

## کنترل مبدل بوست با استفاده از PID مرتبه کسری بهینه شده با الگوریتم رقابت استعماری

صابر فلاحتی علی آبادی<sup>۱</sup>، عباس کتابی<sup>۲</sup> و مسعود حاجی اکبری فینی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه کاشان - کاشان - ایران  
s\_falahati@yahoo.com

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه کاشان - کاشان - ایران  
aketabi@kashanu.ac.ir

۳- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی اصفهان - اصفهان - ایران  
hajiakbari@grad.kashanu.ac.ir

**چکیده:** این مقاله روش جدیدی را برای طراحی کنترل کننده PID مرتبه کسری (FOPID) به منظور کنترل مبدل بوست ارایه می کند. FOPID یک نوع PID است که مرتبه ترم مشتقی و انتگرالی آن به جای عدد صحیح از مرتبه کسری است و با استفاده از آن می توان سیستم را با انعطاف پذیری بیشتری کنترل کرد. در این مقاله، برای کنترل مبدل بوست از کنترل کننده FOPID استفاده شده است. به منظور تعیین شاخص های کنترل کننده FOPID از الگوریتم رقابت استعماری (ICA) که به علت کارایی و دقت در حل مسایل بهینه سازی، در بین پژوهشگران محبوبیت خاصی یافته، بهره گرفته شده است. به منظور نشان دادن کارایی روش پیشنهادی، شبیه سازی هایی در محیط برنامه MATLAB انجام شده و نتایج با الگوریتم ژنتیک و نیز با کنترل کننده های PID و PI مقایسه شده است. نتایج شبیه سازی کارایی روش پیشنهادی را نشان می دهند.

**واژه های کلیدی:** الگوریتم رقابت استعماری، بهینه سازی، مبدل بوست، PID مرتبه کسری

زیادی را می طلبد [۲].

### ۱- مقدمه

در بین توپولوژی های مختلف مبدل های DC/DC مبدل بوست دارای کاربردهای صنعتی زیادی از قبیل درایو موتورها، وسایل نقلیه برقی، منابع تغذیه بدون وقفه، منابع انرژی تجدید پذیر (سیستم فتوولتاییک و توربین باد) و دستگاه های جوشکاری است. به طور معمول، طراحی بسیاری از کنترل کننده ها برای مبدل بوست، بر اساس خطی سازی مدل میانگین<sup>۱</sup> فضای حالت به دست می آید [۳]. مدل خطی شده مبدل، به شکل یک سیستم غیر مینیمم فاز بوده و بنابراین، پاسخ دینامیکی آن کند و لخت است و نمی تواند پاسخ راه اندازی<sup>۲</sup> مناسبی را فراهم آورد. بنابراین، طراحی کنترل کننده برای مبدل بوست همچنان یک موضوع چالشی برای پژوهشگران است [۴].

امروزه با گسترش یافتن استفاده از انرژی های تجدیدپذیر، بهره گیری از مبدل های DC/DC افزایش یافته است. در کنترل این گونه مبدل ها مطلوب این است که ولتاژ خروجی فرمان مرجع را با حالت گذرا و خطای حالت ماندگار مناسب دنبال کند [۱]. از آنجا که این مبدل ها ذاتا سیستم هایی متغیر با زمان و غیرخطی هستند، روند طراحی کنترل کننده برای آنها توجه

\* تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۱/۰۶/۱۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۵/۲۷

نام نویسنده مسئول: صابر فلاحتی علی آبادی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - اصفهان - کاشان - دانشگاه کاشان

- دانشکده برق

## ۲- سیستم‌های کسری

جبر کسری، جبر معمول را با بسط معادلات دیفرانسیل معمول به معادلات دیفرانسیل مرتبه کسری، توسعه می‌دهد. چنین معادلاتی می‌توانند مدل‌های خطی و توابع انتقال را برای برخی از سیستم‌های فیزیکی با ابعاد نامحدود فراهم آورند. از طرف دیگر، کنترل‌کننده مرتبه کسری را می‌توان برای دستیابی به اهداف کنترل فیدبک برای چنین سیستم‌هایی به کار گرفت. امروزه به علت پیشرفت‌های انجام شده در توان محاسباتی که شبیه‌سازی و پیاده‌سازی سیستم‌های با مرتبه کسری را با دقت کافی ممکن ساخته است، مباحث مدل‌سازی و کنترلی با استفاده از مفهوم سیستم مرتبه کسری، توجه زیادی را به خود جلب کرده است.

کنترل‌کننده PID مرتبه کسری یک ساختار مناسب با مرتبه کسری است که برای اهداف کنترلی به کار گرفته می‌شود. این کنترل‌کننده برای نخستین بار توسط پودلابنی در سال ۱۹۹۹ معرفی شد [۱۰]. یک FOPID با پنج شاخص شامل بهره تناسبی، بهره انتگرالی، بهره مشتقی، مرتبه انتگرالگیری و مرتبه مشتق‌گیری مشخص می‌شود. معادله دیفرانسیل یک کنترل‌کننده  $PI^{\lambda}D^{\delta}$  مرتبه کسری به شکل رابطه (۱) تعریف می‌شود:

$$u(t) = k_p e(t) + k_i D_t^{-\lambda} e(t) + k_D D_t^{\delta} e(t) \quad (1)$$

تابع انتقال FOPID با تبدیل لاپلاس بدست آمده و برابر است با:

