



Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: <https://modelling.semnan.ac.ir/>

ISSN: 2783-2538



Research Article

Modelling and Extraction of Current Harmonic Components based on Instantaneous Power Theory for Shunt Active Filter under Weak Grid

Farzad Sajadi ^a, Mohammad Pichan ^{b,*}, Adel Zakipour^b

^a Master of Power Electronics and Electrical Machines, Arak University of Technology, Arak, iran

^b Assistant Professor, Faculty of Electrical Engineering, Arak University of Technology, Arak, iran

PAPER INFO

Paper history:

Received: 13 March 2023

Revised: 19 June 2023

Accepted: 26 August 2023

Keywords:

Shunt active power filters (SAPF),
Positive sequence detector (PSD),
Phase locked loop,
Instantaneous Power Theory,
Third order sinusoidal integrator (TOSSI).

ABSTRACT

The most important part in the suitable performance of the active power filter is possible by precise harmonic extraction of load current. Current harmonic extraction is possible in both time and frequency domain. However, time domain methods have higher speed and low complexity. One of the most popular methods in this field is the Instantaneous Power Theory method but, the main problem is when the grid voltage is not ideal. Therefore, this paper provides a method based on the Instantaneous Power Theory that shows very good performance with the least complexity of implementation in all grid voltage states, whether asymmetry, distorted, or both at the same time. To examine the performance of the proposed method, the three -phase filtration is simulated in the MATLAB/Simulink environment under different grid voltage conditions and finally the experimental results are provided in the laboratory environment. The results verify the effectiveness of the proposed method where the THD% is decreased from 25% to 5%.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2023.30169.2421>

© 2024 Published by Semnan University Press.

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

* Corresponding author.

E-mail address: m.pichan@arakut.ac.ir

How to cite this article:

Sajadi, F., Pichan, M., & Zakipour, A. (2024). Modelling and Extraction of Current Harmonic Components based on Instantaneous Power Theory for Shunt Active Filter under Weak grid. Journal of Modeling in Engineering, 22(76), 27-44. doi: 10.22075/jme.2023.30169.2421

مدل سازی و استخراج هارمونیک‌های جریان بر اساس تئوری توان لحظه‌ای برای فیلتر فعال موازی تحت شرایط شبکه الکتریکی ضعیف

سید فرزاد سجادی^۱، محمد پیچان^{۲*}، عادل زکی پور^۲

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۱۲/۲۲	<p>به منظور جبران هارمونیک‌های جریان و توان راکتیو، فیلتر فعال موازی یکی از بهترین گزینه‌ها می‌باشد. مهم‌ترین بخش در عملکرد مناسب فیلتر فعال تولید جریان مرجع یا همان استخراج دقیق هارمونیک‌های جریان بار می‌باشد. استخراج هارمونیک‌های جریان بار در دو حوزه زمان و فرکانس میسر است که روش‌های حوزه زمان دارای سرعت بالاتر و پیچیدگی کمتری بوده و بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. از ساده‌ترین و محبوب‌ترین روش‌ها در این حوزه روش تئوری توان لحظه‌ای می‌باشد. مشکل اساسی در حالتی است که ولتاژ شبکه نامتعادل، هارمونیک و یا دچار تغییرات فرکانسی باشد. در این حالت عملکرد فیلتر فعال موازی به شدت مختل و خراب می‌گردد. از این‌رو در این مقاله یک روش ارتقا یافته مبتنی بر تئوری توان لحظه‌ای ارائه شده است که با پیچیدگی و بار محاسباتی کمتر، در شرایط عدم تقارن و هارمونیک بودن ولتاژ شبکه پاسخ مناسبی ارائه می‌دهد. همچنین این روش در مقابل تغییرات احتمالی فرکانس شبکه استحکام مناسبی از خود نشان می‌دهد. 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 ارایه شده نشان از عملکرد بسیار مناسب سیستم پیشنهادی دارد بطوریکه THD جریان شبکه در شرایط هارمونیک از ۲۵٪ به کمتر از ۵٪ کاهش یافته است.</p>
بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۲۹	
پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۶/۰۴	
<p>واژگان کلیدی: فیلتر توان فعال موازی، تئوری توان لحظه‌ای، آشکار ساز توالی مثبت، حلقه قفل شونده فاز، فیلتر مرتبه سوم انتگرالی.</p>	

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2023.30169.2421>

© 2024 Published by Semnan University Press.

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

۱- مقدمه

از گذشته برای جبران‌سازی هارمونیک‌های تزریقی بار از فیلترهای پسیو استفاده می‌گردید، این فیلترها از عناصری مانند خازن، سلف و مقاومت تشکیل می‌شوند. استفاده از این فیلترها مشکلاتی با خود به همراه داشت همچون عدم توانایی جبران‌سازی طیف کامل هارمونیک تولیدی توسط بار و یا رزونانس با فرکانس شبکه، تاثیر بر امیدانس دیده شده از سمت شبکه، دینامیک پایین و احتمال پیدایش پدیده تشدید زیرسنکرون^۴ SSR [۲]. به همین دلیل با

امروزه استفاده از ادوات الکترونیک قدرت به دلیل مزایای زیادی که دارند روز به روز در حال افزایش است. این تجهیزات علاوه بر مزایای بسیار معایبی همچون تزریق هارمونیک به شبکه را به همراه دارند. این امر سبب مشکلاتی مانند کاهش راندمان، تاثیر مخرب بر روی بارهای حساس مجاور، اشغال ظرفیت توانی خطوط انتقال و افزایش تلفات می‌گردد [۱].

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: m.pichan@arakut.ac.ir

۱. دانش آموخته کارشناسی ارشد الکترونیک قدرت و ماشین‌های الکتریکی،

دانشگاه صنعتی اراک

۲. استادیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی اراک

^۴ sub-synchronous resonance

عواملی مانند تاخیر، دینامیک پایین، نشت طیفی، پیچیدگی در پیاده سازی، نیاز به جمع آوری اطلاعات زیاد، فضای ذخیره سازی بالا و محاسبات پیچیده، نیاز به فیلتر ضد آلیاسنگ^۶ دقیق، نیاز به تعریف و استفاده مناسب از تابع پنجره و هماهنگ سازی دقیق بین فرکانس اصلی و نمونه برداری باعث می شود استفاده از این روش ها کمتر مورد توجه قرار بگیرد [۱۶-۱۷].

امروزه روش های دیگری که پاسخ بهتری نسبت به روش های حوزه فرکانس دارند نیز ارائه شده اند مانند حذف نویز تطبیقی^۷ [۱۸]، استفاده از شبکه عصبی^۸ [۱۹] و کنترل فازی^۹ [۲۰]، ولیکن باید دقت داشت که این روش ها بدلیل ساختار پیچیده همچنان بصورت روش هایی مرسوم در عمل مورد استفاده قرار نمی گیرند.

در مقابل روش های حوزه فرکانس، روش های حوزه زمان به دلیل سادگی در پیاده سازی، بار محاسباتی کمتر، عدم نیاز به پردازنده قوی و پاسخ سریعتر، بیشتر در عمل مورد استفاده قرار می گیرند [۲۱]. در این حوزه روش هایی مانند تئوری توان لحظه ای^{۱۰} (IRPT) [۲۲]، قاب مرجع همزمان^{۱۱} (SRF) [۲۳]، تابع متعامد مثلثاتی^{۱۲} (TOP) [۲۴] را می توان نام برد.

در [۲۴] از اصل مثلث متعامد استفاده شده است اما در این روش امکان کنترل بر روی میزان توان راکتیو جبران شده نمی باشد. همچنین این روش کارکرد مناسبی در حالتی که ولتاژ شبکه دارای هارمونیک و یا عدم تقارن باشد از خود نشان نمی دهد. چارچوب مرجع همزمان در [۲۵] ارائه شده است اما در این روش ها نیز در صورتی که ولتاژ شبکه دارای اغتشاش و یا نامتعادلی باشد فرایند جبران سازی درست انجام نشده و همچنین نیاز به چندین تبدیل قاب مرجع در این روش ها دیده می شود. در [۲۶] برای حذف حلقه قفل شونده فاز از قاب مرجع ساکن استفاده شده است و نیاز به استخراج توابع \cos و \sin می باشد، اما در شرایط شبکه نامتعادل، هارمونیک های سوم از این طریق تولید می شوند. یکی از محبوب ترین روش ها در حوزه زمان روش تئوری توان لحظه ای می باشد که بر مبنای استفاده از تئوری توان های لحظه ای Akagi است. در این روش از تبدیل

پیشرفت عناصر الکترونیک قدرت استفاده از فیلترهای فعال با رویکرد حذف مشکلات موجود در فیلترهای پسیو مورد توجه قرار گرفت. از جمله کاربردهای فیلترهای فعال می توان به جبران سازی هارمونیک ها و کاهش توان راکتیو از دید شبکه، افزایش کیفیت توان، متعادل سازی جریان کشیده شده (دیده شده) از شبکه در نتیجهی جریان بار غیرمتعال و جبران سازی کامل جریان سیم چهارم در سیستم های چهار سیم اشاره نمود [۳-۴].

از لحاظ محل اتصال فیلتر فعال به سه دسته سری، موازی و هیبرید تقسیم بندی می شود. از آن جایی که در صنعت بیشتر حذف هارمونیک های جریان مد نظر می باشد از این رو استفاده از فیلترهای فعال موازی متداول تر می باشد [۵-۶]. فیلتر فعال موازی بصورت موازی با بار قرار گرفته و جریانی برابر با هارمونیک تولیدی بار تولید کرده و در فاز مخالف در نقطه اتصال تزریق می کند و باعث جبران هارمونیک جریان بار بصورت کامل و یا در حد استاندارد [۷] (IECEN61000-3, IEEE-51) از دید شبکه می شود [۸].

عملکرد مناسب فیلتر فعال موازی به استخراج دقیق جریان هارمونیک مرجع، ساختار کنترل کننده ی تولید جریان مرجع و همچنین کنترل کننده ولتاژ لینک DC وابسته است. در این میان نحوه استخراج هارمونیک جریان مهم ترین بخش می باشد [۹-۱۰] که در نتیجه پارامترهای اندازه و فاز در هارمونیک جریان باید بصورت دقیق استخراج شود. با توجه به توضیحات ارائه شده کارکرد فیلتر فعال موازی باید در هماهنگی کامل با ولتاژ شبکه باشد. لازم به ذکر است که تولید جریان مرجع کاملاً مستقل از ساختار اینورتر (دو سطحی، چند سطحی) می باشد [۱۱].

استخراج هارمونیک جریان در دو حوزه زمان و فرکانس صورت می پذیرد [۱۲]. در حوزه فرکانس تبدیل فوریه گسسته^۲ DFT، تبدیل فوریه سریع^۳ FFT [۱۳]، تبدیل فوریه بازگشتی^۴ RDFT و همچنین در حوزه زمان-فرکانس تبدیل موجک^۵ [۱۴-۱۵] رایج ترین روش ها می باشند. هرچند مزایایی مانند دقت و یا استخراج تک هارمونیک در اینگونه روش ها مشهود است [۵-۶]، ولیکن

⁸ Neural-network

⁹ Fuzzy logic methods

¹⁰ Instantaneous Power Theory

¹¹ Synchronous Reference Frame

¹² Trigonometric Orthogonal Principle

² Discrete Fourier Transform

³ Fast Fourier Transform

⁴ Recursive Discrete Fourier Transform

⁵ Wavelet transforms

⁶ Anti-aliasing filter

⁷ Adaptive noise cancellation

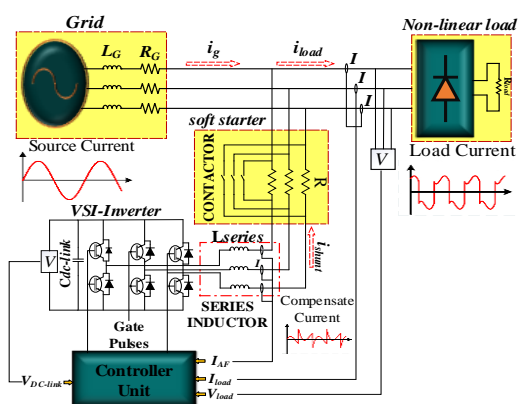
کلی فیلتر فعال موازی^{۱۴} SAPF آورده شده است. در بخش ۳ روابط حاکم بر تئوری توان لحظه ای توضیح داده می شود و سپس در بخش ۴ روش پیشنهادی به تفصیل به همراه روابط ریاضی حاکم، اثبات ها و بلوک دیاگرام ارائه می گردد و در نهایت در بخش ۵ نتایج شبیه سازی روش پیشنهادی در محیط MATLAB-Simulink و همچنین نتایج بررسی های تجربی ارائه می شود.

