

# 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<sup>۱</sup>، کارشناسی ارشد، مصطفی جزائری<sup>۲</sup>، دانشیار، علی زعفری<sup>۳</sup>، 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 جبران سازی هارمونیک و توان راکتیو پیشنهاد می کند. این ساختار جدید بر اساس ایده جداسازی مولفه های فرکانس بالا و پایین جریان مرجع می تواند بر روی عملکرد هر دو فیلتر موثر بوده و کارآئی فیلتر ترکیبی را افزایش دهد. مولفه های فرکانس پایین به فیلتر فعال و مولفه های فرکانس بالا به تنظیمات بانک خازنی اصلاح شده با ساختار فیلتر پسیو اعمال می شود. واحد استخراج کننده فیلتر پسیو بر اساس اطلاعاتی که از طراح دریافت می کند می تواند توان راکتیو شبکه را جبران کرده و همزمان به صورت گزینشی هارمونیک های مرتبه بالا را جبران نماید. این ایده هارمونیک های جریان شبکه را به مقدار مورد نظر استاندارد IEEE519-2014 تقلیل داده و توان راکتیو شبکه را جبران می نماید، در حالیکه می تواند 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 می دهد ایده پیشنهادی انعطاف پذیری قابل ملاحظه ای را برای فیلتر بهمراه داشته و کارآئی آن را افزایش می دهد.

واژه های کلیدی: فیلتر ترکیبی، مبدل منبع جریان، جداسازی مولفه های 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

## ۱- مقدمه

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 عنوان 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، فیلتر پسیو-فیلتر فعال، فیلتر فعال-فیلتر فعال می‌باشند [۱۲-۱۳]. فیلترهای ترکیبی به طور موثر مشکلات فیلترهای پسیو و فعال را موقعي که بنهایی در شبکه مورد استفاده قرار می‌گیرند را کاهش می‌دهد. در تحقیقات صورت گرفته بر روی فیلتر ترکیبی نشان داده شده که جبران‌سازی هارمونیک و توان راکتیو نسبت به موقعی که ایندو بنهایی بکارگرفته شوند بهتر انجام می‌شود. از پرکاربردترین ساختار فیلتر ترکیبی می‌توان به ترکیب فیلتر فعال سری-فیلتر پسیو موازی با شبکه و نیز ترکیب فیلتر فعال سری-فیلتر پسیو موازی با شبکه VSC اشاره کرد [۱۴-۱۵]. در طرحی جدید از فیلتر ترکیبی، دو مبدل 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 راکتیو مورد نیاز بار متصل به شبکه توزیع را نیز تامین نموده و ضریب قدرت آن را بهمود بخشدید. 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.

هارمونیک‌ها نوسانات مزاحمی هستند که می‌توانند اثرات منفی مانند نوسانات الکتریکی و مکانیکی در ژنراتورها و دستگاه‌های محرك، خط‌ها 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 پیشتری 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.

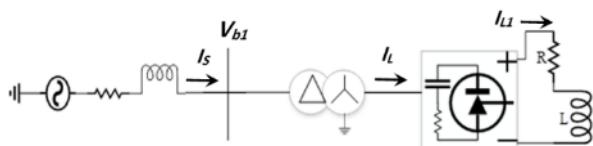
راهکار اولیه استفاده از جبرانگر سنتی مانند بانک خازنی و نیز فیلتر پسیو بر ترتیب جهت جبران توان راکتیو و جلوگیری از انتشار امواج هارمونیکی می‌باشد [۳-۴]. ولی استفاده از جبران‌گر سنتی می‌تواند باعث تقویت ولتاژ هارمونیکی به دلیل رزونانس بین خطوط و خازن‌های موازی شده و احتمال تشديد فیلتر پسیو در نزدیکی فرکانس 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 قادر 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 سینگال‌های 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 الشاعر 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  $\alpha\beta0$  به  $abc$  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

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

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

در رابطه فوق  $\alpha$  زاویه تاخیر روشن شدن کلیدها بر حسب درجه می باشد. بعلاوه  $I_S$ ،  $I_L$  و  $I_{L1}$  به ترتیب جریان شبکه، جریان ورودی یکسو کننده و جریان مصرفی بار  $RL$  می باشند.

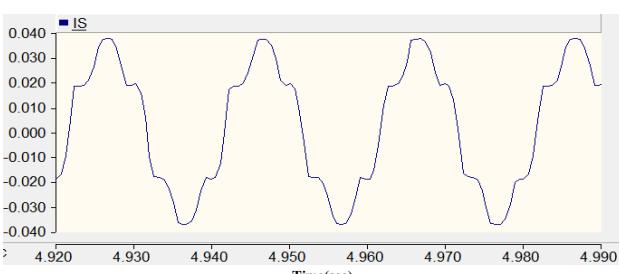
مشخصات بار  $RL$  بهمراه اطلاعات ساختار یکسو کننده تریستوری ۶ پالسه در جدول ۱ آورده شده است. در این شرایط جریان شبکه که با جریان بار شبکه یکسان است در شکل ۲ مشاهده می شود. بوضوح مشخص است که شکل موج جریان شبکه دارای هارمونیک بوده و از شکل موج سینوسی فاصله دارد. شکل ۳ هارمونیک های موجود در شکل موج جریان شبکه را در زاویه آتش صفر درجه یکسو کننده تریستوری با بار  $RL$  نشان می دهد. در این شکل مقدار درصد هارمونیک های شبکه بر مبنای مقدار درصد هارمونیک پایه می باشد.



شکل ۱: ساختار شبکه توزیع با بار غیر خطی (یکسو کننده تریستوری با بار  $RL$ )

جدول ۱: مشخصات بار  $RL$  با یکسو ساز تریستوری

بار $RL$		ساختار یکسو کننده تریستوری ۶ پالسه					
مقاومت $R$	سلف $L$	خازن مدار استابر	مقاومت مدار استابر	مقاومت هر تریستور در حالت خاموش	مقاومت هر تریستور در حالت روشن	توان	انتخاب
۱۵ اهم	۸۰ میلی هانتری	۰/۰۵ میکرو فاراد	۵ کیلو اهم	۱ مگا اهم	۰/۰۱ اهم		



شکل ۲: شکل موج جریان شبکه توزیع بدون حضور فیلتر

- در مرجع [۱۶] فیلتر پسیو در هارمونیک پنجم که فیلتر کردن آن به مرتب از فیلتر کردن هارمونیک های بالا مشکل تر است تنظیم شده و همین موضوع فشار بر روی فیلتر پسیو را برای جبران همزمان توان راکتیو و هارمونیک افزایش می دهد. در این طرح برخلاف مرجع [۱۶] با استفاده از ایده جداسازی مولفه های فرکانسی، هارمونیک های مرتبه پایین به فیلتر فعال و هارمونیک های مرتبه بالا به فیلتر پسیو اعمال می شود 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 جبران سازی 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 بخش ۲ این مقاله ساختار شبکه توزیع با بار غیر خطی (یکسو کننده تریستوری با بار  $RL$ ) و هارمونیک های شبکه و جریان منبع و بار ارائه می شود. در بخش ۳ ساختار کلی فیلتر ترکیبی و نحوه تولید و اعمال ایده پیشنهادی تشریح شده و بخش ۴ نتایج حاصل از عملکرد فیلتر ترکیبی را مورد تجزیه و تحلیل قرار می دهد. مقایسه بین فیلتر ترکیبی پیشنهادی و چند طرح دیگر در بخش ۵ انجام می شود. بخش ۶ به نتیجه گیری اختصاص می یابد.