$$G_c(s) = k_p + k_i s^{-\lambda} + k_D s^{\delta} \quad (2)$$

طراحی FOPID شامل تعیین سه شاخص  $k_p$ ،  $k_i$  و  $k_D$  و دو مرتبه  $\lambda$  و  $\delta$  که لزوماً عدد صحیحی نیستند، می‌باشد. با این کنترل‌کننده می‌توان به انعطاف‌پذیری بیشتری در دستیابی به اهداف کنترلی دست یافت. روش‌های طراحی متفاوتی برای این نوع کنترل‌کننده معرفی شده است از جمله: توزیع قطب [۱۱]، استراتژی حوزه فرکانس [۱۲]، طراحی فضای حالت [۱۳] و دو طبقه یا استراتژی ترکیبی [۱۴] که از روش طراحی کنترل‌کننده (مرتبه صحیح) سنتی استفاده کرده و سپس، کارایی سیستم کنترل طراحی شده با اضافه شدن کنترل‌کننده کسری مناسب بهبود می‌یابد. در این مطالعه برای یافتن شاخص‌های کنترل‌کننده FOPID از الگوریتم رقابت

یک پاسخ راه‌اندازی مناسب دارای فراجش و زمان نشست کم است. چندین روش کنترلی غیرخطی مانند کنترل فازی، کنترل H و تحلیل  $\mu$  را می‌توان برای این منظور پیاده‌سازی کرد. در برخی موارد، مشکلاتی برای تعیین توابع وزن وجود دارد، بنابراین، پاسخ سیگنال بزرگ مناسب آن‌ها نمی‌تواند تضمین شود [۱ و ۵].

به علت سادگی طراحی و کارایی مناسب، کنترل‌کننده‌های PI و PID در صنعت دارای کاربرد بسیار بوده و در نتیجه کوشش مداومی برای بهبود مقاومت و کیفیت آن‌ها انجام شده است [۶]. اشکال این نوع کنترل‌کننده‌ها این است که برای یک نقطه کار طراحی شده و با تغییر نقطه کار پاسخ مناسبی ندارند [۷]. یکی از راه‌های بهبود کنترل‌کننده‌های PID سنتی استفاده از کنترل‌کننده‌های مرتبه کسری است. با این حال مشکلات طراحی تعیین PIDهای مرتبه کسری نسبت به PIDهای سنتی بیشتر است زیرا این نوع کنترل‌کننده‌ها دارای مراتب کسری هستند [۸].

برای تعیین شاخص‌های کنترل‌کننده‌های FOPID<sup>+</sup> راه‌های متعددی وجود دارد. در این مقاله برای این منظور از روش بهینه‌سازی و الگوریتم رقابت استعماری<sup>+</sup> (ICA) استفاده شده است. الگوریتم رقابت استعماری یک روش بهینه‌سازی سراسری بوده و دارای دقت و سرعت قابل توجهی است. از آنجا که پهنای باند کنترل‌کننده در کنترل میزان فراجش مبدل بوست نقش بسزایی دارد [۹]، شاخص‌های FOPID به ازای پهنای باندهای متفاوت به دست آمده و برای نشان دادن کارایی کنترل‌کننده طراحی شده، نتایج به دست آمده با نتایج بدست از الگوریتم ژنتیک<sup>+</sup> (GA) مقایسه شده است. برای مقایسه بین PID مرتبه کسری با PID و PI سنتی، شبیه‌سازی‌هایی در محیط برنامه MATLAB انجام شده است.

ادامه مقاله به شکل زیر سازمان‌دهی شده است. در بخش دوم اصول عملکرد کنترل‌کننده FOPID تشریح شده است. در بخش سوم الگوریتم رقابت استعماری معرفی می‌شود. بخش چهارم به بیان سیستم تحت مطالعه اختصاص یافته و در بخش پنجم نتایج شبیه‌سازی‌ها آورده شده است. در انتها در بخش ششم نتیجه‌گیری بیان خواهد شد.

### ۳-۱- شکل‌دهی امپراطوری‌های اولیه

در بهینه‌سازی، هدف یافتن یک جواب بهینه بر حسب متغیرهای مسئله است. بدین منظور یک آرایه از متغیرهای مسئله که باید بهینه شوند، ایجاد می‌شوند. در اینجا این آرایه یک کشور نامیده می‌شود. در یک مسئله بهینه‌سازی Nvar بعدی، یک کشور، یک آرایه به طول Nvar\*1 است. این آرایه به شکل زیر تعریف می‌شود.

$$\text{country} = [p_1, p_2, \dots, p_{Nvar}]$$

مقادیر متغیرها در یک کشور، به صورت اعداد اعشاری نمایش داده می‌شوند. از دیدگاه تاریخی - فرهنگی، اجزای تشکیل دهنده یک کشور را می‌توان ویژگی‌های اجتماعی - سیاسی آن کشور، همچون فرهنگ، زبان، ساختار اقتصادی و سایر ویژگی‌ها در نظر گرفت.

برای شروع الگوریتم، تعداد Ncountry کشور اولیه ایجاد می‌شوند تا Nimp از بهترین اعضای این جمعیت (کشورهای دارای کم‌ترین مقدار تابع هزینه) به عنوان امپریالیست انتخاب شوند. باقیمانده Ncol تا از کشورها، مستعمراتی را تشکیل می‌دهند که هر کدام به یک امپراطوری تعلق دارند.

