



طراحی و ساخت فیلتر اکتیو قدرت جهت حذف هارمونیک

رضا قاضی

دانشگاه فردوسی مشهد

چکیده:

با توسعه روزافزون سیستم های الکترونیکی قدرت در صنعت از قبیل منابع تغذیه بدون وقفه کنترل دور بسته موتورهای الکتریکی، کوره های الکتریکی، کامپیوترها و سایر بارهای غیرخطی باعث افزایش هارمونیک در شبکه های توزیع و انتقال گردیده است. افزایش میزان هارمونیک و نیرات نامطلوب آنها یکی از مشکلات سیستم برق رسانی محسوب شده و به همین دلیل بر طبق استاندارد محدودیت هایی بر میزان آن در غالب ضریب اغتشاش هارمونیکی (THD) اعمال گردیده است. بنابراین شناسایی انواع هارمونیک ها و روشهای مطلوب حذف و کاهش آنها تا سطح مجاز ضروری است. روشهای اولیه حذف هارمونیک بر کاربرد فیلترهای غیرفعال استوار بود. این وسایل شامل چندین مدار تشدید سری است که بصورت موازی با بار قرار می گیرد و هریک در مقابل هارمونیک مشخص امپدانس کمی را ارائه می کند و باعث می شود که جریان هارمونیکی مدار خود را از این طریق ببندد و از منبع عبور ننماید. باتوجه به معایب و مشکلات این نوع فیلترها، متعاقباً فیلترهای با کیفیت بالاتر تحت عنوان فیلترهای اکتیو (فعال) مطرح گردیدند که نسبت فیلترهای غیرفعال امتیازات فراوانی دارند. در این مقاله بخشی از پروژه تحقیقاتی فیلتر اکتیو قدرت که مربوط به طراحی و ساخت یک نمونه آزمایشگاهی فیلتر فعال است، بررسی و تشریح می گردد. نتایج سایر بخش ها، پروژه قبلاً طی چندین مقاله در کنفرانس برق ارائه گردیده است که در متن به آنها اشاره گردیده است.

۱- مقدمه:

با پیشرفت روزافزون وسایل الکترونیکی قدرت و به کارگیری آنها در کنترل بارهای صنعتی و موتورهای الکتریکی، به شکل مبدل‌های قدرت استاتیکی (یکسو کننده ها، معکوس کننده ها و سایر وسایل سوئیچینگ) به صورت منابعی که شکل موج جریان را از سینوس خالص منحرف می نمایند مشکلاتی را برای شبکه توزیع ایجاد می کنند. بارهای غیرخطی نظیر کوره های الکتریکی، منابع تغذیه لامپهای فلورسنت و اثرات غیرخطی ناشی از اشباع ماشین های الکتریکی و ترانسفورماتورهای توزیع نیز از عوامل شناخته شده تولید هارمونیک می باشند. اینگونه بارها در برابر جریان ac امپدانس غیرخطی ارائه می نمایند و در نتیجه جریان از حالت سینوس خارج می شود و به زبان تحلیل فوریه این جریانه‌های غیر سینوسی دارای مولفه های غیر اصلی یا هارمونیک می گردند. یعنی اینکه این موج توسط سری فوریه به امواج سینوسی با



فرکانس اصلی و با فرکانسهای دیگر که ضرایب صحیحی از فرکانس موج اصلی است تجزیه می شوند. موج با فرکانس های اخیر امواج هارمونیک نامیده می شوند. مولفه های هارمونیک بر تجهیزات الکتریکی اثرات نامطلوب و مخربی دارند باتوجه به اثرات نامطلوب آنها موسسات مختلف استاندارد کوشیده اند تا حد مجازی را برای آن تعریف نمایند در نتیجه موسسات تولید کننده برق موظفند این استاندارد را در تامین برق مشترکین فراهم نمایند و حقیقت یکی از پارامترهایی که باید رعایت گردد تا برق مشترکین دارای کیفیت مطلوب باشد، کاهش میزان اعوجاج شکل موج تا حد مجاز است. در این ارتباط موسسات تولید کننده برق لازم است به نحوی از مصرف کننده هایی که تولید هارمونیک و اعوجاج می نمایند باخبر گردند و آنها را ملزم به رفع این نقص نمایند. استفاده از فیلترهای اکتیو قدرت (Active Power Filtr) یکی از روشهایی است که به کمک آن می توان هارمونیک را حذف و یا تا سقف مجاز کاهش داد و مانع از انتشار آن در شبکه گردید تا مشترکین دیگر و تجهیزات سیستم از عوارض آن مصون بمانند.

