



دانشگاه کاشان  
University of Kashan

مجله محاسبات نرم

## SOFT COMPUTING JOURNAL

تارنمای مجله: [scj.kashanu.ac.ir](http://scj.kashanu.ac.ir)



### طراحی کنترل کننده پسگام زیربهنه برای کنترل فیلتر اکتیو موازی به منظور جبران هارمونیک با استفاده از الگوریتم بهینه ساز نهنگ

پریسا سرافرازی<sup>1</sup>، دانشجوی دکتری، سید عباس طاهر<sup>1\*</sup>، استاد، علی اخوان<sup>2</sup>، استادیار

<sup>1</sup> گروه قدرت، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.

<sup>2</sup> دانشکده انرژی، دانشگاه آبروگ، آبروگ، دانمارک.

#### چکیده

در این مقاله، با استفاده از الگوریتم بهینه ساز نهنگ و با بهره گیری از معیار انتگرال زمان-قدرمطلق خطا (ITAE) به تنظیم بهینه پارامترهای کنترل کننده پسگام به منظور بهبود عملکرد فیلترهای اکتیو موازی در سیستم های توزیع چهارسیمه پرداخته شده است. به طوری که برای کاهش هارمونیک جریان شبکه با قرار دادن فیلتر اکتیو موازی در نقطه اتصال مشترک (PCC) از طریق فیلتر LCL، میزان هارمونیک موجود در جریان شبکه را به حداقل رسانده و سعی در سینوسی نمودن آن می کند. در اکثر مراجع، انتخاب ضرایب کنترل کننده پسگام بر اساس آزمون و خطا انجام می گیرد که علاوه بر زمانبر بودن، تضمینی برای صحت انتخاب ضرایب وجود ندارد. هدف این مقاله یافتن پارامترهای زیربهنه کنترل کننده پسگام با استفاده از الگوریتم نهنگ است که از دقت و سرعت همگرایی بالایی برخوردار است. به کمک این الگوریتم، ضرایب پسگام با به حداقل رساندن معیار خطای انتخاب شده به صورت زیربهنه تعیین می شوند که نقش بسزایی در بهبود عملکرد کنترل کننده و در نتیجه فیلتر نمودن مناسب هارمونیک های جریان شبکه دارد. کارایی روش پیشنهادی از طریق شبیه سازی سناریوهای مختلف نشان داده شده است. با بررسی و ارزیابی نتایج، مشاهده می شود که روش پیشنهادی در بهبود کیفیت توان در سیستم های توزیع عملکرد بسیار خوبی دارد.

#### اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت 29 خرداد ماه 1403  
پذیرش 24 شهریور ماه 1403

کلمات کلیدی:

الگوریتم بهینه ساز نهنگ  
بار نامتعادل  
بار غیرخطی  
کنترل پسگام  
فیلتر اکتیو موازی  
هارمونیک / میان هارمونیک

© 1403 نویسندگان. مقاله با دسترسی آزاد تحت مجوز CC-BY

#### 1. مقدمه

داده است. حضور این هارمونیک ها در سیستم منجر به مسائلی مانند تداخل سیگنال، گرمای بیش از حد، خرابی تجهیزات و وقوع اضافه ولتاژ می شود [1]. از سوی دیگر، میان هارمونیک ها از بارهایی ناشی می شوند که به طور همزمان با فرکانس اصلی سیستم قدرت نوسان نمی کنند. منشا اصلی میان هارمونیک ها از اجزای الکترونیک قدرتی ناشی می شود که دو سیستم AC را که در فرکانس های متفاوت کار می کنند، از طریق یک پیوند DC اتصال می دهند و در نتیجه این مولفه های فرکانسی ناخواسته را

بارهای غیرخطی به عنوان عامل اصلی تولید هارمونیک و میان هارمونیک در شبکه برق شناخته می شوند. استفاده روزافزون از بارهای غیرخطی به طور قابل توجهی کیفیت توان را کاهش

\* نوع مقاله: پژوهشی

\* نویسنده مسئول

پست (های) الکترونیک: [parisa.sarafrazi@yahoo.com](mailto:parisa.sarafrazi@yahoo.com) (سرافرازی)

[sataher@kashanu.ac.ir](mailto:sataher@kashanu.ac.ir) (طاهر)

[alak@et.aau.dk](mailto:alak@et.aau.dk) (اخوان)

نحوه ارجاع به مقاله: پریسا سرافرازی، سید عباس طاهر، علی اخوان، «طراحی کنترل کننده پسگام زیربهنه برای کنترل فیلتر اکتیو موازی به منظور جبران هارمونیک با استفاده از الگوریتم بهینه ساز نهنگ، جلد 14، شماره 2، ص 37-20، پاییز و زمستان 1404.

پارامترهای سیستم غیرمقاوم است [19]. روش‌های کنترل پیش‌بین و deadbeat پاسخ سریع‌تری دارند اما حساسیت آنها به تغییر پارامتر همچنان یک محدودیت است. در مقابل، روش مدل‌گزشی این معایب را ندارد، با این حال اشکال آن در پدیده چترینگ است که به طور مخربی بر کیفیت توان تاثیر می‌گذارد [20]. از این رو، استفاده از کنترل‌کننده پسگام (BSC) به دلیل مزایایی که دارد، توجه زیادی را برای کنترل سیستم‌های غیرخطی به خود جلب کرده است.

روش پسگام یک رویه طراحی بازگشتی مبتنی بر لیاپانوف است که یک مساله طراحی برای سیستم کامل را به دنباله‌ای از مسائل طراحی برای سیستم‌های درجه پایین تبدیل می‌کند. استراتژی پسگام به این صورت است که در هر مرحله با در نظر گرفتن برخی از متغیرهای حالت به عنوان ورودی‌های کنترل مجازی و طراحی تابع لیاپانوف قوانین کنترل میانی به دست می‌آید. سپس متغیرهای حالت به صورت بازگشتی به عنوان ورودی‌های کنترل برای زیرسیستم‌های مرتبه پایین سیستم اعمال می‌شوند. در انتها، تابع نهایی لیاپانوف که با جمع‌بندی توابع لیاپانوف مرتبط با هر مرحله طراحی جداگانه تشکیل می‌شود، پایداری کل سیستم و همچنین هر یک از مراحل را تضمین می‌کند [21]. این روش کاربرد گسترده‌ای در حوزه‌های مختلف پیدا کرده است. به عنوان مثال در مرجع [22]، از استراتژی کنترل پسگام برای ژنراتور القایی دوسو تغذیه در شرایط شبکه متعادل و نامتعادل استفاده شده است. در مرجع [23]، یک روش کنترل غیرخطی مبتنی بر پسگام برای کنترل‌کننده مبدل سمت روتور ارائه شده است تا تلفات ماشین را کاهش دهد. همچنین در مرجع [24]، کنترل‌کننده پسگام برای کنترل ولتاژ پیوند DC در یک فیلتر اکتیو موازی استفاده شده است. چالشی که در تمامی این تحقیقات وجود دارد، نحوه انتخاب پارامترهای روش پسگام است. این پارامترها به شدت بر عملکرد کنترل‌کننده تاثیر می‌گذارد و انتخاب مقدار مناسب آنها از اهمیت بالایی برخوردار است. انتخاب این پارامترها به طور معمول به روش سعی و خطا بوده است اما این روش علاوه بر زمانبر بودن، ممکن است منجر به یافتن مقادیر بهینه نشود. به علاوه، برای سیستم‌های کوچک

تولید می‌کنند. نمونه‌هایی از این بارها، سیکلوکانورترها، درایوهای تنظیم سرعت برای موتورهای سنکرون و القایی و همچنین کوره‌های قوس الکتریکی می‌باشند [2]. وجود میان‌هارمونیک‌ها در شبکه قدرت مجموعه‌ای از چالش‌ها را ایجاد می‌کند که فراتر از آنهایی است که هارمونیک‌ها به تنهایی ایجاد می‌کنند. از جمله این مشکلات می‌توان به سوسو زدن لامپ‌ها، تداخل در سیستم‌های کنترل، اختلال در سیگنال‌های مخابراتی، اشباع ترانسفورماتورهای جریان، نوسانات ولتاژ و عملکرد نادرست تجهیزات الکتریکی، رله‌های حفاظتی و دستگاه‌های اندازه‌گیری اشاره کرد. از این رو، ابداع تکنیک‌هایی برای جبران موثر هارمونیک/میان‌هارمونیک‌ها برای بهبود این اثرات نامطلوب و بالا بردن استانداردهای کیفیت توان ضروری است. فیلترهای پسیو در کاهش هارمونیک‌های ناشی از بارهای غیرخطی در جریان شبکه کاربرد دارند [3]. از ویژگی‌های فیلترهای پسیو می‌توان به طراحی ساده و مقرون به صرفه بودن آنها اشاره کرد. با این حال، حساسیت آنها به ایجاد رزونانس با امپدانس شبکه [4] به ترجیح فیلترهای اکتیو به عنوان یک راه‌حل منطقی‌تر تاکید می‌کند. حوزه روش‌های کنترل فیلتر اکتیو، طیف متنوعی را در بر می‌گیرد و انتخاب یک روش مناسب به طور قابل توجهی بر کارایی فیلتر در جبران‌سازی تاثیر می‌گذارد. این روش‌ها را می‌توان به طور کلی به دو گروه دسته‌بندی کرد. گروه اول شامل استراتژی‌هایی است که مستلزم طراحی کنترل‌کننده‌های مجزا برای هر مولفه هارمونیک است که اغلب بر روی کنترل‌کننده‌های تناسبی-انتگرالی (PI) یا تناسبی-رزونانسی (PR) تکیه می‌کنند [5]-[6]. در مقابل، گروه دوم از تکنیک‌هایی استفاده می‌کنند که نیاز به طراحی کنترل‌کننده اختصاصی را برطرف می‌کند. نمونه‌هایی از این دسته شامل کنترل مد لغزشی (SMC) [7]-[8]، کنترل پیش‌بین [9]-[10] کنترل تکرارشونده [11]-[12]، کنترل deadbeat [13]-[14]، کنترل فازی [15]-[16] و شبکه عصبی [17]-[18] می‌باشند. مزیت کنترل‌کننده‌های دسته دوم نسبت به دسته اول در بار محاسباتی کمتر آنها می‌باشد. در میان این تکنیک‌ها، روش کنترل تکرارشونده در پاسخ‌دهی کندتر است و در برابر اغتشاشات و عدم قطعیت‌های ذاتی در

طوری که هدف اصلی که دستیابی به جریان شبکه عاری از هارمونیک و نامتعادلی ناشی از بارهای غیرخطی و نامتعادل است، محقق می‌شود. نتایج شبیه‌سازی به دست آمده توسط MATLAB/Simulink کارایی این روش را تایید می‌کند. ادامه مقاله به شکل زیر سازماندهی شده است. بخش 2 ساختار سیستم و معادلات ریاضی مربوطه را بیان می‌کند، بخش 3 به کنترل پسگام برای کنترل فیلتر اکتیو موازی می‌پردازد، بخش 4 الگوریتم تکاملی نهنگ را برای یافتن ضرایب پسگام ارائه می‌دهد و در بخش 5 نتایج شبیه‌سازی ارائه می‌شود.

