

Improving the Performance of Shunt Active Power Filter by Offering a Solution Based on Time-Domain Integral Filters under Non-ideal Voltage Conditions in Weak Grid

Seyyed Farzad Sajadi,¹ Mohammad Pichan^{2*}

¹ Department of Electrical Engineering, Faculty of Electrical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran, Sajadi.farzad2@gmail.com

² Department of Electrical Engineering, Faculty of Electrical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran, m.pichan@arakut.ac.ir

Keywords:

Shunt Active Power Filters (SAPF),
Positive sequence detector (PSD),
phase locked loop.

Abstract: The proper and accurate performance of a shunt active power filter depends on the accurate extraction of current harmonics generated by the load. Also, this process requires very good synchronization with network changes. In this paper, a solution for extracting load current harmonics, based on the time-domain-based method, is offered to generate the reference current of a shunt active power filter. This method shows good performance in all grid voltage conditions such as symmetric, symmetric and harmonic, asymmetric, and asymmetric and harmonic. At the same time, the proposed method has very high dynamics and flexibility and low computational load. The performance of the proposed method under grid voltage conditions (symmetric, symmetric and harmonic, asymmetric, and asymmetric and harmonic) was investigated in the Matlab/Simulink environment. To verify the simulation results, several experimental tests were conducted on an active filter built in a laboratory environment, and the results obtained proved the feasibility of using the proposed method industrially with a very good performance. Finally, according to the results obtained in steady-state conditions with optimal dynamic response, the total harmonic distortion of the grid current was significantly reduced from 25.02% to 3.63% for the symmetrical grid, from 24.38% to 4.94% for the symmetrical grid with harmonics, and from 24.53% to 4.77% for the asymmetrical grid with harmonics. These results confirm the optimal and standard performance of the proposed method.

Original Research Article

Paper History:

Received: 15/02/2025

Revise: 26/08/2025

Accepted: 13/10/2025

How to cite this article: Sajadi, F., Pichan, M., "Improving the performance of shunt active power filter by providing a solution based on time-domain integral filters under non-ideal voltage conditions in weak grid", Energy Engineering and Management, Vol. 15, No. 1, PP. 50-69, 2025. <https://doi.org/10.22052/EEM.2025.256369.1103>

© 2023 University of Kashan Press.

This is an open access article under the CC BY license. (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Extended Abstract

Introduction

The penetration of power electronic converters and renewable energy systems is increasing in recent years. The use of these devices results in harmonic injection into the grid. To compensate for the harmonics produced by the load, two types of passive and active filters can be used in general. Passive filters consist of inductors, capacitors, and resistors, mainly used to compensate for single harmonics, the use of which can pose a risk of resonance with the grid frequency. Depending on how these types of filters are placed, they may affect the impedance seen from the grid side. Active filters are introduced in contrast to passive filters. The passive type of these filters have received a lot of attention recently with advantages such as the compensation for a wide range of harmonics produced by the load and also the ability to controllably reduce reactive power from the grid's perspective, and an increase in power quality. Given that harmonic current injection is common in most loads, the use of shunt active power filters is more common than other active power filters such as the series or hybrid ones. The shunt active power filter injects harmonic currents into its common connection point with the grid, these signals are equal in magnitude to the harmonic signals generated by the load, but in opposite phase to them. Obviously, this process causes the harmonics generated by the load to be compensated from the grid perspective. The proper and accurate performance of a shunt active power filter depends on the accurate extraction of current harmonics produced by the nonlinear load, which requires very good synchronization with changes in the grid voltage. Reference current extraction algorithms are categorized into two domains: time and frequency. Among these, time-domain methods have been used more in the industry due to their accuracy, speed, and lower computational burden. To date, many studies have been conducted in the field of extracting load

current harmonics and generating reference current.

Materials and Methods

However, challenges and problems--such as the inability to use these methods under different grid voltage conditions (asymmetric, harmonic, or asymmetric and harmonic), high calculations, the need for complex mathematical transformations, or the need for a complex positive sequence detector structure of the main component--are evident in the studies conducted. Each of these cases can lead to the lack of accurate extraction of current harmonics and ultimately to the inappropriate performance of the active filter. In this paper, a new solution for extracting load current harmonics in the time domain, based on second-order filters, was presented, which showed a good performance in all grid voltage conditions (symmetric, asymmetric, harmonic, and harmonic and asymmetric simultaneously) and at the same time offered the benefits of easy implementation, high dynamics, reliability, appropriate computational load, while eliminating the need for a powerful and expensive processor.

Results

The proper performance of the proposed solution for extracting load current harmonics, for generating compensation current to keep the dc-link voltage constant, for synchronizing of the generated signals properly, and finally generating appropriate reference current was evident with a simple method, low computational load, high dynamics, and the ability to operate under all grid voltage conditions. The performance of the proposed method under different grid voltage conditions (symmetric, symmetric and harmonic, asymmetric, and asymmetric and harmonic) was investigated in the Matlab/Simulink environment; finally, to verify the simulation results, the experimental results obtained in the laboratory environment were presented. Based on the obtained results, the proper

performance of the proposed solution was evident.

Discussion and Conclusion

In this paper, a new algorithm was presented for controlling a time-domain shunt active power filter under different network voltage conditions (symmetric, harmonic, asymmetric, asymmetric, and harmonic), using a positive sequence current principal component extractor based on a second-order filter. In this method, since the extraction process was initiated using only the α - β -0 transform, the reduction in the number of filters was required; also, the computational burden was evident. In addition, the positive sequence voltage principal component was used in a similar way to synchronize and generate the compensation current to keep the DC-link voltage constant. The effective capability of harmonic compensation of the load current, despite the unbalanced and harmonic nature of the grid voltages, could be considered the main advantage of the proposed scheme. The performance of the proposed control algorithm was verified through simulation and experimental studies under different operating conditions. This method can be used in industrial applications due to its low computation, good flexibility, reliability, and the ease of implementation and use in all grid voltage anomalies.

بهبود عملکرد فیلتر فعال موازی با ارائه راهکاری مبتنی بر فیلتر انتگرالی در حوزه زمان تحت شرایط ولتاژ غیر ایدئال در شبکه‌های ضعیف

سید فرزاد سجادی^۱، محمد پیچان^{*۲}

^۱ کارشناسی ارشد گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران، Sajadi.farzad2@gmail.com

^۲ استادیار گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران، m.pichan@arakut.ac.ir

واژه‌های کلیدی:

فیلتر توان فعال موازی،
آشکارساز توالی مثبت،
حلقه قفل‌شونده فاز.

چکیده: عملکرد مناسب و دقیق یک فیلتر فعال موازی وابسته به استخراج دقیق هارمونیک‌های جریانی تولیدشده توسط بار غیرخطی است که این فرایند نیازمند همگام‌سازی بسیار خوب با تغییرات ولتاژ شبکه نیز می‌باشد. در این مقاله راهکاری برای استخراج هارمونیک‌های جریان بار مبتنی بر حوزه زمان برای تولید جریان مرجع فیلتر فعال موازی ارائه می‌گردد، که در تمام حالات ولتاژ شبکه مانند (متقارن، متقارن و هارمونیک، نامتقارن و نامتقارن و هارمونیک) عملکرد مناسبی را از خود نشان می‌دهد. در عین حال روش پیشنهادی دارای دینامیک و انعطاف‌پذیری بسیار بالا و همچنین بار محاسباتی کم است. عملکرد روش پیشنهادی تحت حالات مختلف ولتاژ شبکه (متقارن، متقارن و هارمونیک، نامتقارن و نامتقارن و هارمونیک) در محیط Matlab/Simulink مورد بررسی قرار گرفته است، همچنین برای صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی، آزمایش‌های تجربی متعددی بر روی یک فیلتر فعال ساخته‌شده در محیط آزمایشگاهی صورت گرفته و نتایج حاصل‌شده، گواه بر امکان بهره‌برداری از روش پیشنهادی به‌صورت صنعتی با عملکرد بسیار مناسب است. در نهایت، براساس نتایج به‌دست‌آمده در شرایط حالت پایدار با پاسخ دینامیکی مطلوب، اعوجاج هارمونیک کل جریان شبکه، به‌طور قابل توجهی از ۲۵/۰۲٪ به ۳/۶۳٪ برای شبکه متقارن، از ۲۴/۳۸٪ به ۴/۹۴٪ برای شبکه متقارن دارای هارمونیک و از ۲۴/۵۳٪ به ۴/۷۷٪ برای شبکه نامتقارن دارای هارمونیک کاهش یافته است. این نتایج، عملکرد بهینه و استاندارد روش پیشنهادی را تأیید می‌کند.

مقاله علمی پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۲۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۲۱

۱. مقدمه

نفوذ مبدل‌های الکترونیک قدرت و سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر، در دنیای امروز به‌صورت فزاینده‌ای در حال گسترش است. استفاده از این ادوات باعث تزریق هارمونیک به شبکه می‌گردد. این امر سبب مشکلات بسیاری مانند تحت‌تأثیر قرار دادن بارهای مجاور، کاهش راندمان، بالا رفتن تلفات و کاهش ظرفیت توانی خطوط انتقال می‌گردد [۱ و ۲].

برای جبران‌سازی هارمونیک‌های تولیدشده توسط بار به‌طور کلی می‌توان از دو نوع فیلتر پسیو^۱ یا اکتیو^۲ استفاده کرد. فیلترهای پسیو از سلف، خازن و مقاومت تشکیل شده‌اند و اصولاً برای جبران‌سازی یک هارمونیک مورد استفاده قرار می‌گیرند. ازسوی دیگر، استفاده از این نوع فیلترها می‌تواند خطر رزونانس با فرکانس شبکه را به همراه داشته باشد. همچنین با توجه به نحوه قرارگیری، این نوع فیلترها می‌توانند امیدانس دیده‌شده از سمت شبکه را تحت‌تأثیر خود قرار دهند [۳ و ۴]. در مقابل فیلترهای پسیو، فیلترهای فعال معرفی می‌شوند. این نوع از فیلترها با مزایایی همچون جبران‌سازی طیف وسیعی از هارمونیک‌های تولیدشده توسط بار و همچنین قابلیت کاهش کنترل‌شده توان راکتیو از دید شبکه و درنهایت افزایش کیفیت توان امروزه بسیار مورد توجه واقع شده‌اند [۵ و ۶].

با توجه به اینکه در بیشتر بارهای مورد استفاده، تزریق هارمونیک جریان متداول است، استفاده از فیلترهای فعال موازی^۳ رایج‌تر از سایر فیلترهای فعال مانند فیلتر فعال سری^۴ یا هیبریدی^۵ است [۷].

فیلتر فعال موازی جریان‌های هارمونیکی را به نقطه اتصال مشترک^۶ خود با شبکه تزریق می‌کند. بدیهی است که این فرایند باعث می‌شود که از دید شبکه هارمونیک‌های تولیدشده توسط بار جبران شوند [۸].

تولید جریان مرجع مهم‌ترین بخش برای عملکرد صحیح فیلتر فعال موازی است. این فرایند شامل دو بخش اصلی یعنی استخراج هارمونیک جریان تولیدشده توسط بار و همچنین تولید جریان جبران‌سازی برای ثابت نگه داشتن ولتاژ لینک^۷ dc است. در این میان استخراج هارمونیک‌های جریان بار از اهمیت بیشتری برخوردارند [۹ و ۱۰]. ازاین‌رو جریان‌های هارمونیکی تولیدشده توسط بار باید به‌طور

دقیق از نظر اندازه و فاز استخراج شوند. بنابراین، یک فیلتر فعال موازی باید در هماهنگی کامل با ولتاژ نقطه اتصال خود (برای همگام‌سازی^۸) عمل کند. توجه به این نکته حائز اهمیت است که فرایندهای توضیح داده‌شده کاملاً مستقل از ساختار اینورتر از لحاظ تعداد سطوح است [۱۱ و ۱۲]. روش‌های استخراج جریان‌های هارمونیکی را می‌توان به روش‌های حوزه فرکانس^۹ و حوزه زمان^{۱۰} تقسیم‌بندی کرد [۱۳]. روش‌های حوزه زمان در مقایسه با روش‌های حوزه فرکانس، بسیار سریع‌تر، دقیق‌تر، با بارمحاسباتی و استفاده از حافظه کمتر، جهت پیاده‌سازی می‌باشند. ازاین‌رو روش‌های حوزه زمان در صنعت بیشتر از سایر روش‌ها مورد توجه واقع شده‌اند [۱۴]. روش‌هایی مانند تئوری توان لحظه‌ای^{۱۱} [۱۵] و نظریه قاب مرجع سنکرون^{۱۲} [۱۶] در شرایط غیر ایدئال ولتاژ شبکه، عملکرد خوبی از خود نشان نمی‌دهند [۱۷ و ۱۸]. ازسوی دیگر این روش‌ها نیازمند به چندین تبدیل قاب، محاسبات توان‌های لحظه‌ای هستند. همچنین، اثربخشی و پاسخ دینامیکی سیستم، وابسته به عملکرد صحیح فیلتر پایین‌گذر استفاده‌شده در این‌گونه ساختارهاست [۱۹ و ۲۰]. در مرجع [۲۱] از اصل مثلث متعامد^{۱۳} استفاده شده‌است؛ این روش عملکرد مناسبی در حالتی که ولتاژ شبکه مخدوش باشد، از خود نشان نمی‌دهد.

