |
| 400 | 75 | 80 | 100 | 130 | 140 | 150 |
| 450 | 80 | 90 | 80 | 140 | 160 | 160 |
| 500 | 100 | 120 | 82.5 | 160 | 180 | 180 |

**جدول ۱۲-۵: ماکزیمم خازن برای موتورهای القایی کلاس C، D، و روتور سیم‌پیچی**

| توان موتور (اسب بخار) | کلاس C (1,800 rpm و 1,200 rpm) | کلاس C (900 rpm) | کلاس D (1,200rpm) | روتور سیم‌پیچی شده |
|---|---|---|---|---|
| 15 | 5 | 5 | 5 | 5.5 |
| 20 | 5 | 6 | 6 | 7 |
| 25 | 6 | 6 | 6 | 7 |
| 30 | 7.5 | 9 | 10 | 11 |
| 40 | 10 | 12 | 12 | 13 |
| 50 | 12 | 15 | 15 | 17.5 |
| 60 | 17.5 | 18 | 18 | 20 |
| 75 | 19 | 22.5 | 22.5 | 25 |
| 100 | 27 | 27 | 30 | 33 |
| 125 | 35 | 37.5 | 37.5 | 40 |
| 150 | 37.5 | 45 | 45 | 50 |
| 200 | 45 | 60 | 60 | 65 |
| 250 | 54 | 70 | 70 | 75 |
| 300 | 65 | 90 | 75 | 85 |

**مثال**

موتوری با این مشخصات در نظر بگیرید: ۱۰۰ اسب بخار، ٤٦٠ ولت، ۳٦۰۰ دور در دقیقه، سه‌فاز، و با قاب U-frame. خازن مناسب را از جدول انتخاب کرده، مقدار کاهش جریان خط را محاسبه کنید.

**پاسخ**

از جدول ۱۲-۳، مقدار خازن ۱۵ کیلووار به دست می‌آید. با فرض ضریب توان ۸۰٪ داریم:

$$pf = 0.8$$

$$|I| = \frac{100hp \times 746}{\sqrt{3} \times 460 \times 0.8} = 117A$$

$$I = 117(0.8 - j0.6) = (93.6 - j70.2)A$$

$$I_C = \frac{15kVAR}{\sqrt{3} \times 460} = 18.8A$$

$$I_r = (93.6 - j70.2) + j18.8 = (93.6 - j51.4)A$$

$$|I_r| = 106A$$

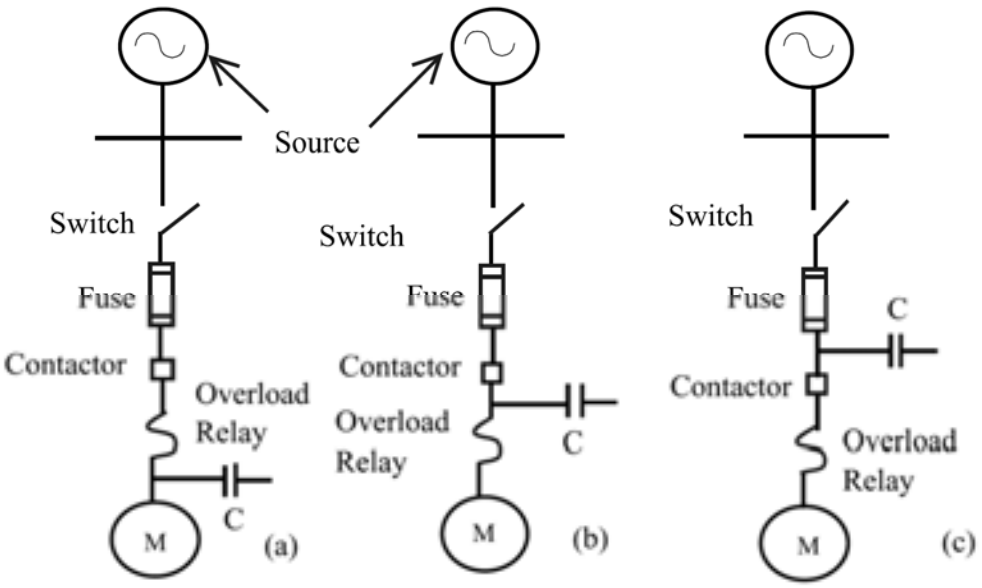
$$\text{reduction} = \frac{117 - 106}{117} \times 100 = 9.4\%$$

### ۱۲-٤-۱- مکان‌یابی خازن‌های شانت

خازن‌های شانت را می‌توان با سه حالت مختلف در ترمینال‌های موتور نصب نمود (تصویر ۱۲-٤). این روش‌ها در اینجا بیان می‌شوند:

*خازن‌های شانت در ترمینال موتور*

خازن‌های شانت را می‌توان مانند تصویر ۱۲-٤ (سمت چپ) به ترمینال‌های موتور نصب نمود. معمولاً موتورهای القایی دارای رلهٔ حرارتی هستند. در صورت نصب خازن‌های شانت، جریان خط کاهش می‌یابد. بنابراین، باید رله‌های فوق مجدداً تنظیم شوند. این روش برای موتورهایی که جدید نصب می‌شوند مناسب است؛ با کاهش جریان خط باید رلهٔ اضافه‌بار و فیوز دوباره تنظیم شوند.




**تصویر ۱۲-٤: محل مناسب خازن شانت برای اصلاح ضریب توان**

*سوییچ کردن همزمان خازن و موتور*

اگر موتور از قبل به همراه رلهٔ اضافه‌بار نصب شده باشد، می‌توان بانک خازنی را مانند تصویر ۱۲-٤ (وسط) بعد از رله نصب نمود. جریان خط دیده شده توسط رله با نصب خازن تغییر نمی‌کند.

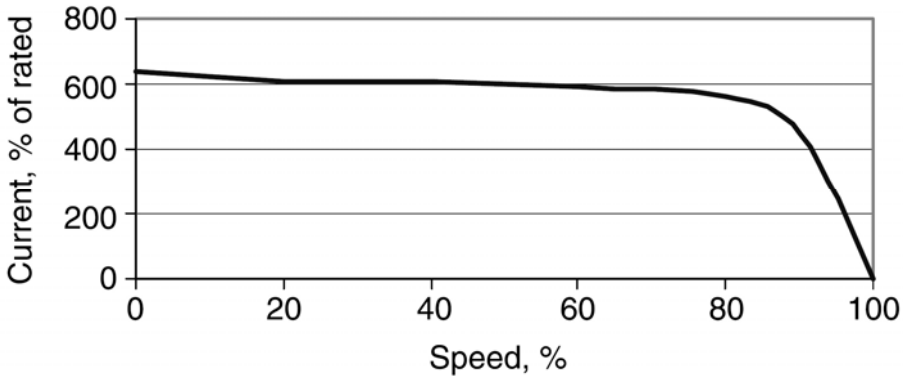
*نصب خازن‌های شانت در کنار راه‌انداز*

در برخی موتورها مانند موتور بالابرها و جرثقیل، از موتور برای حمل بارهای با اینرسی زیاد استفاده می‌شود. در این موارد، برای احتیاط باید مانند تصویر ۱۲-٤ (سمت راست) در کنار راه‌انداز خازن شانت نصب نمود. در این نوع نصب، خازن قبل از راه‌انداز قرار می‌گیرد و می‌توان آن را همواره در مدار داشت.

هر روشی مزایا و معایب خود را دارد. در دو مورد اول، با ورود همزمان خازن و موتور، به دلیل خود تحریکی و گشتاورهای گذرا اضافه‌ولتاژ تولید می‌شود. در روش سوم، در موقع قطع موتور امکان اضافه‌ولتاژ وجود دارد.

## ۱۲-۵- راه‌اندازی موتور و مشکلات مربوط

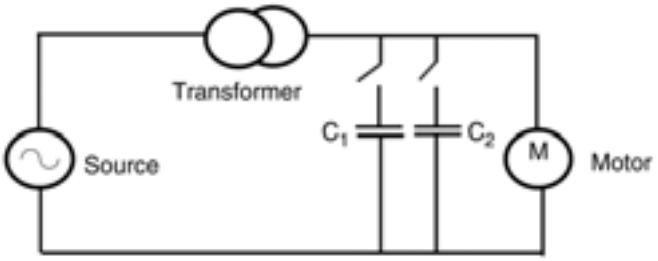
موتورهای بزرگ قفس سنجابی و موتورهای سنکرون صنعتی در هنگام راه‌اندازی چند برابر جریان نامی خود جریان می‌کشند. ضریب توان این موتورها موقع راه‌اندازی در حدود ۱۵ تا ۳۰ درصد است. نمونهٔ یک جریان راه‌اندازی در تصویر ۱۲-۵ آمده است. شکل موج و اندازهٔ جریان راه‌اندازی به طراحی موتور، ولتاژ ترمینال، و مشخصهٔ سرعت–گشتاور بار متصل‌شده به موتور بستگی دارد. جریان راه‌اندازی عبوری از امپدانس سیستم باعث افت ولتاژ شدید در سیستم می‌شود و ممکن است کنتاکتورها را از کار انداخته، راه‌اندازی موتور را دچار مشکل کند.




**تصویر ۱۲-۵: جریان راه‌اندازی یک موتور نمونه**

گاهی اوقات، خازن‌های شانت برای کاهش افت ولتاژ ناشی از راه‌اندازی استفاده می‌شوند. در ضمن، توان راکتیو مورد نیاز را تأمین می‌کنند. در این روش، مؤلفهٔ راکتیو جریان راه‌اندازی تا حد زیادی حذف می‌شود. اندازهٔ

خازن معمولاً ۲ تا ۳ برابر توان نامی موتور است. برای کنترل صحیح ولتاژ، خازن‌ها با سرعت گرفتن موتور پله‌پله خارج می‌شوند و تنها چند ثانیه در مدار قرار می‌گیرند. یک مدل دو پله‌ای در تصویر ۱۲-۶ نشان داده شده است.




**تصویر ۱۲-۶: خازن‌های سوییچ‌شده برای راه‌اندازی**

**مثال**

یک موتور سه‌فاز، ۶۰ هرتز، و ۱۰۰ اسب بخاری در نظر بگیرید. جریان راه‌اندازی تقریباً ۶ برابر جریان نامی و با ضریب توان ۳۰٪ است. اگر بار نامی ۱۰۰ کیلو ولت‌آمپر باشد، خازن مورد نیاز برای راه‌اندازی را حساب کنید.

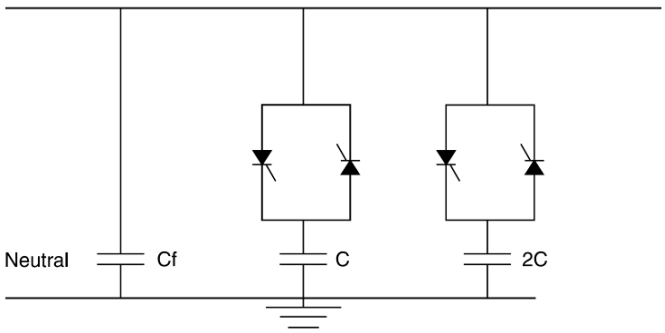
**پاسخ**

$$S_{inrush} = 6 \times 100kVA = 600kVA$$
$$pf = 0.3 \Rightarrow \theta = 81^{\circ}$$
$$Q = 600kVA \times \sin\theta = 572.4kVAR$$

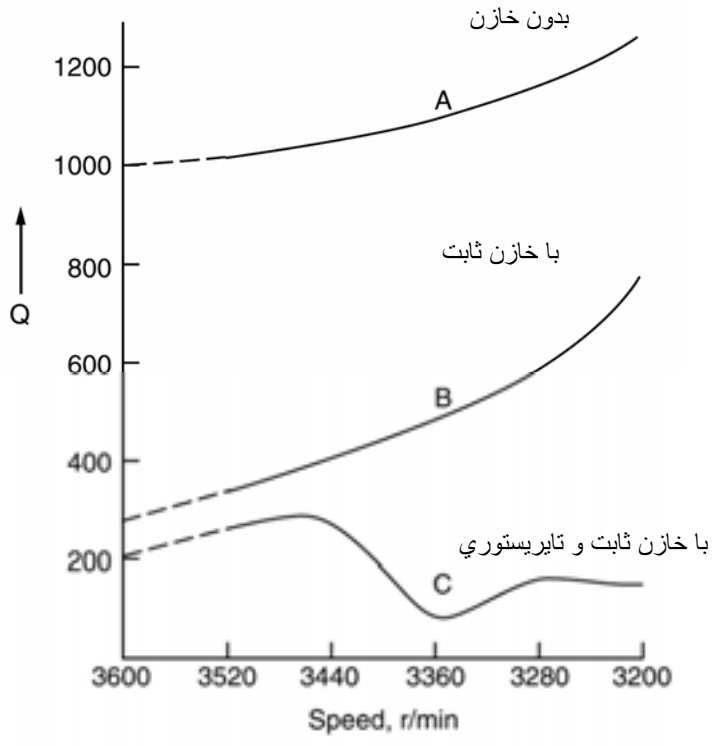
می‌توان پله‌های ۲۰۰، ۲۰۰، و ۱۰۰ کیلوواری در نظر گرفت و به مقدار مورد نظر رسید.

### ۱۲-۵-۱- راه‌اندازی موتور با خازن شانت

برای راه‌اندازی موتور می‌توان از خازن ثابت و خازن تایریستوری در کنار هم استفاده کرد (تصویر ۱۲-۷). موتور ۲ اسب بخار، ۲۲۰ ولت، ۶۰ هرتز، ۷ آمپری، ۳۶۰۰ دور در دقیقه و با اتصال ستاره و از نوع القایی است. حداقل توان راکتیو مورد نیاز این موتور ۱ کیلووار است. برای تأمین این توان به یک خازن سه‌فاز ۵۰ میکروفارادی نیاز است. برای جلوگیری از خود تحریکی، یک خازن ثابت ۴۰ میکروفارادی به کار می‌بریم. پروفایل توان راکتیو در تصویر ۱۲-۸ (منحنی B) آمده است.

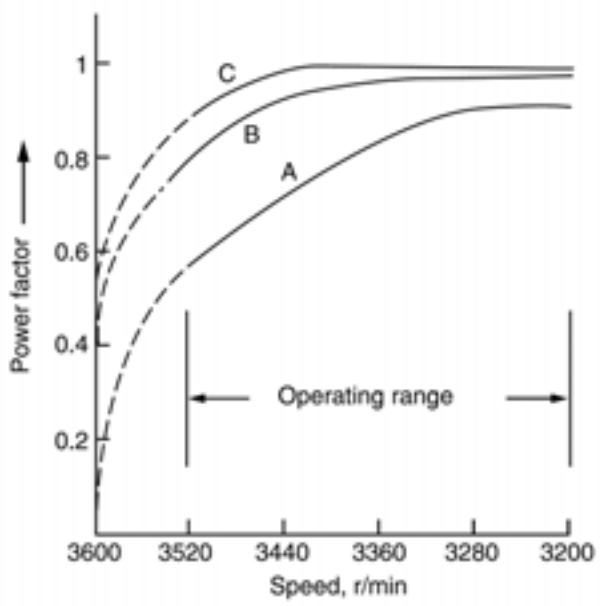



**تصویر ۱۲-۷: خازن ثابت و تایریستوری برای راه‌اندازی موتور**



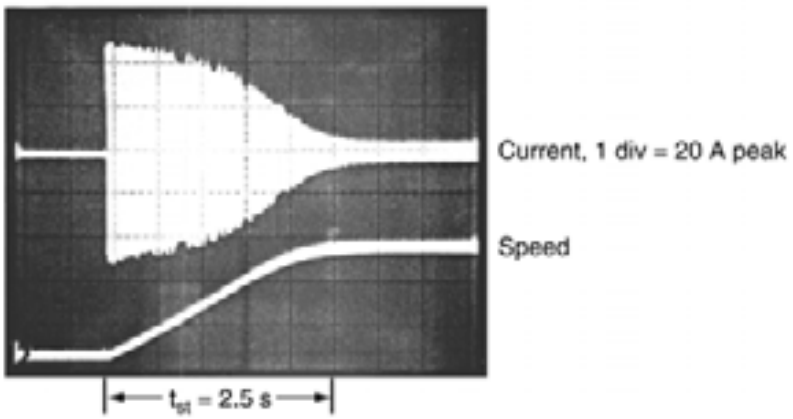

**تصویر ۱۲-۸: پروفایل توان راکتیو موتور القایی**

خازن‌های سوییچ‌شونده توان راکتیو متغیر را تأمین می‌کنند. این خازن‌ها در دو پله و با مقادیر ۱۰ و ۲۰ میکرو فاراد هستند. توان راکتیو موتور با حضور این خازن‌ها در تصویر ۱۲-۸ (منحنی C) آمده است. پروفایل توان راکتیو موتورهای القایی با حضور ٤٠ میکروفاراد خازن ثابت و خازن‌های تایریستوری در تصویر ۱۲-۹ آمده است.




**تصویر ۱۲-۹: پروفایل توان راکتیو موتور القایی**

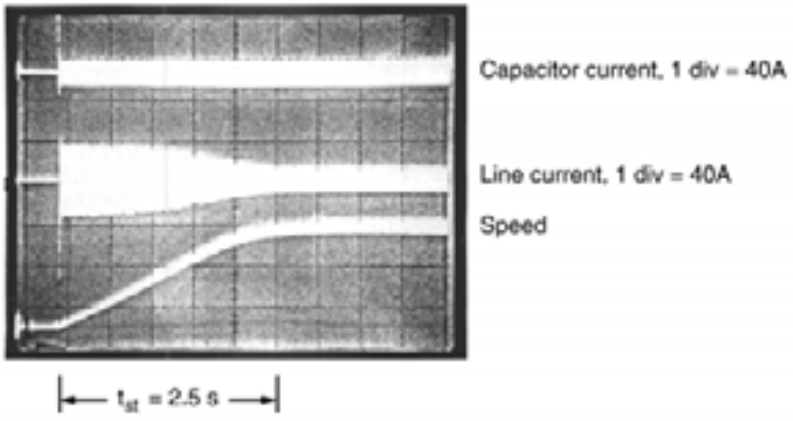
مثال فوق نقش ترکیب خازن ثابت و خازن سوییچ‌شونده در بهبود ضریب توان موتور القایی را در شرایط مختلف کاری نشان می‌دهد. جریان راه‌اندازی و سرعت موتور در آزمایشگاه در دو حالت بدون خازن و با خازن ثبت شده است. زمان راه افتادن موتور در دو حالت بی‌باری و بار نامی به ترتیب ۲/۵ و ۳ ثانیه است. جریان راه‌اندازی و سرعت موتور در حالت بی‌باری بدون خازن شانت در تصویر ۱۲-۱۰ نشان داده شده است. موتور مورد آزمایش ۲ اسب بخاری، ۲۲۰ ولت، ۷ آمپر، ۳۶۰۰ دور در دقیقه، و بدون خازن است. جریان راه‌اندازی ٤٠ آمپر و ۲/۵ برابر جریان نامی است. جریان بی‌باری ٤/۳ آمپر و جریان بار نامی ١٦ آمپر است.




**تصویر ۱۲-۱۰: جریان راه‌اندازی و سرعت در حالت بی‌باری**

### ۱۲-۵-۲- حالت گذراهای راه‌اندازی با حضور خازن ثابت

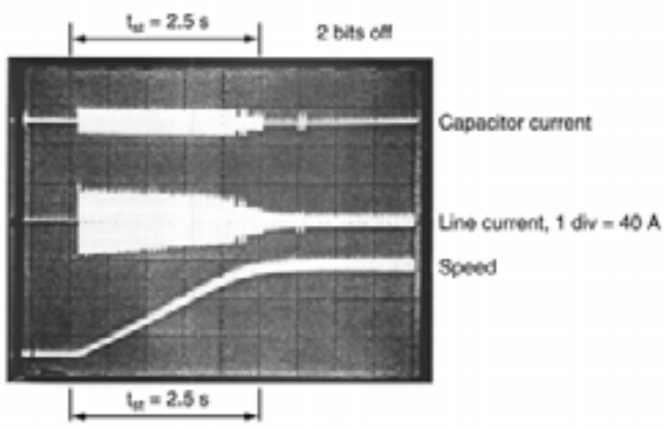
جریان راه‌اندازی موتور، جریان خازن، و سرعت موتور با حضور خازن ثابت در تصویر ۱۲-۱۱ آمده است. جریان راه‌اندازی به شدت کاهش یافته است. جریان حالت ماندگار بسته به سایز خازن افزایش می‌یابد. جریان خازن ثابت می‌ماند (خازن ٢٤٠ میکروفارادی).




**تصویر ۱۲-۱۱: جریان راه‌اندازی و سرعت در حالت بی‌باری**

### ۱۲-۵-۳- حالت گذراهای راه‌اندازی با حضور خازن سوییچ‌شونده

جریان راه‌اندازی موتور، جریان خازن، و سرعت موتور با حضور خازن سوییچ‌شونده در تصویر ۱۲-۱۲ آمده است. جریان راه‌اندازی با خازن ثابت به شدت کاهش می‌یابد. جریان حالت ماندگار به دلیل خروج خازن پس از راه‌اندازی کاهش می‌یابد. خلاصهٔ این راه‌اندازی در جدول ۱۲-٦ آمده است. جریان راه‌اندازی با خازن‌های سوییچ‌شونده کاهش می‌یابد و جریان حالت ماندگار تغییری نمی‌کند. البته این موتوری بسیار کوچک با فاصلهٔ هوایی بزرگ است و جریان بی‌باری آن زیاد است.




**تصویر ۱۲-۱۲: جریان راه‌اندازی و سرعت در حالت بی‌باری**

**جدول ۱۲-٦: خلاصهٔ جریان‌های راه‌اندازی**

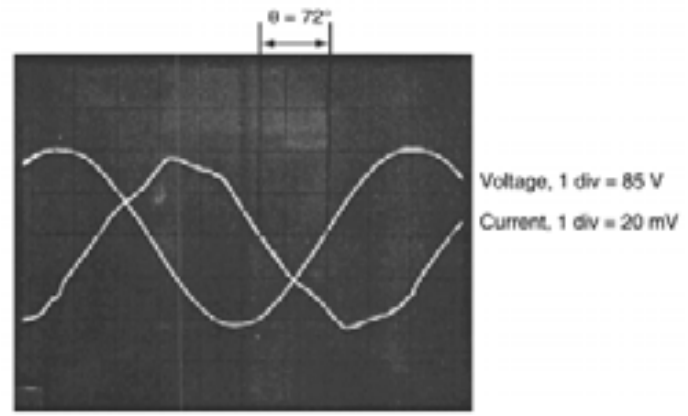
| وضعیت راه‌اندازی | جریان راه‌اندازی (آمپر) | جریان حالت ماندگار (آمپر) |
|---|---|---|
| بدون خازن | 50 | 4.3 |
| ۲٤۰ میکروفاراد خازن ثابت | 40 | 6 |
| ٤۸۰ میکروفاراد خازن ثابت | 35 | 28 |
| با خازن سوییچ‌شونده | 32 | 4.3 |

### ۱۲-۵-٤- اثر خازن‌های شانت بر ولتاژ و جریان موتور

برای نشان دادن اثر خازن‌های شانت، شکل موج‌های ولتاژ و جریان در دو حالت بدون خازن و با خازن بررسی و تحلیل شده است. جریان موتور ۲ اسب بخاری با ترانس جریان ۱۰۰۰ به ۱ و مقاومت ۱۰ اهم اندازه‌گیری شده است. خروجی این ترانس، به ازای هر ۱۰۰ آمپر جریان خط، ۱ ولت ولتاژ می‌دهد. یک ژنراتور DC تاکو روی شَفت موتور نصب شده، با یک سیگنال سرعت موتور را اعلام می‌کند. در سرعت نامی ۳٦۰۰ دور در دقیقه، خروجی این ژنراتور ۱٤۰ ولت است. این سیگنال به یک تقسیم ولتاژ مقاومتی (۷۰ کیلواُهم و ۱ کیلواُهم) داده می‌شود. ولتاژ مقاومت ۱ کیلواُهمی به عنوان سیگنال سرعت استفاده می‌شود که در سرعت نامی ۲ ولت است. شکل موج‌های در دو حالت گذرا و ماندگار، بی‌باری و بار نامی ثبت شده‌اند:

*ولتاژ و جریان بی‌باری بدون خازن*

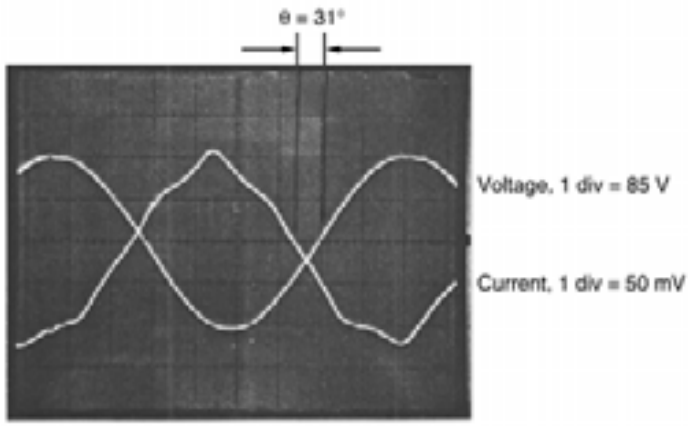
ولتاژ و جریان حالت ماندگار موتور ۱۲۰ ولت، ۳ آمپر، ۳۵۹۰ دور در دقیقه، بدون حضور خازن در تصویر ۱۲-۱۳ آمده است. ولتاژ سینوسی و جریان معوج است. زاویهٔ بین ولتاژ و جریان ۷۲ درجه و ضریب توان ۳۱٪ است.




**تصویر ۱۲-۱۳: جریان و ولتاژ حالت ماندگار (بی‌باری و بدون خازن)**

*ولتاژ و جریان در بار نامی بدون خازن*

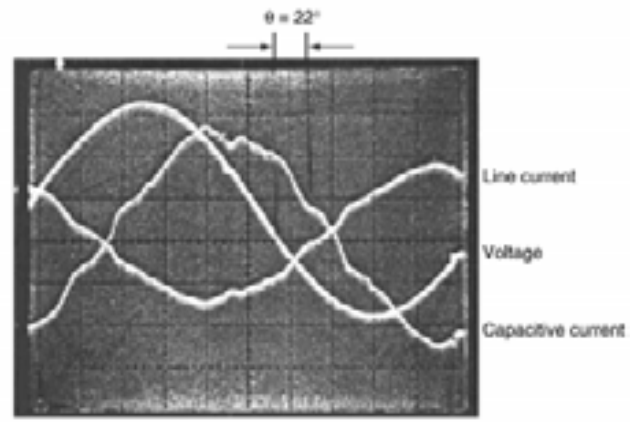
ولتاژ و جریان حالت ماندگار موتور (۱۲۰ ولت، ۳ آمپر، ۳۵۹۰ دور در دقیقه) در بار نامی و بدون حضور خازن در تصویر ۱۲-۱٤ آمده است. ولتاژ سینوسی و جریان معوج و پیک‌دار است. زاویهٔ بین ولتاژ و جریان ۳۱ درجه و ضریب توان ۸٦٪ است.




**تصویر ۱۲-۱٤: ولتاژ و جریان حالت ماندگار (بار نامی و بدون خازن)**

*ولتاژ و جریان بی‌باری با حضور خازن*

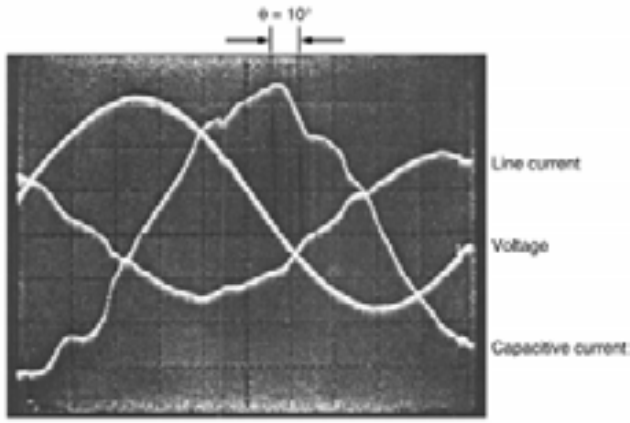
ولتاژ و جریان حالت ماندگار موتور (۱۲۰ ولت، ۳ آمپر، ۳۵۹۰ دور در دقیقه) در بی‌باری و با خازن ۲٤۰ میکروفارادی در تصویر ۱۲-۱۵ آمده است. ولتاژ سینوسی و جریان معوج است. زاویهٔ بین ولتاژ و جریان ۲۲ درجه و ضریب توان ۹۳٪ است.




**تصویر ۱۲-۱۵: ولتاژ و جریان حالت ماندگار (بی‌باری و با حضور خازن)**

*ولتاژ و جریان در بار نامی با حضور خازن*

ولتاژ و جریان حالت ماندگار موتور (۱۲۰ ولت، ۳ آمپر، ۳۵۹۰ دور در دقیقه) در بار نامی و با خازن ۲٤۰ میکروفارادی در تصویر ۱۲-۱٦ آمده است. زاویهٔ بین ولتاژ و جریان ۱۰ درجه و ضریب توان ۹۹٪ است. ولتاژ و جریان خازن تا حدی معوج شده‌اند.




**تصویر ۱۲-۱٦: ولتاژ و جریان حالت ماندگار (بار نامی و با حضور خازن)**

از شکل موج‌ها می‌توان نتیجه گرفت که خازن‌های شانت در ترمینال موتور تا حدی باعث ایجاد اعوجاج در جریان خط می‌شوند. مقدار اعوجاج به میزان بار موتور بستگی دارد.

# فصل ۱۳ : کاربردهای دیگر خازن

## ۱۳-۱- معرفی

خازن‌ها به جز اصلاح ضریب توان، کاربردهای متنوع دیگری در صنعت دارند. در اینجا کاربردهایی مانند کوره‌ها، جوش‌کاری مقاومتی، روشنایی، خازن راه‌انداز موتور، خازن موتوری، ترانس‌های فرورزونانس، و اینورترها بررسی می‌شوند. به علاوه منابع تغذیهٔ پالسی هم بحث می‌شوند.

## ۱۳-۲- کورهٔ قوس الکتریکی

کورهٔ قوس الکتریکی در صنایع زیربنایی مانند تولید فولاد نقش مهمی دارد. کوره‌های الکتریکی به سه دسته تقسیم می‌شوند: مقاومتی، القایی، و قوس. کوره‌های مقاومتی به دلیل ماهیت اهمی، فلیکر کمی تولید می‌کنند. اغلب کوره‌های القایی در فرکانس‌های بالا کار می‌کنند و با مبدل فرکانس به شبکه وصل می‌شود و بار ثابتی دارند. کوره‌های قوس الکتریکی به دلیل قدرت ذوب بالا، به کثرت برای تولید فولاد کیفیت بالا استفاده می‌شوند. در هنگام ذوب کردن، تکه‌های فولاد بین دو الکترود باعث ایجاد اتصال کوتاه در ثانویهٔ ترانس تغذیه می‌شوند. بنابراین، در این زمان جریان نوسان‌های زیادی می‌کند و ضریب توان پایینی دارد. زمان ذوب بسته به نوع کوره بین ۵۰ تا ۱۲۰ دقیقه طول می‌کشد. وقتی فولاد مایع می‌شود، با تنظیم الکترودها می‌توان طول قوس را ثابت نگهداشت. به این فاز، فاز پالایش[1] گفته می‌شود و در آن بار کوره ثابت و دارای ضریب توان بالا است. در این فاز، بسته به اندازهٔ کوره، آن را هر دو ساعت یک‌بار به مدت ۱۰ تا ٤۰ دقیقه برق‌دار می‌کنند. بدترین نوسان‌ها در زمان ذوب رخ می‌دهد و باعث افت ولتاژ شدید در سیستم و فلیکر می‌شود. فرکانس این فلیکرهای ولتاژ از ۱ تا ۳۰ هرتز است. بنابراین با استفاده از فیلترهای مناسب یا کنترلرهای توان راکتیو استاتیک، می‌توان هارمونیک‌ها و فلیکر را کاهش داده، همچنین ضریب توان را بهبود بخشید.

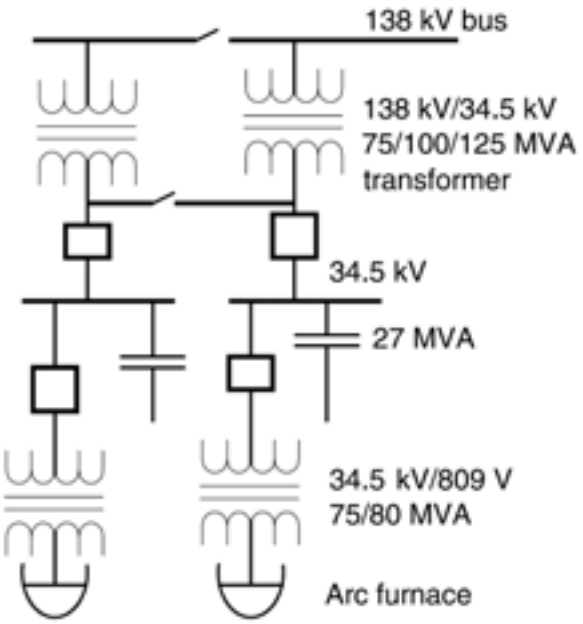
نمونهٔ تغذیهٔ یک کورهٔ قوس الکتریکی در تصویر ۱۳-۱ آمده است. در اینجا، تغذیه از دو خط ۱۳۸ کیلوولتی تأمین می‌شود. ترانس کاهنده از نوع مثلث/ستارهٔ زمین‌شده، ۱۳۸ کیلو ولت به ۳٤/۵ کیلو ولت، ۷۵ مگا ولت‌آمپر، و امپدانس ۸ درصد است و هر کوره کلید جداگانه دارد تا بتوان آنها را مستقلاً خاموش و روشن کرد. ترانس کوره‌ها از نوع مثلث/ستاره، ۳٤/۵ کیلو ولت به ۸۰۹ ولت، ۷۵ مگا ولت‌آمپر است. هر کوره ۲۰۰ تن ظرفیت دارد. برای بهبود ضریب توان، هر کوره به ۲۷ مگا وار خازن مجهز است. برای حفاظت بانک از گذراها، در کلید از مقاومت (pre-insertion) استفاده شده است. کلیدها از نوع خلأ هستند. ضریب توان در فاز ذوب، بدون خازن حدود ۷۱٪

[1] refining

و ضریب توان مطلوب ۹۰٪ است. برای ایجاد حاشیهٔ امنیت برای ولتاژ اعمالی به خازن‌ها، در هر فاز سه خازن سری شده‌اند.

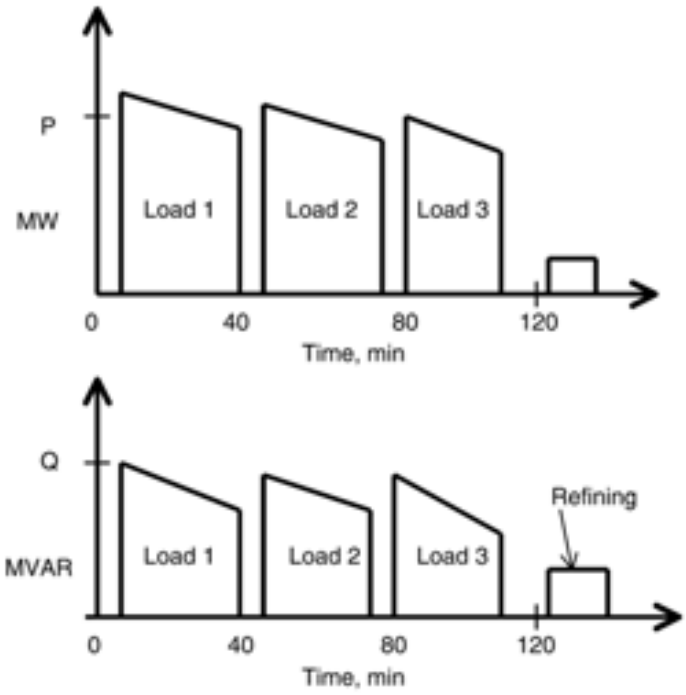
$$3 \times 7.2kV \times \sqrt{3} = 37.4\,kV/phase$$

ولتاژ نامی سیستم ۳٤/۵ کیلو ولت است. بانک خازنی دارای اتصال ستارهٔ زمین‌نشده و دارای سیستم تشخیص عدم تعادل در نوترال است.




**تصویر ۱۳-۱: دیاگرام تک‌خطی تغذیهٔ دو کورهٔ قوس الکتریکی**

در تصویر ۱۳-۲، توان اکتیو و راکتیو یک کورهٔ نمونه در یک سیکل کاری نشان داده شده است. می‌توان دید که کوره سه بار در فاز ذوب بارگذاری شده است. در پایان هر بار، با برقراری قوس پایدار جریان کاهش یافته، توان به منظور جلوگیری از حرارت زیاد کاهش می‌یابد. در دورهٔ پالایش، توان اکتیو و راکتیو بسیار کوچک هستند. مشخصهٔ منبع تغذیهٔ چند کورهٔ دیگر در جدول ۱۳-۱ آمده است. می‌توان دید که اگر نسبت توان ترانس کوره به ترانس اصلی حدود ۷۵٪ باشد، عملکرد کوره بهینه است. این امر نیازمند فیلترگذاری مفصل دارد.




**تصویر ۱۳-۲: پروفایل توان اکتیو و راکتیو یک کورهٔ نمونه**

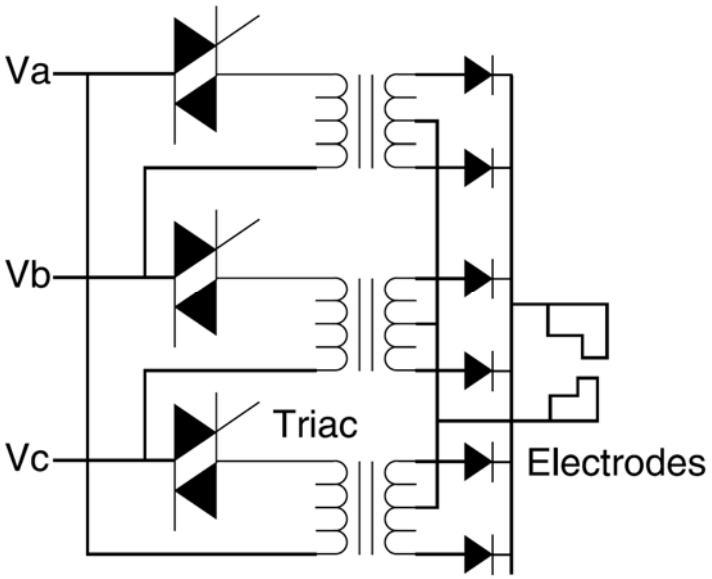
**جدول ۱۳-۱: مشخصات تغذیهٔ چند کورهٔ نمونه**

| پارامتر | کورهٔ A | کورهٔ B | کورهٔ C | کورهٔ D |
|---|---|---|---|---|
| توان کوره (مگاوات) | 20 | 60 | 40 | 57 |
| توان ترانس (مگا ولت‌آمپر) | 27.1 | 56 | 56 | 60 |
| ولتاژ ترانس (کیلو ولت) | 230/22.8 | 230/66 | 230/66 | 230/35 |
| ولتاژ کوره (کیلو ولت) | 22.8 | 33 | 33 | 34.5 |
| نسبت توان ترانس کوره به توان ترانس اصلی | 0.73 | 1.07 | 0.71 | 0.95 |
| توان فیلتر (مگا ولت‌آمپر) | 15 | 65 | 65 | 25 |
| نحوهٔ عملکرد | مناسب | نامناسب | مناسب | – |

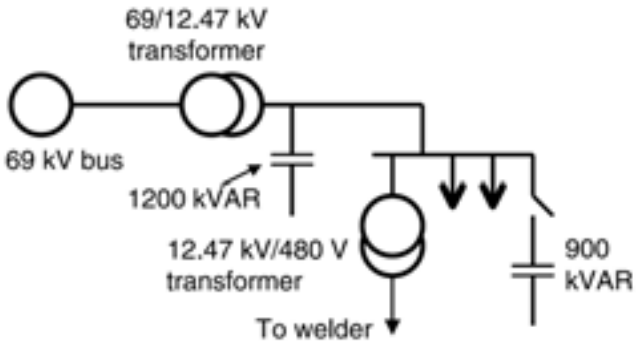
## ۱۳-۳- جوش مقاومتی نقطه‌ای

در جوش الکتریکی، دو قطعه فلز در کنار هم قرار می‌گیرند و با اعمال حرارت شدید به هم جوش می‌خورند. جوش‌های رایج شامل جوش مقاومتی، جوش قوس، جوش هیدروژنی، و هلیومی هستند. جوش مقاومتی با قرار دادن دو ورق فلز میان دو الکترود انجام می‌شود. جریان از نوک الکترودها جاری شده، جوش نقطه‌ای ایجاد می‌کند. در برخی موارد از چهار جفت الکترود (۸ الکترود) استفاده می‌شود. یک بادامک کنترل سرعت، زمان هر جوش را تعیین می‌کند. با هر بار چرخش، الکترودها با محل جدید می‌روند، به نقطهٔ مورد نظر برخورد کرده، جوش را انجام می‌دهند. سپس به محل جدید می‌روند.

دیاگرام منبع تغذیهٔ یک جفت الکترود در تصویر ۱۳-۳ آمده است. منبع تغذیهٔ سه‌فاز از ترایاک استفاده می‌کند که مانند تایریستورهای پشت به پشت با گِیت مشترک هستند و زمان و حرارت جوش را کنترل می‌کنند. ترایاک‌ها مقدار جریان الکترودها را هم کنترل می‌کنند. جریان عبوری از الکترودها، ضربه‌ای است و چند سیکل دوام دارد. این جریان‌ها در سمت AC هم ضربه‌ای و با ضریب توان کم هستند. وقتی جریان یک جوش به ۱ کیلو آمپر می‌رسد، افت ولتاژ و مشکلات فیلکر پیش می‌آید. سیستم جوش مورد نظر ۱۵۰۰ کیلو ولت‌آمپر توان دارد. نمونهٔ مدار تغذیهٔ این سیستم در تصویر ۱۳-٤ آمده است. ضریب توان در ولتاژ ۱۲/٤۷ کیلو ولت توسط ۱۲۰۰ کیلو وار خازن شانت جبران شده است. همچنین در سطح ٤۸۰ ولت، یک بانک ۹۰۰ کیلو واری سوییچ‌شونده نصب شده است.




**تصویر ۱۳-۳: دیاگرام منبع تغذیهٔ یک جفت الکترود**



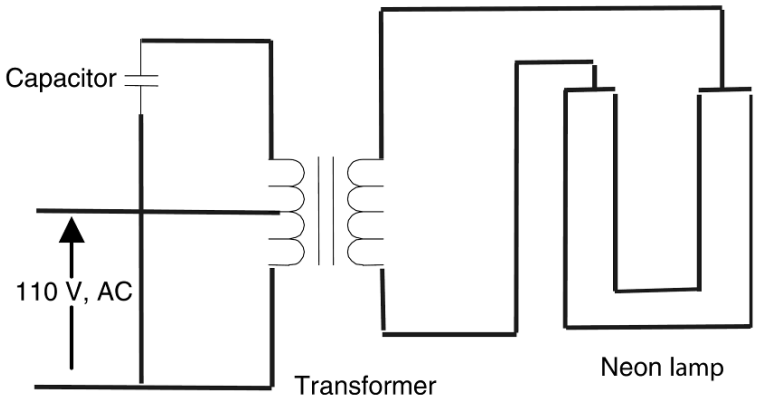

**تصویر ۱۳-٤: دیاگرام تک‌خطی تغذیهٔ سیستم جوش نقطه‌ای**

## ۱۳-۴- خازن‌های روشنایی

لامپ‌های رشته‌ای تنگستن، مقاومتی هستند و با ضریب توان واحد کار می‌کنند، ولی به تغییرات ولتاژ حساس هستند. لامپ‌های تخلیهٔ الکتریکی با پدیدهٔ تحریک و یونیزاسیون گاز یا مایع نور تولید می‌کنند. لامپ‌های معمول در تابلوهای تبلیغاتی یا دکور از بخار سدیم برای تولید نور زرد، بخار جیوهٔ کم‌فشار برای تولید نور سبز مایل به آبی، بخار جیوهٔ پر فشار برای تولید نور سفید مایل به آبی، و گاز نئون برای تولید رنگ قرمز استفاده می‌کنند. در این لامپ‌ها، برای تشکیل قوس و برقرار ماندن آن باید الکترون از کاتد کنده شود. در لامپ‌های کاتد سرد، ولتاژی در حدود ۱۰۰ تا ۲۰۰ ولت لازم است. بنابراین، از یک ترانس برای تولید این ولتاژ استفاده می‌شود. لامپ‌های کاتد گرم را می‌توان مستقیماً از شبکه تغذیه کرد ولی کاتد باید جداگانه گرم شود. برخی از منابع تغذیه و نقش خازن در مدار آنها در اینجا آورده شده است:

### ۱۳-٤-۱- لامپ‌های نئونی (رنگ قرمز)

لامپ نئونی از نوع کاتد سرد است و الکترودها به شکل ورقه‌های فلزی هستند و از داخل لایه‌گذاری شده‌اند. در محفظه از گاز نئون استفاده شده که نور قرمز تولید می‌کند. تغذیه با یک ترانس انجام می‌شود. مدار تغذیهٔ این لامپ در تصویر ۱۳-۵ آمده است. برای پایداری قوس در لامپ از ترانسی با راکتانس نشتی بالا استفاده می‌شود. یک خازن برای اصلاح ضریب توان مدار نصب شده است.

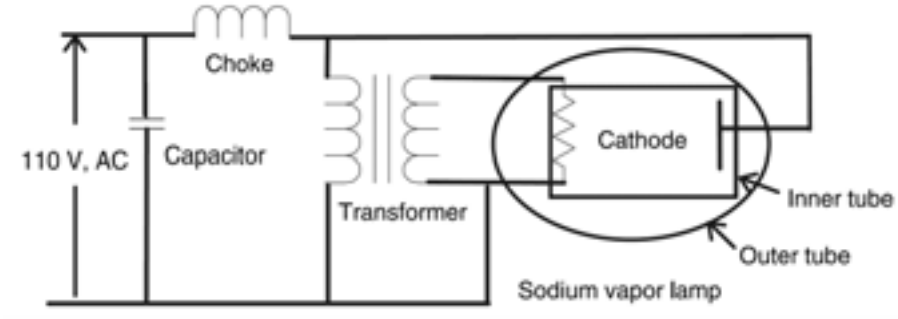



**تصویر ۱۳-۵: منبع تغذیهٔ لامپ نئونی**

### ۱۳-٤-۲- لامپ بخار سدیم (رنگ زرد)

مدار رایج برای لامپ‌های بخار سدیم در تصویر ۱۳-٦ آمده است. لامپ از تیوپ دشارژ تشکیل شده که دماهای بالا را تحمل می‌کند؛ تیوپی خارجی بخشی از طیف نوری تیوپ دشارژ را فیلتر می‌کند. یک مدار جداگانه کاتدها را گرم می‌کند. سدیم ابتدا به صورت جامد است و دشارژ اولیه آن را بخار می‌کند. دمای کاری لامپ حدود

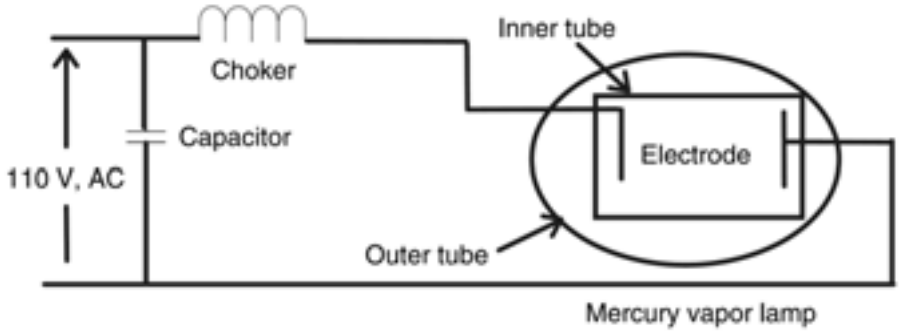
۳۰۰ درجه است. از یک چوک برای پایداری دشارژ الکتریکی و از یک خازن برای جبران توان راکتیو استفاده می‌شود. این لامپ‌ها نور زرد تولید می‌کنند و اغلب برای روشنایی خیابان‌ها و اتوبان‌ها به کار می‌روند.




**تصویر ۱۳-٦: منبع تغذیهٔ لامپ بخار سدیم**

### ۱۳-٤-۳- لامپ بخار جیوه

دیاگرام مدار رایج برای لامپ بخار جیوه در تصویر ۱۳-۷ آمده است. لامپ از تیوپ دشارژ تشکیل شده که دماهای بالا را تحمل می‌کند؛ تیوپی خارجی بخشی از طیف نوری تیوپ دشارژ را فیلتر می‌کند. فضای میان دو تیوپ با یک گاز بی‌اثر پر شده است. لامپ با استفاده از گاز آرگون استارت زده می‌شود. جیوه به صورت جامد است و دشارژ اولیه آن را تبخیر می‌کند. چوک برای پایدار سازی دشارژ و خازن برای بهبود ضریب توان استفاده می‌شود. فشار داخل تیوپ در حدود ۱ تا ۱۰ اتمسفر است. اگر فشار کم باشد، بیشتر تشعشع به صورت ماوراء بنفش خواهد بود. لایهٔ داخلی را فسفر پوشش داده می‌شود که ماوراء بنفش را به نور مرئی تبدیل می‌کند. بسته به فشار داخل لامپ، سبز مایل به آبی یا سفید مایل به آبی تولید می‌شود.

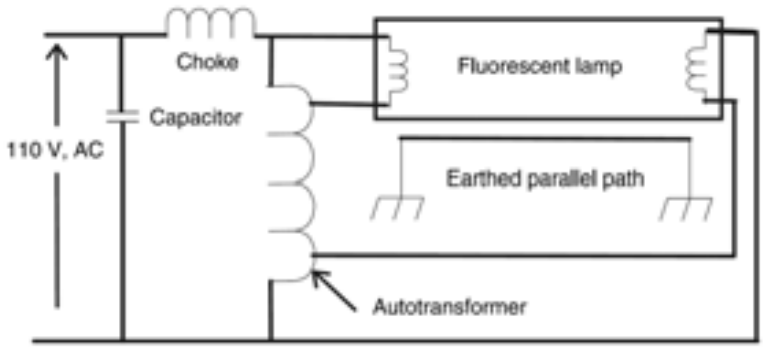



**تصویر ۱۳-۷: منبع تغذیهٔ لامپ بخار جیوه**

### ۱۳-٤-٤- لامپ فلورسنت

دیاگرام منبع تغذیهٔ یک لامپ فلورسنت در تصویر ۱۳-۸ آمده است. لامپ فلورسنت لامپی تخلیه با فشار کم و استفاده از بخار جیوه است. دو الکترود در انتهای تیوپ وجود دارد. الکترون‌ها با سرعت‌های بسیار بالا به سمت

این دو الکترود رانده می‌شوند. به دلیل کم‌فشار بودن لامپ، انرژی ناشی از برخورد این الکترون‌ها و اتم‌های جیوه در طیف ماوراء بنفش است. برای تبدیل این پرتو به نور مرئی، لایهٔ داخلی تیوپ آغشته به فسفر است. برای روشن شدن لامپ و تشکیل قوس از یک اتو ترانس استفاده می‌شود. ولتاژ کمی از اتو ترانس الکترودها را گرم می‌کند. لامپ‌های فلورسنت باعث ایجاد فلیکر در نور می‌شوند. می‌توان با تکنیک‌های مختلف این اثر را از بین برد. در این مدار، از خازن برای بهبود ضریب توان استفاده شده است. مقادیر رایج برای خازن‌های مورد استفاده در برخی لامپ‌ها در جدول ۱۳-۲ آمده است.




**تصویر ۱۳-۸: منبع تغذیهٔ یک لامپ فلورسنت**

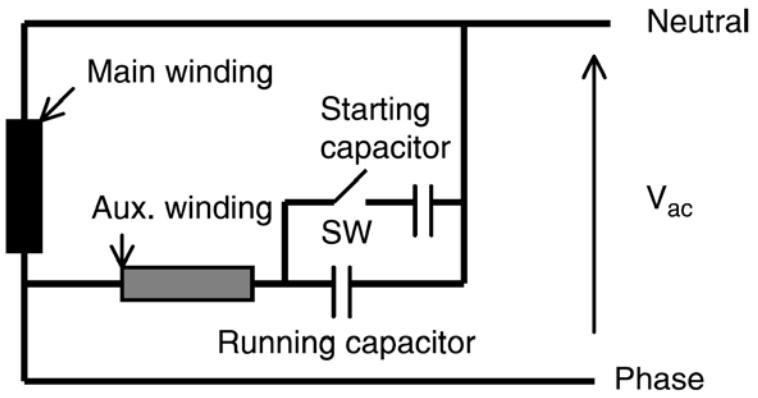
**جدول ۱۳-۲: ظرفیت رایج برای خازن‌های روشنایی**

| نوع لامپ | توان (وات) | خازن (میکرو فاراد) |
|---|---|---|
| بخار سدیم پر فشار | 50 | 10 |
| بخار سدیم پر فشار | 200 | 32 |
| متال هالید | 70, 100 | 12 |
| متال هالید | 150 | 20 |
| بخار جیوهٔ پر فشار | 50 | 7 |
| بخار جیوهٔ پر فشار | 250 | 18 |
| لامپ فلورسنت | 18, 36 | 4.5 |
| لامپ فلورسنت | 58 | 7 |

## ۱۳-۵- خازن‌های تک‌فاز موتوری

دیاگرام تک‌خط یک خازن تک‌فاز راه‌انداز موتور در تصویر ۱۳-۹ آمده است. پارامترهای یک موتور نوعی به این شرح است: ۱۵۰۰ وات، ۲۲۰ ولت، ٦٠ هرتز، ۱۸۰۰ دور در دقیقه. این موتورها با توان کسری از اسب بخار تا ۱/۵ اسب بخار تولید می‌شوند. ولتاژ نامی سیم‌پیچ اصلی ۱۲۰ ولت است. سیم‌پیچی کمکی به خازن راه‌انداز متصل است. به محض به راه افتادن موتور، کلید سانتریفیوژی سیم‌پیچی راه‌انداز را از مدار خارج می‌کند. خازن موتور در مدار می‌ماند و ضریب توان را اصلاح می‌کند. جریان سیم‌پیچی کمکی ۹۰ درجه با جریان سیم‌پیچی اصلی اختلاف

فاز دارد و ایجاد یک میدان گردان می‌کند. مقادیر رایج خازن‌های مورد استفاده در برخی موتورهای تک‌فاز در جدول ۱۳-۳ آمده است. توضیح مختصری از خازن‌های الکترولیتی مورد استفاده در راه‌اندازی موتورهای القایی در فصل ۵ آمده است.




**تصویر ۱۳-۹: خازن‌تکفاز موتوری**

**جدول ۱۳-۳: مقادیر رایج خازن‌های موتوری**

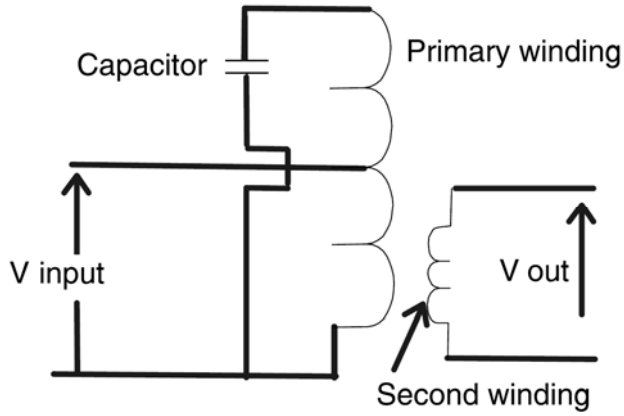
| مشخصات موتور | ولتاژ (ولت) | خازن (میکرو فاراد) | ولتاژ خازن (ولت) |
|---|---|---|---|
| 0.25hp, 1075rpm | 208-230 | 5 | 370 |
| 0.5hp, 1075rpm | 208-230 | 5 | 370 |
| 0.75hp, 1075rpm | 277 | 15 | 370 |

## ۱۳-۶- کاربرد در ترانس‌های فرورزونانس

### ۱۳-٦-۱- ترانس‌های فرورزونانس

در برخی سیستم‌های AC و DC، ولتاژ تغذیه باید ثابت نگه داشته شود؛ مانند کامپیوترها، تلویزیون‌ها، و تجهیزات دارای میکرو پروسسور. چندین دهه است که از ترانس‌های فرورزونانس برای ثابت نگه داشتن ولتاژ تغذیه استفاده می‌شود که روشی مطمئن و بدون نیاز به تعمیر و نگهداری است. ترانس فرورزونانس تجهیزی غیر خطی است که با استفاده از خواص مغناطیسی به طور پَسیو ولتاژ را تنظیم می‌کند. مدار فیدبک پیچیده‌ای برای نظارت و تنظیم ولتاژ خروجی وجود ندارد. این ترانس طوری تنظیم شده که در محدودهٔ خاصی (معمولاً ۱ تا ٤ درصد) کار کند. تفاوت ترانس خطی و غیر خطی در این است که در ترانس غیر خطی با خروج ولتاژ ورودی از محدودهٔ خاصی، ولتاژ خروجی تغییر نمی‌کند. به عبارت دیگر، خروجی ترانس غیر خطی متناسب با ورودی آن است. همچنین ترانس‌های فرورزونانس به دلیل وجود مدار ذخیره می‌توانند در یک نیم‌سیکل انرژی ذخیره کنند. نمونهٔ مدار این ترانس در تصویر ۱۳-۱۰ آمده است و شامل سیم‌پیچی اولیه، ثانویه، و یک خازن است. اگر ولتاژ ورودی در محدودهٔ ۱۸۰ تا ۲۵۰ ولت باشد، ولتاژ خروجی حدود ۱ درصد نوسان خواهد داشت. خازن مورد استفاده در مدار ایجاد رزونانس می‌کند و ولتاژ خروجی ثابت می‌ماند. از مزایای ترانس فرورزونانس ایزوله شدن

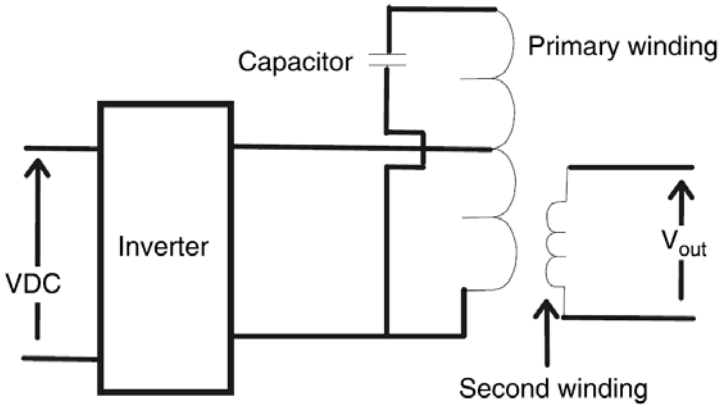
مدار، عدم وجود قطعهٔ متحرک، و پاسخ سریع (۱ سیکلی) است. معایب این ترانس‌ها این است که در خروجی مقداری هارمونیک وجود دارد، بازده پایینی دارد و صدای زیادی تولید می‌کند.




**تصویر ۱۳-۱۰: ترانس فرورزونانس با خروجی ثابت**

### ۱۳-٦-۲- اینورترهای فرورزونانس

کارکرد اصلی اینورتر تبدیل ولتاژ DC به ولتاژ AC با فرکانس دلخواه است. دیاگرام ساده شدهٔ یک اینورتر فرورزونانس در تصویر ۱۳-۱۱ آمده است. اینورتر شامل یک فیلتر DC، یک پل کنترل‌شده با تایریستور، یک مدار تریگر برای تایریستورها، و ترانس فرورزونانس است. فیلتر DC از اینورتر در برابر گذراهای ولتاژ منبع DC محافظت می‌کند. پل کنترل‌شده با تایریستور موج مربعی با فرکانس دلخواه تولید می‌کند. این موج به ترانس فرورزونانس داده می‌شود و در خروجی موج سینوسی با همان فرکانس می‌دهد.

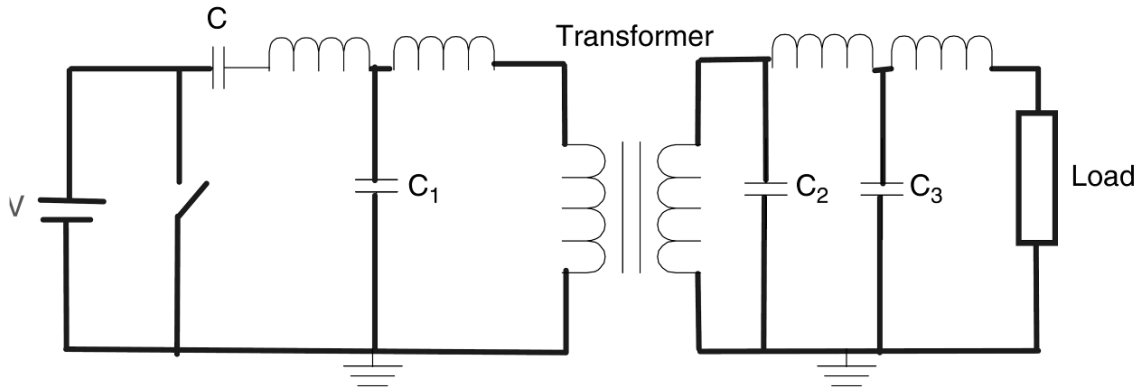



**تصویر ۱۳-۱۱: اینورتر فرورزونانس با خروجی ثابت**

## ۱۳-۷- خازن‌های منبع تغذیهٔ پالسی

خازن‌های مورد استفاده در منابع تغذیهٔ پالسی انرژی را برای زمان کوتاهی در خود ذخیره کرده، به سرعت آزاد می‌کنند. مشکل اصلی این منابع تغذیه، کموتاسیون سریع جریان است. یک مولد پالس معمولاً از مدار کموتاسیون

اکتیو استفاده می‌کند که جریان عبوری از آن برابر با جریان بار است. به همین دلیل، توان خروجی محدود به قابلیت مدار کموتاسیون است. سوییچ‌های پلاسما مانند تایریستورها عمر محدود دارند. به همین دلیل از مدارهایی به نام شبکهٔ فشرده‌ساز مغناطیسی[1] استفاده می‌شود که می‌توانند در چند ده نانو ثانیه پالس‌های توان بالا تولید کنند. اساس کار بر تولید پالسی بزرگ با تجهیزات سوییچینگ کلاسیک مانند تایریستور سریع و اعمال آن به یک مدار فشرده‌ساز مغناطیسی چند طبقه (تصویر ۱۳-۱۲) است. هر طبقه زمان پالس را کاهش و توان آن را افزایش می‌دهد. طبقه‌ها با یک خازن و القاگر اشباع‌شونده ساخته می‌شود که در حالت عادی (غیر اشباع) مانند مدار باز و در حالت اشباع مانند مدار بسته عمل می‌کند.

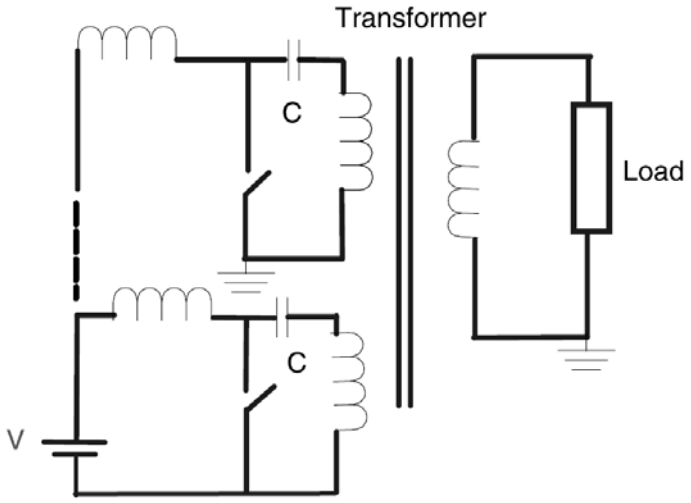



**تصویر ۱۳-۱۲: مدار فشرده‌ساز مغناطیسی**

### ۱۳-۷-۱- ترانس مولد پالس

ترانس مولد پالس از یک مدار مولد پالس (بازده بالا و اندوکتانس نشتی کوچک)، مدار شارژ کننده (خازن و القاءگر)، و یک سوییچ مانند IGBT تشکیل شده است. سیم‌پیچی‌های اولیه با مدار شارژ کننده تغذیه می‌شوند. پالس با خاموش و روشن شدن سوییچ تولید می‌شود. این مدار تا توان‌های ۱۰ مگا وات با ضریب کار[2] ۵ درصد و توان میانگین ۲۰ کیلو وات مناسب است. ترانس‌های پالس اندوکتانس نشتی بسیار کوچکی دارند و می‌توانند در زمان کمتر از ۱ میلی‌ثانیه پالسی ۱۰۰ کیلو ولت/۱۰۰ آمپر تولید کنند. یک مدار نمونه در تصویر ۱۳-۱۳ آمده است.

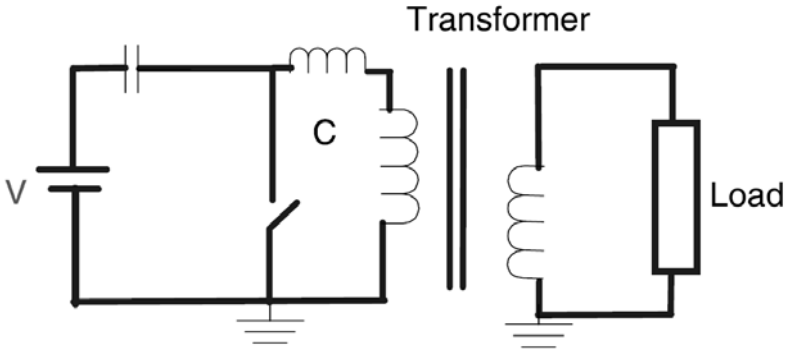
[1] magnetic compression network
[2] duty cycle




**تصویر ۱۳-۱۳: نمونهٔ یک مدار مولد پالس**

### ۱۳-۷-۲- مدار رزونانس برای شارژ ترانس

یک مدار رزونانس شارژ ترانس از یک مدار ترانس برای ذخیرهٔ انرژی، یک سوییچ، و یک ترانس برای انتقال پالس به بار تشکیل شده است. به این ترتیب برای بارهای غیر خطی بسیار مناسب است. نمونهٔ این مدار در تصویر ۱۳-۱٤ آمده است. با پیشرفت روز به روز تکنولوژی سوییچینگ توان بالا، این سوییچ‌ها به مراتب بازده بالاتر و انعطاف بیشتری به دست آورده، کاربردهای بیشتری پیدا می‌کنند. برخی از این کاربردها منبع تغذیهٔ لیزرها، استریل کردن مایعات با میدان الکتریکی ضربه‌ای، اکسیداسیون با تخلیهٔ کورونایی به منظور استریل کردن و زدودن آلودگی، فرم کاری الکترومغناطیسی، و شتاب دهندهٔ ذرات برای آب گرفتن از میوه و سبزی می‌باشد.

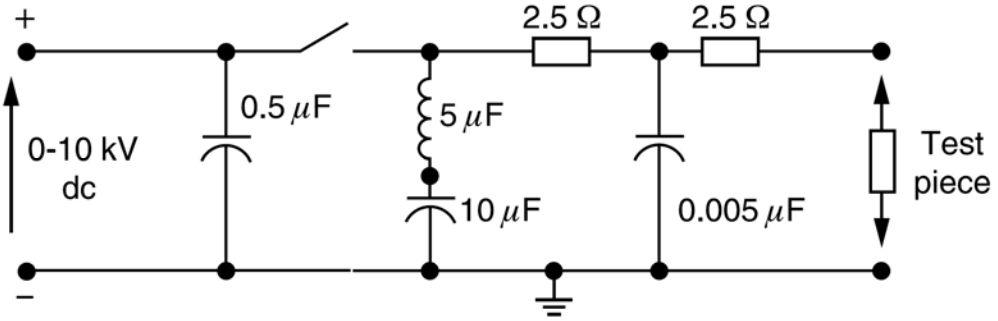



**تصویر ۱۳-۱٤: مدار رزونانس برای شارژ ترانس**

### ۱۳-۷-۳- منبع تغذیهٔ پالسی برای آزمایش وَریستور

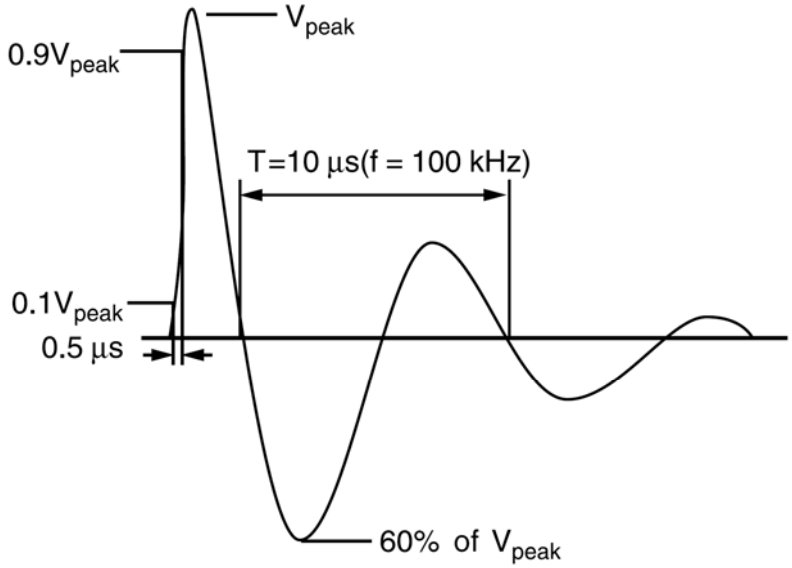
تجهیزات سیستم قدرت مانند مدارشکن‌ها، ترانس‌های قدرت، برق‌گیرها، وَریستورها، ترانس‌ها جریان و ولتاژ در آزمایشگاه تحت آزمایش‌های حالت گذرا و عایقی قرار می‌گیرند. این آزمایش‌ها نیازمند منابع تغذیهٔ ولتاژ بالا و شکل موج‌های خاص است تا حالت‌های مختلف را شبیه‌سازی کند. برای درک بهتر، فرض کنید که منبع تغذیهٔ

ولتاژ بالایی برای آزمایش ایمنی یک وَریستور استفاده می‌شود. در این مورد باید سه آزمایش مختلف انجام شود. یکی از آنها موج ۱۰۰ کیلوهرتزی (به مدت نیم میکرو ثانیه) برای بار گذاری متوسط است. امپدانس بار معمولاً حدود ۱۰۰ اهم انتخاب می‌شود. مدار مولد چنین پالسی در تصویر ۱۳-۱۵ آمده است.




**تصویر ۱۳-۱۵: مدار مولد موج ۱۰۰ کیلوهرتزی**

خروجی این مدار که در صنعت برای آزمایش وَریستور به کار می‌رود، در تصویر ۱۳-۱۶ آمده است. ملاحظه می‌شود که خازن‌های مدار نقش اصلی را در تولید چنین شکل موجی بر عهده دارند.

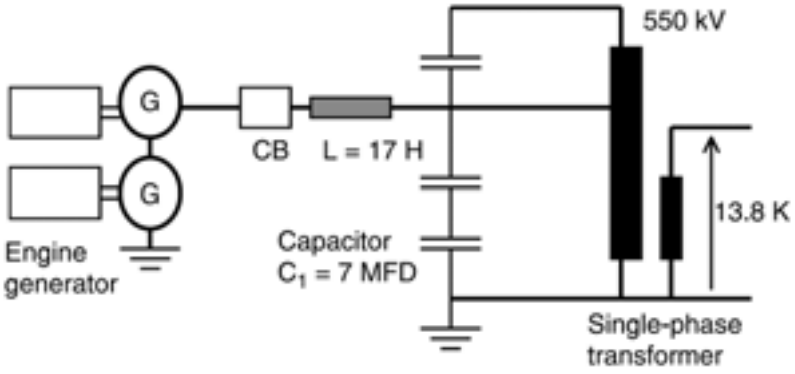



**تصویر ۱۳-۱۶: خروجی مدار باز مدار تصویر ۱۳-۱۵**

### ۱۳-۷-٤- منبع تغذیهٔ ولتاژ بالا برای آزمایش ترانس

همهٔ ترانس‌ها قبل از نصب باید به منظور اطمینان از رعایت استانداردهای صنعتی آزمایش و بررسی شوند. گاهی اوقات ترانس‌ها در پست مقصد آزمایش می‌شوند. برای آزمایش بی‌باری ترانس فشار قوی نیازمند منبع تغذیه‌ای با ولتاژ نامی و توان کافی هستیم. دیاگرام تک‌خطی مدار تغذیه در تصویر ۱۳-۱۷ آمده است. خازن‌ها به عنوان المان‌های فیدبک استفاده می‌شوند. دو ژنراتور برای تولید خروجی ۱۰ کیلو ولت به کار رفته‌اند. می‌خواهیم

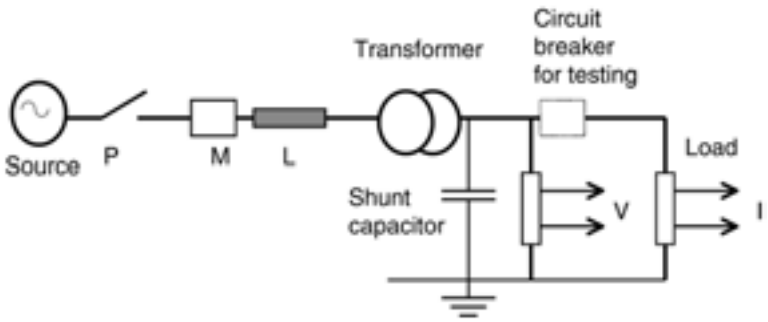
ترانس تک‌فاز به سه سیم‌پیچی را در حالت بی‌باری آزمایش کنیم. اندوکتانس سری (L) برای اتصال منبع تغذیه به کار رفته است. یک بانک خازنی به سیم‌پیچی اصلی وصل شده تا ترانس را تحریک کند. سیم‌پیچی سوم ترانس مدار باز است. پارامترهای تجهیزات آزمایش به شرح زیر است: اتو ترانس تک‌فاز، ٦٠ هرتز ٥٥٠ کیلو ولت به ٢٣٠ و ١٣/٨ کیلو ولت. می‌توان نقش مهم ترانس‌ها را در این مدار ملاحظه کرد.




