

بررسی و مقایسه ساختار فیلترهای نوین ترکیبی

محمد سلمانی کویخی / دانشگاه سمنان / Mohammad.salmani@semnan.ac.ir

مصطفی جزایری / دانشگاه سمنان / Mjzaeri@semnan.ac.ir

چکیده

افزایش مصرف کنندگان بزرگ، غیرخطی و متغیر با زمان در شبکه قدرت باعث افزایش مشکلاتی نظیر هارمونیک، فلیکر، نامتعادلی و ضریب قدرت پایین شده که کیفیت توان شبکه را تحت تاثیر قرار می دهند. برای برطرف کردن این مشکلات راهکارهای زیادی از جمله فیلترهای پسیو، فیلترهای اکتیو و فیلترهای ترکیبی برای اهداف گوناگون پیشنهاد می شود. به دلیل ضعف های دینامیکی فیلترهای پسیو و اکتیو در سال های اخیر پژوهش های زیادی در زمینه طرح های نوین فیلتر ترکیبی انجام شده است. هدف این مقاله معرفی و بررسی ساختارهای نوین فیلتر ترکیبی و مقایسه آنها از لحاظ عملکردهای مختلف در شبکه قدرت می باشد. در این بررسی به وضوح دیده می شود که، طرح نوین جبرانگر استاتیکی توان راکتیو، سری با فیلتر اکتیو قدرت (FPAH-CVS) می تواند عملکرد مناسبی نسبت به دیگر طرح ها در شبکه قدرت داشته باشد.

کلمات کلیدی: کیفیت توان، طرح های نوین فیلتر ترکیبی، طرح SVC-HAPF.

Study and comprison of novel hybrid active power filter topologies

■ Mohammad Salmani Kouyaki/ Department Of Electrical Engineering, Semnan University/ Mohammad.Salmani@Semnan.ac.ir

■ Mostafa Jazaeri/ Department Of Electrical Engineering, Semnan University/ Mjzaeri@Semnan.ac.ir

Abstract:

some problems such as harmonics, flicker, unbalance and low power factor raises on the power grid because large, non-linear, and time variable Loads Increasing that affecting network power quality. many solutions including passive filters, active filters and hybrid filters for different purposes are suggested for overcome these problems. recent research has been carried out on novel Hybrid filter designs, Due to the dynamic problems of passive and active filters. The purpose of this paper is to introduce and review the new Hybrid Filter structures and compare them in terms of different functions in the power grid. In this study new design of hybrid filter including reactive power static compensator coupling with the Active Power Filter (SVC-HAPF) can better performance in the power system of other structure.

Keywords: Power Quality; Novel Hybrid Active Filter topologies; SVC-HAPF Topology.

۲- ساختار فیلتر ترکیبی

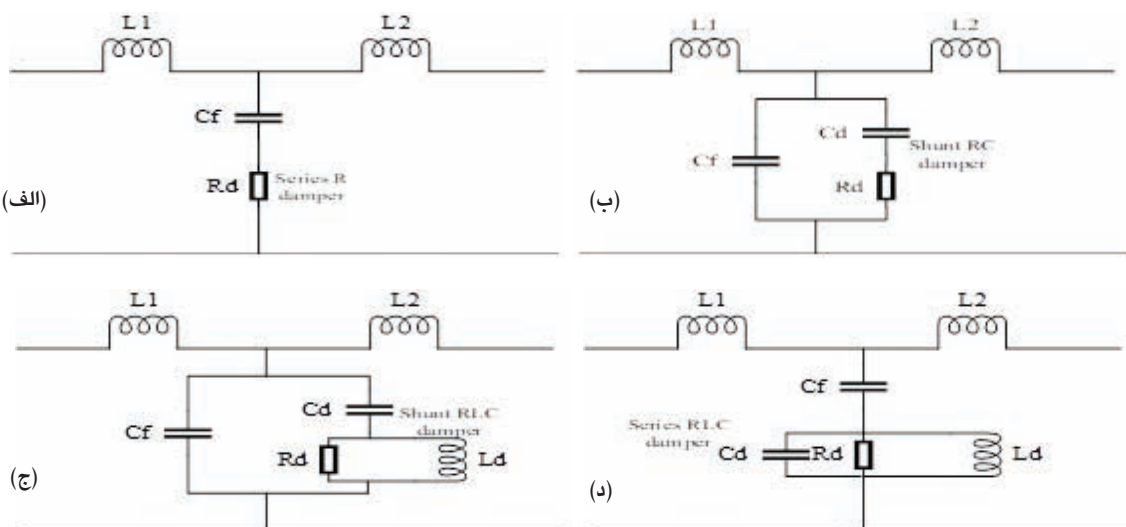
فیلترهای ترکیبی برای سه حالت از شبکه طراحی می‌شوند: ۱- فیلتر ترکیبی برای شبکه تک فاز [۱۲-۱۳]. ۲- فیلتر ترکیبی برای شبکه سه فاز-سه سیمه [۱۴-۱۵]. ۳- فیلتر ترکیبی برای شبکه سه فاز-چهار سیمه. برای هر سه حالت از شبکه سه نوع فیلتر ترکیبی می‌توان استفاده نمود: ۱- فیلتر پسیو-فیلتر پسیو [۱۶-۱۷]. ۲- فیلتر پسیو-فیلتر اکتیو [۱۸-۱۹]. ۳- فیلتر اکتیو-فیلتر اکتیو [۲۰-۲۱]. برای هر هدفی از ترکیب‌های خاصی از فیلتر پسیو و فیلتر اکتیو استفاده می‌شود. اما ترکیب فیلتر پسیو-فیلتر اکتیو، طرحی است که مورد توجه پژوهشگران می‌باشد و بیشتر طرح‌های نوین فیلتر ترکیبی بر همین اساس می‌باشد. در این قسمت ابتدا تعدادی از ساختارهای فیلتر پسیو و فیلتر اکتیو جدید مورد بررسی قرار می‌گیرد و در بخش بعدی نمونه‌هایی از فیلتر ترکیبی نوین آورده می‌شود.