### ۳-۲- سیاست جذب

در راستای این سیاست، کشور مستعمره، به اندازه x واحد در جهت خط واصل مستعمره به استعمارگر، حرکت کرده و به موقعیت جدید، کشانده می‌شود. x عددی تصادفی با توزیع یکنواخت (و یا هر توزیع مناسب دیگر) است. اگر فاصله میان استعمارگر و مستعمره با d نشان داده شود، معمولاً برای d داریم:

$$x \sim U(0, \beta * d)$$

که در آن  $\beta$  عددی بزرگتر از یک و نزدیک به مقدار ۲ است.

### ۳-۳- انقلاب؛ تغییرات ناگهانی در موقعیت یک کشور

انقلاب از دیدگاه الگوریتمی باعث می‌شود کلیت حرکت تکاملی از گیر کردن در دره‌های محلی بهینگی نجات یابد که در برخی موارد باعث بهبود موقعیت یک کشور شده و آن را به یک محدوده بهینگی بهتری می‌برد.

استعماری که از الگوریتم‌های کارآمد می‌باشد، استفاده شده است.

روش‌های تقریب‌سازی مختلفی برای دستیابی به مدل‌های گسسته یا پیوسته مدل‌های مرتبه کسری وجود دارد. یکی از این روش‌ها، روش Crone است. این تقریب به شکل زیر است [۱۵]:

$$s^v \approx k \prod_{n=1}^N \frac{1 + \frac{s}{\omega_n}}{1 + \frac{s}{\omega_{pn}}} \quad v > 0 \quad (3)$$

این تقریب در بازه فرکانسی  $[\omega_l; \omega_h]$  معتبر است. فرکانس قطب‌ها و صفرها به شکل زیر هستند:

$$\begin{aligned} \omega_{z1} &= \omega_l \sqrt{\lambda} \\ \omega_{pn} &= \omega_n \delta, \quad n = 1 \dots N \\ \omega_{zn+1} &= \omega_{pn} \lambda, \quad n = 1 \dots N - 1 \\ \delta &= \left( \frac{\omega_h}{\omega_l} \right)^{\frac{v}{N}} \\ \lambda &= \left( \frac{\omega_h}{\omega_l} \right)^{\frac{v}{N}} \end{aligned}$$

در این مقاله از روش Crone برای پیاده‌سازی FOPID استفاده شده است.

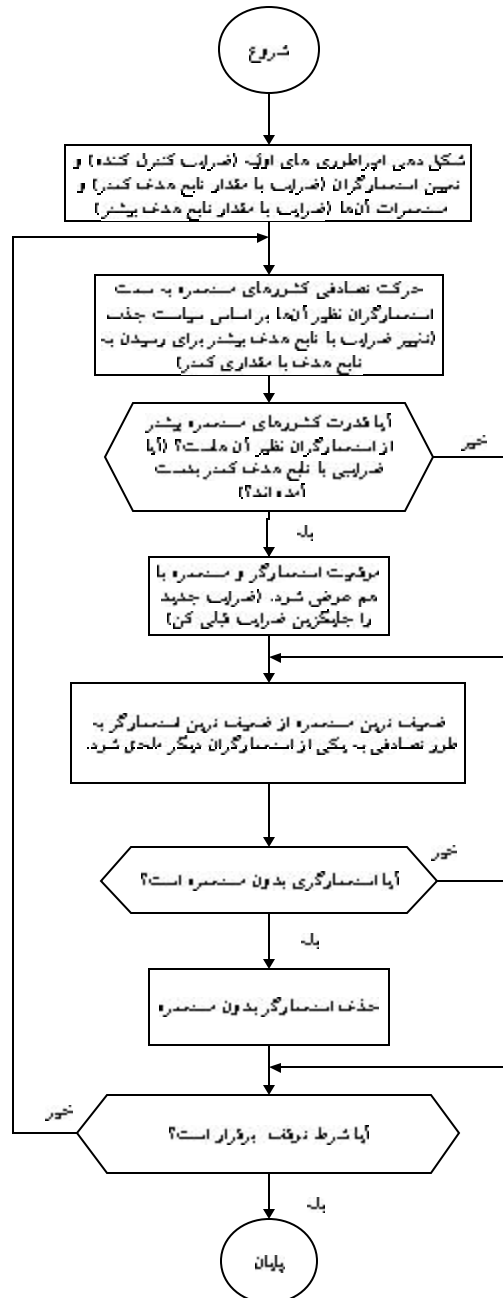
### ۳- الگوریتم رقابت استعماری

امروزه الگوریتم رقابت استعماری به علت سرعت و دقت بالای آن در دستیابی به پاسخ‌های مسئله، محبوبیت زیادی یافته است [۱۸-۱۶]. همانند دیگر الگوریتم‌های تکاملی، این الگوریتم نیز با تعدادی جمعیت اولیه تصادفی که هر کدام از آن‌ها یک «کشور» نامیده می‌شوند، شروع می‌شود. تعدادی از بهترین عناصر جمعیت به عنوان امپریالیست انتخاب شده و باقیمانده جمعیت نیز به عنوان مستعمره، در نظر گرفته می‌شوند. امپریالیست‌ها بسته به قدرتش، این مستعمرات را با یک روند خاص که در ادامه می‌آید، به سمت خود می‌کشند. مراحل الگوریتم رقابت استعماری به شکل زیر است [۱۹]:

