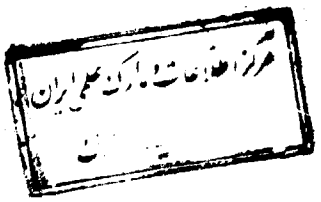
٣٣٢٢٢

بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده برق و کامپیوتر

۱۳۸۰/۱۱/۱۰



روشهای مختلف استفاده از فیلتر اکتیو سری برای حذف هارمونیکهای شبکه

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق - قدرت

حسین قلی‌زاده نرم

۱۰۰۸۴

استاد راهنما

دکتر حمید رضا کارشناس

۱۳۷۸

۳۳۲۲۲

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده برق و کامپیوتر

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق — قدرت آقای حسین قلی‌زاده نرم

تحت عنـوان

روشهـای مختلف استفاده از فیلتـر اکتیـو سـری برای حذف هارمونیکهای شبکه

در تاریخ ۱۳۷۸/۴/۹ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهائی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان نامه — دکتر حمید رضا کارشناس

۲- استاد مشاور پایان نامه — دکتر اکبر ابراهیمی

مسئول تحصیلات تکمیلی دانشکده — دکتر علیمحمد دوست حسینی

سپاسگزاری

الحمد لله الذی هدینا لهذا و ما کنّا لنهتدی لولا ان هدینا الله

پس از حمد و سپاس هدی مهربان. یگانهٔ هستی از پدر و مادر گرامیم که از ابتدا تـ کنون محیطی مناسب برای تحصیل این حقیر فراهم کرده و همیشه دعای خیرشان همراهم بوده خالصانه و خاضعانه تشکر می‌نمایم.

از آقای دکتر کارشناس که در تمامی مراحل انجام پروژه همراه بوده و راهنماییهای بسیار مفیدشان همواره راهگشا، صمیمانه قدردانی و سپاسگزاری می‌کنم. همچنین از آقای دکتر اکبر ابراهیمی استاد مشاور پایان‌نامه که راهنماییهای زیادی در انجام و مخصوصا نوشتن پایان‌نامه داشتند و نیز از آقایان دکتر محمد ابراهیمی . دکتر مقبلی و دکتر منتظری نمایندهٔ تحصیلات تکمیلی که داوری این پایان‌نامه را به عهده داشتند تشکر می‌کنم.

از منشی دفتر دانشکده خانم میرزائی و تایپیست دانشکده خانم طباطبائی بدلیل همکاریهایشان در طول دورهٔ کارشناسی ارشد سپاسگزاری می‌نمایم.

تقدیم به:

حضرت **نورالثّقلین(عج)**

و

تمامی سربازان مخلص آن حضرت

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فهرست مطالب	شش
چکیده	۱
فصل اول : مقدمه	
مقدمه	۲
فصل دوم : فیلترهای اکتیو	
۲-۱- مقدمه	٦
۲-۲- اصول عملکرد فیلترهای اکتیو	۷
۲-۲-۱- فیلتر اکتیو شنت با مولد هارمونیکی جریان	۷
۲-۲-۲- فیلتر اکتیو شنت با مولد هارمونیکی ولتاژ	۸
۲-۲-۳- فیلتر اکتیو سری با مولد هارمونیکی ولتاژ	۸
۲-۲-۴- فیلتر اکتیو سری با مولد هارمونیکی جریان	۹
۲-۳- تشخیص هارمونیکها از موج اصلی	۱۰
۲-۳-۱- روش تبدیل کن کوردیا	۱۰
۲-۳-۲- استخراج دامنه و فاز اصلی	۱۲
۲-۳-۳- روش تبدیل فوریه دیجیتال	۱۳
۲-۳-۴- تخمین دامنه و فاز با فرض ثابت بودن فرکانس (پایه) توسط الگوریتم وفقی	۱۴
۲-۴- مزایا و معایب فیلتر اکتیو	۱۵
۲-۵- نتیجه گیری	۱٦