## ۲- ساختار شبکه توزیع با بار غیر خطی

شکل ۱ یک شبکه توزیع ۴۰۰ ولت، ۵۰ هرتز با بار غیر خطی شامل یکسو کننده تریستوری ۶ پالسه و بار  $RL$  سری را نشان می دهد. از آنچاییکه هدف حذف محلی هارمونیک های تولیدی است لذا می توان برای شبکه بالادست از معادل تونن استفاده کرد. چنین باری در فرآیند کلیدزنی، جریان با طیف وسیعی از نوسانات هارمونیکی با فرکانس های بالا و پائین را به شبکه تزریق می کند که می تواند کیفیت تغذیه را تا حد غیر قابل قبول کاهش داده و مشکلاتی را در بهره برداری ایجاد نماید. بمنظور پیشگیری و اصلاح شرایط عملکردی مجموعه بار و سیستم، همه آرایش های متفاوت فیلتر های پسیو و فعل در ترکیبات مختلف سری، موازی و یا ترکیبی جریان و یا ولتاژ هارمونیکی تزریق می کنند. بخش موازی فیلتر جریان و بخش سری ولتاژ هارمونیکی را تولید می کند.

در شبکه شکل ۱ مقدار موثر جریان کشیده شده توسط بار  $RL$  می تواند با رابطه ۱ محاسبه شود [۱۷]:

جدول ۲ 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 بار RL را تغذیه می‌کند، حضور این بار نیز بر مصرف توان را کنیو و کاهش ضریب قدرت بار نیز اثرگذار می‌باشد. این تاثیر با صرفنظر کردن از تلفات یکسوکننده تریستوری به کمک معادلات (۲) و (۳) بیان می‌شود.

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

$$\begin{aligned} P_{dc} &= P_{ac} \xrightarrow{yields} V_{dc} I_{dc} \cos \alpha = V_{ac} I_{ac} \cos \varphi \\ \xrightarrow{I_L=\frac{\sqrt{6}}{\pi}I_{dc}} \quad \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m I_{dc} \cos \alpha &= \frac{3}{\sqrt{2}} V_m \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_{dc} \cos \varphi \quad (3) \\ \xrightarrow{yields} \quad \cos \alpha &= \cos \varphi \end{aligned}$$

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

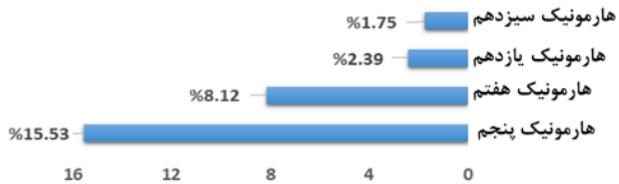
جدول ۲: مقدار ضریب قدرت شبکه به ازای تغییرات زاویه آتش بدون حضور فیلتر

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

### 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

#### هارمونیک‌های جریان شبکه بدون فیلتر



شکل ۳: هارمونیک‌های جریان شبکه توزیع بدون حضور فیلتر

شکل ۲ نشان می‌دهد از آنجایی که بار RL توسط یکسوساز تریستوری ۶ 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 تکفار 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 [۱۹-۱۸].

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 تریستوری ۶ پالسه است، در اینصورت هارمونیک‌هایی با مراتب  $6k \pm 1$  به شبکه تزریق می‌کند. به همین دلیل هارمونیک ۵, ۷, ۱۱, ۱۳ بیشترین سهم حضور در جریان شبکه را دارا می‌باشد [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. شکل ۴ 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 شکل ۴ 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 معمولاً 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 بهمنه دارد. از این رو ضروریست بارهای اندوکتیو به جبران‌سازهای توان راکتیو موازی مجهز شوند.

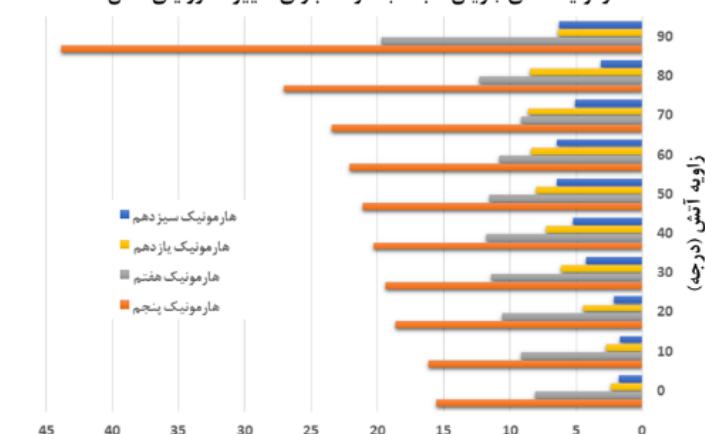
پسیو استفاده شده است. در این ایده فیلتر پسیو وظیفه جبران سازی توان راکتیو و حذف هارمونیک‌های فرکانس بالا را بر عهده دارد و با توجه به اینکه المان‌های فیلتر پسیو بطور لحظه کنترل می‌شوند می‌تواند جریان عبوری از فیلتر فعال را کاهش داده و به تبع آن تلفات آن نیز کاهش یابد.

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.