۲- ساختمان فیلتر فعال موازی

نمای کلی یک فیلتر فعال موازی سه فاز در شکل (۱) نمایش داده شده است. این فیلتر از یک اینوتر منبع ولتاژ سه فاز که به واسطه یک فیلتر سلفی به شبکه متصل شده است به همراه واحد کنترل تشکیل شده است. جهت نمایش امپدانس شبکه از یک مقاومت و سلف (Lg و Rg) استفاده شده و نیز جهت شبیه سازی بار غیر خطی از یک یکسوساز پل سه فاز که یک بار مقاومتی Rload را تغذیه می کند، استفاده شده است.

این فیلتر مانند یک منبع جریان کنترل شونده با ولتاژ عمل می کند. 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^{۱۵} (PCC)، باعث می شود هارمونیک های جریان از دید شبکه جبران و اعوجاج هارمونیک کل^{۱۶} (THD) در محدوده قابل قبول باشد.

این فیلتر مانند یک منبع جریان کنترل شونده با ولتاژ عمل می کند. 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^{۱۵} (PCC)، باعث می شود هارمونیک های جریان از دید شبکه جبران و اعوجاج هارمونیک کل^{۱۶} (THD) در محدوده قابل قبول باشد.



شکل (۱): فیلتر فعال موازی

برداری برای انتقال به قاب مرجع ایستا استفاده می شود. در این حالت می توان عامل ضربان توان فعال و همچنین تمام و یا بخشی از توان راکتیو را جبران کرد [۲۷].

در [۲۸] بردارهای توان IPT مانند بردارهای توان لحظه ای و توان راکتیو اصلاح می شوند. در این حالت بردار توان صفر و حقیقی اضافه شده و به عنوان توان لحظه ای در نظر گرفته می شود. توان راکتیو لحظه ای به توان های صفر مجازی، آلفا و بتا تقسیم می شود. این توان ها با یک فرمول به یکدیگر وابسته هستند.

یک تبدیل مختصات متفاوت IPT در [۲۹-۳۰] پیشنهاد شده است. اجزای جریان و ولتاژ از مختصات $\alpha-\beta$ به مختصات p-q تبدیل می شود. چندین تبدیل در فرمول p-q مورد نیاز است. در مرجع [۳۱]، بردارهای جریان و ولتاژ به سیستم مختصات دکارتی دیگری به نام تبدیل MNO تبدیل می شوند. سپس توان ها در صفحه MNO محاسبه می شوند. در [۳۲] تجزیه اجزای جریان از طریق مؤلفه های توالی مثبت، منفی و صفر انجام می شود که دارای پیچیدگی و محاسبات زیادی می باشد. در تمام روش های ذکر شده مشکلاتی مانند عدم امکان استفاده در حالتی که ولتاژ شبکه نامتعادل و یا دارای هارمونیک باشد، محاسبات زیاد و تبدیل های پیچیده ریاضی و یا نیاز به ساختار آشکار ساز توالی مثبت مولفه اصلی پیچیده احساس می شود. تمامی این موارد به تنهایی برای تخریب تشخیص دقیق هارمونیک های جریان و عدم عملکرد مناسب فیلتر فعال کافی می باشد.

در این مقاله راهکاری جدید جهت استخراج هارمونیک جریان بار بر مبنای تئوری توان لحظه ای ارائه می گردد که در تمام وضعیت های ولتاژ شبکه (متقارن، نامتقارن، هارمونیک، هارمونیک و نامتقارن بصورت همزمان) عملکرد مناسبی از خود نشان می دهد و همزمان از سادگی اجرا، قابل اعتماد بودن، بار محاسباتی مناسب و عدم نیاز به پردازنده قوی و گران قیمت برخوردار است، نکته دیگر که در این روش حائز اهمیت است استحکام روش پیشنهادی در مقابل تغییرات فرکانس ولتاژ شبکه است.

از سوی دیگر جهت افزایش پاسخ دینامیکی سیستم از یک کنترلر PIDA^{۱۳} جهت شارژ لینک dc استفاده شده است. روند ارائه مقاله بدین صورت می باشد که در بخش ۲ ساختار

¹⁵ point of common coupling

¹⁶ total harmonic distortion

¹³ Proportional Integral Derivative Acceleration

¹⁴ shunt active power filters

$$q = v_{\alpha} i_{\beta} - v_{\beta} i_{\alpha} \quad (4)$$

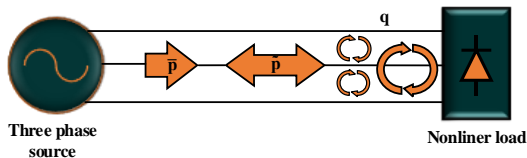
$$\begin{pmatrix} p \\ q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_{\alpha} & v_{\beta} \\ -v_{\beta} & v_{\alpha} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{pmatrix} \quad (5)$$

در این معادلات v_x مقدار لحظه‌ای ولتاژ مؤلفه x مقدار لحظه‌ای جریان مؤلفه x توان اکتیو لحظه‌ای و q توان راکتیو لحظه‌ای می‌باشند.

شکل (۲) نحوه‌ی مبادله مؤلفه‌های متوسط و ضربان توان‌های اکتیو و راکتیو را در سیستم سه فاز با بار غیرخطی نشان می‌دهد. توجه کنید که وجود مؤلفه‌های هارمونیک در ولتاژ و جریان، باعث ایجاد ضربان در توان می‌گردد. بنابراین مقدار لحظه‌ای توان‌های اکتیو و راکتیو از دو مؤلفه متوسط (ثابت) و ضربانی تشکیل می‌گردد. در شکل (۲) علامت \bar{x} نشان دهنده مؤلفه متوسط و علامت \tilde{x} نشان دهنده ضربان (مقدار لحظه‌ای منهای مقدار متوسط) می‌باشد. همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود، مؤلفه متوسط توان اکتیو در همه زمان‌ها از منبع به بار منتقل می‌شود، در حالی که مؤلفه ضربان توان اکتیو در بخشی از زمان از منبع به بار و در بخشی از زمان از بار به منبع منتقل می‌گردد. توان راکتیو موجب ایجاد جریان‌های گردشی بین هادی‌های فازها شده و نمایانگر هیچ گونه انتقال توانی (لحظه‌ای و متوسط) از منبع به بار نمی‌باشد. در سیستم‌های سه فاز متعادل (چه بدون هارمونیک و چه با هارمونیک) مقدار متوسط توان لحظه‌ای راکتیو (q) برابر توان راکتیو بوده، که از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$Q = \bar{q} = 3V_1 I_1 \sin \varphi \quad (6)$$

که در آن V_1 مقدار مؤثر هارمونیک اصلی ولتاژ، I_1 مقدار مؤثر هارمونیک اصلی جریان و φ اختلاف زاویه بین ولتاژ و جریان می‌باشد.



شکل (۲): نحوه مبادله مؤلفه‌های توان

۴- ساختار روش پیشنهادی

الگوریتم کنترلی پیشنهادی جهت استخراج جریان مرجع در شکل (۳) نشان داده شده است.

بلوک کنترلی وظیفه دارد جریان‌های مرجع را برای جبران هارمونیک‌های جریان شبکه تولید کند و همچنین وظیفه ثابت نگهداشتن ولتاژ لینک DC را برعهده دارد. در این شکل $V_{DC-Link}$ و $C_{DC-Link}$ به ترتیب خازن و ولتاژ لینک DC می‌باشند. فیلتر برای تأمین مؤلفه‌های ضربان توان لحظه‌ای و مؤلفه‌ی ثابت توان راکتیو نیازی به منبع توان نداشته و در نتیجه وجود تنها یک عنصر ذخیره‌سازی برای رد و بدل نمودن مؤلفه ضربان توان در فیلتر کافی خواهد بود. در هنگام اتصال فیلتر فعال به شبکه خازن لینک DC از طریق دیویدهای معکوس IGBT¹⁷ ها شارژ می‌گردد. برای جلوگیری از ایجاد ضربه جریان و از بین رفتن کلیدها، از یک مدار راه انداز نرم استفاده می‌شود.

۳- تئوری P-Q

در سال ۱۹۸۳ Akagi و دیگران تئوری تعمیم یافته توان راکتیو لحظه‌ای ($p-q$) در سیستم‌های سه فاز را ارائه نمودند. این تئوری بر اساس مقادیر لحظه‌ای توان سه فاز بنا شده و در مدارهای سه سیمه و چهار سیمه، حالت پایدار و حالت گذرا و هر شکل موج دلخواه ولتاژ و جریان برقرار می‌باشد. تئوری $p-q$ برای محاسبه مؤلفه‌های مختلف توان لحظه‌ای از تبدیل جبری (تبدیل Clarke) ولتاژها و جریان‌های سه فاز از مختصات $a-b-c$ به مختصات $\alpha-\beta-0$ استفاده می‌کند.

معادلات (۱) و (۲) نحوه تبدیل ولتاژها و جریان‌های سه فاز را به قاب $\alpha-\beta$ برای سیستم سه سیمه نشان می‌دهند. توجه کنید که در سیستم سه سیمه جمع جبری ولتاژها و جریان‌ها صفر بوده و در نتیجه مؤلفه‌ی صفر، حذف می‌گردد.

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

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

نحوه محاسبه هر یک از مؤلفه‌های توان لحظه‌ای در روابط (۳) تا (۵) نشان داده شده است.

$$p = v_{\alpha} i_{\alpha} + v_{\beta} i_{\beta} \quad (3)$$

¹⁷ Insulated Gate Bipolar Transistor

می‌شود. کلیه محاسبات در قاب α - β انجام می‌شود که در آن ولتاژهای سه فاز اندازه‌گیری شده با استفاده از تبدیل کلارک از قاب مرجع abc همانطور که در پایین نمایش داده شده است به قاب ایستا α - β منتقل می‌شوند:

$$T_{\alpha\beta} = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin\theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{pmatrix} \quad (7)$$

θ یک زاویه دلخواه است و در اینجا بصورت $\theta = 0$ در نظر گرفته می‌شود. ولتاژ شبکه تحریف شده را در قاب α - β می‌توان بصورت زیر نمایش داد که یک جزء مولفه اصلی ولتاژ شبکه $v_{g(f)}$ و یک جزء مولفه هارمونیک ولتاژ شبکه $v_{g(h)}$ می‌باشد.