**تصویر ١٣-١٧: آزمایش بی‌باری ترانس فوق فشار قوی**

### ١٣-٧-٥- منبع تغذیه برای آزمایش مدارشکن

مدارشکن‌ها برای اطمینان از رعایت استانداردهای صنعتی مورد آزمایش‌های مستقیم و غیر مستقیم قرار می‌گیرند. در آزمایش مستقیم، ولتاژ و بار نامی اعمال شده، عملکرد بررسی می‌شود. آزمایش‌های غیر مستقیم در محل نصب یا در آزمایشگاه انجام می‌شود. به این منظور به مدارهای خاصی نیاز است. دیاگرام ساده‌ای در تصویر ١٣-١٨ آمده است. تجهیز اصلی مورد استفاده منبع تغذیه‌ای مانند شبکه یا ژنراتور با سطح اتصال کوتاه کافی است. یک مدارشکن کمکی (P) استفاده می‌شود که در صورت خرابی مدارشکن اصلی مدار را قطع کند. از مدارشکن (M) برای شبیه‌سازی حالت‌های مختلف مانند بسته شدن تک‌پل یا دو پل استفاده می‌شود. راکتور L جریان اتصال کوتاه را به مقدار مورد نظر محدود می‌کند. ترانس ولتاژ را به سطح مطلوب تبدیل می‌کند. بانک خازن نیز برای کنترل ولتاژ بازیافت به سطح مورد نظر استفاده می‌شود. ولتاژ و جریان مدار در هر لحظه از آزمایش ثبت می‌شود. اندازهٔ بانک خازنی به سایز مدارشکن مورد آزمایش دارد.

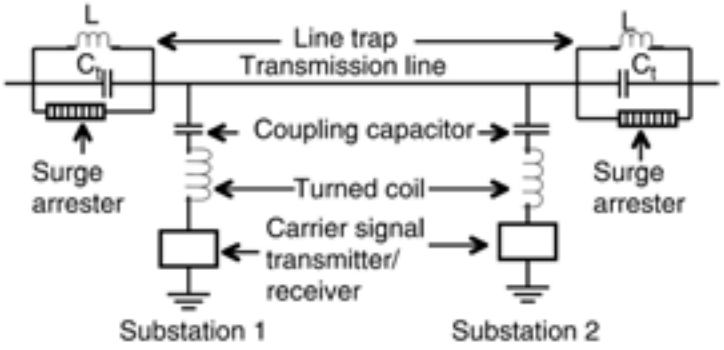



**تصویر ١٣-١٨: مدار آزمایش مدارشکن‌های فشار قوی**

## ۱۳-۸- خازن‌های فوق فشار قوی

### ۱۳-۸-۱- خازن‌های کوپلینگ حامل

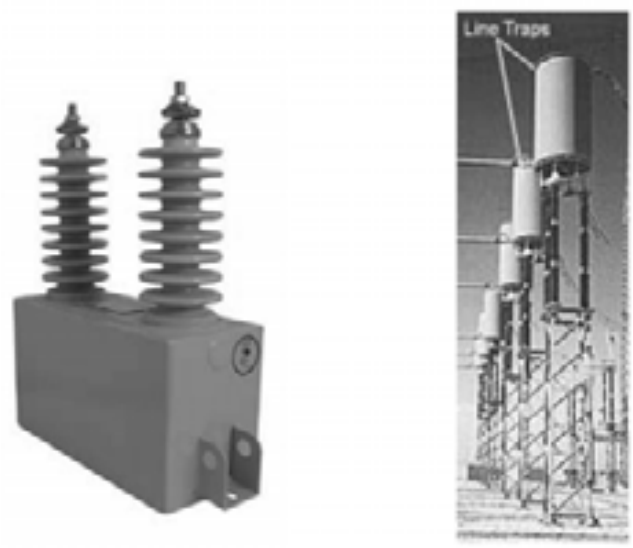
در سیستم‌های قدرت، از خطوط هوایی برای انتقال توان و سیگنال‌های مخابراتی استفاده می‌شود. به مدارهایی که برای ارسال سیگنال روی خط استفاده می‌شوند، مدار حامل گفته می‌شود. فرکانس مورد استفاده از ۳۰ تا ۵۰۰ کیلو هرتز متغیر است. از آنجا که این سیگنال مستقیماً به خط اعمال می‌شود، در چند کانال خاص عملکرد بسیار خوبی دارد؛ در فواصل طولانی نیازی به تقویت کننده نیست. خط پیوسته تعمیر و نگهداری می‌شود بنابراین هزینهٔ نگهداری این سیستم مخابراتی پایین است. ولی سیگنال مخابراتی در معرض اغتشاش و نویز ناشی از خط انتقال است. نمونهٔ مدار این سیستم در تصویر ۱۳-۱۹ آمده است. در این مدار، سیگنال مخابراتی فرستنده از یک مدار تیون‌شده گذشته و به خط می‌رسد. این مدار حاوی خازن کوپلینگ و یک القاءگر است. خازن کوپلینگ المانی فرکانس بالا با بدنهٔ پرسلینی و ترمینال فلزی است و چند خازن سری شده در خود دارد. نمونهٔ چنین خازنی به همراه یک لاین‌تِراپ در تصویر ۱۳-۲۰ آمده است. استوانهٔ دیده شده، القاءگرِ لاین‌تِراپ است. خازن‌ها از نوع کاغذ/فویل هستند. خازن‌ها روی صفحه‌ای فلزی متصل به زمین نصب می‌شوند که با سیم‌پیچی به زمین وصل می‌شود و در فرکانس بالا (فرکانس سیگنال) امپدانس بالایی از خود نشان می‌دهد. مقادیر نوعی این خازن‌ها در جدول ۱۳-٤ آمده است.




**تصویر ۱۳-۱۹: دیاگرام مدار مخابراتی**

**جدول ۱۳-٤: خازن‌های کوپلینگ**

| BIL | خازن ماکزیمم (نانو فاراد) | ولتاژ (کیلو ولت) |
|---|---|---|
| 350 | 23 | 72.5 |
| 550 | 12 | 110 |
| 350 | 10 | 145 |
| 750 | 100 | 170 |
| 1,050 | 9 | 220 |
| 1,050 | 7 | 300 |
| 1,175 | 5 | 360 |
| 1,425 | 4.5 | 420 |
| 1,425 | 4.5 | 500 |
| 2,250 | 3 | 750 |




**تصویر ۱۳-۲۰: خازن کوپلینگ (چپ) و لاین‌تراپ (راست)**

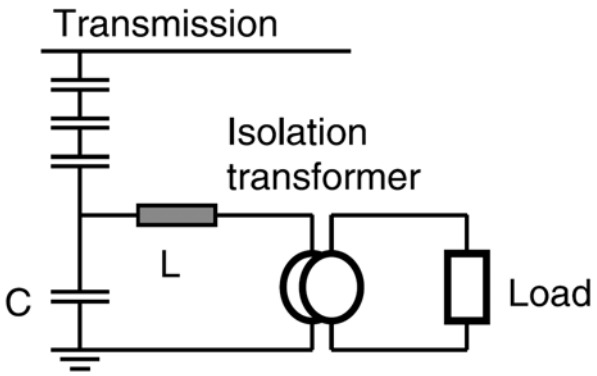
### ۱۳-۸-۲- خازن‌های لاین‌تراپ

همان‌طور که در تصویر ۱۳-۱۹ دیده می‌شود، لاین‌تراپ مداری تیون‌شده است که با خط انتقال سری می‌شود. این مدار برای تقسیم کردن مسیر سیگنال مخابراتی به چند تکه استفاده می‌شود و مدار تشدیدی است که در برابر فرکانس خاصی امپدانسی بالا از خود نشان می‌دهد. در دیگر فرکانس‌ها، امپدانس پایینی دارد و باعث افت ولتاژ قابل توجهی در فرکانس قدرت نمی‌شود. سیم‌پیچی اصلی جریانی برابر با جریان نامی دارد. سیم‌پیچی روی یک استوانهٔ پرسلینی پیچیده می‌شود که محفظهٔ ترانس متغیر است. سیم‌پیچی و خازن روی فرکانسی خاص تیون می‌شوند. معمولاً یک برق‌گیر هم به این مدار متصل می‌شود تا از آن در برابر موج صاعقه و دیگر موج‌های سیار حفاظت کند.

### ۱۳-۸-۳- ترانس‌های ولتاژ کوپلینگ خازنی (CCVT[1])

در سیستم‌های فوق فشار قوی (۵۰۰ کیلو ولت)، ترانس‌های ولتاژ معمولی بسیار گران می‌شوند. همچنین، سیم‌پیچی این ترانس‌ها باید دورهای متعددی از هادی‌های نازک داشته باشد و از نظر عایقی خطرناک می‌شود. روش جایگزین مناسب، استفاده از CCVT برای اندازه‌گیری ولتاژ است. خروجی CCVT برای نظارت، رله‌های حفاظتی، و کنترل به کار می‌رود. دیاگرام تک‌خط چنین سیستمی در تصویر ۱۳-۲۱ آمده و تصویر یک ترانس واقعی در تصویر ۱۳-۲۲ نشان داده شده است.

[1] capacitor coupled voltage transformer

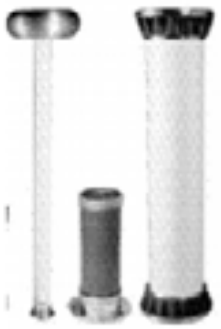



**تصویر ۱۳-۲۱: دیاگرام تک‌خط یک CCVT**

**تصویر ۱۳-۲۲: تصویر یک CCVT**

### ۱۳-۸-٤- خازن‌های آزمایشگاهی

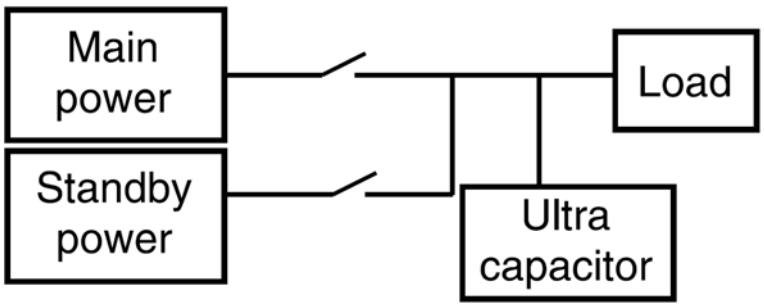
خازن‌های فشار قوی در آزمایشگاه‌ها به عنوان خازن کوپلینگ به منظور اندازه‌گیری تخلیهٔ پتانسیل، تقسیم پتانسیل فشار قوی (٦٠ هرتز)، تقسیم ولتاژ RC برای اندازه‌گیری ضربه، در بارهای خازنی برای رزونانس سری، و منبع تغذیه برای آزمایش تجهیزات به کار می‌روند. ظرفیت این خازن‌ها از ۱۵۰ پیکو فاراد تا ۵۰۰ نانو فاراد و ولتاژ آنها از ۲۰ تا ۱۰۰۰ کیلو ولت متغیر است. چند نمونه از این خازن‌ها در تصویر ۱۳-۲۳ آمده است.



**تصویر ۱۳-۲۳: تصویر چند خازن آزمایشگاهی**

## ۱۳-۹- خازن‌های مخصوص ذخیرهٔ انرژی

در سیستم‌های مخابراتی برای اطمینان بیشتر از ژنراتورهای پشتیبان استفاده می‌کنند. دیگر تجهیزات پشتیبان سیستم عبارتند از باتری، مبدل‌های DC به DC، و UPSها. روش دیگر استفاده از ترکیب موتور و ژنراتور و یا پیل‌های سوختی است که قابلیت اطمینان و بازده را افزایش می‌دهند. این سیستم‌ها، در حالت عادی وارد مدار نمی‌شوند و تنها در صورت قطع برق عمل می‌کنند. اشکال این سیستم‌ها زمان مورد نیاز برای راه‌اندازی و ورود به شبکه است. برای رفع این مشکل باید با مکانیزمی ولتاژ را در زمان راه‌اندازی در سطح قابل قبولی نگه داشت. خازن‌های اولترا راه حل ساده و در عین حال جالبی برای این مسأله هستند. خازن‌های اولترا در ظرفیت‌های چند صد فارادی و در ابعاد کوچک می‌توانند انرژی زیادی ذخیره کنند و در عین حال نیازی به تعمیر و نگهداری ندارند و عمرشان طولانی است. در نتیجه می‌توانند ولتاژ را در زمان راه‌اندازی نگه دارند. دیاگرام چنین سیستمی در تصویر ۱۳-۲٤ آمده است. معمولاً ولتاژ نامی یک خازن اولترا بسیار کوچک (۲ تا ۳ ولت) است و باید تعداد زیادی از آنها را سری و موازی کرد. کاربردهای دیگر خازن‌های اولترا در بهبود کیفیت توان، پایدار سازی توان، کنترل موتورهای متغیر، و حل مشکل فلیکر است.




**تصویر ۱۳-۲٤: نمونهٔ یک سیستم استند بای با خازن اولترا**

# فصل ۱۴ : جبران‌سازهای استاتیک

## ۱۴-۱- معرفی

از زمان کاربرد سیستم‌های AC نیاز به کنترل توان راکتیو در خطوط انتقال و توزیع تشخیص داده شد. خازن‌های شانت ثابت و سوییچ‌شونده می‌توانند پروفایل ولتاژ را در طول خطوط انتقال و توزیع بهبود دهند. برای تحمل گذراهایی مانند کلیدزنی، خروج ژنراتور از شبکه، اضافه‌بار، و خطاهای سیستم باید به سرعت توان راکتیو تأمین کرد تا سیستم پایدار بماند. در مورد بارهای نوسانی مانند کوره‌های قوس الکتریکی، آسیاب‌ها، کارخانه‌های کاغذ، و معادن باید تجهیزات اصلاح ضریب توان هوشمند استفاده کرد. جبران‌سازهای استاتیک (SVC) و کنترل‌شده با تایریستور چنین امکانی را برای کنترل سریع توان راکتیو می‌دهند.

## ۱۴-۲- اصول جبران‌سازی

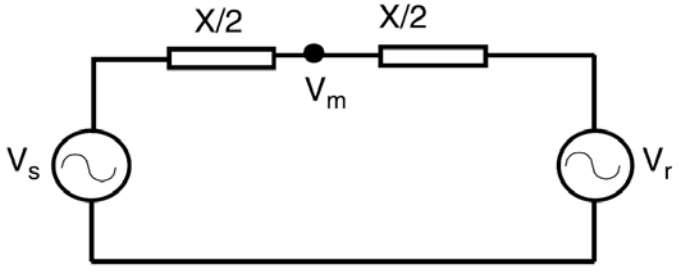
یک سیستم سادهٔ دو ماشینی مانند تصویر ۱۴-۱ برای انتقال سادهٔ توان در نظر بگیرید. رابطهٔ ولتاژ سمت منبع $V_s$ و ولتاژ سمت بار $V_r$ به شرح زیر است:

$$V_s = V\left(\cos\frac{\delta}{2} + j\sin\frac{\delta}{2}\right)$$

$$V_r = V\left(\cos\frac{\delta}{2} - j\sin\frac{\delta}{2}\right)$$

ولتاژ در نقطهٔ میانی $V_m$ از این رابطه به دست می‌آید:

$$V_m = \frac{V_s + V_r}{2} = V\cos\frac{\delta}{2}$$




**تصویر ۱۴-۱: بررسی سیستم دو ماشینی**

جریان خط برابر است با:

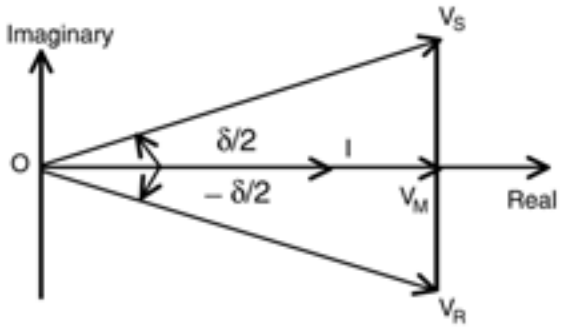
$$I = \frac{V_s - V_r}{jX} = \frac{2V}{X}\sin\frac{\delta}{2}$$

رابطهٔ میان $V_s$، $V_r$، و $I$ در دیاگرام فازوری تصویر ۱۴-۲ آمده است. اگر خط بدون تلفات فرض شود، توان تحویلی برابر است با:

$$P = \frac{V^2}{X}\sin\delta$$

توان راکتیو ورودی از دو طرف به خط برابر است با:

$$Q_s = Q_r = \frac{V^2}{X}(1-\cos\delta)$$

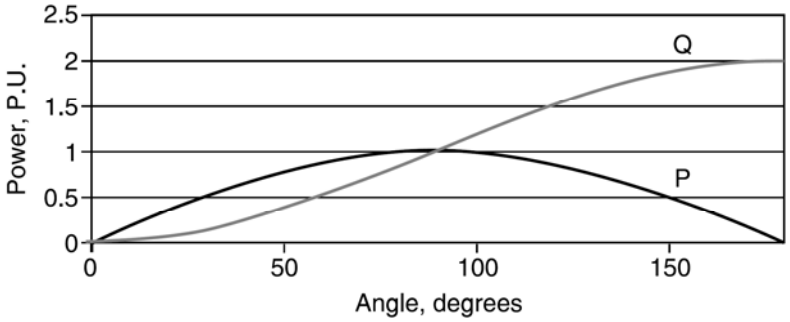



**تصویر ١٤-٢: دیاگرام فازوری رابطهٔ $V_s$، $V_r$، و $I$**

توان راکتیو کل را محاسبه می‌کنیم:

$$Q = 2Q_s = \frac{2V^2}{X}(1-\cos\delta)$$

رابطهٔ میان $P$، $Q$، و $\delta$ در تصویر ١٤-٣ نشان داده شده است. محدودهٔ مجاز توان اکتیو ١ پِر یونیت و محدودهٔ مجاز توان راکتیو ٢ پِر یونیت است.




**تصویر ١٤-٣: دیاگرام توان بر حسب زاویه**

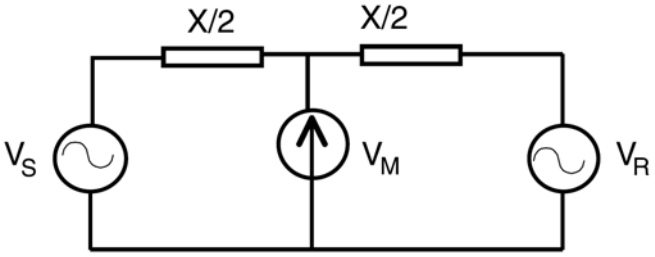
## ١٤-٣- اثرات جبران‌سازی

از منبع ولتاژ سنکرون و کنترل‌پذیری به وسط خط متصل شود، می‌تواند توان راکتیو را جبران کند. به این ترتیب می‌توان توان اکتیو بیشتری منتقل کرد. این نکته در تصویر ١٤-٤ نشان داده شده است. اگر ولتاژ میان خط به اندازهٔ ولتاژ منبع و بار نگهداشته شود، توان اکتیو ($P_c$) برابر است با:

$$P_c = \frac{2V^2}{X}\sin\frac{\delta}{2}$$

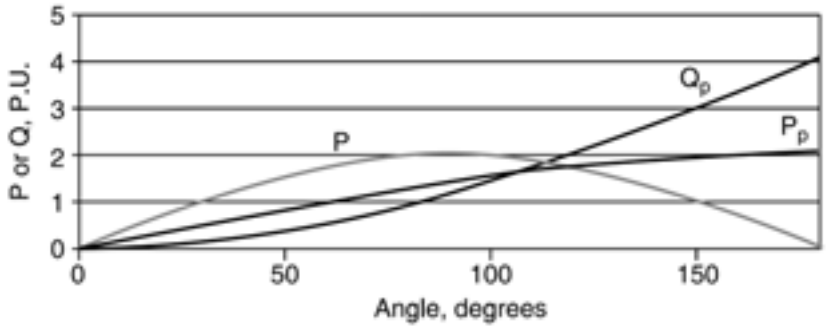
و توان راکتیو:

$$Q_c = \frac{4V^2}{X}\left(1-\cos\frac{\delta}{2}\right)$$




**تصویر ١٤-٤: سیستم دو ماشینی با جبران‌سازی**

منحنی توان اکتیو و راکتیو در تصویر ١٤-٥ نشان داده شده است. در اینجا می‌توان اثر جبران‌سازی را دید. در خطوط دارای تلفات، ماکزیمم توان اکتیو و راکتیو بسیار کمتر است. ماکزیمم توان انتقالی در خطوط جبران نشده در زاویهٔ ٩٠ درجه رخ می‌دهد. در حالی که این زاویه در خطوط جبران‌شده ١٨٠ درجه است.




**تصویر ١٤-٥: توان اکتیو و راکتیو بعد از جبران‌سازی**

کندانسور سنکرون و خازن شانت هر دو جبران‌سازی می‌کنند. برای جبران‌سازی دینامیک می‌توان از SVCهای زیر استفاده کرد:

- راکتور کنترل‌شده با تایریستور و خازن ثابت
- راکتور کنترل‌شده با تایریستور و خازن سوییچ‌شونده با تایریستور
- راکتور کنترل‌شده با تایریستور و خازن سوییچ‌شونده به طور مکانیکی
- خازن سوییچ‌شونده با تایریستور
- SVC دارای میکروپروسسور

- جبران‌ساز استاتیک از نوع STATCOM[1]

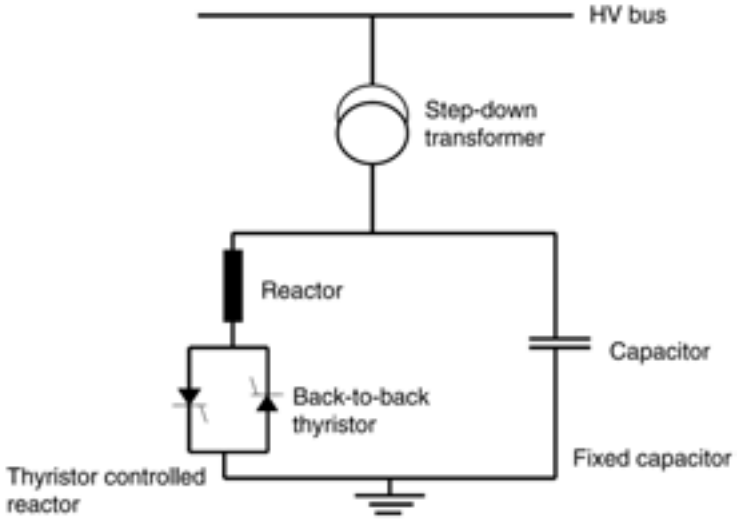
با در نظر گرفت کاربرد و قیمت می‌توان SVC مناسب را انتخاب کرد.

## ۱۴-۴- مشخصات یک SVC

یک SVC نوعی شامل تایریستور و مدار کنترل، سیستم خنک‌کننده برای تایریستورها، تجهیزات الکترونیکی برای کنترل، بانک خازنی، راکتورهای فیلتر، مدارشکن، و قفسه‌های نصب است. تایریستورها هنوز در فشار ضعیف و متوسط کار می‌کنند و بنابراین SVCها در این سطوح ولتاژی تولید می‌شوند. در SVCهای دارای میکروپروسسور، خازن و راکتور کنترل‌شده با تایریستور همراه با سیستم کنترل هوشمند وجود دارند. معمولاً یک ترانس رابط، تجهیز را به سیستم فشار قوی وصل می‌کند.

### ۱۴-٤-۱- راکتور کنترل‌شده با تایریستور و خازن ثابت

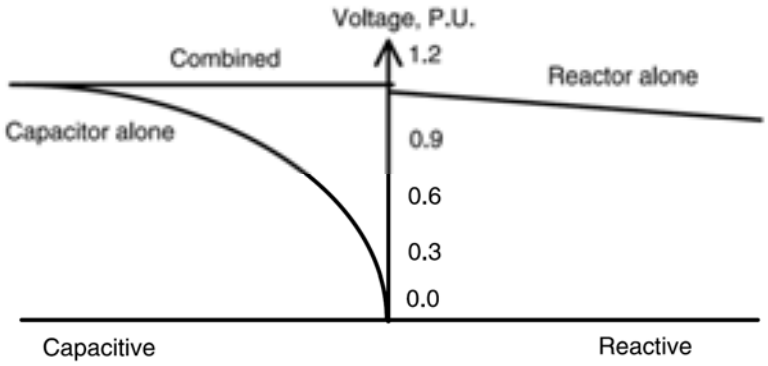
در این روش، خازن‌ها طوری انتخاب می‌شوند که ماکزیمم توان راکتیو مورد نیاز در محل نصب را تأمین کنند. در زمانی که توان راکتیو مورد نیاز ماکزیمم نیست، با کنترل راکتور می‌توان پروفایل ولتاژ را تنظیم کرد. کنترل با تغییر زاویهٔ فاز انجام می‌شود. روش رایج در تصویر ۱٤-٦ آمده است.




**تصویر ۱٤-٦: راکتور کنترل‌شده با تایریستور و خازن ثابت**

در نتیجهٔ این جبران‌سازی، ضریب توان نزدیک واحد می‌شود و ولتاژ حداقل تغییرات را دارد. در ماکزیمم توان راکتیو، سوییچ باز و جریان راکتور صفر است. با افزایش زاویهٔ آتش، هارمونیک‌ها افزایش می‌یابند. یک یونیت ۱۰ مگاواری معمولاً دارای ۱۰ مگاوار خازن و ۱۰ مگاوار راکتور به همراه کنترل‌های تایریستوری است. تغییرات توان راکتیو با ولتاژ سیستم در تصویر ۱٤-۷ نشان داده شده است.

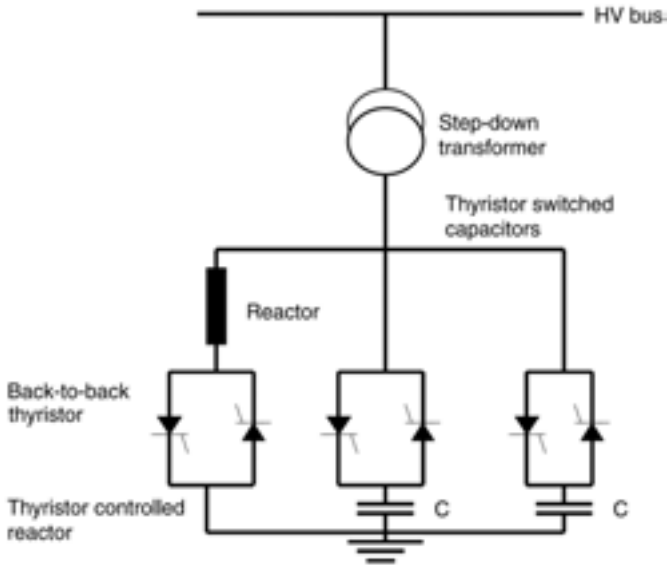
[1] STATic synchronous COMpensator



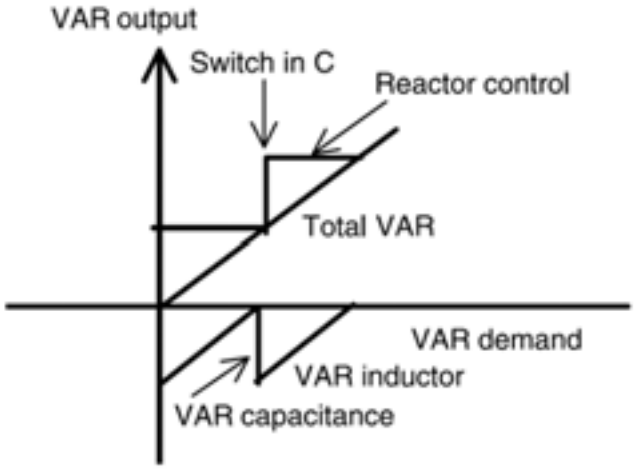

**تصویر ١٤-٧: مشخصهٔ ولتاژ با خازن ثابت و راکتور کنترل‌شده**

### ١٤-٤-٢- راکتور کنترل‌شده با تایریستور و خازن سوییچ‌شونده با تایریستور

یکی دیگر از روش‌های ذکر شده در تصویر ١٤-٨ آمده است. در اینجا چندین بخش خازنی به طور موازی با یک راکتور کنترل‌شده با فاز کار می‌کنند. یک کنترلر الکترونیکی، راکتور و خازن را کنترل می‌کند. بازدهٔ کلی به دلیل تلفات راکتور کمتر است. تعداد شاخه‌های خازنی به میزان توان راکتیو، مشخصات تایریستورها، و مانند آن بستگی دارد. برای یک SVC به ظرفیت ١٠ مگاوار، دو بانک خازنی ٥ مگاواری و یک راکتور ١٠ مگاواری در نظر گرفته می‌شود. منحنی تغییرات توان راکتیو مورد نیاز و توان راکتیو تأمین‌شده در تصویر ١٤-٩ آمده است.



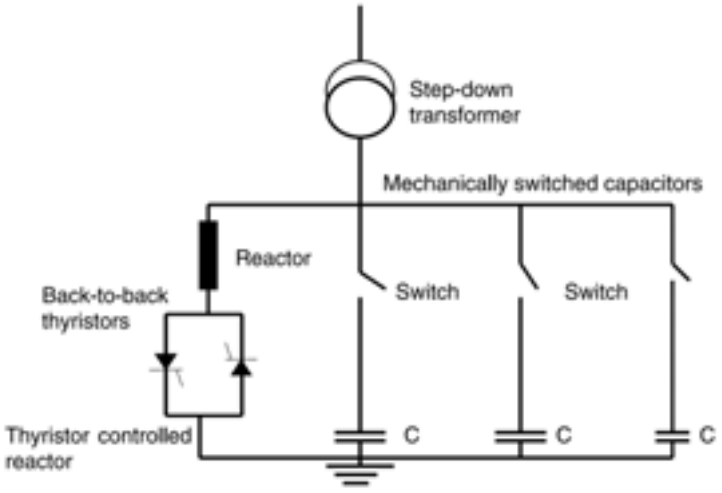

**تصویر ١٤-٨: راکتور کنترل‌شده با تایریستور و خازن سوییچ‌شونده با تایریستور**




**تصویر ١٤-٩: منحنی تغییرات توان راکتیو مورد نیاز و توان راکتیو تأمین‌شده**

### ١٤-٤-٣- راکتور کنترل‌شده با تایریستور و خازن سوییچ‌شونده به طور مکانیکی

دیاگرام این مدار در تصویر ١٤-١٠ آمده است و خازن‌ها با سوییچ‌های مکانیکی قطع و وصل می‌شوند. این روش برای بارهای یکنواخت مناسب است که در آن احتیاجات بار به توان راکتیو قابل پیش‌بینی است و خازن‌ها با استفاده از مدارشکن‌ها سوییچ می‌شوند، و راکتور توسط تایریستورکنترل می‌شود بنابراین در اینجا کنترل نرمی بر روی توان راکتیو به دست می‌آوریم. این روش ارزان‌تر است ولی پاسخ آن بیشتر طول می‌کشد. برای یک یونیت ١٠ مگاواری، بانک خازنی در سه پلهٔ ٣/٣ مگاواری و راکتور ١٠ مگاواری طراحی می‌شود.

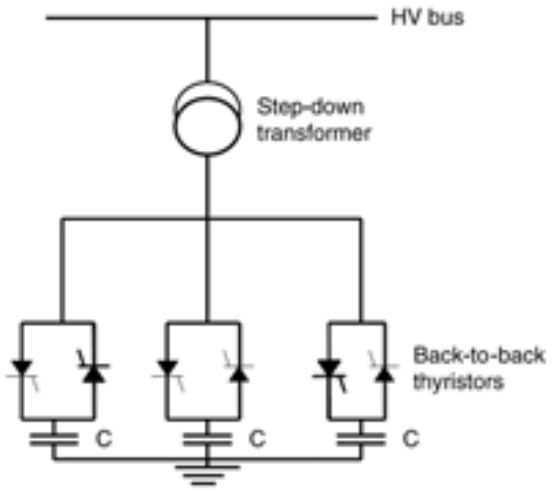



**تصویر ١٤-١٠: راکتور کنترل‌شده با تایریستور و خازن سوییچ‌شونده به طور مکانیکی**

### ١٤-٤-٤- خازن سوییچ‌شونده با تایریستور

در این حالت، خازن‌ها با استفاده از SCRها سوییچ می‌شوند. گاهی برای کاهش تعداد خازن‌ها از گروه‌های دو دویی استفاده می‌شود. این روش هم برای بارهای متعادل و هم بارهای نامتعادل مناسب است. دیاگرام این مدار در تصویر ١٤-١١ آمده است. برای یونیت ١٠ مگاواری، یک بانک ٤ مگاواری و دو بانک ٣ مگاواری در نظر

می‌گیریم. برخی طراحی‌ها پله‌ها را دودویی تقسیم می‌کنند (۲، ٤ و ٤ مگاوار). در این روش، تنها بانک خازنی استفاده می‌شود. در روش‌های قبلی راکتوری با همان ظرفیت به کار می‌رفت. لازم به ذکر است که هزینهٔ این روش بسیار کمتر از روش‌های قبلی است. با این طرح، جبران‌سازی به صورت سیکل به سیکل انجام می‌شود. هر فاز مستقلاً جبران‌سازی می‌شود و عدم تعادل تصحیح می‌گردد. شرایط فرورزونانس نیز برطرف می‌شود زیرا خازن‌ها در هر سیکل وارد و خارج می‌شوند. راکتور کنترل‌شده با فاز وجود ندارد و به همین دلیل هارمونیک تولید نمی‌شود.

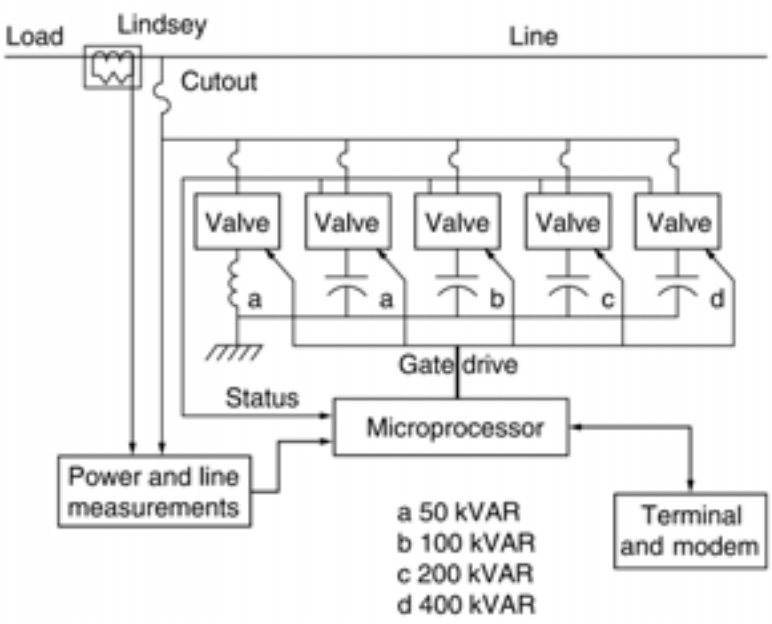



**تصویر ١٤-١١: خازن سوییچ‌شونده با تایریستور**

### ١٤-٤-٥- SVC دارای میکروپروسسور

در این نوع اتصال، خازن‌های سوییچ‌شونده با تایریستور و راکتور کنترل‌شده با تایریستور توسط میکروپروسسور کنترل می‌شوند. به این ترتیب کنترل بدون پله و برای بارها نوسانی مانند کارخانهٔ کاغذ، جوشکاری قوس، کورهٔ قوس، موتورهای بزرگ، تغذیه‌های بزرگ، و ایستگاه‌های پمپ مناسب است. دیاگرام تک‌خطی یک SVC در تصویر ١٤-١٢ نشان داده شده است. همچنین تصویر یک SVC روی تیر در تصویر ١٤-١٣ آمده است. ویژگی‌های دیگر این کنترلر عبارتند از:

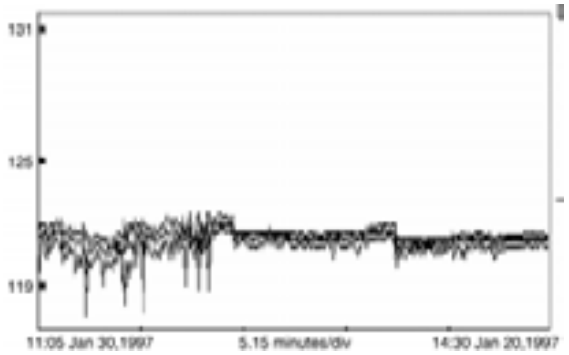
- استفاده در یک کارخانهٔ کاغذ و احتمال وقوع فلیکر
- ولتاژ فاز به زمین ۷/۲ کیلو ولت
- محدودهٔ ضریب توان از ۷۰٪ سلفی تا ٨٦ درصد خازنی




**تصویر ١٤-١٢: دیاگرام تک‌خطی یک SVC دارای میکروپروسسور**

**تصویر ١٤-١٣: تصویر SVC نصب شده در کارخانهٔ کاغذ سازی**

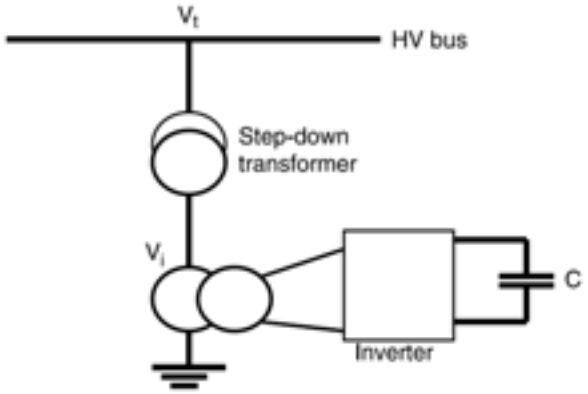
پروفایل ولتاژ قبل و بعد از نصب SVC در تصویر ١٤-١٤ نشان داده شده است. قبل از نصب نوسان‌های زیادی در ولتاژ دیده می‌شد و بعد از نصب، پروفایل ولتاژ نرم‌تر شده و مشکل فلیکر برطرف گردیده است.




**تصویر ١٤-١٤: پروفایل ولتاژ بدون SVC و با SVC**

### ۱۴-۴-۶- سیستم STATCOM

یک سیستم STATCOM شامل یک اینورتر منبع ولتاژ حالت جامد با تعدادی والو (که با تایریستورهای GTO سوییچ می‌شود)، یک خازن لینک DC، مدار مغناطیسی، و یک کنترلر است. تعداد تایریستورها و نحوهٔ اتصال مدار مغناطیسی بستگی به کیفیت شکل موج AC تولید شده در کنترلر دارد. دیاگرام تک‌خط یک STATCOM در تصویر ۱۴-۱۵ نشان داده شده است.



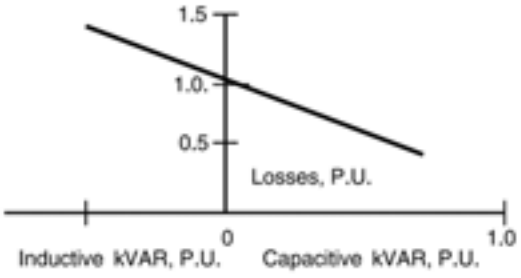

**تصویر ۱۴-۱۵: نمونهٔ یک STATCOM**

خازن لینک DC با مدار اینورتر سوییچ می‌شود و توان راکتیو مورد نیاز به خط انتقال تزریق می‌شود. جریان تزریقی با ولتاژ خط تقریباً در یک ربع هستند و بنابراین در محل اتصال مانند یک خازن یا یک القاءگر عمل می‌کنند. اگر $V_t$ ولتاژ خط و $V_i$ ولتاژ ترمینال اینورتر باشد، آن‌گاه:

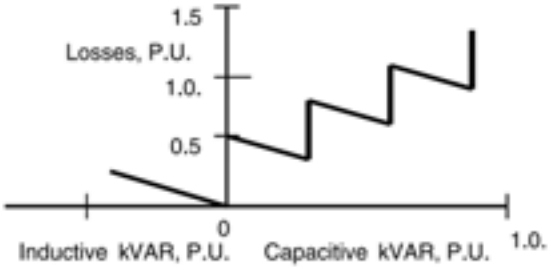
- اگر $V_i$ بزرگ‌تر از $V_t$ باشد، اینورتر توان راکتیو تولید می‌کند و رفتار خازنی دارد.
- اگر $V_i$ کوچک‌تر از $V_t$ باشد، اینورتر توان راکتیو تولید می‌کند و رفتار سلفی دارد.
- اگر $V_i$ برابر با $V_t$ باشد، هیچ توان راکتیوی بین خط و اینورتر تبادل نمی‌شود.

## ۱۴-۵- تلفات و هارمونیک‌ها در SVC

در زمان انتخاب یک سیستم SVC، باید تلفات آن را هم در نظر گرفت. از آنجا که راکتور کنترل‌شده با تایریستور در زاویه‌های آتش مختلفی کار می‌کند، به سختی می‌توان تلفات را در هر زاویهٔ آتشی به دست آورد. در صورت وجود خازن ثابت و راکتور سوییچ‌شونده، هنگام بی‌باری توان راکتیو صفر است؛ یعنی تمام جریان خازنی وارد مدار سلفی می‌شود. بنابراین با افزایش توان راکتیو خازن، تلفات کاهش می‌یابد (تصویر ۱۴-۱۶). تلفات کل در چنین سیستمی حدود ۱٪ توان نامی است. در صورت وجود خازن سوییچ‌شونده و راکتور کنترل‌شده با تایریستور، تلفات در بی‌باری کوچک است و با افزایش توان راکتیو خازن افزایش می‌یابد (تصویر ۱۴-۱۷). در این حالت تلفات به دلیل وجود هارمونیک‌ها بیشتر از مقدار تخمین‌زده خواهد بود.




**تصویر ١٤-١٦: تلفات بر حسب توان راکتیو**




**تصویر ١٤-١٧: تلفات در راکتور کنترل‌شده با تایریستور و خازن سوییچ‌شونده**

### ١٤-٥-١- هارمونیک‌ها

در صورت حضور راکتور کنترل‌شده با تایریستور، هارمونیک‌ها به دلیل کنترل فاز تولید می‌شوند. میزان هارمونیک‌ها به زاویهٔ آتش بستگی دارد. کنترل هارمونیک ولتاژ فواید زیادی دارد، مانند کاهش تلفات، کاهش حرارت، کاهش نیاز به تعمیر، کاهش خطا در عملکرد رله، و مانند آن. در اینجا برخی مشکلات مربوط به هارمونیک‌های خاص بحث می‌شود:

*هارمونیک‌ها در اتصال مثلث*

هارمونیک‌های مضرب سه در اتصال مثلث به گردش می‌افتند. این هارمونیک‌ها در خروجی دیده نخواهد شد.

*هارمونیک‌ها در اتصال ستاره*

بانک‌های خازنی و راکتورهای اتصال ستاره اغلب با اتصال ستاره نصب می‌شوند و انواع هارمونیک‌ها در خروجی آنها دیده می‌شود. برای کنترل این هارمونیک‌ها معمولاً در سیستم‌های SVC از فیلترهای تیون‌شده استفاده می‌شود. فیلترها می‌توانند از مرتبهٔ ٣، ٥، ٧، یا بالاتر باشد که بستگی به میزان هارمونیک موجود در سیستم دارد. برای نشان دادن این مطلب، پارامترهای چند سیستم SVC مانند راکتور، خازن، و فیلتر در جدول ١٤-١ آورده شده است. ملاحظه می‌شود که طراحی چنین سیستمی کاملاً وابسته به مورد است و از قاعدهٔ کلی خاصی تبعیت نمی‌کند.

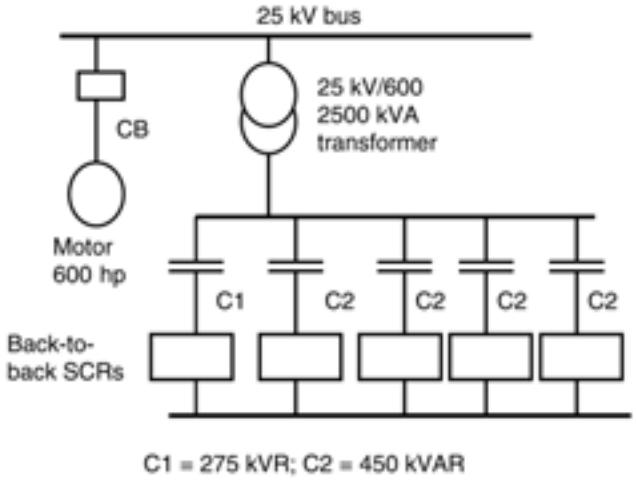
**مثال**

فیدری به طول ٢٧ کیلومتر از یک ترانس ٦٩ کیلو ولت به ٢٥ کیلو ولتی تغذیه می‌شود (تصویر ١٤-١٨). یک موتور القایی ٦٠٠ اسب بخاری سه‌فاز با یک ترانس ٢٥ کیلو ولت به ١٢/٥ کیلو ولتی تغذیه می‌شود. موتور در

موقع راه‌اندازی به مدت ۱۵ ثانیه فلیکری ۱۲/۵ درصدی روی خط ۲۵ کیلو ولت می‌اندازد. می‌خواهیم با نصب یک SVC مشکل را برطرف کنیم.

**جدول ۱۴-۱: نمونهٔ چند سیستم SVC**

| پارامتر | ولتاژ (کیلو ولت) | راکتور (مگا وار) | خازن (مگا وار) | ترانس (کیلو ولت) | فیلتر مرتبهٔ ۵ | فیلتر مرتبهٔ ۷ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| سیستم اول | 0.6 | - | 2.475 | 25/0.6 | - | - |
| سیستم دوم | 18 | 163 | 363 | 138/18 | دو عدد | دو عدد |
| سیستم سوم | 8.3 | 125 | 125 | 128/8.3 | یک عدد | یک عدد |




**تصویر ۱۴-۱۸: سیستم مورد مثال**

**پاسخ**

$$S = 600kVA, \frac{I_{start-up}}{I_{rated}} = 4.125$$

$$S_{start-up} = 600kVA \times 4.125 = 2475kVA$$

$$V_{SVC} = 600V$$

$$5 \times 450kVAR = 2250kVAR$$

$$1 \times 225kVAR = 225kVAR$$

$$Q_{total} = 2250kVAR + 225kVAR = 2475kVAR$$

این بانک را می‌توان به ۱۱ حالت مختلف سوییچ کرد:

$$225kVAR, 250kVAR, 675kVAR, 900kVAR, 1125kVAR$$

$$1350kVAR, 1575kVAR, 1800kVAR, 2025kVAR, 2250kVAR$$

$$2475kVAR$$

به این ترتیب می‌توان فلیکر ناشی از موتور را تا ۱/۵ درصد کاهش داد.

## ۱۴-۶- اثرات SVC بر سیستم‌های قدرت بزرگ

استفاده از SVC در شبکه‌های قدرت بزرگ فواید خاص خود را دارد؛ مانند میرا کردن نوسان‌های شبکه، بهبود پایداری گذرا، بهبود پروفایل ولتاژ و جلوگیری از ناپایداری ولتاژ.

### ۱۴-۶-۱- میرایی نوسان‌های شبکه

رفتار دینامیک یک شبکه را می‌توان با معادلهٔ سوییینگ[1] توصیف کرد:

$$H\frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e$$

در اینجا $P_m$ توان مکانیکی، $P_e$ توان الکتریکی، $H$ اینرسی سیستم، $\delta$ زاویهٔ روتور، و $P_m - P_e$ توان شتاب‌دهنده به سیستم است. در تغییرات کوچک سیستم، با فرض ثابت بودن توان مکانیکی و محاسبهٔ تغییر توان الکتریکی بر حسب ولتاژ کنترل‌شده در میان خط ( $V_m$ ) می‌توان نوشت:

$$H\frac{d^2\delta}{dt^2} + \frac{dP_e}{dV_m}\Delta V_m + \frac{dP_e}{d\delta}\Delta\delta = 0$$

اگر در رابطهٔ بالا $V_m$ را ثابت فرض کنیم، $\Delta\delta$ با این فرکانس نوسان خواهد کرد:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{H}\frac{\partial P_e}{\partial\delta}}$$

برای میرایی ولتاژ وسط خط باید با تابعی از $d(\partial\delta/\partial t)$ نوسان کند:

$$\Delta V_m = K\frac{d(\Delta\delta)}{dt}$$

در اینجا $K$ یک ثابت است. اگر ولتاژ وسط خط با استفاده از خازن افزایش یابد، $d(\partial\delta/\partial t)$ باید مثبت می‌شود و توان انتقالی افزایش می‌یابد. اگر $d(\partial\delta/\partial t)$ منفی باشد، توان راکتیو جذب می‌شود و توان انتقالی کاهش می‌یابد. با تغییر توان راکتیو می‌توان میرایی سیستم را بهبود داد.

### ۱۴-۶-۲- بهبود پایداری گذرا

فرض کنید که معادلهٔ $P = (V^2/X)\sin\delta$ به نصف خط اعمال شود، بنابراین:

$$P = \frac{V^2}{X/2}\sin\frac{\delta}{2}$$

انتقال توان ماکزیمم وقتی که $\delta/2 = 90^\circ$ باشد برابر $2V^2/X$ می‌شود، که دو برابر خط جبران‌نشده است. در کل، راکتانس خط را می‌توان به $n$ تکهٔ مساوی تقسیم کرد و به هر تکه یک جبران‌ساز اختصاص داد. در این صورت توان انتقالی برابر است با:

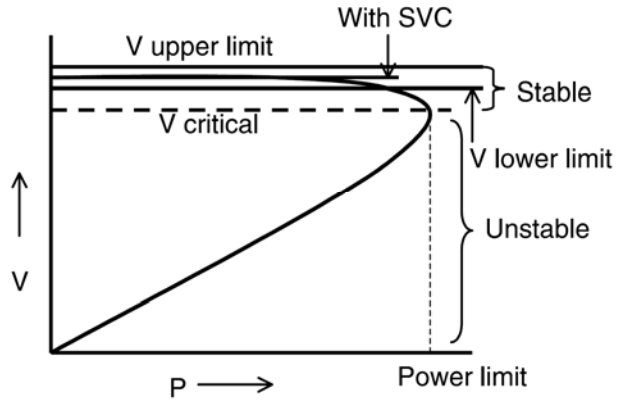
$$P = \frac{V^2}{X/n}\sin\frac{\delta}{n}$$

[1] swing equation

و توان انتقالی ماکزیمم $n\left(V^2/X\right)$ می‌شود که $n$ برابر خط جبران‌نشده است. به همان نسبت در پایداری گذرا بهبود حاصل می‌شود.

### ۱۴-۶-۳- بهبود پروفایل ولتاژ

ولتاژ ابتدا و انتهای یک خط انتقال تابعی از امپدانس خط، بار، و ضریب توان است. منحنی اندازهٔ ولتاژ انتهای خط بر حسب توان دریافتی در انتهای خط در تصویر ۱۴-۱۹ آمده است. در شبکه‌های ضعیف، تغییرات بار، کلید زنی در خط، ترانس، یا بانک‌های خازنی بزرگ و راکتورها باعث نوسان‌های شدید در ولتاژ انتهای خط می‌شود. در بدترین حالت، وقتی توان مورد نیاز بار از توان ماکزیمم قابل انتقال در ضریب توان بار فراتر رود، ولتاژ انتهای خط فرو می‌پاشد. یکی از حالت‌های ممکن وجود باری بزرگ است که با خطوط مستقل از دو یا چند ژنراتور تغذیه می‌شود. از دست رفتن یکی از ژنراتورها باعث افزایش ناگهانی بار روی ژنراتورهای دیگر می‌شود و احتمال فروپاشی ولتاژ در انتهای خط وجود دارد. توان ماکزیمم قابل انتقال را می‌توان با نصب SVC در انتهای خط و تأمین توان راکتیو افزایش داد. پس یک منبع توان راکتیو مناسب که بتواند به سرعت وارد مدار شود می‌تواند از فروپاشی ولتاژ جلوگیری کرده، اندازهٔ ولتاژ انتهای خط را در محدودهٔ مطلوب نگه دارد.




**تصویر ۱۴-۱۹: تغییرات ولتاژ انتهای خط بر حسب توان دریافتی**

## ۱۴-۷- مؤخره

در این فصل، مفاهیم اساسی جبران‌سازی توان راکتیو به همراه اثر آن بر توان اکتیو و راکتیو بیان شد. ثابت کردیم که با جبران‌سازی، می‌توان توان انتقالی بین دو نقطه را افزایش داد. پنج نوع معروف و پر کاربرد SVC بیان شد. در روش‌هایی که خازن سوییچ می‌شود، سایز بانک کوچک‌تر و هزینه کمتر است. این بانک‌ها باید پله‌ای سوییچ شوند و نیاز به مدار کنترل دارند. بسیاری از روش‌های رایج با تایریستور سوییچ می‌شوند، دارای راکتور، خازن ثابت یا سوییچ‌شونده هستند و به فیلترهای بزرگ نیاز دارند. نصب SVC باعث افزایش توان انتقالی، افزایش پایداری گذرا و بهبود پروفایل ولتاژ می‌شود.

# فصل ۱۵ : حفاظت از بانک‌های خازنی

## ۱۵-۱- معرفی

از رله‌ها برای جدا کردن قطعهٔ معیوب از شبکه استفاده می‌شود تا بقیهٔ سیستم قدرت به کار خود ادامه دهد، تجهیز معیوب کمتر آسیب ببیند، احتمال آتش سوزی به حداقل برسد، و ایمنی پرسنل تأمین شود. بانک خازنی با استفاده از سری و موازی کردن یونیت‌های تکی ساخته می‌شود و باید در برابر موارد زیر محافظت شود:

- اضافه‌جریان ناشی از خطاها
- اضافه‌ولتاژهای گذرا
- اضافه‌جریان ناشی از خرابی یک یونیت خازنی
- اضافه‌ولتاژ دائمی روی خازن
- اضافه‌ولتاژ ناشی از دشارژ خازن
- جریان هجومی خازن هنگام کلیدزنی
- قوس زدن داخل بانک
- صاعقه

در جدول ۱۵-۱ انواع خطاهای بانک خازنی و روش حفاظت علیه آنها ذکر شده است. حفاظت اضافه‌جریان خازن که با فیوز انجام می‌شود در فصل ١٦ آمده است. حفاظت کلی بانک که توسط مدارشکن انجام می‌شود در فصل ۱۷ بحث می‌شود. حفاظت ضربه، که بر عهدهٔ برق‌گیر است در فصل ۱۸ آمده است. استفاده از رله‌های حفاظت بانک خازنی هم در این فصل بحث می‌شود.

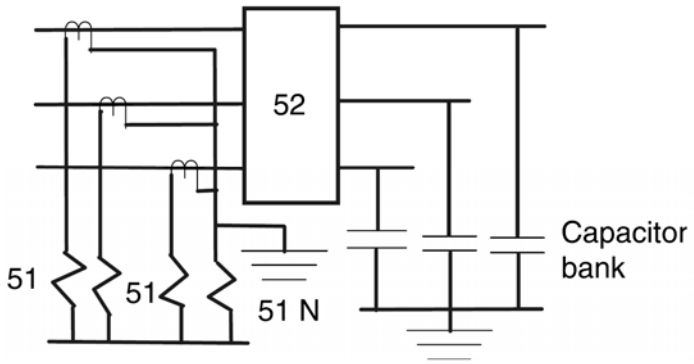
**جدول ۱۵-۱: روش‌های حفاظت از بانک‌های خازن**

| نوع خطا | روش حفاظت |
|---|---|
| خطا در باس | مدارشکن دارای رلهٔ اضافه‌جریان، فیوز |
| ضربه در ولتاژ | برق‌گیر و فاصلهٔ هوایی |
| جریان هجومی | راکتور سری یا کلیدزنی کنترل‌شده |
| جریان دشارژ بانک‌های مجاور | راکتور محدود کنندهٔ جریان یا تغییر محل بانک |
| اضافه‌جریان ناشی از سوختن یکی از فیوزهای درونی | فیوز محدود کنندهٔ جریان یا فیوز انفجاری |
| اضافه‌ولتاژ روی خازن | تشخیص عدم تعادل با رله‌های ولتاژ/جریان، تبدیل بانک به ستارهٔ دوبل، رله‌های فاز ولتاژ |
| خرابی در تابلو | تشخیص عدم تعادل یا رلهٔ اضافه‌جریان |

## ۱۵-۲- حفاظت اضافه‌جریان

اضافه‌جریان می‌تواند در یک یونیت خازنی یا در کل بانک و همچنین به دلیل عدم تعادل سیستم رخ دهد. برای حفاظت بانک از خرابی‌های مختلف، روش‌های حفاظتی مختلفی وجود دارد. اولین خط دفاعی بانک در برابر اضافه‌جریان، فیوز است. ولی حفاظت بانک در برابر خطای فاز به زمین، فاز به فاز، و خطای سه فاز نیازمند یک روش حفاظت اضافه‌جریان است. در تصویر ۱۵-۱ می‌توان فیوزهای قدرت یا مدارشکن‌های متصل به رله‌ها را مشاهده کرد. رله‌های اضافه‌جریان اولیه و ثانویه به صورت زیر در نظر گرفته می‌شوند:

- رلهٔ 51 و 51N برای حفاظت اضافه‌جریان
- مدارشکن AC (بلوک 52) برای قطع کردن بانک



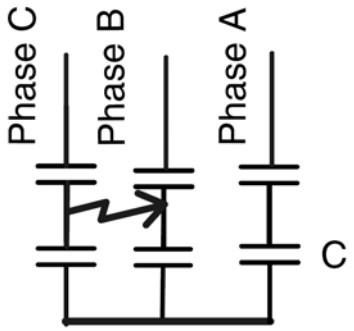

**تصویر ۱۵-۱: حفاظت اضافه‌جریان برای بانک خازنی**

این رله‌ها با اندازه‌گیری جریان و تشخیص اضافه‌جریان خطاهای بانک خازنی را رفع می‌کنند. معمولاً این اندازه‌گیری با ترانس جریان انجام شده، منجر به قطع مدارشکن می‌گردد. بانک‌های خازنی بر اساس استاندارد می‌توانند تا ۳۵٪ اضافه‌جریان را تحمل کنند، ولی در بانک‌های سوییچ‌شونده جریان وابسته به تعداد خازن‌های متصل به شبکه است که تنظیم رلهٔ اضافه‌جریان را دشوار می‌کند. رله‌های اضافه‌جریان زمانی را می‌توان به طور عادی تنظیم کرد که در زمان کلیدزنی و جریان هجومی دچار اشتباه نشوند. رله‌های آنی نیز باید در مقادیر بالا تنظیم شوند که جریان‌های گذرا را ندیده بگیرند. تنظیمات توصیه‌شده برای رله‌های اضافه‌جریان آنی معمولاً سه برابر جریان نامی بانک است به شرط این که بانک دیگری در نزدیکی نباشد.

## ۱۵-۳- حفاظت در برابر خرابی در تابلو

برخی اوقات به دلیل آلودگی در تابلو یا ورود حیوانات به آن بین یونیت‌های خازنی قوس زده می‌شود (تصویر ۱۵-۲). در صورت برطرف شدن سریع خطا، اضافه‌جریان اندکی تولید می‌شود، در غیر این صورت قوس به دیگر خازن‌های سری تسری می‌یابد تا اینکه رلهٔ آنی اضافه‌جریان یا فیوز خطا را برطرف کنند. این زمان در حدود چند ثانیه است. چنین خطاهایی باعث ترکیدگی بدنهٔ خازن و سوختن فیوز می‌شود. بنابراین استفاده از رله‌های آنی و

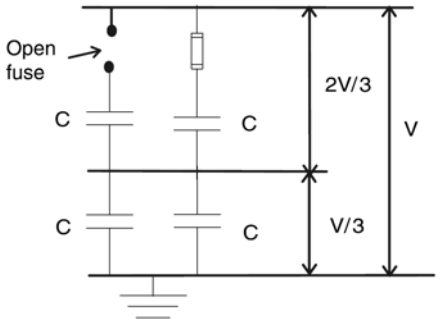
فیوز راه حل خوبی برای مقابله با این خطاها نیست. در بانک‌های زمین‌نشده از تشخیص عدم تعادل برای حفاظت در برابر خرابی تابلو استفاده می‌شود. در بانک‌های زمین‌نشده، این خطاها را نمی‌توان با رله‌ها تشخیص داد. بهترین روش برای تشخیص خطای فاز به فاز درون تابلوها استفاده از جریان توالی صفر است.




**تصویر ۱۵-۲: خطای فاز به فاز منجر به خرابی تابلو**

### ۱۵-۴- حفاظت عدم تعادل

هدف از حفاظت عدم تعادل، قطع بانک خازنی در صورت عملکرد یک فیوز درونی است. به این ترتیب، از خرابی ناشی از اضافه‌ولتاژ روی دیگر خازن‌های سری و موازی جلوگیری شده، مانع از پیش آمدن خطرات دیگر می‌شود. مدار نشان داده شده در تصویر ۱۵-۳ را در نظر بگیرید. وقتی هر چهار خازن در مدار هستند، ولتاژ هر یک نصف ولتاژ کل است. اگر یکی از فیوزها باز شود، ولتاژ روی شاخهٔ بالایی یک‌سوم ولتاژ کل، و ولتاژ روی شاخهٔ پایینی دوسوم ولتاژ کل می‌شود. چنین اضافه‌ولتاژی روی خازن غیر قابل قبول است. بنابراین باید تشخیص داده شده و قبل از خراب شدن یونیت، آن را ایزوله کرد.




**تصویر ۱۵-۳: فیوز باز و توزیع ولتاژ در خازن‌های سری**

روش‌های زیادی برای تشخیص عدم تعادل در بانک‌ها وجود دارد، ولی هیچ روشی نمی‌تواند همهٔ احتمالات را در نظر بگیرد. همهٔ روش‌های موجود با یک سیگنال آلارم وقوع خرابی اولیه در بانک را اعلام می‌کنند. در صورت خرابی‌های بعدی و وقوع اضافه‌ولتاژهای مخرب، بانک قطع می‌شود. روش‌های عادی تشخیص عدم تعادل برای بانک‌های ستارهٔ زمین‌شده و زمین‌نشده در اینجا بحث می‌شوند. از آنجا که بانک‌های اتصال مثلث به ندرت

به کار می‌روند و اتصال ستارهٔ زمین‌نشده رفتار مشابهی دارد، اتصال مثلث بحث نشده است. در این فصل، ده روش حفاظت بیان می‌شود. خرابی یک یا چند یونیت در بانک ایجاد عدم تعادل در ولتاژ می‌کند و می‌توان با روش‌های زیر خازن‌های تحت ولتاژ نامتعادل را شناسایی کرد:

- رلهٔ عدم تعادل باید در صورت عدم تعادل ۵٪ یا کمتر اعلام آلام کرده و در صورت افزایش عدم تعادل به بیش از ۱۰٪ بانک را قطع کند
- تأخیر زمانی رلهٔ عدم تعادل باید طوری باشد که خرابی خازن به دلیل قوس را به حداقل برساند. همچنین از وقوع خرابی به ترانس‌های اندازه‌گیری جلوگیری کند
- تأخیر زمانی رلهٔ عدم تعادل باید بیشتر از زمان لازم برای جریان هجومی، خطاهای زمین، صاعقه، و کلیدزنی تجهیزات نزدیک باشد. در اغلب موارد نیم ثانیه کفایت می‌کند.

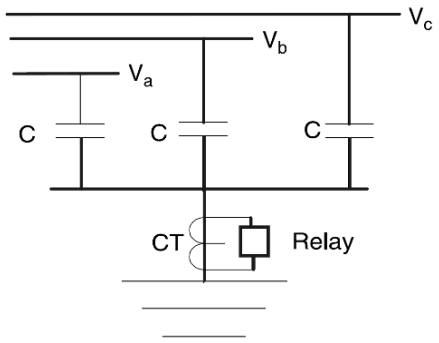
### ۱۵-٤-۱- روش یک: رلهٔ عدم تعادل برای بانک‌های زمین‌شده

در تصویر ۱۵-٤، بانک خازنی زمین‌شده و رلهٔ جریان نوترال نشان داده شده است. در بانک‌های ستارهٔ زمین‌شده یا ستارهٔ دوبل زمین‌شده، تعداد خازن‌های یک گروه خازن سری‌شده که می‌توان از مدار خارج کرد تا اضافه‌ولتاژ روی یونیت‌های دیگر از $V_R$ درصد بیشتر نشود، از این رابطه به دست می‌آید:

$$F = \frac{NS}{S-1}\left(1-\frac{V_{phase}}{SV_C}\times\frac{100}{V_R}\right)$$

در اینجا $S$ تعداد شاخه‌های سری‌شده، $N$ تعداد خازن‌های یک شاخهٔ سری‌شده، $F$ تعداد خازن‌های قابل خروج، $V_C$ ولتاژ خازن، و $V$ ولتاژ بانک است. در صورتی که $F$ کسری بود، آن را به عدد کوچک‌تر گرد می‌کنیم. رله را طوری تنظیم می‌کنیم که در صورت خرابی $F$ یونیت آلام دهد. جریان نوترال ( $I_N$ ) و تنظیم رله در صورت خرابی $F$ یونیت به صورت زیر به دست می‌آید:

$$I_N = \frac{I_C V_{phase}}{SV_C}\left(\frac{NF}{S(N-F)+F}\right)$$




**تصویر ۱۵-٤: رلهٔ جریان نوترال به همراه CT[1]**

[1] Current Transformer

رله را طوری تنظیم می‌کنیم که با خرابی $F$ به علاوهٔ یک یونیت تریپ دهد. برای محاسبهٔ جریان نوترال کافی است که در رابطهٔ قبلی $F$ را با $F+1$ جایگزین کنیم. درصد اضافه‌ولتاژ روی یونیت‌های باقیمانده از رابطهٔ زیر به دست می‌آید:

$$\%V_R = \frac{V_{phase}}{SV_C}\left(\frac{SN}{S(N-F)+F}\right)\times 100$$

در یک روش معمول برای تشخیص عدم تعادل از یک ترانس جریان با ثانویهٔ ۵ آمپری و مقاومت ۱۰ تا ۲۵ اهم استفاده می‌شود که با فیلتر مناسب به یک رلهٔ ولتاژ با تأخیر زمانی وصل می‌شود. مزایای این روش عبارتند از:

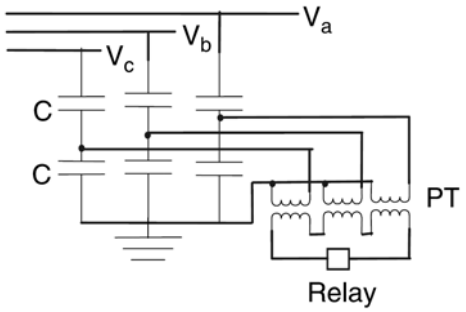
- نسبت تعداد یونیت‌های موازی به یونیت‌های سری در این بانک خازنی دو برابر همین مقدار در بانک‌های ستارهٔ دوبل با همان سایز است که اضافه‌ولتاژ دیده شده در صورت عمل کردن یک فیوز را کاهش می‌دهد.
- این بانک نسبت به یک ستارهٔ دوبل فضای کم‌تری در پست می‌گیرد و اتصالات آن کمتر است.
- حفاظت آن ارزان‌تر است.

معایب این روش عبارتند از:

- حساسیت به عدم تعادل سیستم که در بانک‌های بزرگ مهم است
- حساسیت به هارمونیک‌های مضرب ۳ و نیاز به فیلتر
- اگر خرابی در هر سه فاز مشابه باشد، عمل نخواهد کرد
- تشخیص فاز یونیت خراب شده ممکن نیست

### ۱۵-٤-۲- روش دو: مجموع ولتاژ نقاط تَپ در بانک‌های زمین‌شده

در تصویر ۱۵-۵ روش حفاظت از یک بانک زمین‌شده با استفاده از ولتاژ نقاط تَپ خازن را می‌بینید. هر عدم تعادلی در یونیت‌های خازنی باعث عدم تعادل در نقاط تَپ می‌شود. مجموع این ولتاژها را می‌توان نشان دهندهٔ عدم تعادل دانست. برای محاسبهٔ تغییر در اندازهٔ جریان نوترال و ولتاژ به معادلات روش قبلی (روش یک) مراجعه کنید.




**تصویر ۱۵-۵: تشخیص عدم تعادل با جمع‌کردن ولتاژ نقاط تَپ توسط PT[1]**

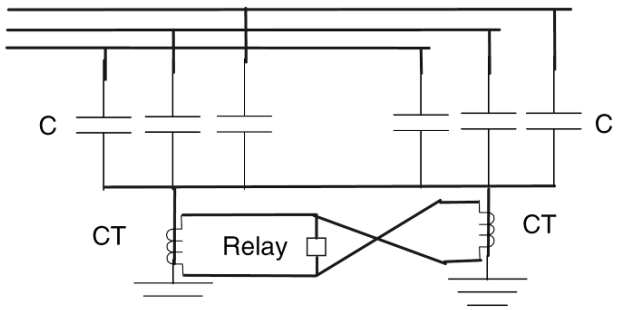
[1] Potential Transformer

### ۱۵-٤-۳- روش سه: حفاظت دیفرانسیلی جریان نوترال، بانک‌های ستارهٔ دوبل زمین‌شده

در این روش (تصویر ۱۵-٦)، نوترال‌های دو ستارهٔ دوبل با CTهای جداگانه زمین شده‌اند. ثانویهٔ این دو ترانس به یک رلهٔ اضافه‌جریان متصل است و به همین دلیل با خطاهای خارج از بانک تحریک نمی‌شود. مزایای این روش عبارتند از:

- این روش به عدم تعادل سیستم حساس نیست و حتی در بانک‌های بسیار بزرگ عملکرد مناسبی دارد.
- هارمونیک جریان روی کار این رله اثر نمی‌گذارد.
- در بانک‌های بزرگ که بیش از یک شاخهٔ سری دارند، انرژی موجود در یونیت‌ها کاهش می‌یابد. این امر باعث کاهش فشار به فیوز و هزینهٔ مربوط به آن می‌شود.

با تقسیم ستاره به دو بخش، نسبت تعداد یونیت‌های موازی به یونیت‌های سری کاهش می‌یابد و بنابراین در صورت خرابی یک یونیت اضافه‌ولتاژ بیشتری روی یونیت‌های دیگر می‌افتد. بانک‌های ستارهٔ دوبل فضای زیادتری می‌گیرند و اتصالات بیشتری دارند. در صورت خرابی متقارن در هر یک از ستاره‌ها رله عکس‌العمل نشان نمی‌دهد.



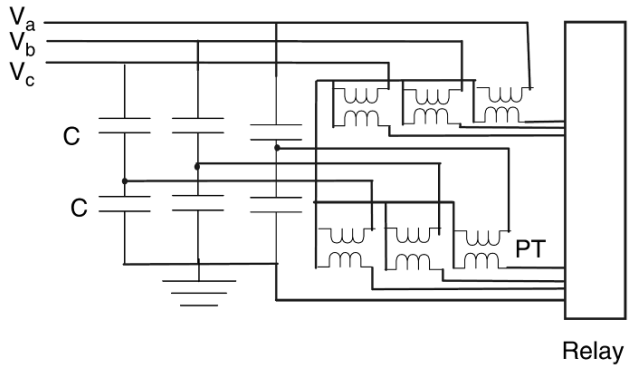

**تصویر ۱۵-٦: تشخیص عدم تعادل با دو CT**

### ۱۵-٤-٤- روش چهار: حفاظت دیفرانسیلی ولتاژ، برای بانک‌های زمین‌شده

در این روش (تصویر ۱۵-۷)، خروجی دو ترانس ولتاژ سه‌فاز در یک رلهٔ دیفرانسیلی مقایسه می‌شود. از دست دادن یک یونیت در هر فاز را می‌توان جداگانه تشخیص داد. در صورت عدم تعادل در بانک، ولتاژ توالی صفر حضور خواهد داشت. مزایای این روش عبارتند از:

- در بانک خازنی، نسبت تعداد یونیت‌های موازی به یونیت‌های سری دو برابر ستارهٔ دوبل است. در صورت خرابی یک یونیت، اضافه‌ولتاژهای دیده شده توسط یونیت‌های دیگر کمتر است.
- بانک خازنی نیاز به فضای کمتری دارد.
- حساسیت این روش به عدم تعادل سیستم کمتر و به خرابی یونیت‌های سری بیشتر است.

بزرگترین محدودیت این روش تعداد ترانس‌های ولتاژ مورد نیاز و اتصالات زیاد آن است.

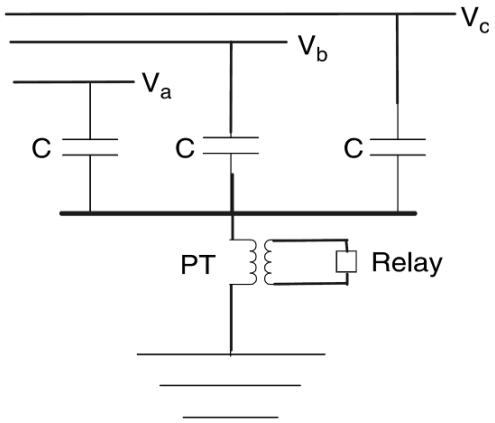



**تصویر ۱۵-۷: حفاظت دیفرانسیلی ولتاژ، برای بانک‌های زمین‌شده**

### ۱۵-٤-۵- روش پنج: حفاظت عدم تعادل ولتاژ نوترال در بانک‌های زمین‌نشده

با نصب یک ترانس ولتاژ بین نوترال و زمین، هرگونه تغییر در ولتاژ ناشی از خرابی یک یونیت را می‌توان تشخیص داد (تصویر ۱۵-۸). تغییر در ولتاژ نوترال ( $V_{NS}$ ) ناشی از خرابی یونیت از این رابطه حساب می‌شود:

$$\%V_{NS} = \frac{F}{3S(N-F)+2F} \times 100$$




**تصویر ۱۵-۸: حفاظت عدم تعادل ولتاژ نوترال در بانک‌های زمین‌نشده**

محاسبهٔ درصد اضافه‌ولتاژ ناشی از خروج یونیت‌ها از بانک:

$$\%V_R = \frac{V_{phase}}{SV_C} \frac{300NS}{3S(N-F)+2F}$$

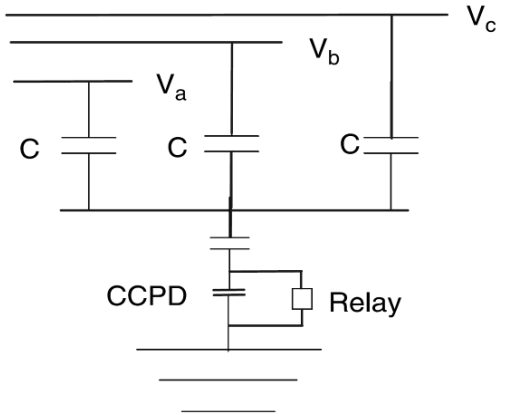
رلهٔ مورد استفاده در این روش، یک رلهٔ ولتاژ تأخیری با فیلتر هارمونیک مرتبهٔ سه است. اندازه‌گیری را می‌توان با ترانس ولتاژ یا یک تجهیز خازنی انجام داد. ولتاژ نامی ترانس ولتاژ باید برابر با ولتاژ سیستم باشد چون در زمان کلیدزنی ولتاژ نوترال بیش از ولتاژ نامی می‌شود. مزایای این روش عبارتند از:

- در این بانک نسبت تعداد یونیت‌های خازنی موازی به یونیت‌های سری دو برابر بانک‌های ستارهٔ دوبل است. اضافه‌ولتاژ دیده شده در صورت خرابی یونیت خازنی کمتر خواهد بود.

- بانک خازنی فضای کوچک‌تر و اتصالات کمتری نیاز دارد.
- حساسیت این روش به عدم تعادل سیستم کمتر است.

