هارمونیک و اثرات منفی آن

اگر به عنوان یک متخصص برق مشغول کار هستید، ممکن است با مشکلاتی از قبیل سوختن کابل‌های برق و عملکرد نادرست تجهیزات حفاظتی و دستگاه‌های اندازه‌گیری مواجه شده باشید. یکی از دلایل بروز چنین مشکلاتی وجود هارمونیک در سیستم برق است. حضور هارمونیک در سیستم قدرت باعث ایجاد اعوجاج در سیگنال‌های ولتاژ و جریان شده و اثرات بسیار زیان‌باری روی کیفیت عملکرد شبکه قدرت دارد. امروزه با افزایش استفاده از تجهیزات الکترونیکی و بارهای غیرخطی حجم هارمونیک در شبکه برق بیشتر شده است. در این مقاله هارمونیک‌ها و نحوه ایجاد آنها را شرح می‌دهیم. با **ماهر** همراه باشید.

فهرست

آشنایی با مفهوم کیفیت توان (Power Quality)

هارمونیک چیست؟

چگونه هارمونیک‌های جریان را اندازه‌گیری کنیم؟

بررسی هارمونیک‌های بارهای الکتریکی مختلف

تأثیر هارمونیک بر عملکرد تجهیزات و مدارهای الکتریکی

تأثیر جریان نول بر دستگاه‌های اندازه‌گیری

تأثیر جریان هارمونیک بر جریان نول

تأثیر هارمونیک بر ضریب توان (Power Factor)

ضریب اعوجاج کلی (THD) چیست؟

مثالی از تأثیر THD بر ضریب توان

جمع‌بندی

سوالات متداول

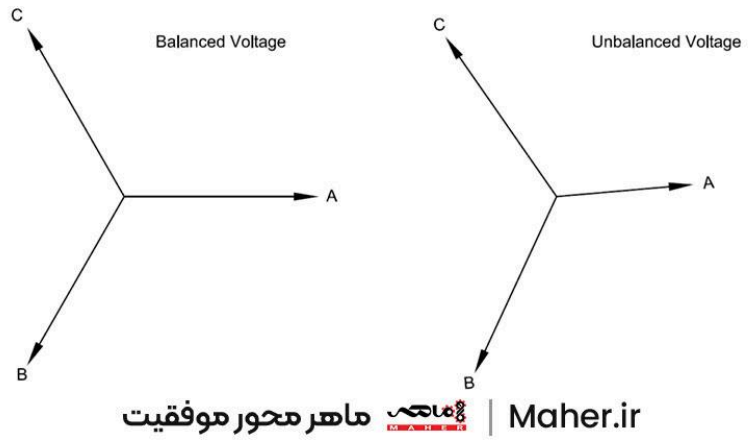
منابع

آشنایی با مفهوم کیفیت توان (Power Quality)

یکی از مباحث مربوط به سیستم تولید و انتقال نیرو که در سال‌های اخیر اهمیت بسیار یافته است، بحث کیفیت توان (Power Quality) است. در گذشته، این مبحث چندان مورد توجه قرار نمی‌گرفت؛ زیرا بارهای الکتریکی و روش‌های تولید انرژی الکتریکی به پیچیدگی و وسعت امروز نبودند و عوامل کاهش کیفیت توان هم به اندازه امروز در شبکه برق وجود نداشتند. کیفیت توان در یک تعریف خیلی ساده عبارت است از میزان شباهت موج‌های ولتاژ و جریان به یک شکل موج سینوسی ایده‌آل.

به طور کلی، بیشتر مصرف‌کننده‌های برق امروزی، از انواع لامپ تا وسایل خانگی و صنعتی دیجیتالی می‌توانند باعث کاهش کیفیت توان شوند. برای مثال، مدارهای الکترونیکی مانند اینورتر و انواع شارژرهای باتری، به‌ویژه شارژرهایی که برای شارژ لوازم الکترونیکی به کار می‌روند، باعث کاهش کیفیت توان شبکه می‌شوند. به‌کارگیری منابع تجدیدپذیر برای تولید انرژی مانند سیستم‌های سولار (خورشیدی) و نیروگاه‌های بادی نیز به دلیل استفاده از مبدل‌های الکترونیک قدرت، از دلایل کاهش کیفیت توان هستند. از جمله پدیده‌های مهم در کیفیت توان، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- **سطح ولتاژ (Voltage Level):** وسایل و تجهیزات الکتریکی با سطح ولتاژ مشخصی کار می‌کنند. پایین بودن سطح ولتاژ، باعث اختلال در عملکرد تجهیزات می‌شود و بالا بودن آن، فشار بر عایق‌های مصرف‌کننده را به همراه دارد.
- **عدم تعادل ولتاژ (Unbalanced Voltage):** در یک سیستم ولتاژ سه‌فاز متعادل اندازه ولتاژ هر سه فاز برابر و ضمن یکسان بودن فرکانس، اختلاف زاویه هر شکل موج با شکل موج دیگر ۱۲۰ درجه است. در نتیجه، زمانی که هر یک از شرایط مذکور برقرار نباشد، سیستم برق AC را نامتعادل گویند. این عدم تعادل می‌تواند ناشی از مشکلاتی مانند توزیع بار نامتوازن یا برق‌دار شدن نول رخ دهد. این مشکل می‌تواند باعث گرم شدن بیش از حد، عملکرد نادرست یا از کار افتادن تجهیزات شود.

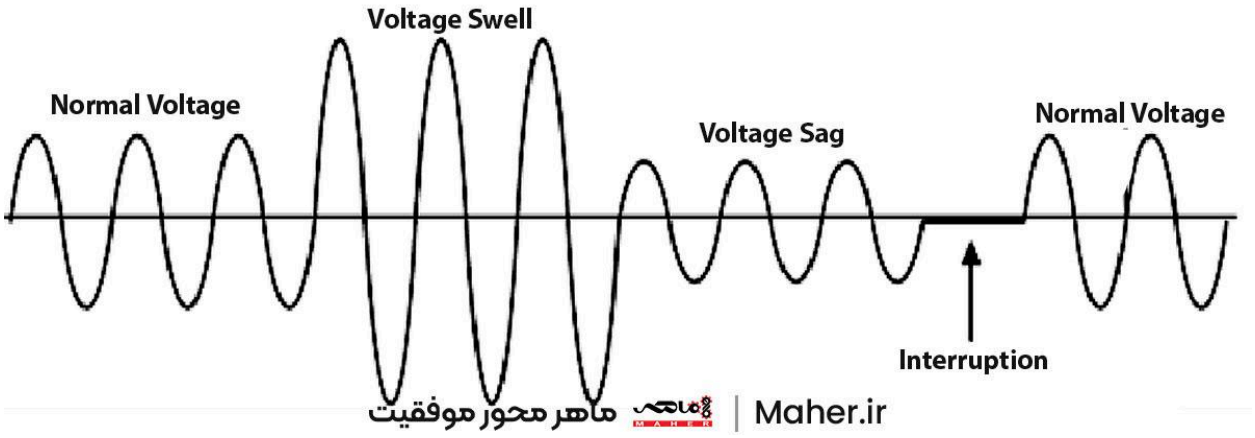


شکل ۱- ولتاژ سه‌فاز متعادل و نامتعادل

- **کمبود ولتاژ موقت (Voltage Sag):** این حالت نوعی افت ولتاژ موقت است که به آن دره ولتاژ (Voltage Dip) نیز می‌گویند. در این نوع اختلال، سطح ولتاژ برای مدت زمان بیش از نیم سیکل قدرت تا یک دقیقه به کمتر از مقدار نامی (۱۰ تا ۹۰ درصد مقدار نامی) افت می‌کند.این اتفاق در اثر افزایش ناگهانی جریان بار، افت ناگهانی ولتاژ شبکه یا بروز اتصالی در سیستم قدرت رخ می‌دهد. (هر سیکل قدرت در فرکانس ۵۰ هرتز ۲۰ میلی‌ثانیه و در فرکانس ۶۰ هرتز ۱۶ میلی‌ثانیه است.)