۲- مفهوم اعوجاج هارمونیک:

شکل موج ولتاژ و یا جریان اعوجاج یافته پیرودیک را می توان به صورت مجموع جملاتی نشان داد که فرکانس هر یک بصورت مضرب صحیحی از فرکانس اصلی بوده و دامنه و فاز آنها تغییر می کند درحقیقت بنا بر قضیه فوریه می توان نوشت:

(۱)

$$m(t) = a_0 + \sum_{n=1,2,3,\dots} a_n \cos(n\omega t + q_n)$$

که در آن دامنه هارمونیک a_n و n ام و q_n زاویه فاز آن است.

موج با فرکانس اصلی هارمونیک مرتبه اول و بقیه هارمونیکهای مرتبه دوم، سوم و... می باشند. جهت مقایسه امواج اعوجاج یافته با موج های سینوسی خالص شاخص های مختلفی را تعریف کرده اند این شاخص ها شامل ضریب هارمونیک (HF)، ضریب اعوجاج کلی (THD)، ضریب اعوجاج (DF)، ضریب دامنه (MF)، ضریب انحراف ولتاژ (WDF)، ضریب نفوذ تلقی (TIF)، ضریب پیک (CF)، هارمونیک کمترین مرتبه (LOH) می باشد.



یکی از شاخص‌های مهم در تعیین میزان اعوجاج هارمونیک، ضریب اعوجاج کلی یا THD است که به صورت زیر تعریف می‌شود.

(۲)

$$THD = \sqrt{\sum a_n^2} / a_1^2$$

$$n = 2, 3, 4, \dots$$

این ضریب که معرف میزان تمامی مولفه‌های هارمونیکی موجود در ولتاژ و یا جریان است حائز اهمیت می‌باشد و نایستی از میزان معینی (۵ درصد از شبکه‌های توزیع) تجاوز نماید.

۳- اثرات نامطلوب هارمونیک:

تجهیزاتی که در معرض آثار نامطلوب هارمونیک قرار دارند عبارتند از: مبدل‌های کنترل‌کننده، سرعت‌موتورهای ac و dc موسوم به (ASD) به خازن‌های موازی اصلاح‌کننده ولتاژ و یا ضریب قدرت، کلیدهای قدرت (CB) و فیوزها، هادی‌های انتقال انرژی، وسایل الکتریکی (وسایل نیمه‌هادی)، وسایل روشنایی، وسایل اندازه‌گیری، رله‌های حفاظتی، ماشین‌های الکتریکی، ترانسفورماتورهای قدرت و خطوط مخابراتی، اثرات هارمونیک‌ها بر روی این وسایل و تجهیزات متفاوت است لیکن می‌توان آنها را در سه دسته کلی شامل اثرات گرمایی، اثرات عایقی و اثرات ناشی از عملکرد نامطلوب تجهیزات الکتریکی تقسیم بندی کرد. این آثار نامطلوب تا حدودی در مرجع ۱ تشریح گردیده است. علی‌رغم تلاش‌هایی که در زمینه طراحی بهتر منابع هارمونیک را انجام گرفته است تا اینکه هارمونیک کمتری وارد شبکه نمایند. لیکن هنوز برخی بارهای غیر خطی بهتر در اندازه‌های کوچک و بزرگ وجود دارند که باعث تزریق هارمونیک در شبکه می‌گردند همچنین در شرایط گذرا نظیر وقوع اتصال کوتاه و عملیات کلیدزنی جریان‌ها از شکل سینوسی خارج می‌شوند و باعث به وجود آمدن هارمونیک در شبکه می‌گردند. بنابراین بایستی اقداماتی در جهت کنترل آنها صورت گیرد. در نتیجه استفاده از وسایلی نظیر فیلترها اجتناب ناپذیر است.

برای کنترل هارمونیک‌ها می‌توان از فیلترهای پیو و اکتیو کمک گرفت. در کاربرد عملی فیلترهای پیو با محدودیت‌های مختلفی نظیر تفرانس سلف و خازن‌ها، تغییر ظرفیت خازن‌ها در اثر درجه حرارت و در نتیجه عدم انطباق فرکانس تشدید با فرکانس‌های هارمونیک، مواجه هستیم. در فیلترهای اکتیو این گونه نقایص و محدودیت‌ها مرتفع گردیده و در نتیجه کار بر آنها جهت حذف و یا کاهش هارمونیک در شبکه مورد توجه قرار گرفته است.



