



Research Article

Technovations of Electrical Engineering in Green Energy System

(2026) 5(3):51-75

A New Time-Domain Current Harmonic Detection and Control Method for Shunt Active Power Filter

Farzad Sajadi¹, M.Sc Student, Mohammad Pichan¹, Assistant Professor¹ Department of Electrical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran

Abstract:

Reducing the destructive effects of current harmonics has attracted a lot of research attention. Shunt active power filter (SAPF) is one of the best options for compensating reactive power as well as current harmonics. The generation of reference current is the most important part in the control structure of the SAPF. The correct operation of this part depends completely on the accurate extraction of load current harmonics. Since conditions such as asymmetry or harmonic pollution in the grid voltage are normal in a weak grid, the correct operation of the active filter should not be affected by such conditions. Also, in some cases, for cost management and optimal design, there is no need to compensate all harmonics generated by the load. As a result, selective harmonic compensation is considered in these cases. Therefore, in this paper, a new method based on instantaneous power theory is proposed to extract load current harmonics and generate reference current for shunt active power filter. The proposed method provides simplicity, low computational burden, easy implementation and enables extraction and compensation of selected harmonics in which all of these are guaranteed under all grid voltage states, including the presence of harmonics, asymmetry or both harmonics and asymmetry. In order to verify the performance of the proposed method, a three-phase SAPF has been simulated in Matlab/Simulink environment under different grid voltage conditions. Finally, the experimental results obtained in the laboratory environment are also presented. The obtained results are verified the appropriate performance of the proposed method.

Keywords: Shunt active power filters (SAPF), Self-tuning filter (STF), Positive sequence detector (PSD), Phase locked loop, Instantaneous power theory.

Received: 24 February 2025**Revised:** 19 August 2025**Accepted:** 1 September 2025**Corresponding Author:** Dr. Mohammad Pichan, m.pichan@arakut.ac.irDOI: <http://dx.doi.org/10.30486/teeges.2022.1885851.1173>



فناوری‌های نوین مهندسی برق در سیستم انرژی سبز

یک روش جدید تشخیص و کنترل مولفه هارمونیک جریان در حوزه زمان جهت استفاده در فیلترهای فعال موازی

سید فرزاد سجادی^۱، کارشناسی/ارشد، محمد پیچان^۱، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

چکیده: کاهش تأثیرات مخرب هارمونیک‌های جریان، توجه تحقیقاتی بسیار زیادی را به خود جلب کرده است. فیلتر فعال موازی یکی از بهترین گزینه‌ها جهت جبران‌سازی توان راکتیو و هارمونیک‌های جریان می‌باشد. تولید جریان مرجع مهم‌ترین قسمت در ساختار کنترلی یک فیلتر فعال موازی است. عملکرد صحیح این بخش کاملاً به استخراج دقیق هارمونیک‌های جریان بار بستگی دارد. از آنجایی‌که در شبکه ضعیف، شرایطی اعم از، عدم تقارن و یا آلودگی هارمونیکی در ولتاژ شبکه امری طبیعی می‌باشد، عملکرد صحیح فیلتر فعال، نباید تحت تأثیر این‌گونه شرایط واقع شود، همچنین در برخی موارد، جهت مدیریت هزینه و طراحی بهینه، نیاز به جبران‌سازی تمام هارمونیک‌های تولید شده توسط بار نمی‌باشد، در این موارد جبران‌سازی هارمونیک انتخابی، مطرح می‌گردد. از این‌رو در این مقاله روشی جدید مبتنی بر تئوری توان لحظه‌ای، جهت استخراج هارمونیک‌های جریان بار و تولید جریان مرجع برای فیلتر فعال موازی پیشنهاد شده است، که در عین سادگی، بار محاسباتی کم، پیاده‌سازی آسان، امکان استخراج و جبران‌سازی هارمونیک انتخابی را نیز ممکن می‌سازد، همچنین ساختار پیشنهادی قابلیت عملکرد فیلتر را در تمامی حالات ولتاژ شبکه اعم از وجود هارمونیک، عدم تقارن و یا هر دو حالت هارمونیکی و عدم تقارن تضمین می‌نماید. جهت بررسی عملکرد روش پیشنهادی، فیلتر فعال سه فاز در محیط Matlab/Simulink تحت شرایط مختلف ولتاژ شبکه شبیه‌سازی شده است و در نهایت نتایج تجربی حاصل شده در محیط آزمایشگاهی ارائه می‌شود. نتایج بدست آمده، گواه بر عملکرد مناسب روش پیشنهادی است.

واژه‌های کلیدی: فیلتر توان فعال موازی، فیلتر خود تنظیم، آشکار ساز توالی مثبت، حلقه قفل شونده فاز، تئوری توان لحظه‌ای.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۰۶

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۵/۲۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۶/۱۰

نویسنده‌ی مسئول: دکتر محمد پیچان، m.pichan@arakut.ac.ir

DOI: <http://dx.doi.org/10.30486/teeges.2022.1885851.1173>



دستیابی به تولید انرژی‌های نو و همچنین استفاده و کنترل بهینه انرژی الکتریکی، باعث شده است که فناوری الکترونیک قدرت به صورت گسترده در تولید، انتقال، توزیع، ذخیره‌سازی و سایر زمینه‌ها، مورد استفاده قرار گیرد. همین امر باعث شده است، سیستم قدرت، یک سیستم مبتنی بر ادوات الکترونیک قدرت باشد [۲،۱].

دستگاه‌های الکترونیک قدرت، عملکردی غیر خطی دارند، یعنی برخلاف بارهای خطی جریان را به صورت سینوسی از شبکه نمی‌کشند. همین امر باعث می‌شود، تولید و انتشار هارمونیک امری اجتناب ناپذیر گردد. همین اغتشاشات هارمونیک، باعث ایجاد چالش اساسی در عملکرد صحیح سیستم قدرت می‌شود. هارمونیک‌ها نه تنها می‌توانند عملکرد امن و پایدار سیستم قدرت را تهدید کنند، بلکه می‌توانند بر روی بارها و تجهیزات الکتریکی مجاور، تأثیر مخربی داشته باشند. در سال‌های اخیر استفاده از بارهای غیرخطی در شبکه توزیع مانند: یکسو کننده‌ها، دستگاه‌های کنترل فرکانس و کوره‌های قوس الکتریکی، رو به افزایش بوده است، این امر منجر به ایجاد حالات ضربه‌ای گذرا، تولید هارمونیک، افزایش توان راکتیو، ایجاد اعوجاج بر روی جریان و ولتاژ شبکه و همچنین ایجاد عدم تعادل در ولتاژ شبکه شده است. بطور کلی می‌توان گفت، حضور هارمونیک‌ها می‌تواند باعث ایجاد مشکلات جدی شود، به عنوان مثال در موتورهای و ترانسفورماتورها، هارمونیک‌های ایجاد شده می‌توانند، تلفات، افت ولتاژ اضافی و در نهایت کاهش راندمان را به همراه داشته باشند. علاوه بر این، هارمونیک‌ها می‌توانند، عملکرد رله‌های حفاظتی، تجهیزات خودکار کنترلی و حفاظتی و تجهیزات اندازه‌گیری را دچار اختلال جدی کنند، همچنین بر عملکرد تجهیزات حساس (PLC^۱ و کامپیوترها)، تأثیرات مخرب بگذارند و یا باعث تداخل و آسیب به تجهیزات الکترونیکی شوند. علاوه بر این، در مواردی هارمونیک‌ها باعث اختلال در تجهیزات مخابراتی می‌شوند. از این رو، جبران‌سازی هارمونیک و توان راکتیو در سیستم قدرت به یک موضوع مهم تبدیل شده است [۳].

بطور معمول استفاده از فیلترهای غیرفعال^۲، راهکاری جهت جبران‌سازی هارمونیک و توان راکتیو بوده است. اگرچه، استفاده از فیلترهای غیر فعال دارای مزایایی همچون سادگی پیاده‌سازی و قیمت مناسب می‌باشد، اما، تأثیر آن بر روی امپدانس شبکه، امکان جبران‌سازی صرفاً یک هارمونیک خاص، امکان رزونانس با فرکانس شبکه، عدم وجود دینامیک و انعطاف‌پذیری بالا در جبران‌سازی هارمونیک‌ها و توان راکتیو را، می‌توان از معایب این نوع فیلترها نام برد [۴].

در مقابل فیلترهای غیرفعال، فیلترهای توان فعال^۳ (APF)، معرفی شده‌اند. فیلترهای فعال، تجهیزاتی موثر برای افزایش کیفیت توان با امکان جبران‌سازی طیف وسیعی از هارمونیک‌ها، به همراه جبران‌سازی توان راکتیو بصورت پویا و کنترل شده، و در برخی موارد، حل مشکلات افت ولتاژ و عدم تعادل سه فاز، تصحیح ضریب توان، همراه با دینامیک و پاسخ سریع هستند [۵].

فیلتر فعال از نظر محل اتصال به شبکه، به سه دسته سری، موازی و هیبرید تقسیم‌بندی می‌شود. استفاده از فیلترهای فعال موازی^۴ از آن جهت که اغلب جبران‌سازی هارمونیک‌های جریان مد نظر است، مرسوم‌تر از سایر فیلترهای فعال می‌باشد [۶]. فیلتر فعال موازی همان‌طور که در شکل (۱) آمده است، بصورت موازی با بار قرار گرفته و جریانی برابر با اندازه هارمونیک‌های جریان تولید شده توسط بار ولی در فاز مخالف را تولید می‌کند. سپس این جریان را به نقطه اتصال مشترک^۵ تزریق می‌نماید. بدیهی است که این فرایند، منجر به جبران شدن هارمونیک‌های تولیدی توسط بار در حد استاندارد از دید شبکه می‌شود [۷].

عملکرد صحیح و دقیق فیلتر فعال موازی به جریان مرجع تولید شده وابسته است و این امر کاملاً مجزا از ساختار اینورتر از لحاظ تعداد سطوح می‌باشد [۸]. جریان‌های مرجع جبرانی از دو بخش یعنی، استخراج هارمونیک‌های جریان بار و همچنین جریان‌های جبرانی جهت ثابت نگهداشتن ولتاژ لینک DC تشکیل می‌شوند. استخراج هارمونیک‌های جریان در این میان نقش پررنگ‌تری را، دارا هستند [۹]. جهت استخراج دقیق هارمونیک‌های جریان باید، پارامترهای اندازه و فاز هارمونیک‌های جریان، به صورت دقیق استخراج شوند. جهت دستیابی به این مهم، فیلتر فعال موازی باید توانایی کارکرد کاملاً هماهنگ، آن‌هم تحت شرایط مختلف ولتاژ شبکه را داشته باشد [۱۰].

استخراج هارمونیک جریان را به دو حوزه زمان^۶ و فرکانس^۷ می‌توان تقسیم بندی کرد [۱۱]. روش‌های حوزه فرکانس علاوه بر مزایایی همچون دقت و استخراج هارمونیک انتخابی، معایبی مانند: تاخیر، انعطاف‌پذیری پایین، نیاز به جمع‌آوری اطلاعات زیاد و در نتیجه نیاز به فضای ذخیره‌سازی بالا و محاسبات پیچیده را به همراه دارند [۱۲،۱۳].



حذف نویز تطبیقی^۸ [۱۵، ۱۴]، کنترل فازی^۹ [۱۶]، استفاده از شبکه عصبی^{۱۰} [۱۷]، روش‌هایی هستند، که امروزه با رویکردی نوین ارائه شده‌اند، اما بدلیل پیچیدگی ساختاری، این‌گونه روش‌ها بصورت مرسوم مورد استفاده قرار نگرفته‌اند.

روش‌های حوزه زمان، بدلیل سادگی در پیاده‌سازی، بار محاسباتی کمتر، عدم نیاز به پردازنده قوی و پاسخ سریع‌تر، نسبت به سایر روش‌ها بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۸]. تئوری توان لحظه‌ای (IPT)^{۱۱} [۱۹]، قاب مرجع سنکرون (SRF)^{۱۲} [۲۰]، تابع متعامد مثلثاتی^{۱۳} [۲۱]، از روش‌هایی هستند که در حوزه زمان دسته بندی می‌شوند.

در [۲۲]، از اصل مثلث متعامد استفاده شده‌است، در این روش امکان کنترل بر روی میزان توان راکتیو جبران شده میسر نمی‌باشد. همچنین در این روش کارکرد مناسبی در حالتی که ولتاژ شبکه دارای هارمونیک و یا عدم تقارن باشد دیده نمی‌شود. قاب مرجع سنکرون در [۲۳]، ارائه شده است، در این روش‌ها نیز در صورت اعوجاج و یا عدم تعادل در ولتاژ شبکه، فرایند جبران‌سازی بصورت صحیح میسر نمی‌باشد و همچنین این‌گونه روش‌ها برای اجرا نیازمند تبدیل قاب‌های مرجع متعدد می‌باشند. در [۲۴]، برای حذف حلقه قفل شونده فاز، از قاب مرجع ساکن استفاده شده است، این روش نیازمند به استخراج توابع $\sin$ و $\cos$ می‌باشد هم چنین ساختار بکار گرفته شده، عملکرد مناسبی در شرایط شبکه نامتعادل از خود نشان نمی‌دهد.

در مرجع [۲۰]، نیاز به فاز مرجع، جهت همگام‌سازی مشهود می‌باشد، این فرایند اصولاً با استفاده از حلقه قفل شونده فاز^{۱۴} (PLL)، ممکن می‌شود، مشکل اساسی این‌گونه مدارات، عدم کارایی مناسب تحت ولتاژ شبکه غیره ایده‌آل می‌باشد، و عملکرد صحیح فیلتر تحت ولتاژهای هارمونیک شبکه دچار اختلال می‌گردد.

در روش‌های مبتنی بر جریان و فیلترهای باندگذر معمول، مشکلاتی مانند عملکرد نامناسب فیلتر، تحت شرایط مختلف ولتاژ شبکه و همچنین عدم جبران‌سازی و اصلاح ضریب توان و توان راکتیو در این‌گونه روش‌ها مشهود می‌باشد [۲۵].

یکی از محبوب‌ترین روش‌ها در حوزه زمان روش تئوری توان لحظه‌ای می‌باشد. در این روش امکان کنترل دقیق بر میزان جبران‌سازی توان راکتیو و نوسانات توان اکتیو میسر می‌باشد [۲۶].