جبران هارمونیک بار تحت شرایط بار متغیر براساس روش‌های بهینه‌سازی برای شرایط نامتعادل در مرجع [۲۲] آورده شده است. در این روش استخراج هارمونیک با استفاده از فیلترهای پایین‌گذر^{۱۴} معمولی صورت می‌گیرد.

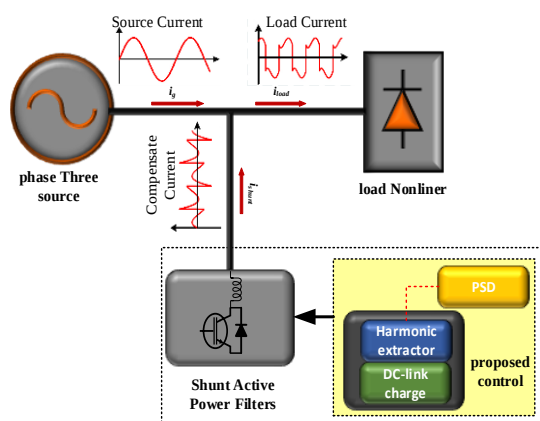
روش‌های دیگری مانند حذف نویز تطبیقی^{۱۵} [۲۳]، کنترل فازی^{۱۶} [۲۴]، نیز مطرح شده‌اند؛ اما این روش‌ها به‌دلیل پیچیدگی پیاده‌سازی در حال حاضر به‌صورت روش‌های صنعتی مورد استفاده قرار نمی‌گیرند.

به‌تازگی، پژوهش‌هایی برای بهبود عملکرد روش‌های استخراج هارمونیک جریان، مبتنی بر زمان در شرایط ولتاژ ناهنجار و نامتعادل با استفاده از پیش‌فیلترها گسترش یافته است. برای استخراج هارمونیک‌های جریان با استفاده از روش‌های مختلف پیش‌فیلتر به

8. Synchronization
9. Frequency Domain
10. Time Domain Methods
11. Instantaneous Power Theory
12. Synchronous Reference Frame (SRF)
13. Trigonometric Orthogonal Principle
14. Low Pass Filter
15. Adaptive Noise Cancellation
16. Fuzzy Logic Methods

1. Passive Filter
2. Active Filter
3. Shunt Active Power Filters
4. Series Active Power Filter
5. Hybrid Active Power Filter
6. Point of Common Coupling
7. DC Link

مقاله، راهکاری جدید برای استخراج هارمونیک جریان بار در حوزه زمان مبتنی بر فیلترهای مرتبه دوم^۲ (SOF) ارائه می‌گردد که در تمام وضعیت‌های ولتاژ شبکه (متقارن، نامتقارن، هارمونیک، هارمونیک و نامتقارن به صورت همزمان) عملکرد مناسبی از خود نشان می‌دهد و همزمان از سادگی اجرا، قابل اعتماد بودن، بار محاسباتی مناسب، عدم نیاز به پردازنده قوی و گران قیمت برخوردار است. روند ارائه مقاله بدین صورت است که در بخش ۲ ساختمان فیلتر فعال موازی (SAFF) آورده شده است، و سپس در بخش ۳ روش پیشنهادی به تفصیل به همراه روابط ریاضی حاکم، اثبات‌ها و بلوک دیاگرام ارائه می‌گردد و در نهایت در بخش ۴ نتایج شبیه‌سازی روش پیشنهادی در محیط Matlab-Simulink و همچنین نتایج بررسی‌های تجربی انجام شده در محیط آزمایشگاهی ارائه می‌شود.



شکل (۱): فیلتر فعال موازی

۲. ساختمان فیلتر فعال موازی

نمای کلی یک فیلتر فعال موازی سه فاز در شکل (۱) نمایش داده شده است. این فیلتر مانند یک منبع جریان کنترل‌شونده با ولتاژ عمل می‌کند. با توجه به اینکه خروجی فیلتر فعال موازی جریانی است که از نظر اندازه برابر ولی در فاز مخالف با هارمونیک جریان تولیدی توسط بار است، با تزریق آن به نقطه اتصال مشترک (PCC)، باعث می‌شود هارمونیک‌های جریان از دید شبکه جبران و اعوجاج هارمونیک کل^۴ (THD) در محدوده قابل قبول باشد.

۳. الگوریتم کنترل پیشنهادی

الگوریتم کنترلی پیشنهادی برای استخراج جریان مرجع در شکل (۲) نشان داده شده است.

روش‌هایی مانند استفاده از شبکه‌های عصبی^۱ (ANNs) [۲۵ و ۲۶] و فیلترهای خودتنظیم^۲ (STF) [۲۷] می‌توان اشاره کرد. گرچه هر دو روش می‌توانند عملکرد خوبی ارائه دهند، روش‌های مبتنی بر پیش فیلتر خودتنظیم در مقایسه با روش‌های ANN بسیار ساده‌ترند. در مرجع [۲۷]، روش مبتنی بر فیلترهای خودتنظیم را فقط می‌توان برای سیستم‌های سه‌فازی به کار برد. همچنین این‌گونه روش‌ها ساختار نسبتاً پیچیده‌ای را به همراه دارند.

در مرجع [۲۸] فیلترهای برداری تطبیقی چندگانه^۳ (AVF) برای استخراج هارمونیک با استفاده از یک حلقه قفل‌شونده فرکانس^۴ (FLL)، پیشنهاد شده است. حلقه‌های قفل‌شونده فاز^۵ (PLL) و حلقه حلقه قفل‌شونده فرکانس (FLL) به‌طور کلی برای استخراج فرکانس سیستم و برای تطبیق فرکانس و همگام‌سازی فرایند استخراج به کار برده می‌شوند.

نسخه جدیدی از حلقه‌های قفل‌شونده فاز، مبتنی بر قاب مرجع همزمان دوگانه گسسته^۶ (DDSRF-PLL) در مرجع [۲۹] و برای کارایی سیستم تحت شرایط نامتعادل بودن ولتاژ شبکه پیشنهاد شده است. PLL اصلاح‌شده دیگری با تئوری d-q در مرجع [۳۰] برای فیلترهای فعال موازی هیبریدی تحت شرایط ولتاژ نامتعادل استفاده شده است. PLL مبتنی بر چارچوب قاب مرجع ساکن در مرجع [۳۱] و PLL مبتنی بر شبکه‌های عصبی در مرجع [۳۲] پیشنهاد شده است که فقط برای شرایط متعادل ولتاژ شبکه مفیدند. این نکته حائز اهمیت است که FLLها و PLLها در شرایطی که ولتاژ شبکه ایدئال باشد، عملکرد مناسبی از خود نشان می‌دهند و کارکرد مناسب آن‌ها در زمانی که ولتاژ شبکه مخدوش می‌شود، نیازمند پیش‌فیلترهای متعدد است. هرچند استفاده از پیش‌فیلترهای متعدد ممکن است عملکردهای حالت پایدار و گذرا PLL/FLLها را افزایش دهد، منجر به افزایش بار محاسباتی و لختی سیستم خواهد شد.

مشکلاتی مانند عدم امکان استفاده تحت شرایط ولتاژ شبکه نامتقارن، هارمونیک و یا نامتقارن و هارمونیک، محاسبات زیاد، نیاز به تبدیل‌های پیچیده ریاضی و یا نیاز به ساختار آشکارساز توالی مثبت مؤلفه اصلی پیچیده در مطالعات انجام‌شده مشهود است. هریک از این موارد، می‌تواند عدم استخراج دقیق هارمونیک جریان و در نهایت عملکرد نامناسب فیلتر فعال را به همراه داشته باشد. در این

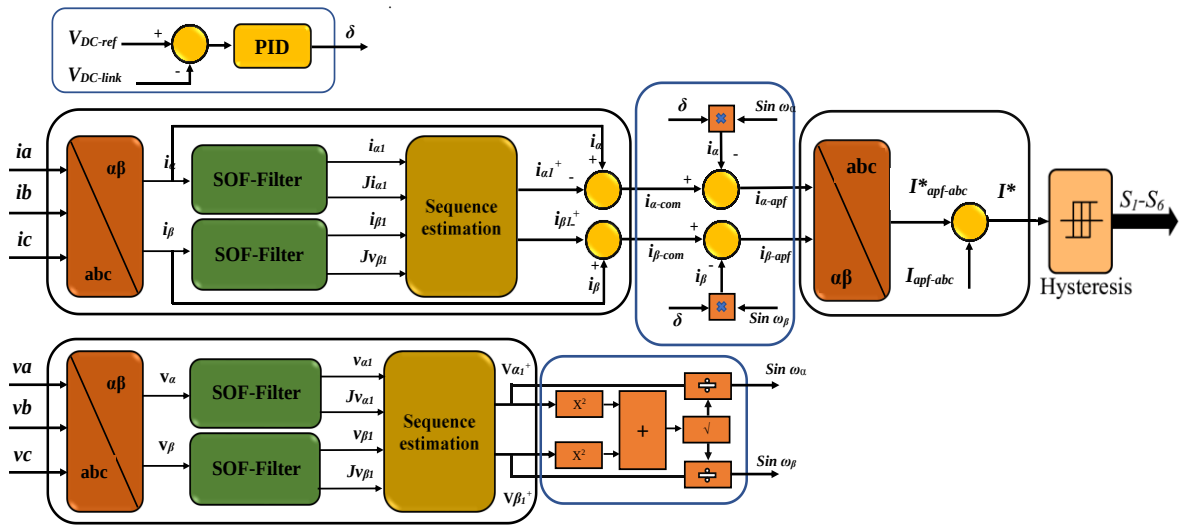
1. Artificial Neural Networks
2. Self-Tuning Filter (STF)
3. Multiple Adaptive Vectorial Filters
4. Frequency-Locked Loop
5. Phase Locked Loop
6. Discrete Dual Synchronous Reference Frame-Phase Locked Loop

7. Second-Order Filters
8. Total Harmonic Distortion

ساختار پیشنهادی را می توان به دو بخش کلی تفکیک کرد:

الف) الگوریتم پیشنهادی برای استخراج توالی مثبت مؤلفه اصلی

ولتاژ جهت همگام سازی؛



شکل (۲): الگوریتم ساختار پیشنهادی

همان طور که در شکل (۳) نشان داده شده است، در ابتدا مؤلفه

اصلی ولتاژ توسط یک فیلتر SOF استخراج می شود. تمام محاسبات در قاب $\alpha\beta$ انجام می شود که در آن ولتاژهای سه فاز اندازه گیری شده با استفاده از تبدیل کلارک^۱ از قاب مرجع abc، به قاب ایستا $\alpha\beta$ منتقل می شوند؛ همان طور که در رابطه (۱) نمایش داده شده است:

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

θ یک زاویه دلخواه است و در اینجا به صورت $\theta = 0$ در نظر گرفته می شود.

رابطه (۲) بیانگر ماتریس ولتاژهای شبکه، در قاب $\alpha\beta$ است.

$$(v_{\alpha} \ v_{\beta})^T = T_{\alpha\beta}(v_{gabc}) \quad (2)$$

ولتاژ شبکه دارای هارمونیک را در قاب $\alpha\beta$ می توان به صورت رابطه (۳) نمایش داد. همان طور که مشاهده می شود، ولتاژ شبکه از دو بخش، یعنی مؤلفه اصلی ولتاژ شبکه $v_{g(f)}$ ، و مؤلفه هارمونیک ولتاژ شبکه $v_{g(h)}$ تشکیل می شود.

$$\begin{bmatrix} v_{g\alpha} \\ v_{g\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{g\alpha(f)} + v_{g\alpha(h)} \\ v_{g\beta(f)} + v_{g\beta(h)} \end{bmatrix} \quad (3)$$

برای استخراج مؤلفه اصلی، ولتاژ شبکه از فیلترهای انتگرالی مرتبه دوم (SOF) عبور داده می شوند. همان طور که در شکل (۳) مشخص است، متناسب با فرکانس زاویه ای که فیلتر بر روی آن تنظیم

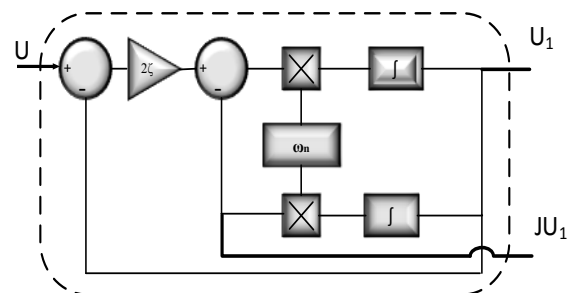
۱.۳. استخراج توالی مثبت مؤلفه اصلی ولتاژ

از آنجاکه ولتاژ شبکه نیز در اکثر مواقع اعوجاج دارد، باید الگوریتم کنترلی اتخاذ شود که استخراج هارمونیک های جریان بار تحت تأثیر اعوجاج ولتاژ شبکه واقع نشوند. به منظور دستیابی به عملکردی مستقل از اعوجاج ولتاژ شبکه و دستیابی به جبران سازی مطلوب هارمونیک جریان بار، در الگوریتم پیشنهادی از اجزای توالی مثبت مؤلفه اصلی ولتاژ استفاده می شود. فرایند استخراج توالی مثبت مؤلفه اصلی ولتاژ را می توان به دو بخش تقسیم کرد:

الف) بلوک استخراج مؤلفه اصلی ولتاژ مبتنی بر فیلتر SOF؛

ب) بلوک استخراج توالی مثبت.