۴- فیلتر اکتیو قدرت:

روشهایی که از دیرباز جهت حذف هارمونیک‌ها مورد استفاده قرار می‌گرفته است مبتنی بر فیلترهای پیو بوده است. این فیلترها از مدارهای تشدید سری تشکیل می‌شوند که با بار بصورت موازی قرار می‌گیرند و هریک بر روی فرکانس تنظیم می‌شوند و هارمونیکهای بار بجای عبور از منبع، مسیر خود را از طریق این فیلترها انتخاب می‌کنند. باتوجه به تنوع هارمونیک‌ها، تعداد آنها افزایش می‌یابد که افزایش هزینه، افزایش تلفات و همچنین امکان وقوع تشدید در مجموعه هریک از بار، فیلتر و خط انتقال را بدنبال دارد. فیلترهای اکتیو عاری از نقایص فوق هستند و کاربرد آنها در دهه اخیر بیشتر مدنظر قرار گرفته است. شکل ۱ شماتیک یک فیلتر اکتیو را نشان می‌دهد. اساس کار فیلتر اکتیو به این صورت است که ابتدا بایستی سیستم شناسایی کننده آن، مولفه‌های زاید (هارمونیک) جریان بار که یک جریان غیرخطی و محتوی مولفه‌های هارمونیک است، شناسایی نماید. آنگاه سیستم اینورتر فیلتر همراه با مدارهای کنترلی مربوطه بایستی مبادرت به تولید مولفه‌های زاید جریان نماید و آنرا به شبکه تزریق کند تا به این طریق مولفه‌های زاید از خط و منبع حذف گردد. در بخش شناسایی روشهای مختلفی مطرح است که عمده می‌توان آنها را به دو دسته کلی تقسیم بندی کرد. دسته اول روشهایی است که در آنها اثر هر کدام از مولفه‌های زاید جریان بار، بر روی مولفه‌های مختلف توان مورد بررسی قرار گرفته و از این طریق مولفه‌های هارمونیک شناسایی می‌شوند. این روش که در سال ۱۹۸۴ توسط Akagi ارائه شد مبتنی بر شناسایی هارمونیک با استفاده از تئوری توان راکتیو لحظه‌ای است [۲]. دسته دوم روشهایی است که صرفنظر از مفاهیم توان و اینکه هر مولفه زاید از جریان منجر به چه مولفه‌ای از توان خواهد شد به جریان بار به دید یک سیگنال نگاه می‌کند و برای جداسازی مولفه زاید، به استفاده از یک فیلتر بسیار تیز مولفه اصلی جریان از جریان بار جدا می‌شود در نتیجه سایر مولفه‌ها، بصورت مولفه‌های زاید شناسایی می‌شوند. در مورد انتخاب نوع فیلتر (دیجیتال یا آنالوگ)، مشخصه فرکانس آن (پایین گذر یا میان گذر)، بررسی لازم انجام گرفته است و نشان داده شده است که کاربرد فیلتر میان گذر بر فیلتر پایین گذر رجهان دارد [۳]. همچنین در این بررسی نشان داده شده است که فیلتر دیجیتالی IIR جهت فیلتر اکتیو مناسب تر است. باید خاطر نشان کرد که براساس بررسی‌های انجام گرفته [۳] روش Akagi در شرایط غیر سینوس بودن ولتاژها قادر به شناسایی کامل هارمونیک‌ها نمی‌باشد. از این رو روش جدیدی در شناسایی هارمونیک‌ها با استفاده از فیلتر دیجیتالی پیشنهاد و نتیجه این بررسی در مقاله‌ای ارائه گردیده است [۴]. موضوع دیگری که در فیلترهای اکتیو حائز اهمیت است آرایش فیلتر یعنی ترکیب و نحوه قرار گرفتن آن در مدار است. موضوع مهم دیگر در ارتباط با فیلترهای اکتیو، انتخاب نوع اینورتر و استراتژی مولاسیون pwm است که مورد بررسی و نتایج آن ارائه شده است [۳].

۵- طراحی و ساخت فیلتر اکتیو آزمایشگاهی:

باتوجه به مطالعات انجام گرفته یک نمونه آزمایشگاهی فیلتر اکتیو در رنج ۷۰ ولت ساخته شده است که قادر است هارمونیک‌های با خواسته حاصل از بار را حذف نماید. در سیستم طراحی شده، بمنظور شناسایی هارمونیک‌های زاید جریان بار از فیلتر آنالوگ و دیجیتال بردر استفاده شده است. فیلتر میان گذر از نوع باترورث درجه ۲ طراحی شده است. با استفاده از یک رگولاتور جریان و فیلتر آنالوگ دیجیتالی IIR، یک فیلتر اکتیو طراحی و نتایج عملی آن مورد بررسی قرار گرفته است.