یک تبدیل مختصات متفاوت IPT در [۲۸، ۲۷]، پیشنهاد شده است. اجزای تشکیل دهنده جریان و همچنین ولتاژ از مختصات $\alpha-\beta$ به مختصات $p-q$ تبدیل می‌شود. برای این کار چندین تبدیل مورد نیاز است. در [۲۹]، اجزای جریان به مؤلفه‌های توالی مثبت، منفی و صفر تجزیه می‌شوند، این فرایند دارای محاسبات و پیچیدگی بسیاری می‌باشد.

در تمام مواردی که تا به این‌جا مورد بررسی قرار گرفته است، محاسبات زیاد و تبدیل‌های پیچیده ریاضی، عملکرد نامناسب فیلتر فعال در شرایطی که ولتاژ شبکه غیر ایده‌آل (نامتقارن و یا دارای هارمونیک) باشد و همچنین نیاز به ساختار آشکارساز توالی مثبت مولفه اصلی پیچیده، محسوس می‌باشد. هر یک از این موارد می‌تواند، اختلال و کاهش دقت در تشخیص هارمونیک‌های جریان و در نهایت عدم عملکرد صحیح فیلتر فعال موازی را به همراه داشته باشد.

از این‌رو در این مقاله راهکاری جهت استخراج جریان مرجع در حوزه زمان و بر مبنای تئوری توان لحظه‌ای پیشنهاد شده است، که علاوه بر قابلیت جبران‌سازی هارمونیک انتخابی، قابلیت کارکرد در حالت غیر ایده‌آل ولتاژ شبکه را، بدون نیاز به هرگونه حلقه قفل شونده فاز و یا مدارات پیچیده آشکارساز توالی مثبت میسر می‌سازد. از سوی دیگر ساختار پیشنهادی نیاز به پیش‌فیلترهای متعدد را جهت کارکرد موثر مدار از بین می‌برد. مزایای ساختار پیشنهادی را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

- ✓ طراحی یک راهکار پیشنهادی جهت استخراج هارمونیک‌های جریان، در حوزه زمان بر اساس تئوری توان لحظه‌ای.
- ✓ جبران‌سازی بسیار مناسب هارمونیک‌های جریان بار از دید شبکه، تحت شرایط مختلف ولتاژ شبکه،
- ✓ تولید سیگنال همگام‌سازی بدون نیاز به ساختارهای پیچیده با استفاده از PLL‌های مرسوم و اطمینان از کارکرد آن در شرایط مختلف ولتاژ شبکه،
- ✓ قابلیت کنترل مستقیم توان (DPC)^{۱۵} و امکان جبران‌سازی و اصلاح کامل و یا بخشی از توان راکتیو،
- ✓ بار محاسباتی کم، سادگی در پیاده‌سازی، عملکرد مناسب در شرایط مختلف ولتاژ شبکه، عدم پیچیدگی محاسباتی، بار محاسباتی کم و بهینه، عدم نیاز به کنترلر گران قیمت و پیچیده و عدم نیاز به فضای ذخیره‌سازی بالا جهت جمع‌آوری



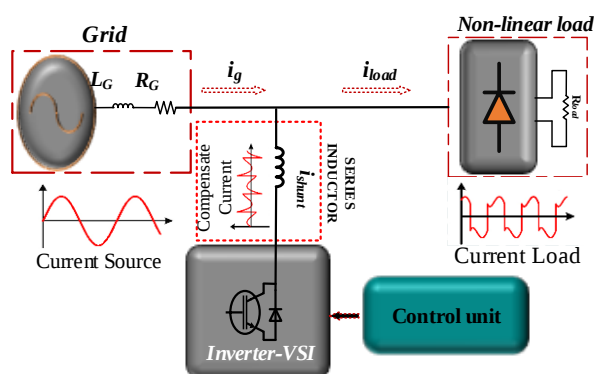
اطلاعات سنسورها و متغیرها، این امکان را فراهم می‌سازد تا راهکار پیشنهادی جایگزین مناسبی برای سایر روش‌های جبران‌سازی هارمونیک معمول باشد.

✓ عدم نیاز به فیلترهای پایین‌گذر و بالاگذر متعدد،

✓ در ساختار پیشنهادی، جبران‌سازی هارمونیک انتخابی جریان بار ممکن می‌باشد.

✓ به دلیل استحکام و قابل اعتماد بودن راهکار پیشنهادی، پیاده‌سازی آن بصورت صنعتی ممکن و مقرون به صرفه می‌باشد.

در مرحله صحت‌سنجی، یک سیستم SAPF سه فاز در محیط شبیه‌سازی به منظور بررسی اثربخشی روش پیشنهادی مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد، همچنین نتایج بدست آمده بر روی یک نمونه فیلتر ساخته شده در محیط صنعتی مورد بحث قرار گرفته است. روش پیشنهادی تحت شرایط ولتاژ غیر ایده‌آل شبکه (متقارن/ نامتقارن/ هارمونیک، هارمونیک و نامتقارن) آزمایش می‌شود. علاوه بر این، روش پیشنهادی از نظر جبران‌سازی هارمونیک انتخابی و همچنین از نظر (THD)^{۱۶}، مورد بحث قرار گرفته است. روند ارائه مقاله بدین شرح می‌باشد: در بخش ۲ روش پیشنهادی به تفصیل به همراه اثبات‌ها، روابط ریاضی و بلوک دیاگرام ارائه شده است و در نهایت در بخش ۳ نتایج شبیه‌سازی روش پیشنهادی در محیط Matlab-Simulink و همچنین نتایج بررسی‌های تجربی ارائه می‌گردد.

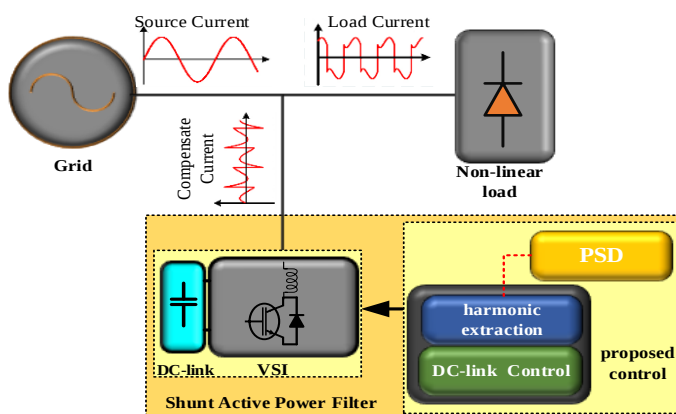


شکل (۱): ساختمان کلی فیلتر فعال موازی [۲۳].

۲- ساختار روش پیشنهادی

در شکل (۲) الگوریتم کنترلی پیشنهادی جهت استخراج جریان مرجع نشان داده شده است. ساختار پیشنهادی را می‌توان در دو بخش اصلی به شرح زیر تفکیک نمود:

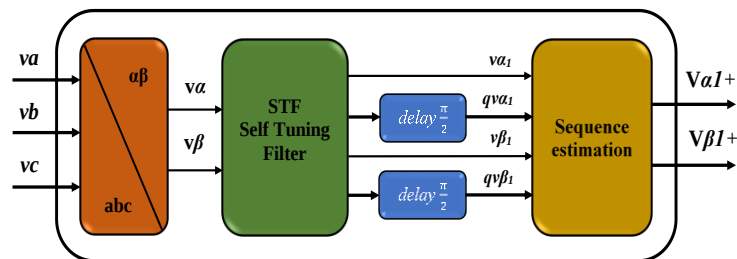
- استخراج توالی مثبت مولفه اصلی ولتاژ،
- استخراج جریان مرجع بر اساس تئوری توان لحظه‌ای.



شکل (۲): الگوریتم ساختار پیشنهادی.

۱-۲- استخراج توالی مثبت مولفه اصلی ولتاژ

از آنجایی که ولتاژ شبکه در اکثر مواقع سینوسی خالص نبوده و دارای هارمونیک و یا عدم تقارن می‌باشد، لذا باید الگوریتم کنترلی اتخاذ شود که استخراج هارمونیک‌های جریان بار، تحت تاثیر اعوجاج ولتاژ شبکه واقع نشوند. به منظور دستیابی به عملکردی مستقل از اعوجاج ولتاژ شبکه و دستیابی به جبران‌سازی مطلوب هارمونیک جریان بار، در الگوریتم پیشنهادی از اجزای توالی مثبت مولفه اصلی ولتاژ جهت محاسبات استفاده می‌شود.



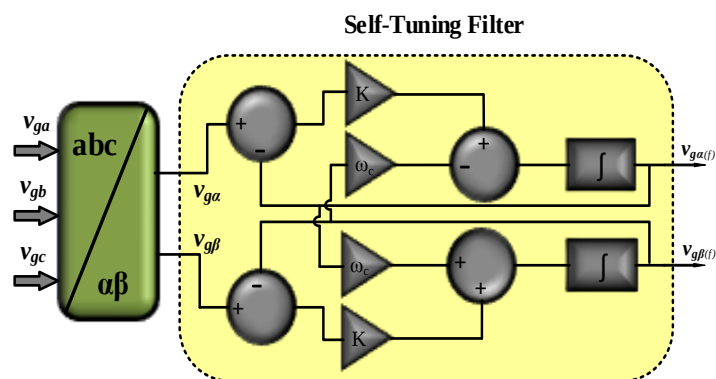
شکل (۳): ساختار استخراج کننده توالی مثبت مولفه اصلی.

همانطور که در شکل (۳) مشخص است، فرایند استخراج توالی مثبت مولفه اصلی ولتاژ بطور کلی از بخش‌های زیر تشکیل شده است:

- بلوک تبدیل کلارک^{۱۷} $(\beta-\alpha)$
- بلوک استخراج مولفه اصلی ولتاژ
- بلوک استخراج توالی مثبت مولفه اصلی ولتاژ

۱-۱-۲- بلوک استخراج مولفه اصلی ولتاژ

همانطور که در شکل (۴) نشان داده شده است، در ابتدا مولفه اصلی ولتاژ توسط یک فیلتر خود تنظیم^{۱۸} استخراج می‌شود.



شکل (۴): بلوک استخراج کننده مولفه اصلی ولتاژ با استفاده از پیش‌فیلتر STF.

کلیه محاسبات در قاب $\alpha\beta$ انجام می‌شود، که در آن ولتاژهای سه فاز اندازه‌گیری شده، با استفاده از تبدیل کلارک از قاب مرجع abc، همانطور که در رابطه (۱) نمایش داده شده است به قاب ایستا $\alpha\beta$ منتقل می‌شوند:

$$T_{\alpha\beta} = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin \theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{pmatrix} \quad (1)$$

جدول (۱): واژه نامه

نمادها	توضیحات	نمادها	توضیحات
v_{β}, v_{α}	مقادیر ولتاژ در قاب $\alpha\beta$	p	توان اکتیو لحظه‌ای
i_{β}, i_{α}	مقادیر جریان در قاب $\alpha\beta$	q	توان راکتیو لحظه‌ای
$v_{g\beta(f)}, v_{g\alpha(f)}$	مولفه اصلی ولتاژ شبکه	$\bar{p}$	مولفه متوسط توان راکتیو
$v_{g\beta(h)}, v_{g\alpha(h)}$	مولفه هارمونیک ولتاژ شبکه	$\bar{q}$	مولفه متوسط توان اکتیو
$i_{\beta(fun)}, i_{\alpha(fun)}$	مولفه اصلی جریان	$\hat{p}$	مولفه نوسانی توان راکتیو
$i_{\beta h}, i_{\alpha h}$	مولفه هارمونیک جریان	$\hat{q}$	مولفه نوسانی توان اکتیو
$v_{\beta(f)}^+, v_{\alpha(f)}^+$	توالی مثبت مولفه اصلی ولتاژ	P_{ref}	توان مرجع اکتیو
θ	زاویه حرکتی	P_{h5}	توان اکتیو مولفه پنجم
ω	سرعت زاویه‌ای	V	ولت
ω_c	سرعت زاویه‌ای قطع	mH	میلی هانری
f_c	فرکانس قطع	Ω	اهم
Hz	هرتز	k	ضریب بهره

θ یک زاویه دلخواه است، و در اینجا بصورت $\theta = 0$ در نظر گرفته می‌شود. ولتاژ شبکه دارای هارمونیک را در قاب $\alpha\beta$ می‌توان بصورت رابطه (۲) نمایش داد، که یک جزء مولفه اصلی ولتاژ شبکه $v_{g\alpha(f)}$ و جزء دیگر، یعنی $v_{g\alpha(h)}$ ، مولفه هارمونیک ولتاژ شبکه می‌باشد.

$$\begin{bmatrix} v_{g\alpha} \\ v_{g\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{g\alpha(f)} + v_{g\alpha(h)} \\ v_{g\beta(f)} + v_{g\beta(h)} \end{bmatrix} \quad (2)$$

برای استخراج مولفه اصلی، ولتاژ شبکه از فیلتر خود تنظیم عبور می‌کند، می‌توان تابع انتقال فیلتر را بصورت رابطه (۳) استخراج کرد:

$$V_{xy} = e^{j\omega t} \int e^{-j\omega t} U_{xy}(t) dt \quad (3)$$

که در آن U_{xy} و V_{xy} به ترتیب سیگنال‌های لحظه‌ای قبل و بعد از انتگرالگیری می‌باشند، ω فرکانس زاویه‌ای است. با تبدیل لاپلاس گرفتن از رابطه (۳) تابع تبدیل فیلتر بصورت رابطه (۴) بدست می‌آید.

$$T(s) = \frac{V_{xy}(s)}{U_{xy}(s)} = \frac{s + j\omega}{s^2 + \omega^2} \quad (4)$$

با معرفی یک پارامتر اضافی k در $T(s)$ ، تابع انتقال دارای تاخیر فاز صفر و بزرگی واحد، در فرکانس قطع $\omega = \omega_c$ خواهد بود. رابطه (۴) را مجدداً باز نویسی می‌کنیم.

$$T(s) = \frac{V_{xy}(s)}{U_{xy}(s)} = k \frac{(s + k) + j\omega_c}{(s + k)^2 + \omega_c^2} \quad (5)$$

