

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۹/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۸/۲۴

## ارائه یک فیلتر فعال موازی بهینه‌شده برای بهبود کیفیت توان در یک کارخانه فولاد مبتنی بر تئوری P-Q توسعه‌یافته

محمد رضا انصاری<sup>۱\*</sup>، سید محمد صادق موسوی قهفرخی<sup>۲</sup>، شیلا صفایی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> استادیار گروه مهندسی برق، مرکز آموزش عالی شهرضا، دانشگاه اصفهان، ایران

m.r.ansari@shr.ui.ac.ir

<sup>۲</sup> دانشجوی کارشناسی گروه مهندسی برق، مرکز آموزش عالی شهرضا، دانشگاه اصفهان، ایران

mohammadsadeghmousavi1374@gmail.com

<sup>۳</sup> استادیار گروه مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سمیرم، اصفهان، ایران

shila\_safaei@yahoo.com

**چکیده:** امروزه مسئله کیفیت توان، پارامتری مهم برای مصرف‌کنندگان انرژی الکتریکی به حساب می‌آید. المان‌های غیرخطی همچون تجهیزات الکترونیک قدرت، کوره‌های قوس الکتریکی، دستگاه‌های فرکانس بالا و... دلیل اصلی وجود مشکلات مربوط به کیفیت توان و ایجاد هارمونیک در شبکه است. در این مقاله، یک روش جدید برای بهبود کیفیت توان در یک کارخانه فولاد ارائه شده است. در این روش، برای حذف هارمونیک‌های جریان و ولتاژ که کوره‌های القایی در یک کارخانه فولاد ایجاد می‌کنند، از یک فیلتر فعال موازی استفاده شده است. برای بهبود عملکرد فیلتر فعال موازی یک کنترل‌کننده جدید که بر اساس تئوری P-Q و کنترل‌کننده PID طراحی گردیده، پیشنهاد شده است. همچنین در راستای افزایش عملکرد مناسب فیلتر و بهبود شاخص‌های کیفیت توان، از یک روش بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی گرگ‌های خاکستری اصلاح‌شده برای تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده استفاده گردیده است. با شبیه‌سازی یک کارخانه فولاد ۱۰ باسه شامل ۶ کوره القایی و استفاده از فیلتر فعال موازی ارائه‌شده در محیط نرم‌افزار MATLAB/SIMULINK و آنالیز شاخص‌های هارمونیک، کارایی ساختار پیشنهادی در افزایش کیفیت توان شبکه قدرت نشان داده شده است.

**واژه‌های کلیدی:** کیفیت توان، فیلتر فعال موازی، تئوری P-Q توسعه‌یافته، کنترل‌کننده PID، الگوریتم گرگ‌های خاکستری، کارخانه فولاد.

## ۱. مقدمه

در عصر جدید، با پیشرفت چشمگیر تکنولوژی و برآورده شدن کمیت توان الکتریکی، اهمیت کیفیت توان روزبه‌روز افزایش پیدا کرده است؛ به طوری که بیشتر فعالیت‌های اجتماعی و اقتصادی به کیفیت و کارایی انرژی الکتریکی بستگی دارد. اصطلاح کیفیت توان<sup>۱</sup> الکتریکی به طور کلی برای ارزیابی و حفظ کیفیت مطلوب توان در سطح تولید، انتقال، توزیع و بهره‌برداری از توان الکتریکی AC استفاده می‌شود [۱]. به عبارتی دیگر، کیفیت توان یک حوزه تحقیقاتی است که روی مطالعه اختلالات در سیگنال‌های الکتریکی در خطوط برق تمرکز کرده است [۲]. از آنجا که کیفیت توان باید مطابق با پارامترهای خاصی به مصرف‌کنندگان تحویل داده شود، نظارت بر کیفیت توان، هم از دید مصرف‌کنندگان و هم از دید شرکت‌های توزیع، اهمیت ویژه‌ای دارد [۳].

در طول چند سال گذشته، با توجه به افزایش چشمگیر استفاده از بارهای غیرخطی، همچون تکنولوژی‌های الکترونیک قدرت، بارهای با توان راکتیو بالا، بارهای نامتقارن و نامتعادل [۴]، سیستم‌های گرمایشی القایی، کوره‌های قوس الکتریکی [۵] و...، بسیاری از مسائل مربوط به کیفیت توان مانند هارمونیک‌های جریان و ولتاژ و ضریب قدرت پایین در شبکه‌های برق ایجاد شده است [۶]. وجود هارمونیک در سیستم‌های الکتریکی باعث به وجود آمدن مشکلات متعددی می‌شود؛ از جمله: افزایش توان راکتیو بار [۷]، ایجاد رزونانس‌های سری و موازی [۸]، تداخل با دستگاه‌های کنترلی و سیستم‌های ارتباطی [۹]، گرمای بیش از حد کابل‌ها [۱۰] و از بین رفتن عایق‌ها و دی‌الکتریک‌ها [۱۱]، کاهش بازده و ایجاد گرما در ماشین‌ها [۱۲] و ترانسفورماتورها [۱۳]، سوء عملکرد در دستگاه‌های تبدیل انرژی (قطارهای برقی و...) [۱۴]، دستگاه‌های حفاظتی (رله‌ها، سوئیچ‌ها، جداکننده‌ها و...) [۱۵].

روش‌های متعددی برای حفظ کیفیت توان و مقابله با هارمونیک‌های جریان و ولتاژ وجود دارد که استفاده از فیلترها بهترین و معروف‌ترین روش است [۱۶]. در ابتدا فیلترهای منفعل یا پسیو به‌عنوان یک دستگاه جریان‌کننده برای کاهش هارمونیک‌های تولیدشده توسط بارهای غیرخطی استفاده می‌شد [۱۷]. این فیلترها برای تأمین کردن یک مسیر کم‌امپدانس برای هارمونیک‌ها و حفظ کیفیت توان مطلوب، به صورت ساده و کم‌هزینه طراحی شده‌اند. از آنجا که فیلترهای پسیو معایبی همچون تنظیم اشتباه، رزونانس یا تشدید و... داشتند، ایده فیلترهای فعال سری یا موازی ارائه شد.

فیلترهای فعال سال‌ها توسط محققان مورد مطالعه قرار گرفت و توسعه یافت و توپولوژی‌های متعددی از آن‌ها به صورت سری یا موازی یا هیبریدی با بارهای غیرخطی به کار گرفته شد [۶]. همچنین فیلترهای فعال را می‌توان با روش‌های مستقیم یا غیرمستقیم کنترل کرد. در روش کنترل مستقیم، اجزای هارمونیک‌های جریان بار استخراج و سپس به کنترل‌کننده به‌عنوان جریان مرجع ارسال می‌شوند. استخراج هارمونیک‌ها با استفاده از تئوری‌های توان [۱۸] و [۱۹]، تبدیل موجک [۲۰]، شبکه عصبی [۲۱] و... انجام می‌شود. از سوی دیگر، در روش کنترل غیرمستقیم، جریان ورودی را با ولتاژ بدون استفاده از هرگونه استخراج هارمونیک، سنکرون می‌کنند. از آنجا که این روش نیازمند فقط یک کنترل‌کننده برای تولید سیگنال‌های مرجع (برای تولید پالس سوئیچ‌های فیلتر فعال) است، ساده‌تر اجرا می‌شود. در واقع در حالت غیرمستقیم، فیلتر فعال به‌عنوان یک یکسوکننده<sup>۲</sup> فعال در نظر گرفته می‌شود که در آن ولتاژ DC و جریان AC باید کنترل شوند [۲۲]. این فیلترها به صورت گسترده استفاده می‌شوند؛ زیرا به طور مؤثری از اعوجاج جریان جلوگیری و توان راکتیو بار غیرخطی را تولید می‌کنند؛ در عین حال آن‌ها تجهیزاتی بسیار گران‌قیمت هستند [۶].

معروف‌ترین فیلترهای فعال، فیلترهای موازی بوده و تا امروز، فیلترهای فعال موازی متعددی با ساختارهای کنترلی مختلف توسط محققان ارائه شده است. در مرجع [۲۳]، یک الگوریتم پیش‌بینی مدل کلاسیک با فرکانس سوئیچینگ ثابت برای فیلتر فعال موازی بیان شده است. این راه‌حل به‌رغم وجود خروجی تعدیل‌شده، عملکرد دینامیکی را در سطح مناسبی حفظ می‌کند و با شبکه هماهنگ می‌شود. در مرجع [۷] به توپولوژی جدیدی با چهار سوئیچ دوپایه برای فیلتر فعال موازی اشاره می‌شود. با پیکربندی پیشنهادی این توپولوژی، فیلتر دارای اندازه حجمی کمتر و ساختاری سبک خواهد بود. همچنین پانگیراهی و همکاران استراتژی کنترلی بر اساس فیلتر کالمن را برای فیلتر فعال موازی پیشنهاد کرده‌اند. آن‌ها با تمرکز بر کاهش خطای ردیابی جریان، سعی در فیلتر مناسب‌تر هارمونیک‌های سیستم دارند [۲۴]. در مرجع [۲۵] نیز یک طرح کنترل تکرار سریع با حلقه‌های اصلاح هارمونیک در فیلتر فعال موازی سه فاز سه‌سیمه برای شبکه‌های توان پایین استفاده شده است. در صورتی که مرجع [۲۶] از روش کنترل تکرار گسسته برای سیستم‌های سه‌فاز چهارسیمه بهره می‌برد. این روش از کنترل RC اصلاح‌شده با پهنای باند کنترلی بهتری نسبت به کنترل RC معمولی برای کنترل فیلترهای

ولتاژ است؛ در نتیجه با توجه به کارهای گذشته می توان نوآوری های مقاله را به صورت زیر خلاصه کرد:

- ارائه ساختار کنترلی توسعه یافته جدید بر مبنای تئوری P-Q، کنترل کننده PID و الگوریتم بهینه سازی گرگ های خاکستری اصلاح شده که منجر به بهبود شاخص های کیفیت توان گردیده است.
- برخلاف اکثر کارهای گذشته که در آن از یک مدل بار غیرخطی ساده در شبیه سازی های فیلتر استفاده شده، در این مقاله، یک کارخانه فولاد ۱۰ باسه که دارای ۶ کوره القایی با دو ساختار متفاوت بوده و مبتنی بر اطلاعات واقعی است، مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج بهبود کیفیت توان توسط ساختار کنترلی پیشنهادی با شبیه سازی این کارخانه به دست آمده است؛ در نتیجه می توان بیان کرد که مدل ارائه شده برای حذف هارمونیک توسط فیلتر پیشنهادی به صورت کاربردی است.

