ارائه ساختاری نوین از یک فیلتر ترکیبی کارآ بر مبنای تفکیک فرکانس جریان مرجع به منظور جبران همزمان هارمونیک و توان راکتیو در شبکه توزیع

محمد سلمانی کویخی [۱] ، کارشناسی ارشد، مصطفی جزائری[۲]، دانشیار، علی زعفری[۳] ، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه سمنان- سمنان- ایران
mohammad.salmani@semnan.ac.ir
۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه سمنان - سمنان- ایران
mjazaeri@semnan.ac.ir
۳- گروه مهندسی برق، واحد نکا، دانشگاه آزاد اسلامی، نکا، ایران
azafari@iauneka.ac.ir

چکیده: این مقاله یک فیلتر ترکیبی جدید شامل فیلتر فعال مبتنی بر مبدل منبع جریان و بانک خازنی اصلاح شده با ساختار فیلتر پسیو را برای کاهش مشکلات جبران‌سازی هارمونیک و توان راکتیو پیشنهاد می‌کند. این ساختار جدید بر اساس ایده جداسازی مولفه‌های فرکانس بالا و پایین جریان مرجع می‌تواند بر روی عملکرد هر دو فیلتر موثر بوده و کارآئی فیلتر ترکیبی را افزایش دهد. مولفه‌های فرکانس پایین به فیلتر فعال و مولفه‌های فرکانس بالا به تنظیمات بانک خازنی اصلاح شده با ساختار فیلتر پسیو اعمال می‌شود. واحد استخراج کننده فیلتر پسیو بر اساس اطلاعاتی که از طراح دریافت می‌کند می‌تواند توان راکتیو شبکه را جبران کرده و همزمان به صورت گزینشی هارمونیک‌های مرتبه بالا را جبران نماید. این ایده هارمونیک‌های جریان شبکه را به مقدار مورد نظر استاندارد IEEE519-2014 تقلیل داده و توان راکتیو شبکه را جبران می‌نماید، در حالیکه می‌تواند ظرفیت، هزینه و تلفات مبدل منبع جریان را نیز کاهش دهد. بمنظور ارزیابی عملکرد فیلتر پیشنهادی بخشی از یک شبکه توزیع نمونه با بار غیرخطی در محیط PSCAD/EMTDC مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد ایده پیشنهادی انعطاف پذیری قابل ملاحظه‌ای را برای فیلتر بهمراه داشته و کارآئی آن را افزایش می‌دهد.

واژه های کلیدی: فیلتر ترکیبی، مبدل منبع جریان، جداسازی مولفه‌های فرکانسی، واحد استخراج کننده فیلتر پسیو.

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۷/۸/۴

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۸/۸/۲۵

نام نویسنده‌ی مسئول : دکتر مصطفی جزائری

نشانی نویسنده‌ی مسئول : ایران- سمنان- دانشگاه سمنان- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-15]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.2.1.4]

۱- مقدمه

هارمونیک‌ها نوسانات مزاحمی هستند که می‌توانند اثرات منفی مانند نوسانات الکتریکی و مکانیکی در ژنراتورها و دستگاه‌های محرک، خطا در عملکرد رله‌های حفاظتی، تداخل با تجهیزات مخابراتی و کاهش در تولید و ارسال و بازده عملی را به سیستم تحمیل نمایند. لذا ملاحظات فنی و اقتصادی درکاهش هارمونیک‌های مرتبه‌پائین که مشکلات بیشتری برای واحدهای تولیدکننده و مصرف‌کنندگان نهایی فراهم می‌کنند حائز اهمیت می‌باشد[۱-۲]. در حقیقت ضروریست مصالحه‌ای بین درصد اختلال هارمونیکی و هزینه صورت پذیرد تا فیلتر عملکرد بهینه داشته باشد.

راهکار اولیه استفاده از جبرانگر سنتی مانند بانک خازنی و نیز فیلتر پسیو بترتیب جهت جبران توان راکتیو و جلوگیری از انتشار امواج هارمونیکی می‌باشد[۳-۴]. ولی استفاده از جبران‌گر سنتی می‌تواند باعث تقویت ولتاژ هارمونیکی به دلیل رزونانس بین خطوط و خازن‌های موازی شده و احتمال تشدید فیلتر پسیو در نزدیکی فرکانس هارمونیک پنجم و هفتم را افزایش دهد، [۵]. یکی از موثرترین روش‌ها برای جبران‌سازی هارمونیک استفاده از فیلتر فعال می‌باشد. فیلترهای فعال که بر مبنای مبدل‌های الکترونیک قدرت کار می‌کنند عملکرد بهتری نسبت به فیلترهای سنتی در شبکه قدرت دارند. برخلاف فیلترهای پسیو که برای حذف هارمونیک خاصی تنظیم می‌شوند و فاقد انعطاف‌پذیری لازم برای انجام مانورهای مورد نیاز هستند، فیلترهای فعال بر مبنای توانمندی مبدل‌های الکترونیک قدرت که از کلیدهای با قابلیت قطع سود می‌برند با تکیه بر ورودی جریان مرجع می‌توانند در محدوده وسیعی از طیف هارمونیکی عمل کرده و سیگنال‌های هارمونیکی برنامه‌ریزی شده‌ای را به شبکه تزریق کنند. با این حال طرح چنین فیلتر قدرتمندی مستلزم قبول تلفات بیشتر، هزینه بالاتر و تولید جریان مرجع است که می‌تواند پیچیدگی طرح را نسبت به همتای پسیو خود بیشتر کرده و پیاده‌سازی عملی آنرا تحت الشعاع قرار دهد. راهکارهای مختلفی برای تولید جریان مرجع و کنترل هارمونیک‌های تزریقی به شبکه در فیلتر فعال وجود دارد. یکی از روش‌های مرسوم و متداول تولید جریان مرجع بکارگیری نظریه توان اکتیو و راکتیو لحظه‌ای می‌باشد[۶] که می‌تواند بطور یکسان برای سیستم‌های تغذیه سه و یا چهار سیمه بکار گرفته شود. در این نظریه ابتدا با استفاده از تبدیل کلارک که شامل یک ماتریس حقیقی است ولتاژها و جریان‌های سه فاز از مختصات abc به $\alpha\beta 0$ انتقال یافته و توان‌های لحظه‌ای و جریان مرجع در این مختصات محاسبه می‌شوند. سپس این جریان مرجع که حاوی اطلاعات فرکانس بالا و پائین است برای تولید پالس‌های کلیدزنی در مبدل‌های منبع ولتاژ (VSC) و یا منبع جریان (CSC) به عنوان فیلتر فعال بکار گرفته می‌شود[۷-۸].

در یک پروژه صنعتی، عملکرد دو مبدل منبع ولتاژ و منبع جریان در بهبود کیفیت توان با هم مقایسه شده و نشان داده شده که CSC حساسیت کمتری نسبت به اختلالات جریان خط از خود نشان می‌دهد. بعلاوه در حضور بارهای غیرخطی و یا متغیر با زمان، تغییرات در تلفات مبدل کمتر احساس شده و عملکردی بهتر خواهد داشت و این در حالی است که تلفات CSC نسبت به VSC در فرکانس‌های بالا بیشتر است[۹-۱۰]. مقایسه بین ساختارهای این دو نوع مبدل از دو دیدگاه توان و کنترل موقعی که بعنوان فیلتر موازی عمل می‌کنند در مرجع [۱۱] انجام شده است. در این مقایسه ویژگی‌های اجزای مختلف این مبدل‌ها در بخش‌های مدار قدرت و سیستم کنترل بطور مجزا و مستقل مورد توجه قرار گرفته و دورنمائی از پیشرفت‌های آتی در حوزه‌های مربوطه ترسیم شده است.

فیلتر ترکیبی بر مبنای فیلتر فعال موضوع دیگر در این حوزه از مطالعات است که امروزه بر روی آن بطور جدی تمرکز شده است[۳]. این فیلترهای ترکیبی به صورت ترکیبی از فیلتر پسیو-فیلتر پسیو، فیلترپسیو-فیلتر فعال، فیلتر فعال-فیلتر فعال می‌باشند[۱۲-۱۳]. فیلترهای ترکیبی به طور موثر مشکلات فیلترهای پسیو و فعال را موقعی که بتنهائی در شبکه مورد استفاده قرار می‌گیرند را کاهش می دهد. در تحقیقات صورت گرفته بر روی فیلتر ترکیبی نشان داده شده که جبران‌سازی هارمونیک و توان راکتیو نسبت به موقعی که ایندو بتنهائی بکارگرفته شوند بهتر انجام می‌شود. از پرکاربردترین ساختار فیلتر ترکیبی می‌توان به ترکیب فیلتر پسیو موازی- فیلتر فعال موازی با شبکه و نیز ترکیب فیلتر فعال سری-فیلتر پسیو موازی با شبکه اشاره کرد[۱۴-۱۵]. در طرحی جدید از فیلتر ترکیبی، دو مبدل VSC و CSC به صورت موازی همزمان به شبکه متصل شده است. این طرح پیشنهادی از ایده جداسازی بخش‌های فرکانس پایین و فرکانس بالای جریان مرجع تولیدی توسط تئوری توان لحظه‌ای استفاده می‌کند و با اعمال مولفه‌های فرکانس بالا به مبدل VSC و مولفه‌های فرکانس پایین به مبدل CSC باعث کاهش تلفات موجود در مبدل‌ها شده است. این ایده همچنین باعث کاهش اندازه المان‌های پسیو در دو سمت ac و dc هر دو مبدل می‌شود[۷].