کارکرد دقیق فیلتر خود تنظیم وابسته به پارامتر k می‌باشد، به گونه‌ای که انتخاب پذیری و دینامیک فیلتر وابسته به ضریب k است. در نتیجه همواره یک مصالحه خوب باید بین انتخاب پذیری و دینامیک فیلتر، برای انتخاب ضریب k در نظر گرفته شود. با گسترش رابطه (۵) و جایگذاری $v_{g\alpha(f)}$ و $v_{g\beta(f)}$ در آن، رابطه (۶) حاصل می‌شود:

$$v_{g\alpha(f)} + jv_{g\beta(f)} = k \left(\frac{(s + k)}{(s + k)^2 + \omega_c^2} + \frac{j\omega_c}{(s + k)^2 + \omega_c^2} \right) (v_{g\alpha} + jv_{g\beta}) \quad (6)$$

با معادل سازی قسمت‌های حقیقی و موهومی، روابط (۷) و (۸) حاصل می‌شوند:



$$v_{g_{\alpha(f)}} = \frac{k(s+k)}{(s+k)^2 + \omega_c^2} v_{g_{\alpha}} - \frac{k\omega_c}{(s+k)^2 + \omega_c^2} v_{g_{\beta}} \quad (7)$$

$$v_{g_{\beta(f)}} = \frac{k(s+k)}{(s+k)^2 + \omega_c^2} v_{g_{\beta}} - \frac{k\omega_c}{(s+k)^2 + \omega_c^2} v_{g_{\alpha}} \quad (8)$$

با ساده‌سازی معادلات (۷) و (۸)، می‌توان به روابط (۹) و (۱۰) دست یافت:

$$v_{g_{\alpha(f)}} = \frac{k}{s} (v_{g_{\alpha}} - v_{g_{\alpha(f)}}) - \frac{\omega_c}{s} v_{g_{\beta(f)}} \quad (9)$$

$$v_{g_{\beta(f)}} = \frac{k}{s} (v_{g_{\beta}} - v_{g_{\beta(f)}}) - \frac{\omega_c}{s} v_{g_{\alpha(f)}} \quad (10)$$

از معادلات (۹) و (۱۰)، مولفه اصلی ولتاژ شبکه، در حوزه $\alpha\beta$ بدست می‌آید. از آنجایی که $\omega_c = 2\pi f_c$ می‌باشد و f_c ، فرکانس قطع است، برای استخراج مولفه اصلی ولتاژ شبکه، مقدار f_c باید بر روی ۵۰ هرتز تنظیم شود. همانطور که توضیح داده شد، k یک ضریب ثابت است و مقدار آن در محدوده ۲۰ تا ۱۰۰ انتخاب می‌گردد.

۲-۱-۲- بلوک استخراج توالی مثبت^{۱۹} PSD

حال که مولفه اصلی ولتاژ در حوزه $\alpha\beta$ بدست آمده است، به وسیله بلوک دیاگرام نمایش داده شده در شکل (۵)، اقدام به استخراج اجزاء توالی مثبت مولفه اصلی می‌کنیم، این روش، از نظریه اجزای متقارن لحظه‌ای جهت استخراج توالی مثبت بهره می‌برد. رابطه بین ولتاژ شبکه و اجزاء توالی مثبت آن، به صورت روابط (۱۱) و (۱۲) می‌باشد.

$$v_{\alpha}^{+} = \frac{1}{2} [(v_{\alpha} - jv_{\beta})] \quad (11)$$

$$v_{\beta}^{+} = \frac{1}{2} [(v_{\alpha} + jv_{\beta})] \quad (12)$$

عملگر J ، جهت ایجاد تغییر فاز است ($J = e^{-j(\frac{\pi}{2})}$)، به گونه‌ای که 90° پس‌فازی را، در خروجی نسبت به ورودی ایجاد می‌کند. حال اگر به ورودی این مدار مولفه اصلی ولتاژ استخراج شده توسط STF را اعمال کنیم، در خروجی آن، توالی مثبت مولفه اصلی را خواهیم داشت.

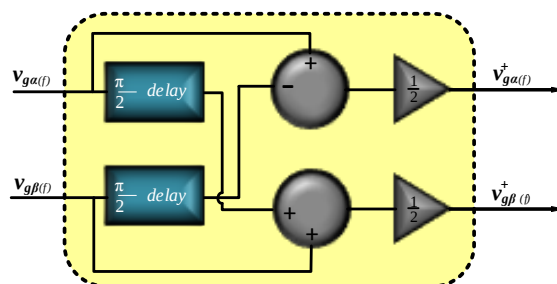
$$v_{\alpha(f)}^{+} = \frac{1}{2} [(v_{\alpha(f)} - jv_{\beta(f)})] \quad (13)$$

$$v_{\beta(f)}^{+} = \frac{1}{2} [(v_{\alpha(f)} + jv_{\beta(f)})] \quad (14)$$

همانطور که در روابط (۱۳) و (۱۴) مشاهده می‌شود، استخراج مولفه اصلی ولتاژ بدون نیاز به هیچگونه PLL و یا FLL صورت گرفته است، که این امر باعث دقت بیشتر، پویایی بالاتر و همچنین برطرف کردن مشکلات ذاتی این گونه مدارات شده است. از سوی دیگر، مداری ساده، جهت استخراج توالی مثبت مورد استفاده قرار گرفته است. بکارگیری این دوساختار، باعث عدم نیاز به مدارات پیچیده آشکارساز توالی مثبت شده است.



Sequence Estimation



شکل (۵): بلوک استخراج کننده توالی مثبت [۲۳].

۲-۲- استخراج جریان مرجع براساس تئوری توان لحظه‌ای

جریان‌های مرجع در فیلتر فعال موازی، متشکل از دو بخش یعنی، سیگنال‌هایی جهت ثابت نگهداشتن ولتاژ لینک DC و سیگنال‌های استخراجی از روش تئوری توان لحظه‌ای (IPT) می‌باشد.

۲-۲-۱- ثابت نگهداشتن ولتاژ لینک DC

در فیلتر فعال موازی نیازی به منبع تولید کننده توان فعال (اکتیو) نمی‌باشد، زیرا در این نوع فیلترها، توان متوسط فعالی قرار نیست به شبکه تزریق شود، لذا می‌توان از یک خازن به عنوان ذخیره‌ساز انرژی، جهت تبادل توان نوسانی استفاده کرد. توجه به این نکته حائز اهمیت است که، فیلتر فعال از عناصر ایده‌آل ساخته نشده است، و در عمل دارای تلفاتی همچون تلفات هدایت، کلیدزنی و... است، پس برای جبران این تلفات، نیاز به دریافت مقداری توان متوسط فعال، از شبکه می‌باشد. لذا در جریان مرجع تولید شده برای فیلتر فعال، باید این تلفات جهت ثابت نگهداشتن ولتاژ لینک DC لحاظ شود.

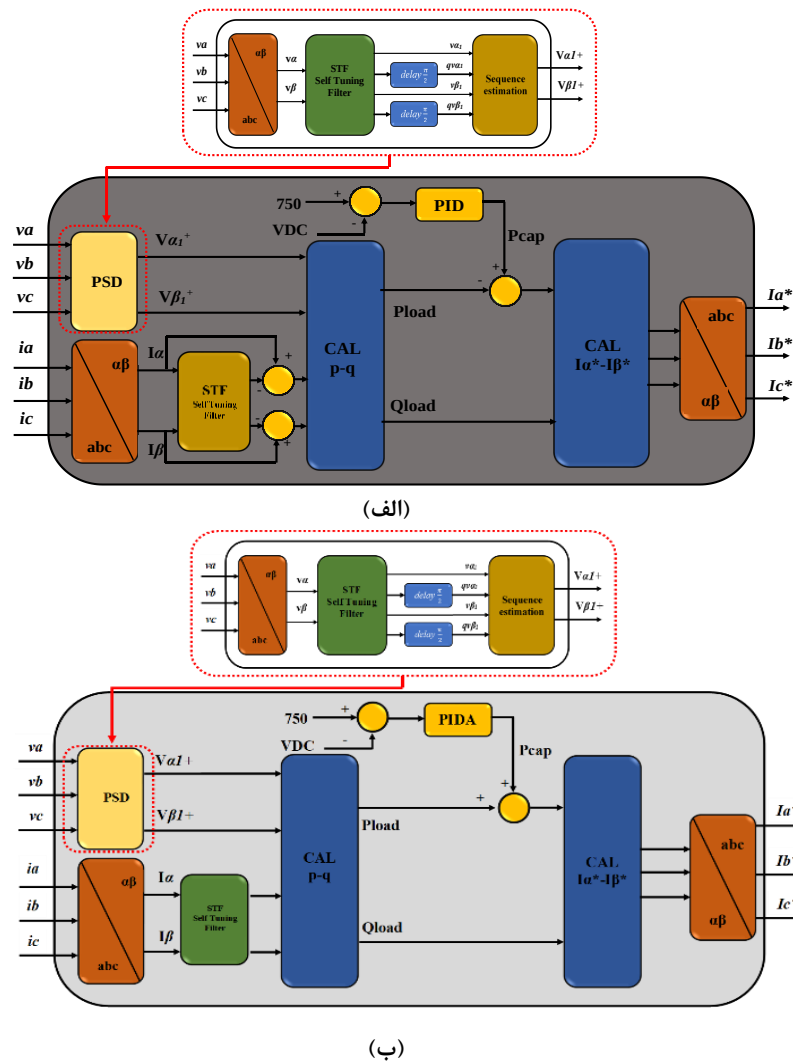
برای کنترل و ثابت نگهداشتن ولتاژ لینک DC، یک ولتاژ مرجع، با ولتاژ اندازه‌گیری شده از لینک DC، مقایسه می‌گردد. سیگنال خطای بدست آمده، به یک کنترلر تناسبی انتگرالی (pi)، وارد شده و در خروجی کنترلر، توان جبران‌سازی که جهت ثابت نگهداشتن ولتاژ لینک DC مورد نیاز است، تولید می‌شود، در نهایت این مقدار، به مقدار مولفه نوسانی توان اکتیو جهت جبران‌سازی اضافه می‌شود.

۲-۲-۲- سیگنال‌های جبرانی استخراجی بر مبنای تئوری توان لحظه‌ای

روش‌های حوزه زمان، جهت استخراج هارمونیک و تولید جریان مرجع، از محبوبیت بیشتری برخوردار هستند. این امر به دلیل مسائلی همچون سادگی، بار محاسباتی کم، سرعت پردازشی بالاتر نسبت به سایر روش‌ها می‌باشد. یکی از محبوب‌ترین روش‌ها در حوزه زمان، روش تئوری توان لحظه‌ای است، از این رو جهت بهره بردن از تمامی مزایای ذکر شده، در این مقاله از روش تئوری توان لحظه‌ای، برای استخراج هارمونیک‌های جریان، استفاده می‌شود. همانطور که پیش‌تر توضیح داده شد، گاهی به دلایلی مانند: طراحی بهینه، کاهش هزینه‌ها و...، نیاز به جبران‌سازی طیف کامل هارمونیک‌ها نمی‌باشد، و صرفاً نیاز به جبران یک هارمونیک انتخابی، که بزرگترین سهم را در THD دارد، عملی معقول‌تر می‌باشد. از این رو در این مقاله روشی با امکان استخراج تک هارمونیک انتخابی و همزمان استفاده از تئوری توان لحظه‌ای، با قابلیت عملکرد صحیح در تمامی حالات ولتاژ شبکه، پیشنهاد شده است، که در ادامه به آن پرداخته خواهد شد. ساختار پیشنهادی جهت تولید جریان مرجع، از نظر استخراج هارمونیک‌ها در دو حالت مورد بررسی قرار می‌گیرد:

۱- تولید جریان مرجع جهت جبران‌سازی کامل هارمونیک‌های بار

۲- تولید جریان مرجع جهت جبران‌سازی هارمونیک انتخابی



شکل (۶): ساختار تولید جریان مرجع جبرانی با روش پیشنهادی: (الف) جبران سازی تمامی هارمونیک های تولید شده توسط بار، (ب) جبران سازی هارمونیک انتخابی.

در روش پیشنهادی جهت تولید جریان مرجع با امکان استخراج هارمونیک انتخابی، همانطور که در شکل (۶-الف) آمده است، ابتدا جریان هارمونیک مورد نظر، توسط پیش فیلتر STF استخراج می گردد. نحوه استخراج هارمونیک انتخابی جریان، دقیقاً همانند مراحل است که جهت استخراج مولفه اصلی ولتاژ طی می شود، و پیش از این بصورت کامل مورد بررسی قرار گرفته است، از این رو از تکرار مجدد روابط در این بخش صرف نظر شده است. تفاوت اصلی در این نکته است، که پیش فیلترها در این مرحله بر روی هارمونیک جبرانی که قصد جبران سازی آن را داریم تنظیم می شوند. از آنجایی که فرض بر این است، که بار یک، یکسوساز ۶ پالسه است، و هارمونیک های مضرب ۳ در جریان ظاهر نمی شوند، در نتیجه، بزرگ ترین هارمونیک ظاهر شده بر روی جریان بار، هارمونیک ۵ می باشد.

در این مقاله با تنظیم سرعت زاویه ای فیلترها بر روی ۱۵۷۰ رادیان بر ثانیه ($\omega = 2\pi f$)، در نهایت در خروجی فیلترها، جریان هارمونیک پنجم استخراج می شود. سپس جهت تولید جریان مرجع از روابط تئوری توان لحظه ای استفاده می شود. مبنای کار تئوری توان لحظه ای، بر اساس مقادیر لحظه ای توان سه فاز است. برای محاسبه مؤلفه های توان لحظه ای از تبدیل کلارک استفاده می شود.

جهت تبدیل ولتاژها و جریان های سه فاز به قاب مرجع ساکن ($\alpha\beta$) از معادلات (۱۵) و (۱۶) استفاده می شود:



$$\begin{pmatrix} v_{\alpha} \\ v_{\beta} \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{pmatrix} \quad (15)$$

$$\begin{pmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} \quad (16)$$

مؤلفه‌های توان لحظه‌ای را می‌توان از معادلات (۱۷) و (۱۸) محاسبه نمود:

$$p = v_{\alpha} \cdot i_{\alpha} + v_{\beta} \cdot i_{\beta} \quad (17)$$

$$q = v_{\alpha} \cdot i_{\beta} + v_{\beta} \cdot i_{\alpha} \quad (18)$$

در این معادلات $v_{\alpha}, v_{\beta}, i_{\alpha}, i_{\beta}$ به ترتیب، مقدار لحظه‌ای ولتاژ و جریان و همچنین p و q به ترتیب توان اکتیو و راکتیو لحظه‌ای می‌باشند. مؤلفه‌های هارمونیک موجود در ولتاژ و جریان، باعث ظهور نوسانات در توان می‌شوند، از این جهت، توان اکتیو و راکتیو را می‌توان بصورت روابط (۱۹) و (۲۰) باز نویسی کرد.

$$p = \bar{p} + \hat{p} \quad (19)$$

$$q = \bar{q} + \hat{q} \quad (20)$$

$\bar{p}$ و $\bar{q}$ معرف مؤلفه متوسط و $\hat{p}$ و $\hat{q}$ نشان دهنده نوسانات توان می‌باشند.