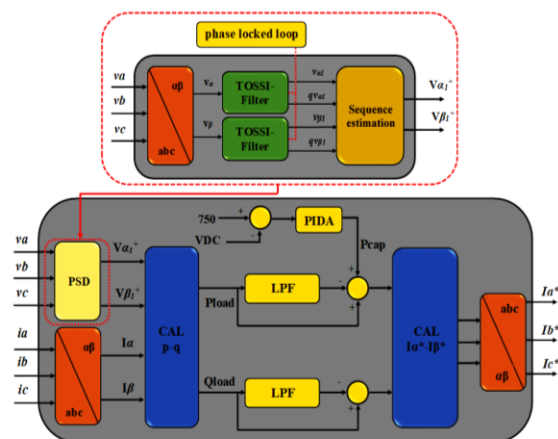
$$\begin{bmatrix} v_{g\alpha} \\ v_{g\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{g\alpha(f)} + v_{g\alpha(h)} \\ v_{g\beta(f)} + v_{g\beta(h)} \end{bmatrix} \quad (8)$$

برای استخراج مولفه اساسی، ولتاژ شبکه از فیلتر انتگرالی مرتبه سوم TOSSI عبور می‌کند، همانطور که در مراجع [۳۳-۳۴] فیلتر مبتنی بر انتگرال‌گیر مرتبه سوم پاسخ‌های حالت پایدار، گذرا و همچنین پاسخ دینامیکی بهتری را نسبت به فیلترهای مرتبه دوم ارائه می‌دهد. همانطور که در تصویر مشخص است، متناسب با فرکانس زاویه‌ای که فیلتر بر روی آن تنظیم می‌شود مولفه مورد نظر را از سیگنال ورودی استخراج می‌کند. علاوه بر این یک سیگنال دیگر در خروجی فیلتر وجود دارد که این سیگنال از نظر اندازه برابر سیگنال مولفه اصلی است ولی ۹۰ درجه عقب‌تر از آن می‌باشد. بر این اساس می‌توان دامنه مولفه اساسی مد نظر را نیز بصورت زیر بدست آورد:

$$U_{1m} = \sqrt{u_1^2 + (ju_1)^2} \quad (10)$$

در اینجا سرعت زاویه‌ای مورد نظر (ω_n) بر روی فرکانس مولفه اساسی تنظیم می‌شود که این عمل توسط یک حلقه قفل شونده فاز^{۱۸} PLL صورت می‌پذیرد. در ساختار فیلتر ۲ ضریب با عنوان k_1 و k_2 مشاهده می‌شود. متغیر k_1 انتخاب‌پذیری فیلتر را مشخص می‌کند و در واقع ضریبی برای تعیین پهنای باند می‌باشد. پارامتر k_2 تعیین کننده پاسخ زمانی فیلتر می‌باشد و در واقع دینامیک فیلتر را تعیین می‌کند.

ساختار پیشنهادی را می‌توان به دو بخش کلی تفکیک کرد: الف) استخراج توالی مثبت مولفه اصلی ولتاژ، ب) استخراج جریان مرجع بر اساس تئوری توان لحظه‌ای.



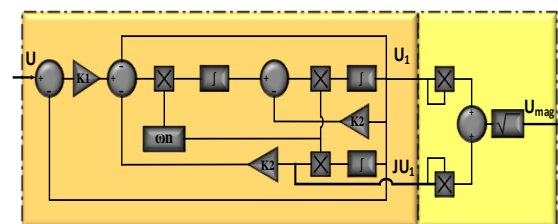
شکل (۳): الگوریتم ساختار پیشنهادی

۴-۱- استخراج توالی مثبت مولفه اصلی ولتاژ

از آنجایی که ولتاژ شبکه نیز در اکثر مواقع دارای اعوجاج 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 جبران سازی مطلوب هارمونیک جریان بار، در الگوریتم پیشنهادی از اجزای توالی مثبت مولفه اصلی ولتاژ جهت محاسبات استفاده می‌شود. فرایند استخراج توالی مثبت مولفه اصلی ولتاژ را می‌توان به دو بخش تقسیم کرد:

(A) بلوک استخراج مولفه اصلی ولتاژ،

(B) بلوک استخراج توالی مثبت.

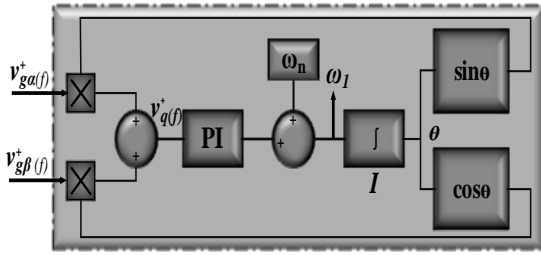


شکل (۴): بلوک استخراج کننده مولفه اصلی ولتاژ با استفاده از پیش فیلتر TOSSI

۴-۱-۱- بلوک استخراج مولفه اصلی ولتاژ

در این قسمت دو بلوک اصلی وجود دارند: (۱) فیلتر انتگرالی مرتبه سوم TOSSI، (ب) حلقه قفل شونده فاز (PLL). همانطور که در شکل (۴) نشان داده شده است، در ابتدا مولفه اصلی ولتاژ توسط یک فیلتر TOSSI استخراج

¹⁸ phase locked loop



شکل (۵): بلوک دیاگرام حلقه قفل شوند فاز PLL

بنابراین ولتاژ تخمینی محور q (یعنی V_{funq}^+) به یک کنترل کننده PI اعمال می شود و خروجی آن به فرکانس اسمی $(\omega_n = 2\pi f)$ اضافه می شود تا فرآیند قفل اولیه تسریع شود و در نتیجه فرکانس اصلی $\omega_{(fun)}$ به دست آید. با استفاده از مدل سیگنال کوچک PLL ارائه شده در [۵۰]، تابع انتقال حلقه به صورت به دست می آید.

$$F(S) = \frac{\theta}{\theta^*}(S) = \frac{(k_{ppll} + k_{ipll}/s)(1/s)}{1 + (k_{ppll} + k_{ipll}/s)(1/s)} = \frac{2\delta\omega_c s + \omega_c^2}{s^2 + 2\delta\omega_c s + \omega_c^2} \quad (14)$$

θ^* و زاویه فاز واقعی و مرجع هستند، ω_c فرکانس قطع و k ضریب میرایی است. از رابطه (۱۴)، پارامترهای PI یعنی $k_{ppll} = 2\omega_c\delta$ و $k_{ipll} = 2\omega_c$ به صورت k_{ppll} و k_{ipll} به دست می آید. برای پاسخ بهینه، پارامترهای ω_c و δ به ترتیب 31.4 rad/s و 0.707 به دست می آیند.

۴-۱-۲- بلوک استخراج توالی مثبت PSD

حال که مولفه اصلی ولتاژ در قاب α - β بدست آمده است به وسیله بلوک دیاگرام نمایش داده شده در شکل (۶)، اقدام به استخراج اجزا توالی مثبت مولفه اصلی ولتاژ می کنیم. این روش از نظریه اجزای متقارن لحظه ای جهت استخراج توالی مثبت بهره می برد. رابطه بین ولتاژ شبکه و اجزا توالی مثبت آن بصورت زیر می باشد.

$$v_{\alpha}^+ = \frac{1}{2} [v_{\alpha} - jv_{\beta}] \quad (15)$$

$$v_{\beta}^+ = \frac{1}{2} [jv_{\alpha} + v_{\beta}] \quad (16)$$

عملگر J جهت ایجاد تغییر فاز است ($J = e^{-j(\pi/2)}$) به گونه ای که 90° تاخیر را در خروجی نسبت به ورودی ایجاد می کند.

بر این اساس ابتدا ضریب k_1 تنظیم می شود و سپس k_2 جهت دستیابی به دینامیک مناسب تنظیم می شود. تابع انتقال فیلتر TOSSI به صورت زیر بدست می آید:

$$T(S) = \frac{u_1}{u}(S) = \frac{k_1\omega_n^2 s}{s^3 + k_2\omega_n s^2 + (k_1+1)\omega_n^2 s + k_2\omega_n^3} \quad (11)$$

$$T(S) = \frac{j u_1}{u}(S) = \frac{k_1\omega_n^3}{s^3 + k_2\omega_n s^2 + (k_1+1)\omega_n^2 s + k_2\omega_n^3} \quad (12)$$

فرآیند استخراج اجزای توالی که تاکنون مورد بحث قرار گرفته است بر این فرض استوار است که فرکانس سیستم ثابت است. هنگامی که فرکانس سیستم نوسان می کند، فرکانس تشدید فیلترهای TOSSI با فرکانس سیگنال ورودی مطابقت ندارد. این منجر به تضعیف سیگنال ورودی و تغییر فاز غیر ضروری در سیگنال خروجی می شود. برای اطمینان از استخراج دقیق اجزای توالی حتی تحت نوسانات فرکانس شبکه، لازم است فرکانس فرآیند استخراج را همگام سازی کرد.

بنابراین، یک سیستم حلقه بسته که روش پیشنهادی را با تغییرات فرکانس تطبیق می دهد، در این جا استفاده می شود. این امر با استفاده از یک PLL برای تخمین فرکانس سیستم و سپس اعمال فرکانس تخمینی به فیلترهای TOSSI استخراج کننده توالی مثبت به عنوان فرکانس تشدید همانطور که در شکل (۵) نشان داده شده است به دست می آید. θ زاویه فاز بردار ولتاژ PCC را نشان می دهد. هنگامی که فرکانس تخمینی PLL به عنوان فرکانس تشدید کننده برای فیلترهای TOSSI استفاده می شود، عملکرد استخراج کننده توالی مثبت مولفه اصلی نیز به کارکرد PLL بستگی دارد. بنابراین، انتخاب ضرایب انتگرالی (k_{ipll}) و تناسبی (k_{ppll}) مناسب برای کنترل کننده PI داخلی PLL ضروری است. در شکل (۵)، توالی مثبت مولفه اصلی ولتاژ PCC در قاب α - β (یعنی $v_{\alpha fun}^+$ و $v_{\beta fun}^+$) به جای ولتاژهای PCC واقعی استفاده شده است. با استفاده از $v_{\alpha fun}^+$ و $v_{\beta fun}^+$ مؤلفه محور q قاب d-q در حال چرخش همزمان که در شکل (۵) نشان داده شده است به صورت زیر برآورد می شود:

$$v_{funq}^+ = v_{\alpha fun}^+ \sin \theta + v_{\beta fun}^+ \cos \theta \quad (13)$$

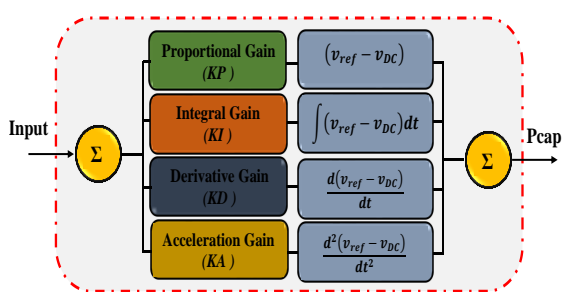
¹⁹ Positive sequence detector (PSD)

ولیکن این امر زمان گذار را افزایش می‌دهد و نوع کنترلر در میزان آورشوت و زمان رسیدن به حالت پایدار بسیار مهم می‌باشد، از این‌رو استفاده از کنترلر PIDA (Proportional Integral Derivative Acceleration) علاوه بر کاهش آورشوت و کاهش زمان گذر می‌تواند کنترل نرم‌تر نوسانات لینک dc را به‌همراه داشته باشد.