- **بیشبود ولتاژ موقتی (Voltage Swell):** این حالت، نوعی افزایش ولتاژ موقتی است که سطح ولتاژ را از مقدار نامی آن، برای مدت ۰.۵ سیکل تا یک دقیقه بالاتر می‌برد (بیش از ۱۱۰٪ مقدار نامی). این مشکل به دلیل تغییر ناگهانی جریان بار یا در پی رفع اتصالی از سیستم ممکن است رخ دهد.

- **وقفه ولتاژ (Voltage Interruption):** وقفه ولتاژ به معنی صفر شدن دامنه ولتاژ برای مدت‌زمان کوتاه است. این اتفاق ممکن است به دلیل بروز اشکال در سیستم توزیع یا در اثر صاعقه رخ دهد و زمان آن نیم سیکل قدرت تا چند دقیقه متغیر است.



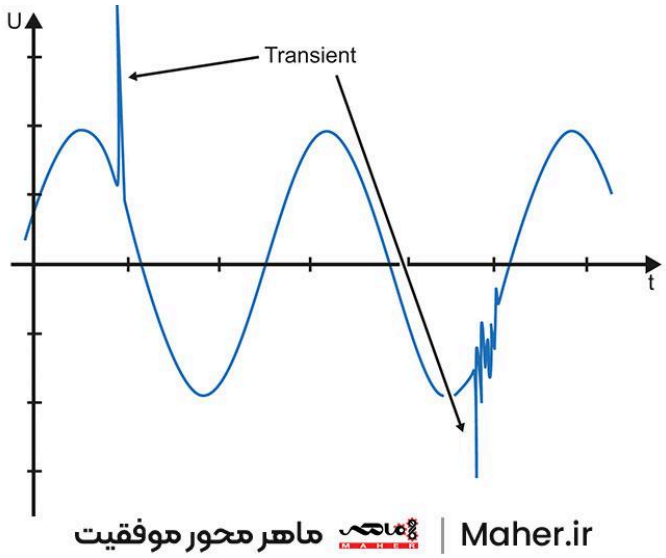
شکل ۲- تغییرات شکل موج ولتاژ تحت تأثیر Swell، Sag و وقفه

- **فلیکر (Flicker):** نوسان ولتاژ به معنی تغییرات مستمر در دامنه ولتاژ بین ۹۰ الی ۱۱۰ درصد مقدار نامی است. تغییر ناگهانی بار مانند روشن شدن یک موتور بزرگ یا راه‌اندازی دستگاه‌های خاصی مانند دستگاه جوش، کوره یا درایوهای بزرگ، می‌تواند باعث بروز نوسان ولتاژ شود. این مشکل باعث سوسو زدن سیستم روشنایی می‌شود و طول عمر وسایل الکترونیکی را نیز کاهش می‌دهد. پدیده نوسان ولتاژ را با دو پارامتر **فرکانس** و **عمق** اندازه‌گیری می‌کنند.

- **تداخل الکتریکی (Electrical Interference):** تداخل الکتریکی، زمانی اتفاق می‌افتد که سیگنال‌هایی ارسال شده از مدارهای الکتریکی دیگر، خطوط انتقال یا حتی فرستنده‌های رادیویی، بر سیگنال ولتاژ مدار مورد نظر ما اثر بگذارد. تداخل الکتریکی باعث کاهش کیفیت سیگنال و افت عملکرد تجهیزات مصرف‌کننده می‌شود.

- **قطع سیستم زمین (Lack of Grounding):** زمین کردن به معنی اتصال مدارهای الکتریکی به زمین است. این کار باعث پایداری بهتر سیستم، کاهش نویز و تداخل و نیز حفاظت وسایل الکترونیکی در برابر الکتریسیته ساکن می‌شود. در اثر قطع ارتباط سیستم زمین مناسب، تجهیزات الکترونیکی حساس آسیب می‌بینند.

- **گذراها (Transients):** حالت‌های گذرا به نوسان‌های کوتاه و ناگهانی سیگنال‌های ولتاژ و جریان در یک دوره زمانی کوتاه گفته می‌شود. عواملی مانند صاعقه، سوئیچینگ در مدارهای الکتریکی و وجود اشکال در سیستم توزیع، می‌توانند موجب رخ دادن حالت‌های گذرا شود. مدت این نوسان‌های گذرا در حد چند میلی‌ثانیه است. این مشکل می‌تواند اثرات مخربی بر عملکرد و قابلیت اطمینان تجهیزات الکتریکی بگذارد.



شکل ۳- حالت‌های گذرا (Transient)

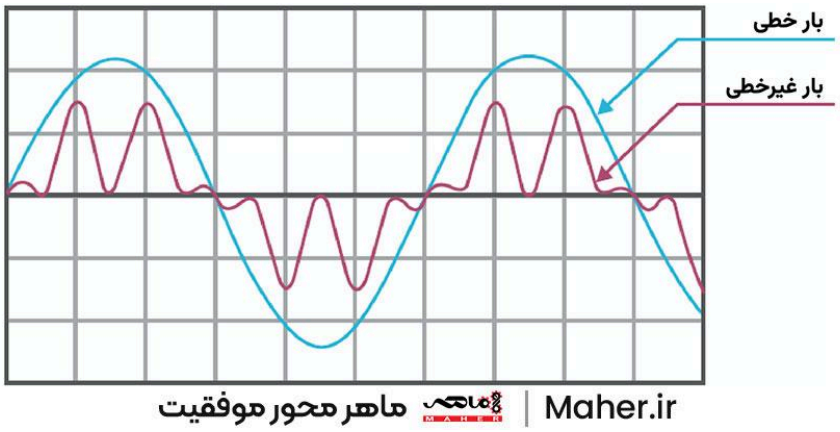
- **ضریب توان (Power Factor):** ضریب توان از تقسیم توان اکتیو به توان ظاهری به دست می‌آید. کاهش ضریب توان باعث اتلاف انرژی و آسیب به تجهیزات می‌شود.

- **هارمونیک‌ها (Harmonics):** هارمونیک‌ها سیگنال‌هایی هستند که فرکانس بالاتری نسبت به فرکانس سیگنال شبکه دارند و باعث اعوجاج در سیگنال اصلی می‌شوند. وسایل الکترونیکی که رفتار غیرخطی دارند، از عوامل اصلی تولید هارمونیک هستند.

با توجه به گستردگی مبحث کیفیت توان، در اینجا به بررسی یکی از مهم‌ترین عوامل کاهش آن، یعنی هارمونیک‌های سیگنال بسنده می‌کنیم. برای بررسی هارمونیک، در ادامه این مقاله با ما همراه باشید.