فصل سوم : فیلتر اکتیو سری بر مبنای اینورتر نوع جریان

۳-۱- مقدمه ۱۸

۳-۲- ساختار و بلوک دیاگرام سیستم ۱۹

۳-۲-۱- منبع توان ۲۰

۳-۲-۲- امپدانس خط ۲۰

۳-۲-۳- بار غیرخطی ۲۱

۳-۲-۴- بخش قدرت فیلتر اکتیو سری ۲۱

۳-۲-۵- تشخیص دهنده هارمونیک اصلی ۲۲

۳-۳- اصول عملکرد فیلتر اکتیو سری پیشنهادی ۲۳

۳-۴- مفهوم مدولاسیون پهنای پالس در CTI ۲۴

۳-۵- الگوی تولید سیگنال PWM در CTI ۲۵

۳-۵-۱- تکنیک PWM حذف انتخابی هارمونیک ۲۷

۳-۵-۲- تکنیک PWM سینوسی ۲۷

۳-۵-۳- مقایسه و انتخاب ۳۰

۳-۶- نتیجه گیری ۳۰

فصل چهارم : مدل لحظه ای و ماندگار فیلتر اکتیو سری بر مبنای اینورتر نوع جریان

۴-۱- مقدمه ۳۲

۴-۲- فرضیات ساده سازی مدار ۳۳

۴-۳- تکنیک متوسط گیری محلی برای مدل کردن مدارات سوئیچینگ ۳۴

۴-۳-۱- مفهوم متوسط محلی یک سیگنال ۳۴

۴-۴- تحلیل دینامیکی اینورتر نوع جریان ۳۵

۴-۴-۱- مدل لحظه ای اینورتر ۳۵

۲-۵- ساختار و استراتژی کنترل ۳۸
۲-۵-۱- انتخاب کنترل کننده اینورتر ۳۹
۲-۵-۲- طراحی کنترل کننده انتخابی ۴۰
۲-۶- مدل ماندگار اینورتر نوع جریان ۴۱
۲-۶-۱- روابط اساسی بین طرف DC و AC اینورتر ۴۲
۲-۶-۲- محاسبه ولتاژ DC ۴۵
۲-۶-۳- تحلیل هارمونیکی ولتاژ و جریان ۴۶
۲-۶-۴- محاسبه جریان DC ۴۸
۲-۷- محاسبه خازن فیلتر خروجی ۴۹
۲-۸- نتیجه گیری ۵۰

فصل پنجم : شبیه سازی کامپیوتری سیستم پیشنهادی

۵-۱- مقدمه ۵۱
۵-۲- سیستم ۱ ..... ۵۳
۵-۳- سیستم ۲ ..... ۶۰
۵-۴- سیستم ۳ ..... ۶۴
۵-۵- نتیجه گیری ۶۶

فصل ششم : کاربردهای دیگری از فیلتر اکتیو سری

۶-۱- مقدمه ۶۸
۶-۲- فیلتر پسیو شنت ۶۹
۶-۳- بررسی تشدید موازی فیلتر پسیو شنت ۷۳
۶-۴- جلوگیری از تشدید موازی توسط فیلتر اکتیو سری ۷۵
۶-۴-۱-فیلتر اکتیو سری به عنوان مقاومت مجازی ۷۶

٦-٢-٢- پیکره سیستم ٧٧

٦-٥- کاربردهای دیگری از فیلتر اکتیو سری ٨١

٦-٦- نتیجه گیری ٨٥

فصل هفتم : نتیجه گیری و پیشنهادات

٧-١- نتایج ٨٦

٧-٢- پیشنهادات ٨٨

مراجع ٨٩

چکیـــده

همزمان با پیدایش اولین یکسوکننده‌های قوس جیوه‌ای، بارهای غـیرخطی متصـل بـه شـبکه افزایـش یـافت. اتصـال بارهای غیرخطی به شبکه باعث اعوجاج ولتاژ شبکه و در نتیجه کاهش کیفیت شبکهٔ قدرت می‌گـردد. وجـود هارمونیکهـای ناخواسته در شبکه باعث مشکلاتی از قبیل تلفات خطـوط انتقـال، کـاهش قـدرت مفیـد قـابل انتقـال، اختـلال در کـارایی سیـستمهای مخابراتی و ... می‌شود. با افزایش هارمونیکها در شبکه، استانداردهای مختلفـی بـرای بهبـود کیفیـت شـبکهٔ قدرت معرفی گردید. در این استانداردها، محدودیتهایی بر تزریق هارمونیک توسط بارهای غیرخطی به شـبکه اعمـال شـده است. مشکلات ذکر شده در بالا باعث گردید که از همان ابتدا روشـهای مختلفـی بـرای حـذف هارمونیکهـا پیشـنهاد شـود. ابتدائی‌ترین و مرسوم‌ترین روش برای این منظور استفاده از فیلترهای پسـیو LC می‌باشـد. بـا پیشـرفت تکنولـوژی سـاخت قطعات نیمه‌هادی قدرت، فیلترهای اکتیو مورد توجه و استفاده قرار گرفتند. در این فیلترها با تزریق مناسب ولتـاژ/ جریـان، اثر بارهای غیرخطی کاهش داده می‌شود.