## 2. ساختار سیستم و معادلات حاکم بر آن

در این بخش ابتدا ساختار سیستم توضیح داده شده است، سپس معادلات حاکم بر آن ارائه می‌گردد.

### 1.2. ساختار سیستم

شکل (1) پیکربندی سیستم چهارسیمه سه‌فاز بکار گرفته شده در این تحقیق را نشان می‌دهد. در نقطه اتصال مشترک (PCC) بار غیرخطی و شبکه به هم متصل می‌شوند. فیلتر اکتیو نیز در این نقطه نصب شده است و با تزریق جریان مناسب باعث کاهش هارمونیک و نامتعادلی در جریان شبکه می‌گردد. برای حذف فرکانس‌های سوئیچینگ ناشی از کلیدزنی اینورتر بایستی فیلتری در خروجی اینورتر قرار گیرد. نوع فیلتر انتخاب شده، فیلتر LCL می‌باشد زیرا فیلترهای LCL دارای قابلیت حذف هارمونیک قوی‌تری نسبت به فیلترهای L یا LC بوده و همچنین پاسخ‌دهی دینامیکی بالاتر، سازگاری با فرکانس‌های سوئیچینگ پایین، کاهش افت ولتاژ و افزایش میرایی را ارائه می‌دهند. علاوه بر این، استفاده از فیلترهای LCL اغلب هزینه‌های کمتری را به همراه دارد که به دلیل استفاده از سلف‌های فشرده‌تر در مقایسه با فیلترهای L می‌باشد.

المان‌های نشان داده شده در شکل (1) شامل  $L_I$ ،  $L_g$  و  $C$  بوده که به ترتیب مربوط به سلف سمت اینورتر، سلف سمت شبکه و خازن فیلتر هستند. علاوه بر این،  $R_I$  و  $R_g$  نشان‌دهنده مقاومت اهمی سلف‌ها می‌باشند. جریان مرجع نیز که شامل مولفه‌های

ممکن است جستجوی پارامتر به کمک آزمون و خطا امکان‌پذیر باشد، اما برای سیستم‌های بزرگ با پارامترهای کنترلی بیشتر، آزمون و خطا عملی نخواهد بود. بنابراین، باید یک روش سیستماتیک برای به دست آوردن پارامترهای کنترلی و برآورده کردن هدف سیستم ارائه شود. اخیراً استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری در مسائل بهینه‌سازی، جایگاه ویژه‌ای پیدا کرده است. در مقاله [25]، یک کنترل‌کننده غیرخطی پسگام برای یک مبدل بوسست چهار فاز پیشنهاد شده است و پارامترهای کنترل کننده با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)، تنظیم و بهینه‌سازی شده‌اند. در مرجع [26]، برای کاهش هارمونیک، جبران توان راکتیو و تزریق توان تولید شده توسط PV به شبکه از کنترل‌کننده پسگام استفاده شده است. در این مقاله از الگوریتم گرگ خاکستری برای تعیین ضرایب کنترل-کننده پسگام استفاده شده است. یکی دیگر از روش‌های مناسب و جدید، الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ می‌باشد که کارایی آن در مقالات مختلف نشان داده شده است [27]، [28]، [29]. در مقاله [29]، یک الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ برای تنظیم ضرایب کنترل‌کننده PI، مقدار خازن پیوند DC و مقدار مرجع  $V_{dc}$  (برای حفظ ولتاژ DC در مقدار مرجع) در فیلتر اکتیو موازی بکار رفته است. در مرجع [30]، از الگوریتم نهنگ برای تنظیم بهینه پارامترهای PID در کنترل سرعت موتور DC استفاده شده است. در مرجع [31]، نیز از این الگوریتم برای تنظیم متغیرهای کنترل به منظور توزیع توان راکتیو بهینه استفاده شده است. همچنین در مرجع [32]، الگوریتم نهنگ برای تعیین اندازه فیلتر پسیو و جایابی مناسب آن برای جبران هارمونیک بکار رفته است.

در این مقاله، از الگوریتم بهینه‌ساز نهنگ برای طراحی بهینه ضرایب پسگام به منظور کنترل فیلتر اکتیو موازی در جبران هارمونیک یک سیستم سه‌فاز چهارسیمه استفاده شده است. به این ترتیب با یافتن مقادیر پارامترهای زیربهینه کنترل‌کننده پسگام، فیلتر اکتیو موازی قادر به دنبال کردن سیگنال جریان هدف یعنی جریان‌های هارمونیک بار خواهد بود. در نتیجه، جبران‌سازی به کمک فیلتر اکتیو به خوبی انجام می‌شود، به

هارمونیکی و نامتعادل جریان بار می باشد، با استفاده از روش نظری توان لحظه ای به دست آمده است. در ادامه به معادلات ریاضی این سیستم پرداخته می شود.

## 2.2. معادلات حاکم بر سیستم

با استفاده از قوانین کیرشهف در شکل (1)، معادلات حاکم بر فیلتر در قاب abc به شرح زیر استخراج می شوند.

$$L_l \frac{d}{dt} i_l(t) + R_l i_l(t) = u(t) - v_c(t)$$

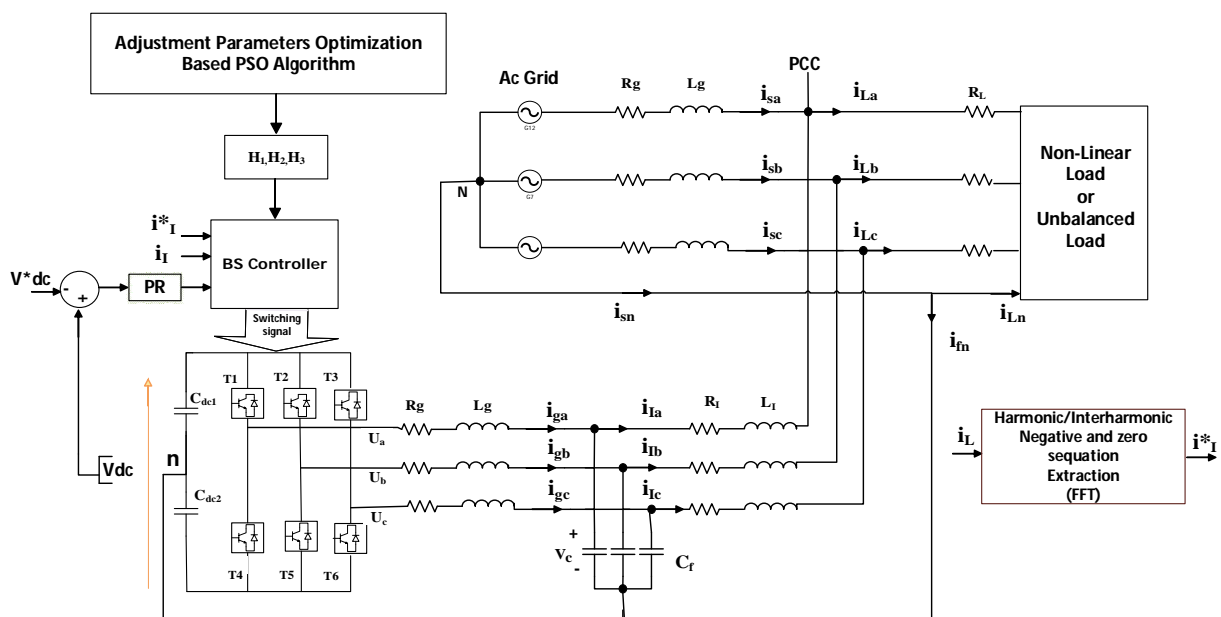
$$C \frac{d}{dt} v_c(t) = i_l(t) - i_g(t) \quad (1)$$

$$L_g \frac{d}{dt} i_g(t) + R_g i_g(t) = v_c(t) - v_{pcc}(t)$$

که در این رابطه،  $[i_l] = [i_{l-a} \ i_{l-b} \ i_{l-c}]$  جریان سه فاز فیلتر سمت اینورتر،  $[i_g] = [i_{g-a} \ i_{g-b} \ i_{g-c}]$  جریان سه فاز فیلتر سمت شبکه، ولتاژ خازن نسبت به نقطه N و  $[v_c] = [v_{c-a} \ v_{c-b} \ v_{c-c}]$  ولتاژ سه فاز نقطه PCC نسبت به نقطه N و  $[v_{pcc}] = [v_{pcc-a} \ v_{pcc-b} \ v_{pcc-c}]$  ولتاژ سه فاز خروجی اینورتر نسبت به نقطه N است. تمام کمیت ها در قاب abc می باشند.

## 3. کنترل پسگام

در این بخش، کنترل کننده پسگام برای یک فیلتر اکتیو موازی طراحی شده است که ردیابی دقیق جریان مرجع  $(i_l^{ref})$  را تضمین می کند. با توجه به متغیرهای حالت تعریف شده، هدف رسیدن جریان فیلتر  $(x_1)$  به مقدار ایده آل آن  $(x^* = i_l^{ref})$  است. به عبارتی، اختلاف جریان فیلتر با ایده آل آن باید حداقل شود. طبق اصول طراحی پسگام مراحل زیر را خواهیم داشت.