در این مقاله بر اساس ایده پیشنهادی جداسازی مولفه‌های فرکانسی جریان مرجع اهداف ذیل دنبال می‌شود:

- از بانک خازنی اصلاح شده با ساختار فیلتر پسیو موازی با شبکه برای جبران هارمونیک‌های مرتبه بالا، برخلاف ایده پیشنهادی در مرجع [۷] استفاده می‌شود. در این طرح همچنین می‌توان توان راکتیو مورد نیاز بار متصل به شبکه توزیع را نیز تامین نموده و ضریب قدرت آن را بهبود بخشید. این طرح پیشنهادی هزینه المان‌ها، تلفات و پیچیدگی کنترل فیلتر ترکیبی را به دلیل حذف مبدل VSC نسبت به طرح پیشنهادی در مرجع [۷] کاهش داده و عملکرد آن در حالت‌های مختلف بار غیرخطی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-15]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.2.1.4]

- در مرجع [۱۶] فیلتر پسیو در هارمونیک پنجم که فیلتر کردن آن به مراتب از فیلتر کردن هارمونیک‌های بالا مشکل‌تر است تنظیم شده و همین موضوع فشار بر روی فیلتر پسیو را برای جبران همزمان توان راکتیو و هارمونیک افزایش می‌دهد. در این طرح برخلاف مرجع[۱۶] با استفاده از ایده جداسازی مولفه‌های فرکانسی، هارمونیک‌های مرتبه پایین به فیلتر فعال و هارمونیک‌های مرتبه بالا به فیلتر پسیو اعمال می‌شود تا بتوان هزینه و تلفات توان مبدل فعال را کاهش داد.
- از اهداف مهم این طرح این است که فیلتر ترکیبی پیشنهادی بتواند در چندین زاویه آتش مختلف، عملکردی مناسب در جبران‌سازی همزمان هارمونیک و توان راکتیو داشته باشد. در این مقاله فیلتر ترکیبی پیشنهادی در ۱۰ زاویه آتش مختلف در محدوده صفر تا ۹۰ درجه مورد استفاده و تجزیه و تحلیل قرار گرفته تا از عملکرد رضایت بخش آن اطمینان حاصل شود.

برای دستیابی به این اهداف در بخش۲ این مقاله ساختار شبکه توزیع با بار غیرخطی(یکسوکننده تریستوری با بارRL) و هارمونیک‌های شبکه و جریان منبع و بار ارائه می‌شود. در بخش۳ ساختار کلی فیلتر ترکیبی و نحوه تولید و اعمال ایده پیشنهادی تشریح شده و بخش۴ نتایج حاصل از عملکرد فیلتر ترکیبی را مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌دهد. مقایسه بین فیلتر ترکیبی پیشنهادی و چند طرح دیگر در بخش ۵ انجام می‌شود. بخش۶ به نتیجه‌گیری اختصاص می‌یابد.

۲- ساختار شبکه توزیع با بارغیرخطی

شکل۱ یک شبکه توزیع ۴۰۰ ولت، ۵۰ هرتز با بار غیرخطی شامل یکسوکننده تریستوری۶ پالسه و بار RL سری را نشان می‌دهد. از آنجائیکه هدف حذف محلی هارمونیک‌های تولیدی است لذا می‌توان بجای شبکه بالادست از معادل تونن استفاده کرد. چنین باری در فرآیند کلیدزنی، جریان با طیف وسیعی از نوسانات هارمونیکی با فرکانس‌های بالا و پائین را به شبکه تزریق می‌کند که می‌تواند کیفیت تغذیه را تا حد غیر قابل قبول کاهش داده و مشکلاتی را در بهره‌برداری ایجاد نماید. بمنظور پیشگیری و اصلاح شرایط عملکردی مجموعهٔ بار و سیستم، همه آرایش‌های متفاوت فیلترهای پسیو و فعال در ترکیبات مختلف سری، موازی و یا ترکیبی جریان و یا ولتاژ هارمونیکی تزریق می‌کنند. بخش موازی فیلتر جریان و بخش سری ولتاژ هارمونیکی را تولید می‌کند.

در شبکه شکل۱ مقدار موثر جریان کشیده شده توسط بار RL می‌تواند با رابطه۱ محاسبه شود[۱۷]:

$$I_{L1}=\frac{\sqrt{2}V_{rms}}{Z}\frac{\sin\left(\frac{2\pi}{3}+\alpha-\theta\right)-\sin\left(\frac{\pi}{3}+\alpha-\theta\right)e^{-\left(\frac{R}{L}\right)\left(\frac{\pi}{3\omega}\right)}}{1-e^{-\left(\frac{R}{L}\right)\left(\frac{\pi}{3\omega}\right)}}-\frac{E}{R}\quad .I_{L1}\geq 0 \qquad (۱)$$

$$\theta=tan^{-1}\left(\frac{\omega L}{R}\right)$$

در رابطه فوق α زاویه تاخیر روشن شدن کلیدها برحسب درجه می‌باشد. بعلاوه I_S ، I_L و I_{L1} به ترتیب جریان شبکه، جریان ورودی یکسو کننده و جریان مصرفی بار RL می‌باشند.

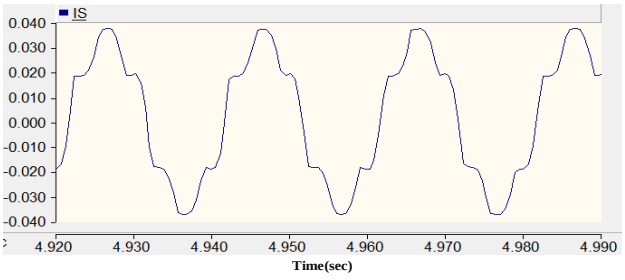
مشخصات بار RL بهمراه اطلاعات ساختار یکسوکننده تریستوری۶ پالسه در جدول۱ آورده شده است. در این شرایط جریان شبکه که با جریان بار شبکه یکسان است در شکل۲ مشاهده می‌شود. بوضوح مشخص است که شکل موج جریان شبکه دارای هارمونیک بوده و از شکل موج سینوسی فاصله دارد. شکل۳ هارمونیک‌های موجود در شکل موج جریان شبکه را در زاویه آتش صفر درجه یکسوکننده تریستوری با بار RL نشان می‌دهد. در این شکل مقدار درصد هارمونیک‌های شبکه بر مبنای مقدار درصد هارمونیک پایه می‌باشد.



شکل۱: ساختار شبکه توزیع با بار غیرخطی(یکسوکننده تریستوری با بار RL)

جدول۱: مشخصات بار RL با یکسوساز تریستوری

ساختار یکسوکننده تریستوری ۶ پالسه				بار RL	
مقاومت هر تریستور در حالت روشن	مقاومت هر تریستور در حالت خاموش	مقاومت مدار اسنابر	خازن مدار اسنابر	سلف L	مقاومت R
۰/۰۱ اهم	۱ مگا اهم	۵ کیلو اهم	۰/۰۵ میکروفاراد	۸۰ میلی هانری	۱۵ اهم



شکل۲: شکل موج جریان شبکه توزیع بدون حضور فیلتر

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-15]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.2.1.4]



شکل۳: هارمونیک‌های جریان شبکه توزیع بدون حضور فیلتر

شکل۲ نشان می‌دهد از آنجایی که بار RL توسط یکسوساز تریستوری۶ پالسه سه فاز تغذیه می‌شود، شبکه دارای هارمونیک در ورودی یکسوساز است. در حالت کلی یعنی حالتی که طیف وسیعی از بارهای سه فاز و تکفاز با ماهیت‌های مختلف خطی و غیرخطی وجود دارند، مؤلفه‌های هارمونیکی مضرب سه نیز در فیدر اصلی توزیع وجود دارند. به همین دلیل آرایش مثلث در ترانس توزیع در نظر گرفته می‌شود. چون هارمونیک سوم می‌تواند در مثلث بسته جریان پیدا کند اما در جریان خط ظاهر نمی‌شود. حتی در برخی از جبران‌سازی‌های گروهی که علاوه بر یک بار غیرخطی بارهای دیگری نیز حضور دارند، ترانسفورماتور با اتصال ستاره-مثلث و نسبت تبدیل ۱:۱ توصیه می‌شود[۱۸-۱۹].

در این حالت فیلتر اکتیو صرفا برای بارهایی نظیر بار مورد مطالعه که هارمونیک سوم جریان ندارند اما تغییرات و دینامیک سریع دارند طراحی می‌شود.

در سیستم مورد مطالعه، بار غیرخطی یک یکسوکننده تریستوری۶ پالسه است، در اینصورت هارمونیک‌هایی با مراتب ۱±۶k به شبکه تزریق می‌کند. به همین دلیل هارمونیک ۵،۷،۱۱،۱۳ بیشترین سهم حضور در جریان شبکه را دارا می‌باشند[۱۷].

با افزایش زاویه تاخیر آتش تریستورها در هر لحظه شکل موج جریان شبکه از شکل موج سینوسی فاصله گرفته و لذا مقدار هارمونیک بیشتری به شبکه تزریق می‌شود. شکل۴ افزایش مقدار مراتب هارمونیکی شبکه توزیع را بر اساس افزایش زاویه آتش کلیدزنی نشان می‌دهد. رفتار هارمونیکی یکسوکننده تریستوری در شبکه توزیع بگونه‌ای است که با افزایش زاویه آتش مقدار مدار مؤثر هارمونیک‌های مرتبه پایین(۵ و ۷) افزایش بیشتری نسبت به مقدار هارمونیک‌های مرتبه بالا (۱۱ و ۱۳) داشته [۱۷] به عبارت دیگر در زوایای آتش ۰-۹۰ درجه طبق شکل۴ مقدار هارمونیک‌های ۵ و ۷ جریان شبکه بیشتر از مقدار هارمونیک‌های ۱۱ و ۱۳ می‌باشد.

از طرف دیگر در یک شبکه تغذیه باید به این نکته توجه داشت که جریان معمولا نسبت به ولتاژ تاخیر فاز داشته و لذا مصرف کننده از شبکه توان راکتیو دریافت می‌کند. توان راکتیو مورد نیاز اگر بصورت محلی تولید نشود باعث اشغال ظرفیت اتصالات شده و افزایش تلفات و افت ولتاژ را بهمراه دارد. از این رو ضروریست بارهای اندوکتیو به جبران‌سازهای توان راکتیو موازی مجهز شوند.

جدول۲ نحوه تغییر ضریب قدرت بار را بازای افزایش زاویه آتش یکسوکننده تریستوری نشان داده می‌دهد. از آنجایی که بر اساس روابط (۲)-(۳) با افزایش زاویه آتش یکسوکننده تریستوری، مقدار ضریب قدرت از واحد به صفر می‌رسد، در این جدول نیز کاهش ضریب قدرت بوضوح دیده می‌شود. همچنین با توجه به این که یکسوکننده بارRL را تغذیه میکند، حضور این بار نیز بر مصرف توان راکتیو و کاهش ضریب قدرت بار نیز اثرگذار می‌باشد. این تاثیر با صرفنظر کردن از تلفات یکسوکننده تریستوری به کمک معادلات (۲) و (۳) بیان می شود.

$$I_{Ln}=\frac{2\sqrt{2}I_{dc}}{n\pi}sin\frac{n\pi}{3}\ \xrightarrow{n=1}\ I_{L1}=\frac{\sqrt{6}}{\pi}I_{dc} \qquad (۲)$$

$$P_{dc}=P_{ac}\ \xrightarrow{yields}\ V_{dc}\,I_{dc}\cos\alpha=V_{ac}\,I_{ac}\cos\varphi$$

$$\xrightarrow{I_L=\frac{\sqrt{6}}{\pi}I_{dc}}\ \frac{3\sqrt{3}}{\pi}V_mI_{dc}\cos\alpha=\frac{3}{\sqrt{2}}V_m\frac{\sqrt{6}}{\pi}I_{dc}\cos\varphi \qquad (۳)$$

$$\xrightarrow{yields}\ \cos\alpha=\cos\varphi$$

طبق رابطه فوق با افزایش زاویه تاخیر آتش تایریستورها ضریب قدرت کاهش می‌یابد. در روابط فوق I_L جریان کشیده شده از شبکه توسط یکسوکننده تریستوری، I_{dc} مقدار متوسط جریان بار RL ، V_m ماکزیمم ولتاژ دو طرف(AC,DC)یکسوکننده تریستوری و α و φ به ترتیب زاویه آتش یکسوکننده و اختلاف فاز جریان و ولتاژ در سمت AC می‌باشند.

