طراحی بانکهای خازنی در شبکه های دارای هارمونیک

جبران سازی توان راکتیو یکی از ابزار بهینه سازی هزینه انرژی و برگشت سریع سرمایه است. در طول چند سال گذشته با بهره گیری از مواد جدید و روشهای تولید پیشرفته، خازنهایی با تلفات بسیار اندک در حجم های کوچک ساخته شده است. با توسعه وتولید کنتاکتورهای خازنی و رگولاتورهای میکروپرسسوری بسیار پیشرفته که تضمین کننده رفتار مناسب وبهینه بانک خازنی به تغییرات بار است، بانکهای خازنی کاملا قابل اعتمادگردیده اند.

با این وجود دلایل بسیاری بر لزوم آشنایی مشاوران و مصرف کنندگان باجنبه های پیچیده این موضوع وجود دارد.

به دلیل افزایش اعوجاجهای هارمونیکی درشبکه های فشار ضعیف و متوسط ، طراحی بانکهای خازنی بسیار مشکل و پیچیده شده اند. یکسو سازها، کنترلرهای الکترونیکی موتورها، مبدلهای فرکانس و دیگر بارهای الکترونیکی برای جبران توان راکتیو مصرفی، نیاز به خازن دارند و در عین حال این مصرف کنندگان مولد هارمونیک هستند. در صورت نزدیک بودن فرکانس رزونانس مجموعه ترانس و خازن به فرکانس هارمونیکها، امکان وقوع خطر بسیار محتمل است.

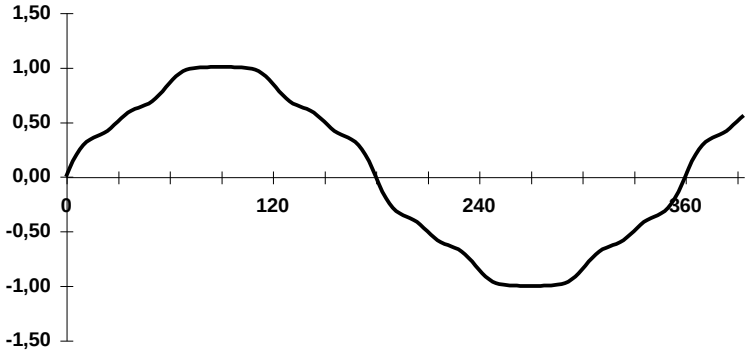
بنابراین به منظور اجتناب از مسایل و هزینه های بعدی قویا پیشنهاد میگردد تا افراد با تجربه برای دستیابی به طرحی مناسب مورد مشاوره قرارگیرند.

هارمونیک چیست؟

در شبکه های فشار ضعیف کنونی شاهد رشد روز افزون مصرف کنندگانی هستیم که جریان غیر سینوسی از شبکه می کشند. عبور این جریان غیر سینوسی از امپدانس شبکه افت ولتاژی را ایجاد می نماید که باعث اعوجاج ولتاژ سینوسی شبکه می شود. این اعوجاجها را می توان به سری فوریه بسط داد، تمامی موجها (جمله های سری فوریه) با فرکانسی برابر مضرب صحیحی از فرکانس پایه (فرکانس شبکه) هارمونیک نامیده می شود.

بارهای خطی	بارهای غیر خطی(مولدین هارمونیک)
مقاومت های اهمی (گرمایش مقاومتی، لامپ های رشته ای)	ترانسفورماتورها و چک ها
موتورهای سه فاز AC	مبدلهای ایستا به ویژه موتورهای القایی با دور متغیر
خازنها	منابع تغذیه بدون قطعی (UPS)
	منابع تغذیه تلویزیون، کامپیوتر و لامپهای کم مصرف