هارمونیک چیست؟

هنگامی که به یک بار الکتریکی ولتاژ سینوسی داده شده و آن بار، جریان غیرسینوسی از منبع می‌کشد، چنین باری را بار هارمونیک‌زا می‌نامند. دلیل چنین رفتاری، ویژگی‌های غیرخطی بار است. بیشتر وسایل و تجهیزات دنیای مدرن هارمونیک‌زا هستند. لامپ‌های فلورسنت و مدارهای تغذیه آن‌ها، شارژرها، درایوهای الکتریکی و منابع تغذیه سوئیچینگ از جمله این وسایل هستند. تنها شمار اندکی از مصرف‌کننده‌ها، مانند لامپ‌های رشته‌ای، اتو و بعضی موتورهای الکتریکی باکیفیت، تولید هارمونیک نمی‌کنند. با توجه به افزایش وسایل ایجاد کننده هارمونیک، شناخت این پدیده و مقابله با آن اهمیت ویژه‌ای یافته است. در شکل ۴ مقایسه جریان یک بار خطی و یک بار غیرخطی را مشاهده می‌کنید.

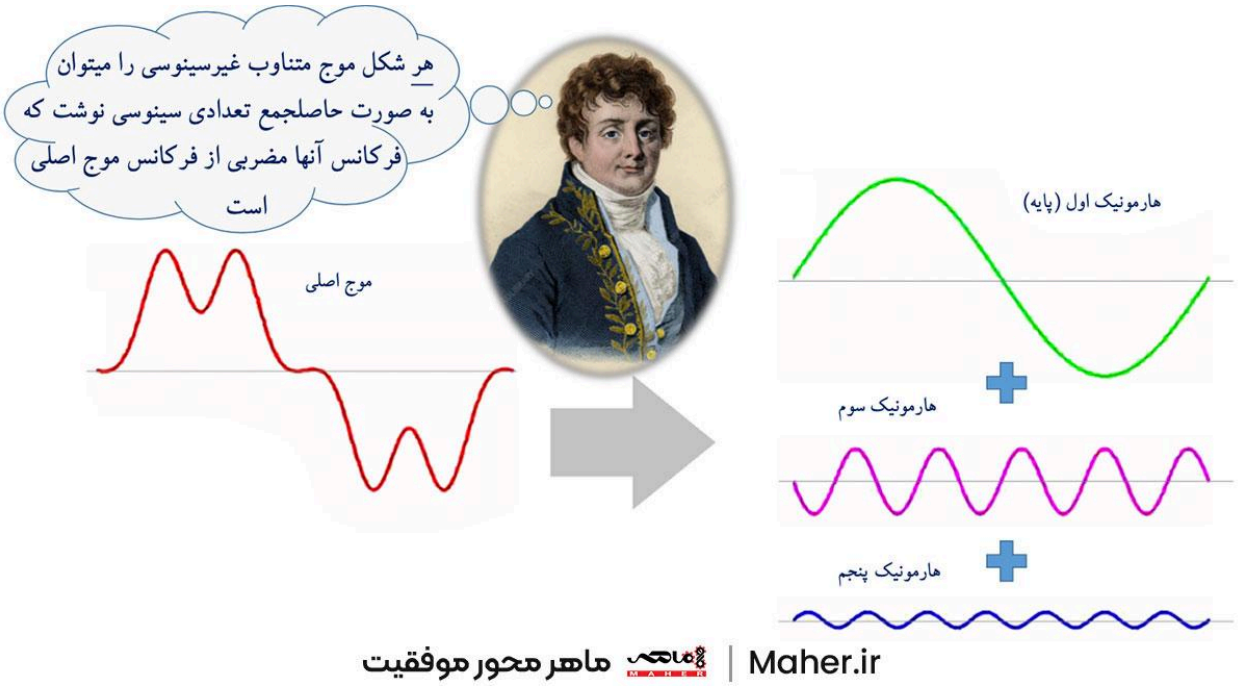


شکل ۴- اثر هارمونیک جریان بر بار غیرخطی

همان‌طور که در شکل ۴ می‌بینید، برخلاف بار خطی، جریان بار غیرخطی شباهت چندانی به یک سیگنال سینوسی ندارد و شکل موج آن به قول معروف دفرمه شده است (به بیان علمی‌تر، دچار اعوجاج شده). این مسئله باعث دشواری تحلیل رفتار مدار و بروز مشکلات جدی در سیستم می‌شود.

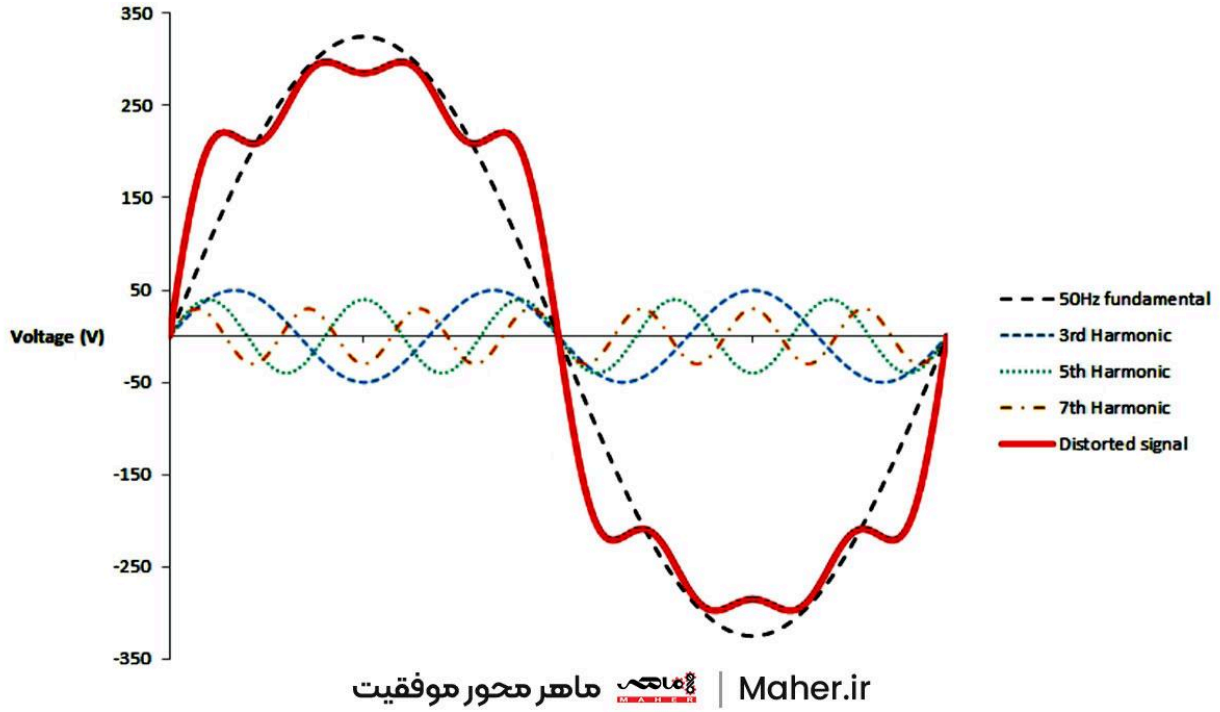
پس از این مقدمه، مفهوم هارمونیک را به طور علمی و ساده شرح می‌دهیم. هارمونیک‌ها در یک سیگنال الکتریکی، شکل موج‌های سینوسی هستند که فرکانس آن‌ها مضرب صحیحی از فرکانس موج سینوسی اصلی است و با ایجاد اعوجاج در سیگنال ولتاژ و جریان، کیفیت توان شبکه را کاهش داده و

باعث اختلال در عملکرد و آسیب به مصرف‌کننده‌های الکتریکی می‌شوند. چنان که اشاره شد، عامل ایجاد هارمونیک رفتار غیرخطی بار است. با استفاده از تبدیل فوریه (Fourier Transform) می‌توان یک تابع غیرسینوسی (تابع متناوب دارای هارمونیک) را به صورت حاصل‌جمع چند تابع سینوسی با دامنه و فرکانس متفاوت معادل کرد. برای درک بهتر موضوع شکل ۵ را ببینید.