### ۱۵-٤-٦- روش ششم: حفاظت عدم تعادل ولتاژ نوترال با مقسم خازنی (بانک‌های زمین‌نشده)

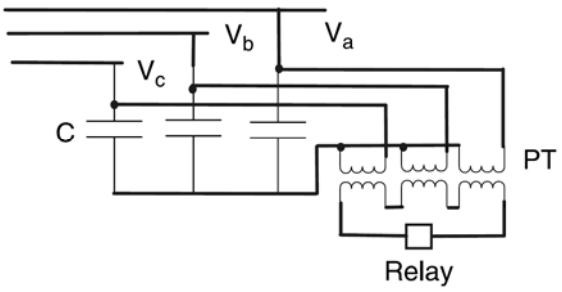
این روش مشابه روش فوق با ترانس ولتاژ است (تصویر ۱۵-۹). یک رلهٔ ولتاژی زمان معکوس به دو سر یک خازن زمین‌شده وصل می‌شود. ولتاژ خازن زمین‌شده کم (۲/٤ کیلو ولت یا کم‌تر) است و ولتاژ مناسب را به رله می‌رساند. در صورت باز شدن یکی از فازها، ولتاژ در رلهٔ نوترال از حد مجاز فراتر رفته، یک محدود کننده وارد عمل می‌شود. مزایا و معایب این روش، مانند روش پنج است.




**تصویر ۱۵-۹: حفاظت عدم تعادل ولتاژ نوترال با مقسم خازنی CCPD[1] (بانک‌های زمین‌نشده)**

### ۱۵-٤-۷- روش هفت: حفاظت عدم تعادل ولتاژ نوترال با سه ترانس ولتاژ (بانک‌های زمین‌نشده)

دیاگرام این روش در تصویر ۱۵-۱۰ نشان داده شده است. در این روش ولتاژ فاز به زمین با سه ترانس ولتاژ اندازه‌گیری می‌شود که ثانویه‌شان با هم سری و به یک رلهٔ اضافه‌ولتاژ متصل شده است. مزایای این روش مشابه روش پنج است. این روش به هارمونیک‌های مضرب سه حساس و به همین دلیل گران است.



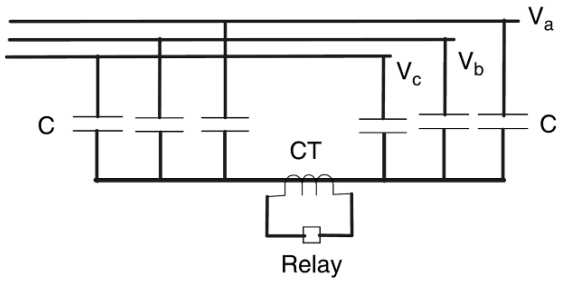

**تصویر ۱۵-۱۰: مجموع ولتاژهای فاز به زمین**

[1] Coupling Capacitor Potential Device

### ۱۵-٤-۸- روش هشت: حفاظت عدم تعادل جریان نوترال در بانک‌های زمین‌نشده

اتصالات این روش در تصویر ۱۵-۱۱ نشان داده شده است. در این روش، یک ترانس جریان در مدار نوترال استفاده شده تا جریان عدم تعادل را تشخیص دهد. می‌توان از یک رلهٔ اضافه‌جریان برای تریپ یا آلارم استفاده کرد. جریان عدم تعادل ناشی از خرابی یونیت‌های خازنی با روش زیر محاسبه می‌شود:

$$I_N = (I_C N)\left(\frac{V_{phase}}{SV_C}\right)\frac{3F}{6S(N-F)+5F}$$




**تصویر ۱۵-۱۱: حفاظت عدم تعادل جریان نوترال در بانک‌های زمین‌نشده**

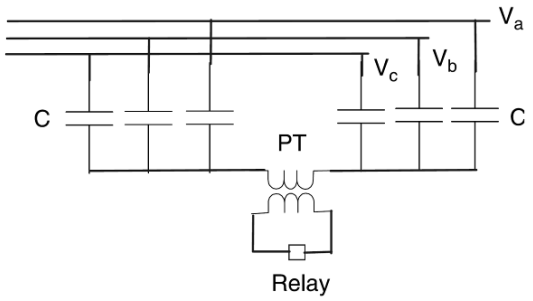
تغییر در ولتاژ نوترال از این رابطه به دست می‌آید:

$$\%V_R = \frac{V_{phase}}{SV_C}\frac{6SN}{6S(N-F)+5F}\times 100$$

این روش به عدم تعادل در سیستم حساس نیست. ولی به خرابی یونیت‌های خازنی حساس است و هارمونیک‌ها در کار آن اثری ندارند. این روش تنها یک ترانس جریان و یک رله دارد. معایب این روش افزایش اضافه‌ولتاژ یونیت‌ها به دلیل کاهش نسبت تعداد یونیت‌های موازی به یونیت‌های سری است و نسبت به ستارهٔ معمولی فضای بیشتری لازم دارد.

### ۱۵-٤-۹- روش نهم: حفاظت ولتاژ نوترال در بانک‌های زمین‌نشده

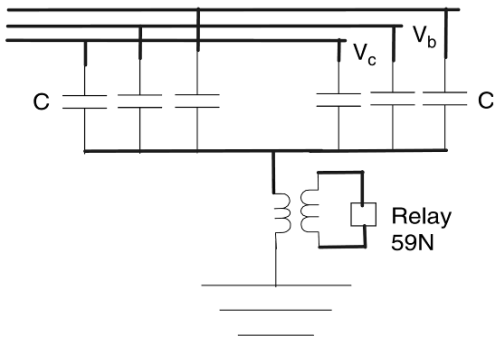
دیاگرام مداری این روش در تصویر ۱۵-۱۲ آمده است. این روش مشابه روش هشت می‌باشد. حسگر در اینجا یک ترانس ولتاژ است. این روش به عدم تعادل سیستم حساس نیست ولی به خرابی یونیت حساس و نسبتاً ارزان است. ستارهٔ دوبل به فضای بیشتری در پست نیاز دارد.




**تصویر ۱۵-۱۲: تشخیص عدم تعادل با یک PT**

### ۱۵-٤-۱۰- روش ده: حفاظت عدم تعادل ولتاژ نوترال در بانک‌های زمین‌نشده

دیاگرام این روش در تصویر ۱۵-۱۳ آمده است. رلهٔ مورد استفاده 59N می‌باشد. این روش به عدم تعادل در سیستم حساس نیست ولی به خرابی یونیت حساس و نسبتاً ارزان است.




**تصویر ۱۵-۱۳: حفاظت عدم تعادل ولتاژ نوترال در بانک‌های زمین‌نشده**

*حفاظت اضافه‌ولتاژ و کاهش ولتاژ*

رله‌های زیر برای حفاظت اضافه‌ولتاژ و کاهش ولتاژ استفاده می‌شوند:

- رلهٔ 59 برای حفاظت اضافه‌ولتاژ
- رلهٔ 27 برای حفاظت کاهش ولتاژ

این رله‌ها معمولاً با مشخصهٔ سیستم و بانک خازنی هماهنگ می‌شوند. تریپ اضافه‌ولتاژ در ۱۰٪ اضافه‌ولتاژ و تریپ کاهش ولتاژ در ۵٪ کاهش ولتاژ رخ می‌دهد. در برخی موارد، رله‌های کاهش ولتاژ را طوری تنظیم می‌کنند که هنگام برق‌دار کردن مجدد سیستم به بانک خازنی تریپ دهند.

*رله‌های دیفرانسیلی ولتاژ*

برای رلهٔ دیفرانسیلی ولتاژ از رلهٔ 60 عدم تعادل ولتاژ یا جریان استفاه می‌کنند. این رله‌ها ولتاژ ترمینال بانک را با ولتاژ نقطهٔ وسط بانک مقایسه می‌کنند. اگر یکی از یونیت‌ها خراب شود، نسبت دو ولتاژ مذکور تغییر می‌کند. این رله‌ها در صورت مشاهدهٔ تفاوت بیشتر از ۰/۷ درصد ولی کمتر از ۱ درصد آلارم می‌دهند و در تفاوت بیشتر از ۲ درصد دستور تریپ می‌دهند.

*رله‌های تشخیص ولتاژ*

رله‌های تشخیص ولتاژ از ولتاژ نقطهٔ میانی استفاده می‌کنند و رله‌های اضافه‌ولتاژ 59-1/S و 59-2/S هستند. این رله‌ها در صورت خرابی یک یونیت آلارم داده، با خرابی دو یونیت دستور تریپ می‌دهند.

رله‌های ولتاژ نوترال ولتاژ ناشی از جریان نوترال بانک را اندازه‌گیری می‌کنند و از نوع رلهٔ اضافه‌ولتاژ 59-1/P و 59-2/P هستند. رله‌های ولتاژ نوترال باید هارمونیک‌ها را فیلتر کنند و تنها ولتاژ فرکانس قدرت به رله داده می‌شود. این رله‌ها در صورت خرابی یک یونیت آلارم داده، با خرابی دو یونیت دستور تریپ می‌دهند.

**مثال**

یک بانک خازنی ستارهٔ زمین‌شده، ٦٠ هرتز، سه‌فاز، ١١٥ کیلو ولت، ٩٧ مگا وار برای اصلاح ضریب توان استفاده می‌شود. در هر فاز این بانک خازنی ١٤ خازن سری و ١٢ خازن موازی وجود دارد. هر خازن ٥ کیلو ولت و ٣٠٠ کیلو وار است. اضافه‌ولتاژ مجاز این یونیت‌ها ١٠٪ است. رله را برای آلارم و تریپ تنظیم کنید.

**پاسخ**

$$V_{phase}=\frac{115kV}{\sqrt{3}}=66.397kV$$

$$S=14, N=12, I_{C/unit}=\frac{300kVAR}{5kV}=60A$$

اضافه‌ولتاژ ناشی از خرابی یک یونیت برابر است با:

$$F=1$$

$$\%V_R=\frac{V_{phase}}{SV_C}\frac{SN}{S(N-F)+F}\times 100=\frac{66.397kV}{14\times 5kV}\frac{14\times 12}{14(12-1)+1}\times 100=102.8\%$$

اگر ولتاژ سیستم ٥ درصد بیشتر از ولتاژ نامی شود، با خرابی یک خازن ولتاژ ٧/٨ درصد افزایش می‌یابد. این مقدار در محدودهٔ مجاز است. از دست رفتن یک خازن باعث وقوع آلارم می‌شود. جریان نوترال ترانس‌ها با رابطهٔ زیر حساب می‌شود:

$$I_N=\frac{I_{C/unit}\times V_{phase}}{SV}\frac{NF}{S(N-F)+F}=\frac{60A\times 66.397kV}{14\times 5kV}\frac{12\times 1}{14(12-1)+1}=$$

$$=4.4A$$

میزان اضافه‌ولتاژ در صورت خرابی دو یونیت برابر است با:

$$F=2$$

$$\%V_R=\frac{V_{phase}}{SV_C}\frac{SN}{S(N-F)+F}\times 100=\frac{66.397kV}{14\times 5kV}\frac{14\times 12}{14(12-2)+2}\times 100=112.2\%$$

این ولتاژ از ولتاژ نامی خازن بیشتر است. برای حفاظت از مدار، خرابی دو یونیت باید باعث تریپ دادن مدارشکن شود. جریان نوترال خازن را محاسبه می‌کنیم:

$$I_N=\frac{I_{C/unit}\times V_{phase}}{SV}\frac{NF}{S(N-F)+F}=\frac{60A\times 66.397kV}{14\times 5kV}\frac{12\times 2}{14(12-2)+2}=$$

$$=9.6A$$

جریان‌های نوترال محاسبه شده با فرض ثابت بودن ولتاژ سیستم است. اگر ولتاژ سیستم ۵٪ افزایش یابد، جریان نوترال به همان نسبت زیاد می‌شود.

## ۱۵-۵- مؤخره

در این فصل، روش‌های اصلی حفاظت از بانک خازنی مانند اضافه‌جریان، خرابی در تابلو، و حفاظت عدم تعادل بیان شد. ده روش حفاظت برای تشخیص عدم تعادل بانک‌های زمین‌شده و زمین‌نشده ذکر گردید. بسته به اتصالات بانک خازنی می‌توان روش حفاظتی مناسب را انتخاب کرد.

# فصل ۱۶ : حفاظت اضافه‌جریان

## ۱۶-۱- معرفی

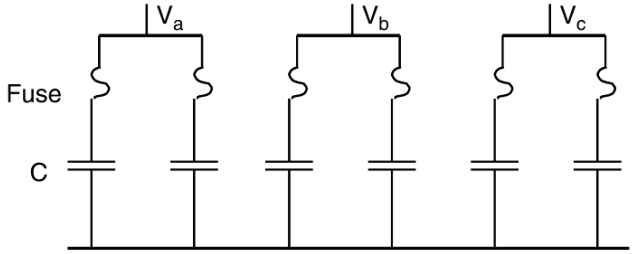
خازن‌ها با استفاده از فیوز لینک در برابر اضافه‌جریان محافظت می‌شوند. فیوز وسیله‌های حفاظتی است که بخشی از آن با عبور جریان بیش از حد ذوب می‌شود. با باز شدن فیوز، سیستم مورد نظر حفاظت می‌شود.

## ۱۶-۲- روش‌های نصب فیوز

برای حفاظت بانک خازنی با فیوز دو روش وجود دارد: نصب فیوز جدا برای هر خازن، و نصب فیوز گروهی.

### ۱۶-۲-۱- فیوزگذاری تکی

در این روش، هر خازن با فیوز جداگانه حفاظت می‌شود. دیاگرام نمونهٔ نصب فیوز تکی برای یک بانک ستارهٔ زمین‌نشده در تصویر ۱۶-۱ نشان داده شده است. این نوع فیوزگذاری در بانک‌های خازنی پست و بدون حفاظ انجام می‌شود. فیوزگذاری تکی معمولاً در بانک‌های ستارهٔ زمین‌نشده استفاده نمی‌شود زیرا در صورت عمل کردن یک فیوز، اضافه‌ولتاژ زیادی روی خازن‌های دیگر می‌افتد.



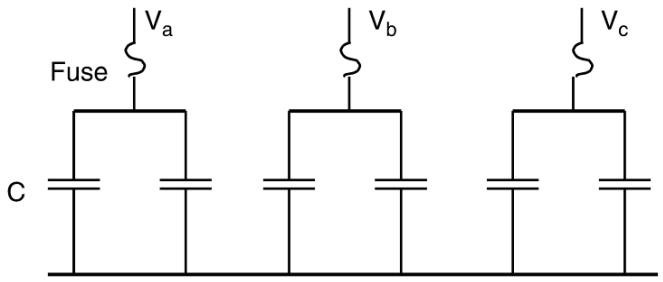

**تصویر ۱۶-۱: نمونهٔ فیوزگذاری تکی**

### ۱۶-۲-۲- فیوزگذاری گروهی

در فیوزگذاری گروهی، از یک فیوز برای حفاظت چند خازن استفاده می‌شود. دیاگرام این روش در تصویر ۱۶-۲ آمده است. این نوع حفاظت برای خازن‌های سر تیر رایج است. فیوزها روی کات‌اوت نصب می‌شوند. کاربری فیوز گروهی تشخیص خرابی‌های پیاپی و قطع خازن از شبکه است تا از ترکیدگی بدنهٔ خازن و آسیب به خازن‌های دیگر جلوگیری شود. فیوز گروهی باید بتواند شرایط کار عادی بانک را تحمل کند. به این منظور باید قابلیت‌های زیر را داشته باشد:

- جریان دائمی: ممکن است در این جریان هارمونیک، خطا در ظرفیت خازن (تا ۱۵ درصد)، و اضافه‌ولتاژ (تا ۱۰ درصد) وجود داشته باشد. فیوز باید ۲۵ تا ۳۵ درصد اضافه‌جریان را تحمل کند.

- جریان هجومی: منحنی ذوب فیوز باید با جریان هجومی بانک هماهنگ باشد تا احتمال ذوب ناخواسته را کاهش دهد.
- جریان ضربه: این ضربه های جریان که از صاعقه یا خطاهای نزدیک ناشی می‌شوند، ممکن است برای بانک‌های خازنی سر تیر که فیوزهای کوچکی دارند، مشکل‌ساز شود. در مناطق صاعقه‌خیز، از فیوزهای کُند با قابلیت بیشتر در تحمل ضربه (T-speed) به جای فیوزهای تُند (K-link) استفاده می‌شوند.
- ولتاژ نامی فیوز: ولتاژ نامی فیوزهای گروهی در بانک‌های زمین‌نشده برابر با ولتاژ فاز به فاز است. به دلیل ولتاژ بازیافت بالاتر در بانک‌های زمین‌نشده به هنگام رفع خطا، ولتاژ نامی فیوزها قدری بالاتر انتخاب می‌شود.




**تصویر ۱۶-۲: نمونهٔ فیوزگذاری گروهی**

به منظور کاهش خطر ترکیدگی بدنهٔ خازن خراب و خسارت زدن به خازن‌های دیگر، فیوز باید قابلیت‌های زیر را داشته باشد:

- قطع ماکزیمم جریان خطای ۶۰ هرتز: در بانک‌های دارای اتصال ستارهٔ زمین‌شده و مثلث، ماکزیمم جریان برابر با جریان خطای سیستم در محل بانک است.
- هماهنگی با منحنی ترکیدگی بدنهٔ خازن: ماکزیمم زمان برطرف شدن خطا توسط فیوز باید سمت چپ منحنی ترکیدگی بدنهٔ خازن قرار گیرد.
- قطع یونیت خراب بدون اعمال اضافه‌ولتاژ به یونیت‌های سالم: در بانک‌های دارای اتصال ستارهٔ زمین‌نشده، در صورت خرابی یک خازن ولتاژ فاز به فاز روی خازن‌های سالم می‌افتد.

## ۱۶-۳- فیوزهای مخصوص خازن

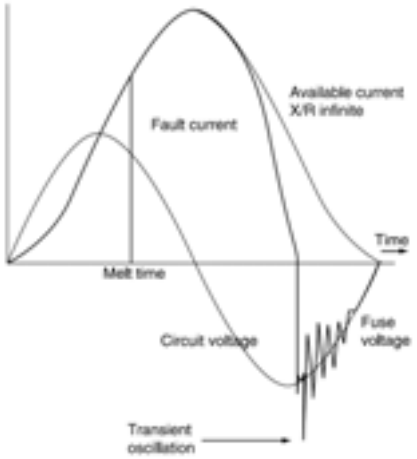
### ۱۶-۳-۱- فیوز انفجاری

معمولاً برای خازن‌ها از فیوزهای NEMA K-link استفاده می‌شود که تُندکار هستند. این فیوزهای سری T سرعت کمتری دارند. نمونهٔ یک کات‌اوت و فیوز لینک در تصویر ۱۶-۳ نشان داده شده است. همچنین مشخصهٔ زمان ذوب و جریان فیوزهای K در تصویر ۲۵-۱ (ضمائم) آمده است. مقادیر رایج این فیوزها ۶، ۱۰، ۲۵، ۴۰، ۶۵، ۱۰۰، ۱۴۰، و ۲۰۰ است. مقادیر میانی این اعداد عبارتند از ۸، ۱۲، ۲۰، ۳۰، ۵۰، و ۸۰. زمان ذوب این فیوزها در

جدول ۲۵-۱۲ فهرست شده است. مشخصهٔ زمان ذوب و جریان فیوزهای سری T در تصویر ۲۵-۲ (ضمائم) نشان داده شده است. مقادیر رایج این فیوزها مانند سری K است. زمان ذوب این فیوزها در جدول ۲۵-۱۳ آورده شده است.

**تصویر ١٦-٣: نمایی از یک فیوز انفجاری و فیوز لینک**

فیوزهای انفجاری دارای یک المان کوچک فیوز هستند که در صورت وقوع اضافه‌جریان شروع به قوس زدن کرده، جریان را قطع می‌کند. هادی بزرگی به این المان متصل شده (لیدر فیوز)، که به بدنهٔ فیوز متصل می‌شود. در زمان خطا، المان فیوزی ذوب می‌شود و در کارتریج قوس تولید می‌کند. وقتی که قوس تولید شد، به سرعت گاز حاصل می‌وشد که یون‌های حاصل از قوس را خنثی کرده و می‌تواند ولتاژ بازیافت و ولتاژ سیستم را تحمل کند. فیوز باید جایگزین شود. تفاوت بین فیوزهای سری K و T در نسبت سرعت[1] آنها است. فیوزهای سری K سرعتی بین ٦ تا ٨/١ و فیوزهای سری T سرعتی میان ١٠ تا ١٣ دارند. منحنی رفع خطا در یک فیوز انفجاری در تصویر ١٦-٤ نشان داده شده است.

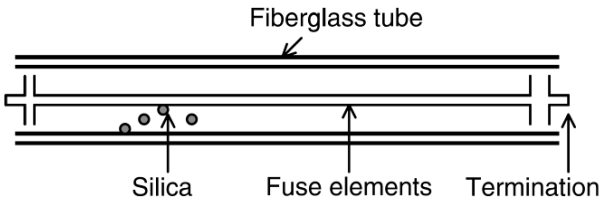



**تصویر ١٦-٤: رفع خطا با فیوز انفجاری**

[1] speed ratio

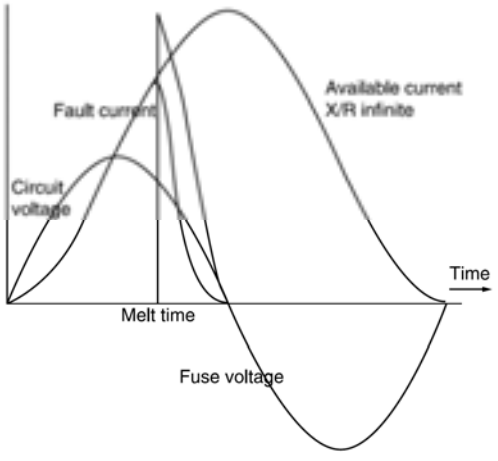
### ۱۶-۳-۲- فیوزهای محدود کنندهٔ جریان

فیوزهای محدود کنندهٔ جریان، جریان خطا را به شدت کاهش می‌دهند. نمای این فیوزها در تصویر ۱۶-۵ نشان داده شده است. این فیوزها از المان فیوزی از جنس نقره، به همراه ذرات کوارتز در یک محفظهٔ سرامیکی تشکیل شده است. در زمان خطا، المان فیوزی بخار می‌شد و قوس حاصل ذرات کوارتز را ذوب می‌کند و باعث جذب حرارت از قوس و خاموشی سریع‌تر و برطرف شدن خطا می‌شود. سپس کوارتز خنک شده به حالت جامد درمی‌آید و دو ترمینال فیوز را از هم عایق می‌کند تا از وصل مجدد آنها جلوگیری شود. این نوع فیوزها یک‌بار مصرف هستند و بعد از عمل کردن باید جایگزین شوند. این فیوزها در دو نوع همه‌کاره و پشتیبان موجود هستند. جریان نامی فیوزها معمولاً ۱/۵ تا ۲ برابر جریان نامی خازن است. فیوز پشتیبان می‌تواند جریان‌هایی از جریان نامی قطع تا مینیمم جریان نامی قطع را قطع کند. فیوز پشتیبان برای قطع کردن جریان‌های بزرگ خطا به کار می‌رود.




**تصویر ۱۶-۵: فیوز محدود کنندهٔ جریان**

در تصویر ۱۶-۶ می‌توان منحنی جریان خطا بر حسب زمان را در یک فیوز محدود کنندهٔ جریان مشاهده کرد. جریان عبوری از فیوز نامتقارن است زیرا فیوز در اولین سیکل وقوع خطا به سرعت عمل می‌کند. با افزایش جریان حرارت تولید می‌شود و قبل از این که جریان به ماکزیمم خود برسد، المان فیوزی ذوب می‌شود. مساحت زیر منحنی انرژی کل یا همان $I^2t$ است.




**تصویر ۱۶-۶: رفع خطا با فیوز محدودکنندهٔ جریان**

### ۱۶-۴- انتخاب فیوز لینک مناسب

فاکتورهای زیر باید برای انتخاب فیوز مناسب حفاظت از بانک خازنی در نظر گرفته شود:

- جریان نامی
- ولتاژ نامی
- خطا در ظرفیت خازن
- هارمونیک‌های جریان
- اندازهٔ جریان خطا
- جریان‌های گذرا ناشی از کلیدزنی بانک‌های مجاور
- مشخصهٔ ترکیدگی بدنهٔ خازن
- ولتاژ روی خازن‌های سالم (در صورت وقوع خطا)
- انرژی تخلیه شده روی خازن‌های معیوب
- جریان دشارژ
- هماهنگی با سیستم تشخیص عدم تعادل

در اینجا موارد فوق به طور مفصل شرح داده شده است:

#### ۱۶-٤-۱- جریان نامی

در بانک‌های خازنی، فیوز باید بتواند تا ۳۵٪ اضافه‌جریان را تحمل کند. در یک یونیت تک‌فاز خازنی:

$$I_{Cap}\left(A\right)=\frac{Q\left(kVAR\right)}{V\left(kV\right)}$$

در یونیت‌های سه‌فاز:

$$I_{Cap}\left(A\right)=\frac{Q\left(kVAR\right)}{\sqrt{3}\times V\left(kV\right)}$$

خازن‌ها با توجه به استانداردهای صنعتی باید بتوانند شرایط زیر را تحمل کنند:

- ۳۵ درصد توان راکتیو اضافی
- ۸۰ درصد اضافه‌جریان
- ۱۰ درصد اضافه‌ولتاژ
- ۱۵ درصد خطا در ظرفیت خازن

برای محاسبهٔ جریان مؤثر (rms) خازن در شرایط هارمونیکی (با دانستن هارمونیک‌ها) از این رابطه استفاده می‌کنیم:

$$I_{rms}=\sqrt{I_1^2+I_2^2+I_3^2+\ldots+I_n^2}$$

محاسبهٔ جریان نامی فیوز مورد استفاده برای یک بانک خازنی (تک‌فاز):

$$I_{fuse} = \frac{Q(kVAR)}{V(kV)} \times 1.35$$

در صورت استفاده از فیوزهای سری K یا T که ۵۰ درصد اضافه‌جریان را تحمل می‌کنند، رابطهٔ فوق به صورت زیر تغییر می‌کند:

$$I_{fuse} = \frac{Q(kVAR)}{V(kV)} \times \frac{1.35}{1.5}$$

و در بانک‌های سه‌فاز:

$$I_{fuse} = \frac{Q(kVAR)}{\sqrt{3} \times V(kV)} \times \frac{1.35}{1.5}$$

### ۱۶-٤-۲- ولتاژ نامی

در سیستم قدرت خطای مجاز ولتاژ حدود ۵ درصد است. مثلاً، در یک سیستم ۲/٤ کیلو ولتی، محدودهٔ مجاز ولتاژ از ۲/۲۸ تا ۲/۵۲ کیلو ولت است. ولتاژ نامی فیوز باید بالاتر از ولتاژ سیستم باشد. بر اساس جریان‌های محاسبه‌شده در بخش قبل، فیوزهای مناسب برای بانک خازنی تک‌فاز در جدول ۱۶-۱ بیان شده‌اند. فیوزهای مناسب بانک‌های سه‌فاز در جدول ۱۶-۲ آمده‌اند.

**جدول ۱۶-۱: فیوزهای انفجاری یونیت‌های تک‌فاز در بانک‌های ستارهٔ زمین‌شده**

| ولتاژ خازن (کیلو ولت) | ولتاژ فیوز (کیلو ولت) | یونیت ۵۰ کیلوواری | | یونیت ۱۰۰ کیلوواری | | یونیت ۱۵۰ کیلوواری | | یونیت ۲۰۰ کیلوواری | | یونیت ۳۰۰ کیلوواری | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | جریان (آمپر) | نوع فیوز | جریان (آمپر) | نوع فیوز | جریان (آمپر) | نوع فیوز | جریان (آمپر) | نوع فیوز | جریان (آمپر) | نوع فیوز |
| 2.4 | 4.3 | 18.8 | 25K | 37.5 | 40K | 56.3 | 65K | 75 | 80K | 112.5 | 140K |
| 2.77 | 4.3 | 16.2 | 25K | 32.5 | 40K | 48.7 | 65K | 65 | 80K | 97.5 | 140K |
| 4.16 | 4.3 | 10.8 | 25K | 21.6 | 40K | 32.5 | 40K | 43.3 | 65K | 64.9 | 80K |
| 4.8 | 5.5 | 9.4 | 10K | 18.8 | 25K | 28.1 | 40K | 37.5 | 40K | 56.3 | 65K |
| 7.2 | 15.5 | 6.3 | 10K | 12.5 | 25K | 18.8 | 25K | 25 | 40K | 37.5 | 40K |
| 7.62 | 15.5 | 5.9 | 10K | 11.8 | 25K | 17.7 | 25K | 23.6 | 40K | 35.4 | 40K |
| 7.96 | 15.5 | 5.7 | 10K | 11.3 | 25K | 17 | 25K | 22.6 | 40K | 33.9 | 40K |
| 8.32 | 15.5 | 5.4 | 8K | 10.8 | 8K | 16.2 | 25K | 21.6 | 40K | 32.5 | 40K |
| 12.47 | 15.5 | 3.6 | 8K | 7.2 | 10K | 10.8 | 12K | 14.4 | 25K | 21.7 | 40K |
| 13.28 | 35 | 3.4 | 8K | 6.8 | 10K | 10.2 | 12K | 13.6 | 25K | 20.3 | 40K |
| 13.8 | 35 | 3.3 | 8K | 6.5 | 10K | 9.8 | 12K | 13 | 25K | 19.6 | 40K |
| 14.4 | 35 | 3.1 | 8K | 6.3 | 10K | 9.4 | 12K | 12.5 | 25K | 18.8 | 40K |
| 19.92 | 35 | 2.3 | 8K | 4.5 | 10K | 6.8 | 10K | 9 | 10K | 13.6 | 20K |

**جدول ۱۶-۲: فیوزهای انفجاری یونیت‌های سه‌فاز در بانک‌های ستارهٔ زمین‌شده**

| ولتاژ نامی (کیلو ولت) | ولتاژ فیوز (کیلو ولت) | ۱۵۰ کیلووار | ۳۰۰ کیلووار | ۴۵۰ کیلووار | ۶۰۰ کیلووار | ۹۰۰ کیلووار | ۱۲۰۰ کیلووار | ۱۸۰۰ کیلووار | ۲۴۰۰ کیلووار | ۳۰۰۰ کیلووار |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2.4 | 4.3 | 40K | 80K | - | - | - | - | - | - | - |
| 2.77 | 4.3 | 40K | 80K | 100K | - | - | - | - | - | - |
| 4.16 | 4.3 | 30K | 65K | 65K | 100K | - | - | - | - | - |
| 4.8 | 5.5 | 25K | 40K | 65K | 80K | - | - | - | - | - |
| 6.64 | 15.5 | 20K | 40K | 50K | 65K | 80K | - | - | - | - |
| 7.2 | 15.5 | 20K | 30K | 40K | 65K | 80K | 100K | - | - | - |
| 7.96 | 15.5 | 20K | 30K | 40K | 65K | 80K | 100K | - | - | - |
| 8.32 | 15.5 | 20K | 30K | 40K | 50K | 65K | 100K | - | - | - |
| 9.96 | 15.5 | 10K | 25K | 30K | 50K | 65K | 80K | 140K | - | - |
| 12.47 | 15.5 | 10K | 25K | 30K | 40K | 50K | 65K | 100K | 120K | - |
| 13.8 | 35 | 10K | 25K | 25K | 40K | 50K | 65K | 80K | 120K | - |
| 14.4 | 35 | 10K | 25K | 25K | 30K | 40K | 65K | 80K | 100K | - |
| 19.2 | 35 | 6K | 10K | 20K | 30K | 40K | 40K | 65K | 80K | 100K |
| 21.6 | 35 | - | - | 20K | 25K | 40K | 40K | 65K | 80K | 100K |
| 23 | 35 | - | - | 12K | 25K | 30K | 40K | 65K | 80K | 80K |
| 24.8 | 35 | - | - | 12K | 12K | 30K | 30K | 65K | 65K | 80K |
| 34.5 | 35 | - | - | - | 12K | 20K | 30K | 40K | 50K | 65K |

**مثال**

یک فیوز مناسب برای یونیت خازنی تک‌فاز، ۱۰۰ کیلو وار، ۲/۴ کیلو ولت بیابید.

**پاسخ**

$$Q = 100kVAR, V = 2.4kV$$

$$I_{fuse} = \frac{100kVAR}{2.4kV} \times \frac{1.35}{1.5} = 37.4A$$

از جدول ۱۶-۱، ولتاژ را ۴/۳ کیلو ولت و فیوز را از نوع 40K انتخاب می‌کنیم. همان‌طور که در مورد فیوزهای محدود کنندهٔ جریان گفته شد، بانک‌ها گاهی اوقات با فیوزهای تُند محافظت می‌شوند. جریان فیوز از این رابطه به دست می‌آید:

$$I_{fuse} = 1.5 \times I_{cap}$$

فاکتور ۵۰ درصد حاشیهٔ امنیتی برای اضافه‌ولتاژ ناشی از هارمونیک، خطا در ظرفیت خازن، و مشخصهٔ ذوب ($I^2t$) است. فیوزهای محدود کنندهٔ جریان مناسب برای انواع خازن‌ها در جدول ۱۶-۳ آمده است.

**مثال**

یک فیوز محدود کنندهٔ جریان مناسب برای یونیت خازنی تک‌فاز، ۱۰۰ کیلو وار، ۲/۴ کیلو ولت بیابید.

**پاسخ**

$$Q = 100kVAR, V = 2.4kV$$

$$I_{cap} = \frac{100kVAR}{2.4kV} = 41.7A$$

$$I_{fuse} = 1.5 \times I_{cap} = 62.5A$$

به همین دلیل فیوز ٦٥ آمپری و ولتاژ ٤/٣ کیلو ولتی انتخاب می‌کنیم.

**جدول ١٦-٣: فیوزهای محدود کنندهٔ جریان**

| ولتاژ خازن (کیلو ولت) | ولتاژ فیوز (کیلو ولت) | خازن ١٠٠ کیلو واری | | | خازن ٢٠٠ کیلو واری | | | خازن ٣٠٠ کیلو واری | | | خازن ٤٠٠ کیلو واری | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $I_{cap}$ | $I_{fuse}$ | فیوز | $I_{cap}$ | $I_{fuse}$ | فیوز | $I_{cap}$ | $I_{fuse}$ | فیوز | $I_{cap}$ | $I_{fuse}$ | فیوز |
| 2.4 | 4.3 | 42 | 63 | 65 | 83 | 125 | 130 | 125 | 188 | 200 | - | - | - |
| 2.77 | 4.6 | 36 | 54 | 65 | 72 | 108 | 130 | 108 | 162 | 200 | - | - | - |
| 4.16 | 4.3 | 24 | 36 | 65 | 48 | 72 | 75 | 82 | 108 | 130 | 96 | 144 | 150 |
| 4.8 | 5.5 | 21 | 31 | 40 | 42 | 63 | 65 | 63 | 94 | 100 | 83 | 125 | 130 |
| 6.64 | 8.3 | 15 | 23 | 25 | 30 | 45 | 50 | 45 | 68 | 80 | 60 | 90 | 100 |
| 7.2 | 8.3 | 14 | 21 | 25 | 28 | 42 | 50 | 42 | 63 | 65 | 56 | 83 | 100 |
| 7.96 | 8.3 | 13 | 19 | 20 | 25 | 38 | 40 | 38 | 57 | 65 | 50 | 75 | 80 |
| 8.32 | 8.3 | 12 | 18 | 20 | 24 | 36 | 40 | 36 | 54 | 65 | 48 | 72 | 80 |
| 9.96 | 15.5 | 10 | 15 | 18 | 20 | 30 | 40 | 30 | 45 | 50 | 40 | 60 | 65 |
| 12.47 | 15.5 | 8 | 12 | 18 | 16 | 24 | 25 | 24 | 36 | 40 | 32 | 48 | 50 |
| 13.8 | 15.5 | 7 | 12 | 18 | 14 | 22 | 25 | 22 | 33 | 40 | 29 | 43 | 50 |
| 14.4 | 15.5 | 7 | 12 | 18 | 14 | 21 | 25 | 21 | 31 | 40 | 28 | 43 | 50 |
| 19.2 | 23 | 5 | 8 | 12 | 10 | 18 | 25 | 16 | 23 | 25 | 21 | 31 | 40 |
| 21.6 | 23 | 5 | 8 | 12 | 9 | 18 | 25 | 14 | 21 | 25 | 19 | 28 | 30 |

### ١٦-٤-٣- خطا در ظرفیت خازن

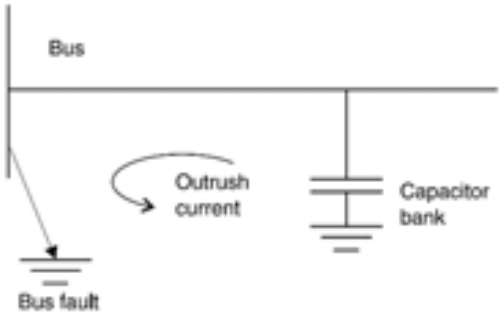
خطای مجاز در ظرفیت خازن حدود ١٥ درصد است.

### ١٦-٤-٤- هارمونیک جریان

با افزودن خازن اصلاح ضریب توان به سیستم، پاسخ فرکانسی سیستم تغییر می‌کند. این نکته در مدار تصویر ٢٠-٨ (فصل ٢٠) به همراه پاسخ فرکانسی سیستم بدون خازن و با خازن (تصویر ٢٠-٩) بیان شده است. اثر افزودن فیلتر تیون‌شده به سیستم در تصویر ٢٠-١٠ آمده است. پاسخ فرکانسی سیستم دارای فیلتر تیون‌شده در تصویر ١٤-٩ نشان داده شده است. فیلترهای تیون‌شده هارمونیک‌های ولتاژ و جریان را کاهش می‌دهند. منبع رزونانس هارمونیکی و تقویت ولتاژ در فصل ٢٢ آمده است (تصویر ٢٢-٢٢). در زمان برق‌دار کردن بانک‌های فشار قوی، مدار خازن فشار ضعیف، در صورت عدم وجود میرا کننده نوسان‌های بزرگی تولید می‌کند. این امر باعث افزایش هارمونیک‌های جریان می‌شود. برای محاسبهٔ جریان مؤثر عبوری از خازن باید هارمونیک‌های جریان را در نظر گرفت.

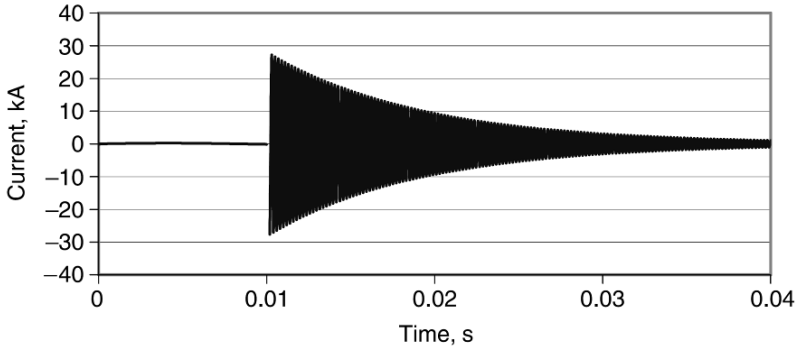
### ١٦-٤-٥- اندازهٔ جریان خطا

در زمان انتخاب خازن باید جریان‌های محتمل در محل خازن را در نظر گرفت. در صورت وقوع خطا، خازن باید تا برطرف شدن خطا توسط فیوز، بتواند جریان خطا را تحمل کند. در صورت وقوع خطا روی باس نزدیک به بانک خازنی، جریان خطا بسیار بزرگ می‌شود (تصویر ١٦-٧).




**تصویر ۱۶-۷: وقوع یک خطای باس در نزدیکی بانک خازنی**

هنگام وقوع خطا در باس، امپدانس کوچکی میان خازن و محل خطا وجود دارد. شکل موج نوعی جریان در تصویر ۱۶-۸ نشان داده شده است. فرکانس جریان حدود ۵ کیلو هرتز است. در خازن‌های تمام‌فیلم رایج، جریان خازنی نباید از حدود داده شده در جدول ۱۶-٤ تجاوز کند. اگر جریان از این حدود فراتر رود، باید از فیوزهای محدود کنندهٔ جریان استفاده کرد. در مورد برخی خازن‌ها، حد مجاز جریان خطا باید از سازنده پرسیده شود.



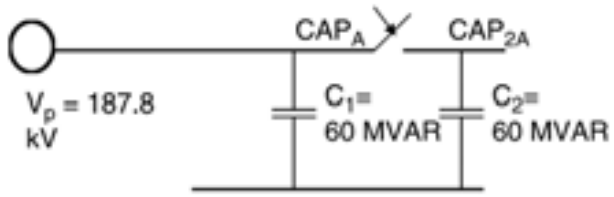

**تصویر ۱۶-۸: جریان خطای فاز به زمین در نزدیکی بانک خازنی**

**جدول ۱۶-٤: جریان مجاز خازن‌های تمام‌فیلم**

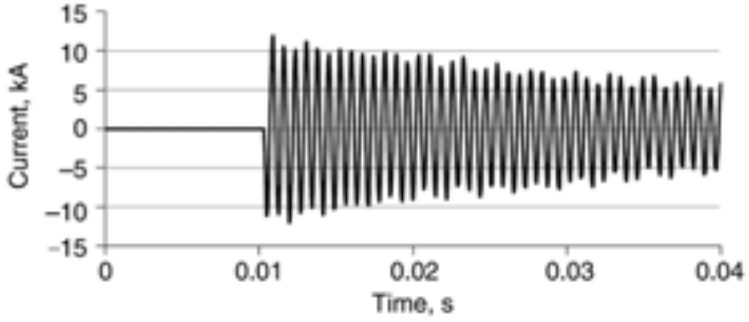
| مشخصات بانک | | حداکثر جریان مؤثر خطای متقارن (آمپر) | | | | فیوز مورد استفاده | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $X/R=0$ | $X/R=5$ | $X/R=10$ | $X/R=15$ | نوع K | نوع T |
| ۵۰ و ۱۰۰ کیلوواری | کمتر از ۵ کیلوولت | 4300 | 3000 | 2600 | 2500 | 50 | 25 |
| | بیشتر از ۳۰ کیلوولت | 3100 | 2200 | 1900 | 1800 | 30 | 20 |
| | ۳۸ کیلوولت (کات‌اوت) | 2000 | 1700 | 1500 | 1400 | 30EK | 20ET |
| ۱۵۰، ۲۰۰، ۳۰۰، و ٤۰۰ کیلوواری | کمتر از ۹ کیلوولت | 8400 | 5900 | 5100 | 4800 | 80 | 50 |
| | بیشتر از ۹ کیلوولت | 6300 | 4400 | 3800 | 3600 | 65 | 40 |
| | ۳۸ کیلوولت (کات‌اوت) | 4100 | 3400 | 3100 | 2900 | 65EK | 40ET |

### ۱۶-٤-٦- جریان‌های گذرا ناشی از کلیدزنی بانک‌های مجاور

فرض کنید که مانند تصویر ۱۶-۹ دو بانک مجاور به هم داریم. بانک ۱ ($C_1$) در مدار و بانک ۲ ($C_2$) خارج از مدار است. پس $C_1$ شارژ است ولی $C_2$ شارژ نیست. بنابراین، با بستن کلید بانک ۲، جریان هجومی بزرگی تولید می‌شود. منحنی نوعی این جریان در تصویر ۱۶-۱۰ رسم شده است. در مورد بانک‌های روی تیر اغلب چنین مشکلی وجود ندارد، ولی در بسیاری از بانک‌های صنعتی و پست‌ها، چنین امری محتمل است. اندازه و فرکانس جریان هجومی به ولتاژ اعمالی، زمان بستن کلید، ظرفیت بانک‌ها، و مقاومت درون مدارشکن دارد. فرکانس حالت گذرا در اینجا حدود ۱/۳ کیلو هرتز است. فیوزهای خازنی همچنین در معرض جریان‌های فرکانس بالای صاعقه هستند. برای کاهش سوختن فیوزهای نوع T به دلیل صاعقه، از این نوع فیوزها در مدارهای کم‌جریان (زیر ۲۵ آمپر) استفاده می‌شود. فیوزهای K در جریان‌های بالاتر به کار می‌روند.



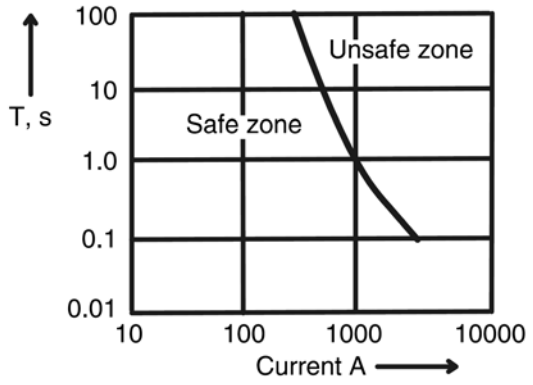

**تصویر ۱۶-۹: دو بانک مجاور در سیستم ۲۳۰ کیلو ولتی**




**تصویر ۱۶-۱۰: جریان یک فاز در هنگام کلیدزنی دو بانک مجاور**

### ۱۶-٤-۷- مشخصهٔ ترکیدگی بدنهٔ خازن

منحنی زمان عملکرد خازن باید با منحنی ترکیدگی خازن هماهنگ باشد. به این ترتیب در صورت خطای داخل بانک، قبل از ترکیدن بدنه خطا برطرف می‌شود. باید ماکزیمم زمان رفع خطای فیوز سمت چپ منحنی ترکیدگی و پایین‌تر از جریان خطا قرار گیرد. در تصویر ۱۶-۱۱ نمونهٔ منحنی ترکیدگی خازن دیده می‌شود. در منحنی ناحیهٔ امن و ناامن مشخص شده است. منحنی ذوب فیوز باید در منطقهٔ امن قرار گیرد. در صورت وقوع خطا، ابتدا فیوز عمل می‌کند و بدنه سالم می‌ماند.




**تصویر ١٦-١١: منحنی ترکیدگی بدنهٔ یک خازن نوعی**

### ١٦-٤-٨- ولتاژ روی خازن‌های سالم

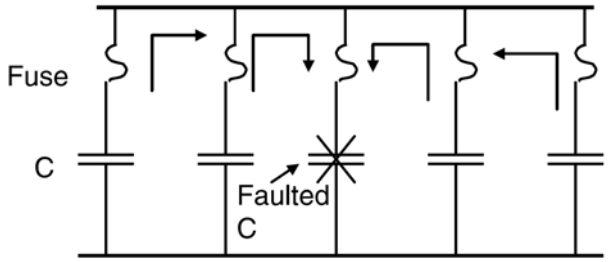
در بانک‌های خازنی با اتصال ستارهٔ زمین‌شده، اگر در یک فاز خازنی خراب شود، ولتاژ فازهای دیگر تا ٧٠ درصد بیشتر از ولتاژ نامی افزایش می‌یابد. اگر خازن خراب بلافاصله قطع نشود، دیگر یونیت‌ها هم به دلیل اضافه‌ولتاژ خراب شده، منجر به خطای فاز به فاز می‌شود. بنابراین، باید از فیوز برای جلوگیری از خرابی خازن‌های دیگر استفاده کنیم. به این منظور فیوز باید از نوع تُند (K) باشد. ولی برای طی کردن حالت‌های گذرا باید از فیوز کُند (T) استفاده کنیم. فیوز کوچک‌تر می‌تواند خطا را سریع‌تر برطرف کند. در جدول ٧-٣ (فصل ٧) ولتاژ خازن‌های سالم در صورت وقوع خطا روی یک فاز را نشان می‌دهد.

### ١٦-٤-٩- دشارژ انرژی در خازن‌های معیوب

خازن و فیوز باید بتوانند انرژی ذخیره شده در یونیت‌ها را تحمل کنند. اگر خازنی خراب شود، انرژی دیگر خازن‌ها وارد آن خازن می‌شود. در تصویر ١٦-١٢ این وضعیت نشان داده شده است. انرژی ذخیره شده نباید از انرژی قابل تحمل خازن و فیوز بیشتر شود، وگرنه امکان عمل کردن فیوز یا ترکیدگی خازن وجود دارد. مقدار انرژی فوق نباید از ١٠ کیلو ژول (معادل ٣/١ مگاوار خازن) برای خازن‌های کاغذ یا فیلم و ١٥ کیلوژول (معادل ٤/٦٥ مگاوار خازن) برای خازن‌های تمام فیلم تجاوز کند. اگر انرژی محاسبه شده از انرژی فوق تجاوز کرد، از دو روش می‌توان پیروی کرد:

- طراحی مجدد بانک خازنی برای کاهش مقدار انرژی ذخیره شده در یونیت‌های موازی. به این منظور می‌توان چند خازن سری افزود یا بانک را به ستارهٔ دوبل تبدیل کرد.
- استفاده از فیوزهای محدود کنندهٔ جریان. ولی تلفات فیوزها و هزینه‌ها افزایش می‌یابد.

بنابراین، می‌توان دید که فیوز محدودیتی برای طراحی بانک‌های بزرگ ایجاد نمی‌کند.




**تصویر ۱۶-۱۲: دشارژ خازن‌های مجاور در خازن معیوب**

### ۱۶-٤-۱۰- جریان دشارژ

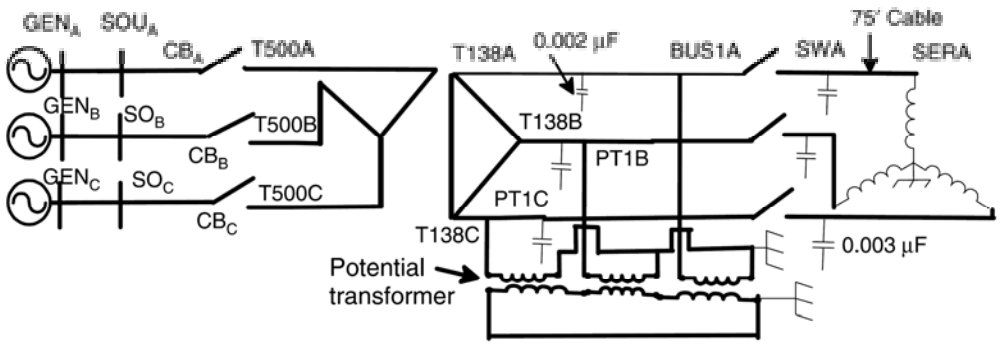
فیوزهای متصل به خازن‌های سالم باید بتوانند $I^2t$ ناشی از دشارژ فرکانس بالا در خازن خراب را تحمل کنند. هنگام خرابی خازن، باقی یونیت‌ها انرژی خود را در خازن خراب می‌ریزند. فیوز خازن‌های سالم باید بتواند این دشارژ را تحمل کند تا مشکل چند برابر نشود. به این ترتیب باید منحنی $I^2t$ فیوز و قدرت دشارژ خازن دانسته شود. پس باید از فیوزهای تُند کار استفاده کرد.

### ۱۶-٤-۱۱- هماهنگی با سیستم تشخیص عدم تعادل

هنگام عمل کردن یک فیوز در بانک خازنی، دیگر یونیت‌های سری‌شده با خازن معیوب دچار اضافه‌ولتاژ می‌شوند. معمولاً در بانک‌ها سیستمی برای تشخیص چنین عدم تعادلی وجود دارد. با عمل کردن اولین فیوز، اگر اضافه‌ولتاژ دیگر یونیت‌ها کمتر از ۱۰ درصد باشد، آلارم داده می‌شود. اگر اضافه‌ولتاژ بیش از ۱۰ درصد باشد، بانک تریپ داده می‌شود. برای قطع و وصل خازن از سوییچ‌های قطع بار یا مدارشکن‌ها استفاده می‌شود. سیستم تشخیص عدم تعادل باید با مشخصهٔ زمان–جریان فیوز هماهنگ شود که فیوز فرصت کافی داشته باشد و قبل از تریپ شدن بانک، یونیت خراب را از مدار خارج کند؛ وگرنه علت قطع بانک معلوم نخواهد بود. این عمل معمولاً با قرار دادن یک تأخیر زمانی انجام می‌شود.

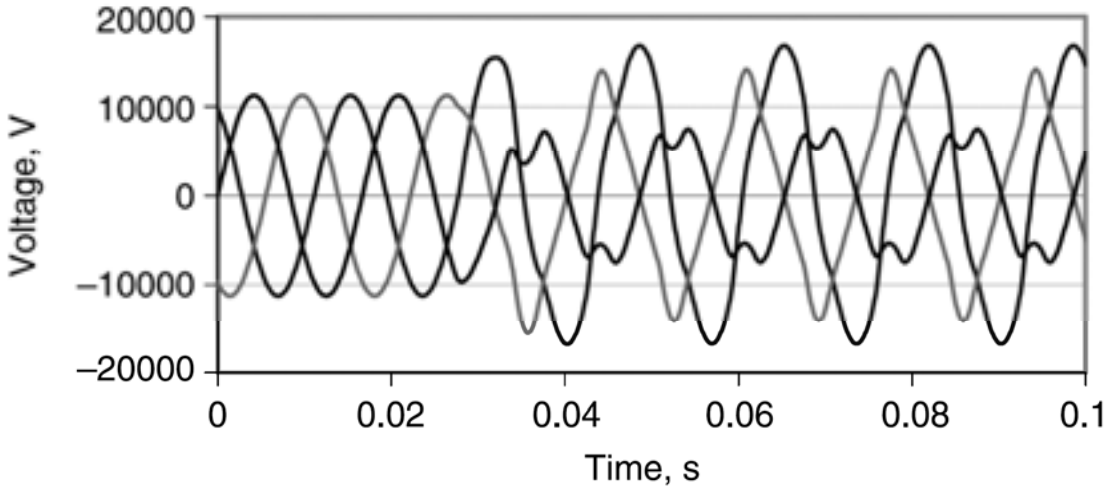
## ۱۶-۵- تأثیر فیوزهای باز

در مدارهای متصل با کابل، اثر خازنی غالب است و باید اثر مدار باز بودن یک فاز در نظر گرفته شود. اگر در مدار از ترانس اندازه‌گیری ولتاژ استفاده شود، بین خازن کابل و راکتور هستهٔ ترانس اثر متقابل پیش می‌آید و فرورزونانس رخ می‌دهد. دیاگرام چنین مداری در تصویر ۱۶-۱۳ نشان داده شده است. فازی که مدار باز است، ولتاژ نامتعادلی در مدارهای ۱۳/۸ کیلوولت از جمله ترانس ولتاژ ایجاد می‌کند. فیوز به صورت یک کلید سه تیغه‌ای مدل می‌شود. کابل ۷۵ فوتی (۲۳ متر) بین فیوز و ترانس تغذیه با یک امپدانس و خازن ۲ نانوفارادی مدل شده است.




**تصویر ۱۶-۱۳: دیاگرام شبیه‌سازی مدار باز بودن یک فاز**

مدار باز بودن یک فاز در خطوط بی‌بار بسیار خطرناک است، زیرا ولتاژ آن فاز تا ۲ برابر ولتاژ نامی بالا می‌رود. اگر در این وضعیت موتوری به سیستم وصل شود، در خلاف جهت مورد انتظار خواهد چرخید. مشکلات مربوط به این مسأله در استاندارد IEEE Standard C57.105 مطرح شده است. این یک مشکل حالت ماندگار ولتاژ است و کنترل عدم تعادل پیش‌آمده بسیار دشوار است. اگر ترانس به درستی حفاظت نشده باشد، به دلیل حرارت زیاد از کار خواهد افتاد. برق‌گیر نیز به دلیل ولتاژ زیاد از کار خواهد افتاد. این حالت در مثلث باز پیش می‌آید. ولتاژ سه فاز در تصویر ۱۶-۱۴ نشان داده شده است. ولتاژ در سه فاز به ترتیب ۱۷، ۱۴، و ۷ کیلو ولت هستند. ولتاژ در فاز مدار باز ۵۰ درصد بیشتر از ولتاژ نامی است که به تجهیزات حساس آسیب خواهد زد. بانک‌های خازنی چنین سیستمی برای جلوگیری از خرابی حتماً باید از مدار خارج شوند.




**تصویر ۱۶-۱۴: شکل موج نامتقارن ولتاژ سه فاز سیستم ۱۳/۸ کیلوولتی**

## ۱۶-۶- مؤخره

در این فصل، در مورد فیوزهای مخصوص بانک خازنی به نتایج زیر رسیدیم:

- برای حفاظت جریانی، باید از یک فیوز لینک استفاده کرد، مانند T. برای رفع سریع خطا باید از فیوز نوع K استفاده کرد.
- برای حفاظت در برابر جریان دشارژ به خازن معیوب از فیوز محدود کنندهٔ جریان استفاده می‌کنیم.
- مشخصهٔ فیوز باید سریع‌تر از مشخصهٔ ترکیدگی بدنهٔ خازن باشد. به این ترتیب از اضافه‌ولتاژ روی یونیت‌های سالم جلوگیری می‌شود.
- برای تحمل گذراهای ناشی از کلیدزنی بانک‌های مجاور و جریان دشارژ به طرف خازن معیوب باید از فیوزهای با عملکرد کُند استفاده کرد.

همواره نمی‌توان تمام موارد بالا را رعایت کرد. فیوز لینک مناسب بر اساس جریان نامی و سطح ایمنی مورد نظر انتخاب می‌شود.

# فصل ۱۷ : مدارشکن‌ها

## ۱۷-۱- معرفی

مدارشکن‌ها تجهیزاتی الکترومکانیکی هستند که برای قطع و وصل تجهیزات شبکه در نیروگاه‌ها، پست‌ها، و بار استفاده می‌شوند. مدارشکن‌ها دارای کنتاکت‌های حامل جریان هستند که الکترود نام دارد. برای برق‌دار کردن این الکترودها به هم متصل و برای بی‌برق کردن از هم جدا می‌شوند. موقع بی‌برق کردن، کنتاکت‌ها باید از هم جدا شوند و در بین آنها قوس تشکیل می‌شود. این قوس نقش مهمی در فرآیند قطع دارد زیرا به مرور وضعیت را از حالت حامل جریان به قطع جریان تغییر می‌دهد. بیشتر مشکلات فنی مدارشکن‌ها مربوط به خاموش کردن قوس و اضافه‌ولتاژهای گذرا در حالت مدار باز است. باز و بسته کردن مدارشکن‌ها در مدارهای خازنی به دلیل انرژی ذخیره شده در خازن‌ها نکات فنی بیشتری دارد.

## ۱۷-۲- انواع مدارشکن‌ها

مدارشکن وسیله‌ای مکانیکی است که در حالت عادی باید بتواند جریان را متصل کند، برقرار نگه دارد، و در صورت لزوم آن را قطع کند. همچنین باید بتواند اتصال جریان، برقراری جریان، و قطع جریان را در حالت‌های خاصی انجام دهد. مدارشکن‌ها بسته به سطوح ولتاژ، نوع سوییچینگ، نصب، و نحوهٔ قطع جریان به کلاس‌های مختلفی تقسیم می‌شوند.

### ۱۷-۲-۱- کلاس‌های مدارشکن بر حسب ولتاژ

بر اساس استانداردهای صنعتی مدارشکن‌ها به دو گروه زیر ۷۲/۵ کیلو ولت و بالای ۱۲۱ کیلو ولت تقسیم می‌شوند. این تقسیم‌بندی به همهٔ مدارشکن‌ها از جمله مدل‌های گازی صدق می‌کند (ضمیمهٔ ۳ را ببینید).

### ۱۷-۲-۲- کلاس‌های مدارشکن بر حسب نوع سوییچینگ

مدارشکن‌ها برای کلیدزنی بارهای مقاومتی، سلفی، و خازنی استفاده می‌شوند. بارهای مقاومتی و سلفی را می‌توان با مدارشکن‌های عادی قطع و وصل کرد. مدارشکن‌های بارهای خازنی نیازمند طراحی خاص هستند. بسته به نوع سوییچینگ، مدارشکن‌ها به دو گروه تقسیم می‌شوند:

- مدارشکن‌های عادی برای بارهای سلفی
- مدارشکن‌های خاص برای بارهای خازنی

این تقسیم‌بندی در ضمیمهٔ ۳ برای ولتاژهای زیر ۷۲/۵ کیلو ولت و بالاتر از ۱۲۱ کیلو ولت آمده است.

### ۱۷-۲-۳- کلاس‌های مدارشکن بر حسب نوع نصب

مدارشکن‌ها را می‌توان به دو صورت indoor و outdoor نصب کرد. مدارشکن‌های indoor برای داخل ساختمان یا تابلوهای مقاوم در برابر شرایط جوی طراحی شده‌اند. مثلاً مدارشکن‌های فشار متوسط برای نصب در تابلو هستند. مدارشکن‌هایی که برای نصب در محل outdoor طراحی شده‌اند، خود دارای محفظه‌هایی هستند که در برابر شرایط جوی مقاوم است. قطعات داخلی هر دو نوع مدارشکن مشابه هم هستند.

مدارشکن‌های outdoor به دو گروه محفظه مُرده (dead tank) و محفظه زنده (live tank) تقسیم می‌شوند. در نوع dead tank، محفظهٔ مدارشکن زمین شده است. قطع‌کننده‌ها در مادهٔ عایقی درون محفظه غوطه‌ور شده‌اند. در نوع live tank، محفظهٔ مدارشکن دارای ولتاژ است. استاندارد IEC در مورد این نوع مدارشکن‌ها چند مزیت قائل می‌شود:

- هزینهٔ کمتر و سایز کوچک‌تر
- فضای کمتر برای نصب
- مادهٔ عایقی کمتر

ولی، این نوع مدارشکن‌ها در هنگام زلزله مشکل‌زا می‌شوند. در مناطق زلزله‌خیز اغلب از مدل dead tank استفاده می‌شود. استاندارد ANSI مزایای زیر را برمی‌شمارد:

- مقاومت بیشتر در برابر زلزله
- محفظهٔ ایمن و قابلیت اسمبلی در کارخانه
- بوشینگ جداگانه برای ورودی و خروجی (نصب ترانس‌های اندازه‌گیری ساده‌تر می‌شود)

مدارشکن‌های dead tank نسبت به نوع live tank قوی‌تر و گران‌تر هستند.

### ۱۷-۲-٤- کلاس‌های مدارشکن بر حسب نحوهٔ قطع جریان

در مدارشکن‌های هوایی، قطعات اصلی مکانیزم قطع، مادهٔ عایق، و محفظه است. روش‌های خاموش کردن قوس با مادهٔ عایقی بسته به نوع مدارشکن‌ها متفاوت است. برخی از مواد عایق مورد استفاده در مدارشکن‌ها هوا، روغن، هوای فشرده، خلأ، و گاز هگزا فلورید گوگرد ($SF_6$) است. در اینجا در مورد انواع این مدارشکن‌ها توضیح می‌دهیم:

*مدارشکن‌های هوایی*

این مدارشکن‌ها از سه یونیت تک‌تیغه‌ای تشکیل شده‌اند که با یک تیرک عایق به هم متصل شده‌اند. تیغه‌ها روی یک تابلوی عایق نصب شده و دو طرف هر تیغه صفحه‌های مقاوم در برابر قوس قرار داده شده است. در این مدارشکن‌ها خاموش کردن قوس با یون‌زدایی از گاز توسط فرآیند خنک‌سازی انجام می‌شود. در ساده‌ترین مدل

مدارشکن هوایی، کنتاکت‌ها شاخی‌شکل هستند. قوس ابتدا کوتاه‌ترین مسیر بین دو کنتاکت را طی می‌کند. سپس مسیر آن به سمت بالا منحرف می‌شود. با افزایش طول قوس، به مرور خاموش می‌شود.

در مدارشکن‌های هوایی مغناطیسی، خاموشی قوس با ضربهٔ مغناطیسی انجام می‌شود؛ قوس در معرض میدان مغناطیسی ناشی از سیم‌پیچ‌های سری با شبکه قرار می‌گیرد. قوس تحت تأثیر نیروی مغناطیسی به سمت مجاری عمودی می‌رود و در آنجا طویل شده، خنک و سپس خاموش می‌شود. به این ترتیب قوس به بخش‌های دیگر سرایت نمی‌کند. این نوع مدارشکن در ولتاژهای بالاتر از ۱۱ کیلو ولت استفاده می‌شود.

نوع دیگر مدارشکن هوایی، بر اساس تکه کردن قوس کار می‌کند. در این مدل، خاموش‌کننده‌ها از میله‌های فلزی تشکیل شده‌اند. وقتی این میله‌ها با قوس تماس می‌یابند، به سرعت آن را خنک می‌کنند. این نوع مدارشکن برای قطع و وصل‌های مکرر کاربرد دارد. مدارشکن‌های هوایی برای کنترل سیستم‌های پشتیبان نیروگاه‌ها و کارخانه‌های صنعتی مفید است. این مدارشکن‌ها روی زمین نصب می‌شوند و از ایمنی بالایی برخوردار هستند.

*مدارشکن‌های روغنی*

در این نوع مدارشکن‌ها، کنتاکت‌ها در روغن غوطه‌ور هستند. قوس تولید شده در هنگام قطع مدار، باعث تبخیر روغن اطراف خود می‌شود و تولید گاز هیدروژن می‌کند. حضور روغن باعث خاموشی سریع قوس و برقراری عایقی مناسب بین تیغه‌ها می‌کند. روغن معمولاً آتش‌زا است و احتمال وقوع آتش‌سوزی در موقع خطا وجود دارد. قوس در روغن تولید کربن می‌کند و روغن به مرور آلوده می‌شود و خاصیت عایقی‌اش کاهش می‌یابد. بنابراین، بازدید دوره‌ای و تعویض روغن کاملاً لازم است. انواع مختلفی از مدارشکن‌های روغنی وجود دارد: معمولی، محفظهٔ بزرگ، و محفظهٔ کوچک. این مدارشکن‌ها معمولاً در ولتاژهای بالاتر از ۱۱۰ کیلو ولت به کار می‌روند.

*مدارشکن‌های هوای فشرده*

در سیستم‌های فشار قوی، با استفاده از هوای فشرده می‌توان سرعت سوییچینگ را افزایش داد. هوای فشرده، نیتروژن، دی‌اکسید کربن، هیدروژن، و فرئون در این مدارشکن‌ها استفاده می‌شوند. هوای فشرده از بین الکترودها عبور می‌کند و قوس را خاموش می‌کند. سه نوع دمیدن هوای فشرده وجود دارد: عمودی، گردشی، و افقی. این نوع مدارشکن برای قطع جریان‌های ۲ کیلو آمپر تا ٤ کیلو آمپر استفاده می‌شود.

*مدارشکن‌های خلأ*

خلأ بیشترین قدرت عایقی را دارد. با باز شدن الکترودهای مدارشکن، به محض عبور جریان از صفر عمل قطع آغاز می‌شود. بنابراین، قدرت دی‌الکتریکی روی تیغه‌ها از مدارشکن‌های دیگر قوی‌تر است. مدارشکن‌های خلأ ساختمان ساده‌تری نسبت به انواع روغنی یا هوای فشرده دارند. دو کنتاکت درون محفظهٔ خلأ قرار می‌گیرند. یکی از الکترودها ثابت است و دیگری می‌تواند اندکی جابه‌جا شود. حفاظی فلزی دور کنتاکت‌ها را گرفته، از محفظهٔ عایقی حفاظت می‌کند. یک طرف کنتاکت ثابت برای اتصال خارجی از محفظه بیرون می‌آید. کنتاکت

متحرک محکم به میلهٔ کنترل متصل می‌شود. یک فنر کنتاکت را در زمان اتصال حرکت می‌دهد. به این ترتیب، مدارشکن خلأ می‌تواند بدون نیاز به تعمیر تعداد زیادی قطع و وصل انجام دهد. به دلیل عدم وجود لرزش روی کنتاکت، این مدارشکن بدون هیچ مشکلی می‌تواند بانک خازنی را قطع و وصل کند.

*مدارشکن‌های گازی*

گاز $SF_6$ پنج برابر سنگین‌تر از هوا است و در این نوع مدارشکن‌ها برای عایق کردن و خاموشی قوس استفاده می‌شود. این گاز پایدار، بی‌بو، بی‌اثر، غیر قابل اشتعال، و غیر سمی است. قدرت دی‌الکتریک بالا دارد و قوس را به خوبی خاموش می‌کند. قطعات اصلی این مدارشکن‌ها محفظه، یونیت‌های قطع‌کننده، مکانیزم قطع، بوشینگ‌ها، و سیستم گاز است. از آنجا محصولات جانبی ناشی از این گاز سمی هستند، مدارشکن باید کاملاً محفوظ باشد و این امر قیمت آن را بالا می‌برد. عملکرد کلی این مدارشکن‌ها برتر از تجهیزات مشابه است. نمونهٔ یک مدارشکن گازی سه‌فاز، ۱۲۰ کیلوولت و ٤٠ کیلوآمپر در تصویر ۱۷-۱ نشان داده شده است.

**تصویر ۱۷-۱: مدارشکن dead tank (۱۲۰ کیلوولت، ٤٠ کیلوآمپر)**

این نوع مدارشکن برای کلیدزنی بانک خازنی مناسب است و اندازهٔ اضافه‌ولتاژها را کاهش می‌دهد. برای مدت‌ها از مدارشکن‌های روغنی برای سوییچینگ بانک خازنی استفاده می‌شد. در این نوع مدارشکن‌ها، چندین سیکل طول می‌کشد تا قوس خاموش شود. گرچه هنوز این مدارشکن‌ها برای سوییچینگ خازن مورد استفاده قرار می‌گیرند، ولی مشکل اضافه‌ولتاژ آنها کاملاً شناخته شده است.

مدارشکن‌های گازی مانند هوای فشرده و $SF_6$ می‌توانند هنگام بی‌برق کردن بانک بدون هیچ مشکلی جریان خازنی را قطع کنند و در سیستم‌های فشار قوی کاربردی گسترده دارند. نصب مقاومت در این مدارشکن‌ها برای محدود کردن گذراهای ناشی از وصل کردن بانک‌های فشار قوی گران تمام می‌شود.

مدارشکن‌های خلأ هنگام سوییچینگ بانک خازنی اضافه‌ولتاژهای زیادی تولید می‌کنند. نصب مقاومت در این مدارشکن‌ها دشوار است. مدارشکن‌های خلأ جریان‌های فرکانس بالا را با موفقیت قطع می‌کنند ولی هنگام بسته شدن گذراهایی تولید می‌کنند. اگر هنگام قطع بانک با مدارشکن خلأ، اتصال مجدد و ناخواسته‌ای پیش آید، بزرگ‌ترین گذراها را نسبت به مدارشکن‌های دیگر تولید می‌کند.

## ۱۷-۳- پارامترهای مختلف مدارشکن

یک مدارشکن باید جریان نامی را در ولتاژ سیستم حمل کند. در هنگام خطا باید بتواند مدار را باز کرده، خطا را برطرف کند. همچنین، مدارشکن باید نیروهای الکترومغناطیسی ناشی از خطا را تحمل کند. به علاوه، مدارشکن باید بتواند جریان خطا را به مدت کوتاهی تحمل کند. پارامترهای مدارشکن در اینجا آورده شده است:

### ۱۷-۳-۱- ولتاژ نامی

مدارشکن برای یک ولتاژ نامی و شرایط خاصی طراحی می‌شود. همچنین مدارشکن یک ولتاژ ماکزیمم دارد که نباید از آن تجاوز شود. ولتاژ نامی یک مدارشکن، به صورت سه‌فاز و خط به خط بیان می‌شود. این پارامترها برای ارتفاع ۱ کیلومتر از سطح دریا یا کمتر در نظر گرفته شده است. در ارتفاع‌های بیشتر این حد تحمل کاهش می‌یابد. ولتاژهای پیشنهادی توسط ANSI و IEC در جدول ۱۷-۱ آمده است.

**جدول ۱۷-۱: ولتاژهای پیشنهادی (کیلوولت) ANSI و IEC برای ولتاژها**

| کمتر از ۷۲/۵ کیلو ولت | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ANSI | 4.76 | 8.25 | 15 | 15.5 | 25.8 | 38 | 48 | 72.5 | | |
| IEC | 3.6 | 7.2 | 12 | 17.5 | 24 | 36 | 52 | 72.5 | | |
| بیشتر از ۷۲/۵ کیلو ولت | | | | | | | | | | |
| ANSI | - | 121 | 145 | 169 | 242 | - | 362 | - | 550 | 800 |
| IEC | 100 | 123 | 145 | 170 | 245 | 300 | 362 | 420 | 525 | 800 |

**مثال**

برای یک پست ۳۴۵ کیلوولت به ۱۱۰ کیلو ولت به مدارشکن نیاز داریم. مقادیر مناسب مدارشکن‌ها را بر اساس استاندارد ANSI و IEC به دست آورید.

**پاسخ**

$$V_1 = 345kV, V_{1,\max} = 345kV \times 1.05 = 362kV$$

می‌توانیم از مدارشکن ۳۶۲ کیلوولتی استفاده کنیم.

$$V_2 = 110kV, V_{2,\max} = 110kV \times 1.05 = 115.5kV$$

بر اساس استاندارد ANSI باید از مدارشکن ۱۲۱ کیلوولت و بر اساس استاندارد IEC باید از مدارشکن ۱۲۳ کیلوولت استفاده کنیم.

### ۱۷-۳-۲- فرکانس

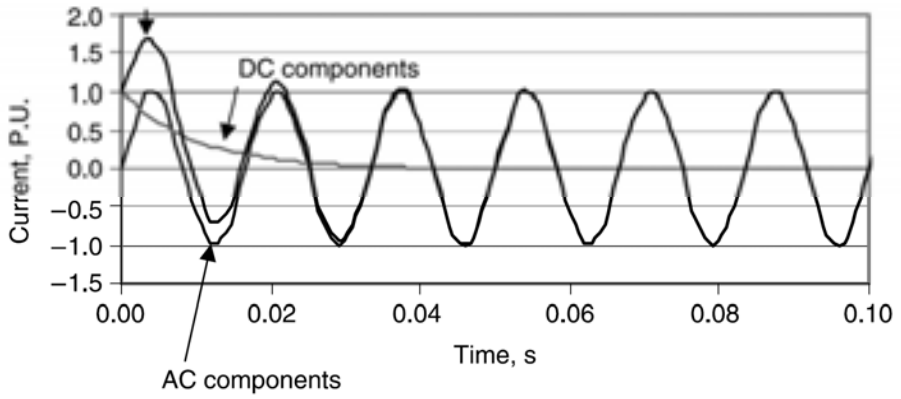
مدارشکن‌های استاندارد سیستم قدرت در ۵۰ هرتز یا ٦۰ هرتز کار می‌کنند. برای کار در فرکانس‌های دیگر باید مورد به مورد بررسی نمود.

### ۱۷-۳-۳- جریان نامی

جریان نامی یک مدارشکن به صورت مقدار مؤثر بیان می‌شود و جریانی است که مدارشکن باید پیوسته و در ولتاژ و فرکانس نامی حمل کند. دمای محیط ٤۰ درجهٔ سانتیگراد فرض می‌شود.

### ۱۷-۳-٤- جریان اتصال کوتاه[1]

این مقدار، بزرگ‌ترین جریان اتصال کوتاه متقارن (مقدار مؤثر) است که مدارشکن قادر به قطع است (تصویر ۱۷-۲).