۱.۱.۳. بلوک استخراج مؤلفه اصلی ولتاژ



شکل (۳): بلوک استخراج کننده مؤلفه اصلی ولتاژ با استفاده از پیش فیلتر

SOF

SOF را بدهیم، در خروجی توالی مثبت مؤلفه اصلی را خواهیم داشت. به این ترتیب روابط (۸) و (۹) به دست می‌آید:

$$v_{\alpha(f)}^+ = \frac{1}{2} [v_{\alpha(f)} - Jv_{\beta(f)}] \quad (۸)$$

$$v_{\beta(f)}^+ = \frac{1}{2} [Jv_{\alpha(f)} + v_{\beta(f)}] \quad (۹)$$

واضح است که برای تخمین توالی مثبت، مؤلفه اصلی ولتاژ یعنی $v_{\alpha l}$ و $v_{\beta l}$ ، به همراه مؤلفه‌های تغییر فاز یافته آن‌ها با تأخیر ۹۰ درجه، یعنی $Jv_{\beta l}$ و $Jv_{\alpha l}$ مورد نیازند. هر دوی این مؤلفه‌ها در خروجی‌های فیلتر مرتبه دوم پیشنهادی ($SOF-v_{\beta}$ و $SOF-v_{\alpha}$) در دسترس هستند. همچنین مشخص است که می‌توان مؤلفه‌های هارمونیک مرتبه h بردار جریان و یا ولتاژ را استخراج کرد. این امر برای استخراج هارمونیک انتخابی بسیار مفید است.

همان‌طور که در بالا مشاهده می‌شود، استخراج مؤلفه اصلی ولتاژ بدون نیاز به هیچ‌گونه PLL یا FLL صورت گرفته است، که این امر باعث دقت و پویایی بالاتر مدار و همچنین باعث برطرف کردن مشکلات ذاتی این گونه مدارات می‌گردد. در عین حال، مداری ساده برای استخراج توالی مثبت استفاده شده است که به کارگیری این دو ساختار، نیاز به استفاده از مدارات پیچیده آشکارساز توالی مثبت را از بین برده است.

۲.۳. تولید جریان‌های مرجع

جریان‌های مرجع در فیلتر فعال موازی خود از دو بخش تشکیل می‌گردد: ۱. سیگنال‌های جریان‌های جبرانی؛ ۲. سیگنال‌هایی برای ثابت نگه داشتن ولتاژ لینک DC.

۱.۲.۳. سیگنال‌های جریان‌های جبرانی استخراج شده

جریان‌های جبرانی تولیدشده توسط فیلتر فعال موازی، باید متناسب با جریان‌های هارمونیک تولیدشده توسط بار باشند. از این رو ابتدا جریان‌های به دست آمده از بار، به فیلتر SOF وارد می‌شوند. در خروجی فیلتر، مؤلفه اصلی جریان بار استخراج می‌گردد، سپس این مؤلفه به استخراج‌کننده توالی مثبت اعمال شده و در خروجی آن توالی مثبت مؤلفه اصلی جریان بار در قاب $\alpha-\beta$ به دست می‌آید. از آنجاکه جریان‌های مرجع از روشی مشابه استخراج توالی مثبت مؤلفه اصلی ولتاژ به دست می‌آید، از تکرار روابط در این قسمت صرف نظر شده است.

۲.۲.۳. ثابت نگه داشتن ولتاژ لینک DC

فیلتر فعال موازی نیازی به منبع تولیدکننده توان اکتیو ندارد و صرفاً می‌توان از یک عنصر ذخیره‌ساز انرژی مانند خازن برای تبادل بخش

می‌شود، مؤلفه مورد نظر از سیگنال ورودی استخراج می‌گردد. علاوه بر مؤلفه اصلی، یک سیگنال دیگر در خروجی فیلتر وجود دارد که این سیگنال از نظر اندازه برابر سیگنال مؤلفه اصلی، ولی ۹۰ درجه عقب‌تر از آن است. در اینجا سرعت زاویه‌ای مورد نظر (ω_n) بر روی فرکانس مؤلفه اصلی تنظیم می‌شود.

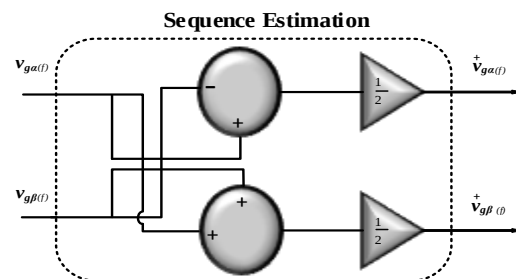
در ساختار فیلتر ضربی با عنوان ζ مشاهده می‌شود. این متغیر ضرب میرایی فیلتر را مشخص می‌کند و در واقع ضربی برای تعیین پهنای باند است. برای عملکرد دینامیکی بهینه، ζ بهتر است بر روی ۰.۷۰۷ تنظیم شود.

تابع انتقال فیلتر انتگرالی مرتبه دوم SOF، به صورت روابط (۴) و (۵) به دست می‌آید:

$$T(s) = \frac{u_1}{u}(s) = \frac{2\zeta\omega_n s}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (۴)$$

$$T(s) = \frac{ju_1}{u}(s) = \frac{2\zeta\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (۵)$$

۲.۱.۳. بلوک استخراج توالی مثبت (PSD)



شکل (۴): بلوک استخراج‌کننده توالی مثبت

حال که مؤلفه اصلی ولتاژ در حوزه $\alpha-\beta$ به دست آمده است، به وسیله بلوک دیاگرام نمایش داده شده در شکل (۴)، اقدام به استخراج اجزای توالی مثبت مؤلفه اصلی می‌کنیم. این روش از نظریه اجزای متقارن لحظه‌ای برای استخراج توالی مثبت بهره می‌برد. رابطه بین ولتاژ شبکه و اجزای توالی مثبت آن به صورت زیر است:

$$v_{\alpha}^+ = \frac{1}{2} [v_{\alpha} - Jv_{\beta}] \quad (۶)$$

$$v_{\beta}^+ = \frac{1}{2} [Jv_{\alpha} + v_{\beta}] \quad (۷)$$

عملگر J برای ایجاد تغییر فاز است ($J = e^{-j(\frac{\pi}{2})}$) به گونه‌ای که ۹۰ درجه تأخیر را در خروجی نسبت به ورودی ایجاد می‌کند. حال اگر به ورودی این مدار، مؤلفه اصلی ولتاژ استخراج شده توسط

تجربی حاصل شده از نمونه صنعتی ساخته شده، در ادامه ارائه می گردد. همچنین روش پیشنهادی برای جبران هارمونیک جریان و بهبود کیفیت توان، بررسی شده است. برای تولید هارمونیک جریان از یک پل دیودی سه فاز به همراه یک بار مقاومتی در سمت DC آن، به عنوان بار غیرخطی استفاده شده است. پارامترهای سیستم در جدول (۱) آمده است.

جدول (۱): پارامترهای SAPF			
واحد	مقدار	پارامتر	
V	۳۸۰	ولتاژ شبکه	شبکه
Hz	۵۰	فرکانس مؤلفه اصلی	AC
KHz	۱۰	فرکانس سوئیچینگ	
V	۷۵۰	ولتاژ لینک dc	
mH	۳/۷	سلف خروجی اینورتر	SAPF
Ω	۲۰	مقاومت بار	
-	۲	(ضریب تناسبی کنترلر لینک dc) k_p	
-	۱۰	(ضریب انتگرالی کنترلر لینک dc) k_i	

۱.۴. نتایج شبیه سازی

۱.۱.۴. عملکرد استخراج کننده دنباله مثبت مؤلفه اصلی

با توجه به توضیحات بخش قبل، این بلوک از دو قسمت یعنی استخراج کننده مؤلفه اصلی با استفاده از فیلترهای SOF و همچنین یک مدار به عنوان استخراج کننده توالی مثبت تشکیل شده است.

عملکرد مناسب فیلتر SOF به انتخاب صحیح ضریب میرایی (۶) وابسته است. برای درک بهتر نحوه انتخاب این ضریب دیگرام بود^۲ فیلتر SOF در شکل (۵) به ازای مقادیر مختلف γ آورده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده انتخاب مقدار 0.707γ برای γ مصالحه خوبی بین انتخاب پذیری و پاسخ دینامیکی فیلتر را به همراه دارد.

شکل (۶-۱) عملکرد استخراج کننده توالی مثبت مؤلفه اصلی ولتاژ پیشنهادی را در حالتی که ولتاژ شبکه متقارن و هارمونیک باشد، و شکل (۶-۲) عملکرد استخراج کننده توالی مثبت مؤلفه اصلی ولتاژ پیشنهادی را در حالتی که ولتاژ شبکه نامتقارن و هارمونیک باشد، نشان می دهد. همچنین در جدول (۲) مقدار THD ولتاژ خروجی PSD پیشنهادی نسبت به THD ولتاژ شبکه تحت شرایط غیر ایدئال آورده شده است. شایان ذکر است عملکرد مناسب و دقیق این بخش تضمین کننده عملکرد مناسب فیلتر، برای تولید سیگنال های جبران ساز برای ثابت نگه داشتن ولتاژ لینک DC است. از شکل (۶) و همچنین جدول (۲) می توان به این نتیجه رسید که در تمام حالات ولتاژ شبکه

نوسانی توان استفاده کرد، اما باید توجه داشت که فیلتر فعال خود دارای تلفاتی است؛ لذا مقداری توان متوسط اکتیو از سمت شبکه دریافت می کند. از این رو برای ثابت نگه داشتن ولتاژ لینک dc، این تلفات توسط جریان مرجع تولیدی باید جبران شود.

برای ثابت نگه داشتن ولتاژ لینک dc، ولتاژ اندازه گیری شده از لینک dc با یک ولتاژ مرجع مورد مقایسه قرار می گیرد. سپس سیگنال خطای حاصل شده به یک کنترلر PI وارد می شود.

$$\delta = (k_p + \frac{ki}{s})(v_{ref} - v_{DC}) \quad (10)$$

در رابطه (۱۰)، k_p و k_i به ترتیب ضرایب تناسبی و انتگرالی کنترل کننده تناسبی-انتگرالی لینک dc هستند.

δ سیگنال خروجی کنترلر است که در الگوهای حاصل شده از $v_{\beta fun}^+$ و $v_{\alpha fun}^+$ ضرب می شود تا جریان های فعال مورد نیاز برای ثابت نگه داشتن ولتاژ لینک dc ساخته شود.

$$i_{\alpha-dc} = \delta \frac{v_{\alpha 1}^+}{\sqrt{(v_{\alpha 1}^+)^2 + (v_{\beta 1}^+)^2}} \quad (11)$$

$$i_{\beta-dc} = \delta \frac{v_{\beta 1}^+}{\sqrt{(v_{\alpha 1}^+)^2 + (v_{\beta 1}^+)^2}} \quad (12)$$

با استفاده از رابطه (۱۱) و (۱۲)، جریان های مرجع فیلتر فعال به صورت زیر محاسبه می شوند:

$$i_{\alpha-apf}^* = i_{\alpha-com} + i_{\alpha-dc} \quad (13)$$

$$i_{\beta-apf}^* = i_{\beta-com} + i_{\beta-dc} \quad (14)$$

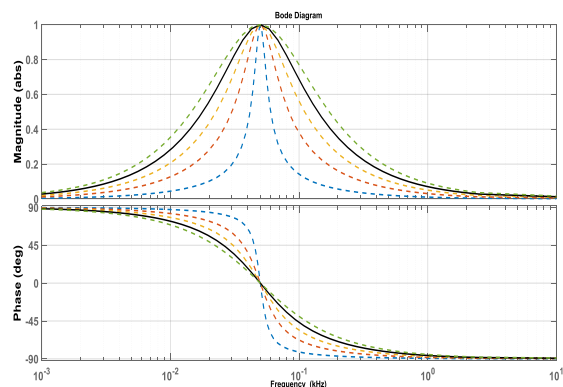
جریان های به دست آمده از رابطه (۱۳) و (۱۴) با استفاده از تبدیل معکوس کلارک به مختصات abc تبدیل می شوند و سپس با جریان های فیدبک خروجی فیلتر فعال، برای تخمین خطای جریان مقایسه می شوند.

$$\begin{aligned} i_a^* &= i_{apf-a}^* - i_{apf-a} \\ i_b^* &= i_{apf-b}^* - i_{apf-b} \\ i_c^* &= i_{apf-c}^* - i_{apf-c} \end{aligned} \quad (15)$$

در رابطه (۱۵)، i_{apf-x} جریان فیدبک خروجی فیلتر فعال است، i_x^* سیگنال های خطا می باشد. در نهایت این سیگنال برای تولید پالس های گیت به اینورتر با استفاده از کنترل کننده هیستریزس^۱ به کار می رود.

