مبدل اصلاح ضریب توان (PFC) در منابع تغذیه و کاربرد آن

تاریخ انتشار۲۶ اسفند, ۱۴۰۱ توسط سید حسین سلطانی

سلام و درود خدمت همراهان همیشگی مایکروالکام. در مطالب قبلی بررسی قطعات الکترونیکی به معرفی کلاک در مدار های دیجیتالی پرداخته شد. در این مطلب به معرفی مبدل اصلاح ضریب توان (PFC) یا Power Factor Correction در منابع تغذیه و ضریب توان (PF) پرداخته خواهد شد. پس با من تا انتهای مطلب همراه باشید. همچنین شما میتونید سایر مطالب من رو از این قسمت دنبال کنید.

مبدل اصلاح توان (PFC)

ضریب توان به نسبت انرژی یک دستگاه که می‌تواند به خروجی منتقل شود در مقابل کل توان ورودی گفته می‌شود. این پارامتر یکی از کلیدی ترین موارد در طراحی دستگاه های الکتریکی به ویژه با توجه به مقررات وضع شده توسط کشور ها و سازمان های بین المللی اروپا می‌باشد.

دلیل اینکه این سازمان بر بهبود و ارتقای ضریب توان متمرکز شده اند این است که توان با کیفیت پایین یک تهدید واقعی برای شبکه توان و انتقال بوده و تلفات حرارتی را افزایش داده و بطور بالقوه باعث قطعی در شبکه برق و مشکلات آن خواهد شد. دو دلیل عمده برای ضریب فاکتور بد وجود دارد.

1. **جابجایی:** این مورد هنگامی رخ می‌دهد که ولتاژ مدار و جریان آن خارج از فاز بوده و معمولا این مورد بدلیل وجود عناصر راکتیو مانند سلف و خازن در مدار می‌باشد.
2. **اعوجاج:** به تغییر شکل موج اصلی گفته می‌شود و معمولا توسط مدار های غیر خطی مانند یکسو ساز ها ایجاد می‌گردد. این امواج غیر خطی دارای هارمونیک های زیادی هستند که موجب مخدوش شدن و اشکال در ولتاژ شبکه می‌شود.

راه حل

اصلاح ضریب توان یا Power Factor Correction که اختصارا بصورت PFC نیز بیان می‌شود از مجموعه روش هایی است که برای بهبود ضریب توان دستگاه های برقی استفاده می‌گردد. برای رفع اشکال جابجایی (هم فاز نبودن) از قطعات راکتیو خارجی برای جبران توان راکتیو کل مدار استفاده می‌کنند. جهت رفع اعوجاج نیز می‌توان 2 روش را بیان کرد.

1. **اصلاح ضریب توان غیرفعال (Passive):** در این روش با فیلتر کردن هارمونیک ها بوسیله فیلتر های غیر فعال، ضریب توان بهبود خواهد یافت. معمولا از این روش در کاربرد هایی که توان کم است استفاده می‌شود.
2. **اصلاح ضریب توان فعال (Active):** در این روش از منبع سوئیچینگ برای مناسب سازی و شکل دادن به شکل موج سینوسی استفاده می‌شود. با این کار تنها هارمونیک های موجود در سیگنال جدید فرکانس سوئیچینگ بوده و براحتی می‌توان آنها را فیلتر نمود. از همین رو بهترین روش برای اصلاح ضریب توان بوده اما در عین حال باعث پیچیدگی در طراحی نیز می‌شود.

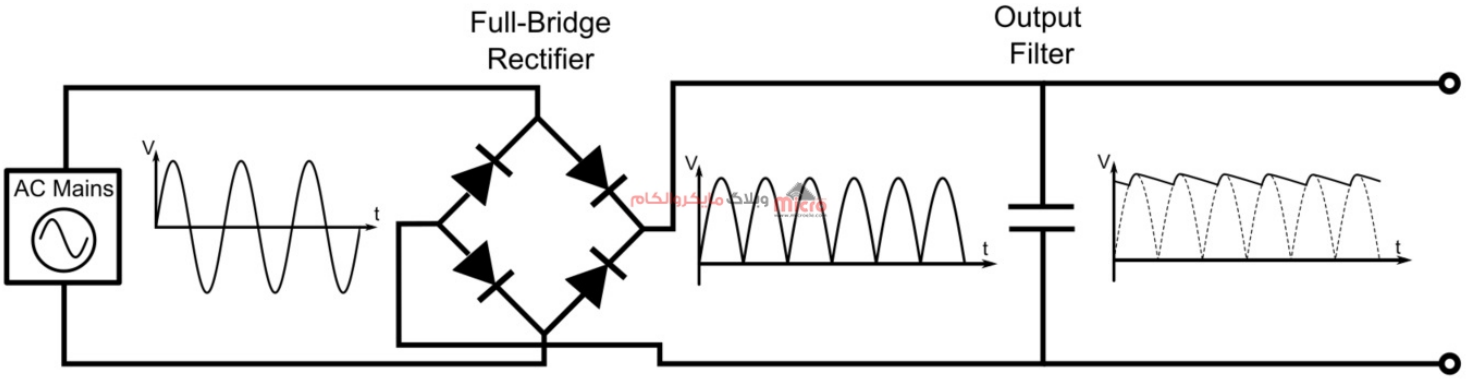
یک مدار اصلاح ضریب توان (PFC) خوب از مهم ترین المان ها برای هر طراحی اصولی است. زیرا یک دستگاه با ضریب توان نامناسب دارای عدم کارایی مناسب بوده و فشار غیر ضرروی به شبکه وارد کرده و ممکن است سایر

دستگاه های دیگر را نیز تحت تاثیر قرار دهد.