با توجه به توضیحات ارائه شده، توان اکتیو جبرانی جهت تولید جریان مرجع برای جبران‌سازی هارمونیک انتخابی (در این جا هارمونیک پنجم جریان) از رابطه (۲۱) بدست می‌آید:

$$p_{ref} = p_{h5} + p_{cap} \quad (21)$$

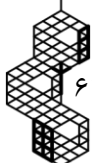
جهت تولید جریان مرجع برای جبران‌سازی طیف کامل هارمونیک‌های جبرانی تولید شده توسط بار، نیاز به استخراج قسمت نوسانی توان اکتیو داریم، همچنین می‌توان تمام و یا بخشی از توان راکتیو را جبران کرد. برای این منظور از ساختار نشان داده شده در شکل (۶-ب) استفاده می‌شود:

$$i_{\alpha h} = i_{\alpha} - i_{\alpha(fun)} \quad (22)$$

$$i_{\beta h} = i_{\beta} - i_{\beta(fun)} \quad (23)$$

$$p_{ref} = \hat{p}_{load} + p_{cap} \quad (24)$$

در این حالت توان مرجع جهت تولید جریان جبرانی، از رابطه (۲۴) جاصل می‌شود.





۳- نتایج مطالعات انجام شده

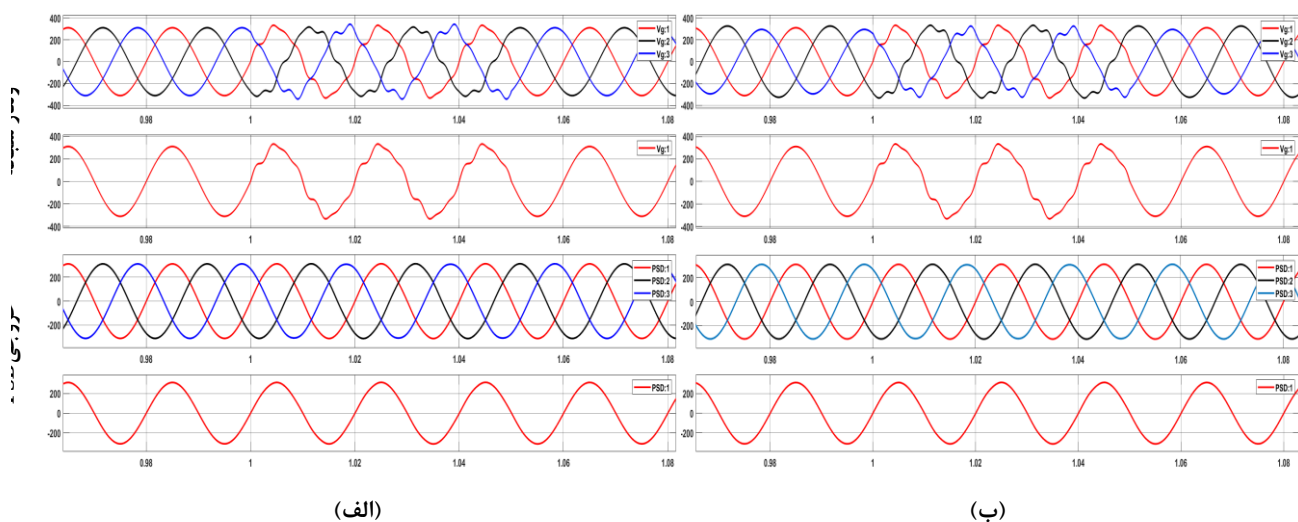
به منظور صحت‌سنجی طرح پیشنهادی، شبیه‌سازی کاملی، شامل فیلتر فعال موازی به همراه آشکارساز توالی مثبت مولفه اصلی ولتاژ پیشنهادی، در محیط Matlab-Simulink انجام شده‌است. پارامترهای انتخابی، در جدول شماره (۲) نمایش داده شده‌است.

جدول (۲): پارامترهای SAPF.

واحد	مقدار	پارامتر
V	۳۸۰	ولتاژ شبکه
Hz	۵۰	فرکانس مولفه اصلی
KHz	۱۰	فرکانس سوئیچینگ
V	۷۵۰	ولتاژ لینک dc
mH	۳.۷	سلف خروجی اینورتر
-	۲	(ضریب تناسبی کنترلر لینک dc) k_p
-	۱۰	(ضریب انتگرالی کنترلر لینک dc) k_i
Ω	۲۰	مقاومت بار

۳-۱- نتایج شبیه‌سازی

شکل (۸)، خروجی استخراج کننده توالی مثبت مولفه اصلی ولتاژ پیشنهادی را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود، در حالتی که ولتاژ شبکه متقارن، نامتقارن، دارای هارمونیک و یا حتی نامتقارن همراه با هارمونیک می‌باشد، به خوبی توالی مثبت مولفه اصلی ولتاژ استخراج می‌شود. مطالعه در مورد نحوه انتخاب ضریب k ، تحت ولتاژ متقارن شبکه در جدول (۴) آورده شده‌است، مشهود است که، افزایش مقدار k ، باعث افزایش پاسخ دینامیکی فیلتر می‌شود، در عین حال میزان انتخاب‌پذیری فیلتر را نیز تحت تاثیر قرار می‌دهد، در شکل (۹)، دیگرام بود^{۲۱} فیلتر STF، به ازای مقادیر مختلف ضریب k ، آورده شده‌است. باتوجه به نتایج بدست آمده از جدول (۴) و شکل (۹)، انتخاب مقدار ۱۰۰، برای k ، مصالحه خوبی بین انتخاب‌پذیری و پاسخ دینامیکی فیلتر بدنبال دارد. میزان THD ولتاژ خروجی PSD پیشنهادی در هرکدام از سناریوهای انجام شده در جدول (۳) آورده شده‌است.

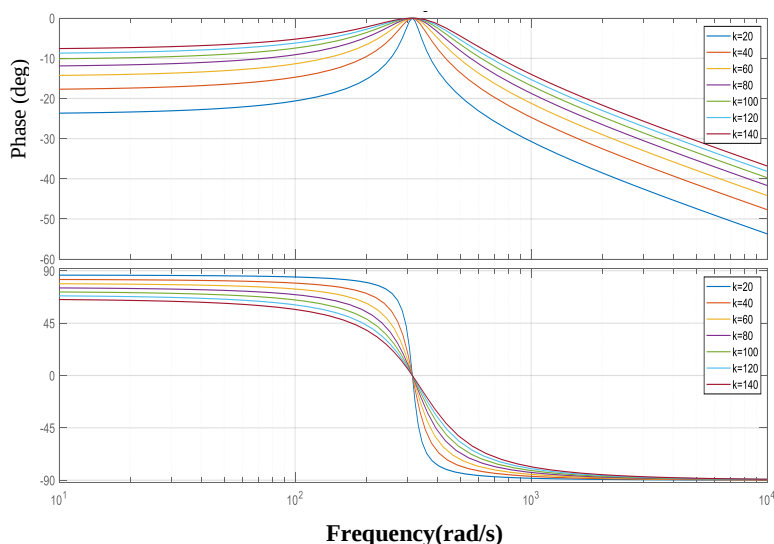


شکل (۸): شکل موج توالی مثبت مولفه اصلی ولتاژ استخراج شده، تحت شرایط هارمونیک: (الف) ولتاژ شبکه متقارن، (ب) ولتاژ شبکه نامتقارن.



جدول (۳): THD ولتاژ خروجی PSD پیشنهادی.

ولتاژ شبکه	THD%
متقارن - هارمونیک	۰.۶۶٪
نامتقارن - هارمونیک	۰.۶۸٪



شکل (۹): نمودار Bode فیلتر STF پیشنهادی برای مقادیر مختلف k

جدول (۴): مشخصه خروجی STF پیشنهادی نسبت به مقادیر مختلف k

بهره k	بار مقاومتی	
	Time (s)	THD (%)
۲۰	۰.۳۳	۰.۱۱
۴۰	۰.۱۶۸	۰.۲۰
۹۰	۰.۰۹۶	۰.۳۶
۱۰۰	۰.۰۶۸	۰.۴۰
۱۱۰	۰.۰۵۸	۰.۴۸
۱۲۰	۰.۰۴۸	۰.۵۶

در این قسمت برای ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، نتایج شبیه‌سازی در دو حالت یعنی: (۱) تولید جریان مرجع جهت جبران‌سازی هارمونیک انتخابی و (۲) تولید جریان مرجع جهت جبران‌سازی طیف کامل هارمونیک‌های تولید شده توسط بار، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

محدوده مجاز THD جریان شبکه، بر اساس استاندارد IEEE 519-2022 [۳۰]، جهت جبران‌سازی طیف کامل هارمونیک‌های بار، کوچک‌تر از ۵٪ می‌باشد، این میزان جبران‌سازی جهت کاهش میزان هارمونیک انتخابی در جریان سمت شبکه نیز صادق می‌باشد. در شکل (۱۲) نتیجه مطالعه انجام شده، جهت استخراج مولفه پنجم جریان بار، تحت ولتاژ شبکه متقارن و دارای هارمونیک آورده شده‌است، ابتدا ولتاژ شبکه بصورت متقارن می‌باشد، سپس هارمونیک‌های ۵ و ۷، به ولتاژ شبکه اضافه می‌گردد. همانطور که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود THD٪ جریان شبکه و بار، در حالتی که ولتاژ شبکه متقارن باشد، به ترتیب ۱۲.۷۶٪ و ۲۵.۳۱٪ است. همانطور که در شکل (۱۳) مشخص است، تاثیر هارمونیک پنجم جریان تولید شده توسط بار، از ۲۲.۳۱٪ در سمت بار به ۱.۸۴٪ در سمت شبکه، رسیده است، در زمانی که ولتاژ شبکه دارای هارمونیک می‌شود، با توجه به شکل (۱۱)، THD٪ جریان شبکه و جریان بار به ترتیب ۱۳.۱۲٪ و ۲۵.۹۸٪ می‌شود. با استناد به شکل (۱۴)، در این حالت تاثیر هارمونیک پنجم جریان، از ۲۹.۸٪ در جریان بار، به ۳٪ در



جریان سمت شبکه رسیده است. در نتیجه در هر دو حالت ولتاژ شبکه یعنی، متقارن و متقارن و هارمونیک، میزان کاهش THD٪ متأثر از هارمونیک پنجم جریان بار، مشهود می‌باشد.

در شکل (۱۵)، عملکرد روش پیشنهادی در حالتی که ولتاژ شبکه، همزمان نامتقارن و دارای هارمونیک می‌باشد، نشان داده شده است. ابتدا ولتاژ شبکه نامتقارن می‌باشد، در این حالت THD٪ جریان بار و جریان سمت شبکه، همانطور که در شکل (۱۶) مشهود است، به ترتیب، ۲۵.۷۹٪ و ۱۲.۸۱٪ می‌باشد، مطابق شکل (۱۸) تأثیر هارمونیک پنجم جریان بار، ۲۲.۸۷٪ است، که این مقدار بعد از جبران سازی، در جریان سمت شبکه، به ۱.۶۷٪ کاهش یافته است، سپس در بازه ۱ ثانیه تا ۱.۱ ثانیه، هارمونیک‌های ۵ و ۷ به ولتاژ شبکه نامتقارن اضافه می‌شوند، در این حالت با توجه به شکل (۱۷)، THD٪ جریان بار و جریان سمت شبکه به ترتیب، ۲۵.۹۱٪ و ۱۲.۹۹٪ است. مطابق شکل (۱۹)، تأثیر هارمونیک پنجم در جریان بار ۲۸.۵٪ است، که بعد از جبران سازی در جریان سمت شبکه به ۲.۶۸٪ کاهش یافته است. مشاهده می‌شود، در این حالت همچنان THD٪ جریان کشیده شده از شبکه کاهش یافته است، و تأثیر هارمونیک پنجم به خوبی در سمت جریان شبکه جبران سازی شده است.

در شکل (۲۴)، عملکرد فیلتر فعال تحت ولتاژ شبکه متقارن و هارمونیک با استفاده از روش پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا فیلتر فعال خاموش بوده و در زمان ۰/۲ ثانیه فیلتر روشن می‌شود. در شکل (۲۵)، جریان جبرانی تولید شده توسط فیلتر فعال آنالیز شده، و همان گونه که مشخص است، بیشترین میزان جریان تولیدی فیلتر هارمونیک پنجم می‌باشد. لازم به ذکر است که، در زمان ۰/۴ الی ۰/۵ ثانیه ولتاژ شبکه نامتقارن دارای هارمونیک‌های ۵ و ۷ است، مشهود است، فرایند تولید جریان جبرانی توسط فیلتر در تمامی موارد به درستی انجام می‌پذیرد.

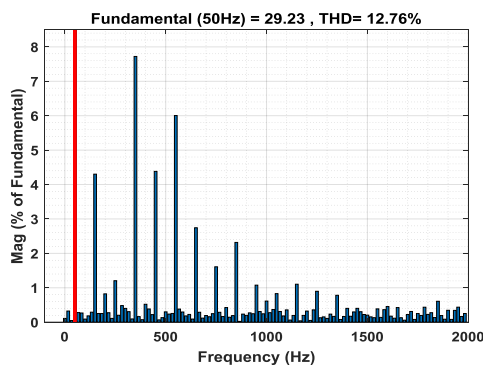
تا به اینجا تمام مطالعات انجام شده جهت استخراج هارمونیک انتخابی (در اینجا هارمونیک پنجم) بوده است، در این قسمت عملکرد فیلتر فعال جهت جبران سازی طیف وسیعی از مولفه‌های هارمونیک جریان تولید شده توسط بار، تحت شرایط مختلف ولتاژ شبکه و با استفاده از PSD پیشنهادی و روش تئوری توان لحظه‌ای، آورده شده است.