## ۳-۴- جابجایی موقعیت مستعمره و امپریالیست

در حین حرکت مستعمرات به سمت کشور استعمارگر، ممکن است برخی از این مستعمرات به موقعیتی بهتر از امپریالیست برسند (به نقاطی در تابع هزینه برسند که هزینه کمتری را نسبت به مقدار تابع هزینه در موقعیت امپریالیست،

تولید می‌کنند). در این حالت، کشور استعمارگر و کشور مستعمره، جای خود را با همدیگر عوض کرده و الگوریتم با کشور استعمارگر در موقعیت جدید ادامه یافته و این بار این کشور امپریالیست جدید است که شروع به اعمال سیاست همگون‌سازی بر مستعمرات خود می‌کند.



شکل (۱): فلوچارت الگوریتم رقابت استعماری [۱۷]

## ۳-۵- رقابت استعماری

به اضافه درصدی از قدرت کل مستعمرات آن تعریف می‌شود. هر امپراطوری که نتواند بر قدرت خود بیفزاید و یا

قدرت یک امپراطوری به شکل قدرت کشور استعمارگر،

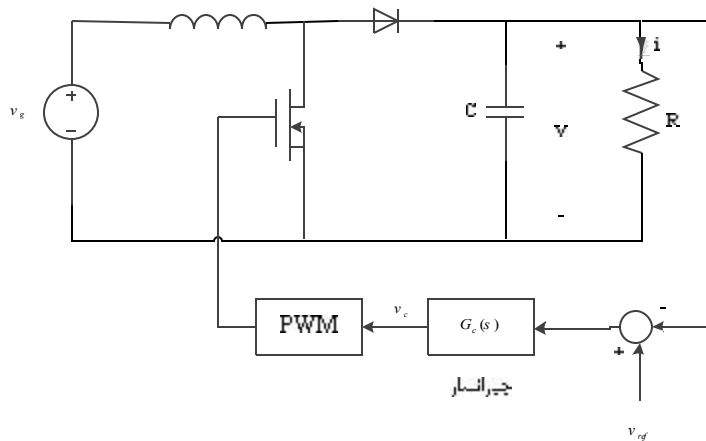
قدرت رقابت خود را از دست بدهد، در جریان رقابت‌های امپریالیستی، حذف خواهد شد.

#### ۴- سیستم مبدل مورد مطالعه

سیستم مبدل بوست مورد مطالعه در شکل (۲) آورده شده است. این سیستم ولتاژ ورودی ۵ ولت را به ولتاژ ۱۰ ولت خروجی تبدیل می‌کند. فرکانس سوئیچ زنی، مقادیر عناصر سیستم و شاخص‌های الگوریتم رقابت استعماری در ضمیمه آورده شده‌اند.

#### ۳-۶- سقوط امپراطوری‌های ضعیف

در جریان رقابت‌های امپریالیستی، خواه ناخواه، امپراطوری‌های ضعیف به تدریج سقوط کرده و مستعمراتشان به دست امپراطوری‌های قوی‌تر می‌افتد. روند کامل الگوریتم رقابت استعماری مطابق فلوجارت نشان داده شده در شکل (۱) است. شاخص‌های الگوریتم در



شکل (۲): سیستم مبدل بوست مورد مطالعه

$$|e| \leq 0.2$$

#### ۵- نتایج شبیه‌سازی

در جدول (۱) خلاصه‌ای از نتایج بدست آمده از بهینه‌سازی کنترل‌کننده FOPID توسط دو الگوریتم رقابت استعماری و ژنتیک به ازای پهنای باندهای مختلف کنترل‌کننده آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود فراجش ولتاژ خروجی سیستم به ازای پهنای باند ۰/۰۱ تا ۱۰۰ رادیان بر ثانیه کنترل‌کننده، زیاد است، و این مقدار با افزایش پهنای باند، کاهش می‌یابد. در کنار این کاهش، زمان نشست نیز با افزایش پهنای باند کنترل‌کننده کاهش پیدا می‌کند. نکته قابل توجه در این جدول این است که در بیشتر نتایج حاصل از الگوریتم رقابت استعماری درجه ترم مشتقی FOPID، ۱ شده است. این مطلب به این معناست که هنگامی

از آنجا که یک پاسخ راه‌اندازی خوب باید دارای فراجش و زمان نشست کم باشد، برای دستیابی به این دو منظور تابع هدف به شکل زیر انتخاب شده است:

$$J = \int_0^T |e| t dt \quad (۴)$$

که در آن

$$e = 10 - y \quad (۵)$$

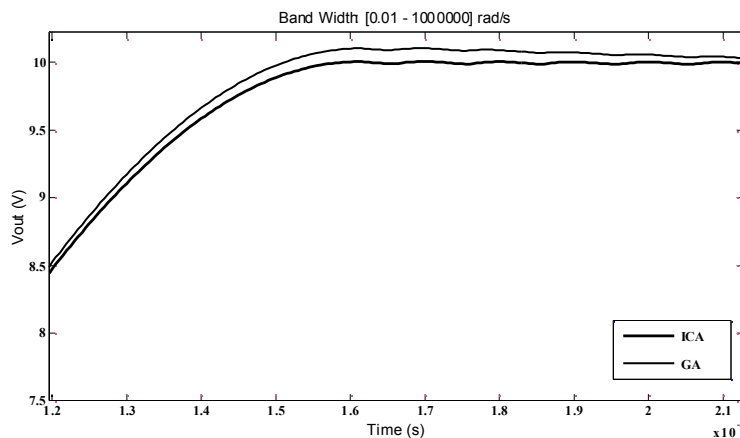
بوده و  $y$  ولتاژ خروجی سیستم می‌باشد. در این مطالعه  $T=0.04$  در نظر گرفته شده است و در نتیجه نتایج شبیه‌سازی حداکثر تا ۰/۰۴ ثانیه نمایش داده شده‌اند. شایان ذکر است که در این مطالعه، زمان نشست، لحظه‌ای در نظر گرفته شده است که در آن شرط زیر صادق باشد:

که ترم مشتقی کنترل‌کننده عددی صحیح است، بهتر می‌تواند

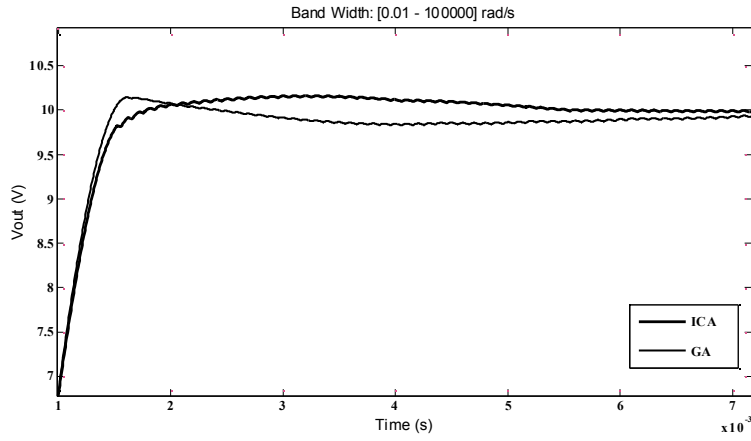
تابع هدف را بهینه کند. از آنجا که در سیستم تحت مطالعه، ترم مشتقی تاثیر به سزایی در کاهش فرآجهش دارد می‌توان به این نتیجه رسید که دو کنترل‌کننده FOPID و PID نتایج حدوداً یکسانی را در کاهش تابع هدف و در نتیجه میزان فرآجهش خواهند داشت.

همانطور که در جدول (۱) مشاهده می‌شود به ازای همه پهنای باندهای مختلف، الگوریتم رقابت استعماری بهتر از الگوریتم ژنتیک FOPID را بهینه می‌کند. تنها به ازای پهنای باند ۰/۰۱ تا ۱۰۰ رادیان، دو الگوریتم نتایج یکسانی را بدست می‌دهند. علت این امر این است که پهنای باند سیستم تاثیر زیادی بر روی ترم مشتقی دارد و در حالتی که پهنای باند سیستم بین ۰/۰۱ تا ۱۰۰ رادیان بر ثانیه است، مدت زمان لازم برای مشتقگیری بیشتر خواهد بود و بنابراین، فضای بهینه‌سازی ساده شده و در نتیجه پاسخ حاصل از دو الگوریتم نزدیک به یکدیگر خواهد شد. شکل‌های (۳) تا (۷) و لتاژ خروجی سیستم را به ازای پهنای باندهای مختلف نشان می‌دهند.

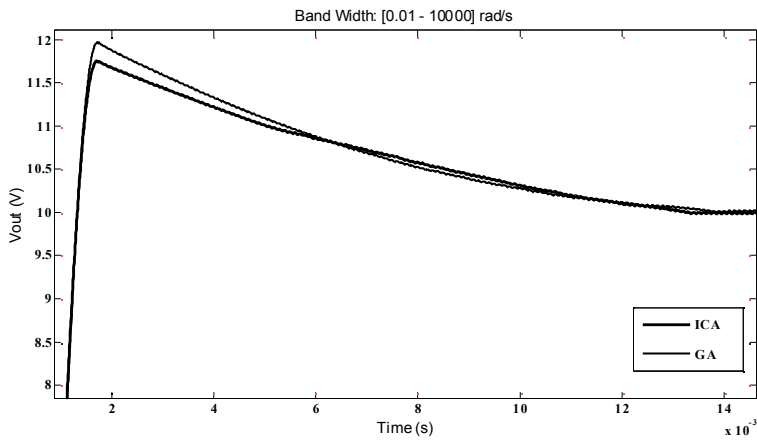
برای انجام مقایسه‌ای بین کنترل‌کننده PID مرتبه کسری و کنترل‌کننده‌های PID و PI سنتی، شبیه‌سازی به ازای پهنای باند ۰/۰۱ تا ۱۰۰۰۰۰ رادیان بر ثانیه انجام شده است. شایان ذکر است که دو کنترل‌کننده PID و PI نیز با ICA بهینه شده‌اند. همان‌طور که پیش از این نیز بیان شد، در این مقاله سیستم تحت مطالعه به گونه‌ای است که بهترین پاسخ به ازای درجه صحیح ترم مشتقی حاصل می‌شود و نیز از آنجا که ترم مشتقی تاثیر به سزایی در کاهش فرآجهش دارد می‌توان انتظار داشت که FOPID و PID پاسخ کمابیش یکسانی را به دست دهند. این مطلب به خوبی در جدول (۲) دیده می‌شود. با این وجود درجه کسری ترم انتگرالی FOPID سبب شده تا عملکرد آن نسبت به PID کمی بهتر شود. همان‌طور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود میزان فرآجهش و لتاژ خروجی حاصل از کنترل‌کننده PI نسبت به PID و FOPID بسیار زیاد است که این امر با توجه به مطالب بیان شده، مورد انتظار است.



