طراحی فیلتر هارمونیک در سیستم های قدرت

نویسندگان:
علیرضا اندرزا
مازیار شهریاری

شرکت فراکوه

FARAKOH

طراحی فیلتر هارمونیک در سیستم های قدرت

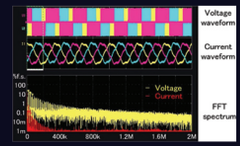
علیرضا اندرزا ، مازیار شهریاری

FARAKOH
شرکت فراکوه

Harmonic Filter Design in Power Systems

فهرست کتابها و مقالات منتشر شده دفتر فنی فراکوه :

۱. راهنمای اصلاح ضریب قدرت
۲. چرا خازن ؟
۳. رگولاتور چیست؟
۴. اصول طراحی بانک خازنی
۵. کیفیت و قابلیت اطمینان خازن های خود ترمیم شونده
۶. طراحی بانک خازن در شرایط هارمونیکی
۷. راهنمای خازن فشار متوسط
۸. کتاب مرجع خازن
۹. کتاب فیوز
۱۰. کتاب جامع کیفیت توان









تهران،ملاصدرا،شیخ بهائی شمالی
خیابان کولیوند،بن بست شبنم،پلاک ۵
تلفن : ۲۰-۸۸۶۱۸۳۱۶
www.farakoh.ir


بسم الله الرحمن الرحيم

شرکت تولیدی تجهیزات برقی فراکوه یزد

عنوان قراردادی : طراحی فیلتر هارمونیک در سیستم های قدرت

عنوان و نام پدیدآور : مهندس علیرضا اندرزا – مهندس مازیار شهریاری

مشخصات نشر : ۲۴۷ ص فنی مهندسی مصور جدول – نمودار

وضعیت فهرست‌نویسی : بر اساس اطلاعات فیپا

موضوع : خازن ، هارمونیک ، فیلتر

طراحی فیلتر هارمونیک در سیستم‌های قدرت

پدیدآورندگان : علیرضا اندرزا – مازیار شهریاری

ناشر: انتشارات ارشدان

شمارگان: ۲۰۰۰ نسخه

چاپ اول: ۱۴۰۲

قیمت: ۱۱۸۰۰۰ تومان

تهران ، خیابان شیخ بهایی ، خیابان کولیوند ، بن بست شبنم ، پلاک۵

تلفن : ۲۰ – ۸۸۶۱۸۳۱۶



طراحی فیلتر هارمونیک در سیستم‌های قدرت

دفتر فنی شرکت فراکوه

پدیدآورندگان:

علیرضا اندرزا

مازیار شهریاری

سرآغاز

مدیران شرکت فراکوه همیشه بر این باور بوده اند که در کنار انتقال دانش فنی و کار تولید،مستند سازی و انتقال این دانش و آگاهی های مربوطه به آن به نسل های آینده را نباید از نظر دور نگاه داشت؛ به همین جهت از آنجا که جای یک کتاب «**طراحی فیلتر هارمونیک**» همیشه خالی بوده؛ برای اولین بار در صنعت برق ایران دست به انتشار «دانشنامه فیلتر هارمونیک» زده و این کتاب به عنوان یک مرجع جامع و کاربردی انتشار یافته است تا شاید بتواند بسیاری از نیازهای فنی،محاسباتی و طراحی متخصصان نیازمند در این صنعت را برآورده و مرتفع سازد.

شرکت فراکوه علاوه بر اینکه در اجرای سیستم های جبران‌ساز اصلاح ضریب توان و بهبود کیفیت توان در پروژه های صنعتی کشوری جایگاه ویژه‌ای داراست،با توجه به چاپ چهارمین جلد از کتب فنی نیز از فعالان تحقیقاتی در زمینه کیفیت توان شناخته می‌شود.

نظر به اینکه تهیه مطالب در این مقیاس همواره دارای اشتباهاتی است. از این روی شرکت فراکوه با افتخار پذیرای یادآوری‌ها و تذکرات شما در خصوص برخی اشتباهات احتمالی خواهد بود تا تلاش خود را در تصحیح آن در چاپ های بعدی به کار بندد.

با سپاس

شرکت فراکوه

پیشگفتار

اکنون‌که چهارمین کتاب از سری کتاب‌های فنی و تخصصی شرکت فراکوه به همت همکاران گرامی آقایان مهندس علیرضا اندرزا و مهندس مازیار شهریاری تهیه و در دست چاپ قرار می‌گیرد، خدا را شاکریم که توانسته‌ایم در جهت کمک به ارتقای سطح علمی برق کشور در کنار وظیفه اصلی خود نیز گامی هرچند کوچک برداریم.

موضوع هارمونیک و فیلتر آن از معضلات قدیمی تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان است. درگذشته این موضوع، مطلبی غیرضروری در صنعت برق به شمار می‌آمد؛ ولی حال که ضرورت استفاده از آن به حد بالایی رسیده است و با عنایت به رشد مصرف، یکپارچگی شبکه‌ها در کشور و حتی توسعه این یکپارچگی در سطح کشورهای هم‌جوار، افزایش جریان‌های راکتیو و به ویژه هارمونیک‌ها به دلیل استفاده از تجهیزات جدید و صدها پدیده دیگر ناشی از آن‌ها، نحوه محاسبه و طراحی و کاربری آن موضوع مهمی برای تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان به‌شمار می‌آید.

در این کتاب موضوع هارمونیک و نحوه طراحی فیلترهای آن، محاسبات و فرمول‌های لازم در حد توان ، تشریح و راه‌حل‌های مربوطه جهت استفاده‌کنندگان ارائه‌شده است. شرکت فراکوه وظیفه خود می‌داند از کلیه کسانی که در تهیه و تدوین و چاپ این کتاب ما را یاری نموده‌اند؛ تشکر و قدردانی کند.

از جناب **مهندس حسین شهابی** برای ایده پروری و اهتمام در تولید این کتاب و از آقایان **مهندس علیرضا اندرزا** و **مهندس مازیار شهریاری** برای پژوهش و نگارش آن سپاسگزاری می‌شود.

جای بسی امیدواری است که این کتاب پژوهشی و تلاش شرکت فراکوه مورد استفادهٔ متخصصان صنعت برق کشور قرار بگیرد؛ دانشجویان رشتهٔ مهندسی برق و دانش پژوهان حرفه ای این حوزه از صنعت نیز از آن بهره مند شوند.

با احترام : محمد مهدی فنائی

رئیس هیئت‌مدیره شرکت فراکوه (سهامی خاص)

بهبود کیفیت توان و اصلاح بهینه ضریب توان یکی از بهترین راه های کاهش هزینه های انرژی است که در زمانی کوتاه هزینه سرمایه گذاری را برمی‌گرداند.پیشرفت های علمی و تحقیقاتی صورت گرفته در سالیان اخیر، قابلیت اطمینان و فناوری سیستم های بهبود کیفیت توان و جبران‌سازی را افزایش داده و طراحی و ساخت آن توسط سازندگان را تخصصی تر و نصب آن را برای بهره برداران ساده تر کرده است.

مبدّل های قدرت،کنترل کننده های موتوری، مبدّل های فرکانس ثابت،لامپ های کم مصرف،تلویزیون های جدید و کامپیوترها به شبکه هارمونیک تزریق می‌کنند، که این هارمونیک ها ممکن است توسط امپدانس‌ها و خازن های شبکه تقویت شوند.از این روی در بسیاری از موارد طراحی و ارائه راه کارهای بهینه به دلیل افزایش روز افزون هارمونیک ها نسبت به قبل چه در شبکه های فشار ضعیف و چه در شبکه های فشار متوسط بسیار سخت تر شده و دقت و مطالعات زیادی را می‌طلبد.

از این رو به هنگام طراحی های اولیه باید راه حل‌های اساسی پیش‌بینی گردد تا از مشکلات بعدی جلوگیری شود.حدود ۳۰ سال است که متخصصان شرکت فراکوه تدابیر اساسی در مورد تحلیل شبکه انجام داده و در این زمینه مقالات متعددی را به چاپ رسانده‌اند؛ بنابراین لازم می‌رسید تا خلاصه این تحقیقات به علاوه سایر اطلاعات در مورد هارمونیک ها و نحوه فیلتر کردن آنها در یک کتاب به صورت یکپارچه به چاپ برسد.

شرکت فراکوه برخود لازم می‌داند حال که با همّت همکاران گرامی جناب آقای مهندس **علیرضا اندرزا و** جناب آقای مهندس **مازیار شهریاری** این کتاب تهیّه و در دست چاپ قرار میگیرد، از جناب آقای دکتر **سیّد حجّت الحق حسینی** عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدّین طوسی، بابت بازنگری کتاب و از کلیه کسانی که در تهیّه، تدوین و چاپ این کتاب مارا یاری نموده اند تشکر و قدردانی نماید.

شرکت فراکوه امیدوار است این کتاب، مرجع جدا نشدنی از متخصصان باشد.

با احترام : حسین شهابی

مدیر عامل شرکت فراکوه (سهامی خاص)

فهرست مطالب

مقدمه ۱۵

فصل اول **۲۱**

مبانی هارمونیک‌ها **۲۱**

۱-۱ اعوجاج هارمونیکی ۲۴

۱-۲ مقایسه اعوجاج ولتاژ و جریان ۲۸

۱-۳ مقایسه هارمونیک‌ها و حالت گذرا ۳۰

۱-۴ مقادیر شبکه قدرت در حالت غیر سینوسی ۳۱

۱-۴-۱ توان‌های اکتیو، راکتیو و ظاهری ۳۱

۱-۴-۲ ضریب توان: واقعی و جابجایی ۳۷

۱-۴-۳ توالی فاز هارمونیک‌ها ۳۸

۱-۴-۴ هارمونیک‌های مضرب ۳ ..... ۴۰

۱-۵ شاخص‌های هارمونیک ۴۵

۱-۵-۱ اعوجاج هارمونیک کل (THD) ۴۵

۱-۵-۲ اعوجاج دیماند کل (TDD) ۴۷

فصل دوم **۴۹**

منابع تولید هارمونیک‌ها **۴۹**

۲-۱ منابع هارمونیک برای بارهای تجاری ۵۰

۲-۱-۲ منابع قدرت تک فاز..... ۵۰

۲-۱-۳ لامپ‌های فلورسنت..... ٥٤

۲-۱-٤ درایوهای تنظیم سرعت برای HVAC و آسانسور
..... ۵۸

۲-۲ هارمونیک‌های بار صنعتی..... ۵۸

۲-۲-۱ مبدل‌های قدرت سه فاز..... ۵۹

۲-۲-۲ دستگاه‌های قوس..... ٦٦

۲-۲-۳ دستگاه‌های اشباع شونده..... ٦٧

۲-٤ موقعیت‌یابی منشأ هارمونیک‌ها..... ۷۰

فصل سوم **۷۳**

مشخصات پاسخ سیستم و رزونانس **۷۳**

۳-۱ امپدانس سیستم ۷٤

۳-۲ امپدانس خازنی..... ۷۸

۳-۳. رزونانس موازی..... ۷۹

۳-٤ رزونانس سری..... ۸٤

۳-۵ تأثیرات بارهای مقاومتی ۸۷

فصل چهارم **۹۱**

تأثیر هارمونیک‌ها بر سیستم‌های قدرت **۹۱**

٤-۱ تأثیرات روی خازن‌ها ۹۲

٤-۲ تأثیرات روی ترانس‌ها ۹٦

٤-۳ تأثیرات روی موتورها ۱۰۱

٤-٤ تأثیرات روی سیستم‌های مخابراتی ۱۰۲

٤-۵ تأثیرات روی انرژی و اندازه‌گیری دیماند ۱۰٤

فصل پنجم **۱۰۷**

اینترهارمونیک و فرورزونانس **۱۰۷**

۵-۱ اینترهارمونیک و فرورزونانس ۱۰۸

۵-۲ اینترهارمونیک‌های زیر سنکرون ۱۱۲

۵-۲-۱ رزونانس زیرسنکرون ۱۱۳

۵-۲-۱ رزونانس زیرسنکرون سیستم‌های HVDC ۱۱٦

۵-۳ فرورزونانس ۱۱۷

۵-۳-۱ فرورزونانس سری ۱۲۱

۵-۳-۲ فرورزونانس موازی ۱۲۳

فصل ششم **۱۲۵**

سنجش اعوجاج هارمونیکی **۱۲۵**

٦-۱ مفهوم نقطه اتصال مشترک.....۱۲۸

٦-۲ ارزیابی هارمونیکی سیستم توزیع ۱۳۰

٦-۲-۱ روش ارزیابی حد ولتاژ ۱۳۲

٦-۲-۲ ارزیابی میزان اعوجاج مورد انتظار.....۱۳٤

٦-۲-۳ ارزیابی طرح کنترل هارمونیک.....۱۳۵

٦-۳ ارزیابی هارمونیکی برای تأسیسات مشترکین نهایی.....۱۳۵

٦-٤ روش ارزیابی حدود جریان‌های هارمونیکی.....۱۳۹

فصل هفتم **۱٤۱**

کنترل هارمونیک‌ها **۱٤۱**

۷-۱ اصول کنترل هارمونیک‌ها ۱٤۲

۷-۱-۱ کاهش جریان‌های هارمونیکی بارها.....۱٤۲

۷-۱-۲ فیلتر کردن ۱٤٤

۷-۱-۳ تعدیل پاسخ فرکانسی سیستم ۱٤۵

۷-۲ چه جاهایی هارمونیک‌ها را کنترل کنیم ۱٤٦

۷-۲-۱ بر روی فیدرهای شرکت توزیع برق ۱٤٦

۷-۲-۲ در تجهیزات مصرف‌کننده نهایی ۱٤۹

۷–۳ مطالعات هارمونیکی ۱۵۱
۷–۳–۱ مراحل مطالعات هارمونیکی..... ۱۵۲
۷–۳–۲ مدل کردن سیستم ۱۵۳
۷–۳–۳ مدل کردن منابع هارمونیکی..... ۱۵۸
۷–۳–٤ ابزارهای کامپیوتری برای تحلیل هارمونیکی..... ۱٦۲
۷–٤ دستگاه‌های کنترل اعوجاج‌های هارمونیکی ۱٦٦
۷–٤–۱ راکتورهای خط یا چوک..... ۱٦۷
۷–٤–۲ ترانسفورماتورها با اتصال زیگزاگ ۱۷۳

فصل هشتم **۱۷۵**

طراحی فیلترهای هارمونیک **۱۷۵**

۸–۱ فیلترهای پسیو ۱۷٦
۸–۱–۱ فیلترهای پسیو موازی ۱۷٦
۸–۱–۲ فیلترهای پسیو سری..... ۱۸۳
۸–۲ فیلترهای باند پهن پایین گذر..... ۱۸۵
۸–۳ فیلترهای C ۱۹۰
۸–٤ فیلترهای اکتیو ۱۹۷
۸–۵ طراحی فیلتر هارمونیک: مطالعه موردی ۱۹۹
۸–٦ مطالعات موردی ۲۱۵

۸-٦-۱ ارزیابی اضافه جریان در سیم خنثی و کاهش توان ترانسفورماتور ۲۱۵

۸-٦-۲ اینترهارمونیک های ایجادشده توسط کوره‌های القایی ۲۱۷

فصل نهم **۲۲۷**

استانداردهای مرتبط با هارمونیک **۲۲۷**

۹-۱ استاندارد IEEE 519-1992 ..... ۲۲۸

۹-۲ بررسی اجمالی استاندارد هارمونیک IEC ۲۳۱

۹-۳ IEC 61000-2-2 ..... ۲۳٤

۹-٤ IEC 61000-3-4 و IEC 61000-3-2 ..... ۲۳۵

۹-۵ IEC 61000-3-6 ..... ۲٤۰

۹-٦ NRS 048-02 ..... ۲٤٤

۹-۷ EN 50160 ..... ۲٤۵

منابع ۲٤۷

مقدمه

هارمونیک‌ها در سیستم‌های قدرت برای سال‌ها وجود داشته‌اند. بااین‌وجود، مسائلی که اخیراً بر اهمیت موضوع افزوده‌اند؛ ظهور هم‌زمان دو گرایش در صنعت برق است که یکی استفاده روزافزون شرکت‌های توزیع‌کننده و بهره‌بردار از بانک‌های خازنی به‌منظور بهبود ضریب توان و دیگری کاربرد گسترده مبدل‌های الکترونیک قدرت، باهدف دستیابی به قابلیت اطمینان و بازدهی بالاتر در سیستم است.

از یک‌سو شرکت‌های بهره‌بردار همواره نگران داشتن ضریب توان بالا هستند که مزایایی همچون کاهش مقادیر نامی تجهیزات مورداستفاده در شبکه، کاهش تلفات خطوط و افت ولتاژ و لذا کاهش جریان نیاز به تجهیزات تنظیم و رگولاسیون ولتاژ دارند. از سویی دیگر با پیشرفت فناوری ساخت نیمه‌رساناها و نیاز به استفاده از درایوها به‌منظور کنترل پیوسته سرعت موتورها و نیز کنترل توان راکتیو با استفاده از سیستم‌های انتقال AC انعطاف‌پذیر ($FACTS$)، گرایش به استفاده از ادوات غیرخطی الکترونیک قدرت که موجب تزریق جریان‌ها و ولتاژهای هارمونیکی به شبکه توزیع صنعتی و حتی شبکه‌های بالادستی می‌شوند؛ به‌طور روزافزونی افزایش‌یافته است.

اعوجاج هارمونیکی توسط سیستم‌های غیرخطی یا سیستم‌های تغییرپذیر با زمان ایجاد می‌شود. سیستم غیرخطی، سیستمی است که در حوزه زمان، خواص همگنی و جمع آثار بین ورودی و خروجی‌های سیستم برقرار نباشد. به طور معمول در سیستم‌های الکتریکی ولتاژ به‌عنوان ورودی

و جریان به‌عنوان خروجی در نظر گرفته می‌شود. در برخی سیستم‌ها نیز جریان به‌عنوان ورودی و ولتاژ به‌عنوان خروجی در نظر گرفته می‌شود. در این کتاب به‌غیراز مواردی که به صراحت اعلام شود، منظور از ورودی به سیستم، جریان اعمال‌شده (تزریق‌شده) به آن و منظور از خروجی سیستم، ولتاژ خروجی آن است. درواقع شکل موج خروجی در سیستم‌های غیرخطی یا تغییرپذیر با زمان، اساساً متفاوت از شکل موج ورودی است که اصطلاحاً گفته می‌شود که سیگنال خروجی دچار ***اعوجاج*** *یا* ***به‌هم‌ریختگی*** شده است.

همچنین به‌طور معادل، برای یک سیستم غیرخطی یا تغییرپذیر با زمان در حوزه فرکانس، محتوای فرکانسی یا طیف سیگنال خروجی، بیشتر از محتوای فرکانسی سیگنال ورودی است و درواقع سیستم غیرخطی یا تغییرپذیر با زمان به محتوای فرکانسی ورودی می‌افزاید که این از خواص سیستم‌های غیرخطی یا تغییرپذیر با زمان است. در مواردی که ورودی به سیستم غیرخطی یا تغییرپذیر با زمان، یک سیگنال سینوسی با فرکانس مشخص f_1 باشد، به محتوای افزوده‌شده بر طیف فرکانسی ورودی که در طیف خروجی خود را نمایان می‌سازد که به‌اصطلاح «***هارمونیک***» گفته می‌شود، درواقع در خروجی یک سیستم غیرخطی یا تغییرپذیر با زمان که به آن یک ورودی سینوسی اعمال‌شده است، افزون بر طیف یا فرکانس ورودی، فرکانس‌های دیگری نیز تولید می‌شوند که پدیده به‌هم‌ریختگی یا اعوجاج موجود در خروجی سیستم، زاییده همین طیف فرکانسی (هارمونیکی) اضافی تولیدشده است.

ازآنجایی‌که کار کردن و تحلیل سیستم‌های خطی و سیگنال‌های سینوسی تک فرکانسی بسیار راحت‌تر از سیستم‌های غیرخطی و سیگنال‌های دچار اعوجاج است، از این روی اگر بتوانیم محتوای خروجی دستگاه یا مبدل غیرخطی یا تغییرپذیر با زمان را که مولد هارمونیک‌ها است، به‌صورت ترکیب خطی وزن‌دهی شده‌ای از سیگنال‌های سینوسی نمایش دهیم؛ (به‌صورت مجموعی از منابع جریان یا ولتاژ سینوسی مدل کنیم)، باتوجه‌به اینکه بقیه اجزای متصل به سیستم موردبررسی (مقاومت‌ها، خازن‌ها و سلف‌ها) خطی و تغییرناپذیر با زمان (LTI)[1] هستند، آنگاه می‌توان با بهره‌گیری از خواص همگنی و جمع آثار سیستم‌های LTI، ابتدا پاسخ خروجی سیستم کلی به تک‌تک این سیگنال‌های وزن‌دهی شده ورودی را در فرکانس معین خود به دست آورده و درنهایت تک‌تک این پاسخ‌های خروجی را با یکدیگر جمع کرده (طبق خاصیت جمع آثار) و بدین ترتیب پاسخ خروجی نهایی را به دست آورد.

خوشبختانه ***سری فوریه*** ابزاری قدرتمند به‌منظور نمایش ترکیب خطی از سینوسی‌ها (هارمونیک‌ها) است که فرکانس هریک از این سینوسی‌ها، مضرب صحیحی از فرکانس پایه (اصلی) سیگنال متناوب معوج است. با استفاده از سری فوریه می‌توان سیگنال خروجی دستگاه غیرخطی را که دچار اعوجاج شده است به مؤلفه‌های هارمونیکی یادشده تجزیه کرده و پاسخ سیستم خطی کلی به هریک از آن‌ها را به‌طور مجزا در آن فرکانس هارمونیکی مشخص خود محاسبه کرده و درنهایت این پاسخ‌ها را با

[1] Linear Time Invariant

یکدیگر جمع کرده تا خروجی نهایی حاصل شود. شکل (۱) پاسخ خروجی سیستم خطی را به‌ازای ترکیب ورودی‌های هارمونیکی که معادل دستگاه مولد هارمونیک است؛ نشان می‌دهد.



شکل ۱- پاسخ سیستم LTI به ترکیب خطی مؤلفه‌های هارمونیکی

که در آن I_h دامنه مؤلفه هارمونیکی h-ام جریان تزریق‌شده به سیستم خطی به‌واسطه بار غیرخطی بوده و V_h دامنه مؤلفه هارمونیکی h-ام ولتاژ ایجادشده به‌واسطه‌ی پاسخ سیستم خطی (امپدانس معادل سیستم) به جریان هارمونیکی تزریقی است. ارتباط بین I_h و V_h برطبق خاصیت خطی سیستم، از طریق رابطه زیر به دست می‌آید :

$$V_h = Z(j2\pi h f_1) I_h$$

بنابراین با فرض I_h ثابت، هرچه اندازه امپدانس در هارمونیک ورودی h-ام بزرگ‌تر باشد، اندازه مؤلفه h-ام ولتاژ نیز بزرگ‌تر خواهد شد. درواقع $Z(j2\pi h f_1)$ اندازه‌ی پاسخ سیستم در فرکانس $\omega_h = 2\pi h f_1$ است.

این درواقع مفهوم عملی پدیده تشدید است؛ البته بستگی به مقدار امپدانس در فرکانس $\omega_h = 2\pi h f_1$ ممکن است این مقدار تشدید مقادیر متفاوتی داشته باشد. فرکانسی را که در آن حداکثر این تشدید اتفاق می‌افتد؛

فرکانس تشدید یا فرکانس رزونانس می‌نامند که پارامتری بسیار مهم و اساسی در تحلیل هارمونیکی سیستم‌های قدرت است.

درواقع از دیدگاه مهندسی کنترل و مبحث پایداری سیستم‌ها، فرکانس‌های $\omega_r = \pm j2\pi r f_1$ که در آن r الزاماً مقدار صحیحی نیست، قطب‌های تشکیل‌دهنده سیستم امپدانسی یادشده هستند و چنانچه محتوای فرکانسی (سری فوریه) جریان هارمونیکی تزریق‌شده به سیستم امپدانسی از طریق مبدّل‌ها و دیگر ادوات غیرخطی حاوی مؤلفه فرکانسی r–ام باشد (طور معادل r یک عدد صحیح باشد)، در این صورت قطب‌های سیستم به‌اصطلاح تحریک‌شده و ایجاد پدیده رزونانس می‌کنند. در این مورد در فصل‌های دیگر با جزئیات بیشتری پرداخته خواهد شد.

در فصل اول کتاب مقدمه‌ای در مورد هارمونیک‌ها مطرح‌شده و شاخص‌های مهم هارمونیک‌ها معرفی و تعریف می‌شوند. در فصل دوم منابع و ادوات تولید هارمونیک‌ها در شبکه موردبررسی قرار می‌گیرند. در فصل سوم و چهارم کتاب به‌این‌ترتیب پدیده تشدید یا رزونانس و تأثیرات آن به‌تفصیل مورد تحلیل قرار می‌گیرد. در فصل پنجم به اینترهارمونیک‌ها، پدیده فرورزونانس و زیرسنکرون پرداخته می‌شود. در فصل ششم مفهوم نقطه اتصال مشترک تبیین می‌شود. در فصل هفتم روش‌های کنترل و کاهش هارمونیک‌ها بررسی‌شده و موضوع فیلترینگ آن‌ها از طریق طراحی فیلتر و چوک‌ها و نیز ابزارهای کامپیوتری به‌منظور تحلیل و مدل‌سازی شبکه‌های هارمونیکی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در فصل هشتم طراحی فیلترهای پسیو سری و موازی به همراه مطالعات موردی به‌طور کامل مورد

تجزیه‌وتحلیل قرار می‌گیرد. در فصل نهم نیز استانداردهای جامع و فراگیر در مورد میزان مجاز هارمونیک‌های تزریقی به شبکه موردبررسی کامل قرار می‌گیرد.

فصل اول

مبانی هارمونیک‌ها

برای شکل موج ولتاژ سینوسی تولیدشده در نیروگاه‌ها می‌توان فرض کرد که دارای اعوجاج ناچیز باشند و همچنین امواج درون خطوط انتقال دارای اعوجاج کمتر از یک درصد هستند. با این‌حال اعوجاج[1] در نزدیکی بار افزایش می‌یابد، به‌گونه‌ای که ممکن است جریان در برخی از بارها هیچ شباهتی با موج سینوسی نداشته باشد. مبدل‌های الکترونیک قدرت توانایی تغییر شکل موج را به حالت دلخواه دارند.

اعوجاج در بیشتر اوقات به‌صورت متناوب و با ضریب صحیحی از فرکانس پایه رخ می‌دهد و در موارد محدود، ممکن است به‌صورت تصادفی[2] باشد. این اعوجاج‌های شکل موج را هارمونیک خطاب می‌کنیم و در این کتاب به تحلیل و محاسبه آن می‌پردازیم.

هنگامی‌که در اواخر سال ۱۹۷۰ میلادی، مبدل‌های الکترونیک قدرت مورد توجه و محبوبیت قرار گرفتند. بسیاری از مهندسان به دلیل ایجاد هارمونیک‌ها توسط این مبدل‌ها نگران بودند و همین مسئله باعث شد مطالعات گسترده‌ای تا به امروز راجع به هارمونیک‌ها و نحوه حذف یا محدود کردنشان برای بهبود کیفیت توان انتقال‌یافته، انجام شود.

[1] Distortion
[2] Random

همچنان، برخی مهم‌ترین مشکل کیفیت توان را وجود هارمونیک‌ها می‌دانند. مشکلات هارمونیکی بسیاری از قوانین سنتی طراحی سیستم‌های قدرت بر اساس فرکانس پایه را به چالش می‌کشد. درحالی‌که مهندسان با پدیده‌ای پیچیده که بررسی و حل آن تجهیزات خاص و دانش بالا لازم دارد؛ مواجه هستند در بسیاری از مواقع درصورتی‌که میزان هارمونیک‌ها مقادیر کوچکی در برابر موج اصلی باشند؛ مشکل‌زا نیستند و تنها در مواقعی که این اعوجاجات شدید باشند باید تدبیراتی سنجید.

بیشتر مشکلات هارمونیکی در بخش مصرف به‌خصوص در مصرف‌کننده‌های صنعتی که دارای درایوهای سرعت، کوره‌های قوس الکتریکی، کوره‌های القایی و... هستند؛ به وقوع می‌پیوندد.

اولین مطالعات اعوجاجات هارمونیکی مربوط به سال ۱۹۳۰م. است که در آن زمان منبع اصلی تولید آن‌ها ترانس‌ها و مشکل اصلی تداخل با سیستم‌های تلفن بوده است.

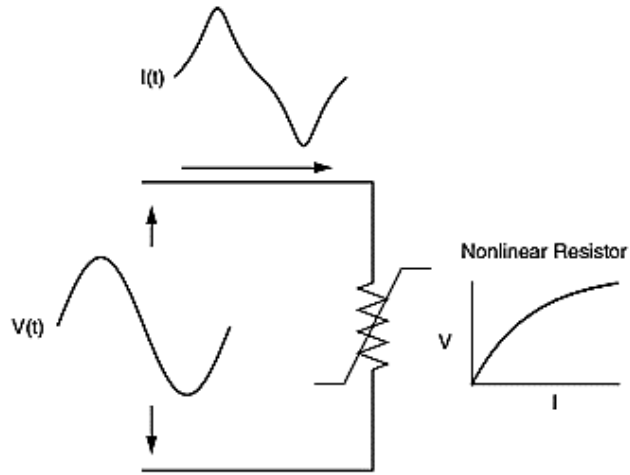
خوشبختانه اگر تأسیسات به‌درستی طراحی و سایزینگ‌ها به نحوی باشند که پاسخگوی بار مصرفی باشند، احتمال مشکل‌ساز شدن هارمونیک‌ها کم است؛ هرچند که می‌توانند برای سیستم‌های مخابراتی، همچنان مشکل ایجاد کنند. مشکلات شبکه قدرت زمانی

جدی می‌شود که به دلیل کاپاسیتانس سیستم (خاصیت خازنی)[1] در یکی از فرکانس‌های هارمونیکی، تشدید[2] (رزونانس) رخ دهد که به طرز وحشتناکی باعث افزایش مقادیر اعوجاج می‌شود. گرچه در تأسیسات خانگی هم احتمال وقوع رزونانس هست؛ اما به طور معمول در محیط‌های صنعتی درجه بالاتری از رزونانس رخ می‌دهد.

۱-۱ اعوجاج هارمونیکی

عامل اصلی ایجاد هارمونیک‌ها، دستگاه‌های غیرخطی در شبکه قدرت هستند. دستگاه‌های غیرخطی دستگاه‌هایی هستند که جریان به نسبت ولتاژ ورودی تغییر نمی‌کند. در شکل ۱-۱ یک ولتاژ سینوسی به یک مقاومت غیرخطی اعمال‌شده و جریان آن دارای اعوجاج است و اگر ولتاژ ورودی را چند درصد بیشتر کنیم ممکن است باعث دو برابر شدن جریان و عوض شدن شکل موج آن شود.

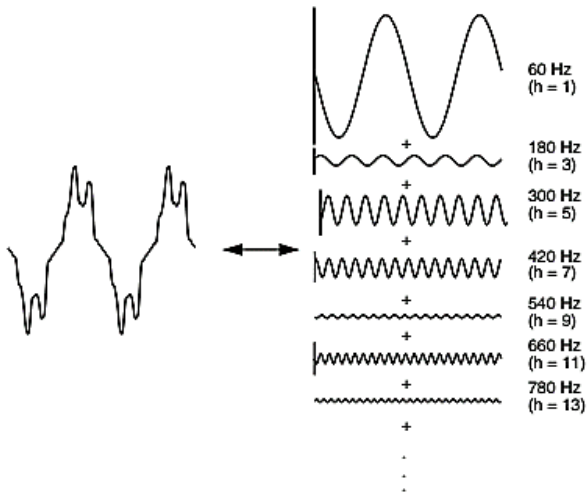
[1] Capacitance
[2] Resonance



شکل ۱-۱ اعوجاج جریان براثر مقاومت غیرخطی

شکل ۱-۲ نشان می‌دهد که هر شکل موج متناوب دارای اعوجاج را می‌توان به‌صورت جمع یک‌سری موج سینوسی نشان داد. به این صورت که این امواج سینوسی کامل و با فرکانس‌هایی معادل ضریب صحیحی از فرکانس پایه شکل موج اصلی (دارای اعوجاج)، هستند. به این جمع موج‌های سینوسی، سری فوریه[1] گفته می‌شود. فوریه اولین فردی بود که توانست این موضوع را به زبان ریاضی بیان کند.

[1] Fourier Series



شکل ۱-۲ نمایش سری فوریه شکل موج اعوجاج دار

سری فوریه به‌صورت فراگیر برای تحلیل و بررسی هارمونیک‌ها کاربرد دارد و می‌توان سیستم را به‌صورت جدا در فرکانس‌های متفاوت به‌صورت سینوسی کامل تحلیل کرد؛ البته که دامنه هارمونیک‌ها بیشتر مدنظر هستند.

هنگامی‌که سیکل مثبت و منفی یک شکل موج، یکسان باشد سری فوریه فقط دارای هارمونیک‌های فرد است. این موضوع معادلات را کمی ساده‌سازی می‌کند و اغلب تجهیزات هارمونیک زا دارای این ویژگی هستند. درواقع در صورت مشاهده هارمونیک زوج می‌توان نتیجه‌گیری کرد که در تجهیزات سمت بار یا مبدّل‌ها مشکلی به وجود آمده است؛ البته استثناهایی، مانند مبدل‌های نصف موج و کوره‌های

قوسی که به‌صورت تصادفی بین دو الکترود قوس برقرار می‌شود، وجود دارد.

به طور معمول در سیستم‌های قدرت از هارمونیک‌های بالای مرتبه ۲۵ یا ۵۰ صرف‌نظر می‌شود. درصورتی‌که در سیستم‌های الکترونیکی توان پایین می‌تواند تأثیرگذار باشد. در فرکانس‌های بالا به‌دست‌آوردن داده‌های دقیق بسیار سخت است. حالت استثنا، گذراهای کلیدزنی[1] یا گذراهای ناشی از بریدگی[2] در مبدل‌های الکترونیک قدرت هستند که روی ولتاژ تأثیر گذاشته و مدارات زمان‌بندی را دچار خطا می‌کنند. این مرتبه از هارمونیک‌ها بیشتر در کابل‌های زیرزمینی موجب رزونانس می‌شوند و در خازن‌های اصلاح توان اهمیت کمتری دارند.

شبکه قدرت را می‌توان به‌صورت یک‌سری المان سری و موازی مدل کرد و اغلب المان‌های غیرخطی در شاخه‌های موازی هستند. امپدانس‌های سری در شبکه قدرت (امپدانس اتصال کوتاه بین منبع و بار) بیشتر خطی هستند. در ترانس‌ها نیز منبع اصلی هارمونیک شاخه موازی (امپدانس مغناطیس کننده) است، درحالی‌که امپدانس نشتی خطی است؛ بنابراین منبع اصلی اعوجاج هارمونیکی به مدار نهایی مصرف‌کننده مربوط است.

[1] Switching
[2] Notching

۱-۲ مقایسه اعوجاج ولتاژ و جریان

کلمه هارمونیک گاهی بدون مشخصات اضافه استفاده می‌شود، به‌عنوان‌مثال شایع است که بشنویم یک درایو کنترل سرعت یا کوره القایی به‌خاطر وجود هارمونیک، درست کار نمی‌کند. معنای دقیق این جمله را در سه مورد از حالت های احتمالی زیر اشاره می‌کنیم:

۱. ولتاژ هارمونیک‌ها بسیار بزرگ است (اعوجاج دارد) و مدار کنترل نمی‌تواند زاویه آتش را درست تنظیم کند.

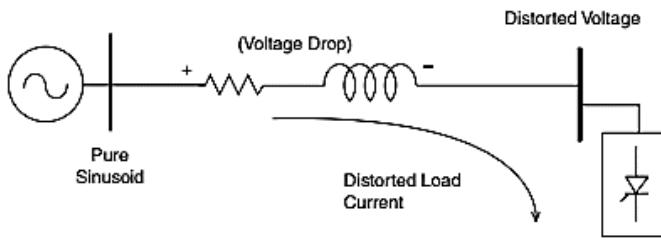
۲. جریان هارمونیک‌ها در قسمت تولید قدرت بسیار بزرگ هستند و برای تجهیزاتی همچون ترانس‌ها و ماشین‌ها باید زیر توان نامی کار کنند.

۳. ولتاژ هارمونیک‌ها بسیار بزرگ است؛ زیرا جریان هارمونیک‌ها باتوجه‌به شرایط سیستم بسیار بزرگ هستند.

بارهای غیرخطی موازی منبع اصلی تولید هارمونیک‌های شبکه جریان در شبکه قدرت است. برای راحت شدن تحلیل این‌گونه بارها آن‌ها را به‌صورت یک منبع جریان مدل می‌کنیم.

همان‌گونه در شکل ۱-۳ مشخص است اعوجاج ولتاژ نتیجه عبور جریان معوج از امپدانس خطی سری سیستم توزیع است. با فرض اینکه شینه منبع ولتاژ، شکل موج سینوسی کامل باشد و بار غیرخطی در مدار وجود داشته باشد جریان اعوجاج دار می‌شود. با عبور این

جریان از امپدانس سیستم افت ولتاژ در هارمونیک‌ها رخ می‌دهد که درنهایت منجر به پیدایش هارمونیک‌های ولتاژ در شینه بار می‌شود. میزان اعوجاج ولتاژ بستگی به جریان و امپدانس دارد. با فرض اینکه در شینه بار اعوجاج در محدوده معقول (کمتر از ۵٪) بماند، میزان هارمونیک جریان تولیدشده توسط بار عموماً ثابت می‌ماند.



شکل ۱-۳ عبور جریان هارمونیکی از امپدانس شبکه و ایجاد هارمونیک ولتاژ در شینه بار

درحالی‌که هارمونیک‌های جریان بار درنهایت باعث اعوجاج ولتاژ می‌شوند؛ اما باید توجه کرد که بار روی اعوجاج ولتاژ کنترلی ندارد.

اساس کار کنترل هارمونیک‌ها درک این موضوع که بار یکسان در دو موقعیت متفاوت دو اعوجاج ولتاژ متفاوت ایجاد می‌کند، است. در استانداردهایی مانند *IEEE519* [1] به ترتیب زیر آمده است.

۱. کنترل روی میزان هارمونیک جریان تزریق‌شده در سیستم که در مدار نهایی رخ می‌دهد، انجام شود.

[1] Institute of Electrical and Electronics Engineers

۲. با فرض اینکه تزریق جریان هارمونیک در محدوده معقول باشد، کنترل روی اعوجاج ولتاژ از طریق کنترل امپدانس سیستم انجام شود.

۱-۳ مقایسه هارمونیک‌ها و حالت گذرا [1]

هارمونیک‌ها برای خیلی از اختلالات شبکه مقصر دانسته می‌شوند درصورتی‌که یک‌سری از این اختلالات درواقع حالت‌های گذرا هستند. اندازه‌گیری این وقایع ممکن است شکل موجی معوج با فرکانس بالا نشان دهد. حالت گذرا با اینکه دارای فرکانس بالا است؛ اما با هارمونیک متفاوت بوده و باید جداگانه مورد تحلیل و بررسی قرار گیرد. شکل موج‌های گذرا به‌صورت امواج فرکانس بالایی هستند که به‌صورت کوتاه‌مدت به شبکه وارد می‌شود. دلیل اصلی این امواج گذرا کلیدزنی‌های درون شبکه رخ می‌دهد و لزوماً فرکانس آن مضرب صحیحی از فرکانس شبکه نیست. درصورتی‌که هارمونیک‌ها در حالت مانا[2] وجود دارند و فرکانس آن‌ها مضرب صحیحی از فرکانس شبکه است. امواج گذرا معمولاً بعد از گذشت چند سیکل از بین می‌روند. حالت‌های گذرا به دلیل تغییرات ناگهانی، مانند کلیدزنی بانک خازنی ایجاد می‌شوند درصورتی‌که هارمونیک‌ها به عملکرد بار بستگی دارند.

[1] Transient

[2] Steady State

یکی از عوامل رزونانس در شبکه حالت گذرای مربوط به مغناطیس کردن ترانس است. با اینکه حالت گذرا است؛ اما تا چند ثانیه ممکن است این پدیده طول بکشد.

۱-٤ مقادیر شبکه قدرت در حالت غیر سینوسی

مقادیر سنتی شناخته‌شده در شبکه‌های قدرت مانند: RMS[1]، توان (ظاهری، اکتیو، راکتیو)، ضریب قدرت و توالی فازها در شرایط سینوسی کامل تعریف‌شده‌اند. درصورتی‌که در حضور هارمونیک‌ها سیستم دیگر در شرایط سینوسی کامل کار نمی‌کند و متأسفانه خیلی از ساده‌سازی‌های مهندسی در تحلیل فرکانسی شبکه کاربردی نخواهد داشت.

۱-٤-۱ توان‌های اکتیو، راکتیو و ظاهری

- توان ظاهری (S) {ولت‌آمپر (VA)} نتیجه حاصل‌ضرب مقادیر rms ولتاژ و جریان است.
- توان اکتیو (P) {وات (W)} نرخ متوسط انرژی انتقال‌یافته است.

[1] Root Mean Square

- توان راکتیو (Q) {ولت‌آمپر راکتیو (VAr)} قسمتی از توان ظاهری که کار انجام نمی‌دهد و با توان اکتیو اختلاف‌فاز ۹۰ درجه دارد.

توان ظاهری (S) برای هر دو موج سینوسی و غیر سینوسی صدق می‌کند و به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$S = V_{rms} \times I_{rms}$$

در حالت سینوسی کامل برای ولتاژ و جریان rms داریم:

$$V_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} V_1 \qquad I_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} I_1$$

که در آن I_1 و V_1 اندازه مؤلفه‌های اول (در فرکانس پایه) ولتاژ و جریان هستند.

درصورتی‌که در شرایط هارمونیکی باید تمام مؤلفه‌های هارمونیکی را نیز لحاظ کرد که رابطه آن به‌صورت زیر درمی‌آید:

$$V_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{max}} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} V_h\right)^2}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{{V_1}^2 + {V_2}^2 + {V_3}^2 + \cdots + {V_{h_{max}}}^2}$$

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{max}} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} I_h\right)^2}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{{I_1}^2 + {I_2}^2 + {I_3}^2 + \cdots + {I_{h_{max}}}^2}$$

که در آن I_h و V_h مقادیر ولتاژ و جریان در هارمونیک h ام هستند. در حالتی که اگر هارمونیک نداشته باشیم در معادلات بالا تنها I_1 و V_1 باقی می‌ماند.

توان اکتیو که بیانگر توان مفیدی است که توسط بار برای انجام کار مورداستفاده قرار می‌گیرد تا انرژی الکتریکی را به دیگر حالت‌های انرژی تبدیل کند. در توان الکتریکی کار توسط قسمتی از جریان که با ولتاژ هم‌فاز است، انجام می‌شود. برای توان اکتیو داریم:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T v(t)\, i(t)\, dt$$

که هم برای موج‌های سینوسی و هم غیر سینوسی صادق است برای حالت سینوسی رابطه بالا به‌صورت رابطه آشنای زیر درمی‌آید:

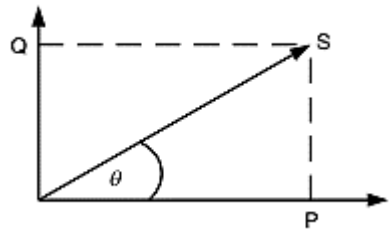
$$P = \frac{V_1 I_1}{2} \cos\theta_1 = V_{1rms} I_{1rms} \cos\theta_1 = S \cos\theta_1$$

که در آن θ_1 اختلاف‌فاز بین ولتاژ و جریان در فرکانس پایه است.

در حالت غیر سینوسی اثرات تمام هارمونیک‌ها باید محاسبه شود، ازآنجایی‌که اغلب کل اعوجاج هارمونیکی کمتر از ۵٪ است با تقریب خوبی رابطه بالا برای امواج غیر سینوسی نیز صدق می‌کند؛ اما توان راکتیو و توان ظاهری، بسیار تحت‌تأثیر اعوجاجات قرار می‌گیرند.

توان راکتیو نوعی از توان است که کار انجام نمی‌دهد و به المان‌های راکتیو مدار (سلف و خازن) مربوط می‌شود، به‌عنوان‌مثال اندوکتانس یک‌بار، مانند موتور می‌تواند باعث شود که جریان از ولتاژ بار عقب بماند و توان بین اندوکتانس شبکه و منبع رفت‌وآمد می‌کند که درنهایت کار مفیدی انجام نمی‌شود؛ در حالت سینوسی به این صورت است:

$$Q = S \sin\theta_1 = \frac{V_1 I_1}{2} \sin\theta_1 = V_{1rms} I_{1rms} \sin\theta_1$$



شکل ۱-٤ رابطه بین S , P , Q در حالت سینوسی

بین تحلیل‌گران هارمونیک در تعریف توان راکتیو اختلاف‌نظر هست، اما در واقعیت به دلیل نیاز به محاسبه دیماند مصرفی، دستگاه‌های بسیاری برای اندازه‌گیری Q موجود است؛ اما اندازه‌گیری مقادیر P و Q مهم‌تر است.

P میزان مصرف توان اکتیو و S ظرفیت شبکه قدرت برای انتقال توان است.Q درواقع خیلی کاربردی ندارد؛ ولی از Q_1 که بیانگر توان راکتیو در فرکانس پایه است، برای سایزینگ خازن‌های موازی استفاده می‌شود.

بیشتر اوقات مهندسان، توان راکتیو را برای موج سینوسی در نظر می‌گیرند؛ اما در واقعیت به دلیل وجود اعوجاج با درنظرگرفتن قوانین کیرشهف[1] و پایستگی انرژی متوجه می‌شویم که نیاز به تعریف پارامتر دیگری است تا بتوانیم تمام توان‌های ایجادشده در موج اعوجاج دار

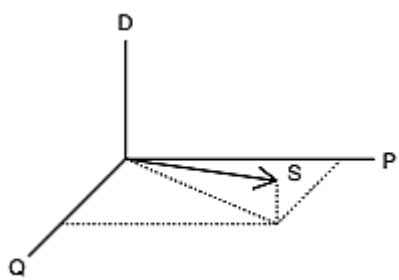
[1] Kirchhoff's Circuit Laws

در فرکانس‌های دیگر را توصیف کنیم. این پارامتر را توان اعوجاجی می‌نامند و با D نشان داده می‌شود. روابط توان را به‌صورت زیر بازنویسی می‌کنیم:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}$$

$$Q = \sum_k V_k I_k \sin\theta_k$$

برخی از تحلیل‌گران تمایل دارند برای نشان دادن روابط از بردارهای سه‌بعدی استفاده کنند.D درواقع عنوان کننده میزان اضافه‌ای از توان ظاهری که به دلیل وجود هارمونیک تولید می‌شود، است.



شکل ۱-۵ روابط برداری توان ظاهری

۱-٤-۲ ضریب توان: واقعی[1] و جابجایی[2]

ضریب توان، نسبت توان مؤثر که می‌تواند کار انجام دهد به توان تولیدشده یا توان ظاهری است.