۲-۱- ساختارهای جدید فیلتر پسیو

فیلترهای پسیو در طرح‌های ترکیبی برای اهدافی خاص طراحی می‌شوند. از جمله این اهداف می‌توان به کاهش هارمونیک‌های جریان و ولتاژ، جبران‌سازی توان راکتیو و کاهش ریپل حاصل از عملیات کلیدزنی فیلتر اکتیو اشاره کرد. در طرح‌های جدید فیلتر پسیو بر روی کاهش معایب این فیلترها مانند کاهش خطر رزونانس حضور تکی فیلتر پسیو تمرکز شده است. برای این منظور چهار طرح فیلتر پسیو معرفی می‌شود. در این طرح‌ها مدارات سری و موازی کاهنده رزونانس همراه با ساختار فیلتر پسیو پیشنهاد شده است [۲۲-۲۳]. شکل (۱) طرح‌های جدید فیلتر پسیو را نشان می‌دهد.

جدول ۱: عملکرد فیلترهای پسیو، اکتیو و ترکیبی

هزینه	تلفات توان	رنج مبدل	رنج جبران‌سازی	مشکلات رزونانسی	سال
پایین	پایین	-	محدود	ضعیف	۱۹۴۰
پایین	پایین	-	گسترده	ضعیف	۱۹۶۰
بالا	بالا	بالا	گسترده	قوی	۱۹۷۶
متوسط	متوسط	پایین	محدود	قوی	۲۰۰۳



شکل ۱: طرح‌های جدید فیلتر پسیو

۲-۱-۱- طرح فیلتر LCL با مقاومت سری

در این طرح یک مقاومت کاهنده (R_d) سری با خازن فیلتر (C_f) قرار گرفته شده است. مقاومت سری در این فیلتر می‌تواند به صورت موازی با خازن فیلتر نیز قرار گیرد ولی از لحاظ عملی پیاده‌سازی این ساختار امکان‌پذیر نمی‌باشد. به این دلیل که امکان عبور جریان ریپسل با مقدار بالا از این مقاومت‌پذیر وجود ندارد [۲۴]. این فیلتر در شکل (۱-الف) نشان داده شده است.

۲-۱-۲- طرح فیلتر LCL با مدار RC موازی

یکی از اصلی‌ترین مزایای این فیلتر پسیو اینست که می‌تواند تضعیف فرکانس بالای فیلتر پسیو را در مقدار $60 \frac{db}{decade}$ ثابت نگه داشته و همچنین مقدار تلفات توان ناشی از مقاومت تعدیل‌کننده به دلیل حضور خازن (C_d) کاهش داده می‌شود. این طرح در شکل (۱-ب) نشان داده شده است.

۲-۱-۳- طرح فیلتر LCL با مدار RLC موازی

این فیلتر تضعیف فرکانس بالا و تلفات توان پایین را با حضور مدار مرتبه دوم $R_d L_d C_d$ کاهنده رزونانس فراهم می‌کند. این مدار در شکل (۱-ج) نشان داده شده است.

۲-۱-۴- طرح فیلتر LCL با مدار RLC سری

ویژگی‌های این فیلتر به صورت مشابه با $R_d L_d C_d$ موازی با خازن فیلتر (C_f) می‌باشد. در طرح RLC می‌توان مدار کاهنده را به صورت سری یا موازی با سلف‌های ($L_1 - L_2$) دو طرف شبکه نیز قرار داد [۲۵]. ولی بیشترین رنج محدودسازی رزونانسی متعلق به طرح‌هایی است که RLC سری و موازی با خازن فیلتر قرار گرفته می‌شود. این طرح در شکل (۱-د) نشان داده شده است.

۲-۲- ساختارهای فیلتر اکتیو

فیلترهای اکتیو قدرت در حالت کلی به دو صورت سری و موازی به شبکه قدرت متصل می‌شود. فیلترهای اکتیو وابسته به نوع کنترل می‌توانند وظایف مختلفی را در شبکه قدرت اجرا کنند. از جمله این وظایف می‌توان به حذف آلودگی‌های هارمونیک‌ی جریان و ولتاژ و بهبود نامتعادلی ولتاژ و جریان شبکه نام برد. تحقیقات اخیر در زمینه فیلترهای اکتیو نشان می‌دهد بیشتر تمرکز پژوهشگران بر روی نحوه کنترل برای ایجاد وظایف مختلف و همچنین کاهش تلفات و هزینه فیلتر اکتیو قدرت می‌باشد [۲۶-۲۷].

از آنجایی که فیلتر اکتیو بر مبنای مبدل‌های منبع ولتاژ VSC، منبع جریان CSC و منبع امپدانس ZVC می‌باشد، طرح‌های مختلفی برای بهبود انعطاف‌پذیری فیلتر اکتیو قدرت بر مبنای این مبدل‌ها طراحی شده است تا عملکردهای مختلف فیلتر سنجیده شود [۲۸-۲۹]. در شکل ۲، (الف) فیلتر اکتیو موازی با شبکه، (ب) فیلتر اکتیو سری با شبکه، (ج) فیلتر اکتیو سری با شبکه بدون ترانسفورماتور نشان داده می‌شود.