جدول۲: مقدار ضریب قدرت شبکه به ازای تغییرات زاویه آتش بدون حضور فیلتر

ضریب قدرت پس فاز	زاویه آتش (درجه)
۰/۹۶	۰
۰/۹۶	۱۰
۰/۹۶	۲۰
۰/۹۰	۳۰
۰/۸۴	۴۰
۰/۷۷	۵۰
۰/۷۷	۶۰
۰/۶۶	۷۰
۰/۶۳	۸۰
۰/۶۱	۹۰

۳- تشریح فیلتر ترکیبی پیشنهادی

در این بخش ابتدا ساختار کلی فیلتر ترکیبی پیشنهادی شرح داده می‌شود. سپس جداسازی مولفه‌های فرکانسی جریان مرجع تولیدی با

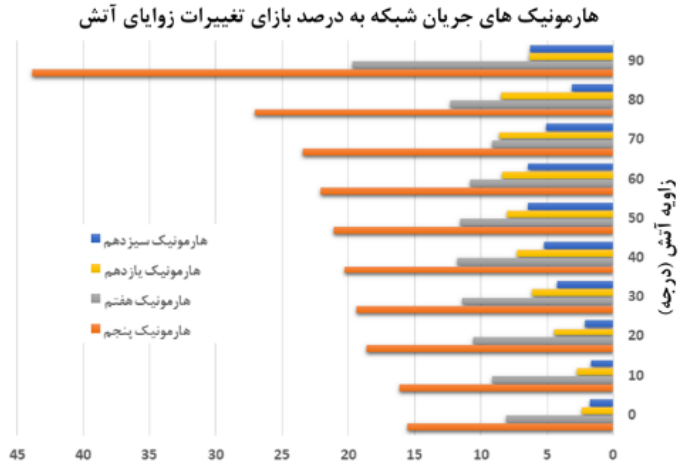
[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-15]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.2.1.4]

استفاده از تئوری توان لحظه‌ای و اعمال آن به فیلتر فعال مبتنی بر CSC و بانک خازنی اصلاح شده با ساختار فیلتر پسیو آورده می‌شود.

۱-۳-ساختار فیلتر

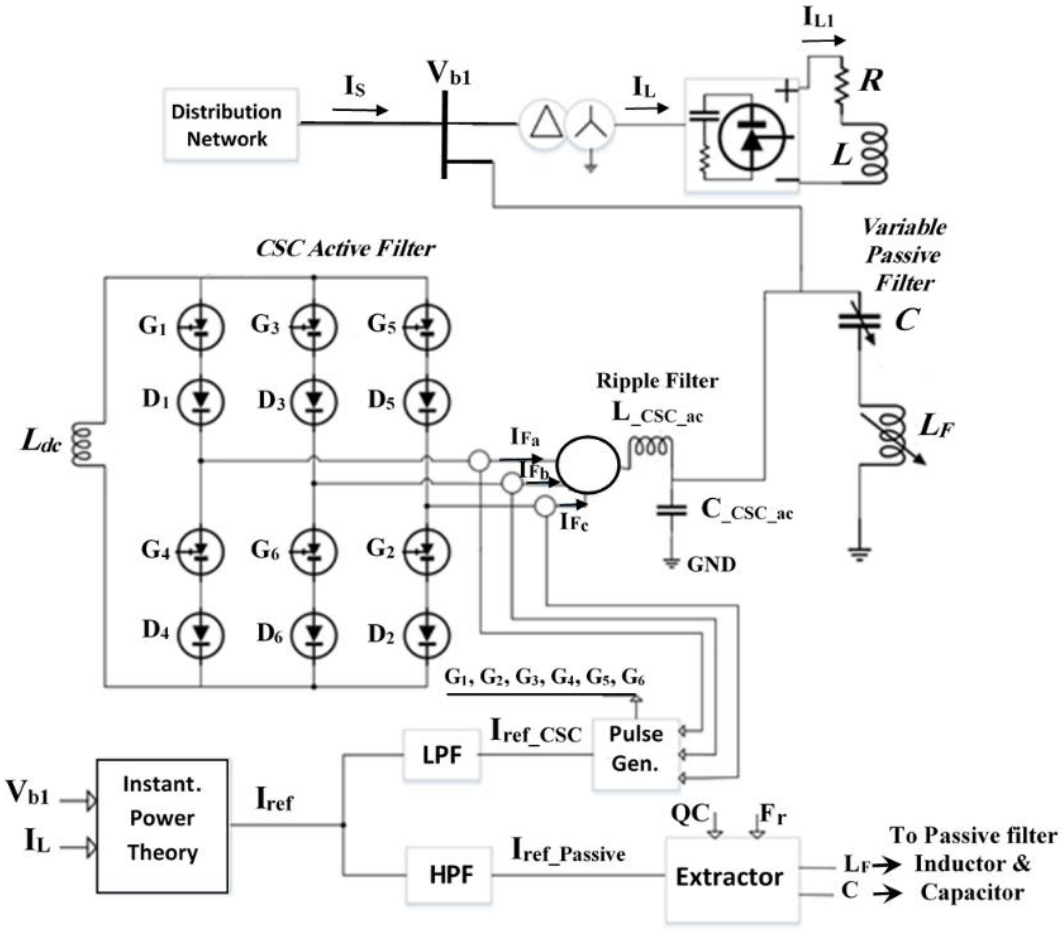
در این مقاله یک فیلتر ترکیبی فعال موازی پیشنهاد می‌شود که می‌تواند بطور همزمان هارمونیک‌های مورد نظر را حذف کرده و ضریب توان بار را افزایش دهد. شکل۵ دیاگرام تک خطی این فیلتر را نشان می دهد. در این طرح از یک بانک خازنی اصلاح شده با ساختار فیلتر پسیو استفاده شده است. در این ایده فیلتر پسیو وظیفه جبران‌سازی توان راکتیو و حذف هارمونیک‌های فرکانس بالا را بر عهده دارد و با توجه به اینکه‌المان‌های فیلتر پسیو بطور لحظه کنترل می‌شوند می‌تواند جریان عبوری از فیلتر فعال را کاهش داده و به تبع آن تلفات آن نیز کاهش یابد.



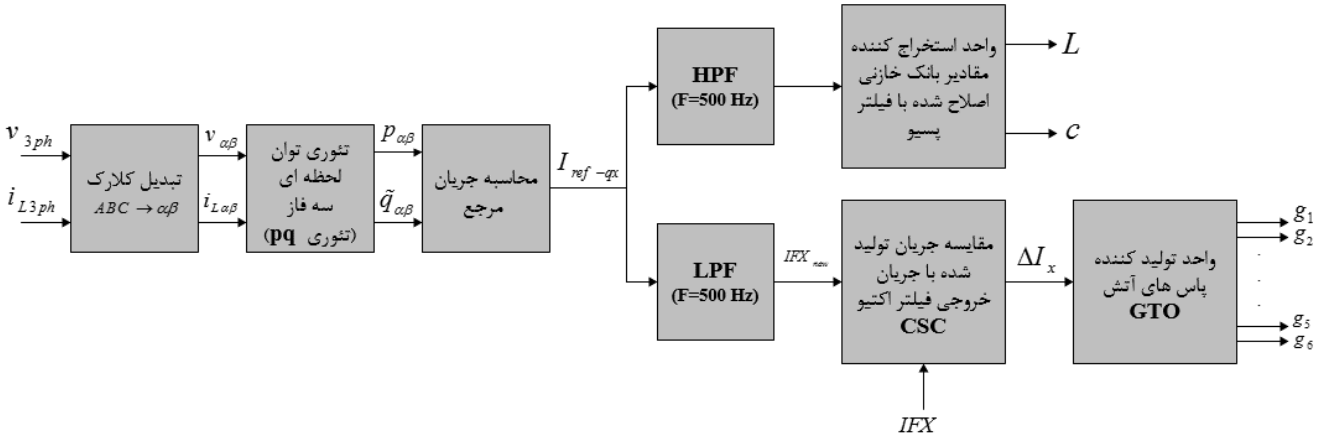
شکل۴: هارمونیک‌های جریان شبکه به ازای تغییرات زاویه آتش بدون حضور فیلتر

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-15]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.2.1.4]



شکل۵: ساختار فیلتر ترکیبی پیشنهادی



شکل۶: فلوچارت کنترل فیلتر ترکیبی پیشنهادی

نحوه عملکرد فیلتر پیشنهادی بدین‌گونه است که پس از نمونه‌برداری از جریان بار و ولتاژ باس مورد نظر و تولید جریان مرجع بر اساس تئوری توان لحظه‌ای، با استفاده از دو فیلتر پایین گذر و بالا گذر که در طرح پیشنهادی شکل۵ نشان داده شده، جریان مرجع این دو فیلتر فراهم می‌شود.

هارمونیک‌های موجود در شبکه مضرب صحیحی از فرکانس اصلی سیستم (۵۰Hz) است، به عنوان مثال فرکانس هارمونیک سوم برابر ۱۵۰=۳×۵۰ و فرکانس هارمونیک پنجم برابر ۲۵۰=۵×۵۰ می‌باشد. جریان مرجع تولید شده نیز شامل هارمونیک‌های شبکه بوده که بر مبنای رابطه (۴) مؤلفه‌های فرکانسی آن جداسازی

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-15]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.2.1.4]

می‌شود. طبق این رابطه جریان مرجع به دو دسته جریان مرجع با مولفه‌های فرکانس‌بالا (هارمونیک‌های فرکانس بالا) و جریان مرجع با مولفه‌های فرکانس پایین(هارمونیک‌های فرکانس پایین) تفکیک خواهند شد.

$$f_{filter} = n \times \qquad (۴)$$

f_{sys} در فرمول فوق مرتبه هارمونیکی می‌باشد.