**تصویر ۱۷-۲: بخش‌های مختلف جریان خطا**

### ۱۷-۳-۵- جریان قطع متقارن[2]

در هر ولتاژ کاری، جریان قطع متقارن از این رابطه به دست می‌آید:

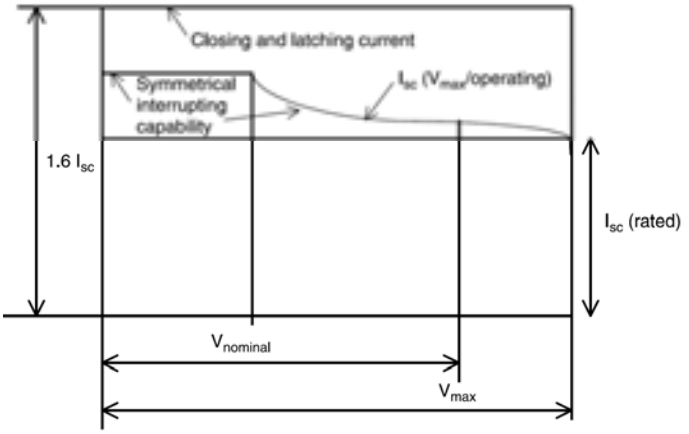
$$I_{\text{int}} = I_{SC}\frac{V_{\max}}{V_{\text{operating}}}$$

### ۱۷-۳-٦- جریان لَچینگ[3]

این جریان، جریانی است که در صورت بسته شدن مدارشکن روی یک خطا از آن عبور می‌کند. جریان لَچینگ در زمان ماکزیمم سیکل و جریان قطع در زمان کنتاکت اندازه‌گیری می‌شود و ٦۰ درصد بیشتر از جریان خطا است

[1] rated short circuit current
[2] symmetrical interrupting current
[3] latching current

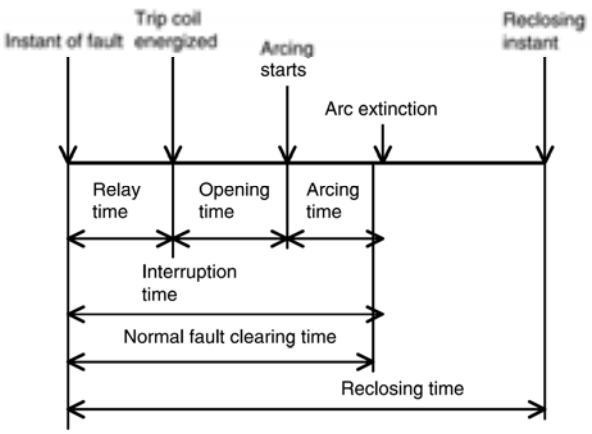
(تصویر ۱۷-۳). اگر مقدار آن به صورت پیک بیان شود، ۲/۷ برابر جریان اتصال کوتاه است. برخی اوقات، این جریان، جریان لحظه‌ای نامیده می‌شود و نیم‌سیکل بعد از خطا اندازه‌گیری می‌شود.




**تصویر ۱۷-۳: رابطهٔ جریان اتصال کوتاه با جریان لَچینگ**

### ۱۷-۳-۷- زمان قطع[1]

این زمان، ماکزیمم زمان بین تحریک مدار تریپ و قطع همهٔ تیغه‌های مدارشکن است. زمان پاسخ یک مدارشکن حدود نیم تا یک سیکل است. زمان رایج برای رفع خطا در حدود ٦ سیکل است (تصویر ۱۷-٤).




**تصویر ۱۷-٤: زمان‌های عملکرد مدارشکن**

### ۱۷-۳-۸- زمان وصل مجدد[2]

برای جلوگیری از قطع کامل سیستم، مدارشکن اندکی بعد از رفع خطا دوباره اتصال را برقرار می‌کند. این زمان در مدارشکن‌های فشار قوی حدود ١٦ سیکل است (تصویر ۱۷-٤).

[1] rated interrupting time
[2] reclosing time

### ۱۷-۳-۹- جریان قطع متقارن[1]

این جریان، مقدار مؤثر بخش AC جریان در تیغه در لحظهٔ قطع است:

$$I_{sym} = \frac{I_{AC}}{\sqrt{2}}$$

### ۱۷-۳-۱۰- جریان قطع نامتقارن[2]

این جریان، مقدر مؤثر کل جریان (AC و DC) در تیغه در لحظهٔ قطع است:

$$I_{asym} = \sqrt{\left(\frac{I_{AC}}{\sqrt{2}}\right)^2 + I_{DC}^2}$$

### ۱۷-۳-۱۱- قدرت دی‌الکتریک

قدرت لازم برای دی‌الکتریک در یک مدارشکن با سه پارامتر زیر بیان می‌شود:

- قدرت تحمل ضربهٔ صاعقه (Lightning impulse withstand)
- مقدار BIL یا سطح اولیهٔ امپدانس (Basic Impedance Level)
- قدرت تحمل ولتاژ مربعی

**مثال**

یک مدارشکن سه‌فاز، ۲۵ کیلوولت، ۶۰ هرتز، ۱۲۰۰ آمپر، و ۲۰۰۰ مگا ولت‌آمپر در نظر بگیرید. مقدار جریان نامی، جریان لَچینگ، و جریان قطع چقدر است؟ اگر این مدارشکن بانک خازنی با ۸۵۰ آمپر در هر فاز را سوییچ کند، چه مقدار حاشیهٔ اطمینان وجود دارد؟

**پاسخ**

$$I = 1200A$$

$$I_{sym} = \frac{2000MVA}{\sqrt{3} \times 25kVA} = 46.2kA$$

$$I_{latch} = 46.2kA \times 1.6 = 73.9kA$$

$$I_{rated} = 850A$$

حداقل حاشیهٔ اطمینان را ۳۰ درصد در نظر می‌گیریم.

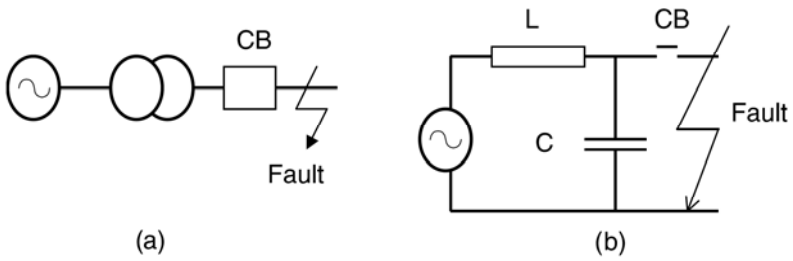
$$I_{\max} = 850A \times 1.3 = 1105A$$

می‌بینیم که حاشیهٔ ایمنی کافی وجود دارد.

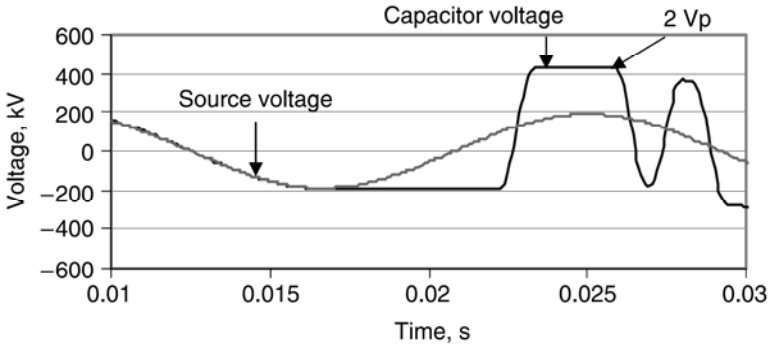
[1] symmetrical breaking current
[2] asymmetrical breaking current

## ۱۷-۴- عملکرد مدارشکن‌ها

عملکرد مدارشکن‌ها با مقدار توانایی آنها در قطع قوس، ولتاژ بازیافت گذرا (TRV[1])، نرخ افزایش ولتاژ بازیافت (RRRV[2])، و عملکردشان در برابر جریان‌های خازنی فرکانس بالای گذرا سنجیده می‌شود. در تصویر ۱۷-۵ شبکه‌ای ساده و مدار معادل آن نشان داده شده است. در حالت عادی خازن و سلف سیستم در خود انرژی ذخیره می‌کنند. کلیدزنی و خطاها باعث اضافه‌ولتاژ می‌شوند. حالت‌های گذرای ناشی از کلیدزنی به دلیل انرژی ذخیره‌شده در خازن و سلف در هنگام تغییر شرایط مدار رخ می‌دهد. ولتاژ خازن در هنگام باز شدن مدارشکن در تصویر ۱۷-٦ نشان داده شده است.




**تصویر ۱۷-۵: دیاگرام شبکه و مدار معادل آن**




**تصویر ۱۷-٦: ولتاژ خازن در لحظهٔ قطع مدارشکن**

### ۱۷-٤-۱- پدیدهٔ قوس و ولتاژ قوس

در لحظهٔ باز شدن مدارشکن بین الکترودها قوس زده می‌شود. این به دلیل گازهای یونیزه شده در هنگام باز شدن است. قوس طبیعت مقاومتی دارد و ولتاژ و جریان آن همفاز هستند. اندازهٔ ولتاژ قوس به مرور افزایش می‌یابد، زیرا کنتاکت‌ها در حال فاصله گرفتن هستند و طول قوس زیاد می‌شود. با فاصله گرفتن کنتاکت‌ها، مقاومت بین آنها به مرور زیاد می‌شود. جریان به مرور کاهش می‌یابد تا اینکه قدرت قوس زدن نداشته باشد. به دلیل ماهیت مقاومتی قوس، با کاهش جریان ولتاژ هم کاهش می‌یابد و قوس خاموش می‌شود.

[1] Transient Recovery Voltage
[2] Rate of Rise of Recovery Voltage

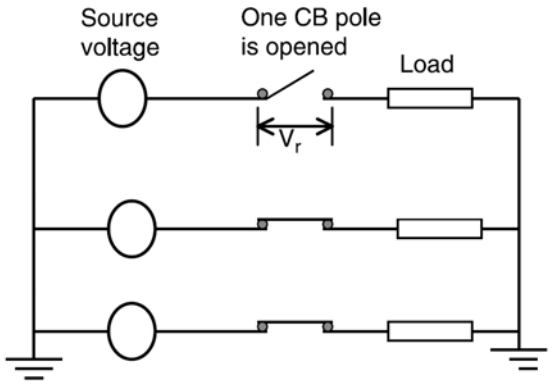
### ۱۷-٤-۲- ولتاژ بازیافت گذرا (TRV)

ولتاژ بازیافت به ولتاژی گفته می‌شود که بعد از خاموش شدن قوس روی کنتاکت‌ها می‌افتد. برخی اوقات، بعد از خاموش شدن قوس این ولتاژ بالا می‌رود و باعث تشکیل مجدد قوس می‌شود. به این ولتاژ گذرا، ولتاژ restrike گفته می‌شود. در تصویر ۱۷-۷ ولتاژ روی کنتاکت‌های باز با این رابطه به دست می‌آید (حوزهٔ فرکانس):

$$V_C = \frac{V_{\max}/s}{sL + 1/sC} = V_{\max}\frac{1}{s\left(s^2+\omega^2\right)}$$

در اینجا $\omega = 1/\sqrt{LC}$ و $V_{\max}$ ماکزیمم ولتاژ بازیافت است. با تبدیل رابطهٔ فوق به حوزهٔ زمان داریم:

$$V_C = V_{\max}\left(1-\cos\omega t\right)$$




**تصویر ۱۷-۷: دیاگرام ولتاژ بازیافت گذرا**

ماکزیمم ولتاژ بازیافت دو برابر $V_{\max}$ است و در $t = \pi/\omega$ رخ می‌دهد. ولتاژ گذرای با فرکانس $1/2\pi\sqrt{LC}$ نوسان می‌کند. یکی از فاکتورهای مهمی که بر ولتاژ restrike اثر می‌گذارد، نرخ افزایش ولتاژ بازیافت (RRRV) است.

### ۱۷-٤-۳- نرخ افزایش ولتاژ بازیافت (RRRV)

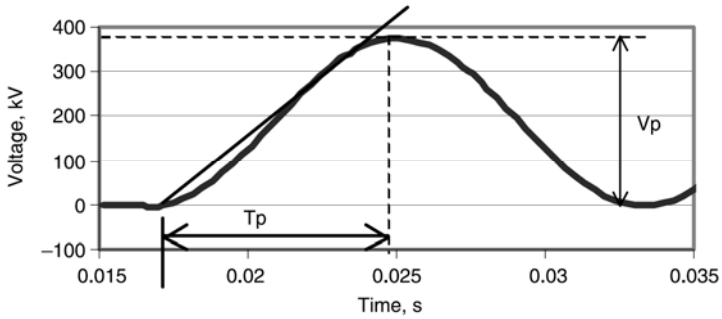
در حالت‌های گذرای تک‌فرکانسی، مقدار RRRV از این رابطه به دست می‌آید:

$$RRRV = \frac{\text{Peak Restrike Voltage}}{\text{Time between voltage zero and peak voltage}}$$

مفهوم RRRV در تصویر ۱۷-۸ نشان داده شده است. بر این اساس، $RRRV = V_{\max}/T_p$ است. رابطهٔ فوق را می‌توان از رابطهٔ ولتاژ restrike به دست آورد:

$$RRRV = \frac{dV_C}{dt} = V_{\max}\omega\sin\omega t$$

مقدار ماکزیمم RRRV در $\omega t = \pi/2$، $t = \pi/2\omega$، یا $t = \sqrt{LC}\,\pi/2$ رخ می‌دهد و برابر با $V_{\max}\omega$ است.




**تصویر ۱۷-۸: مفهوم RRRV در بانک‌های خازنی**

## ۱۷-۵- مدارشکن‌های مخصوص خازن

مدارشکن‌های مخصوص خازن باید قابلیت‌های بیشتری نسبت به مدارشکن‌های عادی داشته باشند. باید به موارد زیر توجه کرد:

### ۱۷-۵-۱- ولتاژ نامی

برای ولتاژ نامی خازن باید یک ضریب در نظر گرفت. می‌توان این ضریب را ۱/۱ اختیار کرد، زیرا خازن‌ها می‌توانند تا ۱۰ درصد بالاتر از ولتاژ نامی را به طور پیوسته تحمل کنند.

### ۱۷-۵-۲- خطا در ظرفیت خازن

برای خطای احتمالی در ظرفیت خازن (مشکل در ساخت) می‌توان ضریبی در حدود ۱/۰۵ تا ۱/۱۵ در جریان نامی ضرب کرد.

### ۱۷-۵-۳- جریان هارمونیکی

بانک‌های خازنی در برابر جریان‌های هارمونیکی امپدانس کمی از خود نشان می‌دهند. وقتی بانک‌های خازنی زمین نشده باشند، مسیری برای جریان‌های توالی صفر (هارمونیک‌های مضرب سه) وجود ندارد. در بانک‌های زمین‌شده ضریب ۱/۱ و در بانک‌های زمین‌نشده ضریب ۱/۰۵ برای جریان در نظر می‌گیرند. در صورت عدم دسترسی به اطلاعات بانک، در بانک‌های زمین‌نشده ضریب ۱/۲۵ و در بانک‌های زمین‌شده ضریب ۱/۳۵ فرض می‌شود.

### ۱۷-۵-٤- بانک‌های خازنی ایزوله

اگر جریان هجومی بانک خازنی توسط اندوکتانس منبع و خازن درون بانک محدود شود، آن بانک ایزوله فرض می‌شود. یک بانک را می‌توان ایزوله خواند، اگر ماکزیمم نرخ تغییرات جریان هجومی هنگام برق‌دار کردن بانک از ماکزیمم نرخ تغییرات جریان قطع متقارن تجاوز نکند. مقدار مجاز برابر است با:

$$\left(\frac{di}{dt}\right)_{\max} = \omega\sqrt{2}\left(\frac{\text{rated maximum voltage}}{\text{operating voltage}}\right)I$$

در اینجا $I$ جریان اتصال کوتاه بر حسب آمپر است.

### ۱۷-۵-۵- بانک‌های خازنی مجاور

اگر چند بانک خازنی به یک باس متصل باشند، جریان هجومی بانک‌ها افزایش می‌یابد. در نتیجه برای کنترل این جریان باید تمهیداتی اندیشید.

### ۱۷-۵-٦- جریان هجومی

برق‌دار کردن بانک خازنی و بستن مدارشکن جریان‌های هجومی بزرگی تولید می‌کند. اندازه و فرکانس جریان هجومی تابعی از ولتاژ اعمالی، خازن حاضر در مدار، اندوکتانس مدار، بار درون خازن، لحظهٔ بستن کلید، و مقدار میرایی مدار است. مدارشکن باید قدرت تحمل این جریان هجومی را داشته باشد. این مطلب در مورد کلیدزنی بانک‌های مجاور هم صدق می‌کند. در جدول ۱۷-۲ اندازه و فرکانس جریان هجومی انواع بانک‌های خازنی آمده است. در این جدول $f_S$ فرکانس سیستم، $L_{eq}$ اندوکتانس معادل سیستم، $I_1$ و $I_2$ به ترتیب جریان‌های بانک خازنی ۱ و ۲ با ضریب ۱/۱۵، $I_{SC}$ جریان اتصال کوتاه متقارن در سیستم است.

**جدول ۱۷-۲: اندازه و فرکانس جریان هجومی**

| وضعیت بانک | اندازه و فرکانس |
|---|---|
| بانک ایزوله | $I_{\max} = 1.41\sqrt{I_{SC}I_1}$<br>$f = f_S\sqrt{I_{SC}/I_1}$ |
| برق‌دار کردن همزمان دو بانک روی یک باس | $I_{\max} = 1.747\sqrt{\frac{V}{L_{eq}}\frac{I_1I_2}{I_1+I_2}}$<br>$f\,(kHz) = 9.5\sqrt{f_S\frac{V}{L_{eq}}\frac{I_1+I_2}{I_1I_2}}$ |
| برق‌دار کردن یک بانک (در حضور بانک برق‌دار مشابه) | $I_{\max} = 1.747\sqrt{\frac{V}{L_{eq}}I_1}$<br>$f\,(kHz) = 13.5\sqrt{f_S\frac{V}{L_{eq}I_1}}$ |

**مثال**

در یک سیستم سه‌فاز، ٦۰ هرتز، ۲۳۰ کیلوولتی اتصال کوتاهی در نزدیکی مدارشکن رخ می‌دهد. ماکزیمم ولتاژ restrike دو برابر ولتاژ سیستم و فرکانس طبیعی ولتاژ بازیافت ۱۵ کیلوهرتز است. مقدار RRRV را تخمین بزنید.

**پاسخ**

$$V = 230kV, V_{phase} = 132.8kV$$

$$V_{restrike,\max} = 2 \times 132.8kV \times \sqrt{2} = 376kV$$

$$t = \frac{1}{2 f_n} = \frac{1}{2 \times 15kHz} = 3.33 \times 10^{-5} s$$

$$RRRV = \frac{V_{restrike,\max}}{t} = \frac{376kV}{3.33 \times 10^{-5} s} = 11.28 kV/\mu s$$

### ۱۷-۵-۷- اثرات حالات گذرا بر مدارشکن

حالت‌های گذرایی که در بانک‌های خازنی تولید می‌شود اغلب حاصل اعمالی مانند برق‌دار کردن، بی‌برق کردن، رفع خطا، بستن مجدد، اتصال مجدد نا خواسته (restrike)، مرحلهٔ قبل از اتصال (pre-strike)، سوییچینگ بانک‌های مجاور، و مانند آن است که در فصل ۲۲ برای سیستم‌های ۲۳۰ کیلو ولتی بیان خواهد شد. مدارشکن باید این گذراهای کلیدزنی را تحمل کند. اندازهٔ اضافه‌ولتاژها و TRVها در هر یک از موارد فوق در جدول ۱۷-۳ آمده است. در برخی موارد، ماکزیمم اضافه‌ولتاژ، TRV، و یا فرکانس نوسان بالاتر از حد مجاز است. مقدار قابل قبول برای TRV تقریباً ۲/٤ برابر ولتاژ نامی، و برای فرکانس ٤/۲۵ کیلو هرتز است. بنابراین، ملاحظه می‌کنید که کلیدزنی خازن نیازمند تمهیدات مختلفی برای کنترل اضافه‌ولتاژ، TRV، و فرکانس نوسان است.

**جدول ۱۷-۳: اضافه‌ولتاژها، فرکانس نوسان، و TRV در حالات مختلف کلیدزنی**

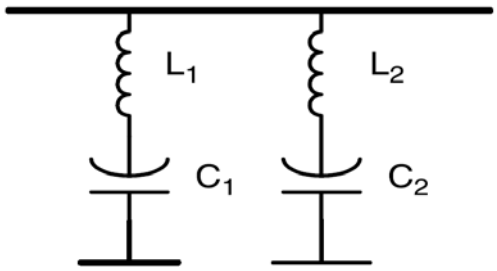
| پدیده | ماکزیمم ولتاژ ( *p.u.* ) | فرکانس (هرتز) | TRV ( *p.u.* ) | نتیجه |
|---|---|---|---|---|
| برق‌دار کردن | 2.1 | 588 | - | قابل قبول |
| بی‌برق کردن | 1 | 0 | 2 | قابل قبول |
| رفع خطا | 2.3 | 5000 | 2.3 | فرکانس نوسان قابل قبول نیست |
| بستن مجدد | 2.5 | 400 | - | ولتاژ قابل قبول نیست |
| Restrike | 3.2 | 400 | 6.4 | ولتاژ و TRV بزرگ هستند |
| Prestrike | 3.28 | - | - | ولتاژ قابل قبول نیست |
| کلیدزنی مجاور | 1.48 | 400 | - | قابل قبول |
| تقویت ولتاژ | 2.1 و 1.6 | - | - | ولتاژ قابل قبول نیست |

### ۱۷-۵-۸- نکات دیگر در مورد حالات گذرای کلیدزنی

در کلیدزنی خازن، ممکن است انتخاب مدارشکنی که همهٔ خواسته‌ها را برآورده کند امکان‌پذیر نباشد. برای محدود کردن جریان‌های اتصال کوتاه و ولتاژهای گذرای نوسانی، از روش‌های کنترلی دیگر مانند راکتور سری، ترانس‌های امپدانس بالا، یا زمین با مقاومت اهمی بالا استفاده می‌شود. راکتور سری را می‌توان در نزدیکی

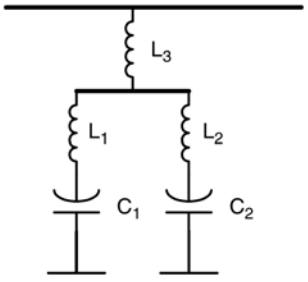
ژنراتورها، باس‌ها، فیدرها، و خازن‌های شانت به کار برد. این روش‌ها مزایا و معایب خود را دارند. استفاده از بانک خازنی برای تصحیح ضریب توان باعث می‌شود که همواره مشکل جریان هجومی به هنگام برق‌دار کردن سیستم وجود داشته باشد. جریان دشارژ بانک نیز وقتی که مدارشکن روی خطا بسته می‌شود حائز اهمیت است. برای محدود کردن این دو جریان، از راکتور سری استفاده می‌کنیم. در اینجا سه روش نصب راکتور سری بحث شده است:

- روش یک: سری کردن یک راکتور با هر بانک خازنی. این روش در تصویر ۱۷-۹ نشان داده شده است. برای محدود کردن اندازهٔ $I_{phase} \times f$ به $2\times10^7$ با هر بانک خازنی یک راکتور سری می‌کنیم.



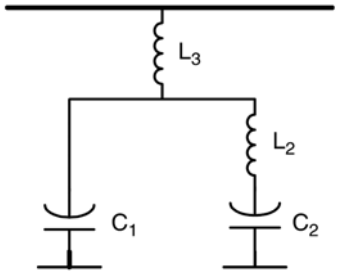

**تصویر ۱۷-۹: دیاگرام مداری روش یک**

- روش دو: نصب راکتور سری در باس و بانک‌های خازنی. این روش در تصویر ۱۷-۱۰ نشان داده شده است. در اینجا راکتورهای نصب شده در بانک‌ها کوچک‌تر هستند و راکتور دیگر در باس برای محدود کردن جریان دشارژ بانک‌ها استفاده می‌شود.




**تصویر ۱۷-۱۰: دیاگرام مداری روش دو**

- روش سه: نصب راکتور برای محدود کردن جریان دشارژ و مدارشکن برای محدود کردن جریان هجومی. در اینجا از راکتور برای محدود کردن جریان دشارژ بانک استفاده می‌شود. برای محدود کردن جریان هجومی، از یک مدارشکن کنترل‌شده یا دارای مدار مقاومت/سلف برای بستن استفاده می‌کنیم. این روش در تصویر ۱۷-۱۱ نشان داده شده است.




**تصویر ۱۷-۱۱: دیاگرام مداری روش سه**

**مثال**

یک مدارشکن برای کلیدزنی بانک خازنی سه‌فاز ۶۰ هرتز، ۳۴۵ کیلوولت انتخاب کنید. سیستم دارای دو بانک ۵۰ مگاواری است و جریان اتصال کوتاه سیستم ۴۰ کیلو آمپر می‌باشد. پارامترهای مدارشکن انتخاب‌شده را با استاندارد مقایسه کنید. در صورت مغایرت، از راکتور مناسب برای محدود کردن جریان اتصال کوتاه و فرکانس نوسان در هنگام سوییچینگ استفاده کنید.

**پاسخ**

مدارشکن باید مناسب بانک ۵۰ مگاواری باشد و از استاندارد ANSI C37.06 تبعیت کند. پارامترهای این مدارشکن عبارتند از:

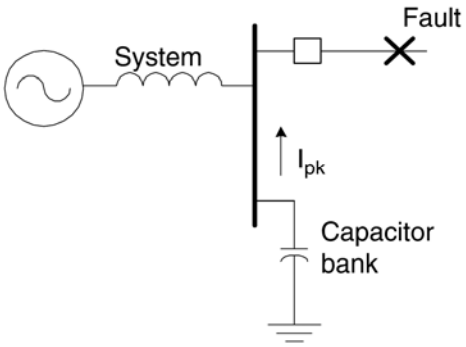
$$V = 345kV, V_{\max} = 345kV \times 1.05 = 362kV$$
$$I_{rated} = 2kA, I_{fault} = 40kA$$
$$V_{\max,lightning} = 1175kV, V_{\max} = 450kV$$
$$V_{\max,switching} = 950kV$$

وقتی در نزدیکی بانک خطا رخ دهد، انرژی بانک امپدانس کوچکی در مسیر خود می‌بیند و با اندازه و فرکانس زیادی در محل خطا تخلیه می‌شود. چنین سیستمی در تصویر ۱۷-۱۲ آمده است. اندازه و فرکانس جریان دشارژ برای بانک مورد مثال از این قرار است:

$$C = \frac{50MVAR}{2\pi \times 60Hz \times (345kV)^2} = 1.11\mu F$$
$$I_{pk} = \frac{V_{peak}}{\sqrt{L_{fault}/C}} = \frac{345kV \times \sqrt{2}/\sqrt{3}}{\sqrt{36\mu H/1.11\mu F}} = 49.5kA$$
$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{fault}C}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{36\mu H \times 1.11\mu F}} = 25.2kHz$$

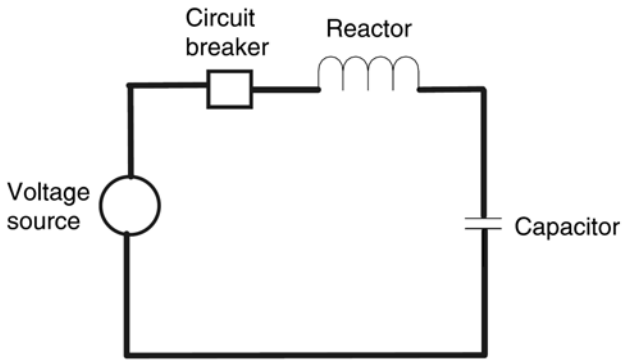
در اینجا فرض شده که کابل فیدر ۲۶ میکرو هانری و بانک خازنی ۱۰ میکرو هانری اندوکتانس داشته باشند. اندازهٔ جریان دشارژ بسیار بزرگ‌تر از مقدار مجاز ذکر شده در استاندارد است (۲۰ کیلوآمپر). فرکانس دشارژ نیز بالاتر از مقدار ۴/۲۵ کیلو هرتز است. بنابراین باید از راکتورهای محدود کنندهٔ جریان استفاده کنیم:

$$L_{\min} = \frac{V_{pk}}{2\pi \times 2 \times 10^7}$$




**تصویر ۱۷-۱۲: خطا در خارج بانک بدون راکتور سری**

حال که راکتور نصب شده است، مسأله را دوباره حل می‌کنیم. مدار معادل این سیستم در تصویر ۱۷-۱۳ آمده است.




**تصویر ۱۷-۱۳: بانک خازنی به همراه راکتور سری**

مقدار راکتور مورد نیاز برابر است با:

$$L_{\min} = \frac{V_{pk}}{2\pi \times 2 \times 10^7} = \frac{345kV \times \sqrt{2}/\sqrt{3}}{2\pi \times 2 \times 10^7} = 2.24mH$$

نزدیک‌ترین راکتور موجود، ۳ میلی‌هانری، انتخاب می‌شود:

$$I_{pk} = \frac{V_{peak}}{\sqrt{L_{fault}/C}} = \frac{345kV \times \sqrt{2}/\sqrt{3}}{\sqrt{3{,}000\mu H/1.11\mu F}} = 5.42kA$$

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{fault}C}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{3{,}000\mu H \times 1.11\mu F}} = 2.76kHz$$

این اندازه و فرکانس برای جریان، پایین‌تر از مقادیر استاندارد هستند. بنابراین مدارشکن برای کلیدزنی چنین بانکی مناسب است. در این مثال ملاحظه می‌شود که راکتور سری می‌توان در محدود کردن اندازه و فرکانس جریان خطا و حفاظت از بانک خازنی مفید باشد.

## ۱۷-۶- مؤخره

در این فصل انواع مدارشکن‌ها بر اساس ولتاژ، سوییچینگ، نصب، و مادهٔ عایقی معرفی شد. بانک‌های خازنی موجود از مدارشکن‌های هوا، روغن، هوای فشرده، خلأ، و $SF6$ استفاده می‌کنند. در بانک های جدید اغلب از مدارشکن‌های خلأ و $SF6$ استفاده می‌شود. این مدارشکن‌ها باید بتوانند شرایط زیر را تحمل کنند:

- مقادیر بالاتر TRV
- وقوع restrike به دلیل انرژی موجود در خازن
- وقوع prestrike در مدارشکن‌های خلأ
- اضافه‌ولتاژ در پست یا ترانس دور دست
- جریان‌های هجومی بزرگ
- اضافه‌ولتاژ به دلیل جریان‌های هجومی و دشارژ
- جریان دشارژ بزرگ به دلیل خطا یا سوییچینگ بانک‌های مجاور
- تقویت ولتاژ در خازن‌های فشار ضعیف به دلیل سوییچینگ بانک‌های خازنی فشار قوی
- گذراهای فرکانس بالا در مدارشکن

بنابراین در بسیاری از موارد مدارشکن به تنهایی نمی‌تواند تمام موارد فوق را تحمل کند. در کلیدزنی بانک‌های خازنی باید تمهیداتی برای این مشکل اندیشید. برخی از راه حل‌های ممکن عبارتند از:

- نصب راکتور سری
- نصب مقاومت در مدارشکن
- بستن کنترل‌شدهٔ مدارشکن
- بستن غیر همزمان کنتاکت‌های مدارشکن
- نصب برق‌گیر برای کنترل اضافه‌ولتاژها
- نصب مناسب بانک خازنی (از روی تجربه)

معمولاً راکتورهای سری در کنترل گذراهای فرکانس بالا بسیار مؤثر هستند (به مثال رجوع کنید). فواید مقاومت‌های مدارشکن در فصل ۲۱ آمده است.

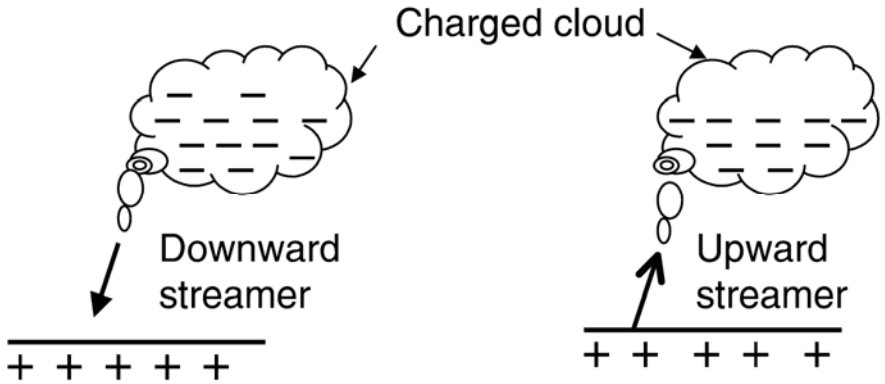
# فصل ۱۸ : حفاظت ضربه

## ۱۸-۱- معرفی

خازن‌های شانت روی تیر و در پست‌ها برای اصلاح ضریب توان نصب می‌شوند. این تجهیزات مانند هر وسیلهٔ دیگری مانند ترانس، مدارشکن، و خط انتقال در معرض ضربه های صاعقه و کلیدزنی هستند. با استفاده از برق‌گیر می‌توان اضافه‌ولتاژهای ناشی از پدیده‌های فوق را محدود کرد. منبع اضافه‌ولتاژها، انواع برق‌گیرها، و نحوهٔ انتخاب و استفاده از برق‌گیرها در این فصل آمده است.

## ۱۸-۲- ضربه های ناشی از صاعقه

از تجمع بخار آب ابر تشکیل می‌شود. با باردار شدن ابر، زمین زیر آن بار مخالف به خود می‌گیرد (تصویر ۱۸-۱). هرگاه اختلاف پتانسیل بین ابر و زمین به حد بحرانی برسد (بیشتر از ولتاژ شکست)، یک شکست بین ابر و نقطه‌ای از زمین رخ می‌دهد. این شکست می‌تواند از زمین به سمت ابر (تصویر ۱۸-۱، سمت راست) یا ابر به سمت زمین (تصویر ۱۸-۱، سمت چپ) شروع شود. در هنگام شکست، صدای شدیدی به نام تندر شنیده می‌شود. در این هنگام جریان بزرگی وارد زمین می‌شود و در اشیاء مجاور ولتاژهای بالایی القاء می‌کند. این اضافه‌ولتاژها می‌تواند باعث خرابی عایق و از کار افتادن تجهیز شود. در تصویر ۱۸-۲، عکس یک صاعقهٔ ابر به زمین را می‌بینید، زیرا قوس در نزدیکی ابر بزرگ‌تر و در نزدیکی زمین کوچک‌تر است.




**تصویر ۱۸-۱: چگونگی تولید صاعقه**

**تصویر ۱۸-۲: عکس یک صاعقهٔ ابر به زمین**

## ۱۸-۳- انواع ضربه های صاعقه

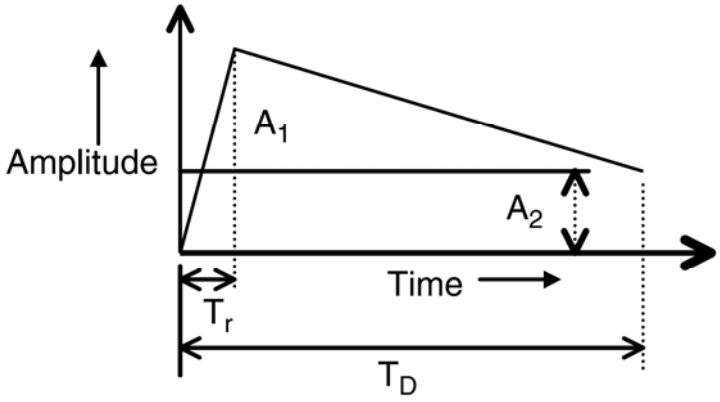
در سیستم قدرت، ضربه های صاعقه به چند دسته تقسیم می‌شوند: ضربهٔ مستقیم، ضربهٔ غیر مستقیم، و ضربهٔ چندگانه.

### ۱۸-۳-۱- ضربهٔ مستقیم صاعقه

در تصویر ۱۸-۲ عکس یک ضربهٔ مستقیم صاعقه را دیدیم. در تصویر ۱۸-۳ بخش‌های مختلف صاعقه را می‌بینیم. در این تصویر، ضربهٔ صاعقه از ابر به زمین است. در عین حال، ضربهٔ بالارونده‌ای از زمین به ابر در حرکت است که در نزدیکی زمین قوی‌تر است. هر دو ضربهٔ بالارونده و پایین‌رونده در بین راه به هم برخورد می‌کنند. صاعقه‌هایی با جریان بیشتر از ده‌ها کیلو آمپر می‌توانند از سیم شیلد خط انتقال گذشته، مستقیماً به فاز برخورد کنند. ساختمان دکل در مقدار ماکزیمم جریان وارد شده به خط تأثیر دارد. شکل موج ضربهٔ یک صاعقهٔ نوعی در تصویر ۱۸-٤ نشان داده شده است. این شکل موج دارای خصوصیات زیر است:

- مقدار پیک (پیشانی موج) برای ۲۵ درصد صاعقه‌ها کمتر از ۱۰ کیلوآمپر، برای ٦۰ درصد صاعقه‌ها کمتر از ۵۰ کیلوآمپر، و برای ۱۱ درصد صاعقه‌ها بین ۵۰ تا ۱۰۰ کیلوآمپر است.
- زمان اوج از ۱ تا ۱۰ میکروثانیه متغیر است.
- زمان تداوم ضربه ($T_D$) از ۱۰ تا ۱۰۰ میکروثانیه متغیر است.

**تصویر ۱۸-۳: بخش‌های مختلف صاعقه**




**تصویر ۱۸-٤: مدل رایج ضربهٔ صاعقه**

اگر صاعقه‌ای مستقیماً به خط برخورد کند، اضافه‌ولتاژ حاصل برابر است با:

$$V = I_S\,(Z/2)$$

در اینجا $I_S$ جریان صاعقه و $Z$ امپدانس ضربه خط است. اگر جریان صاعقه ۵۰ کیلوآمپر و $Z$ حدود ۵۰۰ اهم باشد، اضافه ولتاژ ۲۵ هزار کیلوولت خواهد بود. البته کورونا باعث می‌شود که این اضافه‌ولتاژها به شدت کاهش یابند. به علاوه ضربهٔ مستقیم به خط نادر است.

### ۱۸-۳-۲- ضربهٔ غیرمستقیم

ضربه‌های صاعقه ولتاژی بالا دارند و می‌توانند در زمانی کوتاه چند صد کیلو آمپر جریان تخلیه کنند. ممکن است ضربهٔ صاعقه به سیم نوترال، دکل، یا هادی‌ها برخورد کرده، اضافه‌ولتاژهایی تولید کند که باعث ایجاد جرقه روی عایق‌ها شود. از آنجا که بیشتر جریان به زمین می‌رود، مقاومت زمین زیر دکل اثر زیادی در اضافه‌ولتاژ تولید

شده دارد. این جرقه‌ها باعث ایجاد خطای فاز به زمین می‌شود که باید با مدارشکن برطرف شود. تا وقتی که مدارشکن مجدداً بسته نشود، خط بی‌برق می‌ماند. پارامترهای ضربه‌های غیر مستقیم به شرح زیر است:

- پیک جریان: ۵ تا ۱۰ کیلو آمپر
- نرخ افزایش جریان: ۵ تا ۳۰ کیلوآمپر در هر میکروثانیه
- زمان پیشانی ضربه: ۰/۵ تا ۳۰ میکروثانیه
- زمان فرود: ۲۰ تا ۲۰۰ میکروثانیه

ضربهٔ جریان منتقل‌شده از دکل یا هادی نوترال به هادی فاز، زمان اوج کوتاهی دارد و اندازه‌اش بسیار کوچک‌تر شده، به حدود ۱۰ تا ۲۰ کیلوآمپر می‌رسد. برای رعایت احتیاط هر دو نوع صاعقه (مستقیم و غیر مستقیم) با موج $1.2/50\mu s$ و اندازهٔ یکسان مدل می‌شوند.

### ۱۸-۳-۳- ضربهٔ چندگانه

عکسی از صاعقهٔ چندگانه در تصویر ۱۸-۵ نشان داده شده است. ابر مرکز بار بزرگی دارد و در چند نقطه با زمین قوس زده است. بسیاری از صاعقه‌ها چند ضربه‌ای هستند و بر تجهیزات برقی اثرات بدی می‌گذارند. ضربهٔ چندگانه به دلیل باردار شدن سریع ابر پس از اولین ضربه رخ می‌دهد. گاهی اوقات بین ضربه‌ها فاصلهٔ زمانی وجود دارد. تجهیزاتی مانند برق‌گیر می‌توانند یک ضربهٔ صاعقه را به خوبی تحمل کنند. ضربه‌های بعدی باعث خرابی برق‌گیر می‌شود و بنابراین این نوع صاعقه را نمی‌توان نادیده گرفت.

**تصویر ۱۸-۵: تصویر صاعقهٔ چندگانه از ابر به زمین**

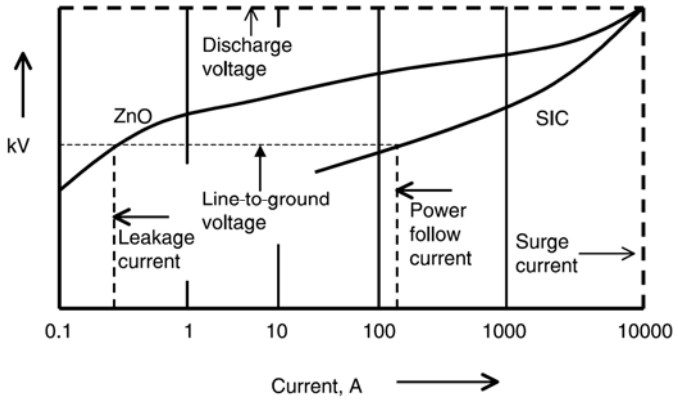
## ۱۸-۴- برق‌گیرها

قبل از دههٔ ۷۰، بیشتر برق‌گیرهای مورد استفاده در صنعت از نوع فاصلهٔ هوایی با کربید سیلیکون بودند. این تجهیزات دارای المان‌های کربید سیلیکون و تعداد فاصلهٔ هوایی هستند. این فاصله‌ها وظیفهٔ حفاظت را بر عهده

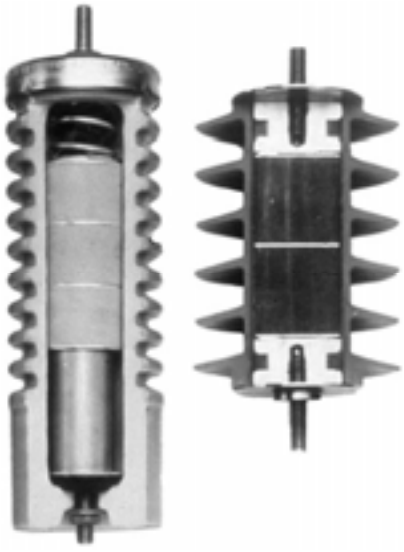
دارند و در صورت وقوع اضافه‌ولتاژهای بزرگ، اتصال کوتاه می‌شوند. عبور از صفر ولتاژ و جریان در یک زمان رخ داده، به فاصلهٔ هوایی اجازه می‌دهد که قوس را خاموش کند.

در یک برق‌گیر از نوع وَریستور با اکسید فلز (MOV)، دیسک‌ها روی همدیگر قرار می‌گیرند و فاصلهٔ هوایی وجود ندارد. دیسک‌های اکسید فلز برق‌گیر را از زمین ایزوله می‌کنند. دیسک از یک نیمه‌هادی مانند اکسید روی است. برق‌گیر در ولتاژ خاصی شروع به هدایت کرده، در ولتاژ خاصی قطع می‌شود. تفاوت‌های عمده میان کربید سیلیکون و MOV عبارتند از:

- در برق‌گیر MOV، فاصلهٔ هوایی وجود ندارد.
- دیسک‌های مورد استفاده در برق‌گیرهای اکسید روی جریان کوچکی در حالت عادی می‌کشند. مشخصهٔ ولتاژ–جریان برق‌گیرهای کربید سیلیکون و MOV در تصویر ۱۸-٦ نشان داده شده است. سطح مقطع برق‌گیر MOV هم در تصویر ۱۸-۷ آمده است.




**تصویر ۱۸-٦: مشخصهٔ ولتاژ–جریان برق‌گیرهای کربید سیلیکون و MOV**



**تصویر ۱۸-۷: سطح مقطع برق‌گیر MOV**

### ۱۸-٤-۱- کلاس‌های برق‌گیر

برای برق‌گیرها سه کلاس مختلف تعریف می‌شود: توزیع، میانی، و پست. برق‌گیرهای توزیع در سیستم‌های توزیع مورد مصرف دارند و برق‌گیرهای میانی و پست در پست‌ها به کار می‌روند. برق‌گیرهای کلاس میانی را می‌توان در پست‌های کوچک‌تر، خطوط کوچک‌تر انتقال، و در ترمینال کابل‌ها به کار برد. برق‌گیرهای پست در پست‌های بزرگ و تجهیزاتی به کار می‌روند که در محیط‌هایی با شیلد نسبی نصب شده‌اند. سطح انرژی این برق‌گیرها با هم متفاوت است. اطلاعات برق‌گیرهای رایج در ضمائم آمده است (۲۵-٤-). برای استفادهٔ صحیح از برق‌گیر باید ماکزیمم ولتاژ در محل و اندازه و مدت زمان اضافه‌ولتاژهای گذرا[1] (TOV) را بدانیم. این اطلاعات باید با ماکزیمم ولتاژ قابل تحمل برق‌گیر به طور دائمی[2] (MCOV) مقایسه شود. پست‌ها و ترانس‌های گازی را می‌توان به برق‌گیرهای گازی مجهز کرد. در سیستم‌های ترابری، برق‌گیرها باید بدنهٔ مستحکمی داشته باشند که لرزش‌های مداوم را تحمل کند. چند برق‌گیر رایج در تصویر ۱۸-۸ آمده است. سطوح ولتاژ برق‌گیرها در جدول ۱۸-۱ فهرست شده است.

**تصویر ۱۸-۸: انواع برق‌گیرها**

**جدول ۱۸-۱: سطوح ولتاژ انواع برق‌گیرها**

| | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| توزیع | 3 | 6 | 9 | 10 | 12 | 15 | 18 | 21 | 24 | 27 | 30 | 36 |
| میانی | 3 | 6 | 9 | 10 | 12 | 15 | 18 | 21 | 24 | 27 | 30 | 36 |
| پست | 3 | 6 | 9 | 10 | 12 | 15 | 18 | 21 | 24 | 27 | 30 | 36 |
| میانی | 39 | 45 | 48 | 54 | 60 | 72 | 90 | 96 | 108 | 120 | - | - |
| پست | 39 | 45 | 48 | 54 | 60 | 72 | 90 | 96 | 108 | 120 | - | - |
| پست | 132 | 144 | 168 | 172 | 180 | 192 | 228 | - | - | - | - | - |

[1] temprorary over-voltage
[2] maximum continuous operatin voltage

این سطوح ولتاژ نوعی هستند، برق‌گیرهایی با سطوح ولتاژ دیگر هم وجود دارند. در کلاس پست، ولتاژهای بالاتر از ۲۲۸ کیلو ولت عبارتند از: ۲٤۰، ۲۵۸، ۲٦٤، ۲۸۸، ۲۹٤، ۳۰۰، ۳۱۲، ۳۳٦، ۳٦۰، ۳۹٦، ٤۲۰، ٤٤٤، و ۵۸۸ کیلو ولت.

### ۱۸-٤-۲- برق‌گیرهای گازی

برای حفاظت از تجهیزات GIS[1] در برابر اضافه‌ولتاژها از برق‌گیرهای دارای اکسید روی استفاده می‌کنند. در این برق‌گیرها محفظه زمین‌شده و با گاز $SF_6$ پرفشار پر شده است. تجهیزات GIS، گذراهای تندی تولید می‌کنند و برق‌گیر باید با موج‌های 8/20μs و 30/60μs که دارای پیشانی موج کمتر از ۱ میکروثانیه هستند، آزمایش شود. این تجهیزات حجیم‌تر از برق‌گیرهای معمولی و گران‌تر هستند.

### ۱۸-٤-۳- برق‌گیرهای پلیمری

برق‌گیرهای فشار قوی در محفظه‌های پرسلینی قرار می‌گیرند. اخیراً با پیشرفت پلیمرها، و مزایای آنها نسبت به پرسلین، از این مواد هم استفاده می‌شود. برق‌گیرهای پلیمری استحکام مکانیکی بیشتری دارند و در صورت بروز خرابی ایمن‌تر هستند. این برق‌گیرها سبک‌تر می‌باشند و در محیط‌های آلوده عملکرد بهتری دارند. نمونهٔ تجاری این نوع برق‌گیرها در تصویر ۱۸-۹ نشان داده شده است.

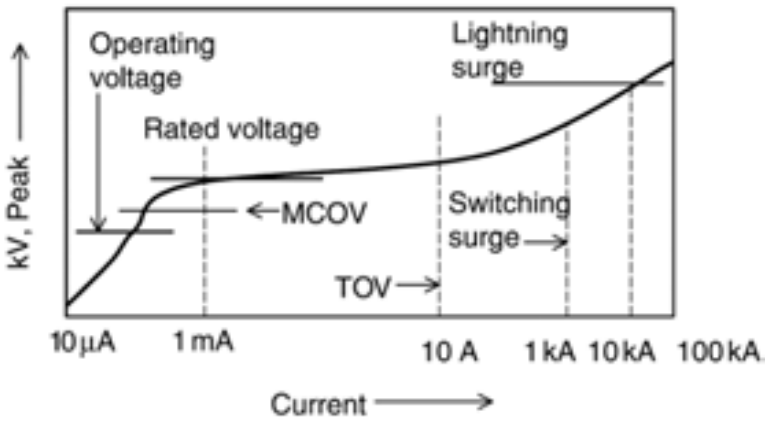
**تصویر ۱۸-۹: نمونهٔ تجاری برق‌گیرهای پلیمری**

[1] Gas Insulated Switchgear

## ۱۸-۵- مشخصهٔ برق‌گیرها

برق‌گیرهای اکسید فلزی مشخصهٔ جریان-ولتاژ غیرخطی دارند. این تجهیزات در ولتاژهای پایین دارای مقاومت بالا و در ولتاژهای بالا هادی‌های خوبی هستند. مشخصهٔ یک برق‌گیر MOV در تصویر ۱۸-۱۰ آمده است. مشخصه‌های مهم این برق‌گیر عبارتند از:

- جریان نشتی کوچک در ولتاژ نامی
- مقدار MCOV (ولتاژ نامی و ولتاژ کاری)
- مقدار TOV و جریانی حدود ۱۰ آمپر
- مقدار ضربه ناشی از کلیدزنی و جریانی حدود ۱ کیلوآمپر
- مقدار ضربه ناشی از صاعقه و جریانی حدود ۱۰ کیلوآمپر



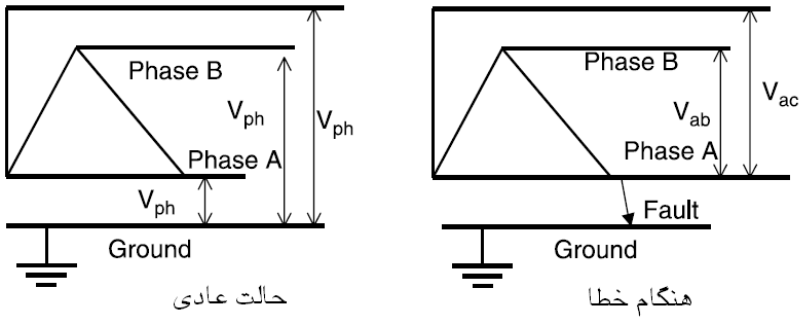

**تصویر ۱۸-۱۰: مشخصهٔ جریان-ولتاژ یک برق‌گیر MOV**

### ۱۸-۵-۱- ولتاژ نامی

ولتاژ نامی یک برق‌گیر به صورت ولتاژ فاز به فاز بیان می‌شود. این ولتاژ باید از ولتاژ سیستم بالاتر باشد تا برق‌گیر افزایش ولتاژ خطا را تحمل کند. ولتاژ نامی برق‌گیر برابر است با ولتاژ فاز به فاز سیستم ضرب در ضریبی که مقدار تغییر در ولتاژ سیستم را نشان می‌دهد.

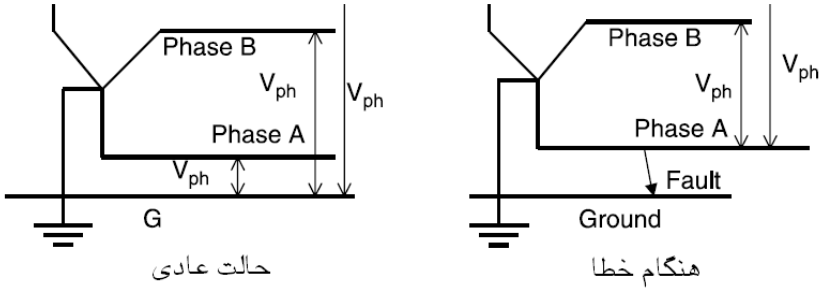
### ۱۸-۵-۲- اضافه‌ولتاژهای گذرا (TOV)

اغلب اضافه‌ولتاژهای گذرا ناشی از افزایش ولتاژ فازهای سالم در هنگام خطای فاز به زمین است. این افزایش ولتاژ بسته به نوع زمین کردن دارد. در یک سیستم با اتصال مثلث، در خطای فاز به زمین ولتاژ فاز به فاز روی فازهای سالم می‌افتد. این وضعیت در تصویر ۱۸-۱۱ نشان داده شده است.

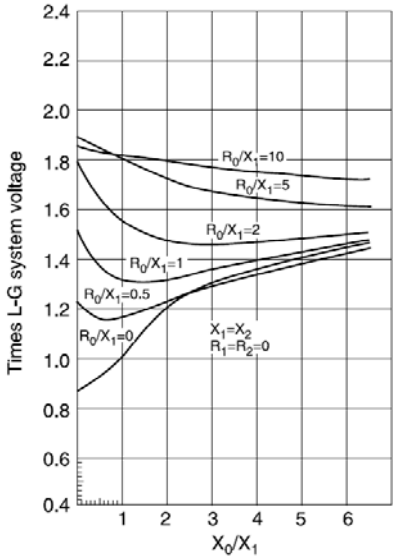



**تصویر ۱۸-۱۱: افزایش ولتاژ در فازهای سالم (اتصال مثلث)**

اگر برق‌گیر بین فاز و زمین وصل شده باشد، ولتاژ روی آن $\sqrt{3}$ برابر ولتاژ فاز خواهد بود. در سیستم‌های اتصال ستارهٔ مستقیماً زمین‌شده، در هنگام خطای فاز به زمین، تنهای ولتاژ فاز روی فازهای سالم می‌افتد (تصویر ۱۸-۱۲). به دلیل باردار شدن خط، اضافه‌ولتاژهای کوچکی در فازهای سالم رخ می‌دهد. این ولتاژها را می‌توان محاسبه کرد و نتایج به طور خلاصه در تصویر ۱۸-۱۳ آورده شده است. با دانستن نسبت‌های $X_0/X_1$ و $R_0/X_1$، می‌توان ضریب گفته شده را به دست آورد.




**تصویر ۱۸-۱۲: افزایش ولتاژ در فازهای سالم (اتصال ستارهٔ زمین‌شده)**




**تصویر ۱۸-۱۳: به دست آوردن ضریب با دانستن $X_0/X_1$ و $R_0/X_1$**

### ۱۸-۵-۳- ماکزیمم ولتاژ قابل تحمل برق‌گیر به طور دائمی (MCOV)

مقدار MCOV در یک برق‌گیر مقدار مؤثر ماکزیمم ولتاژ (با فرکانس اصلی) است که می‌توان به طور دائمی به ترمینال‌های برق‌گیر اعمال کرد. این مقدار حدود ۸٤ درصد ولتاژ نامی برق‌گیر است. مثلاً برای برق‌گیر ۱۰ کیلوولتی، مقدار MCOV برابر با ۸/٤ کیلوولت است. حداقل MCOV مورد نیاز برای یک سیستم زمین‌شده برابر است با ماکزیمم ولتاژ فاز به زمین تقسیم بر $\sqrt{3}$. برق‌گیرهای رایج در شرکت‌های برق در جدول ۱۸-۲ فهرست شده‌اند.

**جدول ۱۸-۲: برق‌گیرهای رایج**

| ولتاژ سیستم (کیلوولت) | | ولتاژ برق‌گیر (کیلوولت) | |
|---|---|---|---|
| نامی | ماکزیمم | مستقیماً زمین‌شده | زمین‌نشده |
| 2.4 | 2.52 | - | 3 |
| 4.16 | 4.37 | 3-4.5 | 6 |
| 4.8 | 5.04 | - | 6 |
| 6.9 | 7.25 | 4.5-5.1 | 9 |
| 12.47 | 13.09 | 9-10 | - |
| 13.2 | 13.86 | 10 | 15-18 |
| 13.8 | 14.49 | 10-12 | 15-18 |
| 20.7 | 21.74 | 15 | - |
| 23 | 24.15 | - | 24-27 |
| 24.9 | 26.15 | 18-21 | - |
| 27.6 | 28.98 | 21-24 | 27-30 |
| 34.5 | 36.23 | 27-30 | 36-39 |
| 46 | 48.3 | - | 48 |
| 69 | 72.45 | 54-60 | 66-72 |
| 115 | 120.75 | 90-96 | 108-120 |
| 138 | 144.9 | 108-120 | 132-144 |
| 161 | 169.05 | 120-144 | 144-168 |
| 230 | 241.5 | 172-192 | 228-240 |
| 345 | 362.25 | 258-312 | - |
| 500 | 525 | 396-444 | - |
| 765 | 803.25 | 588 | - |

در سیستم‌های فوق فشار قوی (۲۳۰ تا ۷٦۵ کیلوولت، ماکزیمم ولتاژ ۱۰ درصد بیشتر از ولتاژ نامی منظور می‌شود.

**مثال**

برای سیستمی زمین‌نشده، ٦۰ هرتز، ۱۳/۸ کیلوولت نیاز به برق‌گیر داریم. برق‌گیر مناسب و MCOV آن را بیابید. اگر سیستم زمین‌شده باشد، ولتاژ برق‌گیر چه خواهد بود؟ ضریب ایمنی ۱/۲ برای اضافه‌ولتاژهای ناشی از خطاهای فاز به زمین انتخاب کنید.

**پاسخ**

در سیستم زمین‌نشده، ولتاژ فاز در زمان خطای فاز به زمین برابر ولتاژ خط است. برق‌گیر اکسید فلز باید ولتاژ ۱۳/۸ کیلوولت را تحمل کند. برق‌گیر را از کلاس پُست انتخاب می‌کنیم.

$$TOV = 13.8kV \times 1.2 = 16.6kV$$

از جدول ۲۵-۹، برق‌گیر مناسب را انتخاب می‌کنیم. ولتاژ ۲۱ کیلوولت و MCOV برابر با ۱۷ کیلوولت مناسب به نظر می‌رسد. بررسی می‌کنیم:

$$MCOV = 21kV \times 0.84 = 17.64kV$$

برق‌گیر مناسب است.

در سیستم‌های زمین‌شده، ماکزیمم ولتاژ در زمان خطای فاز به زمین، ولتاژ فاز است. برق‌گیر باید این ولتاژ را تحمل کند.

$$13.8kV/\sqrt{3} = 7.97kV$$

در اینجا نیز کلاس پست انتخاب می‌کنیم.

$$TOV = 7.97kV \times 1.2 = 9.56kV$$

از جدول ۲۵-۹، برق‌گیر مناسب را انتخاب می‌کنیم. ولتاژ ۱۲ کیلوولت و MCOV برابر با ۱۰/۲ کیلوولت مناسب به نظر می‌رسد.

$$MCOV = 12kV \times 0.84 = 10.08kV$$

### ۱۸-۵-٤- جریان نامی دشارژ

برای شبیه‌سازی جریان دشارژ از یک منحنی مشابه صاعقه با جریان‌های ۱/۵، ۳، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، و ٤۰ کیلوآمپری و موج 8/20μs استفاده می‌شود. پارامترهای توصیه شده عبارتند از:

- جریان ۱۰ کیلوآمپر و بیشتر. اغلب برای حفاظت پست‌های در معرض صاعقه و با ولتاژ بالاتر از ٦٦ کیلوولت استفاده می‌شود.
- جریان نامی ۵ کیلوآمپر. برای حفاظت پست‌های با ولتاژ کمتر از ٦٦ کیلوولت استفاده می‌شود.
- جریان نامی ۳ کیلوآمپر. برای حفاظت پست‌های کوچک که استفاده از جریان‌های بالاتر در آن صرفهٔ اقتصادی ندارد. ولتاژ سیستم در حدود ۲۲ کیلوولت است.
- جریان نامی ۱/۵ کیلوآمپر. برای حفاظت پست‌های روستایی و با ولتاژ کمتر از ۲۲ کیلوولت.

### ۱۸-۵-۵- سطح حفاظتی در برابر پیشانی موج[1] (FOW)

این پارامتر ولتاژ دشارژ جریان ضربهٔ تند (0.6/1.5μs) است. این جریان برای ولتاژهای ۳۹٦ تا ٤٤٤ کیلوولت ۱۵ کیلوآمپر و برای ۵۸۸ کیلوولت ۲۰ کیلوآمپر است. در نتیجهٔ این دشارژ، زمان اوج پیشانی ولتاژ حدود نیم میکروثانیه خواهد بود. از این شکل موج برای محاسبهٔ حاشیهٔ ایمنی سیستم استفاده می‌شود.

[1] front of wave protective level

### ۱۸-۵-٦- سطح حفاظتی در برابر ضربه ناشی از کلیدزنی

ولتاژ ضربه دشارژ برق‌گیر با افزایش جریان زیاد می‌شود. برای هماهنگی از یک جریان دشارژ ۳ کیلوآمپری (45/90μs) در ولتاژهای ٥٤ تا ٥٨٨ کیلوولت و ٥٠٠ آمپر در ولتاژهای ۲/۷ تا ٤٨ کیلوولت استفاده می‌شود.

### ۱۸-۵-۷- ولتاژ ضربهٔ دشارژ (با موج 8/20μs)

ولتاژ دو سر برق‌گیر که ناشی از جریان اجباری است، اغلب در جریان‌های مختلف سنجیده می‌شود.

### ۱۸-۵-۸- اندازهٔ جریان دشارژ

جریان دشارژ گذرنده از برق‌گیر به اضافه‌ولتاژ روی عایق، امپدانس ضربه خط، و نوع زمین‌شدن بستگی دارد. در تجهیزاتی که به طور مناسب شیلد شده‌اند، جریان دشارژ از ۱ تا ۲۰ کیلوآمپر (بسته به ولتاژ سیستم) متغیر است. تقریب مناسب برای جریان دشارژ را می‌توان از رابطهٔ زیر به دست آورد:

$$I_A = \frac{2V_0 - V_A}{Z}$$

در اینجا $V_0$ ۲۰ درصد بیشتر از سطح عایقی خط (کیلوولت)، $Z$ امپدانس ضربه (اهم)، و $V_A$ ولتاژ دشارژ برق‌گیر (کیلوولت) است.

### ۱۸-۵-۹- قابلیت جذب انرژی

دشارژ بانک خازنی روی برق‌گیر باعث ایجاد جریان‌های بزرگ می‌شود. بنابراین قابلیت جذب انرژی در انتخاب برق‌گیر بانک خازنی بسیار مهم است. اگر $V_0$ و $V_a$ به ترتیب ولتاژهای بدون برق‌گیر و با برق‌گیر باشند، انرژی بانک خازنی از این رابطه محاسبه می‌شود:

$$E = \frac{C}{2}\left(V_0^2 - V_a^2\right)$$

بنابراین، قابلیت جذب انرژی موجود در یک برق‌گیر مخصوص بانک خازنی باید به دقت بررسی شود. مقادیر رایج این پارامتر از برق‌گیرها در جدول ۱۸-۳ آمده است.

**جدول ۱۸-۳: قابلیت جذب انرژی برق‌گیر**

| ولتاژ نامی (کیلوولت) | انرژی (کیلوژول بر کیلوولت) |
|---|---|
| 2.7-4.8 | 4 |
| 54-360 | 7.2 |
| 396-588 | 13.1 |

**مثال**

برای سیستمی سه‌فاز، ٦٠ هرتز، ۲۳۰ کیلوولتی می‌خواهیم برق‌گیر مناسب بانک خازنی انتخاب کنیم. قابلیت جذب انرژی برق‌گیر چقدر است؟ (فرض کنید که ولتاژ نامی برق‌گیر ۱۸۰ کیلوولت است)

**پاسخ**

جدول فوق، مقدار انرژی را ۷/۲ کیلوژول بر کیلوولت تعیین می‌کند. کل انرژی در ولتاژ نامی برق‌گیر برابر است با:

$$E = 7.2\,kJ/kV \times 180kV = 1296kJ$$

انرژی در ولتاژ کاری سیستم برابر است با:

$$E = 7.2\,kJ/kV \times \frac{230kV}{\sqrt{3}} = 956.2kJ$$

## ۱۸-۶- مشخصهٔ اضافه‌ولتاژهای گذرا

تجهیزات شبکه در معرض شرایط مختلف مانند اضافه‌ولتاژهای دائمی، گذرا، ضربه ناشی از کلیدزنی و صاعقه قرار می‌گیرند. در بخش ۱۸-۲- اضافه‌ولتاژهای ناشی از صاعقه بحث شد. در اینجا اضافه‌ولتاژهای ناشی از کلیدزنی بیان می‌شود.

### ۱۸-٦-۱- برق‌دار کردن

برق‌دار کردن بانک باعث نوسان در ولتاژ و جریان می‌شود. مثالی از این پدیده در تصویر ۲۲-۲ (فصل ۲۲) آمده است. ماکزیمم اضافه‌ولتاژ ۲/۱ برابر ولتاژ نامی و فرکانس نوسان آن ۵۸۸ هرتز است.

### ۱۸-٦-۲- بی‌برق کردن

بی‌برق کردن بانک خازنی، باعث ظاهر شدن ولتاژ DC در خط باز و مدار خازن می‌شود. مثالی از این پدیده در تصویر ۲۲-٤ (فصل ۲۲) آمده است. شکل موج TRV مربوط در تصویر ۲۲-۵ نشان داده شده است. ماکزیمم ولتاژ TRV در این حالت خاص ۲ برابر ولتاژ نامی است.

### ۱۸-٦-۳- رفع خطا

اغلب خطاها در شبکه از نوع فاز به زمین است. باز کردن مدارشکن‌های دو طرف خطا باعث رفع آن می‌شود. این عمل اضافه‌ولتاژهایی در فازهای سالم و نوسان جریان در فاز دارای خطا تولید می‌کند. مثالی از این پدیده در تصویر ۲۲-۷ (فصل ۲۲) آمده است. شکل موج TRV مربوط در تصویر ۲۲-۸ نشان داده شده است. ماکزیمم ولتاژ TRV در این حالت خاص ۲/۳ برابر ولتاژ نامی است.

### ۱۸-٦-٤- رفع خطا (پشتیبانی)

در هنگام رفع خطا، ممکن است تیغه‌های مدارشکن در هم گیر کرده، باز نشود. در این مواقع، مدارشکن بالادست باید پشتیبانی کرده، خطا را برطرف کند. این رفع خطا مشابه رفع خطای عادی است و به دلیل تأخیر بیشتر اضافه‌ولتاژهای بزرگتری تولید می‌کند.

### ۱۸-٦-٥- بستن مجدد (reslocing)

برای بهبود قابلیت اطمینان سیستم قدرت، مدارشکن‌ها بعد از رفع خطا با تأخیر زمانی کمی مجدداً بسته می‌شوند. این بستن مجدد از بارهای محبوس در خط استفاده می‌کند. اگر برای دشارژ کردن خط یا خازن وسیله‌ای پیش‌بینی نشده باشد، این عمل اضافه‌ولتاژهای بزرگی ایجاد می‌کند. مثالی از این پدیده در تصویر ۲۲-۹ (فصل ۲۲) آمده است. ماکزیمم اضافه‌ولتاژ ۲/۵ برابر ولتاژ نامی و فرکانس نوسان آن ٤۰۰ هرتز است.

### ۱۸-٦-٦- اتصال مجدد نا خواسته (restrike)

هنگام بی‌برق کردن بانک خازنی، اگر TRV بانک خازنی از مقدار ولتاژ قابل تحمل مدارشکن تجاوز کند، قوس بین کنتاکت‌ها دوباره روشن می‌شود. این پدیده که restrike نام دارد، اضافه‌ولتاژهای بزرگی در سیستم تولید می‌کند. نمونهٔ این پدیده در تصویر ۲۲-۱۰ (فصل ۲۲) نشان داده شده است. ماکزیمم اضافه‌ولتاژ ۲/٤ برابر ولتاژ نامی و مقدار TRV حدوداً ٦/٤ برابر ولتاژ نامی است.

### ۱۸-٦-۷- وقوع prestrike

هنگام برق‌دار کردن بانک‌های خازنی، ممکن است پیش از بسته شدن کنتاکت‌های مدارشکن قوس ایجاد شود. این پدیده prestrike نام دارد. در این هنگام، جریان زیادی با فرکانس شبکه تولید می‌شود. در تماس فیزیکی تیغه‌های مدارشکن، گذراهای بسیار بزرگ‌تری نسبت به قبل ایجاد می‌شود. شکل موج ولتاژ و جریان خازن به ترتیب در تصویر ۲۲-۱۳ و تصویر ۲۲-۱٤ (فصل ۲۲) آمده است. ماکزیمم ولتاژ خازن از ۲ برابر ولتاژ نامی به ۳/۲۸ برابر ولتاژ نامی افزایش یافته که باعث عمل کردن برق‌گیر می‌شود.

### ۱۸-٦-۸- برش جریان (chopping)

هنگام بی‌برق کردن یک ترانس بی‌بار، مدارشکن‌ها باید جریان مغناطیسی هسته را قطع کنند. هنگام قطع کردن این جریان‌ها، ولتاژ تا چند برابر ولتاژ نامی افزایش می‌یابد.

### ۱۸-٦-۹- اضافه‌ولتاژهای ماندگار

ممکن است اضافه‌ولتاژها به دلیل شرایط مدار رخ دهند و به مدت طولانی در مدار بمانند. باید این اضافه‌ولتاژها به سرعت برطرف شوند تا تجهیزات آسیب نبینند. این اضافه‌ولتاژها می‌تواند بر اثر عدم پذیرش بار[1] در خط‌های جبران‌شده با خازن شانت، فرورزونانس، و خطای زمین رخ دهد.

### ۱۸-٦-۱۰- فرورزونانس

اضافه‌ولتاژهای ناشی از تعامل ترانس و المان های خازنی شبکه در این بخش قرار می‌گیرند. به طور مثال، فرورزونانس می‌تواند ناشی از باز شدن یک فاز از سه فاز سیستم دارای ترانس ولتاژ اندازه‌گیری باشد. اضافه‌ولتاژ رخ داده در فاز باز شده، بسیار بیشتر از ولتاژ نامی است. این حالت می‌تواند بر اثر سوختن یک فیوز، اشکال در مدارشکن، یا پاره شدن هادی یک فاز رخ دهد. شکل موج‌های ولتاژ در تصویر ١٦-١٤ (فصل ١٦) آمده است. اضافه‌ولتاژها در این حالت ٦٠ درصد بیشتر از ولتاژ نامی است.

### ۱۸-٦-۱۱- خطای زمین

در خطاهای فاز به زمین در سیستم‌های زمین‌شده، ولتاژ در فازهای سالم افزایش می‌یابد. بیشترین اضافه‌ولتاژ ممکن روی فاز سالم ٤٠ درصد بیشتر از ولتاژ نامی است.

## ۱۸-۷- هماهنگی در حفاظت[2]

با دانستن مشخصات سیستم مانند ولتاژ نامی، تعداد فازها، نسبت‌های $X_0/X_1$ و $R_0/X_1$، می‌توان در شش قدم برق‌گیر مناسب را انتخاب کرد:

- دانستن ولتاژ فاز به زمین سیستم
- انتخاب ضریب مناسب در تصویر ۱۸-۱۳ (با دانستن $X_0/X_1$ و $R_0/X_1$)
- مقدار TOV برابر است با ولتاژ فاز ضرب در ضریب فوق. برق‌گیر را انتخاب می‌کنیم.
- باید نسبت MCOV به TOV بزرگتر از واحد باشد.
- حاشیه‌های ایمنی را محاسبه می‌کنیم.
- جریان نشتی برق‌گیر را محاسبه می‌کنیم.

[1] load rejection
[2] protection coordination

با انتخاب برق‌گیر، مشخصهٔ آن مانند MCOV، FOW، سطح حفاظت صاعقه[1] (LPL)، و سطح حفاظت کلیدزنی[2] (SSP) معلوم می‌شود. حال باید TOVهای سیستم با MCOV مقایسه شود. قدرت تحمل عایقی باید معلوم شود؛ که شامل چند پارامتر مانند CWW، BIL، و BSL است. این موارد در زیر بحث می‌شود:

### ۱۸-۷-۱- سطح عایقی BIL

مقدار BIL بر حسب پیشانی موج کلیدزنی بیان می‌شود. این مقادیر که به ولتاژ سیستم بستگی دارد، در جدول ۱۸-٤ فهرست شده است.

### ۱۸-۷-۲- قدرت تحمل بریدگی[3] (CWW)

ولتاژ تحمل بریدگی در موج، مقدار پیشانی موج 1.2/50µs است که به دلیل عملکرد فاصلهٔ هوایی موازی با عایق بریده شده است.

**جدول ۱۸-٤: قدرت عایقی چند تجهیز**

| نام آزمایش | ولتاژ قابل تحمل | نام تجهیز |
|---|---|---|
| پیشانی موج 0.5µs | (1.3-1.5) BIL | ترانس‌ها و راکتورها |
| موج بریده 2µs | 1.29 BIL | مدارشکن‌های ۱۵/۵ کیلوولت به بالا |
| موج بریده 3µs | (1.1-1.15) BIL | ترانس‌ها و راکتورها |
| | 1.15 BIL | مدارشکن‌های ۱۵/۵ کیلوولت به بالا |
| موج کلیدزنی 100×200µs | 0.83 BIL | ترانس‌ها و راکتورها |
| موج کلیدزنی 250×2500µs | (0.63-0.69) BIL | مدارشکن‌های ۳٦۲ تا ۷٦۵ کیلوولتی |

### ۱۸-۷-۳- سطح اولیهٔ عایقی در برابر ضربهٔ کلیدزنی[4] (BSL)

این سطح عایقی بر حسب مقدار پیشانی موج کلیدزنی تعریف می‌شود. این مقدار برای تجهیزات مختلف در جدول ۱۸-٤ آمده است. به فرآیند تطبیق سطوح عایقی با اضافه‌ولتاژ مورد انتظار و خصوصیات برق‌گیر هماهنگی عایقی گفته می‌شود. مقدار هماهنگی با حاشیهٔ حفاظتی[5] سنجیده می‌شود. تعریف این پارامتر به شرح زیر است:

$$\text{Protection Magrgin } (\%) = \left( \frac{\text{Insulation Withstand Level}}{\text{Voltage}} - 1 \right) \times 100$$

در روش سه نقطه‌ای، هماهنگی عایقی برای پیشانی موج، تمام موج، و سطح حفاظتی ضربهٔ کلیدزنی بررسی می‌شود:

[1] lightning protection level
[2] switching surge protective level
[3] chopped wave withstand
[4] basic switching impulse insulation level
[5] protection margin

$$PM_1(\%) = \left(\frac{CWW}{FOW} - 1\right) \times 100$$

$$PM_2(\%) = \left(\frac{BIL}{LPL} - 1\right) \times 100$$

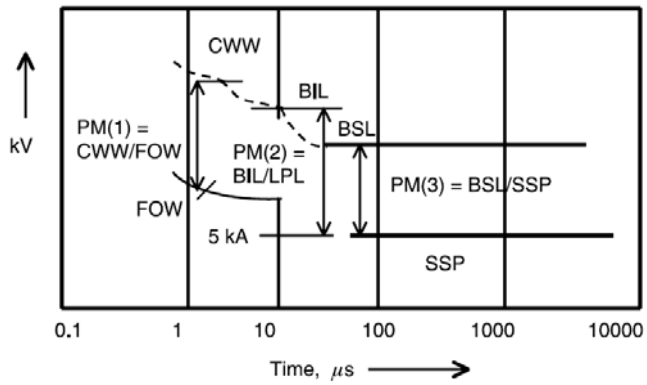
$$PM_3(\%) = \left(\frac{BSL}{SSP} - 1\right) \times 100$$

مقادیر CWW، BIL، و BSL در بالا تعریف شده‌اند. پارامترهای FOW، LPL، و SSP مربوط به برق‌گیر هستند. حاشیه‌های قابل قبول عبارتند از:

$$PM_1 \geq 20\%, PM_2 \geq 20\%, PM_3 \geq 15\%$$

نتایج را می‌توان به صورت گرافیکی (تصویر ۱۸-۱٤) نشان داد. جریان برق‌گیر ($I_A$) از این رابطه به دست می‌آید:

$$I_A = \frac{2V_0 - V_A}{Z}$$




**تصویر ۱۸-۱٤: نمودار هماهنگی برای انتخاب برق‌گیر**

**مثال**

یک بانک سه‌فاز، ٦۰ هرتز، ۱۱۵ کیلوولت، ٦۰ مگاواری احتیاج به حفاظت ضربه دارد. مقدار BIL در بانک ۵۵۰ کیلوولت است. جریان اتصال کوتاه در بانک ۲۲/۷٦ کیلوآمپر است. جریان خطای فاز به زمین نیز ۲۱/۳٤ کیلوآمپر است. اضافه‌ولتاژ لازم برای شکست روی عایق ٦۱۰ کیلوولت است. امپدانس ضربه برابر با ۳۷۵ اهم می‌باشد. سیستم زمین‌شده است. برق‌گیر مناسب برای این بانک را انتخاب کنید.