بخش های بعدی مقاله بدین صورت تنظیم شده است: در بخش دوم، ساختار پیشنهادی فیلتر فعال ارائه شده در مقاله، بیان شده است. در بخش سوم، الگوریتم بهینه سازی مورد استفاده، شرح داده شده است. شبیه سازی کارخانه فولاد و فیلتر فعال با ساختار پیشنهادی به همراه نتایج شبیه سازی نیز در بخش چهارم آورده شده است. در پایان نیز نتیجه گیری نهایی بر اساس داده های به دست آمده بیان شده است.

## ۲. فیلتر فعال

مفهوم حذف هارمونیک ها با روش فیلترهای فعال، برای اولین بار در سال ۱۹۷۱ معرفی شد [۳۳]. از آنجا که فیلترهای فعال دارای اندازه کوچکی بوده و قابلیت جبران هارمونیک های جریان، ولتاژ و توان راکتیو را داشته و نیز از ایجاد رزونانس در سیستم جلوگیری می کنند، در طی چند سال گذشته توجه کاربران صنعتی را به خود جلب کرده اند [۳۴]. فیلترهای فعال می توانند به عنوان راه حل کاهش هارمونیک محلی در کنار یک بار غیرخطی قرار گیرند یا به صورت راه حل سراسری در نقطه اتصال مشترک به مدار متصل شوند؛ که این مکان بهینه معمولاً بر اساس عملکرد مطلوب فیلتر، ثبات شبکه، راندمان کاهش هارمونیک و هزینه انتخاب می شود [۳۵]. همچنین می توان از آن ها برای جبران سازی توان راکتیو و بهبود پروفایل ولتاژ شبکه استفاده کرد [۳۶].

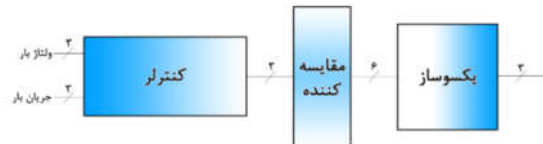
فعال موازی استفاده می کند. نویسندگان در مرجع [۲۷]، روی روش کنترل جریان دو حلقه ای برای فیلترهای فعال موازی کنترل دیجیتال از نوع LCL متمرکز شده اند. روش کنترلی شامل حلقه جریان شبکه و حلقه جریان اصلی است و یک روش مبتنی بر تکنیک روت-لوکاس و نمودار بود برای افزایش دقت جبران هارمونیک ارائه می کند. مقاله های [۲۸] و [۲۹] از فیلتر فعال چندسطحی برای از بین بردن هارمونیک ها و جبران توان راکتیو استفاده می کنند. پژوهش [۲۸] در فیلتر فعال چندسطحی از مبدل های پل سه فاز متصل به ترانسفورماتورهای تک فاز بهره می گیرد. ترتیب و آرایش ترانسفورماتورها این امکان را به جبران کننده می دهد تا از یک واحد dc پیوندی استفاده کند، که این امر باعث ساده تر شدن استراتژی کنترل و کاهش تعداد سنسورها می شود. مرجع [۲۹] نیز یک فیلتر فعال موازی سه فاز در سیستم های الکتریکی هواپیماهای برقی (یا اکثراً برقی) ارائه می دهد. نویسندگان در مرجع [۳۰] پنج پیکربندی رایج در فیلترهای فعال موازی اعمال شده به سیستم های توزیع سه فاز چهارسیمه را بررسی و مقایسه می کنند. به منظور ارزیابی کاربرد توپولوژی های مورد مطالعه، دو سناریو از بارهای چهارسیمه با توجه به سطح مؤلفه های هارمونیک توالی صفر بررسی شد. یک الگوریتم کنترلی تجزیه و تحلیل آنلاین (EMD<sup>۱</sup>) در مرجع [۳۱] به کار رفته است. این مقاله به کاربرد EMD در زمان واقعی برای کنترل فیلتر فعال موازی تحت بارهای متعادل یا نامتعادل می پردازد. در الگوریتم EMD برای جلوگیری از پیچیدگی محاسبات، از درونیاب های خطی استفاده می شود. مقاله [۳۲] نیز یک الگوریتم کنترلی ساده و بهبود یافته مبتنی بر الگوریتم گاوس-نیوتن را برای کنترل فیلتر فعال موازی سه فاز در سیستم های چهارسیمه با ترکیب پاره ای خطی و غیرخطی پیشنهاد می دهد.

در این مقاله نیز یک فیلتر فعال سه فاز سه سیمه برای بهبود کیفیت توان در یک کارخانه فولاد با سیستم توزیع ۱۰ باسه ارائه شده است. در این فیلتر سعی شده با توسعه تئوری P-Q و محاسبه توان های اکتیو از دست رفته در سمت باس DC یکسوکننده و افزودن آن به توان اکتیو در تئوری P-Q، جریان های مناسب تری برای مقایسه به منظور تولید پالس های مورد نیاز یکسوکننده فیلتر فعال ایجاد شود. در مدل پیشنهادی مقاله همچنین از الگوریتم بهینه سازی گرگ های خاکستری اصلاح شده برای تعیین توان تلفاتی و انتخاب بهینه پارامترهای یک PID کنترلر استفاده گردیده است. تابع هدف در الگوریتم بهینه سازی، به حداقل رساندن درصد THD<sup>۲</sup> جریان و

1. Empirical Mode Decomposition  
2. Total Harmonic Distortion

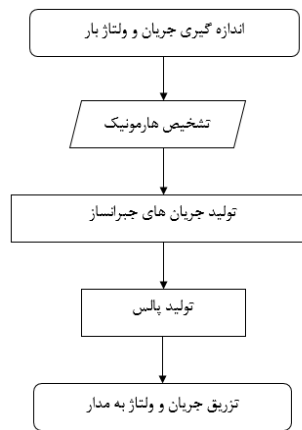
## ۱.۲. پیکربندی کلی فیلتر فعال

هدف اصلی فیلترهای فعال تزریق ولتاژ و جریان به مدار برخلاف هارمونیک ولتاژ و جریان بار است. آن‌ها از سه قسمت کنترلر، مقایسه‌کننده و یکسوکننده تشکیل شده‌اند. تشخیص هارمونیک‌های جریان و ولتاژ توسط قسمت کنترلر فیلتر صورت می‌پذیرد. پس از تشخیص میزان هارمونیک، طبق الگوریتم کنترلی اعمال‌شده به فیلتر فعال، جریان‌های مورد نیاز برای تولید پالس به قسمت مقایسه‌کننده ارسال می‌شود. مقایسه‌گر پس از دریافت جریان‌های جبران‌ساز از سمت کنترلر و مقایسه آن‌ها با جریان‌های خارج‌شده از فیلتر، پالس‌های مورد نیاز یکسوکننده را تولید می‌کند. یکسوکننده نیز با استفاده از انرژی ذخیره‌شده در سمت باس DC خود، ولتاژ و جریان جبران‌سازی را طبق پالس‌های دریافتی، به مدار تزریق می‌کند. پیکربندی کلی یک فیلتر فعال در شکل (۱) آورده شده است.



شکل (۱): پیکربندی کلی فیلتر فعال

همچنین عملکرد کلی فیلتر فعال نیز در طرح‌واره شکل (۲) قابل مشاهده است.

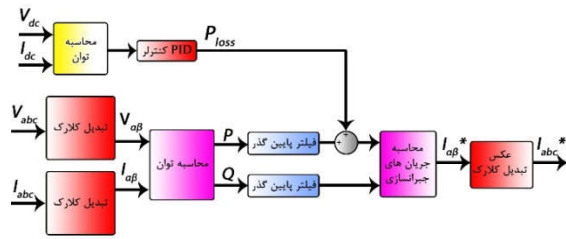


شکل (۲): طرح‌واره عملکرد کلی فیلتر فعال

## ۲.۲. کنترلر فیلتر فعال

اصلی‌ترین قسمت یک فیلتر فعال، کنترلر آن است؛ زیرا کنترلر وظیفه تشخیص هارمونیک‌های جریان و ولتاژ را عهده‌دار است و استراتژی اعمال‌شده به آن، نقش بسیار مهمی در بهبود عملکرد و ثبات فیلتر دارد. در این مقاله، تئوری P-Q، استراتژی انتخاب‌شده برای فیلتر فعال است و به‌منظور بهبود عملکرد فیلتر، این تئوری به‌صورت بهینه، توسعه داده شده است.