در این مقاله فرکانس تفکیک بر روی ۵۰۰ هرتز تنظیم می شود یعنی هارمونیک‌های با فرکانس بیش از ۵۰۰ هرتز(هارمونیک‌های ۱۱ و ۱۳) را به فیلتر پسیو و هارمونیک‌های با فرکانس کمتر از ۵۰۰ هرتز(هارمونیک‌های ۵ و ۷) به CSC اعمال می‌شود. در این مرحله می‌توان با اهداف متنوع نسبت به تعیین فرکانس تفکیک اقدام نمود بطوریکه یک و یا چند ویژگی فیلتر ترکیبی بهینه شود. به عبارت دیگر با توجه به اندازه هارمونیک‌های جریان شبکه، پیکربندی فیلتر ترکیبی و... میتوان فرکانس تفکیک را تغییر داد. شکل۶ فلوچارت کنترل و نحوه کارکرد فیلتر ترکیبی پیشنهادی را بوضوح نمایش می‌دهد. در این فلوچارت X نماینده سه فاز(c، **b** و a) شبکه قدرت می‌باشد.

۲-۳-تولید جریان مرجع

در این مقاله از تئوری توان لحظه‌ای [۵] برای تولید جریان مرجع استفاده می‌شود. برای محاسبه جریان مرجع به روش توان لحظه‌ای، در هر لحظه توان‌های نوسانی ناشی از هارمونیک‌های موجود در شبکه محاسبه می‌شود. به طور کلی وجود هارمونیک باعث ایجاد توان حقیقی نوسانی p و توان موهومی نوسانی q می‌شود و براساس این توان‌های نوسانی جریان مرجع برای عملکرد فیلتر ترکیبی تولید خواهد شد.

بر اساس طرح پیشنهادی مولفه‌های فرکانس بالا و مولفه‌های فرکانس پایین این جریان مرجع جداسازی می‌شوند. برای این منظور با عبور جریان مرجع از یک فیلتر بالاگذر و یک فیلتر پایین‌گذر، مولفه‌های فرکانسی به دو بخش زیر تقسیم می‌شوند:

۱- جریان مرجع با فرکانس‌های بالا(شامل هارمونیک‌های بالا)

۲- جریان مرجع با فرکانس‌های پایین(شامل هارمونیک‌های پایین)

۳-۳-فیلتر فعالCSC

در شکل۵ پس از جداسازی جریان مرجع، خروجی فیلتر پایین گذر به عنوان جریان مرجع CSC در نظر گرفته می‌شود. به عبارت دیگر مبدل CSC بر اساس فیلتر کردن هارمونیک‌های پایین(۵ و۷) کلیدزنی را انجام خواهد داد.

در این طرح پیشنهادی از CSC بدلیل اینکه جریان dc ورودی به مبدل محدود و کنترل شده است [۱۷] استفاده می‌شود. همچنین اگر اشتباهی در زاویه تاخیر در وصل کلیدها و یا اتصال کوتاه رخ دهد این مبدل قابلیت خود حفاظتی داشته و مشکلات جدی ایجاد نخواهد شد[۲۰]. از آنجایی که ایده پیشنهادی در این مقاله می‌تواند مقدار المان‌های پسیو در دو طرف مبدل را کاهش دهد[۷]، راندمان بخش CSC از فیلتر ترکیبی بهبود می یابد.

در ساختار مبدل منبع جریان توان پائین از ترانزیستورهای MOSFET که فرکانس کلیدزنی بالائی دارند استفاده می‌شود. علیرغم این برای قدرت های بالا کلیدهای GTO جایگزین ترانزیستورها می‌شوند. این نوع تریستورها قابلیت قطع سریع داشته و کلیدزنی در فرکانس‌های بالا را امکان پذیر می‌کند. بعلاوه نسبت به سایر المان‌های کلیدزنی دارای قابلیت تحمل ولتاژهای سدکنندگی بالاتری نیز می‌باشند[۱۷].

در این مبدل، موازی با هر GTO مدار اسنابر در نظر گرفته می شود که در هنگام خاموش شدن GTO تغییرات لحظه‌ای ولتاژ را محدود کرده و فشار، تنش و تلفات را کاهش می‌دهد. جدول۳ اطلاعات مربوط به ساختار CSC را نشان می‌دهد. فیلتر اکتیو موازی از طریق یک فیلتر ریپل پایین گذر و یک ترانسفورماتور کوپلینگ به شبکه متصل می‌شود. ترانسفورماتور کوپلینگ با نسبت تبدیل ۱:۱ برای افزایش قابلیت اطمینان، هم ولتاژ بودن مبدل با شبکه و فیلتری اضافی برای جلوگیری از نفوذ فرکانس‌های بالای کلیدزنی به شبکه می‌باشد. فیلتر ریپل پایین گذر جهت جلوگیری از نفوذ فرکانس‌های بالای ناشی کلیدزنی به شبکه توزیع استفاده می‌شود. برای طراحی این فیلتر پایین گذر حتما باید نامساوی (۵) ارضاء شود[۷]. در این رابطه ω_k فرکانسی است که CSC در آن جبران‌سازی انجام می‌دهد.

$$LC < \frac{1}{4\omega_k^2} \qquad (۵)$$

جدول۳: مقادیر پارامترها در ساختار مبدلCSC

مقاومت مدار اسنابر	خازن مدار اسنابر	خازنAC	سلفAC	سلفDC
۵ کیلواهم	۰/۰۵میکروفاراد	۴ میکروفاراد	۰/۱میلی هانری	۰/۱ میکروهانری

۴-۳-بانک خازنی اصلاح شده با ساختار فیلتر پسیو

در این طرح از بانک خازنی اصلاح شده با ساختار فیلتر پسیو استفاده می‌شود. ساختار فیلتر پسیو در این طرح به صورت LC سری بوده و وظیفه اصلی آن جبران‌سازی توان راکتیو است. بر اساس مقدار توان راکتیو مورد نیاز شبکه که می‌تواند متغییر باشد، ظرفیت خازن بدست می‌آید. در این طرح از فیلتر پسیو با مقداری

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-15]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.2.1.4]

ثابت برای شبکه استفاده نشده است و برای اعمال مولفه‌های فرکانس بالا (هارمونیک‌های۱۱و ۱۳) به فیلتر پسیو ابتدا بلوک استخراج‌کننده (extractor) جهت استخراج المان‌های این فیلتر طراحی می‌شود. برای طراحی این استخراج‌کننده ابتدا دو کمیت فرکانس رزونانس و توان راکتیو خازن به عنوان دو ورودی اعمال شده و سپس بصورت گزینشی و برای حذف هارمونیک‌های مورد نظر مقادیر L و C محاسبه می‌شوند.

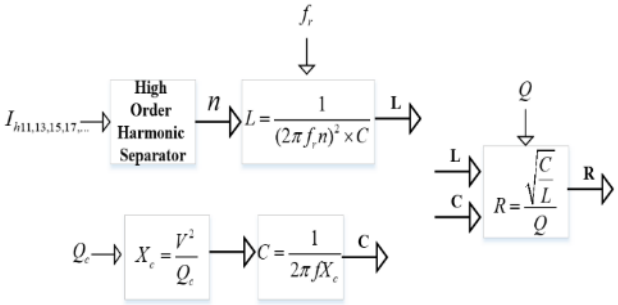
این بلوک استخراج کننده این قابلیت را به فیلتر می‌دهد که بتواند بر اساس هارمونیک‌های موجود در شبکه مقدار جدیدی برای فیلتر پسیو بدست آورد و همچنین توان راکتیو شبکه براساس مقداری که برای آن تعیین می‌شود، جبران‌سازی گردد. بنابراین مقادیر این فیلتر بر اساس تغییرات شبکه قابل تغییر می‌باشد. در طراحی استخراج کننده، ابتدا از جریان خروجی فیلتر بالاگذر نشان داده شده در شکل۶ نمونه برداری شده و با جداسازی مولفه‌های هارمونیکی آن و اعمال یکی از مولفه‌های هارمونیکی به تنظیمات فیلتر پسیو جهت محاسبه L,C می‌توان در هر لحظه و با هر مقدار هارمونیک در شبکه یک فیلتر پسیو متناسب داشت.

این بلوک مقادیر المان‌های این فیلتر را محاسبه کرده و به ساختار فیلتر ترکیبی اعمال می کند همانطور که شکل ۵ نشان می دهد. از آنجایی که در شبکه هارمونیک‌های ۱۱ و ۱۳ به عنوان هارمونیک‌های مرتبه بالا وجود دارند، پس تمرکز اصلی طراحی برای جبران‌سازی بر روی این هارمونیک‌ها می‌باشد. مقدار توان راکتیو ورودی بلوک استخراج کننده بر اساس نیاز شبکه باید ۲۰ تا ۵۰ درصد توان اکتیو بار باشد و همچنین در این طرح فرکانس رزونانس بر روی مقدار ۳۷ هرتز قرار داده می‌شود[۲۱]. برای تعیین مقدار فرکانس رزونانس باید توجه نمود که این مقدار با فرکانس اصلی شبکه و ضریبی از فرکانس اصلی برابر نباشد. شکل۷ نحوه طراحی بلوک استخراج کننده جهت تعیین مقادیر L و C را نشان می‌دهد.

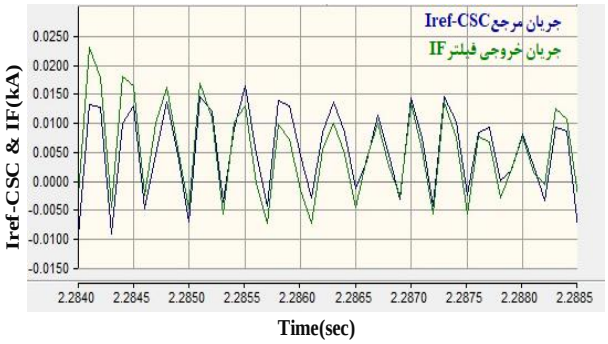
۴- شبیه‌سازی عملکرد فیلترترکیبی‌پیشنهادی

در بخش‌های قبلی بررسی شبکه مورد مطالعه و فیلتر ترکیبی پیشنهادی انجام شد. در این بخش با ورود فیلتر ترکیبی پیشنهادی نتایج و اهداف مورد نظر مقاله بررسی می‌شود.

