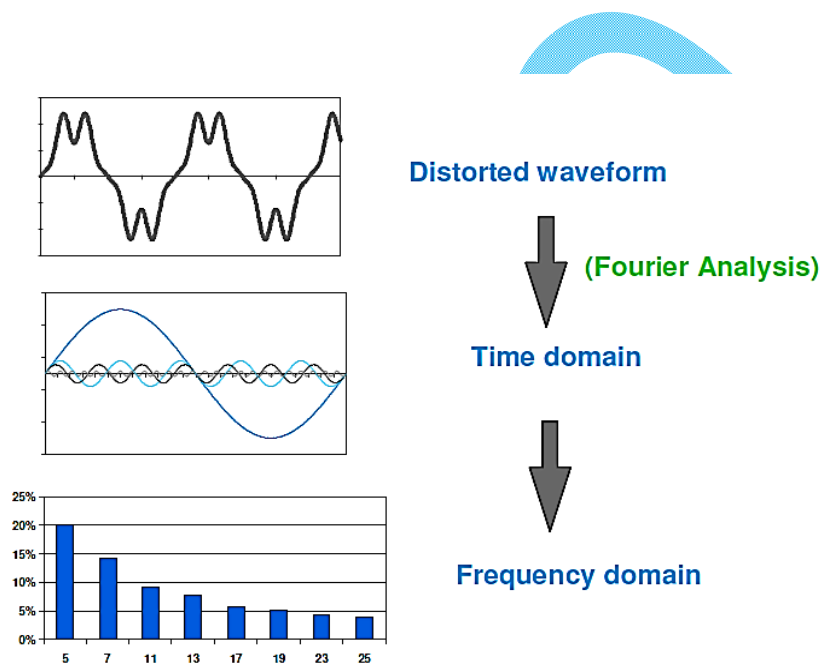


تهیه کننده: واحد تحقیق و توسعه و آموزش سیمکو

هارمونیک چیست؟

هارمونیک‌ها ضرایب صحیحی از فرکانس اصلی امواج الکتریکی متناوب هستند، که به دسته‌های هارمونیک فرد، هارمونیک زوج و هارمونیک مضرب سوم تقسیم‌بندی می‌شوند. به عنوان مثال شکل ۱، شکل موجی را که شامل هارمونیک‌های مختلفی است، نشان می‌دهد. با تحلیل فوریه، می‌توان هارمونیک‌های موجود در شکل موج را، نشان داد. مجموع هارمونیک‌های موجود در سیستم را THD (Total Harmonic Distortion) می‌نامند.



شکل ۱- طیف هارمونیکی شکل موج

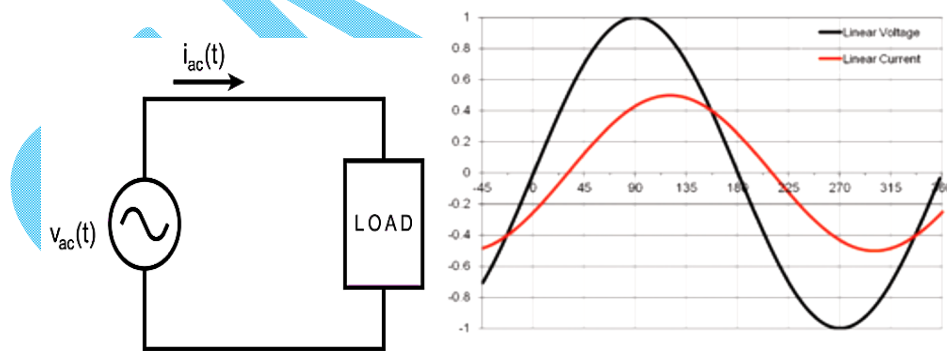
با توجه به نوع بار، مفهوم ضریب قدرت (Power Factor (PF)) در سیستم‌های انتقال، اهمیت می‌یابد. با توجه به رابطه‌ی میان THD و ضریب قدرت سیستم‌ها، ضریب قدرت بالاتر به معنای کم بودن مقدار THD، پیک‌های کمتر جریان و راندمان بالاتر می‌باشد. THD یکی از ویژگی‌های مهم سیستم‌های قدرت بوده و انواع استانداردهای بین‌المللی در کلاس‌های مختلفی مقدار مجاز آن را تعیین می‌کنند.