شکل (1): دیاگرام فیلتر اکتیو موازی سه فاز چهارسیمه

$$V_2 = \frac{1}{2}e_1^2 + \frac{1}{2}e_2^2 \quad (11)$$

و مشتق آن برابر است با

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \dot{e}_1 e_1 + \dot{e}_2 e_2 = \left( \frac{1}{L_g} x_2 + \frac{v_{pcc}}{L_g} - \frac{R_g}{L_g} x_1 \right. \\ &\quad \left. - \dot{x}^* \right) e_1 + e_2 (\dot{x}_2 - \dot{Q}_1) \\ &= \left( \frac{1}{L_g} (e_2 + Q_1) + \frac{v_{pcc}}{L_g} \right. \\ &\quad \left. - \frac{R_g}{L_g} x_1 - \dot{x}^* \right) e_1 \\ &\quad + e_2 \left( \frac{1}{c} x_3 - \frac{1}{c} x_1 - \dot{Q}_1 \right) \end{aligned} \quad (12)$$

با جایگذاری رابطه (8) در رابطه (12) داریم:

$$\dot{V}_2 = H_1 e_1^2 + e_1 \frac{1}{L_g} e_2 + e_2 \left( -\frac{1}{c} x_1 + \frac{1}{c} x_3 - \dot{Q}_1 \right) \quad (13)$$

در رابطه (13)،  $x_3$  یک سیگنال کنترل مجازی است و مقدار ایده‌آل آن با  $Q_2$  تعریف می‌شود. برای اطمینان از پایداری سیستم با روش لیپانوف باید  $\dot{V}_2 < 0$  باشد، بنابراین  $Q_2$  به عنوان مقدار ایده‌آل  $x_3$  به صورت زیر به دست می‌آید.

$$Q_2 = c \left( \frac{1}{c} x_1 + H_2 e_2 + \frac{1}{L_g} e_1 + \dot{Q}_1 \right) \quad (14)$$

با جایگذاری رابطه (14) در رابطه (13)، رابطه (15) به دست می‌آید.

$$\dot{V}_2 = H_1 e_1^2 + H_2 e_2^2 \leq 0 \quad (15)$$

در نتیجه با انتخاب مقادیر منفی برای  $H_2$ ،  $V_2 > 0$  و  $\dot{V}_2 < 0$  خواهند بود و پایداری این مرحله تضمین می‌شود.

**مرحله سوم:** خطای بین مقدار واقعی و ایده‌آل  $x_3$  به صورت زیر در نظر گرفته شده است.

$$e_3 = x_3 - Q_2 \quad (16)$$

تابع لیپانوف به صورت زیر انتخاب می‌شود.

$$V_3 = \frac{1}{2}e_1^2 + \frac{1}{2}e_2^2 + \frac{1}{2}e_3^2 \quad (17)$$

**مرحله اول:** خطای ردیابی برای متغیر اول به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$e_1 = x_1 - x^* \quad (4)$$

که در آن  $x^*$  مقدار مرجع برای متغیر اول می‌باشد. با مشتق‌گیری از رابطه (4) و جایگذاری در رابطه (3)، رابطه (5) به دست می‌آید.

$$\dot{e}_1 = \dot{x}_1 - \dot{x}^* = \frac{1}{L_g} x_2 - \frac{R_g}{L_g} x_1 - \frac{v_{pcc}}{L_g} - \dot{x}^* \quad (5)$$

تابع لیپانوف به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$V_1 = \frac{1}{2}e_1^2 \quad (6)$$

و مشتق آن برابر است با

$$\dot{V}_1 = \dot{e}_1 e_1 = e_1 \left( \frac{1}{L_g} x_2 - \frac{R_g}{L_g} x_1 - \frac{v_{pcc}}{L_g} - \dot{x}^* \right) \quad (7)$$

در این روند  $x_2$  سیگنال کنترل مجازی است و مقدار ایده‌آل آن  $Q_1$  تعریف می‌شود. به منظور اطمینان از پایداری سیستم با روش لیپانوف کافی است  $\dot{V}_1 < 0$  باشد. بنابراین کافی است  $Q_1$  به صورت زیر انتخاب شود.

$$Q_1 = L_g \left( -\frac{v_{pcc}}{L_g} + \frac{R_g}{L_g} x_1 + H_1 e_1 + \dot{x}^* \right) \quad (8)$$

با جایگذاری رابطه (7) در رابطه (8)، رابطه زیر به دست می‌آید.

$$\dot{V}_1 = H_1 e_1^2 \leq 0 \quad (9)$$

با انتخاب مقدار منفی برای  $H_1$ ،  $\dot{V}_1 \leq 0$  شده و طبق روش لیپانوف  $e_1$  به صفر همگرا می‌شود. در نتیجه  $x_1$  به  $x^*$  همگرا خواهد شد.

**مرحله دوم:** خطای بین مقدار واقعی و ایده‌آل  $x_2$  به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود.

$$e_2 = x_2 - Q_1 \quad (10)$$

تابع لیپانوف به صورت رابطه (11) در نظر گرفته می‌شود.

و مشتق آن به صورت زیر می باشد.

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 &= \dot{e}_1 e_1 + \dot{e}_2 e_2 + \dot{e}_3 e_3 = H_1 e_1^2 + H_2 e_2^2 \\ &+ e_2 \frac{1}{C} e_3 + e_3 (\dot{x}_3 - \dot{Q}_2) \\ &= H_1 e_1^2 + H_2 e_2^2 + e_2 \frac{1}{C} e_3 \\ &+ e_3 \left( \frac{1}{L_I} u - \frac{1}{L_I} x_2 - \frac{R_I}{L_I} x_3 - \dot{Q}_2 \right) \end{aligned} \quad (18)$$

در نهایت با برقراری شرط پایداری، سیگنال کنترل  $u$  به صورت زیر حاصل می شود.

$$u = L_I \left( \frac{1}{L_I} x_2 + \frac{R_I}{L_I} x_3 + H_3 e_3 - \frac{1}{C} e_2 + \dot{Q}_2 \right) \quad (19)$$

با جایگذاری رابطه (19) در رابطه (18)، رابطه (20) به دست می آید.

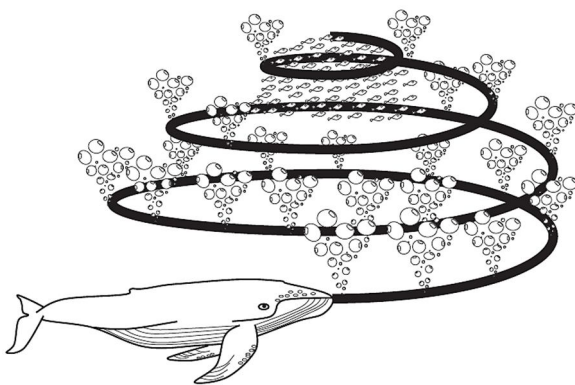
$$\dot{V}_3 = H_1 e_1^2 + H_2 e_2^2 + H_3 e_3^2 \leq 0 \quad (20)$$

با توجه به روند طی شده برای روش پسگام و در نهایت رابطه (20)، شرط پایداری لیاپانوف انتخاب مقدار منفی برای ضرایب پسگام می باشد، یعنی  $(H_1, H_2, H_3 < 0)$ . مقدار این ضرایب به شدت بر عملکرد کنترل کننده اثر می گذارد و انتخاب این ضرایب عموماً از طریق عملیات آزمون و خطا انجام می گیرد. از آنجایی که مقدار این پارامترها دارای محدوده وسیعی از اعداد هستند، این روش بسیار زمانبر است، به علاوه تضمینی برای دستیابی به بهترین مقدار وجود ندارد. در بخش بعد به نحوه به دست آوردن پارامترهای زیربهنه پسگام به کمک الگوریتم نهنگ پرداخته خواهد شد.

#### 4. الگوریتم بهینه ساز نهنگ

الگوریتم بهینه ساز نهنگ یکی از جدیدترین الگوریتم های فراابتکاری به شمار می رود که در سال 2016 ارائه شده است و در حوزه هوش ازدحامی جای می گیرد [33]. در این الگوریتم از روش شکار تور حسابی که توسط نهنگ های گوژپشت انجام می شود، الهام گرفته شده است. به این صورت که روند شکار با ایجاد حباب هایی در امتداد یک مسیر دایره ای شکل همانطور که

در شکل (2) نشان داده شده است، انجام می گیرد. در روند شکار، نهنگ با توجه به موقعیت سایر نهنگ ها شروع به جستجوی طعمه می کند. هنگامی که موقعیت شکار مشخص شد، با استفاده از دو حرکت مختلف که به طور همزمان انتخاب می شوند، شروع به احاطه کردن شکار می کند. این حرکات عبارتند از حرکت خطی در امتداد دایره کوچک و حرکت دایره ای در امتداد یک مسیر مارپیچی و در نهایت وقتی به طعمه نزدیک می شود شکار می کند. برای جزئیات بیشتر در مورد الگوریتم نهنگ می توان به مرجع [33] مراجعه نمود.



شکل (2): رفتار شکار حباب دار نهنگ های گوژپشت [33]

هدف این تحقیق استفاده از الگوریتم نهنگ برای بهینه سازی پارامترهای نامعلوم پسگام با حداقل کردن تابع هدف می باشد. به این صورت که پارامترهای نامعلوم پسگام یعنی  $(H_1, H_2, H_3)$  نشان دهنده موقعیت نهنگ می باشند و تابع هدف مورد نظر در این بهینه سازی انتگرال زمان - قدرمطلق خطا (ITAE) در نظر گرفته شده است که به صورت زیر تعریف می شود.

$$ITAE = \int_0^T t |e| dt \quad (21)$$

که در آن  $e$  اختلاف جریان فیلتر و مقدار مرجع آن (مکان طعمه) است و به صورت زیر تعریف می شود.

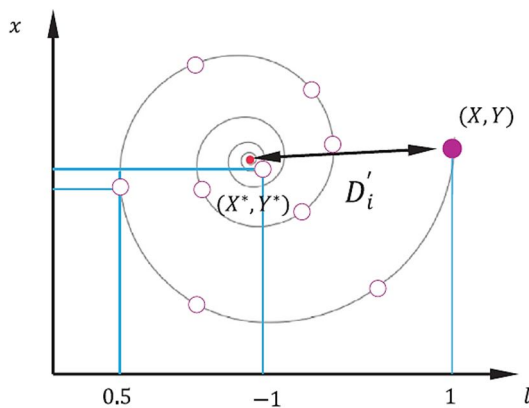
$$e = i_g(t) - i_g^{ref}(t) \quad (22)$$

توجه شود که دلیل انتخاب تابع هزینه ITAE نسبت به سایر توابع هزینه مانند ISE و IAE وجود متغیر زمان در این رابطه می باشد که باعث افزایش سرعت همگرایی تابع هزینه می گردد.