**پاسخ**

توان پایه را ۱۰۰ مگاولت‌آمپر انتخاب می‌کنیم:

$$I_{base} = \frac{100MVA}{\sqrt{3} \times 115kV} = 502A$$

$$I_{SC,3\phi} = \frac{22.76kA}{502A} = 45.33p.u.$$

$$I_{SC,1\phi} = \frac{21.34kA}{502A} = 42.51p.u.$$

$$X_1 = \frac{1}{45.33 p.u.} = 0.0221 p.u.$$

$$I_{SC,1\phi} = \frac{3E}{X_0 + 2X_1} \Rightarrow X_0 = 0.0264 p.u.$$

$$\frac{X_0}{X_1} = \frac{0.0264}{0.0221} = 1.2$$

فرض می‌کنیم که نسبت $X_0/R_0$ برای این سیستم ۳۰ باشد.

$$R_0 = \frac{0.0264}{30} = 0.0009 p.u.$$

$$\frac{R_0}{X_1} = \frac{0.0009}{0.0221} = 0.04$$

از تصویر ۱۸-۱۳، ضریب $K$ را می‌خوانیم.

$$K = 1.18, V = 115kV, V_{phase} = \frac{115kV}{\sqrt{3}} = 66.4kV$$

$$TOV_{\max} = 66.4kV \times 1.18 = 78.35kV$$

برق‌گیری با ولتاژ ۱۰۸ کیلوولت و MCOV برابر با ۸٤ کیلوولت انتخاب می‌کنیم.

$$FOW = 279kV, LPL = 254kV, SSP = 202kV$$

$$BIL = 550kV, CWW = 605kV, BSL = 465kV$$

$$\frac{MCOV}{TOV_{\max}} = \frac{84kV}{78.35kV} = 1.07$$

نسبت محاسبه شده بزرگ‌تر از واحد و قابل قبول است. حاشیه‌های حفاظتی را محاسبه می‌کنیم:

$$PM_1 = \frac{605}{279} - 1 = 1.16 p.u.$$

$$PM_2 = \frac{550}{254} - 1 = 1.16 p.u.$$

$$PM_3 = \frac{465}{202} - 1 = 1.30 p.u.$$

حاشیه‌ها قابل قبول هستند. محاسبهٔ جریان برق‌گیر:

$$V_A = 202kV, Z_S = 375\Omega, FLV = 610\Omega$$

$$I_A = \frac{2 \times 1.2 \times 610 - 202}{375} = 3.36kA$$

برق‌گیر ۱۰ کیلوآمپری برای این مورد مناسب است.

### ۱۸-۷-٤- مکان‌یابی برق‌گیر

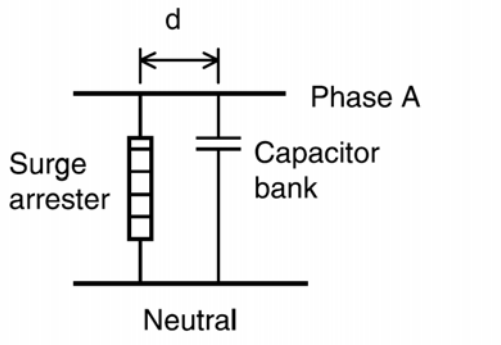
همواره سعی می‌شود که برق‌گیر تا حد امکان به تجهیز مورد نظر نزدیک‌تر باشد. در پست‌های شیلد شده، که احتمال برخورد مستقیم صاعقه ناچیز است، امپدانس ضربه جریان دشارژ را محدود می‌کند. بنابراین، گاهی اوقات

می‌توان از یک برق‌گیر برای حفاظت چند تجهیز استفاده کرد. در پست‌های شیلد نشده، برق‌گیرها باید در ترمینال تجهیز مورد نظر نصب شوند.

گاهی اوقات نصب برق‌گیر در ترمینال تجهیز ممکن نیست. در چنین مواردی، از کابلی به طول معلوم، برای اتصال برق‌گیر به ترمینال تجهیز استفاده می‌شود. نمونهٔ این اتصال با طول d در تصویر ۱۸-۱۵ آمده است. اندازهٔ موج سیار وارد شده به پست در محل برق‌گیر تا ولتاژ دشارژ کاهش می‌یابد. وقتی که برق‌گیر با کابل از تجهیز فاصله داشته باشد، ولتاژ در محل تجهیز بالاتر از ولتاژ برق‌گیر خواهد بود. اندازهٔ ولتاژ تجهیز ($V_t$) در فاصلهٔ $d$ از برق‌گیر از این رابطه به دست می‌آید:

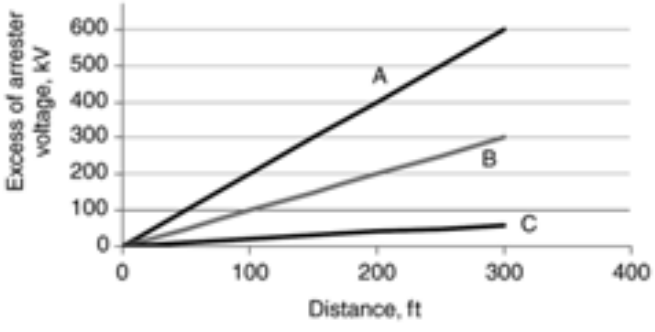
$$V_t = V_a + 2\frac{de}{dt}\frac{d}{1000}$$

در اینجا $V_a$ ولتاژ دشارژ برق‌گیر (کیلوولت)، $de/dt$ نرخ افزایش پیشانی موج (کیلوولت بر میکروثانیه)، و $d$ اندازهٔ کابل (فوت) است.




**تصویر ۱۸-۱۵: اتصال برق‌گیر با کابل به طول d**

رابطهٔ میان فاصلهٔ برق‌گیر از تجهیز و ولتاژ تجهیز در تصویر ۱۸-۱۶ آمده است. در این تصویر موج‌های ورودی به تجهیز با مقادیر مختلف پیشانی موج ($A = 1000\,kV/\mu s, B = 500\,kV/\mu s, C = 100\,kV/\mu s$) نشان داده شده است. به علاوه، ممکن است به دلیل نوسان‌های ناشی از اندوکتانس کابل، ولتاژ بیشتری روی تجهیز بیفتد.




**تصویر ۱۸-۱۶: تأثیر فاصله بر ولتاژ تجهیز**

**مثال**

برق‌گیری در فاصلهٔ $d$ فوتی از یک بانک خازنی ٤٠ مگاواری است. مقدار BIL در بانک ٥٥٠ کیلوولت است. موج سیاری با نرخ افزایش ٦٠٠ کیلوولت بر میکروثانیه به برق‌گیر می‌رسد. ولتاژ دشارژ برق‌گیر ٢٨٠ کیلوولت است. در دو حالت زیر بررسی کنید که آیا برق‌گیر قادر به محافظت از بانک می‌باشد؟

١. $d = 20\,ft$

٢. $d = 300\,ft$

**پاسخ**

حالت اول:

$$V_a = 280kV, \frac{de}{dt} = 600\,kV/\mu s$$

$$V_t = 280 + 2\left(600\,kV/\mu s\right)\frac{20\,ft}{1000} = 304kV$$

مقدار BIL در بانک ٥٥٠ کیلوولت است، بنابراین مشکلی برای بانک پیش نمی‌آید.

حالت دوم:

$$V_t = 280 + 2\left(600\,kV/\mu s\right)\frac{300\,ft}{1000} = 640kV$$

در این حالت، حفاظت بانک رضایت‌بخش نیست، زیرا ولتاژ ورودی از BIL تجاوز می‌کند.

### ١٨-٧-٥- اثر حالت‌های گذرا بر برق‌گیر

لازم است که اثر اضافه‌ولتاژهای گذرای ناشی از کلیدزنی‌ها بر برق‌گیر بررسی شود. در فصل ٢٢ (خلاصه در جدول ١٨-٥) انواع ضربه های کلیدزنی بحث می‌شود. در حالت‌های ذیل، ماکزیمم اضافه‌ولتاژها، TRV، و فرکانس نوسان‌ها شناسایی شده است. در برخی موارد، ماکزیمم اضافه‌ولتاژ، TRV، و یا فرکانس نوسان فراتر از حد مجاز است. مقدار مجاز TRV برابر با ٢/٤ پِر یونیت و فرکانس نوسان ٤/٢٥ کیلوهرتز است. بنابراین، ملاحظه می‌شود که کلیدزنی خازن در بعضی موارد تولید اضافه‌ولتاژ می‌کند و برق‌گیر وادار به عمل می‌شود. ولی، در برخی موارد که اضافه‌ولتاژها بزرگ است، باید عملکرد برق‌گیر بررسی شود. در صورت هدایت مداوم، برق‌گیر سرانجام از کار خواهد افتاد.

## ١٨-٨- مؤخره

برق‌گیر در شبکه برای حفاظت از ضربه استفاده می‌شود. ضربه‌های ناشی از صاعقه و کلیدزنی باعث اضافه‌ولتاژ می‌شوند. مشخصه‌های مهم برق‌گیرهای وَریستور اکسید فلز در این فصل بررسی شد. روش انتخاب برق‌گیر برای محافظت از بانک خازنی با یک مثال نشان داده شد. اثرات کلیدزنی‌های مختلف بر برق‌گیر بحث شد. اثر دوری برق‌گیر از تجهیز نیز نشان داده شد.

**جدول ۱۸-۵: اضافه‌ولتاژها، فرکانس نوسان، و TRV**

| توصیف | ولتاژ ماکزیمم ( *p.u.* ) | فرکانس (هرتز) | TRV ( *p.u.* ) | توضیح |
|---|---|---|---|---|
| برق‌دار کردن | 2.1 | 588 | - | برق‌گیر هدایت می‌کند |
| بی‌برق کردن | 1 | 0 | 2 | قابل قبول |
| رفع خطا | 2.3 | 5000 | 2.3 | فرکانس بالا است |
| بستن مجدد | 2.5 | 400 | - | ولتاژ قابل قبول نیست |
| Restrike | 3.28 | - | - | ولتاژ و TRV قابل قبول نیست |
| Prestrike | 3.28 | - | - | ولتاژ قابل قبول نیست |
| بانک‌های مجاور | 1.48 | 400 | - | قابل قبول |
| تقویت ولتاژ | 2.1, 1.6 | - | - | برق‌گیر هدایت می‌کند |

# فصل ۱۹ : نگهداری و عیب‌یابی

## ۱۹-۱- معرفی

برای عملکرد صحیح بانک خازنی، باید ولتاژ فازها و جریان عبوری از شبکه متعادل باشد. هرگونه عدم تعادل در ولتاژها یا جریان‌ها نشان‌دهندهٔ مشکلی در سیستم است. هارمونیک در ولتاژ و جریان در هر نقطه را می‌توان با تحلیلگرهای شبکه (آنالایزر هارمونیکی) اندازه‌گیری کرد.

## ۱۹-۲- نگهداری

بانک‌های خازنی به ندرت به نگهداری نیاز دارند، زیرا قطعهٔ متحرکی ندارند. ولی باید مرتباً بانک‌های خازنی از نظر تهویه، فیوزها، دمای محیط، ولتاژ فازها، جریان فازها، و تمیزی و عدم وجود گرد و غبار بررسی شوند. این بررسی‌ها شامل بررسی اولیه، نگهداری و تعمیر قبل از برق‌دار کردن، بازرسی دوره‌ای، و اندازه‌گیری‌های مربوط است.

### ۱۹-۲-۱- بازرسی و نگهداری

باید هنگام نصب، بازرسی، و نگهداری از خازن‌ها از استانداردهای ایمنی تبعیت کرد. به علاوه، رویه‌های خاصی در مورد بانک‌های خازنی وجود دارد که برای ایمنی پرسنل و تجهیزات بر اساس NEC رعایت شود. برخی از این موارد عبارتند از:

*شارژ خازن و اتصال زمین*

بعد از بی‌برق شدن بانک، خازن‌ها هنوز باردار هستند. بنابراین، قبل از دست زدن به بانک حداقل ۵ دقیقه صبر کنید تا مقاومت خازن‌ها وقت کافی برای دشارژ کردن آنها داشته باشند. این مقاومت‌ها در عرض ۵ دقیقه ولتاژ خازن را به کمتر از ۵۰ ولت می‌رسانند. ولی، سیم زمین باید به هر سه فاز متصل شود تا بانک خازنی اتصال کوتاه و زمین شود. در پست‌های بزرگ‌تر باید از کلیدهای اتصال زمین استفاده کرد. توصیه می‌شود حتی بعد از زمین کردن، خازن‌ها تک به تک اتصال کوتاه و زمین شوند. سپس پرسنل می‌توانند به خازن‌ها نزدیک شوند. به این ترتیب هیچ گونه باری در آنها باقی نمی‌ماند.

*یونیت‌های خازنی متورم‌شده*

یکی از نشانه‌های خرابی خازن متورم شدن بدنهٔ آن است. بدنهٔ متورم نشان دهندهٔ افزایش فشار داخلی ناشی از گرمای زیاد و تولید گاز به دلیل قوس احتمالی است. باید با این یونیت‌ها به احتیاط برخورد کرد. سازندهٔ خازن‌ها باید در مورد نحوهٔ رفتار با یونیت‌های متورم راهنمایی کند.

*نشتی از یونیت‌های خازنی*

یکی دیگر از نشانه‌های خرابی خازن، نشت به دلیل خرابی بدنه است. باید احتیاط کرد که این ماده با پوست تماس پیدا نکند و نکات ایمنی رعایت شود که با نقاط حساس مانند چشم‌ها برخورد نکند. برخورد و معدوم کردن این مواد باید طبق استاندارد انجام شود. برخی خازن‌ها حاوی مواد آتش‌زا هستند و باید با احتیاط با آنها برخورد کرد.

*برق‌دار کردن مجدد بانک خازنی*

برای برق‌دار کردن مجدد باید اطمینان حاصل شود که اتصالات زمین که به منظور تعمیر و نگهداری نصب شده بودند، برداشته شوند. بین بی‌برق کردن و برق‌دار کردن بانک دست کم ۵ دقیقه زمان در نظر بگیرید تا انرژی ذخیره در آن کاملاً تخلیه شود.

*بررسی اولیه و مراحل برق‌دار کردن*

در بررسی اولیه و قبل از برق‌دار کردن بانک خازنی باید به نکات زیر توجه کرد:

- از اتصالات مکانیکی بانک، حریم لازم بر اساس استاندارد، و استحکام سازه اطمینان حاصل شود.
- بهتر است ظرفیت بانک اندازه‌گیری شود و نتایج برای مقایسه‌های بعدی نگهداری شود.
- اتصالات الکتریکی برای اطمینان از نصب صحیح و برقراری اتصال الکتریکی مناسب بررسی شود. همهٔ ترمینال‌ها محکم باشند. فیوزها تک به تک بررسی شوند تا از محکم بودن آنها اطمینان حاصل شود.
- همهٔ عایق‌ها، فیوزها، و بوشینگ‌ها تمیز شوند تا احتمال قوس زدن کاهش یابد. همهٔ عایق‌های پرسلینی از نظر ترک و شکستگی بررسی شود.
- همهٔ سوییچ‌های قطع، وصل، و زمین، و همهٔ کنترل‌ها قبل از برق‌دار کردن بانک بررسی شوند.
- قبل از برق‌دار کردن بانک، ظرفیت هر فاز اندازه‌گیری و با مقادیر مورد استفاده برای تنظیم رله‌ها مقایسه شود. عدم تعادل در ظرفیت‌ها نباید بیش از ۱۰ درصد اضافه‌ولتاژ روی یونیتی بیندازد.
- بلافاصله بعد از برق‌دار کردن، باید مقدار افزایش ولتاژ اندازه‌گیری شده، با مقدار محاسبه شده مقایسه شود. در ضمن، ولتاژ فازها، جریان، و توان راکتیو بانک اندازه‌گیری شود تا در محدودهٔ مجاز باشد. حدود ۸ ساعت بعد از برق‌دار کردن، بانک برای فیوز سوخته، یونیت‌های متورم، و تعادل جریان بررسی شود.

*بازرسی دوره‌ای، اندازه‌گیری، و نگهداری*

بانک‌های خازنی پست و توزیع باید به طور دوره‌ای بازرسی شوند و پارامترهای آنها اندازه‌گیری شود. تناوب این بازرسی‌ها بستگی به موارد مختلفی مانند شرایط محیط و نوع کنترلر (رگولاتور) درون بانک دارد.

*بازرسی چشمی*

بازرسی چشمی بانک خازنی به منظور یافتن فیوزهای سوخته، نشت در بانک، بدنه‌های متوره، تغییر رنگ در بدنه، و سوراخ شدن بدنه انجام می‌شود. در این بازرسی‌ها، سطح زمین برای یافتن اثرات دی‌الکتریک، سطح

عایق‌ها برای یافتن آلودگی، نشانه‌های گرمای زیاد در بست‌های الکتریکی، سوییچ‌های باز، و تریپ دادن ادوات حفاظتی بررسی می‌شوند. دوربین‌های مادون قرمز برای یافتن نقاط داغ در اتصالات و سطوح بسیار مناسبند و این اطلاعات را می‌توان برای مراجعه‌های بعدی ذخیره کرد. بانک‌های خازنی روی تیر باید از نظر زنگ‌زدگی هم بررسی شوند.

*بازرسی ظاهری و اندازه‌گیری*

این بازرسی به منظور یافتن اتصالات شُل، گرمای زیاد در سیم‌های رابط، و تیوپ‌های فیوز خراب انجام می‌شود. فیوزها باید از نظر گرما و دیگر خرابی‌ها بررسی شوند. ادوات حفاظتی باید از نظر صحیح بودن تنظیمات مانند جهت ترانس جریان و ولتاژ بررسی شوند. ظرفیت بانک اندازه‌گیری شده، با اندازه‌گیری‌های قبلی مقایسه می‌شود.

### ۱۹-۲-۲- مشکلات اندازه‌گیری در محل

انجام اندازه‌گیری در محل بانک‌های خازنی مشکلات خاص خود را دارد:

- دسترسی به تجهیز. بانک‌های خازنی معمولاً در پست‌های روی رَک نصب می‌شوند. دسترسی به خازن‌ها برای انجام اندازه‌گیری نیازمند نردبان‌های بلند است. فضای این بانک‌ها محدودیت دارد.
- اتصالات ترمینال‌ها. برای انجام اندازه‌گیری در بانک، باید ترمینال‌ها را قطع کرد. این عمل در بانک‌های نصب‌شده توصیه نمی‌شود. اگر بعد از اندازه‌گیری ترمینال‌ها به درستی نصب نشوند، مشکلات بیشتری پیش می‌آید.
- محیط اندازه‌گیری. در پست‌ها ولتاژهای القایی الکترواستاتیک و القای الکترومغناطیسی دیگر تجهیزات مانند باس‌ها وجود دارد. به همین دلیل، ممکن است اندازه‌گیری‌های انجام شده در پست دقیق نباشند.
- تعدد یونیت‌ها. در بانک‌های خازنی تعداد یونیت‌های سری و موازی گاهی از صد عدد تجاوز می‌کند. اندازه‌گیری و عیب‌یابی تک تک آنها کاری خسته‌کننده و زمان‌بر است.
- اندازه‌گیری‌های قبلی. اغلب اندازه‌گیری ظرفیت در کارخانهٔ تولید کننده انجام می‌شود و نتایج در محلی نگهداری می‌شوند. ممکن است این اطلاعات به سادگی در دسترس پرسنل نگهداری قرار نگیرد تا به منظور مقایسه استفاده شود.

### ۱۹-۲-۳- روش‌های اندازه‌گیری

تجهیزات اندازه‌گیری بسیاری برای اندازه‌گیری ظرفیت خازن‌ها وجود دارند. اغلب این تجهیزات بسیار حساس و مناسب کار برای indoor هستند. این تجهیزات به دسته‌های زیر تقسیم می‌شوند:

- مخصوص آزمایشگاه. این نوع تجهیزات بسیار حساس هستند و از دقت بالایی برخوردارند. این تجهیزات به دلیل حساسیت و نیاز به قطعات زیاد، اغلب قابلیت جابه‌جا شدن محدودی دارند. این تجهیزات در کارخانهٔ تولید کننده یا آزمایشگاه نصب می‌شوند.
- دستگاه‌های اندازه‌گیری دستی. این تجهیزات کوچک و فشار ضعیف هستند که با باتری کار می‌کنند و برای اندازه‌گیری ظرفیت در شرایط مختلف مناسب هستند. برخی از این دستگاه‌ها می‌توانند تلفات خازن را تا دقت نیم درصد اندازه‌گیری کنند. دستگاه اندازه‌گیری ظرفیت خازن می‌تواند ظرفیت خازن را در محل اندازه‌گیری کند. نمونهٔ این دستگاه در تصویر ۱۹-۱ آمده است. این تجهیز مانند یک مولتی‌متر می‌تواند مقاومت، اندوکتانس، و کاپاسیتانس را اندازه‌گیری کند. ظرفیت قابل اندازه‌گیری این دستگاه از ۲۰ نانو فاراد تا ۲۰۰ میلی‌فاراد است. این محدوده برای اندازه‌گیری خازن‌های اصلاح ضریب توان مناسب است.

**تصویر ۱۹-۱: نمونهٔ تجاری دستگاه اندازه‌گیری ظرفیت خازن**

- تجهیزات پست. این تجهیزات برای اندازه‌گیری مستقیم ظرفیت خازن و بدون نیاز به باز کردن ترمینال‌ها مناسب است. ولتاژ کوچکی به گروه خازن‌های مورد نظر داده می‌شود. یک انبر جریان[1] روی بوشینگ خازن مورد نظر قرار می‌گیرد و ظرفیت به وسیلهٔ تجهیز محاسبه می‌شود. با این وجود تکرار این آزمایش دشوار و دقت آن پایین (۲ تا ۵ درصد) است که برای خازن‌های فیوز داخلی و خازن‌های بدون فیوز مناسب نیست.
- دوربین مادون قرمز. دوربین اشعه مادون قرمز وسیله‌ای مناسب برای اندازه‌گیری دمای اتصالات و دیگر قطعات حساس پست است. دوربین مادون قرمز می‌تواند از میزان اشعه مادون قرمز تشعشع‌شده دمای اجسام را اندازه‌گیری کند. اشعهٔ مادون قرمز درون بخش نامرئی طیف الکترومغناطیس قرار می‌گیرد و ما آن را به

[1] Current Clamp

صورت گرما احساس می‌کنیم. حتی اجسام سرد مانند قطعات یخ از خود مادون قرمز ساطع می‌کنند. با افزایش دمای جسم ابن مقدار تشعشع بیشتر می‌شود. با دوربین‌های مادون قرمز می‌توان بدون هر گونه تماس با جسم مورد نظر تصویری از امواج مادون قرمز ساطع‌شده از آن تهیه کرد. در بسیاری از تجهیزات، قبل از خرابی حرارت زیادی تولید می‌شود و با استفاده از چنین دوربینی می‌توان خرابی آنها را پیش‌بینی کرد. نمونهٔ این دوربین در تصویر ۱۹-۲ آمده است. این دوربین می‌تواند تصاویری با فرمت JPEG تولید کند.

**تصویر ۱۹-۲: نمونهٔ تجاری یک دوربین مادون قرمز**

## ۱۹-۳- عیب‌یابی

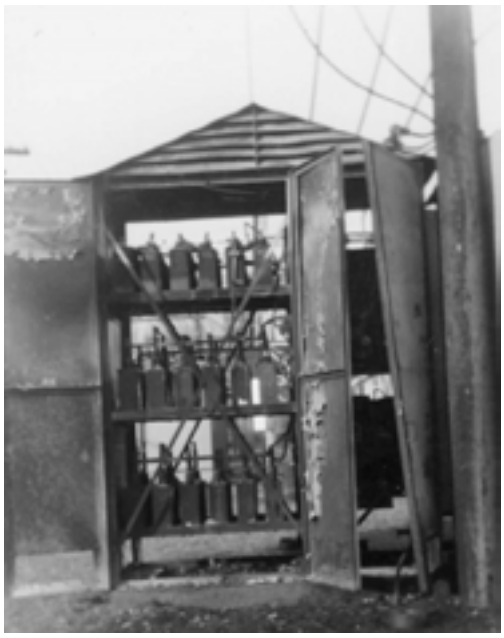
برخی از مشکلات بانک‌های خازنی به خوبی شناخته شده‌اند. در برخی موارد یافتن مشکل و منشأ آن دشوار است. در بسیاری موارد خرابی باعث انفجار خازن یا آتش‌سوزی می‌شود. نمونهٔ آتش‌سوزی در یک بانک خازنی در تصویر ۱۹-۳ آمده است. عوامل خرابی بانک خازنی در اینجا آورده شده است:

*اضافه‌ولتاژ*

در بانک‌های خازنی فیلتردار، خازن‌ها به صورت سری با القاگرها قرار دارند. در برخی موارد، ولتاژ روی خازن‌ها از مقدار مجاز فراتر می‌رود. در این صورت، بانک خازنی آسیب می‌بیند. به مثال زیر توجه کنید.

**مثال**

در یک بانک خازنی سه‌فاز، ٦٠ هرتز، ١٣/٨ کیلوولتی یک فیلتر برای هارمونیک دوم نصب شده است. امپدانس راکتور و خازن نصب شده به ترتیب ٤/٥ و ١٧/٧ اهم در ٦٠ هرتز است. بانک خازنی شامل ٢١ یونیت ٤٠٠ کیلوواری، ٩/٩٦ کیلوولتی تک‌فاز در هر فاز است که با هم موازی شده‌اند. بانک با اتصال ستاره نصب شده و زمین نشده است. آیا این بانک کفایت می‌کند؟



**تصویر ۱۹-۳: آتش‌سوزی در یک بانک خازنی**

**پاسخ**

$$Q_{cap} = 400kVAR, V_{cap} = 9.96kV$$

$$V_{sys} = 13.8kV, V_{phase} = \frac{13.8kV}{\sqrt{3}} = 7.97kV$$

ولتاژ خازن‌ها کافی به نظر می‌رسد.

$$X_L = 4.5\Omega, X_C = 17.7\Omega$$

$$Q = \frac{V^2}{X_C - X_L} = \frac{(13.8kV)^2}{(17.7 - 4.5)\Omega} = 14.42MVAR$$

$$I = \frac{Q}{\sqrt{3} \times V} = \frac{14.42MVAR}{\sqrt{3} \times 13.8kV} = 603A$$

$$V_L = I \times X_L = 603A \times 4.5\Omega = 2.71kV$$

$$V_C = I \times X_C = 603A \times 17.7\Omega = 10.67kV$$

$$V_{\max} = 1.1 \times V_{cap} = 1.1 \times 9.96kV = 10.96kV$$

ولتاژ نامی سیستم ۱۳/۸ کیلوولت و مقدار مجاز اضافه‌ولتاژ ۵ درصد است.

$$1.05 \times 10.67kV = 11.2kV$$

این ولتاژ بیشتر از $V_{\max}$ محاسبه شده است. بنابراین اگر سیستم با ۵ درصد اضافه‌ولتاژ کار کند، بانک خازنی آسیب خواهد دید. ممکن است این طراحی در ابتدا مناسب به نظر برسد، ولی با بررسی بیشتر به اشکالات آن پی می‌بریم.

*سوختن فیوز*

سوختن فیوز می‌تواند به دلیل اتصال کوتاه در یونیت خازنی، اضافه‌جریان ناشی از یک اضافه‌ولتاژ، یا هارمونیک‌ها باشد. تشخیص یونیت خازنی اتصال کوتاه شده با بررسی بدنهٔ خازن انجام می‌شود تا برآمدگی یا ترکیدگی نداشته باشد. برخی اوقات فیوز کوچک‌تر از مقدار مورد نیاز انتخاب می‌شود. اگر محل نصب فیوز مقاومت زیاد داشته باشد، حرارت تولید کرده و فیوز را خراب می‌کند. خرابی فیوز به معنی عمل کردن ناخواستهٔ فیوز است در شرایطی که نمی‌بایست عمل می‌کرد. خرابی فیوز می‌تواند به دلیل کهنگی، استفادهٔ نادرست، و نصب غلط رخ دهد.

**مثال**

برای بانک مثال قبلی، فیوز مدل 40T و ولتاژ ۹/۹۶ کیلوولت استفاده کرده‌ایم. آیا چنین فیوزی مناسب است؟

**پاسخ**

$$Q = 400kVAR, V = 9.96kV$$

$$I = \frac{400kVAR}{9.96kV} = 40A$$

$$I_{fuse} = 40A \times \frac{1.35}{1.5} = 36A$$

فیوز 40T مناسب است. در مثال قبل دیدیم که ولتاژ ماکزیمم ۱۱/۲ کیلوولت خواهد بود. در صورت اضافه‌ولتاژ ۵ درصدی این فیوز هم آسیب خواهد دید. می‌توان ولتاژ بعدی، ۱۵ کیلوولت را انتخاب کرد.

*خرابی ناشی از حرارت زیاد*

خازن‌ها در صورت کار در دمای بالا آسیب می‌بینند. این امر می‌تواند به دلیل دمای بالای محیط، انتقال حرارت از تجهیزات مجاور، یا تلفات زیاد پیش بیاید.

*فرورزونانس*

گاهی بانک‌های خازنی با اندوکتانس ترانس یا منبع تولید فرورزونانس می‌کنند. این امر باعث تولید نوسان‌های میرا نشده در ولتاژ یا جریان، بسته به نوع رزونانس، می‌شود. اگر سیستم میرا نباشد، احتمال خرابی خازن یا ترانس وجود دارد. بررسی احتمال وقوع این خرابی با بررسی سیستم و نه بازرسی چشمی ممکن است.

*هارمونیک‌ها*

هر بار غیرخطی در سیستم مانند کورهٔ قوس یا مبدل‌ها تولید هارمونیک می‌کند. برای کنترل هارمونیک‌ها از فیلتر استفاده می‌شود. اگر فیلترها به خوبی طراحی نشده باشند، جریان هارمونیکی بزرگی وارد بانک خازنی می‌شود که تولید حرارت می‌کند و باعث خرابی خازن می‌شود.

*یونیت‌های خازنی مدارباز*

با اندازه‌گیری در محل می‌توان تشخیص داد که آیا فیوز سوخته یا به دلیل خرابی خازن مدار باز شده است.

*خرابی دی‌الکتریک*

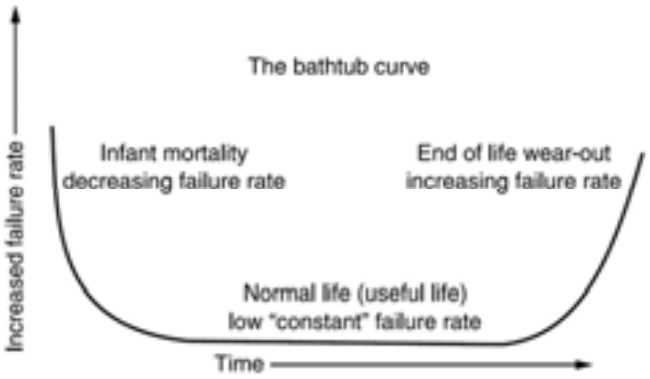
با خرابی یک خازن در یک رشتهٔ سری شده از خازن‌ها، ولتاژ خازن‌های دیگر افزایش می‌یابد. معمولاً اگر اضافه‌ولتاژ از ۱۰ درصد فراتر رود، بانک قطع می‌شود. برای تشخیص این خرابی باید از روش‌های تشخیص عدم تعادل استفاده کرد که به عدم تعادل در سیستم حساس نباشد.

*خطا در تابلو و خرابی عایق*

دو خرابی عمده در بانک‌های خازنی بدون فیوز، خرابی عایق و قوس روی بوشینگ است. اگر یک یونیت با فیوز خارجی در چنین وضعیتی قرار گیرد، فیوز خارجی عمل کرده، خازن را قطع می‌کند. ولی در بانک‌های خازنی بدون فیوز، این عمل میسر نیست.

*اشتباه در خط تولید*

این اشکالات باید هنگام آزمایش خازن در کارخانه معلوم شود. منحنی خرابی تجهیزات الکتریکی[1] در تصویر ۱۹-٤ نشان داده شده است. این منحنی از سه بخش تشکیل شده است: دورهٔ خرابی اولیه[2] که در آن نرخ خرابی رو به کاهش است، دورهٔ عادی یا عمر مفید که در آن نرخ خرابی ثابت و کم است، دورهٔ استهلاک که در آن نرخ خرابی افزایش می‌یابد. اگر در یونیت‌های خازنی اشکالی وجود داشته باشد، در هنگام آزمایش‌های کارخانه معلوم می‌شود. خرابی‌های رخ داده در طول عمر مفید خازن ناشی از فشار بیش از حد است.



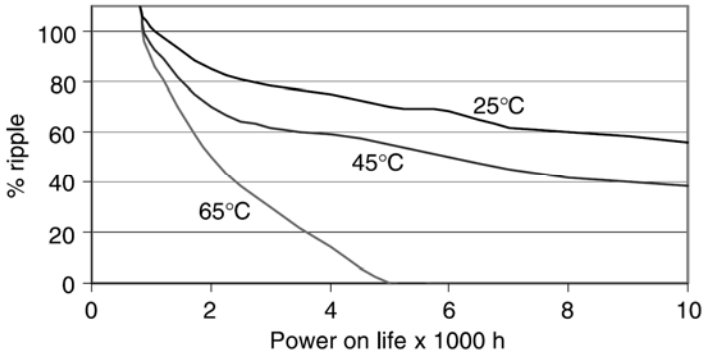

**تصویر ۱۹-٤: منحنی خرابی تجهیزات**

*خرابی به دلیل فشارهای درونی خازن*

ریپل در جریان، ضربه های ولتاژ، و نوسان فرکانس بالا در جریان می‌تواند فشار درونی خازن را افزایش داده، منجر به خرابی زودهنگام شود. در تصویر ۱۹-۵ اثر ریپل جریان بر عمر مفید خازن را می‌بینیم. اگر فرض کنیم که دمای محیط ٤۵ درجه باشد، خازنی با عمر مفید ۱۰ هزار ساعت در حضور ۱۰۰ درصد ریپل جریان تنها ٦۰۰

[1] bathtub curve
[2] infant mortality period

ساعت عمر خواهد کرد. علاوه بر ریپل جریان و اضافه‌ولتاژ، شکل موج و مدت زمان ضربه‌های جریان بر عمر مفید خازن اثر می‌گذارد.




**تصویر ۱۹-۵: اثر ریپل جریان بر عمر خازن (در دماهای مختلف)**

*خرابی به دلیل فشارهای بیرونی خازن*

برخی اوقات بانک‌های خازنی در شرایط نامساعد بیرونی مانند دمای زیاد، رطوبت، نوسان دما، لرزش، ضربه، و تهویهٔ نامناسب قرار می‌گیرند. این شرایط در پست‌ها نیز پیش می‌آید. در برخی موارد می‌توان از تهویهٔ تحت فشار استفاده کرد. در بسیاری موارد بانک‌ها نیازی به تهویهٔ جدا ندارند. خنک‌کاری اضافه باعث طولانی‌تر شدن عمر خازن‌ها می‌شود.

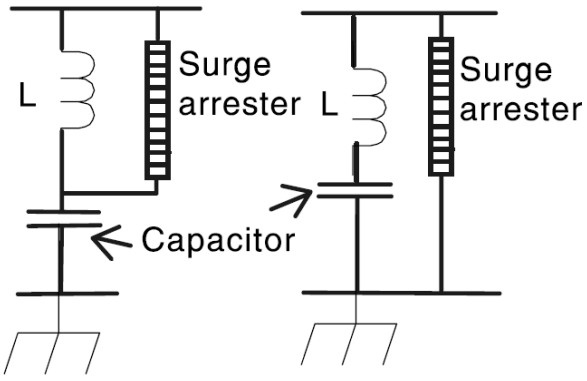
*خطای انسانی*

گاهی اوقات خرابی بانک خازن ناشی از اشتباه شخص است. اگر فیوز بانک به درستی انتخاب نشده باشد، امکان خرابی فیوز یا خازن وجود دارد. هنگام برق‌دار کردن بانک، از سوییچی با مقاومت استفاده می‌شود. اگر بانک خازنی به دلیل خطایی تریپ دهد، مدارشکن باز می‌شود. سوییچ مقاومت‌دار هنوز در وضعیت بسته است. اگر در این وضعیت با بستن مدارشکن بانک برق‌دار شود، مقاومت محدود کننده‌ای در مدار نیست و امکان خرابی بانک به دلیل گذراهای تولید شده وجود دارد. برای انجام این عمل، باید سوییچ باز شود. ابتدا مدارشکن و سپس سوییچ بسته شوند. این خطاهای انسانی رایج هستند ولی به سختی می‌توان آنها را ثابت کرد مگر این که اپراتور به اشتباه خود اعتراف کند.

*نصب برق‌گیر*

برق‌گیر به منظور حفاظت از بانک در برابر کلیدزنی و صاعقه نصب می‌شود. برق‌گیر را می‌توان به دو سر راکتور، تصویر ۱۹-٦ (سمت چپ)، نصب کرد. در این صورت هنگام اضافه‌ولتاژ برق‌گیر هدایت می‌کند و جریان بزرگی از خازن‌ها می‌گذرد که باعث از کار افتادن موقت خازن‌ها می‌شود. همچنین حفاظت ضربه برای خازن‌ها انجام نمی‌دهد. اتصال رایج و توصیه شده برای بانک خازنی در تصویر ۱۹-٦ (سمت راست)، دیده می‌شود. استفاده

از برق‌گیر در اتصال ستارهٔ زمین‌نشده مشکلات دیگری هم دارد که در استاندارد IEEE Standard C62.22 ذکر شده است. توصیه می‌شود که از برق‌گیر در سیستم‌های زمین‌شده استفاده شود.




**تصویر ۱۹-٦: نصب برق‌گیر در بانک خازنی**

*هارمونیک مبدل‌ها و مسائل مربوط*

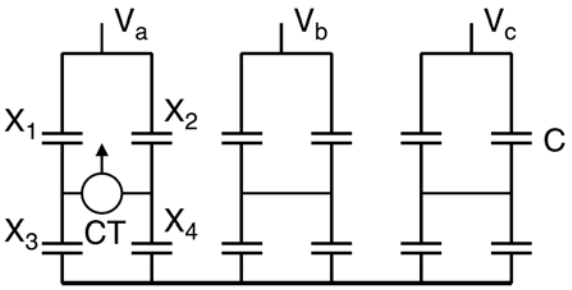
اگر هارمونیک‌های مبدل بیشتر از حد مجاز باشد، فیلترهای شامل خازن و القاگر دچار اضافه بار شده، زودتر از موعد خراب می‌شوند. اگر زاویهٔ آتش تایریستورها هماهنگ نباشد، بار نامتعادل می‌شود و باعث خرابی سوییچ‌های نیمه‌هادی و خرابی‌های بعدی می‌شود. این امر باعث تولید هارمونیک‌های مرتبهٔ زوج می‌شود. ناهماهنگی زاویهٔ آتش به دلایل زیر رخ می‌دهد:

- خطا در فرمان آتش: یکسوساز شش پالسه‌ای را در نظر بگیرید که یکی از پالس‌های آن در زمان درست رخ نمی‌دهد. این امر باعث افزایش هارمونیک جریان و حذف ضعیف هارمونیک‌های فرد و تولید هارمونیک‌های زوج به دلیل عدم تقارن موج خروجی می‌شود.
- عدم تعادل در فازها: عدم تعادل در فازها هارمونیک زوج تولید نمی‌کند، بلکه مانند یکسوساز تک‌فازی عمل می‌کند و طیف کامل هارمونیک‌های فرد را تولید می‌کند.
- خطای گروهی در فرمان آتش: گاهی اوقات پالس‌های ۱، ۳، ۵ به یک اندازه از پالس‌های ۲، ٤، و ٦ فاصله دارند. این امر باعث تولید هارمونیک‌های زوج (مضارب $3n \pm 1$) می‌شود. در این موارد هارمونیک‌های ۲، ٤، و دیگر مضارب دیده می‌شود.

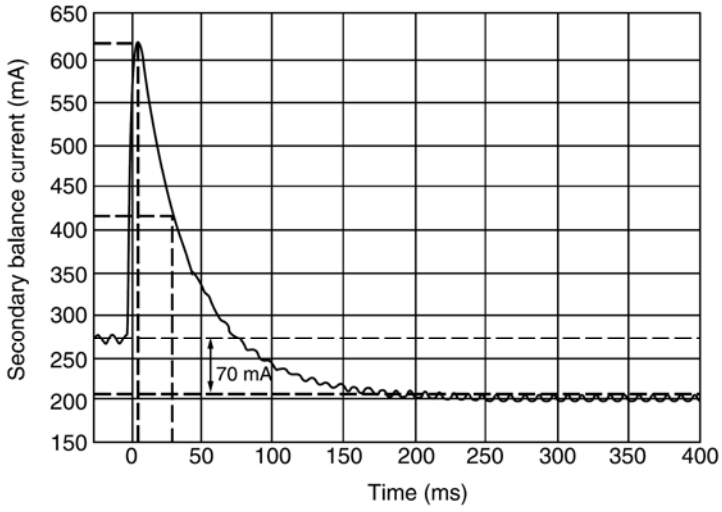
*خرابی‌های اتصال **H***

یک بانک خازنی با اتصال H (تصویر ۱۹-۷) در نظر بگیرید. هر شاخه از یونیت‌های سری و موازی تشکیل شده است. در این اتصال با استفاده از جریان عبوری از میان پل می‌توان خرابی یونیت‌ها را تشخیص داد. در صورت خرابی یک یونیت، موقتاً اتصال کوتاه پیش می‌آید. جریان اندازه‌گیری شده در ثانویهٔ ترانس جریان در تصویر ۱۹-۸ نشان داده شده است. پیک جریان حدود ۵۰ میلی‌ثانیه باقی می‌ماند. سپس یونیت‌های مجاور درون

خازن معیوب دشارژ می‌شوند و فیوز ذوب می‌شود. جریان عدم تعادل میرا می‌شود و مقدار پایین‌تری اختیار می‌کند. اگر این مقدار از حد آلارم یا تریپ فراتر باشد، اقدام لازم برای حفاظت بانک انجام می‌شود. اگر در شاخهٔ مجاور یونیت خازنی‌ای خراب شود، سیستم متعادل شده و جریان پل دوباره صفر می‌شود. در این حالت تنظیمات آلارم یا تریپ عدم تعادل بی‌اثر می‌شوند.




**تصویر ۱۹-۷: بانک خازنی با اتصال H**




**تصویر ۱۹-۸: جریان هنگام خرابی یک یونیت خازنی**

**مثال**

یک بانک خازنی با اتصال H (تصویر ۱۹-۷) در نظر بگیرید. نسبت ترانس جریان مورد استفاده ۵۰۰ به ۱ است. راکتانس‌های مدار برابر با $X_1 = X_2 = X_3 = X_4 = 10\Omega$ است. به دلیل خرابی یکی از خازن‌ها مقدار $X_1 = 9.5\Omega$ می‌شود. فرض کنید جریان بانک ۵۰۰ آمپر است، سپس:

- معادله‌ای برای یافتن جریان پل در حالت عادی بنویسید. جریان ثانویهٔ ترانس جریان چقدر است؟
- فرض کنید که در اثر خرابی یک خازن $X_1 = 9.5\Omega$ بشود، جریان ثانویهٔ ترانس جریان چقدر است؟
- فرض کنید که در اثر خرابی $X_1 = X_2 = 9.5\Omega$ بشود، جریان ثانویهٔ ترانس جریان چقدر است؟
- فرض کنید که در اثر خرابی $X_1 = X_2 = X_3 = X_4 = 9.5\Omega$ بشود، جریان ثانویهٔ ترانس جریان چقدر است؟

نتایج را تفسیر کنید.

**پاسخ**

حالت اول:

$$I_{bank}=500A, X_1=X_2=X_3=X_4=10\Omega$$
$$I_{bridge}=\frac{X_1X_4-X_2X_3}{(X_1+X_2)(X_3+X_4)}\times I_{bank}\times\frac{1A}{500A}=0$$

در حالت عادی که تعادل پل برقرار است، جریانی از آن نمی‌گذرد.

حالت دوم:

$$I_{bank}=500A, X_1=9.5\Omega, X_2=X_3=X_4=10\Omega$$
$$I_{bridge}=\frac{X_1X_4-X_2X_3}{(X_1+X_2)(X_3+X_4)}\times I_{bank}\times\frac{1A}{500A}=$$
$$=\frac{9.5\times10-10\times10}{(9.5+10)(10+10)}\times500A\times\frac{1A}{500A}=0.0128A$$

در صورت خرابی در یکی از شاخه‌ها، خطا قابل تشخیص است.

حالت سوم:

$$I_{bank}=500A, X_1=X_2=9.5\Omega, X_3=X_4=10\Omega$$
$$I_{bridge}=\frac{X_1X_4-X_2X_3}{(X_1+X_2)(X_3+X_4)}\times I_{bank}\times\frac{1A}{500A}=$$
$$=\frac{9.5\times10-9.5\times10}{(9.5+9.5)(10+10)}\times500A\times\frac{1A}{500A}=0$$

اگر در شاخه‌های متناظر خطاهای مشابه رخ دهد، قابل تشخیص نیست.

حالت چهارم:

$$I_{bank}=500A, X_1=X_2=X_3=X_4=9.5\Omega$$
$$I_{bridge}=\frac{X_1X_4-X_2X_3}{(X_1+X_2)(X_3+X_4)}\times I_{bank}\times\frac{1A}{500A}=0$$

اگر در همهٔ شاخه‌ها خطاهای مشابه رخ دهد، قابل تشخیص نیست.

علائم، علل احتمالی، و راه حل آن برای خرابی‌های مختلف خازنی در جدول ۱۹-۱ آمده است. می‌توان دید که علائم رایج، خرابی خازن، خرابی فیوز، تریپ‌های نابه‌جا، خرابی برق‌گیر، راکتور، حرارت بیش از حد در ترانس یا ماشین‌ها، و اختلالات مخابراتی است. علل احتمالی رزونانس، هارمونیک بیش از حد، و فیلترینگ ناکافی است. راه حل‌های احتمالی در بسیاری از موارد تیون کردن صحیح فیلتر است. در صورت مشاهدهٔ نوسان، افزودن مقاومت به فیلتر می‌تواند راه حل مناسبی باشد که آن را به فیلتر بالاگذر تبدیل می‌کند. در برخی موارد لازم است چند فیلتر برای هارمونیک‌های مختلف داشته باشیم. در حالت کم‌باری می‌توان بانک و فیلتر را خاموش کرد.

**جدول ۱۹-۱: علائم خرابی بانک‌های خازنی و راه حل**

| ملاحظات | علت احتمالی | راه حل |
|---|---|---|
| خرابی خازن در نزدیکی بار هارمونیکی | رزونانس | دِتیون کردن فیلتر یا تغییر سایز بانک |
| عملکرد نادرست کنترلرها | اعوجاج ولتاژ | استفاده از فیلتر |
| سوختن فیوز خازن | رزونانس | دِتیون کردن فیلتر |
| داغ شدن ترانس در زیر بار نامی | جریان هارمونیکی | استفاده از فیلتر، دِتیون کردن فیلتر |
| داغ شدن موتورهای القایی در زیر بار نامی | جریان هارمونیکی | استفاده از فیلتر، دِتیون کردن فیلتر |
| خرابی خازن | رزونانس | تیون کردن فیلتر |
| | برق‌گیر نامناسب | انتخاب برق‌گیر مناسب |
| خرابی برق‌گیر | رزونانس | تیون کردن فیلتر |
| | برق‌گیر نامناسب | انتخاب برق‌گیر مناسب |
| خرابی راکتور فیلتر | رزونانس | تیون کردن فیلتر |
| تریپ‌های نابه‌جا | رزونانس | تحلیل مجدد سیستم |
| اختلال‌های مخابراتی | القای جریان در کابل‌های مخابراتی | کاهش هارمونیک‌ها، بررسی بانک‌های زمین‌نشده، تغییر محل فیلتر |
| اضافه‌ولتاژ | هارمونیک بیش از حد | نصب فیلتر مناسب |
| اختلال هارمونیکی در کم‌باری | هارمونیک در کم‌باری وجود دارد | خاموش کردن بانک خازنی در بار کم |
| اختلال هارمونیکی در اوج بار | فیلتر ناکافی | دِتیون کردن فیلتر، نصب فیلتر بیشتر |

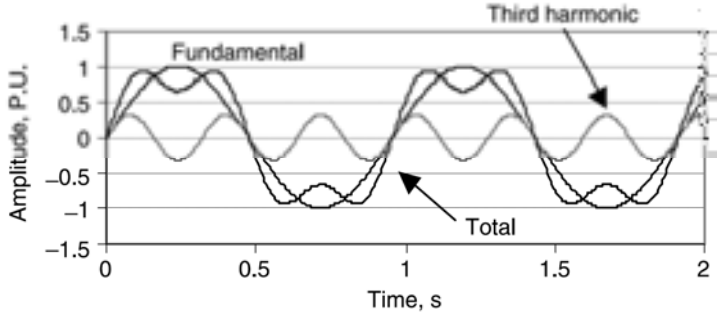
# فصل ۲۰ : فیلتر کردن هارمونیک‌ها

## ۲۰-۱- معرفی

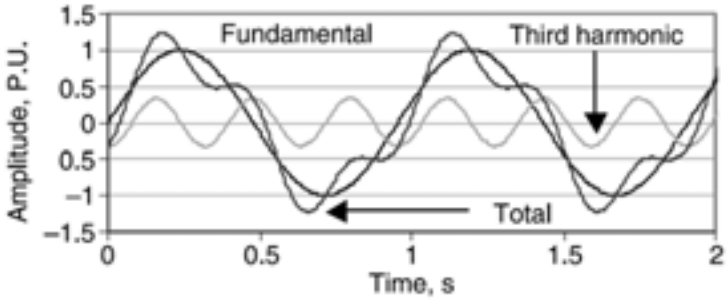
تا دهۀ ٦۰، منبع اصلی هارمونیک‌ها در شبکه کوره‌های قوس و چند مبدل الکتریکی بود. در دهۀ ۷۰ با حضور تایریستورها و منابع تغذیه، بسیاری از صنایع برای کنترل دور موتور از آنها استفاده کردند. با افزایش بارهای الکترونیک قدرت در شبکه، مشکلات مختلفی ظهور کرد:

- ورود هارمونیک‌ها از مبدل به شبکه
- ضریب توان پایین در شبکه
- پروفایل ضعیف ولتاژ در شبکه به دلیل پایین بودن ضریب توان
- تداخل با تجهیزات مخابراتی به دلیل ولتاژهای القایی
- اغتشاش در منابع تغذیه و تأثیر آنها بر تجهیزات کامپیوتری
- خطا در اندازه‌گیری
- جریان‌های دائمی در سیم نوترال سیستم‌های چهار سیمه

بنابراین درک رفتار شبکه‌های صنعتی دارای تجهیزات الکترونیک قدرت بسیار لازم است. با ساخت فیلترهای جدید و نیاز به اصلاح ضریب توان و کنترل هارمونیک‌ها، شرکت‌های برق با مشکلات دیگری روبرو شدند. در این فصل، منابع هارمونیک، پاسخ سیستم، مدل‌سازی سیستم برای تحلیل هارمونیکی، حدود مجاز هارمونیک، و روش‌های تحلیل بحث می‌شوند. برای نشان دادن اثر هارمونیک‌ها بر سیستم فرض کنید هارمونیک اصلی و سوم هم‌فاز باشند (تصویر ۲۰-۱). دامنۀ کلی از ماکزیمم هارمونیک اصلی کوچک‌تر است. حال فرض کنید که هارمونیک اصلی و هارمونیک سوم اختلاف فاز داشته باشند (تصویر ۲۰-۲). در اینجا، دامنۀ موج برآیند بزرگ‌تر از دامنۀ هارمونیک اصلی شده است. پس می‌بینیم که اندازۀ برآیند جریان به زاویۀ فاز بستگی دارد. جریان زیادتر حرارت بیشتر تولید می‌کند. بنابراین اثرات هارمونیک‌ها نیازمند مطالعۀ دقیق است.




**تصویر ۲۰-۱: هارمونیک اول و سوم همفاز هستند**




**تصویر ۲۰-۲: هارمونیک اول و سوم اختلاف فاز دارند**

## ۲۰-۲- منابع هارمونیک

منابع هارمونیکی مختلفی در سیستم‌های توزیع وجود دارد. این بارها غیر خطی هستند. مبدل‌های AC/DC، مبدل‌های مدولاسیون پهنای پالس[1]، سیکلو کانورترها، کوره‌های قوس، جبران‌سازهای استاتیک، و منابع تغذیهٔ سوییچینگ از انواع بارهای تولید کنندهٔ هارمونیک هستند. فرکانس‌ها و دامنهٔ هارمونیک‌های تولید شده توسط هر یک از این تجهیزات در اینجا آورده شده است:

### ۲۰-۲-۱- مبدل‌ها

در کنترل دور سرعت، شارژ کردن باتری، و مدارهای HVDC از مبدل‌های شش پالسی AC به DC استفاده می‌شود. در مدار مبدل متناوباً به هر زوج تایریستور فرمان آتش داده می‌شود تا این که به طور معکوس بایاس شوند. اگر تایریستور با زاویهٔ صفر آتش شود مانند دیود عمل می‌کند. در زاویه‌های آتش مختلف، هارمونیک‌ها مختلف هستند. دامنه و فرکانس هارمونیک‌های تولید شده به صورت زیر است:

$$h = kq \pm 1$$

$$I_h = \frac{I_1}{h}$$

در اینجا $h$ مرتبهٔ هارمونیک، $k$ یک عدد صحیح، $q$ تعداد تایریستورهای مبدل (در اینجا شش عدد)، $I_h$ دامنهٔ هارمونیک مرتبهٔ $h$، و $I_1$ دامنهٔ هارمونیک اصلی است. هارمونیک‌های موجود در یک مبدل شش پالسی در جدول ۲۰-۱ آمده است.

[1] pulse width modulated converter

جدول ۲۰-۱: هارمونیک‌های موجود در مبدل شش پالسی

| مرتبهٔ هارمونیک | اندازه (درصد) | زاویهٔ فاز (درجه) |
|---|---|---|
| 1 | 100 | -75 |
| 5 | 33.6 | -156 |
| 7 | 1.6 | -151 |
| 11 | 8.7 | -131 |
| 13 | 1.2 | 54 |
| 17 | 4.5 | -57 |
| 19 | 1.3 | -226 |
| 23 | 2.7 | 17 |
| 25 | 1.2 | 149 |

### ۲۰-۲-۲- مبدل‌های مدولاسیون پهنای پالس

مبدل‌های PWM از تجهیزات الکترونیک قدرتی استفاده می‌کنند که قابلیت خاموش و روشن شدن دارند. توان ورودی اغلب از یک مبدل تأمین شده و خروجی بسته به نیاز با تایریستورها ساخته می‌شود. پهنای پالس خروجی طوری تنظیم می‌شود که موجی سینوسی و سه‌فاز به بار تحویل شود. بار معمولاً موتوری است که باید در دورهای مختلف کار کند. محتوای هارمونیکی چنین مبدلی در بارهای مختلف در جدول ۲۰-۲ آمده است.

جدول ۲۰-۲: هارمونیک‌های یک PWM

| مرتبهٔ هارمونیک | ۱۰۰٪ بار نامی | | ۷۵٪ بار نامی | | ۵۰٪ بار نامی | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | اندازه | فاز | اندازه | فاز | اندازه | فاز |
| 1 | 100 | 0 | 100 | 0 | 100 | 0 |
| 3 | 0.35 | -159 | 0.59 | -44 | 0.54 | -96 |
| 5 | 60.82 | -175 | 69.75 | -174 | 75.09 | -174 |
| 7 | 33.42 | -172 | 47.03 | -171 | 54.61 | -171 |
| 9 | 0.5 | 158 | 0.32 | -96 | 0.24 | -102 |
| 11 | 3.84 | 166 | 6.86 | 17 | 14.65 | 16 |
| 13 | 7.74 | -177 | 4.52 | -178 | 1.95 | 71 |
| 15 | 0.41 | 135 | 0.37 | -124 | 0.32 | 28 |
| 17 | 1.27 | 32 | 7.56 | 9 | 9.61 | 10 |
| 19 | 1.54 | 179 | 3.81 | 9 | 7.66 | 16 |
| 21 | 0.32 | 110 | 0.43 | -163 | 0.43 | 95 |
| 23 | 1.08 | 38 | 2.59 | 11 | 0.94 | -8 |
| 25 | .016 | 49 | 3.7 | 10 | 3.78 | 7 |

### ۲۰-۲-۳- سیکلو کانورترها

این مبدل‌ها فرکانس موج سینوسی AC را کاهش می‌دهند و برای کنترل دور موتورهای AC بزرگ مناسب هستند. این مبدل‌ها هارمونیک‌های زیادی تولید می‌کنند که از این رابطه به دست می‌آید:

$$f_h = f_1(kq \pm 1) \pm 6nf_0$$

در اینجا $f_h$ فرکانس هارمونیک تولید شده، $k$ و $n$ عدد صحیح، $f_0$ فرکانس موج خروجی، و $f_1$ فرکانس موج ورودی است.

### ۲۰-۲-٤- کورهٔ قوس

محتوای هارمونیکی کورهٔ قوس به دلیل نوسان امپدانس قوس در حالت‌های مختلف کاری کوره بسیار دشوار است. بنابراین، جریان کوره تناوبی نیست و دارای هارمونیک‌های مضرب صحیح و غیر صحیح می‌باشد. محتوای هارمونیکی در حالت ذوب و در حالت پالایش کاملاً متفاوت است. در جدول ۲۰-۳ می‌توان هارمونیک‌های مختلف کوره را ملاحظه کرد.

**جدول ۲۰-۳: محتوای هارمونیکی کورهٔ قوس**

| وضعیت کوره | مرتبهٔ هارمونیک (درصد) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 7 |
| ذوب اولیه | 100 | 7.7 | 5.8 | 2.5 | 4.2 | 3.1 |
| پالایش | 100 | - | 2 | - | 2.1 | - |

### ۲۰-۲-۵- جبران‌سازهای استاتیک (SVC)

راکتورهای کنترل‌شده با تایریستور به همراه خازن‌های ثابت معمولاً برای کنترل ضریب توان کوره‌های القایی و دیگر بارها استفاده می‌شود تا از فلیکر ولتاژ بکاهد. برای بهبود ضریب توان باید جریان راکتور توسط تایریستور کنترل شود و این امر ایجاد هارمونیک می‌کند. محتوای هارمونیکی یک SVC در جدول ۲۰-٤ آمده است.

**جدول ۲۰-٤: محتوای هارمونیکی یک SVC**

| مرتبهٔ هارمونیک | دامنه (درصد) | مرتبهٔ هارمونیک | دامنه (درصد) |
|---|---|---|---|
| 1 | 100 | 3 | 13.78 |
| 5 | 5.05 | 7 | 2.59 |
| 9 | 1.57 | 11 | 1.05 |
| 13 | 0.75 | 15 | 0.57 |
| 17 | 0.44 | 19 | 0.35 |
| 21 | 0.29 | 23 | 0.24 |
| 25 | 0.20 | | |

### ۲۰-۲-٦- منابع تغذیهٔ سوییچینگ

منابع تغذیهٔ سوییچینگ در کامپیوترها بیشترین کاربرد را دارد. این منابع بسیار اقتصادی، انرژی را در یک خازن ذخیره کرده و با دشارژ کردن آن ولتاژ DC مورد نیاز قطعات الکترونیکی را تأمین می‌کنند. از آنجا که بار دیده شده از نظر شبکه خازنی است، جریان پیوستگی ندارد. محتوای هارمونیکی یک منبع تغذیهٔ سوییچینگ در جدول ۲۰-۵ آمده است.

جدول ۲۰-۵: محتوای هارمونیکی یک منبع تغذیهٔ سوییچینگ

| مرتبهٔ هارمونیک | دامنه (درصد) | مرتبهٔ هارمونیک | دامنه (درصد) |
|---|---|---|---|
| 1 | 100 | 3 | 81 |
| 5 | 60.6 | 7 | 37 |
| 9 | 15.7 | 11 | 2.4 |
| 13 | 6.3 | 15 | 7.9 |

## ۲۰-۳- پاسخ سیستم به هارمونیک‌ها

اثر هارمونیک‌ها بر سیستم به مشخصهٔ پاسخ فرکانسی سیستم بستگی دارد. برخی از عوامل مؤثر در اینجا بحث شده‌اند.

### ۲۰-۳-۱- سطح اتصال کوتاه سیستم

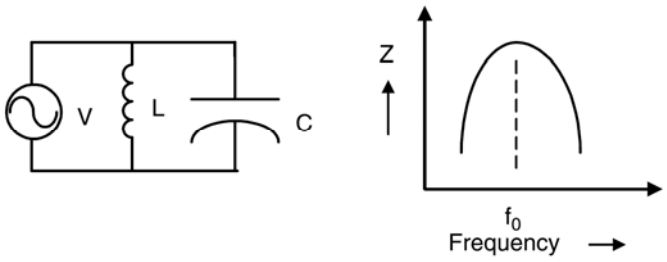
در سیستمی که سطح اتصال کوتاه بالا دارد، اغتشاش کمی در ولتاژ ایجاد می‌شود. سیستمی که سطح اتصال کوتاه پایین‌تری دارد، بیشتر در معرض اغتشاش قرار می‌گیرد. سطح اتصال کوتاه سیستم بستگی به میزان تولید، سطح ولتاژ انتقال، تعداد خطوط موازی، و دیگر پارامترها دارد.

### ۲۰-۳-۲- مشخصهٔ بار

بخش مقاومتی بار باعث ایجاد میرایی در مدار شده و مقدار تقویت ولتاژ را کاهش می‌دهد. بخش راکتیو بار می‌تواند نقطهٔ رزونانس را جابه‌جا کرده، تقویت ولتاژ را افزایش دهد. سیستم کم‌بار به دلیل مقاومت اهمی کوچکتر میرایی کمتر و اغتشاش ولتاژ بیشتری دارد. سیستم در اوج بار از میرایی بیشتری برخوردار است.

### ۲۰-۳-۳- رزونانس موازی

رزونانس موازی زمانی رخ می‌دهد که راکتانس و کاپاسیتانس مدار در فرکانس خاصی برابر شوند. اگر این فرکانس با فرکانس یکی از هارمونیک‌ها برابر شود، جریانی نوسانس بین منبع و خازن به حرکت می‌افتد. نمونهٔ یک مدار با رزونانس موازی حول فرکانس $f_0$ در تصویر ۲۰-۳ نشان داده شده است.



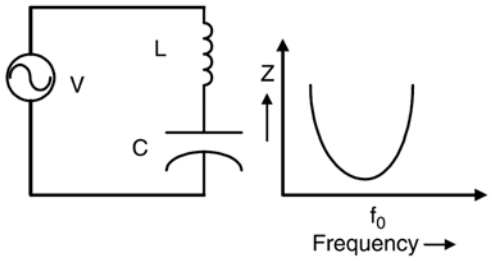

تصویر ۲۰-۳: مدار رزونانس موازی و پاسخ فرکانسی آن

### ۲۰-۳-٤- رزونانس سری

رزونانس سری نتیجه تأثیر متقابل بانک خازنی و اندوکتانس ترانس (تصویر ۲۰-٤) است. یک مدار با رزونانس سری امپدانس کوچکی در برابر جریان‌های هارمونیکی دارد و می‌تواند هارمونیک‌های نزدیک به فرکانس خود را محبوس کند. ولی این مدار باعث ایجاد اغتشاش ولتاژ می‌شود. فرکانس مرکزی ( $f_0$ ) مدار رزونانس موازی و سری از این رابطه به دست می‌آید:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

در اینجا $L$ اندوکتانس کل مدار و $C$ خازن است. هر دو رزونانس باعث نوسان در جریان مدار می‌شوند.




**تصویر ۲۰-٤: مدار رزونانس سری و پاسخ فرکانسی آن**

## ۲۰-۴- مقادیر مجاز

### ۲۰-٤-۱- ضریب توان

در هنگام نصب فیلتر برای کنترل هارمونیک‌ها، بانک خازنی ضریب توان مدار را بهبود می‌دهد. بیشتر شرکت‌های برق انتظار دارند که ضریب توان بالاتر از ۹۵ درصد نگه داشته شود. در برخی شرایط ضریب توان بالاتری مورد نیاز است.

### ۲۰-٤-۲- اغتشاش کلی هارمونیک‌ها[1] (THD)

این پارامتر برای اندازه‌گیری اغتشاش ناشی از هارمونیک‌ها بسیار رایج شده است و به این صورت تعریف می‌شود:

$$THD = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \ldots + V_n^2}}{V_1}$$

در اینجا $V_2$ تا $V_n$ مقدار مؤثر هارمونیک‌های ولتاژ و $V_1$ مقدار مؤثر مؤلفهٔ اصلی ولتاژ است. این پارامتر نسبت مقدار مؤثر کل هارمونیک‌ها به مقدار مؤثر مؤلفهٔ اصلی است. مقدار THD در ولتاژ شبکه‌های صنعتی بسیار اهمیت

[1] total harmonic distortion

دارد زیرا بر بارهای دیگری که با بار مورد نظر موازی هستند، اثر می‌گذارد. استاندارد IEEE Standard 519 به این نکته اشاره می‌کند که شرکت برق در قبال کیفیت ولتاژ در شبکه مسؤول است. مقدار THD مجاز ولتاژ در سطوح مختلف ولتاژ شبکه در جدول ۲۰-٦ آمده است.

**جدول ۲۰-٦: مقادیر مجاز اغتشاش (IEEE Standard 519)**

| ماکزیمم اغتشاش (درصد) | ولتاژ سیستم | | |
|---|---|---|---|
| | کمتر از ٦۹ کیلوولت | ٦۹ تا ۱٦۱ کیلوولت | بیشتر از ۱٦۱ کیلوولت |
| هارمونیک‌های تکی | 3 | 1.5 | 1 |
| کل هارمونیک‌ها (THD) | 5 | 2.5 | 1.5 |

### ۲۰-٤-۳- اغشاش کلی در دیماند[1] (TDD)

این پارامتر، اغتشاش کلی هارمونیکی در جریان است و به این صورت تعریف می‌شود:

$$TDD = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \ldots + I_n^2}}{I_{Load}}$$

در اینجا $I_2$ تا $I_n$ مقدار مؤثر هارمونیک‌های جریان و $I_{Load}$ مقدار مؤثر مؤلفهٔ اصلی جریان است. بنابر استاندارد IEEE Standard 519، مصرف‌کننده مسؤول نگهداشتن هارمونیک جریان در محدودهٔ مجاز است. به دلیل رشد روزافزون بارهای هارمونیک‌زا، شرکت‌های برق مجبور به اجرای استاندارد IEEE 519 شدند تا هارمونیک‌های تک تک مشترکان یا حتی بارها محدود شود. ولی این روش محدودیت‌های خود را دارد، زیرا اغتشاش ولتاژ نیز تابعی از پاسخ فرکانسی سیستم و منابع هارمونیک مصرف‌کننده‌ها است. برای مصرف‌کنندگان بزرگ محدودیت‌های بیشتری وضع می‌شود، زیرا اثر آنها بر اغتشاش ولتاژ بیشتر است. مقادیر مجاز TDD در جدول ۲۰-۷ فهرست شده است.

**جدول ۲۰-۷: مقادیر مجاز هارمونیک جریان (IEEE Standard 519)**

| نسبت $I_{SC}/I_{Load}$ | مرتبهٔ هارمونیک | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | <11 | 11-16 | 17-22 | 23-24 | >35 | TDD |
| <20 | 4 | 2 | 1.5 | 0.6 | 0.3 | 5 |
| 20-50 | 7 | 3.5 | 2.5 | 1 | 0.5 | 8 |
| 50-100 | 10 | 4.5 | 4 | 1.5 | 0.7 | 12 |
| 100-1000 | 12 | 5.5 | 5 | 2 | 1 | 15 |
| >1000 | 15 | 7 | 6 | 2.5 | 1.4 | 20 |

### ۲۰-٤-٤- تحلیل حوزهٔ فرکانس

برای بهبود ضریب توان و حذف هارمونیک‌ها در شبکه از فیلتر استفاده می‌شود. خازن‌های شانت باعث ایجاد رزونانس در سیستم می‌شوند. مرتبهٔ هارمونیک رزونانسی از این رابطه به دست می‌آید:

[1] total demand distortion

$$h = \sqrt{\frac{MVA_S}{MVAR_C}}$$

در اینجا $MVA_S$ سطح اتصال کوتاه سیستم و $MVAR_C$ توان بانک خازنی است. در سیستم‌های پیچیده، پیک‌های رزونانسی را می‌توان با استفاده از اسکن فرکانس پیش‌بینی کرد. در این روش، یک آمپر جریان به باس دارای منبع هارمونیک تزریق می‌شود. مشخصهٔ فرکانسی سیستم تا حدود ۳ کیلوهرتز رسم می‌شود. اگر در برخی هارمونیک‌ها، امپدانس سیستم کمتر از واحد باشد، به مفهوم آن است که فیلترها در حال تضعیف آن هارمونیک هستند. اگر این مقدار بزرگتر از واحد باشد، یعنی فیلترها در حال تقویت آن هارمونیک هستند. اگر این مقدار نزدیک به صفر باشد، به مفهوم رزونانس سری است (تصویر ۲۰-٤). فیلتر روی این فرکانس تیون شده است تا بیشتری تضعیف را داشته باشد. نقاط ماکزیمم در منحنی نشان دهندهٔ رزونانس موازی هستند (تصویر ۲۰-۳). در این نقاط امپدانس فیلتر خازنی و برابر با راکتانس سیستم یا ترانس است.

### ۲۰-٤-۵- عملکرد مطلوب خازن‌ها

مقدار مجاز جریان مؤثر گذرنده از خازن ۸۰ درصد بیشتر از جریان نامی آن است. این جریان از رابطهٔ زیر به دست می‌آید:

$$I_{rms} = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + \ldots + I_n^2}$$

مقدار مؤثر ولتاژ را می‌توان با دانستن مؤلفه‌های جریان و راکتانس به دست آورد. مقدار مجاز این ولتاژ می‌تواند تا ۱۰ درصد بیشتر از ولتاژ نامی افزایش یابد و از رابطهٔ زیر به دست می‌آید:

$$V_{rms} = \sqrt{(I_1X_1)^2 + (I_3X_3)^2 + (I_5X_5)^2 + \ldots + (I_nX_n)^2}$$

مقدار توان راکتیو ماکزیمم یک خازن ۳۵ درصد بیشتر از توان نامی آن است. بارگذاری خازن برابر است با:

$$kVAR = V_1^2(\omega C) + V_3^2(3\omega C) + V_5^2(5\omega C) + \ldots + V_n^2(n\omega C)$$

پیک ولتاژ یک خازن می‌تواند تا ۲۰ درصد بیشتر از ولتاژ نامی برود. این مقدار برابر است با:

$$V_{peak} = \sqrt{2}(I_1X_1 + I_3X_3 + \ldots + I_nX_n)$$

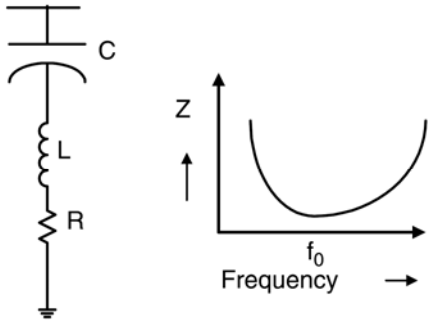
## ۲۰-۵- فیلترهای هارمونیکی

فیلتر کردن هارمونیک‌های غالب سیستم اثر آنها را کاهش می‌دهد. فیلترهای مختلفی برای این منظور وجود دارد. اغلب از فیلترهای ناچ[1] و تک‌تنظیمی[2] و فیلترهای بالاگذر استفاده می‌شود.

[1] notch
[2] single-tuned

### ۲۰-۵-۱- فیلترهای تک‌تنظیمی

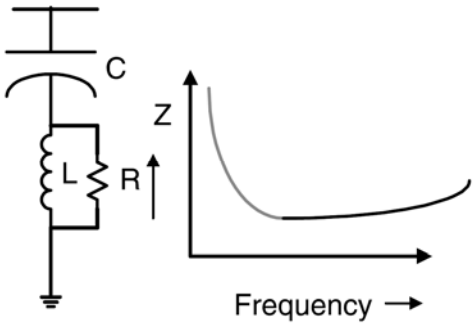
برای فیلتر کردن یک فرکانس خاص می‌توان از فیلتر تک‌تنظیمی یا ناچ استفاده کرد. در تصویر ۲۰-۵ می‌توان یک فیلتر تک‌تنظیمی رایج به همراه پاسخ فرکانسی آن را ملاحظه کرد. نقطهٔ تیون بر اثر تغییرات دما، تلرانس، و تغییر در فرکانس منبع تغذیه جابه‌جا می‌شود. این فیلتر ساده‌ترین راه کنترل هارمونیک است.