۴. نتایج مطالعات انجام شده

برای اعتبارسنجی روش پیشنهادی و بررسی اثربخشی آن علاوه بر آزمایش های شبیه سازی با استفاده از Matlab-Simulink، نتایج

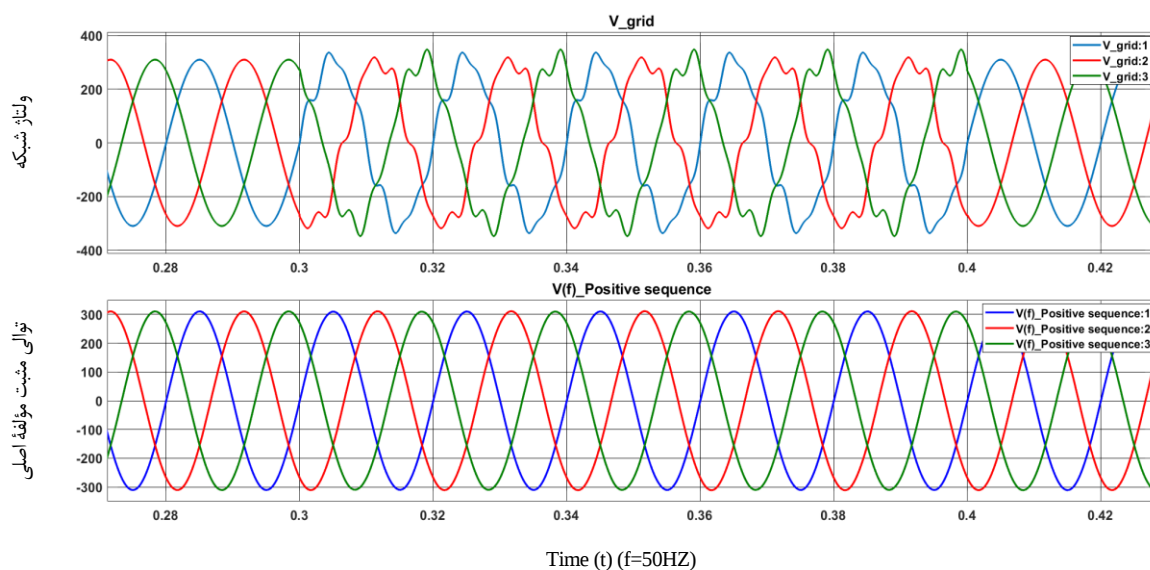


شکل (۵): دیاگرام Bode فیلتر SOF پیشنهادی برای مقادیر مختلف γ

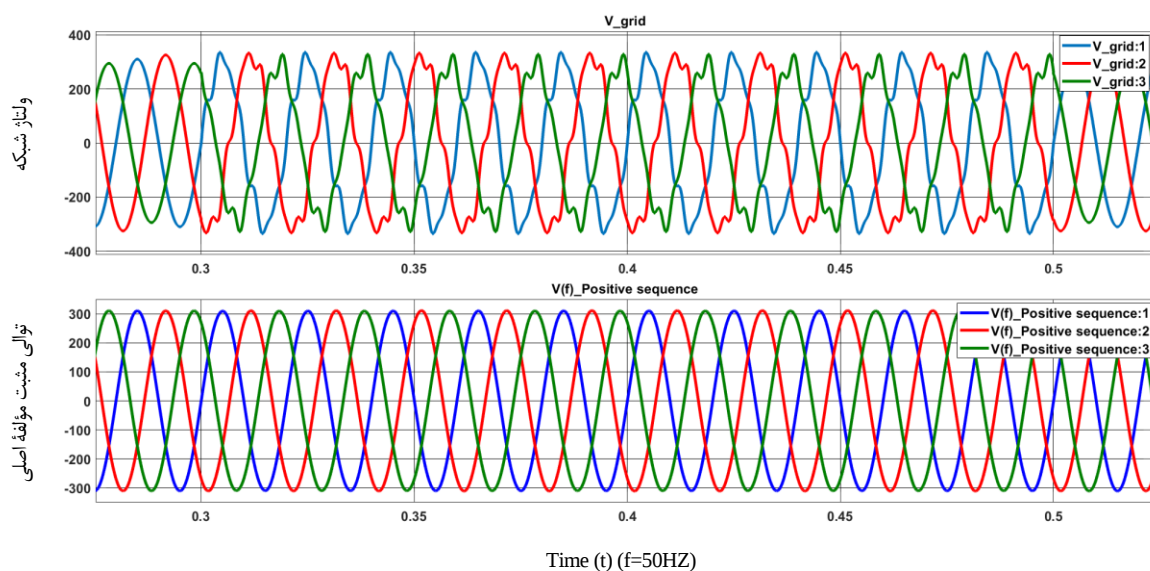
الگوریتم پیشنهادی، به‌خوبی توانایی استخراج توالی مثبت مؤلفه اصلی ولتاژ را دارا می‌باشد.

جدول (۲): THD ولتاژ خروجی PSD پیشنهادی

THD%		
شرایط ولتاژ شبکه	ولتاژ شبکه	خروجی PSD
متقارن - هارمونیک	۱۱/۱۳	۰/۳۷
نامتقارن - هارمونیک	۱۱/۰۸	۰/۳

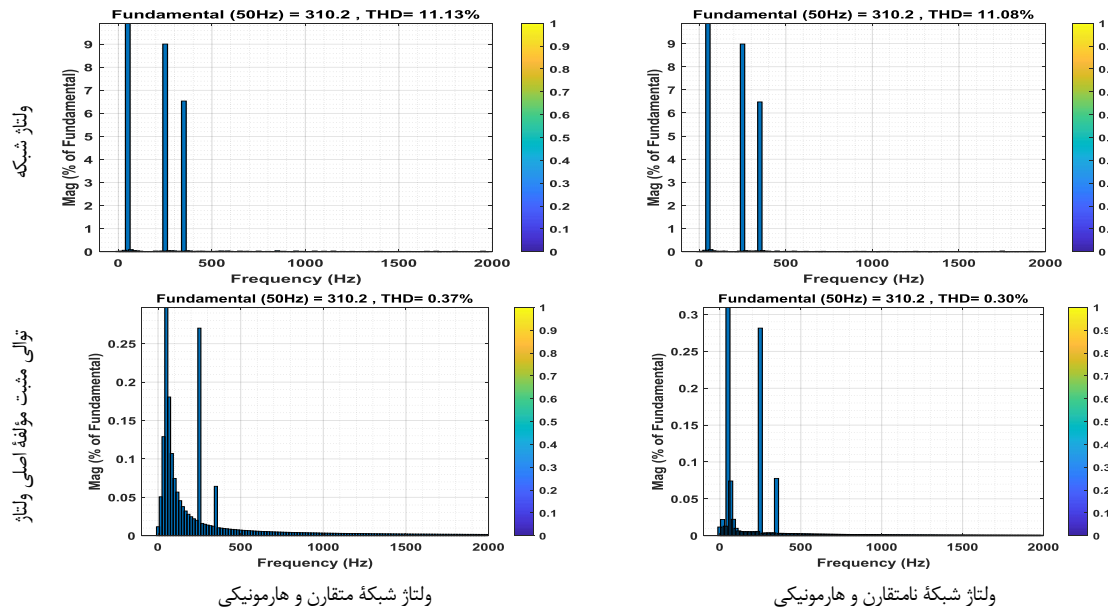


شکل (۱-۶): ولتاژ شبکه متقارن و هارمونیک: ۱. شکل موج ولتاژ شبکه: ۲. توالی مثبت مؤلفه اصلی ولتاژ استخراج شده



شکل (۲-۶): ولتاژ شبکه نامتقارن و هارمونیک: ۱. شکل موج ولتاژ شبکه: ۲. توالی مثبت مؤلفه اصلی ولتاژ استخراج شده

شکل (۶): عملکرد استخراج‌کننده توالی مثبت مؤلفه اصلی ولتاژ: ۱. ولتاژ شبکه متقارن و هارمونیک: ۲. ولتاژ شبکه نامتقارن و هارمونیک



شکل (۷): آنالیز فوری استخراج‌کننده توالی مثبت مؤلفه اصلی ولتاژ: ۱. ولتاژ شبکه متقارن و هارمونیک؛ ۲. ولتاژ شبکه نامتقارن و هارمونیک

۲.۱.۴. تحلیل در حالت پایدار سیستم

برای صحت‌سنجی و مشاهده عملکرد الگوریتم پیشنهادی در چهار سناریوی مختلف مورد بررسی قرار گرفته است:

- ولتاژ شبکه متعادل (THD = 0.00%)
- ولتاژ شبکه متعادل و هارمونیک (THD= 11.00%)
- ولتاژ شبکه نامتعادل (THD = 0.00%)
- ولتاژ شبکه نامتعادل و هارمونیک (THD = 11.00%)

سعی بر آن شده است که تمامی حالاتی که ممکن است برای ولتاژ شبکه حادث شود، بررسی گردیده و همچنین بر مبنای استاندارد IEEE 519-2022 [۳۲]، محدوده مجاز THD جریان شبکه در تمام حالات کوچک‌تر از ۵٪ باشد؛ بنابراین مبنا عملکرد صحیح الگوریتم پیشنهادی بر این اساس در نظر گرفته شده است.

در شکل (۸) نتایج شبیه‌سازی در شرایطی که ولتاژ شبکه نامتقارن و سپس دارای هارمونیک می‌گردد، آورده شده است. ابتدا ولتاژ شبکه کاملاً سینوسی و متقارن است، در زمان ۰/۳ ثانیه (همان‌طور که در شکل (۸) مشخص است) هارمونیک‌های پنجم و هفتم (که معمولاً هارمونیک‌های قالب در شرایط صنعتی نیز هستند) به ولتاژ شبکه اضافه می‌شوند، و در این حالت THD ولتاژ شبکه به ۱۱/۳٪ می‌رسد. تحت ولتاژ شبکه سینوسی و متقارن، مقدار THD جریان شبکه و بار به ترتیب ۲۵/۰۲٪ و ۳/۶۳٪ است. همان‌طور که در شکل (۸) مشخص است، در بازه ۰/۳ تا ۰/۴ ثانیه و در زمان هارمونیک شدن ولتاژ شبکه مقدار THD جریان شبکه و بار به ترتیب ۲۴/۳۸٪ و ۴/۹۴٪ می‌گردد، بررسی و تحلیل وضعیت هارمونیک جریان شبکه و

بار در شرایط متقارن و هارمونیک در شکل (۹) قابل مشاهده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار THD جریان شبکه در این حالات به مقداری کمتر از ۵٪ کاهش یافته و این نشان‌دهنده عملکرد مناسب فیلتر فعال پیاده‌سازی‌شده با روش پیشنهادی است. صحت‌سنجی روش پیشنهادی تحت شرایطی که ولتاژ شبکه نامتقارن یا نامتقارن و هارمونیک می‌باشد، در شکل (۱۰) قابل مشاهده است. در این سناریو فرض بر عدم تقارن در دامنه ولتاژ فازها در بازه ۵٪ می‌باشد. مقادیر دامنه هر فاز در رابطه (۱۶) آورده شده است:

$$\begin{aligned} v_{ga} &= 310 \sin(\omega t) \\ v_{gb} &= 325 \sin(\omega t - 120) \\ v_{gc} &= 295 \sin(\omega t + 120) \end{aligned} \quad (16)$$

تحت شرایطی که ولتاژ شبکه نامتقارن است، THD جریان شبکه و بار به ترتیب ۲۴/۵۳٪ و ۴/۱۷٪ می‌باشد. تحلیل هارمونیک تحت این شرایط در شکل (۱۱) آمده است. در بازه زمانی ۰/۳ تا ۰/۴ ثانیه همان‌طور که در شکل (۱۰) قابل مشاهده است، هارمونیک‌های پنجم و هفتم به ولتاژ شبکه تزریق می‌گردد. در این حالت که ولتاژ شبکه نامتقارن و هارمونیک است، THD ولتاژ شبکه به ۱۱/۰۸٪ می‌رسد. با توجه به اطلاعات نمایش داده‌شده در شکل (۱۱) میزان THD جریان شبکه و بار در این شرایط به ترتیب ۲۴/۴۱٪ و ۴/۷۷٪ می‌باشد و این گواه بر عملکرد مناسب فیلتر فعال پیاده‌سازی‌شده با ساختار کنترلی پیشنهادی در شرایط ولتاژ نامتقارن و نامتقارن و هارمونیک است.

است. در شکل (۱۴) سیگنال همگام‌سازی در صورت عدم استفاده از راهکار پیشنهادی، تحت شرایط ولتاژ شبکه نامتقارن و هارمونیکی مشاهده می‌گردد؛ در این حالت THD جریان سمت شبکه به $7/11\%$ افزایش یافته است. در شکل (۱۵) سیگنال همگام‌سازی در صورت عدم استفاده از راهکار پیشنهادی، تحت شرایط ولتاژ شبکه متقارن و هارمونیکی مشاهده می‌گردد؛ در این حالت THD جریان سمت شبکه به $6/85\%$ افزایش یافته است.

همان‌طور که مشخص است، در صورتی که از استخراج‌کننده توالی مثبت مؤلفه اصلی پیشنهادی استفاده نشود، در هنگامی که ولتاژ شبکه دچار تغییرات شده و از حالت ایدئال خارج می‌شود، سیگنال تولیدی دچار اغوجاج شده و در نتیجه جریان مرجع تولیدشده برای فیلتر تحت تأثیر آن قرار می‌گیرد و مشخص است جبران‌سازی هارمونیک‌های جریان بار به درستی انجام نشده است و جریان در سمت شبکه دارای THD% بالایی می‌گردد.