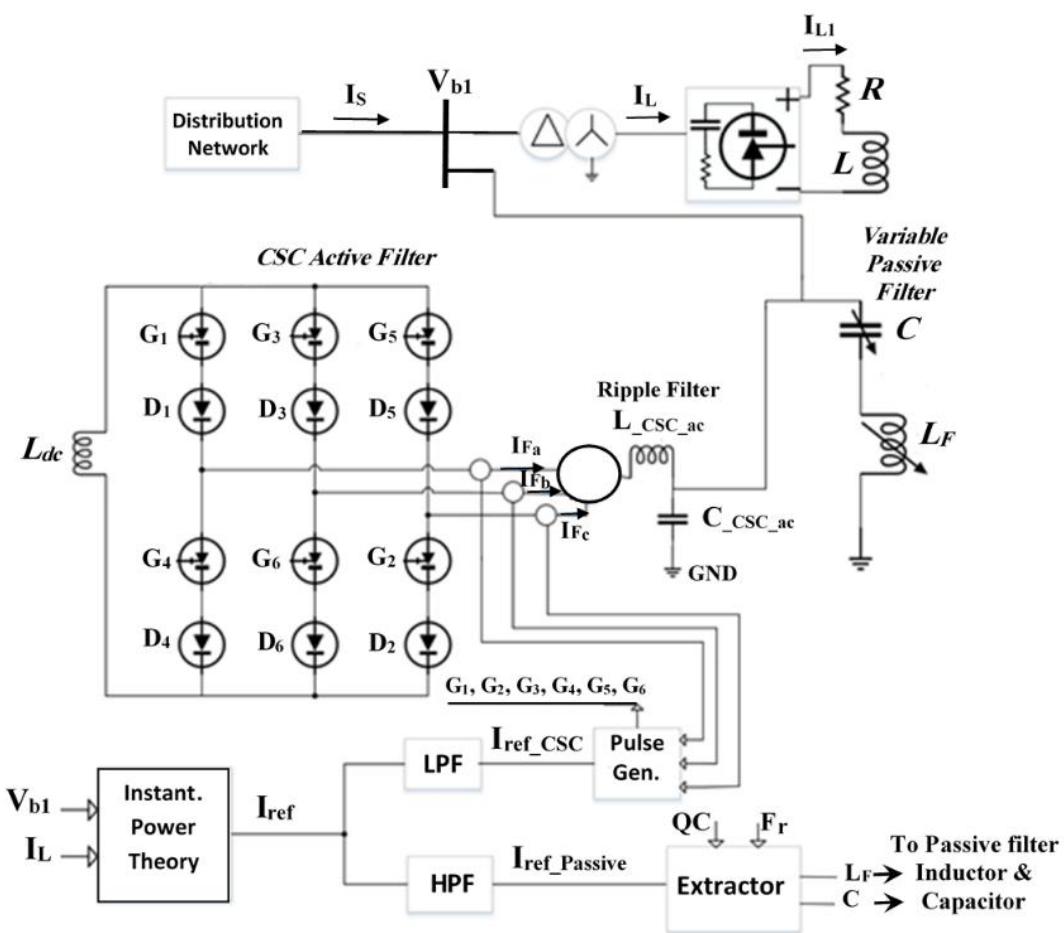
### ۱-۳-ساختار فیلتر

در این مقاله یک فیلتر ترکیبی فعال موازی پیشنهاد می‌شود که می‌تواند بطور همزمان هارمونیک‌های مورد نظر را حذف کرده و ضربه توان بار را افزایش دهد. شکل ۵ دیاگرام تک خطی این فیلتر را نشان می‌دهد. در این طرح از یک بانک خازنی اصلاح شده با ساختار فیلتر

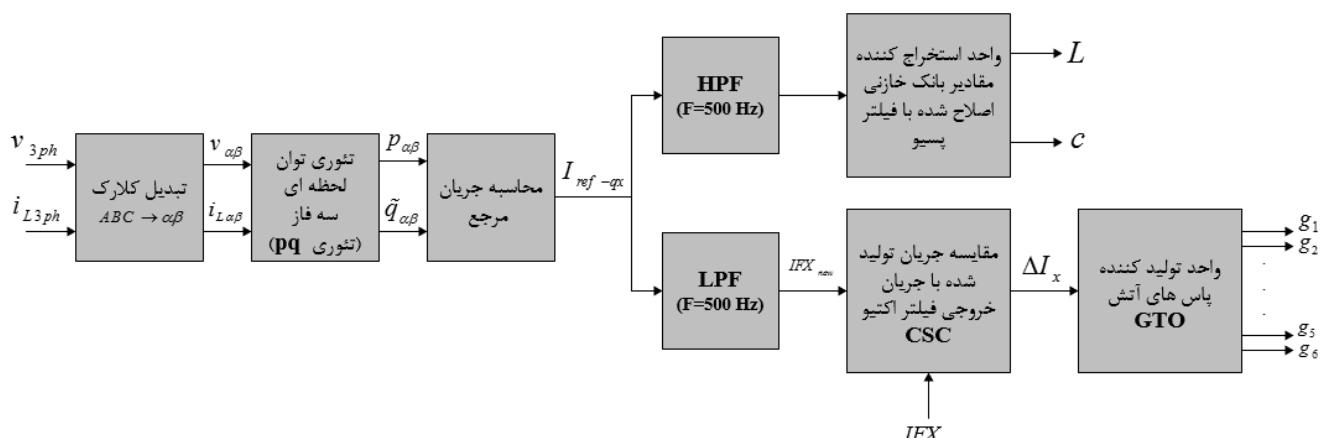
هارمونیک‌های جریان شبکه به درصد بازی تغییرات زوایای آتش



شکل ۴: هارمونیک‌های جریان شبکه به ازای تغییرات زاویه آتش بدون حضور فیلتر



شکل ۵: ساختار فیلتر ترکیبی پیشنهادی



شکل ۶: فلوچارت کنترل فیلتر ترکیبی پیشنهادی

هارمونیک‌های موجود در شبکه مضرب صحیحی از فرکانس اصلی سیستم (۵۰ Hz) است، به عنوان مثال فرکانس هارمونیک سوم برابر  $50 \times 3 = 150$  و فرکانس هارمونیک پنجم برابر  $50 \times 5 = 250$  می‌باشد. جریان مرجع تولید شده نیز شامل هارمونیک‌های شبکه بوده که بر مبنای رابطه (۴) مؤلفه‌های فرکانسی آن جداسازی

نحوه عملکرد فیلتر پیشنهادی بدین‌گونه است که پس از نمونه‌برداری از جریان بار و ولتاژ بس 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 شکل ۵ نشان داده شده، جریان مرجع این دو فیلتر فراهم می‌شود.

در این طرح پیشنهادی از CSC بدلیل اینکه جریان dc ورودی به مبدل محدود و کنترل شده است [۱۷] استفاده می‌شود. همچنین اگر اشتباہی 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 می‌یابد.

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 ترانزیستورها 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 می‌باشد [۱۷].