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

به عبارتی ضریب توان درصدی از توان تولیدشده که قرار است مورداستفاده قرار گیرد. ضریب توان بین صفر و یک می‌تواند باشد. به‌عنوان‌مثال، ضریب توان ۰.۹ پسفاز یعنی، بار می‌تواند به‌طور مؤثر ٪۹۰ توان ظاهری تولیدشده (ولت‌آمپر) را تبدیل به کار مفید (وات) کند. پسفاز بودن آن یعنی شکل موج جریان به‌اندازه ۲۵.۸٤ درجه از شکل موج ولتاژ عقب‌تر است.

در حالت غیر سینوسی نمی‌توان ضریب توان را به‌صورت کسینوس زاویه اختلاف‌فاز بین جریان و ولتاژ در نظر گرفت. در حالت سینوسی ضریب توان محاسبه‌شده را به‌عنوان ضریب توان جابجایی می‌شناسیم.

---

[1] True

[2] Displacement

ضریب توان واقعی توان تمام موج‌ها در فرکانس‌های مختلف را در نظر می‌گیرد. دستگاه‌های مانیتور کردن کیفیت توان معمولاً هر دو ضریب توان را نشان می‌دهند. خیلی از منابع قدرت سوئیچ شونده[1] و PWM[2] و درایوهای سرعت متغیر تقریباً ضریب توان جابجایی واحد دارند، اما ضریب توان واقعی آن‌ها ممکن است در حدود ۰.۵ یا ۰.٦ باشد. با نصب خازن می‌توان کمک کرد ضریب توان واقعی بهبود یابد، اما به شرطی که خازن باعث ایجاد رزونانس نشود؛ زیرا در این حالت اعوجاج تشدید یابد و ضریب توان کاهش پیدا کند. استفاده از ضریب توان جابجایی می‌تواند برای محاسبه توان منبع بالادست ما را دچار خطا کند. اعوجاج باعث می‌شود اضافه جریاناتی در سیستم به وجود آید که هنگام عبور از المان‌های مدار تلفات ایجاد می‌کند. درنتیجه نیاز داریم ظرفیت بیشتری برای انتقال توان به بار در نظر بگیریم.

۱-٤-۳ توالی فاز هارمونیک‌ها

مهندسان برق قدرت به‌طور سنتی از مؤلفه‌های متقارن برای توصیف سیستم‌های سه فاز استفاده می‌کنند. سیستم سه فاز قابل‌تبدیل به سه سیستم تک فاز است و تحلیل بسیار ساده‌تر می‌شود. سیستم متقارن را می‌توان برای تحلیل هارمونیک‌ها نیز استفاده کرد. این روش

[1] Switch-Mode Power Supplies (SMPS)
[2] Pulse Width Modulation

اجازه می‌دهد که هر موج نامتعادلی از جریان یا ولتاژ را به سه سیستم متعادل تقسیم کرد.

سیستم توالی مثبت سه موج سینوسی با اختلاف‌فاز ۱۲۰ درجه در جهت چرخش نرمال سه فاز *A-B-C* (۱۲۰ ، ۱۲۰- ، ۰) هستند. سیستم توالی منفی نیز اختلاف‌فاز ۱۲۰ درجه‌دارند، اما در خلاف جهت چرخش *A-C-B* (۱۲۰- ، ۱۲۰، ۰) و توالی خنثی (صفر) هر سه فاز هم‌فاز هستند (۰،۰،۰). در سیستم سه فاز متعادل توالی فازها با ضرب عدد هارمونیک (*h*) در توالی مثبت قابل‌محاسبه است. به‌عنوان‌مثال برای هارمونیک دوم خواهیم داشت:

۲ × (۱۲۰، ۱۲۰- ، ۰) یا (۱۲۰- ، ۱۲۰، ۰) که همان توالی منفی است. برای هارمونیک ۳ داریم: ۳ × (۱۲۰، ۱۲۰- ، ۰) یا (۰،۰،۰) که همان توالی صفر است.

برای بقیه هارمونیک‌ها نیز با همین روش می‌توان حساب کرد و به‌صورت زیر آن‌ها را تقسیم‌بندی کرد:

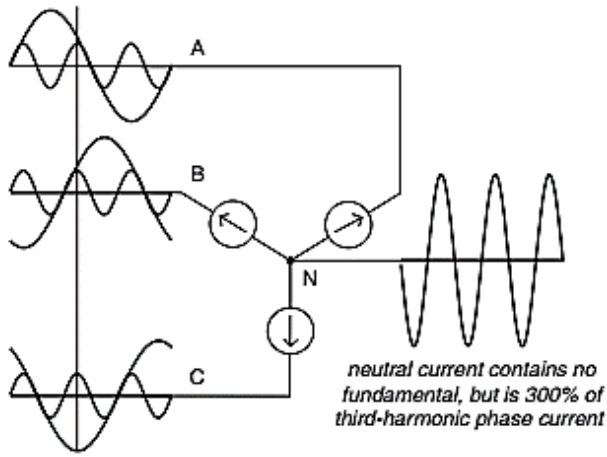
- هارمونیک‌های مرتبه $h = 1,7,13,\ldots$ عموماً توالی مثبت
- هارمونیک‌های مرتبه $h = 5,11,17,\ldots$ عموماً توالی منفی
- هارمونیک‌های مرتبه $h = 3,9,15,\ldots$ عموماً توالی صفر

۱-٤-٤ هارمونیک‌های مضرب ۳ [1]

برای این دسته از هارمونیک‌ها ($h = 3,9,15,21,\dots$) باید تعبیرات جداگانه اتخاذ کرد؛ زیرا گاهی اوقات پاسخ سیستم به این هارمونیک‌ها نسبت به بقیه هارمونیک‌ها بسیار متفاوت است. این هارمونیک‌ها در ترانس‌های ستاره زمین شده بسیار مهم می‌شوند؛ زیرا جریان هارمونیکی مستقیم به سمت خنثی (N) سرازیر می‌شود. دو مشکل اساسی اضافه‌بار شدن خنثی و تداخل با سیستم تلفن است.

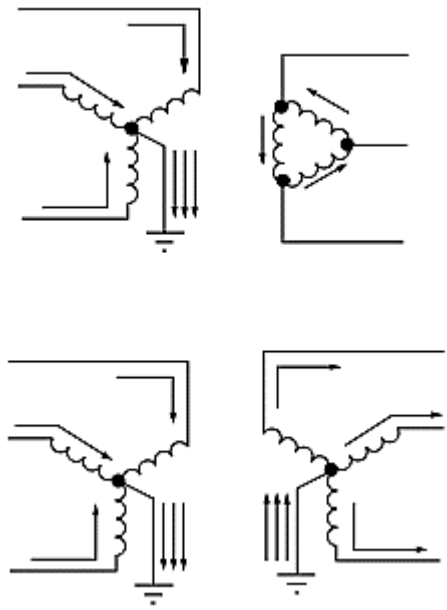
برای سیستمی با بارهای تک فاز کاملاً متعادل همان‌طور که در شکل ۱-٦ آمده است، هارمونیک مرتبه سه وجود دارد. اگر نقطه خنثی را موردبررسی قرار دهیم؛ مجموع سه موج اصلی سه فاز به دلیل اختلاف‌فاز ۱۲۰ درجه بین فازها صفر است درحالی‌که هارمونیک‌های فرد مضرب سه به دلیل هم‌فاز بودن با یکدیگر جمع می‌شوند و در نقطه خنثی جریان می‌یابد.

[1] Triplen Harmonics



شکل ۱-٦ جریان‌های بالا در خنثی به دلیل وجود بارهای غیرخطی تک فاز

نحوه سیم‌پیچی‌های ترانس نقش مهمی در جریان‌های هارمونیک سه دارند. در شکل ۱-۷ ترانس ستاره – مثلث داریم. در سمت ستاره ترانس جریان‌های هارمونیک مضرب سه باهم جمع شده و به خنثی سرازیر می‌شوند، اما در سمت مثلث ترانس این جریان‌ها در سیم‌پیچی‌ها به دام می‌افتند و درون خط جاری نمی‌شوند. همین موضوع یکی از دلایل استفاده رایج از سیم‌پیچی مثلث در سیستم‌های انتقال و توزیع است. استفاده از ترانس ستاره – ستاره زمین شده در هر دوطرف باعث عبور جریان‌های هارمونیک مضرب سه از قسمت ولتاژ-پائین به قسمت ولتاژ-بالا منتقل می‌شود.



شکل ۱-۷ نحوه جریان یافتن هارمونیک مرتبه سوم در ترانس‌های سه فاز قدرت

یک‌سری از پیامدهای مهم مرتبط با تحلیل کیفیت توان عبارتند از:

۱. ترانس‌ها،به‌خصوص اتصالات خنثی در برابر گرمایش به وجود آمده توسط بارهای تک فاز در سمت ستاره که دارای هارمونیک سه بزرگی است؛ بسیار حساس هستند.

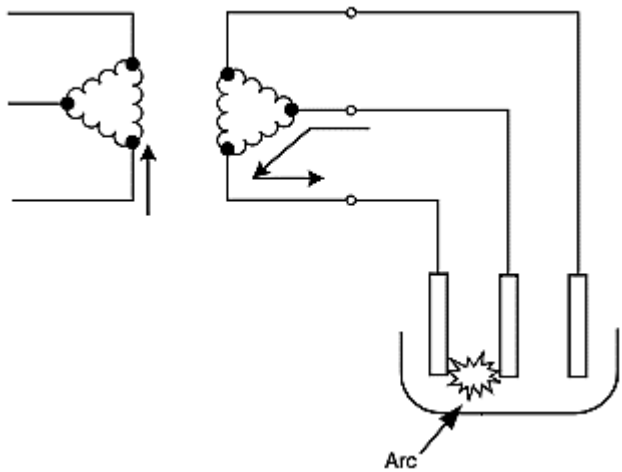
۲. اندازه‌گیری هارمونیک مرتبه سه در قسمت مثلث ترانس بی‌فایده است و مقادیر واقعی آن را نشان نمی‌دهد و نمی‌توان با آن میزان واقعی گرم شدن ترانس را فهمید.
۳. با عایق کردن صحیح اتصالات ترانس می‌توان از جریان یافتن هارمونیک‌های مضرب سه جلوگیری کرد.

حذف نقطه خنثی در سیم‌پیچی‌های ستاره–ستاره جلوی جاری شدن جریان‌های هارمونیک‌های مضرب سه را می‌گیرد؛ گفتنی است ترانس‌های سه هسته مانند سیم‌پیچی مثلث رفتار می‌کنند.

این قوانین تنها راجع به بارهای متعادل صدق می‌کند و در صورت وجود عدم تعادل بار، فرکانس‌های هارمونیک مضرب سه ممکن است مشاهده شود. در حالت نرمال هارمونیک‌های مضرب سه توالی صفر دارند ولی در حالت عدم تعادل ممکن است توالی منفی یا مثبت پیدا کنند.

در کوره‌های قوس الکتریکی سه فاز این اتفاق بسیار رخ می‌دهد و برای جلوگیری از جریان یافتن جریان توالی صفر در ترانس از اتصال مثلث–مثلث استفاده می‌شود. با توجه به اینکه هارمونیک‌های مضرب ۳ را هم‌معنی با توالی صفر می‌دانیم، در جریان خط شاهد مقادیر بزرگی از این هارمونیک‌ها هستیم که دلیلش این است که در هنگام ذوب، کوره در حالت نامتعادل کار می‌کند و بین دو الکترود

جریان برقرار است و مقادیر بزرگ هارمونیک‌های مرتبه ۳ می‌تواند جاری شود که در آن‌ها به میزان برابری توالی‌های مثبت و منفی نیز دیده می‌شود.



شکل ۱-۸ عملیات قوس در کوره باعث ایجاد هارمونیک‌های مضرب ۳ شده و فارغ از سیم‌پیچی مثلث می‌تواند به شبکه بالادست نفوذ کند

۱-۵ شاخص‌های هارمونیک

دو شاخص مهم و پرکاربرد برای بررسی هارمونیک‌های موج، میزان کل اعوجاج هارمونیکی[1] (THD) و کل اعوجاج دیماند[2] (TDD) تعریف می‌شود.

هر دو بیانگر میزان مؤثر شکل موج‌های جریان و ولتاژ می‌باشند.

۱-۵-۱ اعوجاج هارمونیک کل (THD)

بیانگر میزان مؤثر کل مؤلفه‌های هارمونیکی، روی شکل موج دارای اعوجاج است و باعث گرم شدن بیش‌ازحد تجهیزات می‌شود.

برای محاسبه THD داریم:

$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h>1}^{hmax} {M_h}^2}}{M_1}$ در رابطه بالا M_h مقدار rms مؤلفه‌ی h ام مقدار M است.

همچنین رابطه بین THD و rms نیز به‌صورت زیر است:

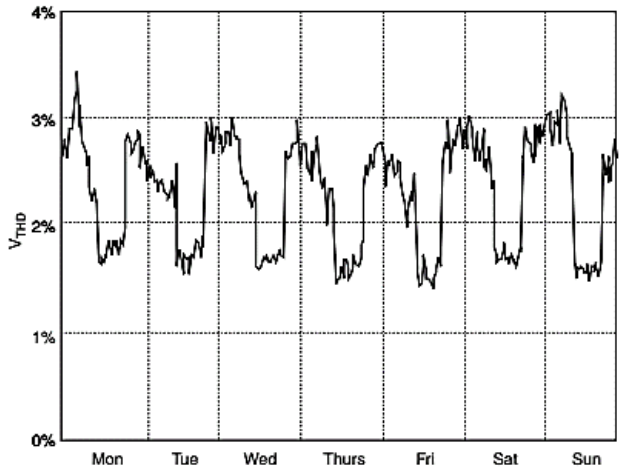
[1] Total Harmonic Distortion

[2] Total Demand Distortion

$$RMS = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{max}} {M_h}^2} = M_1\sqrt{1 + THD^2}$$

THD پارامتری پرکاربرد است، اما محدودیت‌هایی نیز دارد. درواقع این پارامتر بیان می‌کند چقدر گرمای اضافه براثر اعمال ولتاژ اعوجاج دار در اثر گذر از یک‌بار مقاومتی ایجاد می‌شود همچنین تلفات اضافه به دلیل عبور جریان از یک هادی است؛ اما پارامتر خوبی برای نشان دادن تنش‌های عایقی خازن نیست، زیرا مقاومت عایقی یک خازن مرتبط با بیشینه ولتاژ است.

به طور معمول به دلیل متغیر بودن شکل موج ولتاژ در یک بازه زمانی و تغییر بار غیرخطی می‌توان فهمید که *THD* نیز می‌تواند تغییر کند. در شکل ۱-۹ میزان *THD* ولتاژ پست توزیع ۱۳.۲ کیلوولت را طی مدت یک هفته نشان می‌دهد. مقادیر بالای *THD* معمولاً در شب و صبح زود به دلیل بالا بودن نسبت بار غیرخطی به خطی، رخ می‌دهد.



شکل ۱-۹ تغییر اندازه *THD* در طی یک هفته

۱-۵-۲ اعوجاج دیماند کل (TDD)

اعوجاج کل جریان را با مقدار *THD* عنوان کردیم ولی این پارامتر گاهی ایجاد گمراهی می‌کند؛ زیرا موج جریانی کوچک ممکن است *THD* بالایی داشته باشد؛ اما برای سیستم خطر محسوب نمی‌شود. برای مثال خیلی از درایوهای تنظیم سرعت *THD* بالایی دارند، اما در هنگام کار با بارهای کوچک به دلیل کوچک بودن اندازه جریان هارمونیک مشکل‌زا نمی‌شود.

تحلیل‌گران شبکه THD را نسبت به پیک جریان دیماند بار می‌سنجند و به آن اعوجاج دیماند کل (TDD) می‌گویند. در استاندارد $IEEE\ 519$ اعوجاج دیماند کل به‌صورت زیر تعریف‌شده است:

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} {I_h}^2}}{I_L}$$

که در آن I_L میزان پیک جریان دیماند بار که در نقطه اتصال مشترک[1] (PCC) و فرکانس پایه است. دو راه برای اندازه‌گیری I_L وجود دارد. یک‌راه میانگین بیشترین دیماند در ۱۲ ماه یا از روی جداول ارائه‌شده میانگین جریان بار محاسبه می‌شود.

[1] Point of Common Coupling

فصل دوم

منابع تولید هارمونیک‌ها

۲-۱ منابع هارمونیک برای بارهای تجاری

مراکز تجاری مانند مجتمع‌های اداری، مراکز خرید، بیمارستان‌ها و مراکز داده‌های اینترنتی بیشتر توسط بارهایی مانند لامپ‌های فلورسنت (دارای بالاست[1] الکتریکی با بازده بالا)، درایوهای تنظیم سرعت برای سیستم *HVAC*[2]، درایوهای آسانسور و تجهیزات حساس الکترونیکی که توسط منابع سوئیچ شونده تک فاز تغذیه می‌گردد. بارهای تجاری را می‌توان به‌صورت تعداد زیادی تولیدکننده‌های کوچک هارمونیک توصیف کرد. با توجه به تنوع بارهای متفاوت یک‌سری از این هارمونیک‌های کوچک یکدیگر را بی‌اثر می‌کند. اعوجاج ولتاژ بستگی به امپدانس مدار و کل اعوجاج جریان دارد. ازآنجایی‌که خازن‌های جبران‌کننده ضریب توان در بارهای تجاری استفاده نمی‌شوند، امپدانس مدار بیشتر بستگی به امپدانس ترانس ورودی و هادی‌ها دارد.

بنابراین، اعوجاج ولتاژ را می‌توان با ضرب جریان در امپدانس تنظیم‌شده در آن فرکانس تعیین کرد. بارهای غیرخطی تجاری در بخش‌های بعدی موردبررسی قرار داده‌شده است.

۲-۱-۲ منابع قدرت تک فاز

مبدل‌های الکترونیک قدرت دارای ظرفیت بالایی برای تولید جریان‌های هارمونیکی هستند و مهم‌ترین دسته بارهای غیرخطی در شبکه قدرت

[1] Ballast

[2] Heating, Ventilation, and Air Conditioning

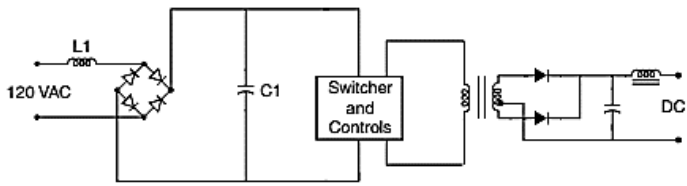
محسوب می‌شوند. پیشرفت در فناوری نیمه‌هادی‌ها انقلابی در زمینه الکترونیک قدرت طی ۲۰ سال گذشته ایجاد کرده است. این تجهیزات شامل درایوهای تنظیم سرعت موتور، منابع الکتریکی، درایوهای موتور *DC*، شارژرهای باتری، بالاست‌های الکتریکی و مبدل‌ها است.

در ساختمان‌های تجاری مشکل بزرگ این است که منابع تغذیه برای تجهیزات الکترونیکی تک فاز، جریان هارمونیکی زیادی تولید می‌کند. تغذیه تجهیزات اداری دارای ریزپردازنده[1]، *DC* است که معمولاً توسط یکسو کننده پل دیودی تک فاز تمام موج تأمین می‌شود و نرخ استفاده از این تجهیزات رو به افزایش است.

دو نوع منبع تغذیه تک فاز برای تجهیزات کامپیوتری کاربرد دارد. درگذشته بیشتر از روش کنترل ولتاژ *AC* به مقدار نیاز روی شینه *DC* استفاده می‌کردند. در این حالت سلف ترانس مانند یک فیلتر عمل کرده و شکل موج ورودی را کمی صاف می‌کند. در فناوری‌های جدیدتر منابع تغذیه سوئیچ شونده از روش تبدیل *DC-DC* استفاده می‌کنند تا به یک خروجی*DC* صاف برسد. پل دیودی ورودی به طور مستقیم به خط *AC* متصل است و ترانس را از مدار خارج می‌کند. این موضوع باعث می‌شود میزان زیادی ولتاژ *DC* روی خازن قرار گیرد. این جریان مستقیم سپس دوباره به جریان متناوب با فرکانس بالا توسط سوئیچ‌ها تبدیل می‌شود. امروزه بسیاری از کامپیوترهای شخصی، چاپگرها، دستگاه‌های کپی و بقیه

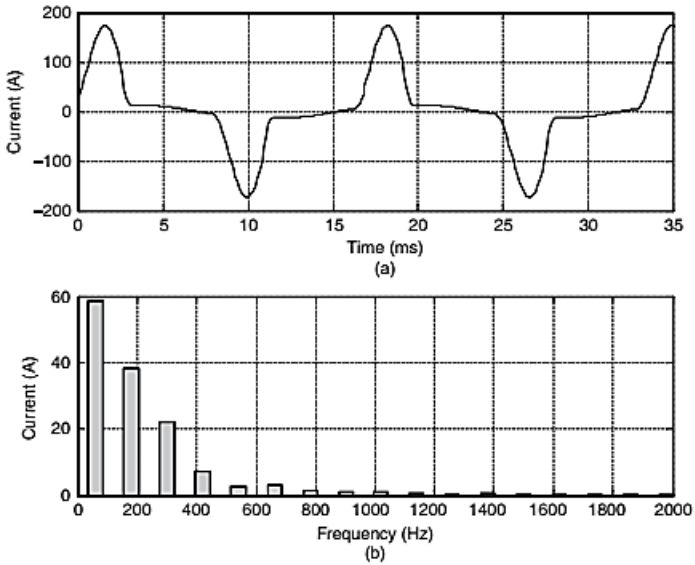
[1] Micro Processor

دستگاه‌های الکترونیکی تک فاز از منابع تغذیه سوئیچی استفاده می‌کنند. از مزیت‌های مهم می‌توان به وزن سبک، اندازه کم، کارایی بالا و عدم نیاز به ترانس آن اشاره کرد و این منابع معمولاً توانایی تحمل تغییرات زیاد ولتاژ را دارند.



شکل ۱-۲ منبع تغذیه سوئیچی

به دلیل عدم وجود اندوکتانس بزرگ در قسمت AC جریان ورودی منابع تغذیه به‌صورت پالس‌های کوچکی خازن C_1 را در هر نیم سیکل شارژ می‌کند. شکل ۲-۲ شکل موج مدار تغذیه تجهیزات الکترونیکی متنوعی با منبع تغذیه سوئیچ شونده کار می‌کنند، آورده شده است.



شکل ۲-۲ طیف هارمونیکی منابع تغذیه سوئیچ شونده

یکی از مشخصه‌های بارز منابع تغذیه سوئیچ شونده، هارمونیک سوم بالای جریان است. ازآنجایی‌که هارمونیک سوم در سیستم سه فاز به نقطه خنثی سرازیر می‌شود، این منابع نگرانی‌هایی برای اضافه‌بار هادی خنثی به‌خصوص در ساختمان‌های قدیمی که هادی خنثی در آنها کوچک‌تر انتخاب می‌شود، ایجاد می‌کند. همین‌طور نگرانی‌هایی بابت گرم شدن ترانس به دلیل ترکیبی از جریان‌های هارمونیک، خنثی و شار سرگردان به وجود می‌آید.

۲-۱-۳ لامپ‌های فلورسنت[1]

روشنایی معمولاً ٤٠ تا ٦٠ درصد بار ساختمان‌های تجاری را تشکیل می‌دهد. طبق مطالعاتی که در این زمینه انجام‌شده، ۷۷ درصد روشنایی انجام‌شده است، لامپ‌های فلورسنت و فقط ١٤ درصد آن لامپ‌های رشته‌ای می‌باشند؛ زیرا لامپ‌های فلورسنت گزینه محبوبی برای صرفه‌جویی در مصرف انرژی می‌باشند.

لامپ‌های فلورسنت درواقع از نوع لامپ‌های تخلیه[2] هستند درنتیجه به یک بالاست نیاز دارند تا بتواند ولتاژ اولیه برای شروع تخلیه الکتریکی بین دو الکترود را تأمین کند. وقتی تخلیه اتفاق بیفتد ولتاژ افت می‌کند درحالی‌که جریان قوس افزایش می‌یابد. اساساً مانند یک اتصال کوتاه بین دو الکترود و بالاست به‌سرعت جریان را برای نگه‌داشتن یک‌میزان مشخص روشنایی محدود می‌کند.

دو نوع بالاست داریم: ۱. مغناطیسی ۲. الکترونیکی

بالاست استاندارد مغناطیسی توسط یک ترانس هسته آهنی و یک خازن تشکیل‌شده است. بالاست مغناطیسی می‌توانند تا دو لامپ فلورسنت را کنترل کند و تحت فرکانس شبکه کار می‌کند. بالاست مغناطیسی هسته آهنی باعث افزایش تلفات حرارتی می‌شود و در برابر بالاست الکترونیکی بازدهی پایین‌تری دارد.

[1] Fluorescent Lighting
[2] Discharge Lamps

بالاست الکترونیکی یک منبع تغذیه سوئیچ شونده در اختیار دارد که ولتاژ ورودی در فرکانس پایه را به ولتاژی با فرکانس خیلی بیشتر معمولاً بین ۲۵ تا ۴۰ کیلوهرتز تبدیل می‌کند. این موج فرکانس بالا دو مزیت دارد:

- یک سلف کوچک کافی است تا جریان را محدود کند.
- فرکانس بالا باعث محدودسازی فلیکرهای[1] ۱۲۰-۱۰۰ هرتز ناشی از بالاست‌های مغناطیسی، هسته آهنی می‌شود. بالاست الکترونیکی تا ٤ لامپ فلورسنت را می‌تواند کنترل کند.

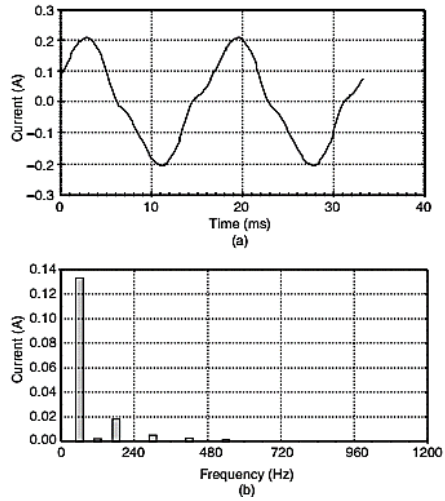
بالاست‌های مغناطیسی استاندارد منابع بی‌خطری ازنظر تولید هارمونیک هستند و اعوجاج هارمونیکی اصلی از رفتار قوس می‌آید. در شکل ۲-۳ جریان اندازه‌گیری شده یک لامپ فلورسنت و طیف هارمونیک آن آورده شده است. *THD* جریان حدود ۱۵ درصد است برای مقایسه یک بالاست الکترونیکی می‌تواند ۲ تا ۳ برابر هارمونیک خروجی بالاست مغناطیسی را تولید کند. در شکل ۲-٤ مشاهده می‌کنیم یک لامپ فلورسنت با بالاست الکترونیکی *THD* جریان ۱٤ درصد دارد. دیگر بالاست‌های الکترونیکی به‌طور خاصی طراحی شدند تا اعوجاج هارمونیکی کمتری نسبت به بالاست مغناطیسی تولید کنند.

بالاست الکترونیکی معمولاً *THD* بزرگ‌تر از ۳۲ درصد طبق استاندارد *ANSI C82.11.1993* بسیاری از بالاست‌های الکترونیکی به یک فیلتر پسیو

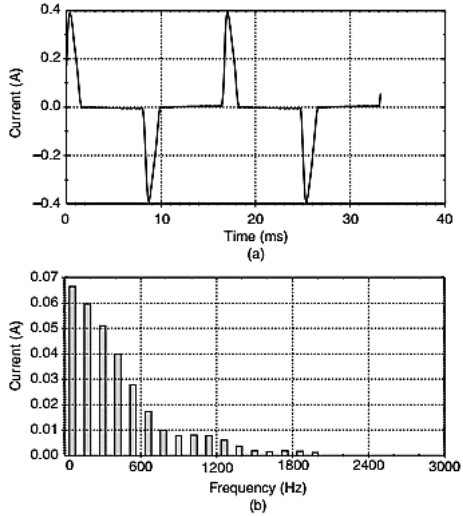
[1] Flicker

تجهیز شده‌اند تا میزان اعوجاج هارمونیکی را به کمتر از ۲۰ درصد کاهش دهند.

ازآنجایی‌که لامپ‌های فلورسنت منبع اصلی هارمونیک در ساختمان‌های تجاری محسوب می‌شوند سعی می‌شود تا آنها به نحوی مساوی بین فازها تقسیم‌شده تا فازها متعادل بمانند و با کمک یک ترانس مثلث می‌توان میزان هارمونیک سه جریان یافته به سمت شبکه را کاهش داد؛ اما باید توجه داشت که هرچقدر فازها خوب متعادل شده باشند یک ترانس ستاره – ستاره نمی‌تواند مانع جریان یافتن هارمونیک‌های سه شود.



شکل ۲-۳ در یک لامپ فلورسنت (a) شکل موج جریان بالاست مغناطیسی (b) طیف هارمونیک مربوط به آن



شکل ۲-٤ در یک لامپ فلورسنت (a) شکل موج جریان بالاست الکترونیکی (b) طیف هارمونیک مربوط به آن

۲-۱-٤ درایوهای تنظیم سرعت برای HVAC و آسانسور

به‌طورمعمول از درایوهای تنظیم سرعت در بارهای تجاری در قسمت موتور آسانسور و در پمپ‌ها و فن‌های سیستم *HVAC* استفاده می‌شود. درایوهای تنظیم سرعت شامل یک مبدل الکترونیک قدرت که ولتاژ و فرکانس را تغییر می‌دهد و از این طریق سرعت موتور را کنترل می‌کند.

درایوهای تنظیم سرعت در بارهای تجاری برای کم کردن سرعت پمپ یا فن استفاده می‌شود.

۲-۲ هارمونیک‌های بار صنعتی

مراکز صنعتی مدرن را می‌توان به‌صورت تعداد زیادی بار غیرخطی توصیف کرد. این بارهای غیرخطی جریان‌های هارمونیک زیادی به شبکه تزریق می‌کند و باعث اعوجاج ولتاژ می‌شود. این مشکلات هارمونیکی باعث پایین آمدن ضریب توان می‌شود. مراکز صنعتی برای بهبود ضریب توان و عدم پرداخت جریمه معمولاً از بانک خازنی استفاده می‌کنند. استفاده از بانک‌های خازنی برای اصلاح ضریب توان پتانسیل ایجاد رزونانس با جریان‌های هارمونیک بارهای غیرخطی را بالا می‌برد. بیشترین اعوجاج ولتاژ معمولاً روی شینه فشار ضعیف که خازن‌ها قرار دارند، رخ می‌دهد. پدیده تشدید (رزونانس) باعث افزایش تلفات حرارتی ترانس و موتور و عدم عملکرد صحیح تجهیزات حساس الکترونیکی می‌شود. بارهای صنعتی غیرخطی را به سه دسته می‌توان تقسیم کرد:

۱. مبدل‌های سه فاز قدرت

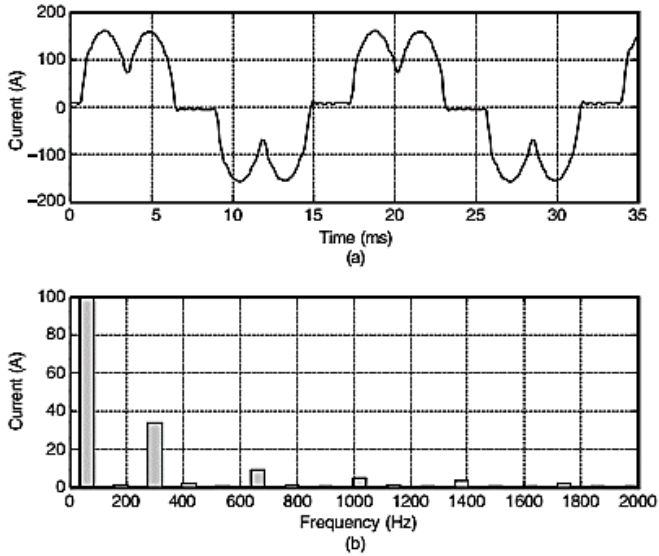
۲. دستگاه‌های قوس

۳. دستگاه‌های اشباع شونده[1]

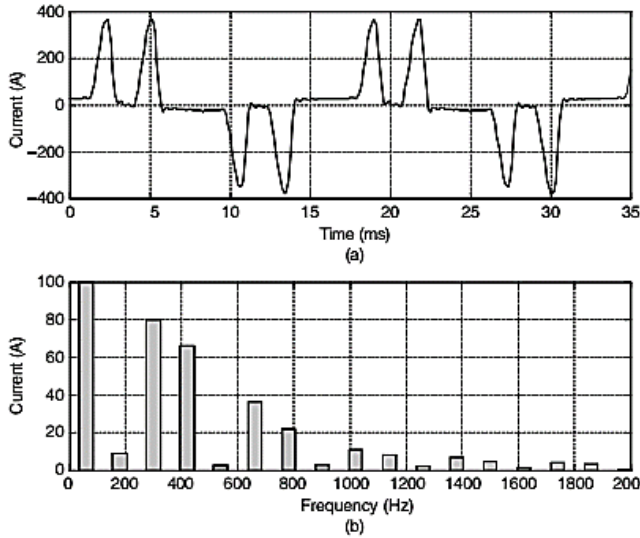
۲-۲-۱ مبدل‌های قدرت سه فاز

مبدّل‌های سه فاز قدرت ازنظر تولید جریانات هارمونیک سه با مبدّل‌های تک فاز متفاوت می‌باشند چراکه هارمونیک مرتبه سه بسیار کمی تولید می‌کنند، اما با این‌حال این مبدل‌ها می‌توانند منبع دیگر هارمونیک‌ها باشند.

[1] Saturable Devices



شکل ۲-۵ شکل موج جریان و طیف هارمونیک درایو سرعت مدل *CSI*



شکل ۲-٦ شکل موج جریان و طیف هارمونیک درایو سرعت *PWM*

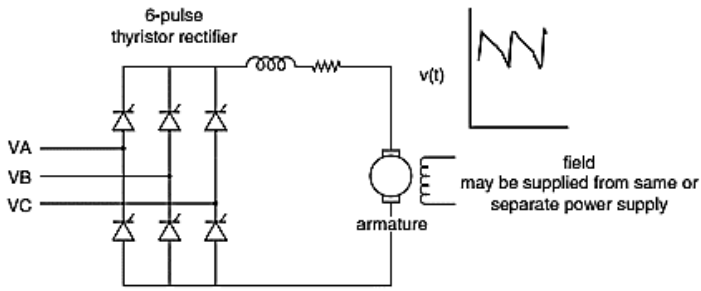
ورودی درایوهای *PWM* بیشتر به‌صورت مدلی از منابع تغذیه سوئیچ شونده مشابه کامپیوترها هستند. یکسو کننده به‌طور مستقیم از شینه *AC* تغذیه می‌شود و به سمت خازن‌های روی شینه *DC* هدایت می‌شود. باوجود میزان اندوکتانس کم، خازن‌ها در پالس‌های کوتاهی شارژ می‌شوند و شکل موج‌های متفاوت گوش خرگوشی مانندی با اعوجاج زیاد شکل می‌دهند. منابع تغذیه سوئیچ شونده عموماً برای بارهای کوچک کاربرد دارد؛ اما درایوهای *PWM* برای بارهایی تا ۵۰۰ اسب بخار[1] نیز استفاده می‌شوند.

[1] هر اسب بخار معادل ۷٤٦ وات است.

درایوهای *DC*: تنها مرحله کار این درایوها یکسوسازی است. به همین منظور نیازمند سیستم کنترلی ساده هستند که مزیت اصلی آن‌ها به شمار می‌رود. درایوهای *DC* دارای بازه سرعتی و گشتاور راه‌اندازی بیشتری نسبت به درایوهای *AC* هستند؛ البته باید در نظر داشت هزینه تهیه و نگهداری موتورهای *DC* نیز بالا است.

بیشتر درایوهای *DC* از یکسو کننده‌های ٦ پالس استفاده می‌کنند و در درایوهای بزرگ‌تر شاهد استفاده از یکسو کننده‌های ۱۲ پالس نیز هستیم که منجر به کاهش جریان‌های تریستور[1] و حذف یک‌سری از هارمونیک‌های جریان است. دو هارمونیک اصلی درایو ٦ پالسه که دارای دامنه بزرگ‌تری هستند، هارمونیک مرتبه ۵ و ۷ است. از طرفی با استفاده از درایو ۱۲ پالس انتظار می‌رود ۹۰ درصد هارمونیک‌های ۵ و ۷ حذف شود؛ اما عیب اصلی آن بیشتر شدن تجهیزات الکترونیک قدرت و همچنین نیاز به ترانس اضافه در بیشتر موارد است که درنهایت منجر به بالا رفتن هزینه می‌شود.

[2] Thyristor



شکل ۲-۷ درایو *DC* ٦ پالسه

درایوهای *AC*: در درایوهای *AC* خروجی یکسوشده به موجی با اندازه و فرکانس دلخواه بازگرداننده می‌شود. اینورترها به دو گروه اینورتر منبع ولتاژ [1] (*VSI*) و اینورتر منبع جریان [2] (*CSI*) تقسیم می‌شوند. اینورتر *VSI* نیازمند ولتاژ *DC* ثابت با ریپل کم در ورودی اینورتر است که به کمک یک فیلتر *LC* در قسمت لینک *DC* امکان‌پذیر است. اینورتر *CSI* نیازمند جریان ثابت ورودی دارد درنتیجه یک سلف سری در قسمت لینک *DC* لازم است.

درایوهای *AC* بیشتر برای موتورهای القایی قفسه سنجابی کاربرد دارند. این دسته از موتورها هزینه نگهداری کمی دارند برای همین استفاده از آن‌ها رایج است. موتورهای سنکرون درجاهایی که کنترل دقیق سرعت مدنظر باشد، کاربرد دارند.

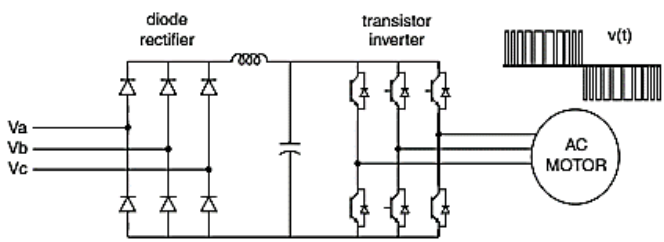
[1] Voltage Source Inverter

[2] Current Source Inverter

یکی از درایوهای محبوب و پراستفاده اینورتر *VSI* روش *PWM* می‌باشد که شکل موج *AC* را به‌صورت قطاری از پالس‌های *DC* با پهنای متغیر شبیه‌سازی می‌کند. اینورترها معمولاً از *SCR* [1] یا تریستورهای گیتی (*GTO*) [۲] یا ترانزیستورهای قدرت مخصوص استفاده می‌کنند.

در حال حاضر درایوهای *VSI* مدل *PWM* بهترین بازدهی انرژی برای طیف وسیعی از سرعت تا توان ۵۰۰ اسب بخار را دارا هستند.

یکی دیگر از مزایای *PWM* این است که نیازی نیست ولتاژ خروجی یکسوکننده‌ها برای کنترل سرعت موتور تغییر کند. این موضوع به تریستورهای یکسوکننده این اجازه را می‌دهد تا با دیود تعویض شوند و جریان کنترل تریستور حذف گردد.

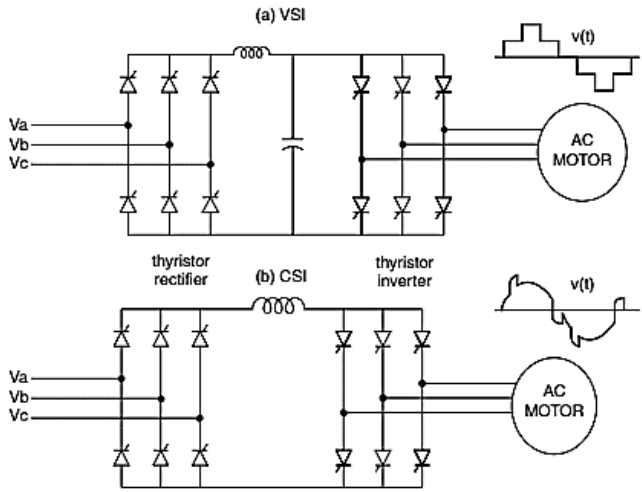


شکل ۲-۸ درایو *PWM*

[1] Silicon-Controlled Rectifier

[2] Gate Turn off Thyristor

درایوهای توان بالا از اینورترها و *SCR* ها استفاده می‌کنند که مانند شکل ۲-۹ می‌تواند ٦ پالسه یا مانند درایوهای بزرگ *DC* ۱۲ پالسه باشد. درایوهای *VSI* برای موتورهایی که نیاز به تغییر دائمی سرعت ندارند مناسب و درایوهای *CSI* دارای قابلیت خوب برای شتاب‌گیری یا ترمزگیری هستند.

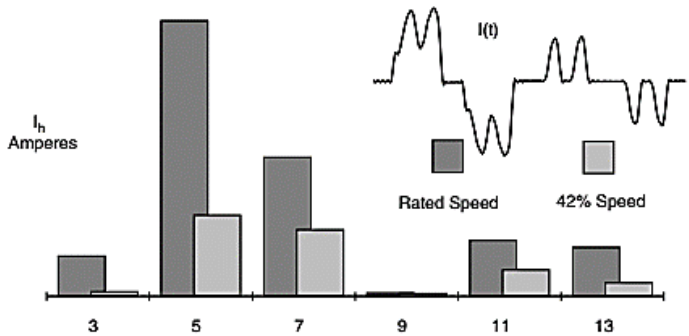


شکل ۲-۹ درایوهای بزرگ *AC*

تأثیرات شرایط عملیاتی: جریان اعوجاج هارمونیکی در درایوهای تنظیم سرعت ثابت نیستند. شکل موج با توجه به‌سرعت و گشتاور تغییر می‌کند.

شکل ۲-۱۰ نشان‌دهنده دو شرایط متفاوت عملیاتی برای درایو تنظیم سرعت *PWM* است، وقتی شکل موج ٤۲ درصد سرعت باشد نسبت به‌سرعت نامی، جریان هارمونیکی بیشتری تزریق می‌کند. این عامل اصلی

محدودکننده در طراحی است نه بیشترین *THD* و مهندسان باید با درک مناسبی از اصول این درایوها طراحی انجام دهند.



شکل ۲-۱۰ تأثیر درایوهای PWM روی هارمونیک‌های جریان در سرعت نامی و ٤٢ درصد سرعت نامی

۲-۲-۲ دستگاه‌های قوس

دستگاه‌هایی مانند کوره قوس، دستگاه‌های جوشکاری، لامپ‌های تخلیه در گاز (فلورسنت، بخار سدیم، بخار جیوه و...) همراه با بالاست‌های مغناطیسی به‌جای بالاست الکترونیکی در این دسته قرار می‌گیرند.

منحنی ولتاژ – جریان قوس‌های الکتریکی غیرخطی است. در پی ایجاد قوس ولتاژ کاهش می‌یابد، درصورتی‌که جریان قوس افزایش می‌یابد که توسط امپدانس شبکه محدود می‌شود. این موضوع باعث می‌شود، در این قسمت از سیکل عملیاتی لامپ‌های تخلیه، دارای رفتاری مشابه مقاومت منفی باشد.

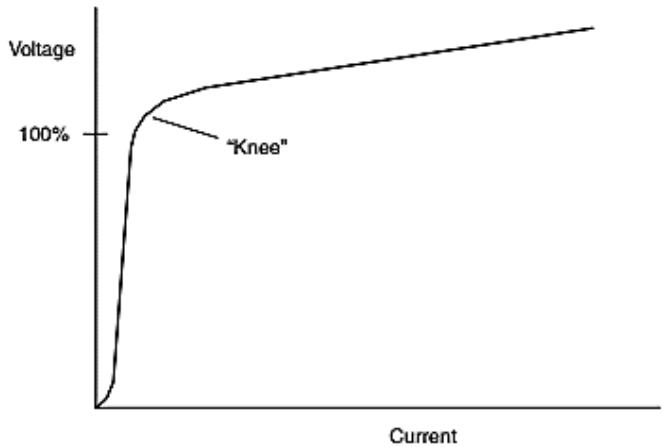
در دستگاه‌های قوس الکتریکی، معمولاً امپدانس محدودکننده بیشتر سلف کابل‌ها است. قوس‌های الکتریکی را می‌توان به‌عنوان بهترین منبع ولتاژ هارمونیکی معرفی کرد، اما به دلیل امپدانس بالاست یا الکترودها به‌صورت بافر عمل می‌کنند و اعوجاج ولتاژ به چشم نمی‌آید. درحالی‌که جریان به‌صورت قابل‌توجهی دچار اعوجاج می‌شود. به‌غیراز زمانی که در مدار رزونانس رخ دهد برای پیدا کردن جواب واقعی از مدار تونن باید استفاده کرد.

مؤلفه‌های هارمونیکی کوره قوس و بقیه دستگاه‌های قوس مشابه بالاست مغناطیسی است. دستگاه‌های قوس سه فاز می‌توانند به نحوی تنظیم شوند تا هارمونیک سه را با توجه به سربندی ترانس حذف گردد. بااین‌حال در کوره‌های قوس به دلیل عدم تقارن عملیات کوره در هنگام ذوب ممکن است در حذف هارمونیک سه موفق نباشیم ولی در مرحله پالایش که قوس ثابت است حذف هارمونیک‌های سه بهتر انجام می‌شود.

۲-۲-۳ دستگاه‌های اشباع شونده

تجهیزات این گروه شامل ترانس‌ها و هر دستگاه الکترومغناطیسی که دارای هسته آهنی، ازجمله موتورها است. هارمونیک‌ها در اثر خاصیت غیرخطی مغناطیس شوندگی آهن است. ترانس‌های قدرت به نحوی طراحی‌شده‌اند تا در حالت نرمال کمی پائین تر از نقطه زانویی منحنی مغناطیس شوندگی کار کنند. چگالی شار نقطه کار ترانس بر اساس بهینه‌سازی پارامترهایی همچون هزینه آهن، تلفات بی‌باری و نویز تعیین می‌شود.

برق منطقه‌ای جریمه سنگینی برای بالا بودن تلفات بی‌باری و تلفات بار و نویز در نظر می‌گیرد، به همین منظور در ترانس با بالا بردن میزان آهن هسته به منحنی اشباع بالاتر و درنتیجه جریان‌های هارمونیک پائین تر می‌رسیم، اما هزینه بسیار بالا می‌رود. برای طراحی ترانس لازم به محاسبه نقطه بهینه است.