**تصویر ۲۰-۵: فیلتر تک‌تنظیمه با پاسخ فرکانسی مربوط**

### ۲۰-۵-۲- فیلترهای بالاگذر

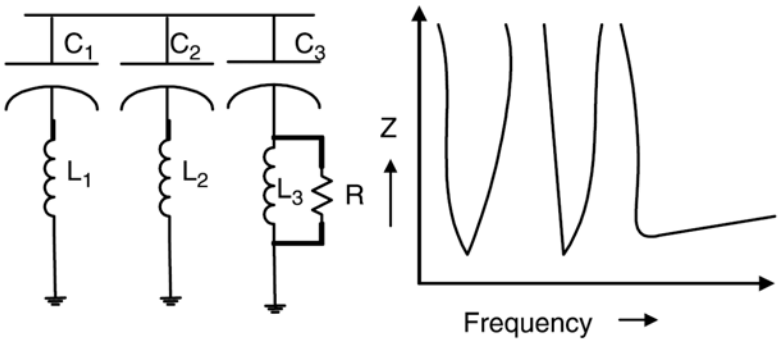
برای طراحی این فیلتر نیازمند دانستن سایز بانک خازنی و فاکتور بهینه‌سازی ( $m$ ) هستیم. نمونهٔ این فیلتر به همراه پاسخ فرکانسی آن در تصویر ۲۰-٦ آمده است. همان‌طور که دیده می‌شود این فیلتر می‌تواند هارمونیک‌های مرتبهٔ بالا را تضعیف کند. محدودهٔ کاری این فیلتر بسیار بزرگ است و به فرکانس خاصی محدود نمی‌شود. به دلیل وجود مقاومت، تلفات این فیلتر در فرکانس شبکه بالا است.




**تصویر ۲۰-٦: فیلتر بالاگذر و پاسخ فرکانسی مربوط**

### ۲۰-۵-۳- فیلترهای ترکیبی

برخی اوقات چند هارمونیک غالب در سیستم وجود دارد. برای کنترل هارمونیک‌هایی مانند ۵ و۷ از فیلترهای تک‌تنظیمی استفاده می‌شود. برای کنترل هارمونیک‌های ۱۱ و بالاتر از فیلتر بالاگذر استفاده می‌شود. این ترکیب در تصویر ۲۰-۷ آمده است. در اینجا $L_1$ و $C_1$ و همچنین $L_2$ و $C_2$ روی یک فرکانس خاص تنظیم‌شده‌اند. ترکیب $L_3$ و $C_3$ یک فیلتر بالاگذر را می‌سازد.



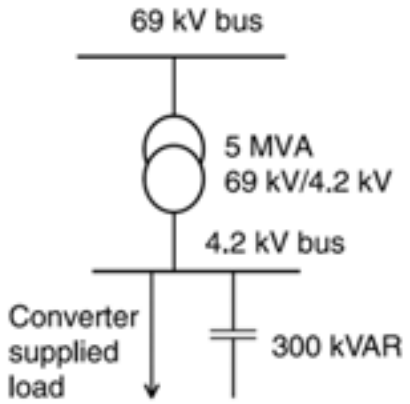

**تصویر ۲۰-۷: ترکیب چند فیلتر و پاسخ فرکانسی آنها**

## ۲۰-۶- تغییر در پاسخ سیستم

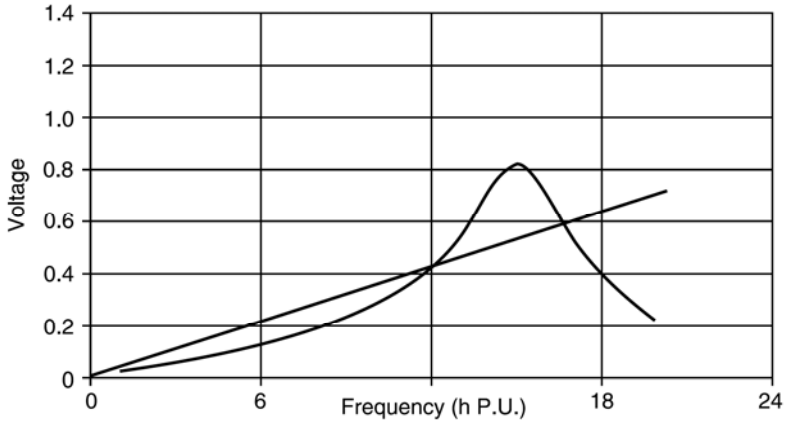
افزودن تجهیزات اصلاح ضریب توان به سیستم باعث رزونانس میان راکتانس سیستم و خازن بانک می‌شود. در مورد فیلترهای تیون‌شده، چنین رفتاری طبیعی است و باید از تقویت ولتاژ جلوگیری کرد.

### ۲۰-٦-۱- مشکلات رزونانسی

افزودن تجهیزات اصلاح ضریب توان در سطح فشار ضعیف باعث ایجاد رزونانس بین اندوکتانس منبع و بانک خازنی می‌شود. هارمونیک‌هایی که نزدیک فرکانس رزونانس هستند تقویت می‌شوند. هارمونیک‌های مرتبهٔ بالا در روی باس تضعیف می‌شوند زیرا امپدانس بانک خازنی در فرکانس‌های بالا کوچک می‌شود. در فرکانس‌های رزونانس، جریان باعث اغتشاش شدید ولتاژ می‌شود. شبکهٔ قدرت نشان داده شده در تصویر ۲۰-۸ را در نظر بگیرید. پاسخ فرکانسی سیستم در دو حالت بدون خازن و با ۳۰۰ کیلووار خازن در تصویر ۲۰-۹ آمده است. بدون خازن، پاسخ فرکانسی خطی صاف است و در هیچ فرکانسی تقویت وجود ندارد. با نصب خازن، در ۱۳ برابر فرکانس نامی رزونانس پیش می‌آید و دامنهٔ هارمونیک در این فرکانس تقویت می‌شود. بنابراین با نصب خازن، رعایت حدود مجاز هارمونیک دشوارتر می‌شود.



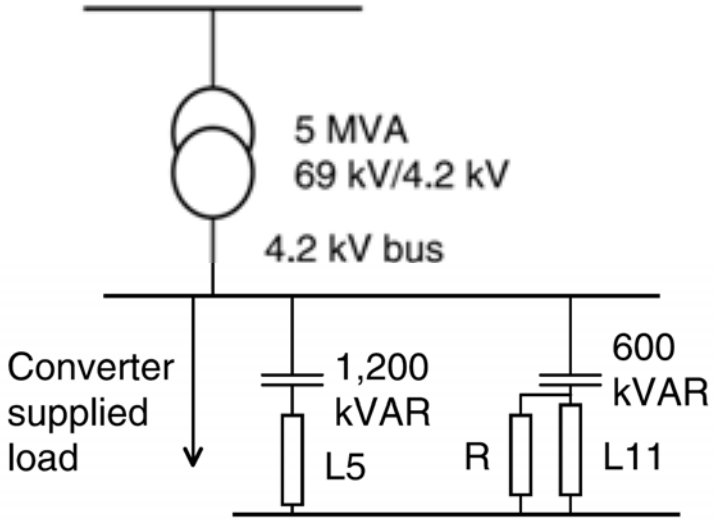

**تصویر ۲۰-۸: نمونهٔ شبکه دارای مشکل رزونانس**



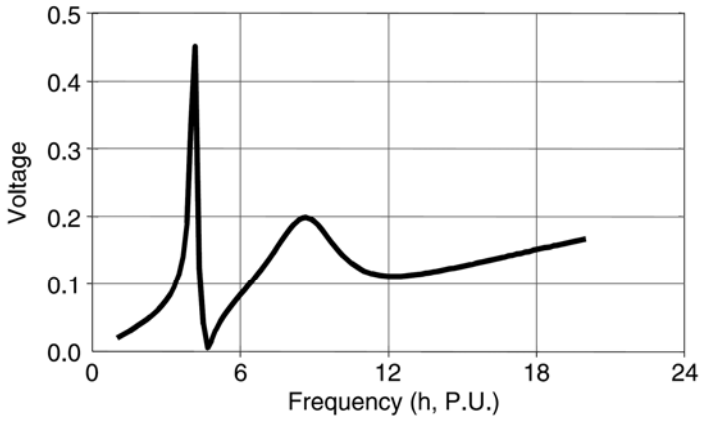

**تصویر ۲۰-۹: پاسخ فرکانسی سیستم در دو حالت بدون خازن و با خازن**

### ۲۰-۶-۲- اصلاح ضریب توان با فیلترهای تیون‌شده

با نصب فیلترهای تیون‌شده می‌توان همزمان کنترل هارمونیک و اصلاح ضریب توان را انجام داد. به این ترتیب در هیچ فرکانسی تقویت هارمونیک نخواهیم داشت. برای درک بهتر، سیستم نشان داده شده در تصویر ۲۰-۱۰ را در نظر بگیرید. این بار مولد هارمونیک است. برای کنترل هارمونیک‌ها یک فیلتر مرتبهٔ ۵ با ۱۲۰۰ کیلووار خازن و یک فیلتر بالاگذر مرتبهٔ ۱۱ استفاده شده است. پاسخ فرکانسی این فیلتر در تصویر ۲۰-۱۱ آمده است.




**تصویر ۲۰-۱۰: شبکهٔ دارای فیلتر تیون‌شده**




**تصویر ۲۰-۱۱: پاسخ فرکانسی سیستم تصویر ۲۰-۱۰**

### ۲۰-٦-۳- میزان کل اغتشاش هارمونیکی (THD)

مقدار محاسبه شده برای THD در ولتاژ و مقادیر مجاز برای سه حالت خاص در جدول ۲۰-۸ فهرست شده‌اند.

**جدول ۲۰-۸: مقدار THD در نزدیکی بانک**

| سناریو | توصیف | THD واقعی (درصد) | THD مجاز (درصد) |
|---|---|---|---|
| اول | بدون خازن | 2.3 | 5 |
| دوم | با ۳۰۰ کیلووار خازن | 6.3 | 5 |
| سوم | فیلتر مرتبهٔ ۵ و ۱۱ | 4.6 | 5 |

### ۲۰-٦-٤- میزان کل اغتشاش در دیماند (TDD)

با داشتن جریان‌های هارمونیکی می‌توان TDD را برای سه حالت فوق محاسبه کرد. هارمونیک‌های ۵، ۷، ۱۱، و ۱۳ غالب هستند و با مقادیر مجاز جدول ۲۰-۹ مقایسه شده‌اند. مقادیر استاندارد IEEE 519 برای حالت $I_{SC}/I_{Load} = 60$ استخراج شده‌اند. از جدول می‌توان دید که در حالت بدون خازن هارمونیک‌های ۱۱ و ۱۳ بالاتر از مقادیر مجاز هستند. با نصب خازن، سطح هارمونیک‌های غالب افزایش یافته و دیگر قابل قبول نیست. با فیلتر مرتبهٔ ۵ و فیلتر بالاگذر مرتبهٔ ۱۱، مقادیر هارمونیکی و TDD به حد مجاز می‌رسد.

**جدول ۲۰-۹: مقادیر TDD**

| سناریو | هارمونیک مرتبهٔ ۵ (درصد) | هارمونیک مرتبهٔ ۷ (درصد) | هارمونیک مرتبهٔ ۱۱ (درصد) | هارمونیک مرتبهٔ ۱۳ (درصد) | TDD (درصد) |
|---|---|---|---|---|---|
| اول | 1.28 | 0.07 | 22.5 | 14.8 | 6.57 |
| دوم | 1.38 | 2.18 | 42.4 | 42.4 | 11.3 |
| سوم | 1.47 | 0.44 | 2.26 | 1.14 | 5.04 |
| استاندارد IEEE | 10 | 10 | 4.5 | 4.5 | 12 |

## ۲۰-۷- طراحی فیلتر

فیلتر هارمونیک یکی از اجزاء مهم سیستم‌های اصلاح ضریب توان و کنترل هارمونیک است. قطعات اصلی یک فیلتر هارمونیکی خازن، راکتور، و مقاومت میرا کننده (در صورت لزوم) است؛ مانند یک فیلتر بالاگذر. مقدار خازن بانک را می‌توان با داشتن توان ظاهری سیستم، ضریب توان فعلی، و ضریب توان مطلوب به دست آورد. مراحل طراحی در دو مثال طراحی فیلتر ناچ و فیلتر بالاگذر بیان می‌شود.

**مثال**

یک فیلتر ناچ برای یک سیستم سه‌فاز، ٦٠ هرتز، ٤/١٦ کیلوولت طراحی کنید. برای اصلاح ضریب توان نیازمند ٤٦٠ کیلووار خازن هستیم. مقدار کیلووار تحویلی چقدر است؟ منبع تولید هارمونیک یک مبدل ١٢ پالسی است.

**پاسخ**

$$V = 4.16kV, V_{phase} = \frac{4.16kV}{\sqrt{3}} = 2.4kV$$

از جدول ٥-٢ خازن مناسب را انتخاب می‌کنیم:

$$Q = 100kVAR, V_{phase} = 2.77kV$$

در هر فاز دو عدد از این خازن‌ها موازی می‌شوند و در کل ٦ عدد از این خازن‌ها خواهیم داشت که در ولتاژ نامی ٦٠٠ کیلووار تحویل می‌دهند.

$$Q_{bank} = 600kVAR\left(\frac{2.4kV}{2.77kV}\right)^2 = 451kVAR$$

$$X_C = \frac{(4.16kV)^2}{451kVAR} = 38.37\Omega, C = \frac{1}{2\pi \times 60 \times 38.37\Omega} = 69\mu F$$

هارمونیک غالب در یک مبدل ١٢ پالسه هارمونیک ١١ است. فرکانس فیلتر ناچ را محاسبه می‌کنیم:

$$f = 10.7 f_0 = 642Hz$$

$$L = \frac{1}{(2\pi f)^2 C} = 0.877mH$$

محاسبهٔ جریان:

$$I_{filter} = \frac{451kVAR}{\sqrt{3} \times 4.16kV} = 62.5A$$

$$I_L = 1.5 \times 62.5A = 93.9A$$

$$Q_L = (93.9A)^2 L\omega = 2.92kVAR$$

$$X_L = L\omega = 0.33\Omega$$

$$I_1 = \frac{V_{phase}}{X_C - X_L} = \frac{4.16kV}{\sqrt{3}(38.37\Omega - 0.33\Omega)} = 63.1A$$

$$I_{10.7 f_0} = 63.1A/10.7 = 5.9A$$

$$I_{rms} = \sqrt{63.1^2 + 5.9^2} = 63.3A$$

جریان مجاز هر فاز از بانک عبارت است از:

$$I = \frac{200kVAR}{2.4kV} = 72.2A$$

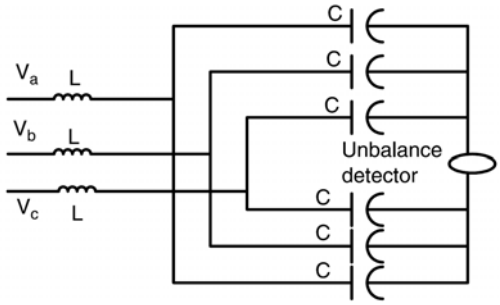
محاسبهٔ ولتاژها:

$$V_1 = 63.1A \times 38.37\Omega = 2.41kV$$
$$V_{10.7\,f_0} = 63.1A \times 38.37\Omega / 10.7 = 226.3V$$
$$V_{peak} = 2.41kV + 226.3V = 2.647kV$$
$$V_{rms} = \sqrt{(2.41kV)^2 + (226.3V)^2} = 2.431kV$$

توان راکتیو تحویلی:

$$Q = 2.41kV \times 63.1A = 154.2kVAR$$
$$R = 2 \times 10.7 \times 0.33\Omega = 7.1\Omega$$

دیاگرام تک‌خط این فیلتر در تصویر ۲۰-۱۲ آمده است. شش عدد از خازن‌های ۲/۷۷ کیلوولت و ۱۰۰ میکروفارادی استفاده شده‌اند. سه عدد از القاگرهای ۸۷۷ میکروهانری (۲/۹ کیلووار) مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مقدار BIL در سیستم ۷۵ کیلوولت در نظر گرفته شده است. بانک خازنی با اتصال ستارهٔ دوبل زمین‌نشده طراحی شده است. جریان عدم تعادل با یک ترانس جریان تشخیص داده می‌شود. برای فیلتر بالاگذر یک مقاومت ۷/۱ اهمی به فیلتر اضافه شده که در تصویر نیامده است.




**تصویر ۲۰-۱۲: دیاگرام تک‌خط فیلتر طراحی شده**

**مثال**

جریان باری در ٤/١٦ کیلوولت ۵۰۰ آمپر است. هارمونیک‌های جریان ۵ و ۷ به ترتیب برابر ۸۰ و ٦٠ آمپر هستند. مقادیر زیر را حساب کنید: (۱) مقدار مؤثر جریان در ٤/١٦ کیلوولت، (۲) مقدار TDD، (۳) اغتشاش مؤلفهٔ ۵ هارمونیک، (٤) اغتشاش مؤلفهٔ ۷ هارمونیک.

**پاسخ**

(۱)

$$I_{rms} = \sqrt{I_1^2 + I_5^2 + I_7^2} = \sqrt{500^2 + 80^2 + 60^2} = 509.9A$$

(۲)

$$TDD = \frac{\sqrt{80^2 + 60^2}}{500} \times 100 = 20\%$$

(۳)

$$\frac{I_5}{I_1} \times 100 = \frac{80}{500} \times 100 = 16\%$$

(٤)

$$\frac{I_7}{I_1} \times 100 = \frac{60}{500} \times 100 = 12\%$$

### ۲۰-۷-۱- فیلترهای رایج

یک فیلتر عملاً شامل بانک خازنی، کات‌اوت با فیوز، راکتور، و برق‌گیر تشکیل شده است. نمونهٔ چنین فیلتری را در تصویر ۲۰-۱۳ می‌بینید. بانک‌های خازنی و راکتورها در رَک نصب شده‌اند. در فصل ۷ نمونه‌های مختلف نصب را دیدیم (تصویر ۷-٤ بر روی تیر، تصویر ۷-۷ درون تابلو، و تصویر ۷-۵ در فضای آزاد). این فیلترها را می‌توان با کلیدهای روغنی، مدارشکن‌های خلأ، یا سوییچ‌های خلأ قطع و وصل کرد.

**تصویر ۲۰-۱۳: فیلتر نصب شده در یک کارخانهٔ مواد شیمیایی**

## ۲۰-۸- خلاصه و مؤخره

در این فصل، منابع هارمونیک و دامنه‌های هر یک از دید سیستم شناسایی شد. میزان مجاز اغتشاش در ولتاژ و جریان بر اساس استاندارد IEEE 519 بیان شد. در مورد اثر خازن بر سیستم و رزونانس‌های هارمونیکی به دلیل تعامل با امپدانس منبع بحث شد. برای بهبود ضریب توان و کاهش هارمونیک‌ها به مقدار مجاز از فیلتر تیون‌شده استفاده شد. همچنین روش طراحی یک فیلتر ناچ بیان گردید.

# فصل ۲۱ : حالت‌های گذرا در ترانس بانک خازنی

## ۲۱-۱- معرفی

استفاده از خازن‌های شانت در شبکه برای اصلاح ضریب توان باعث صرفه‌جویی‌های بزرگی می‌شود. از اثرات جانبی این خازن‌ها، رزنانس هارمونیک‌ها، تقویت ولتاژ، اضافه‌ولتاژها، فرورزونانس، و مسائل مربوط به آن است که در فصل‌های قبل مطرح شد. یکی از اثرات کلیدزنی خازن بر ترانس تولید نوسان‌های فرکانس بالا و در برخی موارد خرابی تجهیز است. برای درک این پدیده باید الگوی کلیدزنی و نتایج حوزهٔ زمان و فرکانس در دسترس باشند. در برخی موارد ترانس و بانک خازنی با هم کلید می‌خورند. کوره‌های قوس از این دسته هستند که در آن کوره و ترانس با هم قطع و وصل می‌شوند. این ترکیب می‌تواند رزونانس ایجاد کند. در سیستم‌های فشار قوی و فوق فشار قوی، بانک‌های خازنی در پست‌های نصب می‌شوند و در انتهای خطوط ترانس‌های کاهنده قرار دارد. کلیدزنی این بانک‌ها باعث ایجاد موج‌های سیار و اضافه‌ولتاژ در ترانس انتهایی می‌شود. گذراهای ناشی از برق‌دار کردن خازن به همراه ترانس در این فصل بحث می‌شوند.

## ۲۱-۲- برق‌دار کردن بانک به همراه ترانس

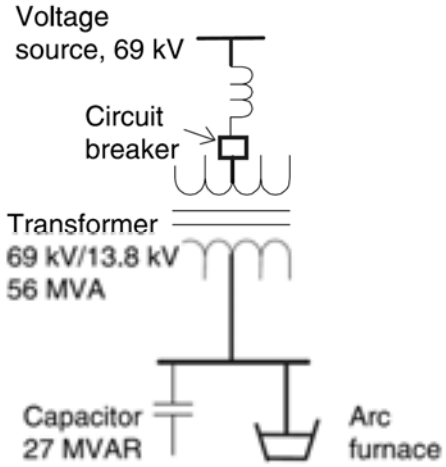
ترانس‌ها در تجهیزاتی مانند کوره‌های قوس به دفعات در طول شبانه‌روز سوییچ می‌شوند. در شرایط عادی، جریان هجومی مشکلی ایجاد نمی‌کند. ولی، اگر یکی از فرکانس‌های طبیعی سیستم با فرکانس جریان هجومی تلاقی کند، اضافه‌ولتاژ رخ می‌دهد. این امر در صورت نصب بانک خازنی بزرگ در ثانویهٔ ترانس مشهودتر است. اگر کلیدزنی ۲۵ تا ۵۰ بار در روز رخ دهد، احتمال دارد که خازن نتواند اضافه‌ولتاژهای موجود را برای مدتی طولانی تحمل کند. نمونهٔ مدار یک کورهٔ قوس در تصویر ۲۱-۱ نشان داده شده است. خازن‌های اصلاح ضریب توان با اندوکتانس سیستم تعامل می‌کنند و در فرکانس‌های خاصی رزونانس دارند. فرکانس رزونانس را می‌توان از رابطهٔ زیر به دست آورد:

$$h = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}}$$

در اینجا $X_C$ و $X_L$ به ترتیب راکتانس بانک خازنی و مجموع راکتانس ترانس و منبع است. رزونانس باعث تقویت هارمونیک‌های در گذراهای برق‌دار کردن می‌شود و اضافه‌ولتاژ تولید می‌کند. برای بررسی هارمونیک‌ها و اضافه‌ولتاژها در دو حالت بدون خازن و با خازن، معمولاً از شبیه‌سازهایی مانند EMTP[1] استفاده می‌شود. موارد زیر بررسی شده‌اند:

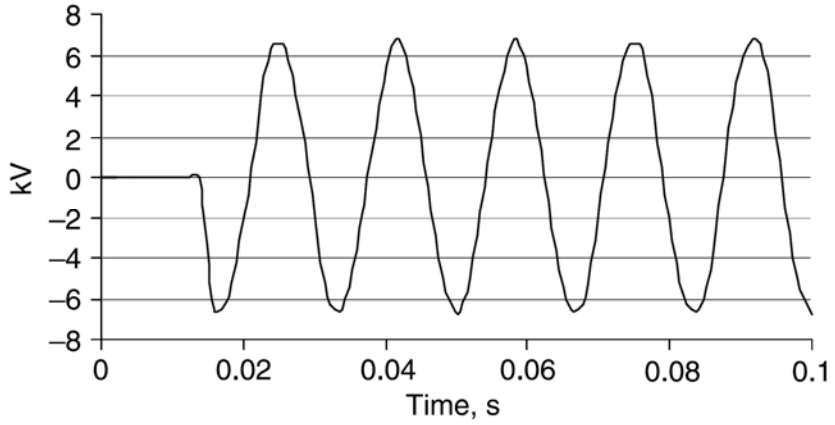
[1] electromagnetic transient program

- تحلیل حوزهٔ زمان بدون حضور خازن (تصویر ۲۱-۲)
- تحلیل حوزهٔ زمان با حضور خازن (تصویر ۲۱-۳)
- تحلیل حوزهٔ فرکانس با حضور خازن (تصویر ۲۱-٤)

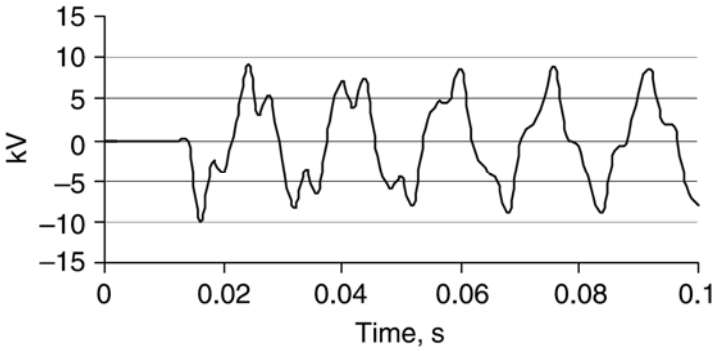



**تصویر ۲۱-۱: کورهٔ قوس همراه با بانک خازنی**

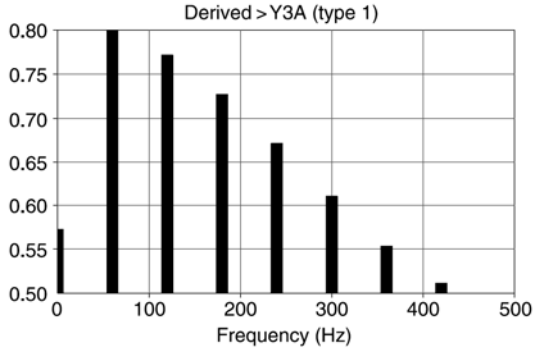
در تصویر ۲۱-۲ می‌توان شکل موج ولتاژ برق‌دار کردن ترانس بدون خازن را ملاحظه کرد. جریان هجومی ترانس اغتشاش کوچکی در ولتاژ ایجاد می‌کند. اضافه‌ولتاژ در اینجا ۵ درصد است. در تصویر ۲۱-۳ شکل موج ولتاژ برق‌دار کردن همزمان ترانس و بانک آمده است. در این مورد، شکل موج ولتاژ به هم ریخته و اضافه‌ولتاژ ٥٤ درصد است. هارمونیک‌های ولتاژی کاملاً مشهود است. در تصویر ۲۱-٤، طیف فرکانسی (تبدیل فوریه) شکل موج ولتاژ تصویر ۲۱-۳ آمده است. هارمونیک‌های غالب در جدول ۲۱-۱ فهرست شده‌اند. همان‌طور که در جدول دیده می‌شود، اندازهٔ هارمونیک‌ها قابل توجه است. گرچه با ٥٤ درصد اضافه‌ولتاژ مشکلی برای عایق‌ها پیش نمی‌آید، مدت زمان و فرکانس نوسان می‌تواند به یونیت‌های خازنی فشار آورده، از عمر مفید ترانس بکاهد.




**تصویر ۲۱-۲: شکل موج ولتاژ برق‌دار کردن (بدون خازن)**




**تصویر ۲۱-۳: شکل موج ولتاژ برق‌دار کردن (با خازن)**




**تصویر ۲۱-٤: طیف هارمونیکی موج تصویر ۲۱-۳**

**جدول ۲۱-۱: هارمونیک‌های غالب در موج تصویر ۲۱-۳**

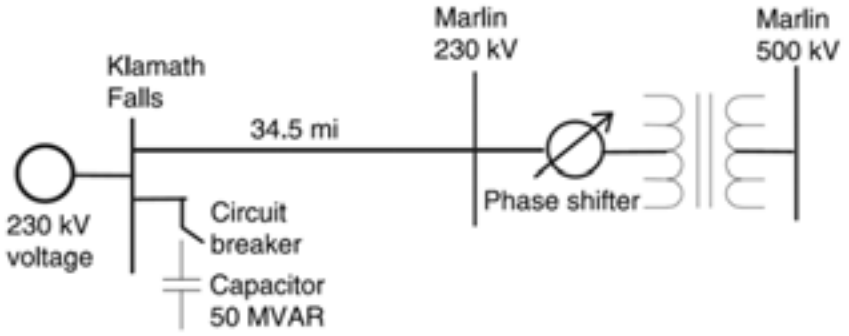
| فرکانس (هرتز) | مرتبهٔ هارمونیک | اندازهٔ هارمونیک‌ها ( *p.u.* ) |
|---|---|---|
| 60 | 1f | 0.8 |
| 120 | 2f | 0.77 |
| 180 | 3f | 0.73 |
| 240 | 4f | 0.67 |
| 300 | 5f | 0.62 |

## ۲۱-۳- کلیدزنی بانک و گذراهای ترانس

برق‌دار کردن بانک‌های خازنی در خطوط منتهی به ترانس باعث تولید حالات گذرا در ترانس می‌شود. این حالات گذرا اضافه‌ولتاژهای فرکانس بالا هستند. برق‌دار کردن بانک‌های درون پست می‌تواند موج‌های سیار در خط و به سوی ترانس بفرستد. این موج‌ها در ترانس منعکس شده موج‌های اول را دو برابر می‌کند. این گذراها دو برابر ولتاژ پیک سیستم و حدود چهار برابر ولتاژ پیک فاز هستند. این ولتاژها بالاتر از حد تحمل فاز به فاز ترانس هستند. در این بخش چند مثال عملی از این مشکل را می‌آوریم:

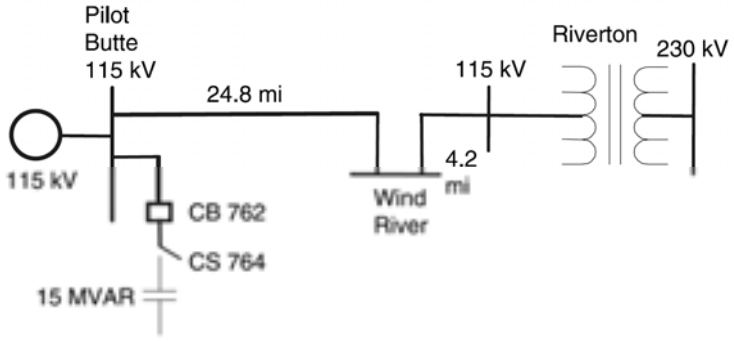
در نمونهٔ اول، یک ترانس شیفت فاز ۲۳۰ کیلوولتی در انتهای یک خط ٥٦ کیلومتری قرار دارد (تصویر ۲۱-۵). یک بانک خازنی ۵۰ مگاواری در پست آبشار Klamath نصب شده است. ترانس شیفت فاز با برق‌گیرهای ۱۸۰ کیلوولتی محافظت شده است. بانک خازنی با مدارشکنی سوییچ می‌شود که مقاومت میراکننده ندارد. این امر باعث

از کار افتادن ترانس شیفت فاز به دلیل خرابی در عایق بین فازهای B و C شد. برق‌گیر باعث حذف اضافه‌ولتاژ نشد.



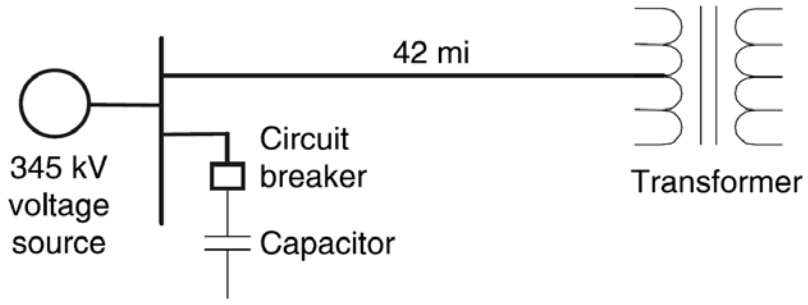

**تصویر ۲۱-۵: خرابی ترانس شیفت فاز**

در نمونهٔ دوم، یک خط انتقال ۱۱۵ کیلوولتی به ترانسی در پست Riverton ختم می‌شود. دیاگرام تک‌خط این شبکه در تصویر ۲۱-٦ آمده است. یک بانک خازنی ۱۵ مگاواری در پست Pilot Butte نصب شده است. در ابتدا مدار شکن شمارهٔ ۷٦۲ بسته شد، سپس بانک خازنی برق‌دار شد. سپس مدارشکن ۷٦۲ توسط رلهٔ محافظ باس تریپ داده شد. بعد از تحقیق معلوم شد که رله بسیار حساس تنظیم شده است. همزمان با برق‌دار کردن بانک، ترانس Riverton از کار افتاد. بررسی بیشتر نشان داد که سیم‌پیچی فاز B نزدیک به بوشینگ ۱۱۵ کیلوولتی خراب شده است. به علاوه، اضافه‌ولتاژ دیگری باعث عمل کردن فاصلهٔ هوایی فاز B در ترانس ولتاژ خازنی (CCVT) در Riverton شد.



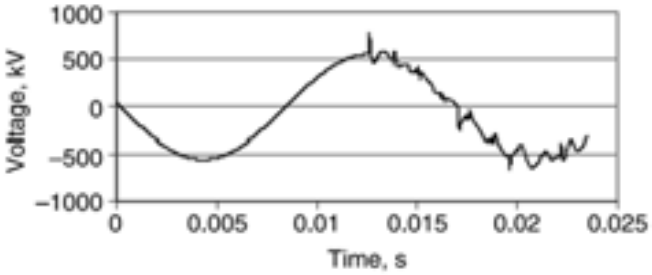

**تصویر ۲۱-٦: خرابی ترانس پست Riverton**

مدار تک‌خطی نمونهٔ سوم در تصویر ۲۱-۷ آمده است. در اینجا یک پست ۳٤۵ کیلوولت به یک خط ٦۸ کیلومتری منتهی به ترانس وصل شده است. بانک خازنی در پست ۳٤۵ کیلوولتی نصب شده است. برای شبیه‌سازی اضافه‌ولتاژهای این شبکه از نرم‌افزار EMTP استفاده شده است.

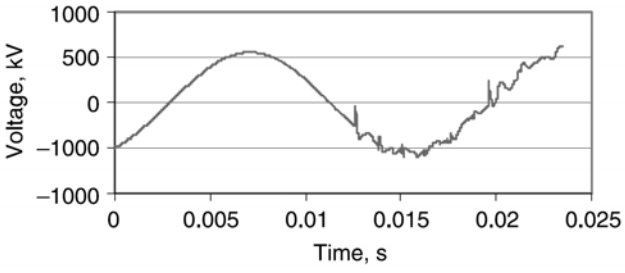



**تصویر ۲۱-۷: نمونهٔ سوم تولید اضافه‌ولتاژ**

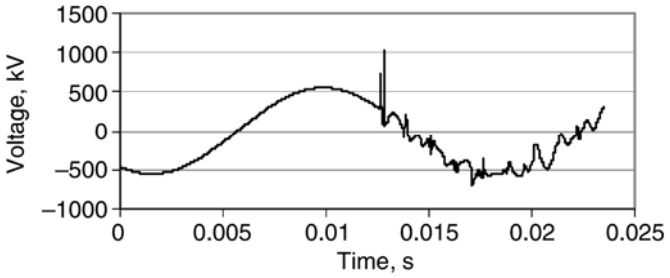
برق‌دار کردن بانک خازنی در پست باعث ایجاد اضافه‌ولتاژ می‌شود. ولتاژ فازهای A و C (بر حسب زمان) در محل ترانس به ترتیب در تصویر ۲۱-۸ و تصویر ۲۱-۹ آمده است. ماکزیمم ولتاژ مشاهده شده در ترانس در فازهای A و C، به ترتیب به میزان ۷۵۰ کیلوولت (۲/٦٦ برابر ولتاژ نامی) و ۷۰۰ کیلوولت (۲/٤۸ برابر ولتاژ نامی) است. ولتاژ فاز به فاز فازهای A و C در تصویر ۲۱-۱۰ آمده است. ماکزیمم این ولتاژ ۱۲۵۰ کیلوولت (٤/٤۳ برابر ولتاژ نامی) است. مقدار مجاز ضربه ناشی از کلیدزنی در خط ۳٤۵ کیلوولتی برابر ۱۰۵۰ کیلوولت (۳/۷۳ برابر ولتاژ نامی) است. اضافه‌ولتاژ گذرای میان فازهای A و C از این مقدار مجاز تجاوز می‌کند.




**تصویر ۲۱-۸: ولتاژ فاز A در محل ترانس**




**تصویر ۲۱-۹: ولتاژ فاز C در محل ترانس**



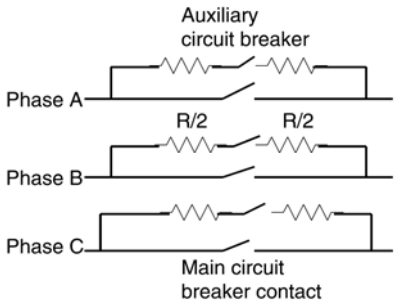

**تصویر ۲۱-۱۰: ولتاژ فاز به فاز A و C در محل ترانس**

## ۲۱-۴- کاهش گذراهای ولتاژ

روش‌های متعددی برای کاهش گذراهای ترانس وجود دارد. برخی از این روش‌ها در اینجا بحث می‌شود:

### ۲۱-٤-۱- مقاومت‌های میراکننده

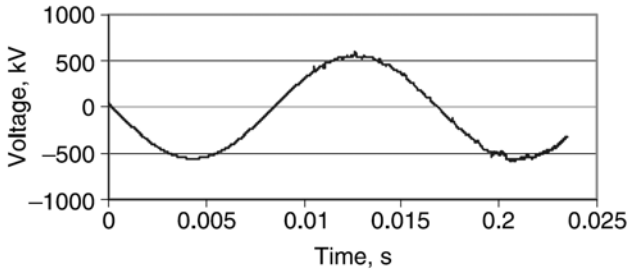
می‌توان مدارشکن‌های کلیدزنی بانک خازنی را به مقاومت‌های میراکننده مجهز کرد. نمونهٔ مدار چنین مدارشکنی در تصویر ۲۱-۱۱ آمده است. در اینجا، کنتاکت‌های کمکی به کنتاکت‌های اصلی مدارشکن متصل شده‌اند. مقاومتی مناسب به کنتاکت‌های کمکی وصل است. مدار فوق برای مدل‌سازی در EMTP استفاده می‌شود. ابتدا کنتاکت‌های کمکی بسته می‌شوند و سپس کنتاکت‌های اصلی با تأخیر بسته می‌شوند. مقاومت میرا کننده جریان هجومی را محدود می‌کند. کنتاکت‌های کمکی بعد از مدتی باز می‌شوند. اثر این مقاومت در ولتاژ فازهای A، C، و ولتاژ فاز به فاز AC به ترتیب در تصویر ۲۱-۱۲، تصویر ۲۱-۱۳، و تصویر ۲۱-۱٤ آمده است. این ولتاژها در جدول ۲۱-۲ فهرست شده‌اند. مقادیر اضافه‌ولتاژ در محدودهٔ مجاز قرار می‌گیرد.



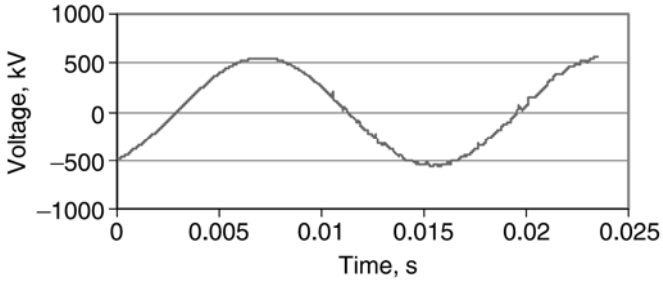

**تصویر ۲۱-۱۱: محل نصب مقاومت‌های میراکننده**

**جدول ۲۱-۲: اضافه‌ولتاژهای گذرا با مقاومت میرا کننده**

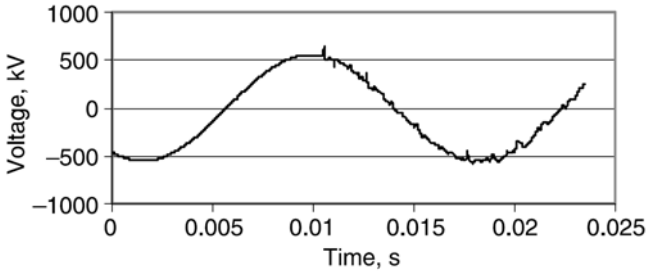
| محل اندازه‌گیری | ولتاژ (کیلوولت) | ولتاژ ( *p.u.* ) با مقاومت میرا کننده | ولتاژ ( *p.u.* ) بدون مقاومت میرا کننده |
|---|---|---|---|
| فاز A | 600 | 2.12 | 2.66 |
| فاز C | 580 | 2.06 | 2.48 |
| فاز A به فاز C | 620 | 2.19 | 4.43 |




تصویر ۲۱-۱۲: ولتاژ فاز **A** (با مقاومت میرا کننده)



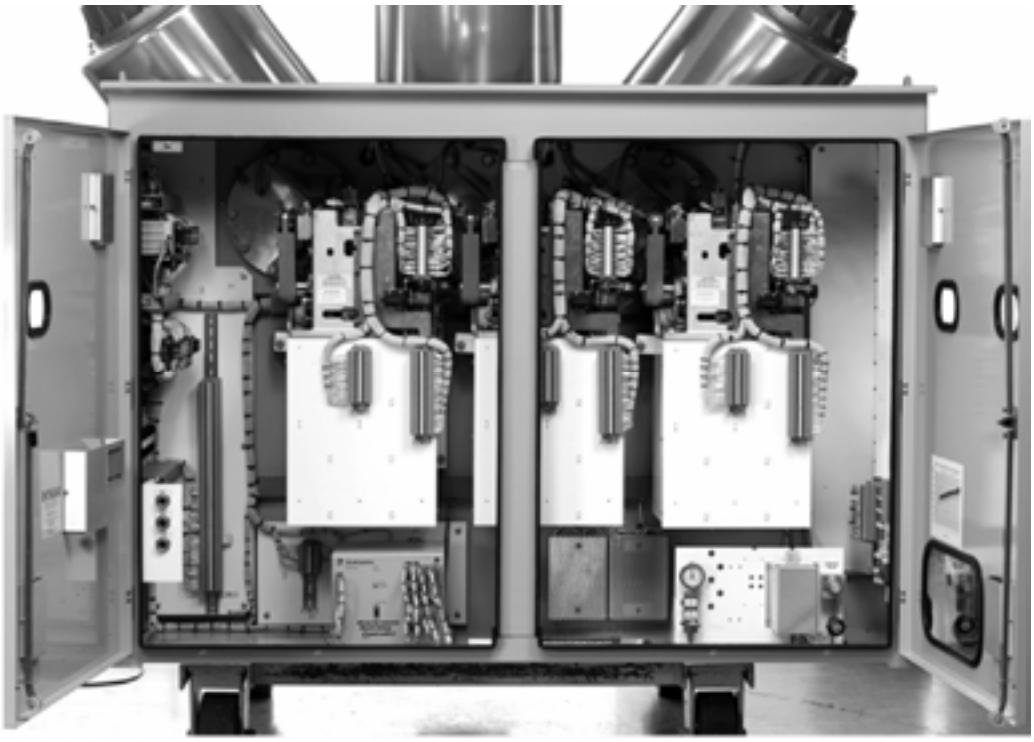

تصویر ۲۱-۱۳: ولتاژ فاز **C** (با مقاومت میرا کننده)




تصویر ۲۱-۱٤: ولتاژ فاز **A** به **C** (با مقاومت میرا کننده)

### ۲۱-٤-۲- کلیدزنی کنترل‌شده

در برخی مدارشکن‌ها می‌توان لحظهٔ بستن تیغه‌ها را کنترل کرد تا اضافه‌ولتاژها به حداقل برسد. اگر کنتاکت‌ها در نزدیکی لحظهٔ عبور از صفر ولتاژ بسته شوند، گذراها کاهش می‌یابد. نمونه‌ای از کلیدزنی کنترل‌شده در مدارشکن گازی ($SF_6$) سه‌فاز، ۲۳۰ کیلوولت، ٤۰ کیلوآمپر در تصویر ۲۱-۱۵ آمده است.



**تصویر ۲۱-۱۵: کلیدزنی سنکرون در یک مدارشکن گازی**

### ۲۱-٤-۳- بستن غیر همزمان کنتاکت‌های مدارشکن

در بانک‌های خازنی زمین‌شده، می‌توان با بستن غیر همزمان کنتاکت‌ها گذراهای فاز به فاز را کاهش داد. این روش برای بانک‌های زمین‌نشده جوابگو نیست و رزونانس داخلی را کاهش نمی‌دهد.

### ۲۱-٤-٤- استفاده از راکتور

نصب یک راکتور در هر فاز بانک خازنی می‌تواند گذراهای ولتاژ را کاهش دهد. راکتورهای سری به کثرت در بانک‌های خازنی برای کاهش جریان هجومی و اضافه‌ولتاژهای گذرا استفاه می‌شوند.

### ۲۱-٤-۵- استفاده از برق‌گیر

نصب برق‌گیر در ترمینال ترانس می‌تواند باعث کاهش حالت‌های گذرا شود. با استفاده از برق‌گیرهای اکسید فلزی، ولتاژ فاز به زمین در هر فاز به ۲ برابر ولتاژ نامی محدود می‌شود. در بدترین حالت، که $+2p.u.$ روی یک فاز و $-2p.u.$ روی فاز دیگر بیفتد، ولتاژ فاز به فاز تا ٤ برابر ولتاژ نامی افزایش خواهد یافت. اگر برق‌گیرها بین فازها نصب شوند، حفاظت ۸۷٪ حالت فاز به زمین خواهد بود. در این صورت، ولتاژ گذرا از ٤ برابر ولتاژ نامی به ۳/۵ برابر ولتاژ نامی کاهش می‌یابد.

### ۲۱-٤-٦- اتصال بانک خازنی

در تجهیزات کلیدزنی که زمان بستن تصادفی است، بانک‌های خازنی زمین‌نشده اضافه‌ولتاژهای بزرگتری نسبت به بانک‌های زمین‌شده از خود نشان می‌دهند. در بانک‌های زمین‌شده، گذراهای هر فاز تقریباً مستقل از هم هستند. در بانک‌های زمین‌شده ولتاژ فاز به فاز بزرگی رخ می‌دهد.

در بانک‌های زمین‌نشده، فازی که اول بسته می‌شود گذرایی تولید نمی‌کند. بسته شدن فاز دوم نسبت به زمان بستن تولید گذرای بزرگی می‌کند. به همین دلیل است که بانک‌های زمین‌نشده ولتاژ فاز به فاز بزرگ‌تری نسبت به بانک‌های زمین‌شده دارند.

## ۲۱-۵- مؤخره

در این فصل، حالت‌های گذرای ناشی از برق‌دار کردن همزمان ترانس و بانک خازنی بررسی شد. این ولتاژها حاوی هارمونیک‌های قابل توجه است و شکل موج ولتاژ معوج می‌شود. بنابراین، باید با مقاومت‌های میراکننده یا روش‌های دیگر این گذراها را کاهش داد.

برق‌دار کردن بانک خازنی در پست می‌توان اضافه‌ولتاژهای بزرگی در ترانس انتهای خط انتقال ایجاد کند. گذراهای ترانس انتهایی را می‌توان با استفاده از مقاومت میراکننده در مدارشکن، کلیدزنی کنترل‌شده، بستن ناهمزمان، نصب راکتور در بانک، و نصب برق‌گیر در ترانس کاهش داد. برخی از بانک‌ها مانند بانک‌های زمین‌شده گذراهای محدودی تولید می‌کنند.

دیگر شرایط که در این فصل بحث نشده، خطاهای موقت در خط منتهی به ترانس است. خطاهای تک‌فاز یا دوفاز باعث افزایش ولتاژ در فازهای سالم ترانس می‌شود. اگر خطی با خازن شانت جبران شده باشد، اضافه‌ولتاژ بزرگ‌تر است و احتمال وقوع فرورزونانس می‌رود. در این موارد، هم بانک و هم ترانس آسیب می‌بینند. در صورت باز بودن یکی از فازها، ولتاژ آن فاز می‌تواند افزایش یابد. امکان ایجاد فرورزونانس بین خازن و راکتانس ترانس وجود دارد. در این موارد اتصالات ترانس‌های دو سر خط بسیار مهم هستند. عامل مهم دیگر زمین‌شدن ترانس و بانک خازنی است.

# فصل ۲۲ : کلیدزنی خازن‌ها

## ۲۲-۱- معرفی

عموماً برای اصلاح ضریب توان و بهبود پروفایل ولتاژ از خازن شانت استفاده می‌شود. همچنین روش رایج برای اصلاح ضریب توان صنایع این است که در محل از بانک‌های خازنی استفاده شود. اگر در محل بار هارمونیکی وجود داشته باشد، در کنار بانک از فیلتر هم استفاده می‌شود. این بانک‌های خازنی با توجه به بار وارد و خارج می‌شوند. عملیات کلیدزنی شامل برق‌دار کردن، بی‌برق کردن، رفع خطا، و حفاظت پشتیبان، و بستن مجدد است. برخی اوقات به دلیل اضافه‌ولتاژ روی تیغه‌های مدارشکن restrike رخ می‌دهد. به علاوه، بر اثر وقوع خطا در نزدیکی بانک‌های خازنی، جریان دشارژ بزرگی از بانک سرازیر می‌شود. همچنین برق‌دار کردن بانک در جوار بانک خازنی دیگر نیز مشکلات خود را دارد. برخی اوقات سیستم‌های فشار قوی و فوق فشار قوی با ترانس‌های کاهنده به سیستم‌های فشار ضعیف وصل می‌شوند. اگر بانک‌های خازنی فشار قوی بسیار بزرگ باشند، در هنگام کلیدزنی امکان افزایش ولتاژ در فشار ضعیف وجود دارد. می‌بینیم که نکات مهمی در کلیدزنی بانک خازنی وجود دارد. برای بررسی این پدیده از نرم‌افزار EMTP استفاده می‌شود.

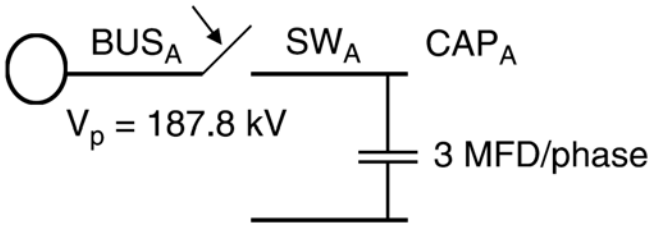
## ۲۲-۲- انواع کلیدزنی

در اینجا کلیدزنی‌هایی مانند برق‌دار کردن، بی‌برق کردن، رفع خطا، حفاظت پشتیبان، بستن مجدد، و restrike برای یک شبکهٔ شعاعی بررسی شده است. در این مثال، یک منبع سه‌فاز، ۶۰ هرتز، و ۲۳۰ کیلوولتی استفاده می‌شود که پیک ولتاژ آن ۱۸۸/۸ کیلوولت است. امپدانس فیدر شعاعی $(0.1+j1.02)\Omega$ است. ظرفیت خازن ۳ میکروفاراد در هر فاز است که توان ۶۰ مگاواری تولید می‌کند. مدارشکن به صورت یک کلید وابسته به زمان تعریف می‌شود که بسته به نیاز باز و بسته می‌شود.

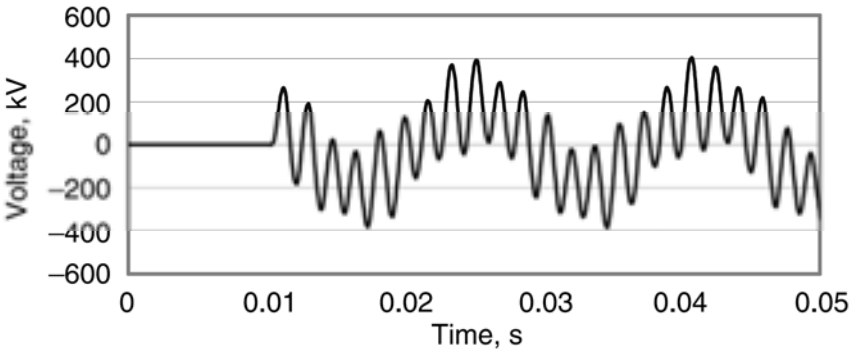
### ۲۲-۲-۱- برق‌دار کردن

مدار مورد استفاده در تصویر ۲۲-۱ آمده است. برای نمایش اضافه‌ولتاژهای گذرای ناشی از برق‌دار کردن بانک، مدارشکن در زمان مورد نظر بسته می‌شود. شکل موج ولتاژ فاز A در تصویر ۲۲-۲ نشان داده شده است. ماکزیمم اضافه‌ولتاژ در این حالت ۲/۱ برابر ولتاژ نامی و فرکانس نوسان ۵۸۸ هرتز است. اندازه و فرکانس جریان هجومی در هنگام برق‌دار کردن بانک از این رابطه به دست می‌آید:

$$I_{peak} = \frac{V_{peak}}{Z_S}, Z_S = \sqrt{\frac{L}{C}}, f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$




**تصویر ۲۲-۱: دیاگرام تک‌خط در حالت برق‌دار کردن**




**تصویر ۲۲-۲: شکل موج ولتاژ فاز A در ترمینال خازن**

**مثال**

در یک سیستم ۲۳۰ کیلوولتی که امپدانس منبع در آن ۹/۵ اهم است، خازنی با ظرفیت ۳ میکروفاراد در هر فاز نصب شده است. اندازه و فرکانس نوسان جریان هجومی هنگام برق‌دار کردن بانک چقدر است؟

**پاسخ**

$$X_L = 9.5\Omega \Rightarrow L = \frac{9.5\Omega}{2\pi \times 60} = 0.025H$$

$$C = 3\mu F$$

$$Z_S = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{0.025H}{3\mu F}} = 91.3\Omega$$

$$I_{peak} = \frac{V_{peak}}{Z_S} = \frac{230kV \times \left(\sqrt{2}/\sqrt{3}\right)}{91.3\Omega} = 2.07kA$$

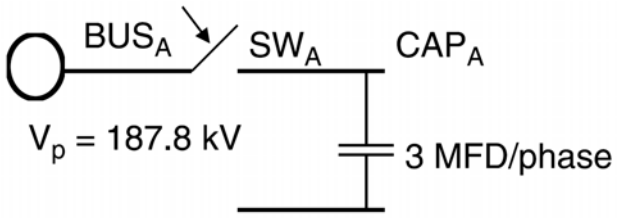
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 581Hz$$

فرکانس به دست‌آمده از نرم‌افزار EMTP برابر ۵۸۸ هرتز است.

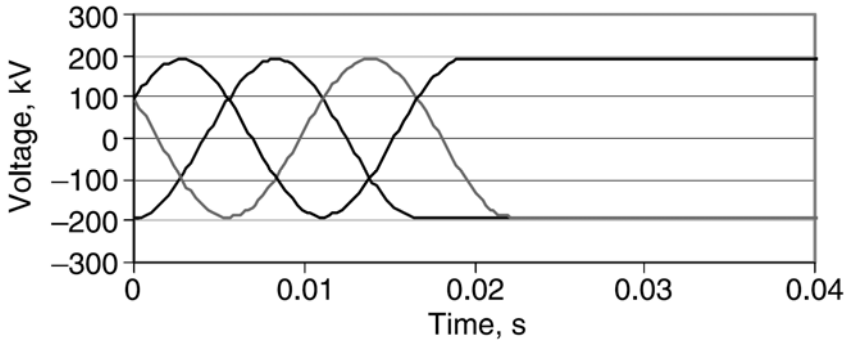
### ۲۲-۲-۲- بی‌برق کردن

دیاگرام تک‌خط مدار مورد نظر در تصویر ۲۲-۳ آمده است. مدارشکن در لحظهٔ مورد نظر باز می‌شود و با صفر شدن جریان قوس خاموش می‌شود. شکل موج ولتاژ در انتهای باز خط در تصویر ۲۲-٤ نشان داده شده است. دیده

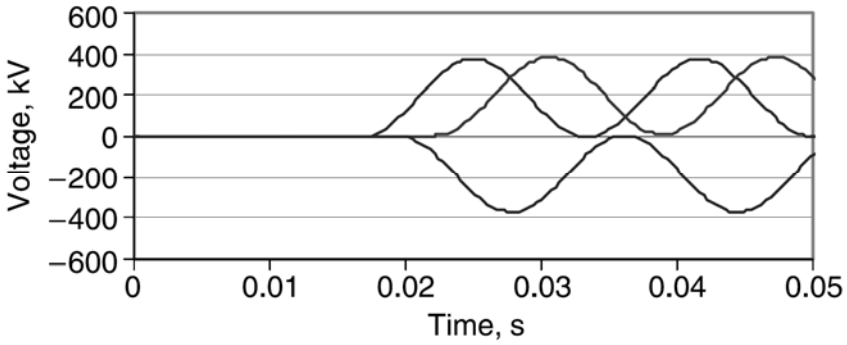
می‌شود که ولتاژها به حالت DC می‌روند و خط باردار می‌ماند. این امر به دلیل وجود خازن است. شکل موج مهم دیگر شکل موج TRV روی مدارشکن است که در تصویر ۲۲-۵ آمده است. ماکزیمم اضافه‌ولتاژ و TRV در هنگام بی‌برق کردن به ترتیب ۱ و ۲ برابر ولتاژ نامی است. اگر اندازهٔ TRV از مقدار قابل تحمل مدارشکن تجاوز کند، مجدداً روی تیغه‌های مدارشکن قوس می‌زند (restrike).




**تصویر ۲۲-۳: دیاگرام تک‌خط در حالت بی‌برق کردن**




**تصویر ۲۲-٤: شکل موج ولتاژ فاز A در ترمینال خازن**

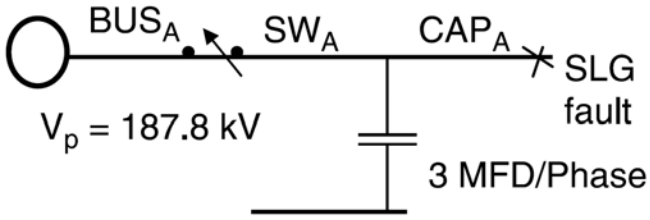



**تصویر ۲۲-۵: شکل موج TRV روی سوییچ**

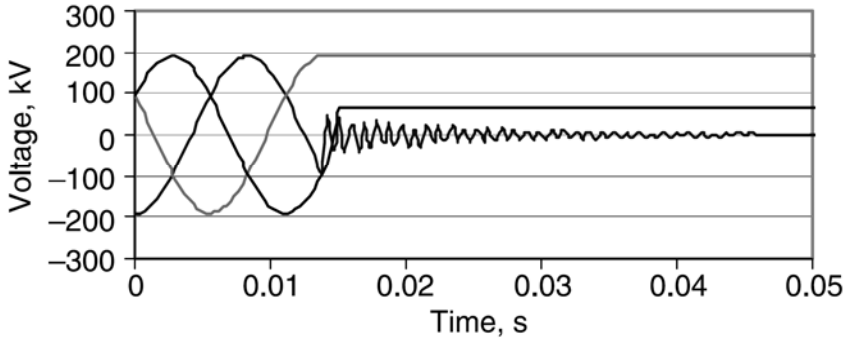
### ۲۲-۲-۳- رفع خطا

دیاگرام تک‌خطی مدار مورد بررسی در تصویر ۲۲-٦ آمده است. فرض می‌کنیم که یک خطای فاز به زمین (فاز A) رخ داده است. سپس مدارشکن باز می‌شود. ولتاژهای فاز در انتهای خط در تصویر ۲۲-۷ نشان داده شده است.

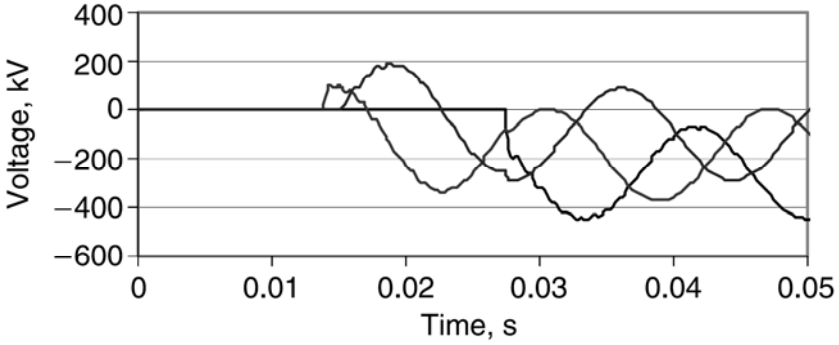
می‌بینیم که ولتاژ روی فاز دارای خطا صفر و روی فازهای دیگر برابر ولتاژ نامی است. شکل موج‌های TRV در تصویر ۲۲-۸ آمده است. ماکزیمم TRV تقریباً ۲/۳ برابر ولتاژ نامی و فرکانس نوسان آن ۵ کیلوهرتز است.




**تصویر ۲۲-۶: دیاگرام تک‌خطی رفع خطا روی فاز A**



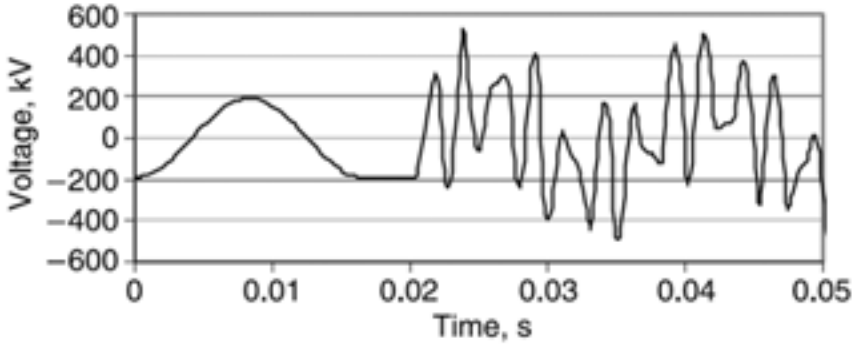

**تصویر ۲۲-۷: شکل موج‌های ولتاژ انتهای خط هنگام رفع خطا**




**تصویر ۲۲-۸: شکل موج TRV روی سوییچ**

### ۲۲-۲-٤- بستن مجدد

بستن مجدد به فرآیند اتصال مجدد بانک خازنی باردار به شبکه گفته می‌شود. در این حالت بانک خازنی در انتهای یک خط باز قرار دارد. دیاگرام تک‌خطی این سیستم در تصویر ۲۲-۱ آمده است. این عمل برای کاستن زمان قطع سرویس انجام می‌شود. ابتدا مدارشکن بسته و در زمان ۱۰ میلی‌ثانیه باز می‌شود. هنوز خط باردار است. سپس در زمان ۲۰ میلی‌ثانیه مدارشکن بسته می‌شود. شکل موج ولتاژ در منبع در تصویر ۲۲-۹ نشان داده شده است. ماکزیمم دامنهٔ اضافه‌ولتاژ به دلیل باردار بودن خط ۲/۵ برابر ولتاژ نامی و فرکانس نوسان آن ٤۰۰ هرتز است.



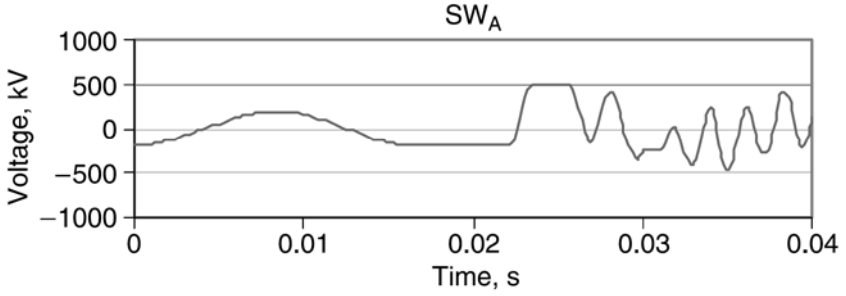

**تصویر ۲۲-۹: ولتاژ منبع هنگام بستن مجدد فاز A**

### ۲۲-۲-۵- حفاظت پشتیبان

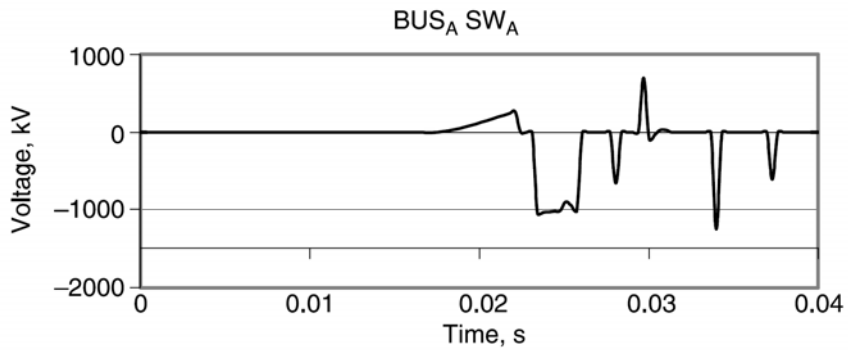
فرض کنید دو خط موازی به یک منبع وصل شده باشند. اگر خطایی در انتهای خط رخ دهد و مدارشکن اول نتواند آن را رفع کند، مدارشکن پشتیبان باید انجام وظیفه کند. به این فرآیند حفاظت پشتیبان گفته می‌شود که با تأخیر زمانی انجام می‌شود. ضربهٔ ولتاژ و جریان ناشی از این مانند رفع خطا است و در اینجا آورده نشده است.

### ۲۲-۲-٦- وقوع restrike

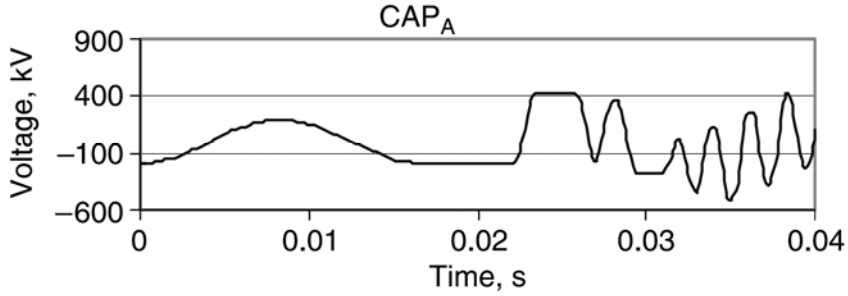
برخی اوقات هنگام بی‌برق کردن بانک خازنی، ولتاژ روی تیغه‌های مدارشکن از حد تحمل آن تجاوز کرده، قوس دوباره روشن می‌شود. بدترین حالت یک نیم‌سیکل بعد از خاموشی قوس، هنگامی که ولتاژ سیستم در پیک است و علامت آن مخالف بار محبوس در بانک است. تحلیل برای مدار نشان داده شده در تصویر ۲۲-۳ انجام شده است. برای شبیه‌سازی restrike از یک سوییچ وابسته به ولتاژ استفاده شده که در ولتاژ خاصی بسته می‌شود. شکل موج ولتاژ منبع در تصویر ۲۲-۱۰ آمده است. شکل موج TRV در تصویر ۲۲-۱۱ نشان داده شده است. شکل موج ولتاژ خازن در تصویر ۲۲-۱۲ آمده است. گذرای ناشی از restrike، اضافه‌ولتاژ ۳/۲ برابر ولتاژ نامی در فاز، ۲/۲ برابر ولتاژ نامی در خازن، و TRV حدود ٦/٤ برابر ولتاژ نامی در مدارشکن ایجاد می‌کند. این اضافه‌ولتاژها فشار زیادی بر تجهیزات مختلف از جمله برق‌گیر تحمیل می‌کنند.




**تصویر ۲۲-۱۰: شکل موج ولتاژ منبع هنگام restrike**



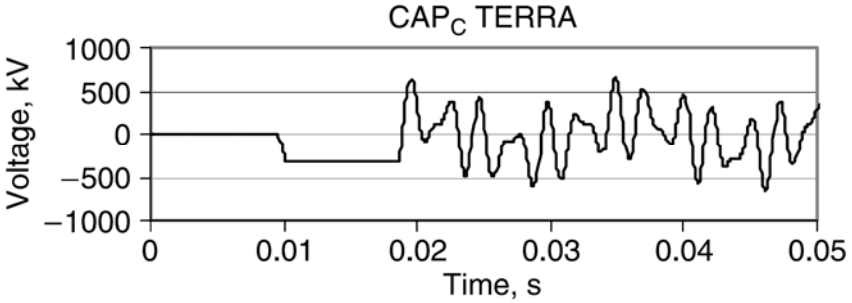

**تصویر ۲۲-۱۱: شکل موج TRV روی مدارشکن هنگام restrike**



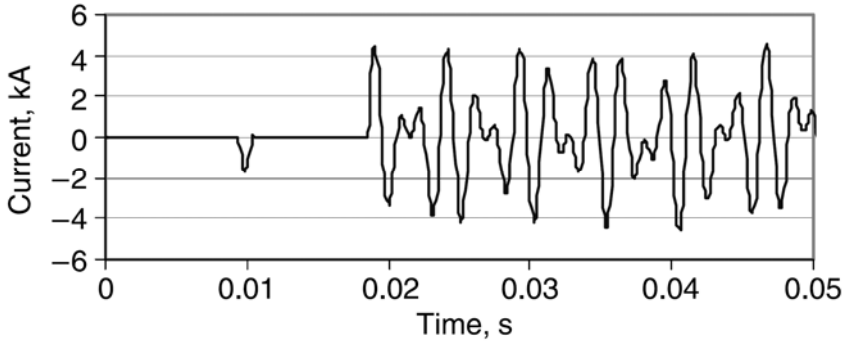

**تصویر ۲۲-۱۲: شکل موج روی خازن هنگام restrike**

### ۲۲-۲-۷- وقوع prestrike

در هنگام برق‌دار کردن بانک، احتمال تشکیل قوس پیش از اتصال فیزیکی تیغه‌های مدارشکن وجود دارد. به این پدیده prestrike گفته می‌شود. در این هنگام، فرکانس حالت گذرا برابر با فرکانس شبکه است. بعد از برقراری تماس فیزیکی تیغه‌ها، دامنهٔ گذراهای تولید شده بسیار بزرگ‌تر از گذراهای عادی است. این پدیده در مدارشکن‌های خلأ رایج است. در اینجا مثالی بر اساس مدار تصویر ۲۲-۱ تحلیل شده است. ولتاژ و جریان خازن به ترتیب در تصویر ۲۲-۱۳ و تصویر ۲۲-۱٤ آمده است. پیک گذرای ولتاژ از ۲ برابر ولتاژ نامی به ۳/۲۸ برابر افزایش یافته که باعث عمل‌کردن برق‌گیر می‌شود. دامنهٔ جریان هجومی نیز بسیار بزرگ‌تر است که ممکن است باعث خرابی خازن شود.



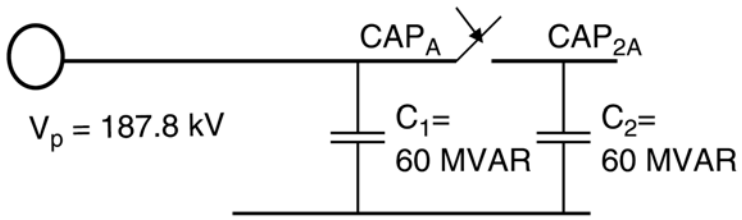

**تصویر ۲۲-۱۳: ولتاژ خازن هنگام prestrike روی فاز C**



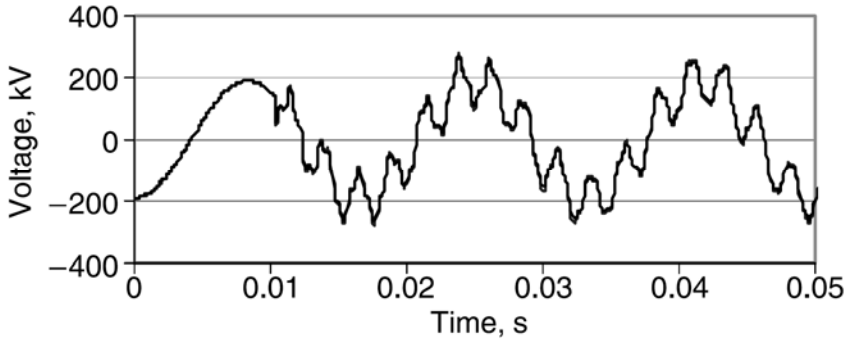

**تصویر ۲۲-۱٤: جریان خازن هنگام prestrike روی فاز C**

### ۲۲-۲-۸- کلیدزنی بانک‌های مجاور

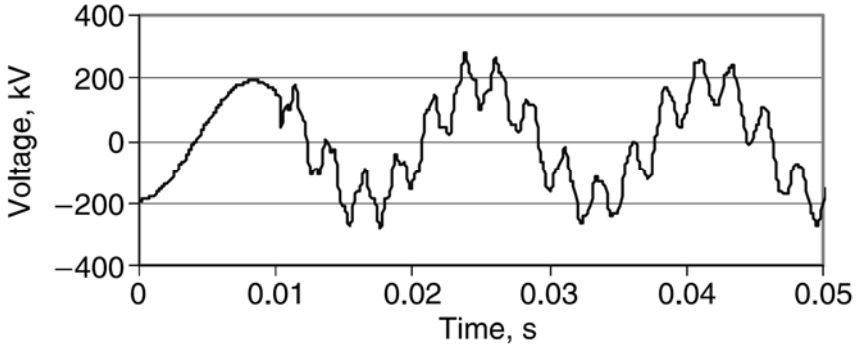
برق‌دار کردن بانک در مجاورت بانک‌های خازنی دیگر را کلیدزنی بانک مجاور می‌گویند. در این پدیده جریان‌هایی با دامنهٔ بزرگ و فرکانس بالا تولید می‌شوند. جریان باید در حد مجاز سوییچ و ترانس جریان نگهداشته شود. معمولاً از راکتورهای سری شده با یونیت‌های خازنی برای محدود کردن این جریان استفاه می‌شود. در تصویر ۲۲-۱۵ مدار ساده‌ای برای تحلیل این پدیده آمده است. شکل موج ولتاژ منبع ۲۳۰ کیلوولتی، ولتاژ خازن درون مدار، و ولتاژ خازن در حال ورود به شبکه به ترتیب در تصویر ۲۲-۱٦ تا تصویر ۲۲-۱۸ آمده است. پیک ولتاژها حدود ۱/٤۸ برابر ولتاژ نامی است. توجه داشته باشید که در اینجا خازن‌ها هم‌اندازه هستند.