نیاز به اصلاح ضریب توان (PFC) در منابع تغذیه AC/DC

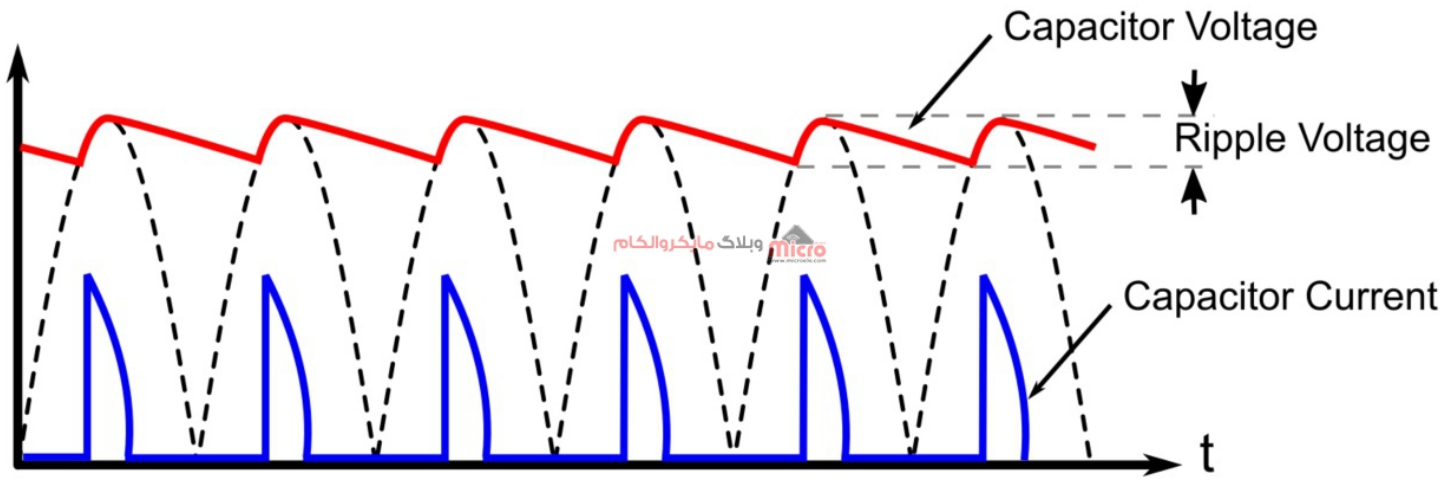
یک منبع تغذیه AC به DC از مدار های متعددی برای تبدیل ولتاژ AC ورودی به DC در خروجی ساخته شده است. یکی از اصلی ترین آنها قسمت یکسوسازی می‌باشد. این مدار وظیفه یکسوسازی ولتاژ AC ورودی و به تعبیری دیگر یکسو کردن ولتاژ متناوب ورودی را دارد. برای اینکه منبع AC به DC مورد کاربرد ما کارایی مناسب و ایمنی خوبی داشته باشد نیاز است که ایزوله بوده، دارای ضریب اصلاح توان مناسب و سطح ریپل ولتاژ کمی باشد. این موارد باعث محافظت از کاربر، شبکه توزیع برق و وسایل متصل به منبع تغذیه خواهد شد.

اولین مرحله در منبع تغذیه یکسوسازی ولتاژ ورودی است. یکسوسازی فرآیندی است که باعث تبدیل ولتاژ متناوب ورودی به ولتاژ مستقیم (DC) در خروجی آن خواهد شد. یکسوساز تمام پل (تمام موج) از 4 دیود تشکیل شده که به آن مدار Graetz نیز گفته می‌شود. این دیود ها باعث قطع و وصل ولتاژ ورودی و نهایتا باعث ایجاد یک ولتاژ DC در خروجی خود مشابه تصویر زیر خواهند شد. البته این ولتاژ هنوز قابل استفاده نبوده و باید از فیلتر نیز عبور کند تا DC مستقیم شود.



مدار یکسوساز در منبع تغذیه

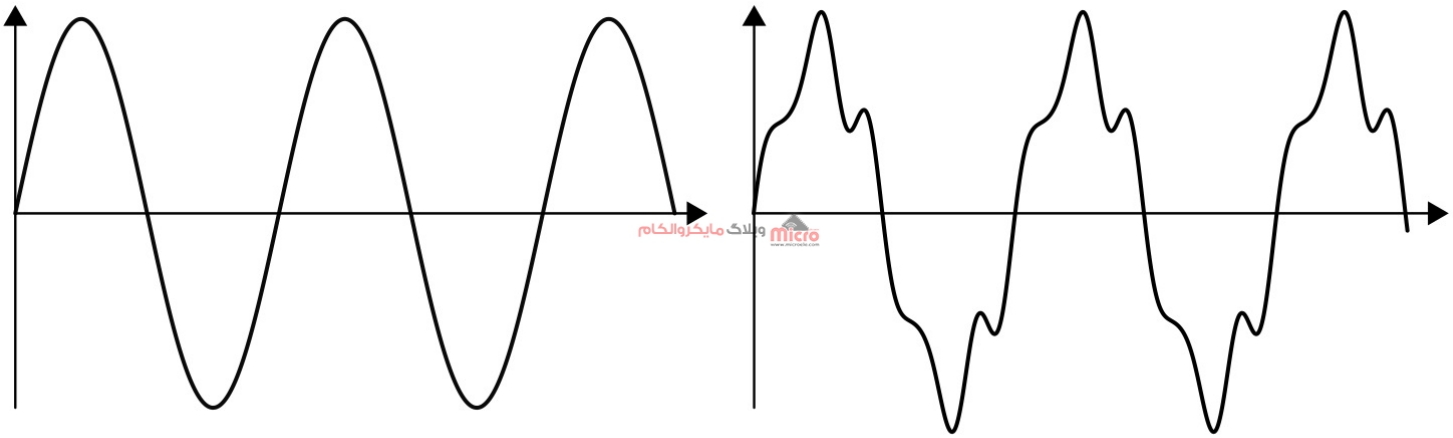
شکل موج ایجاد شده دارای تغییرات زیادی در ولتاژ است که به آن ریپل ولتاژ گفته می‌شود. لذا یک خازن با ظرفیت بالا بصورت موازی با خروجی پل دیود قرار گرفته تا ریپل ولتاژ را کمتر کند. همانطور که در تصویر زیر مشخص است خازن در زمان کوتاهی از نقطه ای که ولتاژ در ورودی خازن بیشتر از ولتاژ شارژ خازن است شارژ می‌شود. همانطور که مشخص است جریان خازن چیزی شبیه اسپایک است و این مورد خوبی نیست. نه تنها برای منبع تغذیه بلکه برای شبکه برق نیز مفید نمی‌باشد. برای درک بزرگی این مشکل باید با هارمونیک ها آشنا شویم.



شکل موج های ولتاژ و جریان خروجی یکسوساز در منبع تغذیه

هارمونیک و تبدیل فوریه

اکثر شکل موج های الکتریکی که تا به حال دیده ایم بصورت شکل موج سینوسی می‌باشند. از همین رو اغلب امواج بصورت سینوسی خالص نمی‌باشند. خصوصا زمانی که اجزای راکتیو (سلف و خازن) یا غیرخطی مانند ترانزیستو و دیود در مدار وجود داشته باشند. این امواج با توابع ریاضی و متفاوتی که اغلب آنها پیچیده هم هستند تعریف می‌شوند. لذا تجزیه و تحلیل این امواج بسیار دشوار خواهد شد.