در شکل (۲۰)، نتیجه مطالعه انجام شده تحت ولتاژ شبکه متقارن و دارای هارمونیک آورده شده است، ابتدا ولتاژ شبکه بصورت متقارن می‌باشد، سپس هارمونیک‌های ۵ و ۷، به ولتاژ شبکه اعمال می‌گردد و مجدداً ولتاژ شبکه به حالت عادی باز می‌گردد. در این حالت همانطور که مشاهده می‌شود، THD٪ جریان شبکه و جریان بار، در حالتی که ولتاژ شبکه متقارن می‌باشد، به ترتیب ۲.۹۴٪ و ۲۴.۹۶٪ می‌باشد. در زمانی که ولتاژ شبکه تحت تأثیر هارمونیک‌ها می‌باشد، THD٪ جریان شبکه و جریان بار، به ترتیب ۳.۴٪ و ۲۴.۹۲٪ می‌شود. مشهود است که، تحت ولتاژ شبکه متقارن و هارمونیک می‌زان THD٪ جریان در سمت شبکه، در محدوده مجاز، یعنی کمتر از ۵٪ می‌باشد.

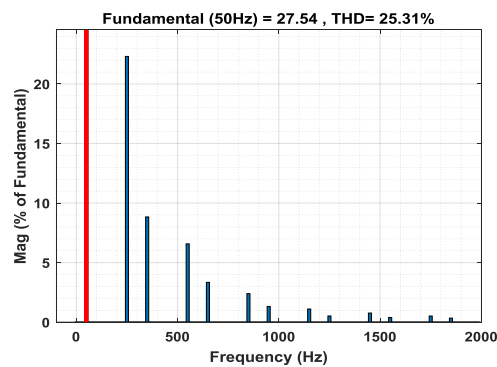
در شکل (۲۱)، عملکرد روش پیشنهادی در حالتی که ولتاژ شبکه همزمان نامتقارن و دارای هارمونیک می‌باشد، نشان داده شده است. ابتدا ولتاژ شبکه نامتقارن می‌باشد، در این حالت THD٪ جریان بار و جریان سمت شبکه، به ترتیب ۲۵.۳۹٪ و ۳.۵۷٪ می‌باشد، سپس در بازه ۱ ثانیه تا ۱.۱ ثانیه، هارمونیک‌ها به ولتاژ شبکه اضافه می‌شوند، در این حالت THD٪ جریان بار و جریان سمت شبکه به ترتیب ۲۵.۱٪ و ۳.۷۱٪ می‌باشد. مشاهده می‌شود، در این حالت نیز همچنان THD٪ جریان کشیده شده از شبکه در حد مجاز می‌باشد. مشهود است که در تمام موارد ذکر شده، جبران سازی هارمونیک‌های جریان بار بخوبی توسط روش پیشنهادی صورت گرفته است و جریان از دید شبکه دارای THD٪ در حد استاندارد تعیین شده می‌باشد.

در شکل‌های (۲۲) و (۲۳)، عملکرد فیلتر در صورتی که از آشکارساز توالی مثبت مولفه اصلی پیشنهادی استفاده نشود، نشان داده شده است. همانطور که در شکل (۲۲) مشهود است، در حالتی که ولتاژ شبکه متقارن و دارای هارمونیک است، THD٪ جریان سمت شبکه برابر با ۱۲/۰۸٪ و در صورتی که ولتاژ شبکه نامتقارن و هارمونیک باشد، THD٪ جریان شبکه برابر با ۱۱/۳۱٪ می‌باشد. در نهایت می‌توان گفت، الگوریتم‌های p-q معمول، تحت شرایطی که ولتاژ شبکه متقارن و فاقد هارمونیک می‌باشد، عملکرد مناسبی از خود نشان می‌دهد، اما در صورت هارمونیک و یا نامتقارن بودن ولتاژ شبکه، عملکرد آن‌ها دقیق نمی‌باشد، از سوی دیگر مدارات معمول PSD، دارای پیچیدگی پیاده سازی زیاد و همچنین نیاز به پیش فیلترهای متعدد، جهت بدست آوردن دقت مناسب در هنگام کار کردن در شبکه غیر ایده آل هستند.



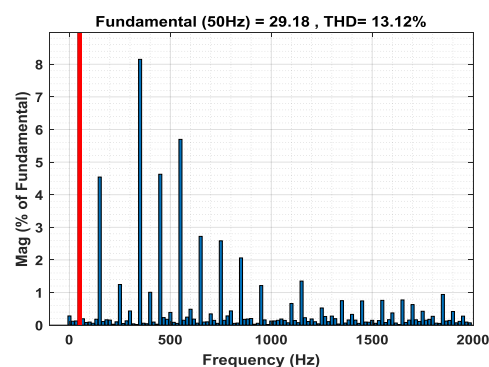


(ب)

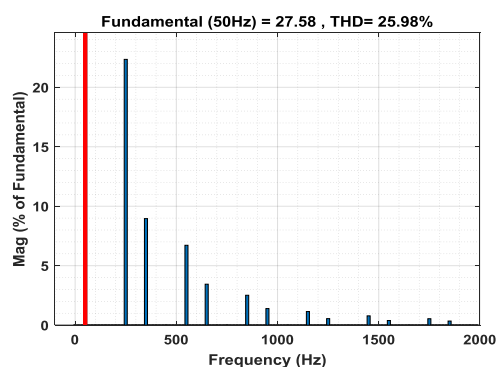


(الف)

شکل (۱۰): تحلیل هارمونیک‌های جریان جهت جبران‌سازی هارمونیک پنجم، تحت ولتاژ شبکه متقارن: (الف) جریان بار، (ب) جریان شبکه.

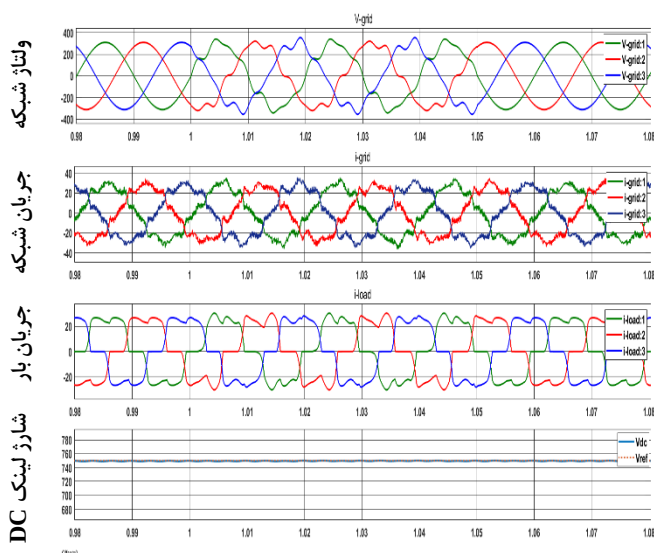


(ب)

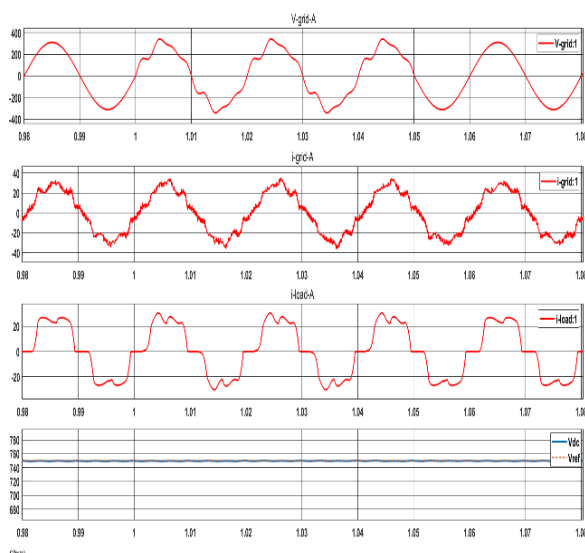


(الف)

شکل (۱۱): تحلیل هارمونیک‌های جریان جهت جبران‌سازی هارمونیک پنجم، تحت ولتاژ شبکه متقارن و هارمونیک: (الف) جریان بار، (ب) جریان شبکه.



ولتاژ شبکه
جریان شبکه
جریان بار
شارژ لینک DC



شکل (۱۲): نتایج شبیه‌سازی جبران‌سازی هارمونیک پنجم جریان بار، تحت شرایط پایدار ولتاژ شبکه متقارن و دارای هارمونیک: (الف) ولتاژ شبکه، (ب) جریان شبکه، (ج) جریان بار، (د) شارژ لینک DC.





160 Hz	0.13%	224.3°
170 Hz	0.17%	114.4°
180 Hz	0.08%	45.5°
190 Hz	0.15%	-15.6°
200 Hz (h4) :	0.31%	18.7°
210 Hz	0.11%	-17.5°
220 Hz	0.14%	89.0°
230 Hz	0.07%	-3.6°
240 Hz	0.10%	12.3°
250 Hz (h5) :	1.84%	224.2°
260 Hz	0.17%	-36.9°
270 Hz	0.06%	169.6°
280 Hz	0.13%	12.9°
290 Hz	0.14%	260.0°
300 Hz (h6) :	0.59%	106.7°
310 Hz	0.15%	107.0°

(ب)

160 Hz	0.00%	100.3°
170 Hz	0.00%	6.3°
180 Hz	0.00%	239.3°
190 Hz	0.00%	64.9°
200 Hz (h4) :	0.01%	185.1°
210 Hz	0.00%	-69.5°
220 Hz	0.00%	216.9°
230 Hz	0.00%	-82.4°
240 Hz	0.00%	166.9°
250 Hz (h5) :	22.31%	121.1°
260 Hz	0.00%	5.3°
270 Hz	0.00%	-88.3°
280 Hz	0.00%	239.0°
290 Hz	0.00%	-84.7°
300 Hz (h6) :	0.00%	-84.8°

(الف)

شکل (۱۳): تأثیر هارمونیک پنجم جریان تحت شرایط ولتاژ شبکه متقارن: (الف) جریان بار، (ب) جریان شبکه.

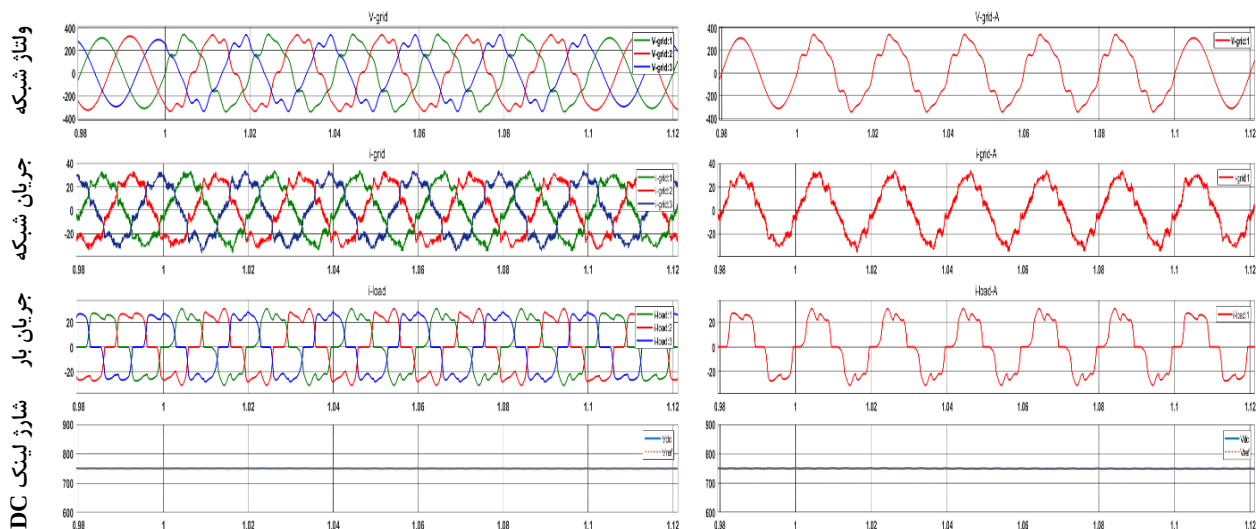
233.333 Hz	0.33%	117.1°
250 Hz (h5) :	3.06%	133.0°
266.667 Hz	0.27%	69.8°
283.333 Hz	0.35%	61.4°
300 Hz (h6) :	0.22%	187.3°
316.667 Hz	0.32%	-20.0°
333.333 Hz	0.37%	-60.3°
350 Hz (h7) :	8.29%	201.8°
366.667 Hz	0.04%	141.9°
383.333 Hz	0.39%	114.9°

(ب)

216.667 Hz	0.00%	-42.7°
233.333 Hz	0.00%	-44.7°
250 Hz (h5) :	29.82%	62.2°
266.667 Hz	0.00%	246.7°
283.333 Hz	0.00%	253.8°
300 Hz (h6) :	0.01%	46.5°
316.667 Hz	0.00%	134.6°
333.333 Hz	0.00%	187.3°
350 Hz (h7) :	7.73%	185.2°

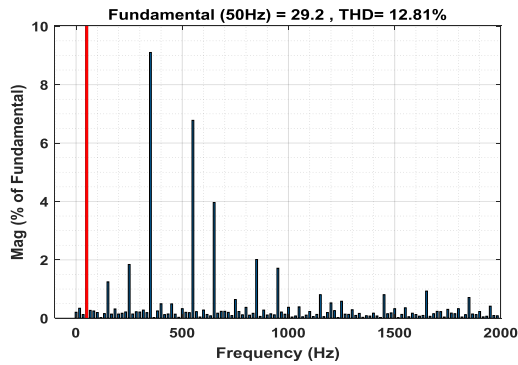
(الف)

شکل (۱۴): تأثیر هارمونیک پنجم جریان تحت شرایط ولتاژ شبکه متقارن و دارای هارمونیک: (الف) جریان بار، (ب) جریان شبکه.