شکل ۲-۱۱ منحنی مغناطیسی هسته ترانس

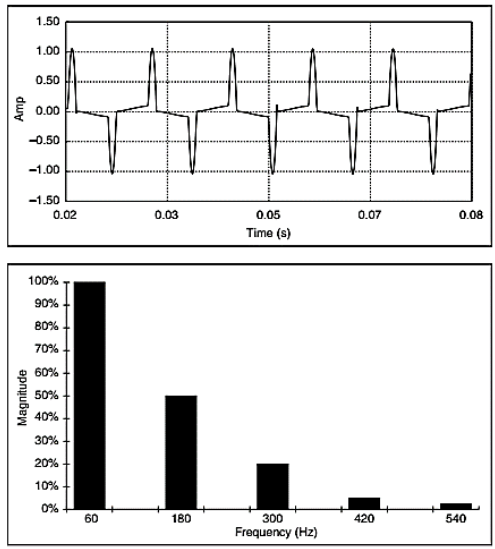
با اینکه جریان ترانس در نقطه کار دارای هارمونیک‌های بسیاری است؛ اما اندازه آنها کمتر از یک درصد جریان بار نامی است. به همین منظور ترانس‌ها مانند دستگاه‌های قوس و مبدّل‌ها که توانایی تولید هارمونیک تا ۲۰ درصد جریان نامی خود را دارند؛ مشکل‌زا نیستند. اثر آنها در سیستم توزیع به دلیل تعداد زیاد ترانس‌ها قابل‌مشاهده است.

بیشتر هارمونیک‌های سه، صبحگاه که بار کم است و ولتاژها افزایش می‌یابند، زیاد است. اعوجاج ولتاژی ترانس که به دلیل بیش تحریکی ترانس انجام می‌شود؛ بیشتر در زمان کم باری محسوس است.

برخی از ترانس‌ها بر اساس کاربرد خاصی که دارند ممکن است در محدوده اشباع طراحی شوند؛ به‌عنوان‌مثال ترانس‌های ۱۸۰ هرتز در کوره‌های القایی.

موتورها نیز وقتی در حالت بیش تحریک قرار می‌گیرند، دچار اعوجاج جریان می‌شوند، اما معمولاً عواقب زیادی ندارد.

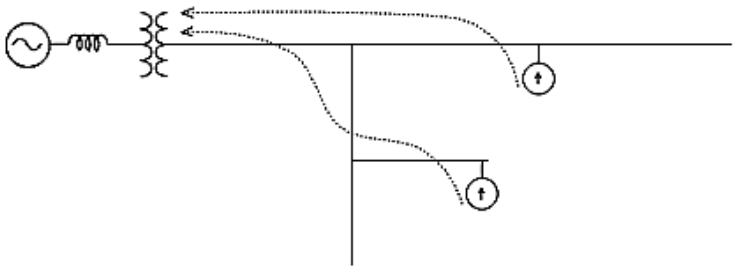
در شکل ۲-۱۲ یک ترانس سه فاز ستاره زمین شده آورده شده است که دارای هارمونیک سه زیادی است. اتصالات مثلث و ستاره زمین نشده جلوی جریان توالی صفر که همان هارمونیک‌های مضرب ۳ است را می‌گیرد مگر اینکه عدم تعادل در سیستم وجود داشته باشد.



شکل ۲-۱۲ طیف جریان مغناطیس شوندگی و هارمونیک‌های ترانس

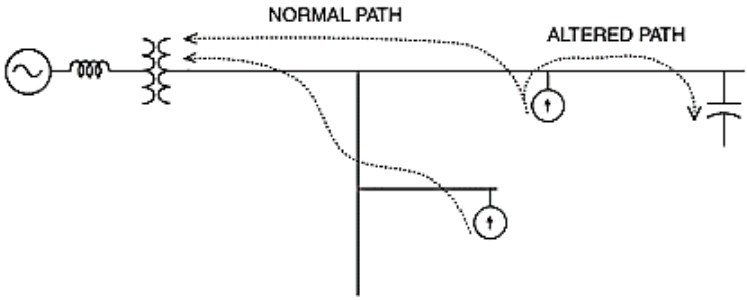
۲-٤ موقعیت‌یابی منشأ هارمونیک‌ها

در سیستم‌های توزیع شعاعی و مصرف‌کنندگان صنعتی جریان هارمونیک از سمت بار به سمت منبع حرکت می‌کند. امپدانس سیستم قدرت از چشم جریانات هارمونیکی کمترین مقدار را دارد؛ بنابراین بیشتر جریان به سمت منبع سرازیر می‌شود. از این موضوع برای موقعیت‌یابی منشأ هارمونیک استفاده می‌شود. با استفاده از وسایل آنالیز کیفیت توان می‌توان مشخصات مؤلفه‌های هارمونیک جریان را اندازه‌گیری کرد.



شکل ۲-۱۳ مسیر حرکت جریان هارمونیک در شبکه شعاعی

خازن‌های اصلاح ضریب توان می‌توانند الگوی جریانی یکی از این هارمونیک‌ها را عوض کنند در این حالت با دنبال کردن مسیر جریان هارمونیک، به‌جای منشأ اصلی به بانک خازنی می‌رسیم؛ بنابراین برای پیدا کردن منشأ هارمونیک ضروری است بانک خازنی را موقتاً از مدار خارج کنیم. رزونانس معمولاً روی یکی از فرکانس‌های هارمونیکی که ضریبی از فرکانس پایه است رخ می‌دهد. در هنگام اندازه‌گیری جریان خازن، اگر یکی از مؤلفه‌های هارمونیک مقدار خیلی زیادی پیداکرده باشد احتمال اینکه بانک خازنی باعث رزونانس شده باشد؛ زیاد است.



شکل ۲-۱٤ بانک‌های خازنی می‌توانند مسیر جریان هارمونیک‌ها را تغییر دهند

راه دیگر برای یافتن منشأ هارمونیک، از طریق ارتباط دادن متغیرهای زمانی اعوجاج ولتاژ با مشخصات بار است. الگوهایی که با اندازه‌گیری اعوجاج هارمونیکی بعضی از بارها ازجمله: کوره‌های قوس، درایوهای میل و... با ارتباط دادن زمان اندازه‌گیری شده با زمان محاسبه‌شده عملیاتی، می‌توان منشأ هارمونیک را متوجه شد.

فصل سوم

مشخصات پاسخ سیستم و رزونانس

در شبکه‌های قدرت، پاسخ سیستم به‌اندازه منشأ هارمونیک‌ها مهم است. درواقع سیستم‌های قدرت در برابر جریانات هارمونیکی تولیدشده توسط بارها، مقاوم هستند؛ اما در اثر تقابل نامطلوب با امپدانس سیستم دچار مشکل می‌شود.

پیدا کردن منشأ هارمونیک تنها نصف کار تحلیل هارمونیک است. پاسخ سیستم قدرت در هرکدام از فرکانس‌های هارمونیک، اثر واقعی بار غیرخطی را روی اعوجاج هارمونیکی ولتاژ می‌گذارد.

سه پارامتر اصلی روی مشخصه پاسخ سیستم تأثیر می‌گذارد:

- امپدانس سیستم
- وجود بانک خازنی
- مقدار بار مقاومتی (اهمی) در سیستم

۳-۱ امپدانس سیستم

سیستم قدرت در فرکانس نامی خاصیت سلفی دارد و به امپدانس معادل گاهی راکتانس اتصال کوتاه نیز گفته می‌شود. معمولاً از تأثیرات خازنی در قسمت سیستم‌های توزیع صرف‌نظر می‌کنیم. در تحلیل هارمونیکی شبکه، امپدانس اتصال کوتاه در نقطه‌ای که خازن قرار گرفته است، لازم است و درصورتی‌که به‌طور مستقیم این پارامتر در دسترس نبود، می‌توان از طریق مطالعه اتصال کوتاه (جریان و قدرت اتصال کوتاه)، به‌صورت زیر به دست آورد:

$$Z_{SC} = R_{SC} + jX_{SC} = \frac{kV^2}{MVA_{SC}} = \frac{kV \times 1000}{\sqrt{3} I_{SC}}$$

Z_{SC} = امپدانس اتصال کوتاه

R_{SC} = مقاومت اتصال کوتاه

X_{SC} = راکتانس اتصال کوتاه

kV = ولتاژ فاز به فاز برحسب کیلوولت

MVA_{SC} = قدرت اتصال کوتاه سه فاز برحسب مگا ولت‌آمپر

I_{SC} = جریان اتصال کوتاه برحسب آمپر

امپدانس اتصال کوتاه به‌صورت فازوری بیان می‌شود؛ یعنی هم مقاومت هم راکتانس را در خود دارد، اما اگر اطلاعات فازوری وجود نداشت. فرض می‌کنیم امپدانس کاملاً سلفی (راکتیو) است. میزان راکتانس سلفی به‌صورت خطی با فرکانس تغییر می‌کند (اشتباهی رایج بین تحلیل‌گران هارمونیک این است که فراموش می‌کنند راکتانس را متناسب با فرکانس تغییر دهند). راکتانس در هارمونیک مرتبه h ام برابرست با $X_h = hX$.

در بیشتر سیستم‌های قدرت می‌توان فرض کرد مقاومت زیر هارمونیک نهم تغییر آن‌چنانی نمی‌کند. برای خطوط و کابل‌ها، مقاومت با مجذور فرکانس متناسب است و اثر پوستی در فرکانس‌های بالا بیشتر می‌شود.

به‌استثنای ترانس‌ها به دلیل وجود تلفات جریان گردابی[1]، مقاومت ظاهری ترانس‌های بزرگ نیز با فرکانس متغیر است و در میرا کردن رزونانس می‌تواند مفید باشد. در ترانس‌های کوچک زیر *KVA* 100 ، مقاومت سیم‌پیچی در برابر امپدانس بزرگ است و باتلاقی برای جریان‌های گردابی می‌شود و در مقاومت ظاهری تا فرکانس ۵۰۰ هرتز تفاوت آن‌چنانی رخ نمی‌دهد. ترانس‌های کوچک‌تر نسبت $\frac{X}{R}$ بین ۱ تا ۲ دارند درحالی‌که ترانس‌های پست برق معمولاً نسبت $\frac{X}{R}$ بین ۲۰ تا ۳۰ است.

درنتیجه مدل امپدانسی با دقت بیشتری باید موردبررسی قرار گیرد؛ زیرا در نظر نگرفتن مقاومت بیشتر اعوجاج هارمونیکی زیادی را به وجود می‌آورد. ازآنجایی‌که با تقریب خوبی امپدانس غالب شینه موردمطالعه همان امپدانس ترانس باشد داریم:

$$X_{SC} = X_{tx}$$

امپدانس ترانس را نیز می‌توان از روی پلاک ترانس به‌صورت زیر به دست آورد:

$$X_{tx} = \left(\frac{kV^2}{MVA_{3\emptyset}}\right) \times Z_{tx}(\%)$$

[1] Eddy Current losses

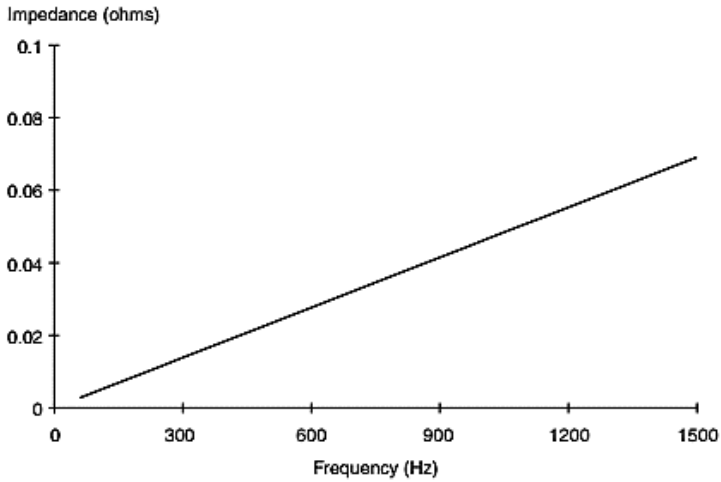
که در آن $MVA_{3\varphi}$ توان نامی ترانس است که در آن امپدانس عمدتاً سلفی است.

به‌عنوان‌مثال برای یک ترانس $1500\ KVA$ و ٦ درصد امپدانس معادل در قسمت ٤٨٠ ولت برابر است با:

$$X_{tx} = \left(\frac{kV^2}{MVA_{3\emptyset}}\right) \times Z_{tx}\ (\%) = \left(\frac{0.48^2}{1.5}\right) \times 0.06$$

$$= 0.0092\ \Omega$$

برای یک سیستم سلفی (خازن نصب نشده باشد) نمودار مشخصه امپدانسی به‌صورت خطی مانند شکل ۳-۱ است. سیستم‌های قدرت در واقعیت به این خوبی رفتار نمی‌کنند (خطی نیستند). این مدل ساده اثر خازنی را در نظر نمی‌گیرد که بدون آن تحلیل هارمونیک بی‌معنی است.



شکل ۳-۱ نمودار امپدانس فرکانس در سیستم سلفی

۳-۲ امپدانس خازنی

خازن‌های موازی در محل مصرف‌کننده برای اصلاح ضریب توان و همچنین در سیستم توزیع برای کنترل ولتاژ، به طرز وحشتناکی در مشخصه امپدانس–فرکانس تغییر ایجاد می‌کنند. خازن‌ها هارمونیک تولید نمی‌کنند، اما تشدید اعوجاج هارمونیکی می‌تواند به دلیل وجود آن‌ها در مدار رخ دهد. درحالی‌که راکتانس سلفی با بالا رفتن فرکانس زیاد می‌شود؛ راکتانس خازنی کاهش می‌یابد.

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C}$$

راکتانس خازنی معادل خط به زمین در فرکانس پایه برای یک بانک خازنی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$X_C = \frac{kV^2}{Mvar}$$

برای بانک‌های سه فاز از ولتاژ خط و توان راکتیو نامی سه فاز در رابطه بالا استفاده می‌شود. برای واحدهای تک فاز از ولتاژ نامی و توان راکتیو نامی استفاده می‌شود. به‌عنوان‌مثال برای بانک خازن سه فازی با توان نامی 1200 *KVAr* و 13.8 *KV* داریم:

$$X_C = \frac{kV^2}{Mvar} = \frac{13.8^2}{1.2} = 158.7\ \Omega$$

۳-۳. رزونانس موازی

تمام مدارهای دارای خازن و سلف دارای حداقل یک فرکانس طبیعی می‌باشند. هنگامی‌که یکی از این فرکانس‌ها، با فرکانس‌هایی که در سیستم قدرت وجود دارد یکسان باشد پدیده تشدید (رزونانس) رخ می‌دهد و ولتاژ و جریان به طرز وحشتناکی در آن فرکانس زیاد می‌شود که ریشه اصلی تمامی مشکلات اعوجاج هارمونیکی در شبکه است. شکل ۳-۲ یک سیستم توزیع که پتانسیل رخ دادن رزونانس در آن بالاست را نشان می‌دهد. از دیدگاه منابع هارمونیک، خازن موازی با سلف مدار معادل (سلف منبع

و ترانس) می‌شود. رزونانس موازی زمانی رخ می‌دهد که راکتانس خازنی و راکتانس سلفی سیستم توزیع یکدیگر را خنثی کنند.

فرکانسی را که در آن این اتفاق رخ می‌دهد؛ می‌توان از رابطه زیر به دست آورد:

$$f_P = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{L_{eq}C} - \frac{R^2}{4{L_{eq}}^2}} \approx \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{L_{eq}C}}$$

R = مقاومت معادل منبع و ترانس

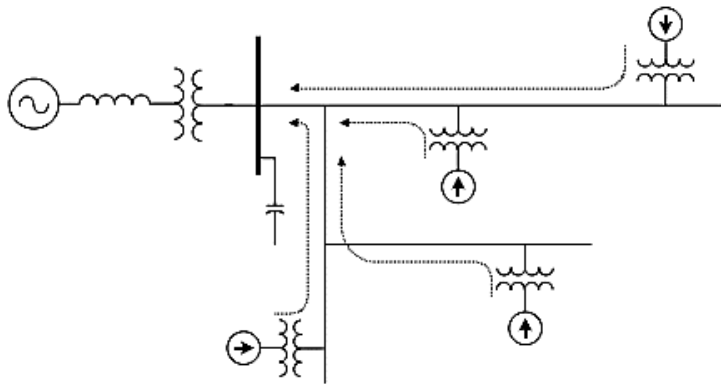
L_{eq} = اندوکتانس معادل منبع و ترانس

C = کاپاسیتانس بانک خازنی

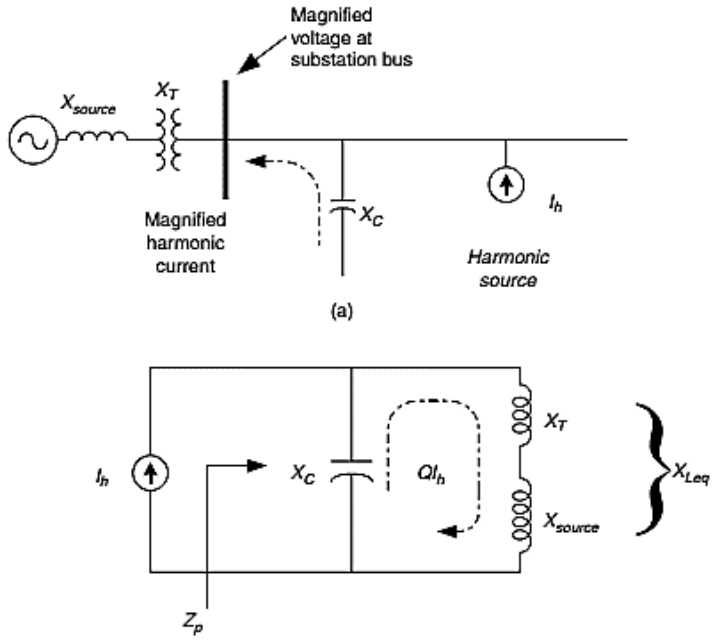
در فرکانس رزونانس، امپدانس ظاهری مدار موازی خازن و سلف از دید منبع جریان هارمونیک بسیار بزرگ می‌شود.

$$Z_p = \frac{X_C\left(X_{L_{eq}} + R\right)}{X_C + X_{L_{eq}} + R} = \frac{X_C\left(X_{L_{eq}} + R\right)}{R}$$

$$\approx \frac{X_{Leq}}{R} = \frac{{X_C}^2}{R} = QX_{L_{eq}} = QX_C$$



شکل ۳-۲ سیستمی با پتانسیل رزونانس موازی.



شکل ۳-۳ در فرکانس رزونانس، بانک خازنی به‌صورت موازی با اندوکتانس سیستم دیده می‌شود.

در رابطه قبل داریم $Q = X_L/R = X_C/R$ و $R \ll X_{Leq}$ در نظر باید داشت که راکتانس در این معادله در فرکانس رزونانس محاسبه‌شده است.گاهی Q را به گاهیان ضریب کیفیت می‌شناسیم که تیز بودن فرکانس پاسخ را عنوان می‌کند.Q بسته به موقعیت سیستم قدرت می‌تواند بسیار تغییر کند در سیستم‌های توزیع می‌تواند کمتر از ۵ و در شینه ثانویه ترانس‌های کاهنده بزرگ از ۳۰ بیشتر می‌شود. همان‌طور که در معادلات هم مشخص است، یک هارمونیک جریان کوچک در هنگام رزونانس می‌تواند افت ولتاژ شدید روی امپدانس ظاهری مدار ایجاد کند.

حال رفتار جریان را هنگام رزونانس موازی بررسی می‌کنیم. اگر جریانی که از بانک خازنی به سمت شبکه قدرت سرازیر می‌شود را $I_{resonance}$ بنامیم خواهیم داشت:

$$I_{resonance} = \frac{V_P}{X_C} = \frac{QX_C I_h}{X_C} = QI_h$$

$$I_{resonance} = \frac{V_P}{X_{L_{eq}}} = \frac{QX_{L_{eq}} I_h}{X_{L_{eq}}} = QI_h$$

از معادلات مشخص است جریان‌هایی که از بانک خازن به سمت شبکه سرازیر می‌شود نیز Q برابر بزرگ می‌شوند. این پدیده می‌تواند باعث خرابی خازن، انفجار فیوز یا گرمایش بیش‌ازحد ترانس شود.

میزان افزایش ولتاژ و جریان را می‌توان به کمک اندازه بانک خازنی مشخص کرد در شکل ۳-٤ اثر اندازه بانک خازنی در برابر امپدانس مشاهده‌شده توسط منبع هارمونیک، در مقایسه با زمانی که خازن نداریم آورده شده است.

تحلیل‌گران سیستم‌های قدرت معمولاً مقادیر C و L را ندارند برای همین ترجیح می‌دهند از رابطه زیر، مقدار هارمونیک رزونانسی h_r را محاسبه کنند.

$$h_r = \sqrt{\frac{X_C}{X_{SC}}} = \sqrt{\frac{MVA_{SC}}{Mvar_{cap}}} \approx \sqrt{\frac{kVA_{tx} \times 100}{kvar_{cap} \times Z_{tx}(\%)}}$$

h_r = هارمونیک رزونانس

X_c= راکتانس خازن

X_{SC}= راکتانس اتصال کوتاه

MVA_{SC}= توان اتصال کوتاه

$Mvar_{Cap}$= توان راکتیو بانک خازنی برحسب مگاوار

kVA_{tx}= توان نامی ترانس کاهنده

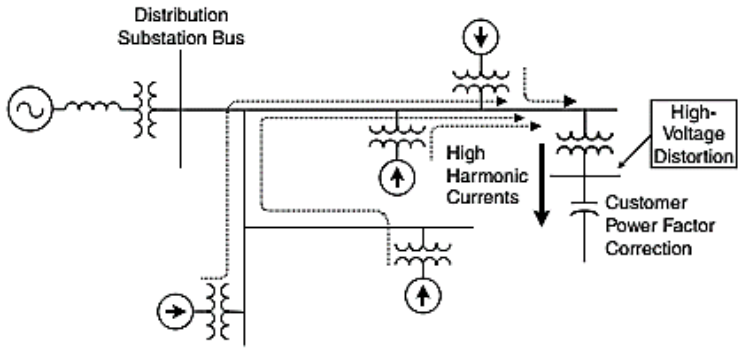
$Kvar_{Cap}$= توان راکتیو بانک خازنی برحسب کیلووار

به‌عنوان‌مثال برای یک بار صنعتی که امپدانس ترانس غالب است هارمونیک رزونانس برای ترانس $1500\,kVA$، ٦ درصد و بانک خازنی $500\,kVAr$ تقریباً برابر است با:

$$h_r = \sqrt{\frac{kVA_{tx} \times 100}{kvar_{cap} \times Z_{tx}(\%)}} = \sqrt{\frac{1500 \times 100}{500 \times 6}} = 7.07$$

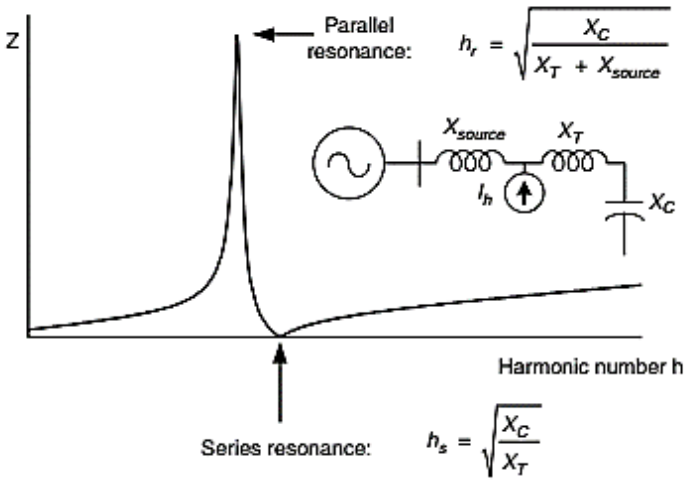
٤-٣ رزونانس سری

در نمونه‌های خاصی هنگامی‌که خازن و اندوکتانس ترانس یا خط انتقال به‌صورت مدار LC سری، جلوی منبع هارمونیک جریان ظاهر می‌شود. اگر فرکانس رزونانس با مشخصه فرکانسی بار غیرخطی مطابقت داشته باشد مدار LC قسمت بزرگی از جریان هارمونیکی درون سیستم را به خود جذب می‌کند. مصرف‌کننده ای که بار غیرخطی ندارد ولی از خازن‌های اصلاح توان استفاده می‌کند می‌تواند اعوجاج ولتاژ بالایی تجربه کند.



شکل ۳-٤ سیستمی با پتانسیل رزونانس سری

در هنگام رزونانس خازن اصلاح ضریب توان یک مدار سری با ترانس و منبع هارمونیک تشکیل می‌دهد. مدار ساده‌شده آن در شکل ۵-۳ آمده است. منبع هارمونیکی نشان داده‌شده، نماینده میزان کل هارمونیک‌های تولیدشده توسط بارها است. اندوکتانس ورودی ترانس سری با خازن کوچک است و فقط میزان کمی مقاومت اهمی دارد که باعث می‌شود در فرکانس رزونانس به‌صورت آزادانه جریان حرکت کند و ولتاژ بانک خازن‌ها بزرگ‌شده و به‌شدت اعوجاج پیدا کند.



شکل ۳-۵ پاسخ فرکانسی مدار رزونانس سری

$$Vs = \frac{X_c}{X_T + X_c + R} V_h = \frac{X_c}{R} V_h$$

که در آن V_h ولتاژ هارمونیکی مرتبط با I_h و V_s ولتاژ روی بانک خازنی است. مقاومت R در شکل بالا نشان داده نشده است؛ زیرا در برابر راکتانس بسیار کوچک و قابل صرف‌نظر کردن است. امپدانس اغماض شده در مدار رزونانس سری را می‌توان به‌گونه‌ای مورد بهره‌برداری قرار داد تا جریان‌های

هارمونیکی مدنظر را جذب کند که بنیان طراحی فیلتر ناچ[1] نیز محسوب می‌شود.

در بسیاری از سیستم‌ها با پتانسیل رزونانس سری، رزونانس موازی نیز با توجه به توپولوژی مدار شکل می‌گیرد. همان‌طور که در شکل بالا قابل‌مشاهده است رزونانس موازی بین X_{source} و مدار معادل سری شده X_T و X_C تشکیل‌شده است. فرکانس رزونانس موازی همیشه کوچک‌تر از رزونانس سری آن است. فرکانس رزونانس موازی را می‌توان به‌صورت زیر عنوان کرد:

$$h_r = \sqrt{\frac{X_C}{X_T + X_{source}}}$$

۳-۵ تأثیرات بارهای مقاومتی

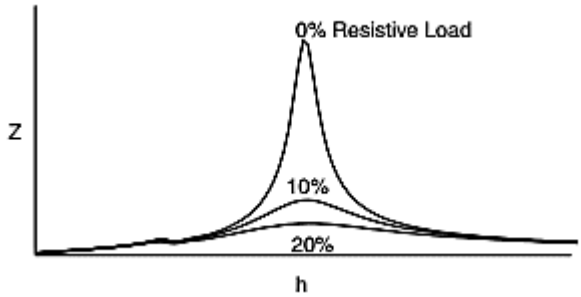
تعیین کردن مرتبه هارمونیک که در آن رزونانس با منبع رخ می‌دهد همیشه عامل اصلی خطر نیست. مقاومت موجود در مدار گاهی به میزان خوبی عمل دمپینگ را انجام می‌دهد و جلوی ولتاژ و جریان‌های خطرناک را می‌گیرد.

[1] Notch

شکل ۳-٦ مشخصه امپدانسی مدار رزونانس موازی را برای مقاومت‌های متغیر موازی نشان می‌دهد. حتی مقاومتی به کوچکی ۱۰ درصد بار می‌تواند تأثیرات مفیدی روی پیک امپدانس بگذارد. همین‌طور اگر کابل‌ها یا خطوط طویل بین شینه بانک خازنی و ترانس بالادست وجود داشته باشد، رزونانس سرکوب می‌شود؛ زیرا کابل‌ها و خطوط می‌توانند مقدار قابل‌توجهی مقاومت به مدار معادل اضافه کنند. مقاومت خطوط و بارها دلایلی هستند که مشکلات وحشتناک هارمونیکی به‌خاطر خازن‌های روی فیدر توزیع به‌ندرت دیده می‌شود. اصلی‌ترین شرایط رزونانسی زمانی است که خازن‌ها روی شینه‌ی پست‌های توزیع یا در مراکز صنعتی نصب‌شده باشند. در این حالت که امپدانس ترانس غالب و نسبت $\frac{X}{R}$ بالا و مقاومت نسبی پایین می‌باشد. پیک امپدانس رزونانس موازی بسیار بالاست و دلیل اصلی خرابی خازن، ترانس یا تجهیزات پخش بار می‌باشد؛ به طور معمول به دلیل آنالیز دقیق شبکه و مطالعات گسترده روی بانک‌های خازنی، مهندسان بدون نگرانی بانک‌های خازنی را در تأسیسات فشار ضعیف یا پست‌های برق نصب و راه‌اندازی می‌کنند. در ۲۰ درصد مراکز صنعتی که روی آن‌ها مطالعه‌ای انجام‌نشده است، شاهد اختلال عملکرد و خرابی تجهیزات به دلیل وقوع رزونانس هستیم. درواقع انتخاب بانک خازنی فقط بر اساس کاتالوگ‌های سازنده به‌منظور حذف جریمه پرداختی می‌تواند سیستم را در نزدیکی هارمونیک پنجم کوک[1] کند. معمولاً هارمونیک پنجم یکی از دردسرسازترین هارمونیک‌ها به دلیل دارا بودن دامنه زیاد است.

[1] tune

یک تصور غلط رایج این است که بارهای مقاومتی هارمونیک‌ها را دمپ می‌کنند. در نبود رزونانس، هرگونه باری تأثیر بسیار کمی روی جریانات هارمونیکی دارد و بیشتر می‌تواند باعث اعوجاج ولتاژ شود، اما اگر عنوان کنیم که بارهای مقاومتی رزونانس را میرا (damp) می‌کنند و اعوجاج ناشی از آن را کاهش می‌دهند، درست عنوان کرده‌ایم. بارهای موتوری بیشتر سلفی هستند و میزان میرائی (damping) کمی دارند. درواقع آن‌ها می‌توانند با جابجایی فرکانس رزونانس دچار ایجاد اعوجاج بیشتر هم شوند. موتورهای کوچک زیر یک اسب بخار قدرت دمپ کنندگی مناسبی دارند؛ زیرا نسبت $\frac{X}{R}$ آنها کوچک‌تر از موتورهای بزرگ سه فاز است.



شکل ۳-٦ تأثیر بارهای مقاومتی روی رزونانس موازی

فصل چهارم

تأثیر هارمونیک‌ها بر سیستم‌های قدرت

جریان‌های هارمونیکی که توسط بارهای غیرخطی تولید می‌شوند و به سمت منبع حرکت می‌کنند می‌توانند با تجهیزاتی مانند خازن‌ها، ترانس‌ها و موتورها تداخل کنند و باعث ایجاد تلفات اضافی حرارتی و اضافه‌بار شوند؛ همچنین این‌گونه جریان‌های هارمونیکی می‌توانند با خطوط ارتباطی و سیستم‌های اندازه‌گیری نیز تداخل داشته باشد.

٤-١ تأثیرات روی خازن‌ها

مشکلات هارمونیک‌ها معمولاً اول از همه سراغ بانک‌های خازنی می‌آید. بهتر است عنوان شود، بانک‌های خازنی در هنگام رزونانس دچار اعوجاج‌های شدید ولتاژی می‌شود. جریان‌هایی که به سمت بانک‌های خازنی جاری می‌شود بزرگ و غنی از هارمونیک‌های یکنواخت است.

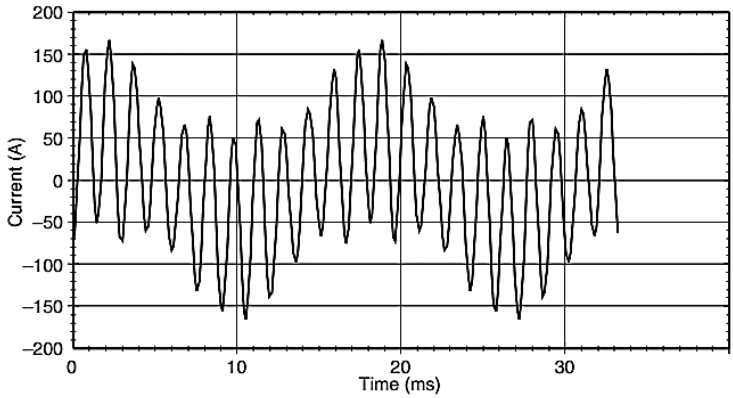
شکل ٤-١ شکل موج جریان رزونانس بانک خازن با سیستم در هارمونیک مرتبه ۱۱ را نشان می‌دهد. جریان هارمونیک مجزا و به‌صورت یک موج هارمونیک ۱۱ ام که بر روی فرکانس پایه سوار است، خود را نشان می‌دهد. این شکل موج جریان، خودش نشان‌دهنده وجود رزونانس در سیستم به دلیل وجود خازن است. در چنین شرایطی مقدار *rms* جریان معمولاً بیشتر از مقدار جریان *rms* نامی خازن است. در استاندارد *IEEE* برای خازن‌های قدرت در حالت کار دائم مواردی را آورده است که خازن بدون مشکل باید تحمل کند:

- ۱۳۵ درصد توان راکتیو روی پلاک
- ۱۱۰ درصد ولتاژ *rms* نامی (شامل هارمونیک و بدون گذرا)
- ۱۸۰ درصد جریان *rms* نامی (شامل جریان اصلی و هارمونیک)
- ۱۲۰ درصد ولتاژ پیک (شامل هارمونیک‌ها)

برای یک بانک خازنی 1200 *kVAr* جریان بار کامل به‌صورت زیر به دست می‌آید:

$$I_C = \frac{kvar_{3\phi}}{\sqrt{3} \times kV_{LL}} = \frac{1200}{\sqrt{3} \times 13.8} = 50.2$$

بانک خازنی اصولاً در معرض دو هارمونیک ۵ و ۷ قرار دارد که اعوجاج ولتاژ شامل ٤ درصد هارمونیک پنجم و ۳ درصد هارمونیک هفتم است و همین موضوع باعث ایجاد ۲۰ درصد هارمونیک پنجم جریان و ۲۱ درصد هارمونیک هفتم جریان می‌شود.



شکل ٤-١ شکل موج جریان بانک خازن در رزونانس هارمونیک ۱۱ ام

جدول ٤-١ نمونه‌ای از تعیین مقادیر خازن

Recommended Practice for Establishing Capacitor Capabilities
When Supplied by Nonsinusoidal Voltages **IEEE Std 18-1980**

Capacitor Bank Data:

Bank Rating:	1200	kVAr
Voltage Rating:	13800	V (L-L)
Operating Voltage:	13800	V (L-L)
Supplied Compensation:	1200	kVAr

Fundamental Current Rating:	50.2	Amps
Fundamental Frequency:	60	Hz
Capacitive Reactance:	158.700	Ω

Harmonic Distribution of Bus Voltage:

Harmonic Number	Frequency (Hertz)	Volt Mag V_h (% of Fund.)	Volt Mag V_h (Volts)	Line Current I_h (% of Fund.)
1	60	100.00	7967.4	100.00
3	180	0.00	0.0	0.00
5	300	4.00	318.7	20.00
7	420	3.00	239.0	21.00
11	660	0.00	0.0	0.00
13	780	0.00	0.0	0.00
17	1020	0.00	0.0	0.00
19	1140	0.00	0.0	0.00
21	1260	0.00	0.0	0.00
23	1380	0.00	0.0	0.00
25	1500	0.00	0.0	0.00

Voltage Distortion (THD):	5.00	%
RMS Capacitor Voltage:	7977.39	Volts
Capacitor Current Distortion:	29.00	%
RMS Capacitor Current:	52.27	Amps

Capacitor Bank Limits:

	Calculated	Limit	Exceeds Limit
Peak Voltage:	107.0%	120%	No
RMS Voltage:	100.1%	110%	No
RMS Current:	104.1%	180%	No
kVAr:	104.3%	135%	No

٤-۲ تأثیرات روی ترانس‌ها

ترانس‌ها به‌گونه‌ای طراحی‌شده تا توان لازم به بارهای وصل شده را با کمترین تلفات در فرکانس پایه برساند. اعوجاج هارمونیک جریان و ولتاژ می‌تواند باعث بالا رفتن تلفات حرارتی و گرمایش بیش‌ازحد شود.

در طراحی برای اینکه ترانس بتواند طاقت فرکانس‌های بالا را داشته باشد از روش‌های گوناگونی مانند ترنسپوز کردن کابل‌ها و قرار دادن آن در داکت‌هایی باقابلیت خنک شوندگی بهتر، بهره می‌برند. عموماً ترانسی که اعوجاج جریان آن از ۵ درصد بیشتر شود، توسط هارمونیک‌ها تعدیل (*Derate*) می‌شود. هنگامی‌که جریان بار هارمونیک دارد، باعث افزایش تلفات حرارتی ترانس می‌شود. تأثیرات اصلی آن عبارتند از:

۱. جریان *rms*. اگر یک ترانس فقط برای نیاز بار طراحی‌شده باشد جریان‌های هارمونیکی ممکن است منجر به افزایش جریان *rms* ترانس شود و از ظرفیت نامی ترانس بیشتر شود. همچنین افزایش جریان *rms* باعث بالا رفتن تلفات هادی نیز می‌شود.
۲. تلفات جریان گردابی[1]. این تلفات براثر شارهای القایی مغناطیسی در ترانس ایجاد می‌شوند. جریان‌های القایی در سیم‌پیچی‌ها و هسته و در بقیه قسمت‌های هادی بدنه حرکت کرده و باعث گرمایش اضافی می‌شود. این مؤلفه تلفات با مربع فرکانس جریان نسبت مستقیم دارد.

[1] Eddy Current Losses

۳. تلفات هسته. افزایش تلفات هسته در حضور هارمونیک‌ها بستگی به ولتاژ اعمال‌شده و طراحی هسته ترانس دارد. افزایش اعوجاج ولتاژ می‌تواند باعث افزایش جریان گردابی شود. اثر آن بستگی به قطر و کلفتی ورقه‌های هسته و کیفیت آهن آن دارد. افزایش این تلفات براثر هارمونیک به‌اندازه دو تای قبلی بحرانی نیست.

تلفات بار P_{LL} را می‌توان به دو مؤلفه تقسیم کرد:

تلفات اهمی و تلفات جریان گردابی (PEC). درنتیجه داریم:

$$P_{LL} = I^2R + P_{EC}W$$

$$P_{EC} = k_{EC} \times I^2 \times h^2$$

تلفات بار کامل در شرایط هارمونیکی را به‌صورت پریونیت می‌توان بیان کرد:

$$P_{LL} = \sum {I_h}^2 + \left(\sum {I_h}^2 \times h^2\right) P_{EC-R}$$

که در آن $P_{EC\text{-}R}$ ضریب تلفات جریان گردابی در شرایط نامی است. ضریب K عموماً در بحث کیفیت توان ضریبی است برای *Derate* کردن ترانس توسط هارمونیک‌ها به‌صورت زیر:

$$K = \frac{\sum\left(I_h{}^2 \times h^2\right)}{\sum I_h{}^2}$$

و بعد از ضریب K، مقدار *rms* جریان معوج را استخراج می‌کنیم:

$$\sqrt{\sum I_h{}^2} = \sqrt{\frac{1 + P_{EC-R}}{1 + K \times P_{EC-R}}} \qquad (pu)$$

که در آن :

$P_{EC\text{-}R}$ = ضریب تلفات گردابی

h = عدد هارمونیک

I_h = جریان هارمونیک مرتبه h ام

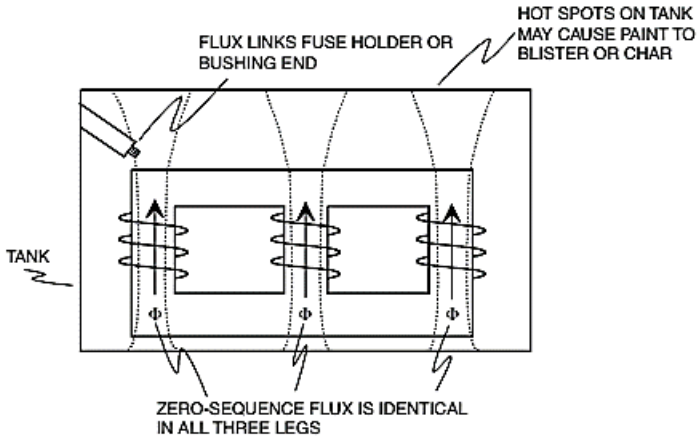
بنابراین *Derate* شدن ترانس با دانستن ضریب تلفات گردابی قابل‌محاسبه است و این ضریب این‌گونه استخراج می‌شود:

۱. از طراح گرفته می‌شود
۲. طبق استاندارد ترانس‌ها *ANSI/IEEE C57.110*
۳. مقادیر تخمینی با توجه به نوع و اندازه ترانس

استثناها:

در برخی موارد ترانس‌ها مشکل هارمونیکی ندارند، اما با این‌حال بسیار داغ کار می‌کنند و به نظر می‌آید دچار مشکل اضافه‌بار شده‌اند. در ترانسی با سربندی ستاره زمین شده حدود ۸ درصد هارمونیک سه وجود دارد که به نسبت پایین است و ترانس در باری کمتر از بار نامی دچار اضافه دما می‌شود. اگر پارامترهای تهویه مناسب برای خنک کردن را در نظر نگیریم می‌توان فهمید یک‌سری هادی‌های شار مغناطیسی دارند تحت تأثیر هارمونیک قرار می‌گیرند که یکی از سه احتمال زیر پیش می‌آید:

- شارهای توالی صفر، از هسته سه ستون (محبوب‌ترین طرح برای ترانس‌های توزیع) فرار می‌کنند. همان‌طور که در شکل ٤-٢ نشان داده‌شده است اگر هارمونیک‌های توالی صفر (...،۱۵،۹،**۳**) با توجه به سربندی ترانس اجازه جریان یافتن پیدا کنند می‌توانند باعث گرم شدن اضافه در تانک هسته و کلمپ‌ها شوند. این موضوع لزوماً در حین تست‌های تک فاز و سه فاز مشخص نمی‌شوند.۸ درصد جریان خطی که پیشتر به آن اشاره شد تبدیل می‌شود به ٢٤ درصد هارمونیک سه جریان فاز که منجر به افزایش شار نشتی در تانک در قسمت روغن و هوا می‌شود.



شکل ٤-٢ جریان یافتن شار توالی صفر در هسته سه ستونه

- آفست‌های جریان DC نیز می‌تولند باعث فرار شار از محدوده هسته شود. به‌عنوان‌مثال هسته ممکن است در سیکل مثبت اشباع شود درصورتی‌که در سیکل منفی نرمال می‌ملند. تعدادی از مبدّل‌های الکترونیک قدرت به‌صورت تصادفی یا بر اساس طراحی، شکل موج‌های نامتقارنی می‌سازند. این موضوع می‌تواند باعث ایجاد یک آفست کوچک DC در سمت بار (از سمت منبع قابل‌لندازه‌گیری نیست) در ترانس شود. فقط میزان کوچکی از آفست DC کافی است تا برای ترانس‌های قدرت ایجاد مشکل کند.
- یک ساختار کلمپی (گیره مانند)، انتهای بوشینگ یا هر المان هادی دیگری در نزدیکی میدان مغناطیسی باشد.

ممکن است این مقادیر آن‌قدر کوچک باشد که در فرکانس نامی اثر کوچکی روی تلفات پراکندگی[1] داشته باشد ولی احتمال ایجاد نقطه داغ[2] در شارهای هارمونیکی وجود دارد.

٤-٣ تأثیرات روی موتورها

موتورها به‌شدت تحت تأثیر اعوجاج هارمونیک ولتاژ قرار می‌گیرند. اعوجاج هارمونیک ولتاژ در ترمینال موتور باعث ایجاد شارهای هارمونیکی می‌شود. این شارها زیاد روی گشتاور موتور تأثیر نمی‌گذارند ولی باعث چرخش در فرکانسی متفاوت با فرکانس سنکرون روتور می‌شود. درواقع جریان‌های فرکانس بالا درون روتور القاء می‌شود.

اثر آنها روی موتور مشابه جریان توالی منفی در فرکانس نامی است و شارهای القائی اضافه باعث بالا رفتن تلفات، پائین آمدن بازده، گرم شدن، ارتعاش و ایجاد سروصدا می‌شوند.

در فرکانس‌های هارمونیک، موتورها به طور معمول به‌صورت راکتانس روتور قفل‌شده[3] عنوان می‌شود. مؤلفه‌های هارمونیک‌های مرتبه پائین‌تر مهم‌تر می‌باشند؛ زیرا معمولاً اندازه‌های بزرگ‌تری دارند و همچنین امپدانس ظاهری موتور کمتر است.

---

[1] Stray Losses
[2] Hot Spots
[3] Blocked Rotor
آزمایشی در موتورهای القایی است. در این آزمایش می‌توان مقادیر جریان اتصال کوتاه، جمع کل راکتانس نشتی و گشتاور نیرو را پیدا کرد.

معمولاً نیازی به *Derate* کردن مشخصات موتور درصورتی‌که اعوجاج در محدوده مجاز استاندارد *IEEE 519* باشد (*THD* از 5% و هر هارمونیک از ۳٪ کمتر باشد) مشکلات گرم شدن بیش‌ازحد هنگامی‌که اعوجاج ۸-۱۰٪ یا بیشتر شود شروع می‌شود. برای افزایش طول عمر موتور باید اصلاح شوند.

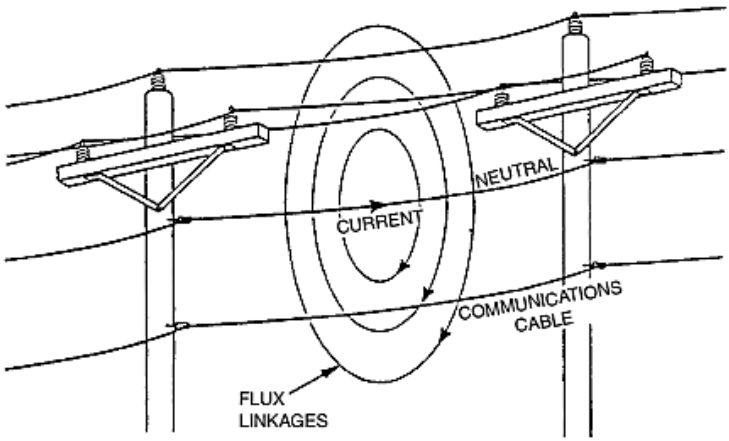
موتورها به‌صورت موازی با امپدانس سیستم قدرت ظاهر می‌شوند و همین موضوع فرکانس رزونانس را بالاتر می‌برد؛ زیرا اندوکتانس معادل کاهش‌یافته است. مضر بودن این موضوع بستگی به موقعیت رزونانس سیستم قبل از راه‌اندازی موتور دارد. موتورها می‌توانند، بعضی از مؤلفه‌های هارمونیک را با توجه به نسبت $\frac{X}{R}$ روتور قفل‌شده، دمپ کنند.

در سیستمی با موتورهای کوچک که نسبت $\frac{X}{R}$ پائین تری دارند می‌توانند باعث تضعیف رزونانس شود.