شکل ۵- تحلیل سیگنال متناوب غیرسینوسی با استفاده از تبدیل فوریه

همان‌طور که در شکل ۵ می‌بینید، موج غیرسینوسی متناوبِ سمت چپ با استفاده از تبدیل فوریه با حاصل‌جمع سه موج سینوسی معادل شده است. فرکانس هارمونیک اول (پایه) برابر با فرکانس موج اصلی و فرکانس هارمونیک‌های سوم و پنجم، به‌ترتیب ۳ و ۵ برابر فرکانس موج اصلی است. در شکل ۶ تصویر دیگری از هارمونیک‌های سیگنال AC را مشاهده می‌کنید.



شکل ۶- نمایش هارمونیک‌های اول تا هفتم یک موج غیرسینوسی

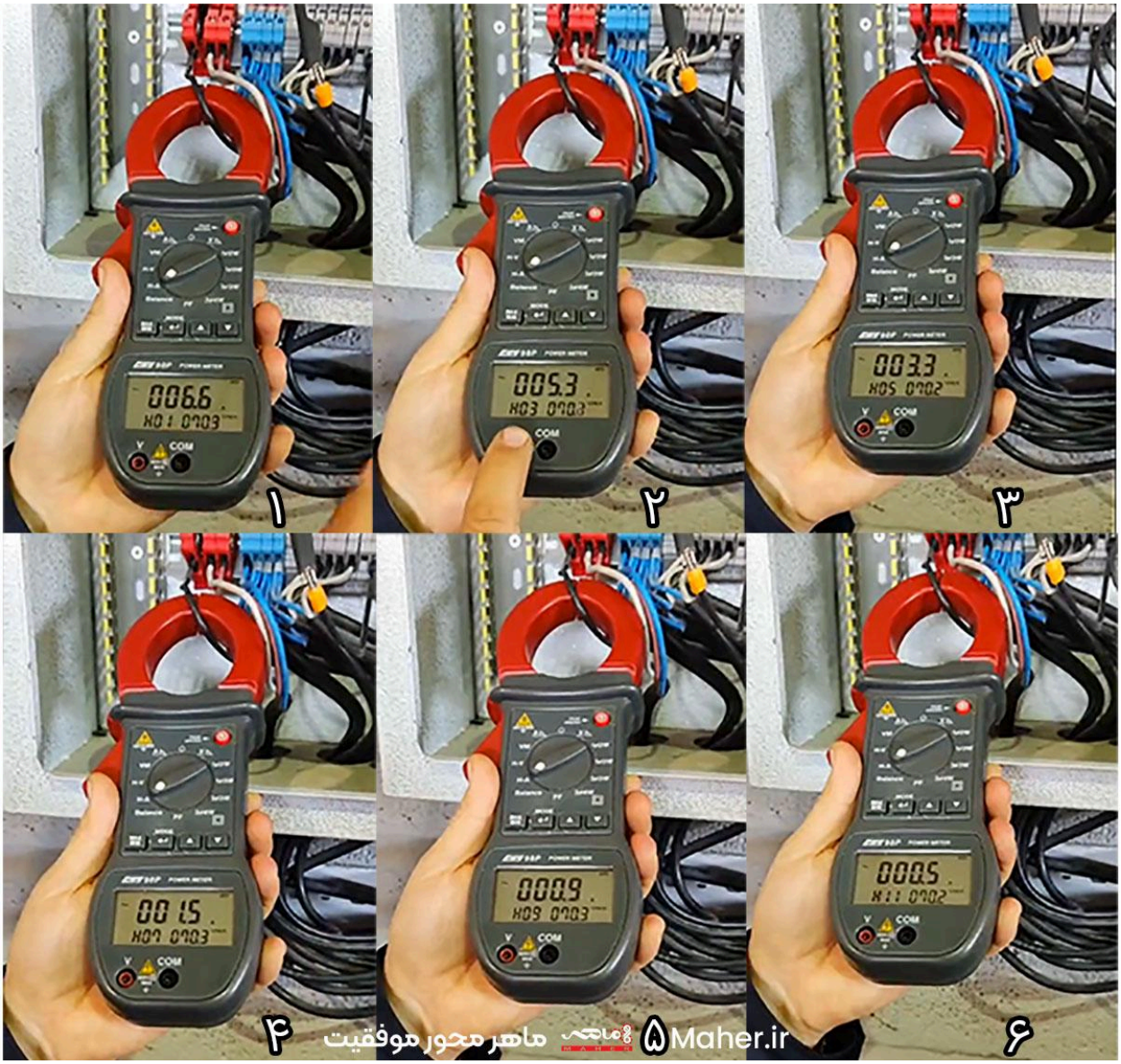
در شکل ۶، منحنی قرمز رنگ، یک موج ولتاژ واقعی است که توسط اسیلوسکوپ ثبت شده و سایر موج‌ها، هارمونیک‌های اول تا هفتم آن هستند. باید دانست از نظر تئوری تعداد هارمونیک‌های یک شکل موج غیرسینوسی، نامحدود است؛ اما در عمل اغلب به بررسی چند هارمونیک اول (مثلاً تا پانزدهم یا نهایتاً بیست و پنجم) اکتفا می‌شود.

چگونه هارمونیک‌های جریان را اندازه‌گیری کنیم؟

برای اندازه‌گیری هارمونیک‌های جریان از دستگاه پاور آنالایزر (Power Analyzer) یا دستگاه پاورمتر (Power Meter) استفاده می‌شود. در شکل ۷ نمای ظاهری این دو دستگاه را می‌بینید.

شکل ۷- پاورمتر (سمت راست) و پاور آنالایزر (سمت چپ)

دستگاه پاورمتر می‌تواند مقدار هارمونیک‌های جریان را اندازه‌گیری کند و نمایش دهد؛ اما پاور آنالایزر علاوه بر نمایش، توانایی ثبت و ذخیره‌سازی هارمونیک‌ها، بیشبود، کمبود، وقفه و بسیاری دیگر از پارامترهای شبکه قدرت را دارد و ضمناً می‌تواند نمودارهای تحلیلی این داده‌ها را نیز در اختیار متخصصان قرار دهد. در شکل ۸ اندازه‌گیری هارمونیک‌های یکی از فازهای استودیوی صنعتی ماهر به وسیله پاورمتر را مشاهده می‌کنید.



شکل ۸- اندازه‌گیری هارمونیک‌های فرد اول تا یازدهم استودیوی ماهر

همان‌طور که در شکل ۸ می‌بینید، با افزایش مرتبه هارمونیک‌های جریان، دامنه هارمونیک کاهش یافته است. اعداد روی دستگاه پاورمتر بر حسب آمپر هستند.