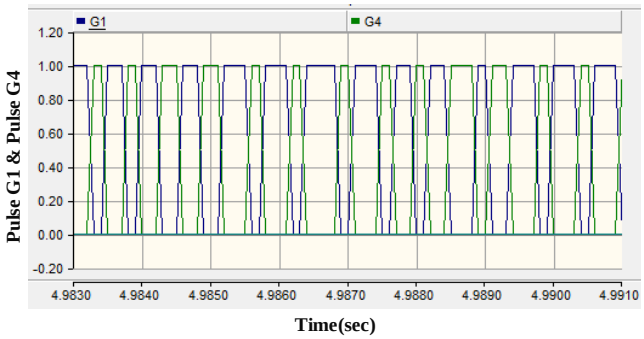
برای عملکرد صحیح فیلتر فعال مبتنی بر CSC باید طبق نسل دوم کنترل کننده‌های جریان مرجع، هر لحظه جریان خروجی فیلتر با جریان مرجع تولیدی (جریان خروجی فیلتر پایین‌گذر (I_{ref_CSC})) مقایسه شده و این اختلاف جریان به عنوان جریان مرجع جدید برای کلیدزنی به CSC اعمال شود. شکل۸ مقایسه جریان مرجع خروجی فیلتر پایین‌گذر (I_{ref_CSC}) و جریان خروجی CSC (I_F) که به شبکه تزریق می‌شود را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، CSC توانسته مقدار جریان مرجع خود را به خوبی دنبال و ردیابی کند. در برخی لحظات جریان فیلتر از مقدار جریان مرجع خود خارج شده است این بدلیل وجود المان‌های پسیو خروجی فیلتر می‌باشد. با انتخاب مقدار سلف بزرگتر می‌توان این مقدار ریپل جریان خروجی را کاهش داد طوری که جریان خروجی فیلتر با اغتشاش کمتری بهمراه باشد. با این حال با انتخاب مقدار سلف کوچکتر هزینه مبدل و تلفات آن کاهش می‌یابد. شکل۹ پالس‌های آتش GTOها را در یک ساق CSC نشان می‌دهد. در این شکل دیده می‌شود هیچکدام از ۲ کلید در یک ساق همزمان روشن نمی‌شوند.



شکل۷: طراحی بلوک استخراج کننده جهت تولید مقادیر L,C



شکل۸: جریان مرجع و جریان خروجی CSC



شکل۹: پالس‌های آتش GTO در یک ساق مبدل CSC

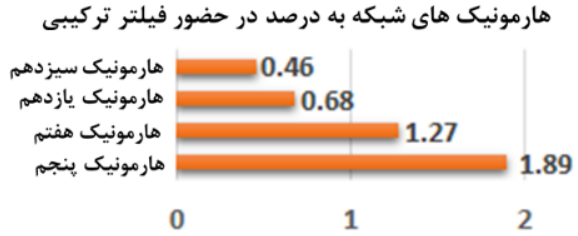
۴-۱-جبران‌سازی هارمونیکی

طبق شکل۵، بعد از ورود فیلتر ترکیبی پیشنهادی به شبکه، فیلتر هر لحظه شبکه را رصد کرده و بر اساس اطلاعات هارمونیکی دریافت شده، جریان مرجعی توسط تئوری توان لحظه‌ای برای آن

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-15]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.2.1.4]

تولید می‌کند، که این جریان مرجع عکس جریان هارمونیکی است که باید حذف شود. به عبارت دیگر فیلتر ترکیبی جریانی را به شبکه تزریق می‌کند که دقیقا عکس جریان‌های نامطلوب تزریق شده توسط یکسوکننده تریستوری به شبکه می‌باشد.

شکل۱۰ هارمونیک‌های جریان شبکه در زاویه آتش صفر درجه یکسوکننده تریستوری بعد از ورود فیلتر ترکیبی را نشان می‌دهد. ملاحظه می شود که در حضور فیلتر ترکیبی هارمونیک‌های شبکه به مقدار مورد نظر استاندارد IEEE519-2014 می‌رسد.

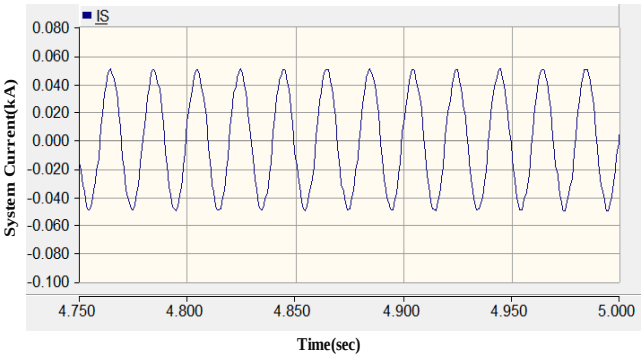


شکل۱۰: هارمونیک‌های جریان شبکه

همچنین مقدار هارمونیک‌های مجاز جریان شبکه بر اساس استاندارد ذکر شده در جدول ۴ نشان داده شده است[۲۲]. در این استاندارد بر اساس مقدار نسبت جریان اتصال کوتاه به جریان بار که بازه‌های عددی آن در ستون اول جدول۴ دیده می‌شود مقدار مجاز مراتب مختلف هارمونیکی متفاوت است.

با بکارگیری فیلتر ترکیبی پیشنهادی و طراحی انجام شده، هارمونیک‌های موجود یعنی ۵ و ۷ بمیزان کمتر از ۴٪ و هارمونیک‌های ۱۱ و ۱۳ نیز به زیر ۲درصد کاهش یافته است. شکل۱۱ جریان شبکه بعد از بکارگیری فیلتر ترکیبی در زاویه تأخیر صفر درجه یکسوکننده تریستوری با بار RL را نشان می‌دهد. این شکل موج جریان بیانگر آنست که فیلتر ترکیبی توانسته است کیفیت موج جریان شبکه را نسبت به زمانی که شبکه بدون فیلتر است، بهبود ببخشد در حالی که شرایط کاری شبکه و ماهیت بارها برای دو حالت یکسان فرض شده است.

طبق نتایج بدست آمده این فیلتر در زوایای آتش ۰-۹۰ درجه یکسوکننده تریستوری با بار RL می‌تواند هارمونیک‌های جریان شبکه را در محدوده مجاز نگه دارد. شکل۱۲ هارمونیک‌های شبکه با حضور فیلتر ترکیبی در زوایای آتش تأخیر ۰-۹۰ درجه یکسوکننده تریستوری را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، فیلتر ترکیبی پیشنهادی که شامل دو بخش فیلتر فعال CSC و بانک خازنی اصلاح شده با ساختار فیلتر پسیو است به خوبی توانسته هارمونیک‌ها را در محدوده مجاز حفظ کند. فیلتر اکتیو CSC با تزریق جریان‌هایی دقیقا عکس جریان‌های نامطلوب شبکه(شامل هارمونیکهای ۵ و ۷) وظیفه حذف این هارمونیک‌ها در هر لحظه انجام می‌دهد و فیلتر پسیو نیز با توجه به مقدار خازن و سلف استخراجی هارمونیک‌های ۱۱ و ۱۳ را حذف می‌کند.



شکل۱۱: جریان شبکه توزیع با فیلتر ترکیبی

۲-۴-جبران‌سازی توان راکتیو

ضریب توان در یکسوکننده‌های تریستوری(کنترل شده)، طبق رابطه(۳) بستگی به زاویه آتش(α) دارد. همچنین در مبدل‌های کنترل شده‌ای که ولتاژ خروجی پایین دارند، ضریب توان مقدار بسیار کمی داشته به همین دلیل باید در نزدیکی این مبدل‌ها جبران‌سازی توان راکتیو برای بهبود ضریب توان مبدل انجام شود. فیلتر ترکیبی پیشنهادی طوری طراحی می‌شود که در تمام زوایای آتش یکسوکننده بتواند توان راکتیو دریافتی از شبکه را جبران و ضریب قدرت بار را طبق جدول۵ اصلاح کند. در طرح پیشنهادی به دلیل استفاده از بانک خازنی اصلاح شده با ساختار فیلتر پسیو توان راکتیو مورد نیاز بار جبران‌سازی می‌شود. در شرایطی که فیلتر ترکیبی به شبکه متصل نیست، شبکه خاصیت سلفی داشته و توان راکتیو عبوری از شبکه مثبت و مقدار آن برابر ۷/۲ کیلووار است. بعد از حضور فیلتر ترکیبی و ورود بانک خازنی اصلاح شده با ساختار فیلتر پسیو مقدار توان راکتیو مورد نیاز بار تامین می‌شود و مقدار آن برابر ۵/۳- کیلووار می‌گردد.

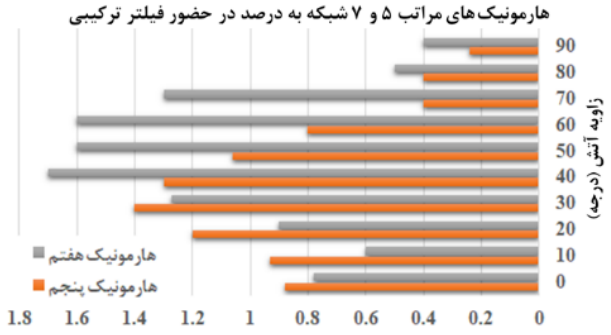
جدول۴: مقادیر هارمونیک‌های جریان برای شبکه‌های۱۲۰ ولت تا ۶۹ کیلوولت بر اساس استاندارد IEEE519-2014

I_{SC} / I_L	۳≤ h <۱۱	۱۱≤ h <۱۷	۱۷≤ h <۲۳	۲۳≤ h <۳۵	۳۵≤ h <۵۰
<۲۰	۴٪	۲٪	٪ ۱/۵	٪ ۰/۶	٪ ۰/۳
۲۰< ۵۰	۷٪	٪ ۳/۵	٪ ۲/۵	۱٪	٪ ۰/۵

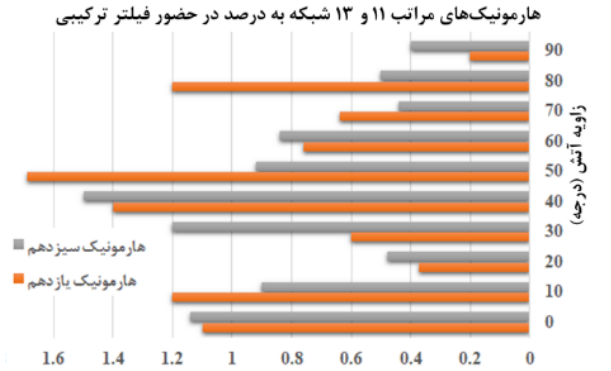
[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-15]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.2.1.4]