٤-٤ تأثیرات روی سیستم‌های مخابراتی

جریانات هارمونیکی در سیستم توزیع یا درون مدار نهایی می‌تواند باعث تداخل در مدارهای مخابراتی شود. ولتاژهای القاشده در هادی‌های موازی توسط جریان‌های هارمونیکی گاهی در پهنای باند شنیداری قرار می‌گیرند. هارمونیک‌های بین ٤٥٠ تا ۱۰۰۰ هرتز (مرتبه ۹ تا ۲۰) بسیار برای سیستم‌های مخابراتی مخرب‌اند. هارمونیک‌های فرد مضرب سه (3,9,15,…) در سیستم‌های چهار سیم مشکل‌زا هستند؛ زیرا مؤلفه‌های آن با یکدیگر اختلاف‌فاز ندارند و جریان هر سه فاز باهم جمع شده و به نول می‌ریزند که بیشترین تأثیر را روی مدارهای مخابراتی دارد.

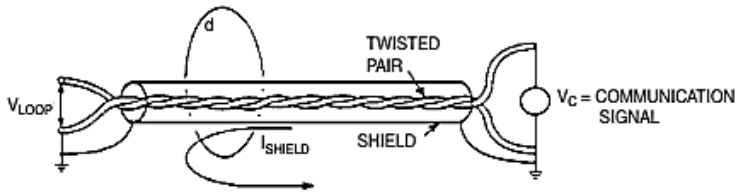
جریان‌های هارمونیک شبکه قدرت به‌صورت القایی یا هدایت مستقیم با مدارات مخابراتی تداخل می‌کنند. شکل ٤-۳ تداخل نوترال خط انتقالی را به‌صورت القایی نشان می‌دهد.



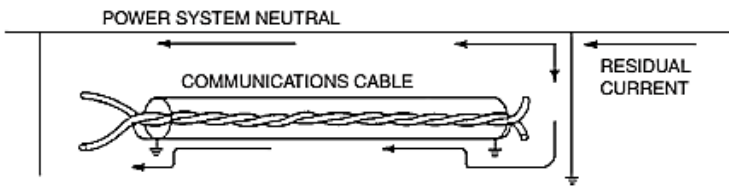
شکل ٤-۳ تداخل اضافه جریان القایی نوترال خط با سیستم مخابراتی

در زمان تلفن‌های سیمی این مسئله بسیار مشکل‌ساز بوده است. امروزه با رایج شدن استفاده از هادی‌های شیلد دار و زوج به هم تابیده برای مدارات تلفنی، این حالت از تداخل کمتر رخ می‌دهد؛ زیرا القاء در جفت هادی‌ها برابر است و برآیند صفر درست می‌کند. همچنین در صورت عبور جریان‌های القایی بزرگ از شیلد دور هادی، ولتاژ (IR) ایجاد می‌کند و در انتهای کابل می‌تواند اختلاف‌پتانسیل قابل‌توجهی ایجاد کند. جریان درون شیلد می‌تواند به‌صورت هدایت مستقیم نیز اتفاق بیفتد. همان‌طور که در شکل ٤-٤ آمده است، شیلد با مسیر زمین موازی می‌شود و اگر شرایط

زمین محلی به‌گونه‌ای باشد که جریان در شیلد جاری شود افت IR دوباره باعث ایجاد اختلاف ولتاژ می‌شود.



شکل ٤-٤ در تداخل القایی براثر افت ولتاژ IR در شیلد کابل تفاوت ولتاژ در انتهای کابل به وجود می‌آید.



شکل ٤-٥ تداخل مستقیم در مسیر زمین مشترک.

٤-٥ تأثیرات روی انرژی و اندازه‌گیری دیماند

شرکت‌های برق منطقه‌ای، معمولاً مصرف انرژی را با دو پارامتر اندازه‌گیری می‌کنند، میزان کل انرژی مصرف‌شده تجمیعی و توان بیشینه برای دوره‌ای خاص (دیماند). بیشتر مصرف‌کنندگان مسکونی فقط برای مصرف انرژی قبض دریافت می‌کنند و مصرف‌کنندگان صنعتی دو هزینه جداگانه باید بپردازند. هزینه انرژی نمایانگر هزینه تولید و توزیع کل انرژی مصرف‌شده در یک دوره قبض و برحسب کیلووات ساعت بیان می‌شود. سمت دوم قبض بهای دیماند است که بیانگر هزینه تأسیساتی است که

برای رفع حداکثر توان موردنیاز مصرف‌کننده، مورداستفاده است. دیماند معمولاً بر اساس بیشترین تقاضا در بازه ۱۵ یا ۳۰ دقیقه‌ای در یک دوره قبض است و به کیلووات اندازه‌گیری می‌شود.

هارمونیک‌های جریان بارهای غیرخطی روی دقت دیماندمتر و کنتور تأثیر منفی می‌گذارد. کنتورهای سنتی بر اساس قوانین القاء الکترومغناطیسی (شبیه به موتورهای القایی) ساخته‌شده‌اند. سمت گردان (روتور) همان دیسک درون کنتور است که نسبت به میزان مصرف سرعت می‌گیرد و با به حرکت درآوردن یک‌سری چرخ‌دنده اعداد روی آن را عوض می‌کند. هارمونیک‌ها تأثیر منفی روی دستگاه‌های اندازه‌گیری دارند. این میزان تأثیر با فرکانس نسبت مستقیم دارد. به‌طورکلی بارهای غیرخطی توان هارمونیکی به سیستم تزریق می‌کنند و بارهای خطی توان هارمونیکی جذب می‌کنند. درنتیجه برای بار غیرخطی عدد اندازه‌گیری شده توسط کنتور برابر است با:

$$P_{measured} = P_1 - a_3P_3 - a_5P_5 - a_7P_7 - \cdots$$

که در آن $a_1, a_3, a_5, \ldots$ ضرایبی کوچک‌تر از یک هستند.

برای بار خطی توان اندازه‌گیری شده برابر است با:

$$P_{measured} = P_1 + a_3P_3 + a_5P_5 + a_7P_7 + \cdots$$

بار خطی انرژی اضافه را جذب می‌کند، اما سؤال اینجاست که مصرف‌کننده واقعاً به این انرژی نیاز دارد؟ اگر بار موتوری باشد جواب خیر است؛ زیرا باعث بالا رفتن تلفات می‌شود، اما اگر بار اهمی باشد انرژی به‌صورت مؤثر مصرف می‌شود. خوشبختانه در بیشتر مواقع واقعی خطا بسیار ناچیز است. کنتورهای الکتریکی جدید بر اساس تقسیم زمانی و نمونه‌برداری دیجیتال کار می‌کنند. این کنتورها بسیار دقیق‌تر از کنتورهای قدیمی هستند. این کنتورها می‌توانند هارمونیک‌ها و همچنین فقط توان پایه را اندازه‌گیری کنند. مصرف‌کننده تعیین می‌کند، کدام‌یک از این مقادیر اندازه‌گیری شوند. بیشترین خطا برای اندازه‌گیری دیماند رخ می‌دهد.

خطای کنتور به دلیل در نظر نگرفتن توان ظاهری با توجه به اعوجاج‌های هارمونیکی است. برخی از کنتورها توان اکتیو (P) و توان راکتیو (Q) را اندازه‌گیری می‌کنند ولی توان هارمونیک (D) را حذف می‌کنند.

بسیاری از کنتورها توان ظاهری کل را درست اندازه نمی‌گیرند و درنتیجه توان (kVA) اندازه‌گیری شده کمتر از واقعیت است. این خطا به نفع مصرف‌کننده است. بدترین خطاها زمانی رخ می‌دهد که جریان در تابلوی کنتور دارای اعوجاج شدید باشد. در این حالت کل توان متقاضی ممکن است ۱۰–۱۵ درصد خطا داشته باشد.

فصل پنجم

اینترهارمونیک و فرورزونانس

۵-۱ اینترهارمونیک و فرورزونانس[1]

با توجه به بسط فوری یک شکل موج متناوب را می‌توان به‌صورت جمع تعدادی موج سینوسی با اندازه‌های متفاوت و با فرکانس‌هایی برابر با مضرب فرکانس پایه موج اصلی (که به آن فرکانس هارمونیک گفته می‌شود) بیان کرد؛ بنابراین داریم $f_h = hf_0$ که در آن f_0 فرکانس پایه و h عدد هارمونیک است.

به این نکته باید توجه داشت که جمع تعدادی موج سینوسی با اندازه‌های متفاوت که فرکانس آنها مضربی از فرکانس پایه نیست، لزوماً تشکیل یک موج متناوب نمی‌دهند و به آنها اینترهارمونیک می‌گوییم و داریم $f_{ih} = h_i f_0$ که در آن h_i یک عدد غیر صحیح بزرگ‌تر از یک است، پس در عمل فرکانس اینترهارمونیک، فرکانس بین دو هارمونیک مجاور است.

یکی از اصلی‌ترین منبع‌های اینترهارمونیک استفاده گسترده از مبدل‌های الکترونیک قدرت است که توانایی تولید اعوجاج جریان در بازه وسیعی از فرکانس‌ها را دارند؛ به‌عنوان‌مثال درایوهای تنظیم سرعت در مصرف‌کننده‌های صنعتی، مبدل‌های *PWM* ، *UPS* ها و فیلترهای اکتیو؛ همان‌طور که پیش‌تر به آن اشاره شد، در درایوهای تنظیم سرعت معمولاً یکسو کننده دیودی وجود دارد که ولتاژ *AC* ورودی را به *DC* تبدیل می‌کند و بعداً اینورتر ولتاژ *DC* را به ولتاژی *AC*، اما با فرکانس دلخواه تبدیل

[1] Ferroresonance

می‌کند، اینورترها می‌توانند، تولیدکننده اینترهارمونیک جریان باشند، به‌خصوص هنگامی‌که اینورتر دارای سوئیچ آسنکرون باشد. سوئیچ آسنکرون زمانی اتفاق میفتد که نسبت فرکانس سوئیچینگ مضرب صحیحی از فرکانس ولتاژ خروجی باشد. اگر هارمونیک جریان از لینک DC عبور کند و به سمت منبع به حرکت دربیاید مشکلات اینترهارمونیکی را می‌تواند افزایش دهد.

یکی دیگر از منابع مهم اینترهارمونیک از تغییر متداوم جریان بار، مانند کوره‌های القایی و سیکلوکانورترها[۱] می‌باشند. نوسان سریع جریان بار باعث ایجاد فرکانس باند جانبی در اطراف فرکانس پایه هارمونیک می‌شود. بهترین مثال برای تولید اینترهارمونیک‌ها کوره القایی است. کوره‌های القایی به‌صورت گسترده برای ذوب کردن قطعات آهنی و غیر آهنی در صنعت مورداستفاده قرار می‌گیرد. کوره‌های القایی مدرن از مبدّل‌های الکترونیک قدرت برای تغذیه کویل القاء در فرکانس‌های متفاوت استفاده گردد. فرکانس در کویل ذوب، با توجه به جنس موادی که قرار است ذوب شود، اندازه آن تغییر می‌کند. کویل کوره القایی و خازن یک مدار رزونانسی تشکیل می‌دهند و اینورتر DC به AC مدار را به سمت رزونانس سوق می‌دهد. اندوکتانس کویل با توجه به مدل، دما و مقدار جنس موادی که کوره از یک سیکل به سیکل دیگر (برای مثال از ذوب به ریخته‌گری) متغیر است. این شرایط منجر به تغییر در فرکانس کارکرد کوره می‌شود. فرکانس

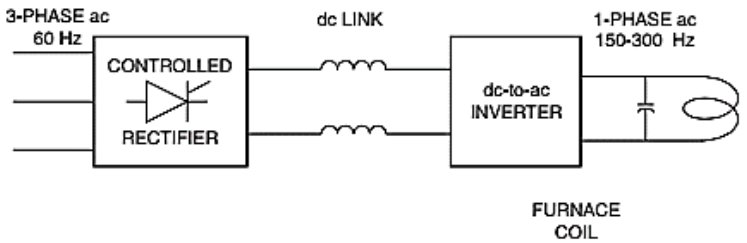
[۱] سیکلوکانورتر (CCV) یک شکل موج AC با ولتاژ و فرکانس ثابت را به شکل موجAC دیگری با فرکانس پایین‌تر یا بالاتر تبدیل می‌کند.

به طور معمول بین ۱۵۰ تا ۱۲۰۰ هرتز متغیر است. با بیان مثالی این موضوع را باز می‌کنیم، یک کوره القایی توسط یک مبدل ۱۲ پالس که دارای راکتورهایی در لینک DC برای صاف کردن جریان اینورتر است، تغذیه می‌شود. همان‌طور که در شکل ۵-۱ آورده شده است، مشخصه‌های ذاتی هارمونیک جریان در سمت AC دارای هارمونیک‌های ...،۱۱،۱۳،۲۳،۲۵ و همچنین هارمونیک‌های غیر ذاتی ۵،۷ است، اما در ضرایب غیر صحیح فرکانس به دلیل اثر متقابل فرکانس خروجی اینورتر هنگامی‌که از یک سیکل به سیکل دیگر می‌رود، جریان‌هایی شکل می‌گیرد. اینترهارمونیک‌های مشاهده‌شده به‌صورت جفت‌های زیر است:

$$2f_0 + f_s \, , 4f_0 + f_s \, , \ldots$$

که در آن f_0 فرکانس عملیاتی و f_S فرکانس پایه است.

بنابراین، اگر فرکانس عملکرد ۱۶۰ هرتز باشد اولین اینترهارمونیک‌ها در ۲۶۰ و ۳۸۰ هرتز مشاهده می‌شود. جفت هارمونیک دوم در ۵۸۰ و ۷۰۰ هرتز با اندازه کوچک‌تر مشاهده می‌شود.



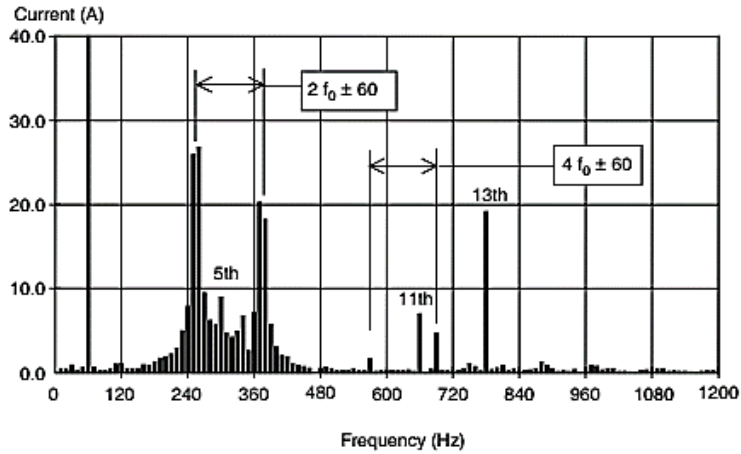
شکل ۵-۱ دیاگرام یک کوره مدرن القایی به همراه اینورتر جریان

طیف اینترهارمونیک‌های جریان کوره القایی در شکل ۵-۲ آمده است. فرکانس‌های اینترهارمونیک‌ها به‌آرامی از چند ثانیه تا چند دقیقه بسته به کوره تا عملیات ذوب و ریخته‌گری را تکمیل کند؛ حرکت می‌کند و می‌تواند رزونانس را در سیستم تغذیه تحریک کند.

توضیح دادیم که چگونه اینترهارمونیک‌ها در یک کوره القایی مدرن تولید می‌شود. سیکلوکانورترها، درایوهای تغییر سرعت، موتورهای القایی با روتور سیم‌پیچی شده که از مبدل‌های زیرسنکرون متوالی استفاده می‌کنند و دستگاه‌های قوس نیز اینترهارمونیک‌هایی به روش مشابه تولید می‌کنند.

تأثیرات اینترهارمونیک‌ها بسیار همانند هارمونیک‌ها مانند اضافه‌بار فیلتر، گرم شدن بیش‌ازحد، تداخل با خطوط انتقال، ریپل ولتاژ و فلیکر است. با این‌حال حل مشکلات اینترهارمونیک‌ها می‌تواند، چالش‌زا باشد. به‌خصوص زمانی که فرکانس‌ها لحظه‌به‌لحظه، مانند کوره‌های القایی تغییر کند. فیلترهای پهن باند[1] معمولاً برای رفع مشکلات اینترهارمونیک‌ها استفاده می‌شود.

[1] Broad Band



شکل ۵-۲ طیف جریانی یک کوره القایی

۵-۲ اینترهارمونیک‌های زیر سنکرون [1]

به دسته‌ای از هارمونیک‌ها گفته می‌شود که با مشخصه $h<1$ تعریف می‌شوند. این دسته از هارمونیک‌ها دوره تناوب‌هایی بیشتر از فرکانس پایه دارند. در استاندارد *IEEE-519* به‌صورت مستقیم به این گروه اشاره‌ای نشده است ولی مقالات بسیاری در این زمینه موجود است. همانند بقیه هارمونیک‌ها، این دسته نیز می‌توانند باعث ایجاد رزونانس شود.

[1] Sub Synchronous

۵-۲-۱ رزونانس زیرسنکرون

تبادل انرژی با ژنراتور توربینی ممکن است در بیشتر از یک فرکانس طبیعی سیستم رخ بدهد. محور[1] ژنراتور توربینی دارای حالات نوسان طبیعی در فرکانس‌های زیرسنکرون است. اگر گشتاور القایی زیرسنکرون با یکی از حالات طبیعی نوسان محور یکی شود، محور در این فرکانس طبیعی شروع به نوسان می‌کند و گاهی اوقات اندازه آن نیز بزرگ است. این موضوع می‌تواند باعث فرسودگی محور شود و احتمال خرابی را بالا ببرد. دلایل ایجاد این‌گونه اثرات متقابل عبارتند از:

۱. اثر القایی ژنراتور: مقاومت روتور در برابر جریان‌های زیر سنکرون منفی دیده می‌شود و شبکه از خود مقاومت مثبت نشان می‌دهد. اگر مقاومت منفی ژنراتور بزرگ‌تر از مقاومت مثبت سیستم باشد، جریان زیرسنکرون پایداری خواهیم داشت.
۲. تقابل دورانی: در بالا توضیح داده شد. براثر گشتاور القایی در محور ژنراتور ایجاد می‌شود.
۳. گشتاورهای گذرا که براثر اختلالات سیستم به وجود می‌آیند باعث ایجاد تغییراتی در شبکه می‌شوند که منجر به تغییر ناگهانی جریان که در فرکانس طبیعی نوسان می‌کند؛ می‌شود.

[1] Shaft

خازن سری دارای فرکانس رزونانس طبیعی که به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$f_n = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

f_n معمولاً کمتر از فرکانس سیستم قدرت است. در این فرکانس، سیستم‌های الکتریکی ممکن است باعث تقویت یکی از فرکانس‌های رزونانس مکانیکی و درنتیجه منجر به رزونانس زیر سنکرون شوند.

اگر f_r را فرکانس رزونانس زیرسنکرون در یک خط با جبران ساز در نظر بگیریم در حالت رزونانس داریم:

$$2\pi f_r L = \frac{1}{2\pi f_r C}$$

$$f_r = f\sqrt{K_{SC}}$$

رابطه بالا نشان می‌دهد رزونانس زیر سنکرون در فرکانس f_r به وقوع می‌پیوندد که برابر ضرب فرکانس نرمال در جذر درجه جبران سازی که معمولاً بین ۱۵ تا ۳۰ هرتز قرار دارد، می‌باشد. هنگامی‌که جبران سازی در بازه‌ی ۷۵-۲۵ درصد قرار دارد، f_r کمتر از f است. جریان‌های گذرا در فرکانس‌های زیرهارمونیک روی موج با فرکانس شبکه سوار می‌شود و ممکن است در چند سیکل توسط مقاومت خط دمپ شود. در شرایط خاص، جریان‌های زیرهارمونیک می‌تواند تأثیر منفی روی پایداری

ماشین‌های دوار داشته باشد. اگر مدار الکتریکی دچار نوسان شود، آنگاه مؤلفه‌های زیر هارمونیک جریان روی میزان ژنراتور نیز تأثیر می‌گذارد. این میزان در خلاف جهت چرخش میدان دوار اصلی ایجاد می‌شود و باعث ایجاد گشتاور متناوب در فرکانس $f - f_r$ می‌شود.

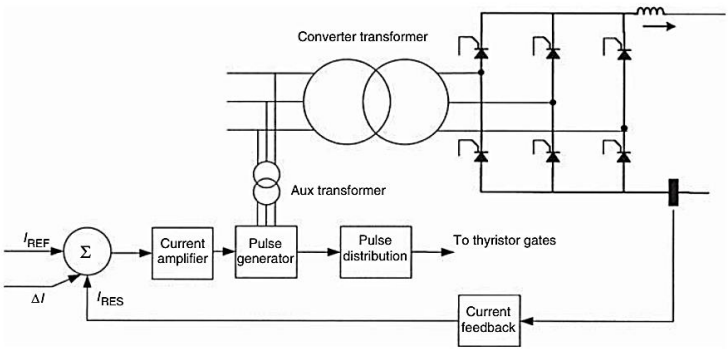
اگر فرکانس رزونانس مکانیکی محور ژنراتور با این فرکانس یکی شود، محور ژنراتور دچار آسیب می‌شود.

افزایش ولتاژ بسیار شدیدی می‌تواند رخ دهد اگر راکتانس ژنراتور و راکتانس خازنی سیستم باهم رزونانس کنند. هیچ نوع سیم‌پیچی یا رگولاتور ولتاژی وجود ندارد که بتواند شار ژنراتور را کنترل کند. مدارهای مغناطیسی ترانس‌ها می‌توانند به اشباع بروند و برق‌گیرها[1] ممکن است درست کار نکنند. فرکانس غالب زیر سنکرون ذاتی در خازن سری می‌تواند توسط یک TCR[2] موازی اصلاح شود. اگر خازن سری کنترل‌شده توسط تریستور یا GTO[3] باشد TCSC[4] می‌تواند، به‌گونه‌ای تنظیم شود تا هرگونه نوسان فرکانس پائین و زیر سنکرون را دمپ کند. خازن‌های سری کنترل‌شده با تریستور در بسیاری از پروژه‌های HVDC به کار گرفته‌شده است.

[1] Surge Arrester
[2] Thyristor Controlled Reactor
[3] Gate Turn-Off thyristor
[4] Thyristor-Controlled Series Capacitor

۵-۲-۱ رزونانس زیرسنکرون سیستم‌های HVDC

رزونانس زیرسنکرون می‌تواند، در سیستم‌های *HVDC* به دلیل تقابل نوسان‌های درون سیستم انتقال و تنش‌های دورانی مکانیکی در توربین ژنراتور به وجود آید. این موضوع بیشتر توسط دمپینگ منفی در حلقه کنترلی *HVDC* رخ می‌دهد. با طراحی کنترلرهای *HVDC* با دمپینگ مثبت از این موقعیت می‌توان اجتناب کرد. این تقابل دورانی بیشتر در نزدیکی مبدّل‌های پست بیشترین مقدار را دارد ولی قابل‌چشم‌پوشی است.



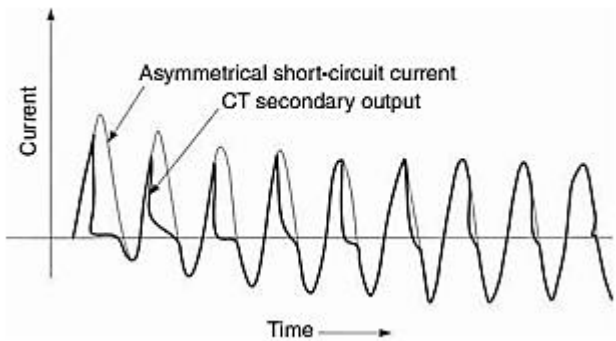
شکل ۵-۳ دیاگرام مدار کنترل *HVDC*

برای ژنراتورهایی که دور از مبدل پست‌ها هستند، دمپینگ منفی با زیادشدن توان *HVDC* و بیشتر شدن زاویه آتش تریستورهای کنترلی، بیشتر می‌شود. سطح اتصال کوتاه در سیستم‌های *AC* تأثیر مستقیم دارند هرچه سطح اتصال کوتاه بیشتر باشد اثر دمپینگ هم بیشتر می‌شود.

۵-۳ فرورزونانس

در حضور کاپاسیتانس سیستم، ترکیب خاصی از ترانس و راکتور می‌تواند پدیده فرورزونانس را به دلیل غیرخطی بودن و اشباع شدن راکتانس تقویت کند.

این موضوع به‌صورت جریان‌های ضربه‌ای مشخص می‌شوند که می‌تواند برای مدت کوتاهی تولید اضافه ولتاژ کند و دارای هارمونیک و زیرهارمونیک تا اندازه $2\ p.u$ [1] است.



شکل ۵-٤ شکل موج اشباع جزئی جریان ثانویه CT در برابر خطای نامتقارن

این پدیده می‌تواند توسط تغییرات در سیستم یا اغتشاشات آغاز شود و پاسخ می‌تواند پایدار یا ناپایدار باشد، همچنین می‌تواند ادامه‌دار باشد یا در

[1] Per Unit

چند ثانیه از بین برود. فرورزونانس را می‌توان به‌صورت زیر دسته‌بندی کرد.

- فیدرهای ترانس در مدارهای دوبل توسط کاپاسیتانس مشترک بین خطوط در صورت خاموش شدن یکی از فیدرها به سمت فرورزونانس می‌رود.
- ترانس‌هایی که یک فاز از دست می‌دهند به‌عنوان‌مثال براثر عمل کردن یک فیوز در سیستم زمین نشده
- وصل باقی ماندن خازن در مدار بعد از قطع کلید فشارقوی ترانس
- احتمال وقوع فرورزونانس با *CVT* [1] یا *PT* [2] الکترومغناطیسی تحت شرایط خاص

در شکل ۵-۵ (a) یک مدار ساده و یک سلف غیرخطی که می‌تواند یک PT یا ترانس باشد که توسط یک مقاومت و خازن برق‌دار شده است. همان‌طور که در نمودار فازوری (b) مشخص است تا زمانی که راکتور زیر نقطه اشباع (زانویی) فعالیت کند نقطه کار پایدار است. در قسمت (c) نمودار تغییر از نقطه a به نقطه c باعث شروع یک‌سری گذرا در سیستم می‌شود و می‌تواند مشکلاتی را با توجه به تصادفی (random) بودنش، ایجاد کند. در قسمت (d) شکل، دو خط با کوپلینگ خازنی مشترک آورده

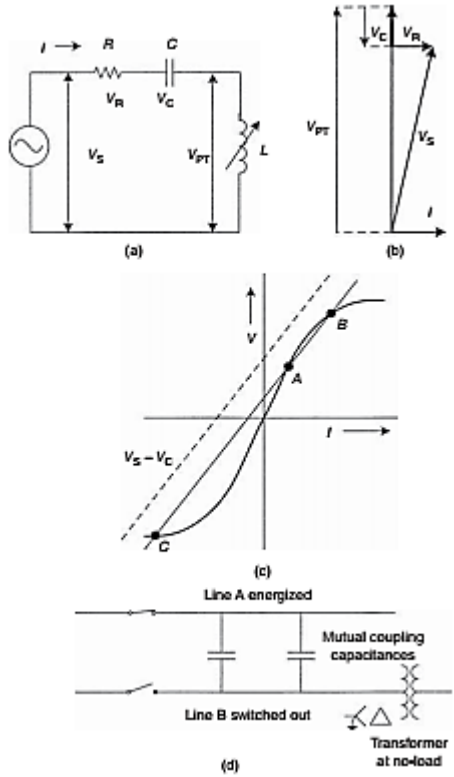
[1] Capacitor Voltage Transformer
[2] Potential Transformer

شده است. ترانس یک مدار فرورزونانس سری با خازن متقابل بین خطوط ایجاد می‌کند.

فرورزونانس می‌تواند در فرکانس کمتر از فرکانس پایه رخ دهد و باعث بالا رفتن دمای ترانس شود. گذراهای کلید زنی روی ولتاژهای فرورزونانس سوار می‌شوند.

این پدیده کلید زنی یک راکتور غیرخطی در بقیه سیستم‌ها نیز می‌تواند ایجاد شود؛ مانند راکتورهای موازی (شانت) در سیستم انتقال.

اضافه ولتاژهایی به بزرگی $4.5\ p.u$ و شکل موج‌های اعوجاج دار و هارمونیکی می‌تواند تولید شود.



شکل ۵-۵

(a) مدار معادل برق‌دار شدن یک سلف غیرخطی، (b) دیاگرام فازوری، (c) نقطه احتمالی وقوع فرورزونانس بسته به اشباع و مشخصه ولتاژ، (d) فرورزونانس به دلیل کوپل خازنی بین دو خط انتقال در زمانی که خط B یک ترانس بی‌بار را برق‌دار می‌کند.

- رزونانس می‌تواند روی بازه گسترده‌ای از $\frac{X_c}{X_m}$ رخ دهد که به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$0.1 < \frac{X_c}{X_m} < 40$$

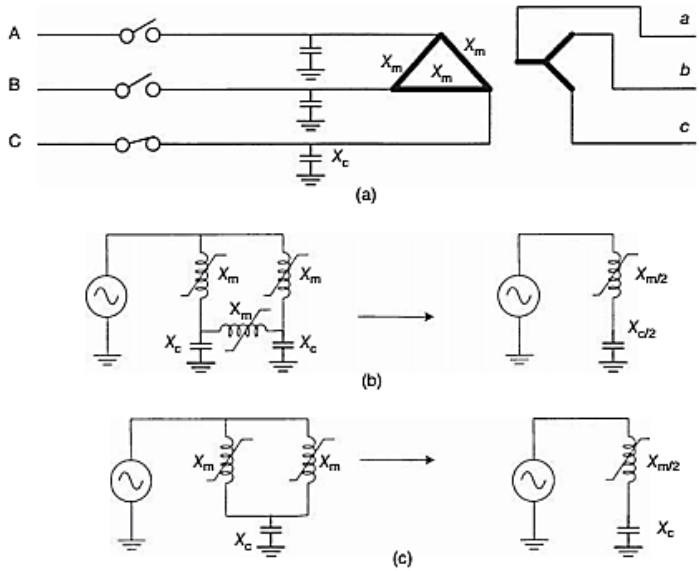
- رزونانس زمانی که ترانس بی‌بار یا کم‌بار است رخ می‌دهد. ترانس‌هایی با بار بیشتر از ۱۰ درصد ظرفیت نامی مستعد فرورزونانس نیستند.

کاپاسیتانس کابل‌ها بین ٤٠ تا ۱۰۰ نانوفاراد در ft ۱۰۰۰ بسته به سایز هادی متغیر است. بااین‌حال راکتانس مغناطیس کننده ترانس 35 kV چندین برابر بیشتر از ترانس 15 kV است. فرورزونانس در ولتاژهای بالاتر می‌تواند خطرناک‌تر باشد. برای ترانس‌هایی با سربندی ستاره – ستاره زمین شده مورد طرفدارترین سیستم توزیع زیرزمینی در آمریکای شمالی است. با اینکه مقاوم‌تر است؛ اما در برابر فرورزونانس کامل در امان نیست.

۵-۳-۱ فرورزونانس سری

در شکل ٥-٦ یک مدار ساده فرورزونانس نشان داده‌شده است. در نظر بگیرید فیوز محدودکننده جریان در یک یا دو خط کار کند. X_C کاپاسیتانس کابل‌ها و بوشینگ ترانس‌ها با زمین است؛ همچنین کلید ممکن است هم‌زمان در هر سه فاز بسته نشود یا هم‌زمان باز نشوند. برای نشان دادن

مدار معادل می‌توانیم هم به‌صورت یک فاز بسته و هم دو فاز بسته که در شکل ٥-٦ قسمت b و c آمده است استفاده کنیم.



شکل ٥-٦ (a) مداری با پتانسیل رزونانس (b) یک فاز بسته (c) دو فاز بسته

مدار معادل مشابهی برای ترانس ستاره – ستاره زمین نشده نیز می‌توان رسم کرد. کمترین کاپاسیتانسی که بتواند فرورزونانس تولید کند را $\frac{X_C}{X_m} = 40$ در نظر می‌گیریم، به این صورت داریم:

$$C_{m\,res} = \frac{2.21 \times 10^{-7} MVA_{transf} I_m}{{V_n}^2}$$

که در آن:

I_m = جریان مغناطیس کنندگی ترانس به‌صورت درصدی از جریان بار کامل، معمولاً جریان مغناطیس کننده ترانس توزیع ۱ تا ۳ درصد جریان بار کامل است.

MVA_{transf} = توان نامی ترانس برحسب MVA

$C_{m\,res}$ = کمترین کاپاسیتانس رزونانس برحسب pF

U_n = ولتاژ فاز برحسب kV

۵-۳-۲ فرورزونانس موازی

حالتی از فرورزونانس که کمتر رایج است در شکل ۵-۷ آمده است که شامل X_m مشترک بین سیم‌پیچی‌ها در ترانس‌های ٤ یا ۵ پایه است.

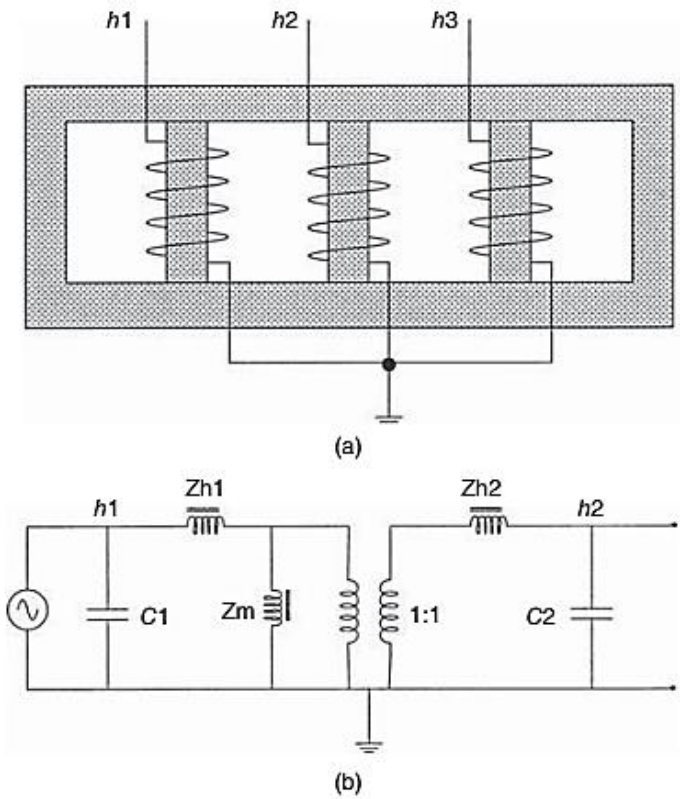
که می‌تواند در اتصال ستاره زمین شده باعث ایجاد رزونانس شود. گرچه اضافه ولتاژها به $1.5\,p.u$ محدود می‌شود؛ زیرا مدار معادل، یک مدار LC موازی است و Z_m ولتاژ را به دلیل اشباع، محدود می‌کند.

از این فرورزونانس‌های شبکه قدرت می‌توان به این صورت اجتناب کرد:

۱. دستگاه‌های محافظتی مناسب، به‌عنوان‌مثال یک رله توالی منفی می‌تواند، ازکارافتادن یک فیوز در مدار سه فاز را تشخیص و جلوی خسارت به ماشین‌های دوار را بگیرد.
۲. قرار دادن برق‌گیرها

۳. مقاومت‌ها و خازن‌های ثانویه بار در مدارهای رله‌ای محافظت‌شده

۴. مقاومت‌های بار بین سیم‌پیچی‌های ترانس ولتاژ (PT) مثلث باز



شکل ۵-۷ (a) فرورزونانس کوپلینگ متقابل (b) مدار معادل فرورزونانس کوپلینگ متقابل

فصل ششم

سنجش اعوجاج هارمونیکی

همان‌طور که در فصل پیشین گفته شد، جریان‌های هارمونیکی تولیدشده توسط بارهای غیرخطی می‌توانند برهمکنش نامطلوبی بر روی سیستم توزیع برق داشته باشند. این برهمکنش غالباً منجر به اعوجاج هارمونیکی ولتاژی و جریانی‌ای می‌شود که در بسیاری از جاها در سیستم توزیع مشاهده می‌شود.بنابراین برای محدود کردن هردوی اعوجاج‌های هارمونیکی ولتاژ و جریان، استاندارد *IEEE-519* پیشنهاد می‌کند که تزریق جریان هارمونیکی از سوی مصرف‌کنندگان نهایی طوری محدود شود که میزان هارمونیک ولتاژی در سیستم قدرت کلی قابل‌قبول باشد، البته به شرطی که سیستم قدرت به‌طور غیرمنتظره‌ای جریان‌های هارمونیکی را تشدید نکند. این روش، مشارکت دوسویه مصرف‌کنندگان نهایی و شرکت‌های توزیع را می‌طلبد.

۱. مصرف‌کنندگان نهایی: برای مصرف‌کنندگان نهایی مجزا، استاندارد *IEEE 519-1992* سطح تزریق جریان هارمونیکی را در نقطه اتصال مشترک (*PCC*) محدود می‌کند. این کمیتی است که مصرف‌کنندگان نهایی روی آن کنترل دارند. محدودیت‌های توصیه‌شده، هم برای تک‌تک مؤلفه‌های هارمونیکی و هم برای اعوجاج دیملندی کل، ارائه می‌شوند. مفهوم نقطه اتصال مشترک در شکل ٦-١ به تصویر کشیده شده است. این محدودیت‌ها به‌جای اینکه برحسب درصدی از مؤلفه پایه بیان شوند، برحسب درصدی از بیشینه میزان جریان دیماندی بیان می‌شوند. هدف از این کار ارائه یک مبنای مشترک برای ارزیابی در طول زمان است.

۲. سیستم توزیع: ازآنجایی‌که اعوجاج ولتاژ هارمونیکی در سیستم برق از برهمکنش بین جریان‌های هارمونیکی بار و امپدانس سیستم توزیع ناشی می‌شود، شرکت برق عمدتاً مسئول محدود کردن اعوجاج ولتاژ در نقطه اتصال *PCC* است. محدودیت‌ها برای مقدار حداکثر تک‌تک مؤلفه‌های هارمونیکی و برای شاخص اعوجاج هارمونیکی کل (*THD*) ارائه می‌شوند. این مقادیر به‌صورت درصدی از ولتاژ پایه تعریف می‌شوند. برای سیستم‌هایی در ولتاژ زیر ۶۹ کیلوولت، شاخص *THD* بایستی کمتر از ۵٪ باشد. گاهی اوقات امپدانس سیستم در فرکانس‌های هارمونیکی به‌واسطه رزونانس بانک‌های خازنی اصلاح ضریب توان، تعیین می‌شوند. این رزونانس منجر به امپدانس خیلی بالا و ولتاژهای هارمونیکی خیلی بالایی می‌شود.از این روی، سازگاری با استاندارد *IEEE-519-1992* اغلب به این معناست که شرکت توزیع بایستی تضمین کند که رزونانس‌های سیستم با فرکانس‌های هارمونیکی موجود در جریان‌های بار منطبق نیستند.

بنابراین، مصرف‌کنندگان و شرکت‌های توزیع برق، مسئولیت‌های خود را برای محدود کردن تزریق جریان‌های هارمونیکی و ایجاد اعوجاج در سیستم در نقطه اتصال مشترک (*PCC*)، تقسیم می‌کنند.

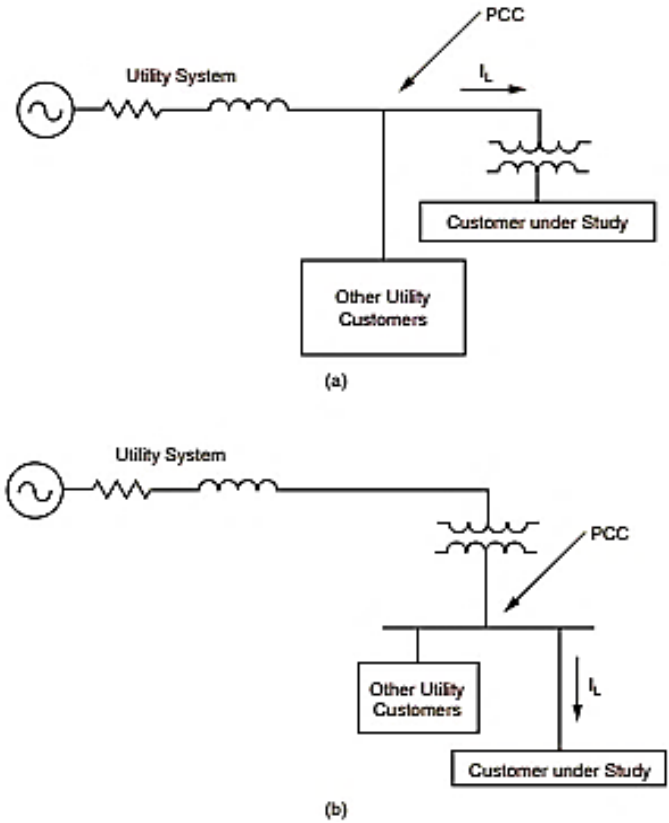
ازآنجایی‌که دو طرف در محدود کردن اعوجاج هارمونیک دخیل هستند؛ ارزیابی اعوجاج‌های هارمونیکی به دو بخش تقسیم می‌شود:

اندازه‌گیری جریانی که دارد توسط بار به سیستم تزریق می‌شود و محاسبه‌ی پاسخ فرکانسی امپدانس سیستم.

اندازه‌گیری‌ها باید به‌طور پیوسته در یک دوره زمانی کافی انجام شود تا تغییرات زمانی و ویژگی‌های آماری اعوجاج هارمونیک به‌طور دقیق نمایش داده شود. از اندازه‌گیری‌های پراکنده و ناپیوسته بایستی اجتناب شود؛ زیرا با توجه به اینکه هارمونیک‌ها یک پدیده پیوسته هستند، اندازه‌گیری‌های پراکنده مشخصه‌های هارمونیکی را به‌طور دقیق نشان نمی‌دهند. حداقل دوره اندازه‌گیری معمولاً یک هفته است؛ زیرا این سیکل بارگذاری، نماینده‌ای برای اکثر بارهای صنعتی و تجاری ارائه می‌دهد.

۱-٦ مفهوم نقطه اتصال مشترک

ارزیابی اعوجاج هارمونیکی، معمولاً در نقطه‌ای بین کاربر نهایی یا مشترکین و سیستم توزیع توان انجام می‌شود که در آن نقطه می‌توان به مشترک دیگری نیز سرویس‌دهی کرد. این نقطه، به نقطه اتصال مشترک یا *(PCC)* معروف است.*PCC* بسته به اینکه آیا چند مصرف‌کننده از ترانسفورماتور تغذیه می‌شود یا خیر، می‌تواند در هر دو سمت اصلی یا ثانویه ترانسفورماتور سرویس قرار گیرد. به‌عبارت‌دیگر، اگر چندین مشترک از سمت اولیه ترانسفورماتور سرویس‌دهی شوند، آنگاه *PCC* در سمت اولیه ترانسفورماتور قرار می‌گیرد. از طرفی، اگر چندین مصرف‌کننده یا مشتری از سمت ثانویه ترانسفورماتور سرویس‌دهی شوند، در این صورت *PCC* در سمت ثانویه ترانسفورماتور قرار می‌گیرد. شکل ٦-۱ این دو حالت را به تصویر می‌کشد.



شکل ٦-١ انتخاب *PCC* بستگی به مکانی دارد که به چندین مشتری سرویس ارائه می‌شود.

(a) نقطه *PCC* در سمت اولیه ترانسفورماتور که در آن به چندین مشتری خدمات داده می‌شود، (b) نقطه *PCC* در ثانویه ترانسفورماتور که در آن به چندین مشتری سرویس ارائه می‌شود.

توجه داشته باشید که در حالتی که سمت اولیه ترانسفورماتور به‌عنوان نقطه *PCC* انتخاب شود، اندازه‌گیری‌های جریان می‌تواند در سمت ثانویه

انجام شود. منتها در این حالت این نتایج اندازه‌گیری به شرطی مورد تأیید هستند که با در نظر گرفتن نسبت تبدیل ترانسفورماتور و تأثیر نوع اتصال سیم‌پیچی‌های آن بر روی مؤلفه‌های توالی صفر، به سمت اولیه ارجاع داده شوند. به‌عنوان‌مثال، یک ترانسفورماتور با اتصال مثلث – ستاره به مؤلفه جریان توالی صفر اجازه نمی‌دهد که از سمت ثانویه به سمت اولیه سیستم جریان پیدا کند. این مؤلفه‌های ثانویه در سیم‌پیچ اولیه مثلث محبوس خواهند شد. بنابراین در ارزیابی برای یک *PCC* در سمت اولیه، مؤلفه‌های توالی صفر (که مؤلفه‌های هارمونیکی معادل مضرب سه هستند) که در سمت ثانویه اندازه‌گیری شده‌اند؛ گنجانده نمی‌شوند.

٦-٢ ارزیابی هارمونیکی سیستم توزیع

ارزیابی هارمونیکی در سیستم توزیع برق شامل رویه‌هایی برای تعیین میزان قابل‌قبول بودن اعوجاج ولتاژ برای همه مشترکین است. اگر اعوجاج ولتاژ بیش از مقدار توصیه‌شده باشد؛ اقدامات اصلاحی برای کاهش اعوجاج به سطحی در محدوده مجاز انجام خواهد شد.

استاندارد *IEEE 519-1992* دستورالعمل‌هایی را برای سطوح قابل‌قبول اعوجاج ولتاژ در سیستم برق ارائه می‌کند. این موارد در جدول ٦-١ خلاصه‌شده است. دقت داشته باشید که محدودیت‌های توصیه‌شده برای حداکثر مقدار منفرد هارمونیک‌ها و برای اعوجاج هارمونیکی کل (*THD*) مشخص‌شده است.

توجه داشته باشید که تعریف اعوجاج هارمونیک کل در جدول ٦-١ کمی متفاوت از تعریف مرسوم است. مقدار THD در این جدول به جای

درصدی از اندازه ولتاژ در فرکانس پایه، به‌صورت درصدی از مقدار مؤثر ولتاژ (rms) نامی سیستم در فرکانس پایه در زمان اندازه‌گیری بیان می‌شود.

تعریف مورداستفاده در اینجا این امکان را می‌دهد که اعوجاج ولتاژ را به جای اینکه نسبت به معیارهایی که با ولتاژ سیستم در نوسان هستند؛ با معیارهای ثابتی ارزیابی کنیم. همانند چنین مفهومی در مورد معیارهای جریان نیز بکار می‌رود.

دو مؤلفه مهم برای محدود کردن میزان اعوجاج ولتاژ در سیستم کلی توزیع برق وجود دارد:

۱. جریان‌های هارمونیکی تزریق‌شده از مشترکین نهایی به سیستم بایستی محدود شود. این جریان‌ها از طریق امپدانس سیستم به سمت منبع تغذیه منتشر می‌شوند و باعث ایجاد اعوجاج در ولتاژ می‌شوند. بنابراین با محدود کردن مقدار جریان هارمونیک تزریقی، می‌توان اعوجاج ولتاژ را نیز محدود کرد. این درواقع روش اصلی کنترل میزان اعوجاج، کلی است که توسط استاندارد *IEEE 519-1992* پیشنهادشده است.