در مقاله‌های زیر درایوهای برند Siemens، ABB و LS که مجهز به فیلتر هارمونیک هستند معرفی شده‌اند.

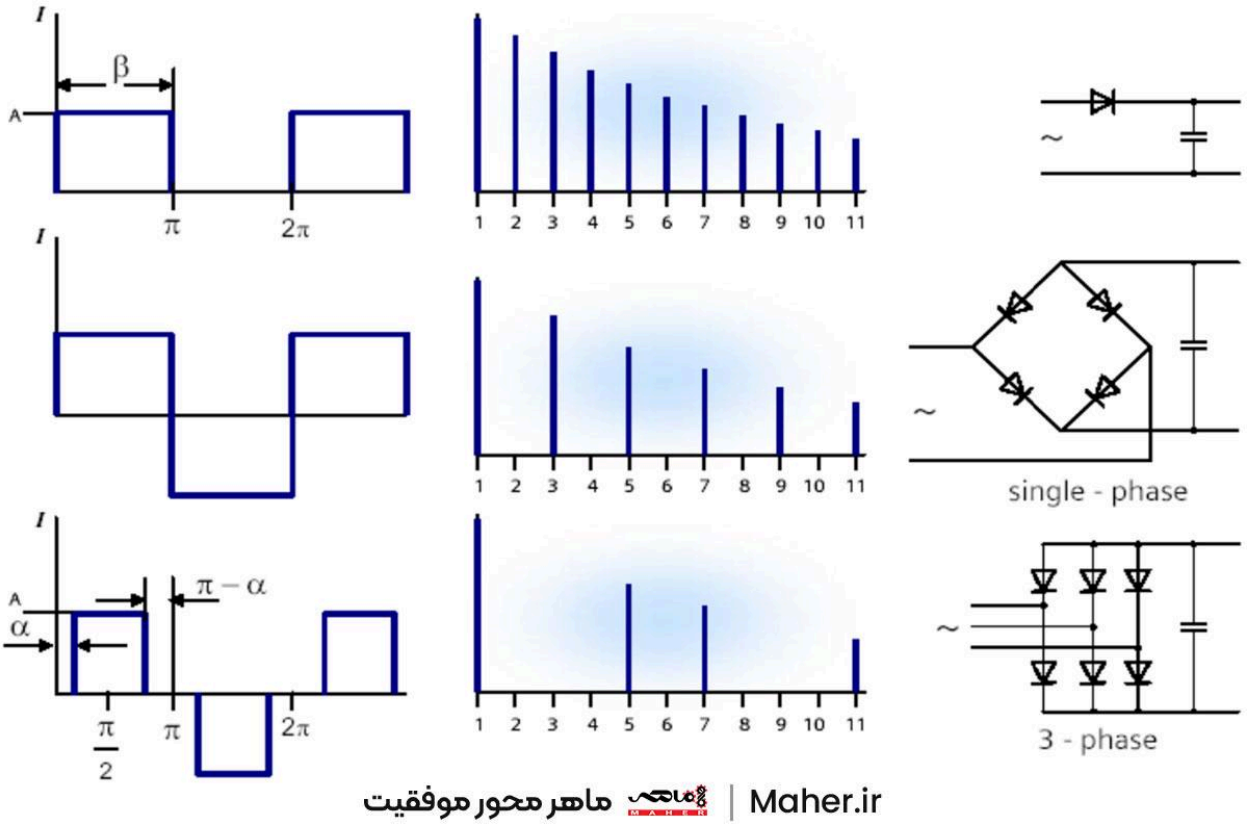
https://maher.ir/1211709/siemens-drives/

https://maher.ir/1211541/ls-drive-manual/

https://maher.ir/1211305/abb-drives/

بررسی هارمونیک‌های بارهای الکتریکی مختلف

یکی از مدارهای الکتریکی بسیار پرکاربرد، مدار یکسوکننده است. این مدار برای تبدیل برق AC به DC استفاده می‌شود. شکل ۷ چند نوع مدار یکسوکننده را به همراه شکل موج خروجی و هارمونیک‌های آن‌ها نشان می‌دهد.



شکل ۷- میزان تولید هارمونیک در انواع مدارهای یکسوکننده

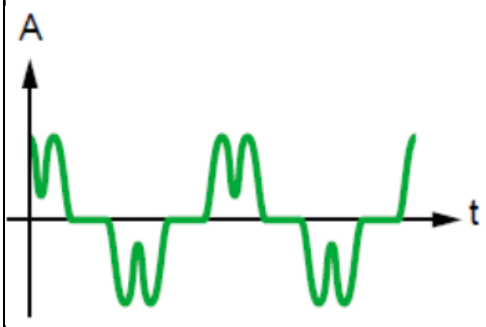
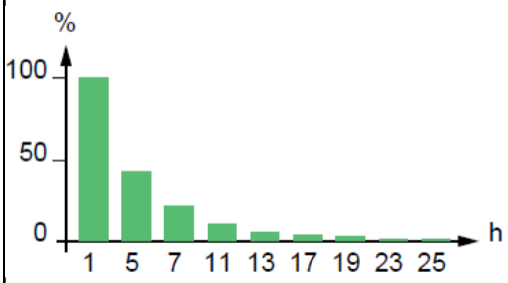
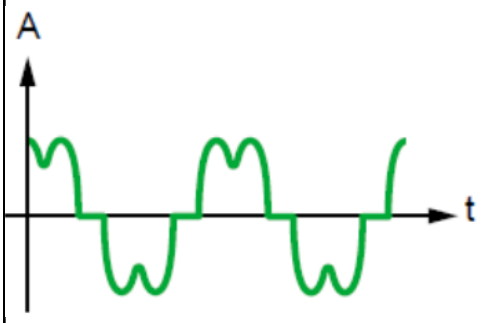
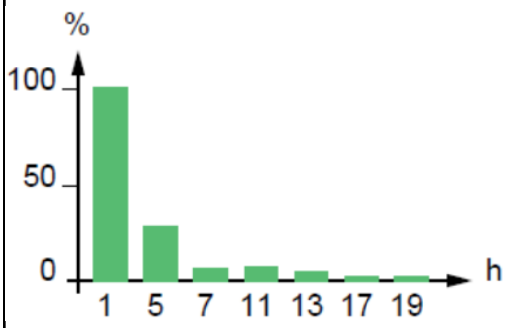
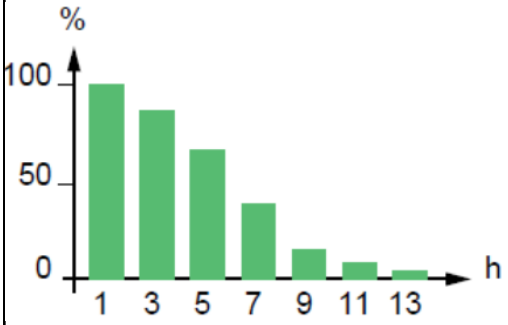
در اولین مدار شکل ۷ یک یکسو کننده تک‌فاز نیم موج است که در آن از یک دیود تنها برای یکسو کردن برق استفاده شده است. همان‌طور که می‌بینید، شکل موج خروجی هیچ شباهتی با سیگنال سینوسی ندارد و جریان خروجی مدار همه ی هارمونیک‌ها را ایجاد کرده است.