با توجه به رابطه‌ی (۱)، ضریب قدرت علاوه بر رابطه‌ای که با فاز ولتاژ و فاز جریان دارد، به صورت زیر نیز با THD در ارتباط است. همچنین مقدار کسینوس اختلاف فاز ولتاژ و جریان نیز برابر با نسبت میزان توان متوسط به کل توان است. توان کل برابر با مجموع توان متوسط و توان ظاهری سیستم است. به طور کلی بالا بودن مقدار THD منجر به کاهش ضریب توان خواهد شد.

$$PF = \cos(\theta_v - \theta_i) \times \sqrt{\frac{1}{1+THD^2}} = \frac{P_{avg}}{V_{rms} I_{rms}} \times \sqrt{\frac{1}{1+THD^2}} \quad (1)$$

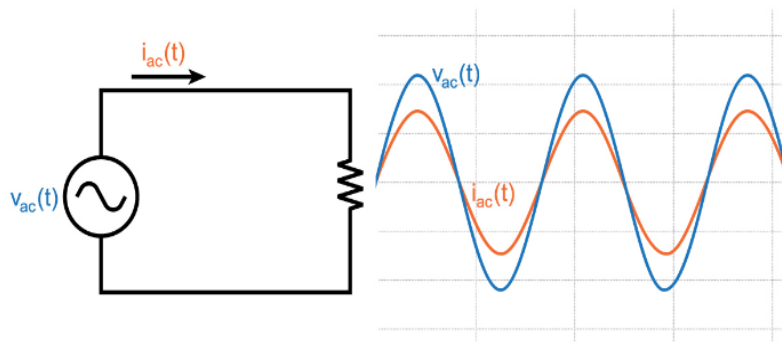
که در آن θ_v ، فاز ولتاژ و θ_i ، فاز جریان می‌باشد. P_{avg} توان متوسط، V_{rms} و I_{rms} نیز به ترتیب ولتاژ و جریان موثر می‌باشند.

زمانی که بار خطی به سیستم‌های توان الکتریکی متصل گردد، شکل موج جریان هم‌فاز با شکل موج ولتاژ خواهد بود. به طور مثال شکل موج ولتاژ و جریان یک بار خطی به صورت شکل ۲ می‌باشد. بار خطی مذکور، می‌تواند مقاومتی، سلفی، خازنی و یا ترکیبی از آن‌ها باشد.



شکل ۲- شکل موج ولتاژ و جریان یک بار خطی

در صورت مقاومتی بودن بار، به دلیل صفر بودن توان ظاهری سیستم، اختلاف فاز میان ولتاژ و جریان صفر بوده بنابراین کسینوس آن‌ها، برابر یک می‌شود. بنابراین کسینوس اختلاف زاویه، مقدار ماکزیمم خود را خواهد داشت. در نتیجه طبق رابطه‌ی ۱، با فرض ایده‌آل بودن سیستم، با ضریب قدرت یک، مقدار THD برابر با صفر خواهد بود. عملاً چنین سیستمی در دنیای واقعی وجود ندارد زیرا تمامی مصرف‌کننده‌ها دارای بار خازنی و یا سلفی می‌باشند. شکل ۳ شکل موج ولتاژ و جریان یک بار خطی مقاومتی را نشان می‌دهد.