مراحل جهت ثابت نگاه‌داشتن ولتاژ لینک DC به این صورت است که: ولتاژ اندازه‌گیری شده از لینک DC با یک ولتاژ مرجع مقایسه می‌گردد سپس سیگنال خطای بدست آمده به یک کنترلر PIDA وارد می‌شود و در خروجی کنترلر توان جبران‌سازی که جهت ثابت نگهداشتن ولتاژ لینک dc نیاز است تولید می‌شود و در نهایت این مقدار به مقدار مولفه نوسانی توان اکتیو جهت جبران‌سازی اضافه می‌شود. کنترلر PIDA شکل توسعه یافته‌ای از کنترلر PID است. اصطلاح اضافی (A) به معنی شتاب است این عبارت جدید باعث می‌شود که یک شبکه حلقه بسته سریع‌تر (زمان ماندگاری کمتر) همراه با آورشوت کمتر پاسخ دهد [۳۶-۳۸]. در شکل (۷) بلوک دیاگرام داخلی کنترلر PIDA آورده شده است. بنابراین می‌توان نوشت:

$$p_{cap} = k_p(v_{ref} - v_{DC}) + k_i \int (v_{ref} - v_{DC}) dt + k_d \frac{d(v_{ref} - v_{DC})}{dt} + k_a \frac{d^2(v_{ref} - v_{DC})}{dt^2} \quad (19)$$

که در آن v_{ref} ولتاژ مرجع، v_{DC} ولتاژ لینک dc، k_p ضریب تناسبی و k_i ضریب انتگرالی، k_d ضریب مشتق گیر، k_a ضریب شتاب کنترلر PIDA می‌باشد.

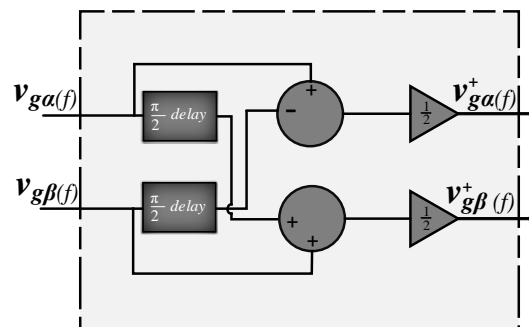


شکل (۷): کنترلر کننده PIDA

حال می‌توان نوشت:

$$p_{ref} = \underbrace{p_{load} - p_{tossi}}_{\tilde{p}} + p_{cap} \quad (20)$$

Sequence Estimation



شکل (۶): بلوک استخراج کننده توالی مثبت

حال اگر به ورودی این مدار مولفه اصلی ولتاژ استخراج شده توسط TOSSI را بدهیم می‌توانیم در خروجی توالی مثبت مولفه اصلی را داشته باشیم. به این ترتیب:

$$v_{\alpha(f)}^+ = \frac{1}{2} [v_{\alpha(f)} - Jv_{\beta(f)}] \quad (17)$$

$$v_{\beta(f)}^+ = \frac{1}{2} [Jv_{\alpha(f)} + v_{\beta(f)}] \quad (18)$$

تا به اینجای کار توالی مثبت مولفه اصلی ولتاژ استخراج شده است و با توجه به این مولفه می‌توان بر اساس تئوری توان لحظه‌ای اقدام به استخراج مولفه‌های هارمونیک‌های جریانی بار نمود و در نهایت جریان مرجع را جهت کنترل فیلتر فعال موازی تولید کرد.

۲-۴- استخراج جریان مرجع بر اساس تئوری توان لحظه‌ای
جریان‌های مرجع در فیلتر فعال موازی از دو بخش تشکیل می‌شود.

۱- سیگنال‌های جبرانی استخراجی از تئوری توان لحظه‌ای

۲- سیگنال‌هایی جهت ثابت نگهداشتن ولتاژ لینک DC.

از آنجایی که SAPF توان متوسط اکتیوی به شبکه تزریق نمی‌کند نیازی به منبع تولید کننده توان اکتیو ندارد و صرفاً می‌توان از یک عنصر ذخیره‌ساز انرژی مانند خازن جهت تبادل بخش نوسانی توان استفاده کرد، اما از آنجا که فیلتر فعال خود دارای تلفاتی مانند تلفات سوئیچینگ، هدایت، عناصر پارازیت و ... می‌باشد، لذا مقداری توان متوسط اکتیو از سمت شبکه دریافت می‌کند از این رو برای ثابت نگاه‌داشتن ولتاژ لینک dc این تلفات توسط جریان مرجع تولیدی باید جبران شود. باید توجه داشت در لحظه راه‌اندازی مقدار قابل توجهی توان متوسط اکتیو جهت شارژ خازن از شبکه کشیده می‌شود هرچند جهت کنترل این جهش ناگهانی از مدار راه انداز نرم استفاده شده است،

$$L_{series} = \frac{\sqrt{3} m v_{DC_link}}{12\delta f_{sw} \Delta i} \quad (25)$$

که در آن f_{sw} و Δi به ترتیب فرکانس سوئیچینگ و ریپل مجاز جریان می‌باشد. δ ضریب اضافه بار است (در اینجا برابر با ۱.۲ در نظر گرفته می‌شود). محاسبه سلف بر مبنای محدود کردن جریان SAPF در محدوده قابل قبول، کوچکتر از ۵٪ می‌باشد.

۵-۳- طراحی خازن لینک dc

بر اساس تغییرات انرژی ذخیره شده می‌توان نوشت:

$$\Delta E = 0.5 C_{DC_link} (v_{DC_link}^2 - v_{DC_link_ref}^2) \quad (26)$$

$$C_{DC_link} = \frac{3 v_g \delta i_{shunt} \Delta t}{0.5 (v_{DC_link}^2 - v_{DC_link_ref}^2)} \quad (27)$$

Δt زمان بازیابی ولتاژ لینک DC می‌باشد، بهتر است مقدار خازن را کمی بزرگتر از مقدار محاسبه شده انتخاب کنید و همچنین از خازن‌ها به صورت موازی استفاده شود.

۶- نتایج مطالعات انجام شده

به منظور صحت‌سنجی طرح پیشنهادی شبیه‌سازی کاملی شامل فیلتر فعال موازی به همراه آشکار ساز توالی مثبت مولفه اصلی ولتاژ پیشنهادی و کنترلر PIDA در محیط Matlab-Simulink انجام شده‌است. روش پیشنهادی جهت جبران هارمونیک جریان و توان راکتیو مورد بررسی قرار گرفته‌است. جهت تولید هارمونیک جریان از یک پل دیودی سه فاز به همراه یک بار مقاومتی در سمت DC آن، به عنوان بار غیرخطی استفاده شده‌است. پارامترهای انتخاب شده در جدول شماره ۱ نمایش داده شده‌است.

جدول (۱): پارامترهای SAPF

	ولتاژ شبکه	۲۸۰	V
شبکه AC	فرکانس	۵۰	Hz
	مولفه اصلی		
	فرکانس سوئیچینگ	۱۰	KHz
SAPF	ولتاژ لینک dc	۷۵۰	V
	سلف خروجی اینورتر	۳.۷	mH
	مقاومت بار	۲۰	Ω

۶-۱- نتایج شبیه‌سازی

۶-۱-۱- عملکرد استخراج کننده دنباله مثبت

همان طور که در بخش قبل توضیح داده شد بر اساس قانده تئوری توان لحظه‌ای توان‌های اکتیو و راکتیو آنی از روابط توضیح داده شده استخراج می‌شوند، توان اکتیو از دو مولفه ثابت و نوسانی تشکیل شده‌است، جهت استخراج جریان جبرانی برای حذف هارمونیک‌های بار، نیاز به استخراج قسمت نوسانی توان اکتیو داریم همچنین می‌توان تمام و یا بخشی از توان راکتیو را جبران کرد. مطابق شکل (۳) برای این منظور از یک فیلتر پایین گذر استفاده می‌شود.

۵- طراحی عناصر سیستم

با ارجاع به مرجع [۳۹] می‌توان محاسبات زیر را در مورد طراحی فیلتر فعال موازی انجام داد. از آنجایی که بار غیرخطی توسط یک یکسوساز سه فاز شبیه سازی شده‌است بنابراین این:

$$i_g = \sqrt{\frac{2}{3}} i_{load} \quad (21)$$

این جریان از نظر شکل موج نزدیک به شکل موج مربعی می‌باشد، پس مولفه اصلی آن برابر است با:

$$i_{g_fun} = \sqrt{\frac{6}{\pi}} i_{load} \quad (22)$$

حال دامنه جریان خروجی SAPF که برابر با هارمونیک جریان بار است را می‌توان از رابطه زیر بدست آورد.

$$i_{shunt} = \sqrt{i_g^2 - i_{g_fun}^2} = i_h \quad (23)$$

۵-۱- ولتاژ لینک dc

SAPF باید اجزای جریان هارمونیک و راکتیو بار را جبران کند. برای تولید توان راکتیو، ولتاژ خروجی SAPF باید بیشتر از پیک ولتاژ خط شبکه باشد. بر این اساس، معادله زیر می‌تواند ولتاژ DC-link مناسب را برآورده کند:

$$v_{DC_link} = \frac{2\sqrt{2} v_g}{m} \quad (24)$$

که در آن v_g ولتاژ فاز و m شاخص مدولاسیون اینورتر است که کوچکتر از ۱ می‌باشد. (در اینجا m برابر با ۰.۸۶۷ در نظر گرفته می‌شود).

۵-۲- طراحی سلف فیلتر (series inductor)

جهت کاهش ریپل جریان خروجی فیلتر فعال و همچنین کاهش ریپل‌های ناشی از کلیدزنی، از یک سلف سه‌فاز بصورت سری در خروجی SAPF استفاده شده‌است. از رابطه (۲۶) می‌توان با دقت مناسبی مقدار سلف SAPF را محاسبه کرد.

میزان THD ولتاژ خروجی PSD پیشنهادی در هرکدام از سناریوهای انجام شده در جدول ۲ آورده شده است.

۶-۱-۲- تحلیل در حالت پایدار سیستم

در این قسمت برای ارزیابی عملکرد الگوریتم جدید پیشنهادی، نتایج شبیه‌سازی در چهار بخش مختلف مورد بررسی قرار گرفته است: در بخش اول ولتاژ شبکه بصورت متقارن در نظر گرفته شده است، بخش دوم ولتاژ شبکه دارای هارمونیک و در نهایت در بخش سوم ولتاژ شبکه بصورت نامتقارن مورد بررسی قرار گرفته است. روابط (۲۹) الی (۳۱) مشخصات ولتاژهای اعمال شده را نشان می‌دهد.

۶-۱-۲-۱- ولتاژ شبکه متعادل (THD = 0.00%)

$$\begin{aligned} v_{ga} &= 310 \sin(\omega t) \\ v_{gb} &= 310 \sin(\omega t - 120) \\ v_{gc} &= 310 \sin(\omega t + 120) \end{aligned} \quad (28)$$

۶-۱-۲-۲- ولتاژ شبکه با تحریف هارمونیک (THD= 25.00%)

$$\begin{aligned} v_{ga} &= 310 \sin(\omega t) + 62 \sin(5\omega t) \\ &\quad + 46 \sin(7\omega t) \\ v_{gb} &= 310 \sin(\omega t - 120) \\ &\quad + 62 \sin(5(\omega t - 120)) \\ &\quad + 42 \sin(7(\omega t - 120)) \\ v_{gc} &= 310 \sin(\omega t + 120) \\ &\quad + 62 \sin(5(\omega t + 120)) \\ &\quad + 42 \sin(7(\omega t + 120)) \end{aligned} \quad (29)$$

۶-۱-۲-۳- ولتاژ شبکه نامتعادل (THD = 0.00%)

$$\begin{aligned} v_{ga} &= 310 \sin(\omega t) \\ v_{gb} &= 325 \sin(\omega t - 120) \\ v_{gc} &= 295 \sin(\omega t + 120) \end{aligned} \quad (30)$$

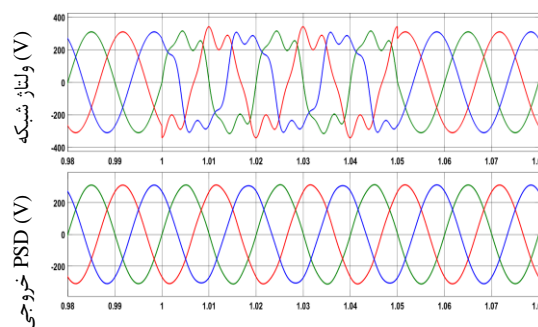
شکل موج‌های شبیه‌سازی در ادامه آمده است که شامل ولتاژ شبکه V_g ، جریان کشیده شده از شبکه i_g ، جریان بار i_{load} و شارژ لینک دی‌سی $V_{DC-link}$ می‌باشد. با توجه به استاندارد IEEE 519-2014 محدوده مجاز THD جریان شبکه باید کوچک‌تر از ۵٪ باشد بنابراین مینا عملکرد صحیح الگوریتم پیشنهادی براین اساس در نظر گرفته شده است.