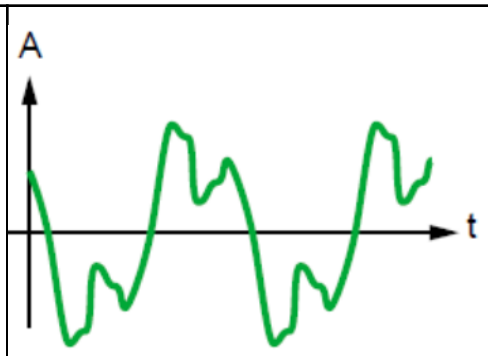
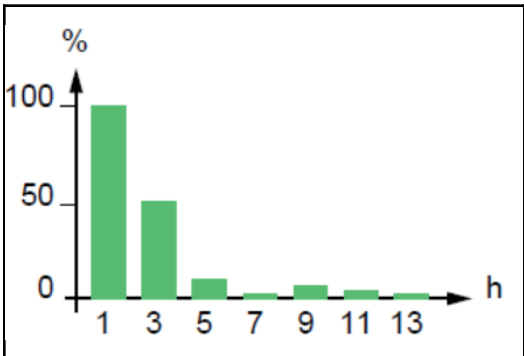
در مدار دوم یک پل دیودی تکفاز به کار رفته است. بر اساس طیف هارمونیک این مدار، همه هارمونیک‌های مرتبه زوج حذف شده‌اند؛ اما هارمونیک‌های مرتبه فرد کماکان در جریان خروجی آن دیده می‌شوند. جالب است بدانید در اکثر مدارات پرکاربرد قدرت، این پدیده رخ داده و صرفاً با هارمونیک‌های مرتبه فرد سر کار داریم.

مدار سوم از یک پل دیودی سه‌فاز برای تبدیل جریان AC به DC بهره می‌برد. همان‌طور که می‌بینید، از میان یازده هارمونیک اول، تنها هارمونیک‌های پنجم، هفتم و یازدهم در طیف هارمونیک جریان خروجی ظاهر شده‌اند.

از این مثال می‌توان نتیجه گرفت که کیفیت مدار داخلی مصرف‌کننده‌های الکتریکی تا چه اندازه می‌تواند در تولید هارمونیک تاثیرگذار باشد. در جدول ۱ نحوه ایجاد هارمونیک توسط مدارهای الکتریکی مختلف را مشاهده می‌کنید.

جدول ۱- شکل موج جریان و طیف هارمونیک چند بار الکتریکی

بار غیرخطی	شکل موج جریان	طیف هارمونیک
درایو		
یکسوکننده/شارژر		
پردازنده کامپیوتری		

سیستم روشنایی فلورسنت		

درایوهای الکتریکی، شارژرها، سیستم‌های پردازش داده و سیستم‌های روشنایی که با لامپ فلورسنت کار می‌کنند، تنها برخی از بارهای هارمونیک‌زا هستند که در جدول ۱ شکل موج جریان و طیف هارمونیک آن‌ها را می‌بینید.

تأثیر هارمونیک بر عملکرد تجهیزات و مدارهای الکتریکی

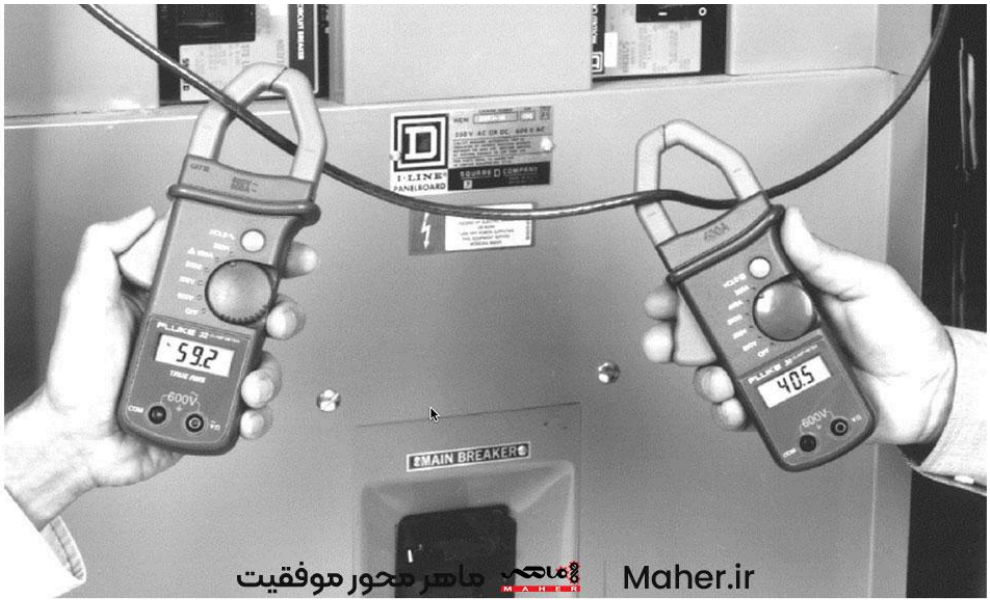
هارمونیک‌ها باعث اختلال در عملکرد تجهیزات الکتریک می‌شوند. در جدول ۲ اثرات مخرب وجود هارمونیک در شبکه بر بعضی تجهیزات الکتریکی را می‌بینید.

جدول ۲- اثرات هارمونیک بر عملکرد برخی تجهیزات

تجهیز	اثرات
دژنکتور و کلید اتوماتیک	طولانی شدن مدت‌زمان از بین بردن قوس، احتمال قطعی ناخواسته کلید
بانک خازنی	افزایش دما، مشکل در تخلیه خازن، عملکرد فیوزهای داخلی
رله‌ها	قطع اشتباه مدار، عدم قطع در هنگام بروز خطا
خطوط انتقال و کابل‌ها	افزایش دمای هادی
منابع روشنایی	کاهش طول عمر، پدیده فلیکر (سوسو زدن)
ترانس‌ها و سلف‌ها	افزایش دمای هادی و هسته
موتورها	افزایش دمای هادی و هسته، ارتعاش گشتاور، افزایش نویز
وسایل اندازه‌گیری	اندازه‌گیری نادرست
تلفن	ایجاد نویز

تأثیر جریان نول بر دستگاه‌های اندازه‌گیری

هارمونیک می‌تواند در خوانش دستگاه‌های اندازه‌گیری اشکال ایجاد کند. شکل ۱۰ را مشاهده کنید!