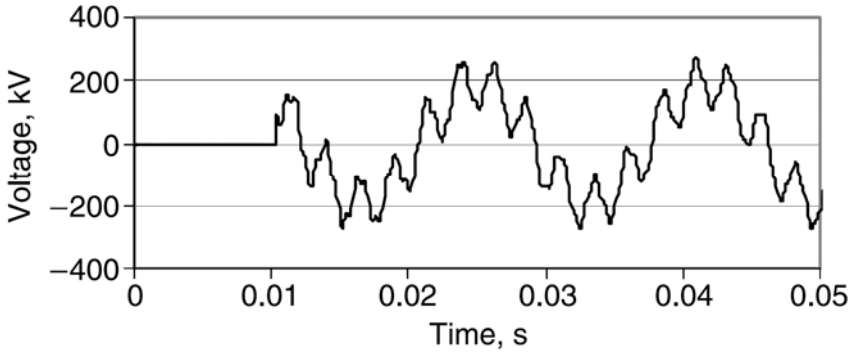

**تصویر ۲۲-۱۵: مدار معادل کلیدزنی بانک مجاور (فاز A)**




**تصویر ۲۲-۱٦: شکل موج ولتاژ منبع**

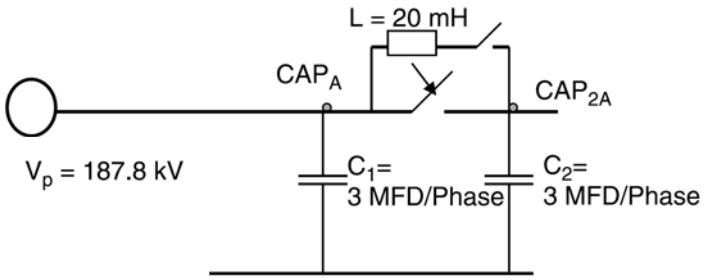



**تصویر ۲۲-۱۷: شکل موج ولتاژ خازن درون شبکه**



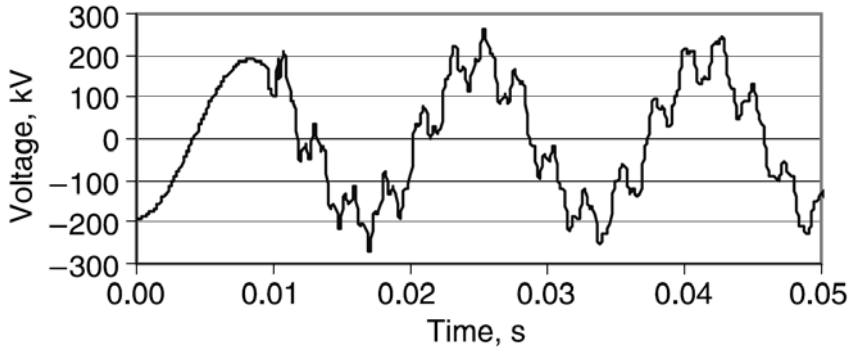

**تصویر ۲۲-۱۸: شکل موج ولتاژ خازن در حال ورود به شبکه**

برای کنترل جریان هجومی، می‌توان از یک راکتور محدود کنندهٔ جریان استفاده کرد. این راکتور (۲۰ میلی‌هانری) با یک جفت سوییچ وارد و خارج می‌شود. بلافاصله بعد از برق‌دار کردن، راکتور را اتصال کوتاه می‌کنیم. نمونهٔ چنین مداری در تصویر ۲۲-۱۹ آمده است. نمونهٔ تجاری چنین سوییچی در تصویر ۲۲-۲۰ نشان داده شده است. این سوییچ‌ها ارزان‌تر از مدارشکن‌ها هستند و ضربه ناشی از کلیدزنی را به خوبی کنترل می‌کنند. شکل موج ولتاژ منبع در تصویر ۲۲-۲۱ نشان داده شده است. در اینجا پیک حالت گذرا ۱/۳۲ برابر ولتاژ نامی است.




**تصویر ۲۲-۱۹: نمونهٔ مدار کلیدزنی با استفاده از راکتور**

تصویر ۲۲-۲۰: سوییچ مورد استفاده برای کلیدزنی بانک خازنی



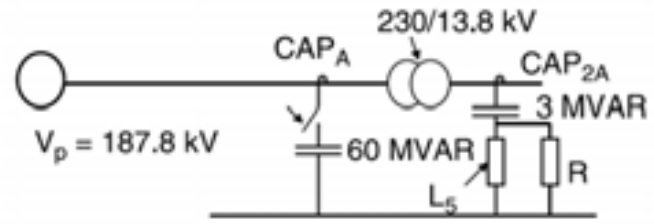

تصویر ۲۲-۲۱: ولتاژ منبع هنگام کلیدزنی با راکتور

### ۲۲-۲-۹- تقویت ولتاژ

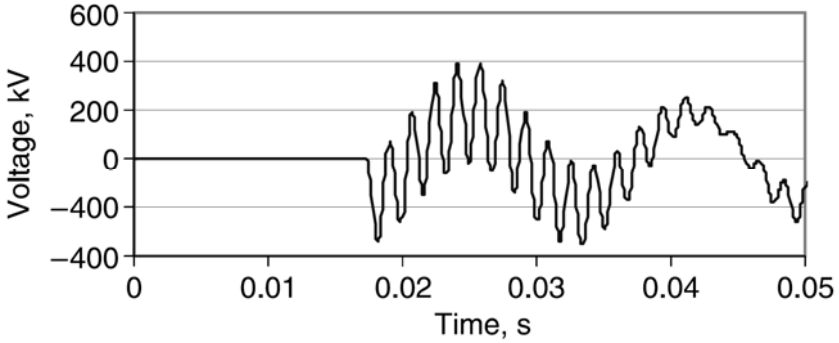
فرض کنید در سیستمی، بانک‌های خازنی در فشار ضعیف و فشار قوی نصب شده‌اند (تصویر ۲۲-۲۲). کلیدزنی بانک فشار قوی باعث القاء ولتاژهای بزرگی روی بانک خازنی فشار ضعیف می‌شود. این ولتاژ موقعی ماکزیمم است که:

- فرکانس طبیعی مدارهای خازنی و سلفی برابر باشد؛ یعنی $L_1C_1 = L_2C_2$.
- ظرفیت بانک خازنی فشار قوی بسیار بزرگ‌تر از بانک فشار ضعیف باشد (دست کم ۲۵ برابر).
- میرایی در سمت بانک فشار ضعیف کوچک باشد.

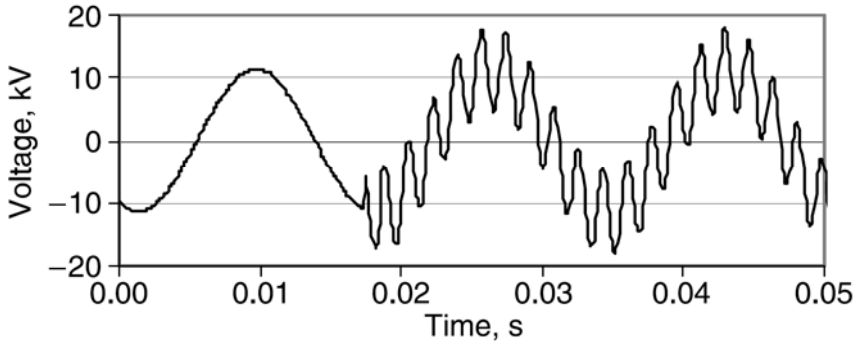
برای نمایش اثر تقویت ولتاژ، فرض کنید که بانک خازنی فشار ضعیف در مدار است و می‌خواهیم بانک فشار قوی را وارد شبکه کنیم. در حالت عادی انتظار می‌رود که گذراهای کلیدزنی تنها در بخش فشار قوی ظاهر شوند. در اینجا، به دلیل تعامل خازن و سلف در فشار ضعیف هم نوسان خواهیم داشت. در صورتی که فرکانس‌های طبیعی فشار ضعیف و فشار قوی برابر شوند، یا بانک فشار قوی بسیار بزرگ‌تر از بانک فشار ضعیف باشد، یا میرایی کمی داشته باشیم، تقویت ولتاژ رخ می‌دهد. شکل موج ولتاژ خازن سوییچ‌شده در تصویر ۲۲-۲۳ آمده است. ولتاژ بانک خازنی فشار ضعیف (در اینجا ۱۳/۸ کیلوولت) در تصویر ۲۲-۲٤ آمده است. می‌بینیم که در هر دو مورد نوسان‌های ولتاژ میرا نشده‌اند. اندازهٔ اضافه‌ولتاژ در ۲۳۰ کیلوولت و ۱۳/۸ کیلوولت به ترتیب ۲/۱ و ۱/٦ برابر ولتاژ نامی هستند. این نوسان‌ها از دید مصرف‌کننده غیر قابل قبول است.




**تصویر ۲۲-۲۲: مدار بررسی اثر تقویت ولتاژ**

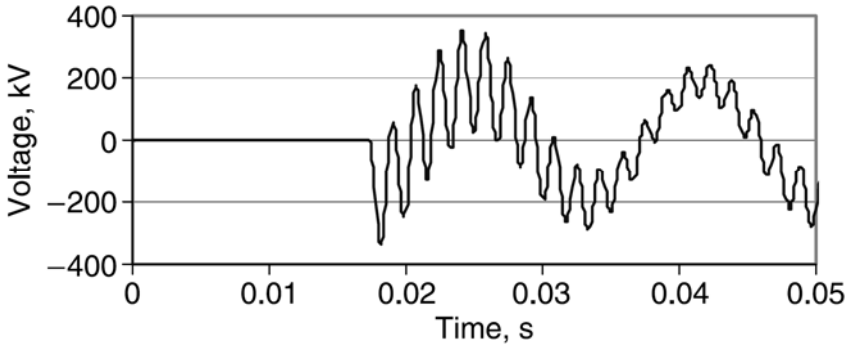



**تصویر ۲۲-۲۳: شکل موج ولتاژ باس ۲۳۰ کیلوولتی (بدون مقاومت)**

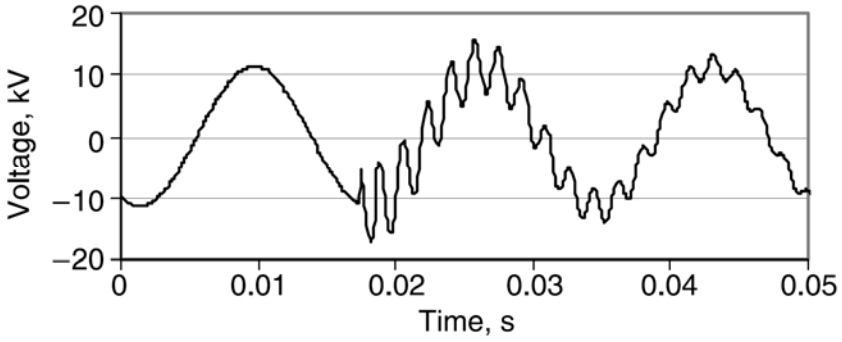



**تصویر ۲۲-۲٤: شکل موج ولتاژ باس ۱۳/۸ کیلوولتی (بدون مقاومت)**

برای کنترل این پدیده باید در سمت فشار ضعیف میرایی مدار را افزایش داد. با تبدیل فیلتر ناچ هارمونیک پنجم به فیلتر بالاگذر می‌توان این کار را انجام داد. این فیلتر بالاگذر دارای یک مقاومت میراکننده در دو سر راکتور است. در اینجا مقدار مقاومت ۹ اهم انتخاب شده است. شکل موج ولتاژ باس ۲۳۰ کیلوولت و ۱۳/۸ کیلوولت هنگام برق‌دار کردن بانک فشار قوی به ترتیب در تصویر ۲۲-۲۵ و تصویر ۲۲-۲٦ آمده است. اندازهٔ اضافه‌ولتاژ در اینجا ۱/۵ برابر ولتاژ نامی است که نوسان‌های آن به سرعت میرا شده است.




**تصویر ۲۲-۲۵: شکل موج ولتاژ باس ۲۳۰ کیلوولتی (۹ اهم مقاومت)**



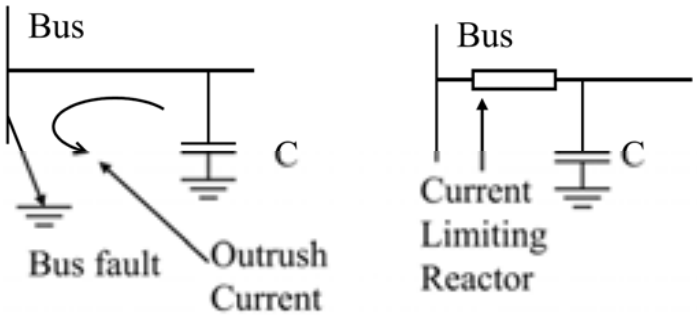

**تصویر ۲۲-۲٦: شکل موج ولتاژ باس ۱۳/۸ کیلوولتی (۹ اهم مقاومت)**

### ۲۲-۲-۱۰- جریان دشارژ در خطا

فرض کنید که مانند تصویر ۲۲-۲۷ (سمت چپ) یک مدارشکن بر روی خطا بسته شود. این امر فشار شدیدی به مدارشکن می‌آورد. اگر بانک خازنی هم در مدار داشته باشیم، به دلیل دشارژ شدن بانک در خطا، جریان بیشتر خواهد بود. این جریان باید محدود شود و حاصل‌ضرب پیک جریان در فرکانس آن کمتر از $2\times10^7$ شود. در مدارشکن‌های مخصوص بانک خازنی این مقدار برابر است با:

$$I_{peak} \times f = \frac{V_{peak}}{2\pi L}$$

در اینجا $V_{peak}$ ولتاژ پیک در سیستم و $L$ اندوکتانس میان بانک و محل خطا است. جریان دشارژ را می‌توان با افزایش این اندوکتانس کاهش داد. در مثالی در تصویر ۲۲-۲۷ (سمت راست) با نصب راکتور محدود کنندهٔ جریان این عمل انجام شده است.




**تصویر ۲۲-۲۷: پدیدهٔ دشارژ خازن در خطا**

### ۲۲-۲-۱۱- اضافه‌ولتاژهای ماندگار

احتمال وقوع اضافه‌ولتاژهای رزونانسی و ماندگار ناشی از برق‌دار کردن خازن بسیار مهم است. این اضافه‌ولتاژها را می‌توان از رابطهٔ زیر حساب کرد:

$$V_{bus} = V_{peak}\left(1+\frac{X_S}{X_C - X_S}\right)$$

در اینجا $X_S$ راکتانس منبع، $X_C$ راکتانس بانک خازنی، و $V_{peak}$ ولتاژ باس قبل از برق‌دار کردن خازن است. یک پست سه‌فاز، ۲۳۰ کیلوولت، با سطح اتصال کوتاه (بدون خازن) حدود ٤۰۹۲ مگاولت‌آمپر در نظر بگیرید. در اینجا راکتانس منبع ۱۲/۹ اهم است. برای بانک خازنی ۱۰۵ مگاواری، ولتاژ عادی ۱/۰٤ برابر ولتاژ نامی است. ممکن است، ولتاژ از حد مجاز خازن‌ها و فیوز تجاوز کند. برق‌گیر مناسب ولتاژ ۲۳۰ کیلوولتی، ۱۸۰ کیلوولت است. مقدار MCOV در این برق‌گیر ۱٤٤ کیلوولت است. این مقدار بسیار نزدیک به ولتاژ سیستم در حالت بی‌باری و با خازن است. توصیه می‌شود از رله‌های اضافه‌ولتاژ استفاده شود.

### ۲۲-۲-۱۲- رزونانس

افزودن بانک خازنی به یک باس به دلیل تعامل خازن با امپدانس منبع تولید فرکانس رزونانس می‌کند. اگر این فرکانس با فرکانس یکی از هارمونیک‌ها برابر شود، در ولتاژ و جریان نوسان تولید می‌کند. فرکانس رزونانس ناشی از بانک خازنی را می‌توان از این رابطه به دست آورد:

$$h = \sqrt{\frac{MVA_{SC}}{MVAR_C}}$$

در اینجا $MVA_{SC}$ سطح اتصال کوتاه منبع و $MVAR_C$ ظرفیت بانک خازنی است. همچنین در این رابطه h فرکانس رزنانس شبکه است.

**مثال**

سطح اتصال کوتاه یک باس ۲۳۰ کیلوولتی، ۱۶۹۰۰ مگاولت‌آمپر است. می‌خواهیم با نصب یک بانک ۱۰۰ مگاواری در محل ضریب توان را بهبود دهیم. فرکانس رزونانس در این باس چقدر است؟

**پاسخ**

$$MVA_{SC} = 16900MVA, MVAR_C = 100MVAR$$

$$h = \sqrt{\frac{MVA_{SC}}{MVAR_C}} = \sqrt{\frac{16900MVA}{100MVAR}} = 13$$

فرکانس رزونانس با فرکانس هارمونیک سیزدهم برابر است.

## ۲۲-۳- حدود مجاز ولتاژ

تجهیزات برقی می‌توانند اضافه‌ولتاژها با دامنه و زمان خاصی را تحمل کنند. موارد زیر باید در مورد اضافه‌ولتاژها در نظر گرفته شود:

### ۲۲-۳-۱- اضافه‌ولتاژهای گذرا

این اضافه‌ولتاژها به دلیل کلیدزنی رخ می‌دهند. چند میلی‌ثانیه تا چند سیکل طول می‌کشند. قدرت تحمل ضربه کلیدزنی یک تجهیز در استانداردهای صنعتی تعیین شده است.

| نام تجهیز | استاندارد | پارامتر تعیین‌شده |
|---|---|---|
| ترانس | C57.12.00 | مقدار BIL و ضربه کلیدزنی |
| راکتور شانت | C57.21.00 | مقدار BIL و ضربه کلیدزنی |
| خازن شانت | IEEE Standard 18 | مقدار BIL و ضربه کلیدزنی |
| GIS | C37.22 | مقدار BIL و ضربه کلیدزنی |
| مدارشکن | C37.06 | مقدار BIL و ضربه کلیدزنی |

| | | |
|---|---|---|
| مدارشکن (TRV) | C37.09 | مقدار TRV |
| عایق | - | مقدار BIL و ضربه کلیدزنی |

### ۲۲-۳-۲- ولتاژ بازیافت گذرا (TRV)

این پارامتر هنگام بازشدن مدارشکن روی دو سر آن اندازه‌گیری می‌شود. مقدار این پارامتر به دامنه و نرخ افزایش ولتاژ روی تیغه‌های مدارشکن بستگی دارد. مقادیر مجاز TRV، بر اساس استاندارد ANSI C37.09، در جدول ۲۲-۱ فهرست شده‌اند.

**جدول ۲۲-۱: مقادیر مجاز TRV**

| نوع مدار بانک خازنی | مقدار TRV مجاز ( *p.u.* ) |
|---|---|
| خازن زمین‌شده | 2 |
| کابل بی‌بار | 2 |
| خط انتقال بی‌بار | 2.4 |

## ۲۲-۴- هماهنگی عایقی

در مورد سیستم ۲۳۰ کیلوولتی فوق، بررسی هماهنگی عایقی انجام شده است. سطح تحمل اضافه‌ولتاژ تجهیز بسته به دامنه و زمان آن اضافه‌ولتاژ دارد. اضافه‌ولتاژهای اغلب ناشی از کلیدزنی هستند و از چند میلی‌ثانیه تا چند سیکل ادامه دارند. سطح تحمل اضافه‌ولتاژ تجهیزات در استانداردهای صنعتی تعریف شده است. این سطوح در جدول ۲۲-۲ آمده است.

**جدول ۲۲-۲: حدود مجاز ضربه کلیدزنی در چند تجهیز**

| نام تجهیز | مقدار BIL (کیلوولت) | مقاومت در برابر کلیدزنی (کیلوولت) | سطح مجاز ضربه کلیدزنی ( *p.u.* ) | استاندارد مربوط |
|---|---|---|---|---|
| ترانس | 900 | 745 | 3.9 | ANSI C57.12 |
| خازن | 1050 | 750 | 3.9 | IEEE 824 |
| مدارشکن | 900 | 675 | 3.6 | ANSI C37.06 |
| مدارشکن (TRV) | - | - | 2.4 | ANSI C37.09 |

### ۲۲-٤-۱- سطح تحمل اضافه‌ولتاژ در برق‌گیر

در سیستم ۲۳۰ کیلوولتی، یک برق‌گیر ۱۸۰ کیلوولتی حاشیهٔ اطمینان زیادی در برابر MCOV ندارد. البته این مقدار بنابر استاندارد ANSI C62.2 انتخاب شده است. ماکزیمم حد تحمل ضربه کلیدزنی یک برق‌گیر ۱۸۰ کیلوولتی برابر ۳۵۱ کیلوولت (۸۷ درصد بیشتر از ولتاژ نامی) است.

### ۲۲-٤-۲- ولتاژ بازیافت گذرا (TRV)

پارامتر TRV بعد از باز شدن مدارشکن روی آن اندازه‌گیری می‌شود. مقدار این پارامتر به دامنه و نرخ افزایش ولتاژ روی تیغه‌های مدارشکن بستگی دارد. مقدار مجاز TRV، بر اساس استاندارد ANSI C37.09، حدود ۲/٤ برابر ولتاژ نامی است.

## ۲۲-۵- مؤخره

در این فصل، اثرات کلیدزنی خازن‌های اصلاح ضریب توان بررسی شد. حالت‌های کلیدزنی ذیل بحث شد:

| | |
|---|---|
| برق‌دار کردن | بی‌برق کردن |
| رفع خطا | بستن مجدد (reclosing) |
| حفاظت پشتیبان | Restrike |
| Prestrike | کلیدزنی بانک‌های مجاور |
| تقویت ولتاژ | اضافه‌ولتاژهای فرکانس بالا |
| دشارژ بانک | اضافه‌ولتاژهای ماندگار |

همچنین طبیعت اضافه‌ولتاژهای گذرا و اثرات آن بر هماهنگی عایقی بررسی شد.

# فصل ۲۳ : ولتاژهای القایی در کابل‌های کنترل

## ۲۳-۱- معرفی

در پست‌های فشار قوی، هادی‌های زیادی در کنار هم قرار می‌گیرند، مانند باس‌های فشار قوی، ترانس‌های جریان، ترانس‌های ولتاژ، کوپلرهای حامل، بوشینگ، کابل‌های کنترل، هادی‌های زمین، و اتصالات زمین. کابل‌های کنترل خروجی‌های ترانس‌های ولتاژ، خروجی‌های ترانس‌های جریان، سیگنال‌های کنترل مدارشکن، رله‌ها، و دیگر سیگنال‌های مخابراتی را حمل می‌کنند. روز به روز بر تعداد تجهیزات الکترونیکی پست‌ها افزوده می‌شود. اگر کابل‌های کنترلی و تجهیزات الکترونیکی به درستی محافظت نشوند، تحت تأثیر ولتاژهای القایی درون پست قرار می‌گیرند. بین هادی‌های موازی خاصیت القایی و خازنی وجود دارد. از آنجا که هادی‌های قدرت جریان‌های بزرگی حمل می‌کنند و ولتاژ بسیار بالاتری نسبت به کابل‌های کنترلی دارند، می‌توانند ولتاژهایی با فرکانس شبکه در کابل‌های کنترلی القاء کنند که منجر به ایجاد نویز شود. به علاوه، اگر سیستم به درستی زمین نشده باشد، جریان‌های زمین در این فرکانس‌ها می‌تواند با مقاومت، خازن، و سلف سیستم کنترل و اندازه‌گیری کوپل شده، بی‌دلیل منجر به تریپ شود. در این فصل، محاسبهٔ ولتاژهای القایی در کابل‌های کنترلی به دلیل ضربه های کلیدزنی و صاعقه بحث خواهد شد. در حضور بانک‌های خازنی در پست‌ها، دامنه و فرکانس این ضربه ها افزایش می‌یابد.

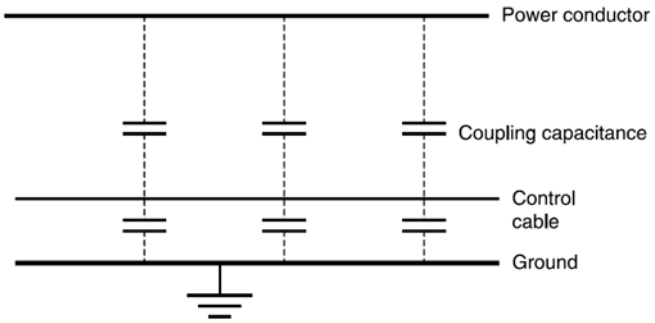
## ۲۳-۲- منابع القاء ولتاژ

### ۲۳-۲-۱- کوپلینگ خازنی

کوپلینگ الکترواستاتیک بین هادی‌های شبکه و کابل‌های کنترلی باعث القاء ولتاژ با فرکانس شبکه می‌شود. مثالی از این القاء بین هادی شبکه و کابل کنترلی در تصویر ۲۳-۱ دیده می‌شود. خازن مانند یک مقسم ولتاژ عمل می‌کند. در گذراهای کلیدزنی، جریان‌هایی در کابل کنترلی القاء می‌شود که از این رابطه به دست می‌آید:

$$i = C\frac{dV}{dt}$$

با افزایش فاصلهٔ میان هادی و کابل کنترل می‌توان ولتاژ القاء شده در کابل کنترلی را کاهش داد.




**تصویر ۲۳-۱: کوپلینگ خازنی بین هادی و کابل کنترل**

### ۲۳-۲-۲- کوپلینگ سلفی

حضور هادی قدرت در نزدیکی کابل کنترل باعث القاء سلفی بین آنها می‌شود. جریان عبوری از هادی شبکه شاری مغناطیسی تولید می‌کند (تصویر ۲۳-۲). اگر کابل کنترلی در این میدان قرار گیرد، ولتاژهایی با فرکانس شبکه در آن القاء می‌شود. اندازهٔ این ولتاژ بسته به القاء متقابل بین هادی و جریان عبوری از هادی دارد و از این رابطه به دست می‌آید:

$$e\left(\text{Control Cable}\right) = M\,\frac{di}{dt}$$

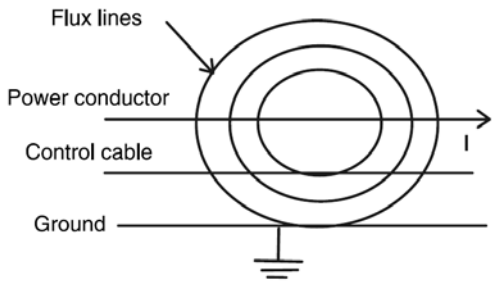
در اینجا $M$ اندوکتانس مشترک بین هادی و کابل کنترل و $i$ جریان عبوری از هادی است. میدان الکتریکی متناسب است با بار واحد طول ($\rho$) روی باس و نسبت عکس دارد با کوتاه‌ترین فاصلهٔ بین دو هادی ($r$)؛ و از این رابطه به دست می‌آید:

$$E = \frac{\rho}{2\pi\varepsilon_0 r}$$

$$\rho = CV_{phase}$$

$$C = \frac{1}{Z_S \times c}$$

در اینجا $c$ سرعت نور ($3\times10^8\ m/s$)، $C$ خازن باس، $V_{phase}$ ولتاژ فاز، و $Z_S$ امپدانس ضربه (اهم) است.




**تصویر ۲۳-۲: کوپلینگ سلفی بین هادی و کابل کنترل**

از روابط فوق می‌توانیم نتیجه بگیریم:

$$E = \frac{V_{phase}}{2\pi Z_S h} \times \frac{1}{\varepsilon_0 c}$$

در اینجا $r$ (شعاع) با $h$ (ارتفاع باس) جایگزین شده است. همچنین:

$$\eta = \frac{1}{\varepsilon_0 c} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = 377\Omega$$

با انعکاس میدان از زمین (اصل آینه‌ها)، میدان تولیدی دو برابر می‌شود، پس داریم:

$$E = \frac{377 \times V_{phase}}{\pi Z_S h}$$

**مثال**

میدان ناشی از یک فاز ۲۳۰ کیلوولتی در فاصلهٔ ۸ متری را حساب کنید. فرض کنید امپدانس ضربه حدود ۳۵۰ اهم باشد.

**پاسخ**

$$h = 8m, Z_S = 350\Omega, V_{phase} = \frac{230kV}{\sqrt{3}} = 132.8kV$$

$$E = \frac{377 \times V_{phase}}{\pi Z_S h} = \frac{377 \times 132.8kV}{\pi \times 350\Omega \times 8m} = 5.7\, kV/m$$

ولتاژهای گذرای القایی در کابل‌های کنترل به دلیل کلیدزنی با مدارشکن و موج‌های سیار ناشی از صاعقه است. دامنهٔ جریان‌های گذرا به امپدانس ضربه هادی و پیک ولتاژ فاز سیستم بستگی دارد.

### ۲۳-۲-۳- گذراهای کلیدزنی ناشی از مدارشکن

کنتاکت‌های متحرک مدارشکن‌ها نه تنها اجازهٔ شکست عایقی بین قطعات سیستم فشار قوی را می‌دهند، بلکه می‌توانند باعث افزایش پتانسیل از ولتاژ نامی سیستم شوند. فرکانس نوسان‌ها از فرکانس شبکه تا چند کیلوهرتز متغیر است. اگر کابل‌های کنترل در نزدیکی باشند، به دلیل القاء متقابل روی آنها ولتاژ القاء می‌شود.

### ۲۳-۲-٤- گذراهای صاعقه

صاعقه می‌تواند باعث ایجاد قوس در پست‌ها و حالت‌های گذرا شود. اگر کابل‌های کنترلی به موازات هادی‌های شبکه قرار گیرند، در آنها ولتاژ القاء می‌شود. در پست‌ها، ولتاژهای القایی کابل‌های کنترل می‌تواند ناشی از کوپلینگ رسانا، کوپلینگ تشعشعی مانند کوپلینگ الکترواستاتیکی، یا کوپلینگ القایی باشد. ولتاژ القاءشده در کابل‌های کنترلی می‌تواند به تجهیزات الکترونیکی آسیب بزند.

## ۲۳-۳- حدود مجاز ولتاژهای القایی

حدود مجاز ولتاژهای القایی در کابل‌های کنترلی ناشی از گذراهای سریع الکتریکی از استاندارد IEC 801-4 استخراج می‌شود. چهار سطح برای شرایط محیطی در نظر گرفته شده است:

- سطح یک: حفاظت مناسب
- سطح دو: حفاظت عادی
- سطح سه: حفاظت نسبی (صنعتی)
- سطح چهار: حفاظت شدید (صنعتی)

سطوح مجاز پارامترهای القایی در جدول ۲۳-۱ آمده است. ولتاژ مدار باز در روی هادی‌های شبکه و کابل‌های کنترلی داده شده است. جریان‌های اتصال کوتاه با تقسیم ولتاژ مدار باز بر ۵۰ اهم امپدانس منبع تخمین زده شده‌اند. این مقدار بدترین ولتاژ دیده شده توسط سیستم حفاظت ضربه است. در یک پست ۲۳۰ کیلوولتی که در سطح چهار قرار دارد، مقدار مجاز پیک به پیک ولتاژ مدار باز هنگام کلیدزنی ٤ کیلوولت و مقدار مجاز ولتاژ مدار باز القایی ۲ کیلوولت است.

**جدول ۲۳-۱: سطوح مجاز ولتاژهای القایی**

| سطح | منبع تغذیه | | کابل کنترل | |
|---|---|---|---|---|
| | ولتاژ مدار باز (کیلوولت) | جریان اتصال کوتاه (آمپر) | ولتاژ مدار باز (کیلوولت) | جریان اتصال کوتاه (آمپر) |
| یک | 0.5 | 10 | 0.25 | 5 |
| دو | 1 | 20 | 0.5 | 10 |
| سه | 2 | 40 | 1 | 20 |
| چهار | 4 | 80 | 2 | 40 |

## ۲۳-۴- سیستم مورد مثال

یک پست ۲۳۰ کیلوولت به ۱۱۵ کیلوولت در اینجا مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. این پست از روش یک و نیم مدارشکن با باس دوبله استفاده می‌کند. بانک خازنی ٦۰ مگاواری به بخش ۲۳۰ کیلوولتی متصل است. مشخصات بانک عبارتند از:

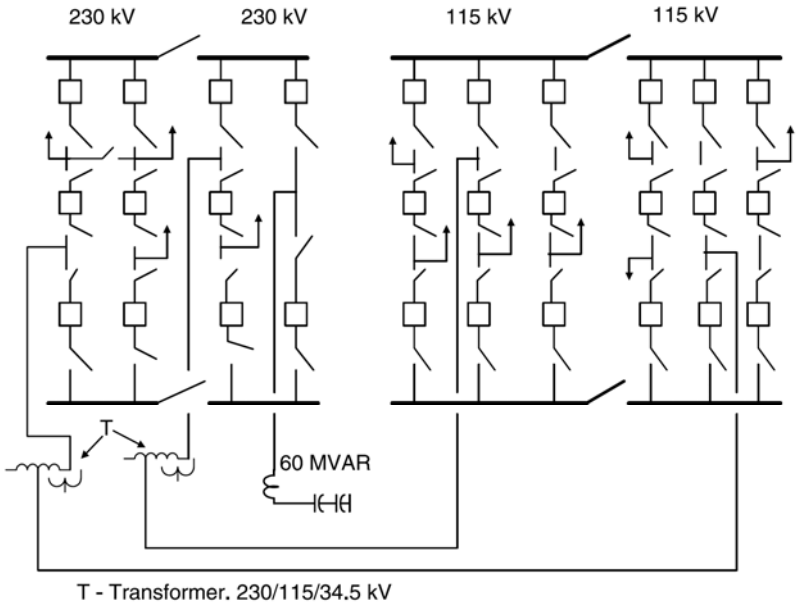
- ولتاژ نامی: ۲۳۰ کیلوولت
- ماکزیمم ولتاژ: ۲۵۳ کیلوولت
- توان بانک در ۲۳۰ کیلوولت: ٦۰ مگاوار
- فرکانس: ٦۰ هرتز
- نوع اتصال: ستارهٔ زمین‌شده

### ۲۳-٤-۱- مدارشکن خازن

مشخصات مدارشکن مورد استفاده:

- ولتاژ ماکزیمم: ۲٤۲ کیلوولت
- جریان قطع: ٤۰ کیلوآمپر
- جریان نامی: ۳ کیلوآمپر
- سطح BIL: ۱۰۵۰ کیلوولت
- شعاع باس: ۱۲/۵ سانتیمتر
- شعاع کابل کنترل: ۰/۸ سانتیمتر
- شعاع شیلد: ۰/۳ سانتیمتر

مدارشکن‌های ۲۳۰ کیلوولت و ۱۱۵ کیلوولتی به همراه بانک خازنی ٦۰ مگاوار در تصویر ۲۳-۳ نشان داده شده‌اند. بانک‌های خازنی در این پست بدون دلیل تریپ می‌دهند و احتمال می‌رود که منشأ مشکل از تداخل الکترومغناطیسی[1] (EMI) باشد. بررسی انجام شده مشکل را تأیید کرد و راه حل‌هایی پیشنهاد داد. ولتاژهای القایی در کابل‌های کنترلی در پست ناشی از عملیات کلیدزنی (مانند برق‌دار کردن، بی‌برق کردن، بستن مجدد، رفع خطا، و حفاظت پشتیبان) و صاعقه است.




**تصویر ۲۳-۳: پست‌های ۲۳۰ کیلوولتی و ۱۱۵ کیلوولتی همراه بانک خازنی**

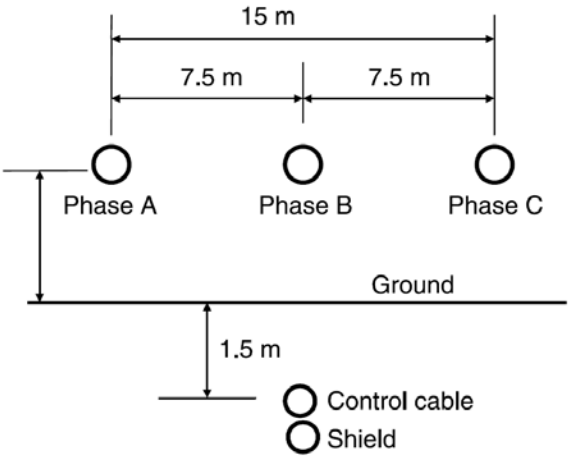
[1] electromagnetic interference

## ۲۳-۵- محاسبهٔ ولتاژهای القایی

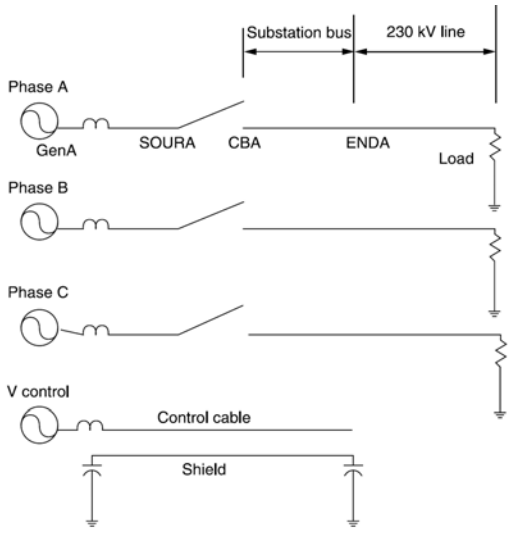
اغلب برای بررسی حالت ماندگار و حالت گذرا در حوزهٔ زمان از نرم‌افزار EMTP استفاده می‌شود. از این نرم‌افزار برای محاسبهٔ ولتاژهای القایی در کابل‌های کنترل ناشی از کلیدزنی خط ۲۳۰ کیلوولتی استفاده شده است. باس‌های پست و کابل‌های کنترلی در تصویر ۲۳-٤ نشان داده شده است. مدار معادل مورد استفاده در تحلیل در تصویر ۲۳-۵ آمده است. در این تحلیل از فرض‌های زیر استفاده شده است:

- مقاومت بار در سطح ولتاژ ۲۳۰ کیلوولت برابر با ۳۵۱ اهم است. این بار جریان لازم را از باس ۲۳۰ کیلوولتی می‌کشد.
- در اینجا تنها از یک کابل کنترل استفاده شده است.
- ولتاژهای القایی ناشی از برق‌دار کردن بزرگتر از بقیهٔ ولتاژهای القایی هستند.
- شیلد کابل کنترل به صورت یک هادی مدل شده است.
- منبع تغذیهٔ کابل کنترل ٢٤ ولتی است.
- یک بار ۱۵۰ اهمی روی کابل کنترلی فرض شده است. این مقدار رایج برای ترانس‌های جریان است.

برای بررسی از پنج حالت مختلف و با مطالعهٔ ولتاژ کابل کنترل در حالت مدار باز و بار نامی، ولتاژ شیلد در ابتدا و انتها استفاده شده است. منحنی شکل موج ولتاژهای القایی در کابل‌های کنترل برای حالت اول در تصویر ٦-۲۳ و تصویر ۷-۲۳، برای حالت چهارم در تصویر ۸-۲۳ و تصویر ۹-۲۳ آمده است. ولتاژهای پیک در جدول ۲-۲۳ خلاصه شده‌اند.




تصویر ۲۳-٤: باس ۲۳۰ کیلوولتی، کابل کنترل، و شیلد




تصویر ۲۳-۵: مدار مورد استفاده برای شبیه‌سازی

پنج حالت در اینجا توصیف شده‌اند:

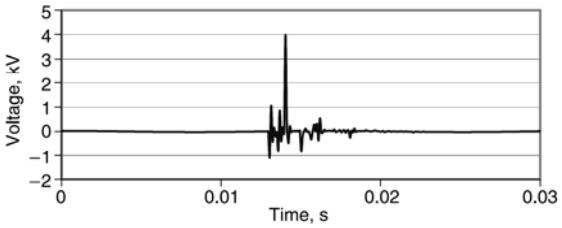
۱. برق‌دار کردن خط ۲۳۰ کیلوولتی: کابل کنترلی مدار باز است. شیلد زمین نشده است. ولتاژ القایی در کابل کنترلی ٦ کیلوولت بیشتر از مقدار مجاز مدار باز در استاندارد (IEC 801-4) است که ٤ کیلوولت ذکر شده است. ولتاژ القایی در دو سر شیلد زمین‌نشده به ترتیب ٤ و ۳/۲ کیلوولت است.

۲. برق‌دار کردن خط ۲۳۰ کیلوولتی: کابل کنترلی ۱۵۰ اهم بار دارد. شیلد زمین نشده است. ولتاژ القایی در کابل کنترل ٦۰۰ ولت است.

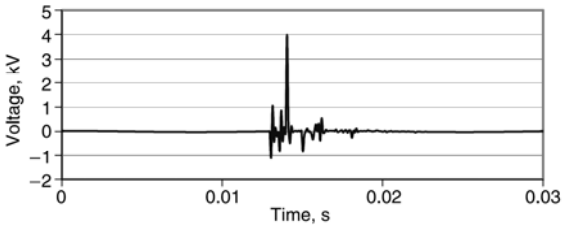
۳. برق‌دار کردن خط ۲۳۰ کیلوولتی: کابل کنترلی ۱۵۰ اهم بار دارد. سمت چپ شیلد زمین شده ولی سمت راست آن زمین نشده است. ولتاژ القایی در کابل کنترل ۱/۳ کیلوولت است.

٤. برق‌دار کردن خط ۲۳۰ کیلوولتی: کابل کنترلی ۱۵۰ اهم بار دارد. دو سر سیم شیلد زمین شده است. ولتاژ القایی در کابل کنترل ۷۰ ولت و قابل قبول است.

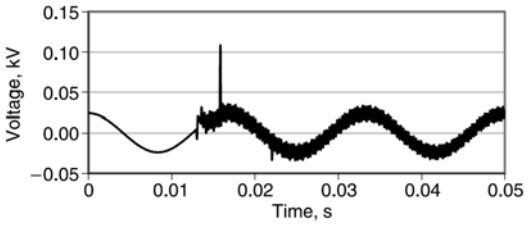
۵. برق‌دار کردن خط ۲۳۰ کیلوولتی: کابل کنترلی مدار باز است. دو سر سیم شیلد زمین شده است. ولتاژ القایی در کابل کنترل ۳/۵ کیلو ولت و طبق استاندارد IEC قابل قبول است، ولی چنین ولتاژی در کابل‌های کنترلی قابل قبول نیست.



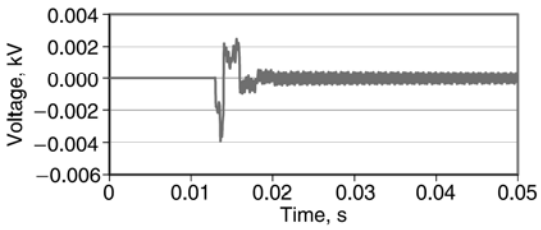

**تصویر ۲۳-٦: ولتاژ انتهای کابل کنترل (حالت اول)**




**تصویر ۲۳-۷: ولتاژ ابتدای کابل کنترل (حالت اول)**




**تصویر ۲۳-۸: ولتاژ انتهای کابل کنترل (حالت چهار)**




**تصویر ۲۳-۹: ولتاژ ابتدای کابل کنترل (حالت چهار)**

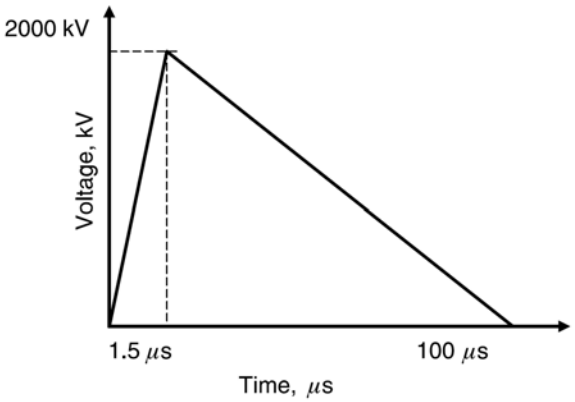
وقتی که دو سر سیم شیلد زمین نشده باشد، ولتاژهای القایی در آن بزرگ است. اگر تنها یک انتهای سیم شیلد زمین شده باشد، ولتاژ القایی کمتر است ولی ولتاژ القایی در سمت زمین‌نشده بالا است. وقتی سیم شیلد در دو طرف زمین شده باشد، ولتاژ القایی در شیلد و کابل کنترل کوچک است. در این صورت، باید مسیری جداگانه برای خطاهای سیستم فراهم کرد. اگر در پست خطایی رخ دهد، بین نقاط مختلف زمین اختلاف ولتاژ پیش می‌آید. در این صورت شیلد جریان می‌کشد و فیوز می‌سوزاند. باید سیم زمینی جداگانه با سطح مقطع حداقل ٦۸ میلی‌متر مربع برای این جریان فراهم شود.

جدول ۲۳-۲: ولتاژهای القایی در کابل کنترل

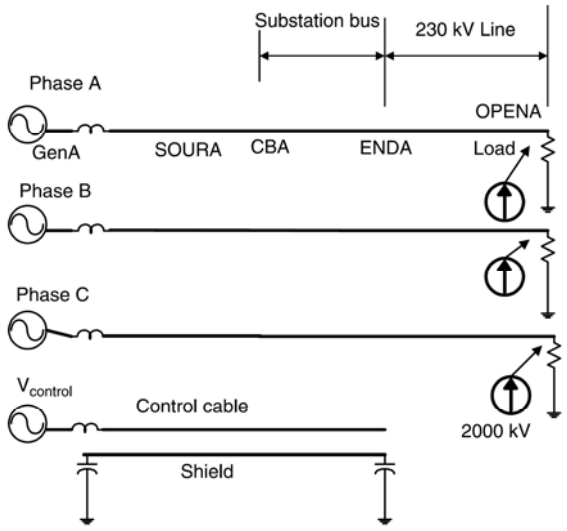
| حالت | ولتاژ مدار باز کابل کنترل | | ولتاژ ابتدای شیلد | ولتاژ انتهای شیلد |
|---|---|---|---|---|
| | EMTP (کیلوولت) | IEC (کیلوولت) | (کیلوولت) | (کیلوولت) |
| اول | 6 | 4 | 3.2 | 3.2 |
| دوم | 0.6 | - | 1.2 | 1.2 |
| سوم | 1 | - | 0.03 | 2.5 |
| چهارم | 0.07 | - | 5 | 0.007 |
| پنجم | 3.5 | 4 | 6 | 0.007 |

## ۲۳-۶- اثر صاعقه بر کابل‌های کنترل

صاعقه یکی از عمده‌ترین منشأ خرابی در شبکه‌های قدرت است. در هنگام وقوع صاعقه، به دلیل کوپلینگ میان هادی‌های فاز و کابل‌های کنترل، ولتاژهایی در کابل‌های کنترل القاء می‌شود. ضربهٔ صاعقه را می‌توان به صورت منبع جریان یا منبع ولتاژ مدل کرد. در اینجا به صورت یک منبع ولتاژ ۲۰۰۰ کیلوولتی (تصویر ۲۳-۱۰) مدل شده است. فرض می‌کنیم که صاعقه به انتهای خط برخورد کرده است. عملاً، صاعقه می‌تواند به هر جایی از خط انتقال یا پست اصابت کند. مدار معادل مورد استفاده برای بررسی این حالت گذرا در تصویر ۲۳-۱۱ آمده است. اثر برق‌گیر در نظر گرفته نشده است. با حضور برق‌گیر، دامنهٔ موج‌های سیار کاهش یافته، اندازهٔ ولتاژ القایی در کابل‌های کنترل کوچک‌تر می‌شود.

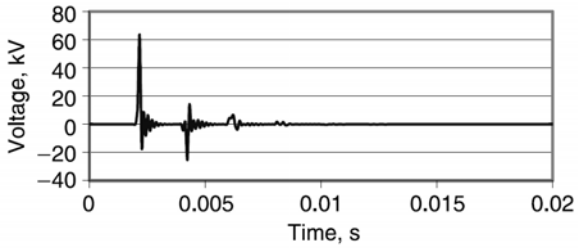



تصویر ۲۳-۱۰: شکل موج ولتاژ ضربهٔ صاعقه

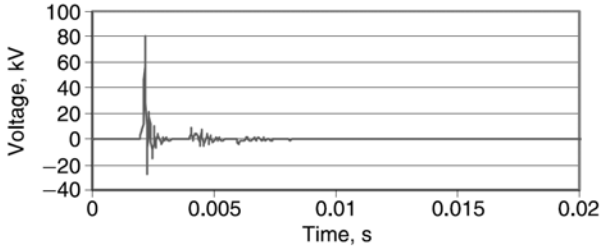



تصویر ۲۳-۱۱: مدار بررسی ضربهٔ صاعقه

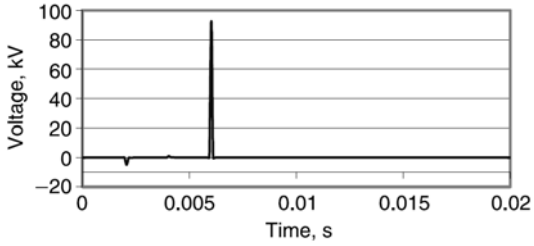
در اینجا چند حالت برای بررسی ولتاژهای القایی در کابل در نظر گرفته شده است. ولتاژ در ابتدا و انتهای کابل کنترل، ابتدا و انتهای شیلد شبیه‌سازی شده است. منحنی شکل موج‌های ولتاژ در دو سر کابل کنترل برای حالت اول در تصویر ۲۳-۱۲ و تصویر ۲۳-۱۳، و برای حالت چهار در تصویر ۲۳-۱٤ و تصویر ۲۳-۱۵ آمده است.



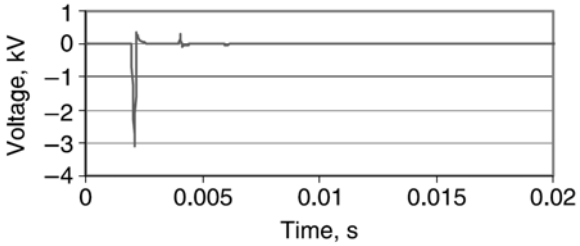

تصویر ۲۳-۱۲: ولتاژ انتهای کابل کنترل (حالت اول)




تصویر ۲۳-۱۳: ولتاژ ابتدای کابل کنترل (حالت اول)




تصویر ۲۳-۱٤: ولتاژ انتهای کابل کنترل (حالت چهار)




تصویر ۲۳-۱۵: ولتاژ ابتدای کابل کنترل (حالت چهار)

چهار حالت مورد بررسی عبارتند از:

۱. برخورد صاعقه به خط ۲۳۰ کیلوولت: کابل کنترل مدار باز است. دو سر شیلد زمین نشده است. ولتاژ القایی در کابل کنترل ۵۰ کیلوولت است که بیشتر از مقدار استاندارد (IEC 801-4) است که ٤ کیلوولت تعیین شده است. ولتاژ القایی در شیلد ۱۲۰ کیلوولت است.

۲. برخورد صاعقه به خط ۲۳۰ کیلوولت: کابل کنترل ۱۵۰ اهم بار دارد. دو سر شیلد زمین نشده است. ولتاژ القایی در کابل کنترل ٦۵ کیلوولت است که قابل قبول نیست.

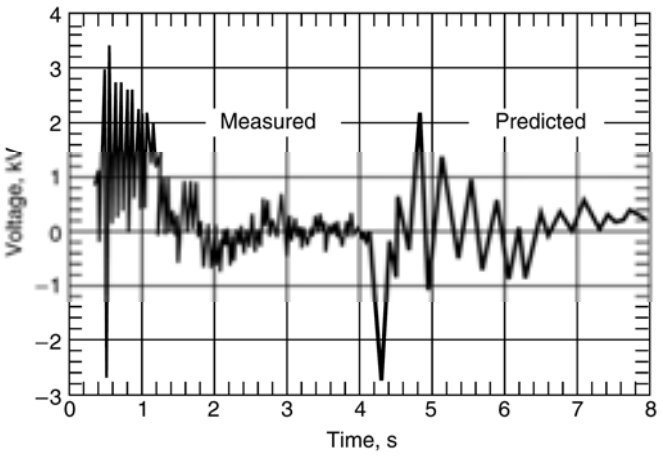
۳. برخورد صاعقه به خط ۲۳۰ کیلوولت: کابل کنترل ۱۵۰ اهم بار دارد. یک سر شیلد زمین شده است. ولتاژ القایی در کابل کنترل ۱۸ کیلوولت است که قابل قبول نیست.

٤. برخورد صاعقه به خط ۲۳۰ کیلوولت: کابل کنترل ۱۵۰ اهم بار دارد. دو سر شیلد زمین شده است. ولتاژ القایی در کابل کنترل ۳/۵ کیلوولت است که قابل قبول است.

۵. برخورد صاعقه به خط ۲۳۰ کیلوولت: کابل کنترل مدار باز است. دو سر شیلد زمین شده است. ولتاژ القایی در کابل کنترل ۱۳۵ کیلوولت است که قابل قبول نیست.

در هر پستی، کابل‌های کنترل میان اتاق کنترل و تجهیزات وجود دارد. در تصویر ۲۳-۱٦ کانال مخصوص عبور کابل‌های کنترل در یک پست را می‌بینید. به دلیل طبیعت صاعقه، باید در ترمینال‌های پست برق‌گیر نصب شود. شکل موج اندازه‌گیری شده از ولتاژ القایی در کابل کنترل یک تجهیز در تصویر ۲۳-۱۷ آمده است. ماکزیمم ولتاژ در کابل کنترل یک ترانس جریان سیستم ۵۰۰ کیلوولتی، ۳ کیلوولت است.

تصویر ۲۳-۱۶: کانال مخصوص کابل‌های کنترل در یک پست




تصویر ۲۳-۱۷: ولتاژ القایی در کابل کنترل (سیستم ۵۰۰ کیلوولتی)

## ۲۳-۷- مؤخره

مقدار مجاز ولتاژ القایی در کابل کنترل در یک پست ۲۳۰ کیلوولتی، برابر ٤ کیلوولت است. این مقدار برای کابل‌های دیتا (بر طبق IEC 801-4) ۲ کیلوولت است. در این فصل با نرم‌افزار EMTP ولتاژ القایی در کابل‌های کنترل هنگام کلیدزنی و صاعقه بررسی شد.

در صورتی که یک سر شیلد زمین شده باشد، ولتاژ القایی در کابل کنترل ۱/۳ کیلوولت است. اگر دو سر شیلد زمین شده باشد، ولتاژ القایی در کابل کنترل ۷۰ ولت است که قابل قبول می‌باشد. بررسی دیگری برای اندازه‌گیری ولتاژهای القایی ناشی از صاعقه انجام شد و ولتاژ القایی در صورت زمین شدن دو سر شیلد قابل قبول دانسته شد. کابل‌های کنترلی پست‌های ۲۳۰ کیلوولتی دارای شیلد هستند. اگر دو طرف این شیلد زمین شده باشد، باید مسیر زمین جداگانه‌ای برای جریان‌های خطا در نظر گرفت.

# فصل ۲۴ : تحلیل اقتصادی

## ۲۴-۱- معرفی

در همهٔ پروژه‌های مهندسی، باید تجهیزات نصب شده از نظر اقتصادی به صرفه باشند. تحلیل‌های اقتصادی را می‌توان به چند گروه تقسیم کرد: ورودی ثابت، خروجی ثابت، و حالتی که در آن نه ورودی و نه خروجی ثابت است. به طور کلی، بدون توجه به نوع مسأله، هدف بهینه‌سازی و افزایش نسبت مزایا به هزینه‌ها است. این روش شاید برای پروژه‌های دولتی که در آن مسائل سیاسی دخیل است، مناسب نباشد. روش مطرح‌شده در اینجا برای ارزیابی سرمایه‌گذاری، ضرر و زیان، هزینهٔ بهره‌برداری، و صرفه‌جویی‌ها مناسب است.

## ۲۴-۲- اساس اقتصاد مهندسی

### ۲۴-۲-۱- وابستگی ارزش سرمایه به زمان

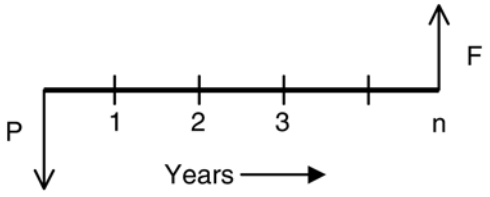
در مواردی که گردش پولی در زمان کوتاهی رخ دهد، می‌توان درآمد و هزینه‌ها را از هم کم کرد و مانده را محاسبه کرد. وقتی که بازهٔ زمانی بزرگ‌تر است، باید اثر سود بر سرمایه‌گذاری را در محاسبات دخیل کرد. مثلاً به ازای هر ۱۰۰ دلار سرمایه با سود ٦ درصد در سال، ٦ دلار بهره تعلق می‌گیرد و ارزش آن در انتهای سال ۱۰٦ دلار خواهد بود. این مثال وابستگی ارزش پول به زمان را نشان می‌دهد. در پروژه‌هایی که عمر مفید چند ساله دارند، باید این امر در محاسبات وارد شود.

### ۲۴-۲-۲- ارزش فعلی سرمایه

در این فرآیند ارزش فعلی سرمایه بر اساس ارزش آتی آن محاسبه می‌شود (تصویر ۲٤-۱):

$$P = F\frac{1}{(1+i)^n}$$

در اینجا $F$ ارزش آتی سرمایه، $P$ ارزش فعلی آن، $i$ نرخ سود در هر دوره، و $n$ تعداد دوره‌ها است.




تصویر ۲٤-۱: ارزش فعلی سرمایه

**مثال**

ارزش فعلی سرمایه‌ای ۱۰ هزار دلاری که بعد از ۳ سال دریافت خواهد شد چقدر است؟ (سود را ۸ درصد فرض کنید).

**پاسخ**

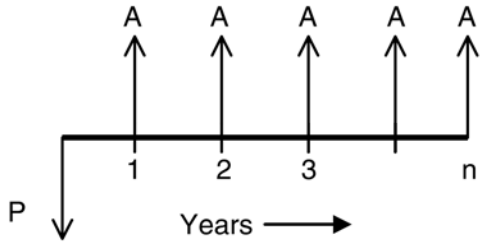
با استفاده از رابطهٔ فوق داریم:

$$P = F\frac{1}{(1+i)^n} = (10,000\$)\frac{1}{(1+0.08)^3} = 7,938\$$$

### ۲۴-۲-۳- تحلیل سالیانهٔ گردش پول

فرض کنید که به مدت $n$ سال، هر سال مبلغ $A$ به سرمایه اضافه شود. اگر $i$ سود سالیانه باشد، می‌توان ارزش فعلی سرمایه را محاسبه کرد (تصویر ۲۴-۲):

$$P = A\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n}$$




**تصویر ۲۴-۲: ارزش فعلی سرمایه (افزایش سالیانه به میزان $A$)**

**مثال**

اگر به مدت ۵ سال، هر سال ۵۰۰ دلار به سرمایه اضافه شود، ارزش فعلی آن چقدر است؟ (سود سالیانهٔ ٦ درصد در نظر بگیرید).

**پاسخ**

$$P = (500\$)\frac{(1+0.06)^5 - 1}{0.06(1+0.06)^5} = 2,106\$$$

### ۲۴-۲-٤- ارزش آتی سرمایه

در اینجا فرآیند محاسبهٔ ارزش آتی یک سرمایه محاسبه می‌شود. فرض کنید که در حال حاضر سرمایه‌ای $P$ در اختیار داریم و می‌خواهیم ارزش آتی آن را ($F$) پس از گذشت $n$ سال با نرخ سود سالیانهٔ $i$ حساب کنیم. مفهوم همانند تصویر ۲۴-۱ است. از این رابطه استفاده می‌کنیم:

$$F = P(1+i)^n$$

این همان رابطهٔ محاسبهٔ ارزش فعلی سرمایه است.

**مثال**

ارزش آتی یک سرمایهٔ ٦٠٠٠ دلاری با نرخ سود ٨ درصد بعد از گذشت ٣ سال چقدر است؟

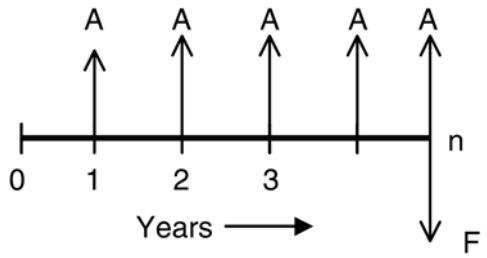
**پاسخ**

$$F = (6,000\$)(1+0.08)^3 = 7,558\$$$

### ٢٤-٢-٥- تحلیل سالیانهٔ گردش پول با استفاده از ارزش آتی سرمایه

فرض کنید که مقدار $A$ در هر سال به مدت $n$ سال به سرمایه اضافه شود. اگر نرخ سود سالیانه $i$ باشد، ارزش آتی سرمایه (تصویر ٢٤-٣) برابر است با:

$$F = A\frac{(1+i)^n - 1}{i}$$




**تصویر ٢٤-٣: ارزش آتی سرمایه (افزایش سالیانه به میزان $A$)**

**مثال**

اگر سالانه ٦٠٠٠ دلار به مدت ٥ سال با نرخ سود ٨ درصد در سال به سرمایه اضافه شود، ارزش آتی آن چقدر خواهد بود؟

**پاسخ**

$$F = (6,000\$)\frac{(1+0.08)^5 - 1}{0.08} = 35,200\$$$

## ٢٤-٣- تقسیم‌بندی هزینه

نصب خازن‌های شانت برای اصلاح ضریب توان و کنترل هارمونیک یکی از روش‌های بهینهٔ بهبود عملکرد شبکه است. هنگام خرید تجهیزاتی مانند بانک خازنی، مدارشکن، یا ترانس هزینه‌های مختلفی در آن دخیل هستند. این هزینه‌ها شامل سرمایهٔ اولیه[1]، هزینهٔ نگهداری، ارزش بازیافتنی[2]، و درآمد سالیانه است. عوامل دیگری نیز مانند مالیات بر درآمد، استهلاک، اعتبار مالیاتی[3]، مالیات مستقلات، و بیمه دخیل هستند. برای بررسی اقتصادی باید همهٔ

[1] capital cost
[2] salvage value
[3] tax credit

این عوامل در نظر گرفته شوند. در اینجا حالت خاص بررسی اقتصادی بانک‌های خازنی بیان می‌شود، ولی می‌توان آن را برای موارد مشابه مانند ترانس‌ها یا مدارشکن‌ها هم به کار برد:

۱. سرمایهٔ اولیهٔ بانک خازنی. یونیت‌های خازنی در ابعاد ۵۰ تا ٤۰۰ کیلووار موجود هستند. این یونیت‌ها باید در ترکیب‌های سری و موازی نصب شوند تا توان مورد نظر تأمین گردد. در نصب علاوه بر خازن‌ها، به راکتورها، مدارشکن‌ها، رله‌ها، فیوزها، تابلو، برق‌گیرها، و کابل‌ها نیاز است.

۲. هزینهٔ نصب. بانک‌های خازنی را می‌توان روی تیر، در پست، یا در تابلو نصب کرد. در پست‌ها باید محل نصب بتون‌ریزی شود. بانک‌های خازنی در تابلو و در ترکیب‌های مناسب سری و موازی نصب می‌شوند. هزینهٔ نصب بسته به محل و پروژه متفاوت است.

۳. هزینهٔ نگهداری. هزینهٔ نگهداری به نوع طراحی و محل نصب بستگی دارد.

٤. ارزش بازیافتنی. معمولاً هر وسیلهٔ الکتریکی عمر مفیدی دارد. این عمر به نوع تجهیز، طراحی، نحوهٔ نگهداری، و شرایط کاری بستگی دارد. برخی اوقات ارزش تجهیز در انتهای عمر مفیدش صفر است.

### ۲٤-۳-۱- فواید اقتصادی نصب بانک‌های خازنی

همان‌طور که در فصل ۹ گفته شد، نصب بانک خازنی فواید متعددی دارد:

- صرفه‌جویی ناشی از آزادسازی ظرفیت ترانس
- صرفه‌جویی ناشی از بهبود ضریب توان
- صرفه‌جویی ناشی از کاهش تلفات ترانس و فیدر
- هزینه‌های وابسته به توان راکتیو
- صرفه‌جویی ناشی از عدم پرداخت جریمهٔ توان راکتیو
- صرفه‌جویی ناشی از کاهش دیماند
- صرفه‌جویی ناشی از کاهش توان راکتیو

لازم به ذکر است که میزان صرفه‌جویی در یک محل خاص به تعرفه‌ها بستگی دارد. برخی اوقات، انجام همهٔ موارد فوق امکان‌پذیر نیست.

*صرفه‌جویی ناشی از آزادسازی ظرفیت ترانس*

اگر ضریب توان بار را با خازن شانت اصلاح کنیم، توان ظاهری کشیده شده از ترانس کاهش می‌یابد. مقدار کاهش توان ظاهری از این رابطه به دست می‌آید:

$$kVA_R = P\left(\frac{1}{pf_1} - \frac{1}{pf_2}\right)$$

در اینجا $P$ توان اکتیو و $pf_1$ و $pf_2$ ضریب توان‌های قبل و بعد از خازن‌گذاری است. اگر $C_{TR}$ هزینهٔ سالیانهٔ هر کیلو ولت‌آمپر در ترانس باشد، میزان صرفه‌جویی از این رابطه به دست می‌آید:

$$C_{TRS} = kVA_R \times C_{TR}$$

*صرفه‌جویی ناشی از بهبود ضریب توان*

اگر ضریب توان بار از $pf_1$ به $pf_2$ تصحیح شود، میزان صرفه‌جویی در توان راکتیو برابر است با:

$$kVAR_S = P\left(\tan\theta_1 - \tan\theta_2\right)$$

اگر $C_{QD}$ هزینهٔ هر یونیت توان راکتیو باشد، میزان صرفه‌جویی در هزینه‌ها ($C_{kVAR}$) برابر است با:

$$C_{kVAR} = C_{QD} \times kVAR_S$$

*صرفه‌جویی ناشی از کاهش تلفات ترانس و فیدر*

این صرفه‌جویی به طور غیر مستقیم بر هزینهٔ تعرفه اثر می‌گذارد. اگر توان راکتیو جبران شود، جریان فیدر و ترانس کاهش می‌یابد و در نتیجه تلفات اهمی آنها کم می‌شود. اگر جریان‌های $I_1$ و $I_2$ مقدار مؤثر جریان قبل و بعد از اصلاح ضریب توان و $R$ مجموع مقاومت‌های ترانس و فیدر باشد، کاهش هزینهٔ ناشی از کاهش تلفات برابر است با:

$$C_L = 3C_W\left(I_1^2 - I_2^2\right)\left(R \times 8,760 \times LF\right) \times 10^{-3}$$

در اینجا $LF$ ضریب تلفات، $C_W$ هزینهٔ الکتریسیته به ازای هر کیلووات ساعت، و ۸۷۶۰ تعداد ساعت‌های موجود در هر سال است. ضریب بار به صورت نسبت متوسط تلفات بر ماکزیمم تلفات تعریف می‌شود.

*هزینه‌های وابسته به توان راکتیو*

در صورت عدم حضور تجهیزات اصلاح ضریب توان، شرکت برق باید توان راکتیو لازم برای بار را تأمین کند. اگر $C_Q$ هزینهٔ واحد توان راکتیو و مقدار توان راکتیو مورد نیاز $kVAR_h$ باشد، هزینهٔ توان راکتیو برابر است با:

$$C_{QT} = C_Q \times kVAR_h$$

*صرفه‌جویی ناشی از عدم پرداخت جریمهٔ توان راکتیو*

اگر ضریب توان بار به میزان قابل قبول شرکت برق (۹۵ درصد یا بیشتر) برسد، جریمهٔ توان راکتیو منظور نمی‌شود. در اینجا $C_{kVAR}$ هزینهٔ واحد توان راکتیو است و مقدار صرفه‌جویی ($CPF$) برابر است با:

$$C_{PF} = C_{kVAR} \times kVAR$$

*صرفه‌جویی ناشی از کاهش دیماند*

اگر مقدار کاهش توان ظاهری ناشی از اصلاح ضریب توان معلوم باشد، می‌توان مقدار صرفه‌جویی در دیماند ($C_S$) را محاسبه کرد:

$$C_S = C_{SD} \times kVA_R$$

در اینجا $C_{SD}$ هزینهٔ ماکزیمم دیماند به ازای هر کیلوولت‌آمپر است.

اگر مقدار توان راکتیو جبران‌شده را بدانیم و $C_{QD}$ هزینهٔ دیماند توان راکتیو باشد، صرفه‌جویی کل ($C_{QDT}$) عبارت است از:

$$C_{QDT} = C_{QD} \times kVAR_S$$

هر شرکت برقی ساختار و سیستم صورت‌حساب خود را دارد. مقدار صرفه‌جویی ناشی از بهبود ضریب توان بر اساس تعرفه صورت می‌گیرد. تابع هزینهٔ زیر را می‌توان تعریف کرد:

تابع هزینهٔ سرمایه‌گذاری مجموع سرمایهٔ اولیهٔ بانک خازنی، هزینهٔ نصب، هزینهٔ نگهداری منهای مقدار ارزش بازیافتنی است. تابع هزینهٔ صرفه‌جویی مجموع صرفه‌جویی‌های ناشی از آزادسازی ظرفیت ترانس، صرفه‌جویی ناشی از بهبود ضریب توان، هزینه‌های ناشی از توان راکتیو، کاهش تلفات ترانس و فیدر، کاهش جریمهٔ توان راکتیو، کاهش دیماند، کاهش توان راکتیو می‌باشد. بسته به نوع تعرفه چند بند از تابع هزینهٔ صرفه‌جویی انتخاب می‌شود.

## ۲۴-۴- اثر اصلاح ضریب توان بر مالیات بر درآمد

برای واقعی‌بودن بررسی اقتصادی عواملی مانند مالیات بر درآمد، استهلاک، اعتبار مالیاتی، و تورم باید در نظر گرفته شوند.

### ۲٤-٤-۱- مالیات

باید مالیاتی که در غالب عوارض شهری، مالیات استانی، و مانند آن اخذ می‌شود، در هزینه‌ها آورده شود. بخش عمدهٔ این هزینه، مالیات بر درآمد است.

### ۲٤-٤-۲- اعتبارات مالیاتی

معمولاً دولت‌ها برای تشویق به صرفه‌جویی انرژی از اعتبارات مالیاتی استفاده می‌کنند. مثلاً امروزه انرژی‌های نو به دلیل کاهش آلودگی هوا از بیشترین اعتبار مالیاتی برخوردارند. برخی از پروژه‌هایی که شامل این طرح هستند، عبارتند از:

| | |
|---|---|
| منابع انرژی جایگزین | انرژی باد و انرژی خورشیدی |
| تجهیزات بازیافت | استخراج نفت از سنگ‌های نفتی |
| پروژه‌های cogeneration | تجهیزات تولید برق‌آبی |

### ۲٤-٤-۳- استهلاک

روش محاسبهٔ استهلاک روشی مفید برای بازیابی سرمایه از طریق مالیات بر درآمد طی مدت زمان خاصی است. معمولاً استهلاک برای دارایی‌های بزرگی مانند خانه، اتومبیل، و تجهیزات صنعتی به کار می‌رود. این روش

برای مواردی مانند زمین، ارزش بازیافتنی، و یا بهره به کار نمی‌رود. دو روش برای محاسبهٔ استهلاک وجود دارد: استهلاک ثبتی و استهلاک مالیاتی. در استهلاک ثبتی، مقدار خاصی هر سال ثبت می‌شود و برای سرمایه‌گذاری مجدد استفاده می‌شود. استهلاک مالیاتی، وابسته به قوانین مالیاتی است و ممکن است دست‌خوش تغییر گردد. روش‌های زیر برای بررسی اقتصادی در مهندسی به کار می‌رود:

- روش خط مستقیم[1]
- روش مجموع سال‌ها[2]
- روش استهلاک ماندهٔ نزولی[3]
- روش بازیافت سریع هزینه[4]

ممکن است گاهی بازیافت استهلاک دارایی خاصی بیشتر وابسته به نوع مصرف آن باشد تا زمان. در چنین مواردی، از روش استهلاک واحد تولید شده استفاده می‌شود که مناسب تجهیزات الکتریکی نیست.

*روش خط مستقیم*

اگر میزان سرمایه و تعداد سال معلوم باشد، استهلاک هر سال برابر است با میزان سرمایه تقسیم بر تعداد سال. معمولاً این روش برای ثبت و نه مالیات به کار می‌رود. مثلاً اگر سرمایه ۵۰ هزار دلار و عمر مفید اقتصادی ۵ سال باشد، مقدار استهلاک سالیانه ۱۰ هزار دلار است.

*روش مجموع سال‌ها*

در این روش، مقدار استهلاک در سال‌های اولیه بیشتر و در سال‌های انتهایی کمتر در نظر گرفته می‌شود. از رابطهٔ زیر استفاده می‌کنیم:

$$SYD = n(n+1)/2$$

برای ۵ سال عمر مفید اقتصادی، مقدار پارامتر فوق ۱۵ سال می‌شود. مقدار استهلاک در این مثال در جدول ۲۴-۱ آمده است.

**جدول ۲۴-۱: پارامتر SYD استهلاک**

| سال | کسر از کل | مقدار استهلاک (دلار) |
|---|---|---|
| اول | 5/15 | 16,667 |
| دوم | 4/15 | 13,333 |
| سوم | 3/15 | 10,000 |
| چهارم | 2/15 | 6,667 |
| پنجم | 1/15 | 3,333 |
| مجموع | 1 | 50,000 |

[1] straight line method
[2] sum of years of digit method
[3] declining balance method
[4] accelerated cost recovery system

*روش استهلاک ماندهٔ نزولی*

در این روش، نرخ استهلاک ثابتی به ارزش ثبت‌شدهٔ دارایی تعلق می‌گیرد. این نرخ بسته به نوع دارایی و تاریخ خرید آن است. نرخ‌های رایج ۲۰۰، ۱۷۵، و ۱۵۰ درصد است. به نرخ ۲۰۰ درصد، اصطلاحاً روش استهلاک ماندهٔ نزولی دوبله گفته می‌شود و مقدار آن برابر است با دو برابر ارزش ثبت‌شدهٔ دارایی تقسیم بر تعداد سال‌ها. ارزش ثبت‌شدهٔ دارایی برابر است با مجموع استهلاک‌ها تا تاریخ مورد نظر. مقدار استهلاک نزولی دوبله در هر سال عبارت است از دو برابر سرمایه منهای استهلاک تا آن تاریخ تقسیم بر تعداد سال‌ها.

**مثال**

مقدار سرمایه‌گذاری در تجهیزاتی ۵۰ هزار دلار است. مقدار استهلاک نزولی دوبله را حساب کنید.

**پاسخ**

استهلاک سال اول:

$$2(50,000\$ - 0\$)/5 = 20,000\$$$

استهلاک سال دوم:

$$2(50,000\$ - 20,000\$)/5 = 12,000\$$$

استهلاک سال سوم:

$$2(50,000\$ - 32,000\$)/5 = 7,200\$$$

استهلاک سال چهارم:

$$2(50,000\$ - 39,200\$)/5 = 4,320\$$$

استهلاک سال پنجم:

$$2(50,000\$ - 43,520\$)/5 = 2,592\$$$

مقدار ارزش بازیافتنی برابر است با:

$$50,000\$ - (20,000 + 12,000 + 7,200 + 4,320 + 2,592)\$ = 3,882\$$$

*روش بازیافت سریع هزینه*

در این روش، زمان استهلاک بسیار کمتر از عمر واقعی تجهیز است. مقدار ارزش بازیافتنی برابر صفر فرض می‌شود. اولین قدم در محاسبهٔ استهلاک، تعیین گروه دارای بر اساس جدول ۲۴-۲ است. قدم بعدی، خواندن زمان استهلاک از جدول ۲۴-۳ است.

**جدول ۲۴-۲: گروه‌های مختلف برای محاسبهٔ استهلاک**

| گروه‌بندی دارایی‌ها | کلاس استهلاک |
|---|---|
| اتومبیل و کامیون‌های سبک | ۳ سال |
| ماشین‌ها و تجهیزات تحقیقاتی | |
| ابزار ویژه و دیگر تجهیزات با عمر مفید کمتر از ٤ سال | |
| اغلب ماشین‌ها و تجهیزات | ۵ سال |
| مبلمان و تجهیزات اداری | |
| کامیون‌های سنگین، کشتی‌ها، و هواپیما | |
| تجهیزات شرکت‌های برق و آب با عمر مفید کمتر از ۲۵ سال | ۱۰ سال |
| واگن‌های باری، خانه‌های پیش‌ساخته | |
| تجهیزات شرکت‌های برق و آب با عمر مفید کمتر از ۳۰ سال | ۱۵ سال |
| املاک و مستقلات | |

**جدول ۲۴-۳: مقدار استهلاک مستقلات**

| سال | سه سال (درصد) | پنج سال (درصد) | ده سال (درصد) | پانزده سال (درصد) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 33 | 20 | 10 | 7 |
| 2 | 45 | 32 | 18 | 12 |
| 3 | 22 | 24 | 16 | 12 |
| 4 | - | 16 | 14 | 11 |
| 5 | - | 8 | 12 | 10 |
| 6 | - | - | 10 | 9 |
| 7 | - | - | 8 | 8 |
| 8 | - | - | 6 | 7 |
| 9 | - | - | 4 | 6 |
| 10 | - | - | 2 | 5 |
| 11 | - | - | - | 4 |
| 12 | - | - | - | 3 |
| 13 | - | - | - | 3 |
| 14 | - | - | - | 2 |
| 15 | - | - | - | 1 |

**مثال**

یک کامپیوتر، دارایی شخصی است و ۳ هزار دلار قیمت دارد. مقدار بازیافت سریع هزینه چقدر است؟

**پاسخ**

بنابر جدول ۲۴-۲ این تجهیز در گروه ۵ سال قرار می‌گیرد. مقدار استهلاک محاسبه شده و در جدول ٢٤-٤ آمده است.