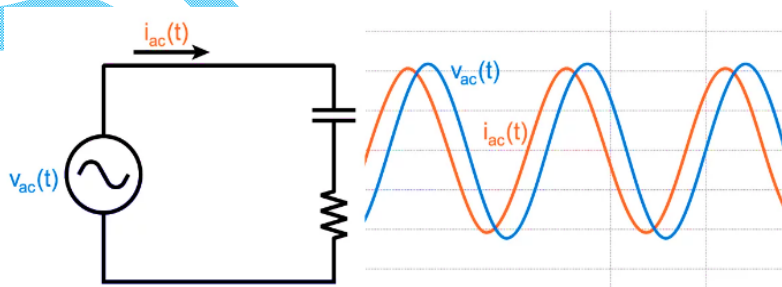


شکل ۳- شکل موج ولتاژ و جریان مداری با بار مقاومتی

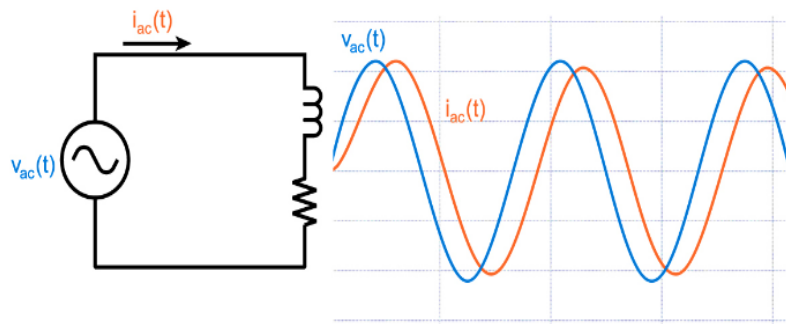
شکل ۴ و شکل ۵، نشان دهنده‌ی شکل موج‌های ولتاژ و جریان سیستم‌های خازنی و سلفی است. به دلیل وجود خازن و سلف اختلاف فازی میان ولتاژ و جریان وجود خواهد داشت که منجر به کاهش ضریب توان سیستم خواهد شد. در این حالت باید مقدار THD جریان را طبق رابطه‌ی (۲) محاسبه نموده تا ضریب توان مشخص گردد.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \quad (2)$$

THD مجموع هارمونیک‌های موجود در شکل موج، I_1 دامنه‌ی مولفه اصلی شکل موج جریان و I_h دامنه‌ی هر یک از هارمونیک‌های جریان می‌باشد.

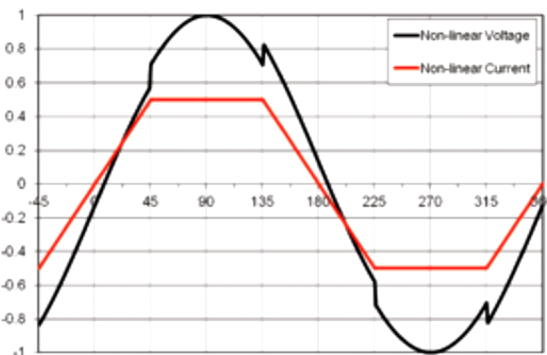


شکل ۴- شکل موج ولتاژ و جریان مداری با بار مقاومتی- خازنی



شکل ۵- شکل موج ولتاژ و جریان مداری با بار مقاومتی - سلفی

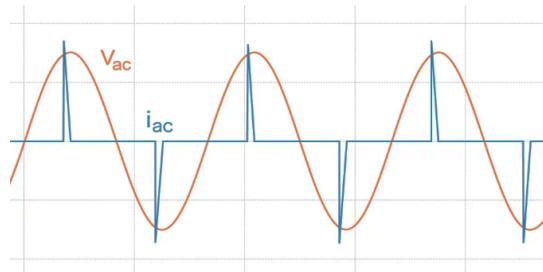
دسته‌ی دیگری از سیستم‌ها دارای بار غیر خطی هستند، در واقع مقدار امپدانس وابسته به تغییرات ولتاژ است. در این حالت، شکل موج جریان، غیرخطی و غیر سینوسی می‌باشد، که در شکل ۶ نشان داده شده است. در سیستم‌های غیرخطی، شکل موج جریان شامل هارمونیک‌های جریان است که بر اثر تغییرات بار ناشی از اعوجاج‌های ولتاژ، به وجود آمده است.



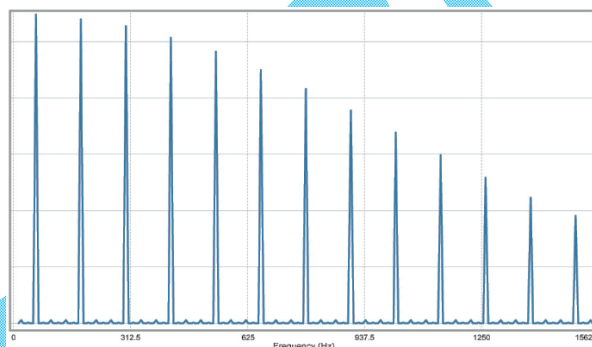
شکل ۶- شکل موج ولتاژ و جریان یک بار خطی

در چنین سیستم‌هایی با توجه به بالا بودن مقدار THD، مقدار ضریب قدرت سیستم کاهش می‌یابد. برای مشاهده‌ی دامنه‌ی هریک از هارمونیک‌های موجود، از تحلیل FFT (Fast Fourier Transform) استفاده می‌شود. این تحلیل توسط نرم‌افزارهای شبیه‌سازی و یا توسط اسیلوسکوپ‌های دیجیتالی انجام می‌گیرد. شکل ۷ نمونه‌ای از شکل موج ولتاژ و جریان یک سیستم با بار غیر خطی را نشان می‌دهد. در این شکل، جریان دارای شکل موجی غیر سینوسی است که دارای هارمونیک‌های زیادی می‌باشد. با تحلیل FFT بر

روی جریان مذکور، مقدار دامنه‌ی هارمونیک‌های مختلف آن قابل مشاهده خواهد بود که در شکل ۸ نشان داده شده است.