در این پروژه پس از بررسی مقدماتی انواع ساختارهای مختلف فیلترهای اکتیو، یک نوع خـاص از فیلـتر اکتیـو سـری پیشنهاد و تجزیه و تحلیل شده است. فیلتر اکتیو سری بررسی شده بر مبنای اینورتر نـوع جریـان می‌باشـد. بـرای طراحـی اجزاء مختلف بخش قدرت و کنترل فیلتر، مدل لحظه‌ای و ماندگار فیلتر بدست آمده است. سیستم پیشنهادی در سه مثـال (سیـستم) مختلف شبیه‌سازی شده و نتایج مربوط به هر یک آورده شده است. این شبیه‌سـازیها کـارایی فیلـتر پیشـنهادی را در حذف هارمونیک ولتاژ از شبکه نشان می‌دهند. علاوه بر این دو کاربرد دیگر از فیلتر اکتیو سری نـیز مـورد بررسـی قـرار گرفته است. کاربرد اول استفادهٔ ترکیبی از فیلتر پسیو شنت و فیلتر اکتیو سـری را نشـان می‌دهـد. در ایـن کـاربرد، فیلـتر بصورت یک مقاومت مجازی در برابر جریانهای هارمونیکی عمل کرده و مـانع از تشـدید مـوازی بیـن فیلـتر پسـیو شـنت و امپدانس شبکه و خط انتقال که بزرگترین مشکل استفاده از فیلتر پسیو شنت می‌باشد، می‌شود. شبیه‌سازیهای این سیستم نشان می‌دهد که با وجود فیلتر اکتیو سری، عبور جریانهای هارمونیکی از خط انتقال کاهش چشـمگیری داشـته اسـت. بـه بیان دیگر، فیلتر اکتیو سری باعث مجزا شدن فیلتر پسیو شنت از امپدانس منبع و خط انتقال شده است.

کاربرد دوم فیلتر اکتیو سری که از مزایای خاص این نوع فیلتر می‌باشد، بررسی و شبیه‌سازی شده است. ایـن مزیـت، خصیت مجزاسازی بار حساس به هارمونیک از بارهای غیرخطی متصل به شبکه می‌باشد. در این کاربرد، فیلتر اکتیو سـری ولتاژ را فقط برای بار حساس به هارمونیک عاری از اعوجاج می‌نماید.

فصل اول

مقدمه

از همان سالهای ابتدایی گسترش شبکه‌های قدرت، مهندسین با مشکلات ناشی از هارمونیکهای تولیدی توسط ماشینهای گردان و ترانسفورماتورهای اشباع شونده در گیربوده‌اند. شاید آقای اشتین‌متز[1] یکی از معروفترین مهندسینی باشد که هارمونیکها را مورد مطالعه قرار داد و نتایج تحقیقات خود را در مقاله‌ای در AIEE[2] در سال ۱۹۰۰ به چاپ رسانید. با ظهور سیستمهای الکترونیک قدرت از قبیل یکسوکننده‌ها و سایر بارهای غیرخطی، مسئلهٔ هارمونیکها ابعاد تازه‌تر در عین حال پیچیده‌تری پیدا کردند و اثرات منفی آنها بیشتر آشکار گردید.

وجود هارمونیکهای ناخواسته در شبکهٔ قدرت باعث مشکلاتی از قبیل اعوجاج شکل موج ولتاژ، افزایش تلفات خطوط انتقال و ترانسفورماتورها و تداخل در سیستمهای مخابراتی می‌شود[۱]. همچنین اعوجاج ولتاژ ناشی از هارمونیکها می‌تواند باعث مشکلاتی برای بارهای حساس به هارمونیک از قبیل شبکه‌های کامپیوتری گردد[۲].