شکل (3) برای بهروزرسانی موقعیت مارپیچی، ابتدا فاصله بین نهنگ واقع در  $(X, Y)$  و طعمه واقع در  $(X^*, Y^*)$  محاسبه می‌شود. سپس یک معادله مارپیچی بین موقعیت نهنگ و طعمه ایجاد می‌شود تا حرکت مارپیچ شکل نهنگ‌های گوزپشت به صورت رابطه (25) به روز شود.

$$x(t+1) = De^{bl} \cos(2\pi l) + x^*(t) \quad (25)$$

در رابطه فوق،  $b$  یک عدد مثبت حقیقی برای تعریف شکل مارپیچ لگاریتمی بوده و  $l$  عددی تصادفی (شامل اعداد صحیح و اعشاری) بین  $[-1, 1]$  است.  $D = |x^*(t) - x(t)|$  نیز نشان‌دهنده فاصله بین بهترین موقعیت  $(x^*)$  و موقعیت جاری  $(x)$  می‌باشد.



شکل (3): فلوجارت الگوریتم نهنگ

اگر  $p \leq 0.5$  باشد، مسیر خطی برای بهروزرسانی موقعیت نهنگ به صورت  $x(t+1) = x^*(t) - AD$  تعریف می‌شود. به طور خلاصه می‌توان رابطه بهروزرسانی را به صورت رابطه (26) بیان کرد.

$$x(t+1) = \begin{cases} x^*(t) - AD & \text{if } p < 0.5 \\ De^{bl} \cos(2\pi l) + x^*(t) & \text{if } p \geq 0.5 \end{cases} \quad (26)$$

مرحله نهایی به عنوان مرحله جستجوی طعمه یا مرحله اکتشاف شناخته می‌شود. در این مرحله، نهنگ‌ها فضای مساله را برای یافتن مناطق بازدید نشده و افزایش تنوع جمعیت بررسی می‌کنند. یک عامل جستجو به طور تصادفی انتخاب شده، موقعیت هر نهنگ را مطابق رابطه (27) به روز می‌کند ( $1 < A$ ).

طبق الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ، اولین گام، مقداردهی اولیه جمعیت نهنگ (تعداد عامل‌های جستجو برای پارامترهای پس‌گام که در این تحقیق برابر 50 در نظر گرفته شد) و مقداردهی اولیه موقعیت تصادفی نهنگ‌ها (مقادیر تصادفی پارامتر برای  $H_1, H_2, H_3$  در هر مجموعه عامل) است. هر حرکت نهنگ به سمت طعمه با محاسبه تابع هدف آنها یعنی فاصله از طعمه (انحراف کمیت مورد نظر از مقدار مرجع آن) انجام می‌شود. هر نهنگ موقعیت خود را نسبت به بهترین آنها مطابق رابطه (23) به روز می‌کند. بنابراین قبل از بهروزرسانی موقعیت هر یک از عوامل جستجو، تابع هدف آنها محاسبه می‌شود و عاملی با کمترین تابع هدف به عنوان بهترین عامل جستجو انتخاب می‌شود.

$$x(t+1) = x^*(t) - AD \quad (23)$$

$$D = |Cx^*(t) - x(t)|$$

در رابطه فوق  $t$  شماره تکرار،  $x(t)$  موقعیت نهنگ در تکرار  $t$  ام و  $x^*(t)$  بهترین موقعیت نهنگ می‌باشد. همچنین  $C$  یک ضریب بوده که به صورت  $C = 2r$  داده می‌شود و  $r$  یک عدد تصادفی (شامل اعداد صحیح و اعشاری) در بازه  $[0, 1]$  است. پارامتر تصادفی  $A$  برای دور کردن عامل جستجو از یک نهنگ انتخاب شده می‌باشد و مقدار آن با استفاده از رابطه (24) محاسبه می‌شود.

$$A = a(2r - 1) \quad (24)$$

که در آن  $a$ ، عددی ثابت (شامل اعداد صحیح و اعشاری) است که از 2 به 0 کاهش می‌یابد.

همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، هنگامی که موقعیت طعمه مشخص شد، نهنگ‌ها با استفاده از دو حرکت خطی و دایره‌ای موقعیت خود را به روز می‌کنند. برای مدل‌سازی این رفتار همزمان، فرض می‌شود که احتمال 50% انتخاب بین این دو حرکت برای بهروزرسانی موقعیت نهنگ‌ها در طول بهینه‌سازی وجود دارد. به این ترتیب در صورتی که  $p$  یک عدد تصادفی (شامل اعداد صحیح و اعشاری) در بازه  $[0, 1]$  در نظر گرفته شود، اگر  $p \geq 0.5$  باشد، مسیر مارپیچی به روز می‌شود. مطابق

الگوریتم به دلیل مکانیسم بهروزرسانی موقعیت نهنگ‌ها با استفاده از رابطه (27) است. طبق این رابطه نهنگ‌ها در مراحل اولیه تکرارها به طور تصادفی در اطراف یکدیگر حرکت می‌کنند و در بقیه تکرارها به همگرایی بالا می‌رسند که از رابطه (26) نشات می‌گیرد. این معادله به نهنگ‌ها اجازه می‌دهد تا به سرعت در اطراف یکدیگر قرار گیرند یا در مسیر مارپیچی شکل به سمت بهترین راه‌حل به دست آمده تاکنون حرکت کنند. از آنجایی که این دو مرحله به طور جداگانه و تقریباً در نیمی از تکرارها انجام می‌شوند، الگوریتم نهنگ سرعت همگرایی بالایی را در تکرارها نشان می‌دهد و احتمال قرار گرفتن در بهترین موقعیت را افزایش می‌دهد. در حالی که، PSO، GSA و هر الگوریتم مشابه دیگری از یک فرمول برای بهروزرسانی موقعیت عوامل جستجو استفاده می‌کنند که احتمال رکود در بهترین موقعیت را افزایش می‌دهد. در ادامه، به بررسی نتایج شبیه‌سازی پرداخته می‌شود.

## 5. نتایج شبیه‌سازی

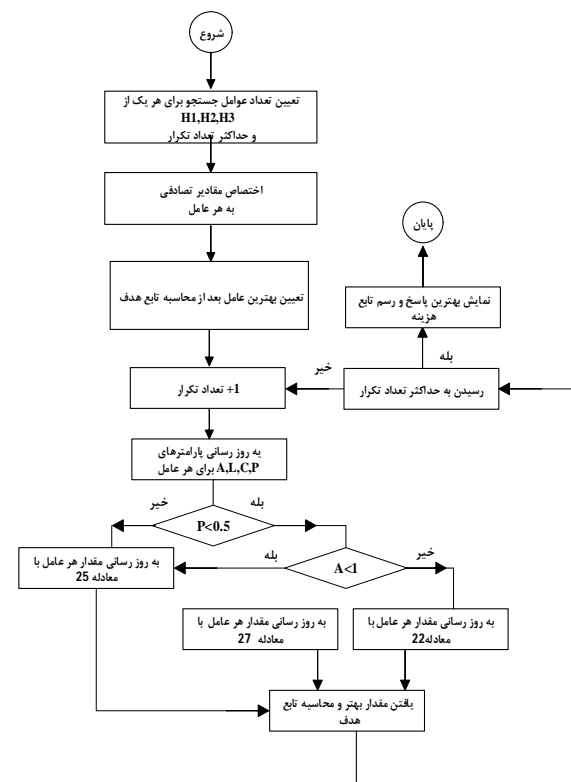
برای ارزیابی روش پیشنهادی از محیط MATLAB/Simulink برای شبیه‌سازی سیستم نشان داده شده در شکل (1) استفاده شده است. پارامترهای شبیه‌سازی در جدول (1) فهرست شده است.

ابتدا برای دستیابی به بهترین مقدار برای ضرایب پسگام (پارامترهای  $H_1, H_2, H_3$ ) که در محدوده  $[-1e^4 - 5e^{-1}]$  در نظر گرفته شده‌اند، الگوریتم بهینه‌ساز نهنگ و همچنین الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) اجرا شده‌اند. پارامترهای الگوریتم PSO در جدول (2) در آورده شده است. حداکثر تعداد تکرار در هر دو الگوریتم در مقدار 100 تنظیم شده و نتایج به دست آمده از دو الگوریتم به همراه مقدار تابع هدف در جدول (3) آورده شده است. همچنین به منظور مقایسه دقت و سرعت همگرایی دو الگوریتم، منحنی تابع هدف در شکل (5) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است، الگوریتم نهنگ، نتیجه بهتری از لحاظ تعداد تکرار کم‌تر و همچنین تابع هزینه کمتر نسبت به الگوریتم ازدحام ذرات داشته

$$x(t+1) = x_{rand}(t) - AD \quad (27)$$

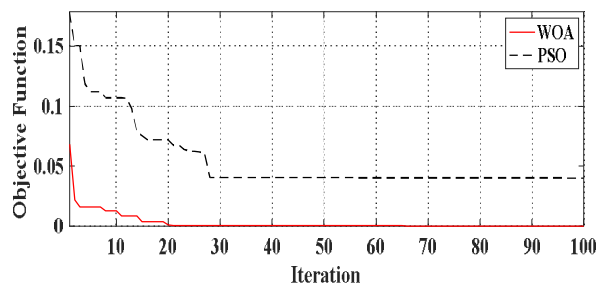
$$D = |Cx_{rand}(t) - x(t)|$$

که در آن  $x_{rand}$  یک موقعیت تصادفی انتخاب شده از جمعیت است. اگر ضریب  $A < 1$  نهنگ‌ها موقعیت خود را با استفاده از استراتژی تعریف شده در رابطه (22) به روز می‌کنند. پس از هر بهروزرسانی تابع هدف محاسبه می‌شود و اگر یک عامل جستجوی دیگر خطای کمتری داشته باشد، به عنوان بهترین عامل جستجو انتخاب می‌شود. اما قبل از اینکه این اتفاق بیافتد، موقعیت هر عامل به روز شده، بررسی می‌شود. اگر موقعیت هر عامل به روز شده فراتر از فضای جستجو باشد، در موقعیت قبلی خود باقی می‌ماند. وقتی تعداد تکرار به حداکثر خود رسید، الگوریتم به پایان می‌رسد و مقادیر زیربینه برای ضرایب کنترل کننده پسگام تعیین می‌شود. فلوجارت این الگوریتم در شکل (4) نشان داده شده است.