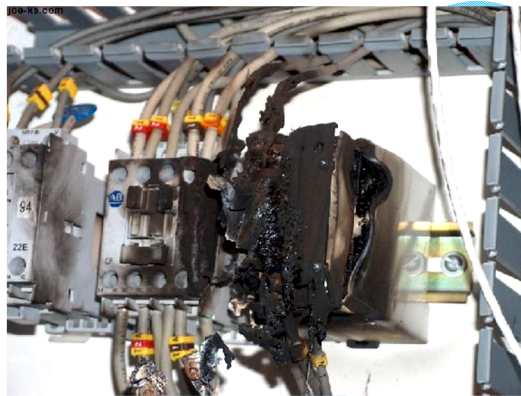
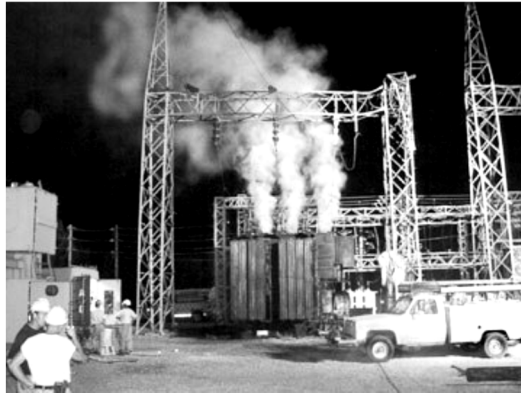
شکل ۷- شکل موج ولتاژ و جریان یک سیستم با بار غیرخطی



شکل ۸- نتیجه تحلیل FFT جریان شکل ۷

بررسی اثر هارمونیک‌ها بر سیستم‌ها

وجود هارمونیک در سیستم باعث ایجاد تلفات اهمی بیشتر در سیم‌ها و کابل‌ها می‌شود. همچنین افزایش دمای ترانسفورماتورها را در پی خواهد داشت. جریان‌های هارمونیکی عبورکننده از امپدانس سیستم، باعث ایجاد افت ولتاژ برای هر هارمونیک شده، در نتیجه ولتاژ هارمونیکی در دو سر بار ایجاد می‌شود، بنابراین باعث اعمال استرس ولتاژ اضافی بر روی المان‌های سیستم از جمله کابل‌ها می‌شود. جریان هارمونیک بیش از حد ممکن است منجر به گرمای بیش از حد یا حتی سوزاندن اجزای شبکه شود که نمونه‌هایی از آن، در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۹- آسیب دیدگی اجزای شبکه بر اثر هارمونیک‌های جریانی و ولتاژی

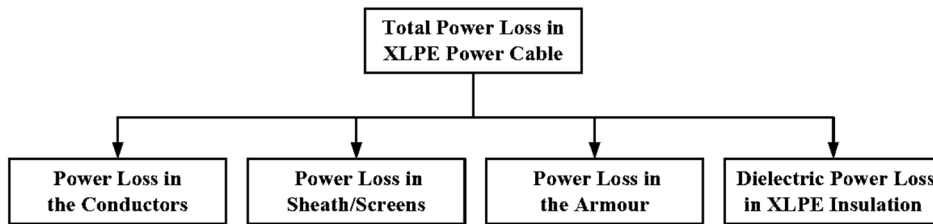
از طرفی خازن‌ها به دلیل امپدانس پایینی که دارند، نسبت به هارمونیک‌های مراتب بالا بسیار حساس می‌باشند و در صورتی که در برابر هارمونیک‌ها حفاظت نشوند، آسیب دیده و از بین خواهند رفت. آسیب دیدگی خازن‌ها که نتیجه‌ی شکست عایقی آن‌هاست، باعث افزایش جریان و توان ظاهری آن‌ها می‌شود، در نتیجه راندمان سیستم کاهش خواهد یافت. شکل ۱۰ نمونه‌ای از خازن‌های آسیب دیده را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰- آسیب دیدگی خازن‌ها بر اثر هارمونیک‌های مراتب بالا

اثر هارمونیک‌ها بر کابل:

با توجه به ساختار کابل، که یک خازن طولی است، همچنین توجه به این که تمامی بارهای موجود خاصیت سلفی - خازنی دارند، اختلاف فازی میان ولتاژ و جریان سیستم انتقال پدید خواهد آمد. بنابراین با توجه به رابطه (۱)، با کاهش ضریب قدرت، مقدار THD سیستم افزایش خواهد داشت. با وجود دامنه‌های بالای هارمونیک‌ها در سیستم به دلیل افزایش جریان‌های ناشی، دمای کابل افزایش خواهد یافت و در نتیجه باعث افزایش میزان تلفات در خطوط انتقال و کاهش بارگذاری آن‌ها می‌شود. همچنین هارمونیک‌های ولتاژی ایجاد شده، باعث افزایش دمای کابل‌ها شده و می‌تواند باعث شکست عایقی آن‌ها شود. توان ورودی صرف توان‌های ظاهری سیستم شده که بین خازن و سلف موجود، رد و بدل می‌شوند، بنابراین باعث کاهش مقدار راندمان سیستم نیز خواهد شد. به طور کلی می‌توان تلفات موجود در کابل‌های دارای عایق XLPE را در شکل ۱۱ مشاهده نمود. در کابل‌ها و خطوط انتقال، با در نظر گرفتن اثر پوستی، مقاومت به صورت تقریبی با مربع فرکانس تغییر می‌کند. بنابراین هارمونیک‌های مراتب بالا، علاوه بر افزایش مقدار جریان در رابطه‌ی تلفات، مقدار مقاومت مسیر را نیز افزایش داده و منجر به افزایش تلفات خواهند شد. در سیستم‌های دارای خازن و سلف که دارای چندین فرکانس طبیعی هستند، وجود هارمونیک‌ها در دسرساز خواهد بود. اگر هارمونیک‌ی با فرکانسی برابر با فرکانس تشدید مدار ایجاد شود، سیستم رزونانس کرده و ولتاژ و جریان زیادی به سیستم تحمیل می‌گردد.



شکل ۱۱- تلفات توان در کابل قدرت دارای عایق XLPE

استفاده از XLPE به عنوان عایق در کابل‌ها، باعث افزایش پایداری نسبت به مواد شیمیایی و خوردگی می‌شود، همچنین دارای تلفات دی الکتریک کم و مقاومت عایقی بالا نیز می‌باشد. طول عمر کابل دارای عایق XLPE در حالت بهره‌برداری صحیح ۳۰ الی ۴۰ سال است. با عبور جریان هارمونیک با دامنه‌ی بالا، طول عمر آن به صورت نمائی کاهش می‌یابد. به طور مثال، با افزایش ۸ تا ۱۰ درجه‌ای دمای هادی بیشتر از حد مجاز، طول عمر عایق نصف می‌گردد. همچنین با افزایش ۸ تا ۱۰ درصدی ولتاژ بهره‌برداری نیز، عمر عایق به نصف آن کاهش می‌یابد. بنابراین روش‌های مناسب ارایه شده در راستای کاهش هارمونیک‌های انتقالی در کابل‌ها و افزایش طول عمر و کارایی سیستم‌ها، دارای اهمیت بسیاری می‌باشند.

روش‌های کنترل کردن و کاهش دادن هارمونیک‌ها:

روش‌های کنترل کردن هارمونیک‌ها و کمک به افزایش طول عمر کابل‌ها، به دسته‌های کلی زیر تقسیم‌بندی می‌شوند که در ادامه به بررسی مختصر هر یک از آن‌ها پرداخته خواهد شد.

۱. طراحی کابل
۲. طراحی شرایط نصب
۳. استفاده از بانک خازنی
۴. طراحی فیلتر

۱. طراحی کابل

از جمله روش‌هایی که در جهت کاهش هارمونیک‌ها قابل توجه است، کاهش قطر هادی کابل است که باعث کاهش خاصیت خازنی کابل شده و تلفات عایقی کابل را کاهش می‌دهد. به عبارت دیگر، در شرایط مشابه، کابلی که دارای هادی با سطح مقطع کوچکتریست، به دلیل کاهش قدرت خازنی، دارای ضریب قدرت بیشتری بوده و در نتیجه مقدار THD کمتری خواهد داشت.

از دیگر روش‌های ارایه شده در بخش طراحی کابل، افزایش رشته‌های هادی است که باعث کاهش بسیار زیادی در مقاومت AC هادی خواهد شد. بنابراین تلفات و گرمای کابل کاهش یافته و باعث افزایش قابلیت جریان‌دهی آن می‌شود.