پیکربندی کنترلر فیلتر فعال پیشنهادی در شکل (۳) دیده می‌شود.



شکل (۳): پیکربندی کنترلر فیلتر فعال پیشنهادی

در سال ۱۹۸۳ میلادی، تئوری جدیدی برای کنترل فیلترهای فعال در سیستم‌های سه‌فاز با عنوان تئوری توان لحظه‌ای (به‌اختصار تئوری P-Q) ارائه شد [۳۷ و ۳۸]. این تئوری به‌منظور استخراج هارمونیک، ولتاژ و جریان لحظه‌ای بار را دریافت می‌کند. با استفاده از تبدیل کلارک ولتاژ و جریان لحظه‌ای از مختصات abc به مختصات  $\alpha\beta$  انتقال داده می‌شود. معادلات (۱) و (۲) انتقال ولتاژ و جریان لحظه‌ای با استفاده از تبدیل کلارک را بیان می‌کنند [۳۹].

$$\begin{bmatrix} V_{\alpha} \\ V_{\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \sqrt{\frac{3}{2}} & -\sqrt{\frac{3}{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} I_{\alpha} \\ I_{\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \sqrt{\frac{3}{2}} & -\sqrt{\frac{3}{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

پس از انتقال ولتاژ و جریان لحظه‌ای به مختصات  $\alpha\beta$ ، توان‌های لحظه‌ای اکتیو و راکتیو محاسبه می‌شوند [۴۰]. معادله (۳) بیان‌کننده این مرحله است.

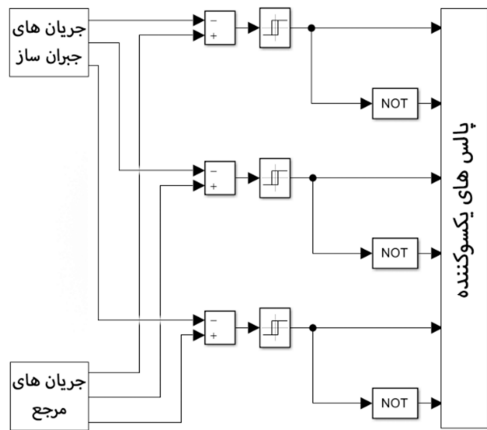
$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{\alpha} & V_{\beta} \\ -V_{\alpha} & V_{\beta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} \quad (3)$$

توان‌های لحظه‌ای اکتیو و راکتیو به‌دست‌آمده توسط یک فیلتر پایین‌گذر، فیلتر خواهند شد. سپس توان تلفاتی به توان اکتیو اضافه می‌شود. در قسمت بعد با استفاده از مقادیر ولتاژ لحظه‌ای و توان‌های اکتیو و راکتیو اصلاح‌شده، جریان‌های جبران‌ساز به دست می‌آید [۴۱]:

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{\alpha} & V_{\beta} \\ -V_{\alpha} & V_{\beta} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (4)$$

این جریان‌ها در مختصات  $\alpha\beta$  هستند. بنابراین با استفاده از عکس تبدیل کلارک به مختصات abc انتقال داده می‌شوند [۴۱].

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \sqrt{\frac{3}{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\sqrt{\frac{3}{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} \quad (5)$$



شکل (۵): بلوک مقایسه کننده فیلتر فعال

### ۴.۲. یکسوکننده فیلتر فعال

یکسوکننده فیلتر فعال شامل یک پل با سه بازو یا شش کلید الکترونیک قدرت و یک باس DC است. کلید مورد استفاده در پیکربندی فیلتر فعال از نوع  $GTO^2$  می باشد. این قسمت پس از دریافت پالس های مورد نیاز خود از قسمت مقایسه کننده، ولتاژ و جریان را از طریق یک فیلتر پسیو به مدار در نقطه اتصال تریقی می کند.

### ۳. الگوریتم بهینه سازی

#### ۱.۳. الگوریتم بهینه سازی گرگ خاکستری معمولی

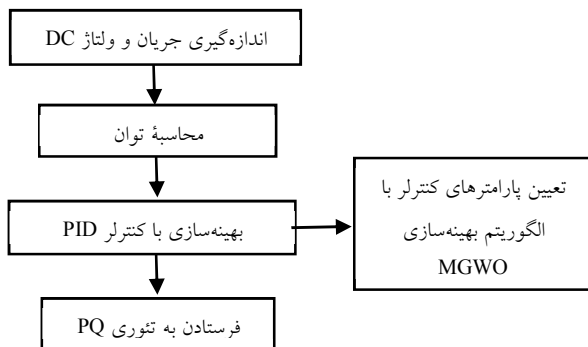
الگوریتم بهینه سازی گرگ خاکستری یا  $GWO^3$  یک الگوریتم هوش جمعی و فراابتکاری است که سید علی میرجلیلی و همکاران در سال ۲۰۱۴ ارائه کردند [۴۳]. الگوریتم  $GWO$ ، گرگ های خاکستری در سلسله مراتب اجتماعی شان به چهار گروه آلفا ( $\alpha$ )، بتا ( $\beta$ )، دلتا ( $\delta$ ) و امگا ( $\omega$ ) تقسیم می شوند. گروه  $\alpha$  شامل رهبرانی است که وظیفه دارند دستور شکار گروه های دیگر را صادر کنند. گرگ های خاکستری گروه های  $\beta$  و  $\delta$  به رهبران کمک می کنند و گرگ های گروه  $\omega$  کمترین رتبه را دارند [۴۳]. برای مدل سازی روند شکار گرگ های خاکستری به صورت ریاضی، سه قسمت محاصره طعمه، اکتشاف و شکار در کنار سلسله مراتب اجتماعی در نظر گرفته شده است. محاصره طعمه نیازمند بروز کردن موقعیت گرگ ها در اطراف طعمه است.

$$D = |C \cdot X_0(i) - X(i)| \quad (7)$$

$$X(i+1) = X_0(i) - A \cdot D \quad (8)$$

در کنترلر فیلتر فعال مبتنی بر تئوری P-Q کلاسیک، برای محاسبه توان تلفاتی، ولتاژ سمت باس DC یکسوکننده با مقدار ثابت ولتاژ DC مرجع جمع می گردد و سپس به یک PID کنترلر فرستاده شده و خروجی این PID کنترلر در تئوری P-Q با توان اکتیو جمع می شود [۶]. در این کنترلر، به دلیل ثابت بودن مقداری که برای ولتاژ DC مرجع در نظر گرفته می شود، در مواردی که رفتار غیرخطی کوره ها با استفاده از اطلاعات واقعی مدل سازی گردد، فیلتر عملکرد مناسبی نخواهد داشت و جبران سازی به صورت صحیح انجام نمی پذیرد. به همین دلیل در مدل پیشنهادی برای محاسبه توان تلفاتی، علاوه بر ولتاژ لحظه ای، از جریان لحظه ای سمت باس DC استفاده از معادله (۶)، توان اکتیو تلفاتی به دست می آید. به منظور کارایی بهتر تئوری، با استفاده از یک PID کنترلر مقدار مؤثر توان های لحظه ای به دست آمده، بهینه می شود. همچنین به منظور عملکرد مناسب تر کنترلر PID، ضرایب این کنترلر توسط الگوریتم بهینه سازی گرگ خاکستری اصلاح شده تعیین می شوند. تابع هدف در الگوریتم بهینه سازی، به حداقل رساندن درصد THD جریان و ولتاژ است. طرح واره گام به گام محاسبه توان تلفاتی در شکل (۴) آورده شده است.

$$P = V \times I \quad (6)$$



شکل (۴): طرح واره پیشنهادی گام به گام محاسبه توان تلفاتی

### ۳.۲. مقایسه کننده فیلتر فعال

شکل (۵) شامل پیکربندی مقایسه کننده فیلتر فعال یا بلوک کنترلر جریان هیستریزس<sup>۱</sup> است [۴۲]. مقایسه بین دو جریان در این بلوک انجام می شود. جریان های جبران ساز تولید شده توسط کنترلر فیلتر فعال با جریان های مرجع (جریان فیلتر) مقایسه می شود و پالس های مورد نیاز یکسوکننده تولید می شود.

2. Gate Turn-Off thyristor  
3. Grey Wolf Optimization

1. Hysteresis Current Control

رفع این مشکل و بهبود عملکرد الگوریتم از معیار فاصله وزنی که در معادله (۱۵) بیان شده است، استفاده می‌شود و مکان جدید نیز با توجه به معادله اصلاح‌شده (۱۶) به دست خواهد آمد.

$$\begin{aligned} w_1 &= A_\alpha * C_\alpha \\ w_2 &= A_\beta * C_\beta \\ w_3 &= A_\delta * C_\delta \end{aligned} \quad (15)$$

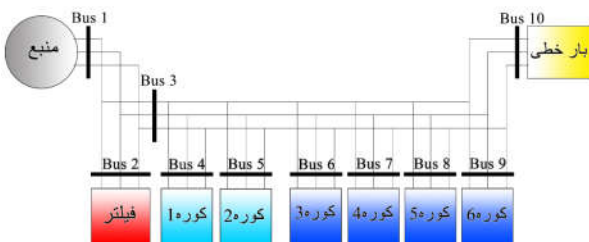
$$X(k+1) = \frac{w_1 * X_1 + w_2 * X_2 + w_3 * X_3}{3} \quad (16)$$

#### ۴. شبیه‌سازی و نتایج

در این مقاله برای نشان دادن کارایی فیلتر فعال ارائه‌شده در قسمت قبل، یک کارخانه فولاد ۱۰ باسه که دارای ۶ کوره القایی با دو ساختار متفاوت بوده و مبتنی بر اطلاعات واقعی است، به کار رفته و نتایج بهبود کیفیت توان با ساختار کنترلی پیشنهادی با شبیه‌سازی این کارخانه به دست آمده است. مشخصات کارخانه فولاد در قسمت بعدی ارائه شده است.