شکل (4): فلوجارت الگوریتم نهنگ

برتری الگوریتم نهنگ به طور کلی نسبت به سایر الگوریتم‌ها در مرجع [33] بررسی شده است. توانایی بالای اکتشاف این



شکل (5): تابع هدف بر حسب تعداد تکرار

### 1.5. حضور بار هارمونیک/ میان هارمونیک

در این بخش، بررسی عملکرد کنترل کننده پسگام در حضور یک بار غیرخطی حاوی مولفه‌های هارمونیک و میان هارمونیک انجام می‌شود. این پیکربندی شامل یک موتور آسنکرون به همراه درایو کنترل سرعت است که یکی از منابع تولید میان هارمونیک می‌باشد. درایو تنظیم سرعت (ASD)<sup>2</sup> یک مبدل فرکانسی است که فرکانس تغذیه ورودی را به یک فرکانس خروجی مورد نظر تغییر می‌دهد. ولتاژ AC با استفاده از پل دیودی به ولتاژ DC تبدیل می‌شود. در پیوند DC یک خازن به منظور حذف ریبیل ولتاژ قرار دارد تا ولتاژ خروجی DC ثابتی تولید شود. این ولتاژ DC به وسیله اینورتر با مدولاسیون پهنای پالس (PWM) به ولتاژ AC با دامنه و فرکانس متغیر برای کنترل سرعت موتور القایی تبدیل می‌شود. ASD علاوه بر هارمونیک‌های مخصوص هر طبقه، میان هارمونیک‌هایی را ایجاد می‌کند که در شرایط ایده‌آل منبع، به وسیله تلفیق هارمونیک‌های یکسوکننده و اینورتر به وجود می‌آیند و فرکانس آن از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$f_{ih_{dc}}(v, m_f, r, j) = |(v-1) * q_{ss} \pm 1| * f \pm |m_f j \pm r| * f_o \quad v = 1, 2.. \quad (28)$$

در این رابطه،  $q_{ss}$  تعداد پالس‌های اینورتر،  $m_f$  ضریب مدولاسیون فرکانس،  $f$  فرکانس اصلی و  $f_o$  فرکانس خروجی اینورتر می‌باشد. در ضمن  $r$  و  $j$  اعداد صحیح می‌باشند. با وارد کردن مقادیر ارائه شده از جدول (1) در این رابطه، فرکانس‌های میان هارمونیک تولیدی به صورت رابطه (29) در می‌آیند.

است. پس از به دست آوردن ضرایب، آزمایش‌های شبیه‌سازی تحت شرایط مختلف برای اثبات عملکرد طرح پیشنهادی انجام گرفته‌اند که در ادامه ارائه می‌گردد.

جدول (1): پارامترهای شبیه‌سازی

اندازه	پارامتر	کمیت
173 V	ولتاژ شبکه (خط -RMS)	
50 Hz	فرکانس شبکه $f$	شبکه قدرت AC
1/2 mH / 0/1 $\Omega$	امپدانس شبکه $L_s/R_s$	
5 $\Omega$	بار خطی $R_L$	
10 $\Omega$ / 10 mH	بار غیرخطی $R/L$	پارامترهای بار
29	ضریب مدولاسیون $m_f$	
12 Hz	فرکانس خروجی اینورتر $f_o$	
0/2 $\Omega$ / 5 mH	امپدانس شبکه $R_g/L_g$	
0/2 $\Omega$ / 5 mH	امپدانس سمت اینورتر $R_l/L_l$	پارامترهای فیلتر LCL
5 $\mu$ F	خازن فیلتر $C$	
10 kHz	فرکانس سوئیچینگ $f_{sw}$	
300 V	ولتاژ مرجع پیوند DC $V_{dc}$	
220 $\mu$ F	خازن پیوند DC $C_{dc1}, C_{dc2}$	پیوند DC

جدول (2): پارامترهای الگوریتم ازدحام ذرات

پارامتر	PSO	
ضریب آموزش	$c_1=2$	$c_2=1$
ضریب وزنی	$w=0/9$	
تعداد ذرات	50	
حداکثر تعداد تکرار	100	

جدول (3): ضرایب بهینه پسگام

پارامتر	PSO	WOA
$H_1$	$-4e^4$	$-5e^4$
$H_2$	$-2e^{-1}$	$-1e^{-1}$
$H_3$	$-1.2e^4$	$-5e^4$
تابع هدف	0.04	0

<sup>2</sup> Adjustable speed drive

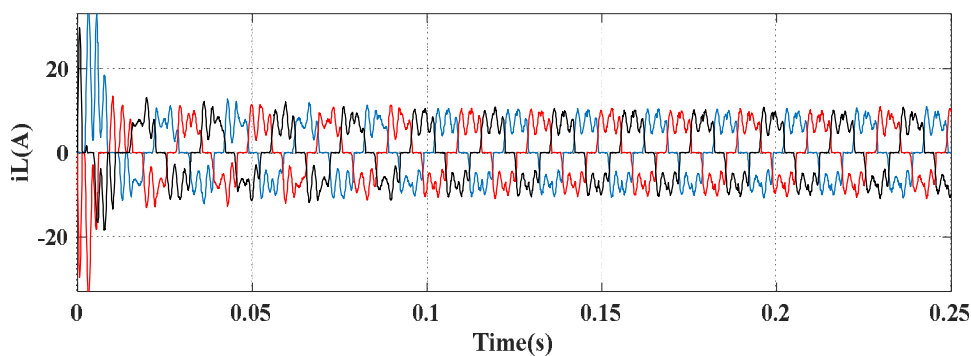
26% را نشان می دهد که از شبکه عبور می کند. کنترل کننده پسگام تنظیم شده با الگوریتم نهنگ در لحظه  $t = 0.1$  ثانیه فعال شده و جریان شبکه در شکل (6-ج) آورده شده است. همان طور که ملاحظه می شود جریان شبکه تا لحظه  $t = 0.1$  ثانیه اعوجاج را تجربه می کند و پس از آن جریان هارمونیک ناشی از بار غیرخطی به خوبی توسط فیلتر خنثی می شود. شکل (6-د)، تحلیل THD را نشان می دهد که منجر به کاهش قابل توجهی در THD جریان شبکه از 26/6% به 1/5% شده است. همچنین سیگنال کنترلی در شکل (6-ه) نشان داده شده است.

$$f_{ihdc}(v, m_f, r, j) = \left| |(v-1) * 6 \pm 1| * 50 \pm |29j \pm r| * 12 \right| \quad v = 1, 2.. \quad (29)$$

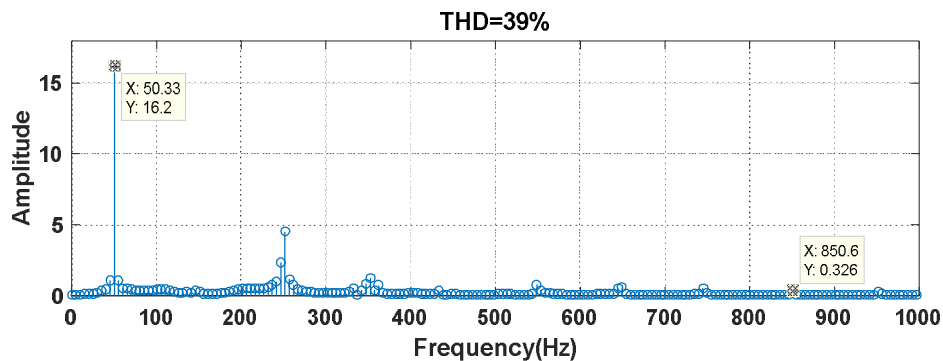
طبق این رابطه فرکانس های میان هارمونیک زیر می تواند حاصل شوند:

... و 362 و 262 و 178 و 122 و 22

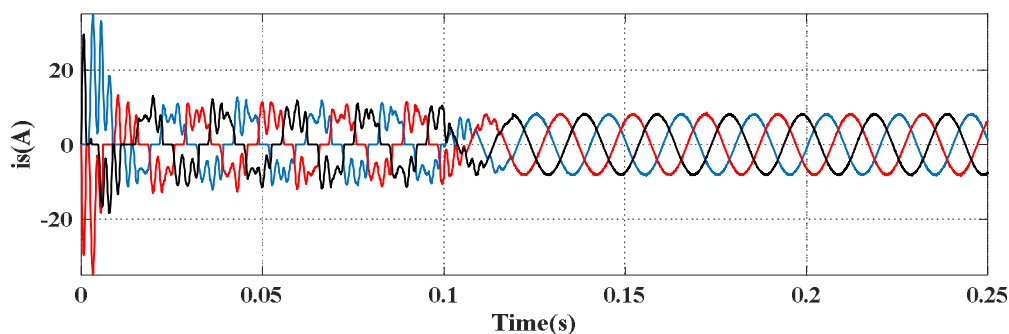
پس از اتصال این بار در نقطه PCC و انجام جبران سازی، نتایج در شکل (6) ارائه شده است. شکل موج جریان بار و آنالیز THD آن به ترتیب در شکل (6-الف) و شکل (6-ب) نشان داده شده است. قابل توجه است که جریان بار اعوجاج هارمونیک کل



(الف)

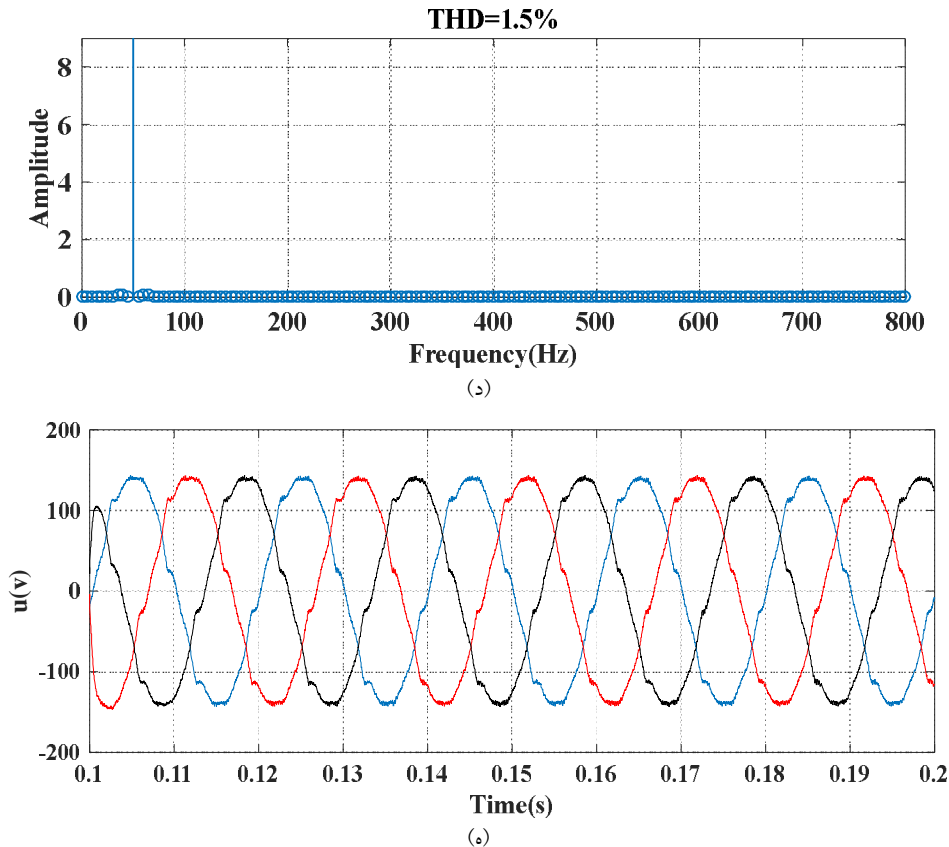


(ب)



(ج)

شکل (6): عملکرد کنترل کننده پسگام تنظیم شده با الگوریتم نهنگ در حضور بار میان هارمونیک: (الف) جریان بار، (ب) آنالیز هارمونیک جریان بار، (ج) جریان شبکه، (د) آنالیز هارمونیک جریان شبکه، (ه) سیگنال کنترل.