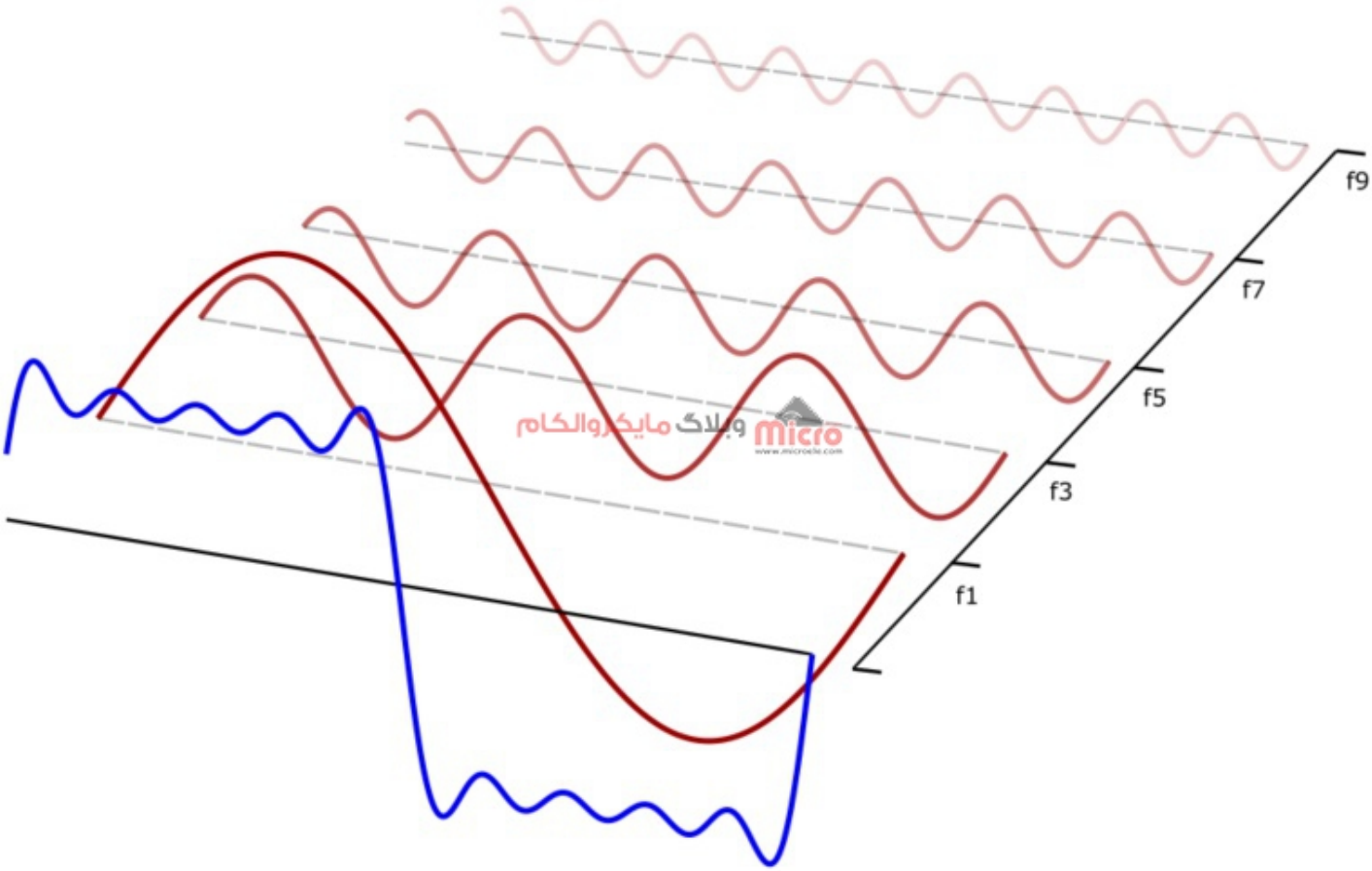
Sine Wave Fuction: V(t) = A x sin(2π x f x t)

Distorted Wave Fuction: V(t) = ???

شکل موج سینوسی و یک موج نامشخص و توابع آن

در قرن 19 ریاضی‌دان فرانسوی بنام Jean-Baptiste Joseph Fourier روشی را برای تجزیه هر شکل موج متناوبی که مطابق آن به شکل مجموعه ای از امواج سینوسی و کسینوسی با فرکانس های مختلف است بیان کرد که به آن هارمونیک گفته می‌شود.

اولین مورد از این امواج که از آن به عنوان پایه یاد می‌شود موجی با کمترین فرکانس است. پس از آن چندین موج دیگر که با موج پایه ترکیب شده و دارای دامنه و فرکانس خاصی می‌باشند. بطور کلی هر چه یک شکل موج نسبت به موج سینوسی خالص انحراف بیشتری داشته باشد، دارای هارمونیک بیشتری نیز خواهد بود.

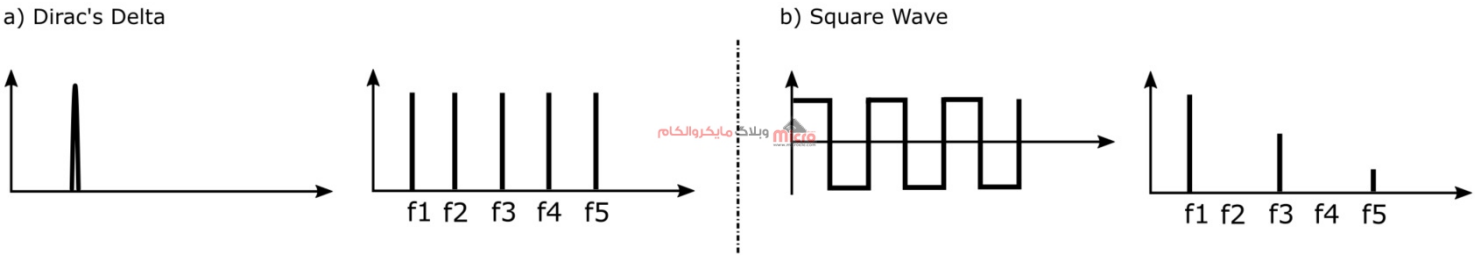


تجزیه شکل موج دلخواه به سری فوریه

فرکانس های هارمونیک باید مضرب صحیحی از فرکانس اصلی باشند. مثلا اگر فرکانس پایه یک موج 50Hz باشد، هارمونیک دوم آن 100Hz، هارمونیک سوم آن 150Hz و... می‌باشد.