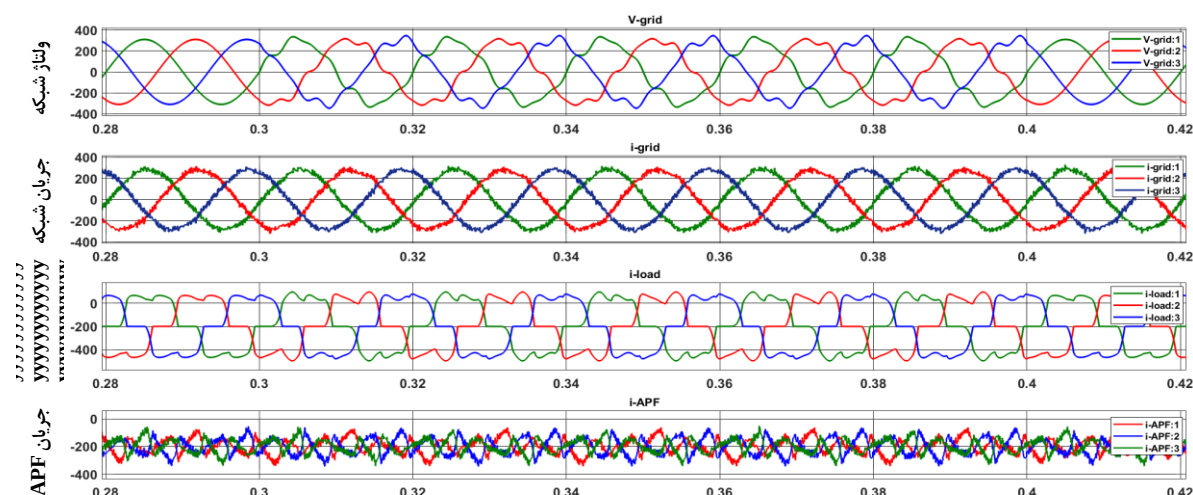
در شکل (۱۶) عملکرد استخراج‌کننده توالی مثبت مؤلفه اصلی ولتاژ پیشنهادی، در صورتی که ولتاژ ورودی به آن آلوده به نویز شود، آورده شده است. ابتدا ولتاژ اندازه‌گیری شده سینوسی کامل است، سپس در زمان $0/5$ ثانیه سیگنال‌های نویز به ورودی کنترلر اضافه می‌شود. با استناد به شکل (۱۷)، که آنالیز فوریه ولتاژ ورودی به کنترلر را نمایش می‌دهد، مشخص است که در این حالت استخراج‌کننده توالی مثبت مؤلفه اصلی ولتاژ، عملکرد مناسبی را از خود نشان می‌دهد. آنالیز جریان‌های شبکه و بار، در شکل (۱۸) آورده شده است. همان‌طور که مشخص است، فیلتر فعال پیشنهادی عملکرد مناسبی را در مقابل آلودگی‌های نویزی احتمالی از خود نشان می‌دهد.

در شکل (۱۲) عملکرد فیلتر فعال آورده شده است؛ به گونه‌ای که در ابتدا فیلتر خاموش بوده و هیچ‌گونه جریان جبرانی را تولید نمی‌کند. در این حالت همان‌طور که مشخص است، جریان سمت شبکه به شدت تحت تأثیر هارمونیک‌های جریان بار بوده و عملاً جریان کشیده‌شده از شبکه، ساختاری غیرسینوسی دارد، در زمان $0/2$ ثانیه همان‌طور که در شکل (۱۲) مشخص شده است، فیلتر فعال موازی، شروع به کار کرده و مشاهده می‌شود که جبران‌سازی هارمونیک‌های جریان بار به خوبی صورت گرفته و جریان سمت شبکه با THD مناسب به شکل سینوسی درآمده است.

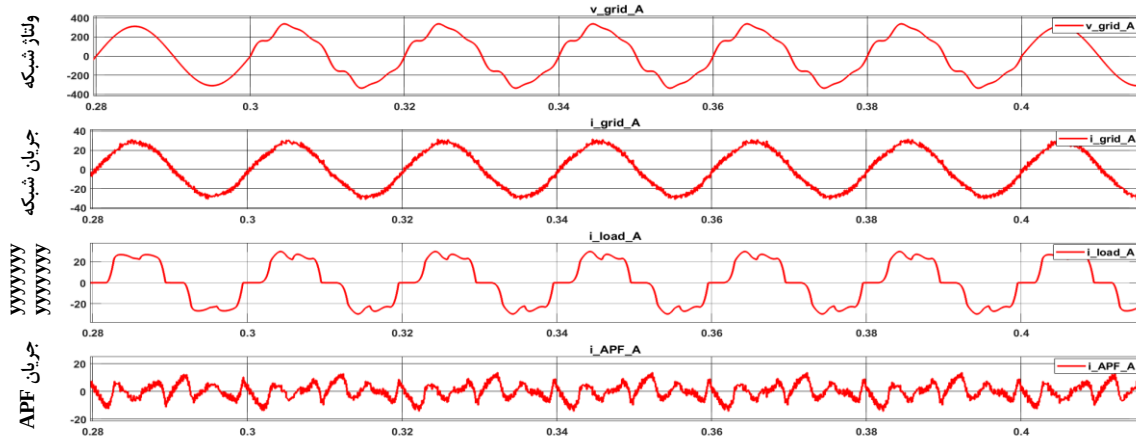
وضعیت پایداری و کنترل ولتاژ لینک DC از طریق روش پیشنهادی در شکل (۱۳) قابل مشاهده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، حتی در زمانی که هارمونیک‌های پنجم و هفتم به ولتاژ شبکه تزریق می‌شود، عملکرد کنترلر ولتاژ لینک DC دچار اختلال نشده و این امر نشان‌دهنده این است که جریان‌های جبرانی تولیدشده برای ثابت نگه داشتن ولتاژ لینک DC به درستی و در همزمانی کامل با جریان‌های هارمونیک‌های استخراج‌شده از جریان بار هستند. این امر گواه بر عملکرد مناسب روش پیشنهادی برای تولید جریان‌های جبرانی برای ثابت نگه داشتن ولتاژ لینک DC با دینامیک سریع و استحکام مناسب، تحت شرایط مختلف ولتاژ شبکه است.

کاملاً قابل مشاهده است در تمام بررسی‌های انجام‌شده، جبران‌سازی هارمونیک‌های جریان بار به خوبی توسط روش پیشنهادی صورت گرفته و این امر باعث شده است که جریان سمت شبکه دارای THD% در حد استاندارد تعیین شده باشد.

در شکل‌های (۱۴) و (۱۵) شکل موج همگام‌سازی برای تولید جریان‌های جبران‌سازی برای ثابت نگه داشتن لینک DC آورده شده

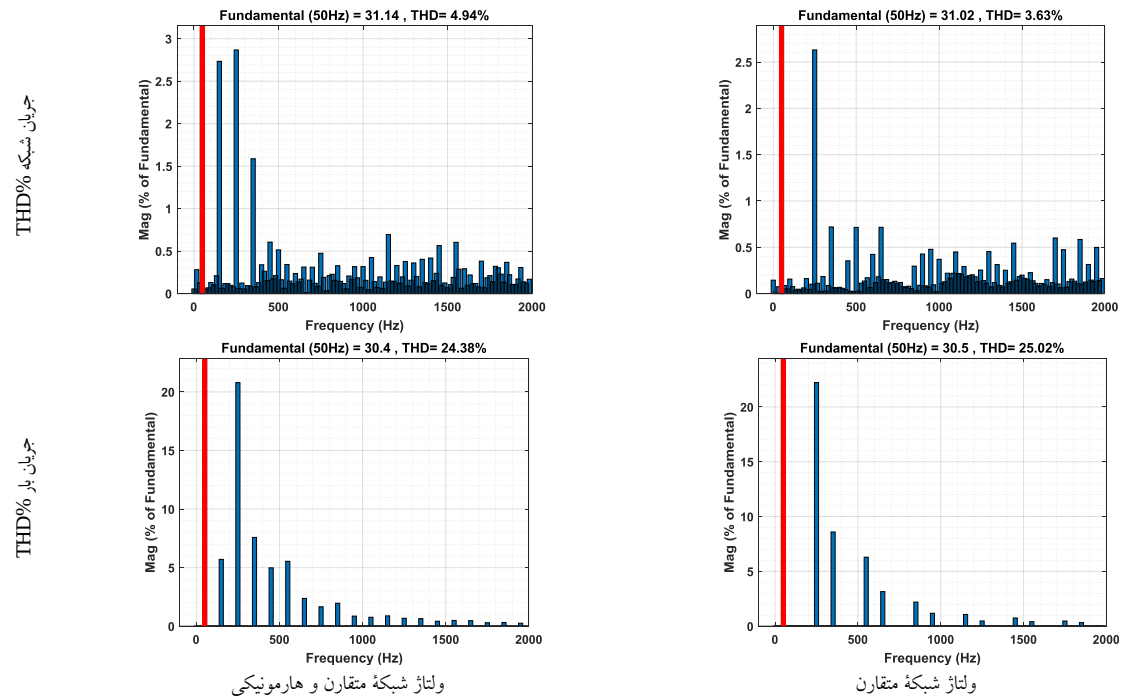


شکل (۸-۱): ولتاژ شبکه متقارن و هارمونیکی جریان‌های ۳ فاز

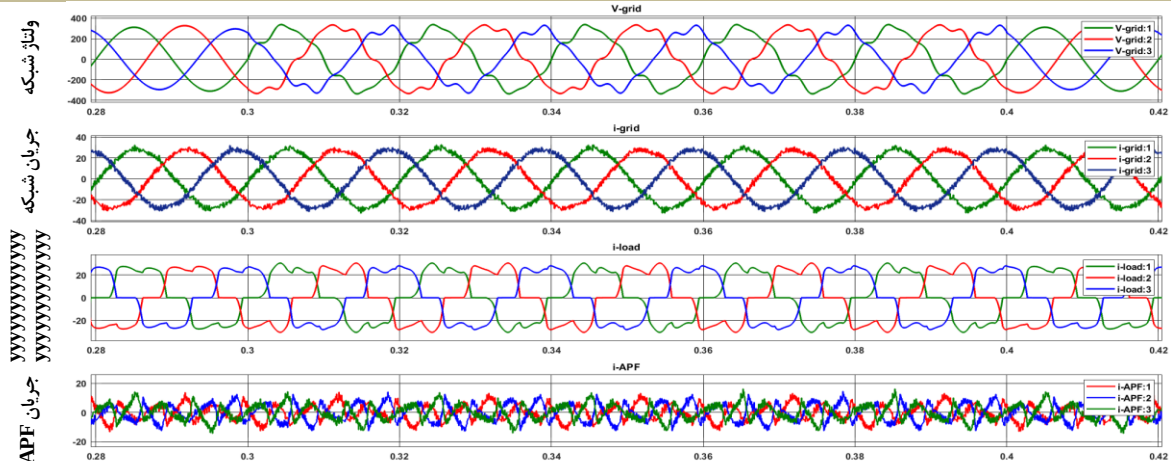


شکل (۸-۲): ولتاژ شبکه متقارن و هارمونیک جریانی فاز A

شکل (۸): نتایج شبیه‌سازی تحت شرایط پایدار، (ولتاژ شبکه متقارن و هارمونیک): (الف) ولتاژ شبکه (V_g)؛ (ب) جریانی شبکه (i_g)؛ (ج) جریانی بار (i_{load})؛ (د) جریانی فیلتر فعال موازی (i_{shunt})

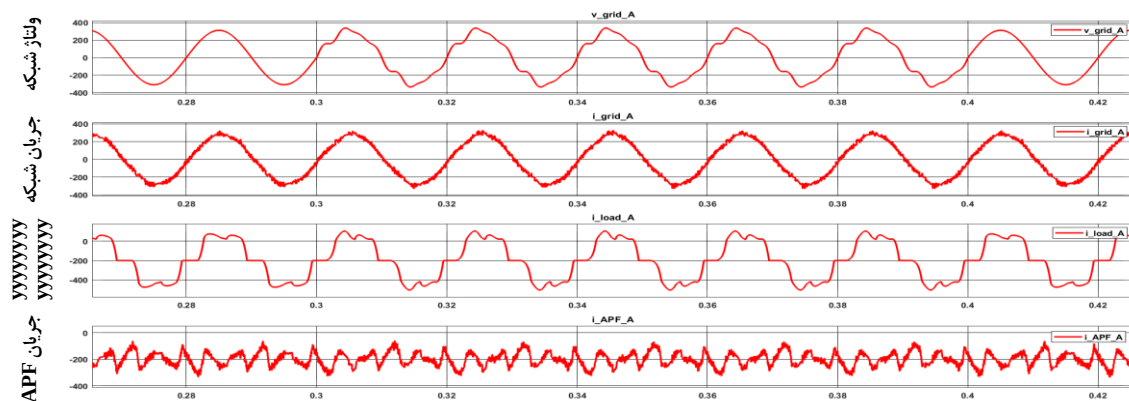


شکل (۹): عملکرد فیلتر فعال در جبران‌سازی هارمونیک‌های جریانی بار: ۱. ولتاژ شبکه متقارن؛ ۲. ولتاژ شبکه متقارن و هارمونیک