ادامه شکل (6): عملکرد کنترل کننده پسگام تنظیم شده با الگوریتم نهنگ در حضور بار میان‌هارمونیکی: (الف) جریان بار، (ب) آنالیز هارمونیکی جریان بار، (ج) جریان شبکه، (د) آنالیز هارمونیکی جریان شبکه، (ه) سیگنال کنترل.

نتایج حاصل از کنترل کننده پسگام تنظیم شده با الگوریتم ازدحام ذرات نیز در شکل (7) آورده شده است. شکل (7-الف) و شکل (7-ب) به ترتیب جریان شبکه و تحلیل THD آن را نشان می‌دهد. واضح است که جبران‌سازی به کمک کنترل کننده پسگام تنظیم شده توسط الگوریتم نهنگ نسبت به الگوریتم ازدحام ذرات نتیجه بهتری را ارائه می‌دهد. همچنین سیگنال کنترلی در شکل (7-ج) نشان داده شده است.

نتایج حاصل از کنترل کننده پسگام تنظیم شده با الگوریتم PSO نیز در شکل (9) آورده شده است. شکل (9-الف) و شکل (9-ب) به ترتیب جریان شبکه و جریان نول را نشان می‌دهد که نشان‌دهنده عدم جبران‌سازی کامل نامتعادلی توسط پسگام تنظیم شده با PSO می‌باشد.

### 3.5. عملکرد کنترل کننده تحت شبکه هارمونیکی

در این بخش، ولتاژ شبکه یک انحراف از رفتار سینوسی خالص را نشان می‌دهد که شامل هارمونیک مرتبه پنجم و هفتم می‌باشد. شایان ذکر است که مولفه‌های هارمونیک پنجم و هفتم به ترتیب

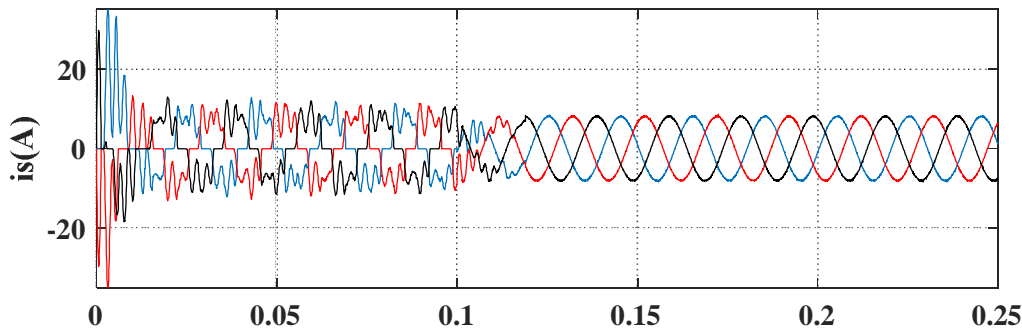
در این بخش برای بررسی بار نامتعادل، یک بار مقاومتی سه‌فاز با مقادیر  $(R_1=8\Omega, R_2=12\Omega, R_3=16\Omega)$  به PCC متصل شده است. همچنین یک بار تک‌فاز شامل یک یکسوکننده موازی شده با مقاومت و سلف بین فازهای b و c قرار گرفته است. شکل (8-الف) جریان بار که برابر با جریان شبکه قبل از جبران است را نشان می‌دهد. کنترل کننده پسگام تنظیم شده با الگوریتم

### 2.5. حضور بار هارمونیکی و نامتعادل

نتایج حاصل از کنترل کننده پسگام تنظیم شده با الگوریتم ازدحام ذرات نیز در شکل (7) آورده شده است. شکل (7-الف) و شکل (7-ب) به ترتیب جریان شبکه و تحلیل THD آن را نشان می‌دهد. واضح است که جبران‌سازی به کمک کنترل کننده پسگام تنظیم شده توسط الگوریتم نهنگ نسبت به الگوریتم ازدحام ذرات نتیجه بهتری را ارائه می‌دهد. همچنین سیگنال کنترلی در شکل (7-ج) نشان داده شده است.

در شکل (10- الف) و شکل (10- ب) نشان داده شده است. شکل (10- ج) جریان شبکه را پس از اعمال روش BSC به همراه الگوریتم PSO نشان می‌دهد. اگرچه این روش قادر به جبران هارمونیک‌ها هست، مشاهده می‌شود که در مقایسه با روش BSC به همراه الگوریتم نهنگ پاسخ گذرای کندتری از خود نشان می‌دهد.

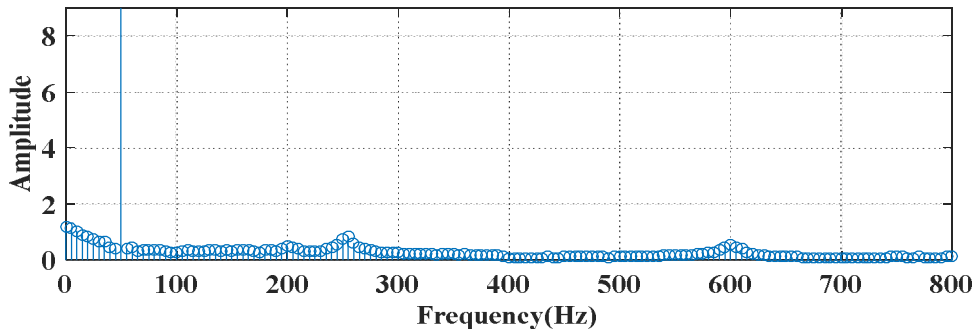
10% و 7% مولفه اصلی را تشکیل می‌دهند. حضور چنین هارمونیک‌هایی در ولتاژ شبکه باعث هارمونیک شدن جریان شبکه با THD برابر با 12% می‌شود. پس از فعال شدن کنترل کننده BSC به همراه الگوریتم نهنگ، THD به شدت کاهش یافته و به مقدار 0/5 درصد می‌رسد. این نتیجه، برتری روش در جبران اعوجاج جریان شبکه ناشی از ولتاژ شبکه هارمونیک را نشان می‌دهد. جریان بار و جریان شبکه به ترتیب



Time(s)

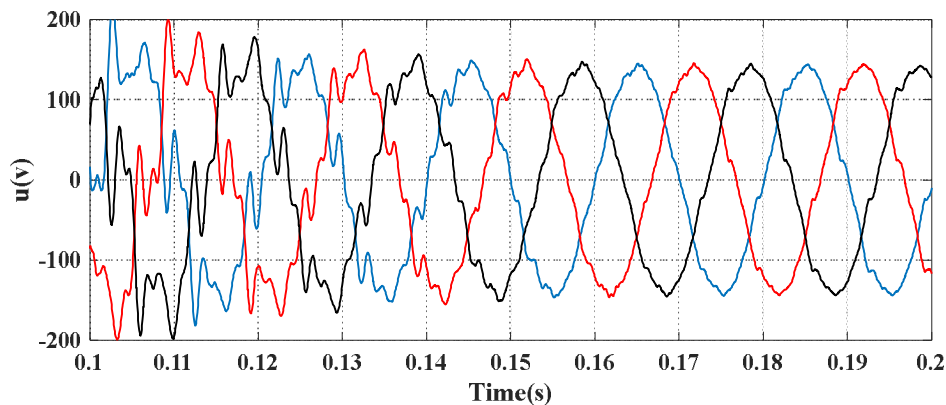
(الف)

THD=4%



Frequency(Hz)

(ب)

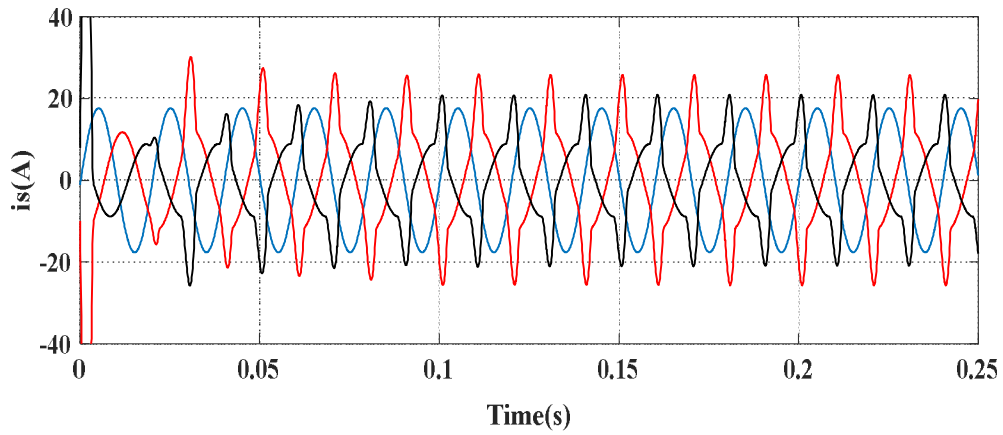


Time(s)