۵-۱- رگولاتور جریان pwm:

جهت تولید جریان تزریقی لازم به شبکه جهت حذف مولفه‌های زاید هارمونیک از اینوری مطابق شکل ۲ استفاده شده است بمنظور درایو هر یک از ترانزیستورهای قدرت از مدار شکل ۳ استفاده شده است. در این راستا سعی شده است تا حداکثر ملاحظات علمی جهت حداکثر استفاده از سرعت سوئیچینگ عناصر و کاهش تأخیر ناشی از آنها به عمل آید. شکل ۴ مدار مولد موج حاصل، نشان می‌دهد که قابلیت تولید موجهای مثلثی دنداناره ای را با فرکانس قابل تنظیم بین ۵ تا ۲۰ کیلوهرتز دارد. شکل ۵ مدار اندازه‌گیری جریان اینورتر را نشان می‌دهد. اندازه‌گیری جریان توسط اندازه‌گیری ولتاژ دوسر مقاومت سری شده با خروجی صورت گرفته است. شکل ۶ مدار مقایسه‌کننده و کنترل‌کننده و مدولاتور pwm بکار رفته را نشان می‌دهد.

جریان خروجی با جریان مرجع مقایسه شده و سپس این سیگنال توسط یک مقاومت‌کننده و تقویت شده و جهت مقایسه با موج حاصل به مقایسه‌کننده اعمال می‌شود. پالسهای خروجی همان سیگنالهای pwm است که مدار درایور تراتیور اعمال می‌شود.

۵-۲- مدار شناسایی هارمونیک:

جهت شناسایی هارمونیک‌های جریان بار، مدار مشابه مدار اندازه‌گیری جریان اینورتر استفاده می‌شود. این جریان از فیلتر آنالوگ میان‌گذری که فرکانس 50HZ را جدا می‌کند عبور می‌کند (شکل ۷). خروجی شکل موج سینوس با فرکانس 50HZ است که پس از مقایسه با جریان بار هارمونیک‌های زاید شناسایی می‌شوند. می‌توان در این قسمت از فیلتر دیجیتال که دارای مزایای زیادی است جهت شناسایی استفاده کرد. بلوک دیاگرام سخت افزار فیلتر در شکل ۸ نشان داده شده است و قسمتهای مختلف بلوک دیاگرام در شکل‌های ۹ الی ۱۱ نشان داده شده است. فلوجارت نرم افزار آن در شکل ۱۲ آمده است.



۵-۳- بررسی عملکرد فیلتر اکتیو:

جهت بررسی عملکرد فیلتر ساخته شده از یک بار غیرخطی که در واقع یک یکسو کننده است استفاده شده است. (شکل ۱۳) شکل موج جریان قبل از جبران سری (موج مربعی) و پس از جریان سازی در شکل ۱۴ نشان داده شده است. همچنین در شکل ۱۵ جریان بار و جریان ساخته شده توسط اینورتر را را نشان می دهد.

۵-۴- نتیجه گیری:

منابع تولید هارمونیک و اثرات نامطلوب آنها مورد توجه قرار گرفته است. روشهای مختلف شناسایی هارمونیک بررسی و مزایا و معایب روشها تشریح گردید. روشهای ایجاد جریانهای مورد نظر توسط اینورتر و کنترل آنها مطالعه گردید. براساس مطالعات انجام گرفته یک فیلتر فعال آزمایشگاهی طراحی و ساخته شد. و عملکرد آن جهت حذف هارمونیک مورد آزمایش قرار گرفت.

[1] Effect of Harmonics on Equipment

IEEE Task Force on the effects of

IEEE Trans. On Power Delivery vol-8 no.2 1993

[2] H-Akagi at _____ "Instantaneous Reactive power compensators comprising Switching Devices Without Energy Storage Components"

IEEE Trans on Ind . App. Vol. IA-20, no.3 1984

۶- مراجع :

[۳] تولیت حمید - قاضی رضا - رفیعی سیدمحمدرضا "بررسی، طراحی و ساخت فیلتر فعال جهت حذف هارمونیکها"

گزارش پروژه تحقیقاتی، کمیته تحقیقات برق خراسان ۱۳۷۵

[۴] رفیعی سیدمحمدرضا - تولیت حمید - قاضی رضا " روش جدید در شناسایی هارمونیک ها با استفاده از فیلترهای

دیجیتالی " سومین کنفرانس مهندسی برق ایران - دانشگاه علم و صنعت ایران ۱۳۷۴