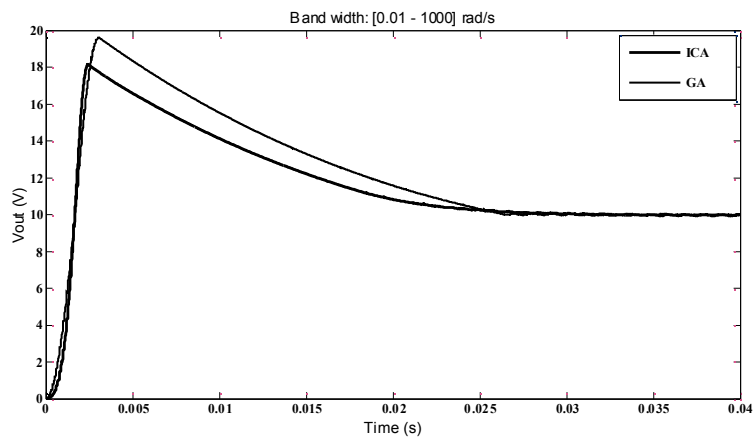
شکل (۳): ولتاژ خروجی سیستم به ازای پهنای باند ۰/۰۱ تا ۱۰<sup>۶</sup> رادیان بر ثانیه



شکل (۴): ولتاژ خروجی سیستم به ازای پهنای باند ۰/۰۱ تا  $10^5$  رادیان بر ثانیه

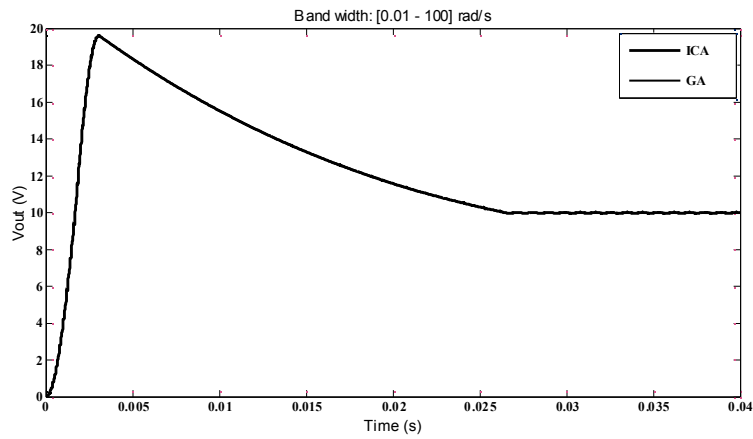


شکل (۵): ولتاژ خروجی سیستم به ازای پهنای باند ۰/۰۱ تا  $10^4$  رادیان بر ثانیه

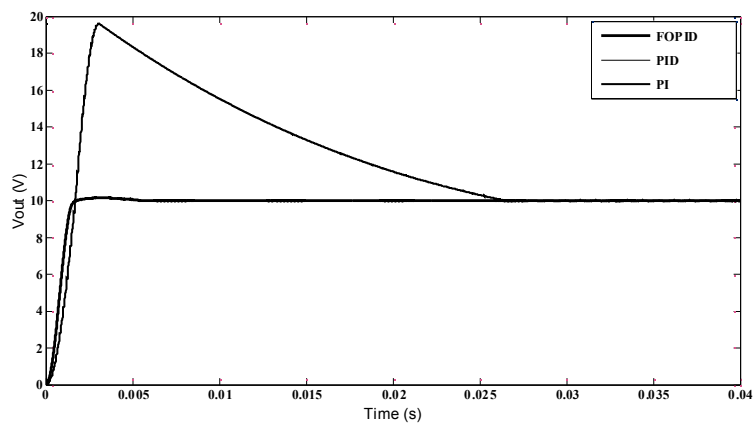


شکل (۶): ولتاژ خروجی سیستم به ازای پهنای باند ۰/۰۱ تا  $10^3$  رادیان بر ثانیه

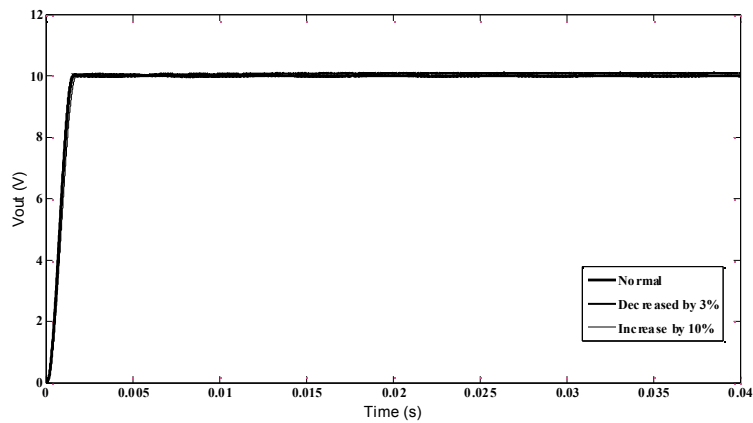
کنترل مبدل بوست با استفاده از PID مرتبه کسری بهینه شده با الگوریتم رقابت استعماری