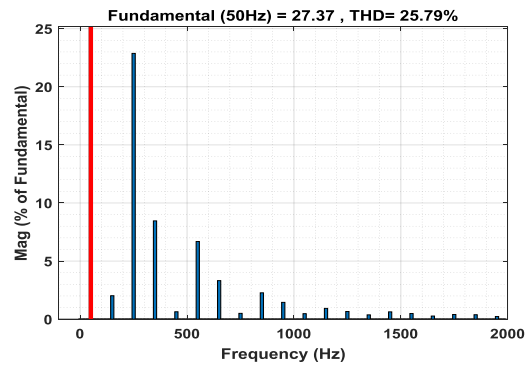


شکل (۱۵): نتایج شبیه سازی جبران سازی هارمونیک پنجم جریان بار تحت شرایط پایدار ولتاژ شبکه نامتقارن و دارای هارمونیک: (الف) ولتاژ شبکه، (ب) جریان شبکه، (ج) جریان بار، (د) شارژ لینک DC.



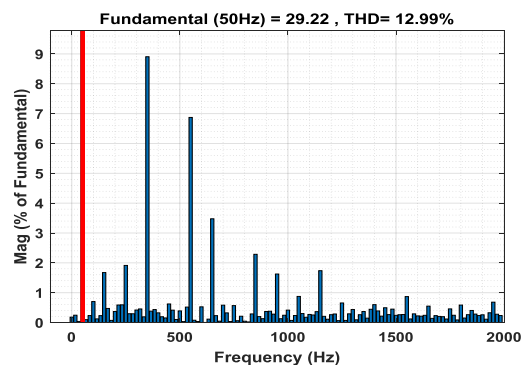


(ب)

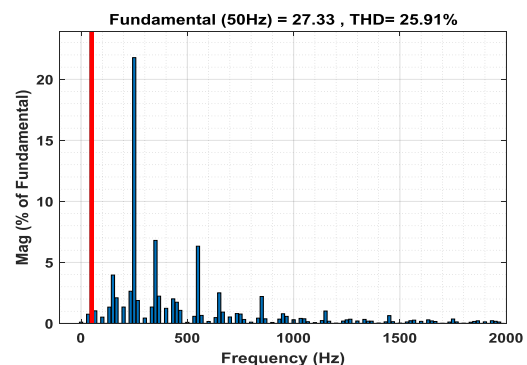


(الف)

شکل (۱۶): تحلیل هارمونیک‌های جریان جهت جبران‌سازی هارمونیک پنجم، تحت ولتاژ شبکه نامتقارن: (الف) جریان بار، (ب) جریان شبکه.



(ب)



(الف)

شکل (۱۷): تحلیل هارمونیک‌های جریان جهت جبران‌سازی هارمونیک پنجم، تحت ولتاژ شبکه نامتقارن و هارمونیک: (الف) جریان بار، (ب) جریان شبکه.

230 Hz	0.06%	-9.0°
240 Hz	0.03%	173.0°
250 Hz (h5):	1.67%	216.0°
260 Hz	0.10%	184.8°
270 Hz	0.07%	63.7°
280 Hz	0.07%	172.3°
290 Hz	0.12%	11.0°
300 Hz (h6):	0.63%	268.4°
310 Hz	0.04%	201.2°
320 Hz	0.09%	193.9°
330 Hz	0.04%	103.3°
340 Hz	0.19%	158.2°
350 Hz (h7):	8.55%	102.8°
360 Hz	0.07%	-29.3°

(ب)

240 Hz	0.00%	123.7°
250 Hz (h5):	22.87%	123.7°
260 Hz	0.00%	59.6°
270 Hz	0.00%	248.8°
280 Hz	0.00%	241.2°
290 Hz	0.00%	181.1°
300 Hz (h6):	0.01%	-17.3°
310 Hz	0.00%	161.3°
320 Hz	0.00%	134.5°
330 Hz	0.00%	116.5°

(الف)

شکل (۱۸): تأثیر هارمونیک پنجم جریان تحت شرایط ولتاژ شبکه نامتقارن: (الف) جریان بار، (ب) جریان شبکه.





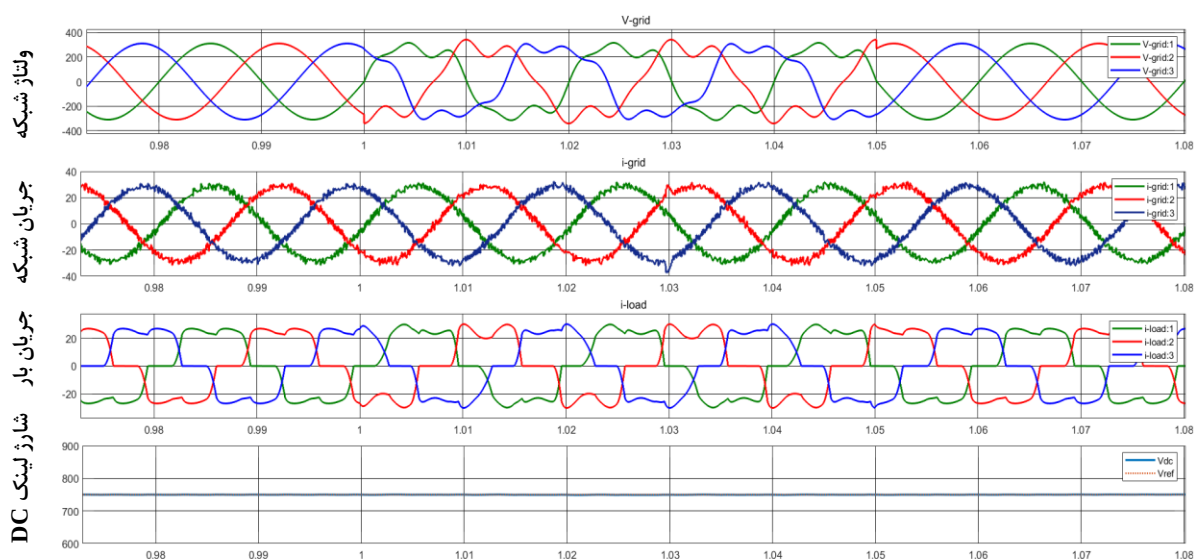
216.667 Hz	0.43%	135.7°
233.333 Hz	0.53%	144.3°
250 Hz (h5):	2.68%	145.6°
266.667 Hz	0.37%	24.7°
283.333 Hz	0.31%	23.7°
300 Hz (h6):	0.36%	-30.7°
316.667 Hz	0.15%	-70.4°
333.333 Hz	0.17%	-87.1°
350 Hz (h7):	9.02%	197.3°
366.667 Hz	0.22%	43.1°

(ب)

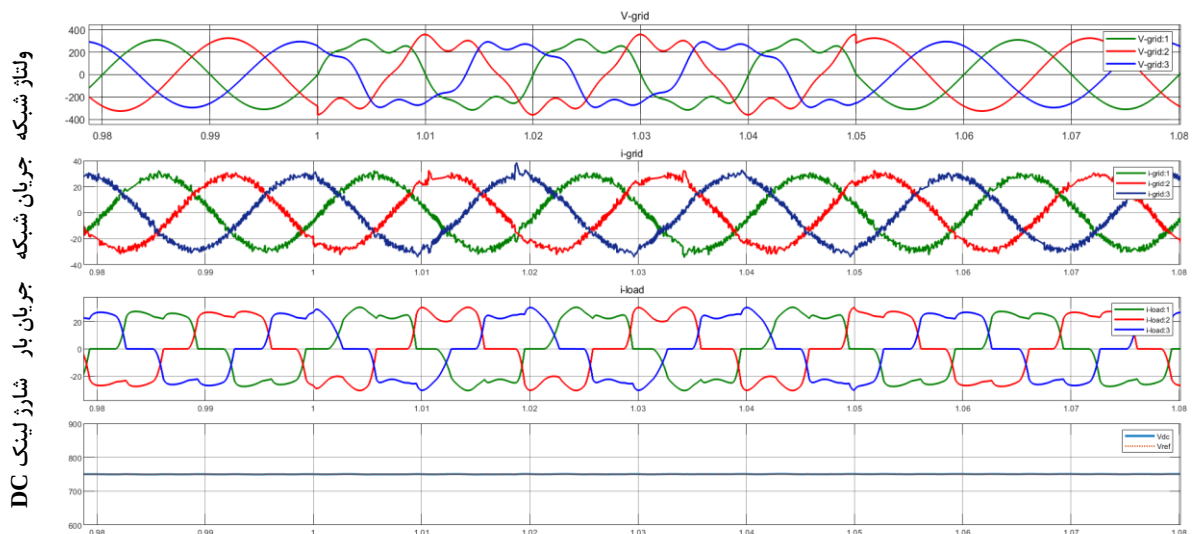
216.667 Hz	0.00%	125.4°
233.333 Hz	0.00%	6.3°
250 Hz (h5):	28.53%	63.3°
266.667 Hz	0.00%	122.1°
283.333 Hz	0.00%	-87.6°
300 Hz (h6):	0.00%	159.6°
316.667 Hz	0.00%	147.7°
333.333 Hz	0.00%	124.2°
350 Hz (h7):	8.73%	183.4°
366.667 Hz	0.00%	245.2°
383.333 Hz	0.00%	107.0°

(الف)

شکل (۱۹): تأثیر هارمونیک پنجم جریان تحت شرایط ولتاژ شبکه نامتقارن و دارای هارمونیک: (الف) جریان بار، (ب) جریان شبکه.



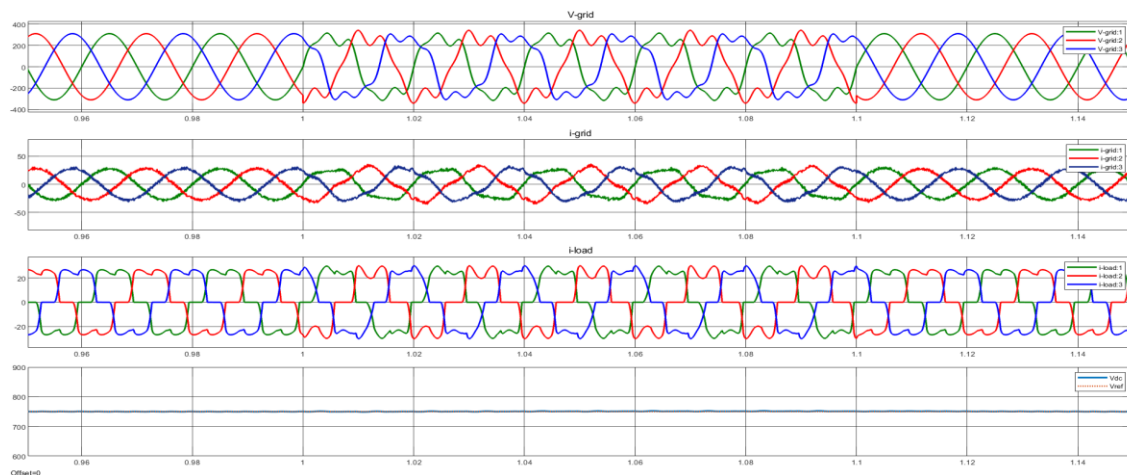
شکل (۲۰): نتایج شبیه سازی تحت شرایط ولتاژ شبکه دارای هارمونیک: (الف) ولتاژ شبکه، (ب) جریان شبکه، (ج) جریان بار، (د) شارژر لینک DC.



شکل (۲۱): نتایج شبیه سازی تحت شرایط ولتاژ شبکه نامتقارن و دارای هارمونیک: (الف) ولتاژ شبکه، (ب) جریان شبکه، (ج) جریان بار، (د) شارژر لینک DC.

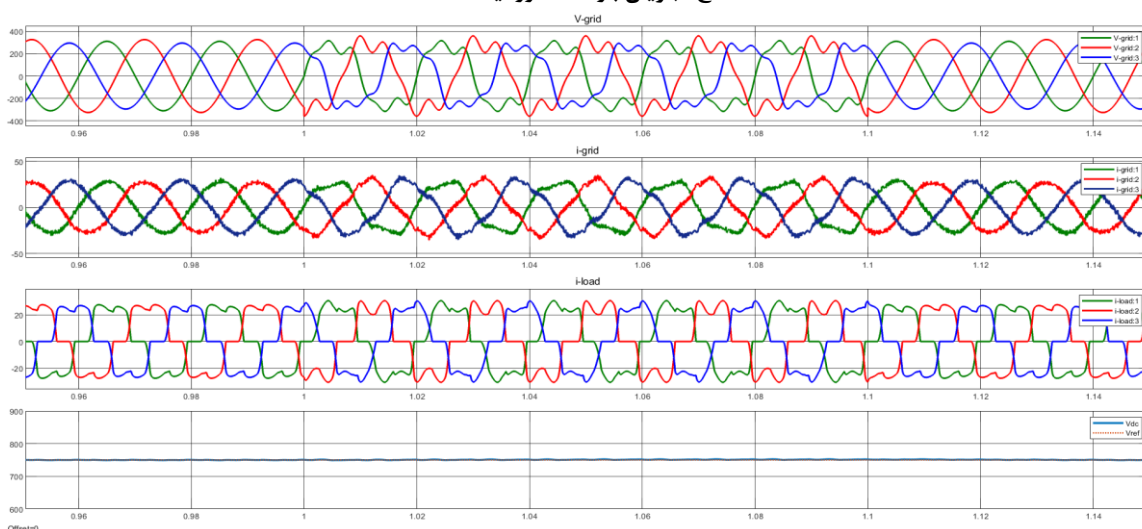


ولتاژ شبکه جریان شبکه جریان بار شارژ لینک DC



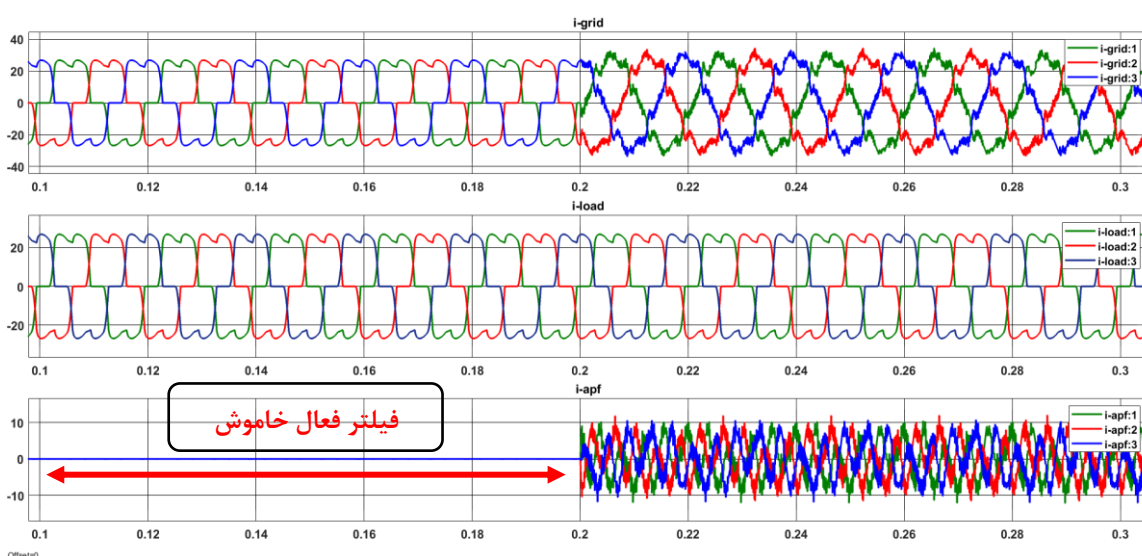
شکل (۲۲): نتایج شبیه‌سازی تحت شرایط ولتاژ شبکه متقارن و دارای هارمونیک، بدون PSD پیشنهادی: الف) ولتاژ شبکه، ب) جریان شبکه، ج) جریان بار، د) شارژ لینک DC.