۵۰ <۱۰۰	۱۰٪	٪ ۴/۵	٪۴	٪ ۱/۵	٪ ۰/۷
۱۰۰ < ۱۰۰۰	۱۲٪	٪ ۵/۵	٪۵	۲٪	۱٪
۱۰۰۰۰<	۱۵٪	۷٪	٪۶	٪ ۲/۵	٪ ۱/۴



(الف)



(ب)

شکل۱۲: هارمونیک‌های جریان شبکه توزیع با فیلتر ترکیبی: (الف) هارمونیک‌های پنجم و هفتم، (ب)هارمونیک‌های یازدهم و سیزدهم

این روند در طراحی فیلتر پیشنهادی می‌تواند برای فیلتر و جبران‌سازی دیگر انواع بارهای غیرخطی با طیف هارمونیکی متفاوت بخوبی مورد استفاده قرار گیرد. با این حال ضروری است در هر مورد فرکانس تفکیک با توجه به شناخت جامع از ماهیت طیف فرکانسی بار مورد مطالعه و هوشمندانه انتخاب شود تا شاخص یا شاخص‌هائی بهینه شوند. برای مثال چنانچه از یک مبدل ۱۲ پالسه بهمراه یک خازن جبران‌ساز موازی برای تغذیه بار استفاده شود هرچند هارمونیک‌های مراتب ۵ و ۷ در شکل موج جریان ac مبدل غایبند اما در مقایسه با فیلتر پیشنهادی و برای دستیابی به یک هدف یکسان، پیاده‌سازی پیچیده‌تر و هزینه و تلفات بیشتری تحمیل می‌نماید. در مقایسه با مبدل با تعداد پالس بیشتر این ویژگی‌ها برای فیلتر پیشنهادی بیشتر هم می‌شود. علاوه بر این انتخاب فرکانس تفکیک انعطاف‌پذیری زیادی را در رسیدن به اهداف مختلف در اختیار طراح قرار می‌دهد که در دیگر ساختارهای متداول وجود ندارد. با این وجود این انعطاف‌پذیری در محدوده معنی‌دار و مهمی که برای برقراری ملاحظات استاندارد IEEE519-

جدول۵: ضریب قدرت بار با و بدون فیلتر ترکیبی

با فیلتر ترکیبی	بدون فیلتر ترکیبی	زاویه آتش(درجه)
۰/۹۷۲	۰/۹۶	۰
۰/۹۷۲	۰/۹۶	۱۰
۰/۹۷۲	۰/۹۶	۲۰
۰/۹۶۲	۰/۹۰	۳۰
۰/۹۷۲	۰/۸۴	۴۰
۰/۹۸۴	۰/۷۷	۵۰
۰/۹۹۱	۰/۷۱	۶۰
۰/۹۹۷	۰/۶۶	۷۰
۰/۹۹۷	۰/۶۳	۸۰
۰/۹۹۸	۰/۶۱	۹۰

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-15]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.2.1.4]

2014 و نیز جبران‌سازی بمنظور ضریب توان بیشتر از ۹۶ درصد ضروری است می‌تواند ارزیابی شود.

۳-۴-تجزیه و تحلیل ظرفیت و تلفات

در این ایده پیشنهادی با توجه به اینکه المان‌های فیلتر پسیو هر لحظه کنترل می‌شوند به عنوان یک فیلتر پسیو متغییر می‌تواند جریان عبوری از فیلتر فعال را کاهش داده و به تبع آن تلفات فیلتر نیز کاهش می‌یابد. طبق روابط (۶)-(۹) نحوه کاهش تلفات و ظرفیت CSC با استفاده از ایده جداسازی مولفه‌های فرکانسی جریان مرجع توضیح داده می‌شود.

توان یک GTO به استفاده از رابطه (۵) بدست می‌آید[۱۶] که در آن جریان کلیدزنی(I_{SW}) عبوری از کلیدها با در نظرگیری جریان مرجع در حضور تمام هارمونیک‌ها طبق رابطه (۷) خواهد بود.

$$S_{GTO} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times V_{DC} \times I_{SW} \quad (۶)$$

$$I_{SW} = I_{ref} = I_{h5.7} + I_{h11.13} \quad (۷)$$

با استفاده از ایده جداسازی مولفه‌های فرکانسی جریان مرجع و اعمال مولفه‌های فرکانس پایین به CSC و ممانعت از ورود جریان هارمونیکی با مولفه‌های فرکانس بالا، مقدار جریان پیک عبوری از کلیدها نیز کاهش می‌یابد. در این صورت این ایده باعث کاهش فشار و استرس بر روی نیمه‌هادی‌های قدرت شده، کاهش ظرفیت و توان نیمه هادی‌های CSC را بدنبال داشته و به تبع آن باعث کاهش هزینه و تلفات خواهد شد. رابطه (۸) مقدار توان یک کلید را پس از جداسازی مولفه‌های جریان مرجع نشان می‌دهد.

$$S_{GTO} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times V_{DC} \times I_{h5.7} \quad (۸)$$

تلفات کلیدزنی در یک مبدل قدرت به سه مولفه ولتاژ(v_{SW}) و جریان کلیدزنی(I_{SW}) و تعداد دفعات کلیدزنی(f_{SW}) وابسته است. این تلفات در دو حالت روشن و خاموش بودن کلیدها طبق رابطه (۹) بدست می‌آید.

$$P_{SW-GTO} = f_{SW}\left(\int_{t_{ON}} v_{SW}(t) \cdot I_{SW}(t) \cdot dt + \int_{t_{OFF}} v_{SW}(t) \cdot I_{SW}(t) \cdot dt\right) \quad (۹)$$

با اعمال فقط مولفه‌های فرکانس پایین جریان مرجع به CSC تلفات کلیدزنی در مقایسه با وضعیتی که در آن جریان مرجع با تمام مولفه‌های فرکانسی بکار برده می‌شود کاهش می‌یابد.

۵- مقایسه طرح ترکیبی پیشنهادی

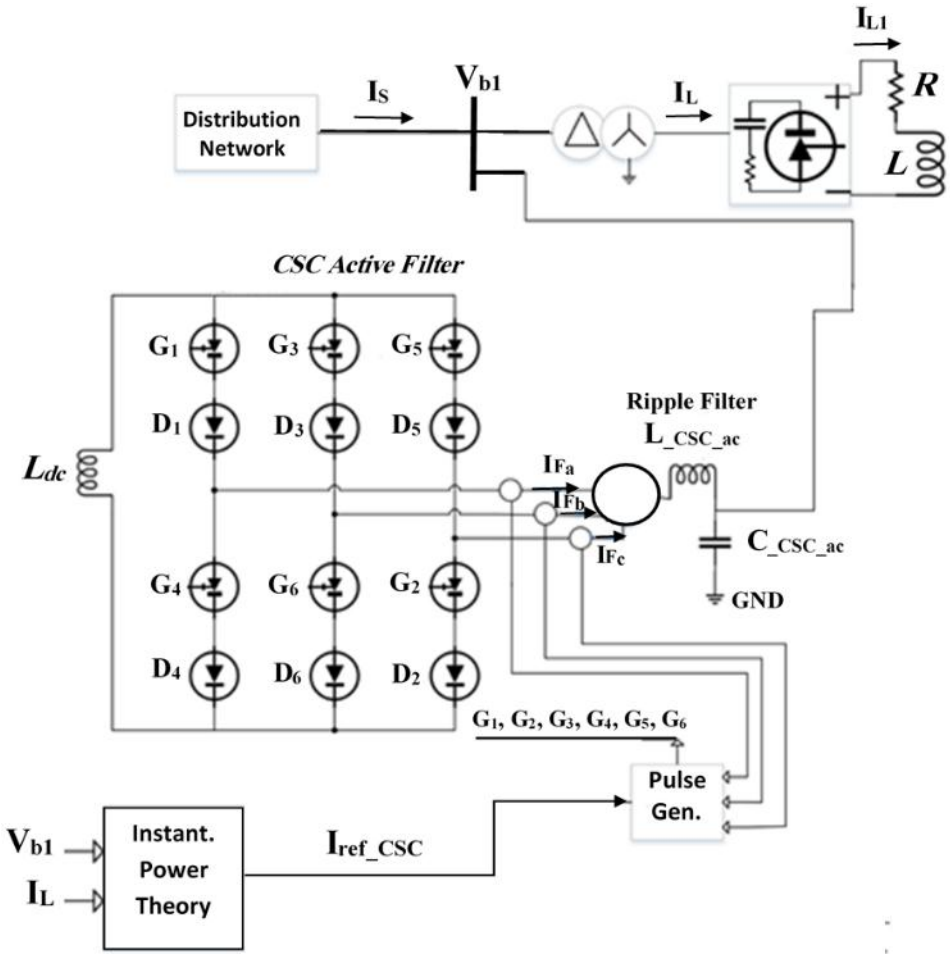
برای نشان‌دادن ویژگی‌های ایده پیشنهادی، این طرح ابتدا با طرحی مقایسه می‌شود که در آن فیلتر فعال مبتنی بر CSC به تنهائی حضور داشته و جریان مرجع با تمام محتوای هارمونیکی به آن اعمال می شود. سپس در بخش بعدی شبکه طراحی شده با دو طرح مراجع [۷] و [۱۶] از نظر چندین عملکرد مقایسه می‌گردد.

برای مقایسه طرح پیشنهادی با طرح فیلتر فعال مبتنی بر CSC تکی، شبکه نشان داده شده در شکل۱۳ در محیط PSCAD/EMTDC پیاده سازی می‌شود.

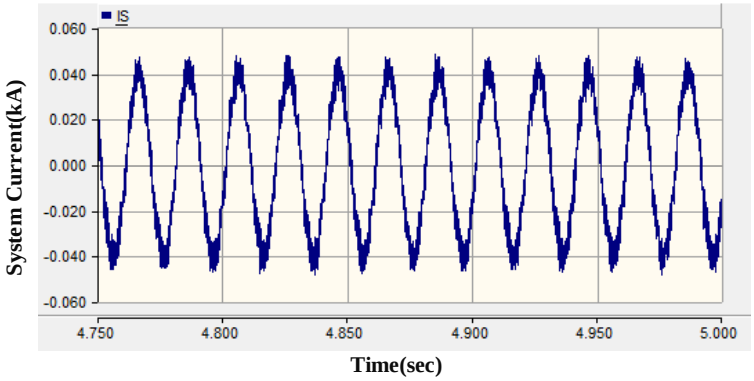
شکل۱۴ جریان شبکه را با فیلتر فعال مبتنی بر CSC نشان می‌دهد. در این حالت کیفیت جریان شبکه مناسب نبوده و برای رسیدن به کیفیت شکل موج قابل قبول باید مقدار عناصر پسیو در طرف مبدل CSC را افزایش داد. مثلا عناصر پسیو تا ۱۰۰ برابر نسبت به طرح پیشنهادی مقدارشان افزایش یابد[۷].