شکل (۷): ولتاژ خروجی سیستم به ازای پهنای باند ۰/۰۱ تا ۱۰۰ رادیان بر ثانیه



شکل (۸): ولتاژ خروجی سیستم بدست آمده از سه کنترل کننده PID، FOPID و PI



شکل (۹): عملکرد کنترل کننده طراحی شده نسبت به تغییر شاخص‌ها

برای بررسی میزان مقاوم بودن کنترل کننده طراحی شده ثانیه است، در نظر گرفته شده‌اند:

- ۱- کاهش اندازه سلف و خازن به اندازه ۳٪
  - ۲- افزایش اندازه سلف و خازن به اندازه ۱۰٪
- نسبت به تغییرات اندازه عناصر سیستم، دو حالت زیر در موردی که پهنای باند سیستم بین ۰/۰۱ تا ۱۰۰۰۰۰۰ رادیان بر ثانیه



نتایج دو حالت یاد شده در شکل (۹) آورده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود کنترل‌کننده پیشنهادی نسبت به تغییرات انجام شده در اندازه عناصر مقاوم است.

برای رسیدن به پاسخ مطلوب، پهنای باند کنترل‌کننده باید بیش از ۱۰۰۰۰ رادیان بر ثانیه باشد. علاوه بر این، برای کنترل مبدل بوسست بهترین جواب در حالتی به دست می‌آید که درجه ترم مشتقی کنترل‌کننده FOPID برابر ۱ باشد، که این به این معناست که دو کنترل‌کننده FOPID و PID جواب تقریباً یکسانی را برای سیستم تحت مطالعه بدست می‌دهند. با این وجود FOPID به علت داشتن درجه کسری برای ترم انتگرالی توانست تابع هدف را نسبت به PID و البته PI بهتر بهینه کند. همچنین، برای بررسی میزان مقاوم بودن کنترل‌کننده پیشنهادی، شبیه‌سازی به ازای دو حالت افزایش و کاهش در اندازه عناصر مبدل انجام شدند. نتایج حاصل از این شبیه‌سازی نشان دادند که کنترل‌کننده پیشنهادی نسبت به تغییرات یاد شده تا حد بسیار زیادی مقاوم است.

## ۶- نتیجه گیری

در این مقاله، روش جدیدی برای کنترل مبدل بوسست ارائه شد. در این روش از PID مرتبه کسری بهینه شده با الگوریتم رقابت استعماری برای کاهش فرجهش و زمان نشست در پاسخ راه‌اندازی مبدل بوسست بهره گرفته شد. شبیه‌سازی‌ها به ازای پهنای باندهای متفاوت با دو الگوریتم رقابت استعماری و ژنتیک انجام شده و نتایج آن‌ها با یکدیگر مقایسه شد و این نتیجه بدست آمد که الگوریتم رقابت استعماری بهتر از الگوریتم ژنتیک می‌تواند کنترل‌کننده PID مرتبه کسری را بهینه سازد. همچنین این نتیجه حاصل شد که

جدول (۱): نتایج بدست آمده از دو الگوریتم رقابت استعماری و ژنتیک

Band Width	Algorithm	Kp	Kd	Ki	$\delta$	$\lambda$	Overshoot	Settling Time	Fitness Value
0.01-10 <sup>6</sup>	ICA	-1.4328	0.0089	1.0096	0.9555	0.0012	0.06%	0	9.33
	GA	-0.2433	0.0121	0.3753	0.9343	0.2257	1.05%	0	13.51
0.01-10 <sup>5</sup>	ICA	-0.7237	0.0139	27.5439	1	0.8857	1.6%	0	10.89
	GA	-1.1111	0.0492	1.3993	0.8872	0.4130	-1.7%	0	13.66
0.01-10 <sup>4</sup>	ICA	-0.3371	0.0081	23.4227	1	0.3703	17.5%	0.01	51.97
	GA	0.9074	0.0093	2.1769	0.9903	0.1630	19.7%	0.01	56.78
0.01-10 <sup>3</sup>	ICA	0.6927	0.0029	0.3196	1	0.6410	81.5%	0.03	675.40
	GA	0.3695	0.3800	0.2356	0.0160	0.8876	96%	0.03	941.44
0.01-10 <sup>2</sup>	ICA	0.8145	-0.0623	-0.0414	0.0979	0.4186	96%	0.03	939.29
	GA	0.6107	0.0510	0.0933	0.0350	0.7258	96%	0.03	939.29

جدول (۲): نتایج از سه کنترل‌کننده

Band Width	Controller	Kp	Kd	Ki	$\delta$	$\lambda$	Overshoot	Settling Time	Fitness Value
0.01-10 <sup>5</sup>	FOPID	-0.7237	0.0139	27.5439	1	0.8857	1.6%	0	10.89
	PID	-1.9948	0.0139	22.0397	-	-	1.7%	0	11.66
	PI	0.4697	-	0.0901	-	-	96%	0.26	939.29