جدول (۲): THD ولتاژ خروجی PSD پیشنهادی

متقارن	0.07
متقارن - هارمونیک	1.2
نامتقارن	0.02
نامتقارن - هارمونیک	1.18

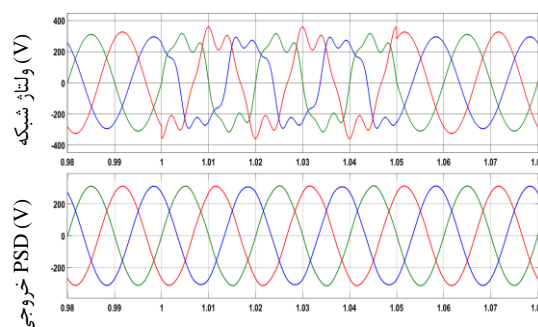
در شکل (۹) نتیجه مطالعه انجام شده تحت ولتاژ شبکه متقارن و دارای هارمونیک آورده شده است، ابتدا ولتاژ شبکه

شکل (۸) خروجی استخراج کننده توالی مثبت مولفه اصلی ولتاژ پیشنهادی را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود در حالی که ولتاژ شبکه متقارن، نامتقارن، دارای هارمونیک و یا حتی، نامتقارن همراه با هارمونیک می‌باشد، به خوبی توالی مثبت مولفه اصلی ولتاژ استخراج می‌گردد. از شکل (۸)



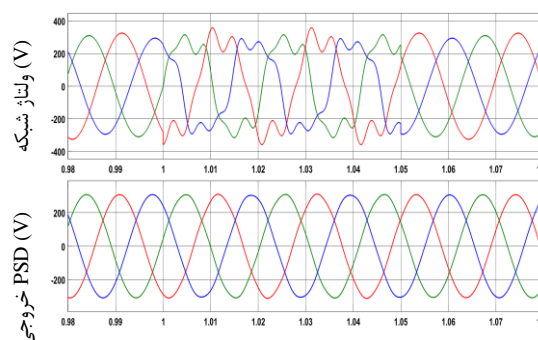
Time (t) (f=50HZ)

شکل (۸-۱): ولتاژ شبکه متقارن و هارمونیک



Time (t) (f=50HZ)

شکل (۸-۲): ولتاژ شبکه نامتقارن و هارمونیک



Time (t) (f=48HZ)

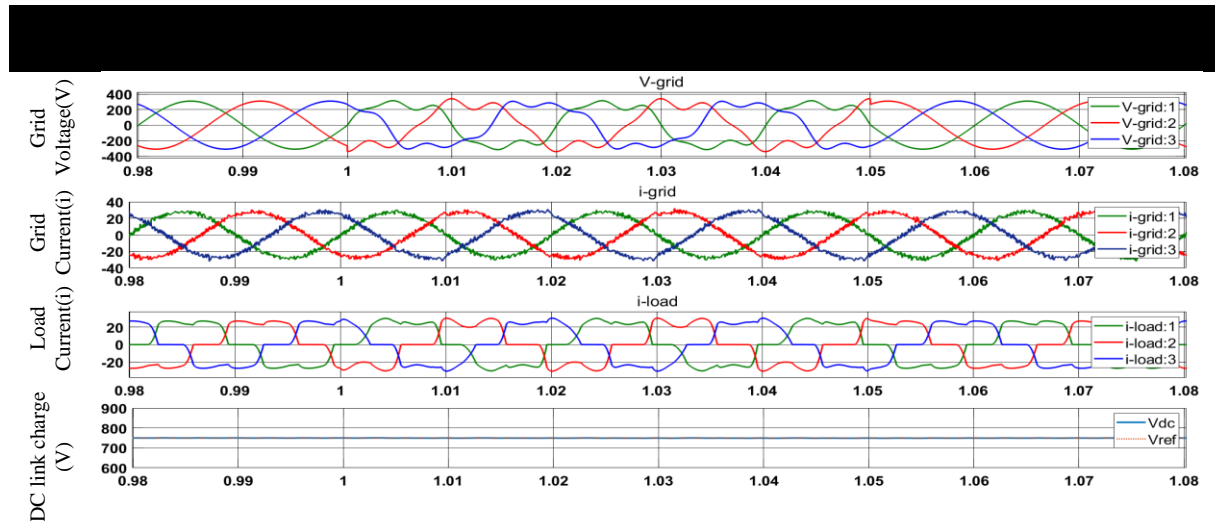
شکل (۸-۳): تغییرات فرکانس ولتاژ شبکه.

شکل (۸): شکل موج ولتاژ شبکه و توالی مثبت مولفه اصلی ولتاژ استخراج شده (۱) ولتاژ شبکه متقارن و مخدوش شده، (۲) ولتاژ شبکه مخدوش شده و نامتقارن، (۳) تغییر فرکانس ولتاژ شبکه

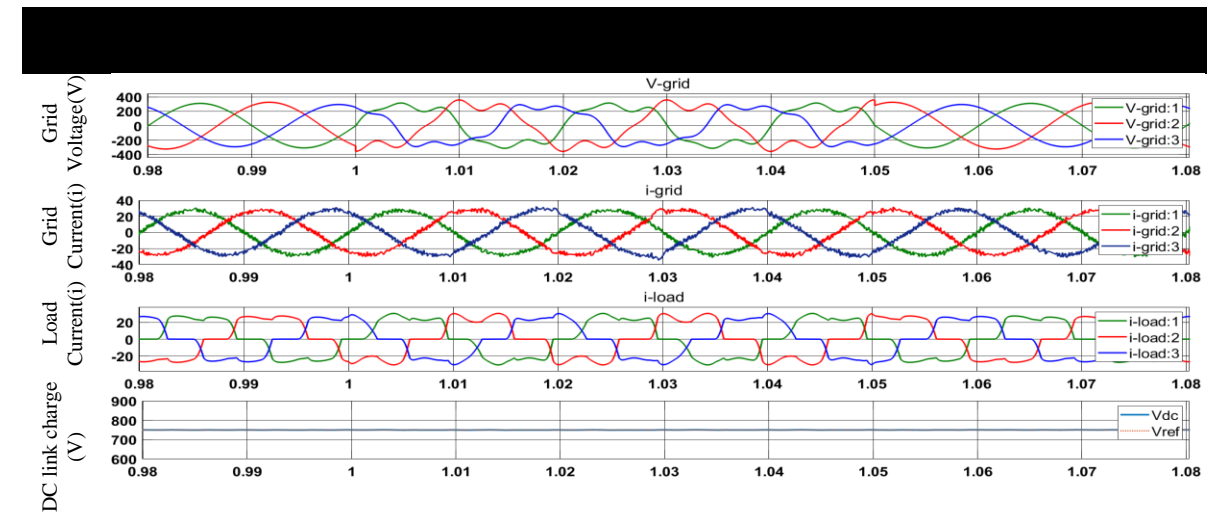
می‌توان به این نتیجه رسید که در تمام حالات ولتاژ شبکه PSD پیشنهادی عملکرد مناسبی از خود نشان می‌دهد.

مخدوش می‌شود THD جریان شبکه و جریان بار به ترتیب ۳.۴٪ و ۲۴.۹۲٪ می‌شود. در نتیجه در هر دو حالت میزان کاهش THD در محدوده مجاز کمتر از ۵٪ می‌باشد و می‌توان استنباط کرد الگوریتم پیشنهادی عملکرد مناسبی جهت کاهش THD جریان شبکه در حدود استاندارد تعیین شده دارد.

بصورت متقارن می‌باشد، سپس هارمونیک‌های ۵ و ۷ که بطور معمول هارمونیک‌های قالب می‌باشند 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 و در زمانی که ولتاژ شبکه



شکل (۹): نتایج شبیه سازی تحت شرایط حالت پایدار ولتاژ شبکه تحریف شده: الف) ولتاژ شبکه (V_g)، ب) جریان شبکه (i_g)، ج) جریان بار (i_{load})، د) شارژ لینک DC (V_{DC_link})

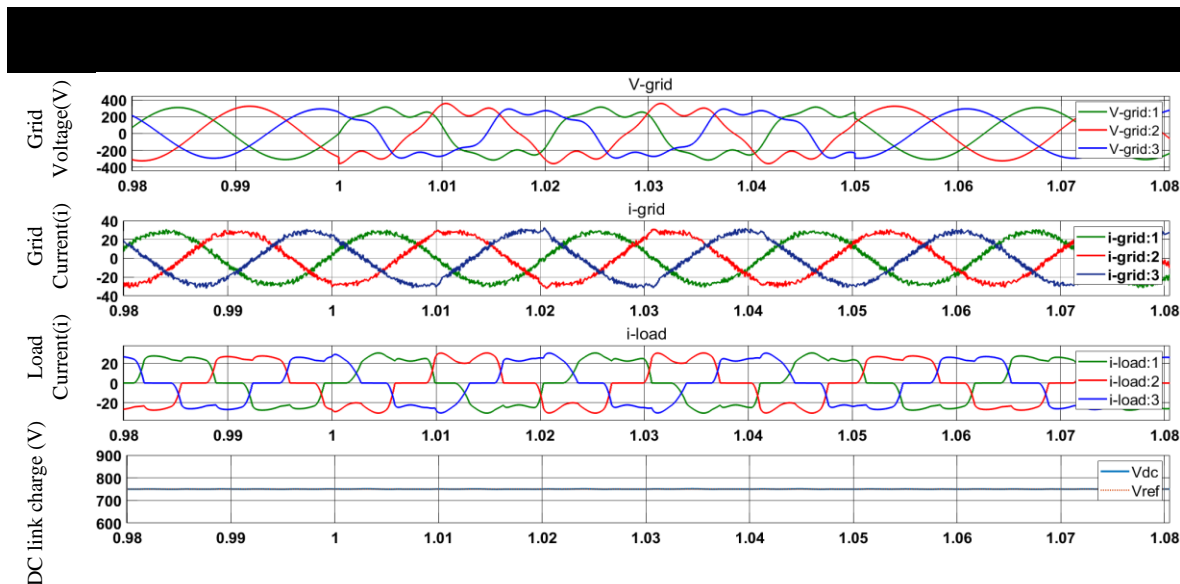


شکل (۱۰): نتایج شبیه سازی تحت شرایط حالت پایدار ولتاژ شبکه نامتقارن و تحریف شده: الف) ولتاژ شبکه (V_g)، ب) جریان شبکه (i_g)، ج) جریان بار (i_{load})، د) شارژ لینک DC (V_{DC_link})