یکی از مهم ترین پارامتر های هارمونیک دامنه آن است که معیاری بر تاثیر آن بر فرکانس موج پایه است. معمولا موج پایه دارای دامنه بیشتری است و دامنه هارمونیک ها به ترتیب کاهش خواهند یافت. لذا هارمونیک 9 یا 20 وجود نخواهد داشت.

دامنه این هارمونیک ها را می‌توان ترسیم کرد و نشان داد که هر هارمونیک چه نقشی در ساخت شکل موج دلخواه بازی می‌کند. مشکلی که با جریان در خازن وجود دارد این است که مشابه تابع دلتا می‌باشد. این شکل موج بطور ایده آل یک پالس لحظه ای و قوی است. موجی با این مشخصات قابل تجزیه به امواج سینوسی پیچیده است و باعث تعداد زیادی از هارمونیک قوی خواده شد که تقریبا در بر گیرنده همه فرکانس ها خواهد بود.



هارمونیک های تابع دلتا و موج مربعی

ضریب توان (Power Factor)

سه مدل توان AC وجود دارد. توان اکتیو، توان راکتیو و توان ظاهری که در ادامه به توضیح آنها پرداخته شده است.

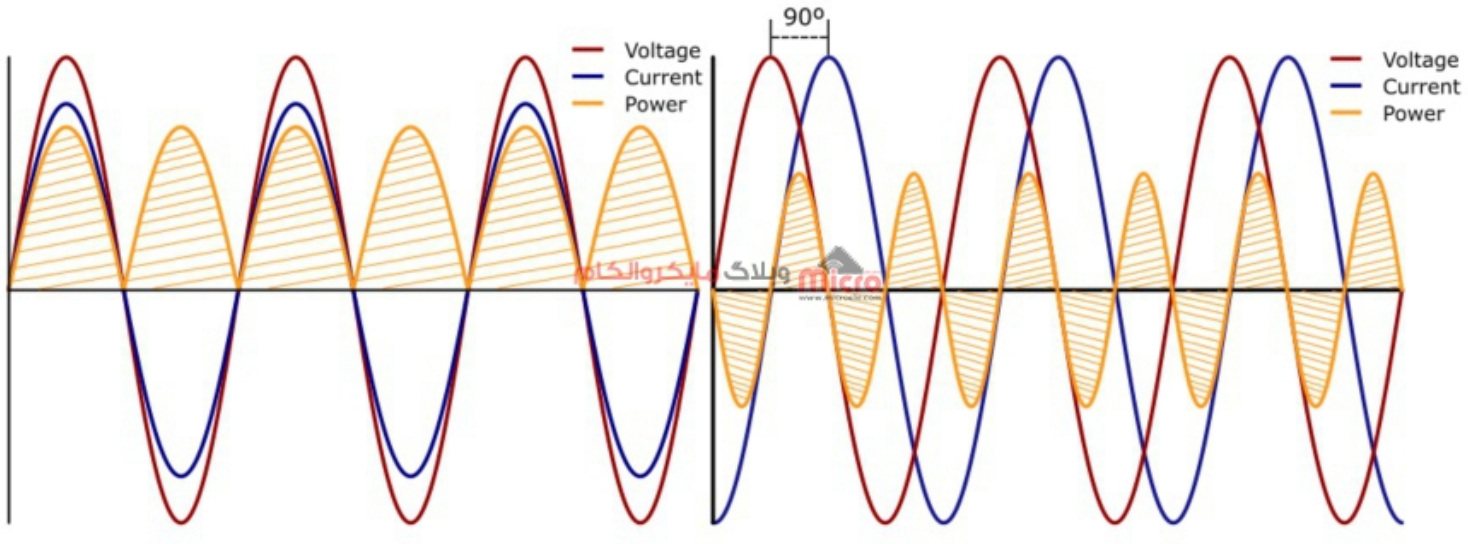
توان اکتیو

همان توان واقعی بوده و با P بیان می‌شود. این پارامتر نشان دهنده انرژی خالصی است که به بار منتقل می‌شود. اگر بار متصل کاملا مقاومتی باشد توان اکتیو بوده و ولتاژ و جریان با یکدیگر هم فاز می‌باشند.

توان راکتیو

اگر بار مانند سلف و خازن راکتیو باشد توان نیز راکتیو خواهد بود و آن را با Q بیان می‌کنند. از این توان برای تولید و حفظ میدان مغناطیسی و الکتریکی در اجزای راکتیو استفاده می‌شود. از همین رو این میدان ها باعث ایجاد اختلاف فاز 90 درجه ای (بصورت ایده آل) خواهد شد. اگر بار خازنی باشد 90 درجه پیش فاز (Lead) و اگر بار سلفی باشد 90 درجه پس فاز (Lag) خواهد بود. در تصویر زیر این موارد قابل بررسی است. به تعبیری دیگر توان کلی تولید شده توسط

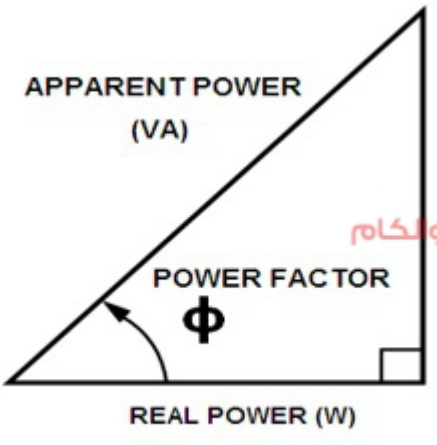
این بار های راکتیو خالص صفر است. زیر توان راکتیو مثبت توسط توان راکتیو منفی خنثی می‌شود.



تصویر سمت چپ هم فاز بودن ولتاژ و جریان تصویر سمت راست اختلاف فاز 90 درجه ولتاژ و جریان

توان ظاهری

در عمل، توان هیچگاه مقاومتی خالص یا راکتیو نمی‌باشد بلکه ترکیبی از این دو است. به این ترکیب توان ظاهری گفته شده و با S بیان می‌شود. از همین رو یک جمع مرتبه دوم بوده و رابطه بین این توان همانند روابط مثلثات است. ضریب قدرت، رابطه بین توان اکتیو و توان ظاهری است و برای اندازه گیری راندمان انتقال توان در مدار کاربرد دارد.