در این مبدل، موازی با هر GTO مدار استابر در نظر گرفته می‌شود که در هنگام خاموش شدن GTO تغییرات لحظه‌ای ولتاژ را محدود کرده و فشار، تنش و تلفات را کاهش می‌دهد. جدول ۳ اطلاعات مربوط به ساختار CSC را نشان می‌دهد. فیلتر راکتیو 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 حتماً باید نامساوی (۵) ارضاء شود [۷]. در این رابطه  $\omega_k$  فرکانسی است که CSC در آن جبران‌سازی انجام می‌دهد.

$$LC < \frac{1}{4\omega_k^2} \quad (5)$$

جدول ۳: مقادیر پارامترها در ساختار مبدل CSC

DC سلف	AC سلف	AC خازن	خازن مدار استابر	مقاومت مدار استابر
۰/۱ میکروهانتری	۰/۱ میلی هانتری	۴ میکروفاراد	۰/۰۵ میکروفاراد	۵ کیلوواهم

#### 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 متغیر باشد، ظرفیت خارج بست می‌آید. در این طرح از فیلتر پسیو با مقداری

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

$$f_{filter} = n \times f_{sys} \quad (4)$$

در فرمول فوق مرتبه هارمونیکی می‌باشد.

در این مقاله فرکانس تفکیک بر روی ۵۰۰ هرتز تنظیم می‌شود 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 تعییر داد. شکل ۶ فلوچارت کنترل و نحوه کارکرد فیلتر ترکیبی پیشنهادی را بوضوح نمایش می‌دهد. در این فلوچارت X نماینده سه فاز a، b و c 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.

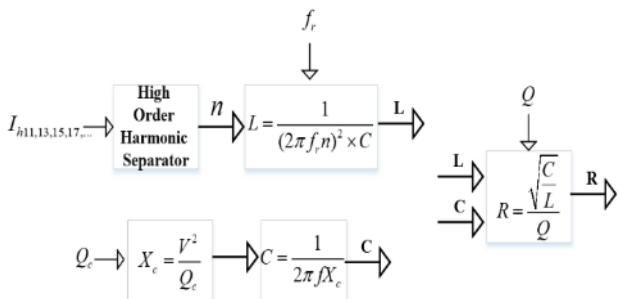
بر اساس طرح پیشنهادی مولفه‌های فرکانس بالا و مولفه‌های فرکانس پایین این جریان مرجع جداسازی می‌شوند. برای این منظور با عبور جریان مرجع از یک فیلتر بالاگذر و یک فیلتر پایین گذر، مولفه‌های فرکانسی به دو بخش زیر تقسیم می‌شوند:

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

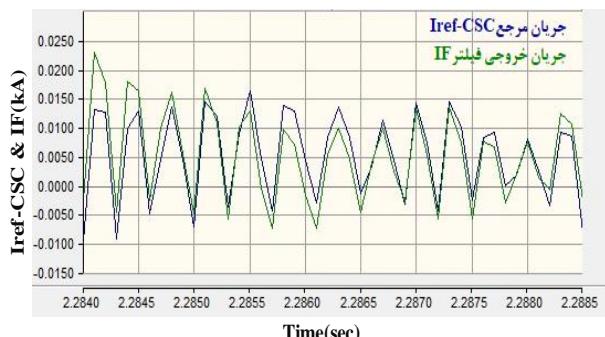
#### ۳-۳-فیلتر فعال CSC

در شکل ۵ 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 و ۷) کلیدزنی را انجام خواهد داد.

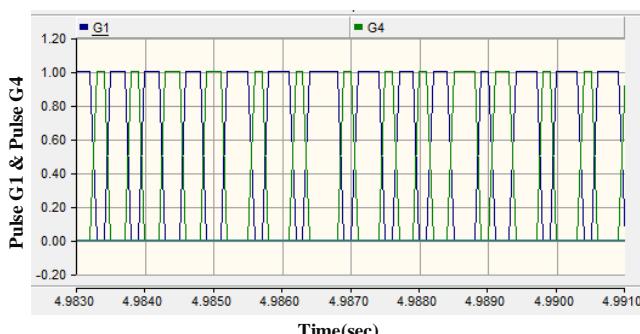
جريان مرجع خود خارج شده است این بدليل وجود المان های پسیو خروجی فیلتر می باشد. با انتخاب مقدار سلف بزرگتر می توان این مقدار ریپل جریان خروجی را کاهش داد طوری که جریان خروجی فیلتر با اغتشاش کمتری بهمراه باشد. با این حال با انتخاب مقدار سلف کوچکتر هزینه مبدل و تلفات آن کاهش می یابد. شکل ۹ پالس های آتش GTOها را در یک ساق CSC نشان می دهد. در این شکل دیده می شود هیچکدام از ۲ کلید در یک ساق همزمان روشن نمی شوند.



شکل ۷: طراحی بلوک استخراج کننده جهت تولید مقادیر L, C



شکل ۸: جریان مرجع و جریان خروجی CSC



شکل ۹: پالس های آتش GTO در یک ساق مبدل CSC

#### ۱- ۴- جبران سازی هارمونیکی

طبق شکل ۵، 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 لحظه ای برای آن

ثابت برای شبکه استفاده نشده است و برای اعمال مولفه های فرکانس بالا (هارمونیک های ۱۱ و ۱۳) به فیلتر پسیو ابتدا بلوک استخراج کننده (extractor) جهت استخراج المان های این فیلتر طراحی می شود. برای طراحی این استخراج کننده ابتدا دو کمیت فرکانس رزونانس و توان راکتیو خازن به عنوان دو ورودی اعمال شده و سپس بصورت گزینشی و برای حذف هارمونیک های مورد نظر مقادیر L و C محاسبه می شوند.

این بلوک استخراج کننده این قابلیت را به فیلتر می دهد که بتواند بر اساس هارمونیک های موجود در شبکه مقدار جدیدی برای فیلتر پسیو بدست آورد و همچنین توان راکتیو شبکه براساس مقداری که برای آن تعیین می شود، جبران سازی گردد. بنابراین مقادیر این فیلتر بر اساس تغییرات شبکه قابل تغییر می باشد. در طراحی استخراج کننده، ابتدا از جریان خروجی فیلتر بالاگذر نشان داده شده در شکل ۶ نمونه برداری شده و با جداسازی مولفه های هارمونیکی آن و اعمال یکی از مولفه های هارمونیکی به تنظیمات فیلتر پسیو جهت محاسبه L, C می توان در هر لحظه و با هر مقدار هارمونیک در شبکه یک فیلتر پسیو متناسب داشت.