نفوذ رو به رشد انرژی‌های تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی به شبکه قدرت باعث شده استفاده از این انرژی مورد توجه محققان در حوزه کیفیت توان نیز قرار گیرد. انتقال توان خورشیدی از طریق مبدل DC/AC از جمله تحقیقات در سال‌های اخیر می‌باشد [۳۰-۳۹].

در این تحقیقات ثابت شده بر اساس نحوه کنترل، مبدل می‌تواند علاوه بر جبران‌سازی هارمونیک و توان راکتیو، توان اکتیو حاصل از حضور سلول‌های خورشیدی نیز از طریق مبدل به شبکه تزریق شود. ویژگی‌ها و عیوب چند طرح مبتنی بر انرژی خورشیدی در زیر مورد بررسی قرار گرفته است.

در ساختاری که در شکل (۳) نشان داده شده از مبدل‌های چند سطحی به‌عنوان فیلتر اکتیو استفاده می‌کند، که سلول‌های

خورشیدی جدا از هم به سمت DC آنها متصل است. این مبدل‌ها از طریق یک سلف کوپلینگ به شبکه (IGCT) متصل می‌شوند. این طرح به اختصار IGCT (Inductive Coupling grid connected Inverter) گفته می‌شود. در این طرح با استفاده از مبدل‌های چندسطحی، تعداد نیمه‌هادی‌های قدرت و خازن‌های DC را افزایش داده و به تبع آن هزینه و پیچیدگی کنترل مبدل نیز افزایش می‌یابد [۳۰-۳۱]. ساختار نشان داده شده در شکل (۴) از یک ترانسفورماتور برای تطبیق ولتاژ بین شبکه و مبدل چند سطحی استفاده کرده است. در این طرح به دلیل استفاده از ترانسفورماتور اندازه، وزن، تلفات و هزینه فیلتر افزایش داده می‌شود [۳۲-۳۳]. در طرح بعدی از یک مبدل DC/DC افزایش یافته است [۳۴-۳۶]. شکل (۶) ساختاری از فیلترهای مبتنی بر سلول‌های خورشیدی را نشان می‌دهد که با حذف مبدل افزایش یافته و ترانسفورماتور پیچیدگی کنترل، هزینه، اندازه و... کاهش داده می‌شود. در این طرح با افزایش سلول‌های خورشیدی، تا حد بسیار مناسبی هزینه‌های کنترلی را کاهش می‌دهد ولی در مقابل آن زمان و هزینه بیشتری برای تعمیر و نگهداری سلول‌ها باید صرف شود [۳۷-۳۹].

جدول (۲) مزایا و معایب این طرح‌ها را نشان می‌دهد. نقاط ضعف طرح‌ها در این جدول پررنگ نمایش داده شده است. همچنین منظور از رنج جبران‌سازی در این جدول، این است که فیلتر در رنج گسترده‌ای بتواند هارمونیک، توان راکتیو و توان اکتیو را هم‌زمان جبران‌سازی و به شبکه تزریق کند. تحقیقات در سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ نشان داده که عملکرد فیلترها به صورت ترکیبی مبتنی بر انرژی خورشیدی علاوه بر قابلیت‌های فوق می‌توانند با ایده‌های متنوعی همراه باشند به طوری که توان و تلفات مبدل متصل به شبکه نیز کاهش یابد [۴۰].