مثالی از ولتاژخط تخریب شده توسط هارمونیک



۵٪ دامنه هارمونیک پنجم

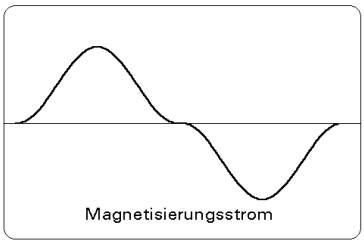
۴٪ دامنه هارمونیک هفتم

۲.۵٪ دامنه هارمونیک یازدهم

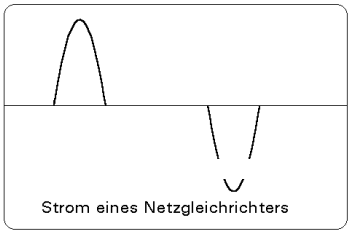
بارهای صنعتی، تنها مولدین هارمونیک نیستند بلکه مصارف خانگی نیز اثر قابل توجهی دارند. معمولا بارهـای غیـر خطی مولد هارمونیکهای فرد هستند ودر شبکه غالبا با هارمونیکهای مرتبه سوم، پنجم، هفتم، یـازدهم و سـیزدهم مواجه هستیم.

هارمونیکها کجا به وجود می آیند؟

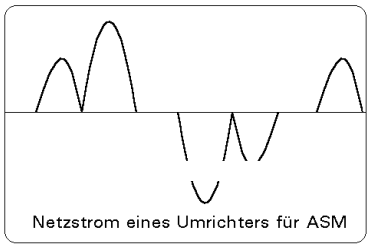
⇐در شبکه فشار ضعیف صنعتی، بویژه هنگامیکه تغییر دهنده های سرعت موتورهای القایی نصب شده باشند.
⇐در تمامی ساختمانهای مسکونی وتجاری : تمامی تلویزیونها ، کامپیوترها، لامپ های کم مصرف مولد هارمونیـک هستند.



جریان مغناطیسی کننده ترانس



یکسوساز تکفاز



درایو موتورالقایی سه فاز

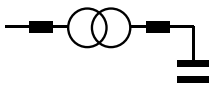
هارمونیکها تا قبل از نصب خازن

دامنه و تنوع هارمونیکها بستگی به تعدد بارهای غیر خطی نصب شده در شبکه دارد. به عنوان مثال:
اگر مبدل ۶ پالسه تریستوری با قدرت ۵۰٪ قدرت ترانس در شبکه ای نصب شده باشد هارمونیک پـنجم بـا دامنـه ۴٪ و هارمونیک هفتم با دامنه ۳٪ در شبکه وجود خواهد داشت.

اگر تعداد زیادی مبدل تریستوری در شبکه نصب شوند به دلیل اختلاف فاز جریانهای آنها، اثر هارمونیکهای مبدل کمتر میشود.
به عنوان مثال اگر مبدل تریستوری با توان کلی ۲۵٪ توان نامی ترانس در شبکه نصب شوند هارمونیکها تقریبا بصورت زیرند:
هارمونیک پنجم با دامنه ۱٪ الی ۱/۵٪ دامنه موج اصلی
هارمونیک هفتم با دامنه ۰/۷٪ الی ۱٪ دامنه موج اصلی

اثر بانک خازنی بر دامنه هارمونیکها

یک بانک خازنی بدون فیلتر همراه با اندوکتانسهای شبکه تشکیل مدار رزونانسی می دهد. و در صورت حضور هارمونیک با فرکانس نزدیک به فرکانس رزونانس، اضافه ولتاژ و جریانهای رزونانسی رخ می دهد.
یک روش سر انگشتی برای محاسبه فرکانس رزونانس به شرح زیر است:



$$f = 50 \cdot \sqrt{\frac{S_k}{Q_c}}$$

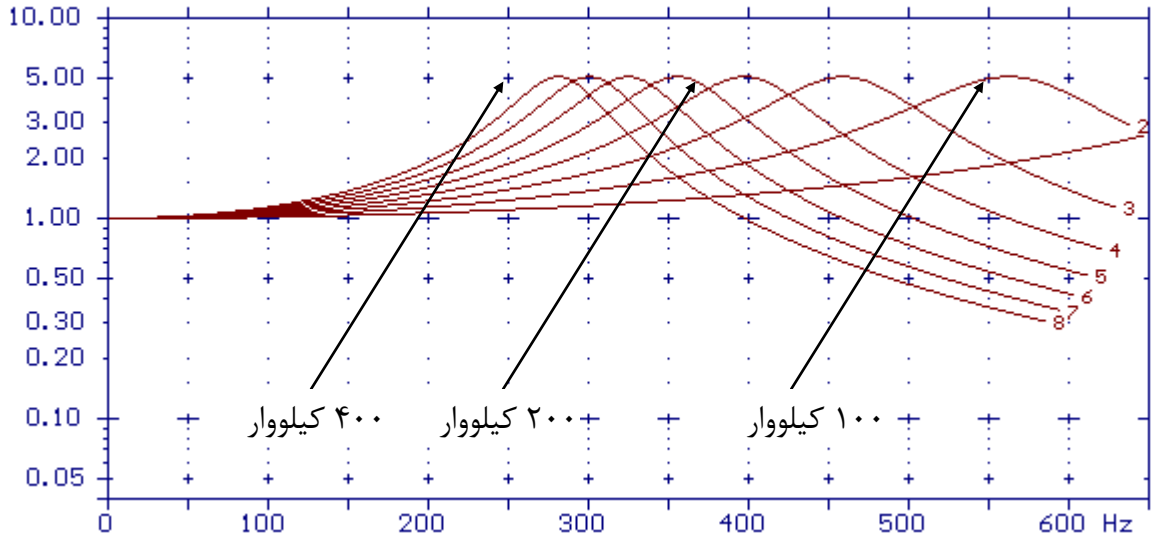
S_k = قدرت اتصال کوتاه شبکه
Q_c = ظرفیت بانک خازنی

قدرت اتصال کوتاه شبکه S_k:
- توسط مشخصات ترانسفورماتور مشخص می گردد.
- حدود ۱۰٪ بدلیل امپدانس شبکه فشار متوسط کاهش می یابد.
- بر حسب فاصله بین ترانس و خازن تغیر می کند: هر قدر فاصله بیشتر باشد قدرت اتصال کوتاه کمتر است
- برای اکثر کاربردها میتوان از فرمول تقریبی زیر استفاده کرد:

$$S_k \approx 0.9 \times \frac{S_n}{Q_c}$$

S_n = قدرت طبیعی ترانس
U_k = ولتاژ اتصال کوتاه ترانس
S_k = قدرت اتصال کوتاه شبکه

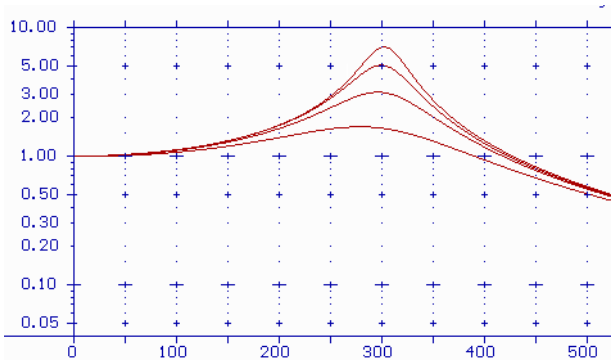
مثال:
در شبکه ای ۱۰۰۰ کیلوولت آمپر و امپدانس نسبی ترانس ۶٪ و قدرت نامی ترانس ۱۵ مگاولت آمپر و فرکانس ۵۰ هرتز است؛ در صورت نصب ۳۰۰ کیلووار خازن فرکانس رزونانس ۳۵۳ هرتز خواهد بود. هنگام قطع و وصل پله های بانک خازنی فرکانس رزونانس شبکه تغییر می کند و معمولا در اطراف فرکانس های هارمونیکها قرار می گیرد. در صورتیکه فرکانس رزونانس نزدیک به فرکانس یکی از هارمونیکها باشد، ولتاژ هارمونیکی بدلیل ماهیت شبکه رزونانسی، افزایش می یابند و حتی دامنه آنها ۵ برابر یا بیشتر می شود.در شکل زیر مشخصه رزونانس یک بانک ۴۰۰ کیلووار در شبکه فشار ضعیفی با ترانس ۱۰۰۰ کیلوولت آمپر به ازای ظرفیتهای متفاوت ترسیم شده است.