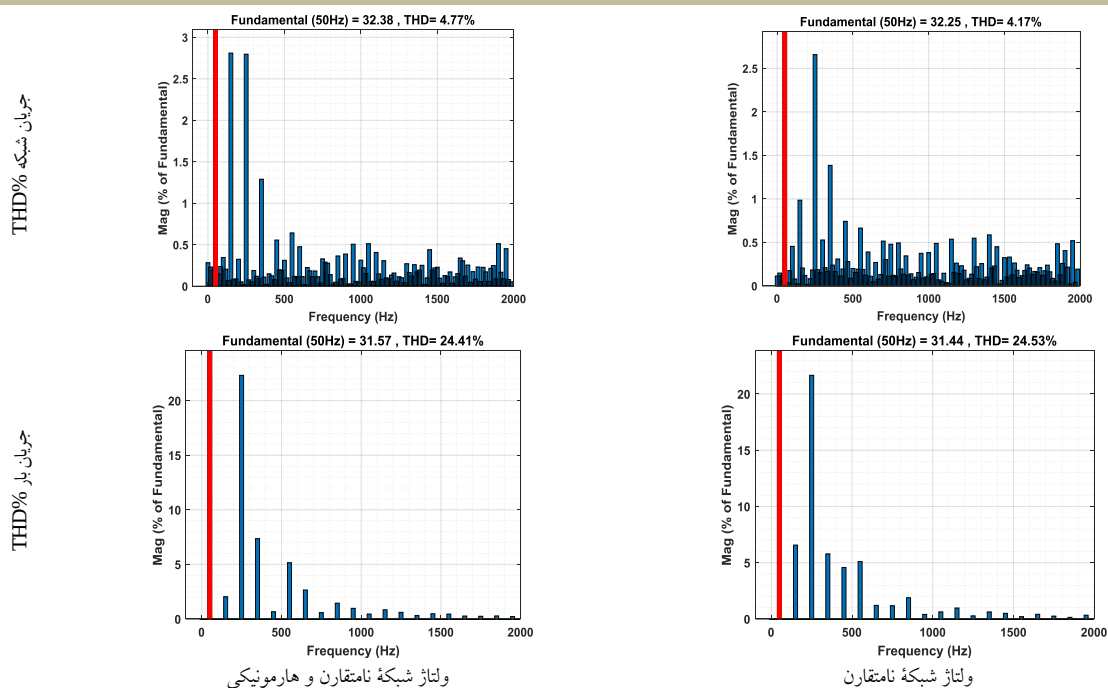
شکل (۱۰-۱): ولتاژ شبکه نامتقارن و هارمونیک جریانی فاز ۳

بهبود عملکرد فیلتر فعال موازی با ارائه راهکاری مبتنی بر فیلتر انتگرالی در حوزه زمان تحت شرایط ولتاژ غیر ایدئال در شبکه‌های ضعیف، سجادی و پیچان ۶۳

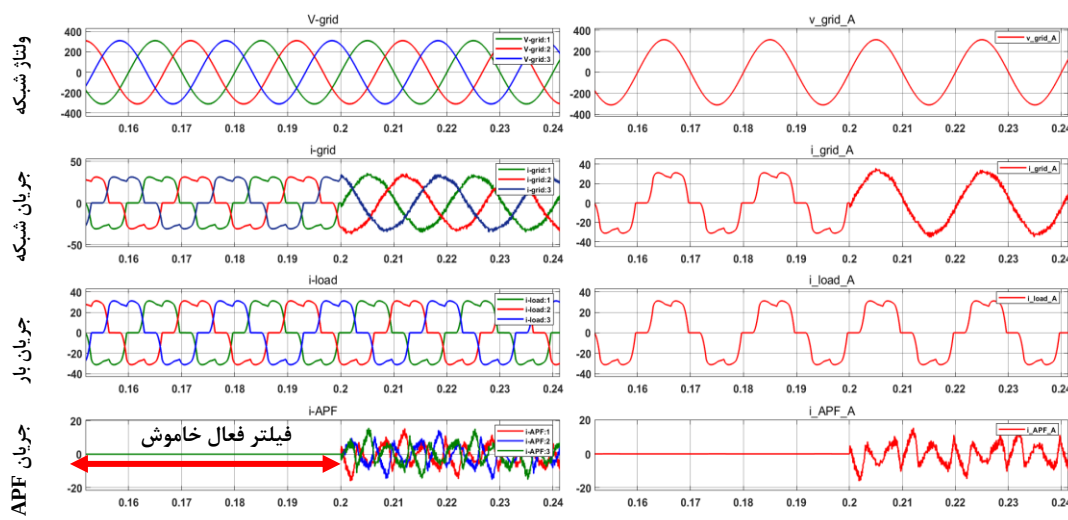


شکل (۱۰-۲): ولتاژ شبکه نامتقارن و هارمونیک جریانی فاز A

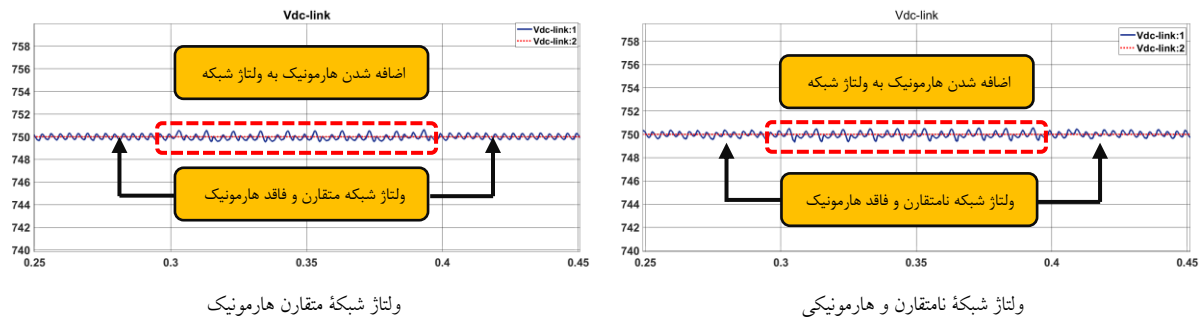
شکل (۱۰): نتایج شبیه‌سازی تحت شرایط پایدار، (ولتاژ شبکه نامتقارن و هارمونیک): الف) (ولتاژ شبکه (V_g): ب) جریانی شبکه (i_g): ج) جریانی بار (i_{load}): د) جریانی فیلتر فعال موازی (i_{shunt})



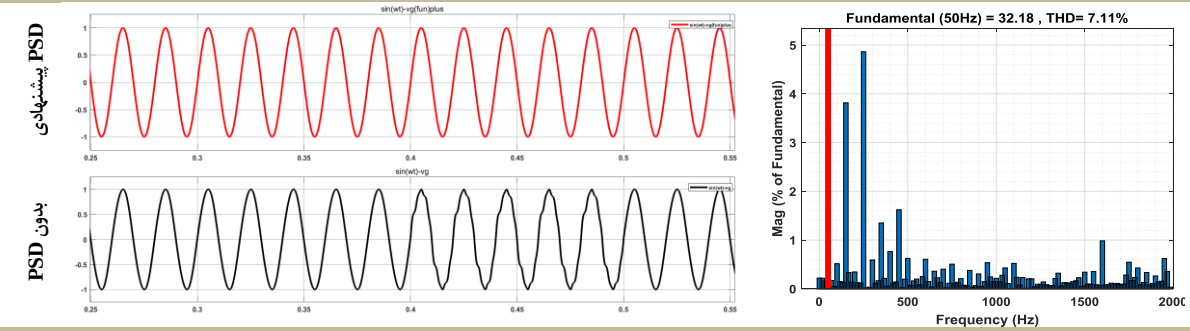
شکل (۱۱): عملکرد فیلتر فعال در جبران‌سازی هارمونیک‌های جریانی بار: ۱. ولتاژ شبکه نامتقارن؛ ۲. ولتاژ شبکه نامتقارن و هارمونیک



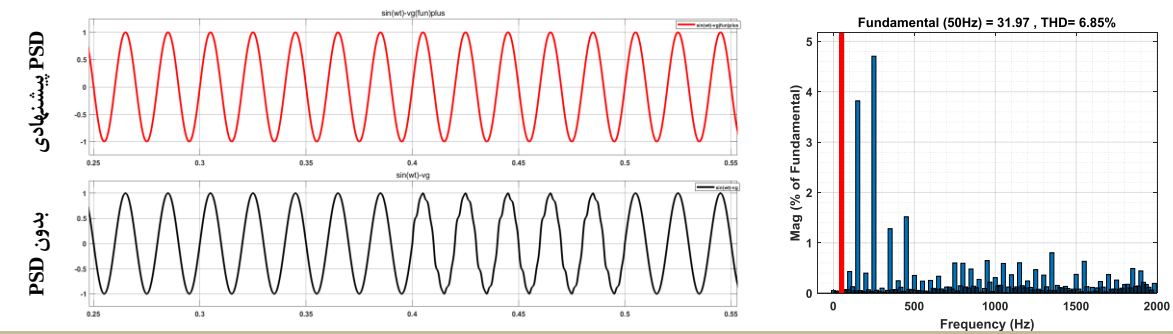
شکل (۱۲): نتایج شبیه‌سازی عملکرد فیلتر فعال موازی، (ولتاژ شبکه نامتقارن و هارمونیک): الف) (ولتاژ شبکه (V_g): ب) جریانی شبکه (i_g): ج) جریانی بار (i_{load}): د) جریانی فیلتر فعال موازی (i_{shunt})



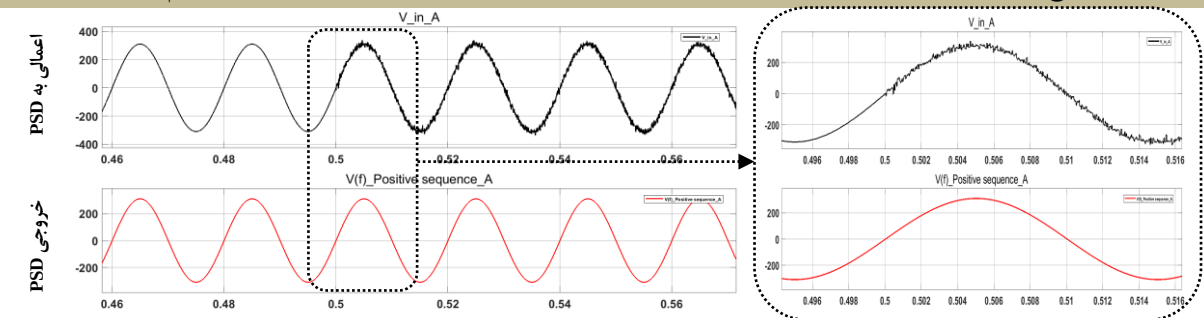
شکل (۱۳): نتایج شبیه‌سازی عملکرد کنترلر برای ثابت نگه داشتن ولتاژ لینک DC



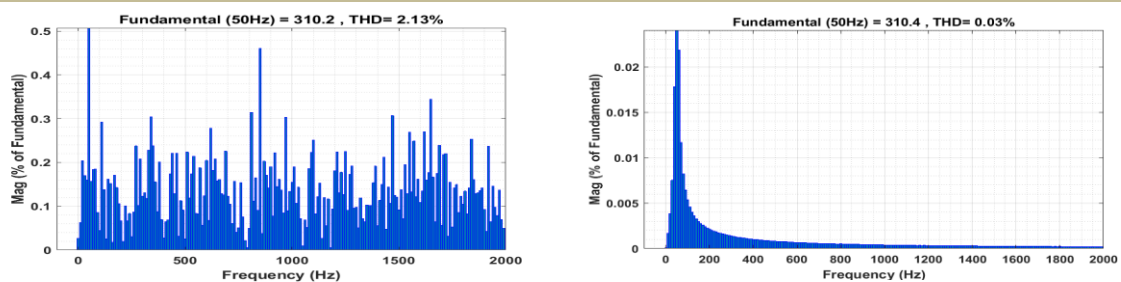
شکل (۱۴): نتایج شبیه‌سازی عملکرد PSD پیشنهادی تحت شرایط ولتاژ شبکه متقارن و هارمونیک: ۱. استفاده از PSD؛ ۲. عدم استفاده از PSD



شکل (۱۵): نتایج شبیه‌سازی عملکرد PSD پیشنهادی تحت شرایط ولتاژ شبکه نامتقارن و هارمونیک: ۱. استفاده از PSD؛ ۲. عدم استفاده از PSD