جدول (۴): شاخص‌های ICA

شاخص	مقدار
nPop	150
MaxDecades	20
beta	2
pRevolution	0.1
zeta	0.1
nImp	5

## ضمیمه

جدول (۳): شاخص‌های سیستم

شاخص	مقدار
L	250 $\mu$ H
C	1056 $\mu$ F
R	25 $\Omega$
Switching frequency	10 kHz

- Optimization”, 14th International Power Electronics and Motion Control Conference, EPE-PEMC 2010.
- [10] I. Podlubny, “Fractional-order systems and  $PI^{\lambda}D^{\delta}$  Controllers”, IEEE Trans. Automatic Control, Vol. 44, No. 1, pp. 208-214, 1999.
- [11] I. Petras, “The fractional order controllers: methods for their synthesis and application, Journal of Electrical Engineering”, Vol. 50, No. 9-10, pp. 284-288, 1999.
- [12] B.M. Vinagre, I. Podlubny, L. Dorack, V. Feliu, “On fractional PID controllers: a frequency domain approach. In: Proceedings of IFAC Workshop on Digital Control-PID”, Terrassa, Spain, 2000.
- [13] I. Dorcak, I. Petras, I. Kostical, J. Terpak, “State-space controller design for the fractional-order regulated systems”, In: Proceedings of the ICC2001, Krynica, pp.15-20, 2001.
- [14] M. Chengbin, Y. Hori, “The application of fractional order PID controller for robust two-inertia speed control”, In: Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Power Electronic and Motion Control Conference, Xi'an, 2004.
- [15] D. Vale'rio, J. Sa' da Costa “Time-domain implementation of fractional order controllers”, IEE Proc.-Control Theory Appl., Vol. 152, No. 5, pp. 539-552, 2005
- [16] A. Karami, E. Rezaei, M. Shahhosseni, M. Aghakhani, “Optimization of heat transfer in an air cooler equipped with classic twisted tape inserts using imperialist competitive algorithm”, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 38, pp. 195-200, 2012.
- [17] A. Kaveh, S. Talatahari, “Optimum design of skeletal structures using imperialist competitive algorithm” Computers & Structures, Vol. 88, No. 21-22, pp. 1220-1229, 2010.
- [18] S. Nazari-Shirkouhi, H. Eivazy, R. Ghodsi, K. Rezaei, E. Atashpaz-Gargari. “Solving the integrated product mix-outsourcing problem using the imperialist competitive algorithm”, Expert Systems with Applications, Vol. 37, No. 12, pp. 7615-7626, 2010.
- [19] E. Atashpaz-Gargari, C. Lucas. “Imperialist Competitive Algorithm: An algorithm for optimization inspired by imperialistic competition”, IEEE Congress on Evolutionary Computation, pp. 4661-4667, 2007.
- جهت پیاده‌سازی PID از ثابت زمانی مشتق  $0/00001$  ثانیه و زمان نمونه‌گیری  $0/00005$  ثانیه استفاده شده است.

## مراجع

- [1] S.M.R. Rafiei, R. Ghazi, R. Asgharian, M. Barakati, and H.A.Toliat, “Robust Control of dc/dc PWM Converters: A Comparison of H<sub>inf</sub>, Miu, and Fuzzy Logic Based Approaches,” Proceedings of the IEEE 2003 Control Applications conference, Vol. 1, pp. 603-608, June 23-25, 2003.
- [2] Gabriel Garcera, Antonio Abellan, and Emilio Figueres, “Sensitivity Study of the Control Loops of DC-DC Converters by Means of Robust Parametric Control Theory,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.49, No. 3, pp. 581-586, June 2002.
- [3] R.D. Middlebrook and S. Cuk “A Unified Approach to Modeling Switching Converter Power Stage” IEEE, Power Electronics Specialists Conference (PESC), pp. 18-34, 1976.
- [4] I. Yazici, “Robust voltage-mode controller for DC-DC boost converter ,” IET Power Electronics, Vol. 8, No.3, pp. 342 - 349, March 2015.
- [5] V. S. C. Raviraj and P. C. Sen, “Comparative study of proportional-integral, sliding mode, and fuzzy logic controllers for power converters,” IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 33 No. 2 , pp. 518-524, March/April 1997.
- [6] D. Maiti, A. Acharya M. Chakraborty, A. Konar, R. Janarthanan, “Tuning PID and Fractional PID Controllers using the Integral Time Absolute Error Criterion” 4th International Conference on Information and Automation for Sustainability, pp. 457-462, 2008.
- [7] S. Kapat, , P.T. Krein, ‘Formulation of PID control for DC-DC converters based on capacitor current: a geometric context’, IEEE Trans. Power Electron., , Vol. 27, No. 3, pp. 1424-1432, 2012.
- [8] B. Jayakrishna and V. Agarwal “FPGA implementation of QFT based controller for a buck type DC-DC power converter and comparison with fractional and integral order PID controllers” COMPEL, pp. 1-6, Aug. 2008.
- [9] K. Arab Tehrani, A. Amirahmadi, S. M. R. Rafiei, G. Griva, L.Barrandon, M. Hamzaoui, I. asoanarivo, F.M.Sargos, “Design of Fractional order PID controller for Boost converter based on Multi-Objective

<sup>1</sup> Averaging model

<sup>2</sup> Start-up response

<sup>3</sup> Fractional Order PID

<sup>4</sup> Imperialist Competitive Algorithm

<sup>5</sup> Genetic Algorithm