#### ۱.۴. توصیف کارخانه فولاد

سیستم مورد مطالعه در این مقاله، یک کارخانه فولاد ۱۰ باسه است. پست کارخانه فولاد از دو خط ۳۰ کیلوولتی تغذیه می‌شود. این پست به صورت یک منبع ۳۰ کیلوولت ۵۰ هرتز در باس ۱ مدل می‌شود. باس ۲ نیز شامل فیلتر فعال موازی است. بارهای الکتریکی این کارخانه فولاد (متصل به باس ۳) شامل ۶ کوره القایی، ۲ کوره گرمایی و خدمات عمومی کارخانه مثل نوارهای نقاله، روشنایی و قسمت‌های اداری (دفاتر) است. کوره‌های القایی از دو نوع متفاوت هستند. چهار کوره از نوع ۱ که به باس‌های ۶ تا ۹ متصل‌اند و دو کوره از نوع ۲ که در باس‌های ۴ و ۵ قرار گرفته‌اند. ترانسفورماتورهای توزیع خدمات عمومی و کوره‌های گرمایی با ضریب توان ۰/۸۶ و مصرف ۱۸۰۰ کیلووات، به دلیل اینکه سهم اندکی از کل انرژی مصرف‌شده در کارخانه را دارند و هیچ‌گونه اعوجاجی ایجاد نمی‌کنند، به عنوان یک بار خطی در باس دهم مدل شده‌اند. پیکربندی سیستم ۱۰ باسه کارخانه فولاد مورد مطالعه در شکل (۶) دیده می‌شود [۴۴].



شکل (۶): پیکربندی کامل کارخانه فولاد

$$A = 2a \cdot \text{rand}_1 - a \quad (9)$$

$$C = 2\text{rand}_2 \quad (10)$$

در معادلات فوق،  $i$  نشان‌دهنده تکرار فعلی است.  $A$  و  $C$  بردار ضرایب و  $X_0$  و  $X$  بردار مکان طعمه و گرگ هستند.  $\text{rand}_1$  و  $\text{rand}_2$  اعدادی تصادفی در بازه  $[0, 1]$  هستند. مؤلفه‌های بردار  $a$  به‌طور خطی در تکرارها از ۲ به ۰ کاهش می‌یابد.

$$\begin{aligned} D_\alpha &= |C_\alpha \cdot X_\alpha - X| \\ D_\beta &= |C_\beta \cdot X_\beta - X| \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} D_\delta &= |C_\delta \cdot X_\delta - X| \\ X_1 &= X_\alpha - A_\alpha \cdot D_\alpha \\ X_2 &= X_\beta - A_\beta \cdot D_\beta \end{aligned} \quad (12)$$

$$X_3 = X_\delta - A_\delta \cdot D_\delta \\ X(k+1) = \frac{X_1 + X_2 + X_3}{3} \quad (13)$$

در طول کل فعالیت یک رفتار ضروری به نام اکتشاف وجود دارد که به گرگ‌ها کمک می‌کند تا در مراحل اولیه در جست‌وجوی طعمه‌های سراسری بگردند و در مرحله آخر به موقعیت نزدیک‌تر حمله کنند. زمانی که نوبت به عملیات شکار می‌رسد، گرگ‌های  $\alpha$ ،  $\beta$  و  $\delta$  با داشتن دانش برتر در مورد مکان طعمه در نظر گرفته می‌شوند. این سه راه‌حل برتر باید برای گرگ‌های  $\omega$  ذخیره شوند تا مکان خود را نسبت به طعمه به‌روز کنند.

#### ۲.۳. الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری اصلاح‌شده

در الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری مقادیر مؤلفه‌های بردار  $a$  به‌طور خطی در تکرارها از ۲ به ۰ کاهش می‌یابد. از آنجا که این مسئله باعث به وجود آمدن تأثیرات بد بر روی همگرایی الگوریتم می‌شود و همگرایی الگوریتم را کاهش می‌دهد، الگوریتم بهینه‌سازی گرگ‌های خاکستری اصلاح‌شده یا  $MGWO^1$  پیشنهاد می‌گردد. در الگوریتم بهینه‌سازی  $MGWO$  به منظور تقویت اکتشاف، بهره‌برداری و میزان همگرایی  $GWO$ ، مؤلفه‌های بردار  $a$  به صورت معادله (۱۴) بیان می‌شود.

$$a = \zeta e^{(-\theta \times k)} \quad (14)$$

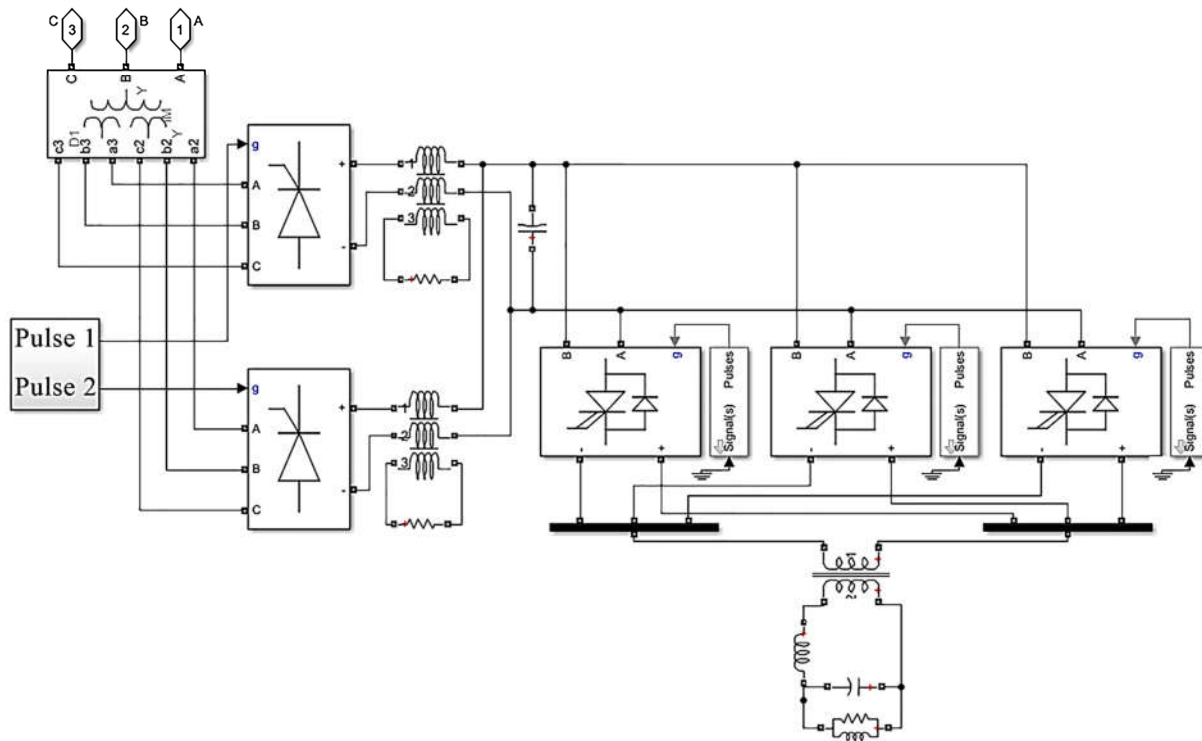
$\zeta$  و  $\theta$  دو پارامتر کنترلی برای رفتار مشخصه همگرایی الگوریتم  $GWO$  در تکرار  $k$ ام و برای هر نقطه هستند. علاوه بر این، با تبدیل بردار  $a$  به بردار غیرخطی تصادفی، می‌توان ویژگی الگوریتم را حفظ کرد و به همگرایی آن سرعت بخشید. همچنین در الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری معمولی، گرگ‌ها موقعیت خود را از سه گرگ  $\alpha$ ،  $\beta$  و  $\delta$  به‌روز می‌کنند. این کار منجر به همگرایی زودرس و کیفیت پایین در مورد مسائل بهینه‌سازی پیچیده خواهد شد. برای

یکسوکننده‌ها پیکربندی ۱۲ پالس دارند و هر دو یکسوکننده به صورت سری با استفاده از سیم‌پیچ‌هایی به یکدیگر متصل می‌شوند. ولتاژ dc به دست آمده ۲۸۰۰ ولت است. یک بانک خازنی با سیم‌پیچ کوره القایی به صورت موازی متصل می‌شود. مصرف تقریبی کوره ۴۰۰۰ کیلووات است. پیکربندی این کوره القایی نیز در شکل (۸) دیده می‌شود [۴۴].