۲. سطوح اعوجاج ولتاژ کلی می‌تواند بسیار زیاد باشد حتی اگر تزریق جریان هارمونیک در محدوده باشد. این وضعیت بیشتر درزمانی رخ می‌دهد که یکی از فرکانس‌های جریان هارمونیکی به فرکانس تشدید سیستم نزدیک باشد. این می‌تواند منجر به سطوح اعوجاج ولتاژ غیرقابل قبول در برخی از مکان‌های سیستم شود. بیشترین اعوجاج

ولتاژ معمولاً در یک بانک خازنی که در تشـدید شـرکت می‌کند، رخ می‌دهد. این مکان می‌تواند از نقطه تزریق دور باشد.

جدول ٦-١ محدودیت‌های ولتاژ هارمونیک نسبت به ولتاژ پایه

Bus voltage at PCC, V_n (kV)	Individual harmonic voltage distortion (%)	Total voltage distortion, THD_{V_n} (%)
$V_n \leq 69$	3.0	5.0
$69 < V_n \leq 161$	1.5	2.5
$V_n > 161$	1.0	1.5

SOURCE: IEEE Standard 519-1992, table 11.1.

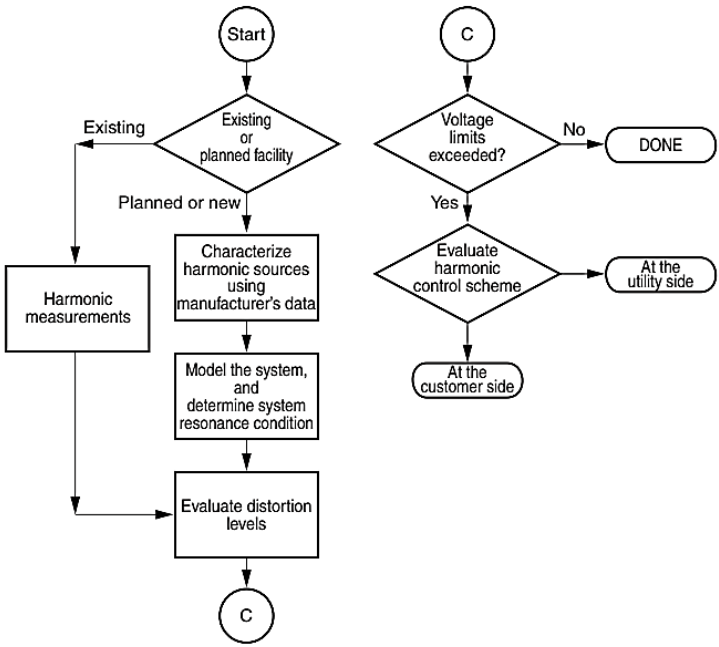
٦-٢-١ روش ارزیابی حد ولتاژ

رویّه کلی برای ارزیابی هارمونیک سیستم توزیع در اینجا توضیح داده‌شده است. این روش برای هر دو تأسیسات موجود و برنامه‌ریزی‌شده قابل اجراست. شکل ٦-٢ نمودار جریان روند ارزیابی را نشان می‌دهد.

١. ***مشخصات منابع هارمونیک***. ویژگی‌های منابع هارمونیک در سیستم با اندازه‌گیری کردن برای تأسـیسـات موجود به بهترین وجه تعیین می‌شـود. این اندازه‌گیری‌ها باید در تأسیساتی که مشکوک به داشتن بارهای غیرخطی مشـکل‌سـاز هسـتند، انجام شـود. مدت‌زمان اندازه‌گیری‌ها معمولاً حداقل یک هفته اسـت تا بتوان تمام تغییرات چرخه‌ای بار را ثبت کرد. برای تأسیسات جدید یا برنامه‌ریزی‌شده، مشخصات هارمونیکی ارائه‌شده توسط سازندگان ممکن است کافی باشد.

۲. ***مدل‌سازی سیستم***. پاسخ سیستم به جریان‌های هارمونیک تزریق‌شده در مکان‌های کاربر نهایی یا توسط دستگاه‌های غیرخطی در سیستم قدرت با توسعه یک مدل کامپیوتری از سیستم تعیین می‌شود. مدل‌های سیستم توزیع و انتقال همان‌طور که توضیح داده‌شده است؛ توسعه داده می‌شوند.

۳. ***پاسخ فرکانس سیستم***. رزونانس‌های احتمالی سیستم باید با اسکن فرکانسی کل سیستم توزیع برق تعیین شود. اسکن فرکانس برای تمام پیکربندی‌های بانک خازن موردتوجه انجام می‌شود؛ زیرا پیکربندی خازن متغیر اصلی است که بر فرکانس‌های تشدید تأثیر می‌گذارد.



شکل ٦-٢ روند ارزیابی حدود هارمونیک ولتاژ

٦-٢-٢ ارزیابی میزان اعوجاج مورد انتظار

حتی با تشدید سیستم در نزدیکی هارمونیک‌های مشخصه، سطوح اعوجاج ولتاژ در اطراف سیستم ممکن است؛ قابل‌قبول باشد. در سیستم‌های توزیع، بیشتر رزونانس‌ها به‌طور قابل‌توجهی توسط مقاومت‌های موجود در سیستم میرا می‌شوند که باعث کاهش تقویت جریان‌های هارمونیکی می‌شود. منابع هارمونیکی تخمین زده‌شده با پیکربندی سیستم استفاده می‌شود که بدترین حالت را برای مشخصه‌های پاسخ فرکانسی، برای محاسبه بالاترین اعوجاج هارمونیک مورد انتظار ایجاد

می‌کند. این نشان می‌دهد که آیا اقدامات کاهش هارمونیک لازم است یا خیر.

٦-۲-۳ ارزیابی طرح کنترل هارمونیک

گزینه‌های کنترل هارمونیک شامل: کنترل تزریق هارمونیک از بارهای غیرخطی، تغییر مشخصات پاسخ فرکانسی سیستم یا مسدود کردن جریان‌های هارمونیکی با اعمال فیلترهای هارمونیکی است. طراحی فیلترهای پسیو برای برخی از سیستم‌ها می‌تواند دشوار باشد؛ زیرا ویژگی‌های سیستم به‌طور مداوم در حال تغییر هستند، زیرا بارها تغییر می‌کنند و بانک‌های خازن سوئیچ می‌شوند.

در فصل هفتم کنترل‌های هارمونیک، به‌تفصیل موردبحث قرار می‌گیرد.

٦-۳ ارزیابی هارمونیکی برای تأسیسات مشترکین نهایی

مشکلات هارمونیکی بیشتر در تأسیسات برقی مشترکین رایج است تا در سیستم تأمین و توزیع توان. بیشتر بارهای غیرخطی در داخل تأسیسات مصرف‌کننده نهایی قرار دارند و بیشترین مقدار اعوجاج هارمونیکی ولتاژ نزدیک به منابع هارمونیک رخ می‌دهد. مهم‌ترین مشکلات، زمانی رخ می‌دهند که بارهای غیرخطی و خازن‌های اصلاح‌کننده ضریب توان وجود داشته باشد که منجر به شرایط تشدید (رزونانس) شود.

استاندارد *IEEE 519-1992* حدود اعوجاج جریان هارمونیک را در نقطه اتصال مشترک (*PCC*) تعیین می‌کند. محدودیت‌هایی که در جدول ۲-٦ خلاصه‌شده است، به بار مصرفی مشترکین در رابطه با ظرفیت اتصال

کوتاه سیستم در PCC بستگی دارد. متغیرها و محدودیت‌های اضافی به محدودیت‌های ارائه‌شده در جدول ٦-٢ عبارتند از:

جدول ٦-٢ محدودیت‌های اعوجاج هارمونیکی (I_h) برحسب درصدی از I_L

I_{SC}/I_L	$h < 11$	$11 \le h < 17$	$17 \le h < 23$	$23 \le h < 35$	$35 \le h$	TDD
			$V_n \le 69$ kV			
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20–50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50–100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100–1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0
			69 kV < $V_n \le$ 161 kV			
<20*	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20–50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50–100	5.0	2.25	2.0	0.75	0.35	6.0
100–1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
>1000	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0
			$V_n >$ 161 kV			
<50	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
≥50	3.0	1.50	1.15	0.45	0.22	3.75

*All power generation equipment applications are limited to these values of current distortion regard less of the actual short-circuit current ratio I_{SC}/I_L.
SOURCE: IEEE Standard 519-1992, tables 10.3, 10.4, 10.5.

- I_h اندازه مؤلفه هر هارمونیک h ام است.
- I_{SC} جریان اتصال کوتاه در نقطه اتصال مشترک است.
- I_L مؤلفه اصلی حداکثر جریان دیماند بار در نقطه اتصال مشترک است. می‌توان آن را به‌عنوان میانگین حداکثر جریان‌های دیماند ماهانه برای ۱۲ ماه قبل محاسبه کرد یا ممکن است لازم باشد تخمین زده شود.

- این محدودیت‌ها برای مؤلفه‌های هارمونیکی فرد اعمال می‌شود. برای مؤلفه‌های هارمونیکی زوج مقدار محدودیت‌ها باید ۲۵ درصد مقادیر محدودیت‌های اعمال‌شده به هارمونیک‌های فرد باشد.
- اعوجاج جریانی که منجر به جریان آفست DC در نقطه اتصال مشترک می‌شود، مجاز نیست.
- اعوجاج دیماند کل (TDD) برحسب حداکثر جریان بار تقاضا بیان می‌شود، یعنی:

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2} (I_h{}^2)}}{I_L} \times 100\%$$

- اگر بارهای تولیدکننده هارمونیک، شامل مبدل‌های توان با عدد پالس q بالاتر از ٦ باشد، حدود نشان داده‌شده در جدول ٦-١ با ضریب $\sqrt{q/6}$ افزایش می‌یابد.

در محاسبه جریان اتصال کوتاه در نقطه اتصال مشترک، بایستی شرایط عادی سیستم که منجر به حداقل ظرفیت اتصال کوتاه در نقطه اتصال مشترک می‌شود، مورد استناد قرار گیرد؛ زیرا این شرایط منجر به شدیدترین تأثیرات بر روی سیستم می‌شود.

یک روش برای تعیین نسبت اتصال کوتاه به ترتیب زیر است:

۱. جریان اتصال کوتاه سه فاز I_{SC} را در نقطه اتصال مشترک تعیین کنید. این مقدار ممکن است به طور مستقیم از طریق محاسبات شرکت برق به‌دست‌آمده و برحسب آمپر بیان شود. اگر وظیفه اتصال کوتاه برحسب مگا ولت‌آمپر داده‌شده است، آن را با استفاده از عبارت زیر به مقدار آمپر تبدیل کنید:

$$I_{SC} = \frac{1000 \times MVA}{\sqrt{3}\, KV} \qquad (A)$$

که در آن MVA و kV به ترتیب ظرفیت اتصال کوتاه سه فاز برحسب مگا ولت‌آمپر و ولتاژ خط به خط در نقطه اتصال مشترک را برحسب کیلوولت نشان می‌دهند.

۲. میانگین بار دیماند PD را برحسب کیلووات در ۱۲ ماه اخیر بیابید. این را می‌توان از اطلاعات صورت حساب برق پیدا کرد.

۳. متوسط دیماند برحسب کیلووات را با استفاده از عبارت زیر به جریان دیماند متوسط در آمپر تبدیل کنید:

$$I_L = \frac{1000 \times MVA}{PF\ \sqrt{3}\ KV} \quad (A)$$

که در آن PF ضریب توان متوسط مندرج در صورت حساب است.

۴. حالا نسبت اتصال کوتاه می‌تواند از طریق رابطه زیر به دست آید:

$$Short\ Circuit\ Ratio = \frac{I_{SC}}{I_L}$$

این نسبت اتصال کوتاهی است که برای تعیین حدود جریان‌های هارمونیک در استاندارد *IEEE-519-1992* استفاده می‌شود.

در برخی موارد، میانگین حداکثر جریان بار دیماند در نقطه اتصال مشترک برای ۱۲ ماه گذشته در دسترس نیست. در چنین شرایطی، این مقدار باید بر اساس پروفایل‌های بار پیش‌بینی‌شده تخمین زده شود. برای بارهای فصلی، میانگین باید فقط بر روی بیشینه بارها، گرفته شود.

٦-٤ روش ارزیابی حدود جریان‌های هارمونیکی.

این روش شامل ارزیابی ویژگی‌های هارمونیک تولیدی تک‌تک بارهای مصرف‌کننده نهایی با توجه به محدودیت‌های استاندارد *IEEE 519-1992* است. با این‌حال، هنگام در نظر گرفتن تجهیزات اصلاح ضریب توان، ملاحظات ویژه‌ای لازم است.

۱. نقطه اتصال مشترک را تعریف کنید. برای کاربران نهایی صنعتی و تجاری، نقطه اتصال مشترک (*PCC*) به طور معمول در سمت اولیه ترانسفورماتوری است که توان لازم تأسیسات را تأمین می‌کند.
۲. نسبت اتصال کوتاه را در نقطه اتصال مشترک محاسبه کنید و بر اساس آن، محدودیت‌های متناظر با هر یک از هارمونیک‌ها و نیز *TDD* را بیابید.

۳. منابع هارمونیک را مشخص کنید. هر یک از بارهای غیرخطی در کارخانه یا مجتمع صنعتی ترکیب می‌شوند تا تشکیل میزان کلی تولید جریان هارمونیکی را دهند. بهترین راه برای توصیف جریان هارمونیک در یک مرکز موجود، انجام لندازه‌گیری در نقطه اتصال مشترک در طی یک دوره زمانی (حداقل یک هفته) است. برای مطالعات برنامه‌ریزی، جریان‌های هارمونیکی را می‌توان با دانستن ویژگی‌های بارهای غیرخطی فردی و درصد کل بار ایجادشده توسط این بارهای غیرخطی تخمین زد.

۴. میزان جریان هارمونیکی را با توجه به محدودیت‌های جریانی با استفاده از جدول ٦-۲ ارزیابی کنید. اگر این مقادیر از حد مجاز فراتر رود، کارخانه یا مجتمع صنعتی نمی‌تواند محدودیت‌های توصیه‌شده توسط *IEEE Standard 519-1992* را برآورده کند و کاستن اجباری از میزان هارمونیک‌ها ممکن است لازم باشد.

فصل هفتم

کنترل هارمونیک‌ها

۷-۱ اصول کنترل هارمونیک‌ها

در تمام سیستم‌های قدرت درجه‌ای از اعوجاج وجود دارد. اساساً تنها در صورت بروز مشکل، می‌بایست هارمونیک‌ها را کنترل کرد. سه دلیل شایع برای مشکلات هارمونیکی وجود دارد:

۱. منبع جریان‌های هارمونیک بسیار بزرگ است.
۲. مسیری که جریان طی می‌کند، خیلی طولانی است (ازنظر الکتریکی) و درنتیجه اعوجاج ولتاژ بالا یا تداخل تلفنی ایجاد می‌شود.
۳. پاسخ سیستم به یک یا چند هارمونیک، آنها را به میزانی بیش ازآنچه قابل‌تحمل برای سیستم است، تقویت می‌کند.

هنگامی‌که مشکلی رخ می‌دهد؛ گزینه‌های اصلی برای کنترل هارمونیک‌ها عبارت‌اند از:

۱. کاهش جریان‌های هارمونیکی تولیدشده توسط بار.
۲. افزودن فیلترها به‌منظور منحرف کردن مسیر جریان‌های هارمونیک از سیستم، مسدود کردن جریان‌های هارمونیکی یا تأمین جریان بارهای هارمونیکی را به‌صورت محلی.
۳. اصلاح (تعدیل) پاسخ فرکانس سیستم را با استفاده از فیلترها، سلف‌ها یا خازن‌ها.

۷-۱-۱ کاهش جریان‌های هارمونیکی بارها

اغلب کارهای کمی می‌توان با تجهیزات بار موجود انجام داد تا میزان جریان هارمونیک تولیدشده را به میزان قابل‌توجهی کاهش دهد، مگر اینکه

از آن به‌طور ناقص بهره‌برداری شود. درحالی‌که یک ترانسفورماتور فوق تحریک‌شده را می‌توان با کاهش ولتاژ اعمال‌شده به محدوده صحیح به عملکرد عادی بازگرداند، دستگاه‌های قوس الکتریکی و بیشتر مبدل‌های برق الکترونیکی در مشخصات طراحی‌شده خود قفل می‌شوند.

درایوهای *PWM* که خازن باس *DC* را به طور مستقیم از خط و بدون هیچ امپدانس از پیش تعبیه‌شده‌ای شارژ می‌کنند، یک استثناء در این مورد هستند. افزودن یک راکتور خطی یا ترانسفورماتور به‌صورت سری هارمونیک‌ها را به میزان قابل‌توجهی کاهش می‌دهد و همچنین مزایای حفاظت گذرا را فراهم می‌کند.

از نحوه سیم‌پیچی ترانسفورماتور می‌توان برای کاهش جریان‌های هارمونیکی در سیستم‌های سه فاز استفاده کرد. تغییر فاز نیمی از مبدل‌های قدرت ٦ پالسی در بار نیروگاهی به میزان ۳۰ درجه می‌تواند بارهای ۱۲ پالسی را با کاهش چشمگیر هارمونیک‌های پنجم و هفتم مواجه کند. ترانسفورماتورهای با اتصال مثلث می‌توانند، عبور جریان‌های هارمونیکی توالی صفر (معمولاً هارمونیک‌های مضرب سه) از خط را مسدود کنند. ترانسفورماتورهای زیگزاگ و زمین می‌توانند با ایجاد مسیر موازی، هارمونیک‌های مضرب سه را از خط منحرف کنند.

مشخصات خرید می‌تواند با جریمه کردن پیشنهادهای فروشندگان با محتوای هارمونیک بالا، گام بلندی را در جهت جلوگیری از مشکلات هارمونیک برداشت. این امر به‌ویژه برای بارهایی، مانند روشنایی با راندمان بالا بسیار مهم است.

۷-۱-۲ فیلتر کردن

فیلتر شنت تا جایی که ازنظر عملی نزدیک به منبع ایجاد اعوجاج باشد، جریان‌های هارمونیکی را اتصال کوتاه می‌کند. این کار جریان‌های هارمونیکی را از سیستم خارج می‌کند. این رایج‌ترین نوع فیلتری است که به دلیل اقتصادی بودن و همچنین به دلیل اصلاح ضریب توان بار و همچنین حذف جریان هارمونیکی اعمال می‌شود.

روش دیگر اعمال فیلتر سری است که عبور جریان هارمونیکی را مسدود می‌کند. این فیلتر یک مدار موازی تیون شده است به‌صورت سری در مدار شبکه قرار می‌گیرد و امپدانس بالایی در عبور جریان هارمونیکی ایجاد می‌کند. ازآنجایی‌که عایق‌کاری آن دشوار بوده (به دلیل عبور جریان خط) و موجب اعوجاج دار شدن ولتاژ بار می‌شود، اغلب از آن استفاده نمی‌شود. یکی از کاربردهای رایج این نوع فیلتر، استفاده از آن در سیم نوترال بانک‌های خازنی با اتصال ستاره‌ی زمین شده است که جریان‌های هارمونیکی مضرب سه را مسدود می‌کند و درعین‌حال در فرکانس اصلی سیستم (۵۰ یا ٦۰ هرتز) امپدانس کمی دارد و بدین ترتیب خاصیت زمین بودن نقطه‌ی نوترال را به‌خوبی حفظ می‌کند.

فیلترهای اکتیو با تولید الکترونیکی مؤلفه‌های هارمونیکی جریان در یک‌بار غیرخطی کار می‌کنند.

در مورد فیلترها در فصل هشتم، بیشتر توضیح داده‌شده است.

۷-۱-۳ تعدیل پاسخ فرکانسی سیستم

۱. *افزودن یک فیلتر شنت*. این نه‌تنها یک جریان هارمونیکی مشکل‌ساز را از سیستم جدا می‌کند، بلکه اغلب اوقات (اما نه همیشه) پاسخ سیستم را طور کامل و در جهت بهتر شدن تغییر می‌دهد.

۲. *اضافه کردن یک راکتور به‌منظور تیون زدایی*[1] *سیستم*. رزونانس‌های مشکل‌ساز معمولاً بین اندوکتانس سیستم و خازن‌های اصلاح ضریب توان موازی سیستم رخ می‌دهد. راکتور باید بین خازن و منبع سیستم تأمین اضافه شود. یکی از روش‌ها این است که صرفاً یک راکتور را به‌صورت سری با خازن قرار دهیم تا *فرکانس رزونانس سیستم را جابجا کند*، بدون اینکه واقعاً قصد تیون کردن مجموعه خازن و راکتور به یک فرکانس معین، برای ایجاد فیلتر تیون داشته باشیم. روش دیگر، اضافه کردن راکتانس به‌صورت سری در خط است.

۳. *تغییر اندازه خازن*. این اغلب یکی از کم‌هزینه‌ترین گزینه‌ها برای شرکت‌های توزیع برق و مشترکین صنعتی است.

۴. *انتقال خازن به نقطه‌ای از سیستم با امپدانس اتصال کوتاه متفاوت یا تلفات بیشتر*. هنگامی‌که یک بانک جدید باعث تداخل تلفنی می‌شود؛ این یک گزینه برای شرکت‌های توزیع برق است. انتقال بانک خازنی به شاخه‌ی دیگری از فیدر ممکن است به‌خوبی مشکل را حل کند. این گزینه اغلب برای کاربران صنعتی گزینه مناسبی محسوب نمی‌شود، زیرا خازن را نمی‌توان به‌اندازه کافی جابجا کرد تا تفاوت ایجاد کند.

---

[1] Detune

۵. خازن را حذف کنید و به‌سادگی تلفات بیشتر، ولتاژ کمتر و جریمه ضریب توان را بپذیرید. اگر ازنظر فنی امکان‌پذیر باشد، گاهی اوقات این بهترین انتخاب اقتصادی است.

۷-۲ چه جاهایی هارمونیک‌ها را کنترل کنیم

راهبردهای کاهش مشکلات اعوجاج هارمونیک تا حدودی بر اساس مکان متفاوت است. راهکارهای زیر راه‌هایی برای کنترل اعوجاج هارمونیک در فیدر توزیع برق و سیستم قدرت مصرف‌کننده نهایی هستند.

۷-۲-۱ بر روی فیدرهای شرکت توزیع برق

نسبت X/R در یک فیدر توزیع برق معمولاً کم است؛ بنابراین، تقویت هارمونیک‌ها در اثر رزونانس با بانک‌های تغذیه‌کننده معمولاً در مقایسه با آنچه ممکن است در داخل یک مرکز صنعتی یافت شود، ناچیز است. مهندسان شرکت‌های توزیع برق عادت دارند که بدون نگرانی در مورد هارمونیک‌ها، فیدرهای بانک‌های خازنی را در مکان‌های موردنیاز خود قرار دهند.

بااین‌حال، اعوجاج ولتاژ ناشی از تشدید فیدر بانک‌های خازنی ممکن است در موارد معدودی از حد مجاز فراتر رود و نیاز به کاهش داشته باشد. هنگامی‌که مشکلی رخ می‌دهد، راهبرد معمول این است که ابتدا با جابجایی بانک خازنی مشکل‌ساز یا تغییر اندازه خازن یا اتصال نوترال، راه‌حلی را امتحان کنیم.

برخی از مشکلات هارمونیکی مرتبط با فیدر بانک‌های خازنی به دلیل افزایش هارمونیک‌های مضرب سه در مدار نوترال فیدر است. برای تغییر جریان‌های هارمونیکی توالی صفر، تغییراتی در نقطه نوترال بانک‌های خازنی با اتصال ستاره اعمال می‌شود. برای مسدود کردن عبور جریان توالی صفر، نقطه نوترال اجازه شناور شدن دارد. در موارد دیگر، کمک به عبور جریان‌های هارمونیک سوم با قرار دادن یک راکتور در نوترال به‌منظور تبدیل بانک خازنی به یک مدار تشدید (رزونانسی) تیون شده شنت برای یک هارمونیک توالی صفر مفیدتر است.

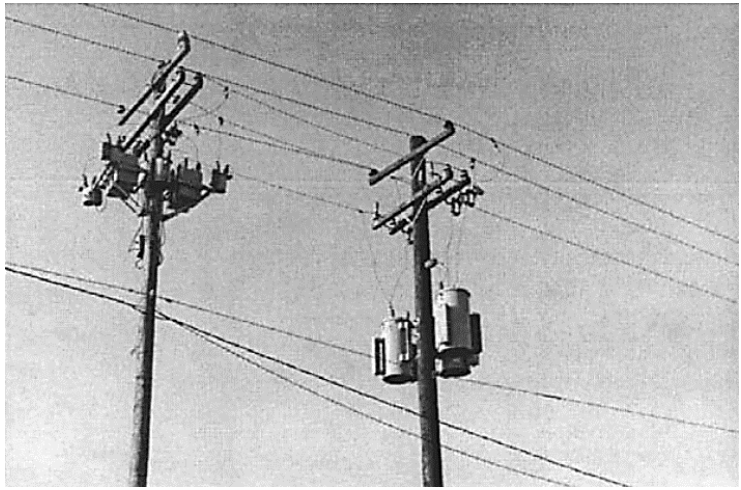
مشکلات هارمونیکی در فیدرهای توزیع اغلب فقط در مواقع کم باری و بارهای سبک وجود دارد. در این حالت، ولتاژ افزایش می‌یابد و باعث می‌شود که ترانسفورماتورهای توزیع جریان‌های هارمونیکی (جریان تحریک) بیشتری تولید کنند و بار کمتری برای کاهش تشدید وجود داشته باشد. از مدار خارج کردن خازن‌ها در این زمان، اغلب مشکل را حل می‌کند.

اگر جریان‌های هارمونیکی از منابع پراکنده بر روی فیدرهای توزیع نیاز به فیلتر شدن داشته باشند، می‌توان از این ایده که چند فیلتر در سمت انتهایی فیدر توزیع شود، استفاده کرد. درحالی‌که این کار اغلب انجام نمی‌شود، تعداد نصب فیلتر فیدر در حال افزایش است. شکل ۷-۱ نمونه‌ای از فیلتر نصب‌شده روی فیدر توزیع هوایی را نشان می‌دهد. این امر مسیر متوسط جریان هارمونیکی را کوتاه می‌کند و احتمال تداخل تلفنی و کاهش افت ولتاژ هارمونیکی در خطوط را کاهش می‌دهد. فیلترها تقریباً به‌صورت

یک اتصال کوتاه نسبت به حداقل یک مؤلفه هارمونیکی ظاهر می‌شوند و این اعوجاج ولتاژ روی فیدر را به حداقل می‌رساند. با توجه به اعوجاج ولتاژی که در انتهای فیدر توسط فیلترها تثبیت‌شده است[1]، افزایش اعوجاج ولتاژ از حد مجاز درجاهای دیگر دشوارتر است.

مطالعات جریان هارمونیکی همیشه باید زمانی که بانک‌های خازنی بزرگ در پست‌های توزیع نصب‌شده‌اند، انجام شود؛ نمی‌توان روی تلفات سیستم برای کاهش رزونانس در این نقطه از سیستم حساب کرد و تقویت ولتاژ و جریان به‌واسطه رزونانس می‌تواند شدید باشد.

[1] Nailed Down



شکل ۷-۱ نصب فیلتر بر روی فیدر توزیع هوایی. راکتورهای هسته آهنی با عایق روغن روی یک تیر برق بتنی مجزا از بانک خازنی و کلیدها نصب‌شده‌اند.

۷-۲-۲ در تجهیزات مصرف‌کننده نهایی

هنگامی‌که مشکلات هارمونیکی در تأسیسات کاربر نهایی ایجاد می‌شود، اولین قدم این است که تعیین کنیم آیا علت اصلی تشدید، خازن‌های اصلاح ضریب توان در تأسیسات است یا خیر؟ اگر پاسخ مثبت است، اولین راه‌حل ساده امتحان کردن توان راکتیو خازنی با مقداری متفاوت است. با کنترل‌کننده‌های ضریب توان خودکار (رگولاتورها)، ممکن است بتوان یک طرح کنترلی را انتخاب کرد که از پیکربندی‌ای که باعث ایجاد مشکل می‌شود اجتناب کرد. در غیر این صورت، خازن‌های زیادی به‌طور تصادفی با بار سوئیچ می‌شوند که اجتناب از شرایط تشدید غیرممکن خواهد بود. در این صورت فیلتر کردن ضروری.

نصب فیلترها بر روی سیستم‌های فشار ضعیف کاربر نهایی معمولاً عملی‌تر و مقرون به‌صرفه‌تر از سیستم‌های توزیع برق است. معیارهای نصب فیلتر راحت‌تر برآورده می‌شوند و تجهیزات فیلتر به‌راحتی در بازار موجود است.

هنگامی‌که مقدار جریان‌های هارمونیکی تزریق‌شده توسط بارها بیش‌ازحد باشد، مشترکین صنعتی؛ همچنین باید ابزارهای کاهش هارمونیک‌ها را با استفاده از اتصالات ترانسفورماتور مختلف و چوک‌های خط بررسی کنند. در ساختمان‌های اداری، ترانسفورماتورهای زیگزاگ و فیلترهای هارمونیک مضرب سه می‌توانند تأثیر جریان‌های هارمونیکی مضرب سه را بر مدارهای نوترال کاهش دهند.

مطالعات هارمونیکی بایستی بر روی تمامی خازن‌های نصب‌شده بر روی شین اصلی در سیستم‌های صنعتی انجام شود. در این مکان، تلفات خط کافی برای کاهش رزونانس وجود ندارد؛ بنابراین، زمانی که تشدید با یک فرکانس هارمونیکی که مؤلفه‌ای قوی در جریان بار است منطبق باشد، اعوجاج ولتاژ حاصل اغلب شدید است.

مشکلات تشدید اغلب زمانی که خازن‌ها در کف کارخانه روی موتورها و در مراکز کنترل موتور (*MCC*)[1] قرار می‌گیرند، شدت کمتری دارند. همچنین این امر مزیت کاهش تلفات سیستم را در مقایسه با قرار دادن خازن بر روی شین اصلی دارد. البته این راه‌حل به دلیل نصب تأسیسات

[1] Motor Control Centers

متعدد موردنیاز، می‌تواند هزینه بیشتری نسبت به استفاده از یک خازن در باس اصلی داشته باشد. این فرض را بر این می‌گذارد که کابل‌ها به‌اندازه‌ای طولانی هستند که مقاومت کافی به مدار وارد کنند تا رزونانس کم شود. در کارخانه‌هایی با کابل‌های کوتاه، ممکن است، نتوان به مزایای کاهش هارمونیک قابل‌توجهی دست‌یافت.

۳-۷ مطالعات هارمونیکی

مطالعات هارمونیکی نقش مهمی در توصیف و درک میزان مشکلات هارمونیکی ایفا می‌کند. مطالعات هارمونیکی اغلب زمانی انجام می‌شود که دنبال:

۱. یافتن راه‌حلی برای مشکل هارمونیک موجود باشیم.
۲. نصب بانک‌های خازنی بزرگ در سیستم‌های توزیع برق یا سیستم‌های برق صنعتی باشیم.
۳. نصب دستگاه‌ها یا بارهای غیرخطی بزرگ باشیم.
۴. طراحی فیلتر هارمونیکی باشیم.
۵. تبدیل بانک خازنی ضریب توان به فیلتر هارمونیک باشیم.

مطالعات هارمونیکی ابزاری برای ارزیابی راه‌حل‌های مختلف ممکن و اثربخشی آنها در طیف وسیعی از شرایط قبل از اجرای راه‌حل نهایی فراهم می‌کند. در این بخش روش‌های انجام مطالعات هارمونیک ارائه می‌شود.

۷-۳-۱ مراحل مطالعات هارمونیکی

روش ایده‌آل برای انجام مطالعه هارمونیک سیستم‌های قدرت را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه کرد:

۱. اهداف مطالعه را تعیین کنید. این امر موضوعی مهم برای ادامه تحقیقات در مسیر است. به‌عنوان‌مثال، هدف ممکن است شناسایی عامل ایجاد یک مشکل موجود و حل آن باشد. یکی دیگر ممکن است تعیین این باشد که آیا توسعه یک نیروگاه جدید شامل تجهیزاتی مانند درایوهای تنظیم سرعت و خازن‌ها احتمالاً مشکل دارد یا خیر؟

۲. اگر سیستم پیچیده است، یک شبیه‌سازی کامپیوتری پیش از اندازه‌گیری بر اساس بهترین اطلاعات موجود انجام دهید. اندازه‌گیری‌ها ازنظر نیروی کار، تجهیزات و اختلالات احتمالی در عملیات کارخانه گران هستند. به‌طورکلی مقرون‌به‌صرفه است که قبل از شروع اندازه‌گیری‌ها، ایده خوبی داشته باشید که به دنبال چه چیزی هستید و کجاها را بایستی نگاه کنید.

۳. اندازه‌گیری شرایط هارمونیکی موجود، مشخص کردن منابع جریان هارمونیک و اعوجاج ولتاژ باس سیستم.

۴. مدل کامپیوتری را با استفاده از اندازه‌گیری‌ها کالیبره کنید.

۵. شرایط مدار جدید یا مشکل موجود را مطالعه کنید.

۶. ایجاد راه‌حل (فیلتر و...) و بررسی فعل‌وانفعالات نامطلوب سیستم. همچنین حساسیت نتایج به متغیرهای مهم را بررسی کنید.

۷. پس از نصب راه‌حل‌های پیشنهادی، نظارت را برای بررسی صحت عملکرد سیستم انجام دهید.

مسلماً انجام هر یک از این مراحل همیشه به‌صورت ایده‌آل امکان‌پذیر نیست. اغلب مراحل حذف‌شده یک یا هر دو مرحله اندازه‌گیری به دلیل هزینه زمان مهندسی، سفر و هزینه تجهیزات، باقی می‌ماند. ممکن است یک تحلیل‌گر باتجربه بتواند مشکلی را بدون اندازه‌گیری حل کند، اما اکیداً توصیه می‌شود که اندازه‌گیری‌های اولیه در صورت امکان انجام شود؛ زیرا شگفتی‌های ناخوشایند زیادی در سایه تحلیل‌های هارمونیکی در کمین هستند.

۷-۳-۲ مدل کردن سیستم

دو موضوع اساسی وجود دارد که باید در توسعه یک مدل سیستمی برای مطالعات شبیه‌سازی هارمونیکی در نظر گرفته شود :

اولین مسئله، گستردگی مدل سیستمی است که باید در شبیه‌سازی گنجانده شود.دوم اینکه باید تصمیم گرفت که آیا مدل باید به‌عنوان یک معادل تک فاز یا یک مدل کامل سه فاز نمایش داده شود.

به‌عنوان نمونه‌ای از گستردگی مدل، فرض کنید یک شرکت برق قصد دارد یک بانک خازنی بزرگ را روی یک فیدر توزیع نصب کند و می‌خواهد پاسخ فرکانسی مرتبط با بانک خازنی را ارزیابی کند.

نشان دادن کل سیستم توزیع معمولاً عملی نیست؛ زیرا توسعه مدل زمان‌بر است و منابع محاسباتی را برای اجرای شبیه‌سازی‌ها تحت‌فشار قرار می‌دهد.

یکی از رویکردها این است که شروع به توسعه یک مدل یک یا دو باس، از باس موردنظر خود کنیم و همه‌چیز را دراین‌بین لحاظ کنیم. روش دیگر شروع با یک مدار ساده کوچک است که به‌طور دقیق پدیده‌ها را نشان می‌دهد و جزئیات بیشتری از سیستم را برای تعیین تأثیر بر نتیجه راه‌حل اضافه می‌کند. در نقطه‌ای که افزودن جزئیات بیشتر سیستم نتایج تجزیه‌وتحلیل را تغییر نمی‌دهد، سیستم فیزیکی به‌اندازه کافی توسط مدل شبیه‌سازی نشان داده می‌شود.

در مدل‌سازی سیستم‌های توزیع برای مطالعات هارمونیکی، به طور معمول نمایش سیستم انتقال بالادستی با یک اتصال کوتاه در سمت فشارقوی ترانسفورماتور پست کافی است. امپدانس نشتی ترانسفورماتور بر معادل اتصال کوتاه غالب است و به‌طور مؤثر انتقال و توزیع را برای بسیاری از مطالعات جدا می‌کند. بااین‌حال، اگر یک بانک خازنی در نزدیکی سمت فشارقوی ترانسفورماتور وجود داشته باشد، بخشی از سیستم انتقال باید به‌گونه‌ای مدل‌سازی شود که شامل بانک خازنی باشد. ترکیب ترانسفورماتور و بانک خازنی ممکن است به‌عنوان یک فیلتر برای برخی فرکانس‌ها که از سمت ولتاژ پایین ترانسفورماتور دیده می‌شود، عمل کند.

اجزای سیستم توزیع در پایین‌دست ترانسفورماتور پست (در سمت فشار ضعیف) مانند فیدرها، بانک‌های خازنی، ترانسفورماتورهای سرویس

کلید و بانک‌های خازنی کاربر نهایی باید نمایش داده شوند. ازآنجایی‌که بانک‌های خازنی فیدر بر ظرفیت خازنی سیستم غالب هستند؛ معمولاً قابل‌قبول است که از ظرفیت خازنی خطوط فیدر خط هوایی چشم‌پوشی شود. بااین‌حال، اگر مقدار قابل‌توجهی از کابل *UD* وجود داشته باشد، ظرفیت کابل باید نشان داده شود؛ به‌خصوص اگر مطالعه مربوط به هارمونیک‌های مرتبه بالاتر باشد.

سپس تحلیل‌گر باید تصمیم بگیرد که آیا مدل باید به‌عنوان یک مدل کامل سه فاز یا یک معادل تک فاز نمایش داده شود. یک مدل معادل تک فاز به‌طورکلی در مقایسه با یک مدل سه فاز ساده‌تر بوده و پیچیدگی کمتری دارد. بااین‌حال، مدار معادل تک فاز، برای تجزیه‌وتحلیل پدیده‌ها یا سیستم‌های نامتعادل با بارهای تک فاز متعدد اغلب ناکافی است.

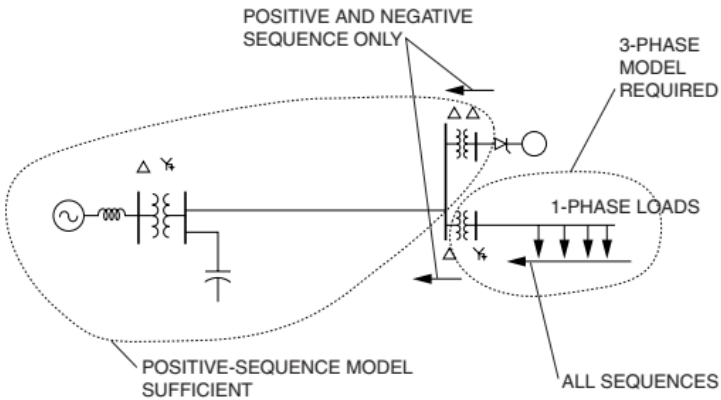
خوشبختانه، قانونی وجود دارد که اجازه ساده کردن مدل‌سازی توالی مثبت برای بسیاری از بارهای صنعتی سه فاز را می‌دهد. تعیین پاسخ سیستم به هارمونیک‌های توالی مثبت ساده است، زیرا هم مهندسان شرکت‌های توزیع برق و هم مهندسان برق صنعتی به انجام چنین مدل‌سازی‌هایی در تحلیل‌های جریان بار و افت ولتاژ عادت دارند. این قانون را می‌توان به‌سادگی بیان کرد:

هنگامی‌که یک سیم‌پیچ مثلث در ترانسفورماتور در هر نقطه به‌صورت سری با منبع هارمونیک و سیستم قدرت وجود دارد، فقط مدار توالی مثبت برای تعیین پاسخ سیستم باید نمایش داده شود. وجود هارمونیک‌های توالی صفر غیرممکن است. چون آنها مسدود شده‌اند.

شکل ۷-۲ این اصل را نشان می‌دهد و نشان می‌دهد که چه مدل‌هایی برای بخش‌های مختلف سیستم اعمال می‌شود.

هر دو شبکه توالی مثبت و منفی معمولاً پاسخ یکسانی به هارمونیک‌ها دارند. گاهی اوقات اندازه‌گیری، هارمونیک‌های مضرب سه در بالادست یک سیم‌پیچ مثلث را نشان می‌دهد. به‌طورمعمول فرض می‌شود که این هارمونیک‌ها توالی صفر هستند. بسته به اینکه چه منابع هارمونیکی دیگری در سیستم وجود دارد، ممکن است باشند. بااین‌حال، همچنین آنها می‌توانند، ناشی از منابع هارمونیکی نامتعادل باشند که یکی از نمونه‌های آن کوره قوس الکتریکی است. فقط هارمونیک‌های مضرب سه که هم‌فاز و توالی صفر دارند و توسط سیم‌پیچی مثلث مسدود می‌شوند؛ بنابراین، استفاده از هارمونیک‌های مضرب سه در هنگام انجام آنالیز با استفاده از حالت توالی فاز مثبت معمول است.

راهکار مؤلفه‌های متقارن هنگام تجزیه‌وتحلیل فیدرهای توزیع چهار سیمه با بارهای تک فاز متعدد، مزیتی را به همراه ندارد؛ چون هر دو شبکه توالی مثبت و صفر وارد بازی می‌شوند. به‌طورکلی تجزیه‌وتحلیل سیستم به‌صورت دستی غیرعملی است و بیشتر برنامه‌های کامپیوتری که قادر به مدل‌سازی دقیق این سیستم‌ها هستند، به‌سادگی معادلات سه فاز توأم را تولید کرده و به طور مستقیم آنها را حل می‌کنند.



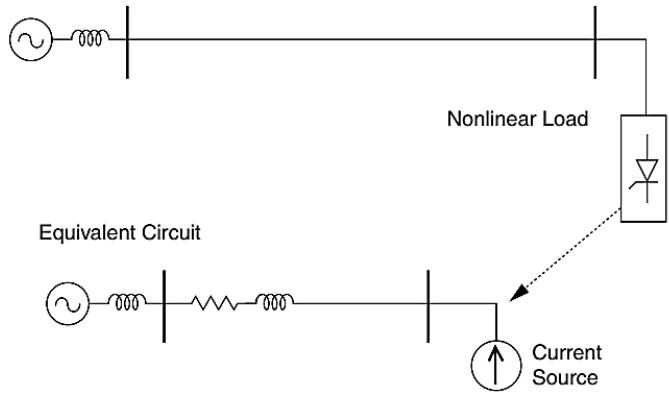
شکل ۷-۲ اثرات اتصال ترانسفورماتور بر الزامات مدل‌سازی برای تحلیل جریان‌های هارمونیکی در شبکه

خوشبختانه، برخی از ابزارهای کامپیوتری در حال حاضر توسعه یک مدل سه فاز را تقریباً تا اندازه‌ی ساختن یک مدار معادل تک فاز آسان می‌کنند. حل کردن مدل کامل سه فاز زمان بیشتری از حل کردن شبکه‌های توالی طول نمی‌کشد؛ زیرا آنها نیز باید جفت شوند. نه‌تنها راهکار اجزای متقارن در این مورد مزیتی به همراه نمی‌آورد؛ بلکه تحلیل‌گران اغلب اشتباه می‌کنند و سهواً مفروضات روش را نقض می‌کنند. به‌طورکلی توصیه نمی‌شود که آنالیز هارمونیک مدارهای نامتعادل با استفاده از اجزای متقارن انجام شود. فقط باید کسانی تلاش کنند که کاملاً از درک خود از روش و مفروضات آن مطمئن هستند.

۷-۳-۳ مدل کردن منابع هارمونیکی

بیشتر تجزیه‌وتحلیل جریان هارمونیکی در سیستم‌های قدرت با استفاده از روش‌های حل مدار خطی در حالت دائمی انجام می‌شود. منابع هارمونیک که عناصر غیرخطی هستند، عموماً به‌عنوان منابع تزریقی به مدل‌های شبکه خطی در نظر گرفته می‌شوند. آنها را می‌توان به‌عنوان منابع تزریق جریان یا منابع ولتاژ نشان داد.

برای اکثر مطالعات جریان‌های هارمونیکی، مناسب است که منابع هارمونیک را به‌عنوان منابع ساده جریان هارمونیک در نظر بگیریم. این در شکل ۷-۳ نشان داده‌شده است که در آن یک مبدل برق الکترونیکی با یک منبع جریان در مدار معادل جایگزین شده است. اعوجاج ولتاژ در باس سرویس عموماً به نسبت کم بوده و کمتر از ۵٪ است؛ بنابراین، اعوجاج جریان برای بسیاری از دستگاه‌های غیرخطی تقریباً ثابت و مستقل از اعوجاج در سیستم تغذیه است.



شکل ۷-۳ دیاگرام تک خطی برای نمایش یک بار غیرخطی با منبع جریان هارمونیکی به‌منظور تجزیه‌وتحلیل

مقادیر جریان تزریقی باید با اندازه‌گیری تعیین شود. در غیاب اندازه‌گیری‌ها و داده‌های منتشرشده، معمول است که فرض کنیم محتوای هارمونیکی با عدد هارمونیک نسبت معکوس دارد؛ یعنی جریان هارمونیک پنجم، یک‌پنجم یا ۲۰ درصد اندازه جریان در فرکانس پایه است و غیره. این فرض از سری فوریه برای **موج مربعی** گرفته‌شده است که مبنای بسیاری از دستگاه‌های غیرخطی است. بااین‌حال، برای درایوهای PWM با فناوری جدیدتر و منابع تغذیه سوئیچنگ که دارای محتوای هارمونیکی بسیار بالاتری هستند، چندان کاربرد ندارد. جدول ۷-۳ مقادیر نوعی را برای تجزیه‌وتحلیل انواع مختلف دستگاه نشان می‌دهد.

جدول ۷-۳ درصد معمول اعوجاج هارمونیکی منابع هارمونیک متداول: هارمونیک‌های فرد، ۱ تا ۱۳

Harmonic	Six-pulse ASD	PWM drive	Arc lighting	SMPS
1	100	100	100	100
3			20*	70
5	18	90	7	40
7	12	80	3	15
9			2.4*	7
11	6	75	1.8	5
13	4	70	0.8	3

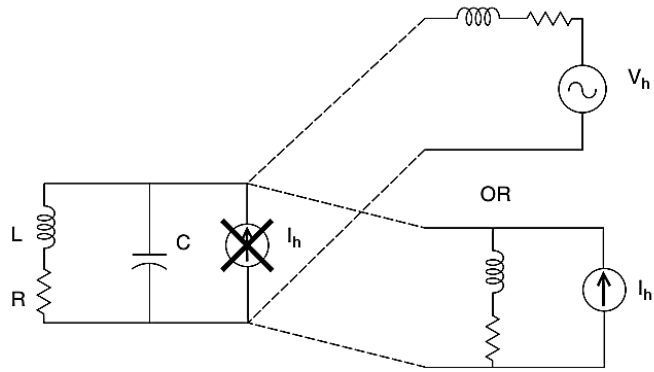
*For single-phase or unbalanced three-phase modeling; otherwise assume triplen is zero.
ASD = adjustable-speed drive, PWM = pulse-width modulated, SMPS = switch-mode power supply.