۲. طراحی شرایط نصب

طراحی شرایط نصب شامل شرایط محیطی، طراحی آرایش و انتخاب نوع باندینگ است. شرایط محیطی مناسب، همانند دمای مناسب محیط از جمله عوامل دارای اهمیت می‌باشند. هرچه دمای محیطی که کابل در آن نصب می‌شود کمتر باشد، قابلیت جریان‌دهی کابل افزایش می‌یابد. استفاده از backfill، برای دفع حرارت ایجاد شده در کابل نیز می‌تواند به کابل کمک کند که توانایی تحمل جریان‌های لحظه‌ای بالا را داشته باشد. همچنین نوع آرایش تخت، در مقایسه با آرایش مثلثی، دارای تحمل دمایی بیشتری می‌باشد.

استفاده از زره، جهت محافظت کابل‌ها در برابر عوامل محیطی، باعث ایجاد تلفات می‌شود. بنابراین با باندینگ مناسب و تغییر در امپدانس مسیر، سعی به کاهش اثرات نامطلوب شده است. در نتیجه، انتخاب باندینگ مناسب برای کابل‌ها، بر روی میزان تلفات تاثیر مستقیم دارد. باندینگ بر ولتاژ القایی، جریان گردآبی و امنیت شبکه موثر بوده و همچنین از لحاظ اقتصادی دارای اهمیت زیادی می‌باشد. سه روش جهت باندینگ کابل‌ها وجود دارد:

- باندینگ تک نقطه

- باندینگ دو نقطه

- کراس باندینگ

هر یک از روش‌های باندینگ به دلیل امپدانس متفاوتی که در مسیر ایجاد می‌کنند، بر روی هارمونیک‌ها اثرات مختلفی دارند.

باندینگ تک نقطه

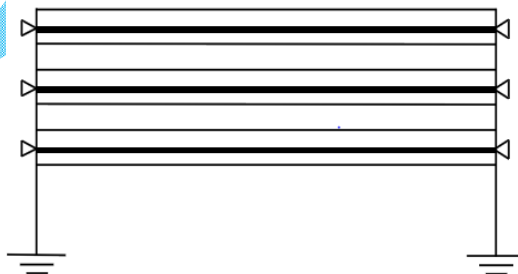
طبق شکل ۱۲، در این نوع آرایش زره و شیلد (خطوط نازک) با باندینگ مناسب در یک سمت، زمین خواهند شد. در این صورت به دلیل مدار باز بودن از یک سو، جریان گردآبی صفر بوده اما اختلاف ولتاژ بالایی در سمت زمین نشده وجود خواهد داشت، که باعث ایجاد خطر می‌شود.



شکل ۱۲ - باندینگ تک نقطه

باندینگ دو نقطه

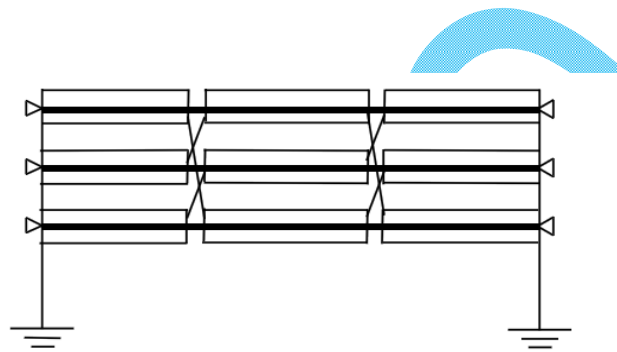
در این نوع از باندینگ، مطابق شکل ۱۳، هر دو طرف کابل‌ها زمین خواهند شد. در این حالت از نظر ولتاژی، اختلاف پتانسیلی وجود ندارد، اما باعث ایجاد جریان گردآبی خواهد شد.



شکل ۱۳ - باندینگ دو نقطه

کراس باندینگ

در این حالت از باندینگ طبق آنچه در شکل ۱۴ مشخص است، کابل‌ها به صورت الگوهای خاصی، ابتدا به سه قسمت تقسیم شده و سپس کراس می‌شوند. در این حالت از افزایش زیاد دامنه‌ی جریان به وجود آمده در باندینگ دو نقطه کاسته می‌شود و همچنین در دو سوی کابل اختلاف ولتاژ موجود در حالت تک نقطه نیز وجود ندارد.