#### ۲.۴. نتایج شبیه‌سازی

در این بخش، کارخانه فولاد به همراه فیلتر فعال موازی با استفاده از محیط نرم‌افزار MATLAB/SIMULINK شبیه‌سازی شد. شبیه‌سازی‌ها در چهار مرحله و به صورت فهرست زیر انجام و نتایج شبیه‌سازی‌ها به صورت نمودار ارائه شده است.

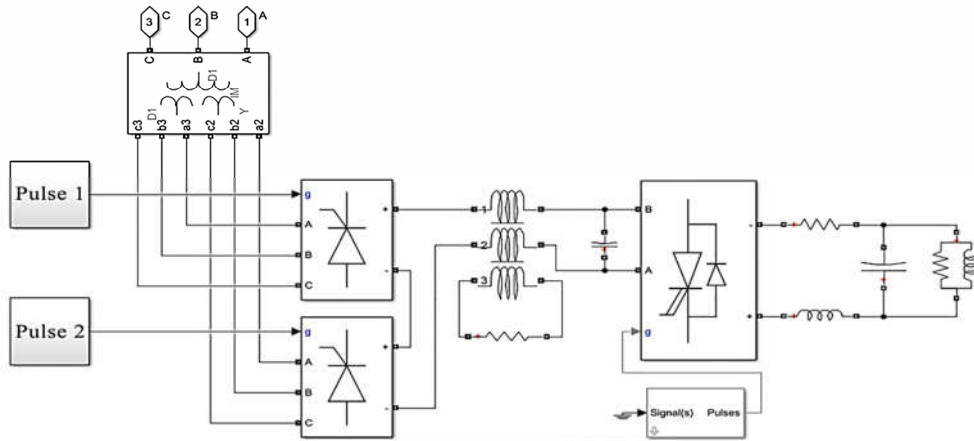
- شبیه‌سازی کارخانه فولاد بدون حضور فیلتر فعال.
- کارخانه فولاد با حضور فیلتر فعال موازی کلاسیک.
- شبیه‌سازی کارخانه فولاد با حضور فیلتر فعال موازی توسعه‌یافته.
- کارخانه فولاد با حضور فیلتر فعال موازی توسعه‌یافته و بهینه‌شده با الگوریتم بهینه‌سازی MGWO.



شکل (۷): پیکربندی کوره‌های القایی نوع یک

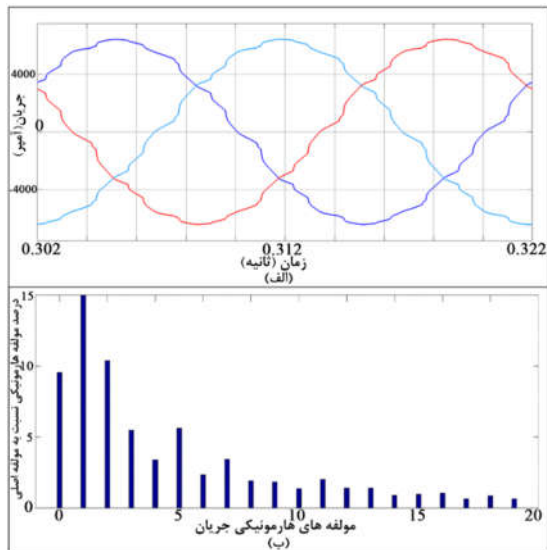
هر کوره از نوع یک با استفاده از یک ترانسفورماتور سه سیم‌پیچ ۴ مگاوات آمپری تغذیه می‌شود. ولتاژ از ۳۰ کیلوولت به ۷۷۰ ولت کاهش می‌یابد. همچنین ترانسفورماتور دارای تپ چنجر می‌باشد ( $2 \times 30$ ). سیم‌پیچ‌های ثانویه و ثالثیه هر کدام یک یکسوکننده کنترل‌شده تریستوری را تغذیه می‌کنند. یکسوکننده پیکربندی ۱۲ پالسی دارد. هر دو یکسوکننده به صورت موازی با استفاده از سیم‌پیچ‌هایی به یکدیگر متصل می‌شوند. این سیم‌پیچ‌ها جریان مستقیم را بهبود می‌بخشند. ولتاژ dc به دست آمده ۱۲۵۰ ولت می‌باشد. سه اینورتر فرکانس متوسط به وسیله این ولتاژ تغذیه می‌شوند و خروجی اینورترها به صورت موازی به یک ترانسفورماتور افزایش یافته متصل شده است. یک بانک خازنی نیز به صورت موازی با سیم‌پیچ کوره القایی متصل می‌شود. ولتاژ در سیم‌پیچ‌هایی که فولاد را ذوب می‌کند، ۲۲۰۰ ولت با فرکانس ۵۰۰ هرتز و مصرف تقریبی ۳۳۰۰ کیلووات است. پیکربندی کوره‌های القایی نوع یک در شکل (۷) آورده شده است [۴۴].

هر کوره نوع دو نیز از یک ترانسفورماتور سه سیم‌پیچ با ظرفیت ۵ مگاوات آمپری تغذیه می‌شود. ولتاژ از ۳۰ کیلوولت به ۹۴۵ ولت کاهش پیدا می‌کند. مشابه با کوره‌های نوع یک، سیم‌پیچ‌های ثانویه و ثالثیه به یکسوکننده کنترل‌شده تریستوری متصل می‌شوند.



شکل (۸): پیکربندی کوره‌های القایی نوع دو

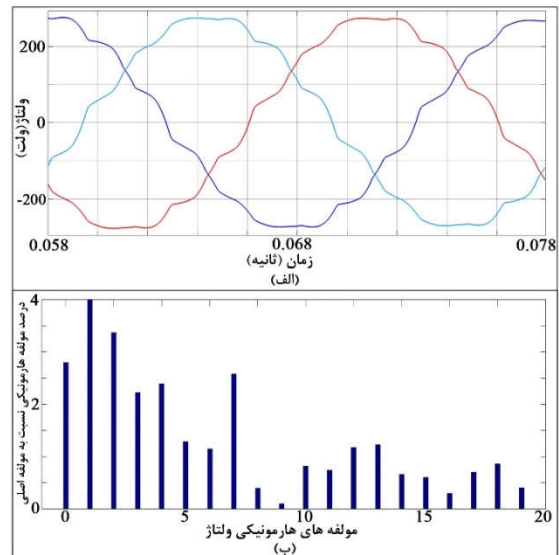
موج جریان کاملاً مشخص است و در شکل (۱۰ ب) مؤلفه‌های هارمونیک جریان، گویای وجود اعوجاجات بیش از حد مجاز می‌باشد. همان‌طور که در شکل‌های (۹) و (۱۰) مشاهده شد، شکل موج‌های جریان و ولتاژ ورودی به کارخانه فولاد بر اثر وجود کوره‌های القایی غیرخطی دارای اعوجاج هستند. هدف اصلی این مقاله، ارائه راهکاری جدید و توسعه‌یافته برای از بین بردن هارمونیک‌های ولتاژ و جریان به صورت بهینه است. نتایج شبیه‌سازی مربوط به راهکار پیشنهادی به صورت مرحله‌به‌مرحله در ادامه آورده شده است.



شکل (۱۰): الف. شکل موج جریان ورودی؛ ب. مؤلفه‌های هارمونیک جریان

#### ۱.۲.۴. شبیه‌سازی کارخانه فولاد بدون حضور فیلتر فعال

در این بخش، سیستم توزیع برق کارخانه فولاد بدون حضور فیلتر فعال موازی شبیه‌سازی می‌گردد تا بیشترین میزان اعوجاجات به دست آید. نتایج حاصل از شبیه‌سازی این مورد در ادامه آورده شده است. شکل موج ولتاژ سه فاز ورودی به کارخانه فولاد (باس ۱) به همراه مؤلفه‌های هارمونیک ولتاژ در شکل (۹) قابل مشاهده است. با توجه به شکل (۹ الف) وجود هارمونیک و اعوجاجات ولتاژ در شکل موج ولتاژ ورودی به کارخانه فولاد کاملاً مشخص است. مؤلفه‌های هارمونیک ولتاژ نیز تا هارمونیک ۱۹ ام (فرکانس ۱۰۰۰ هرتز) در شکل (۹ ب) گویای اعوجاجات هستند.