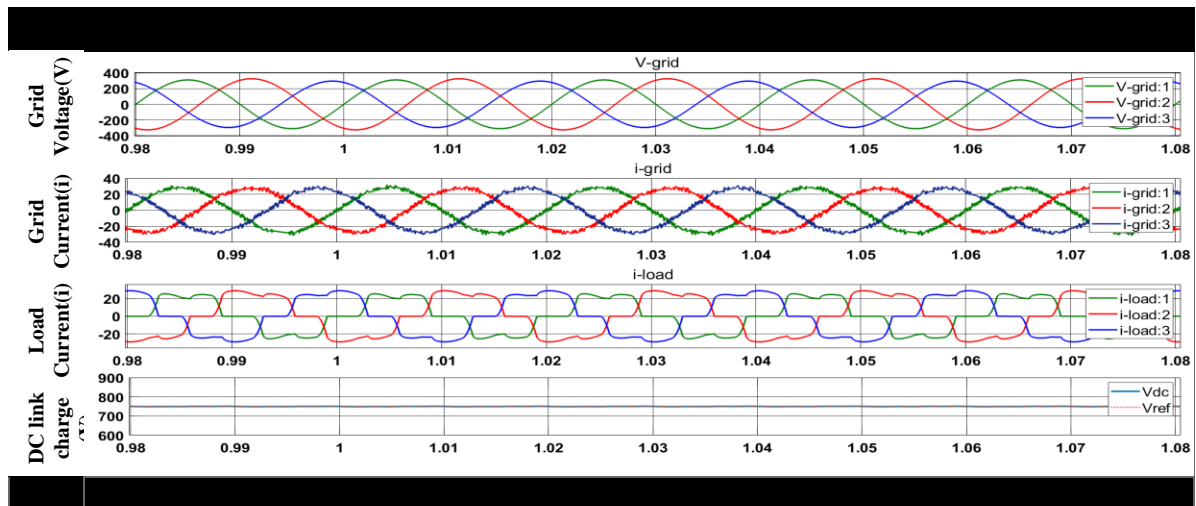
در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) عملکرد فیلتر در صورتی که از آشکار ساز توالی مثبت مولفه اساسی پیشنهادی استفاده نشود نشان داده شده است، همانطور که مشهود است، در حالی که ولتاژ شبکه دارای هارمونیک است، THD جریان سمت شبکه برابر با ۱۲.۰۸٪ و در صورتی که ولتاژ شبکه نامتقارن باشد THD جریان شبکه برابر با ۱۱.۳۱٪ می‌باشد. در نهایت می‌توان گفت، الگوریتم‌های p-q معمول تحت شرایطی که ولتاژ شبکه متقارن و متعادل می‌باشد بخوبی کار می‌کنند، اما در صورت مخدوش بودن و یا نامتعادل بودن ولتاژ شبکه عملکرد آن‌ها دقیق نمی‌باشد، از سوی دیگر مدارات معمول PSD دارای پیچیدگی پیاده‌سازی زیاد و همچنین نیاز به پیش فیلترهای متعدد جهت بدست آوردن دقت مناسب در هنگام کار کردن در شبکه غیر ایده‌آل هستند، علاوه بر این همانطور که مشاهده شد در تمام حالات ولتاژ شبکه کارکرد SAPF باعث کاهش قابل توجهی از هارمونیک جریان کشیده شده از شبکه بوده است و همچنین می‌توان مشاهده کرد که تقریباً ضریب توان واحد و متعادل کردن جریان بار در تمام موارد نیز حاصل شده است.

در شکل (۱۰) عملکرد روش پیشنهادی در حالتی که ولتاژ شبکه همزمان نامتقارن و دارای هارمونیک می‌باشد نشان داده شده است. ابتدا ولتاژ شبکه صرفاً 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 هارمونیک‌های ۵ و ۷ اضافه می‌شوند در این حالت THD جریان بار و جریان سمت شبکه ۲۵.۱٪ و ۳.۷۱٪ می‌باشد.

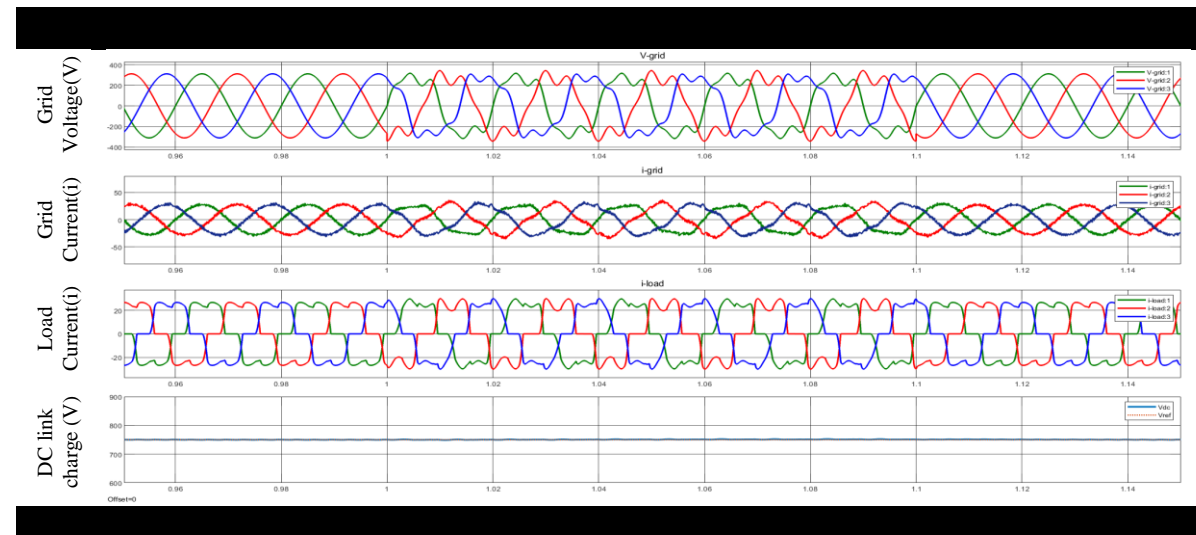
همچنین در شکل (۱۲) عملکرد روش پیشنهادی تحت شرایطی که ولتاژ شبکه همزمان از لحاظ دامنه و فاز دارای عدم تقارن است آورده شده است در این حالت THD جریان بار و جریان سمت شبکه به ترتیب ۳۰.۷۹٪ و ۳.۷٪ می‌باشد. مشاهده می‌شود در این حالت نیز همچنان THD جریان کشیده شده از شبکه در حد مجاز است و الگوریتم پیشنهادی در این حالت نیز عملکرد مطلوبی از خود نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود در تمام موارد ذکر شده جبران سازی هارمونیک‌های جریان بار بخوبی توسط روش پیشنهادی صورت گرفته است و جریان از دید شبکه دارای هارمونیک در حد استاندارد تعیین شده می‌باشد.



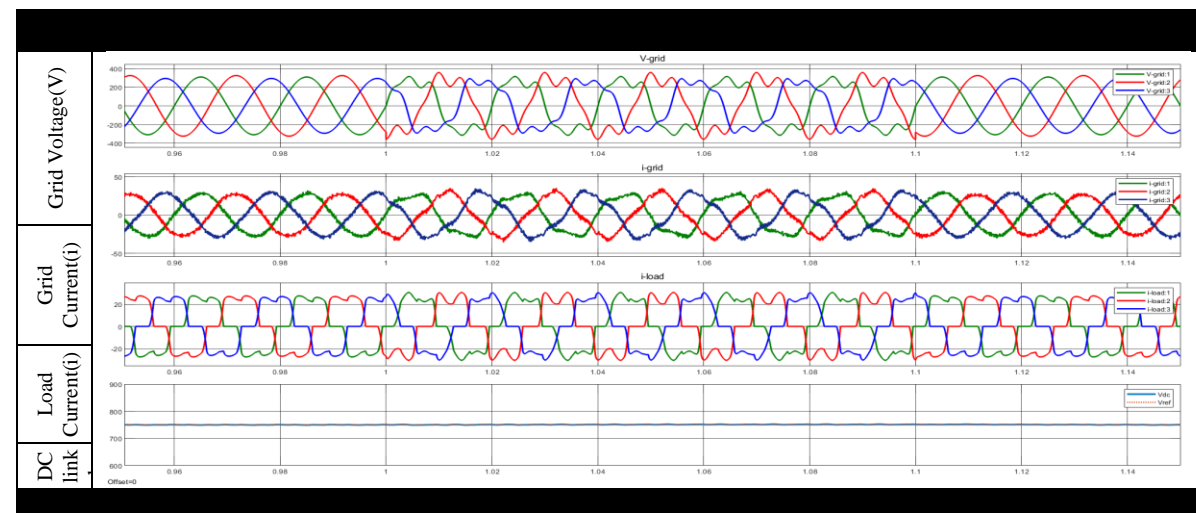
شکل (۱۱): نتایج شبیه سازی تحت شرایط حالت پایدار ولتاژ شبکه نامتقارن و تحریف شده: الف) ولتاژ شبکه (V_g)، ب) جریان شبکه (i_g)، ج) جریان بار (i_{load})، د) شارژ لینک DC (V_{DC_link})



شکل (۱۲): نتایج شبیه سازی تحت شرایط حالت پایدار نامتقارن (از نظر عدم تقارن دامنه و فاز همزمان) ($\text{phase } b=110^\circ, \text{phase } a=0^\circ$) (الف) ولتاژ شبکه (V_g)، (ب) جریان شبکه (i_g)، (ج) جریان بار (i_{load})، (د) شارژ لینک DC (V_{DC_link}) (phase c=250°)



شکل (۱۳): نتایج شبیه سازی تحت شرایط حالت پایدار متقارن و تحریف شده بدون PSD پیشنهادی: (الف) ولتاژ شبکه (V_g)، (ب) جریان شبکه (i_g)، (ج) جریان بار (i_{load})، (د) شارژ لینک DC (V_{DC_lin})



شکل (۱۴): نتایج شبیه سازی تحت شرایط حالت پایدار نامتقارن و تحریف شده بدون PSD پیشنهادی: (الف) ولتاژ شبکه (V_g)، (ب) جریان شبکه (i_g)، (ج) جریان بار (i_{load})، (د) شارژ لینک DC (V_{DC_link})

جدول (۳): THD جریان شبکه در شرایط استفاده و عدم استفاده از PSD پیشنهادی

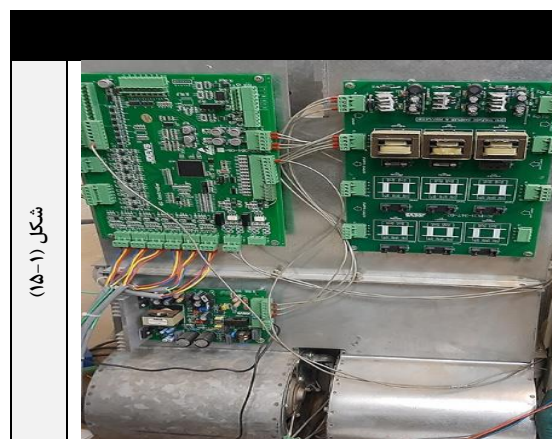
جریان شبکه	جریان بار	جریان شبکه	جریان بار	مقارن
۳۰.۴	۲۴.۹۶	۲.۹۴	۲۴.۹۶	مقارن
۱۲.۰۸	۲۴.۹۲	۳.۳۴	۲۴.۹۲	مقارن - هارمونیک
۱۱.۳۱	۲۵.۳۹	۳.۵۷	۲۵.۳۹	نامقارن
۱۲.۴۸	۲۵.۱۶	۳.۷۱	۲۵.۱۶	نامقارن - هارمونیک

۶-۲- نتایج تجربی

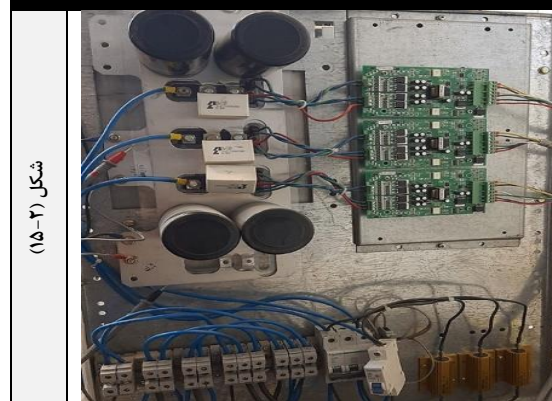
در شکل (۱۵) تصاویر نمونه صنعتی مورد آزمایش SAPF آورده شده است. در شکل (۱۶-۱) شکل موج جریان شبکه به همراه جریان بار در حالی که ولتاژ شبکه دارای هارمونیک می‌باشد نشان داده شده است، جهت درک بهتر مطلب خروجی آنالایزور در شکل (۱۸-۱) نشان دهنده میزان THD موجود بر روی هر کدام از فازهای ولتاژ شبکه می‌باشد همانطور که در شکل (۱۸-۲) مشخص است طیف هارمونیک‌های ۵ و ۷ بیشترین سهم را در این بین دارا می‌باشند. با توجه به شکل (۱۹-۱) که خروجی آنالایزور برای جریان شبکه است مشاهده می‌شود که هارمونیک‌های جریان بار که در شکل (۱۹-۲) آمده است به خوبی جبران سازی شده است و THD از ۲۵.۶٪ به ۳.۶٪ کاهش پیدا کرده است پیش‌تر در نتایج شبیه‌سازی نیز نتایج مشابه بدست آمده بود.