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

$$PF = \frac{P}{S} = \cos(\phi)$$

مثلث ارتباطی توان

ضریب قدرت (Power Factor) یا PF کم حاصل ترکیب دو دلیل جابجایی و اعوجاج است. در ابتدا در بار های خطی به دلیل وجود قطعات راکتیو باعث ایجاد اختلاف فاز بین ولتاژ و جریان می‌شود. اثری که این اختلاف فاز بر ضریب قدرت کلی دارد با ضریب جابجایی تعریف می‌شود که از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$(PF_DISPLACEMENT = Cos(\theta V - \theta I$$

اگر به اصل مطلب خود برگردیم مشکلی که طراحان منبع تغذیه با آن دست و پنجه نرم می‌کنند نه تنها ممکن است اختلاف فاز جریان و ولتاژ باشد بلکه این مهم هم می‌باشد که شکل موج فعلی به قطار پالس تبدیل شده است که عملکرد آن غیر خطی است. این بدان معنا است که حاصل ضرب ولتاژ و جریان که بعنوان توان شناخته می‌شود غیر خطی بوده و ناکارآمد خواهد بود.

محاسبه THD

این مورد زمانی اتفاق می‌افتد که مدار دارای بار غیر خطی مانند لامپ فلورسنت یا پل دیودی باشد. این بار ها جریان لحظه ای زیاد و کوتاه کشیده که باعث ایجاد تعداد زیادی هارمونیک شده و در نتیجه دچار اعوجاج در خروجی خواهد شد. متداول ترین روش برای بیان مقدار اعوجاج سیگنال از طریق بزرگی اعوجاج هارمونیک کل یا Total Harmonic Distortion (اختصارا THD) است. این مورد نشان دهنده نسبت جریان هارمونیک به جریان اصلی است. THD از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum n \neq 1 \, I_n^2 \, RMS}}{I_{fund.\,RMS}} = \frac{RMS\ harmonic\ current}{RMS\ fundamental\ current}$$

فرمول محاسبه *THD*

تاثیر اعوجاج بر ضریب توان کلی از ضریب اعوجاج استفاده می‌شود که مربوط به اعوجاج هارمونیک کلی است و از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$PF_{DISTORTION} = \sqrt{\frac{1}{1+THD^2}}$$

حاصل ضرب ضرایب جابجایی و اعوجاج، ضریب توان را بیان می‌کند که در رابطه زیر آمده است.

$$PF = PF_{DISPLACEMENT} \; x \; PF_{DISTORTION} = COS(\theta_V - \theta_I) \; x \; \sqrt{\frac{1}{1+THD^2}}$$

بررسی تاثیر ضریب قدرت

اغلب اوقات ضریب قدرت زیاد، برروی عملکرد سیستم تاثیر نمی‌گذارد. اما زمانی که جریان به شبکه بازگردد، ضریب توان بد یا ضعیف را با خود به همراه دارد. مثلا اگر یک بار سلفی با ضریب توان خیلی کم (مانند موتور DC همزن برقی یا مخلوط کن)، به شکبه متصل شود؛ ممکن است تلوزیون بدلیل هارمونیک های ایجاد شده توسط موتور دچار پارازیت یا نویز شود. در سطح کلان باعث ایجاد تلفات حرارتی قابل توجه در شبکه و حتی قطعی برق نیز خواهد شد.

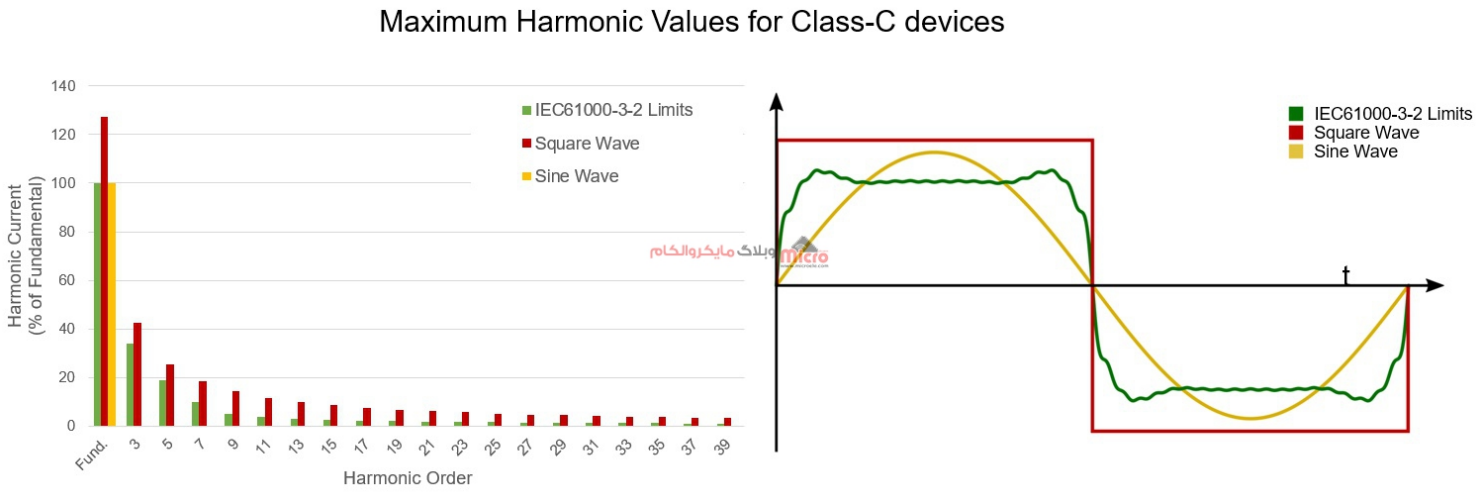
از همین رو تامین کنندگان برق برخی از محدودیت را برای میزان تداخلی که بعضی از دستگاه می‌توانند ایجاد و به شبکه اعمال کنند در نظر گرفته اند. اولین تلاش برای این مورد در سال 1899 همزمان با شروع بکارگیری از روشنایی الکتریکی بود. زمانیکه متوجه شدند تداخل سایر تجهیزات می‌تواند دلیلی بر سوسو زدن لامپ های رشته ای باشد. پس از آن در سال 1978 مقرارتی از طرف کنوانسیون بین المللی الکتروتکنیک IEC (International Electrotechnical Commission) مطرح شد تا اصلاح ضریب توان در محصولات برقی در نظر گرفته شود و تولید کنندگان آن را رعایت نمایند.

از آن زمان کشور های مختلف راه کار ها و مقررات خود را در محدودیت های ضریب توان مطرح کرده اند. مثلا در ایالات متحده دستور العمل Energy Star اینگونه بیان می‌کند که هر تجهیز محاسباتی هنگام عملکرد با حداکثر خروجی

نامی خود باید حداقل دارای ضریب قدرت (PF) معادل 0.9 باشد. یا در اتحادیه اروپا قانون IEC31000-3-2 دقیق تر بوده و دستگاه های الکتریکی را به چهار دسته بندی تقسیم کرده است.