با استفاده از ضریب تقویت ولتاژ هارمونیکی برای یک بانک خازنی می توان احتمال وقـوع رزونـانس را پـیش بینـی کرد.

ولتاژ و جریان بانک خازنی بدون فیلتر

در شرایط رزونانس مقدار موثر ولتاژ شبکه بسیار نا چیزی تغییر می کند در حالیکه جریان موثر بانک خازنی شدیدا افزایش می یابد



بعنوان مثال:

حضور هارمونیک یازدهم با دامنه ۱۰٪ موج اصلی موجب:

- افزایش ولتاژ موثر به میزان ۰/۵٪
- افزایش پیک ولتاژ به میزان ۸٪ الی ۱۰٪
- جریان موثر خازن به میزان ۵۰٪ خواهد داشت.

توان تحمل اضافه جریانهای زیاد بصورت دائمی از وجوه بسیار با اهمیت، کیفیت یک خازن است

خازنهای فراکوه با مشخصات:

سطح ولتاژ قابل تحمل تا ۴۸۰ ولت،

تحمل بیش از ۲.۲ برابر جریان نامی،

تحمل پیک جریان تست در ۳۵۰ برابر جریان نامی و گارانتی در ۳۳۰ برابر جریان نامی

مناسب چنین شرایطی هستند

در صورت محتمل بودن وقوع رزونانس چه باید کرد؟

یکی از مهمترین جنبه های طراحی بانکهای خازنی در حضور هارمونیک، پاسخ به سوال فوق است.

بعنوان مثال موارد زیر در طراحی تعیین کننده هستند:

هیچ مولد هارمونیکی در سمت فشار ضعیف و هیچ هارمونیکی در ولتاژ طرف فشار متوسط وجود ندارد ولی فرکانس رزونانس کمتر از ۴۰۰ هرتز است.

در ولتاژ شبکه فشار متوسط هارمونیک وجود دارد و امکان کاهش فرکانس رزونانس شبکه به کمتر از ۴۰۰ هرتز در اثر تغییر ساختار شبکه وجود دارد.

آیا در آینده سیستم الکترونیک قدرت بزرگی در شبکه نصب خواهد گردید؟

تحلیل کننده شبکه FRAKO مدل EMA1100 به منظور حفاظت بانک خازنی در مقابل وقوع رزونانسهای نادر بکار میرود. این دستگاه مشخصات سه فاز شبکه را مونیتور می نماید و در صورت افزایش دامنه هارمونیکها بانک خازنی را قطع می نماید. با کاهش مجدد هارمونیکها مجددا بانک را به مدار می آورد. حداکثر مقادیر اندازه گیری شده در حافظه ذخیره شده و توسط سیستم سریال RS485 قابل دستیابی هستند.

در شبکه ها با بار سه فاز متعادل رگولاتورهای اصلاح ضریب قدرت FRAKO قابل استفاده هستند رگولاتورها جریان هارمونیکی بانک خازنی را محاسبه می نمایند و در صورتی که از حد تنظیم شده ای فراتر رود، بانک را قطع می نماید. با کاهش دامنه هارمونیکها مجددا به مدار وارد می گردد در شرایطی که وقوع رزونانس قویا امکان پذیر است باید بانک به فیلتر مجهزگردد.

طراحی بانک خازنی برای شبکه هارمونیکی

ترکیبی از اطلاعات زیر در طراحی بانک مفید واقع می گردند.