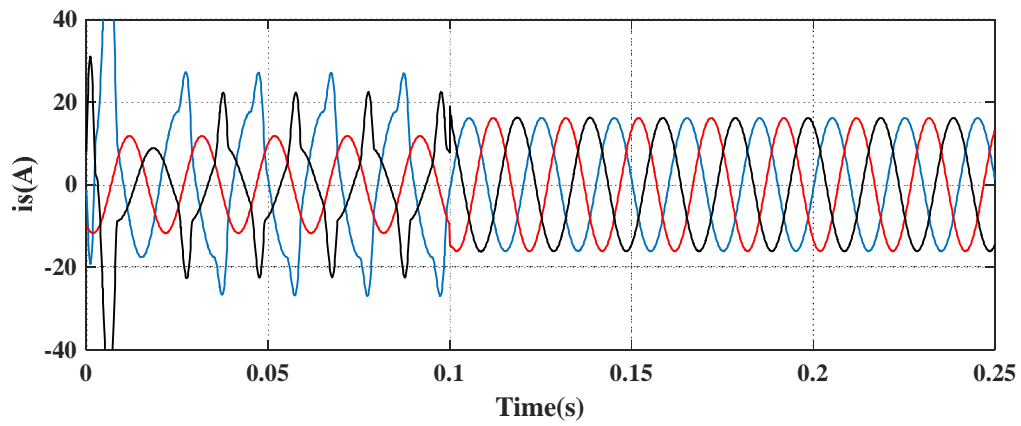
(ج)

شکل (7): عملکرد کنترل کننده پسگام تنظیم شده با الگوریتم PSO در حضور بار میان هارمونیک: (الف) جریان شبکه، (ب) آنالیز هارمونیک جریان

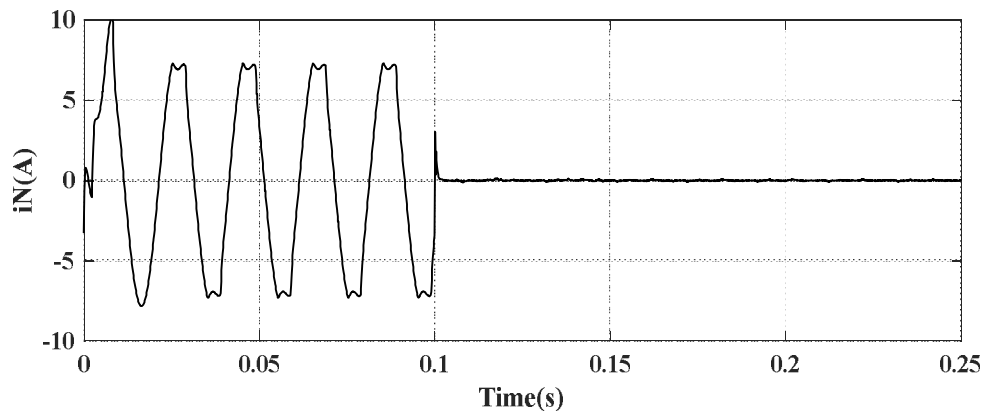
شبکه، (ج) سیگنال کنترل.



(الف)

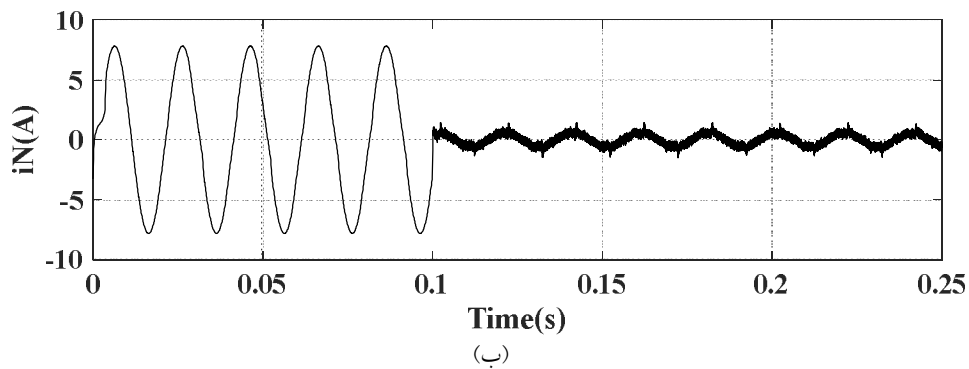
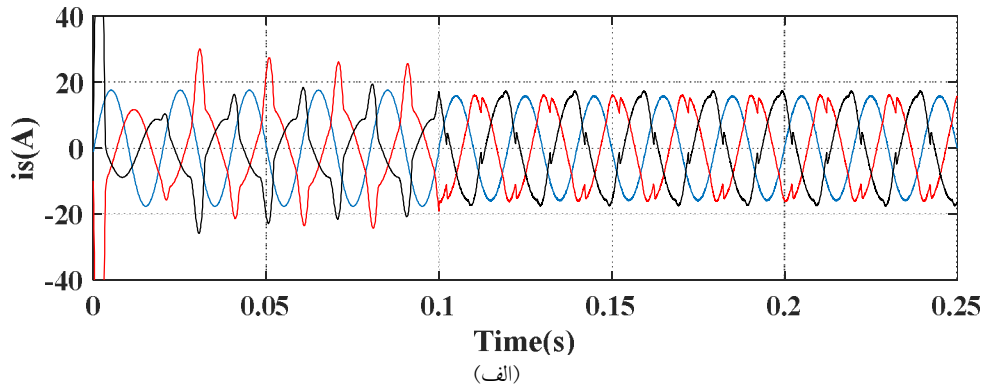


(ب)

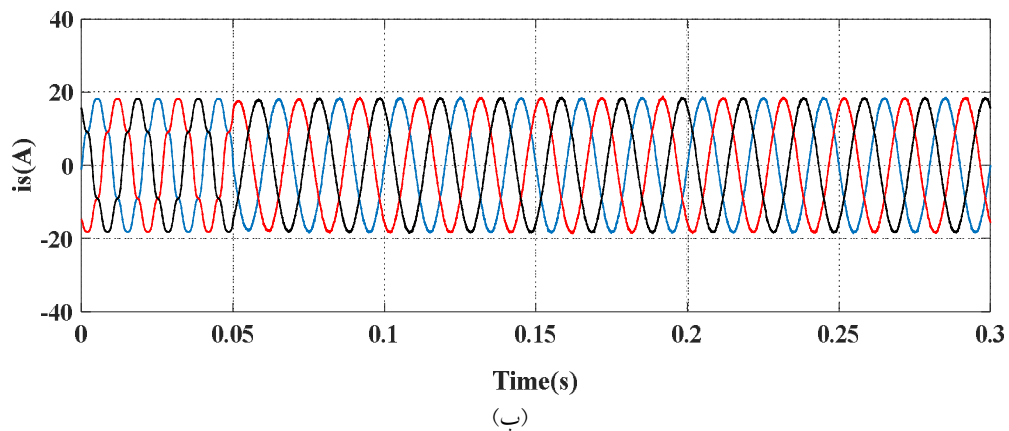
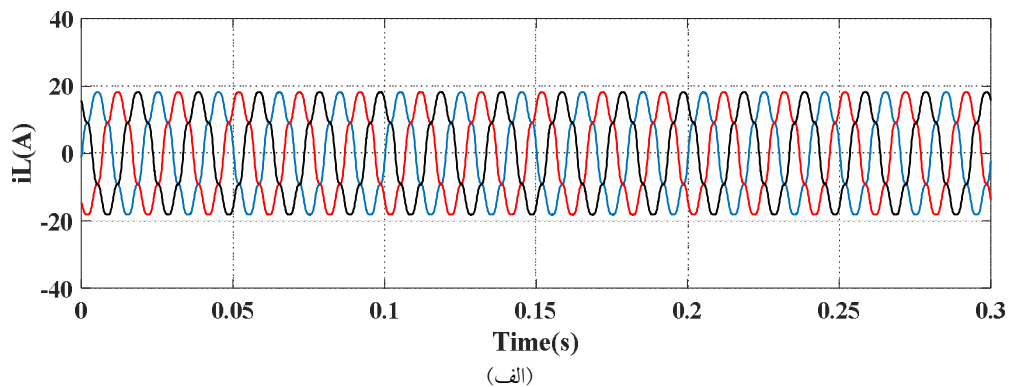


(ج)

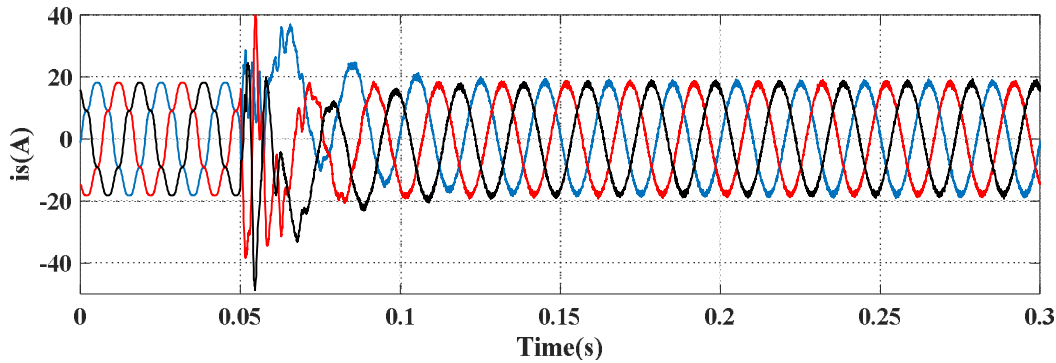
شکل (8): عملکرد پسگام به همراه الگوریتم نهنگ در حضور بار نامتعادل غیرخطی: (الف) جریان بار، (ب) جریان شبکه، (ج) جریان نول.



شکل (9): عملکرد پسگام به همراه الگوریتم PSO در حضور بار نامتعادل غیرخطی: (الف) جریان شبکه، (ب) جریان نول.



شکل (10): عملکرد کنترل کننده در حضور شبکه هارمونیک: (الف) جریان بار، (ب) جریان شبکه با استفاده از BSC به همراه الگوریتم نهنگ، (ج) جریان شبکه با استفاده از BSC به همراه PSO.



(ج)

ادامه شکل (10): عملکرد کنترل کننده در حضور شبکه هارمونیک: (الف) جریان بار، (ب) جریان شبکه با استفاده از BSC به همراه الگوریتم نهنگ، (ج) جریان شبکه با استفاده از BSC به همراه PSO.

## 6. نتیجه گیری

تعارض منافع: نویسندگان اعلام می کنند که هیچ تعارض منافعی ندارند.