شکل (۹): الف. شکل موج ولتاژ ورودی؛ ب. مؤلفه‌های هارمونیک ولتاژ

#### ۲.۲.۴. شبیه‌سازی کارخانه فولاد با حضور فیلتر فعال موازی

##### کلاسیک

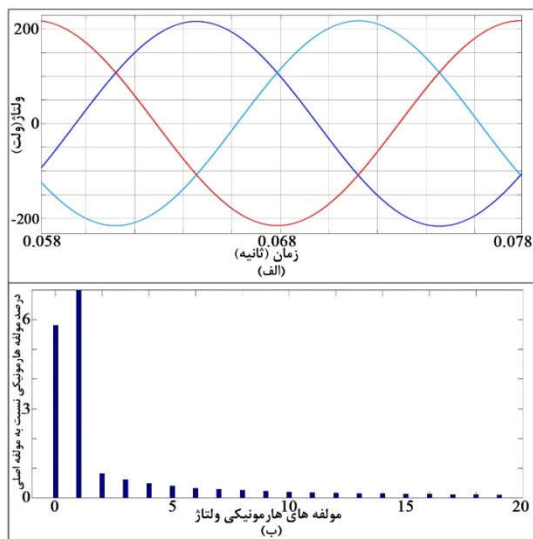
در این مرحله، سیستم توزیع برق کارخانه فولاد به همراه فیلتر فعال موازی کلاسیک شبیه‌سازی شده است. نتایج شبیه‌سازی در این

شکل موج جریان سه فاز ورودی به کارخانه فولاد (باس ۱) به همراه مؤلفه‌های هارمونیک جریان در شکل (۱۰) آورده شده است. در شکل (۱۰ الف) نیز وجود اعوجاجات جریان در شکل



۳.۲.۴. شبیه‌سازی کارخانه فولاد با حضور فیلتر فعال موازی توسعه یافته

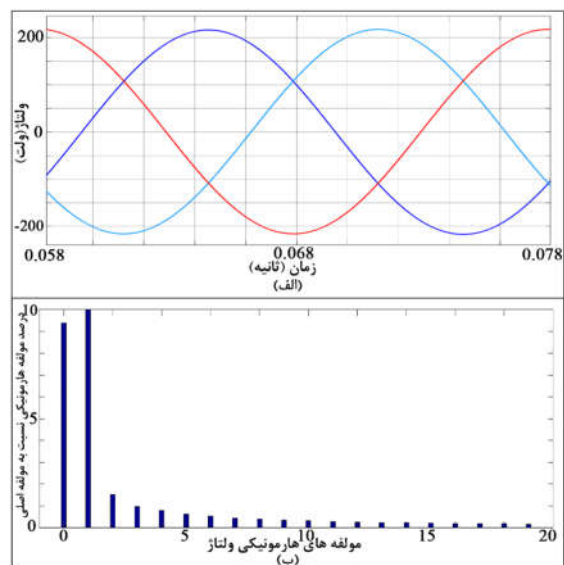
در این قسمت، فیلتر فعال موازی توسعه یافته به جای فیلتر فعال موازی کلاسیک در سیستم توزیع برق کارخانه فولاد قرار می‌گیرد (بدون استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی). نتایج شبیه‌سازی در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) آورده شده است. در شکل (۱۳)، شکل موج ولتاژ سه فاز ورودی به کارخانه فولاد (باس ۱) به همراه مؤلفه‌های هارمونیک ولتاژ قابل مشاهده است. در شکل (۱۴) مشاهده می‌شود که تمام مؤلفه‌های هارمونیک ولتاژ کوچک‌تر از ۱ درصد مؤلفه اصلی ولتاژ هستند. همچنین برتری فیلتر فعال موازی توسعه یافته نسبت به فعال موازی کلاسیک نیز کاملاً مشخص است. همچنین در شکل (۱۴)، شکل موج جریان سه فاز ورودی به کارخانه فولاد (باس ۱) به همراه مؤلفه‌های هارمونیک جریان مشاهده می‌شود. در شکل (۱۴) نیز برتری فیلتر فعال موازی توسعه یافته نسبت به فعال موازی کلاسیک واضح است. به طور کلی، با توجه به شکل‌های (۱۳) و (۱۴) می‌توان بیان کرد که در حضور فیلتر فعال موازی توسعه یافته جبران‌سازی بهتری نسبت به حضور فیلتر فعال موازی کلاسیک صورت گرفته است.



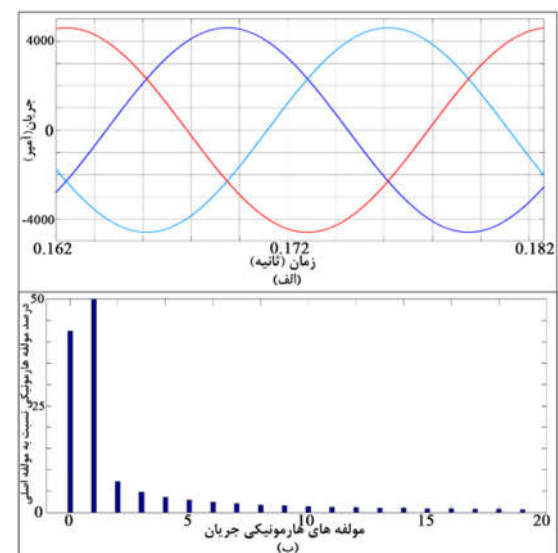
شکل (۱۳): الف. شکل موج ولتاژ ورودی؛ ب. مؤلفه‌های هارمونیک ولتاژ

قسمت گویای تأثیرات فیلتر فعال موازی کلاسیک بر سیستم توزیع برق مورد مطالعه است. در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) شکل موج‌های ولتاژ و جریان سه فاز ورودی به کارخانه فولاد (باس ۱) به همراه مؤلفه‌های هارمونیک ولتاژ و جریان دیده می‌شود.

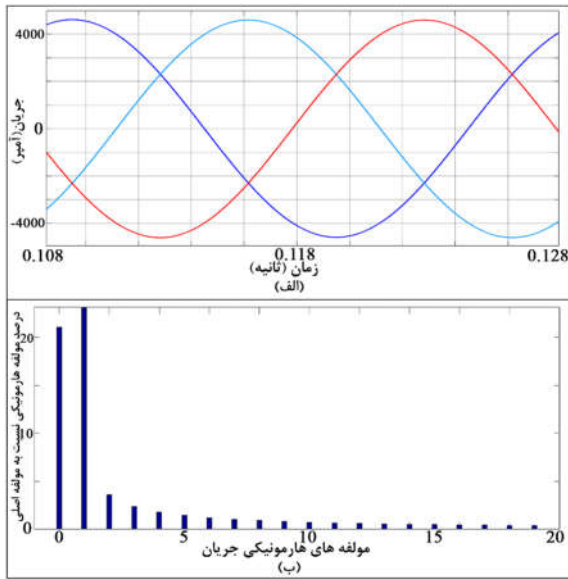
همان طور که در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) مشاهده می‌شود، فیلتر فعال موازی کلاسیک توانسته است تا حدی اعوجاجات اضافه ایجاد شده توسط بارهای غیرخطی را از بین ببرد، ولی برخی مؤلفه‌ها هنوز مقادیر بزرگی دارند و به جبران‌سازی بیشتری نیاز است.



شکل (۱۱): الف. شکل موج ولتاژ ورودی؛ ب. مؤلفه‌های هارمونیک ولتاژ



شکل (۱۲): الف. شکل موج جریان ورودی؛ ب. مؤلفه‌های هارمونیک جریان



شکل (۱۶): الف. شکل موج جریان ورودی؛ ب. مؤلفه‌های هارمونیک جریان

همچنین به منظور بررسی بیشتر و مقایسه بهتر از شاخص‌هایی همچون THD، TDD<sup>۱</sup> و HCR<sup>۲</sup> برای سنجش کیفیت توان و هارمونیک‌ها استفاده می‌شود. شاخص THD به منظور نشان دادن اعوجاجات ولتاژ و هارمونیک محاسبه می‌شود. شاخص TDD فقط برای نشان دادن اعوجاجات جریان است. شاخص HCR یا ضریب جبران هارمونیک نیز نشان‌دهنده میزان جبران‌شده مقادیر هارمونیک است. این شاخص‌ها به در معادلات (۱۷)، (۱۸)، (۱۹) و (۲۰) معرفی می‌شوند:

$$THD_I = \left( \sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} (I_h)^2} \right) / I_1 \quad (17)$$

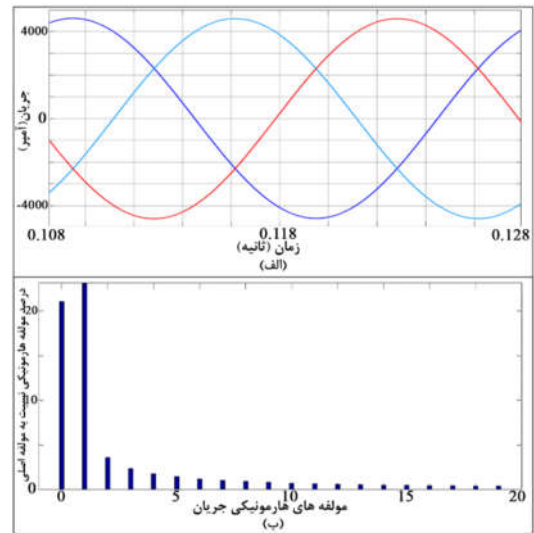
$$THD_V = \left( \sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} (V_h)^2} \right) / V_1 \quad (18)$$

$$TDD = \left( \sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} (I_h)^2} \right) / I_L \quad (19)$$

$$HCR = \left( \frac{THD_{\text{پس از جبران}}}{THD_{\text{قبل از جبران}}} \right) \times 100 \quad (20)$$

مقدار هر شاخص باید طبق استاندارد و در بازه‌های تعیین‌شده توسط استانداردهای بین‌المللی قرار داشته باشد. طبق استاندارد IEEE519-2014 برای سیستم‌های با رنج ولتاژ ۱ تا ۶۹ کیلوولت و رنج نسبت جریان اتصال کوتاه به جریان بار ۲۰ تا ۵۰، حداکثر مقدار مجاز THD ولتاژ برابر با ۵٪ و حداکثر مقدار مجاز TDD جریان برابر با ۸٪ است [۴۵]. جدول (۱) مقادیر شاخص‌های سنجش کیفیت توان و بررسی اعوجاجات هارمونیک برای چهار مرحله شبیه‌سازی را بیان می‌کند. همچنین به منظور نشان دادن عملکرد