ولتاژ شبکه جریان شبکه جریان بار شارژ لینک DC

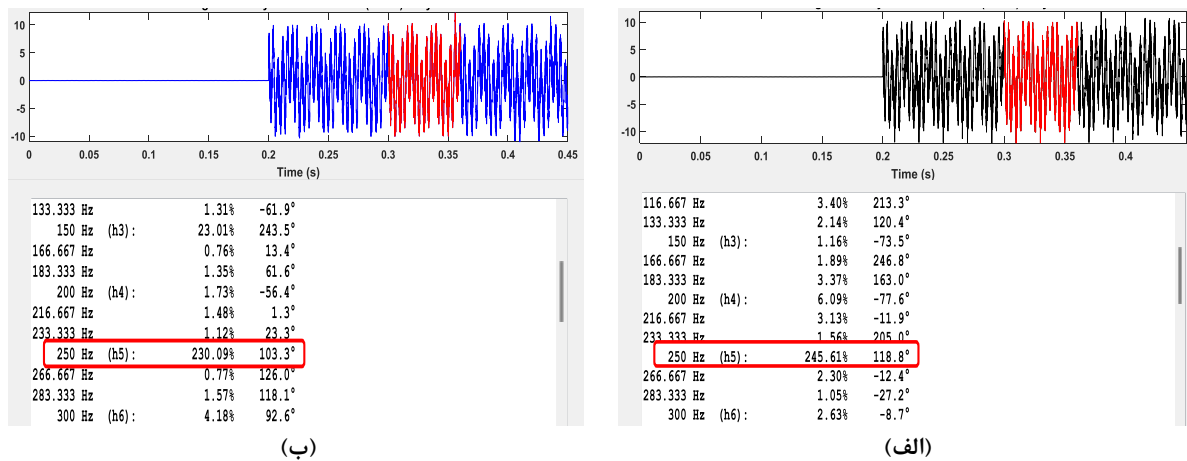


شکل (۲۳): نتایج شبیه‌سازی تحت شرایط ولتاژ شبکه نامتقارن و دارای هارمونیک، بدون PSD پیشنهادی: الف) ولتاژ شبکه، ب) جریان شبکه، ج) جریان بار، د) شارژ لینک DC.

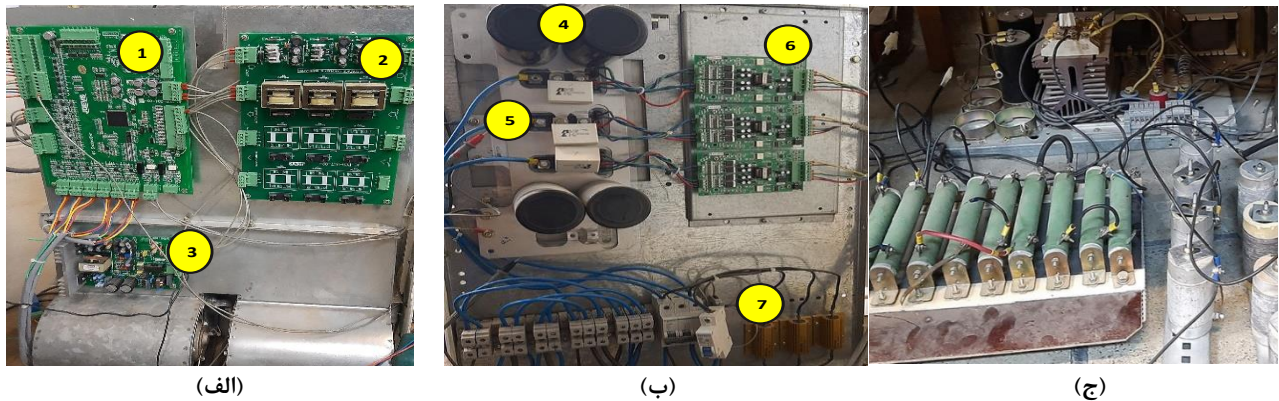
جریان شبکه



شکل (۲۴): نتایج شبیه‌سازی عملکرد فیلتر فعال جهت جبران‌سازی هارمونیک پنجم جریان بار، تحت شرایط ولتاژ شبکه متقارن شامل: الف) جریان شبکه، ب) جریان بار، ج) جریان فیلتر فعال.



شکل (۲۵): آنالیز جریان جبرانی تولید شده توسط فیلتر فعال، جهت جبران سازی هارمونیک پنجم جریان بار: (الف) ولتاژ شبکه مقارن، (ب) ولتاژ شبکه نامتقارن و هارمونیک.



شکل (۲۶): نمونه صنعتی SAPF: (الف) نمای روبرو، (ب) نمای پشتی، (ج) مدل بار غیرخطی.

۳-۲- نتایج آزمایشگاهی

در شکل (۲۶)، تصاویر نمونه صنعتی فیلتر فعال موازی، مشاهده می شود. نتایج عملی بدست آمده براساس آزمایش های انجام شده، در ادامه، ارائه می گردد. هدف از آزمایش های انجام شده راستی آزمایی راهکار پیشنهادی و کارکرد فیلتر تحت شرایط مختلف ولتاژ شبکه می باشد.

جدول (۵): معرفی عناصر نمونه صنعتی فیلتر فعال موازی

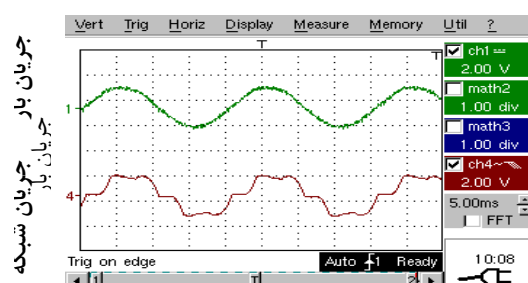
۱	برد کنترلر مبتنی بر (DSP)
۲	نمونه گیری ولتاژ
۳	منبع تغذیه
۴	خازن های لینک DC
۵	IGBT ها و خازن های اسنابر
۶	مدار راه انداز IGBT
۷	مقاومت و کلیدهای راه انداز نرم

در شکل (۲۷)، شکل موج جریان شبکه، جریان بار و همچنین جریان جبران سازی تولید شده توسط فیلتر فعال موازی تحت شرایط ولتاژ شبکه مقارن و هارمونیک آورده شده است. در شکل (۲۸)، تجزیه و تحلیل هارمونیک های موجود بر روی ولتاژ شبکه نشان داده

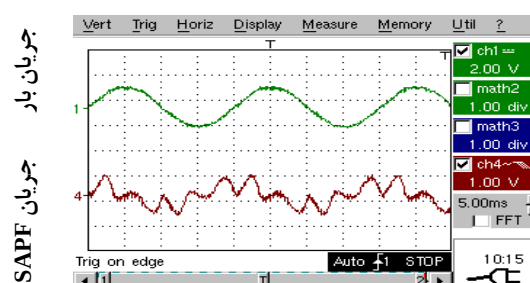
شده است، همانطور که در خروجی آنالیزور مشخص می‌باشد، طیف هارمونیک‌های پنجم و هفتم، بیشترین سهم را در بین هارمونیک‌های موجود بر روی ولتاژ شبکه دارا می‌باشند. بررسی هارمونیک‌های جریان بار و جریان شبکه در شکل (۲۹) آورده شده است، کاملاً مشخص می‌باشد که جبران‌سازی هارمونیک‌های جریان تولیدی توسط بار به خوبی توسط فیلتر فعال با راهکار پیشنهادی تحت ولتاژ شبکه متقارن و هارمونیکی صورت گرفته است و از دید شبکه جریان ساختاری سینوسی دارد. در این حالت جریان بار دارای $\%THD$ برابر با $\%۲۵.۶$ می‌باشد، این عدد در سمت شبکه به مقدار $\%۳.۶$ کاهش یافته است که این مساله گواه بر عملکرد صحیح راهکار پیشنهادی جهت جبران هارمونیک‌های جریان بار تحت ولتاژ متقارن و هارمونیکی می‌باشد.

شکل موج جریان‌های بار، شبکه و خروجی فیلتر فعال، با استفاده از راهکار پیشنهادی تحت شرایط ولتاژ نامتقارن و هارمونیکی در شکل (۳۰) آمده است، خروجی آنالیزور در شکل (۳۱-الف) نمایانگر عدم تقارن در اندازه فازها می‌باشد. تجزیه و تحلیل هارمونیکی جریان‌های بار و شبکه نیز در شکل‌های (۳۱-ب) و (۳۱-ج) آمده است، همانطور که از خروجی آنالیزور مشخص است، تحت شرایط ولتاژ نامتقارن و هارمونیکی میزان $\%THD$ جریان بار و شبکه به ترتیب برابر با $\%۲۶.۷$ و $\%۳.۹$ می‌باشد، و این مساله گواه بر عملکرد مناسب راهکار پیشنهادی جهت جبران‌سازی هارمونیک‌های تولیدی بر روی جریان بار از دید شبکه می‌باشد.

بررسی نتایج تجربی و همچنین نتایج بررسی‌های انجام شده در محیط شبیه‌سازی گواه بر عملکرد مناسب روش پیشنهادی تحت شرایط مختلف ولتاژ شبکه می‌باشد.

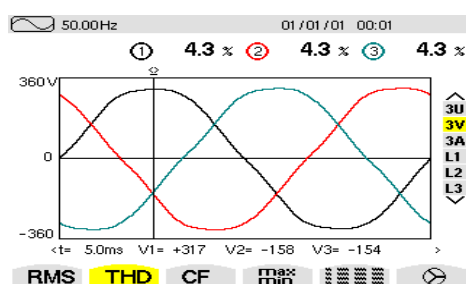


(الف)

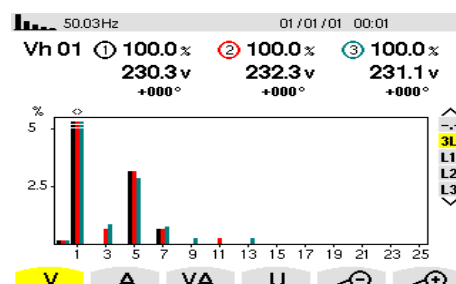


(ب)

شکل (۲۷): شکل موج‌های تجربی حالت پایدار با ولتاژ شبکه (متقارن و هارمونیکی شده): (الف) جریان‌های شبکه و بار، (ب) جریان شبکه و جریان SAPF.

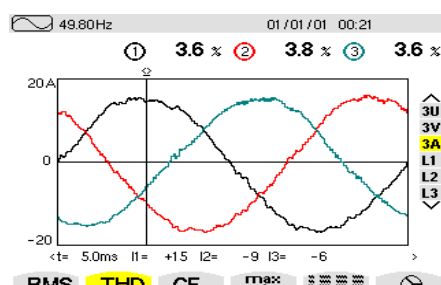


(الف)

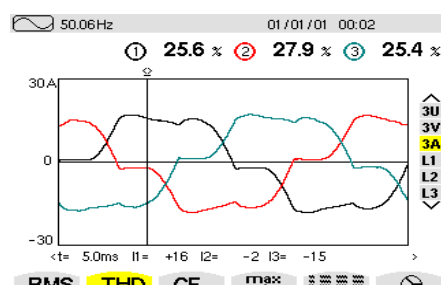


(ب)

شکل (۲۸): تجزیه و تحلیل تجربی حالت پایدار با ولتاژ شبکه (متقارن و هارمونیکی) شامل: (الف) ولتاژ شبکه، (ب) شاخص هارمونیک ولتاژ شبکه

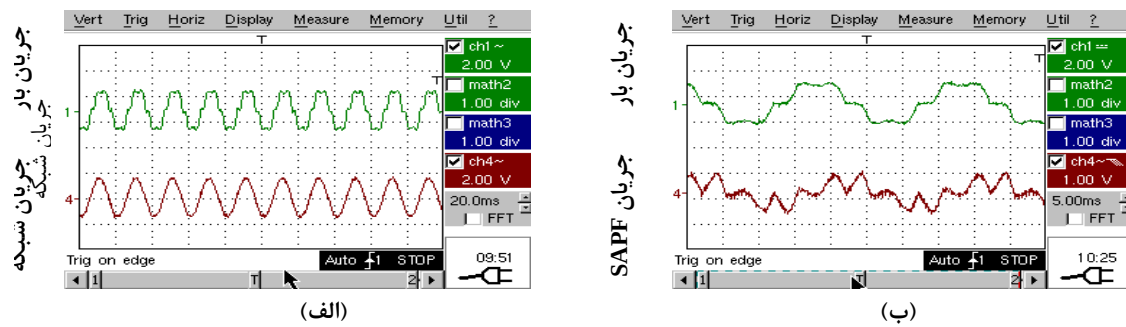


(الف)

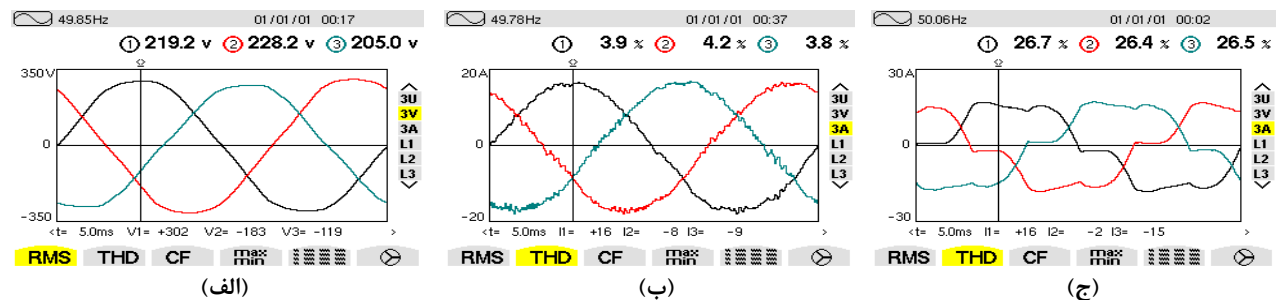


(ب)

شکل (۲۹): تجزیه و تحلیل تجربی حالت پایدار با ولتاژ شبکه (متقارن و هارمونیکی) شامل: (الف) جریان شبکه، (ب) جریان بار.