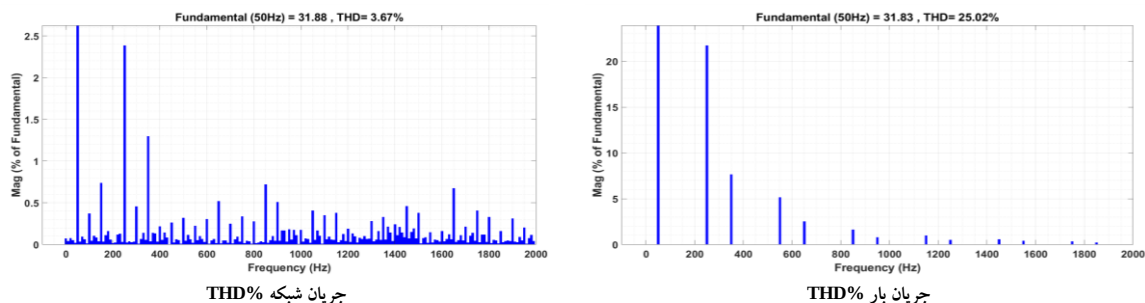
شکل (۱۶): نتایج شبیه‌سازی عملکرد PSD پیشنهادی: ۱. ولتاژ نمونه‌برداری شده برای اعمال به PSD؛ ۲. خروجی PSD



ورودی آشکار ساز توالی مثبت مؤلفه اصلی ولتاژ THD%

خروجی آشکار ساز توالی مثبت مؤلفه اصلی ولتاژ THD%

شکل (۱۷): آنالیز فوری PSD پیشنهادی همراه با نویز نمونه‌برداری



شکل (۱۸): آنالیز فوری فیلتر فعال در جبران‌سازی هارمونیک‌های جریان بار، همراه با نویز نمونه‌برداری اعمال‌شده به PSD

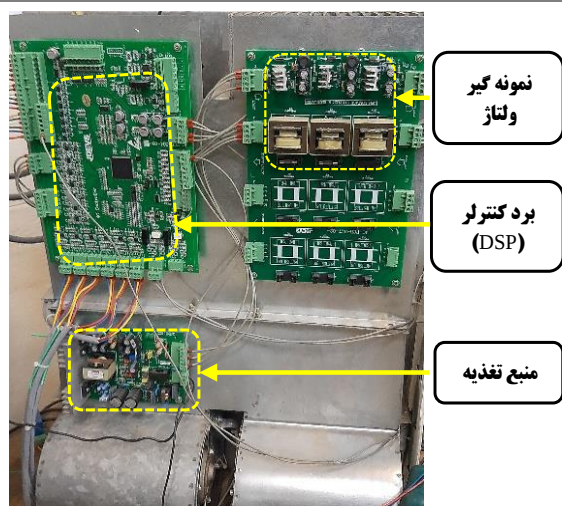
جدول (۳): مقایسه عملکرد فیلتر فعال تحت شرایط مختلف ولتاژ شبکه

عدم تقارن ولتاژ شبکه (درصد)	۵٪				۷٪				۹٪			
ولتاژ شبکه (THD%)	۸٪	۱۱٪	۱۳٪	۱۵٪	۸٪	۱۱٪	۱۳٪	۱۵٪	۸٪	۱۱٪	۱۳٪	۱۵٪
جریان شبکه (THD%)	۳/۹۱	۴/۷۷	۴/۸۱	۴/۸۶	۴/۵۲	۴/۸۰	۴/۹۰	۵/۰۳	۴/۷۳	۴/۹۱	۵/۰۷	۵/۳۷
جریان بار (THD%)	۲۴/۴	۲۴/۴۱	۲۴/۵۷	۲۵/۰۱	۲۴/۶	۲۴/۸۲	۲۴/۹۱	۲۵/۱۴	۲۴/۷۱	۲۴/۸۴	۲۵/۰۱	۲۵/۲۶

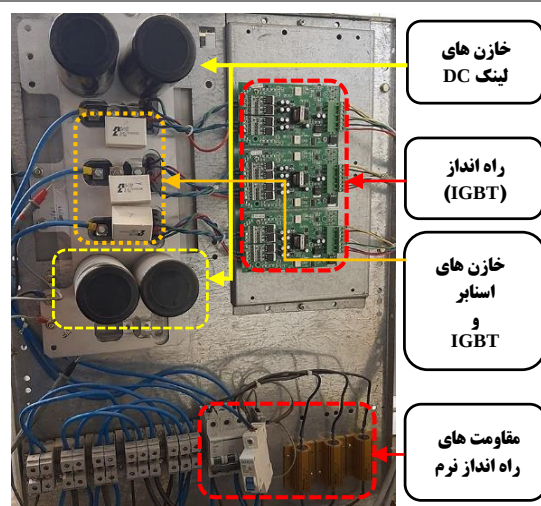
این مقدار برابر با بیشترین میزان مجاز هارمونیک جریان براساس استاندارد IEEE 519-2022 است، و عملاً محدوده عملکرد فیلتر در این محدوده پیشنهاد می‌گردد. شایان ذکر است که با توجه به میزان اغتشاش اعمالی در ولتاژ شبکه، محدوده عملکردی فیلتر با راهکار پیشنهادی، مقداری قابل قبول می‌باشد و این خود گواه بر عملکرد مناسب فیلتر در مقابل تغییرات ولتاژ شبکه است.

در جدول (۳) مقایسه عملکرد فیلتر فعال موازی مبتنی بر راهکار پیشنهادی، تحت شرایط مختلف ولتاژ شبکه آورده شده است. همان‌طور که مشخص است، عملکرد فیلتر نسبت به تغییرات ولتاژ ورودی متغیر است و براساس نتایج شبیه‌سازی در هنگامی که ولتاژ شبکه دارای عدم تقارن ۹٪ و هارمونیک در حدود ۱۳٪ است، اعوجاج هارمونیکی جریان سمت شبکه حدوداً برابر ۵٪ می‌گردد، که

نمای روبه‌روی نمونه صنعتی فیلتر فعال



نمای پشتی نمونه صنعتی فیلتر فعال



شکل (۱۹): نمونه صنعتی SAPF: ۱. نمای روبه‌رو؛ ۲. نمای پشتی

جدول (۴): پارامترهای پیکربندی سیستم آزمایشی SAPF

توضیحات	نام	مقدار/ نوع
نوع مبدل	تمام پل منبع ولتاژی	۳ فاز/ ۳ ساق
سوچ های قدرت	IGBT	SKM100GB12T4
پردازنده	DSP	TMS-320F28335 TI
راه انداز	راه اندازهای IGBT	Prototype (IC-HCPL316j)
ترانسفورماتور	کاهنده	۲۲۰ V/ ۷۰ V
سنسور جریان	LEM sensors	LA55P
بار غیر خطی	پل دیودی با بار اهمی	6 pulses+10 Ω
خازن لینک DC	C _{DC-Link}	۲۲۰۰ μ F
سلف سری	L _f	۱mH
مقاومت سری	R _f	۱۰m Ω

۲.۴. نتایج تجربی

برای تأیید اثربخشی روش کنترلی پیشنهادی و صحت سنجی نتایج شبیه سازی، از نمونه آزمایشگاهی فیلتر فعال موازی استفاده شده است. بخش هایی از این فیلتر در شکل (۱۹) نشان داده شده است. همچنین در جدول (۴)، پارامترهای پیکربندی سیستم مورد آزمایش آورده شده است. کنترلر به کاررفته در این فیلتر DSP TMS28F335^۱ از شرکت TI است. IGBT^۲ های به کاررفته با مشخصات SKM100GB12T4 به همراه مدارات راه انداز استفاده شده است. شایان ذکر است که برای کنترل جریان راه اندازی، از یک راه انداز نرم^۳ استفاده شده است. همچنین، یک سنسور جریان LEM LA55P برای اندازه گیری جریان های خط، بار و جریان تولیدشده توسط فیلتر فعال موازی استفاده شده است. برای اندازه گیری ولتاژ از ترانسفورماتورهای ولتاژ استفاده شده است. برای شبیه سازی بار غیرخطی از یک یکسوساز پل دیود سه فاز با بار مقاومتی استفاده می گردد؛ همان طور که در شکل (۲۰) نشان داده شده است.

شکل موج های جریان شبکه به همراه جریان بار تحت شرایطی که ولتاژ شبکه متقارن و همزمان هارمونیک است، در شکل (۲۱) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، هارمونیک های موجود در جریان سمت شبکه به خوبی جبران شده و جریان شبکه برخلاف شکل موج جریان بار، ساختاری سینوسی دارد.

برای بررسی دقیق تر عملکرد فیلتر فعال پیاده سازی شده با روش پیشنهادی، خروجی آنالایزور برای ولتاژ شبکه در حالت متقارن و هارمونیک در شکل (۲۲) آورده شده است. در این حالت THD ولتاژ شبکه برابر با ۰.۰۶٪ است. تحت چنین شرایطی THD جریان

شبکه و بار، به ترتیب برابر با ۰.۸٪/۳ و ۰.۲٪/۲۳ است. این گواه بر عملکرد صحیح فیلتر فعال پیاده سازی شده با روش پیشنهادی تحت شرایط ولتاژ شبکه هارمونیک و متقارن است.

همان طور که در شکل (۲۳) مشخص است، هارمونیک های تأثیرگذار در ولتاژ شبکه هارمونیک های پنجم و هفتم هستند.

جریان تولیدشده توسط فیلتر فعال موازی به همراه جریان شبکه در شکل (۲۴) آورده شده است. همان طور که مشاهده می شود، جریان جبران سازی تولیدشده توسط فیلتر فعال به خوبی توانسته است هارمونیک های جریان بار را جبران کند.

در شکل (۲۵) خروجی اسیلوسکوپ برای جریان شبکه، جریان تولیدشده توسط فیلتر فعال موازی، جریان بار، تحت شرایط ولتاژ شبکه نامتقارن و هارمونیک آورده شده است.

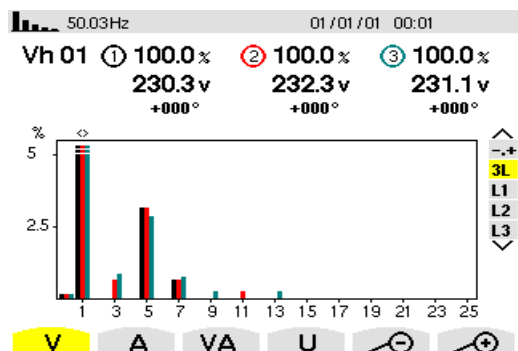
برای تجزیه و تحلیل هارمونیک تحت شرایط ولتاژ نامتقارن و هارمونیک، خروجی آنالایزور در شکل (۲۷) آورده شده است. در این حالت مقدار THD جریان بار و شبکه به ترتیب ۰.۷٪/۲۶ و ۰.۱٪/۴ است و این امر گواه بر عملکرد مناسب راهکار پیشنهادی تحت شرایطی است که ولتاژ شبکه نامتقارن و هارمونیک است.

برای بررسی ولتاژ شبکه در حالت نامتقارن و هارمونیک، مقدار اندازه و فاز ولتاژها در شکل (۲۶) آورده شده است.

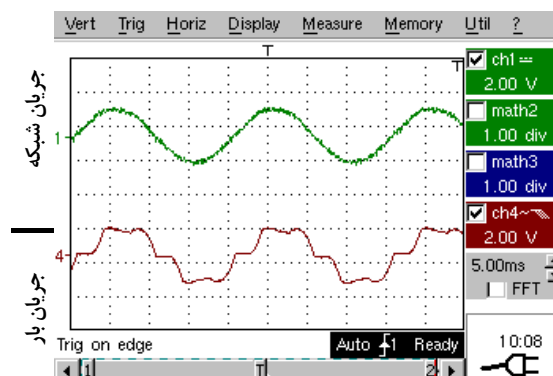


شکل (۲۰): بار غیر خطی

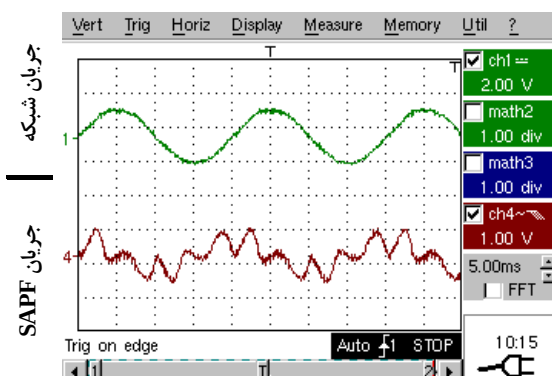
1. Digital Signal Processor
2. Insulated-Gate Bipolar Transistor
3. Soft Starter



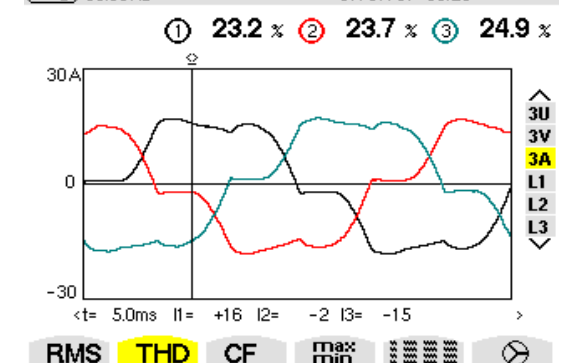
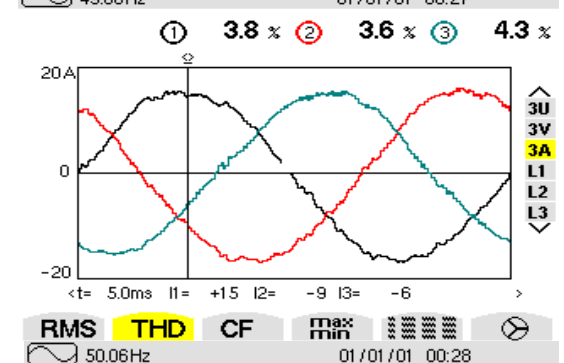
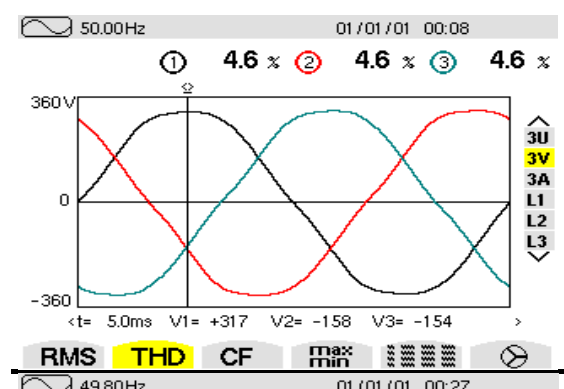
شکل (۲۳): تجزیه و تحلیل تجربی شاخص هارمونیک ولتاژ شبکه تحت شرایط شبکه متعادل و هارمونیک