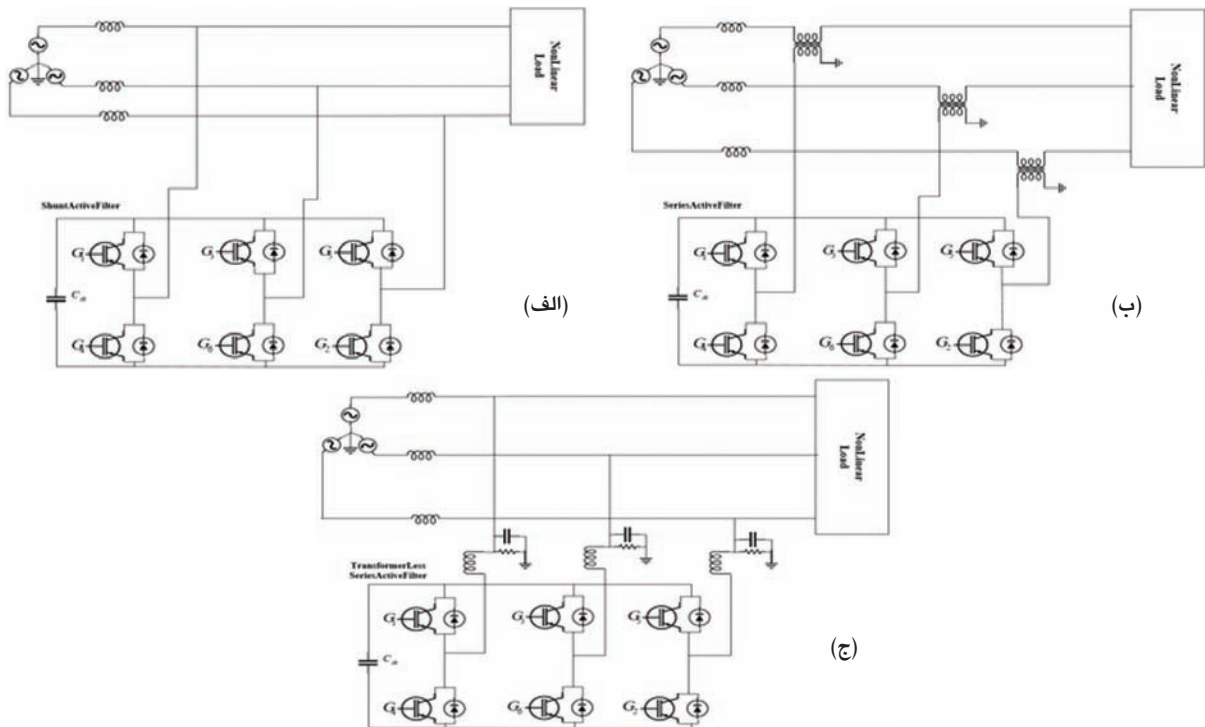
۳- ساختارهای نوین فیلتر ترکیبی

ساختارهای نوین فیلتر ترکیبی بر اساس بهبود عملکرد فیلترهای پسیو و اکتیو طراحی می‌شوند و با توجه به اهداف خاصی در شبکه، کنترل فیلتر ترکیبی انجام می‌گیرد.

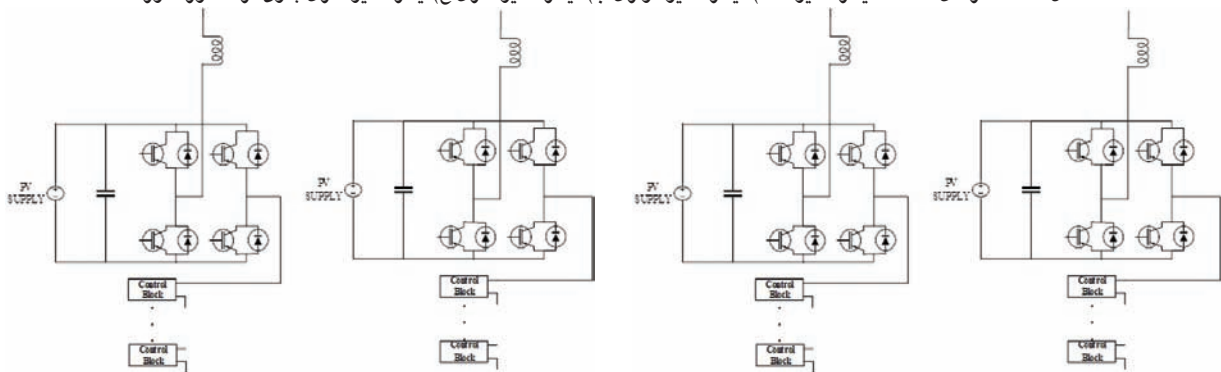
در مرجع [۴۱] یک فیلتر ترکیبی شامل یک SVC موازی و یک فیلتر اکتیو موازی با شبکه پیشنهاد شده است. در این طرح بخش SVC وظیفه جبران‌سازی توان راکتیو را در رنج وسیعی بر عهده دارد و این موضوع نرخ جریان فیلتر اکتیو را کاهش می‌دهد.

اگرچه باز هم در این طرح مشکل حضور فیلتر اکتیو در سطح ولتاژ متوسط بررسی و برطرف نشده و فیلتر اکتیو وابسته به مبدل‌های چندسطحی، پرهزینه می‌باشد. استفاده از مبدل‌های چندسطحی باعث افزایش نیمه‌هادی‌های قدرت و همچنین خازن‌های سمت DC مبدل می‌شود. با افزایش تعداد نیمه‌هادی‌ها، تلفات حاصل از کلیدزنی مبدل رشد پیدا کرده و همچنین هزینه مبدل نیز صرفه اقتصادی نخواهد داشت.

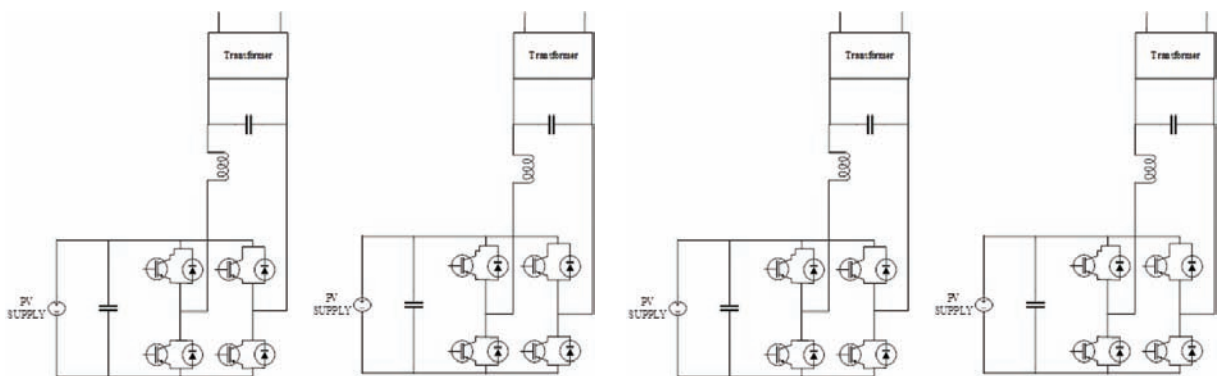
در سال ۲۰۱۰، طرحی از فیلتر ترکیبی معرفی گردید که یک بخش فیلتر پسیو موازی با شبکه و یک بخش فیلتر اکتیو موازی با شبکه را شامل می‌شود. فیلتر پسیو موازی بخش بزرگی از جریان جبران‌سازی را از خود عبور می‌دهد و باعث کاهش جریان فیلتر اکتیو می‌شود. اما این طرح یک مشکل اساسی داشت و آن این بود که زمانی توان راکتیو بار متغیر باشد، تلفات فیلتر اکتیو نیز افزایش می‌یابد [۴۲-۴۳]. در این طرح کنترل فیلتر پسیو موازی به وسیله ترانسفورماتور انجام نشده