جدول ٢٤-٤: محاسبهٔ استهلاک با روش بازیافت سریع هزینه

| سال | بازیافت سریع هزینه (درصد) | هزینه (دلار) | استهلاک (دلار) |
|---|---|---|---|
| 1 | 20 | 3,000 | 600 |
| 2 | 32 | 3,000 | 960 |
| 3 | 24 | 3,000 | 720 |
| 4 | 16 | 3,000 | 480 |
| 5 | 8 | 3,000 | 240 |

## ۲۴-۵- تحلیل‌های اقتصادی

روش‌های مختلفی برای تحلیل اقتصادی و انتخاب مناسب در پروژه‌ها وجود دارد، مانند:

- روش برگشت سرمایه (بازپرداخت)
- روش نرخ بازدهی
- بررسی نسبت هزینه و فایده
- روش سربه‌سری

معمولاً در این تحلیل‌ها از فرض‌های زیر استفاده می‌شود:

- یکی از پارامترها با مقدار فعلی خود فرض می‌شود، مانند بهره یا عمر مفید.
- اغلب ارزش بازیافتنی صفر فرض می‌شود.
- نرخ بهره متغیر فرض می‌شود.
- محصولات با تکنولوژی برتر محبوب‌تر از تکنولوژی قدیمی فرض می‌شود. در چنین مواردی، مزایا و برتری‌های فنی باید مقایسه شوند.

### ۲٤-۵-۱- روش برگشت سرمایه

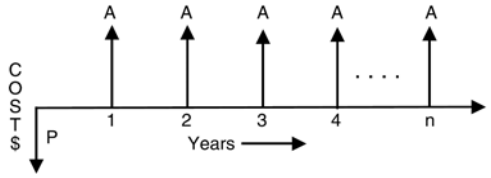
در روش برگشت سرمایه زمان لازم برای مساوی شدن منافع یک سرمایه‌گذاری با مقدار آن سرمایه است. زمان برگشت پول برابر است با میزان سرمایه تقسیم بر عواید سالیانه. در این روش ارزش زمانی سرمایه در نظر گرفته نمی‌شود. یکی از روش‌های مقایسهٔ جنبه‌های اقتصادی دو طرح، استفاده از ارزش فعلی سرمایه ( $PWF$ ) است. عواید سالیانه باید در ضریبی ضرب شود:

$$PWF = \frac{1}{(1+i)^n}$$

که در آن $n$ تعداد سال‌ها است. مقدار کل عواید برابر است با:

$$P = A\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{(1+i)^n} = A\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n}$$

در اینجا $A$ عواید حاصله در هر سال است. سرمایه و بازگشت آن به صورت تابعی از زمان تعریف می‌شوند (تصویر ۲۴-٤). برای پروژهٔ خاصی، محاسبهٔ زمان بازگشت سرمایه با استفاده از ارزش فعلی سرمایه و محاسبهٔ فاکتورهایی مانند عواید سالیانه و نرخ بهره انجام می‌شود.




**تصویر ۲۴-٤: روش برگشت سرمایه**

برای انجام تحلیل اقتصادی، باید اثر مالیات بر درآمد را در نظر گرفت. برخی اوقات پروژه‌های مربوط به انرژی شامل اعتبارات مالیاتی می‌شوند. موارد زیر باید در نظر گرفته شوند:

- گردش مالی قبل از اعمال مالیات
- استهلاک برابر است با سرمایه ضرب در نرخ استهلاک
- تغییر در درآمد شامل مالیات برابر است با گردش مالی قبل از اعمال مالیات منهای مالیات بر درآمد
- گردش مالی بعد از اعمال مالیات برابر است با گردش مالی قبل از اعمال مالیات منهای مالیات بر درآمد

برای محاسبهٔ اثر تورم بر زمان برگشت سرمایه، باید تغییرات زمانی هزینه‌ها و نرخ تورم در محاسبهٔ زمان بازگشت سرمایه منظور شوند. مراحل زیر باید طی شود:

- گردش مالی قبل از اعمال مالیات
- گردش مالی واقعی برابر است با گردش مالی قبل از اعمال مالیات ضرب در $(1+f)^n$ که $f$ نرخ تورم است
- استهلاک برابر است با سرمایه ضرب در نرخ استهلاک
- تغییر در درآمد شامل مالیات برابر است با گردش مالی واقعی منهای استهلاک
- مالیات بر درآمد برابر است با تغییر در درآمد شامل مالیات ضرب در مالیات بر درآمد افزایشی[1]
- گردش مالی بعد از اعمال مالیات برابر است با گردش مالی بعد از اعمال مالیات ضرب در $(1+f)^n$

### ۲۴-۵-۲- بررسی نرخ بازدهی

نرخ بازدهی را می‌توان بهرهٔ پرداختی ماندهٔ وام در اقساط از پیش تعیین شده دانست. این نوع تحلیل برای فعالیت‌های اقتصادی کُند با بهرهٔ پایین مناسب است. اگر بهره حدود ۲ درصد باشد، اثر بهرهٔ مرکب کم است. برای محاسبهٔ نرخ بازدهی، ارزش فعلی عواید را با هزینه‌های فعلی برابر فرض می‌کنیم. تنها مجهول این معادله نرخ بهره است. به مثال زیر توجه کنید:

[1] incremental tax credit

**مثال**

سرمایه‌ای به مبلغ ۵۷٤۰۰ دلار در یک بانک خازنی صرف شده است. عمر پروژه ۱۰ سال تخمین زده می‌شود. صرفه‌جویی ناشی از به کار بردن بانک در هر سال ۸۱۷۳ دلار است. نرخ بازدهی را حساب کنید.

**پاسخ**

$$n=10, A=8{,}173\$, P=57{,}400\$$$

$$57{,}400=8{,}173\frac{(1+i)^{10}-1}{i(1+i)^{10}}$$

نرخ بهره از معادلهٔ فوق، ۷ درصد به دست می‌آید.

محاسبهٔ نرخ بازدهی از مهم‌ترین تحلیل‌های اقتصاد مهندسی است. با این نرخ به سرعت می‌توان میزان مفید بودن پروژه را فهمید. گاهی اوقات نرخ سود به دست آمده از این رابطه منفی می‌شود. بنابراین، باید در انتخاب این تکنیک دقت کرد.

### ۲٤-۵-۳- بررسی نسبت هزینه و فایده

در صورتی که روش قبلی قابل اجرا نباشد، از نسبت هزینه و فایده استفاده می‌کنیم. اگر نسبت عواید فعلی پروژه به هزینه‌های فعلی آن بزرگ‌تر از واحد باشد، آن را امکان‌پذیر می‌دانیم. این روش تحلیل را می‌توان برای انواع مسائل ورودی ثابت، خروجی ثابت، و ورودی و خروجی متغیر به کار برد.

**مثال**

سرمایهٔ ۵۷٤۰۰ دلار برای احداث یک بانک خازنی صرف شده است. نرخ بهره ٦ درصد و عمر مفید بانک ۲۰ سال تخمین زده شده است. به دلیل شرایط محیطی عمر مفید به ۱۰ یا ۱۵ سال کاهش خواهد یافت. نسبت هزینه و فایده را برای عمرهای مفید مختلف حساب کنید. عواید سالیانهٔ بانک ۸۱۷۳ دلار است.

**پاسخ**

$$P=57{,}400\$, A=8{,}173\$, i=6\%$$

$$n=10 \Rightarrow \frac{8{,}173\dfrac{(1+0.06)^{10}-1}{0.06(1+0.06)^{10}}}{57{,}400}=1.048$$

$$n=15 \Rightarrow \frac{8{,}173\dfrac{(1+0.06)^{15}-1}{0.06(1+0.06)^{15}}}{57{,}400}=1.383$$

$$n=20 \Rightarrow \frac{8{,}173\dfrac{(1+0.06)^{20}-1}{0.06(1+0.06)^{20}}}{57{,}400}=1.633$$

نسبت مورد نظر در همهٔ موارد بزرگتر از واحد است.

### ۲٤-٥-٤- تحلیل سربه‌سری

تحلیل سربه‌سری روشی دقیق برای تحلیل‌های اقتصادی است. این تحلیل برای پروژه‌های ساخت چند مرحله‌ای مناسب است. آیا پروژه را باید با در نظر گرفتن نیاز و گسترش آینده ساخت یا تنها حال حاضر را در نظر گرفت. پروژهٔ اصلاح ضریب توان در چنین مجموعه‌ای قرار می‌گیرد. فرض کنید که کارخانه‌ای ضریب توان ۸۰ درصد دارد و می‌خواهیم با نصب ۱۰۰ مگاوار خازن ضریب توان را به ۹۵ درصد افزایش دهیم. پروژهٔ دیگری در سه سال آینده انجام می‌شود که نیاز کارخانه را ۱۰۰ مگاوار افزایش خواهد داد. سؤال این است که آیا ۲۰۰ مگاوار را در یک مرحله نصب کنیم یا آن را در دو مرحله انجام دهیم.

**مثال**

پروژهٔ اصلاح ضریب توانی را در نظر بگیرید که می‌تواند در یک یا دو مرحله انجام شود. هزینهٔ احداث به شرح زیر است:

- هزینهٔ احداث کامل ۲۰۰ مگاوار خازن: ۳۵۰ هزار دلار
- هزینهٔ احداث ۱۰۰ مگاوار خازن: ۱۹۰ هزار دلار
- هزینهٔ نصب ۱۰۰ مگاوار خازن بعد از $n$ سال: ۲۰۰ هزار دلار

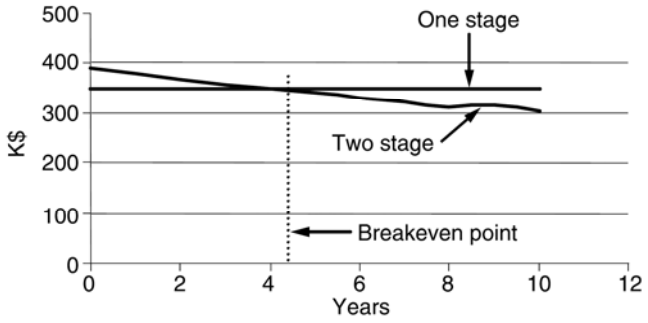
عمر مفید چنین تأسیساتی ۲۰ سال است. نرخ بهره نیز ٦ درصد می‌باشد. تحلیل سربه‌سری انجام دهید.

**پاسخ**

هزینهٔ ساخت در یک مرحله ۳۵۰ هزار دلار است. بررسی هزینهٔ ساخت در دو مرحله با فاصلهٔ $n$ سال:

$$PW = 190,000 + 200,000(1+0.06)^{-n}$$
$$n=2 \Rightarrow PW = 190,000 + 200,000(1+0.06)^{-2} = 368,000\$$
$$n=3 \Rightarrow PW = 190,000 + 200,000(1+0.06)^{-3} = 357,923\$$
$$n=4 \Rightarrow PW = 190,000 + 200,000(1+0.06)^{-4} = 348,418\$$
$$n=5 \Rightarrow PW = 190,000 + 200,000(1+0.06)^{-5} = 339,451\$$
$$n=10 \Rightarrow PW = 190,000 + 200,000(1+0.06)^{-10} = 301,678\$$

نمودار رابطهٔ فوق برای نقطهٔ سربه‌سری در تصویر ۲٤-۵ آمده است. نقطهٔ سربه‌سری نقطه‌ای است که هزینهٔ دو پروژه با هم برابر می‌شود که در این مثال ٤ سال است.




**تصویر ۲٤-۵: تحلیل سربه‌سری**

## ۲۴-۶- مؤخره

تحلیل اقتصادی یکی از جنبه‌های مهم تصمیم‌گیری است. در این فصل، اصول اولیه مانند ارزش فعلی سرمایه و ارزش آتی آن بحث شد. اجزاء مختلف هزینه‌های یک پروژهٔ اصلاح ضریب توان گفته شد. اثرات عواملی مانند مالیات، استهلاک، اعتبارات مالیاتی، و تورم بر تحلیل‌های اقتصادی ذکر شد. زمان برگشت سرمایه با در نظر گرفتن ارزش فعلی سرمایه، مالیات، استهلاک، اعتبارات مالیاتی، و تورم محاسبه شد. دیگر روش‌های مناسب تحلیل پروژه‌های اصلاح ضریب توان تحلیل نسبت هزینه و فایده و نرخ بازدهی هم بررسی شد. در انتها، تحلیل سربه‌سری برای انجام مرحله به مرحلهٔ پروژه‌ها گفته شد. لازم به ذکر است تکنیک‌های دیگر برای تحلیل اقتصادی بانک‌های خازنی وجود دارد که در آن عواید سال به سال با هم متفاوت است.

# فصل ۲۵ : ضمائم

## ۲۵-۱- اصول اولیهٔ مدارهای خازنی

روابط متعددی وجود دارد که برای محاسبات شبکه و به خصوص بانک‌های خازنی مفید است که در اینجا آورده می‌شود.

ظرفیت معادل گروهی از خازن‌ها که با هم موازی شده باشند، برابر است با:

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + \ldots$$

مجموع توان راکتیو چند بانک خازنی که با هم موازی شده‌اند:

$$kVAR = kVAR_1 + kVAR_2 + kVAR_3 + \ldots$$

ظرفیت معادل گروهی از خازن‌ها که با هم سری شده باشند، برابر است با:

$$C = \frac{1}{1/C_1 + 1/C_2 + 1/C_3 + \ldots}$$

مجموع توان راکتیو چند بانک خازنی که با هم سری شده‌اند:

$$kVAR = \frac{1}{1/kVAR_1 + 1/kVAR_2 + 1/kVAR_3 + \ldots}$$

اگر ظرفیت خازن بر حسب میکروفاراد بیان شود، راکتانس آن (در ٦٠ هرتز) برابر است با:

$$X_C = \frac{10^6}{(2\pi f)C} = \frac{2653}{C}$$

توان راکتیو آن (بر حسب کیلووار) برابر است با:

$$kVAR = \frac{1000(kV)^2}{X_C}$$

در یک سیستم سه‌فاز، توان ظاهری (کیلوولت آمپر) برابر است با:

$$kVA = \sqrt{3} \times kV \times I$$

در ضمن می‌توان از تقریب‌های زیر استفاده کرد:

- توان ظاهری موتورهای القایی برابر با توان آنها بر حسب اسب بخار است.
- در موتورهای سنکرون با ضریب توان ۸۰ درصد، توان ظاهری برابر با توان موتور بر حسب اسب بخار است.
- در موتورهای سنکرون با ضریب توان واحد، توان ظاهری ۸۰ درصد توان موتور بر حسب اسب بخار است.

جریان اتصال کوتاه در ترمینال‌های ترانس برابر است با جریان نامی تقسیم بر امپدانس ترانس.

مقدار مؤثر جریان با دانستن مؤلفه‌های هارمونیکی برابر است با:

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + \ldots}$$

مقدار کل اغتشاش در دیماند (TDD) برابر است با:

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_L}$$

که در آن $I_L$ جریان بار است. مقدار TDD ناشی از یک هارمونیک خاص از این رابطه به دست می‌آید:

$$TDD = \frac{I_n}{I_L}$$

**مثال**

سه خازن به ظرفیت‌های ۵، ۱۰، و ۱۵ میکروفاراد در اختیار داریم که با یک منبع DC ۱۰۰ ولتی موازی شده‌اند. (۱) بار هر خازن را حساب کنید. (۲) ظرفیت معادل را به دست آورید. (۳) اگر سه خازن سری شوند، ولتاژ هر یک چقدر است؟

**پاسخ**

محاسبهٔ بار خازن‌ها

$$Q_1 = C_1 V = \left(5 \times 10^{-6}\right) \times 100 = 500 \mu C$$
$$Q_2 = C_2 V = \left(10 \times 10^{-6}\right) \times 100 = 1,000 \mu C$$
$$Q_3 = C_3 V = \left(15 \times 10^{-6}\right) \times 100 = 1,500 \mu C$$

ظرفیت معادل

$$C = C_1 + C_2 + C_3 = \left(5 + 10 + 15\right) \times 10^{-6} = 30 \mu F$$

ظرفیت معادل در اتصال سری

$$C = \frac{1}{1/C_1 + 1/C_2 + 1/C_3} = \frac{1}{1/5 + 1/10 + 1/15} \times 10^{-6} = 2.727 \mu F$$
$$Q = CV = 2.727 \mu F \times 100 V = 272.7 \mu C$$

بار هر سه خازن با هم برابر است، ولتاژ هر یک برابر است با:

$$V_1 = \frac{Q}{C_1} = \frac{272.7 \mu C}{5 \mu F} = 54.5 V$$
$$V_2 = \frac{Q}{C_2} = \frac{272.7 \mu C}{10 \mu F} = 27.3 V$$
$$V_3 = \frac{Q}{C_3} = \frac{272.7 \mu C}{15 \mu F} = 18.2 V$$

**مثال**

ظرفیت خازن مورد استفاده در یک سیستم سه‌فاز، ۶۰ هرتز، ۲۳۰ کیلوولتی برابر ۳ میکروفاراد در هر فاز است. راکتانس خازن در هر فاز چقدر است؟ توان راکتیو تحویلی را حساب کنید.

**پاسخ**

$$C = 3\mu F, X_C = \frac{2653}{3} = 884.3\Omega/phase$$

$$Q = \frac{1000 \times (230kV)^2}{884.3\Omega} = 59,821kVAR$$

**مثال**

یک ترانس ۱ مگا ولت‌آمپری سه فاز با امپدانس ۶ درصد و ولتاژ ۳۳ کیلوولت به ۴/۱۶ کیلوولت فرض کنید. جریان اتصال کوتاه در ترمینال فشار ضعیف ترانس چقدر است؟

**پاسخ**

$$I_{\text{nominal}} = \frac{1MVA}{\sqrt{3} \times 4.16kV} = 138.8A$$

$$I_{SC} = \frac{138.8A}{0.06} = 2.31kA$$

**مثال**

مقدار مؤثر جریان‌های هارمونیک اصلی، پنجم، و هفتم به ترتیب ۱۰۰، ۱۱، و ۵ آمپر است. مقدار مؤثر جریان، TDD کل، و TDD ناشی از هر هارمونیک را حساب کنید.

**پاسخ**

$$I_{rms} = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + \ldots} = \sqrt{100^2 + 11^2 + 5^2} = 100.72A$$

$$TDD(\%) = \frac{\sqrt{11^2 + 5^2}}{100} \times 100 = 12\%$$

$$TDD(\text{5th harmonic}) = \frac{11}{100} \times 100 = 11\%$$

$$TDD(\text{7th harmonic}) = \frac{5}{100} \times 100 = 5\%$$

## ۲۵-۲- تعاریف

| | |
|---|---|
| آمپر (A): | واحد اندازه‌گیری جریان که نرخ عبور بار در سیم است. یک آمپر برابر است با عبور $6.023\times10^{23}$ الکترون در ثانیه. |
| اتصال ستاره: | اتصالی برای سیم‌پیچی یک ترانس سه‌فاز یا سه ترانس تک‌فاز که در آن سه سیم‌پیچی به یک نقطهٔ مشترک وصل می‌شوند |
| اتصال مثلث: | نوعی از اتصال یک ترانس سه‌فاز یا سه ترانس تک‌فاز که با هم سری شده‌اند تا مسیری بسته به وجود آورند. اتصال مثلث برای تجهیزات دیگر مانند خازن، راکتور، و ژنراتور هم به کار می‌رود. |
| اصلاح ضریب توان: | روشی برای بهبود ضریب توان و افزایش آن به واحد |
| اغتشاش کلی هارمونیک‌ها (THD): | نسبت مقدار مؤثر هارمونیک‌ها به مقدار مؤثر مؤلفهٔ اصلی که بر حسب درصد بیان می‌شود. |
| اغتشاش هارمونیکی: | اعوجاج در شکل موج جریان یا ولتاژ ناشی از حضور هارمونیک‌ها |
| امپدانس ضربه: | قدرت منبع الکتریکی یا امپدانس معادل آن که هنگام اتصال کوتاه دیده می‌شود |
| امپدانس: | مقاومتی که یک مدار الکتریکی در برابر عبور جریان از خود نشان می‌دهد (بر حسب اُهم) |
| اندوکتانس: | قابلیت ذخیره‌سازی انرژی در یک المان به صورت میدان مغناطیسی |
| بار: | تجهیزی که توان الکتریکی مصرف می‌کند. |
| بار خطی: | باری الکتریکی که از منبع ولتاژ سینوسی جریان سینوسی می‌کشد |
| بار غیر خطی: | باری الکتریکی که از منبع ولتاژ سینوسی جریان غیر سینوسی می‌کشد |
| باس: | یک هادی یا گروهی از هادی‌ها که نقطهٔ اتصال دو یا چند مدار با ولتاژ یکسان است |
| بانک خازنی ایزوله: | بانک خازنی‌ای که با بانک دیگری موازی نشده باشد. |
| بانک خازنی غیر ایزوله: | بانک خازنی‌ای که با یک یا چند بانک دیگر موازی شده باشد. |
| بانک خازنی ثابت: | بانک خازنی‌ای که همواره در مدار است و کنترل اتوماتیک ندارد. |
| بانک خازنی سوییچ‌شونده: | بانک تصحیح ضریب توان که با رگولاتور به طور اتوماتیک با شرایط سیستم منطبق می‌شود |
| بانک خازنی فیلتردار: | بانک خازنی مجهز به فیلتر برای حذف هارمونیک‌های مزاحم سیستم. |
| برق‌گیر: | تجهیزی که از شبکه در برابر اضافه‌ولتاژ ناشی از دشارژ یا ضربه های جریان حفاظت می‌کند |
| پاسخ فرکانسی: | رابطه یا نموداری که رابطهٔ امپدانس یک شبکه را با فرکانس نشان می‌دهد. |
| پس‌فاز: | جریان الکتریکی‌ای که فاز آن عقب‌تر از ولتاژ فاز متناظر باشد (سلفی) |
| پیش‌فاز: | جریان الکتریکی‌ای که فاز آن جلوتر از ولتاژ فاز متناظر باشد (خازنی) |
| تایریستور: | سوییچی نیمه‌هادی با وضعیت‌های خاموش و روشن که روشن شدن آن با سیگنال انجام می‌شود |
| ترانس جریان: | تجهیزی برای حس کردن جریان مدارهای فشار قوی به منظور اندازه‌گیری یا کنترل |
| ترانس: | تجهیزی برای انتقال انرژی الکتریکی از یک مدار به مداری با ولتاژ متفاوت. شامل هسته‌ای مغناطیسی و دو یا چند سیم‌پیچی است |

| | |
|---|---|
| تلفات: | انرژی (کیلووات ساعت) یا توانی (کیلووات) که در شبکه معمولاً به صورت حرارت تلف می‌شود. |
| تلفات اهمی: | تلفات حرارتی ناشی از عبور جریان از مقاومت ترانس، موتور، یا یک هادی |
| توالی صفر: | توالی‌ای که در آن ولتاژ/جریان هر سه‌فاز با هم هم‌فاز هستند. |
| توالی مثبت: | توالی‌ای که در آن ولتاژ/جریان فاز B ۱۲۰ درجه عقب‌تر از فاز A و ۱۲۰ درجه جلوتر از فاز C است. |
| توالی منفی: | توالی‌ای که در آن ولتاژ/جریان فاز B ۱۲۰ درجه جلوتر از فاز A و ۱۲۰ درجه عقب‌تر از فاز C است. |
| توان اغتشاشی: | بخشی از توان که ناشی از هارمونیک‌ها است و به توان مفید تبدیل نمی‌شود |
| توان اکتیو (P): | حاصل ضرب مؤلفهٔ همفاز جریان و ولتاژ در یک مدار الکتریکی که به آن توان حقیقی هم گفته می‌شود. |
| توان راکتیو (Q): | حاصل ضرب مؤلفهٔ غیر همفاز جریان و ولتاژ در یک مدار الکتریکی که به آن توان موهومی هم گفته می‌شود. |
| توان ظاهری (S): | حاصل‌ضرب ولتاژ و جریان |
| جریان دشارژ خازن: | جریان بزرگ و فرکانس بالایی که در صورت وقوع خطا، با دشارژ خازن‌ها رخ می‌دهد. |
| جریان متناوب (AC): | ولتاژ یا جریانی که به صورت پریودیک تغییر جهت می‌دهد، در مقابل جریان مستقیم (DC)، و مقادیر مثبت و منفی اختیار می‌کند. |
| جریان مستقیم (DC): | ولتاژ یا جریانی که اندازه‌ای ثابت دارد. |
| جریان هجومی خازن: | جریان گذرای بزرگی که در اولین لحظهٔ اتصال خازن به شبکه کشیده می‌شود |
| حالت ماندگار: | زمانی که عملکرد سیستم به حالت پایدار و مانا رسیده است |
| حالت گذرا: | زمانی که عملکرد سیستم هنوز به حالت پایدار و مانا نرسیده است |
| خازن: | خازن در قدرت برای تأمین توان راکتیو نصب می‌شود. شامل دو جوشن است که با پلاستیک یا کاغذ از هم جدا شده‌اند. با عایق مناسب در محفظه‌ای قرار می‌گیرد. |
| درایو کنترل دور موتور (ASD): | مدار الکتریکی برای استفاده از موتور در سرعت‌های مختلف. |
| دیاگرام تک‌خطی: | دیاگرامی تک‌فاز که نشان دهندهٔ ساختار الکتریکی شبکه و تجهیزات آن است |
| دیماند ماکزیمم: | ماکزیمم توانی که تجهیز در زمان خاصی مصرف می‌کند. |
| راکتور: | تجهیزی که در شبکه راکتانس سلفی دارد. |
| رزونانس سری: | اگر خازن و سلف سری باشند، در فرکانس خاصی امپدانس کمی دارند و جریان عبوری از آنها بزرگ می‌شود. |
| رزونانس موازی: | رزونانسی که با برابر شدن راکتانس خازن و اندوکتانس سلف رخ می‌دهد و در فرکانس خاصی جریان عبوری را ماکزیمم یا مینیمم می‌کند |
| رزونانس هارمونیکی: | شرایطی که در آن اندوکتانس و کاپاسیتانس در فرکانس خاصی با هم برابر می‌شوند |
| رگولاتور: | وسیله‌ای برای سوییچینگ اتوماتیک خازن‌ها |

| | |
|---|---|
| زاویهٔ فاز: | در سیستم قدرت، به اختلاف فاز یک پارامتر با پارامتر دیگر همان فاز در محل‌های مختلف یا محل مرجع گفته می‌شود. |
| سطح اتصال کوتاه: | توان ظاهری مدار در هنگام اتصال کوتاه بر حسب کیلوولت‌آمپر |
| ضریب توان جابه‌جایی (DPF): | نسبت توان اکتیو به توان ظاهری ناشی از مؤلفهٔ اصلی فرکانس (بدون اثر هارمونیک‌ها) |
| ضریب توان: | نسبت توان حقیقی به توان ظاهری |
| فرکانس: | نرخ تکرار یک پارامتر بر حسب هرتز، فرکانس نامی شبکه‌های ۵۰ یا ۶۰ هرتز است. |
| فیلتر: | تجهیزی که فرکانس‌های خاصی را بلوک کرده، به فرکانس‌های خاصی اجازهٔ عبور می‌دهد |
| فیوز خازنی: | فیوزی که خازن معیوب در بانک را از شبکه جدا می‌کند |
| فیوز: | وسیله‌ای برای حفاظت در برابر اضافه‌جریان، المان فیوز در صورت حرارت زیاد ذوب می‌شود و جریان را قطع می‌کند. |
| کاپاسیتانس (Capacitance): | خاصیت ذخیره‌سازی انرژی به صورت بار الکتریکی در چند هادی یا دی‌الکتریک در صورت اعمال ولتاژ به آنها |
| کلیدزنی بانک‌های مجاور: | کلیدزنی بانک خازنی‌ای که با یک یا چند بانک دیگر موازی شده است |
| ماشین سنکرون: | ماشینی که با تحریک روی روتور که می‌تواند در فرکانس نامی سیستم بچرخد |
| مبدل دوازده پالسی: | مبدلی سه‌فاز که از دو مبدل شش پالسی تشکیل شده تا هارمونیک‌های ۵، ۷، و مانند آن را حذف کند |
| مبدل شش پالسی: | یکسو سازی شش پالسه یا شش دیود یا شش سوییچ الکترونیک قدرت که ولتاژ متناوب را به ولتاژ مستقیم تبدیل می‌کند |
| مبدل: | وسیله‌ای الکترونیک قدرت که جریان متناوب را به جریان مستقیم تبدیل می‌کند. |
| مدارشکن: | سوییچی که برای اتصال جریان، برقراری جریان، و قطع جریان عادی مدار و همچنین قطع جریان خاصی در صورت وقوع خطا در سیستم. در انواع روغنی، گازی، خلأ، و هوای تحت فشار |
| مدولاسیون پهنای باند (PWM): | تکنیکی برای سوییچینگ که در آن نسبت زمان قطع به وصل متغیر است. ( مورد استفاده در اینورتر ها) |
| مقدار مؤثر: | پارامتری از یک ولتاژ یا جریان متناوب که به اندازهٔ ولتاژ یا جریان مستقیم هم‌اندازه‌اش کار یا حرارت تولید می‌کند. |
| میرایی شبکه: | خصوصیتی از شبکه که می‌تواند گذراها یا هارمونیک‌ها را در خود تضعیف کند |
| نسبت پیک به میانگین (Crest Factor): | نسبت مقدار پیک یک موج پریودیک به مقدار مؤثر آن. این نسبت برای یک موج سینوسی $\sqrt{2}$ است. در موج‌های دیگر این نسبت متفاوت است. |
| نوترال: | نقطهٔ اتصال مشترک سه فاز در شبکه |
| ولتاژ فاز به زمین: | مرجع ولتاژ در سیستم‌های تک‌فاز |
| ولتاژ فاز به فاز: | مرجع ولتاژ در سیستم‌های سه‌فاز |
| ولتاژ نامی سیستم: | ولتاژی که شبکه در آن طراحی شده و تجهیزات برای کار در آن تنظیم شده‌اند |
| هارمونیک اصلی: | مؤلفهٔ هارمونیکی‌ای که فرکانسی برابر با فرکانس نامی شبکه دارد. |
| هارمونیک: | موجی سینوسی که فرکانس آن مضربی صحیح از فرکانس اصلی است. |

هارمونیک‌های مشخص (Characteristic Harmonics): هارمونیک‌های غالب در یک بار هارمونیک‌زا، مثلاً هارمونیک‌های مشخص برای یک مبدل شش پالسی عبارتند از: ۵، ۷، ۱۱، ۱۳، ۱۷، و ۱۹.

یکسو ساز: تجهیزی که جریان متناوب را به جریان مستقیم تبدیل می‌کند.

### ۲۵-۳- اطلاعات مدارشکن‌ها

مدارشکن‌های مورد استفاده در شبکه بر اساس استاندارد ANSI C37.06 به دو گروه همه‌منظوره و مخصوص تقسیم می‌شوند.

#### ۲۵-۳-۱- مدارشکن‌های همه‌منظوره

این مدارشکن‌ها برای سوییچ کردن خطوط، ترانس‌ها، راکتورها، و باس‌ها استفاده می‌شوند. مقادیر این مدارشکن‌ها در استاندارد ANSI C37.06 موجود است. در جداول زیر مقادیر استاندارد مدارشکن‌های indoor، outdoor، و گازی آمده است.

- جدول ۲۵-۱ مخصوص مدارشکن‌های بدون روغن و indoor (٤/٧٦ تا ۳۸ کیلوولت)
- جدول ۲۵-۲ مخصوص مدارشکن‌های پست‌های گازی و outdoor (۱۵/۵ تا ۷۲/۵ کیلوولت)
- جدول ۲۵-۳ مخصوص مدارشکن‌های outdor (بالاتر از ۱۲۱ کیلوولت) و مدارشکن‌های پست‌های گازی (۱۲۱ تا ۸۰۰ کیلوولت)

**جدول ۲۵-۱: مقادیر نامی مدارشکن‌های بدون روغن و indoor**

| Rated Maximum Voltage kV, rms | Rated Voltage Range Factor K | Rated Continuous Current at 60 Hz A, rms | Rated Short Circuit Current (at Rated Maximum kV) kA, rms | Rate Interrupting Time Cycles | Rated Maximum Voltage Divided by K kV, rms | Maximum Symmetrical Interrupting Capability and Rated Short Time Current kA, rms | Closing and Latching Capability 2.7K Times Rated Short Circuit Current kA, Crest |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 4.76 | 1.36 | 1,200 | 8.8 | 5 | 3.50 | 12 | 32 |
| 4.76 | 1.24 | 1,200, 2,000 | 29.0 | 5 | 3.85 | 36 | 97 |
| 4.76 | 1.19 | 1,200, 2,000, 3,000 | 41.0 | 5 | 4.00 | 49 | 132 |
| 8.25 | 1.25 | 1,200, 2,000 | 33.0 | 5 | 6.60 | 41 | 111 |
| 15.00 | 1.30 | 1,200, 2,000 | 18.0 | 5 | 11.50 | 23 | 62 |
| 15.00 | 1.30 | 1,200, 2,000 | 28.0 | 5 | 11.50 | 36 | 97 |
| 15.00 | 1.30 | 1,200, 2,000, 3,000 | 37.0 | 5 | 11.50 | 48 | 130 |
| 38.00 | 1.65 | 1,200, 2,000, 3,000 | 21.0 | 5 | 23.00 | 35 | 95 |
| 38.00 | 1.00 | 1,200, 3,000 | 40.0 | 5 | 38.00 | 40 | 108 |

جدول ۲۵-۲: مقادیر نامی مدارشکن‌های پست‌های گازی و **outdoor** (کمتر از ۷۲/۵ کیلوولت)

| Rated Maximum Voltage kV, rms | Rated Voltage Range Factor K | Rated Continuous Current at 60 Hz A, rms | Rated Short Circuit Current (at Rated Maximum kV) kA, rms | Rated Maximum Voltage Divided by K kV, rms | Maximum Symmetrical Interrupting Capability and Rated Short Time Current kA, rms | Closing and Latching Capability 2.7 K Times Rated Short Circuit Current kA, Crest |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 15.5 | 1.0 | 600, 1,200 | 12.5 | 15.5 | 12.5 | 34 |
| 15.5 | 1.0 | 1,200, 2,000 | 20.2 | 15.5 | 20.2 | 54 |
| 15.5 | 1.0 | 1,200, 2,000 | 25.0 | 15.5 | 25.0 | 68 |
| 15.5 | 1.0 | 1,200, 2,000, 3,000 | 40.0 | 15.5 | 40.0 | 108 |
| 25.8 | 1.0 | 1,200, 2,000 | 12.5 | 25.8 | 12.5 | 34 |
| 25.8 | 1.0 | 1,200, 2,000 | 25.0 | 25.8 | 25.0 | 68 |
| 38.0 | 1.0 | 1,200, 2,000 | 16.0 | 38.0 | 16.0 | 43 |
| 38.0 | 1.0 | 1,200, 2,000 | 20.0 | 38.0 | 20.0 | 54 |
| 38.0 | 1.0 | 1,200, 2,000 | 25.0 | 38.0 | 25.0 | 68 |
| 38.0 | 1.0 | 1,200, 2,000 | 31.5 | 38.0 | 31.5 | 85 |
| 38.0 | 1.0 | 1,200, 2,000, 3,000 | 40.0 | 38.0 | 40.0 | 108 |
| 48.3 | 1.0 | 1,200, 2,000 | 20.0 | 48.3 | 20.0 | 54 |
| 48.3 | 1.0 | 1,200, 2,000 | 31.5 | 48.3 | 31.5 | 85 |
| 48.3 | 1.0 | 1,200, 2,000, 3,000 | 40.0 | 48.3 | 40.0 | 108 |
| 72.5 | 1.0 | 1,200, 2,000 | 20.0 | 72.5 | 20.0 | 54 |
| 72.5 | 1.0 | 1,200, 2,000, | 31.5 | 72.5 | 31.5 | 85 |
| 72.5 | 1.0 | 1,200, 2,000, 3,000 | 40.0 | 72.5 | 40.0 | 108 |

جدول ۲۵-۳: مقادیر نامی مدارشکن‌های پست‌های گازی و **outdor** (بالاتر از ۱۲۱ کیلوولت)

| Rated Maximum Voltage kV, rms | Rated Voltage Range Factor K | Rated Continuous Current at 60 Hz A, rms | Rated Short Circuit Current (at Rated Maximum kV) kA, rms | Rate Interrupting Time Cycles | Rated Maximum Voltage Divided by K kV, rms | Maximum Symmetrical Interrupting Capability and Rated Short Time Current kA, rms | Closing and Latching Capability 2.7 K Times Rated Short Circuit Current kA, Crest |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 121 | 1.0 | 1,200 | 20 | 3 | 121 | 20 | 54 |
| 121 | 1.0 | 1,600, 2,000, 3,000 | 40 | 3 | 121 | 40 | 1,808 |
| 121 | 1.0 | 2,000, 3,000 | 63 | 3 | 121 | 63 | 170 |
| 145 | 1.0 | 1,200 | 20 | 3 | 145 | 20 | 54 |
| 145 | 1.0 | 1,600, 2,000, 3,000 | 40 | 3 | 145 | 40 | 108 |
| 145 | 1.0 | 2,000, 3,000 | 63 | 3 | 145 | 63 | 170 |
| 145 | 1.0 | 2,000, 3,000 | 80 | 3 | 145 | 80 | 216 |
| 169 | 1.0 | 1,200 | 16 | 3 | 169 | 16 | 43 |
| 169 | 1.0 | 1,600 | 31.5 | 3 | 169 | 31.5 | 85 |
| 169 | 1.0 | 2,000 | 40 | 3 | 169 | 40 | 108 |
| 169 | 1.0 | 2,000 | 50 | 3 | 169 | 50 | 135 |
| 169 | 1.0 | 2,000 | 63 | 3 | 169 | 63 | 170 |
| 242 | 1.0 | 1,600, 2,000, 3,000 | 31.5 | 3 | 242 | 31.5 | 85 |
| 242 | 1.0 | 2,000, 3,000 | 40 | 3 | 242 | 40 | 108 |
| 242 | 1.0 | 2,000 | 50 | 3 | 242 | 50 | 135 |
| 242 | 1.0 | 2,000, 3,000 | 63 | 3 | 242 | 63 | 170 |
| 362 | 1.0 | 2,000, 3,000 | 40 | 2 | 362 | 40 | 108 |
| 362 | 1.0 | 2,000 | 63 | 2 | 362 | 63 | 170 |
| 550 | 1.0 | 2,000, 3,000 | 40 | 2 | 550 | 40 | 108 |
| 550 | 1.0 | 3,000 | 63 | 2 | 550 | 63 | 170 |
| 800 | 1.0 | 2,000, 3,000 | 40 | 2 | 800 | 40 | 108 |
| 800 | 1.0 | 3,000 | 63 | 2 | 800 | 63 | 170 |

### ۲۵-۳-۲- مدارشکن‌های خاص

این مدارشکن‌ها برای کلیدزنی بانک‌های خازنی به کار می‌روند. مقادیر رایج آنها بر طبق استاندارد ANSI C37.06 در جداول زیر آمده است:

- جدول ۲۵-٤ مدارشکن‌های indoor بدون روغن مخصوص بانک خازنی با ولتاژ ٤/۷٦ تا ۳۸ کیلوولت
- جدول ۲۵-۵ مدارشکن‌های outdoor مخصوص بانک خازنی (کمتر از ۷۲/۵ کیلوولت) و پست‌های گازی (۱۵/۵ تا ۷۲/۵ کیلوولت)
- جدول ۲۵-٦ مدارشکن‌های outdoor مخصوص بانک خازنی (بالاتر از ۱۲۱ کیلوولت) و پست‌های گازی (۱۲۱ تا ۸۰۰ کیلوولت)

**جدول ۲۵-٤: مقادیر نامی مدارشکن‌های indoor بدون روغن (خازنی)**

| Rated Maximum Voltage kV, rms | Rated Short Circuit Current kA, rms | Rated Continuous Current A, rms | General Purpose Circuit Breakers Rated Capacitance Switching Current | Definite Purpose Circuit Breakers Rated Capacitance Switching Current | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Shunt Capacitor Bank or Cable | Shunt Capacitor Bank or Cable | | | |
| | | | | | Back-to-Back | | |
| | | | Shunt Capacitor Bank or Cable | | | Inrush Current | |
| | | | Isolated Current A, rms | Overhead Line Current A, rms | Isolated Current A, rms | Peak Current kA | Frequency Hz |
| 4.76 | 8.80 | 1,200 | 400 | 630 | 630 | 15 | 2,000 |
| 4.76 | 29.00 | 1,200 | 400 | 630 | 630 | 15 | 2,000 |
| 4.76 | 29.00 | 2,000 | 400 | 1,000 | 1,000 | 15 | 1,270 |
| 4.76 | 41.00 | 1,200, 2,000 | 400 | 630 | 630 | 15 | 2,000 |
| 4.76 | 41.00 | 3,000 | 400 | 1,000 | 1,000 | 15 | 1,270 |
| 8.25 | 33.00 | 1,200 | 250 | 630 | 630 | 15 | 2,000 |
| 8.25 | 33.00 | 2,000 | 250 | 1,000 | 1,000 | 15 | 1,270 |
| 15.00 | 18.00 | 1,200 | 250 | 630 | 630 | 15 | 2,000 |
| 15.00 | 18.00 | 2,000 | 250 | 1,000 | 1,000 | 15 | 1,270 |
| 15.00 | 28.00 | 1,200 | 250 | 630 | 630 | 15 | 2,000 |
| 15.00 | 28.00 | 2,000 | 250 | 1,000 | 1,000 | 15 | 1,270 |
| 15.00 | 37.00 | 1,200 | 250 | 630 | 630 | 15 | 2,000 |
| 15.00 | 37.00 | 2,000 | 250 | 1,000 | 1,000 | 18 | 2,400 |
| 15.00 | 37.00 | 3,000 | 250 | 1,600 | 1,600 | 25 | 1,330 |
| 38.00 | 21.00 | 1,200, 2,000, 3,000 | 50 | 250 | 250 | 18 | 6,000 |
| 38.00 | 40.00 | 1,200, 3,000 | 50 | 250 | 250 | 25 | 8,480 |

جدول ۲۵-۵: مقادیر نامی مدارشکن‌های **outdoor** (کمتر از ۷۲/۵ کیلوولت) و پست‌های گازی (خازنی)

| Rated Maximum Voltage kV, rms | Rated Short Circuit Current kA, rms | Rated Continuous Current A, rms | General Purpose Circuit Breakers Rated Capacitance Switching Current | Definite Purpose Circuit Breakers Rated Capacitance Switching Current | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Shunt Capacitor Bank or Cable | Shunt Capacitor Bank or Cable | | | |
| | | | | Back-to-Back | | | |
| | | | Isolated Current A, rms | Overhead Line Current A, rms | Isolated Current A, rms | Inrush Current | |
| | | | | | | Peak Current kA | Frequency Hz |
| 15.5 | 12.5 | 600, 1,200 | 250 | 100 | 400 | 20 | 4,240 |
| 15.5 | 20.2 | 1,200, 2,000 | 250 | 100 | 400 | 20 | 4,240 |
| 15.5 | 25.0 | 1,200, 2,000 | 250 | 100 | 400 | 20 | 4,240 |
| 15.5 | 40.0 | 1,200, 2,000, 3,000 | 250 | 100 | 400 | 20 | 4,240 |
| 25.8 | 12.5 | 1,200, 2,000 | 160 | 100 | 400 | 20 | 4,240 |
| 25.8 | 25.0 | 1,200, 2,000 | 160 | 100 | 400 | 20 | 4,240 |
| 38.0 | 16.0 | 1,200, 2,000 | 100 | 100 | 250 | 20 | 4,240 |
| 38.0 | 20.0 | 1,200, 2,000 | 100 | 100 | 250 | 20 | 4,240 |
| 38.0 | 25.0 | 1,200, 2,000 | 100 | 100 | 250 | 20 | 4,240 |
| 38.0 | 31.5 | 1,200, 2,000 | 100 | 100 | 250 | 20 | 4,240 |
| 38.0 | 40.0 | 1,200, 2,000, 3,000 | 100 | 100 | 250 | 20 | 4,240 |
| 48.3 | 20.0 | 1,200, 2,000 | 10 | 100 | 250 | 20 | 6,800 |
| 48.3 | 31.5 | 1,200, 2,000 | 10 | 100 | 250 | 20 | 6,800 |
| 48.3 | 40.0 | 1,200, 2,000, 3,000 | 10 | 100 | 250 | 20 | 6,800 |
| 72.5 | 20.0 | 1,200, 2,000 | 20 | 100 | 630 | 25 | 3,360 |
| 72.5 | 31.5 | 1,200, 2,000 | 20 | 100 | 630 | 25 | 3,360 |
| 72.5 | 40.0 | 1,200, 2,000, 3,000 | 20 | 100 | 630 | 25 | 3,360 |

جدول ۲۵-٦: مقادیر نامی مدارشکن‌های **outdoor** (بالاتر از ۱۲۱ کیلوولت) و پست‌های گازی (خازنی)

| | | | General Purpose Circuit Breakers Rated Capacitance Switching Current | | Definite Purpose Circuit Breakers Rated Capacitance Switching Current | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | Shunt Capacitor Bank or Cable | | |
| | | | | | | | Back-to-Back | | |
| | | | Shunt Capacitor Bank or Cable | | | | | Inrush Current | |
| Rated Maximum Voltage kV, rms | Rated Short Circuit Current kA, rms | Rated Continuous Current A, rms | Overhead Line Current A, rms | Isolated Current A, rms | Overhead Line Current A, rms | Isolated Current A, rms | Isolated Current A, rms | Peak Current kA | Frequency Hz |
| 121 | 20 | 1,200 | 50 | 50 | 160 | 315 | 315 | 16 | 4,250 |
| 121 | 40 | 1,600, 2,000, 3,000 | 50 | 50 | 160 | 315 | 315 | 16 | 4,250 |
| 121 | 63 | 2,000, 3,000 | 50 | 50 | 160 | 315 | 315 | 16 | 4,250 |
| 145 | 20 | 1,200, 2,000 | 63 | 63 | 160 | 315 | 315 | 16 | 4,250 |
| 145 | 40 | 1,600, 2,000, 3,000 | 80 | 80 | 160 | 315 | 315 | 16 | 4,250 |
| 145 | 63 | 2,000, 3,000 | 80 | 80 | 160 | 315 | 315 | 16 | 4,250 |
| 145 | 80 | 2,000, 3,000 | 80 | 80 | 160 | 315 | 315 | 16 | 4,250 |
| 169 | 16 | 1,200 | 100 | 100 | 160 | 400 | 400 | 20 | 4,250 |
| 169 | 31.5 | 1,600 | 100 | 100 | 160 | 400 | 400 | 20 | 4,250 |
| 169 | 40 | 2,000 | 100 | 100 | 160 | 400 | 400 | 20 | 4,250 |
| 169 | 50 | 2,000 | 100 | 100 | 160 | 400 | 400 | 20 | 4,250 |
| 169 | 63 | 2,000 | 100 | 100 | 160 | 400 | 400 | 20 | 4,250 |
| 242 | 31.5 | 1,600, 2,000, 3,000 | 160 | 160 | 200 | 400 | 400 | 20 | 4,250 |
| 242 | 40 | 2,000, 3,000 | 160 | 160 | 200 | 400 | 400 | 20 | 4,250 |
| 242 | 50 | 2,000 | 160 | 160 | 200 | 400 | 400 | 20 | 4,250 |
| 242 | 63 | 2,000, 3,000 | 160 | 160 | 200 | 400 | 400 | 20 | 4,250 |
| 362 | 40 | 2,000, 3,000 | 250 | 250 | 315 | 500 | 500 | 25 | 4,250 |
| 362 | 63 | 2,000 | 250 | 250 | 315 | 500 | 500 | 25 | 4,250 |
| 550 | 40 | 2,000, 3,000 | 400 | 400 | 500 | 500 | 500 | | |
| 550 | 63 | 3,000 | 400 | 400 | 500 | 500 | 500 | | |
| 800 | 40 | 2,000, 3,000 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | | |
| 800 | 63 | 3,000 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | | |

## ۲۵-۴- مشخصهٔ برق‌گیرها

برق‌گیرها برای محافظت از تجهیزات شبکه در برابر اضافه‌ولتاژهای ناشی از کلیدزنی و صاعقه به کار می‌روند. قبل از دههٔ ۸۰، از برق‌گیرهای فاصلهٔ هوایی کربید سیلیکونی استفاده می‌شد. وَریستورهای اکسید فلزی (MOV) در دههٔ ۸۰ معرفی شدند. در حال حاضر از MOV برای حفاظت خطوط هوایی، کابل‌های زیر زمینی، ترانس‌ها، مدارشکن‌ها، خازن‌های شانت، و دیگر تجهیزات استفاده می‌شود. جداول زیر از استاندارد IEEE 141 استخراج شده‌اند. در اینجا MCOV مقدار ماکزیمم اضافه‌ولتاژ به صورت دائمی، FOW سطح حفاظتی در برابر پیشانی موج، و SSP ماکزیمم سطح حفاظت در برابر ضربه ناشی از کلیدزنی است.

**جدول ۲۵-۷: مشخصهٔ برق‌گیرهای MOV کلاس پست**

| Peak SSP (kV) | پیک ولتاژ تخلیه (کیلوولت) در جریان‌های مختلف موج 8/20µs | | | | | | Peak FOW (kV) | rms MCOV (kV) | کیلوولت (rms) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 40kA | 20kA | 10kA | 5kA | 3kA | 1.5kA | | | |
| 6.3 | 10.3 | 9 | 8 | 7.5 | 7.2 | 6.9 | 9.1 | 2.55 | 3 |
| 12.4 | 20.3 | 17.7 | 15.8 | 14.8 | 14.2 | 13.6 | 17.9 | 5.1 | 6 |
| 18.4 | 30.2 | 26.4 | 23.5 | 22 | 21.2 | 20.2 | 26.6 | 7.65 | 9 |
| 20.3 | 33.3 | 29.1 | 25.9 | 24.2 | 23.3 | 22.2 | 29.3 | 8.4 | 10 |
| 24.6 | 40.4 | 35.2 | 31.4 | 29.4 | 28.2 | 26.9 | 35.5 | 10.2 | 12 |
| 30.6 | 50.3 | 43.9 | 39.1 | 36.6 | 35.1 | 33.5 | 44.2 | 12.7 | 15 |
| 36.8 | 60.6 | 52.8 | 47.1 | 44.1 | 42.3 | 40.4 | 53.3 | 15.3 | 18 |
| 40.9 | 67.2 | 58.7 | 52.3 | 48.9 | 46.9 | 44.8 | 59.1 | 17 | 21 |
| 46.9 | 77.1 | 67.3 | 60 | 56.1 | 53.8 | 51.4 | 67.8 | 19.5 | 24 |
| 52.9 | 87 | 75.9 | 67.7 | 63.3 | 60.8 | 58 | 76.5 | 22 | 27 |
| 58.7 | 96.5 | 84.2 | 75.1 | 70.3 | 67.4 | 64.3 | 84.9 | 24.4 | 30 |
| 69.7 | 115 | 100 | 8.2 | 83.4 | 80 | 76.4 | 101 | 29 | 36 |
| 75.8 | 125 | 109 | 96.9 | 90.6 | 86.9 | 83 | 110 | 31.5 | 39 |
| 88.3 | 146 | 127 | 113 | 106 | 102 | 96.8 | 128 | 36.5 | 45 |
| 93.8 | 155 | 135 | 120 | 113 | 108 | 103 | 136 | 39 | 48 |
| 98 | 151 | 136 | 122 | 115 | 112 | 105 | 135 | 42 | 54 |
| 110 | 173 | 155 | 139 | 131 | 127 | 120 | 154 | 48 | 60 |
| 131 | 205 | 184 | 165 | 156 | 151 | 142 | 183 | 57 | 72 |
| 161 | 241 | 226 | 202 | 190 | 184 | 174 | 223 | 70 | 90 |
| 175 | 274 | 245 | 220 | 208 | 201 | 190 | 242 | 74 | 96 |
| 193 | 301 | 271 | 243 | 229 | 221 | 209 | 267 | 76 | 108 |
| 202 | 316 | 284 | 254 | 239 | 232 | 219 | 279 | 84 | 108 |
| 231 | 351 | 315 | 283 | 266 | 257 | 244 | 311 | 98 | 120 |
| 249 | 381 | 342 | 306 | 289 | 280 | 264 | 340 | 106 | 132 |
| 271 | 413 | 369 | 332 | 314 | 303 | 287 | 368 | 115 | 144 |
| 308 | 470 | 412 | 379.4 | 357 | 345 | 326 | 418 | 131 | 168 |
| 330 | 502 | 448 | 404 | 381 | 368 | 348 | 446 | 140 | 172 |
| 339 | 417 | 463 | 417 | 392 | 380 | 359 | 458 | 144 | 180 |
| 360 | 546 | 488 | 440 | 414 | 401 | 379 | 483 | 152 | 192 |
| 424 | 645 | 578 | 520 | 489 | 474 | 447 | 571 | 182 | 228 |

**جدول ۲۵-۸: مشخصهٔ برق‌گیرهای MOV کلاس میانی**

| Peak SSP (kV) | پیک ولتاژ تخلیه (کیلوولت) در جریان‌های مختلف موج 8/20µs | | | | | | Peak FOW (kV) | rms MCOV (kV) | کیلوولت (rms) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 40kA | 20kA | 10kA | 5kA | 3kA | 1.5kA | | | |
| 5.9 | 10.8 | 9.3 | 8 | 7.5 | 7.2 | 6.6 | 10.4 | 2.55 | 3 |
| 11.7 | 21.2 | 18.2 | 16.2 | 14.8 | 14.2 | 13.1 | 18.9 | 5.1 | 6 |
| 20 | 38 | 31.5 | 26 | 23.5 | 23.5 | 22 | 30.5 | 7.65 | 9 |
| 22.5 | 42 | 35 | 29 | 28 | 28 | 24.5 | 33.5 | 8.4 | 10 |
| 27.5 | 51 | 42.5 | 35.5 | 31.5 | 31.5 | 30 | 41 | 10.2 | 12 |
| 34 | 61.5 | 52.5 | 44 | 39.5 | 39.5 | 37 | 61 | 12.7 | 15 |
| 40.5 | 77 | 63 | 52 | 48 | 48 | 44.5 | 61 | 15.3 | 18 |
| 45.5 | 95.5 | 70.5 | 59 | 53.5 | 53.5 | 49.5 | 68.5 | 17 | 21 |
| 52 | 98 | 81 | 67 | 60 | 60 | 57 | 78 | 19.5 | 24 |
| 58.5 | 110 | 91 | 76 | 68.5 | 68.5 | 64 | 88 | 22 | 27 |
| 66 | 122 | 101 | 84.5 | 76 | 76 | 71 | 97.5 | 24.4 | 30 |
| 78 | 145 | 121 | 101 | 91 | 91 | 84 | 116 | 29 | 36 |
| 84 | 158 | 131 | 109 | 98 | 98 | 91.5 | 126 | 31.5 | 39 |
| 97 | 183 | 152 | 126 | 114 | 114 | 106 | 146 | 36.5 | 45 |
| 104 | 195 | 163 | 135 | 122 | 122 | 113 | 156 | 39 | 48 |
| 112.5 | 210 | 174 | 145 | 130 | 130 | 122 | 168 | 42 | 54 |
| 127 | 239 | 198 | 165 | 149 | 149 | 13 | 191 | 48 | 60 |
| 151 | 284 | 236 | 196 | 177 | 177 | 165 | 227 | 57 | 72 |
| 186 | 351 | 290 | 242 | 218 | 218 | 203 | 280 | 70 | 90 |
| 196 | 370 | 306 | 255 | 230 | 230 | 214 | 294 | 70 | 90 |
| 223 | 420 | 348 | 290 | 261 | 261 | 244 | 335 | 76 | 108 |
| 233 | 439 | 364 | 303 | 273 | 273 | 254 | 350 | 84 | 108 |
| 260 | 490 | 406 | 336 | 321 | 304 | 284 | 390 | 98 | 120 |

**جدول ۲۵-۹: مشخصهٔ برق‌گیرهای MOV کلاس توزیع (برای کار عادی)**

| Peak SSP (kV) | پیک ولتاژ تخلیه (کیلوولت) در جریان‌های مختلف موج 8/20µs | | | | | | Peak FOW (kV) | rms MCOV (kV) | کیلوولت (rms) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 40kA | 20kA | 10kA | 5kA | 3kA | 1.5kA | | | |
| 8.5 | 18.5 | 14.3 | 12.3 | 11 | 10.3 | 9.8 | 12.5 | 2.55 | 3 |
| 17 | 37 | 28.5 | 24.5 | 22 | 20.5 | 19.5 | 25 | 5.1 | 6 |
| 23 | 50.5 | 39 | 33 | 30 | 28 | 26 | 33.5 | 7.65 | 9 |
| 24 | 53 | 41.5 | 36 | 31.5 | 29.5 | 27 | 36 | 8.4 | 10 |
| 34 | 74 | 57 | 49 | 44 | 41 | 39 | 50 | 10.2 | 12 |
| 40 | 87.5 | 67.5 | 57.5 | 52 | 48.5 | 45.5 | 58.5 | 12.7 | 15 |
| 46 | 101 | 76 | 66 | 60 | 56 | 52 | 67 | 15.3 | 18 |
| 49 | 107 | 84 | 73 | 64 | 60 | 55 | 73 | 17 | 21 |
| 63 | 138 | 106.5 | 90.5 | 82 | 76.5 | 71.5 | 92 | 19.5 | 24 |
| 69 | 151.5 | 117 | 99 | 90 | 84 | 78 | 100.5 | 22 | 27 |
| 72 | 159 | 124.5 | 108 | 94.5 | 88.5 | 81 | 108 | 24.4 | 30 |

**جدول ۲۵-۱۰: مشخصهٔ برق‌گیرهای MOV کلاس توزیع (برای کار سنگین)**

| Peak SSP (kV) | پیک ولتاژ تخلیه (کیلوولت) در جریان‌های مختلف موج 8/20µs | | | | | | Peak FOW (kV) | rms MCOV (kV) | کیلوولت (rms) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 40kA | 20kA | 10kA | 5kA | 3kA | 1.5kA | | | |
| 8 | 15.3 | 13 | 11 | 10.8 | 10 | 9.5 | 12.5 | 2.55 | 3 |
| 16 | 30.5 | 26 | 22 | 21 | 20 | 19 | 25 | 5.1 | 6 |
| 22.5 | 41 | 35 | 30 | 27.5 | 26 | 24.5 | 34 | 7.65 | 9 |
| 23.5 | 43.5 | 37.5 | 32 | 29.5 | 28 | 26 | 36.5 | 8.4 | 10 |
| 32 | 61 | 52 | 44 | 42 | 40 | 38 | 50 | 10.2 | 12 |
| 38.5 | 71.5 | 61 | 52 | 48.5 | 46 | 43.5 | 59 | 12.7 | 15 |
| 45 | 82 | 70 | 60 | 55 | 52 | 49 | 68 | 15.3 | 18 |
| 48 | 88.5 | 76 | 65 | 60 | 57 | 53 | 75 | 17 | 21 |
| 61 | 112.5 | 96 | 82 | 76 | 72 | 68 | 93 | 19.5 | 24 |
| 67.5 | 123 | 105 | 90 | 82.5 | 78 | 73.5 | 102 | 22 | 27 |
| 70.5 | 130.5 | 112.5 | 96 | 88.5 | 84 | 78 | 109.5 | 24.4 | 30 |
| 90 | 164 | 140 | 120 | 110 | 104 | 98 | 136 | 29 | 36 |

**جدول ۲۵-۱۱: مشخصهٔ برق‌گیرهای MOV کلاس توزیع (روی تیر)**

| Peak SSP (kV) | پیک ولتاژ تخلیه (کیلوولت) در جریان‌های مختلف موج 8/20µs | | | | | | Peak FOW (kV) | rms MCOV (kV) | کیلوولت (rms) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 40kA | 20kA | 10kA | 5kA | 3kA | 1.5kA | | | |
| - | - | - | - | - | - | - | - | 2.55 | 3 |
| 11.7 | 21.1 | 18.1 | 16.2 | 14.7 | 14 | 13 | 17.4 | 5.1 | 6 |
| 17.5 | 31.6 | 27 | 24 | 21.9 | 21 | 19.3 | 25.7 | 7.65 | 9 |
| 19.2 | 34.8 | 29.8 | 26.5 | 24 | 23 | 21.2 | 28.5 | 8.4 | 10 |
| 23.3 | 42.2 | 36.2 | 32.3 | 29.4 | 28 | 25.9 | 34.8 | 10.2 | 12 |
| 29.1 | 52.7 | 46.1 | 40.2 | 36.6 | 36 | 32.3 | 43.1 | 12.7 | 15 |
| 34.9 | 63.2 | 54 | 48 | 43.8 | 41.9 | 38.6 | 51.4 | 15.3 | 18 |
| 38.7 | 70.5 | 60.2 | 53.6 | 48.6 | 46.4 | 42.8 | 57.6 | 17 | 21 |
| 46.6 | 84.3 | 72.1 | 64.2 | 58.5 | 55.9 | 51.6 | 68.6 | 19.5 | 24 |
| 52.4 | 94.8 | 81 | 72 | 65.7 | 62.9 | 57.9 | 77.1 | 22 | 27 |
| 57.6 | 104.4 | 89.4 | 79.5 | 72 | 69 | 63.5 | 88.5 | 24.4 | 30 |
| 69.8 | 126.4 | 108.8 | 96 | 87.6 | 83.8 | 77.2 | 102.8 | 29 | 36 |

## ۲۵-۵- مشخصهٔ فیوزها

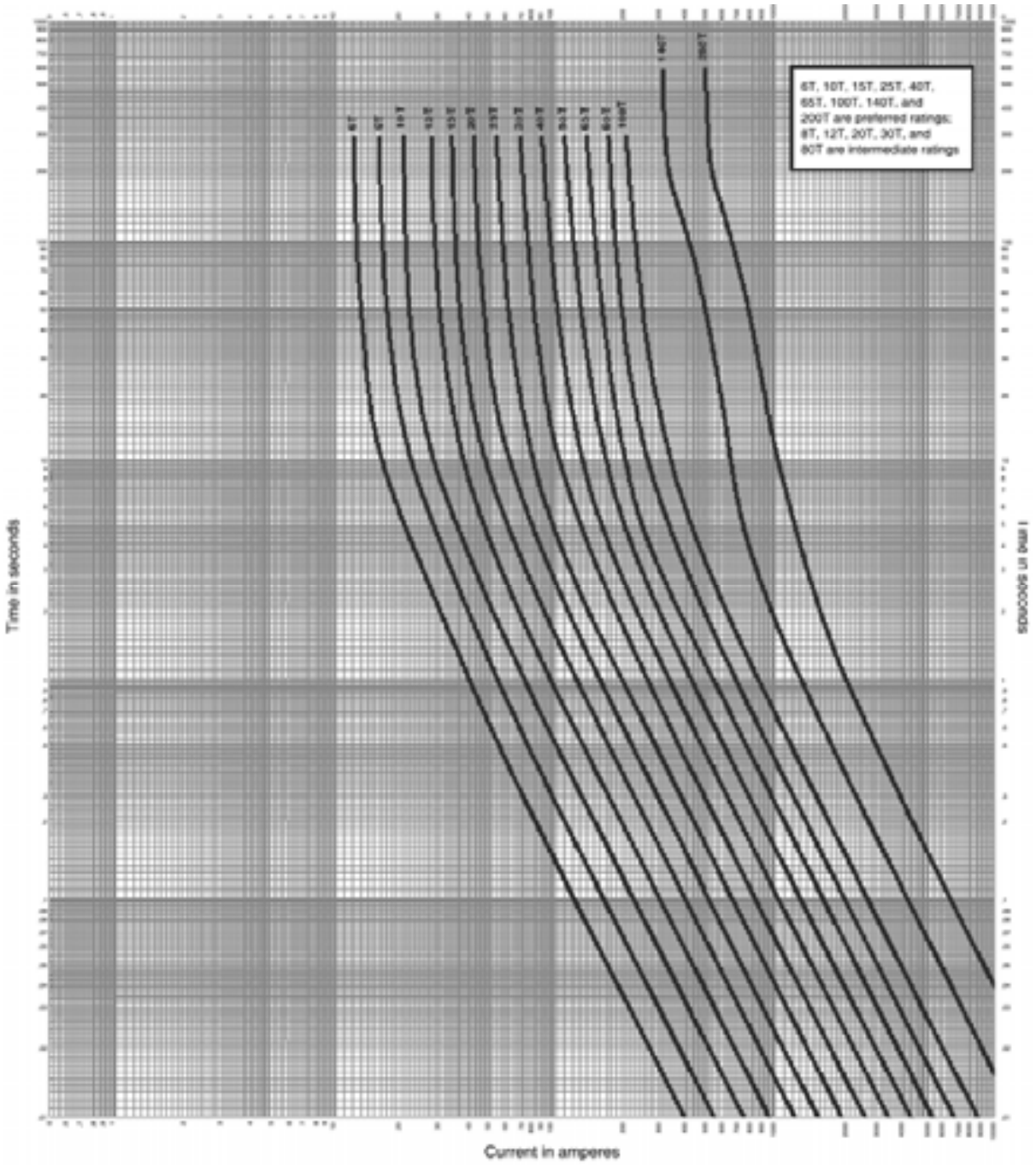
### ۲۵-۵-۱- فیوزهای انفجاری

دو نوع فیوز انفجاری برای حفاظت از بانک خازنی وجود دارد:

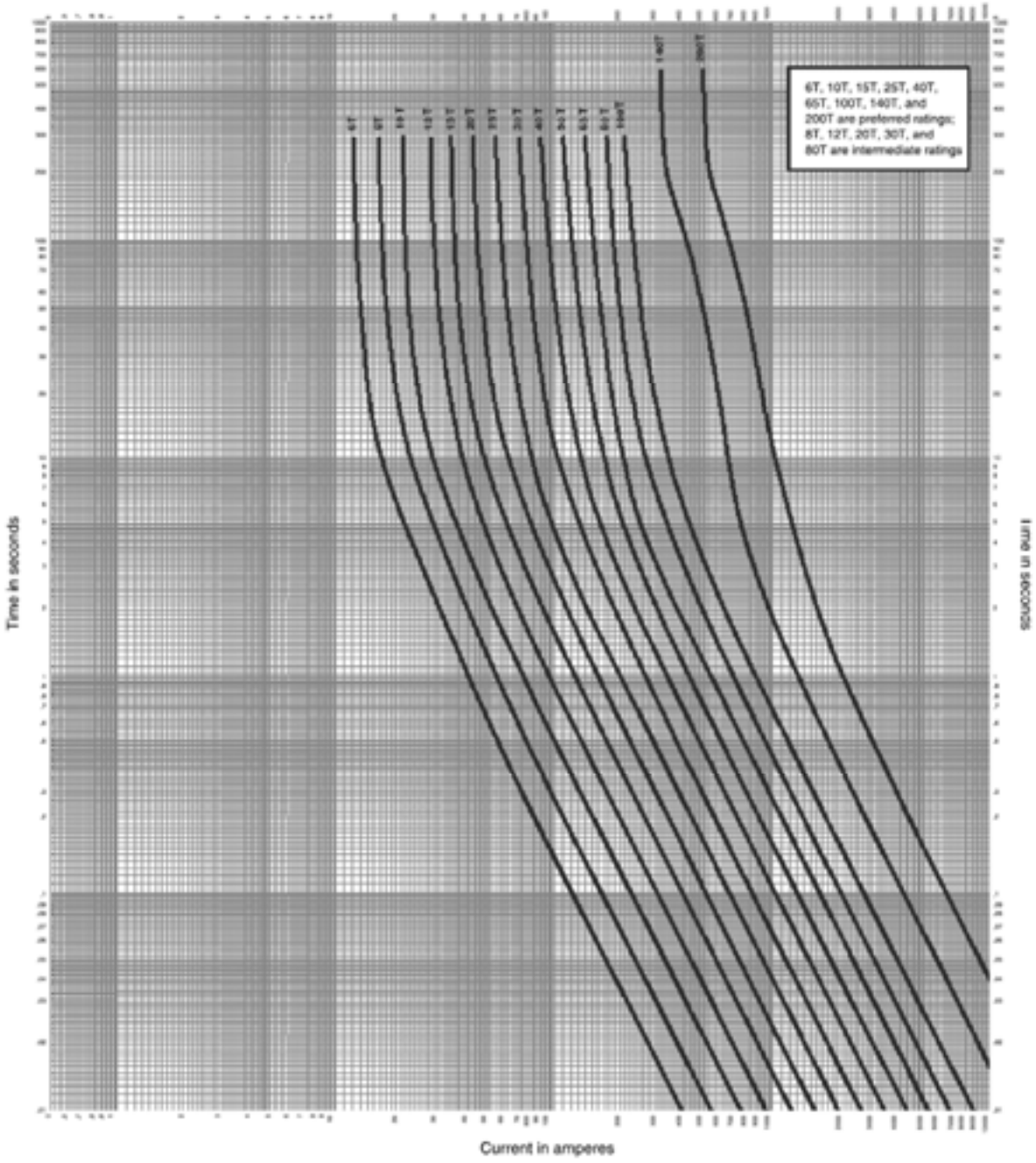
- سری K (فیوزهای تند)
- سری T (فیوزهای کُند)

اطلاعات فیوزهای انفجاری مانند کات‌اوت، ولتاژ، جریان، و روش‌های آزمایش آنها در استاندارد ANSI C37.42 آمده است. مشخصهٔ جریان-زمان ذوب این فیوزها در تصاویر و جداول زیر آمده است:

- تصویر ۲۵-۱، مشخصهٔ جریان-زمان ذوب فیوزهای سری K
- تصویر ۲۵-۲، مشخصهٔ جریان-زمان ذوب فیوزهای سری T
- جدول ۲۵-۱۲، جریان ذوب فیوزلینک‌های نوع K (سریع)
- جدول ۲۵-۱۳، جریان ذوب فیوزلینک‌های نوع T (کُند)




تصویر ۲۵-۱: مشخصهٔ زمان ذوب و جریان فیوزهای نوع K




**تصویر ۲۵-۲: مشخصهٔ زمان ذوب و جریان فیوزهای نوع T**

**جدول ۲۵-۱۲: جریان ذوب فیوزهای نوع K (سریع)**

| جریان نامی (آمپر) | جریان ذوب ۳۰۰ یا ۶۰۰ ثانیه (آمپر) | | جریان ذوب ۱۰ ثانیه (آمپر) | | جریان ذوب ۰/۱ ثانیه (آمپر) | | نسبت سرعت[1] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | مینیمم | ماکزیمم | مینیمم | ماکزیمم | مینیمم | ماکزیمم | |
| مقادیر رایج | | | | | | | |
| 6 | 12 | 14.4 | 13.5 | 20.5 | 72 | 86 | 6 |
| 10 | 19.5 | 23.4 | 22.5 | 34 | 128 | 154 | 6.6 |
| 15 | 31 | 37.2 | 37 | 55 | 215 | 258 | 6.9 |
| 25 | 50 | 60 | 60 | 90 | 360 | 420 | 7 |
| 40 | 80 | 96 | 98 | 148 | 565 | 680 | 7.1 |
| 65 | 128 | 153 | 159 | 237 | 918 | 1100 | 7.2 |
| 140 | 200 | 240 | 258 | 388 | 1520 | 1820 | 7.6 |
| 200 | 310 | 372 | 430 | 650 | 2470 | 2970 | 8 |
| | 480 | 576 | 760 | 1150 | 3880 | 4650 | 8.1 |
| مقادیر متوسط | | | | | | | |
| 8 | 15 | 18 | 18 | 27 | 97 | 116 | 6.5 |
| 12 | 25 | 30 | 29.5 | 44 | 166 | 199 | 6.6 |
| 20 | 39 | 47 | 48 | 71 | 273 | 328 | 7 |
| 30 | 63 | 76 | 77.5 | 115 | 447 | 546 | 7.1 |
| 50 | 101 | 121 | 126 | 188 | 719 | 862 | 7.1 |
| 80 | 160 | 192 | 205 | 307 | 1180 | 1420 | 7.4 |
| کوچک‌تر از ۶ آمپر | | | | | | | |
| 1 | 2 | 2.4 | 1 | 10 | 1 | 58 | - |
| 2 | 4 | 4.8 | 1 | 10 | 1 | 58 | - |
| 3 | 6 | 7.2 | 1 | 10 | 1 | 58 | - |

[1] speed ratio

**جدول ۲۵-۱۳: جریان ذوب فیوزهای نوع T (کُند)**

| جریان نامی (آمپر) | جریان ذوب ۳۰۰ یا ٦۰۰ ثانیه (آمپر) | | جریان ذوب ۱۰ ثانیه (آمپر) | | جریان ذوب ۰/۱ ثانیه (آمپر) | | نسبت سرعت |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | مینیمم | ماکزیمم | مینیمم | ماکزیمم | مینیمم | ماکزیمم | |
| مقادیر رایج | | | | | | | |
| 6 | 12 | 14.4 | 15.3 | 23 | 120 | 144 | 10 |
| 10 | 19.5 | 23.4 | 23.4 | 40 | 224 | 269 | 11.5 |
| 15 | 31 | 37.2 | 37.2 | 67 | 388 | 466 | 12.5 |
| 25 | 50 | 60 | 60 | 109 | 635 | 762 | 12.7 |
| 40 | 80 | 96 | 96 | 178 | 1040 | 1240 | 13 |
| 65 | 128 | 153 | 153 | 291 | 1650 | 1975 | 12.9 |
| 140 | 200 | 240 | 240 | 475 | 2620 | 3150 | 12.1 |
| 200 | 310 | 372 | 372 | 775 | 4000 | 4800 | 12.9 |
| | 480 | 576 | 576 | 1275 | 6250 | 7470 | 13 |
| مقادیر متوسط | | | | | | | |
| 8 | 15 | 18 | 20.5 | 31 | 166 | 199 | 11.1 |
| 12 | 25 | 30 | 34.5 | 52 | 296 | 355 | 11.8 |
| 20 | 39 | 47 | 57 | 85 | 496 | 595 | 12.7 |
| 30 | 63 | 76 | 93 | 138 | 812 | 975 | 12.9 |
| 50 | 101 | 121 | 152 | 226 | 1310 | 1570 | 13 |
| 80 | 160 | 192 | 248 | 370 | 2080 | 2500 | 13 |
| کوچک‌تر از ٦ آمپر | | | | | | | |
| 1 | 2 | 2.4 | 1 | 11 | 1 | 100 | - |
| 2 | 4 | 4.8 | 1 | 11 | 1 | 100 | - |
| 3 | 6 | 7.2 | 1 | 11 | 1 | 100 | - |