لازم به ذکر است به دلیل وجود محدودیت جهت تولید ولتاژ شبکه مخدوش شده، هارمونیک ولتاژ در تست عملی (THD=4.3%) استفاده شده است حال آن‌که در شبیه سازی‌ها میزان THD ولتاژ شبکه برابر با ۲۵٪ در نظر گرفته شده است.

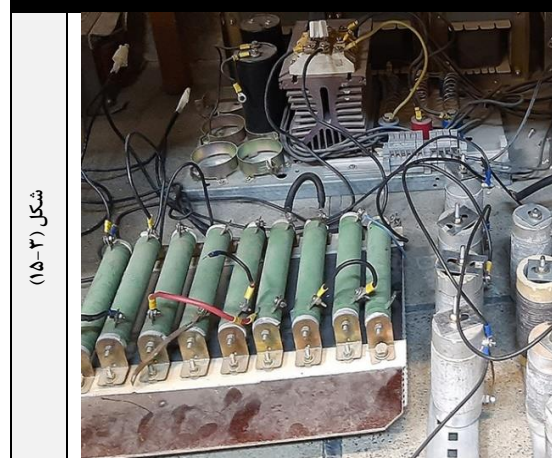
در شکل (۱۷-۱) شکل موج اسیلوسکوپ که بصورت همزمان جریان شبکه و جریان بار را در حالی که ولتاژ شبکه نامتقارن و مخدوش شده است، نشان می‌دهد همزمان در شکل (۲۰-۱) و (۲۰-۲) خروجی آنالایزور اندازه ولتاژ هر یک از فازها را نمایش می‌دهد همانطور که در شکل (۲۱-۱) مشخص است میزان THD جریان سمت شبکه در محدوده استاندارد می‌باشد و با توجه به شکل (۲۱-۲) که جریان سمت بار را نشان می‌دهد مشاهده می‌شود که THD جریان بار ۲۶.۷٪ است در حالی که بعد از جبران سازی THD سمت شبکه به ۳.۶٪ رسیده است که همچنان گواه بر عملکرد مناسب سیستم پیشنهادی در حالی که ولتاژ



شکل (۱۵-۱)



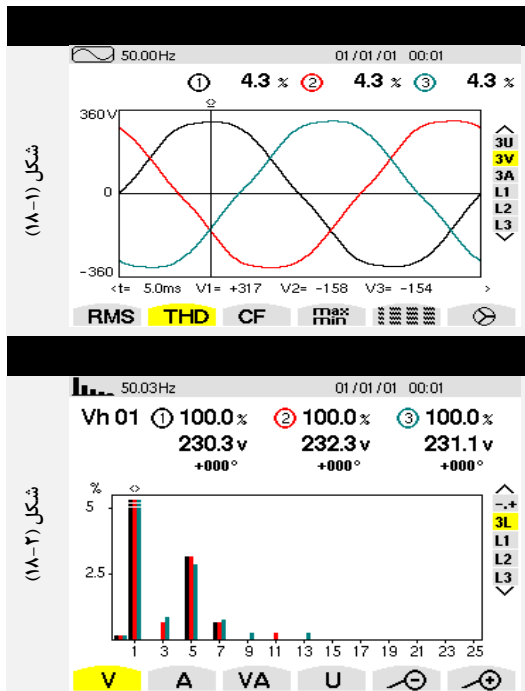
شکل (۱۵-۲)



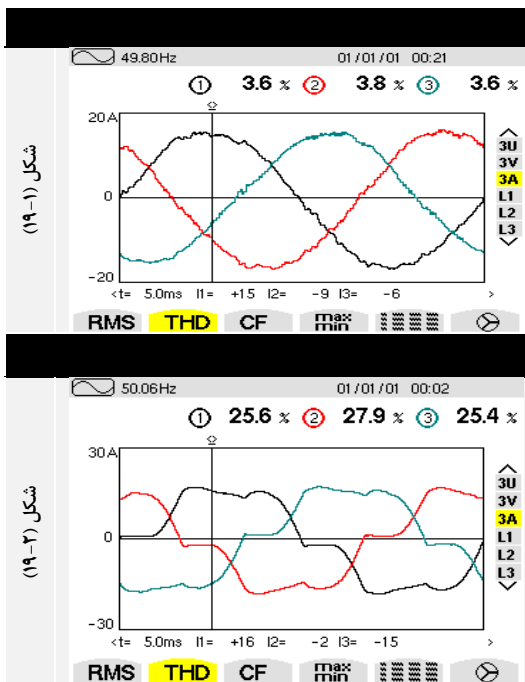
شکل (۱۵-۳)

شکل (۱۵): نمونه صنعتی SAPF: (۱) نمای روبرو، (۲) نمای پشتی، (۳) مدل بار غیرخطی

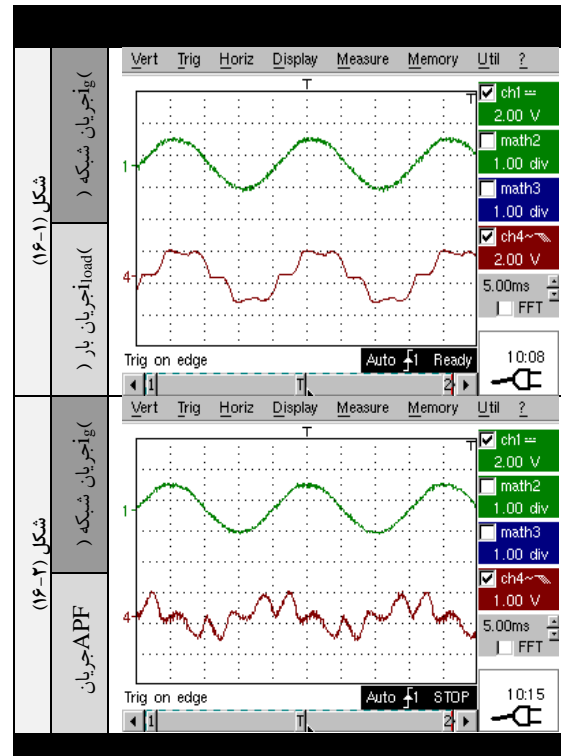
شبکه نامتقارن و مخدوش شده است می‌باشد. در شکل‌های (۱۶-۱۷) و (۱۶-۱۷) جریان شبکه و بار به همراه جریان جبران سازی تولیدی توسط SAPF آورده شده است.



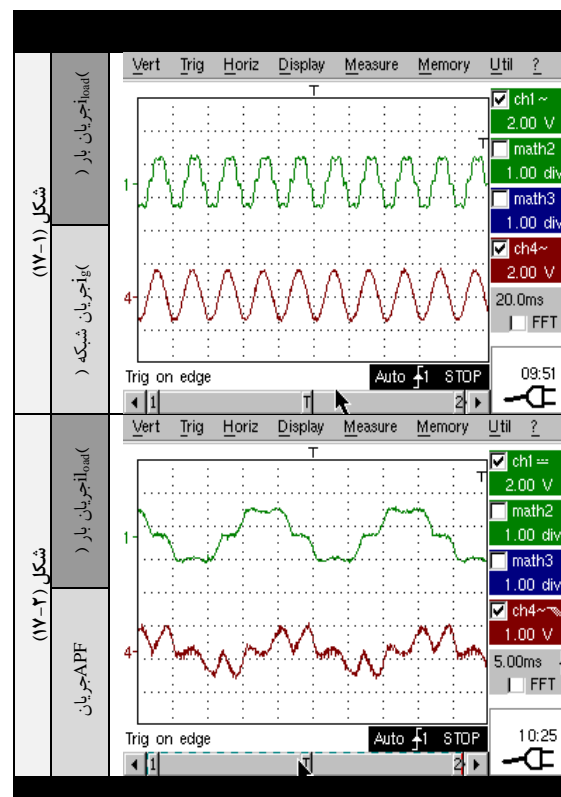
شکل (۱۸): تجزیه و تحلیل تجربی حالت پایدار با ولتاژ شبکه (متعادل و تحریف شده) شامل: (۱) ولتاژ شبکه (۲) شاخص هارمونیک ولتاژ شبکه



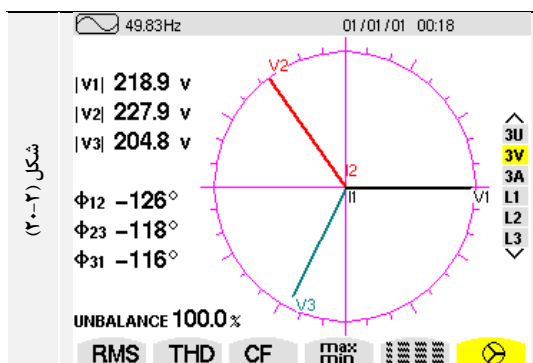
شکل (۱۹): تجزیه و تحلیل تجربی حالت پایدار با ولتاژ شبکه (متعادل و تحریف شده) شامل: (۱) جریان شبکه (i_g) (۲) جریان بار (i_{load})



شکل (۱۶): شکل موج‌های تجربی حالت پایدار با ولتاژ شبکه (متعادل و تحریف شده) شامل: (۱) جریان شبکه (i_g) و جریان بار (i_{load})، (۲) جریان شبکه (i_g) و جریان APF (i_{shunt})

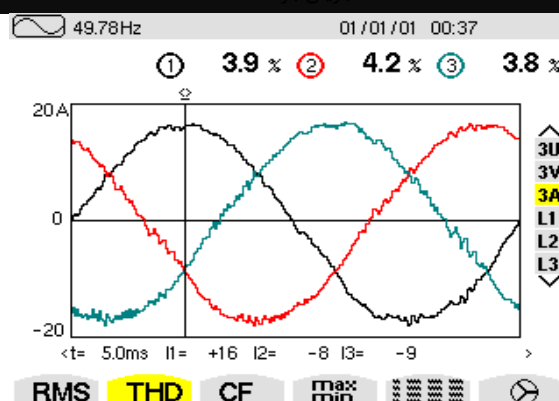
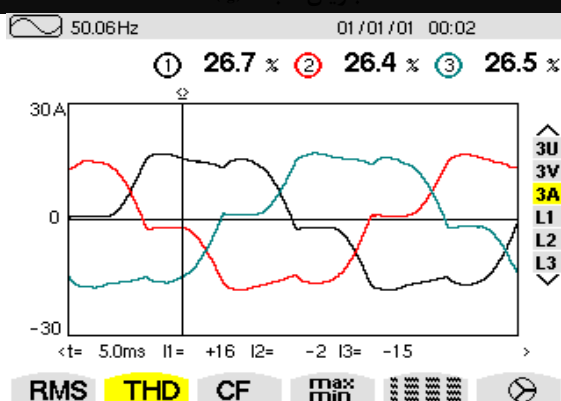
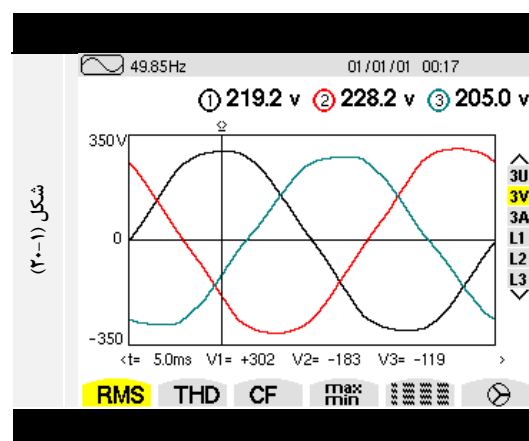


شکل (۱۷): شکل موج‌های تجربی حالت پایدار با ولتاژ شبکه (نامتقارن و تحریف شده) شامل: (۱) جریان شبکه (i_g) و جریان بار (i_{load})، (۲) جریان بار (i_{load}) و جریان APF (i_{shunt})



شکل (۲۰): تجزیه و تحلیل تجربی حالت پایدار با ولتاژ شبکه (نامتعادل و تحریف شده) شامل: (۱) ولتاژ شبکه (V_g).