شکل (۳۰): شکل موج‌های تجربی حالت پایدار با ولتاژ شبکه (نامتقارن و هارمونیک): (الف) جریان‌های شبکه و بار، (ب) جریان بار و جریان SAPF



شکل (۳۱): تجزیه و تحلیل تجربی حالت پایدار با ولتاژ شبکه (نامتقارن و هارمونیک) (شامل: الف) ولتاژ شبکه (ب) جریان شبکه، (ج) جریان بار

۴- نتیجه‌گیری

امروزه روش‌های متعددی جهت استخراج جریان‌های هارمونیک تولید شده توسط بار، در شبکه‌های ضعیف پیشنهاد می‌گردد، اما همچنان استفاده از روش‌های حوزه زمان بدلائل متعددی همچون، سادگی اجرا و بار محاسباتی کم نسبت به سایر روش‌ها، از محبوبیت بیشتری برخوردار هستند. یکی از محبوب‌ترین روش‌ها در این حوزه، روش تئوری توان لحظه‌ای می‌باشد. این روش به دلایلی چون قابلیت پیاده‌سازی ساده، بار محاسباتی کم، قابلیت کنترل مستقیم توان و ... از محبوبیت اجرایی زیادی در صنعت برخوردار است. امروزه به دلیل کاهش هزینه‌ها و همچنین بهینه‌سازی طراحی، مسئله جبران‌سازی هارمونیک‌های انتخابی، مورد توجه قرار گرفته است. از این جهت با تمرکز بر جبران‌سازی هارمونیک‌هایی که بیشترین تأثیر را در THD جریان دارند، می‌توان به پاسخی مناسب با هزینه کمتر دست یافت. از این‌رو در این مقاله راهکاری جهت جبران‌سازی هارمونیک‌های انتخابی با استفاده از روش تئوری توان لحظه‌ای ارائه شده است، به گونه‌ای که فیلتر فعال موازی کارکرد مناسبی را تحت شرایط مختلف ولتاژ شبکه مانند: عدم تقارن و وجود هارمونیک از خود نشان دهد، این امر با استفاده از الگوریتم پیشنهادی مبتنی بر یک استخراج کننده توالی مثبت مولفه اصلی ولتاژ با استفاده از پیش فیلترهای STF ممکن شده است. در نهایت با توجه به نتایج شبیه‌سازی و همچنین نتایج تجربی بدست آمده مشاهده می‌شود، روش پیشنهادی عملکرد مناسبی را جهت جبران‌سازی هارمونیک‌های انتخابی جریان بار تحت شرایط مختلف ولتاژ شبکه از خود نشان می‌دهد، بگونه‌ای که تأثیر هارمونیک پنجم جریان تولید شده توسط بار، در شرایط ولتاژ شبکه ایده‌آل، از ۲۲.۳۱٪ در سمت بار به ۱.۸۴٪ در سمت شبکه، تحت ولتاژ شبکه دارای هارمونیک، از ۲۹.۸٪ در جریان بار، به ۳٪ در جریان سمت شبکه، و تحت ولتاژ شبکه نامتقارن، از ۲۸.۵٪ در سمت بار به ۲.۶۸٪ در سمت شبکه، کاهش یافته است. همچنین در جبران‌سازی طیف کامل هارمونیک-های تولیدی جریان بار توسط راهکار پیشنهادی، در حالتی که ولتاژ شبکه متقارن می‌باشد، THD/جریان شبکه و جریان بار به ترتیب ۲.۹۴٪ و ۲۴.۹۶٪، و در زمانی که ولتاژ شبکه تحت تأثیر هارمونیک‌های ۵ و ۷ واقع می‌شود، THD/جریان شبکه و جریان بار، به ترتیب ۳.۴٪ و ۲۴.۹۲٪، و همچنین، در حالتی که ولتاژ شبکه همزمان نامتقارن و دارای هارمونیک می‌باشد، THD/جریان بار و جریان سمت شبکه، به ترتیب ۲۵.۳۹٪ و ۳.۵۷٪ می‌باشد. مشاهده می‌شود در تمام نتایج بدست آمده جبران‌سازی هارمونیک‌های





جریان بخوبی میسر شده است، بگونه‌ای که میزان هارمونیک های موجود در جریان شبکه در محدوده استاندارد می‌باشد، و در نهایت با توجه به نتایج حاصل شده مشهود است که، راهکار پیشنهادی قابلیت پیاده‌سازی صنعتی را دارا می‌باشد.

مراجع

- [1] H. Wang and S. Liu, "Harmonic interaction analysis of delta-connected cascaded H-bridge-based shunt active power filter," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 8, no. 3, pp. 2445–2460, 2019, doi: 10.1109/JESTPE.2019.2930033.
- [2] M. Tavoosi, M. Delshad, and I. Sadeghkhan, "Decentralized Coordination of Distributed Electric Vehicles Charger for Distribution Network Harmonic Mitigation," *Technovations of Electrical Engineering in Green Energy System*, vol. 2, no. 1, pp. 1–16, 2022, doi: 10.30486/teeges.2022.1959178.1014.
- [3] F. Nejabatkhah, Y. W. Li, and H. Tian, "Power quality control of smart hybrid AC/DC microgrids: An overview," *Ieee access*, vol. 7, pp. 52295–52318, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2912376.
- [4] H. Zhai *et al.*, "An optimal compensation method of shunt active power filters for system-wide voltage quality improvement," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 67, no. 2, pp. 1270–1281, 2019, doi: 10.1109/TIE.2019.2899561.
- [5] D. Bernet and M. Hiller, "Grid- connected medium- voltage converters with parallel voltage-source active filters," *IET Electric Power Applications*, vol. 13, no. 10, pp. 1507–1513, 2019, doi: 10.1049/iet-epa.2019.0021.
- [6] M.-C. Wong, Y. Pang, Z. Xiang, L. Wang, and C.-S. Lam, "Assessment of active and hybrid power filters under space vector modulation," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 36, no. 3, pp. 2947–2963, 2020, doi: 10.1109/TPEL.2020.3017750.
- [7] M. Pichan, M. Samadi, and H. Shahrjerdi, "Active Power Decoupling of Single-Phase Photovoltaic Inverter Using DC Active Filter and Improved Hybrid Controller," *Journal of Modeling in Engineering*, pp. –, 2025, doi: 10.22075/jme.2025.33562.2637.
- [8] B. Amini, H. Rastegar, and M. Pichan, "An optimized proportional resonant current controller based genetic algorithm for enhancing shunt active power filter performance," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 156, p. 109738, 2024, doi: 10.1016/j.ijepes.2023.109738.
- [9] M. Popescu, A. Bitoleanu, C. V. Suru, M. Linca, and L. Alboteanu, "Shunt active power filters in three-phase, three-wire systems: A topical review," *Energies*, vol. 17, no. 12, p. 2867, 2024, doi: 10.3390/en17122867.
- [10] G. Jia, M. Chen, S. Tang, C. Zhang, and B. Zhao, "A modular multilevel converter with active power filter for submodule capacitor voltage ripples and power losses reduction," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 35, no. 11, pp. 11401–11417, 2020, doi: 10.1109/TPEL.2020.2982440.
- [11] B. Amini, H. Rastegar, and M. Pichan, "A New Fractional-Order Proportional-Resonant Control of Shunt Active Power Filter Based on Genetic Algorithm Optimization," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2024, doi: 10.1109/JESTPE.2024.3443159.
- [12] M. Pichan, M. Seyyedhosseini, and H. Hafezi, "A new DeadBeat-based direct power control of shunt active power filter with digital implementation delay compensation," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 72866–72878, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3188685.
- [13] A. El Ghaly, M. Tarnini, and K. Chahine, "A robust reference extraction method for shunt active power filters in the presence of noise and source voltage distortion," *Measurement*, vol. 242, p. 116243, 2025, doi: 10.1016/j.measurement.2024.116243.
- [14] Z. Li, L. Wang, Y. Wang, and G. Li, "Harmonic detection method based on adaptive noise cancellation and its application in photovoltaic-active power filter system," *Electric Power Systems Research*, vol. 184, p. 106308, 2020, doi: 10.1016/j.epr.2020.106308.
- [15] K. B. Rai, N. Kumar, and A. Singh, "Three-phase grid connected shunt active power filter based on adaptive Q-LMF control technique," *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2024, doi: 10.1109/TPEL.2024.3398369.
- [16] S. Hou, J. Fei, C. Chen, and Y. Chu, "Finite-time adaptive fuzzy-neural-network control of active power filter," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 34, no. 10, pp. 10298–10313, 2019, doi: 10.1109/TPEL.2019.2893618.





- [17] M. Kadem, A. Semmah, P. Wira, and A. Slimane, "Artificial neural network active power filter with immunity in distributed generation," *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, vol. 64, no. 2, pp. 109–119, 2020, doi: 10.3311/PPme.12775.
- [18] S. K. Chauhan and V. S. Chauhan, "A comprehensive review on power quality issues and disturbances mitigation through shunt active power filters," *International Journal of Applied*, vol. 13, no. 4, pp. 844–852, 2024, doi: 10.11591/ijape.v13.i4.pp844-852.
- [19] M. R. Ansari, M. S. Mousavi Ghahfarokhi, and S. Safaee, "Power Quality Improvement in a Steel Plant by an Optimized Shunt Active Power Filter Based on Developed PQ Theory," *Energy Engineering and Management*, vol. 11, no. 3, pp. 78–91, 2023, doi: 10.22052/11.3.3.
- [20] S. F. Al-Gahtani, Z. Elbarbary, and S. M. Irshad, "A developed DQ control method for shunt active power filter to improve power quality in transformers," *Plos one*, vol. 19, no. 7, p. e0299635, 2024, doi: 10.1371/journal.pone.0299635.
- [21] D. Chen, L. Xiao, W. Yan, Y. Li, and Y. Guo, "A harmonics detection method based on triangle orthogonal principle for shunt active power filter," *Energy Reports*, vol. 7, pp. 98–104, 2021, doi: 10.1016/j.egyr.2021.06.016.
- [22] S. Gautam, P. Yunqing, Y. Kafle, M. Kashif, and S. U. Hasan, "Evaluation of fundamental dq synchronous reference frame harmonic detection method for single phase shunt active power filter," *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, vol. 4, no. 1, pp. 112–126, 2014, doi: 10.11591/ijpeds.v4i1.4723.
- [23] F. Sajadi, M. Pichan, and A. Zakipour, "Modelling and Extraction of Current Harmonic Components based on Instantaneous Power Theory for Shunt Active Filter under Weak grid," *Journal of Modeling in Engineering*, vol. 22, no. 76, pp. 27–44, 2024, doi: 10.22075/jme.2023.30169.2421.
- [24] R. Ghobadi and G. Shahgholian, "Providing Improved Structure and Adaptive Control Strategy for Solar System with the Ability to Improve Power Quality in Islanded Microgrid," (in Fa), *Journal of Technovations of Electrical Engineering in Green Energy System*, vol. 2, no. 4, pp. 18–37, 2024, doi: 10.30486/teegees.2025.1121457.
- [25] A. M. Nour and A. A. Helal, "A voltage sensorless technique for a shunt active power filter adopting band pass filter under abnormal supply conditions," *Electric Power Systems Research*, vol. 238, p. 111133, 2025, doi: 10.1016/j.epsr.2024.111133.
- [26] M. Pichan and M. Mohammadian, "Modelling and digital-based direct power control of shunt active power filter for rectifier loads," *Journal of Modeling in Engineering*, vol. 21, no. 72, pp. 99–109, 2023, doi: 10.22075/jme.2022.26912.2258.
- [27] F. Harirchi and M. G. Simoes, "Enhanced instantaneous power theory decomposition for power quality smart converter applications," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, no. 11, pp. 9344–9359, 2018, doi: 10.1109/TPEL.2018.2791954.
- [28] A. Chebabhi, M.-K. Fellah, and M.-F. Benkhoris, "Application of PQR theory for control of a 3-phase 4-wire 4-legs shunt active power filter in the $\alpha\beta$ -axes using 3d-svm technique," *Leonardo Journal of Sciences*, vol. 14, no. 26, pp. 17–28, 2015. [Online]. Available: hal-02454590.
- [29] A. A. Montanari and A. M. Gole, "Enhanced instantaneous power theory for control of grid connected voltage sourced converters under unbalanced conditions," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 8, pp. 6652–6660, 2016, doi: 10.1109/TPEL.2016.2627049.
- [30] IEEE, "IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems," *IEEE Standard*, vol. 519, pp. 1–31, 2022, doi: 10.1109/IEEESTD.2022.9848440.

زیرنویس‌ها

¹ programmable logic controller (PLC)

² Passive Filters

³ Active power filter

⁴ Shunt active power filter

⁵ Point of Common Coupling





- ⁶ Time-domain
- ⁷ Frequency-domain
- ⁸ adaptive noise cancellation
- ⁹ fuzzy logic methods
- ¹⁰ neural-network
- ¹¹ Instantaneous Power Theory
- ¹² Synchronous Reference Frame
- ¹³ Trigonometric Orthogonal Principle
- ¹⁴ phase-locked loop
- ¹⁵ Direct power control
- ¹⁶ Total harmonic distortion
- ¹⁷ Clarke transformation
- ¹⁸ Self-Tuned Filter (STF)
- ¹⁹ Positive sequence detector (PSD)
- ²⁰ proportional–integral–derivative
- ²¹ Bode