با افزایش هارمونیکها در سیستمهای قدرت و در نتیجه مشکلات ناشی از آنها، استانداردهای مختلفی برای تعیین حدود مجاز هارمونیکها در سیستم معرفی گردید. یکی از این استانداردها در

---

1. Steinmetz

2. American Institute of Electrical Engineers

مقالهٔ [۳] IEEE_519 تحت عنوان "توصیه‌های اعمالی و لازم جهت کنترل هارمونیک در سیستمهای قدرت" در سال ۱۹۸۱ منتشر شد. محتوای این سند بر سطحهای مجاز اعوجاج در سیستم استوار شده بود و در سطح وسیعی برای کنترل و محدود کردن هارمونیکها در صنعت الکتریکی قدرت بکار می‌رفت. با این وصف، افزایش استفاده‌های صنعتی از درایوهای تطبیقی قدرت، یکسوکننده‌ها و دیگر بارهای غیرخطی در سالیان اخیر، لزوم دوباره نویسی IEEE_519 را بسیار ضروری می‌کرد. IEEE_519 جدید که در سال ۱۹۹۲ انتشار یافت، محدودیتهای جدیدی روی هارمونیکهای ولتاژ در سیستمهای انتقال و توزیع و هارمونیک‌های جریان در دستگاههای صنعتی اعمال کرد [۳].

منابع تولید هارمونیک را می‌توان به سه دستهٔ اساسی تقسیم نمود[۴]:

الف- وسایل فرّومغناطیسی شامل ژنراتورها، موتورها، ترانسفورماتورها و راکتورها.

ب- مبدلهای قدرت الکترونیکی شامل یکسو کننده‌ها، اینورترها، سیستمهای اضطراری بدون وقفه[1]

ج- تجهیزات تخلیه‌ای از قبیل کوره‌های ذوب با قوس الکتریکی، لامپهای فلورسنت.

مرسوم‌ترین روش برای حذف یا کاهش هارمونیکها در سیستمهای قدرت استفاده از فیلتر پسیو[2] می‌باشد. در حالت ایده‌آل، یک فیلتر می‌تواند تمام هارمونیکها را بدون تأثیر بر مؤلفه اصلی حذف کند. این هارمونیکها ممکن است توسط خود ژنراتور یا توسط بارهای غیرخطی تولید شوند. فیلتر ممکن است بین ژنراتور و بار بطور سری برای حذف هارمونیک ولتاژ در محل بار قرار گیرد (فیلتر سری)، یا بصورت موازی به خطوط انتقال برای بایپاس کردن هارمونیکهای جریان متصل شود (فیلتر شنت). فیلترهای پسیو که معمولاً بصورت شنت استفاده می‌شوند از موازی شدن چند پیوند سلف و خازن تشکیل شده‌اند[۵]. از مزایای این فیلتر می‌توان به ارزان بودن و عدم نیاز آن به مدار کنترل اشاره کرد.

در سالهای ابتدایی استفاده از فیلترهای پسیو، چنین به نظر می‌رسید که مشکلات ناشی از هارمونیکها در آینده‌ای نزدیک بطور مؤثر از بین خواهد رفت ولی پس از آنکه این فیلترها در سیستمهای قدرت واقعی بکار گرفته شدند، مسائل جدیدی را بوجود آوردند. طراحی این فیلترها باید با دقت و ملاحظات ویژه‌ای صورت می‌گرفت، زیرا در غیر اینصورت فیلترهای پسیو شنت می‌توانستند حتی خطرناکتر از منابع تولید هارمونیک عمل کنند. از جمله معایب این نوع فیلتر، حساسیت به تغییرات اجزا آن و همچنین امپدانس شبکه [۶] ، ایجاد تشدید موازی با امپدانس منبع در هارمونیکهای خاص [۷] و

---

1. Unintruptible Power Supply (UPS)

2. Passive Filters

حجم و وزن بالا می‌باشد. با توجه به مشکلات استفاده از فیلتر پسیو و همچنین افزایش بارهای غیرخطی با هارمونیکهای تزریقی طیف گسترده، نیاز به روش دیگری برای حذف هارمونیک احساس می‌شد.

در سال ۱۹۷۱ آقایان ماچیدا[1] و ساساکی[2] فیلتر اکتیو شنت[3] را بجای فیلتر پسیو شنت پیشنهاد کردند[۸]. به دلیل مشکلات تکنیکی که در سال ۱۹۷۱ وجود داشت، ساخت فیلترهای اکتیو امکان‌پذیر نبود. به همین دلیل استقبال چندانی از مقالهٔ مذکور بعمل نیامد. در سال ۱۹۷۶ آقایان جوجی[4] و استرای‌کولا[5] خانواده‌ای از فیلترهای اکتیو سری و شنت را معرفی کرده و نتایج حاصل از یک نمونهٔ آزمایشگاهی را هم در مقالهٔ مذکور منعکس نمودند[۵]. با پیشرفت و توسعهٔ چشمگیری که در زمینهٔ سرعت و ظرفیت توان وسایل نیمه‌هادی انجام گرفت، استفاده از فیلترهای اکتیو شنت در شبکهٔ قدرت نیز افزایش یافت. فیلترهای اکتیو از چند بخش عمدهٔ تشخیص دهندهٔ هارمونیک، مولد موج هارمونیک کنترل شونده، مدار کنترل تحریک و مدار تزریق تشکیل شده‌اند. توضیح بیشتر در فصهای دوم و سوم آورده شده است.