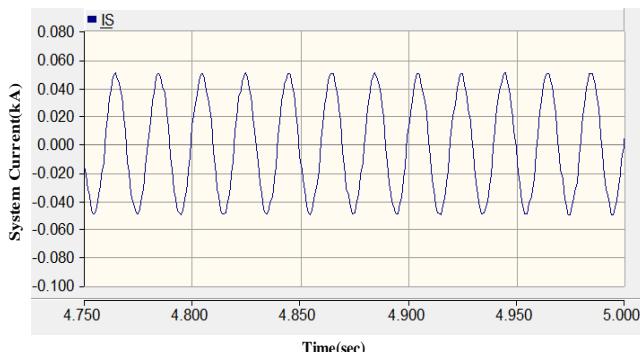
این بلوک مقادیر المان های این فیلتر را محاسبه کرده و به ساختار فیلتر ترکیبی اعمال می کند همانطور که شکل ۵ نشان می دهد. از آنجایی که در شبکه هارمونیک های ۱۱ و ۱۳ به عنوان هارمونیک های مرتبه بالا وجود دارند، پس تمرکز اصلی طراحی برای جبران سازی بر روی این هارمونیک ها می باشد. مقدار توان راکتیو ۵۰ درصد توان اکتیو بار باشد و همچنین در این طرح فرکانس رزونانس بر روی مقدار ۳۷ هرتز قرار داده می شود [۲۱]. برای تعیین مقدار فرکانس رزونانس باید توجه نمود که این مقدار با فرکانس اصلی شبکه و ضریبی از فرکانس اصلی برابر نباشد. شکل ۷ نحوه طراحی بلوک استخراج کننده جهت تعیین مقادیر L و C را نشان می دهد.

#### ۴- شبیه سازی عملکرد فیلتر ترکیبی پیشنهادی

در بخش های 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 می شود.

برای عملکرد صحیح فیلتر فعال مبتنی بر CSC باید طبق نسل دوم کنترل کننده های جریان مرجع، هر لحظه جریان خروجی فیلتر با جریان مرجع تولیدی (جریان خروجی فیلتر پایین گذر ( $I_{ref\_CSC}$ ) مقایسه شده و این اختلاف جریان به عنوان جریان مرجع جدید برای کلیدزنی به CSC اعمال شود. شکل ۸ مقایسه جریان مرجع خروجی فیلتر پایین گذر ( $I_{ref\_CSC}$ ) و جریان خروجی CSC ( $I_F$ ) که به شبکه تزریق می شود را نشان می دهد. مطابق این شکل، CSC توانسته مقدار جریان مرجع خود را به خوبی دنبال و ردیابی کند. در برخی لحظات جریان فیلتر از مقدار

راکتیو CSC با تزریق جریان‌های دقیقاً 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.



شکل ۱۱: جریان شبکه توزیع با فیلتر ترکیبی

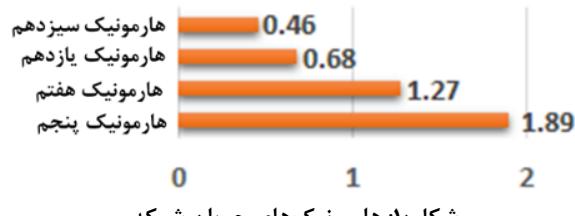
#### ۴-۲- جبران‌سازی توان راکتیو

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 جدول ۵ 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  $7/2$  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  $5/3$ - کیلووار می‌گردد.

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 دقیقاً عکس جریان‌های نامطلوب تزریق شده توسط یکسوکننده تریستوری به شبکه می‌باشد.

شکل ۱۰ هارمونیک‌های جریان شبکه در زاویه آتش صفر درجه یکسوکننده تریستوری بعد از ورود فیلتر ترکیبی را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که در حضور فیلتر ترکیبی هارمونیک‌های شبکه به مقدار مورد نظر استاندارد IEEE519-2014 می‌رسد.

#### هارمونیک‌های شبکه به درصد در حضور فیلتر ترکیبی



شکل ۱۰: 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 جدول ۴ دیده می‌شود مقدار مجاز مراتب مختلف هارمونیکی متفاوت است.

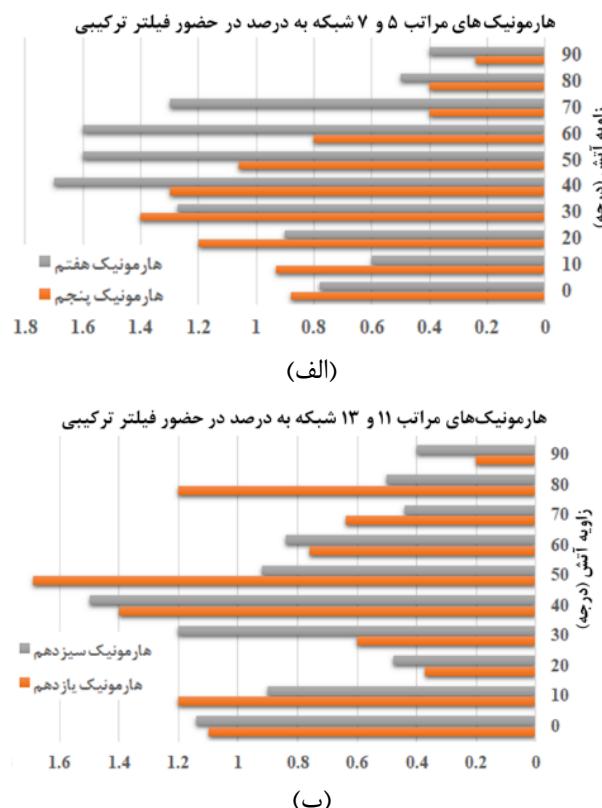
با بکارگیری فیلتر ترکیبی پیشنهادی و طراحی انجام شده، هارمونیک‌های موجود یعنی ۵ و ۷ بمیزان کمتر از  $1/4$  و هارمونیک‌های ۱۱ و ۱۳ نیز به زیر ۲ درصد کاهش یافته است. شکل ۱۱ جریان شبکه بعد از بکارگیری فیلتر ترکیبی در زاویه تأخیر صفر درجه یکسوکننده تریستوری با بار RL را نشان می‌دهد. این شکل موج جریان شبکه را نسبت به زمانی که شبکه بدون فیلتر کیفیت موج جریان شبکه را نسبت به زمانی که شبکه به خود بخشید 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  $90^{\circ}$  درجه یکسوکننده تریستوری با بار RL می‌تواند هارمونیک‌های جریان شبکه را در محدوده مجاز نگه دارد. شکل ۱۲ هارمونیک‌های شبکه با حضور فیلتر ترکیبی در زوایای آتش تأخیر  $90^{\circ}$  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

جدول ۴: مقادیر هارمونیک‌های جریان برای شبکه‌های ۱۲۰ ولت تا ۶۹ کیلوولت بر اساس استاندارد ۲۰۱۴-۲۰۱۹ IEEE519

$I_{SC} / I_L$	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$
$< 20$	۴%	۲%	٪ ۱/۵	٪ ۰/۶	٪ ۰/۳
$20 < h < 50$	٪ ۷	٪ ۳/۵	٪ ۲/۵	٪ ۱	٪ ۰/۵