شکل ۱۰- تأثیر هارمونیک بر وسایل اندازه‌گیری

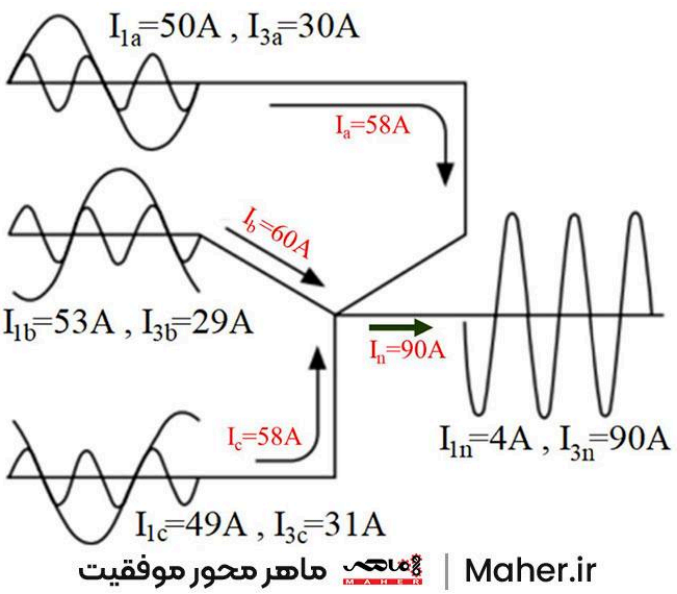
در شکل ۱۰ مقدار جریان اندازه‌گیری‌شده توسط آمپرمتر سمت راست حدود ۴۰ آمپر و آمپرمتر سمت چپ حدود ۶۰ آمپر است. آمپرمتر مقدار RMS سیگنال متناوب را نشان می‌دهد؛ در این شکل، آمپرمتر سمت راست دارای قابلیت TRMS است. این قابلیت امکان اندازه‌گیری مقدار RMS واقعی را با در نظر گرفتن جریان هارمونیک به آمپرمتر می‌دهد. آمپرمتر سمت راست توانایی تشخیص جریان هارمونیک را ندارد و مقدار جریان را به‌درستی اندازه نمی‌گیرد.

درایوهای الکتریکی هم تولید هارمونیک می‌کنند و هم تحت تأثیر هارمونیک قرار می‌گیرند. در مقاله زیر در مورد تاثیر هارمونیک بر درایو بیشتر بخوانید.

https://maher.ir/1211210/electromagnetic-interference/

تأثیر جریان هارمونیک بر جریان نول

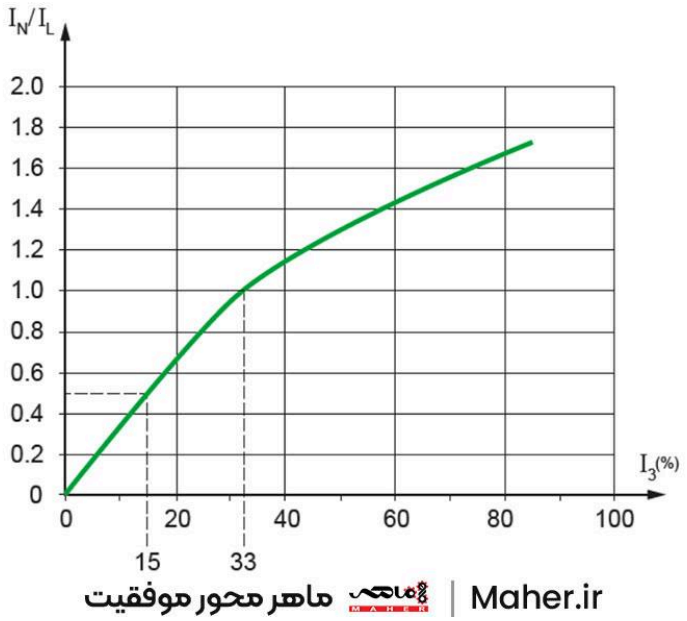
در صورت وجود هارمونیک، جریان نولِ مدار سه‌فاز به‌شدت افزایش می‌یابد. در مدار شکل ۱۱ این مسئله نشان داده شده است.



شکل ۱۱- مدار سه‌فاز با هارمونیک

جریان هارمونیک اول و سوم سه فاز را در مدار شکل ۱۱ مشاهده می‌کنید. همان‌طور که می‌بینید، جریان‌های مؤثر ورودی به مرکز ستاره به ترتیب ۵۸، ۶۰ و ۵۸ آمپر هستند. با توجه به تعادل نسبی بار روی سه فاز انتظار می‌رود که مسیر نول جریان کمی داشته باشد؛ اما به دلیل وجود هارمونیک سوم، جریان نول ۹۰ آمپر شده است (۱.۵ برابر فاز!!). دلیل این مسئله آن است که **برخلاف هارمونیک‌های اول، جریان‌های هارمونیک سوم وقتی به مرکز ستاره می‌رسند، نه‌تنها یکدیگر را خنثی نمی‌کنند، بلکه با هم جمع می‌شوند.**

برای درک بهتر، این نکته را باید در نظر گرفت که در یک سیستم سه‌فاز، هارمونیک‌های مرتبه ۳ همراستا و هم‌جهت هستند و مانند مؤلفه اصلی یا دیگر هارمونیک‌ها ۱۲۰ درجه اختلاف بینشان وجود ندارد. جریان هارمونیک مرتبه سوم در کابل‌های سه‌فاز باعث برق‌دار شدن نول، افزایش شدید تلفات و کاهش ظرفیت کابل می‌شود. شکل ۱۲ نمودار افزایش جریان نول نسبت به جریان خط بر اساس درصد هارمونیک سوم را نشان می‌دهد.



شکل ۱۲- نمودار جریان نول بر حسب درصد هارمونیک سوم

طبق نمودار شکل ۱۲، برای مثال اگر ۱۵ درصد هارمونیک سوم داشته باشیم، جریان نول معادل نصف جریان فاز است. اگر هارمونیک سوم به ۳۳ درصد برسد، جریان نول با جریان فاز برابر خواهد شد. در صورتی که هارمونیک سوم سهمی بیش از این داشته باشد، جریان نول از فاز بیشتر خواهد شد!

تأثیر هارمونیک بر ضریب توان (Power Factor)

یکی از مباحث مهم شبکه برق، بحث ضریب توان (ضریب قدرت) است. ضریب توان از **تقسیم توان اکتیو (kW) به توان ظاهری (kVA)** مدار به دست می‌آید. تعریف ریاضی دیگری که برای ضریب توان ارائه می‌شود «**کسینوس اختلاف زاویه بین سیگنال ولتاژ و سیگنال جریان**» است و به آن $cos\varphi$ (ضریب توان جابجایی) می‌گویند. ضریب قدرت تنها زمانی با $cos\varphi$ برابر است که هارمونیک در شبکه وجود نداشته باشد؛ در صورت وجود هارمونیک، ضریب توان و $cos\varphi$ یکی نیستند و اولی کمتر از دومی خواهد شد.

ضریب اعوجاج کلی (THD) چیست؟

برای درک بهتر تأثیر هارمونیک بر ضریب توان، ابتدا باید با مفهوم «ضریب اعوجاج کلی هارمونیکی» (Total Harmonic Distortion) که به اختصار به آن THD گفته می‌شود، آشنا شوید. مقدار THD جریان از رابطه زیر به دست می‌آید.

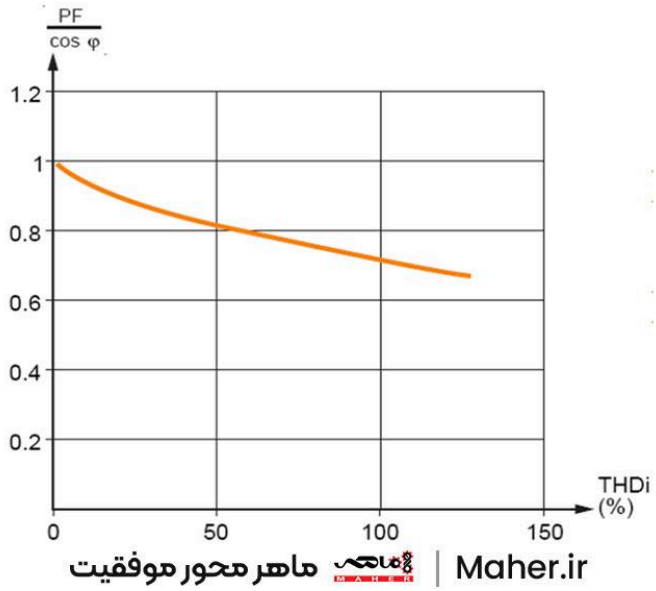
$$THD_I = \frac{\sqrt{I_2^2+I_3^2+...+I_n^2}}{I_1^2}$$

در معادله بالا، I جریان و n مرتبه هارمونیک است.