شکل ۱۴- کراس باندینگ

کراس باندینگ نسبت به دو نوع تک نقطه و دو نقطه دارای کارایی بهتر می‌باشد اما راه حلی گران قیمت محسوب می‌شود. انتخاب باندینگ با توجه به طول کابل صورت می‌گیرد. در کابل‌های با طول کم‌تر، باندینگ تک نقطه رایج‌تر بوده اما در طول‌های بالاتر، باندینگ دو نقطه با وجود اینکه دارای حلقه‌ی جریانی مزاحم است به عنوان متداول‌ترین روش از نظر قیمتی و امنیت مورد مصرف قرار می‌گیرد.

۳. استفاده از بانک خازنی

استفاده از بانک‌های خازنی یکی از راه‌حل‌های پیشنهادی، خصوصاً در مصرف‌کننده‌های صنعتی است. زیرا این‌گونه مصرف‌کنندگان دارای بارهای به شدت غیرخطی بوده که می‌توانند اثرات منفی ناشی از آن‌ها را به سیستم توزیع منتقل کنند. بنابراین با قرارگیری بانک خازنی در ورودی کارخانجات، اقدام به افزایش ضریب قدرت می‌شود. طبق ارتباط تنگاتنگ میان ضریب قدرت و THD در رابطه‌ی (۱)، با افزایش ضریب قدرت میزان هارمونیک‌های سیستم کاهش خواهد یافت.

خازن‌های موازی که برای تصحیح ضریب توان به کار می‌روند، در فرکانس‌های مختلف، امیدانس سیستم را شدیداً تغییر می‌دهند. خازن‌ها خود عامل تولید هارمونیک نیستند اما بعضی مواقع، اعوجاج هارمونیکی به دلیل وجود خازن‌ها تشدید می‌شود. بنابراین جداسازی بانک‌های خازنی امری با اهمیت محسوب می‌شود تا بتوان منابع ایجاد هارمونیک را یافت. نمونه‌ای از انواع بانک خازنی در شکل ۱۵ نشان داده شده است.



شکل ۱۵- نمونه‌ای از بانک خازنی

۴. طراحی فیلتر

با طراحی فیلتر مناسب برای سیستم موردنظر، می‌توان رنج فرکانسی مزاحم را تضعیف نمود. با در نظر گرفتن رنج فرکانس تشدید سیستم و همچنین تحلیل FFT جریان موجود، می‌توان به بازه‌های پرخطر فرکانسی پی برد. در نتیجه با طراحی فیلتر با فرکانس قطع مناسب، می‌توان از ورود هارمونیک‌های با دامنه‌ی بالا جلوگیری کرد. به عنوان مثال می‌توان از فیلتر پایین‌گذر برای عبور فرکانس اصلی و تضعیف فرکانس‌های بالا استفاده نمود.

در حال حاضر، استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی در راستای کمینه کردن خطای تعریف شده، رو به افزایش است. از جمله آن‌ها می‌توان به الگوریتم‌هایی همچون الگوریتم ژنتیک (Genetic Optimization)، الگوریتم PSO (Particle Swarm Optimization)، کلونی مورچگان (Ant Colony Optimization)، کلونی زنبورها (Bee Colony Optimization)، شبکه‌های عصبی (Neural Network Algorithm) و ... اشاره نمود. این گونه الگوریتم‌ها می‌توانند پارامترهای مورد نیاز را به صورت بهینه انتخاب کنند. بنابراین می‌توان از

الگوریتم‌های بهینه‌سازی جهت انتخاب هر چه بهینه‌تر المان‌های فیلتر بهره برد. شکل ۱۶ یک بانک فیلتری را برای رفع هارمونیک‌های ولتاژ، نشان می‌دهد.



شکل ۱۶- بانک فیلتر

فیلترها به دو دسته‌ی اکتیو و پسیو تقسیم‌بندی می‌شوند. فیلترهای پسیو شامل المان‌های پسیو سلف، خازن و مقاومت بوده در حالیکه فیلترهای اکتیو دارای سوئیچ بوده و وظیفه آنها به حداقل رساندن اعوجاج و کاهش اختلاف فاز بین ولتاژ و جریان ورودی است. از جمله فیلترهای اکتیو می‌توان به مدارهایی که با نام PFC (Power Factor Correction) یا تصحیح کننده‌ی ضریب توان هستند، اشاره کرد. این گونه مدارها معمولاً به صورت طبقات اولیه‌ی سیستم‌ها بوده و وظیفه‌ی تصحیح ضریب قدرت و در نتیجه بهبود میزان THD را بر عهده دارند. این فیلترها نیازمند کنترل کننده‌های مناسب جهت کارکرد صحیح هستند. جهت طراحی کنترل کننده مناسب می‌توان از الگوریتم‌های بهینه‌سازی بیان شده، استفاده نمود. بنا به نیاز سیستم و همچنین توجه به جنبه‌ی اقتصادی، می‌توان نسبت به انتخاب فیلتر مناسب اقدام کرد.