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



شکل ۱۲: 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 شاخص‌هایی بهینه شوند. برای مثال چنانچه از یک مبدل ۱۲ پالسه بهمراه یک خازن جبران‌ساز موازی برای تغذیه بار استفاده شود هرچند هارمونیک‌های مرتب 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 متدالو وجود ندارد. با این وجود این انعطاف‌پذیری در محدوده معنی‌دار و مهمی که برای برقراری ملاحظات استاندارد IEEE519-

جدول ۵: ضریب قدرت بار با و بدون فیلتر ترکیبی

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

است. این تلفات در دو حالت روشن و خاموش بودن کلیدها طبق رابطه (۹) بدست می‌آید.

$$\begin{aligned} P_{SW-GTO} = & f_{SW} \left( \int_{t_{ON}} v_{SW}(t) \cdot I_{SW}(t) \cdot dt + \right. \\ & \left. \int_{t_{OFF}} v_{SW}(t) \cdot I_{SW}(t) \cdot dt \right) \end{aligned} \quad (9)$$

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 برد می‌شود کاهش می‌یابد.

## ۵- مقایسه طرح ترکیبی پیشنهادی

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

برای مقایسه طرح پیشنهادی با طرح فیلتر فعال مبتنی بر CSC تکی، شبکه نشان داده شده در شکل ۱۳ در محیط PSCAD/EMTDC پیاده سازی می‌شود.

شکل ۱۴ 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. مثلاً عناصر پسیو تا ۱۰۰ برابر نسبت به طرح پیشنهادی مقدارشان افزایش یابد [۷].

۲۰۱۴ و نیز جبران‌سازی بمنظور ضربیت توان بیشتر از ۹۶ درصد ضروری است می‌تواند ارزیابی شود.

## ۴-۴- 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 متغیر 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 نظر گیری جریان مرجع در حضور تمام هارمونیک‌ها طبق رابطه (۷) خواهد بود.

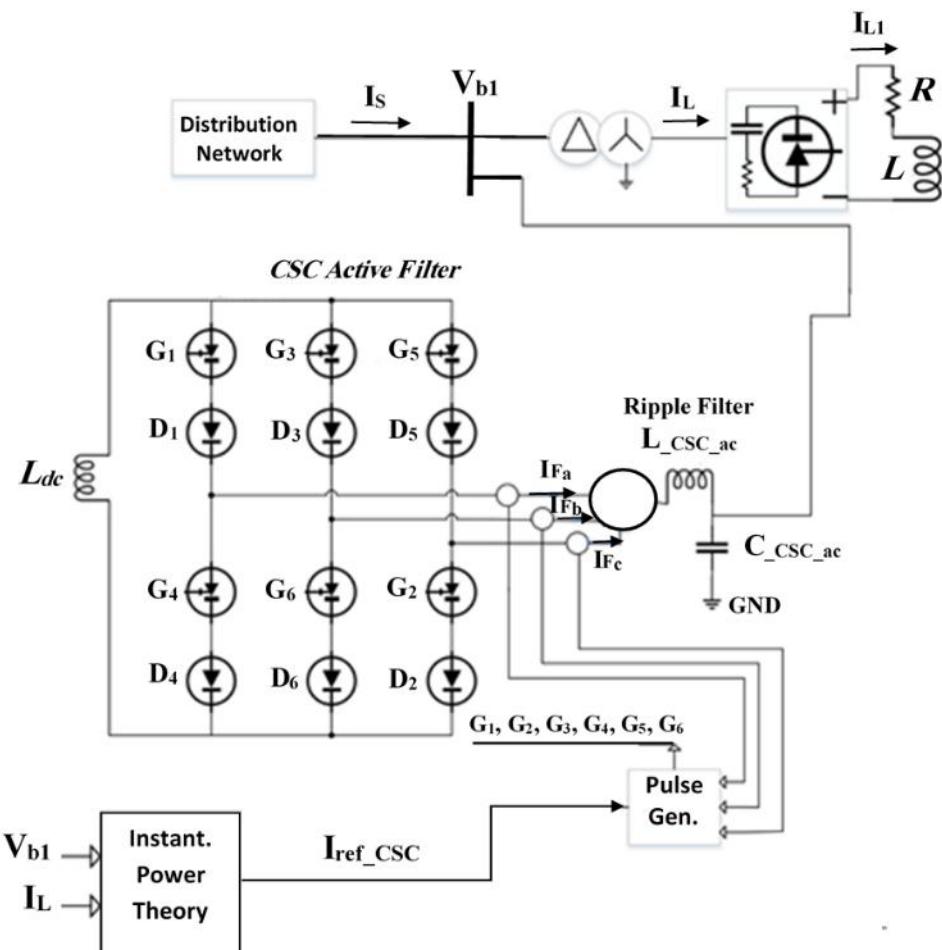
$$(7) \quad S_{GTO} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times V_{DC} \times I_{SW}$$

$$I_{SW} = I_{ref} = I_{h5.7} + I_{h11.13}$$

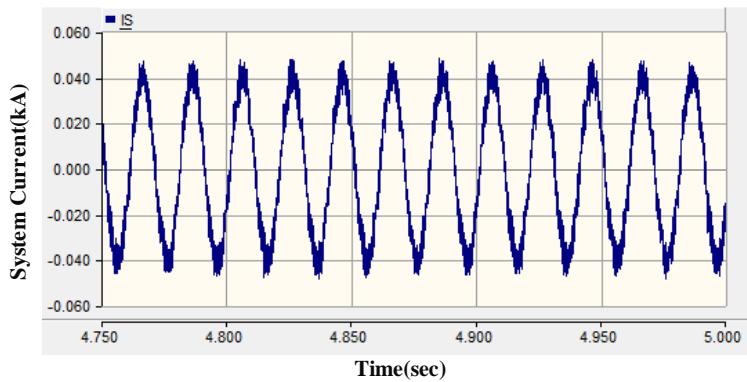
با استفاده از ایده جداسازی مولفه‌های فرکانسی جریان مرجع و اعمال مولفه‌های فرکانس پایین به CSC و ممانعت از ورود جریان هارمونیکی با مولفه‌های فرکانس بالا، مقدار جریان پیک عبوری از کلیدها نیز کاهش می‌یابد. در این صورت این ایده باعث کاهش فشار و استرس بر روی نیمه‌هادی‌های قدرت شده، کاهش ظرفیت و توان نیمه‌هادی‌های 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.

$$(8) \quad S_{GTO} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times V_{DC} \times I_{h5.7}$$

تلفات کلیدزنی در یک مبدل قدرت به سه مولفه ولتاژ ( $v_{SW}$ ) و جریان کلیدزنی ( $I_{SW}$ ) و تعداد دفعات کلیدزنی ( $f_{SW}$ ) وابسته