در صورت وجود هارمونیک، رابطه میان ضریب توان و $cos\varphi$ به شکل زیر خواهد بود.

$$PF = \frac{cos\varphi}{\sqrt{1+THD_I^2}}$$

در شکل ۱۱ نمودار روند کاهشیِ نسبت ضریب توان به $cos\varphi$ به‌ازای افزایش درصد THD را مشاهده می‌کنید.

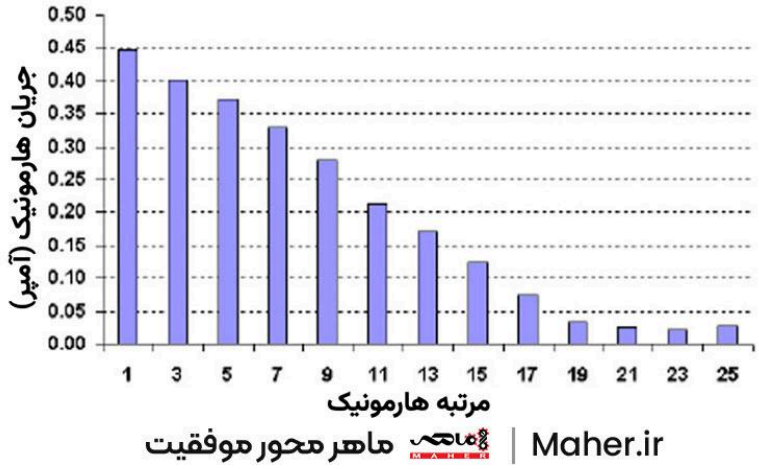


شکل ۱۱- نمودار کاهش ضریب توان واقعی با افزایش THD

بر اساس فرمول فوق و نمودار شکل ۱۱، اگر THD شکل موج جریان ۲۰ درصد باشد، ضریب توان واقعی برابر با ۰.۹۸ ضریب توان ظاهری ($cos\varphi$) است؛ اما اگر THD تا ۱۰۰ درصد افزایش یابد، ضریب توان واقعی ۰.۷ برابر ضریب توان ظاهری خواهد بود.

مثالی از تأثیر THD بر ضریب توان

برا درک بهتر تأثیر THD بر ضریب توان، طیف هارمونیک‌های جریان را برای یک دستگاه کامپیوتر بررسی می‌کنیم. شکل ۱۲ را در نظر بگیرید.



شکل ۱۲- طیف هارمونیک‌های جریان یک کامپیوتر

با توجه به مقادیر هارمونیک شکل ۱۲ مقدار THD از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$THD_I = \frac{\sqrt{0.4^2+0.37^2+0.33^2+0.28^2+0.21^2+0.17^2+0.13^2+0.07^2+0.04^2+0.02^2+0.02^2+0.03^2}}{0.45} \times 100 = 170\%$$

در صورتی که ضریب توان ظاهری برابر با ۰.۸۲ باشد، با وجود هارمونیک، ضریب توان واقعی از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$PF = \frac{0.82}{\sqrt{1+1.7^2}} = 0.416$$

همان‌طور که می‌بینید، با احتساب هارمونیک، ضریب توان واقعی کمتر از نصف ضریب توان ظاهری است.

به جز موارد مطرح شده می‌توان نکات زیر را در مورد اثرات زیان‌بار هارمونیک مطرح کرد.

- جریان هارمونیک باعث می‌شود که سرعت پاسخ کلید دژنکتور به خطای اتصال کوتاه، به دلیل اطفای دیرتر قوس الکتریکی ناشی از وجود هارمونیک، افزایش یابد.
- وجود هارمونیک باعث افزایش سطح جریان مؤثر عبوری از کلیدهای حفاظتی می‌شود و با وجود اینکه کلید، متناسب با جریان مصرفی بار انتخاب شده است، وجود هارمونیک باعث قطعی ناخواسته آن می‌شود.
- با توجه به تأثیر بسیار زیاد نقش فرکانس در راکتانس خازن، وجود هارمونیک مراتب بالا در مدار خازنی تأثیر بسیار زیادی در جریان عبوری از خازن دارد و به راحتی باعث سوختن یا انفجار خازن می‌شود.

- هارمونیک‌های جریان باعث ایجاد گشتاور ارتعاشی می‌شوند. مثلاً هارمونیک پنجم باعث ایجاد گشتاور چپگرد در موتور می‌شود. در این حالت، موتور در هنگام کار زوزه می‌کشد و حرارت آن بالا می‌رود.

جمع‌بندی

وجود هارمونیک یکی از عوامل اصلی کاهش کیفیت توان سیستم توزیع برق است. این عامل می‌تواند تأثیرات زیان‌باری بر تجهیزات و مدارهای الکتریکی بگذارد و نیز شبکه قدرت را دچار اختلال کند. در این مقاله، ضمن معرفی هارمونیک و شرح نحوه ایجاد آن، اثرات منفی آن بر برخی مدارها و تجهیزات الکتریکی را بررسی کردیم. یکی از راهکارهای اصلی مقابله با هارمونیک و حفاظت سیستم در برابر آسیب‌های آن اجرای سیستم زمین استاندارد است. با ثبت‌نام در دوره جامع ارتینگ ماهر می‌توانید به صورت علمی و کاربردی نحوه پیاده‌سازی یک سیستم ارتینگ کارآمد و استاندارد را بیاموزید.

سوالات متداول

۱- کیفیت توان چیست؟

کیفیت توان به میزان تطابق ولتاژ، جریان، و فرکانس یک سیستم الکتریکی با استانداردهای مورد نظر اشاره دارد.

۲- برای اندازه‌گیری هارمونیک‌های جریان چه ابزاری نیاز است؟

برای اندازه‌گیری هارمونیک‌های جریان، از پاور آنالایزر یا پاورمتر استفاده می‌شود.

۳- بارهای الکتریکی چگونه هارمونیک‌ها را تولید می‌کنند؟

بارهای غیرخطی مانند درایوهای فرکانس متغیر و منابع تغذیه سوئیچینگ و لامپ‌های فلورسنت و LED هارمونیک‌زا هستند.

۴- چگونه جریان هارمونیک بر جریان نول تأثیر می‌گذارد؟

جریان‌های هارمونیک می‌توانند باعث افزایش جریان نول و بار اضافی بر سیستم‌های زمین و سوختن کابل شوند.

منابع

https://www.smart-energy.com/industry-sectors/smart-grid/what-is-power-quality-and-why-is-it-important/

https://www.hioki.com/us-en/learning/electricity/power-quality.html

https://powerquality.blog/2021/07/12/understanding-current-and-voltage-harmonics/

Santoso, S., McGranaghan, M. F., Dugan, R. C., & Beaty, H. W. (2012). *Electrical power systems quality*. McGraw-Hill Education.