هنگامی‌که سیستم نزدیک فرکانس رزونانس است، یک مدل منبع جریان ساده، پیش‌بینی بسیار بالایی از اعوجاج ولتاژ را ارائه می‌دهد. این مدل سعی می‌کند یک جریان ثابت را به یک امپدانس بالا تزریق کند که نمایش معتبری از واقعیت نیست. جریان هارمونیک در اعوجاج ولتاژ بالا ثابت نمی‌ماند و اغلب بی‌اهمیت است، زیرا مهم‌ترین چیز این است که بدانیم، سیستم نمی‌تواند با موفقیت در رزونانس کار کند که به‌راحتی از مدل ساده قابل‌مشاهده است. هنگامی‌که رزونانس با افزودن فیلتر حذف شد، مدل یک پاسخ واقعی خواهد داد.

برای مواردی که پاسخ دقیق‌تری در شرایط تشدید موردنیاز است، باید از مدل پیچیده‌تری استفاده شود. برای بسیاری از دستگاه‌های سیستم قدرت، معادل تونن یا نورتون کافی است (شکل ۷-٤ را ببینید). امپدانس

اضافی پاسخ مدار تشدید موازی را تعدیل می‌کند. مدار معادل تونن به روشی ساده برای بسیاری از بارهای غیرخطی به دست می‌آید. به‌عنوان‌مثال، یک کوره قوس الکتریکی با یک ولتاژ موج مربعی با دامنه پیک تقریباً ۵۰ درصد ولتاژ نامی سیستم جریان متناوب به‌خوبی نشان داده می‌شود. امپدانس سری صرفاً امپدانس اتصال کوتاه ترانسفورماتور کوره و سرکابل‌هاست.

متأسفانه، تعیین امپدانس‌های معادل واضح برای بسیاری از دستگاه‌های غیرخطی دشوار است. در این موارد، شبیه‌سازی دقیق اجزای داخلی بار تولیدکننده هارمونیک ضروری است. این می‌تواند با برنامه‌های کامپیوتری که برمبنای جواب‌های تکرارشونده عمل می‌کنند یا از طریق تجزیه‌وتحلیل دقیق دامنه زمانی انجام شود. خوشبختانه، دستیابی به چنین دقت بالایی در شرایط تشدید به‌ندرت ضروری است و تحلیل‌گران اغلب مجبور به انجام این اقدامات نیستند. بااین‌حال، مدل‌سازی دستگاه‌های قوس الکتریکی با مدل تونن بدون توجه به‌ضرورت توصیه می‌شود.



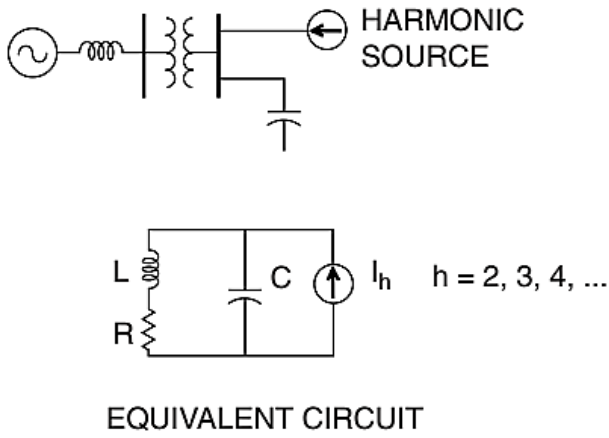
شکل ۷-٤ جایگزینی مدل منبع جریان ساده با یک معادل تونن یا نورتن برای مدل‌سازی بهتر منبع هارمونیک در شرایط تشدید

۷-۳-٤ ابزارهای کامپیوتری برای تحلیل هارمونیکی

بحث قبلی به خواننده ایده‌ای در مورد انواع کارهایی که باید برای تجزیه‌وتحلیل هارمونیکی سیستم‌های قدرت انجام شود، داده است. باید کاملاً واضح باشد که برای هر چیزی؛ حتی ساده‌ترین مدارها، یک برنامه کامپیوتری پیچیده موردنیاز است. ویژگی‌های چنین برنامه‌هایی و میراث برخی از ابزارهای تجزیه‌وتحلیل محبوب در اینجا شرح داده شده می‌شود.

۱. در ابتدا، باید توجه داشت که یک مدار اغلب در سیستم‌های صنعتی ساده ظاهر می‌شود که به محاسبات دستی کمک می‌کند (شکل ۷-۵). این در اصل مدار یک تک-شینه با یک خازن است. دو کار ممکن است به نسبت آسان انجام شود:

تعیین فرکانس تشدید. اگر فرکانس تشدید نزدیک به هارمونیک بالقوه آسیب‌رسان باشد، باید خازن را عوض کرد یا فیلتری طراحی کرد.



شکل ۷-۵ یک مدار ساده که می‌تواند به‌صورت دستی تحلیل شود

۲. تخمینی از اعوجاج ولتاژ ناشی از جریان I_h را تعیین کنید. ولتاژ V_h توسط رابطه

$$V_h = \left(\frac{R + j\omega L}{1 - \omega^2 LC + j\omega RC}\right) I_h$$

داده می‌شود که در آن:

$$\omega = 2\pi(hf_1)$$

$$h = 2, 3, 4, \ldots$$

f_1 = فرکانس پایه سیستم قدرت

با توجه به اینکه فرکانس تشدید نزدیک به یک هارمونیک قابل‌توجه نیست و اعوجاج ولتاژ پیش‌بینی‌شده کم است، برنامه احتمالاً با موفقیت کار خواهد کرد.

متأسفانه، همه موارد عملی را نمی‌توان با چنین مدار ساده‌ای نشان داد. درواقع، افزودن تنها یک باس دیگر با یک خازن به مدار ساده در شکل ۷-۵ این مشکل را حتی برای ماهرترین تحلیلگران به چالشی واقعی تبدیل می‌کند. بااین‌حال، یک کامپیوتر می‌تواند این کار را در میلی‌ثانیه انجام دهد. برای استفاده از ابزارهای رایانه‌ای که معمولاً در دسترس هستند، تحلیل‌گر باید پیکربندی مدار، بارها و منابع را برای برنامه توصیف کند. داده‌هایی که باید جمع‌آوری شوند شامل:

- امپدانس‌های خط و ترانسفورماتور
- اتصالات ترانسفورماتور
- مقادیر و مکان‌های خازن (بحرانی)
- طیف هارمونیک برای بارهای غیرخطی
- ولتاژهای منبع تغذیه

این مقادیر به برنامه وارد می‌شوند که به‌طور خودکار امپدانس‌ها را برای فرکانس تنظیم می‌کند و جریان هارمونیک را در سراسر سیستم محاسبه می‌کند.

قابلیت برنامه‌های تحلیل هارمونیک: نرم‌افزار کامپیوتری قابل‌قبول برای تحلیل هارمونیک سیستم‌های قدرت باید دارای ویژگی‌های زیر باشد:

۱. باید قادر به مدیریت شبکه‌های بزرگ حداقل چند صد گره باشد.
۲. باید بتواند مدل‌های چند فازی ساختار دلخواه را مدیریت کند. همه مدارها، به‌ویژه مدارهایی که روی فیدرهای توزیع برق قرار دارند، با مدل‌های متوازن و توالی مثبت قابل‌حل دقیق نیستند.
۳. همچنین باید قادر به مدل‌سازی سیستم‌ها با مدل‌های توالی مثبت باشد. وقتی هارمونیک‌های توالی صفر وجود نداشته باشد، نیازی به ساخت یک مدل سه فاز کامل نیست.
۴. باید بتواند یک اسکن فرکانس را در فواصل فرکانسی کوچک (برای مثال ۱۰ هرتز) انجام دهد تا ویژگی‌های پاسخ فرکانسی سیستم لازم برای شناسایی تشدیدها را ایجاد کند.
۵. باید قادر به انجام حل هم‌زمان منابع هارمونیک متعدد برای برآورد جریان واقعی و اعوجاج ولتاژ باشد.
۶. باید دارای مدل‌های داخلی از منابع هارمونیک رایج باشد.
۷. باید هر دو مدل منبع جریان و منبع ولتاژ منابع هارمونیک را مجاز کند.

۸. بایستی بتواند به‌صورت خودکار زاویه‌ای فاز منابع را بر اساس زاویه فاز مؤلفه فرکانسی پایه تنظیم کند.
۹. باید بتواند هر نوع اتصال سیم‌پیچی ترانسفورماتور را مدل‌سازی کند.
۱۰. باید بتواند نتایج را به‌صورت معنادار و کاربر پسند نمایش دهد.

۷-٤ دستگاه‌های کنترل اعوجاج‌های هارمونیکی

تعدادی دستگاه برای کنترل اعوجاج هارمونیک موجود است. آنها می‌توانند به‌سادگی یک بانک خازن یا یک راکتور خطی یا به پیچیدگی یک فیلتر فعال باشند.

همان‌طور که در بخش‌های پیشین توصیف‌شده است، یک اقدام کاهشی ساده مانند افزودن، تغییر اندازه، یا جابجایی یک بانک خازن شنت می‌تواند به‌طور مؤثر پاسخ فرکانس نامطلوب سیستم را اصلاح کند و درنتیجه اعوجاج هارمونیکی را به سطح قابل قبولی برساند. به‌طور مشابه، یک راکتور می‌تواند همان عملکرد را با جدا کردن سیستم از رزونانس‌های مضر انجام دهد. اثربخشی چنین راهکارهای ساده‌ای در کنترل اعوجاج هارمونیکی باید قبل از در نظر گرفتن یک دستگاه پیچیده‌تر بررسی شود.

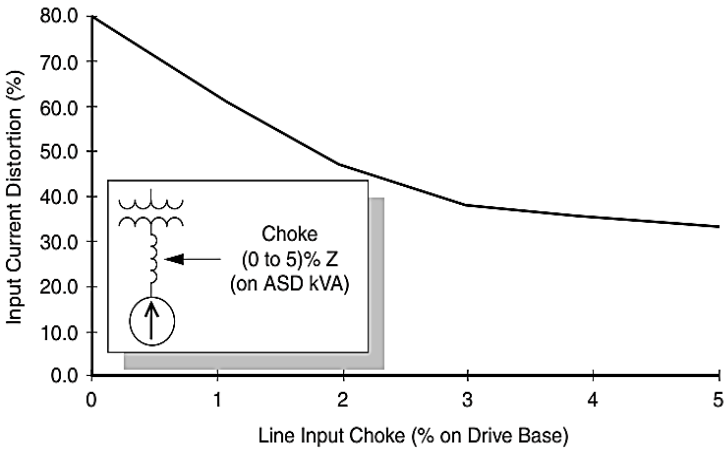
مطالب زیر ابتدا کارایی یک راکتور خطی ساده یا چوک را در کاهش اعوجاج هارمونیک موردبحث قرار می‌دهد. سپس، دو دسته کلی از فیلترهای هارمونیکی، یعنی فیلترهای پسیو و اکتیو، موردبحث قرار می‌گیرند. اولی بر اساس عناصر پسیو بوده، درحالی‌که دومی بر اساس ادوات الکترونیک قدرت است.

۷-٤-۱ راکتورهای خط یا چوک

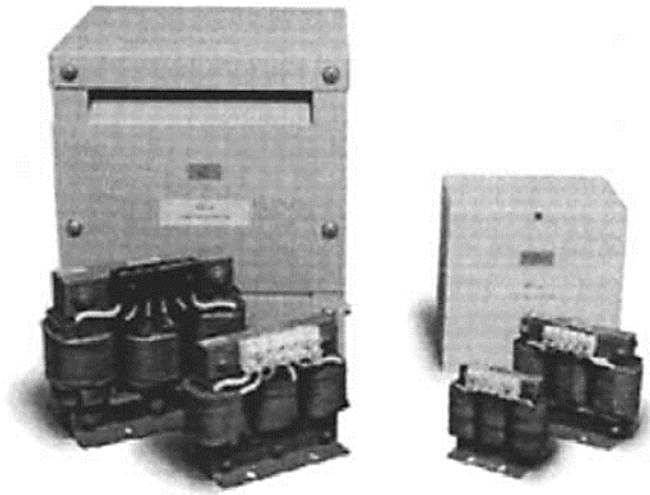
یک روش ساده، اما اغلب موفق، برای کنترل اعوجاج هارمونیک ایجادشده توسط درایوهای تنظیم سرعت، شامل یک راکتور به نسبت کوچک یا چوک است که در سمت ورودی خط درایو قرار می‌گیرد. این به‌ویژه برای درایوهای نوع PWM مؤثر است.

اندوکتانس، سرعت شارژ خازن در باس DC را کاهش می‌دهد و درایو را مجبور می‌کند تا جریان را در مدت‌زمان طولانی‌تری بکشد. اثر خالص آن یک جریان با دامنه‌ای کمتر و محتوای هارمونیکی بسیار کمتر است درحالی‌که همچنان همان انرژی را ارائه می‌دهد.

معمولاً یک چوک ورودی ۳ درصد می‌تواند اعوجاج جریان هارمونیک را برای یک درایو نوع PWM از حدود ۸۰ تا ٤۰ درصد کاهش دهد. این کاهش هارمونیک چشمگیر در شکل ۷-٦ نشان داده‌شده است. کاهش هارمونیک اضافی زمانی محدود می‌شود که اندازه چوک بیش از ۳ درصد افزایش یابد. اندازه چوک بر روی مبنای (پریونیت) کیلوولت‌آمپر درایو محاسبه می‌شود. شکل ۷-۷ چوک‌های خط را که معمولاً در کاربردهای درایوهای تنظیم سرعت ٤۸۰ ولت مورداستفاده قرار می‌گیرند، نشان می‌دهد.



شکل ۷-٦ کاهش هارمونیک درایو تنظیم سرعت نوع *PWM* به‌عنوان تابعی از اندازه چوک ورودی



شکل ۷-۷ چوک‌های خط سه فاز برای کاربردهای درایوهای تنظیم سرعت

شکل ۷-۸ کارایی یک چوک ۳ درصدی را در کاهش اعوجاج جریان هارمونیکی در شرایط بدون چوک برای اندازه‌های مختلف درایوهای تنظیم سرعت مقایسه می‌کند. (اندازه‌های درایوهای تنظیم سرعت نسبت به کیلوولت‌آمپر ترانسفورماتور سرویس نرمال شده‌اند). شکل موج‌های نمونه برای انتهای هر محدوده نشان داده‌شده است. شکل موج بزرگ‌تر بدون چوک است. همان‌طور که از شکل ۷-۸ مشخص است، با قرار دادن یک چوک در خط تغذیه‌کننده درایوهای تنظیم سرعت، بهبود قابل‌توجهی حاصل می‌شود. شاخص *THD* فعلی از محدوده ۸۰ تا ۱۲۰ درصد به تقریباً ٤٠ درصد کاهش می‌یابد. کاهش بهتر زمانی حاصل می‌شود که اندازه درایوهای تنظیم سرعت به‌طور قابل‌توجهی کوچک‌تر از ترانسفورماتور سرویس باشد. زمانی که اندازه کیلوولت‌آمپر نامی درایو

تنظیم سرعت، ۵ درصدِ توان ظاهری نامی ترانسفورماتور باشد، جریان *THD* از ۱۲۵ به ٤٠ درصد کاهش می‌یابد.

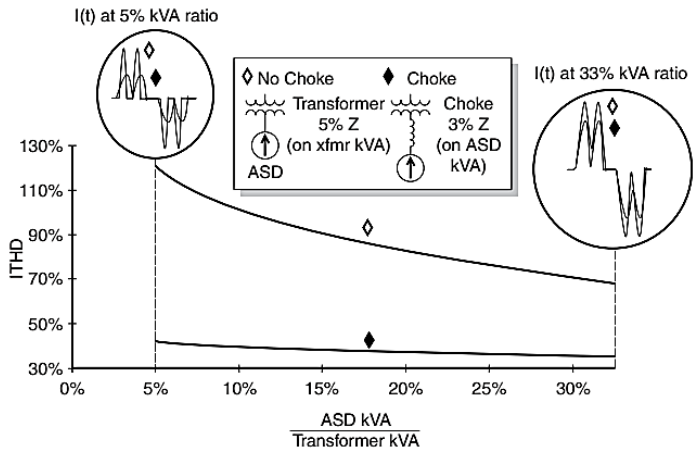
همچنین بیان این نکته ضروری است که مزایای دیگری از چوک در کاربردهای درایوهای تنظیم سرعت وجود دارد. اثر کاهش سرعت شارژ خازن *DC* نیز باعث می‌شود که چوک در مسدود کردن برخی از حالت‌های گذرای فرکانس- بالا بسیار مؤثر باشد. این امر به جلوگیری از خاموش شدن ناگهانی درایو در حین عملیات برق‌دار کردن خازن در سیستم توزیع برق کمک می‌کند.

ترانسفورماتورهای ایزوله می‌توانند همان مزیت یک چوک را داشته باشند؛ اما ممکن است هزینه بیشتری داشته باشند. بااین‌حال، ترانسفورماتورهای ایزوله با درایوهای متعدد مزیت ایجاد عملکرد مؤثر ۱۲ پالس را ارائه می‌دهند. شکل ۷-۹ این مفهوم را نشان می‌دهد.

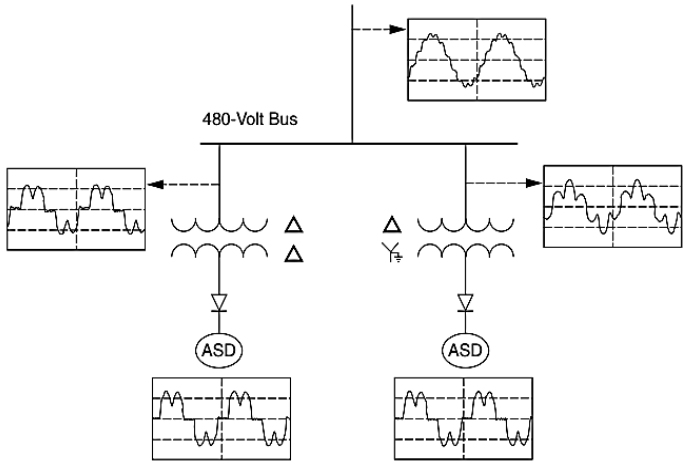
پیکربندی ۱۲ پالسه را می‌توان با تأمین یک درایو از طریق یک ترانسفورماتور مثلث – ستاره و یک درایو دیگر از طریق یک ترانسفورماتور مثلث – مثلث یا یک ترانسفورماتور سه سیم‌پیچ که در آن سیم‌پیچی‌های ثانویه و ثالثه‌ی آن ستاره و مثلث باشند، به دست آورد. شکل ۷-۹ شکل موج‌های جاری را برای دو درایو تنظیم سرعت شش پالسی مجزا نشان می‌دهد.

هنگامی‌که دو شکل موج بروی اولیه ترانسفورماتور باهم جمع می‌شوند، شکل موج حاصل که به سیستم توزیع تزریق می‌شود، اعوجاج بسیار

کمتری دارد؛ در درجه اول به این دلیل که هارمونیک‌های پنجم و هفتم حذف می‌شوند. این دو هارمونیک عامل بیشتر اعوجاج درایوهای شش پالس هستند.



شکل ۷-۸ اثر چوک‌های خط AC بر کاهش هارمونیک‌های جریان درایو تنظیم سرعت



شکل ۷-۹ پیکربندی ۱۲ پالسی به‌عنوان روشی برای کنترل هارمونیک‌ها از دو درایو تنظیم سرعت

ما می‌دانیم که بین بردارهای ولتاژ اولیه و ثانویه یک ترانسفورماتور مثلث – ستاره یک تغییر فاز ۳۰ درجه‌ای وجود دارد؛ درحالی‌که برای ترانسفورماتورهایی با اتصالات مثلث – مثلث یا ستاره – ستاره، این تغییر فاز صفر درجه است. اگر بار به‌طور مساوی بین دو ترانسفورماتور تقسیم شود، یکی با اتصال مثلث – مثلث و دیگری با اتصال مثلث – ستاره، هارمونیک‌های مرتبه 5,7,17,... حذف (کنسل) می‌شوند و سیستم مانند ۱۲ پالسه رفتار می‌کند. این ترکیب، ضرب فازی نامیده می‌شود.

با تعمیم این مفهوم، درایوهای ۲٤ پالسه را می‌توان با چهار ترانسفورماتور با تغییر فاز متقابل ۱۵ به دست آورد. ازآنجایی‌که دامنه این نوع مبدّل‌های هارمونیکی با عدد پالس نسبت معکوس دارد، هارمونیک‌های مشکل‌ساز مرتبه پایین‌تر با دامنه بزرگ‌تر حذف می‌شوند. اگرچه این کنسل

شدن هارمونیک‌ها ۱۰۰٪ نیست، زیرا شرایط ایده‌آل عملکرد به‌ندرت در عمل برآورده می‌شود. ترانسفورماتورها باید دقیقاً دارای نسبت‌های یکسان و امپدانس‌های یکسان باشند، بارها باید به‌طور مساوی تقسیم شوند و مبدّل‌ها باید دقیقاً زاویه تأخیر یکسانی داشته باشند. تقریباً ۷۵٪ کنسلی ممکن است در عمل به دست آید و در مطالعات آنالیز هارمونیکی، ۲۵٪ هارمونیک‌های باقیمانده مدل‌سازی شده‌اند.

۷-٤-۲ ترانسفورماتورها با اتصال زیگزاگ

ترانسفورماتورهای زیگزاگ اغلب در تأسیسات تجاری برای کنترل مؤلفه‌های هارمونیکی توالی صفر استفاده می‌شوند. یک ترانسفورماتور زیگزاگ با ایجاد یک مسیر کم امپدانس به سمت نوترال، مانند یک فیلتر برای جریان توالی صفر عمل می‌کند. این کار مقدار جریانی را که در نوترال به سمت منبع تغذیه برمی‌گردد؛ با ایجاد مسیر کوتاه‌تری برای جریان کاهش می‌دهد. برای مؤثر بودن، ترانسفورماتور باید در نزدیکی بار روی مداری که در حال محافظت است، قرارگیرد. دو مشکل مهم در تأسیسات تجاری عبارتند از اضافه‌بار هادی‌های نوترال و گرمایش بیش‌ازحد ترانسفورماتور.

هر دوی این مشکلات با قرار دادن ترانسفورماتور زیگزاگ مناسب قابل‌حل است. برخی از ساختمان‌های تجاری جدید شامل ترانسفورماتورهای زیگزاگی بر روی ثانویه ترانسفورماتور تغذیه ۲۰۸/٤۸۰ ولت هستند تا از گرم شدن بیش‌ازحد ترانسفورماتور جلوگیری کنند. ترانسفورماتور زیگزاگی واقع در ثانویه ترانسفورماتور تغذیه هیچ سودی برای هادی‌های نوترال تأمین‌کننده بارها ندارد. نتایج معمول با یک

ترانسفورماتور زیگزاگ نشان می‌دهد که می‌تواند حدود ۵۰ درصد از جریان هارمونیک مرتبه سوم را از هادی‌های نوترال مدار اصلی دور کند. بنابراین، ترانسفورماتور زیگزاگ تقریباً همیشه می‌تواند جریان‌های نوترال را به دلیل هارمونیک‌های توالی صفر تا سطوح قابل‌قبول کاهش دهد. بزرگ‌ترین هارمونیک توالی صفر در ساختمان‌های اداری تقریباً همیشه هارمونیک مرتبه سوم است که به‌دلیل وجود کامپیوترها، *UPS* ها و لامپ‌های *LED* و تجهیزات دارای منابع تغذیه سوئیچینگ است.

فصل هشتم

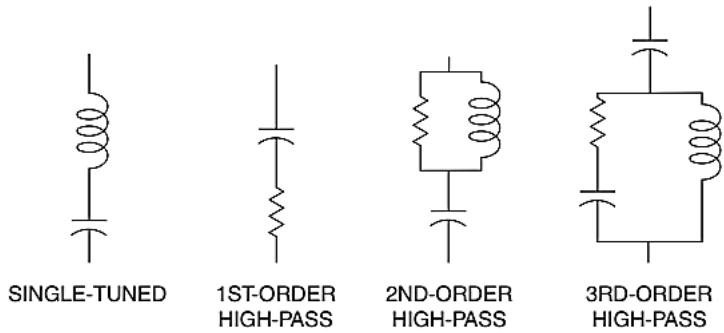
طراحی فیلترهای هارمونیک

۸-۱ فیلترهای پسیو

فیلترهای پسیو المان‌های اندوکتانس، ظرفیت خازنی و مقاومتی هستند که برای کنترل هارمونیک‌ها پیکربندی و تنظیم‌شده‌اند. استفاده از آنها رایج است و در مقایسه با سایر ابزارهای حذف‌کننده اعوجاج هارمونیکی به نسبت ارزان هستند. بااین‌حال، آنها این عیب را دارند که به‌طور بالقوه برهمکنش نامطلوبی با سیستم قدرت دارند و بررسی تمام برهمکنش‌های احتمالی سیستم هنگام طراحی، مهم است. آنها یا برای منحرف کردن جریان‌های هارمونیکی از خط یا مسدود کردن جریان آن‌ها بین بخش‌های مختلف سیستم با تنظیم المان‌ها برای ایجاد رزونانس در یک فرکانس انتخابی مشخص استفاده می‌شوند. شکل ۸-۱ آرایش چندین نوع فیلتر رایج را نشان می‌دهد.

۸-۱-۱ فیلترهای پسیو موازی

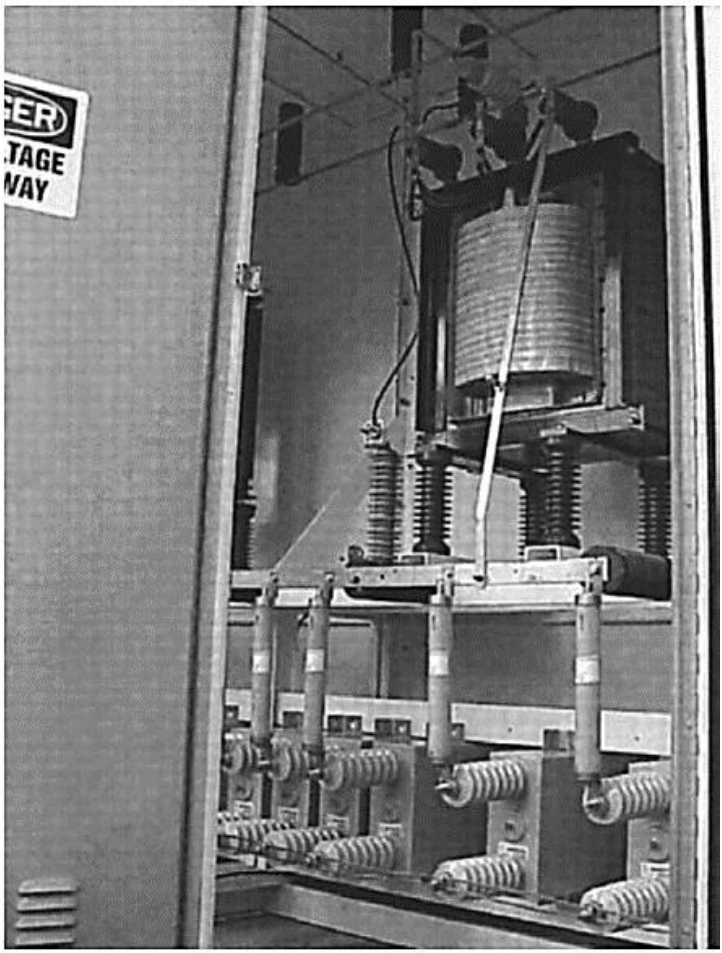
رایج‌ترین نوع فیلتر اکتیو، فیلتر تک تنظیم‌شده « ناچ » است. این مقرون به‌صرفه‌ترین نوع فیلتر است و برای اغلب کاربردها کافی است. فیلتر ناچ به‌صورت سری تنظیم‌شده است تا امپدانس پایینی را به یک جریان هارمونیک خاص ارائه دهد و به‌صورت شنت به سیستم قدرت متصل است. بنابراین، جریان‌های هارمونیک از مسیر جریان عادی خود در خط عبوری از فیلتر منحرف می‌شوند.



شکل ۸-۱ پیکربندی فیلترهای پسیو معمول

فیلترهای ناچ می‌توانند افزون بر حذف هارمونیک، تصحیح ضریب توان را نیز انجام دهند. درواقع ممکن است از خازن‌های اصلاح‌کننده ضریب توان برای ساخت فیلترهای ناچ استفاده شود.

شکل ۸-۲ نمونه‌ای از چنین فیلترهایی را نشان می‌دهد که برای کاربردهای ولتاژ متوسط طراحی‌شده است. راکتور هسته آهنی نوع خشک در بالای خازن‌ها قرارگرفته است که به‌صورت اتصال ستاره با فازهای دیگر (نمایش داده نشده) به هم متصل شده‌اند. هر محفظه خازن به یک فیوز محدودکننده جریان مجهز است تا در صورت خرابی محفظه، آسیب به حداقل برسد. در تأسیساتی که در فضای آزاد نصب می‌شوند، اغلب استفاده از راکتورهای هسته هوا مقرون به‌صرفه‌تر است. راکتورهای هسته آهنی نیز ممکن است عایق روغن باشند.



شکل ۸-۲ یک فاز از فیلتر سه فاز در تابلوی فلزی

شکل ۸-۳ طرح دیگری را برای کاربردهای سایت صنعتی نشان می‌دهد. در اینجا راکتورها در بالای پنلی قرار می‌گیرند که خازن‌ها و تابلو برق را در خود جای‌داده است.



شکل ۸–۳ فیلتر برای کاربردهای سیستم قدرت صنعتی

نمونه‌ای از آرایش فیلتر معمولی ٤٨٠ ولت در شکل ۸–٤ نشان داده‌شده است. شکل، یک بانک خازنی ولتاژ پایین با اتصال مثلث را نشان می‌دهد که با افزودن یک سلف سری به فازها به فیلتر تبدیل‌شده است. در این حالت، عدد هارمونیک ناچ با راکتانس‌های محاسبه‌شده در فرکانس پایه از طریق رابطه زیر مرتبط است:

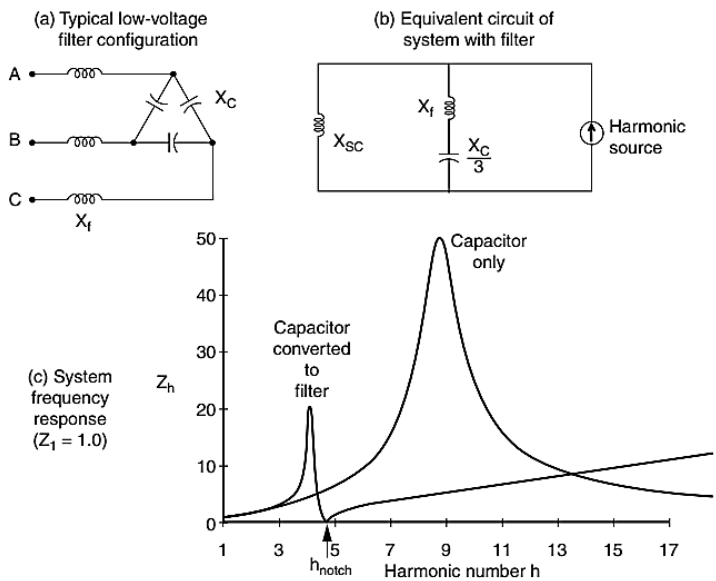
$$h_{notch} = \sqrt{\frac{X_C}{3X_F}}$$

توجه داشته باشید که X_C در این مورد راکتانس یک پایه مثلث است نه راکتانس خازنی معادل خط به خنثی. اگر ولتاژ فاز به فاز و *kvar* سه فاز برای محاسبه X_C استفاده شود، همان‌طور که پیشتر توضیح داده شد، ضریب ۳ حذف می‌شود.

یکی از اثرات جانبی مهم این نوع فیلتر این است که یک نقطه تشدید موازی تیز در فرکانسی کمتر از فرکانس ناچ ایجاد می‌کند (شکل c ۸-٤).

این فرکانس تشدید باید به‌طور ایمن از هر هارمونیک مهم یا اجزای فرکانس دیگری که ممکن است توسط بار تولید شود دور باشد. فیلترها معمولاً کمی پایین‌تر از هارمونیکی که باید فیلتر شوند تنظیم می‌شوند تا در صورت ایجاد تغییراتی در پارامترهای سیستم که فرکانس ناچ را افزایش می‌دهد، حاشیه امنی ایجاد کند. اگر آنها دقیقاً بر روی هارمونیکی که قرار است فیلتر شود تنظیم‌شده باشند؛ تغییرات در خازن یا اندوکتانس در اثر دما یا شکست ممکن است نقطه رزونانس موازی را فرکانسی بالاتر یعنی به فرکانسی که قصد فیلتر کردن آن را داریم؛ منتقل کند. این می‌تواند وضعیتی بدتر از حالت بدون فیلتر به وجود آورد، زیرا شیب دیاگرام رزونانس به طور معمول بسیار تیز است و در اثر جابجایی نقطه کمینه

دیاگرام امپدانسی سیستم (فرکانس ناچ) به سمت راست، نقطه بیشینه (فرکانس رزونانس) هم به پیامد آن به سمت راست منتقل‌شده و چه‌بسا در حوالی فرکانس رزونانس قرار بگیرد که موجب تحریک حداکثری فرکانس رزونانس شبکه خواهد شد.



شکل ۸-٤ ایجاد یک فیلتر ناچ هارمونیک پنجم و تأثیر آن بر پاسخ سیستم.

برای جلوگیری از مشکلات ناشی از این رزونانس، فیلترهایی که به سیستم اضافه می‌شوند، بایستی با کمترین فرکانس هارمونیک چشمگیر موجود در سیستم شروع شوند.

به‌عنوان‌مثال، نصب فیلتر هارمونیک هفتم، معمولاً مستلزم نصب فیلتر هارمونیک پنجم نیز است. رزونانس موازی جدید با به‌کارگیری یک فیلتر هارمونیک هفتم به‌تنهایی، اغلب بسیار نزدیک به هارمونیک پنجم است که به‌طورکلی فاجعه‌آمیز است.

پیکربندی فیلتر شکل (a) ۸-٤ جریان‌های توالی صفر را عبور نمی‌دهد؛ زیرا خازن به‌صورت اتصال مثلث است که آن را برای فیلتر کردن هارمونیک‌های مضرب سه توالی صفر بی‌اثر می‌کند.

ازآنجایی‌که خازن‌های ٤٨٠ ولت بیشتر به‌صورت اتصال مثلث پیکربندی می‌شوند؛ زمانی که کنترل جریان‌های هارمونیکی توالی صفر در بسیاری از تأسیسات صنعتی و تجاری ساختمان‌ها ضروری باشد، باید از راه‌حل‌های دیگری استفاده شود. در مقابل، خازن‌ها در سیستم‌های توزیع برق معمولاً به‌صورت اتصال ستاره هستند. این نوع اتصال امکان کنترل هارمونیک‌های مضرب سه توالی صفر را صرفاً با تغییر در اتصال نقطه نوترال می‌دهد. قرار دادن یک راکتور در خنثی خازن یک روش رایج برای وادار کردن بانک به فیلتر کردن هارمونیک‌های دنباله صفر است. این راهکار بیشتر برای از بین بردن تداخل تلفن استفاده می‌شود. یک راکتور متغیر تپ دار در نوترال نصب‌شده است و تپ راکتور طوری تنظیم می‌شود که تداخل فرکانس هارمونیک سیستم قدرت با فرکانس سیگنال تلفن را به حداقل برساند.

فیلترهای پسیو باید همیشه روی باسی قرار گیرند که انتظار می‌رود راکتانس اتصال کوتاه X_{SC}ثابت بماند. درحالی‌که فرکانس ناچ ثابت می‌ماند، رزونانس موازی همراه با امپدانس سیستم حرکت می‌کند. به‌عنوان‌مثال، فرکانس رزونانس موازی برای عملکرد در حالت آماده‌به‌کار، به‌خودی‌خود احتمالاً بسیار کمتر از زمانی است که به سیستم برق شهری متصل است؛ زیرا امپدانس ژنراتور بسیار بالاتر از امپدانس شبکه توزیع است. این می‌تواند هارمونیکی را که معمولاً ناچیز است، تقویت کند؛ بنابراین، فیلترها اغلب برای حالتی که ژنراتور در حالت آماده‌به‌کار است، حذف می‌شوند.

همچنین فیلترها باید با در نظر گرفتن ظرفیت باس طراحی شوند. گرایش به این است که ظرفیت حمل جریان را صرفاً بر اساس باری که هارمونیک تولید می‌کند در نظر بگیریم. بااین‌حال، مقدار کمی اعوجاج ولتاژ پس‌زمینه در یک باس بسیار قوی ممکن است جریانی بیش‌ازحد بر روی فیلتر اعمال کند.

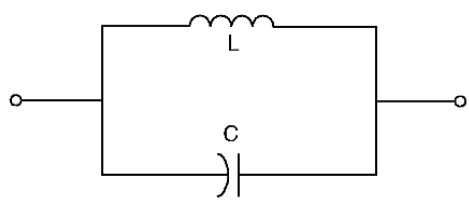
۸-۱-۲ فیلترهای پسیو سری

برخلاف یک فیلتر ناچ که به‌صورت شنت به سیستم قدرت متصل می‌شود، یک فیلتر پسیو سری به‌صورت سری با بار متصل می‌شود. اندوکتانس و خازن به‌صورت موازی به هم متصل شده‌اند و برای ایجاد امپدانس بالا در فرکانس هارمونیک انتخاب شده تنظیم‌شده‌اند؛ از این روی این امپدانس بالا جریان هارمونیک را فقط در فرکانس تنظیم‌شده مسدود می‌کند. فیلتر باید طوری طراحی شود که در فرکانس پایه، امپدانس پایینی

ایجاد کند تا جریان تنها با کمی امپدانس اضافی و تلفات جزئی مواجه شود. شکل ۸-۵ ترکیبی از یک فیلتر سری معمولی را نشان می‌دهد.

فیلترهای سری برای مسدود کردن یک جریان هارمونیک منفرد (مانند هارمونیک سوم) استفاده می‌شوند و به‌ویژه در مدارهای تک فاز که امکان بهره‌گیری از ویژگی‌های توالی صفر وجود ندارد، مفید هستند. استفاده از فیلترهای سری در مسدود کردن جریان‌های هارمونیک چندگانه محدود است. چراکه هر جریان هارمونیک نیاز به یک فیلتر سری تنظیم‌شده برای آن هارمونیک دارد. این آرایش می‌تواند تلفات قابل‌توجهی در فرکانس پایه ایجاد کند.

افزون بر این، مانند دیگر المان‌های سری در سیستم‌های قدرت، یک فیلتر سری باید برای حمل یک جریان بار نامی کامل طراحی شود و باید یک طرح حفاظتی در برابر جریان اضافه داشته باشد؛ بنابراین، فیلترهای سری بسیار کمتر از فیلترهای شنت به کار گرفته می‌شوند.



شکل ۸-۵ یک فیلتر پسیو سری

۸-۲ فیلترهای باند پهن پایین گذر

در کاربردهای عملی طبقات متعددی از فیلترهای سری و شنت اغلب موردنیاز است. به‌عنوان‌مثال، در کاربردهای فیلتر شنت، فیلتری برای مسدود کردن فرکانس هارمونیک هفتم معمولاً به دو مرحله فیلتر شنت نیاز دارد: خود فیلتر هارمونیک هفتم و فیلتر هارمونیک پنجم و پایین‌تر. به‌طور مشابه، در کاربردهای فیلتر سری، هر فرکانس به یک فیلتر سری مخصوص به خود نیاز دارد؛ بنابراین، چندین مرحله از فیلترها برای مسدود کردن فرکانس‌های متعدد موردنیاز است.

در بسیاری از مواقع در سیستم قدرت، هارمونیک‌ها می‌توانند نه‌تنها در یک فرکانس ظاهر شوند، بلکه می‌توانند در طیف وسیعی از فرکانس‌ها گسترده شوند. یک مبدل شش پالسی هارمونیک‌های مشخصه‌های ۵، ۷، ۱۱، ۱۳ و... را تولید می‌کند. مبدّل‌های برق الکترونیکی اساساً می‌توانند اینترهارمونیک‌های متغیر با زمان را تولید کنند که طیف وسیعی از فرکانس‌ها را پوشش می‌دهد. طراحی یک فیلتر شنت یا سری برای حذف یا کاهش این هارمونیک‌های گسترده و متغیر با زمان با استفاده از فیلترهای شنت بسیار دشوار است.بنابراین بایستی، یک فیلتر هارمونیکی جایگزین ابداع شود.

فیلتر پهن باند پایین گذر یک طرح ایده‌آل برای مسدود کردن فرکانس‌های هارمونیک چندگانه یا گسترده است. جریان با مؤلفه‌های فرکانسی پایین‌تر از فرکانس قطع فیلتر می‌تواند عبور کند؛ درحالی‌که جریان با مؤلفه‌های فرکانسی بالاتر از فرکانس قطع، فیلتر می‌شود. ازآنجایی‌که این

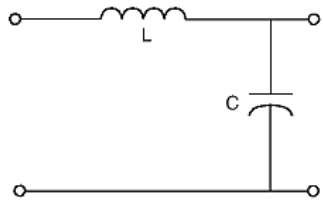
نوع فیلتر پایین گذر معمولاً برای دستیابی به فرکانس قطع پایین طراحی‌شده است، به آن فیلتر پهن باند پایین گذر می‌گویند. یک پیکربندی معمولی از فیلتر پهن باند پایین گذر در شکل ۸-٦ نشان داده‌شده است.

در کاربردهای سیستم توزیع، اثر فیلترهای باند پهن پایین گذر را می‌توان با نصب یک بانک خازن در سمت ولتاژ پایین ترانسفورماتور همان‌طور که در شکل ۸-۷ نشان داده‌شده است، به دست آورد. اندازه بانک خازن باید طوری انتخاب شود که فرکانس قطع موردنظر را در صورت ترکیب با اندوکتانس نشتی ترانسفورماتور و امپدانس سیستم فراهم کند. سپس می‌تواند از نفوذ هارمونیک‌های بالاتر از فرکانس قطع به سمت ولتاژ بالای ترانسفورماتور جلوگیری کند. ازآنجایی‌که فرکانس قطع می‌تواند گاهی بسیار کم باشد، اندازه بانک خازنی ممکن است به نسبت بزرگ باشد. این باعث افزایش قابل‌توجه ولتاژ می‌شود. اگر ولتاژ بالا بماند، باید از یک تنظیم‌کننده ولتاژ یا تغییردهنده بار ترانسفورماتور LTC [1] استفاده شود تا ولتاژ را تا حد قابل قبولی کاهش دهد.

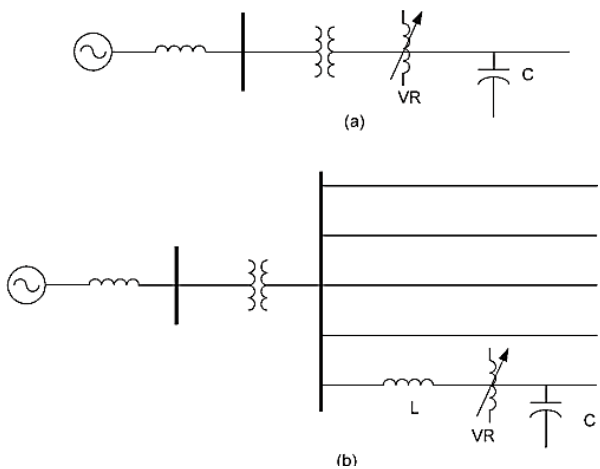
در پستی که چندین فیدر را تغذیه می‌کند، یک راکتور خط و تنظیم‌کننده ولتاژ می‌تواند در ابتدای فیدر نصب شود تا بخشی از سیستم را که در معرض ولتاژ بالا قرار دارد جدا کند. این ترتیب باعث می‌شود که سطوح ولتاژ در سایر فیدرها در مقادیر نرمال حفظ شود. ترکیبی از اندوکتانس

[1] Load Tap Changer

نشتی ترانسفورماتور، راکتور خط، تنظیم‌کننده ولتاژ و بانک خازنی، فرکانس قطع موردنظر را ایجاد می‌کند. شکل (b) ۸-۷ این آرایش را نشان می‌دهد.



شکل ۸-٦ مدار فیلتر باند پهن پائین گذر



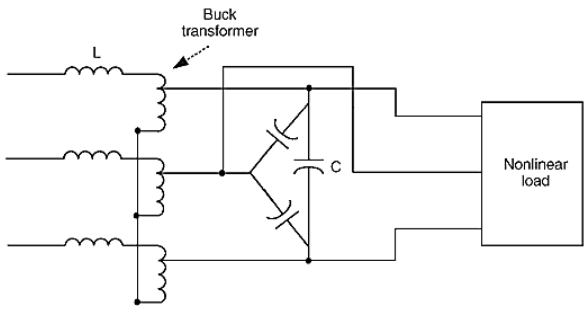
شکل ۸-۷ کاربرد فیلتر پهن باند پایین گذر در خدمات برق برای سیستم‌های صنعتی.
آرایش فیلتر در یک پست با (a) اختصاصی و (b) فیدرهای متعدد.

در کاربردهای سیستم‌های صنعتی، از فیلترهای باند پهن پایین گذر تجاری برای جلوگیری از ورود هارمونیک‌های تولیدشده توسط بارهای غیرخطی به سیستم AC استفاده می‌شود.

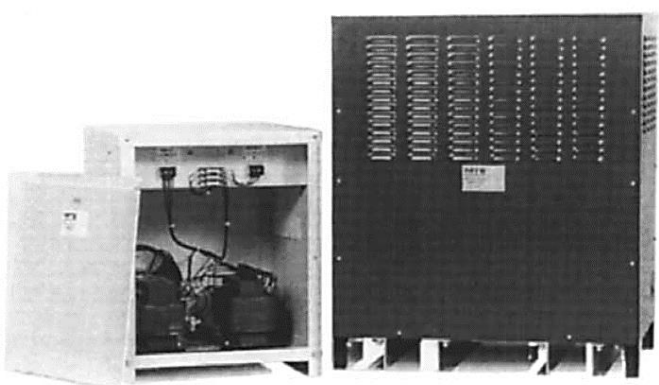
طراحی معمولی در شکل ۸–۸ نشان داده‌شده است. شکل ۸–۹ یک سیستم معمولی در نظر گرفته‌شده برای این کاربرد را نشان می‌دهد. یک راکتور خطی که به‌صورت سری با خط اصلی AC نصب‌شده است که برای ایجاد فاصله الکتریکی بین سیستم AC و بار غیرخطی استفاده می‌شود. یک بانک خازنی به‌صورت موازی نصب‌شده تا یک پیکربندی فیلتر پهن باند پایین گذر را تشکیل دهد. ازآنجایی‌که وجود بانک خازنی ولتاژ را در ورودی درایو تنظیم سرعت افزایش می‌دهد، یک ترانسفورماتور کاهنده برای پایین آوردن ولتاژ در خروجی راکتور خط به سطحی که ولتاژ در خازن قابل‌قبول باشد، نیاز است. عملکرد بهینه یک فیلتر پهن باند پایین گذر در کاربردهای درایو تنظیم سرعت زمانی به دست می‌آید که سلف سری بین بانک‌های خازن فیلتر و خازن باس DC درایو تنظیم سرعت وجود نداشته باشد. هرگونه امپدانس دراین‌بین، قابلیت شارژ خازن باس DC را کاهش می‌دهد؛ زیرا آن از طریق خازنِ فیلتر شارژ می‌شود.