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-15]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.2.1.4]



شکل۱۳: شبکه مورد مطالعه با فیلتر فعال مبتنی بر CSC



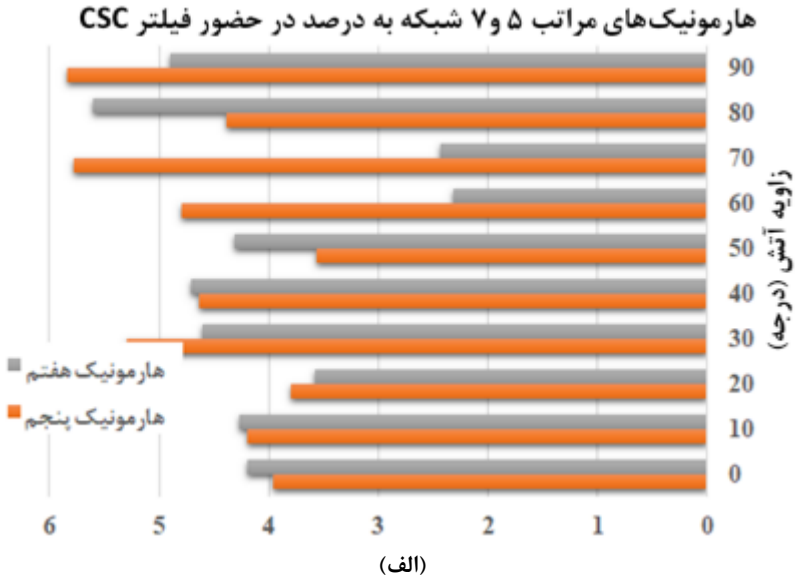
شکل۱۴: جریان شبکه با حضور فقط فیلتر فعال مبتنی بر CSC

برای نشان دادن تاثیر افزایش المان‌های پسیو فیلتر فعال CSC، ابتدا مقدار این المان‌ها را۵۰ برابر افزایش داده هارمونیک‌های جریان شبکه در این حالت بررسی می‌شود. مقدار L_{dc}-CSC، L_{ac}-CSC، C_{ac}-CSC به ترتیب ۵ میکروهانری، ۵ میلی هانری و ۲۰۰ میکروفاراد می‌باشد. طبق شکل۱۵هارمونیک‌های مراتب پایین و بالا جریان شبکه در بیشتر زوایای آتش کلیدزنی از محدوده مجاز استاندارد عبور کرده است. برای نگه داشتن هارمونیک‌ها در محدوده مجاز مقدار المان‌های پسیو دو طرف فیلتر فعال مبتنی بر CSC نسبت به وضعیت اولیه ۱۰۰ برابر می‌شود. مقدار L_{dc}-CSC، L_{ac}-CSC، C_{ac}-CSC در این حالت به ترتیب ۱۰میکروهانری، ۱۰میلی هانری و ۴۰۰میکروفاراد می‌باشد. مقدار هارمونیک‌ها در شکل۱۶ نشان می‌دهد که تمام بازه‌های موردنظر استاندارد با افزایش ۱۰۰برابری مقادیر المان‌های پسیو حفظ می‌شود. با برآورده انجام شده استاندارد کیفیت جریان نسبت به طرح اولیه افزایش داشته و این تاثیر در شکل۱۷ بوضوح مشاهده می‌شود. افزایش ۱۰۰برابری المان‌های فیلتر پسیو می‌تواند راندمان فیلتر فعال مبتنی بر CSC

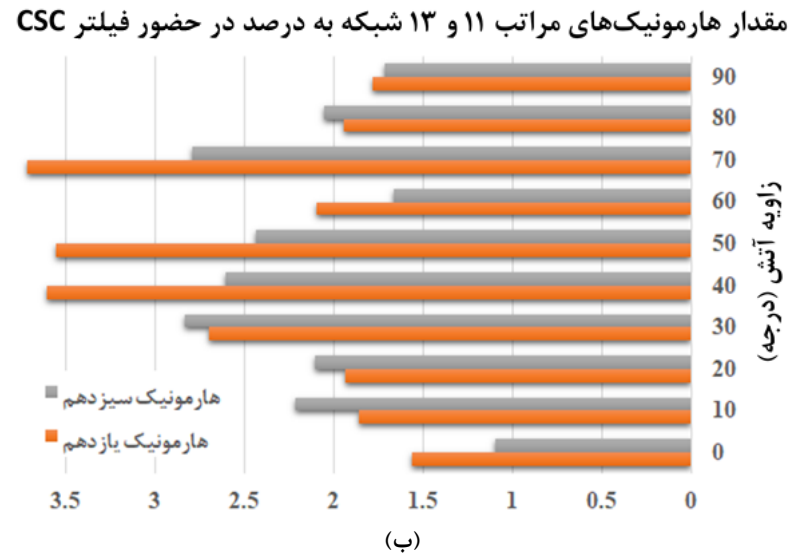
[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-15]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.2.1.4]

را کاهش داده و همچنین تلفات و هزینه مبدل را نیز افزایش دهد. در صورتی که می‌توان با استفاده از ایده پیشنهادی و با استفاده از یک بانک خازنی اصلاح شده با ساختار فیلتر پسیو هم راندمان و تلفات مبدل به مقدار مناسب رسانده شود و هم علاوه بر هارمونیک، توان راکتیو شبکه را نیز جبران‌سازی نمود. جدول۶ مقایسه‌ای بین هزینه طرح پیشنهادی بر مبنای جداسازی مؤلفه‌های فرکانسی و طرح فیلتر فعال مبتنی بر CSC تکی را در حالتی نشان می‌دهد که در حالت تکی مقدار سلف‌های دوطرف مبدل CSC ۱۰۰ برابر افزایش پیدا کنند. مقدار هزینه‌ها در جدول۶ بر اساس اطلاعات دو شرکت معتبر farnell و eu-mouser می‌باشد [۲۴-۲۳].



(الف)

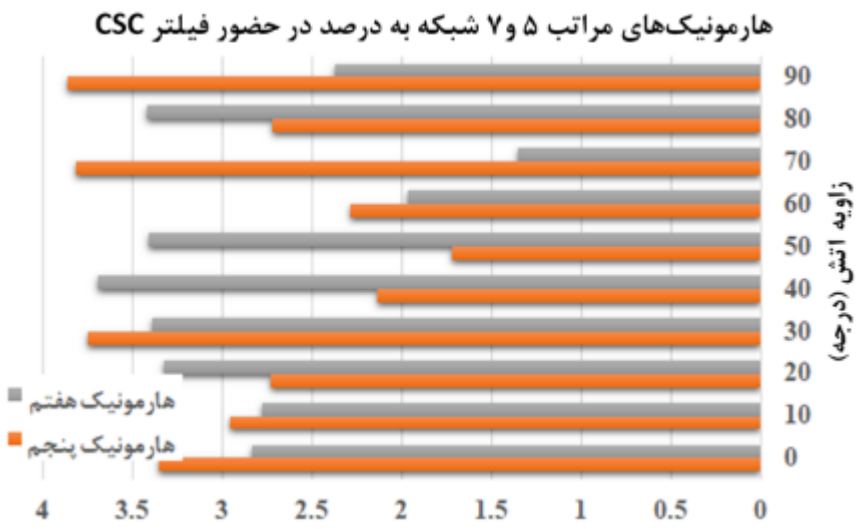


(ب)

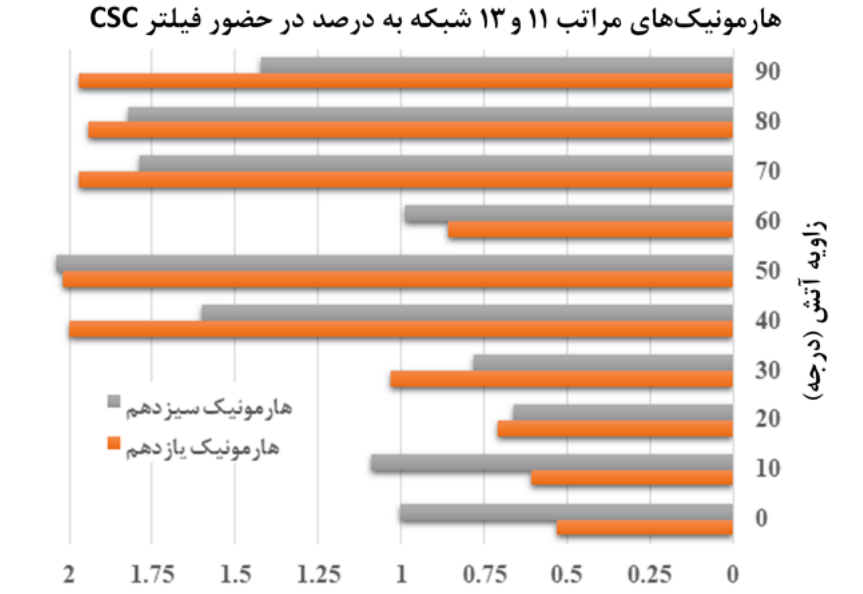
شکل۱۵: هارمونیک‌های جریان شبکه با فیلتر فعال CSC با افزایش ۵۰ برابری المان‌های پسیو: (الف) هارمونیک‌های پنجم و هفتم، (ب)هارمونیک‌های یازدهم و سیزدهم

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-15]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.2.1.4]

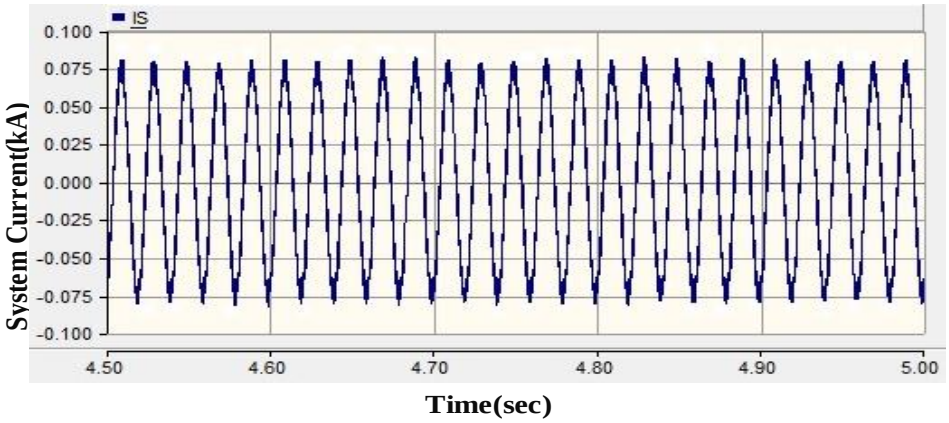


(الف)