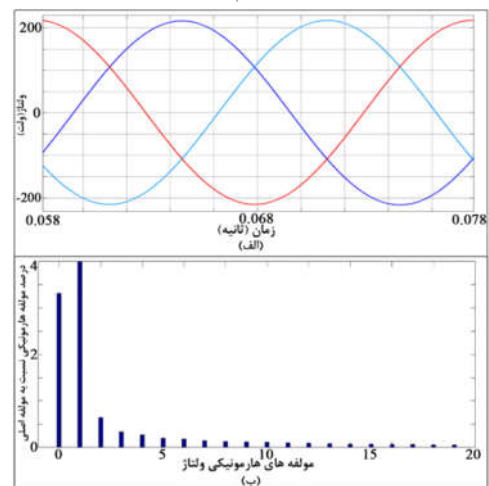
1. Total Demand Distortion
2. Harmonic Compensation Ratio



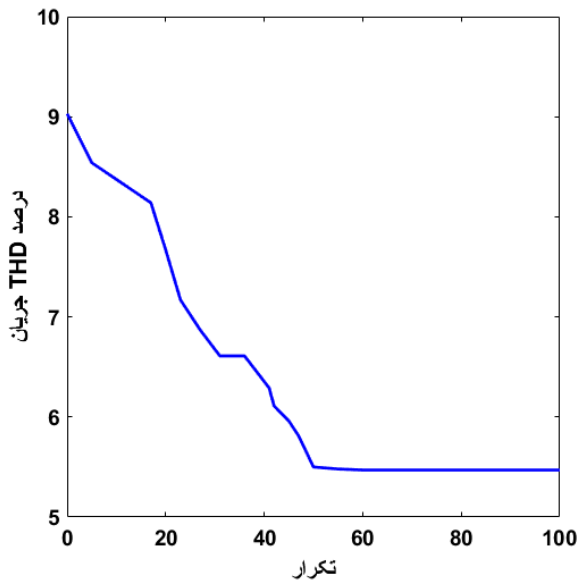
شکل (۱۴): الف. شکل موج جریان ورودی؛ ب. مؤلفه‌های هارمونیک جریان

#### ۴.۲.۴. شبیه‌سازی کارخانه فولاد با حضور فیلتر فعال توسعه‌یافته و بهینه‌شده با الگوریتم MGWO

به منظور کارایی بهتر فیلتر فعال موازی توسعه‌یافته، در این مرحله از الگوریتم MGWO کمک گرفته می‌شود. در الگوریتم بهینه‌سازی MGWO، سائز جمعیت برابر ۳۰، حداکثر تکرار ۱۰۰،  $\zeta$  برابر ۲/۱ و  $\theta$  برابر ۰/۹ در نظر گرفته می‌شود. نتایج حاصل از این شبیه‌سازی در ادامه آورده شده است. شکل‌های (۱۵) و (۱۶) بیانگر شکل موج‌های ولتاژ و جریان سه‌فاز ورودی به کارخانه فولاد (باس ۱) به همراه مؤلفه‌های هارمونیک ولتاژ و جریان هستند. همان‌طور که در شکل‌های (۱۵) و (۱۶) مشاهده می‌شود، در حضور فیلتر فعال بهینه‌شده با الگوریتم MGWO جبران‌سازی بهتری نسبت به سه مرحله قبل انجام شده است.



شکل (۱۵): الف. شکل موج ولتاژ ورودی؛ ب. مؤلفه‌های هارمونیک ولتاژ



شکل (۱۷): تغییرات تابع برازش الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادی MGWO در تکرارهای مختلف

### ۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک روش پیشنهادی جدید برای استفاده در فیلترهای فعال موازی سه‌فاز به منظور بهبود کیفیت توان و حذف هارمونیک ارائه شده است. در فیلتر فعال ارائه شده، از یک ساختار کنترلی جدید بر مبنای تئوری P-Q، کنترل‌کننده PID و الگوریتم بهینه‌سازی گرگ‌های خاکستری اصلاح شده که منجر به بهبود شاخص‌های کیفیت توان گردیده، استفاده شده است. برای نشان دادن کارایی روش پیشنهادی، این فیلتر در یک کارخانه فولاد با شش کوره القایی در محیط نرم‌افزار MATLAB/SIMULINK شبیه‌سازی شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها نشان داد که فیلتر پیشنهادی، جبران‌سازی بهتری نسبت به روش کلاسیک دارد و همچنین با بهینه‌سازی فیلتر می‌توان میزان این جبران‌سازی را افزایش داد. از آنجا که این شبیه‌سازی با اطلاعات واقعی از یک کارخانه فولاد انجام گرفته است، می‌تواند کاربران صنعتی را در بهبود کیفیت توان صنایع به طرز شایانی کمک کند.

### ۶. قدردانی

این پژوهش با استفاده از اعتبار پژوهشی شماره ۹۸۳۹۰۰۰۵۱ مرکز آموزش عالی شهرضا انجام گرفته است.

الگوریتم بهینه‌سازی گرگ‌های خاکستری اصلاح شده، فیلتر توسعه یافته با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی تجمع ذرات (PSO) نیز پیاده‌سازی شده و مقادیر شاخص‌ها در جدول (۱) آورده شده است.

با توجه به معادلات ارائه شده در فرمول‌های ۱۷ تا ۲۰ مقادیر THD، TDD و HCR هرچه کمتر باشد، نشان‌دهنده عملکرد بهتر فیلتر است؛ در نتیجه جدول (۱) نشان می‌دهد کارایی روش پیشنهادی در مقایسه با دیگر روش‌ها برای همه شاخص‌ها (چه شاخص‌های مربوط به جریان و چه شاخص‌های مربوط به ولتاژ) بهتر بوده و بهترین مقادیر شاخص‌های سنجش کیفیت توان و بررسی اعوجاجات هارمونیکی برای فیلتر توسعه یافته و بهینه شده با MGWO به دست آمده است. همچنین تمام شاخص‌ها برای روش پیشنهادی در محدوده استاندارد IEEE519-2014 نیز قرار گرفته است. کارایی الگوریتم بهینه‌سازی MGWO نسبت به یکی دیگر از الگوریتم‌های بهینه‌سازی، الگوریتم بهینه‌سازی PSO، نیز در جدول (۱) مورد تأکید قرار گرفته است. در مقایسه این دو روش نیز مشاهده می‌شود که الگوریتم پیشنهادی به نتایج بهتری منجر شده است.

همچنین در شکل (۱۷) تغییرات تابع برازش الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادی MGWO در تکرارهای مختلف رسم شده و روند همگرایی آن مشخص است.

جدول (۱): مقادیر شاخص‌های سنجش کیفیت توان و بررسی

اعوجاجات هارمونیکی					
روش پیشنهادی- فیلتر توسعه یافته و بهینه شده با MGWO (مرحله ۴)	فیلتر توسعه یافته و بهینه شده با PSO	فیلتر توسعه یافته بدون بهینه‌سازی (مرحله ۳)	فیلتر کلاسیک (مرحله ۲)	بدون فیلتر (مرحله ۱)	شاخص
۱/۴۸	۲/۰۱	۳/۲۹	۴/۹۵	۶/۵۳	THD <sub>v</sub>
۵/۴۷	۵/۷۵	۶/۲۳	۹/۰۳	۱۵/۲۴	THD <sub>i</sub>
۵/۴۶	۵/۷۴	۶/۲۱	۸/۹۹	۱۵/۰۷	TDD
۲۲/۶۶	۳۰/۷۸	۵۰/۳۸	۷۵/۸۰	-	HCR <sub>v</sub>
۳۵/۸۹	۳۷/۷۳	۴۰/۸۷	۵۹/۲۵	-	HCR <sub>i</sub>