فرکانس قطع برای یک فیلتر پهن باند پایین گذر برای کاربردهای درایو تنظیم سرعت معمولاً در یک فرکانس هارمونیک پایین طراحی می‌شود، مانند ۱۰۰ تا ۲۰۰ هرتز در یک سیستم ۶۰ هرتز. با این فرکانس تنظیم پایین، فیلتر بعید است که رزونانس نامطلوبی را با بقیه سیستم تحریک ایجاد کند و می‌تواند بسیاری از جریان‌های هارمونیک را فیلتر کند. در کاربردهای

درایو تنظیم سرعت فیلتر به‌طورکلی می‌تواند اعوجاج هارمونیک جریان کلی را از محدوده ۹۰ تا ۱۰۰ درصد به محدوده ۹ تا ۱۲ درصد در شرایط بار نامی کاهش دهد.



شکل ۸–۸ کاربرد فیلتر پهن باند پایین گذر در یک سیستم صنعتی



شکل ۸–۹ یک فیلتر تجاری ۶۰۰ ولت سه فاز باند پهن.

این عملکرد مطمئناً بسیار بهتر از یک چوک ساده AC است که فقط اعوجاج جریان کلی را تا محدوده ۳۰ تا ٤٠ درصد کاهش می‌دهد. بااین‌حال، هزینه یک چوک خط AC کمتر از یک فیلتر پهن باند پایین گذر است.

۸-۳ فیلترهای C

فیلترهای C جایگزینی برای فیلترهای باند پهن پایین گذر در کاهش فرکانس‌های هارمونیکی چندگانه به‌طور هم‌زمان در سیستم‌های صنعتی و توزیع برق هستند. آنها می‌توانند طیف وسیعی از فرکانس‌های هارمونیکی و بین هارمونیکی متغیر با زمان ثابت و متغیر تولیدشده توسط مبدل‌های الکترونیکی، کوره‌های القایی، سیکلوکانورترها و موارد مشابه را کاهش دهند.

پیکربندی یک فیلتر C تقریباً مشابه با فیلتر بالا گذر مرتبه دوم است که پیشتر در شکل ۸-۱ نشان داده‌شده است. تمایز اصلی بین دو پیکربندی این است که فیلتر C دارای یک خازن کمکی C_a به‌صورت سری با سلف L_m است. یک پیکربندی معمولی از یک فیلتر C در شکل ۸-۱۰ نشان داده‌شده است. اندازه خازن کمکی C_a به‌گونه‌ای است که راکتانس خازنی آن L_m را در فرکانس پایه خنثی می‌کند و مقاومت میرایی R را دور می‌زند. به همین دلیل، تلفات مرتبط با R در عمل حذف می‌شوند و اجازه می‌دهند یک فیلتر C روی یک فرکانس پایین تنظیم شود.

پاسخ فرکانس امپدانس یک فیلتر C نیز اساساً با پاسخ یک فیلتر بالا گذر درجه دوم یکسان است. در فرکانس‌های هارمونیکی مرتبه بالا،

راکتانس C_a کم است، درحالی‌که راکتانس L_m بزرگ است؛ بنابراین، در امپدانس سری L_m و شاخه C_a، راکتانس L_m قالب است. پاسخ‌های فرکانس بالای فیلتر C و فیلترهای مرتبه دوم بالا گذر مشابه هستند (شکل ۸-۱۰ را ببینید).

در طراحی فیلتر C لازم است که $ISF(h_T)$ ، حداکثر جریان هارمونیکی مجاز برای جریان در سیستم در h_T ، فرکانس هارمونیک تنظیم‌شده، مشخص شود. همچنین فرض می‌شود که الزامات برای جبران توان راکتیو شناخته‌شده است، بنابراین اندازه نامی خازن C_m تعیین می‌شود. شکل ۸-۱۱ یک مدار معادل برای استخراج اجزای فیلتر R، Ca و Lm را نشان می‌دهد. راکتانس اتصال کوتاه با X_S نشان داده می‌شود.

اجزای فیلتر را می‌توان به‌صورت زیر محاسبه کرد:

$$R = \frac{R_F\,(h_T)^2 + \left(\frac{X_{C_m}}{h_T}\right)^2}{R_F(h_T)}$$

$$X_{L_m} = X_{C_a} = \frac{R_F\,(h_T)^2 + \left(\frac{X_{C_m}}{h_T}\right)^2}{\left(\frac{X_{C_m}}{h_T}\right)\left(\frac{h_T - 1}{h_T}\right)}$$

که در آن:

$$R_F = \frac{h_T\, X_S}{\sqrt{\frac{1}{I_{SF}\ \ (h_T)^2} - 1}}$$

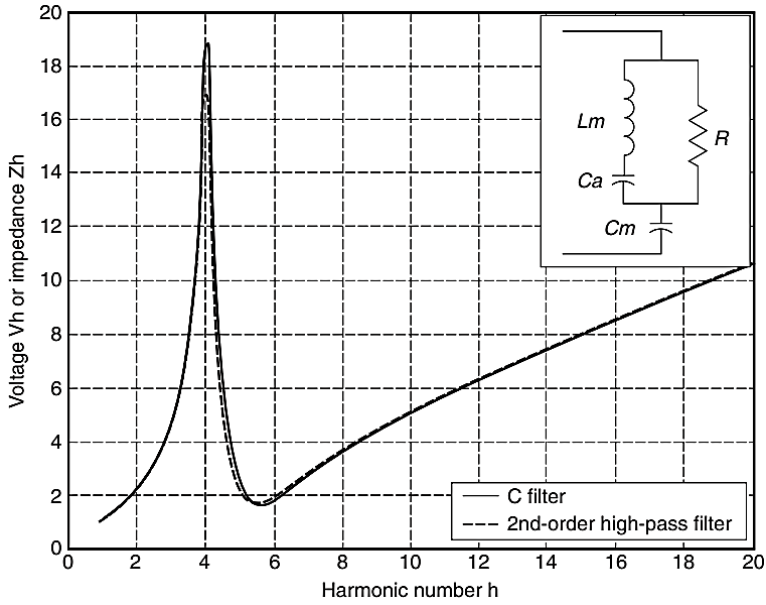
X_S = راکتاتس اتصال کوتاه در فرکانس پایه

X_{Lm} = راکتانس L_m در فرکانس پایه

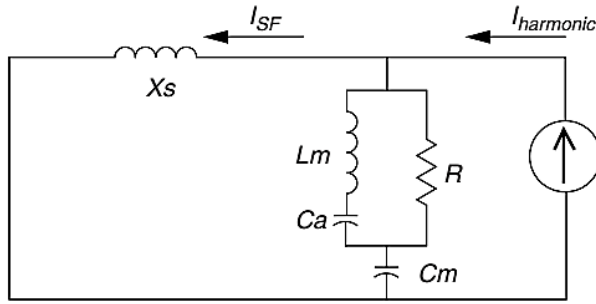
X_{ca} = راکتانس C_a در فرکانس پایه

مثال:

بیایید یک فیلتر C اعمال‌شده در یک باس ۱۳/۸ کیلوولت را در نظر بگیریم. این فیلتر برای تحویل ۵ مگاوات توان راکتیو در فرکانس اصلی ($X_{Cm} = 13.8^2 / 5 = 38.1\ \Omega$) و برای کاهش ۷۰ درصدی هارمونیک‌های تزریق‌شده در هارمونیک تنظیم‌شده $h_T = 5.5$ طراحی‌شده است.



شکل ۸-۱۰ یک پیکربندی معمولی فیلتر C و پاسخ فرکانس امپدانس آن



شکل ۸–۱۱ مدار معادل برای استخراج مشخصات فیلتر C

بنابراین، حداکثر جریان مجاز برای جریان در سیستم در فرکانس تنظیم‌شده، I_{SF} $(h_T = 5.5)$ = 0.3 p.u که معادل ۳۰٪ است، خواهد بود. راکتانس اتصال کوتاه سیستم، ۱ اُهم در نظر گرفته‌شده است. از معادلات داده‌شده می‌توان محاسبه کرد که R = 29.5 و $X_{Ca} = X_{La}$ = 1.383 خواهد بود. شکل ۸–۱۲ جریان هارمونیک مجاز برای جریان در سیستم را نشان می‌دهد، به‌عنوان‌مثال، I_{SF} به‌عنوان تابعی از فرکانس برای فیلترهای C با برابر با ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد.

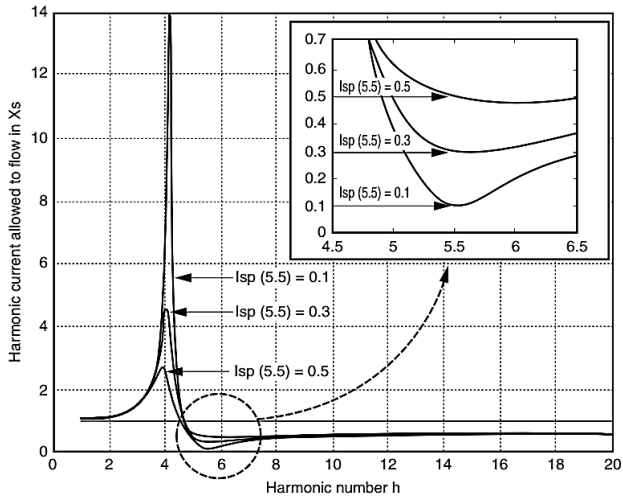
از شکل ۸–۱۲، مشاهده می‌شود که در فرکانس‌های هارمونیک پایین‌تر I_{SF} (h_T) کوچک‌تر است و میرایی فیلتر کمتر خواهد بود. به‌عنوان‌مثال، فیلتر C با I_{SF} $(h_T = 5.5)$ = 0.1 در مقایسه با فیلتر I_{SF} $(h_T = 5.5)$= 0.3 یا 0.5 میرایی کمتری دارد؛ زیرا مؤلفه مقاومتی R مقدار بیشتری دارد.

در فرکانس‌های هارمونیک بالاتر، مقدار جریان جاری در سیستم تقریباً در تمام موارد نشان داده‌شده در شکل ۸–۱۲ یکسان است؛ زیرا راکتانس

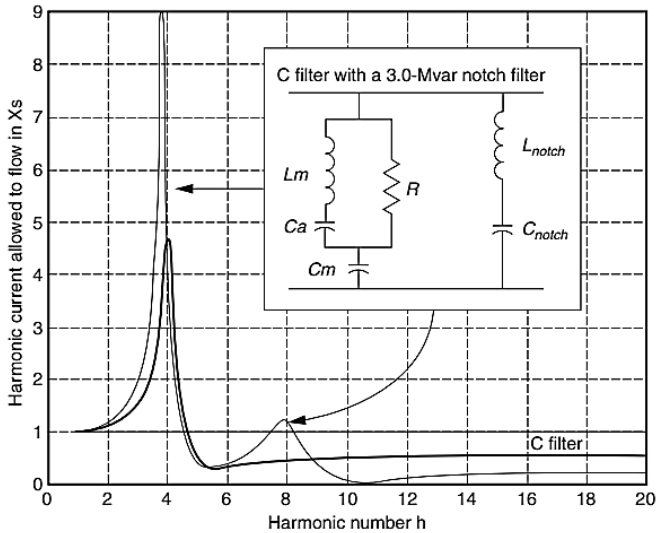
C_m بر امپدانس کلی فیلتر غالب است. به همین دلیل، میرایی بالاتر در فرکانس‌های هارمونیکی بالا را نمی‌توان با داشتن فیلتر C با $I_{SF}\ (h_T)$ پایین‌تر به دست آورد. در عوض، یک فیلتر اضافی موردنیاز است.

شکل ۸-۱۳ پیکربندی یک فیلتر C همراه با یک فیلتر ناچ را برای دستیابی به تضعیف بیشتر در فرکانس‌های بالاتر نشان می‌دهد. اشکال این آرایش این است که یک رزونانس موازی جدید مرتبط با فیلتر ناچ وجود دارد. این تشدید موازی باید به‌گونه‌ای انتخاب شود که توسط هیچ جریان هارمونیک موجود در سیستم تحریک نشود.

فیلتر ناچ به طور معمول بالاتر از فیلتر C تنظیم می‌شود. اگر فیلتر ناچ زیر فیلتر C تنظیم شود، اندازه خازن کمکی C_a به‌طور قابل‌توجهی بزرگ‌تر می‌شود و فیلتر C را غیرعملی می‌کند.



شکل ۸-۱۲ نمونه‌ای از فیلتر C که در آن حداکثر جریان هارمونیک مجاز در سیستم به ترتیب ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد در مرتبه هارمونیکی تنظیم‌شده در ۵.۵ است.



شکل ۸-۱۳ یک فیلتر C با و بدون فیلتر ناچ

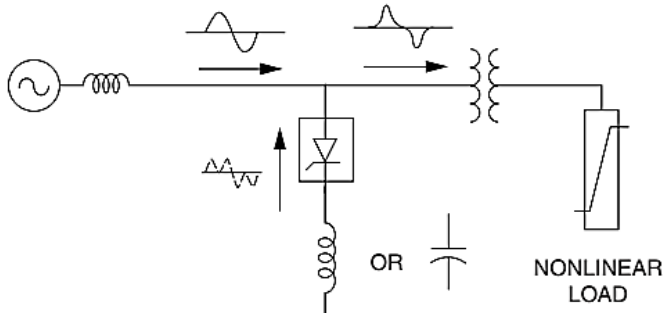
۸-٤ فیلترهای اکتیو

فیلترهای فعال انواع به نسبت جدیدی از دستگاه‌ها برای حذف هارمونیک‌ها هستند. آنها بر پایه الکترونیک قدرت پیچیده طراحی و بسیار گران‌تر از فیلترهای پسیو هستند. بااین‌حال، مزیت بزرگ آنها عدم ایجاد رزونانس در سیستم است. فیلترهای اکتیو می‌توانند مستقل از ویژگی‌های امپدانسی سیستم کار کنند؛ بنابراین، آنها را می‌توان در شرایط بسیار دشواری که فیلترهای پسیو به دلیل مشکلات رزونانس موازی نمی‌توانند با موفقیت کار کنند، استفاده کرد. آنها همچنین می‌توانند بیش از یک هارمونیک را در یک‌زمان موردبررسی قرار دهند و با دیگر مشکلات کیفیت توان، مانند

فلیکر مقابله کنند. آنها به‌ویژه برای بارهای بزرگ و اعوجاجی که از نقاط نسبتاً ضعیف سیستم قدرت تغذیه می‌شوند مفید هستند.

ایده اصلی، جایگزینی بخشی از موج سینوسی است که در جریان در یک بار غیرخطی وجود ندارد. شکل ۸-۱٤ مفهوم را نشان می‌دهد. یک کنترلر الکترونیکی ولتاژ یا جریان خط را کنترل می‌کند و ادوات الکترونیک قدرت را با دقت زیادی سوئیچ می‌کند تا جریان یا ولتاژ بار را ردیابی کند و آن را مجبور به سینوسی بودن کند. همان‌طور که نشان داده‌شده، دو رویکرد اساسی وجود دارد: یکی این است که از یک سلف برای ذخیره کردن جریان شود تا در لحظه مناسب به سیستم تزریق شود و دیگری که از یک خازن استفاده می‌کند؛ بنابراین، درحالی‌که جریان بار به میزان موردنیاز توسط بار غیرخطی اعوجاج می‌یابد، جریانی که توسط سیستم مشاهده می‌شود بسیار سینوسی‌تر است.

فیلترهای اکتیو به طور معمول می‌توانند برای تصحیح ضریب توان و هارمونیک‌ها برنامه‌ریزی شوند.



شکل ۸-۱٤ کاربرد فیلتر اکتیو در بار

۸-۵ طراحی فیلتر هارمونیک: مطالعه موردی

این بخش یک روش طراحی فیلترهای هارمونیکی برای کاربردهای صنعتی را نشان می‌دهد. این روش همچنین می‌تواند برای تبدیل خازن تصحیح ضریب توان موجود به فیلتر هارمونیک استفاده شود. همان‌طور که می‌دانیم خازن‌های اصلاح ضریب توان به‌طور گسترده در تأسیسات صنعتی برای بهبود ضریب توان، کاهش تلفات و حذف جریمه‌های اعمال‌شده در قبوض برق مشترکین صنعتی از سوی شرکت‌های توزیع برق استفاده می‌شود. از سوی دیگر، خازن‌های تصحیح ضریب توان ممکن است رزونانس هارمونیکی تولید کنند و موجب افزایش ولتاژ و جریان در باس‌های سوئیچینگ خازن می‌شوند؛ بنابراین، اغلب مطلوب است که یک یا چند بانک خازنی در یک تأسیسات به‌عنوان فیلتر هارمونیک اجرا شود.

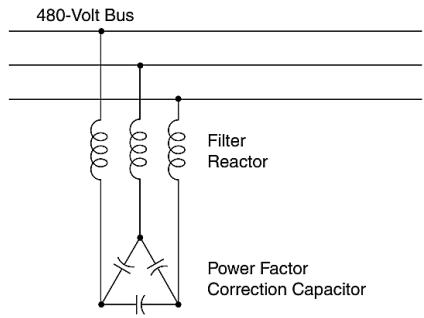
مراحل طراحی فیلتر در مراحل زیر به‌تفصیل شرح داده‌شده است. بهترین راه برای نشان دادن رویه‌های طراحی، از طریق یک مثال است.

یک فیلتر ناچ تک-تنظیم‌شده برای یک تأسیسات صنعتی طراحی‌شده و در یک باس ٤٨٠ ولت اعمال می‌شود. باری که فیلتر در آن نصب خواهد شد تقریباً ۱۲۰۰ کیلوولت آمپر با ضریب قدرت جابجایی نسبتاً ضعیف ۰/۷۵ پس‌فاز است. مجموع جریان هارمونیک تولیدشده توسط این بار (*THD*) تقریباً ۳۰ درصد جریان اصلی و حداکثر ۲۵ درصد هارمونیک پنجم است. این تأسیسات توسط یک ترانسفورماتور ۱۵۰۰ کیلوولت آمپر با امپدانس ٦ درصد تأمین می‌شود. اعوجاج ولتاژ پس‌زمینه هارمونیک پنجم در سمت اولیه (ولتاژ ورودی شبکه) ترانسفورماتور ۱ درصد مؤلفه اصلی در زمان بی‌باری است. در شکل ۷-۵ در فصل پیشین، تأسیسات صنعتی را نشان می‌دهد که در آن فیلتر اعمال خواهد شد. مراحل طراحی هارمونیک در گام‌های زیر ارائه می‌شود.

۱. **یک فرکانس تنظیم‌شده برای فیلتر انتخاب کنید.** فرکانس تنظیم‌شده بر اساس ویژگی‌های هارمونیک بارهای درگیر انتخاب می‌شود. به دلیل ماهیت فیلتر تک تنظیم‌شده، فیلتر کردن باید با کمترین فرکانس هارمونیکی تولیدشده توسط بار شروع شود. در این صورت، آن هارمونیک پنجم خواهد بود. فیلتر کمی پایین‌تر از فرکانس هارمونیک موردنظر تنظیم می‌شود تا تلورانس‌ها در اجزای فیلتر و تغییرات امپدانس سیستم امکان‌پذیر باشد. این امر مانع از عملکرد فیلتر به‌عنوان یک اتصال کوتاه مستقیم برای جریان هارمونیک متخلف می‌شود و کار اجزای فیلتر را کم می‌کند. همچنین در صورت تغییر

پارامترهای سیستم و تغییر فرکانس تنظیم، احتمال تشدید هارمونیک خطرناک را به حداقل می‌رساند.

در این مثال فیلتر به‌گونه‌ای طراحی‌شده است که فرکانس تیون روی مرتبه ٤/٧ تنظیم شود. این یک انتخاب متداول از فرکانس ناچ است؛ زیرا فرکانس تشدید موازی حاصل در اطراف هارمونیک چهارم قرار می‌گیرد، فرکانس هارمونیکی که توسط اکثر بارهای غیرخطی تولید نمی‌شود. فیلتر ناچ در شکل ۸-۱۵ نشان داده‌شده است.



شکل ۸-۱۵ مثالی از پیکربندی یک فیلتر فشار ضعیف

۲. **اندازه بانک خازنی و فرکانس تشدید را محاسبه کنید.** به‌عنوان یک قاعده کلی، اندازه فیلتر بر اساس نیاز توان راکتیو بار برای اصلاح ضریب توان است. هنگامی‌که یک خازن تصحیح ضریب توان موجود به یک فیلتر هارمونیک تبدیل می‌شود، اندازه خازن مشخص است. سپس اندازه راکتور برای تنظیم خازن به فرکانس موردنظر انتخاب می‌شود. بااین‌حال، بسته به فرکانس تنظیم‌شده، اندازه نامی ولتاژ بانک خازنی ممکن است بیشتر از ولتاژ سیستم

باشد تا امکان افزایش ولتاژ در سراسر راکتور فراهم شود؛ بنابراین، به‌هرحال ممکن است مجبور شوید خازن را عوض کنید.

در این مثال فرض می‌شود که هیچ خازنی نصب نشده است و ضریب توان مطلوب ۰/۹۶ است؛ بنابراین، توان راکتیو خالص از فیلتر موردنیاز برای تصحیح ضریب توان از ۷۵ به ۹۶ درصد را می‌توان به‌صورت زیر محاسبه کرد:

- توان راکتیو موردنیاز برای ضریب توان ۷۵ درصد خواهد بود با:

$$1200 \times \sin[\cos^{-1}(0.75)] = 794.73\ kvar$$

- میزان توان راکتیو موردنیاز برای ضریب توان ۰/۹۶ خواهد بود:

$$1200 \times \sin[\cos^{-1}(0.96)] = 336\ kvar$$

- مقدار توان راکتیو موردنیاز برای جبران سازی با فیلتر:

$$794.73 - 336.0 = 457.73$$

برای یک سیستم اسمی ۴۸۰ ولت، راکتانس خالص معادل اتصال ستاره فیلتر X_{Filt} توسط رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$X_{Filt} = \frac{KV^2(1000)}{Kvar} = \frac{0.48^2(1000)}{457.73} = 0.5034\ \Omega$$

X_{Filt} اختلاف بین راکتانس خازنی و راکتانس القایی در فرکانس پایه است:

$$X_{Filt} = X_{Cap} - X_L$$

برای تیون شدن (تنظیم شدن) در هارمونیک ٤/٧ :

$$X_{Cap} = h^2 X_L = 4.7^2 X_L$$

بنابراین، راکتانس خازنی موردنظر را می‌توان توسط رابطه‌ی زیر به دست آورد:

$$X_{Cap} = \frac{X_{Filt}\, h^2}{h^2 - 1} = \frac{0.5034(4.7^2)}{4.7^2 - 1} = 0.5272\ \Omega$$

در این مرحله، مشخص نیست که آیا ولتاژ نامی خازن فیلتر می‌تواند پاسخگو باشد یا بایستی ولتاژ بالاتری را برای خازن در نظر گرفت:

$$kvar = \frac{KV^2(1000)}{X_{Cap}} = \frac{0.480^2(1000)}{0.5272} = 437\ kVAr$$

به‌طور مشابه در ٦٠٠ ولت، خازن بایستی، خازن ٦٨٢ کیلو وار باشد. در حال حاضر، فیلتر با استفاده از یک خازن ٤٨٠ ولت با توان ٤٥٠ کیلووات طراحی خواهد شد که اندازه معمولی در دسترس نزدیک به مقدار موردنظر است. برای این رده از خازن:

$$X_{Cap} = 0.5120\ \ \Omega$$

۳. **اندازه راکتور فیلتر را محاسبه کنید.** اکنون می‌توان اندازه راکتور فیلتر را برای تنظیم خازن به فرکانس دلخواه انتخاب کرد. از مرحله ۱، فرکانس موردنظر در هارمونیک مرتبه ٤/٧ یا ۲۸۲ هرتز است. اندازه راکتور فیلتر از راکتانس خازنی معادل اتصال ستاره که در مرحله ۲ تعیین می‌شود، به شرح زیر محاسبه می‌شود:

$$X_{L(fund)} = \frac{X_{Cap\,(wye)}}{h^2} = \frac{0.5120}{4.7^2} = 0.02318\ \Omega$$

یا:

$$L = \frac{X_{L(fund)}}{2\pi \times 60} = 0.06148\ \ mH$$

از سویی دیگر، اندازه راکتور را می‌توان با حل L در معادله زیر محاسبه کرد:

$$f_h = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_{(wye)}}}$$

که در آن $f_h = 4.7 \times 60 = 282$ Hz است.

مرحله بعدی ارزیابی الزامات کاری برای خازن و راکتور است.

۴. **الزامات کاری فیلتر را ارزیابی کنید.** ارزیابی الزامات کاری فیلتر معمولاً شامل وظایف بانک خازنی است. این وظایف شامل ولتاژ پیک، جریان، kvar تولیدشده و ولتاژ *rms* است.استاندارد *IEEE* برای خازن‌های قدرت شنت، به‌عنوان استاندارد محدودکننده برای ارزیابی

این وظایف استفاده می‌شود. محاسبات وظایف نسبتاً طولانی است؛ بنابراین، آنها به سه مرحله تقسیم می‌شوند؛ یعنی محاسبه وظایف اساسی، وظایف هارمونیک و وظایف جریان و ولتاژ پیک و مقدار مؤثر ولتاژ.

۵. **محاسبه ملزومات کاری اساسی.** در این مرحله یک ولتاژ کاری در فرکانس پایه در سراسر بانک خازنی تعیین می‌شود. محاسبه به شرح زیر است:

الف) راکتانس ظاهری ترکیب خازن و راکتور در فرکانس پایه به‌صورت زیر است:

$$X_{fund} = \left|X_L - X_{Cap(wye)}\right| = |0.02318 - 0.5120| = 0.489\ \Omega$$

ب) جریان عبوری از فیلتر در فرکانس پایه برابر است با:

$$I_{fund} = \frac{KV_{actual}/\sqrt{3}}{X_{fund}} = \frac{480/\sqrt{3}}{0.489} = 567\ A$$

پ) ولتاژ کاری دو سر خازن در فرکانس پایه به‌صورت:

$$V_{L-L\,(fund)} = \sqrt{3} \times I_{fund} \times X_{Cap\,(wye)} = 502.8\ V$$

این ولتاژ نامی پایه در خازن است. باید برای هر شرایط احتمالی (حداکثر ولتاژ سیستم) تنظیم شود و باید کمتر از ۱۱۰ درصد ولتاژ نامی خازن باشد.

ت) به‌دلیل این واقعیت که فیلتر جریان اصلی (پایه) بیشتری نسبت به خازن تنها می‌کشد، توان راکتیو واقعی تولیدشده بزرگ‌تر از رده خازن است:

$$kvar_{(fund)} = \sqrt{3} \times I_{fund} \times KV_{actual} = 471 \ kvar$$

۶. **محاسبه الزامات نامی هارمونیک.** در این مرحله حداکثر جریان هارمونیک مورد انتظار در فیلتر محاسبه می‌شود. این جریان دارای دو جزء است: جریان هارمونیک تولیدشده توسط بار غیرخطی (محاسبه‌شده در مرحله الف) و جریان هارمونیک از سمت شبکه (محاسبه‌شده در مرحله ب).

الف) ازآن‌جایی‌که بار غیرخطی ۲۵٪ هارمونیک پنجم جریان را تولید می‌کند، جریان هارمونیک برحسب آمپر تولیدشده توسط بار:

$$I_{h\,(amps)} = I_{h\,(pu)} \frac{KVA/\sqrt{3}}{KV_{actual}} = 0.25 \times \frac{1200}{\sqrt{3} \times 0.48} = 360.8\ A$$

ب) جریان هارمونیکی واردشده به فیلتر از سمت منبع به شرح زیر تخمین زده می‌شود. فرض بر این است که یک درصد اعوجاج ولتاژ هارمونیک پنجم موجود در سیستم برق تنها توسط امپدانس‌های ترانسفورماتور سرویس و فیلتر محدود می‌شود. امپدانس شبکه توزیع نادیده گرفته می‌شود.

- امپدانس ترانسفورماتور سرویس‌دهنده در فرکانس پایه برابر است با:

$$X_{T\,(fund)} = Z_{T(\%)} \frac{KV_{actual}{}^2}{MVA_{Xfmr}} = 0.06 \times \frac{0.48^2}{1.5} = 0.0092\ \Omega$$

- امپدانس پنجم هارمونیک ترانسفورماتور سرویس (ترانسفورماتور در حالت القایی است):

$$X_{T\,(harm)} = hX_{T\,(fund)} = 5 \times 0.0092 = 0.0461\ \Omega$$

- امپدانس هارمونیکی بانک خازنی برابر است با:

$$X_{Cap(wye);harm} = \frac{X_{Cap(wye)}}{h} = \frac{0.512}{5} = 0.1024\ \Omega$$

- امپدانس هارمونیکی راکتور برابر است با:

$$X_{L\,(harm)} = h\,X_{L\,(fund)} = 5 \times 0.02318 = 0.1159\ \Omega$$

- با توجه به اینکه اعوجاج ولتاژ در سیستم برق ۱٪ پریونیت است، مقدار تخمینی جریان هارمونیک پنجم واردشده به فیلتر از سمت منبع برابر خواهد بود با:

$$I_{h\,(utility)} = \frac{V_{h\,(utilituy)}\,(pu) \times KV_{actual}}{\sqrt{3} \times \left(X_{T\,(harm)} - X_{Cap(wye).harm} + X_{L\,(harm)}\right)}$$

$$= \frac{0.01 \times 480}{\sqrt{3} \times (0.0461 - 0.1024 + 0.1159)} = 46.5\ A$$

پ) حداکثر جریان هارمونیکی از مشارکت مجموع جریان هارمونیک تولیدشده توسط بار و جریانی هارمونیکی تولیدشده به‌واسطه ولتاژ هارمونیکی شبکه حاصل می‌شود:

$$I_{h\,(Total)} = 360.8 + 46.5 = 407\ A$$

ت) ولتاژ هارمونیکی در خازن را می‌توان به‌صورت زیر محاسبه کرد:

$$V_{Cap(L-L.rms.harm)} = \sqrt{3}\ I_{h(total)} \frac{X_{Cap(wye)}}{h} = \sqrt{3} \times 407 \times \frac{0.512}{5} = 72.2$$

۷. ارزیابی جریان *rms* کل و ولتاژ پیک موردنیاز.

ارزیابی این دو کمیت به‌صورت زیر محاسبه می‌شوند:

الف) مجموع جریان *rms* عبوری از فیلتر:

$$I_{rms.total} = \sqrt{I_{fund}^2 + I_{(utility)}^2} = \sqrt{567^2 + 407^2} = 698\ A$$

این مقدار کل جریان *rms* موردنیاز برای راکتور فیلتر است.

ب) با فرض جمع شدن مؤلفه‌های هارمونیکی و پایه، حداکثر ولتاژ پیک در خازن برابر است با:

$$V_{L-L.Cap(max.peak)} = \sqrt{V_{L-L.Cap(fund)}^2 + V_{L-L.Cap(rms.harm)}^2} = \sqrt{(502.8^2 + 42.2^2)} = 508\ V$$

مجموع *kvar* مشاهده‌شده توسط خازن برابر است با:

$$kvar_{Cap\ (wye).totoal} = \sqrt{3} I_{rms.total} \times V_{L-L\ Cap(rms.total)} = \sqrt{3} \times 698 \times 508 = 614$$

۸. **ارزیابی محدودیت‌های درجه‌بندی خازن.** پارامترهای (پیک ولتاژ، ولتاژ و جریان *rms* و *kvar* تولیدشده) برای خازن فیلتر پیشنهادی با محدودیت‌های مختلف استاندارد *IEEE* در جدول ۸-۱ مقایسه شده است. این مقادیر بسیار مرزی خواهند بود؛ زیرا پارامترهای خازن اساساً در حداکثر محدودیت‌ها هستند. هیچ تلورانسی برای انحراف در مفروضات یا افزایش ولتاژ سرویس وجود ندارد. یک خازن ۴۸۰ ولت احتمالاً در این کاربرد عمر کوتاهی خواهد داشت. هنگامی‌که این اتفاق می‌افتد، باید از یک خازن با ولتاژ بالاتر استفاده شود. در ۶۰۰ ولت، رتبه خازن معادل خواهد بود با:

$$450 \times \frac{600^2}{480^2} = 703\ kvar$$

مقدار نامی ۷۰۰ کیلووار با مقادیر راکتور محاسبه‌شده در مرحله ۳ اساساً فیلتر مشابهی را در تلورانس‌های تولید معمولی فراهم می‌کند. خازن ۶۰۰ ولت در این مورد به‌خوبی در حد مقادیر خود است.

۹. **ارزیابی پاسخ فرکانس فیلتر.** حال پاسخ فرکانسی فیلتر ارزیابی می‌شود تا اطمینان حاصل شود که فیلتر رزونانس جدیدی در فرکانسی ایجاد نمی‌کند که باعث ایجاد مشکلات اضافی شود. فرکانس هارمونیکی که در آن رزونانس موازی **زیر فرکانس ناچ** رخ می‌دهد به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$h_o = \sqrt{\frac{X_{Cap(wye)}}{X_{T(fund)}+X_{L(fund)}}} = \sqrt{\frac{0.512}{0.0092+0.02318}} = 3.97$$

رابطه بالا با این فرض است که راکتانس ترانسفورماتور سرویس بر امپدانس شبکه توزیع یا منبع غالب است. به‌حساب آوردن امپدانس سیستم توزیع فرکانس رزونانس موازی را کاهش می‌دهد.

این فیلتر منجر به تشدید بسیار نزدیک به هارمونیک چهارم می‌شود که مورد جالبی است. به‌طورمعمول، منابع بسیار کمی از یک هارمونیک یکنواخت در طول عملکرد حالت پایدار وجود دارد و این فیلتر به‌طور قابل قبولی کار می‌کند. بااین‌حال، جریان‌های هارمونیک چهارم قابل‌توجهی در طی رویدادهایی مانند راه‌اندازی ترانسفورماتور وجود دارد. اگر زمانی که یک ترانسفورماتور بزرگ برق‌دار می‌شود و بار بسیار کمی برای مستهلک کردن رزونانس وجود دارد و فیلتر در سرویس باشد، ممکن است اضافه ولتاژهایی وجود داشته باشد که پس از دوره گذرای هجومی معمول همچنان پابرجا بماند. در این حالت، طراح اول باید امپدانس سیستم توزیع را در محاسبه لحاظ کند.دوم اینکه برای به دست آوردن حاشیه اطمینان اضافی از هارمونیک چهارم، اندازه فیلتر اصلی باید افزایش یابد.

جدول ۸–۱ جدول مقایسه به‌منظور ارزیابی محدودیت‌های کاری فیلتر

Duty	Definition	Limit, %	Actual values	Actual values, %
Peak voltage	$\frac{V_{\text{L-L,Cap(max,Peak)}}}{\text{kV}_{\text{rated}}}$	120	$\frac{575\ \text{V}}{480\ \text{V}}$	119
RMS voltage	$\frac{V_{\text{L-L,Cap(rms,total)}}}{\text{kV}_{\text{rated}}}$	110	$\frac{508\ \text{V}}{480\ \text{V}}$	106
RMS current	$\frac{I_{\text{rms,total}}}{I_{\text{Cap(rated)}}}$	180	$\frac{698\ \text{A}}{541\ \text{A}}$	129
kvar	$\frac{\text{kvar}_{\text{Cap(wye),total}}}{\text{kvar}_{\text{rated}}}$	135	$\frac{614\ \text{kvar}}{450\ \text{kvar}}$	136

۱۰. ارزیابی تأثیر تغییرات پارامتر فیلتر در محدوده تلورانس مشخص‌شده. طراحان فیلتر معمولاً فرض می‌کنند که خازن‌ها با تلورانس ۱۵ درصد مقدار ظرفیت اسمی طراحی‌شده‌اند. فرض می‌شود راکتورها دارای تلورانس ۵± درصد از اندوکتانس اسمی هستند. این تلورانس‌ها می‌توانند به‌طور قابل‌توجهی بر عملکرد فیلتر تأثیر بگذارند؛ اگر پاسخ فرکانسی در این محدوده یک تشدید مضر ایجاد کند؛ بنابراین، مرحله نهایی بررسی طراحی فیلتر برای حالات بحرانی مختلف است. این کار به‌صورت خودکار در برخی از نرم‌افزارهای طراحی فیلتر انجام می‌شود.

مراحل ۱ تا ۱۰ یک طراحی معمولی فیلتر تک تیون شده را نشان می‌دهد.

هنگامی‌که یک فیلتر تک تیون شده هارمونیک‌ها را تا سطوح قابل‌قبول کنترل نمی‌کند، ممکن است فیلترهای تک تیون شده متعددی ضروری باشند. به‌عنوان‌مثال، فیلترهای هارمونیک پنجم، هفتم و یازدهم ممکن است برای بارهای شش پالسی بزرگ موردنیاز باشد. روش کلی یکسان است با این تفاوت که ابتدا توان راکتیو موردنیاز بین مراتب فیلتر تقسیم می‌شود. ارزیابی تأثیر تلورانس مؤلفه بسیار مهم است؛ زیرا فیلترهای متعددی در آن دخیل هستند.

مشخصه تنظیم فیلتر با ضریب کیفیت آن Q توصیف می‌شود. Q معیاری از تیز بودن مشخصه امپدانسی فیلتر است و برای مقاومت فیلتر سری به‌صورت تعریف می‌شود:

$$Q = \frac{nX_L}{R}$$

که در آن:

R = مقاومت سری المان‌های فیلتر

n = هارمونیک تنظیم‌شده

X_L = راکتانس راکتور فیلتر در فرکانس پایه

به‌طورمعمول، مقدار R فقط از مقاومت ذاتی سلف تشکیل‌شده است. این معمولاً منجر به یک مقدار بسیار بزرگ Q و یک عمل فیلترینگ بسیار شدید می‌شود. این موضوع معمولاً برای کاربرد معمولی تک فیلتر

رضایت‌بخش است و منجر به فیلتری می‌شود که کارکرد آن بسیار مقرون‌به‌صرفه است (مصرف انرژی کم). بااین‌حال، گاهی اوقات توصیه می‌شود کمی تلفات عمدی برای کمک به میرایی پاسخ سیستم ایجاد شود. معمولاً یک مقاومت به‌موازات راکتور اضافه می‌شود تا یک فیلتر بالا گذر ایجاد شود. در این حالت، Q به‌عنوان معکوس حالت اتصال سری بالا تعریف می‌شود به‌طوری‌که اعداد بزرگ منعکس‌کننده تنظیم فرکانسی تیزتر هستند. فیلترهای بالا گذر معمولاً فقط در هارمونیک‌های ۱۱ و ۱۳ و بالاتر استفاده می‌شوند. معمولاً به دلیل مقدار تلفات و اندازه مقاومت، استفاده از چنین فیلتری در هارمونیک‌های ۵ و ۷ مقرون‌به‌صرفه نیست. (یک فیلتر C ممکن است قابل‌استفاده باشد.)

راکتورهای مورداستفاده برای کاربردهای فیلتر بزرگ‌تر به طور معمول با یک هسته هوا ساخته می‌شوند که خاصیت خطی بودن را با توجه به فرکانس و جریان ارائه می‌دهند. راکتورهای فیلترهای کوچک‌تر و فیلترهایی که باید در یک فضای محدود یا نزدیک سازه‌های فولادی قرار گیرند با هسته فولادی ساخته می‌شوند. در مرحله ۱۰، تلورانس ۵ درصد در راکتانس بیشتر برای کاربردهای صنعتی قابل‌قبول است. نسبت X/R در فرکانس ۶۰ هرتز معمولاً بین ۵۰ تا ۱۵۰ است. در صورت تمایل می‌توان از یک مقاومت سری برای کاهش این نسبت استفاده کرد تا فیلتری با میرایی بیشتر تولید شود. راکتور باید به‌گونه‌ای انتخاب شود که در برابر اتصال کوتاه در محل اتصال راکتور و خازن مقاومت کند. یک طراحی برای مقدار Q برای

پیکربندی فیلتر بالا گذر معمولاً ممکن است ۱ یا ۲ باشد تا به یک پاسخ مسطحی در فرکانس‌های بالاتر از فرکانس تنظیم‌شده دست یابد.

فیلترها برای بسیاری از کاربردهای پرقدرت و سه فاز مانند سیستم‌های جبران‌کننده استاتیک اغلب شامل هارمونیک‌های پنجم و هفتم می‌شوند، زیرا این هارمونیک‌ها بزرگ‌ترین هارمونیک‌هایی هستند که توسط مبدل‌های پل شش پالسه تولید می‌شوند. گاهی اوقات این هارمونیک‌ها باعث ایجاد تشدید در سیستم‌هایی با فرکانس تشدید نزدیک به هارمونیک سوم می‌شوند که ممکن است به فیلتر هارمونیک سوم نیاز داشته باشد. به‌طورمعمول، کسی فکر نمی‌کند که هارمونیک سوم در یک پل سه فاز مشکل‌ساز باشد؛ اما عدم تعادل در عملکرد پل و در پارامترهای سیستم باعث ایجاد مقدار کمی هارمونیک غیر مشخصه می‌شود. تحلیلگران بیشتر اوقات فرض می‌کنند که هارمونیک‌های غیر مشخصه ۹۰ تا ۹۵ درصد مقدار بیشینه تئوری تضعیف شده‌اند. اگر سیستم به آن هارمونیک‌ها پاسخ دهد، ممکن است برخلاف این فرض که این هارمونیک‌ها کنسل می‌شوند، فیلترها باید اعمال شوند. در بارهای سه فازی که می‌توانند در حالت تک فاز کار کنند (به‌عنوان‌مثال، کوره‌های قوس الکتریکی)، هیچ تضعیف هارمونیک‌های غیر مشخصه‌ای را نمی‌توان فرض کرد.

۸-٦ مطالعات موردی

دو مطالعه موردی اضافی ارائه‌شده است.

۱) ارزیابی بارگذاری هادی خنثی و کاهش سطح ترانسفورماتور.

۲) بین هارمونیک‌های ناشی از کوره‌های القایی را توصیف می‌کند.

۸-٦-۱ ارزیابی اضافه جریان در سیم خنثی و کاهش توان ترانسفورماتور

در مراکز داده، بار غالب شبکه متشکل از صدها سرور رایانه تک فاز و تجهیزات شبکه است. جریان‌های فاز در مدارهای ولتاژ پایین دارای مشخصات هارمونیکی هستند. ازآنجایی‌که این بارها در هارمونیک سوم غنی هستند، احتمال زیادی وجود دارد که هادی نوترال بیش‌ازحد بارگذاری شود.

مسئله، تخمین بارگذاری هادی نوترال برحسب آمپر و درصد جریان مؤثر فاز است. افزون بر این، مقدار *Derate* ترانسفورماتور تغذیه‌کننده این بار، بایستی با فرض ضریب تلفات جریان گردابی تحت بار نامی $P_{EC\text{-}R}$، ۸ درصد تعیین شود. سیستم متعادل فرض می‌شود؛ بنابراین، مجموع تمام جریان‌های فاز منجر به جریان هارمونیک سوم در هادی نوترال می‌شود. مقدار مؤثر جریان فاز برابراست با:

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1.3.5.N}^{N=31} I_h^2} = 1.26\, I_1 = 359.1\ A$$

جریان هارمونیک سوم ٦٥/٧ درصد است که جریان نوترالی برابر با:

$$I_{neutral} = 3I_{3rd} = 3 \times 0.657 I_1 = 562.72\ A$$

$$= 1.56 I_{rms}$$

بر اساس این برآورد، هادی نول تقریباً به ١٥٦ درصد از هادی فاز بارگذاری می‌شود. این پدیده مسئول اضافه‌بار نوترال است. راه‌حل‌های رایج عبارت‌اند از:

- در نظر گرفتن هادی نول جداگانه برای هر فاز
- دو برابر کردن سطح مقطع هادی نول
- استفاده از ترانسفورماتور زیگزاگ نزدیک به بارها برای کوتاه کردن مسیر برگشت برای جریان‌های هارمونیک سوم و رفع بار اضافی نوترال
- فیلتر سری تنظیم‌شده روی هارمونیک سوم در مدار نوترال در ترانسفورماتور

جدول ۸-۲ محاسبات کاهش برای ترانسفورماتور

Harmonic	Current, %	Frequency, Hz	Current, pu	I^2	I^2h^2
1	100.00	60	1.000	1.000	1.000
3	65.70	180	0.657	0.432	3.885
5	37.70	300	0.377	0.142	3.553
7	12.70	420	0.127	0.016	0.790
9	4.40	540	0.044	0.002	0.157
11	5.30	660	0.053	0.003	0.340
13	2.50	780	0.025	0.001	0.106
15	1.90	900	0.019	0.000	0.081
17	1.80	1020	0.018	0.000	0.094
19	1.10	1140	0.011	0.000	0.044
21	0.60	1260	0.006	0.000	0.016
23	0.80	1380	0.008	0.000	0.034
25	0.40	1500	0.004	0.000	0.010
27	0.20	1620	0.002	0.000	0.003
29	0.20	1740	0.002	0.000	0.003
31	0.20	1860	0.002	0.000	0.004
			Total	1.596	10.119
				K factor	6.34
			Standard derating (ANSI/IEEE C57.110-1986)		0.85 pu
			Assumed eddy current loss factor $P_{EC\text{-}R}$		8%

۸-۶-۲ اینترهارمونیک های ایجادشده توسط کوره‌های القایی

از علائم کلیدی این مشکل این بود که مشتریان مسکونی در یک منطقه گسترده از اینکه ساعت آن‌ها در هرروز هفته تقریباً در یک زمان مشابه سریع‌تر کار می‌کند، شکایت داشتند. دیگر ابزارهای زمان‌سنجی نیز رفتاری نامنظم داشتند.