(ب)

شکل۱۶: هارمونیک‌های جریان شبکه با CSC با افزایش ۱۰۰ برابری المان‌های پسیو: (الف) هارمونیک‌های پنجم و هفتم، (ب)هارمونیک‌های یازدهم و سیزدهم



شکل۱۷: جریان شبکه با فیلتر فعال مبتنی بر CSC با افزایش ۱۰۰ برابری المان‌های پسیو

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-15]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.2.1.4]

جدول۶: هزینه مبدل منبع جریان در دو طرح رقابتی

	L_{ac}-CSC			L_{dc}-CSC			GTO		
	تعداد	قیمت دلار	ظرفیت میلی هانری	جریان عبوری	تعداد	قیمت	ظرفیت میکروهانری	جریان عبوری	تعداد	قیمت	جریان عبوری
فیلتر فعال مبتنی بر CSC بتنهائی	۳	۵۱/۱۳	۱۰	۴۰ آمپر	۱	۱۲/۳دلار	۱۰	۴۰ آمپر	۶	۹/۶دلار	۴۰آمپر
طرح پیشنهادی مبتنی بر جداسازی فرکانس‌های هارمونیکی	۳	۱۷/۶۴	۰/۱	۲۲آمپر	۱	۳/۵۶دلار	۰.۱	۲۲آمپر	۶	۴/۵۰دلار	۲۲آمپر

جدول۷: مقایسه طرح پیشنهادی

	عملکرد در شرایط مختلف بار	بهبود ضریب قدرت	هزینه	تلفات توان	عملکرد فعال	قابلیت جلوگیری رزونانس
طرح مرجع [۱۶]	---	قوی	بالا	بالا	متوسط	قوی
طرح مرجع[۷]	---	---	پایین	پایین	قوی	قوی
طرح پیشنهادی	**قوی**	قوی	پایین	پایین	قوی	قوی

با مقایسه طرح پیشنهاد شده در این مقاله با دو طرح مراجع [۷] و [۱۶] و طبق جدول۶ دیده می‌شود نقاط ضعف این دو طرح از چند نقطه نظر عملکردی پوشش داده می‌شود. سلول‌های پررنگ نقاط ضعف طرح‌های مراجع یاد شده را نشان می‌دهد. قابل ذکر است در این مقاله عملکرد حالت ماندگار فیلتر پیشنهادی مورد توجه بوده است. در چنین شرایطی می توان از مدل حالت ماندگار یک بار موتوری مثلا یک موتور DC استفاده کرد. برای یک شرایط کاری نمونه، مدار معادل الکتریکی ساده شده موتور از دید ترمینال را می توان با یک سلف و یک مقاومت سری نمایش داد که می تواند مشابه همین بار RL مفروض در مقاله باشد. بنابراین در حالت ماندگار نتایج برای بار موتوری هم همچنان معتبر باقی می ماند. در نتیجه می توان انتظار داشت که طرح پیشنهادی در این مقاله به نحوی است که اگر به شبکه بار موتوری متصل شود وهارمونیک به جریان شبکه توزیع تزریق کند، فیلتر توانایی آن را دارد که خود را با هر تغییری در میزان و مقدار هارمونیک تنظیم نماید.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله ساختار یک فیلتر ترکیبی شامل فیلتر فعال مبتنی بر CSC و بانک خازنی اصلاح شده با ساختار فیلتر پسیو موازی پیشنهاد شده است. در این ایده ابتدا جریان مرجع با استفاده از تئوری توان لحظه‌ای محاسبه شده و سپس مولفه‌های فرکانس‌پائین و فرکانس بالا بر مبنای فرکانس تفکیک انتخابی جداسازی شده و فقط مولفه‌های فرکانس پائین به CSC اعمال می‌شوند. بقیه طیف هارمونیکی در واحد استخراج کننده و بمنظور تعیین مقادیر بخش پسیو فیلتر ترکیبی و جبران‌ساز مورد استفاده قرار می‌گیرد در وهله اول فیلتر پیشنهادی به یک سیستم توزیع شامل یکسوکننده سه‌فاز تایریستوری با بار RL به عنوان بار غیرخطی اعمال شده و عملکرد فیلتر در کاهش هارمونیک جریان شبکه تا محدوده مجاز استاندارد IEEE519-2014 و اصلاح ضریب قدرت مورد بررسی قرار گرفته و اعتبار سنجی شده است. در مرحله بعد، مزیت‌های طرح پیشنهادی نسبت به ساختارهای مشابه از دیدگاه های تلفات و هزینه مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که در شرایط مشابه بار و شبکه و برای رسیدن به نتایج یکسان مقادیر المان‌های پسیو در ساختارهای متعارف به مراتب بیشتر از این مقادیر در ساختار ترکیبی پیشنهادی است. این مسئله منجر به افزایش تلفات و هزینه در ساختارهای مشابه نسبت به ساختار پیشنهادی می‌شود. همچنین طبق نتایج شبیه‌سازی، عملکرد ساختار ترکیبی در اصلاح ضریب قدرت و تحت بارهای مختلف بهتر از ساختارهای مشابه است. این مزیت به لحاظ عملی

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-15]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.2.1.4]

ارزشمند است چون بار شبکه بطور لحظه‌ای تغییر می‌کند و جبران‌کننده باید بتواند به این تغییرات در زمان مناسب پاسخ دهد.

مراجع

[1] Das S. R., Ray P. K., Mohanty A., "Enhancement of power quality disturbances using hybrid power filters", International Conference on Circuit ,Power and Computing Technologies (ICCPCT), Kollam, pp.1-6, October 2017.

[2] کیانی مقدم محمد، سالم نیا احمد، شیوایی مجتبی، عاملی محمدتقی. یک رویکرد چندهدفه جدید برای برنامه ریزی فیلترهای اکتیو قدرت با بهره گیری از الگوریتم جستجوی ملودی و روش رضایت مندی فازی. نشریه کیفیت و بهره وری صنعت برق ایران. ۱۳۹۵; ۵ (۹) :۳۱-۴۷.

[3] Mahela, O. P., Shaik, A. G., "Topological aspects of power quality improvement techniques: A comprehensive overview", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier, vol. 58(C), pp 1129-1142, December 2015.

[4] Ferreira S. C., Gonzatti R. B., Pereira R. R., da Silva C. H., da Silva L. E. B., Lambert-Torres G., "FiniteControl Set Model Predictive Control for Dynamic Reactive Power Compensation With Hybrid Active Power Filters", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 3, pp. 2608-2617, March 2018.

[5] Akagi H., Kanazawa Y., Nabae A., "Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-Phase Circuits", Proceedings IPEC83, Tokyo1983.

[6] Li D., Song M., Hu J., . Luo Y, Xiao X., Yang K., "Improved series active power filter with fundamental and harmonic magnetic flux hybrid compensation", in IET Power Electronics, vol. 11, no. 6, pp. 1038-1045, May 2018.

[7] Zafari A., and Jazaeri M., (2016), A novel structure of hybrid active power filter based on voltage- current source converter (VCSC- HAPF), Int Trans Electr Energ Syst, doi:10.1002/etep.2299, November 2016.

[8] Bilgin H. F., Ermis M., "Current source converter based STATCOM: operating principles, design and field performance", Electr Power Syst. Res, Vol.81, No.2, PP.478-487, October 2010.

[9] Pinto J. G., Exposto B., Monteiro V., Monteiro L. F. C., "Comparison of current- source and voltage- source shunt active power filters for harmonic compensation and reactive power control", 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, pp. 5161–5166, October 2012.

[10] Singh B, Verma V., "An improved hybrid filter for compensation of current and voltage harmonics for varying rectifier loads"., Int J Electr Power Energy Syst., Vol. 29, PP.312–321, July 2007.

[11] Zafari A., Jazaeri M., "STATCOM systems in distribution and transmission system applications: a review of power stage topologies and control methods", International Transactions on Electrical Energy Systems, Early view, DOI:10.1002/etep.2084, May 2015.

[12] Allah Hooshmad R., Torabian Esfahani M., "A new combined method in active filter design for power quality improvement in power system". ISA Trans, Vol. 50, PP.150–8, December 2011.

[13] Ryckaert W. R. A., Ghijselen J. A. L., Melkebeek J. A. A., "A hybrid compensation system comprising hybrid power filter and AC power capacitor", Electr Power Syst Res, Vol. 65, PP.639, February 2006.

[14] Tamali Y., Srianthumrong S., Akagi H., "Comparisons between a hybrid shunt active filter and a pure shunt active filter",.Electr Eng Jpn, Vol. 153, No. 2, PP. 61-70, August2005.

[15] Zafari A., Jazaeri M., "Conceptual design of an efficient unified shunt active power filter based on voltage and current source converters", Energy (2016), http://dx.doi.org/10.1016/j.energy, November 2016.

[16] Corasaniti V. F., Barbieri M. B., Arnera P. L., Valla M. I., "Hybrid Active Filter for Reactive and Harmonics Compensation in a Distribution Network," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.56, no. 3, pp.670-677, March2009.

[17] Muhammad H, Rashid: Power Electronics Circuits, Device, Applications, Pearson Publishing, (4nd ed.)2014.

[18] Nicolae P., and Nicolae I., "About the static excitation system with a fully controlled rectifier", *Eurocon2013*, Zagreb, pp. 969-97, July 2013.

[19] Ngandui E., Olivier G., "Analysis of the performances of thyristor rectifiers in an unbalanced regime", Engineering Solutions for the Next Millennium. IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (Cat. No.99TH8411), Edmonton, Alberta, Canada, vol.3, pp. 1234-1239, August 1999.

[20] Kwak S., Toliyat H. A., "Multilevel Converter Topology Using Two Types of Current-Source Inverters", in *IEEE Transactions on Industry* Applications, vol. 42, no. 6, pp.1558-1564, November 2006.

[21] Sachan R., Srivastava R., "Performance analysis of fixed shunt passive filters for harmonic mitigation", International Conference on Emerging Trends in Electrical Electronics & Sustainable Energy Systems (ICETEESES), Sultanpur, pp.8790, October2016.

[22] IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems", in IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std5191992) , vol., no., pp.1-29, June 2014.

[23] http://www.farnell.com

[24] http://www.Eu.mouser.com

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-15]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.2.1.4]