شکل ۲: ساختارهای مختلف فیلتر اکتیو: (الف) فیلتر اکتیو موازی (ب) فیلتر اکتیو سری (ج) فیلتر اکتیو سری بدون ترانسفورماتور



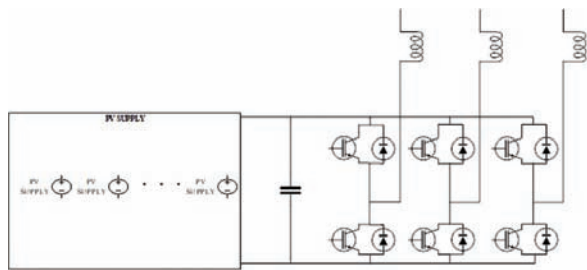
شکل ۳: ساختار IGBT



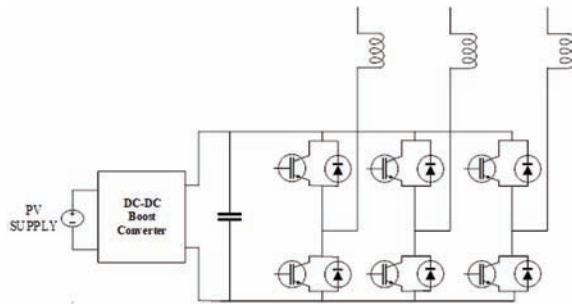
شکل ۴: ساختار فیلتر با ترانسفورماتور کوپلینگ

پیچیده تر می کند. طرحی از فیلتر ترکیبی در سال ۲۰۱۲ پیشنهاد می شود که شامل یک سلف قابل کنترل با تریستور (TCR) و یک فیلتر اکتیو که توسط یک ترانسفورماتور به شبکه متصل است همچنین موازی با هر ترانسفورماتور یک مدار رزونانسی سری قرار دارد. این طرح به اختصار

است. به همین دلیل با تغییراتی که در بار ایجاد می شود، مسوولیت کنترل یکپارچه تمام این تغییرات برعهده فیلتر اکتیو است که این موضوع فشار و استرس را بر روی نیمه هادی ها افزایش داده و به تبع آن تلفات فیلتر اکتیو نیز افزایش می یابد. در طرح [۴۲] از مبدل چندسطحی آبخاری استفاده شده است که کنترل فیلتر اکتیو را



شکل ۶: ساختار فیلتر با افزایش سلول‌های خورشیدی



شکل ۵: ساختار فیلتر با مبدل DC/DC افزاینده

جدول ۲: مزایا و معایب فیلترهای مبتنی بر سلول‌های خورشیدی

پسچیدگی کنترل	اندازه	هزینه	تلفات توان	رنج جبرانسازی	
بالا	متوسط	بالا	بالا	گسترده	IGCT
متوسط	بالا	بالا	بالا	گسترده	فیلتر با ترانسفورماتور کوپلینگ
متوسط-بالا	متوسط	متوسط	بالا	گسترده	فیلتر با مبدل DC/DC افزاینده
پایین	متوسط	متوسط	پایین	گسترده	فیلتر با افزایش پنلهای خورشیدی

جدول ۳: مقایسه طرح‌های نوین فیلتر ترکیبی

هزینه	تلفات توان	رنج مبدل	رنج جبرانسازی	مشکلات رزونانسی	سال	
بالا	بالا	متوسط	گسترده	قوی	۲۰۰۳	طرح SVC موازی با APF
بالا	بالا	متوسط	گسترده	قوی	۲۰۱۰	طرح PPF موازی با APF
بالا	متوسط	متوسط-پایین	متوسط	متوسط	۲۰۱۲	طرح TCR-RITHAPF
متوسط	متوسط	متوسط	گسترده	قوی	۲۰۱۶	طرح SVC سری با APF

طرح بدست آورد در حالی که هم‌زمان تلفات و هزینه کلی فیلتر اکتیو را کاهش دهد. در سال‌های ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸ بیشتر با پژوهش بر روی طرح SVC-HAPF بسیاری از نقاط ضعف فیلتر ترکیبی بر طرف شده است. در جدول (۳) مقایسه‌ای بین طرح‌های نوین فیلتر ترکیبی و نقاط ضعف و قدرت آنها را نمایش داده می‌شود. نقاط ضعف طرح‌ها در این جدول پررنگ نمایش داده شده است. همچنین منظور از رنج جبرانسازی، این است که فیلتر در رنج گسترده‌ای بتواند هارمونیک و توان راکتیو را هم‌زمان جبرانسازی نماید.