استانداردهای هارمونیک

استاندارد IEC 61000-3، از جمله استانداردهای تعیین کننده مقدار مجاز هارمونیک در سیستم‌های فرکانس پایین است که به دو دسته‌ی IEC 61000-3-2 برای تجهیزات با جریانی کمتر از ۱۶ آمپر و IEC 61000-3-4 برای تجهیزات دارای جریان بیشتر از ۱۶ آمپر، تقسیم‌بندی می‌شود. هر یک از دسته‌های ذکر شده دارای کلاس بندی‌های مختلفی هستند که بنا به انواع سیستم‌ها، تقسیم بندی شده‌اند.

از دیگر استانداردها می‌توان به IEEE STD 519 اشاره کرد. این استاندارد میزان ولتاژ و جریان هارمونیکی مجاز در نقطه‌ی ورودی سیستم‌های قدرت PCC (Point of Common Coupling) را تعیین می‌کند. بسته به ولتاژ خط، میزان مجاز هارمونیک ولتاژی در PCC مطابق جدول ۱ می‌باشد.

جدول ۱- اعوجاج ولتاژی مورد قبول

Bus voltage V at PCC	Individual harmonic (%)	Total harmonic distortion THD (%)
$V \leq 1.0 \text{ kV}$	5.0	8.0
$1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3.0	5.0
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1.5	2.5
$161 \text{ kV} < V$	1.0	1.5 ^a

مقدار مجاز هارمونیک‌های جریانی، به ازای رنج ولتاژی ۱۲۰ v الی ۶۹ kv، ۶۹ kv الی ۱۶۱ kv و بیشتر از ۱۶۱ kv، به ترتیب در جداول ۲، ۳ و ۴ نشان داده شده‌اند.

جدول ۲- اعوجاج جریانی مورد قبول در رنج ولتاژی ۱۲۰ v الی ۶۹ kv

Maximum harmonic current distortion in percent of I_L						
Individual harmonic order (odd harmonics) ^{a, b}						
I_{sc}/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
$< 20^c$	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

جدول ۳- اعوجاج جریانی مورد قبول در رنج ولتاژی ۶۹ kv الی ۱۶۱ kv

Maximum harmonic current distortion in percent of I_L						
Individual harmonic order (odd harmonics) ^{a, b}						
I_{sc}/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
$< 20^c$	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

جدول ۴- اعوجاج جریانی مورد قبول در رنج ولتاژی بیشتر از ۱۶۱ kv

Maximum harmonic current distortion in percent of I_L						
Individual harmonic order (odd harmonics) ^{a, b}						
I_{sc}/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
$< 25^c$	1.0	0.5	0.38	0.15	0.1	1.5
$25 < 50$	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
≥ 50	3.0	1.5	1.15	0.45	0.22	3.75

در جداول مذکور I_{sc} ماکزیمم جریان PCC در حالت اتصال کوتاه و I_L ماکزیمم جریان مورد نیاز بار است.

مراجع

1. CH. H. Chien, R. W G Bucknall, "An assessment of the influence of bonding on the harmonic performance of AC XLPE insulated subsea cable transmission systems", Journal of Marine Engineering & Technology, 2014.
2. IEEE Guide for the Application of Sheath-Bonding Methods for Single-Conductor Cables and the Calculation of Induced Voltages and Currents in Cable Sheaths, ANSI/IEEE Std 575-1988.
3. K. D. Patil and W. Z. Gandhare, "Threat of Harmonics to Underground Cables", IEEE 2012.

4. ABB Group, 'Harmonic distortions & solutions, 2010.
5. N. Shah, 'Harmonics in power systems, Causes, effects and control', Design Engineering Low-Voltage Drivers, Siemens Industry, Inc.
6. D. Williams, 'Understanding THD in Power Systems', www.allaboutcircuits.com, 2017.
7. IEEE Standards Association, 'IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems', Revision of IEEE STD 519- 1992.
8. Dr. J. Cheng, 'IEEE Standard 519-2014, Compliances, Updates, Solutions and Case Studies', Schneider Electric.
۹. کابل‌های زیر دریایی، طراحی، نصب، تعمیر، اثرات زیست محیطی، ترجمه‌ی مهندس حمیدرضا شریف پناه