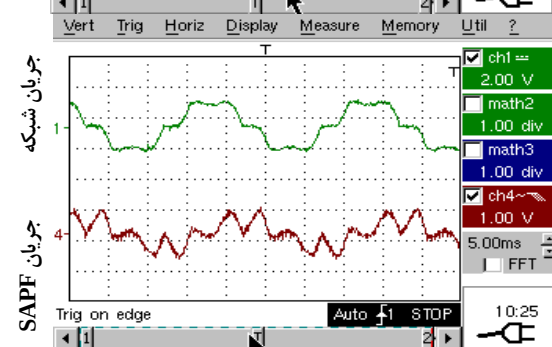
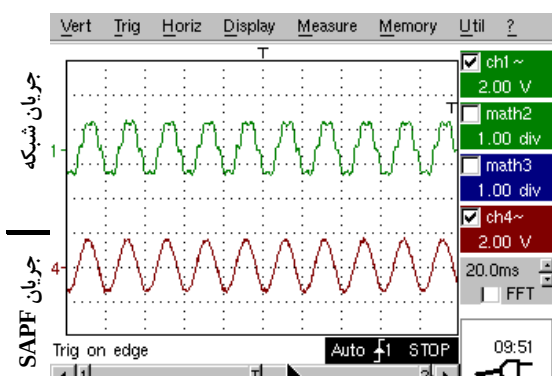
شکل (۲۱): نتایج تجربی جریان شبکه و جریان بار در حالت پایدار تحت شرایط ولتاژ شبکه متقارن و هارمونیک



شکل (۲۴): نتایج تجربی جریان شبکه و جریان تولیدشده توسط فیلتر فعال تحت شرایط ولتاژ شبکه متقارن و هارمونیک



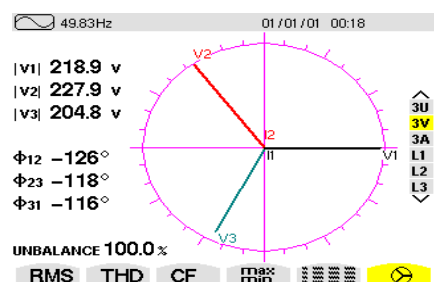
شکل (۲۲): تجزیه و تحلیل تجربی تحت ولتاژ شبکه متقارن و هارمونیک: ۱. ولتاژ شبکه؛ ۲. جریان شبکه؛ ۳. جریان بار



شکل (۲۵): شکل موج‌های تجربی جریان شبکه، جریان بار و جریان تولید شده توسط فیلتر فعال تحت شرایط ولتاژ شبکه نامتقارن و هارمونیک

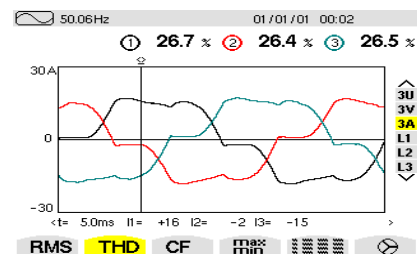
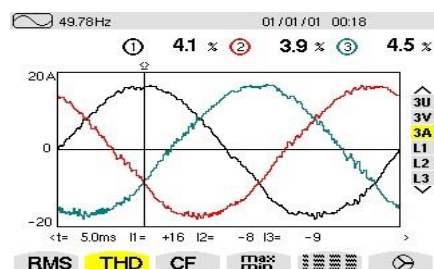
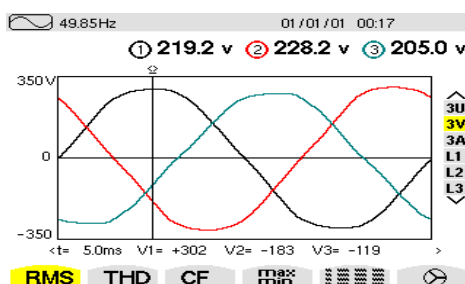
۵. نتیجه گیری

در این مقاله یک الگوریتم جدید جهت کنترل فیلتر فعال موازی مبتنی بر حوزه زمان، تحت شرایط مختلف ولتاژ شبکه (مقایسه هارمونیک، نامتقارن، نامتقارن و هارمونیک) با استفاده از استخراج کننده توالی مثبت مؤلفه اصلی جریان مبتنی بر فیلتر SOF ارائه شده است. در این روش با توجه به اینکه فقط با استفاده از یک تبدیل قاب مرجع ساکن فرایند استخراج آغاز می شود، کاهش تعداد فیلترهای مورد نیاز و همچنین کاهش بار محاسباتی مشهود است. علاوه بر این، از توالی مثبت مؤلفه اصلی ولتاژ به روش مشابه برای همگام سازی و تولید جریان جبرانی برای ثابت نگه داشتن ولتاژ لینک DC استفاده شده است. قابلیت مؤثر جبران هارمونیک جریان بار، به رغم ماهیت نامتعادل و هارمونیک ولتاژهای شبکه را می توان مزیت اصلی طرح پیشنهادی عنوان کرد. عملکرد الگوریتم کنترل پیشنهادی از طریق شبیه سازی و مطالعات تجربی در شرایط عملیاتی مختلف مورد بررسی و تأیید قرار گرفته است. از این روش به دلیل محاسبات کم، انعطاف پذیری مناسب، قابل اعتماد بودن، سادگی اجرا و استفاده در تمام ناهنجاری های ولتاژ شبکه می توان در مصارف صنعتی بهره برد.



شکل (۲۶): تجزیه و تحلیل تجربی ولتاژ شبکه تحت شرایط

شبکه نامتقارن و هارمونیک



شکل (۲۷): تجزیه و تحلیل تجربی جریان شبکه تحت شرایط ولتاژ شبکه نامتعادل و هارمونیک

مراجع

- [1] Wang, H., Liu, S., "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, <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2019.2930033>.
- [2] Nejabatkhah, F., Li, YW., Tian, H., "Power quality control of smart hybrid AC/DC microgrids: An overview", in IEEE Access, Vol. 7, pp. 52295-52318, 2019, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2912376>.
- [3] Bernet, D., Hiller, M., "Grid-connected medium-voltage converters with parallel voltage-source active filters", IET Electric Power Applications, Vol. 13, No. 10, pp. 1507-1513, 2019, <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2019.0021>.
- [4] Amini, B., Rastegar, H., Pichan, M., "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, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109738>.
- [5] Kashif, M., Hossain, MJ., Zhuo, F., Shi, S., Soon, JL., "An advanced harmonic extraction technique applied to a three-phase three-level active power filter", In 2017 IEEE 3rd International Future Energy

- Electronics Conference and ECCE Asia (IFEEC 2017-ECCE Asia), pp. 364-369. IEEE, 2017, <https://doi.org/10.1109/IFEEC.2017.7992065>.
- [6] Pichan, M., Samadi, M., Shahrjerdi, H., "Active Power Decoupling of Single-Phase Photovoltaic Inverter Using DC Active Filter and Improved Hybrid Controller", Journal of Modeling in Engineering, 2025, <https://doi.org/10.22075/jme.2025.33562.2637>.
- [7] Jia, G., Chen, M., Tang, S., Zhang, C., Zhao, B., "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, <https://doi.org/10.1109/TPEL.2020.2982440>.
- [8] Popescu, M., Bitoleanu, A., Suru, C.V., Linca, M., Alboteanu, L., "Shunt active power filters in three-phase, three-wire systems: A topical review", Energies, Vol. 17, No. 12, pp. 2867, 2024, <https://doi.org/10.3390/en17122867>.
- [9] Ansari, M.R., Mousavi Ghahfarokhi, M.S., Safaee, S., "Power Quality Improvement in a Steel Plant by an Optimized Shunt Active Power Filter Based on Developed P-Q Theory", Energy Engineering and Management, Vol. 11(3), pp. 78-91, 2023. <https://doi.org/10.22052/11.3>.
- [10] Chen, D., Xiao, L., Yan, W., Li, Y., Guo, Y., "A harmonics detection method based on triangle orthogonal principle for shunt active power filter", Energy Reports, Vol. 7, pp. 98-104, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.06.016>.
- [11] Al-Gahtani, S.F., Nelms, R.M., "Performance of a shunt active power filter for unbalanced conditions using only current measurements", Energies, Vol. 14, No. 2, pp. 397, 2021, <https://doi.org/10.3390/en14020397>.
- [12] Samanta, J., Sangno, R., Pudur, R., "A Modified Control Scheme To Mitigate Harmonics, Improve Voltage Regulation & Power Factor Using Single-Phase Shunt Active Power Filter", Suranaree Journal of Science & Technology, Vol. 31, No. 6, 2024, <https://doi.org/10.55766/sujst-2024-06-e03764>.
- [13] Sajadi, F., Pichan, M., Zakipour, A., "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(76), pp. 27-44, 2024, <https://doi.org/10.22075/jme.2023.30169.2421>.
- [14] Yi, H., Zhuo, F., Wang, F., Li, Y., Wang, Z., "A single-phase harmonics extraction algorithm based on the principle of trigonometric orthogonal functions", Journal of Power Electronics, Vol. 17, No. 1, pp. 253-261, 2017, <https://doi.org/10.6113/JPE.2017.17.1.253>.
- [15] Li, Z., Wang, L., Wang, Y., Li, G., "Harmonic detection method based on adaptive noise cancellation and its application in photovoltaic - active power filter system", Electric Power Systems Research, Vol. 184, No. 106308, ISSN0378-7796, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106308>.
- [16] Hou, S., Fei, J., Chen, C., Chu, Y., "Finite-Time Adaptive Fuzzy-Neural-Network Control of Active Power Filter", in IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 34, No. 10, pp. 10298-10313, Oct. 2019, <https://doi.org/10.1109/TPEL.2019.2893618>.
- [17] Govind, A., Jayaswal, K., Tayal, V.K., Kumar, P., "Simulation and real time implementation of shunt active power filter for power quality enhancement using adaptive neural network topology", Electric Power Systems Research, Vol. 228, No. 110042 ISSN0378-7796, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.110042>.
- [18] Kadem, M., Semmah, A., Wira, P., Slimane, A., "Artificial Neural Network Active Power Filter with Immunity in Distributed Generation", Period. Polytech. Mech. Eng., Vol. 64(2), No. 109-1, 2020 Jan. 1, <https://doi.org/10.3311/PPme.12775>.
- [19] Jayasankar, V.N., Vinatha, U., "Backstepping Controller With Dual Self-Tuning Filter for Single-Phase Shunt Active Power Filters Under Distorted Grid Voltage Condition", in IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 56, No. 6, pp. 7176-7184, Nov.-Dec. 2020, <https://doi.org/10.1109/TIA.2020.3025520>.
- [20] Vazquez, S., Sanchez, J.A., Reyes, M.R., Leon, J.I., Carrasco, J.M., "Adaptive Vectorial Filter for Grid Synchronization of Power Converters Under Unbalanced and/or Distorted Grid Conditions", in IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 61, No. 3, pp. 1355-1367, March 2014, <https://doi.org/10.1109/TIE.2013.2258302>.
- [21] Rodríguez, P., Pou, J., Bergas, J., Candela, J.I., Burgos, R.P., Boroyevich, D., "Decoupled Double Synchronous Reference Frame PLL for Power Converters Control", in IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 22, No. 2, pp. 584-592, March 2007, <https://doi.org/10.1109/TPEL.2006.890000>.
- [22] Ahmad, A.A., Pichan, M., Abrishamifar, A., "A new simple structure PLL for both single and three phase applications", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 74, pp. 118-125, ISSN 0142-0615, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.07.021>.
- [23] Sun, D., Long, H., Zhou, K., Wu, F., Sun, L., "An Improved $\alpha\beta$ -EPLL Based on Active Disturbance Rejection Control for Complicated Power Grid Conditions", in IEEE Access, Vol. 7, p. 139276-139293, 2019, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2943490>.
- [24] Đokić, V.V., Đokić, D., "NEW NEURAL PLL ARCHITECTURE." Journal of Information Technology & Applications, Vol 14, No. 2, 2024, <https://doi.org/10.7251/JIT2402150DJ>.
- [25] IEEE, "IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems", IEEE Standard, Vol. 519, pp. 1-31, 2022, <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2022.9848440>.