- لوازم خانگی (کلاس A)
- ابزارآلات برقی (کلاس B)
- روشنایی (کلاس C)
- وسایل الکترونیکی (کلاس D)

هر دسته بندی دارای محدودیت های خاصی در حجم نسبی است که هر هارمونیک (تا 39) نسبت به فرکانس پایه می‌تواند داشته باشد. سایر کشور ها نیز دارای قوانین خود هستند. مانند چین با GB/T 14549-93 یا IEEE 519-1992 بین المللی. در تصویر زیر محدودیت های شکل موج ایجاد شده توسط IEC61000-3-2 برای دستگاه های کلاس C هم در حوزه زمان و هم فرکانس بیان کرده مشخص شده است.



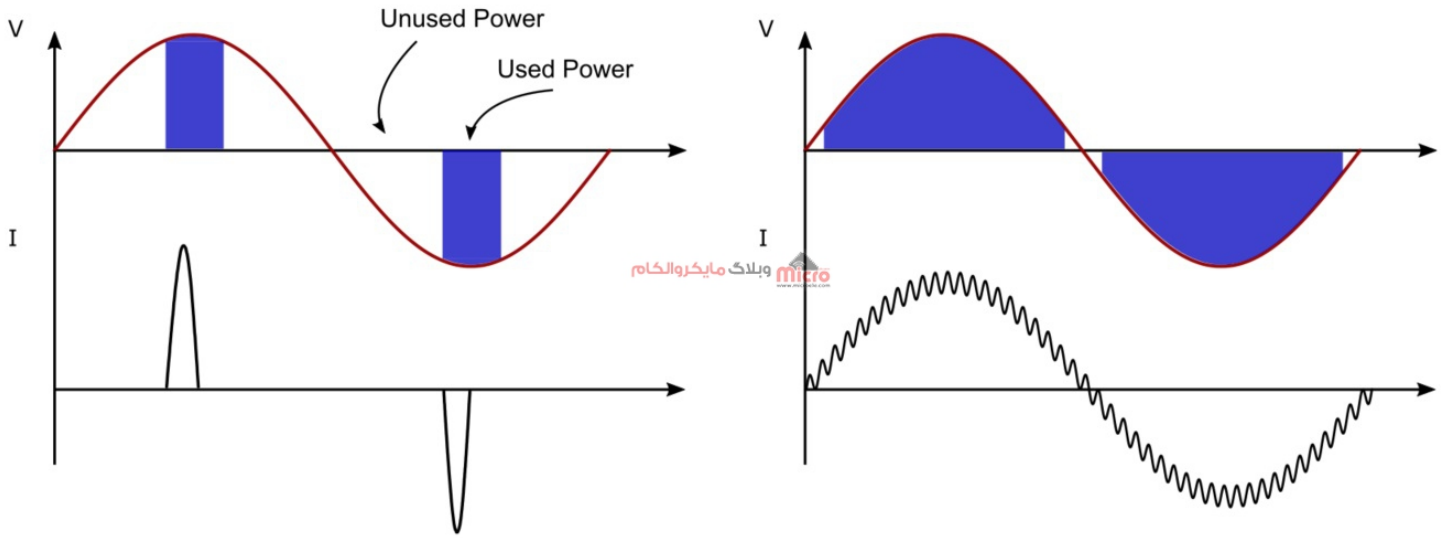
حداکثر مجاز هارمونیک ها برای دستگاه های موجود در کلاس C

اصلاح ضریب توان (PFC)

تصحیح ضریب توان یا PFC مجموعه ای از روش ها است که تولیدکنندگان دستگاه های الکترونیکی از آن برای بهبود ضریب توان دستگاه خود استفاده می‌کنند. همانطور که پیش تر ذکر شد ضریب توان کم به دلیل وجود جابجایی (اختلاف فاز) و اعوجاج در سیگنال ایجاد می‌گردد. مرتفع کردن اثر بد اختلاف فاز بر PF (ضریب توان) تقریبا ساده

است.

خازن باعث ایجاد پیش فاز شدن و سلف باعث پس فاز شدن می‌شود. حال اگر جریان از ولتاژ عقب تر باشد (پس فاز) می‌توان با افزودن خازن با امپدانس مناسب آن را رفع تا ولتاژ و جریان هم فاز شوند. عکس این مورد نیز صادق است.

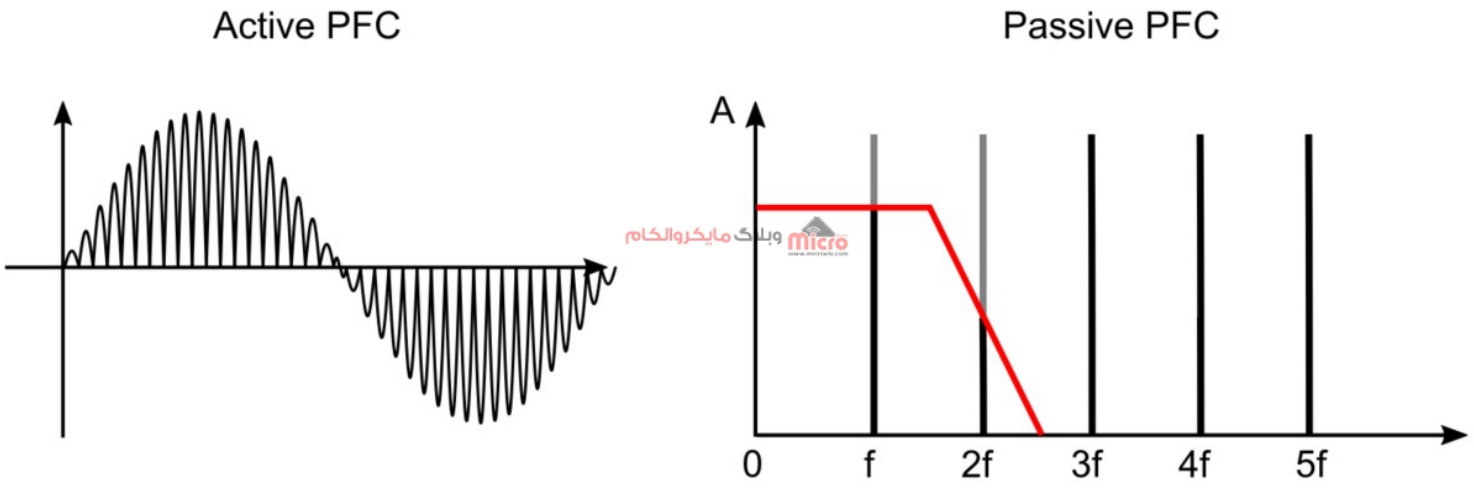


انتقال توان با *PF* کم بدون *PFC* در سمت چپ و انتقال توان با *PF* تصحیح شده و *PFC*

بهبود ضریب اعوجاج یک سیستم که معمولا در مدار های غیرخطی وجود دارد تقریبا پیچیده تر از جبران ضریب جابجایی در مدار های خطی است. برای انجام این کار 2 راه وجود دارد.