در این مقاله، به طراحی و بررسی عملکرد کنترل کننده پسگام با پارامترهای تنظیم شده زیربینه از طریق الگوریتم نهنگ به منظور جبران هارمونیک جریان ناشی از بار غیرخطی پرداخته شد. تابع هدف مورد استفاده در این مساله بهینه سازی بر مبنای معیار انتگرال زمان-قدرمطلق خطا (ITAE) می باشد. عملکرد سیستم با کنترل کننده پسگام تنظیم شده توسط نهنگ با عملکرد سیستم با کنترل کننده پسگام تنظیم شده توسط الگوریتم ازدحام ذرات مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان دهنده عملکرد مطلوب الگوریتم نهنگ در تعیین پارامترهای کنترل کننده پسگام در مساله جبران هارمونیک می باشد. در ضمن عملکرد مناسب کنترل کننده در شرایط حضور بار نامتعادل شایستگی این روش را در اصلاح عدم تعادل نیز نشان می دهد.

## مراجع

- [1] M. F. Akram, R. Burch, G. Carpinelli, and W. Xu, "Interharmonics: Theory and Measurement," IEEE Trans. Power Del., vol. 22, no. 4, pp. 2335-2348, 2007, doi: 10.1109/TPWRD.2007.905505.
- [2] F. D. Rosa, R. Langella, A. Sollazzo, and A. Testa, "On the Interharmonic Components Generated by Adjustable Speed Drives," IEEE Trans. Power Del., vol. 20, no. 4, pp. 2535-2543, 2005, doi: 10.1109/TPWRD.2005.852313.
- [3] D. Li, K. Yang, Z. Q. Zhu, and Y. Qin, "A Novel Series Power Quality Controller with Reduced Passive Power Filter," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 64, no. 1, pp. 773-784, 2017, doi: 10.1109/TIE.2016.2527727.
- [4] T. Lee and S. Hu, "An Active Filter with

- Resonant Current Control to Suppress Harmonic Resonance in a Distribution Power System,” *IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron.*, vol. 4, no. 1, pp. 198-209, 2016, doi: 10.1109/JESTPE.2015.2478149.
- [5] E. Clarke, *Circuit Analysis of A-C Power Systems*. New York, NY, USA: Wiley, 1950.
- [6] C. Lascu, L. Asiminoaei, I. Boldea, and F. Blaabjerg, “Frequency Response Analysis of Current Controllers for Selective Harmonic Compensation in Active Power Filters,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 2, pp. 337-347, 2009, doi: 10.1109/TIE.2008.2006953.
- [7] J. Fei and H. Wang, “Experimental Investigation of Recurrent Neural Network Fractional-Order Sliding Mode Control of Active Power Filter,” *IEEE Trans. Circuits Syst. II, Exp. Briefs*, vol. 67, no. 11, pp. 2522-2526, 2020, doi: 10.1109/TCSII.2019.2953223.
- [8] H. De Battista and R. J. Mantz, “Harmonic Series Compensators in Power Systems: Their Control via Sliding Mode,” *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 8, no. 6, pp. 939-947, 2000, doi: 10.1109/87.880597.
- [9] L. C. Proença and L. Rolim, “Two-Leg Modular Multilevel Cascade Converter as Active Power Filter-Control Improvement,” *IEEE Latin Am. Trans.*, vol. 17, no. 9, pp. 1501-1508, 2019, doi: 10.1109/TLA.2019.8931139.
- [10] S. Bosch, J. Staiger, and H. Steinhart, “Predictive Current Control for an Active Power Filter With LCL-Filter,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 65, no. 6, pp. 4943-4952, 2018, doi: 10.1109/TIE.2017.2772176.
- [11] H. Chen, H. Liu, and Y. Xing, “Enhanced DFT-Based Controller for Selective Harmonic Compensation in Active Power Filters,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 34, no. 8, pp. 8017-8030, 2019, doi: 10.1109/TPEL.2018.2877848.
- [12] H. Geng, Z. Zheng, T. Zou, B. Chu, and A. Chandra, “Fast Repetitive Control With Harmonic Correction Loops for Shunt Active Power Filter Applied in Weak Grid,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 55, no. 3, pp. 3198-3206, 2019, doi: 10.1109/TIA.2019.2894178.
- [13] W. Jiang, X. Ding, Y. Ni, J. Wang, L. Wang, and W. Ma, “An Improved Deadbeat Control for a Three-Phase Three-Line Active Power Filter with Current-Tracking Error Compensation,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 33, no. 3, pp. 2061-2072, 2018, doi: 10.1109/TPEL.2017.2693325.
- [14] W. Sou et al., “A Deadbeat Current Controller of LC-Hybrid Active Power Filter for Power Quality Improvement,” *IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron.*, vol. 8, no. 4, pp. 3891-3905, 2020, doi: 10.1109/JESTPE.2019.2933934.
- [15] T. M. T. Thentral et al., “Development of Control Techniques Using Modified Fuzzy Based SAPF for Power Quality Enhancement,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 38354-38365, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3063529.
- [16] Q. Zhang and D. He, “Disturbance-Observer-Based Adaptive Fuzzy Control for Strict-Feedback Switched Nonlinear Systems With Input Delay,” *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 29, no. 7, pp. 1942-1952, 2021, doi: 10.1109/TFUZZ.2020.2989265.
- [17] C.-I. Chen and C.-H. Chen, “Recurrent Wavelet Fuzzy Neural Network-Based Reference Compensation Current Control Strategy for Shunt Active Power Filter,” *Energies*, vol. 15, no. 22, Art. no. 8687, 2022, doi: 10.3390/en15228687.
- [18] P. Chittora, A. Singh, and M. Singh, “Design and Analysis of Functional Link Artificial Neural Network Controller for Shunt Compensation,” *IET Gen. Transm. Distrib.*, vol. 13, no. 12, pp. 2280-2289, 2019, doi: 10.1049/iet-gtd.2018.6070.

- [19] M. Li, H. Xiao, and M. Cheng, "An Adaptive Strategy Based on Repetitive Predictive Control for Improving Adaptability of LCL-Type Grid-Connected Inverters Under Weak Grid," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 37, no. 3, pp. 2562-2572, 2022, doi: 10.1109/TPEL.2021.3108878.
- [20] J. K. Liu and F. C. Sun, "Research and Development on Theory and Algorithms of Sliding Mode Control," *Control Theory Appl.*, vol. 24, no. 3, pp. 407-418, 2007.
- [21] T. K. Roy, M. A. Mahmud, M. A. Barik, A. B. M. Nasiruzzaman, and A. M. T. Oo, "A Nonlinear Backstepping Control Scheme for Rapid Earth Fault Current Limiters in Resonant Grounded Power Distribution Systems: Applications for Mitigating Powerline Bushfires," *IEEE J. Emerg. Sel. Topics Ind. Electron.*, vol. 3, no. 2, pp. 362-371, 2022, doi: 10.1109/JESTIE.2021.3088387.
- [22] X. Yan and M. Cheng, "Backstepping-Based Direct Power Control for Dual-Cage Rotor Brushless Doubly Fed Induction Generator," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 38, no. 2, pp. 2668-2680, 2023, doi: 10.1109/TPEL.2022.3214331.
- [23] I. K. Amin and M. N. Uddin, "Nonlinear Control Operation of DFIG-Based WECS Incorporated With Machine Loss Reduction Scheme," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 35, no. 7, pp. 7031-7044, 2020, doi: 10.1109/TPEL.2019.2955021.
- [24] A. Ghamri, T. Mahni, M. Benchouia, K. Srairi, and A. Golea, "Comparative Study Between Different Controllers Used in Three-Phase Four-Wire Shunt Active Filter," *Energy Procedia*, vol. 74, pp. 807-816, 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.07.816.
- [25] X. Hao, I. Salhi, S. Laghrouche, Y. Ait-Amirat, and A. Djerdir, "Backstepping Super-Twisting Control of Four-Phase Interleaved Boost Converter for PEM Fuel Cell," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 37, no. 7, pp. 8011-8022, 2022, doi: 10.1109/TPEL.2022.3149099.
- [26] O. Eddine, A. Chebabhi, and A. Kessal, "Backstepping Based Grey Wolf and DPC for Power Quality Improvement and Active Power Injection in PV Grid-Connected System Based on Interleaved Boost Converter," *Period. Polytech. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 67, no. 3, pp. 268-280, 2023, doi: 10.3311/PPee.21852.
- [27] N. Shrivastava, A. Baliyan, and S. J. Alam, "Hybrid Series Active Power Filter for Harmonic Compensation Using PI Controller Tuned with WOA Technique," *Russ. Electr. Eng.*, vol. 93, no. 2, pp. 129-140, 2022, doi: 10.3103/S1068371222020110.
- [28] K. Abhishek and D. Dushmanta, "A Whale Optimization Algorithm Based Shunt Active Power Filter for Power Quality Improvement," *Int. J. Electr. Energy*, vol. 6, no. 1, pp. 7-12, 2018, doi: 10.18178/ijoe.6.1.7-12.
- [29] T. J. Son, L. K. Yun, and Y. K. Haur, "Shunt Active Power Filter Design with Whale Optimization Algorithm for Three Phase Power System," in *Proc. 2nd Int. Conf. Electr. Control Instrum. Eng. (ICECIE)*, 2020, pp. 1-10, doi: 10.1109/ICECIE50279.2020.9309556.
- [30] X. Huang, C. Zhang, Q. Li, Y. Tai, B. Gao, and J. Shi, "Optimal Tuning of Fractional Order PID Controller for DC Motor Speed Control via Chaotic Atom Search Optimization Algorithm," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 38100-38114, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2905961.
- [31] K. B. O. Medani, S. Sayah, and A. Bekrar, "Whale Optimization Algorithm Based Optimal Reactive Power Dispatch: A Case Study of the Algerian Power System," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 163, pp. 696-705, 2018, doi: 10.1016/j.epsr.2017.09.001.
- [32] A. Rosyadi, O. Penangsang, and A. Soeprijanto, "Optimal Filter Placement and Sizing in Radial Distribution System Using Whale Optimization Algorithm," in *Proc. Int. Sem. Intell. Technol. Its*

Appl. (ISITIA), 2017, pp. 87-92, doi:  
10.1109/ISITIA.2017.8124060.

- [33]S. Mirjalili and A. Lewis, "The Whale Optimization Algorithm," Adv. Eng. Softw., vol. 95, pp. 51-67, 2016, doi:  
10.1016/j.advengsoft.2016.01.008.