ساعت‌هایی که این مشکل مواجه بودند، با تشخیص عبور صفر در شکل موج ولتاژ، زمان را می‌شمارند. زمان بین تقاطع دو صفر مجاور نیم سیکل فرکانس پایه در سیستم قدرت است. ازآنجایی‌که خطای فرکانس سیستم

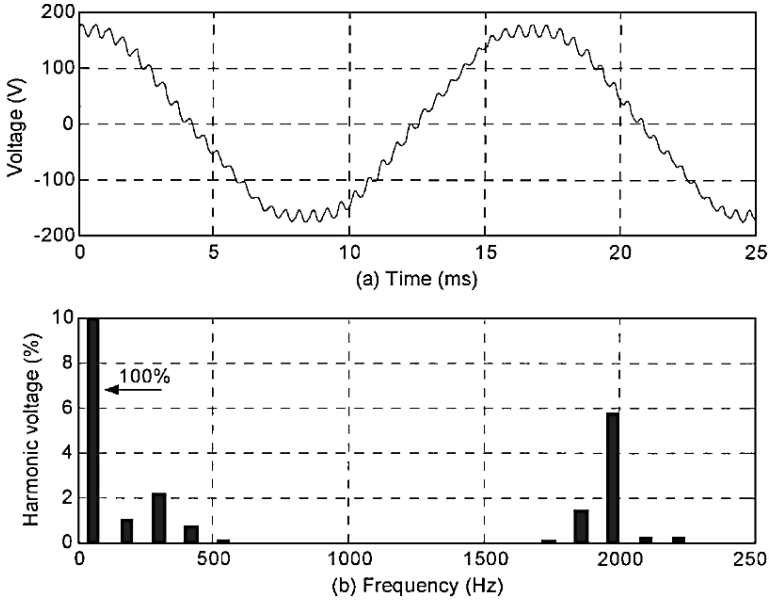
قدرت در بازه‌های زمانی طولانی ناچیز است، این ساعت‌ها بسیار دقیق هستند.

پدیده‌های ساعت سریع زمانی اتفاق می‌افتند که به دلیل اعوجاج فرکانس بالا در شکل موج ولتاژ، بیش‌ازحد انتظار در نیم سیکل، گذر از صفر وجود دارد. سیگنال فرکانس بالا به‌صورت یک سیگنال دندانه اره‌ای یا سینوسی که روی سیگنال فرکانس اصلی قرارگرفته است، ظاهر می‌شود. شکل ۸-۱۶ یک شکل موج ولتاژ معمولی اندازه‌گیری شده در محل مشترک را نشان می‌دهد. واضح است که مواردی در یک نیم سیکل چندین گذر از صفر وجود داشته باشد.

شکل ۸-۱۶ (b) نشان می‌دهد که اعوجاج فرکانس بالا در هارمونیک‌های ۲۹ (۱۷۴۰ هرتز) و ۳۵ (۲۱۰۰ هرتز) رخ می‌دهد. بررسی‌های بیشتر نشان داد که این فرکانس‌ها توسط کوره‌های القایی واقع در یک کارخانه سنگ‌زنی فولاد تولید می‌شوند. این اعوجاج بر مشتریان مسکونی چندین مایل دورتر تأثیر گذاشته است. هم تأسیسات سنگ‌زنی و هم مشتریان مسکونی از یک سیستم توزیع ٤٦ کیلوولتی تأمین‌شده‌اند که در نمودار تک خطی تأسیسات در شکل ۸-۱۷ نشان داده‌شده است.

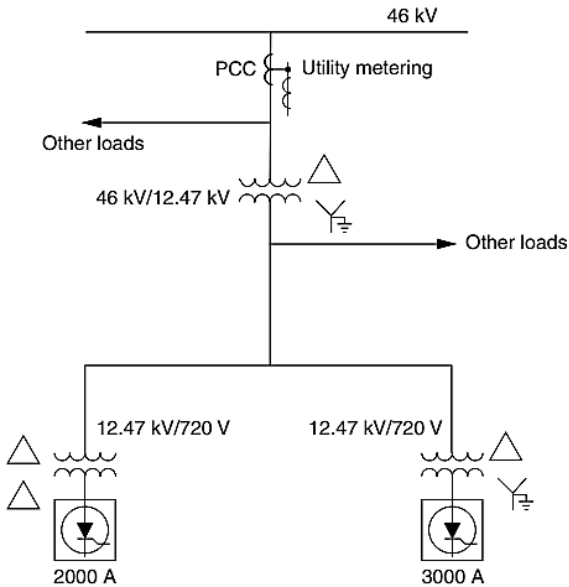
فرکانس کاری دو کوره القایی بسته به مقدار و نوع ماده ذوب‌شده بین ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ هرتز متغیر است. مشخصات هارمونیک این کوره‌ها پیشتر توضیح داده شد. با فرض اینکه فرکانس کاری در یک مرحله عملیاتی خاص ۹۵۰ هرتز باشد، جریان خط حاصل که با استفاده از معادلات گذشته

قابل‌محاسبه است، شامل جفت جریان‌های زیر است: (۱۸٤۰ هرتز، ۱۹٦۰ هرتز)، (۳۷٤۰ هرتز، ۳۸٦۰ هرتز) و ... .



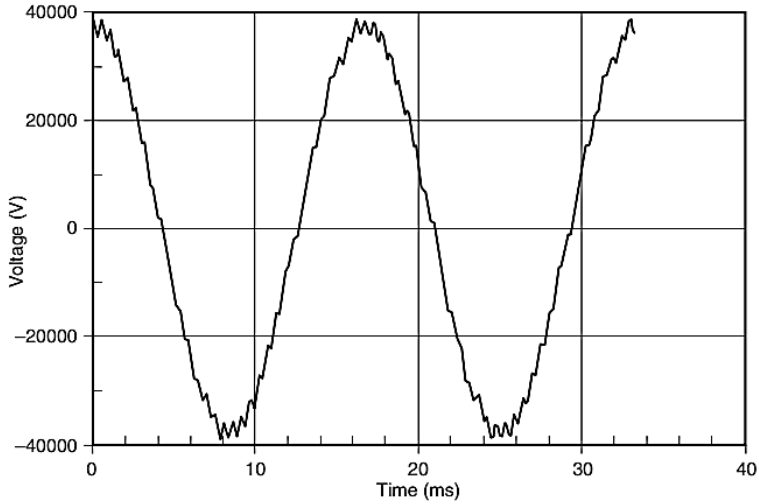
شکل ۸–۱۶ شکل موج ولتاژ که به دلیل اعوجاج فرکانس بالا و طیف هارمونیکی آن باعث ایجاد مشکل ساعت سریع می‌شود.

این جریان‌ها جریان‌های اینترهارمونیک هستند؛ زیرا مضرب صحیح فرکانس اصلی نیستند. دوتای اولی قوی‌ترین مؤلفه‌های اینترهارمونیکی هستند و در ولتاژ برجسته‌تر هستند. ازآنجایی‌که فرکانس کاری کوره بین ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ هرتز متغیر است، اولین جفت جریان بین هارمونیک حاصل بین ۱۵۴۰ (۲۵/۶۷–امین هارمونیک) و ۲۰۶۰ هرتز (هارمونیک ۳۴/۳۳–امین) تغییر می‌کند. این اعوجاج هارمونیک متفاوت استفاده از فیلترهای غیرفعال شنت را غیرممکن می‌کند.



شکل ۸–۱۷ نمودار یک خطی کارخانه سنگ‌زنی فولاد که منبع، اندازه‌گیری و بارها را نشان می‌دهد.

نقطه اتصال مشترک برای این تأسیسات در سمت ولتاژ بالا ترانسفورماتور ۱۲.٤۷/٤٦ کیلوولت قرار داشت. شکل ۸–۱۸ شکل موج ولتاژ را در نقطه اتصال مشترک نشان می‌دهد که در آن اعوجاج فرکانس بالا به‌وضوح در بالای شکل موج فرکانس پایه قابل‌مشاهده است.



شکل ۸–۱۸ شکل موج ولتاژ در *PCC* برای تأسیسات سنگ‌زنی فولاد (٤٦ کیلوولت)

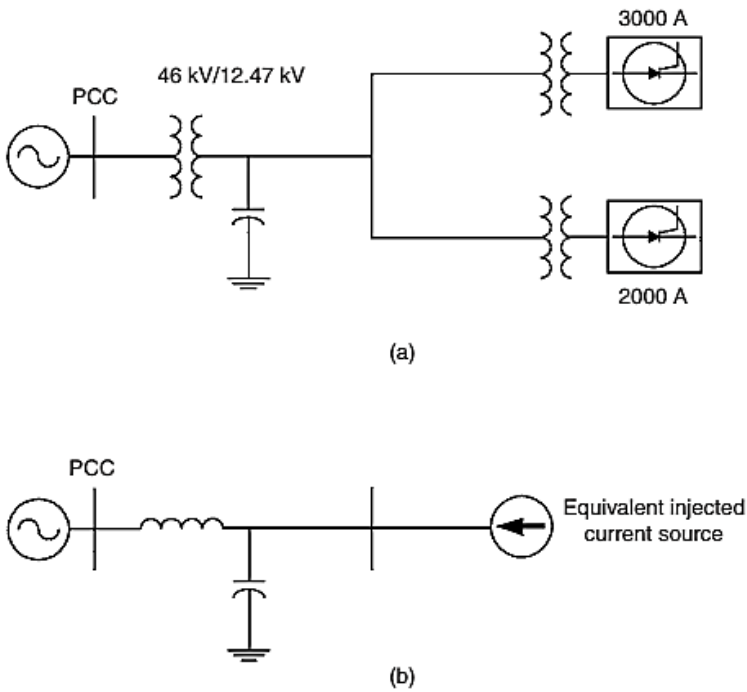
برای درک اینکه چرا اعوجاج در سراسر سیستم ٤٦ کیلوولت ظاهر شد، یک اسکن فرکانسی از سیستم از دید نقطه اتصال مشترک انجام می‌شود. مشخصه امپدانس حاصل در شکل ۸–۱۹ نشان داده‌شده است. اسکن نشان داد که فرکانس رزونانس غالب به تقریب در هارمونیک ٣٤–ام است. هنگامی‌که اجزای فرکانس تولیدشده توسط یک بار غیرخطی با فرکانس طبیعی سیستم مطابقت داشته باشند، اعوجاج بزرگ‌تر می‌شود. این دقیقاً همان چیزی است که در این مشکل رخ‌داده است. فرکانس‌های اینترهارمونیک تولیدشده توسط کوره‌های القایی بین هارمونیک ۲۵ و ٣٤ متغیر است، انتهای بالایی این محدوده با فرکانس طبیعی سیستم منطبق است؛ بنابراین ظهور اعوجاج ولتاژ در یک منطقه وسیع جای تعجب نداشت.

ازآنجایی‌که اعوجاج فرکانس بالا با زمان تغییر می‌کند و پاسخ فرکانس سیستم بر اعوجاج تأکید می‌کند، راه‌حل‌هایی که از فیلترهای شنت تک-تنظیم استفاده می‌کنند (حتی با چند مرحله) پاسخگو نیست. دو راه‌حل ممکن فیلتر وجود دارد:

۱. اصلاح پاسخ فرکانسی در باس ٤٦ کیلوولت به‌طوری‌که فرکانس طبیعی آن با فرکانس‌های بین هارمونیکی کوره القایی مطابقت نداشته باشد.
۲. قرار دادن فیلتر پهن باند در باس اصلی تأسیسات برای جلوگیری از ورود جریان‌های معوج به سیستم ٤٦ کیلوولت.

روش اول مستلزم انتخاب دقیق یک بانک خازن ٤٦ کیلوولتی است. پاسخ فرکانسی جدید نباید حاوی رزونانسی باشد که با هارمونیک تولیدشده توسط بارهای غیرخطی هماهنگ باشد. با شبیه‌سازی‌ها، تخمین زده شد که یک بانک خازن تقریباً ۳ مگا وار برای انتقال فرکانس طبیعی سیستم موجود از هارمونیک ۳۵ به هارمونیک ۸ موردنیاز است. هارمونیک هشتم انتخاب شد؛ زیرا بارهای غیرخطی شناخته‌شده‌ای وجود نداشت که جریان‌های هارمونیک این مرتبه را تولید کند. این راه‌حل قابل‌اجراست. بااین‌حال، نصب یک بانک خازن ۳ مگا وار در بیشتر مواقع باعث جبران بیش‌ازحد خواهد شد. افزون بر این، اگر فرکانس تنظیم مدنظر به دلیل قطع‌شدگی خط که سیستم را ضعیف می‌کند به زیر هارمونیک هشتم کاهش یابد، خطر ایجاد مشکل در هارمونیک پنجم و هفتم افزایش می‌یابد.

روش دوم نیازمند سازوکاری است که از ورود اینترهارمونیک‌های فرکانس بالا به سیستم ٤٦ کیلوولت جلوگیری کند. همان‌طور که در رویکرد اول توضیح داده شد، چندین مرحله از بانک‌های فیلتر شنت تک تنظیم‌شده به‌خوبی کار نمی‌کنند؛ زیرا اینترهارمونیک‌ها متفاوت هستند. فیلترهای اکتیو مشکل را حل می‌کند. بااین‌حال، آنها گران هستند. یک‌راه حل مقرون‌به‌صرفه تر، فیلتر پهن باند پایین گذر است مانند آنچه در فصل هفتم توضیح داده‌شده است. همچنین، کنترل بیشتری روی امپدانس اتصال کوتاه در محل فیلتر وجود دارد. راه‌حل در شکل ۸-۱۹ نشان داده‌شده است.

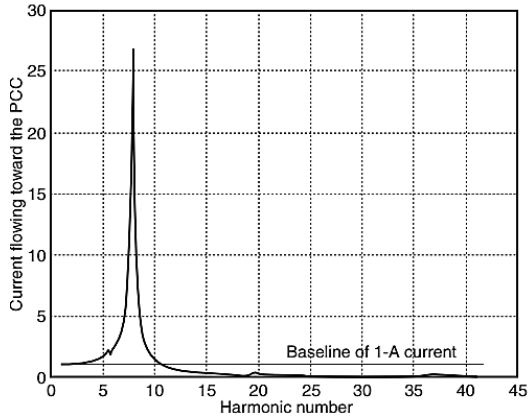


شکل ۸-۱۹ راه‌حل در قسمت ۱۲.٤۷ کیلوولت

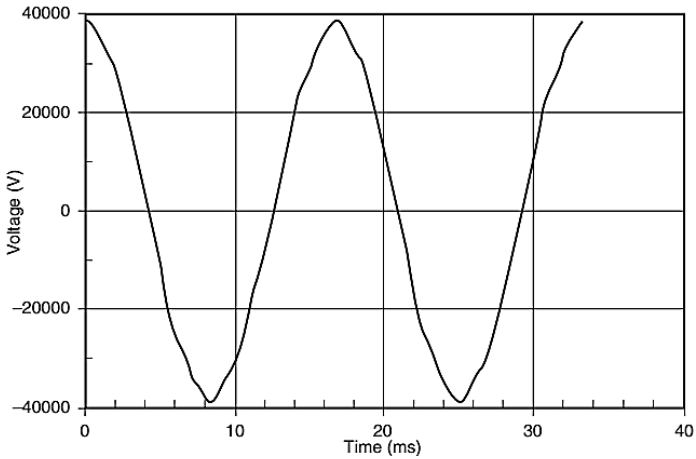
تضعیف کردن فرکانس‌های بالاتر از هارمونیک ۳۰ با این رویکرد آسان است. مشکل این است که اندازه خازنی پیدا کنیم که منجر به رزونانسی نشود که با فرکانس‌های هارمونیک دیگر تولیدشده توسط کوره‌ها، به‌ویژه، ۵، ۷، ۱۱ و ۱۳ هماهنگ باشد. هارمونیک هشتم دوباره به‌عنوان فرکانس تنظیم هدف انتخاب می‌شود. بهترین فرکانس بعدی ممکن است هارمونیک چهارم باشد. بااین‌حال، افزایش ولتاژ ناشی از اندازه بانک خازنی بزرگ‌تر نیاز به افزودن یک تنظیم‌کننده ولتاژ برای کاهش ولتاژ دارد. این راه‌حل را بسیار پرهزینه‌تر می‌کند.

با شبیه‌سازی مشخص شد که یک بانک ۱۲۰۰ کیلووار رایج با ولتاژ ۱۳/۲ کیلوولت راه‌حل خوبی ارائه می‌دهد. استفاده از خازن با مقدار بالاتر از نامی، تنظیم را کمی بالاتر می‌برد و بزرگ‌نمایی کمتری برای هارمونیک هفتم ایجاد می‌کند. شکل ۸-۲۰ جریان به سمت نقطه اتصال مشترک را برای یک آمپر نشان می‌دهد. جریان‌های بین هارمونیک با فرکانس بالای هارمونیک ۳۰-ام به‌شدت تضعیف‌شده و از راه یافتن به سیستم ٤٦ کیلوولت از طریق ترانسفورماتور جلوگیری می‌شود.

شکل ۸-۲۱ شکل موج ولتاژ حاصل را در نقطه اتصال مشترک نشان می‌دهد. باوجوداینکه مقداری اعوجاج جزئی باقی می‌ماند (بیشتر هارمونیک‌های پنجم و هفتم) بااین‌حال نتایج قابل‌قبول است؛ بنابراین، این مشکل را می‌توان به‌سادگی با استفاده از یک بانک خازنی به نسبت ارزان و معمولی حل کرد.



شکل ۸-۲۰ جریان به سمت *PCC* هنگامی‌که ۱ آمپر جریان در فرکانس‌های مختلف از باس ۱۲/٤۷ کیلوولت تزریق می‌شود



شکل ۸-۲۱ شکل موج ولتاژ در *PCC* پس از نصب یک بانک ۱۲۰۰ ***kvar*** با نرخ ۱۳/۲ کیلوولت در باس ۱۲/٤۷کیلوولت

فصل نهم

استانداردهای مرتبط با هارمونیک

امروزه سازمان‌های مختلفی در سطح بین‌الملل هماهنگ با مهندسان، تولیدکنندگان و مراکز تحقیقاتی در حال تعامل هستند تا بتوانند استانداردهایی برای دستورالعمل‌های حاکم و شیوه‌های توصیه‌شده و محدودیت‌های هارمونیکی، ایجاد کنند. هدف اولیه این استانداردها این است که دستورالعمل مشترکی برای تمام طرف‌های درگیر فراهم کنند تا با اطمینان خاطر شاهد سازگاری تجهیزات در قسمت مصرف‌کننده نهایی در سیستم باشیم. یک مثال برای سازگاری یا عدم سازگاری در تجهیزات مصرف‌کننده نهایی می‌توان به مشکل ساعت سریع (*fast clock*) اشاره کرد. تجهیز مصرف‌کننده نهایی یک ساعت برای تشخیص عبور از صفر موج ولتاژ است. هنگامی‌که سیستم دارای هارمونیک ولتاژ بین مرتبه ۳۰ تا ۳۵ ام است و عدم تطابق سازگاری که باعث اختلال در عملکرد تجهیز مصرف‌کننده نهایی می‌شود را نشان می‌دهد.

این بخش روی استانداردهای حاکم بر محدودیت‌های هارمونیکی که شامل: IEEE 519-1992 , IEC 61000-2-2 , IEC 61000-3-2 , IEC 61000-3-4 , IEC 61000-3-6 , NRS 048-2 , EN 50160 می‌باشند؛ تمرکز می‌کند.

۹-۱ استاندارد IEEE 519-1992

محدودیت‌های روی هارمونیک ولتاژ و جریان بر طبق استاندارد *IEEE 519-1992* همان‌طور که در بخش‌های قبل نیز آورده شده است، صورت می‌گیرد. فلسفه محتوای این استاندارد این است که تزریق هارمونیک هر مصرف‌کننده به شبکه را محدود کند تا یک اعوجاج ولتاژ بسیار شدید تحت

شرایط کار نرمال سیستم به وجود نیاید و همچنین اعوجاج ولتاژی که توسط شبکه ایجاد می‌شود، محدود گردد. محدودیت‌های اعوجاج ولتاژ و جریان برای بدترین حالت شرایط کار نرمال به مدت یک ساعت طراحی می‌گردد. برای دوره تناوب‌های کمتر برای مثال هنگام راه‌اندازی محدودیت‌ها ممکن است حتی از ۵۰٪ نیز بیشتر شود.

این استاندارد مسئولیت محدود کردن هارمونیک‌ها را بین مصرف‌کننده نهایی و شبکه تقسیم می‌کند. مصرف‌کننده نهایی مسئولیت محدود کردن تزریق جریان‌های هارمونیکی را بر عهده دارد، درحالی‌که شبکه مسئول محدود کردن اعوجاج ولتاژ در سیستم تأمین است.

محدودیت‌های هارمونیک ولتاژ و جریان به نقطه اتصال مشترک (PCC) اعمال می‌شود. این نقطه‌ای است که در آن مصرف‌کنندگان به یک شینه مشترک وصل شده‌اند یا در آینده مصرف‌کنندگان جدید به آن وصل می‌شوند. استاندارد در جست‌وجوی رویکردی عادلانه برای اختصاص دادن سهم هر مصرف‌کننده در محدود کردن هارمونیک‌ها است. استاندارد میزان محدودیت تزریق جریان را بر اساس اندازه بار و اندازه شبکه قدرت که توسط قدرت اتصال کوتاه تعریف می‌شود؛ تعیین می‌کند. ضریب اتصال کوتاه به این صورت که نسبت بیشترین جریان اتصال کوتاه به بیشترین جریان بار متقاضی در فرکانس پایه در نقطه اتصال مشترک (PCC) ، تعریف می‌شود.

اساس محدود کردن تزریقات هارمونیک هرکدام از مصرف‌کنندگان، جلوگیری از ایجاد اعوجاج‌های ولتاژ غیرقابل قبول است. برای همین

محدودیت‌های جریانی به‌گونه‌ای تعیین‌شده است تا کل تزریق هارمونیک هر مصرف‌کننده از میزان مجاز کل هارمونیک ولتاژ آورده شده در جدول ۹-۱ تجاوز نکند.

در جدول ۹-۱ محدودیت‌های جریانی برای ولتاژهای مختلف را نشان داده می‌شود. بارهای کوچک‌تر (معمولاً دارای نسبت اتصال کوتاه بیشتر) مجاز به داشتن درصد هارمونیک جریان بیشتر نسبت به بارهای بزرگ با نسبت اتصال کوتاه کوچک‌تر، هستند. بارهای بزرگ‌تر باید محدودیت‌های سخت‌گیرانه‌تری با توجه به اشغال سهم بیشتر از ظرفیت بار سیستم، داشته باشند. محدودیت‌های جریانی، تنوع هارمونیک‌ها و این مسأله که برخی از هارمونیک‌ها ممکن است یکدیگر را خنثی کنند و برخی باهم جمع شوند را نیز در نظر می‌گیرد.

محدودیت‌های جریان هارمونیک در نقطه اتصال مشترک برای محدود کردن ولتاژ *THD* به میزان گفته‌شده در جدول ۹-۱ است. ازآنجایی‌که اعوجاج ولتاژ وابسته به امپدانس سیستم است، کلید کنترل اعوجاج ولتاژ از طریق کنترل امپدانس سیستم است. دو شرایط اصلی که باعث بالا رفتن امپدانس می‌شود، یکی ضعیف بودن سیستم برای تأمین بار و دیگری پدیده رزونانس است که دومین حالت محتمل‌تر است؛ بنابراین پائین نگه‌داشتن اعوجاج ولتاژ معمولاً به معنی دورنگه داشتن سیستم از رزونانس است. گاهی اوقات لازم به‌اضافه کردن ترانس‌ها یا خطوط جدید برای بالا بردن قدرت سیستم است.

استاندارد *IEEE 519-1992* مجموعه‌ای از قواعد و راهنمایی‌هایی برای مصرف‌کننده است تا تأثیرات هارمونیک هایی را که توسط بار غیرخطی ایجاد می‌شود؛را بتوان کنترل کرد.

جدول ۹-۱ اساس محدودیت‌های هارمونیک جریان

Short-circuit ratio at PCC	Maximum individual frequency voltage harmonic (%)	Related assumption
10	2.5–3.0	Dedicated system
20	2.0–2.5	1–2 large customers
50	1.0–1.5	A few relatively large customers
100	0.5–1.0	5–20 medium-size customers
1000	0.05–0.10	Many small customers

۹-۲ بررسی اجمالی استاندارد هارمونیک IEC [1]

در حال حاضر در ژنو سوئیس مستقر است و دارای یک‌سری دسته‌بندی برای سازگاری الکترومغناطیسی *EMC* [2] و استانداردهایی را که مرتبط با بحث کیفیت توان است؛ در خود دارد. منظور از کلمه سازگاری الکترومغناطیسی مربوط به نگرانی‌های حاصل از اختلالات القایی و رسانایی تجهیزات مصرف‌کننده نهایی است.

استاندارد *IEC* به شش بخش تقسیم می‌شود :

بخش اول عمومی: این استانداردها با ملاحظات عمومی مانند مقدمه، اصول بنیادی و پایه، تعاریف و اصطلاحات سروکار دارند. آنها همچنین

[1] International Electrotechnical Commission
[2] ElectroMagnetic Compatibility

کاربرد و تفسیر مفاهیم اولیه را در خود دارند. شماره اختصاص‌یافته به‌صورت *IEC 61000-1-X* مشخص می‌شود.

بخش دوم محیط: این استانداردها مشخصه محیطی که تجهیزات می‌توانند نصب شوند و طبقه‌بندی تمامی محیط‌ها و درجه سازگاری آنها را شامل می‌شود و به‌صورت *IEC 61000-2-X* مشخص می‌شود.

بخش سوم محدودیت‌ها: این استانداردها سطوح مجاز انتشاری که توسط تجهیزات قرارگرفته در محیط ایجاد می‌شوند. آنها محدودیت‌های عددی و همچنین محدودیت‌های مجاز برای این انتشارات را تعیین می‌کند و به‌صورت *IEC 61000-3-X* مشخص می‌شود.

بخش چهارم تست و اندازه‌گیری: این بخش استاندارد دستورالعمل‌هایی برای تست تجهیزات و روش‌های اندازه‌گیری را عنوان می‌کند تا بتوان با بقیه دستورالعمل‌ها اعداد به‌دست‌آمده را تطبیق داد و به‌صورت *IEC 61000-4-X* مشخص می‌شود.

بخش پنجم دستورالعمل‌های نصب و راه‌اندازی: این بخش از استانداردها شامل دستورالعمل‌هایی در مورد نصب تجهیزاتی مانند زمین کردن و کابل‌کشی سیستم است تا درنتیجه سازگاری الکترومغناطیسی بین دستگاه‌های الکترونیکی و الکتریکی برقرار باشد؛ همچنین آن‌ها مفاهیم محافظت تأسیسات عمرانی در مقابل پالس‌های الکترومغناطیسی با دامنه

زیاد *HEMP* [1] که براثر انفجار اتمی ایجاد می‌شود؛ بررسی کرده‌اند که به این‌صورت *IEC 61000-5-X* مشخص می‌شوند.

بخش ششم متفرقه: این استانداردها عمومی هستند که تعاریف سطوح ایمن و منتشره لازم برای تجهیزات در آن آورده شده است و به‌صورت *IEC 61000-6-X* مشخص می‌شوند.

استانداردهای *IEC* مرتبط با هارمونیک‌ها معمولاً در بخش‌های ۲ و ۳ واقع‌شده‌اند. برعکس استانداردهای *IEEE* راجع به هارمونیک‌ها که در یک نشریه به‌تمامی مسائل هارمونیک‌ها پرداخته است. در استانداردهای *IEC* در چند نشریه به هارمونیک‌ها پرداخته‌شده است. در این استاندارد به محدودیت‌های شرایط محیطی پرداخته‌شده؛ حتی آنها بر اساس اندازه ولتاژ و جریان نیز تقسیم‌بندی شده‌اند. استانداردهای کلیدی *IEC* عبارت‌اند از:

- *IEC 61000-2-2 (1993)*: سازگاری الکترومغناطیسی (*EMC*) بخش ۲ محیط قسمت ۲: درجه سازگاری برای اغتشاشات فرکانس پائین و ارسال سیگنال در سیستم‌های قدرت فشار ضعیف.
- *IEC 61000-3-2 (2000)*: سازگاری الکترومغناطیسی (*EMC*) بخش ۳ محدودیت قسمت ۲: انتشار جریان هارمونیک (در ورودی تجهیز تا ۱۶ آمپر در هر فاز)

[1] High Electromagnetic Pulse

- *IEC 61000-3-4 (1998)*: سازگاری الکترومغناطیسی (*EMC*) بخش ۳ محدودیت قسمت ٤: محدودیت انتشار جریان‌های هارمونیکی در سیستم‌های قدرت فشار ضعیف برای تجهیزات با جریان نامی بالای ١٦ آمپر
- *IEC 61000-3-6 (1996)*: سازگاری الکترومغناطیسی (*EMC*) بخش ۳ محدودیت قسمت ٦: ارزیابی حدود انتشار بارهای اعوجاج دار در سیستم‌های قدرت *MV* و *HV*

پیش از سال ۱۹۹۷ م. این استانداردها توسط سری اعداد ۱۰۰۰ شناخته می‌شوند و به‌عنوان‌مثال *IEC 61000-2-2* به‌عنوان *IEC 1000-2-2* شناخته می‌شود. این استانداردهای هارمونیک توسط انجمن‌های اروپایی به تصویب رسیده بودند برای همین آنها را با عنوان *EN6100* نیز می‌شناسند. برای مثال *IEC 61000-3-2* را به‌عنوان *EN 61000-3-2* نیز می‌شناسند.

۹-۳ IEC 61000-2-2

این استاندارد سطوح سازگاری اختلالات فرکانس پائین و ارسال سیگنال در منابع ولتاژ پائین مثل ٥٠-٦٠ هرتز در سیستم‌های تک یا سه فاز با ولتاژ نامی ٢٤٠ تا ٤١٥ ولت را تعریف می‌کند. سطوح سازگاری به‌صورت تجربی به‌گونه‌ای تعریف‌شده‌اند تا تعداد شکایات مربوط به عدم کارکرد صحیح به سطح قابل‌قبول برسد. این سطوح خیلی سخت‌گیرانه نیستند و می‌توانند در شرایط خاص اندکی بیشتر شوند. سطوح قابل‌قبول ولتاژهای هارمونیک در شبکه فشار ضعیف در جدول ۹-۲ آورده شده است آنها به‌صورت درصدی از ولتاژ پایه بیان‌شده‌اند.

جدول ۹-۲ سطوح سازگاری برای هر هارمونیک ولتاژ در شبکه فشار ضعیف با توجه به استاندارد *IEC 61000-2-2*

Not multiple of 3		Multiple of 3			
Odd order h	Harmonic voltage (%)	Odd order h	Harmonic voltage (%)	Even order h	Harmonic voltage (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.3	6	0.5
13	3	21	0.2	8	0.5
17	2	>21	0.2	10	0.2
19	1.5			12	0.2
23	1.5			>12	0.2
25	1.5				
>25	$0.2 + 1.3 \times 25/h$				

۹-٤ IEC 61000-3-4 و IEC 61000-3-2

هردو محدودیت‌های جریان هارمونیک به ازای ۱۶ آمپر در هر فاز و بیشتر از آن را بیان می‌کنند. این استانداردها محدودیت‌های جریانی را به‌گونه‌ای که حدود ولتاژ شبکه فشار ضعیف را که در استاندارد *IEC 61000-2-2* آمده است؛ تعریف می‌کند.

استاندارد *IEC 61000-3-2* از استاندارد *IEC 555-2 (EN60555-2)* حاصل‌شده است.

این استاندارد، تجهیزات را به چهار دسته (کلاس) تقسیم می‌شود.

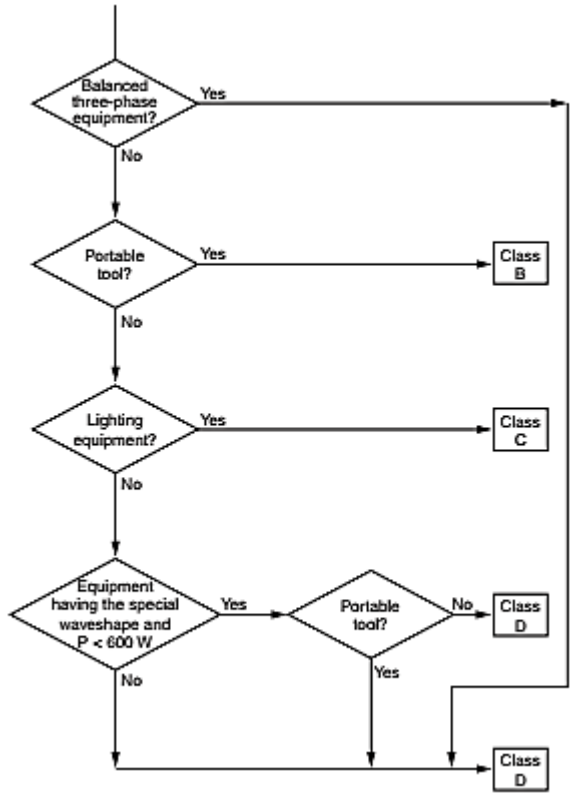
کلاس *A*: تجهیزات سه فاز متعادل و تجهیزاتی که در کلاس *B,C,D* نباشند.

کلاس *B*: تجهیزات قابل‌حمل

کلاس *C*: تجهیزات روشنایی به همراه دستگاه‌های دیمر

کلاس *D*: تجهیزاتی که دارای جریان ورودی با شکل موج خاص هستند و دارای توان کمتر از ٦٠٠ وات می‌باشند.

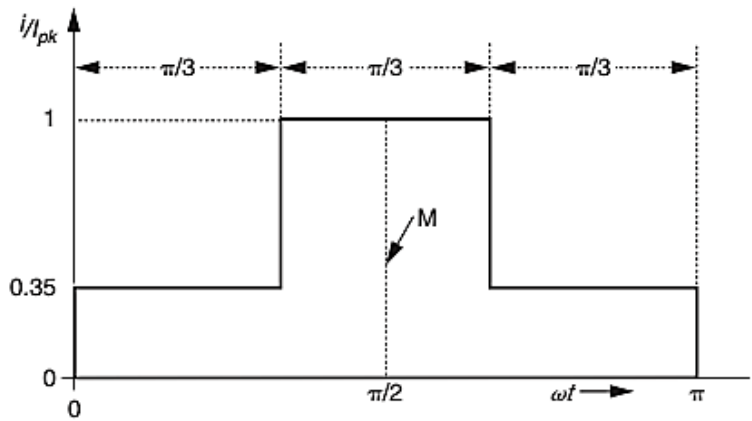
از شکل ۹-۱ می‌توان برای دسته‌بندی تجهیزات *IEC61000-3-2* استفاده کرد؛ باید در نظر گرفته شود تجهیزات کلاس *B* و *C* به‌طور موقت تجهیزات موتور محور در کلاس *D* جدا از شکل موج ورودی آنها قرار نمی‌گیرند. شکل نیم موج تجهیزات کلاس *D* باید در محدوده T مانند نشان داده‌شده در شکل ۹-۲ در حداقل ۹۵٪ مواقع باشد. خط مرکزی در $\pi/2$ با جریان بیشینه ورودی یکسان می‌شود.



شکل ۹-۱ فلوچارت برای طبقه‌بندی تجهیزات با توجه به *IEC 61000-3-2*

بیشترین جریان هارمونیکی مجاز برای کلاس‌های A,B,C,D به‌صورت آمپراژ واقعی اندازه‌گیری شده در جریان ورودی تجهیز است. محدودیت‌های جریان در جدول (۹-۳ تا ۹-۶) نشان داده‌شده است و محدودیت‌های تجهیزات کلاس D به‌صورت اعداد مطلق و مقادیر نسبی با توان اکتیو است. این محدودیت‌ها فقط در مورد تجهیزاتی که دارای توان زیر ۶۰۰ وات هستند صدق می‌کنند.

در IEC 61000-3-4 محدودیت برای دستگاه‌هایی که جریان ۱۶ تا ۷۵ آمپر می‌کشند؛ آورده شده است. این‌گونه تجهیزات نیاز به موافقت اداره برق برای استفاده ندارند. محدودیت‌های جریان هارمونیکی این استاندارد در جدول ۹-۶ آمده است.



شکل ۹-۲ جریان ورودی برای شکل موج خاص تجهیزات کلاس *D*

جدول ۹-۳ محدودیت هارمونیک جریان تجهیزات کلاس *A*

Odd order *h*	Max. permissible harmonic current order (A)	Even order *h*	Max. permissible harmonic order (A)
3	2.3	2	1.08
5	1.14	4	0.43
7	0.77	6	0.3
9	0.4	8–40	$0.23 \times 8/h$
11	0.33		
13	0.21		
15–39	$0.15 \times 15/h$		

جدول ۹-٤ محدودیت‌های جریان هارمونیک برای تجهیزات کلاس *C*

Harmonic order *h*	Max. permissible harmonic current* (%)
2	2
3	30 × circuit power factor
5	10
7	7
9	5
11–39	3

جدول ۹-۵ محدودیت‌های جریان هارمونیک برای تجهیزات کلاس *D*

	Max. permissible harmonic current	
Harmonic order *h*	Per watt (mA/W)	(A)
2	3.4	2.3
5	1.9	1.14
7	1.0	0.77
9	0.50	0.40
13	0.35	0.33

جدول ۹-٦ محدودیت هارمونیک جریان با توجه به *IEC 61000-3-4*

Harmonic order h	Max. permissible harmonic current* (%)	Harmonic order h	Max. permissible harmonic current* (%)
3	21.6	19	1.1
5	10.7	21	0.6
7	7.2	23	0.9
9	3.8	25	0.8
11	3.1	27	0.6
13	2	29	0.7
15	0.7	31	0.7
17	1.2	33	0.6

IEC 61000-3-6 ۵-۹

این استاندارد محدودیت‌های جریان‌های هارمونیک وصل شده به شبکه فشار متوسط (*MV*) و شبکه فشارقوی را عنوان می‌کند. به ولتاژ بین ۱ تا ۳۵ کیلوولت، فشار متوسط و به ولتاژ بین ۳۵ تا ۲۳۰ کیلوولت فشارقوی میگویند. همچنین به ولتاژ زیر ۱ کیلوولت فشار ضعیف (*LV*) و به ولتاژ بالای ۲۳۰ کیلوولت فشار نهایت بالا (*EHV*)[1] میگویند.

در این استاندارد محدودیت‌های هر دستگاه متصل به شبکه *MV* و *HV* باید بر اساس اعواج ولتاژ صورت گیرد. این موضوع برای این است که جریان تزریق‌شده توسط تجهیزات باعث بالاتر رفتن سطوح اعوجاج ولتاژ از محدوده مجاز نشود. استاندارد سطوح سازگاری ولتاژ هارمونیک در *LV* و *MV* را در جدول ۹-۷ آورده است.

[1] Extra High Voltage

جدول ۹-۷ سطوح سازگاری ولتاژهای هارمونیک به نسبت ولتاژ پایه برای سیستم‌های *LV* و *MV*

Odd harmonics					
Not multiple of 3		Multiple of 3		Even harmonics	
Order h	Harmonic voltage (%)	Order h	Harmonic voltage (%)	Order h	Harmonic voltage (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.3	6	0.5
13	3	21	0.2	8	0.5
17	2	>21	0.2	10	0.5
19	1.5			12	0.2
23	1.5			>12	0.2
25	1.5				
>25	$0.2 + 1.3 \times 25/h$				

سطوح طراحی، مرجع اصلی ما برای طراحی و توسط اداره برق تعیین‌شده است. برای همین این سطوح معمولاً کمتر از سطوح سازگاری هستند. سطوح طراحی برای ولتاژ هارمونیک به‌صورت درصدی از ولتاژ پایه برای سیستم‌های *MV,HV,EHV* در جدول های (۹-۸ و ۹-۹) نشان داده‌شده است.

جدول ۹–۸ سطوح طراحی برحسب درصد ولتاژ هارمونیک به ولتاژ پایه در سیستم‌های *MV*

Odd harmonics					
Not multiple of 3		Multiple of 3		Even harmonics	
Order h	Harmonic voltage (%)	Order h	Harmonic voltage (%)	Order h	Harmonic voltage (%)
5	5	3	4	2	1.6
7	4	9	1.2	4	1
11	3	15	0.3	6	0.5
13	2.5	21	0.2	8	0.4
17	1.6	>21	0.2	10	0.4
19	1.2			12	0.2
23	1.2			>12	0.2
25	1.2				
>25	$0.2 + 0.5 \times 25/h$				

جدول ۹–۹ سطوح طراحی برحسب درصد ولتاژ هارمونیک به ولتاژ پایه در سیستم‌های *HV* و *EHV*

Odd harmonics					
Not multiple of 3		Multiple of 3		Even harmonics	
Order h	Harmonic voltage (%)	Order h	Harmonic voltage (%)	Order h	Harmonic voltage (%)
5	2	3	2	2	1.6
7	2	9	1	4	1
11	1.5	15	0.3	6	0.5
13	1.5	21	0.2	8	0.4
17	1	>21	0.2	10	0.4
19	1			12	0.2
23	0.7			>12	0.2
25	0.7				
>25	$0.2 + 0.5 \times 25/h$				

استاندارد *IEC 61000-3-6* دارای دستورالعمل‌هایی برای موردسنجش قرار دادن تجهیزات، به‌منظور بررسی موردقبول بودن آنها در اتصال به سیستم‌های *MV* و *HV* است. سه مرحله سنجش عبارت‌اند از:

مرحله اول: سنجش ساده اختلالات منتشرشده.

مرحله دوم: محدودیت‌های منتشره به نسبت مشخصه‌های شبکه.

مرحله سوم: پذیرش سطوح بالاتر در شرایط خاص پرمخاطره.

در مرحله اول تجهیز می‌تواند به سیستم‌های *MV* و *HV* بدون نیاز به مطالعات هارمونیکی تا زمانی که اندازه آن در برابر ظرفیت اتصال کوتاه سیستم کوچک باشد، وصل شود. برای وسایل خانگی کوچک، تولیدکنندگان مسئول محدود کردن جریان‌های هارمونیکی خود هستند.

اگر تجهیز معیارهای مرحله اول را داشته باشد مشخصات هارمونیکی تجهیز به همراه ظرفیت جذب سیستم به‌دقت موردسنجش قرار می‌گیرد. اگر ظرفیت جذب سیستم به‌صورت کامل به تجهیزات اختصاص داده‌شده باشد و تجهیزات به‌اندازه محدودیت تعریف‌شده، هارمونیک تولید کنند اعوجاج ولتاژ سیستم در محدوده سطوح طراحی می‌ماند.

اگر تجهیز معیارهای مرحله دوم را نداشته باشد، ممکن است اجازه وصل شبکه را پیدا کند درصورتی‌که مصرف‌کننده نهایی متعهد شود تعبیراتی را در سیستم خود در نظر بگیرد.

۹-۶ NRS 048-02

استاندارد کیفیت تولید *NRS 048-02* مربوط به آفریقای جنوبی است که به کیفیت تولید برق می‌پردازد و از ۱ جولای ۱۹۹۷ م. به اجرا درآمده است. این استاندارد تولیدکنندگان برق را مجاب به اندازه‌گیری و گزارش کیفیت توان تولیدی و رگولاسیون شبکه ملی برق کرده است.

NRS 048-02 به پنج قسمت تقسیم‌شده است و یکی از کامل‌ترین استانداردهای مربوط به کیفیت تولید توان است که حداقل کیفیت استاندارد QOS [1] پوشش می‌دهد.اندازه‌گیری و گزارش QOS، دستورالعمل‌های نصب و اجرای تجهیزات ابزار دقیق برای ضبط و مانیتور کردن کیفیت ولتاژ به‌منظور بهبود QOS.

قسمت دوم *NRS 048* حداقل استانداردهای کیفیت توان رسیده به مصرف‌کننده نهایی را تعیین می‌کند. این حداقل استانداردها شامل محدودیت‌های هارمونیک ولتاژ، اینترهارمونیک، فلیکر ولتاژ، عدم تعادل ولتاژ و رگولاسیون ولتاژ و فرکانس است.

NRS 048-02 از محدودیت‌های استاندارد *IEC 61000-2-2* که و استانداردهای سیستم *LV* و *MV* استفاده می‌کند. در سیستم‌های آفریقای جنوبی ولتاژ نامی سیستم‌های *LV* زیر ۱ کیلوولت است؛ درحالی‌که ولتاژ سیستم‌های *MV* بین ۱ تا ٤٤ کیلوولت است.

[1] Quality Of Supply

NRS 048 محدودیت هارمونیک ولتاژ برای سیستم‌های *HV* تعیین نکرده‌اند اگرچه از استاندارد *IEC 61000-3-6* برای محدودیت ولتاژ هارمونیک سیستم‌های *HV* و *EHV* که در جدول ۹-۹ آمده است، به‌عنوان محدودیت طراحی برای سیستم‌های *HV* در نظر گرفته می‌شود. (ولتاژ نامی بین ۲۰۰ تا ٤۰۰ کیلوولت است.)

EN 50160 ۷- ۹

EN 50160 یک استاندارد اروپایی برای کیفیت توان تولیدی است. در این استاندارد سطوح خاصی از مشخصه ولتاژ تعریف‌شده است تا بتواند میزان انطباق تولیدکننده و مصرف‌کننده سنجش شود. *EN 50160* توسط کمیته استاندارد گذاری الکتروتکنیکال در ۱۹۹٤ مورد تأیید قرار گرفت.

EN 50160 مشخصه ولتاژ در ترمینال‌های مصرف یا به‌طورکلی سیستم‌های توزیع *LV* و *MV* تحت شرایط کار نرمال مشخص می‌کند. به‌عبارت‌دیگر *EN 50160* خودش را به مشخصه ولتاژ در نقطه اتصال مشترک محدود می‌کند و مشخص نمی‌کند ملزومات کیفیت توان در سیستم تولید است.

در این استاندارد محدوده ولتاژ هارمونیک به‌صورت درصدی از ولتاژ پایه است؛ همچنین برای هم *LV* و *MV* صدق می‌کند. از ۲۳۰ ولت تا ۳۵ کیلوولت محدوده اعوجاج کل هارمونیک منبع در جدول ۱۰-۹ نشان داده‌شده است اعوجاج کل ولتاژ منبع تا مرتبه ٤۰ ام نباید از ۸ درصد بیشتر شود.

جدول ۹-۱۰ محدودیت‌های ولتاژ در ترمینال‌های تولید

Odd harmonics					
Not multiple of 3		Multiple of 3		Even harmonics	
Order h	Harmonic voltage (%)	Order h	Harmonic voltage (%)	Order h	Harmonic voltage (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.3	6–24	0.5
13	3	21	0.2		
17	2				
19	1.5				
23	1.5				
25	1.5				

هارمونیک‌های مرتبه‌های بالاتر مشخص نشده‌اند، ازآنجایی‌که آنها بسیار مقادیر کوچکی دارند. در نظر باید داشت محدودیت‌های *EN 50160* تقریباً همانند سطوح سازگاری *IEC 61000-3-6* در سیستم‌های *LV* و *MV* است؛ به‌جز نبود محدودیت روی هارمونیک‌های مرتبه بالا در EN 50160 .

منابع

1- Das, J. C. **Power system harmonics and passive filter designs**. John Wiley & Sons, 2015.

2- Dugan, R. C., Mark F. McGranaghan, and H. W. Beaty. **Electrical power systems quality**. New York: McGraw-Hill, 1996.

3- Kusko, Alexander, and Marc T. Thompson. **Power quality in electrical systems**. Vol. 23. New York: McGraw-Hill, 2007.

4- Wakileh, George J. **Power systems harmonics: fundamentals, analysis and filter design**. Springer Nature, 2019.