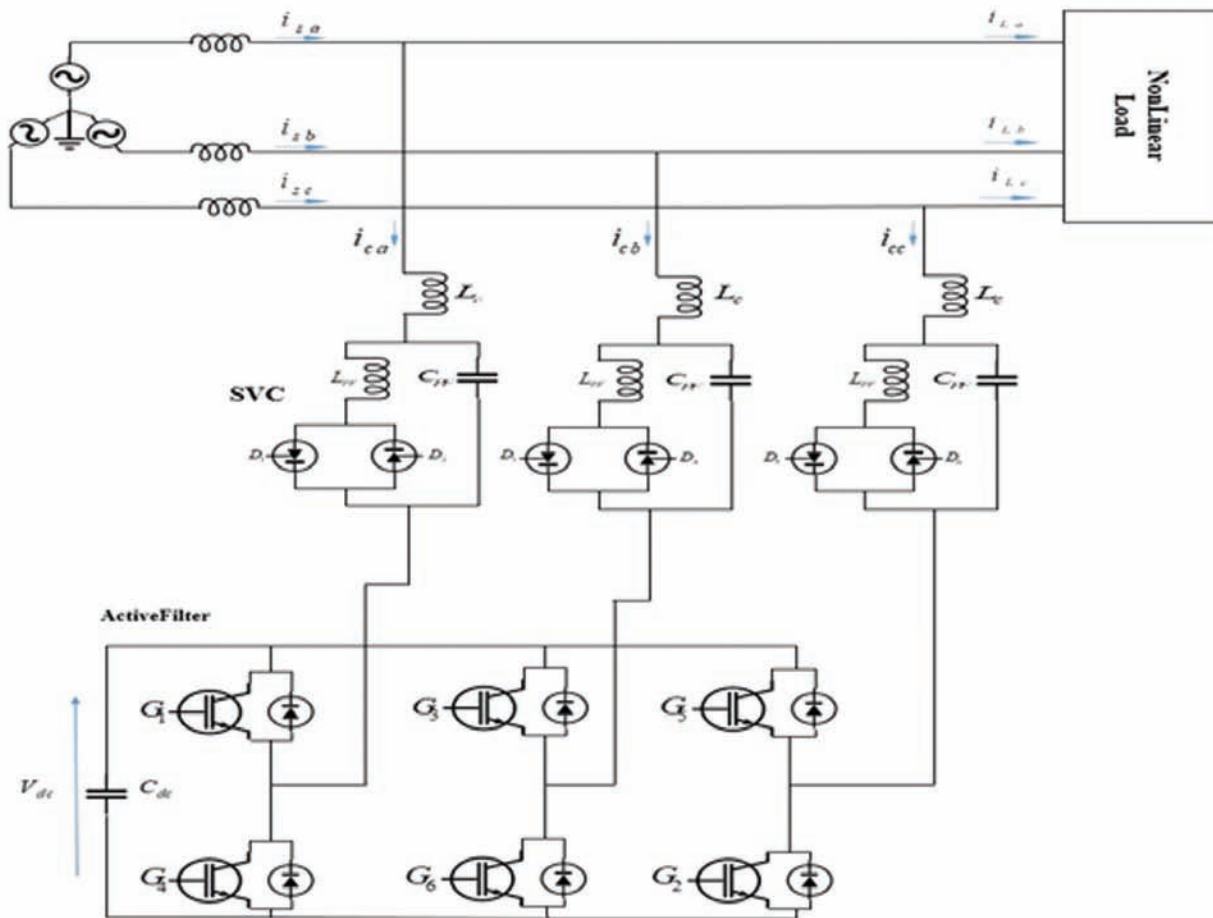
۴- نتیجه‌گیری

افزایش اهمیت کیفیت توان الکتریکی باعث شده پژوهش‌های زیادی بر روی ساختارهای نوین فیلتر ترکیبی انجام شود. این ساختارها که نمونه‌های موفق آنها در این مقاله معرفی گردید به خوبی توانسته‌اند نقاط ضعف خود را برطرف کنند و پاسخ مناسبی برای مشکلات توان در شبکه قدرت داشته باشند. از جمله این ساختارها طرح نوین SVC-HAPF می‌باشد، که توانسته با اتصال به شبکه قدرت دارای بار غیرخطی و وجود مشکلاتی نظیر نامتعادلی و هارمونیک‌های ولتاژ و جریان عملکرد مطلوبی از خود به نمایش بگذارد در حالی که توان و تلفات حاصل از عملکرد فیلتر نیز کاهش یابد. افزایش سرعت تحقیقات در زمینه فیلترهای ترکیبی باعث شده در اواخر سال ۲۰۱۸ مقاله‌ای در مجله IEEE چاپ شود که ویژگی جدیدی را به ساختار SVC-HAPF اضافه کرده است که بتواند علاوه بر جبرانسازی

TCR-RITHAPF نام دارد [۴۴]. از آنجایی که بیشتر بارهای شبکه قدرت سلفی می‌باشند و بخش TCR نیز خاصیت سلفی دارد، بخش RITHAPF نیازمند یک جریان جبرانسازی خازنی بزرگ می‌باشد که بتواند توان راکتیو مورد نیاز بار را تامین کند و همین موضوع توان RITHAPF را افزایش می‌دهد. همچنین با توجه به اینکه در این طرح از ترانسفورماتور استفاده شده است، اندازه، وزن و تلفات فیلتر ترکیبی افزایش پیدا کرده است.