تحقیقات علمی و عملی که تاکنون در زمینهٔ فیلترهای اکتیو انجام پذیرفته بیشتر بر روی فیلتراکتیو شنت بر مبنای اینورتر نوع ولتاژ بوده است. هدف این پایان‌نامه، مطالعه و بررسی فیلتراکتیو سری بر مبنای اینورتر نوع جریان و انواع کاربردهای آن در سیستمهای قدرت می‌باشد. برای بررسی این نوع فیلتر در کاربردهای مختلف، نیاز به ساختاری به عنوان سیستم پیشنهادی و روابطی برای طراحی فیلتر می‌باشد. بنابراین ابتدا باید کاربردهای مختلف را شناخت، سپس در هر کاربرد ساختاری را به عنوان سیستم پیشنهادی معرفی کرده و روابط مورد نیاز را برای طراحی ارائه کرد.

روند ارائهٔ مطالب در این پایان‌نامه بصورت زیر است:

فصل اول شامل مقدمه‌ای بر هارمونیک، منابع آن و روشهای محدود کردن هارمونیک در شبکه می‌باشد که از نظرتان گذشت.

در فصل دوم اساس فیلترهای اکتیو را بررسی کرده و انواع مختلف آن را توضیح می‌دهیم. همچنین در این فصل چند روش تشخیص هارمونیک در شبکه را نیز توضیح می‌دهیم.

در فصل سوم فیلتر اکتیو سری بر مبنای اینورتر نوع جریان را بیشتر مورد توجه قرار داده و

---

1. T. Machida
2. H. Sasaki
3. Shunt Active Filter
4. L. Gyugyi
5. E.C. Strycula

سیستم پیشنهادی را معرفی می‌کنیم.

در فصل چهارم مدل لحظه‌ای و ماندگار فیلتر و روابط تحلیلی مورد نیاز برای طراحی فیلتر را بدست می‌آوریم.

فصل پنجم اختصاص به شبیه‌سازی سیستم پیشنهادی دارد. در این فصل، سه سیستم مختلف بر مبنای سیستم پیشنهادی را شبیه‌سازی کرده و عملکرد فیلتر را بررسی می‌کنیم.

در فصل ششم دو نمونهٔ دیگر از کاربرد فیلتراکتیو سری را توضیح می‌دهیم.

فصل هفتم شامل نتیجه‌گیری از سیستم پیشنهادی و پیشنهادات لازم در جهت بهبود طرح و ادامهٔ آن می‌باشد.

فصل دوم
فیلترهای اکتیو

۲-۱) مقدمه

همانطور که در فصل اول ذکر شد، استفاده از فیلترهای پسیو شنت تحول قابل ملاحظه‌ای در حذف هارمونیکها ایجاد کردند ولی با افزایش بارهای غیرخطی در شبکهٔ قدرت و ایجاد هارمونیکهای مختلف بسیار در شبکه، کارایی این فیلتر در حذف اعوجاج روز به روز کاهش بیشتری یافت. از عمده معایب آن می‌توان ایجاد تشدید موازی با امپدانس منبع و خط انتقال، تأثیر پذیری زیاد آن از تغییرات پارامترهای شبکه و فقط کاهش هارمونیکهای خاص از پیش طراحی شده را برشمرد.

در سال ۱۹۷۱ آقایان ساساکی و ماچیدا سیستمی را که اساس آن استفاده از الکترونیک قدرت برای از بین بردن هارمونیکهای ناشی از بارهای غیرخطی بود معرفی کردند[۸]. از آنجائیکه این سیستم همواره با شبکه قدرت ارتباط داشته و بسته به تغییر وضعیت شبکه، استراتژی کنترل خود را طوری تغییر می‌دهد که بتواند شکل موج ولتاژ یا جریان شبکه را به موج سینوسی نزدیک نماید، فیلتر اکتیو نامیده شد. فیلترهای اکتیو مشخصه‌های بهتری در قبال تغیرات امپدانس خطوط AC و تغییرات فرکانس جریانهای هارمونیک نسبت به فیلترهای پسیو دارند. ضمناً بعضی از فیلترهای اکتیو می‌توانند ضمن