شکل ۱۳: شبکه مورد مطالعه با فیلتر فعال مبتنی بر CSC



شکل ۱۴: جریان شبکه با حضور فقط فیلتر فعال مبتنی بر CSC

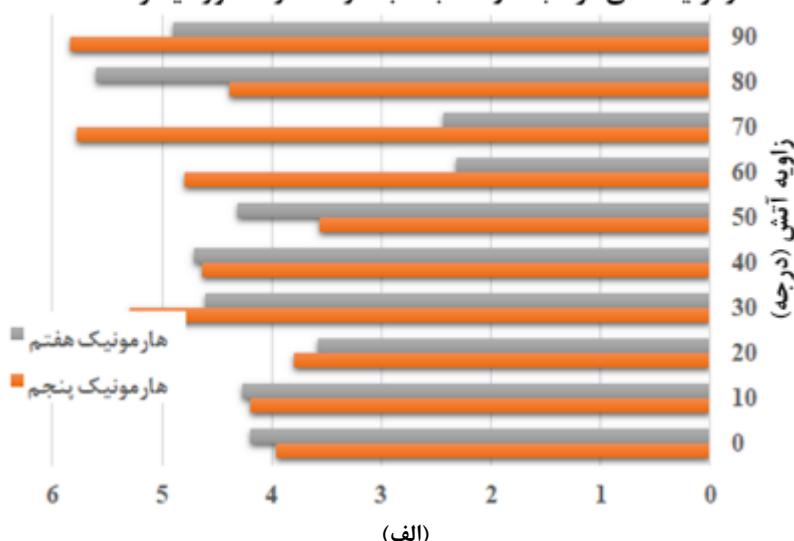
برای نشان دادن تاثیر افزایش المان های پسیو فیلتر فعال CSC، ابتدا مقدار این المان ها را ۵۰ برابر افزایش داده هارمونیک های جریان شبکه در این حالت بررسی می شود. مقدار هارمونیک ها در شکل ۱۶ CSC، L<sub>ac</sub>-L<sub>dc</sub>-CSC به ترتیب ۵ میکروهانری، ۵ میلی هانری و بالا میکروفاراد می باشد. طبق شکل ۱۵ هارمونیک های مراتب پایین و بالا جریان شبکه در بیشتر زوایای آتش کلیدزنی از محدوده مجاز استاندارد عبور کرده است. برای نگه داشتن هارمونیک ها در محدوده مجاز مقدار المان های پسیو دو طرف فیلتر فعال مبتنی بر CSC

برای نشان دادن تاثیر افزایش المان های پسیو فیلتر فعال CSC، ابتدا مقدار این المان ها را ۱۰۰ برابر می شود. مقدار L<sub>ac</sub>-L<sub>dc</sub>-CSC در این حالت به ترتیب ۱۰ میکروهانری، ۱۰ میلی هانری و ۱۰۰ میکروفاراد می باشد. مقدار هارمونیک ها در شکل ۱۷ CSC، L<sub>ac</sub>-L<sub>dc</sub>-CSC به ترتیب ۱۵ میکروهانری، ۱۵ میلی هانری و بالا میکروفاراد می باشد. طبق شکل ۱۶ هارمونیک های مراتب پایین و بالا جریان شبکه در بیشتر زوایای آتش کلیدزنی از محدوده مجاز استاندارد عبور کرده است. برای نگه داشتن هارمونیک ها در محدوده مجاز مقدار المان های پسیو دو طرف فیلتر فعال مبتنی بر CSC

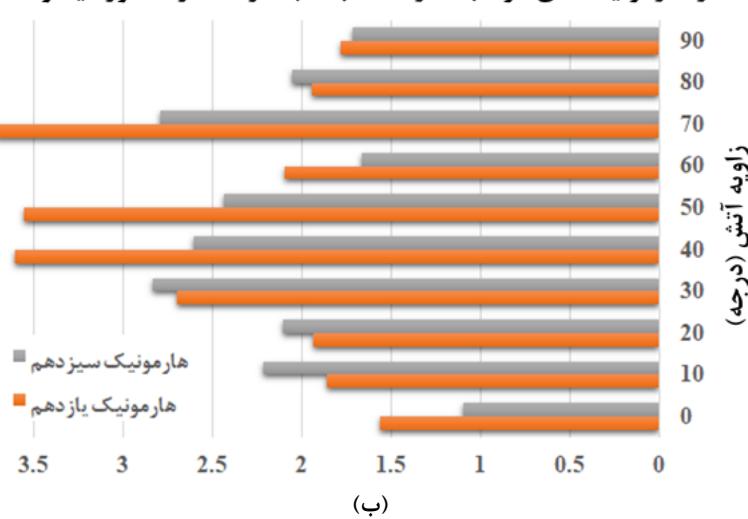
افزایش پیدا کنند. مقدار هزینه‌ها در جدول ۶ بر اساس اطلاعات دو شرکت معتبر farnell و eu-mouser می‌باشد [۲۳-۲۴].

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. جدول ۶ 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 دوطرفه مبدل CSC ۱۰۰ برابر