مراجع [۴۵-۴۶] طرحی از فیلتر ترکیبی موازی با شبکه را پیشنهاد می‌کنند، که شامل یک بخش SVC و یک بخش فیلتر اکتیو قدرت (APF) است. این دو بخش به صورت سری با هم یک ساختار نوین از فیلتر ترکیبی را ایجاد می‌کنند. این طرح در شکل (۷) نشان داده شده است. فیلتر ترکیبی (SVC-HAPF) رنج جبرانسازی وسیع‌تر داشته و همچنین توان مبدل فیلتر اکتیو قدرت را کاهش می‌دهد. در این طرح با حذف فیلترهای پس‌یو ثابت، مبدل‌های چندسطحی به عنوان فیلتر اکتیو و ترانسفورماتور، مشکلاتی نظیر رزونانس، تلفات حاصل از افزایش نیمه‌هادی‌ها، هزینه حاصل از افزایش تعداد نیمه‌هادی‌ها و خازن‌های DC مبدل و افزایش اندازه و وزن حاصل از حضور ترانسفورماتور را به طور کلی برطرف کرده است. در این طرح نوین، وابسته به نوع کنترل می‌توان بسیاری از عملکردهای فیلتر ترکیبی را بهبود بخشید.

در ساختار SVC-HAPF طراح می‌تواند بر مبنای شاخص مورد نظر پارامترهای فیلتر را تنظیم و انعطاف‌پذیری معنی‌داری را در اهداف



شکل ۷: طرح SVC-HAPF

converter," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 64, no. 4, pp. 2742-2749, April 2017.

- [9] C. Zhao et al., "Optimized design of full-bridge modular multilevel converter with low energy storage requirements for hvdc transmission system," IEEE Trans. Power. Electron., vol. 33, no. 1, pp. 97-109, Jan. 2018.
- [10] Z. Kong, X. Huang, Z. Wang, J. Xiong and K. Zhang, "Active power decoupling for submodules of a modular multilevel converter," IEEE Trans. Power. Electron., vol. 33, no. 1, pp. 125-136, Jan. 2018.
- [11] S. Srianthumrong and H. Akagi, "A medium-voltage transformerless AC/DC power conversion system consisting of a diode rectifier and a shunt hybrid filter," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 39, pp. 874-882, May/June 2003.
- [12] Prasad AR, Ziogas PD, Manias S. A novel passive wave shaping method for single-phase diode rectifiers. IEEE Trans Ind Electron 1990;37(6):521-30.
- [13] Vlatkovic V, Borojevic D, Lee FC. Input filter design for power factor correction circuits. IEEE Trans Power Electron 1996;11(January (1)):199-205.
- [14] Sung JH, Park S, Nam K. New hybrid parallel active filter configuration minimizing active filter size. In: Proceedings of IEEE electric power applications, vol. 147, no. 2; March 2000. p. 93-8.
- [15] 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. Accessed May 13, 2015.
- [16] Ryckaert WRA, Ghijsselen JAL, Melkebeek JAA. A hybrid

خرابی‌های توان، بخشی از توان حقیقی بارها را نیز تامین کند.

مراجع

- [1] G. Newstead and D. L. H. Gibbins, "Error-actuated power filters," Proceedings of the IRE, vol.37, no. 10, pp. 1115-1119, Oct. 1949.
- [2] P. Sen, P. Biringner and R. Segsworth, "Thyristor-controlled single phase variable inductor," IEEE Trans. Magnetics., vol. 3, no. 3, pp.240-245. Sep1967.
- [3] B. W. Lingard, R. W. Johnson and W. Shepherd, "Steady-state performance and analysis of the series resistance-capacitance circuit with control by adjustable thyristor triggering," IEEE Trans. on Ind. and Gen. Appl., vol. IGA-4, no. 6, pp. 644-654, Nov. 1968.
- [4] L. J. Bohmann and R. H. Lasseter, "Harmonic interactions in thyristor controlled reactor circuits," IEEE Trans. Power Del., vol. 4, no. 3, pp.1919-1926, Mar. 1989
- [5] Z. Li, X. Yu and R. Ban, "The changes of inductors' inductances and resistances in inductive pulse power supply," 2017 IEEE 21st International Conference on Pulsed Power (PPC), Brighton, United Kingdom, 2017, pp. 1-4.
- [6] L. Gyugyi and E. C. Strycula, "Active ac power filters," IEEE/ IAS Annual Meeting, vol. 19-C, pp. 529-535, 1976.
- [7] W. P. Komrumpf and J. P. Waiden, "Power factor of active filtering systems," IEEE Power Electron. Spec. Conf. Cleveland, OH, pp.318325, Jun.1976.
- [8] Y. S. Kumar and G. Poddar, "Control of medium-voltage AC motor drive for wide speed range using modular multilevel