– اندازه گیری هارمونیکهای ولتاژ و جریان در طی چند روز بدون حضور هیچ گونه خازنی چه در سمت فشار ضعیف و چه سمت فشارقوی

- محاسبه تئوری فرکانس رزونانس

- حداکثر مقدار دامنه هارمونیک اندازه گیری شده، در ضریب تقویت بدست آمده از **تحلیل کننده شبکه** ضرب می گردد.

مثال: در یک شبکه فشار ضعیف، متوسط با ترانس ۱۰۰۰ کیلووات آمپر (به شکل صفحه ۴ مراجعه کنید) هنگامی که بانک خازنی کامل (۴۰۰ کیلووار) در مدار است هارمونیک پنجم سه برابر می شود و در ظرفیت ۲۵۰ کیلووار هارمونیک هفتم ۴ برابر می شود.

اگر هارمونیکهای زیر در شبکه فشار متوسط حضور داشته باشند:

٪۴	هارمونیک مرتبه ۳	(۱۵۰ هرتز)
٪۵	هارمونیک مرتبه ۵	(۲۵۰ هرتز)
٪۴	هارمونیک مرتبه ۷	(۳۵۰ هرتز)
٪۳	هارمونیک مرتبه ۱۱	(۵۵۰ هرتز)
٪۲/۱	هارمونیک مرتبه ۱۳	(۶۵۰ هرتز)

دراین مثال میپذیریم که دامنه ولتاژ هارمونیکی از میزان تعیین شده در استانداردها فراتر رود فقط در صورتیکه بدون جبران سازی:

- دامنه هارمونیک مرتبه ۵ بیش از ٪۲ یا
- دامنه هارمونیک مرتبه ۷ و بالاتر بیش از ٪۱ باشد

در چنین شرایطی قویا توصیه می گردد از بانک خازنی مجهز به سلف استفاده شود.

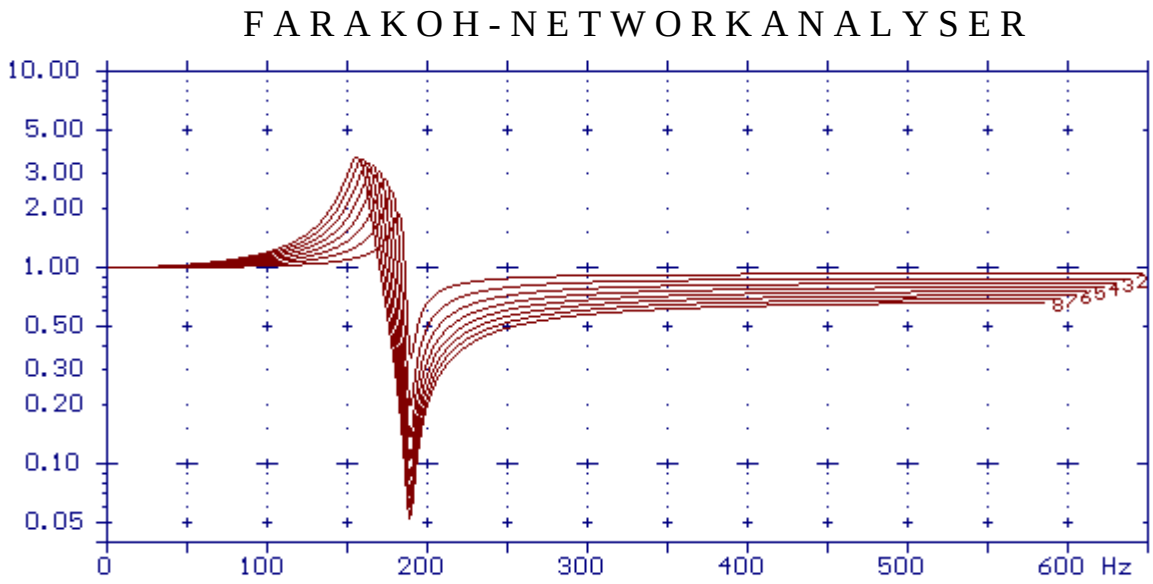
یک بانک خازنی با فیلتر چگونه کار می کند؟

فیلترهای هارمونیکی فرکانس رزونانس را کمتر از ۲۵۰ هرتز کاهش می دهند. تمامی هارمونیک ها با فرکانس کمتر از ۲۵۰ هرتز قابل صرف نظرکردن هستند.