1- فیلتر کردن هارمونیک ها

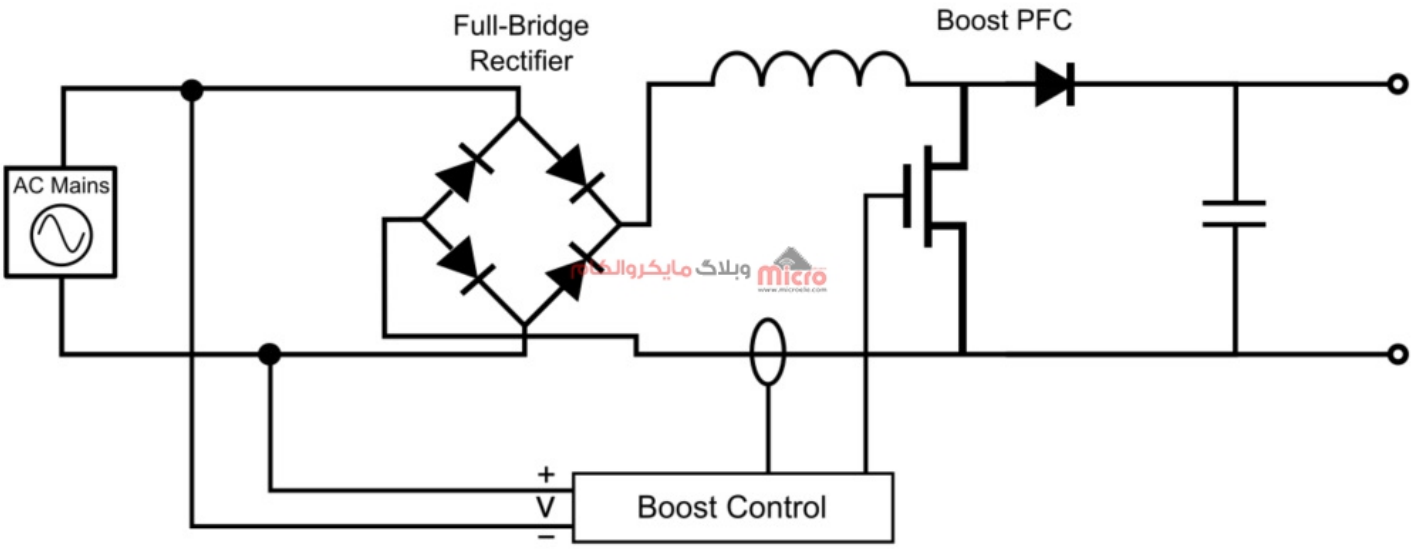
می‌توان با افزودن فیلتر در ورودی باعث کاهش ورود هارمونیک ها شد. به این مورد FPC پسیو گفته و از یک فیلتر پایین گذر برای حذف هارمونیک های فرکانس بالا استفاده می‌شود. بصورت ایده آل این فیلتر فقط فرکانس های 50Hz را عبور می‌دهد (تصویر زیر).



تصویر چپ شکل موج خروجی جریان و تصویر راست پاسخ فرکانسی فیلتر *PFC* پسیو

PFC -2 اکتیو (فعال)

این روش باعث تغییر شکل موج جریان شده و باعث می‌شود با ولتاژ هم فاز گردد. از همین رو هارمونیک ها به فرکانس های بسیار بالاتر منتقل و فیلتر کردن آنها بسیار آسان تر خواهد شد. پر استفاده ترین مدار برای این موارد، مدار تقویت کننده است. این مدار باعث افزایش ولتاژ شده در حالیکه جریان آن را شبیه ترانسفورماتور کاهش می‌دهد. ساده ترین مدار بوستر (تقویت کننده) از سلف، تزانیستور و یک دیود تشکیل شده است.