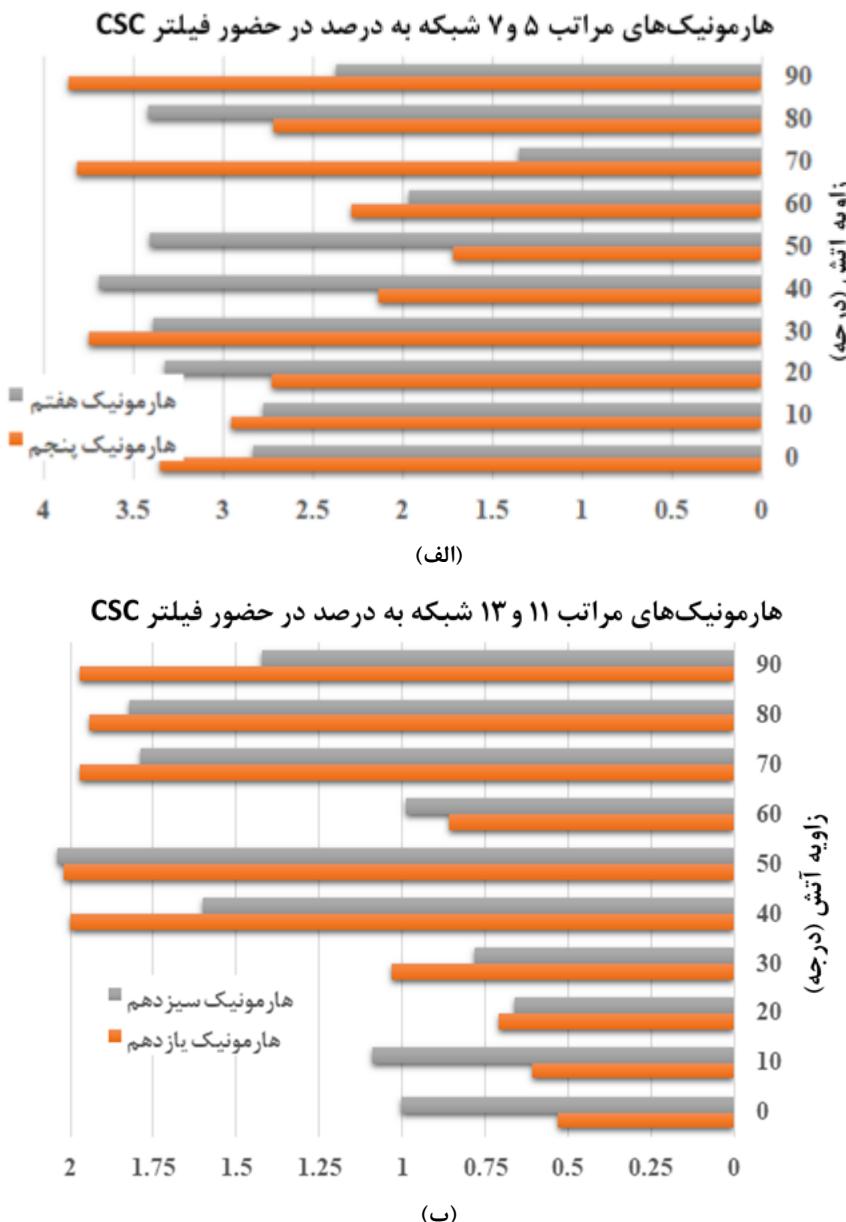
هارمونیک‌های مرتب ۵ و ۷ شبکه به درصد در حضور فیلتر CSC



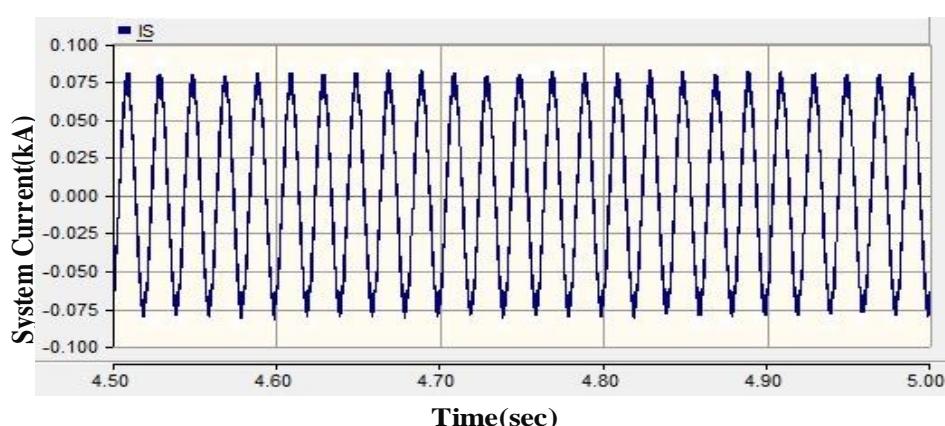
مقدار هارمونیک‌های مرتب ۱۱ و ۱۳ شبکه به درصد در حضور فیلتر CSC



شکل ۱۵: هارمونیک‌های جریان شبکه با فیلتر فعال CSC با افزایش ۵۰ برابری المان‌های پسیو: (الف) هارمونیک‌های پنجم و هفتم، (ب) هارمونیک‌های یازدهم و سیزدهم



شکل ۱۶: هارمونیک‌های جریان شبکه با CSC با افزایش ۱۰۰ برابر المان‌های پسیو: (الف) هارمونیک‌های پنجم و هفتم، (ب) هارمونیک‌های یازدهم و سیزدهم



شکل ۱۷: جریان شبکه با فیلتر فعال مبتنی بر CSC با افزایش ۱۰۰ برابر المان‌های پسیو

جدول ۶: هزینه مبدل منبع جریان در دو طرح رقابتی

	GTO			L <sub>dc</sub> -CSC				L <sub>ac</sub> -CSC			
	جریان عبوری	قیمت	تعداد	جریان عبوری	ظرفیت میکروهانتری	قیمت	تعداد	جریان عبوری	ظرفیت میلی هانتری	قیمت دلار	تعداد
فیلتر فعال مبتنی بر CSC پیشنهادی	۴۰ آمپر	۹/۶۱ دلار	۶	۴۰ آمپر	۱۰	۱۲/۳ دلار	۱	۴۰ آمپر	۱۰	۱۳/۵۱ دلار	۳
طرح پیشنهادی مبتنی بر جداسازی فرکانس‌های هارمونیکی	۲۲ آمپر	۴/۵۴ دلار	۶	۲۲ آمپر	۰.۱	۵۶/۳۳ دلار	۱	۲۲ آمپر	۰/۱	۶۴/۱۷ دلار	۳

جدول ۷: مقایسه طرح پیشنهادی

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

تئوری توان لحظه‌ای محاسبه شده و سپس مولفه‌های فرکانس پائین 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 جبران ساز 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 دیدگاه‌های 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

با مقایسه طرح پیشنهاد شده در این مقاله با دو طرح مراجع [۷] و [۱۶] و طبق جدول ۶ 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 می‌توان از مدل حالت ماندگار یک بار موتوری مثلاً یک موتور DC استفاده کرد. برای یک شرایط کاری نمونه، مدار معادل الکتریکی ساده شده موتور از دید ترمیمال را می‌توان با یک سلف و یک مقاومت سری نمایش داد که می‌تواند مشابه همین بار RL مفروض در مقاله باشد. بنابراین در حالت ماندگار نتایج برای بار موتوری هم همچنان معتبر باقی می‌ماند. در نتیجه می‌توان انتظار داشت که طرح پیشنهادی در این مقاله به نحوی است که اگر به شبکه بار موتوری متصل شود و هارمونیک 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

- [12] Allah Hooshmand 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., Ghijsselen 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, August 2005.
- [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, March 2009.
- [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, October 2016.
- [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>

ارزشمند است چون بار شبکه بطور لحظه‌ای تغییر می‌کند و جران‌کننده 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، شیوای مجتبی، عاملی محمدتقی. یک رویکرد چنددهدفه جدید برای برنامه ریزی فیلترهای اکتیو قدرت با بهره گیری از الگوریتم جستجوی ملودی و روش رضایتمندی فازی. *نشریه کیفیت و بهره وری صنعت برق ایران*. ۱۳۹۵؛ ۵(۹): ۴۷-۳۱.
- [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*, Tokyo 1983.
- [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.