## مراجع

- [1] Rao, P.B.K. and Rani, P.E., "Comparison of Shunt Active Power Filter with Different Control Algorithms Using Particle Swarm Optimization Technique", International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, Vol. 5, No. 7, pp.14070-14081, 2016.
- [2] Solis-Munoz, F.J., Osornio-Rios, R.A., Romero-Troncoso, R.J. and Jaen-Cuellar, A.Y., "Differential Evolution Implementation for Power Quality Disturbances Monitoring using Open CL", Advances in Electrical and Computer Engineering, Vol. 19, No. 2, pp.13-22, 2019.
- [3] Silva, L.G., Silva, A.A.P. and Almeida-Filho, A.T., "Allocation of Power Quality Monitors using the P-median to Identify Non-Technical Losses", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 31, No. 5, pp. 2242-2249, 2016.
- [4] Pana, A., Baloi, A. and Matei, F.M., "From the Balancing Reactive Compensator to the Balancing Capacitive Compensator", Energies, Vol. 11, No. 8, pp. 1-24, 2018.
- [5] Yilmaz, I., Durna, E. and Ermiş, M., "Design and Implementation of a Hybrid System for the Mitigation of PQ Problems of Medium-Frequency Induction Steel-Melting Furnaces", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 52, No. 3, pp. 2700-2713, 2016.
- [6] Swain, S.D., Ray, P.K. and Mohanty, K.B., "Improvement of Power Quality using a Robust Hybrid Series Active Power Filter", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 32, No. 5, pp. 3490-3498, 2017.
- [7] Tareen, W.U.K. and Mekhief, S., "Three-Phase Transformer less Shunt Active Power Filter With Reduced Switch Count for Harmonic Compensation in Grid-Connected Applications", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 33, No. 6, pp. 4868-4881, 2018.
- [8] Hu, H., Shao, Y., Tang, L., Ma, J., He, Z. and Gao, S., "Overview of Harmonic and Resonance in Railway Electrification Systems", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 54, No. 5, pp. 5227-5245, 2018.
- [9] Jaraut, P., Rawat, M. and Ghannouchi, F.M., "Harmonically Related Concurrent Tri-Band Behavioral Modeling and Digital Predistortion", IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, Vol. 66, No. 6, pp. 1073-1077, 2019.
- [10] Yong, J. and Xu, W., "A Method to Estimate the Impact of Harmonic and Unbalanced Currents on the Capacity of Concentric Neutral Cables", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 31, No. 5, pp. 1971-1979, 2016.
- [11] Azizian Fard, M., Farrag, M.E., McMeekin, S.G. and Reid, A.J., "Partial Discharge Behavior under Operational and Anomalous Conditions in HVDC Systems", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 24, No.3, pp. 1494-1502, 2017.
- [12] Yang, C., Zhang, Y. and Qiu, H., "Influence of Output Voltage Harmonic of Inverter on Loss and Temperature Field of Permanent Magnet Synchronous Motor", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 55, No. 6, pp. 1-5, 2019.
- [13] Dao, T. and Phung, B.T., "Effects of Voltage Harmonic on Losses and Temperature Rise in Distribution Transformers", IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 12, No. 2, pp. 347-354, 2018.
- [14] Cui, H., Song, W., Fang, H., Ge, X. and Feng, X., "Resonant Harmonic Elimination Pulse Width Modulation-based High-Frequency Resonance Suppression of High-Speed Railways", IET Power Electronics, Vol. 8, No. 5, pp. 735-742, 2015.
- [15] Jedrzejczak, J., Anders, G.J., Fotuhi-Firuzabad, M., Farzin, H. and Aminifar, F., "Reliability Assessment of Protective Relays in Harmonic Polluted Power Systems", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 32, No. 1, pp. 556-564, 2017.
- [16] Abu-Rub, H., Malinowski, M. and Al-Haddad, K., "Power Electronics for Renewable Energy Systems, Transportation and Industrial Applications, chapter: Active Power Filter", Wiley-IEEE Press, Edition: 1, 2014.
- [17] Cortes, B., Araujo, L.R. and Penido, D.R.R., "Passive Filters Design Applied to an Electrical Submersible Pump System", IEEE Latin America Transactions, Vol. 16, No. 7, pp. 1992-1999, 2018.
- [18] Oruganti, V.S.R.V., Bubshait, A.S., Dhanikonda, V.S.S.S. and Simoes, M.G., "Real-Time Control of Hybrid Active Power Filter using Conservative Power Theory in Industrial Power System", IET Power Electronics, Vol. 10, No. 2, pp. 196-207, 2017.
- [19] Harirchi, F. and Simoes, M.G., "Enhanced Instantaneous Power Theory Decomposition for Power Quality Smart Converter Applications", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 33, No. 11, pp. 9344-9359, 2018.

- [20] Sezgin, E. and Salor, O., "Analysis of Power System Harmonic Subgroups of the Electric Arc Furnace Currents Based on a Hybrid Time-Frequency Analysis Method", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 55, No. 4, pp. 4398-4406, 2019.
- [21] Hou, S., Fei, J., Chen, C. and Chu, Y., "Finite-Time Adaptive Fuzzy-Neural-Network Control Of Active Power Filter", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 34, No. 10, pp. 10298-10313, 2019.
- [22] Vahedi, H., Shojaei, A.A., Louis-A. Dessaint, L.A. and Al-Haddad, K., "Reduced DC-Link Voltage Active Power Filter Using Modified PUC5 Converter", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 33, No. 2, pp. 943-947, 2018.
- [23] Tarisciotti, L., Formentini, A., Gaeta, A., Degano, M., Zanchetta, P., Rabbeni, R. and Pucci, M., "Model Predictive control for Shunt Active Filters with Fixed Switching Frequency", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 53, No. 1, pp. 296-304, 2017.
- [24] Panigrahi, R. and Subudhi, B., "Performance Enhancement of Shunt Active Power Filter using a Kalman Filter based  $H_\infty$  Control Strategy", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 32, No. 4, pp. 2622-2630, 2017.
- [25] Geng, H., Zheng, Z., Zou, T., Chu, B. and Chandra, A., "Fast Repetitive Control with Harmonic Correction Loops for Shunt Active Power Filter Applied in Weak Grid", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 55, No. 3, pp. 3198-3206, 2019.
- [26] Pandove, G. and Singh, S., "Robust Repetitive Control Design for 3P4W Shunt Active Power Filter", IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol. 15, No. 5, pp. 2810-2818, 2019.
- [27] Yang, L. and Yang, J., "A Robust Dual-Loop Current Control Method with a Delay-Compensation Control Link for LCL-Type Shunt Active Power Filters", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 34, No. 7, pp. 6183-6199, 2019.
- [28] Carlos, G.A.A., Jacobina, C.B.A., Mello, J.P.R.A. and dos Santos, E.C., "Shunt Active Power Filter Based on Cascaded Transformers Coupled With Three Phase Bridge Converters", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 53, No. 5, pp. 4673-4681, 2017.
- [29] Nademi, H., Burgos, R. and Soghomonian, Z., "Power Quality Characteristics of a Multilevel Current Source with Optimal Predictive Scheme from More-Electric-Aircraft Perspective", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 67, No. 1, pp. 160-170, 2018.
- [30] Fabricio, E.L.L., Junior, S.C.S., Jacobina, C.B. and Correa, M.B.R., "Analysis of Main Topologies of Shunt Active Power Filters Applied to Four-Wire Systems", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 33, No. 3, pp. 2100-2112, 2018.
- [31] Shukla, S., Mishra, S., Singh, B. and Kumar, S., "Implementation of Empirical Mode Decomposition Based Algorithm for Shunt Active Filter", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 53, No. 3, pp. 2392-2400, 2017.
- [32] Chittora1, P., Singh, A. and Singh, M., "Gauss-Newton-based Fast and Simple Recursive Algorithm for Compensation using Shunt Active Power Filter", IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 11, No. 6, pp. 1521-1530, 2017.
- [33] Sasaki, H. and Machida, T., "A New Method to Eliminate AC Harmonic Currents by Magnetic Flux Compensation-Considerations on Basic Design", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-90, No. 5, pp. 2009-2019, 1971.
- [34] Wu, T.F., Hsieh, H.C., Hsu, C.W. and Chang, Y.R., "Three-Phase Three-Wire Active Power Filter with  $D-\Sigma$  Digital Control to Accommodate Filter Inductance Variation", IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, Vol. 4, No. 1, 2016.
- [35] Asiminoaei, L., Blaabjerg, F., Hansen, S. and Thogersen, P., "Adaptive Compensation of Reactive Power with Shunt Active Power Filters", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 44, No. 3, 2008.
- [۳۶] محمدی، حمیدرضا، حاجی اکبری فینی، مسعود، «ارائه روش کنترلی جدید برای فیلترهای اکتیو موازی در سیستم‌های سه‌فاز چهارسیمه به منظور جبران‌سازی هارمونیک‌ها، نامتعادلی و توان راکتیو»، مهندسی و مدیریت انرژی، سال چهارم، شماره دوم، صفحه ۲-۹، ۱۳۹۳.
- [37] Akagi, H., Kanazawa, Y. and Nabae, A., "Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three Phase Circuits", IPEC 83-int Power Electronics Conf. Tokyo Japan, pp.1375-1386, 1983.
- [38] Akagi, H., Kanazawa, Y. and Nabae A., "Instantaneous Reactive Power Compensator Comprising Switching Devices without Energy Storage Components", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 20, No. 3, pp. 625-630, 1984.
- [39] Pradhan, M. and Mishra, M.K., "Dual P-Q Theory based Energy Optimized Dynamic Voltage Restorer for Power Quality Improvement in Distribution System", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 66, No. 4, pp. 2946-2955, 2019.
- [40] Carne, G.D., Langwasser, M., Zhu, R. and Liserre, M., "Smart Transformer-Based Single Phase-to-Neutral Fault Management", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 34, No. 3, pp. 1049-1059, 2019.

- [41] Tuyen, N.D. and Fujita, G., "*PV-APF Combination Supplies Power to Nonlinear Load and Compensates Utility Current*", IEEE Power and Energy Technology Systems Journal, Vol. 2, No. 1, pp. 32-42, 2015.
- [42] Shah, P., Hussain, I., Singh, B., Chandra, A. and Al-Haddad, K., "*GI based Control Scheme for Single Stage Grid interfaced SECS for Power Quality Improvement*", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 2, No. 1, pp. 869-881, 2018.
- [43] Mirjalili, S.A., Mirjalili, S.M. and Lewis, A., "*Grey Wolf Optimizer*", Advances in Engineering Software, Vol. 69, pp. 46-61, 2014.
- [44] Zamora, I., Albizu, I., Mazon, A.J., Sagastabeitia, K.J. and Fernandez, E., "*Harmonic Distortion in an Steel Plant with Induction Furnaces*", Department of Electrical Engineering University of the Basque Country Alda. Urquijo s/n, 48013 Bilbao (Spain), 2003.
- [45] "519-2014- IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems", IEEE, 2014.