منبع تغذیه سوئیچینگ *AC-DC* با *FPC* اکتیو

تشریح عملکرد مدار بوستر

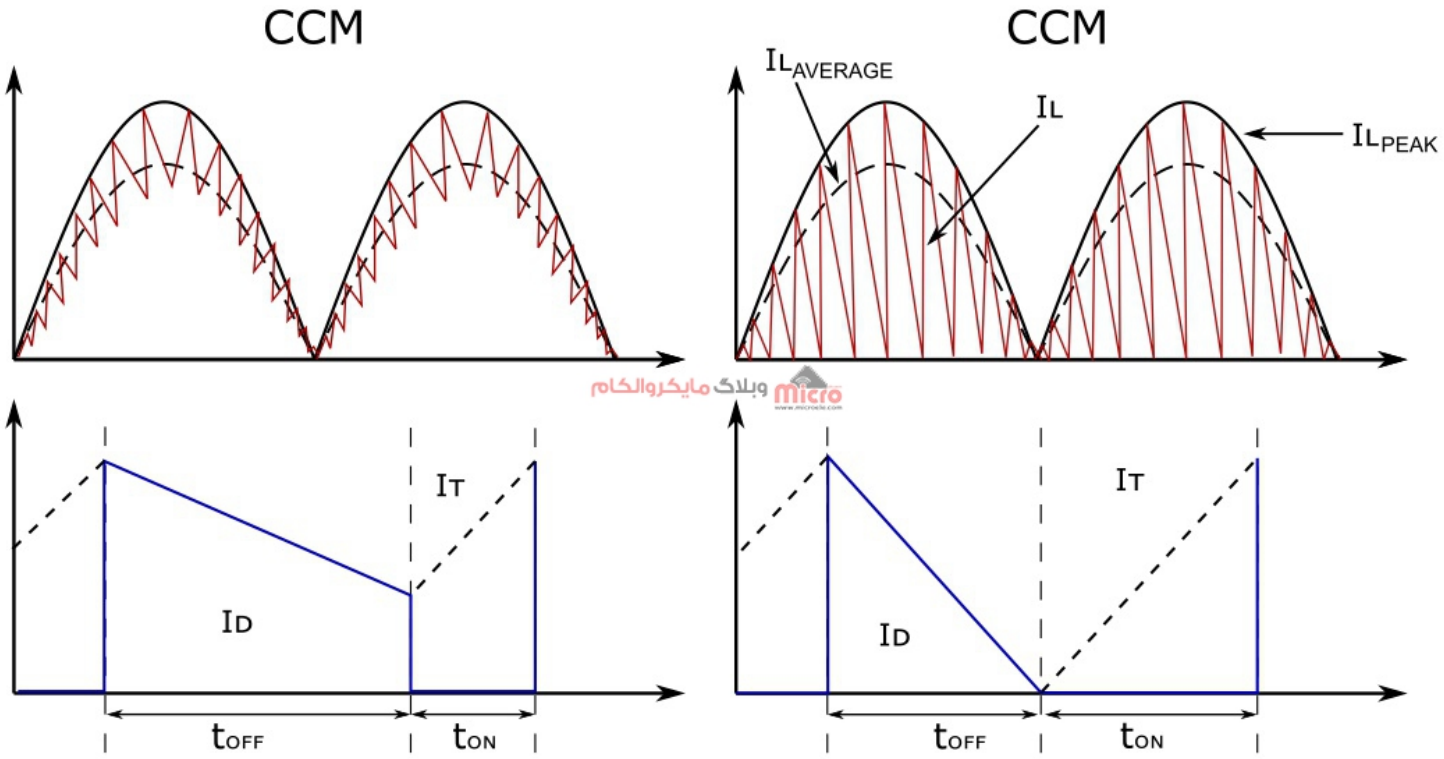
مبدل بوست دارای دو حالت کاری است. در حالت اول هنگامی که عنصر سوئیچ روشن (سوئیچ بسته) شود، سلف توسط ولتاژ منبع (در این مدار ولتاژ خروجی یکسو ساز) شارژ خواهد شد. هنگامی که سوئیچ باز شود سلف جریانی که در حالت بسته بودن سوئیچ در خود ذخیره کرده است را به مدار تزریق کرده و باعث افزایش ولتاژ خروجی می‌شود. این جریان همچنین باعث شارژ کردن خازن شده تا زمانیکه سلف درحال شارژ است، سطح ولتاژ خروجی را حفظ نماید.

حالت CCM

اگر فرکانس سوئیچینگ بالا باشد نه سلف و نه خازن بصورت کامل دشارژ نشده و ولتاژ خروجی همواره از ولتاژ ورودی آن بیشتر خواهد بود. این حالت را حالت هدایت پیوسته یا CCM (Continuous Conduction Mode) گویند. مدت زمانی که سوئیچ بیشتر بسته باشد یا به تعبیر دیگر مدت زمان روشن بودن ترانزیستور (عنصر سوئیچ)، باعث بیشتر بودن ولتاژ در خروجی خواهد شد. اگر دیوتی سایکل به درستی کنترل شود، شکل موج جریان ورودی را می‌توان به شکل سینوسی درآورد.

حالت BCM

همه مبدل های PFC از حالت CCM استفاده نمی‌کنند. با این وجود روش دیگری وجود دارد که تلفات سوئیچینگ را کاهش و دارای هزینه کمتری است. اما PF کمتری خواهد داشت. این روش را حالت هدایت مرزی یا Boundary Conduction Mode (BCM) یا حالت هدایت بحرانی (Critical Conduction) گویند. در این حالت ترانزیستور زمانی سوئیچ می‌شود که سلف کاملا تخلیه شده باشد. تصویر زیر گویای این مطلب است. این را سوئیچینگ جریان صفر یا Zero-current Switching (ZCS) گویند که اجازه می‌دهد دیود پلاریته را خیلی سریع و آسان در مبدل بوست تغییر دهد و باعث کاهش نیاز به قطعات گران قیمت خواهد شد.



تصویر چپ *PFC* با سلف، ترانزستور و دیود در حالت *CCN* تصویر راست حالت *BCM*

مبدل ولتاژ ورودی را دنبال می‌کند لذا جریان خروجی شبیه یک موج سینوسی با فرکانس 50Hz خواهد بود. با این وجود باز هم شکل موج فعلی سینوسی خالص نبوده و دارای تعداد زیادی هارمونیک خواهد بود. از آنجا که این هارمونیک ها مضربی از فرکانس سوئیچینگ می‌باشند و بیشتر از فرکانس 50Hz (بیشتر از 50 و 100KHz) است راحت تر فیلتر خواهند شد. از همین رو باعث افزایش قابل توجه ضریب توان (PF) خواهد شد. برای همین است برخی از منابع تغذیه سوئیچینگ به PF با مقدار 0.99 دست پیدا می‌کنند.

توپولوژی های پایه برای PFC فعال (Active)

در سال های اخیر استفاده از توپولوژی های سوئیچینگ افزایش یافته و مدار ها و روش ها برای مطابقت با آنها نیز توسعه داده شده است. استاندارد هایی مانند IEEE Std 519 و IEC1000-3-2. برای رسیدن به این هدف، از روش و تکنیک های سوئیچینگ فرکانس بالا برای شکل دادن شکل موج جریان ورودی بطور موفقیت آمیز استفاده می‌کنند. اساسا در

تصحیح کننده PF فعال (Active) از شش توپولوژی یا انواع آن برای انجام PFC استفاده می‌شود.

- Buck
- Boost
- Buck-Boost
- Cuk
- Sepic
- Zeta

نتیجه گیری

در این مطلب بصورت مختصر به بیان و معرفی مبدل های PFC و کاربرد آنها در مدارت منابع تغذیه سوئیچینگ پرداخته شد. همچنین روش های آن به اختصار بیان شد. بدون شک بحث طراحی و استفاده از آن تخصصی بوده و مستلزم صرف زمان و دقت زیاد جهت یادگیری آن است که در یک مطلب نمی‌توان به آن پرداخت.

امیدوارم از این مطلب کمال بهره را برده باشید. در صورت داشتن هرگونه نظر یا سوال درباره این مطلب یا تجربه مشابه اون رو در انتهای همین صفحه در قسمت دیدگاه ها قرار بدید. در کوتاه ترین زمان ممکن به اون ها پاسخ خواهم داد. اگر این مطلب براتون مفید بود، اون رو به اشتراک بگذارید تا سایر دوستان هم بتوانند استفاده کنند. همینطور میتونید این مطلب را توی اینستاگرام با هشتگ #microelecom به اشتراک بگذارید و پیج مایکروالکام (@microelecom) رو هم منشن کنید.