- no. 11, pp. 4445-4455, Nov.2009.
- [34] A. Sangwongwanich; Y. Yang; F. Blaabjerg, "A sensorless power reserve control strategy for two-stage grid-connected PV systems," *IEEE Trans. Power Electron.*, early access, doi: 10.1109/TPEL.2017.2648890.
- [35] F. J. Lin, K. C. Lu, T. H. Ke, B. H. Yang and Y. R. Chang, "Reactive power control of three-phase grid-connected PV system during grid faults using Takagi-Sugeno-Kang probabilistic fuzzy neural network control," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 9, pp. 5516-5528, Sept. 2015.
- [36] L. Cao, K. H. Loo and Y. M. Lai, "Output-impedance shaping of bidirectional DAB dc-dc converter using double-proportional-integral feedback for near-ripple-free dc bus voltage regulation in renewable energy systems," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 3, pp. 2187-2199, Mar. 2016.
- [37] Y. Bae, T. K. Vu and R. Y. Kim, "Implemental control strategy for grid stabilization of grid-connected PV system based on german grid code in symmetrical low-to-medium voltage network," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 28, no. 3, pp. 619-631, Sept. 2013
- [38] B. N. Alajmi, K. H. Ahmed, G. P. Adam and B. W. Williams, "Single-phase single-stage transformer less grid-connected PV system," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 6, pp. 2664-2676, June 2013.
- [39] H. Choi, M. Ciobotaru, M. Jang and V. G. Agelidis, "Performance of medium-voltage dc-bus PV system architecture utilizing high-gain dc-dc Converter," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 6, no. 2, pp. 464-473, Apr. 2015.
- [40] L. Wang, C. Lam and M. Wong, "Multifunctional Hybrid Structure of SVC and Capacitive Grid-Connected Inverter (SVC/CGCI) for Active Power Injection and Nonactive Power Compensation," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 3, pp. 1660-1670, March 2019.
- [41] J. Dixon et al., "A full compensating system for general loads, based on a combination of thyristor binary compensator, and a PWM-IGBT active power filter," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 50, no. 5, pp. 982-989, Oct. 2003.
- [42] A. Varschavsky, J. Dixon, M. Rotella and L. Moran, "Cascaded ninelevel inverter for hybrid-series active power filter, using industrial controller," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 8, pp. 2761-2767, Aug. 2010.
- [43] S. P. Litran and P. Salmeron, "Reference voltage optimization of a hybrid filter for nonlinear load reference," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 6, pp. 2648-2654, Jun. 2014.
- [44] A. Luo, S. Peng, C. Wu, J. Wu and Z. Shuai, "Power electronic hybrid system for load balancing compensation and frequency-selective harmonic suppression," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, no. 2, pp. 723-732, Feb.2012.
- [45] S. Rahmani, A. Hamadi, and K. Al-Haddad, "A combination of shunt hybrid power filter and thyristor-controlled reactor for power quality," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 5, pp. 2152-2164, May 2014
- [46] L. Wang, C. S. Lam and M. C. Wong, "A hybrid-STATCOM with wide compensation range and low DC-link voltage," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol.63, no. 6, pp. 3333-3343, Jun. 2016.
- ***
- compensation system comprising hybrid power filter and AC power capacitor. *Electr Power Syst Res* 2003;65:63-9
- [17] Prasad AR, Ziogas PD, Manias S. A novel passive wave shaping method for single-phase diode rectifiers. *IEEE Trans Ind Electron*1990;37(6):521-30
- [18] Kandil TA, Quaicoe JE. A new approach to voltage and harmonic compensation. In: *Proceedings of IEEE Canadian conf on electrical and computer engineering*, Toronto, Ontario, vol. 2; 2001. p. 747-52.
- [19] Rodriguez P, Pindado R, Bergas J. Alternative topology for three-phase fourwire PWM converters applied to a shunt active power filter. In: *Proceedings of IEEE annual conference of industrial electronics society, IECON*, vol. 4; November 2002. p. 2939-44
- [20] 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 Energy Syst*, doi:10.1002/etep.2299.
- [21] 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.2016.11.049>.
- [22] J. Arrillaga and N. R. Watson, *Power System Harmonics*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2003.
- [23] R. N. Beres, X. Wang, M. Liserre, F. Blaabjerg and C. L. Bak, "A Review of Passive Power Filters for Three-Phase Grid-Connected Voltage-Source Converters," in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 4, no.1, pp. 54-69, March 2016.
- [24] K. H. Ahmed, S. J. Finney, and B. W. Williams, "Passive Filter Design for Three-Phase Inverter Interfacing in Distributed Generation," in *Proc. of Compatibility in Power Electronics*, 2007, pp. 1-9.
- [25] R. W. Erickson and D. Maksimović, *Fundamentals of Power Electronics*. Boston, MA: Springer US, 2001.
- [26] X. Sun, L. Yang, R. Wang, R. Han, H. Shen and Z. Chen, "A Novel Impedance Converter for Harmonic Damping in Loop Power Distribution Systems," in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 4, no. 1, pp. 162-173, March 2016.
- [27] A. Javadi, L. Woodward and K. Al-Haddad, "Real-Time Implementation of a Three-Phase THSeAF Based on a VSC and a P+R Controller to Improve the Power Quality of Weak Distribution Systems," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, no. 3, pp. 2073-2082, March 2018.
- [28] Pinto JG, Exposto B, Monteiro V, Monteiro LFC. 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, Montreal, QC, 25-28 Oct. 2012.
- [29] 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*.2007;29:312-321.
- [30] F. Rong; X. Gong; H. Shoudao, "A novel grid-connected PV system based on MMC to get the maximum power under partial shading conditions," *IEEE Trans. Power Electron.*, early access, doi: 10.1109/TPEL.2016.2594078
- [31] X. Li, S. Dusmez, U. R. Prasanna, B. Akin and K. Rajashekara, "A new SVPWM modulated input switched multilevel converter for grid-connected PV energy generation systems," *IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron.*, vol.2, no. 4, pp. 920-930, Dec. 2014.
- [32] N. Kumar, T. K. Saha and J. Dey, "Sliding-mode control of PWM dual inverter-based grid-connected PV system: modeling and performance analysis," *IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron.*, vol. 4, no. 2, pp.435-444, Jun. 2016.
- [33] A. Pigazo, M. Liserre, R. A. Mastromauro, V. M. Moreno and A. Dell'Aquila, "Wavelet-based islanding detection in grid-connected PV systems," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56,