(۲) نمودار ولتاژ شبکه



شکل (۲۱): تجزیه و تحلیل تجربی حالت پایدار با ولتاژ شبکه (نامتعادل و تحریف شده) شامل: (۱) جریان شبکه (i_g), (۲) جریان بار (i_{load})

پایداری لینک dc کوتاه‌تر شود همچنین آورشوت و خطای حالت ماندگار نیز کاهش یابد. الگوی پیشنهادی باعث استخراج مولفه های هارمونیک جریانی بار و در نهایت تولید جریان مرجع مستقل از وضعیت های ممکن در ولتاژ شبکه با دقت، سرعت، کیفیت و بار محاسباتی کم می‌شود. جهت صحت سنجی الگوریتم پیشنهادی نتایج شبیه سازی و بررسی های تجربی و عملیاتی در وضعیت های مختلف ولتاژ شبکه ارائه شده است که گواه بر استحکام و پاسخ مناسب روش پیشنهادی می‌باشد. از این روش به دلیل دینامیک مناسب، قابل اعتماد بودن، سادگی اجرا و استفاده در تمام ناهنجاری های ولتاژ شبکه می‌توان در مصارف صنعتی و بخصوص در موادی که از چندین بار غیر خطی با ساختار های مختلف استفاده شده است بهره برد.

۷- نتیجه گیری

در این مقاله جهت بهبود عملکرد SAPF بر اساس تئوری توان لحظه‌ای، یک الگوریتم جدید پیشنهاد شده است، این الگوریتم مبتنی بر یک استخراج کننده توالی مثبت مولفه اساسی ولتاژ می‌باشد، این امر با استفاده از فیلترهای TOSSI جهت استخراج مولفه اصلی و یک مدار ساده جهت جدا سازی توالی مثبت استفاده شده است. این ساختار علاوه بر سادگی اجرا، بار محاسباتی کم، امکان استفاده از SAPF را در تمام وضعیت هایی که ولتاژ شبکه ممکن است با آن مواجه شود مانند (اغتشاش هارمونیک، عدم تقارن، عدم تقارن و اغتشاش هارمونیک بصورت همزمان) را ممکن می‌سازد. علاوه بر آن با استفاده از یک کنترلر PID جهت ثبات ولتاژ لینک dc باعث شده است که زمان گذر جهت

مراجع

- [1] Q. Liu, Y. Ying, and M. Wu. "Extended harmonic resonance analysis of grid-connected converters considering the frequency coupling effect." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 69, no. 9 (2021): 9353-9363.
- [2] Y. Liu, J. Zheng, Q. Chen, Z. Duan, Y. Tian, M. Ban, and Z. Li. "MMC-STATCOM supplementary wide-band damping control to mitigate subsynchronous control interaction in wind farms." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 141 (2022): 108171.
- [3] W.U.K. Tareen, and S. Mekhief. "Three-phase transformerless shunt active power filter with reduced switch count for harmonic compensation in grid-connected applications." *IEEE Transactions on Power Electronics* 33, no. 6 (2017): 4868-4881.
- [4] R. Kumar, and H.O Bansal. "Hardware in the loop implementation of wavelet based strategy in shunt active power filter to mitigate power quality issues." *Electric Power Systems Research* 169 (2019): 92-104.
- [5] D. Li, T. Wang, W. Pan, X. Ding, and J. Gong. "A comprehensive review of improving power quality using active power filters." *Electric Power Systems Research* 199 (2021): 107389.
- [6] 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* 10 (2022): 72866-72878.
- [7] F II, I. "IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems." New York, NY, USA (1993): 1-1.
- [8] S.K. Khadem, M. Basu, and M.F. Conlon. "Harmonic power compensation capacity of shunt active power filter and its relationship with design parameters." *IET Power Electronics* 7, no. 2 (2014): 418-430.
- [9] M.S. Karbasforooshan, and M. Monfared. "Adaptive Self-Tuned Current Controller Design for an LCL-Filtered LC-Tuned Single-Phase Shunt Hybrid Active Power Filter." *IEEE Transactions on Power Delivery* 37, no. 4 (2021): 2747-2756.
- [10] M.S. Kouyakh, and A. Zafari. "Design a Photovoltaics (PV) System Interfaced by Hybrid Active Power Filter Based on the Load Current Frequency Orders Separation Idea in Distribution Network." *Journal of Modeling in Engineering* 19, no. 67 (2021): 1-11.
- [11] 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* (2023).
- [12] A.M. Massoud, S.J. Finney, and B.W. Williams. "Review of harmonic current extraction techniques for an active power filter." In *2004 11th International Conference on Harmonics and Quality of Power (IEEE Cat. No. 04EX951)*, pp. 154-159. IEEE, 2004.
- [13] M. Inci, M. Buyuk, and M. Tumay. "FFT based reference signal generation to compensate simultaneous voltage sag/swell and voltage harmonics." In *2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, pp. 1-5. IEEE, 2016.
- [14] A. Moradi, and M. Pichan. "A High Performance Harmonic Detection Method Based on Wavelet Transform for Shunt Active Power Filter with Experimental Verification." In *2022 13th Power Electronics, Drive Systems, and Technologies Conference (PEDSTC)*, pp. 544-548. IEEE, 2022.
- [15] K. Sheshyekani, G. Fallahi, M. Hamzeh, and M. Kheradmandi. "A general noise-resilient technique based on the matrix pencil method for the assessment of harmonics and interharmonics in power systems." *IEEE Transactions on Power Delivery* 32, no. 5 (2016): 2179-2188.
- [16] Terriche, Yacine, Saeed Golestan, Josep M. Guerrero, Djallel Kerdoune, and Juan C. Vasquez. "Matrix pencil method-based reference current generation for shunt active power filters." *IET Power Electronics* 11, no. 4 (2018): 772-780.
- [17] 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* 184 (2020): 106308.
- [18] V. Deshpande, P. Modi, and A.V. Sant. "Analysis of Levenberg Marquardt-ANN based reference current generation for control of shunt active power filter." *Materials Today: Proceedings* 62 (2022): 7104-7108.
- [19] S.R. Das, A.P. Hota, H.M. Pandey, and B.M. Sahoo. "Industrial power quality enhancement using fuzzy logic based photovoltaic integrated with three phase shunt hybrid active filter and adaptive controller." *Applied Soft Computing* 121 (2022): 108762.
- [20] L. Asiminoael, F. Blaabjerg, and S. Hansen. "Detection is key_Harmonic detection methods for active power _lter applications." *IEEE Industry Applications Magazine* 13, no. 4 (2007): 22-33.

- [21] V. Khadkikar, A. Chandra, and B.N. Singh. "Generalised single-phase pq theory for active power filtering: simulation and DSP-based experimental investigation." *IET Power Electronics* 2, no. 1 (2009): 67-78.
- [22] E. Sundaram, and M. Venugopal. "On design and implementation of three phase three level shunt active power filter for harmonic reduction using synchronous reference frame theory." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 81 (2016): 40-47.
- [23] H. Yi, F. Zhuo, F. Wang, Y. Li, and Z. Wang. "A single-phase harmonics extraction algorithm based on the principle of trigonometric orthogonal functions." *Journal of Power Electronics* 17, no. 1 (2017): 253-261.
- [24] Do. 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* 7 (2021): 98-104.
- [25] N. Geddada, S.B. Karanki, and M.K. Mishra. "Synchronous reference frame based current controller with SPWM switching strategy for DSTATCOM applications." In *2012 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*. IEEE. (2012): 1-6.
- [26] P. Verdelho, and V. Soares. "A unity power factor PWM voltage rectifier based on the instantaneous active and reactive current $i_{d/i_{q}}$ method." In *ISIE'97 Proceeding of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. IEEE 2 (1997): 411-416.
- [27] H. Akagi, Y. Kanazawa, and A. Nabae. "Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components." *IEEE Transactions on industry applications* 3 (1984): 625-630.
- [28] D.A. Marshall, F.P. Venter, and J.D. Van Wyk. "An evaluation of the instantaneous calculation of load current components." *European Transactions on Electrical Power* 3, no. 1 (1993): 53-59.
- [29] H. Kim, F. Blaabjerg, B. Bak-Jensen, and J. Choi. "Instantaneous power compensation in three-phase systems by using pqr theory." *IEEE Transactions on Power Electronics* 17, no. 5 (2002): 701-710.
- [30] 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* 32, no. 8 (2016): 6652-6660.
- [31] A. Alves Montanari. "Enhanced instantaneous power theory for control of grid connected voltage sourced converters under unbalanced conditions." (2017).
- [32] W. Li, X. Ruan, C. Bao, D. Pan, and X. Wang. "Grid synchronization systems of three-phase grid-connected power converters: A complex-vector-filter perspective." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 61, no. 4 (2013): 1855-1870.
- [33] R. Chilipi, N.A. Sayari, K.A. Hosani, and A.R. Beig. "Control scheme for grid-tied distributed generation inverter under unbalanced and distorted utility conditions with power quality ancillary services." *IET Renewable Power Generation* 10, no. 2 (2016): 140-149.
- [34] X. Guo, W. Wu, and Z. Chen. "Multiple-complex coefficient-filter-based phase-locked loop and synchronization technique for three-phase grid-interfaced converters in distributed utility networks." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 58, no. 4 (2010): 1194-1204.
- [35] G. Panda, S.K. Dash, and N. Sahoo. "Comparative performance analysis of Shunt Active power filter and Hybrid Active Power Filter using FPGA-based hysteresis current controller." In *2012 IEEE 5th India International Conference on Power Electronics (IICPE)*. IEEE (2012): 1-6.
- [36] N. Narkvitul, P. Ukakimaparn, P. Pannil, and T. Trisuwannawat. "Closed-form formulas for continuous/discrete-time PIDA controllers' parameters." In *2015 15th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*. IEEE. (2015): 326-329.
- [37] S. Jung, and R.C. Dorf. "Novel analytic technique for PID and PIDA controller design." *IFAC Proceedings Volumes* 29, no. 1 (1996): 1146-1151.
- [39] B. Singh, A. Chandra, and K. Al-Haddad. Power quality: problems and mitigation techniques. *John Wiley & Sons*, 2014.