بانک خازنی همراه با سلف، اتصال سری چوک فیلتر با خازن است فرکانس رزونانس این مجموعه باید کمتر از ۲۵۰ هرتز در نظرگرفته شود. چنین شرایطی برای فرکانسهای بیش از ۲۵۰ هرتز رفتار سلفی نشان می دهد.

بانک خازنی فیلتردار بخشی از هارمونیکها را جذب می نماید.

شکل زیر ضریب تقویت ولتاژ هارمونیکی دریک بانک خازنی مجهز به فیلتر را به ازای ظرفیت های (پله های) گوناگون نشان می دهد.



بانکهای مجهز به فیلتر براساس فرکانس رزونانس مدار فیلتر یابراساس در صد افت ولتاژ نسبی سلف P (نسبت افت ولتاژ بر روی سلف به افت ولتاژ روی خازن) مشخص می شوند. دو مقدار مذکور توسط رابطه زیر به یکدیگر مرتبط می شوند.

$$f_r = 50Hz \cdot \sqrt{\frac{1}{P}} \qquad P = 0.07(7\%) \qquad f_r = 189Hz$$

در فرکانس ۲۵۰ هرتز امپدانس مجموعه خازن و چوک برابر امپدانس خازن بدون فیلتر تقسیم بر ضریب X می باشد.

در فرکانس هارمونیک مرتبه ۵ بانک خازنی همراه با فیلتر هارمونیک دارای

مشخصه جذب است اگر $X > 1$

مشخصه جذب است اگر $X < 1$

$u_{250max} = 4\%$	$X = 2.4$	$f_r = 210Hz$	$p = 5.7\%$
$u_{250max} = 5\%$	$X = 1.33$	$f_r = 189Hz$	$p = 7\%$
$u_{250max} = 5\%$	$X = 1.0$	$f_r = 177Hz$	$p = 8\%$
$u_{250max} = 5\%$	$X = 0.44$	$f_r = 136Hz$	$p = 13.5\%$

مثال:

۴٪ هارمونیک مرتبه ۵ در ولتاژ شبکه حضور دارد. بانک خازنی هارمونیک مرتبه ۵ را بر حسب مشخصات جدول زیر جذب می نماید (I_n جریان نامی بانک خازنی است)

$p = 7\%$: $0.27 \times I_n = (4\% \times (250/50) \times 1.33)$

$p = 5.7\%$: $0.48 \times I_n$

$p = 13.5\%$: $0.08 \times I_n$

موارد زیر باید در انتخاب بانک خازنی مد نظر قرار گیرند:

- بانکهای خازنی مجهز به فیلتر نباید همراه با بانکهای خازنی بدون فیلتر در یک شبکه فشار ضعیف مشترک استفاده شوند.
- بانکهای خازنی مجهز به فیلتر با فرکانسهای رزونانس متفاوت را بصورت موازی می توان نصب کرد .در این شرایط احتمال تحت اضافه بار قرار گرفتن بانک با فرکانس رزونانس بالاتر وجود دارد.

در آینده نه چندان دور شبکه ایران بیش از پیش تحت تاثیر هارمونیک قرار می گیرد

در این راهنما تنها اطلاعاتی مختصر و کلی ارائه گردید ارائه کامل مطالب مربوط به این موضوع در یک راهنما امکان پذیر نیست.

بهترین نتیجه هنگامی بدست می آید که از افراد متخصص با تجربه طولانی در هر زمینه یاری گرفته شود.