



Modeling and Analysis of SEPIC Converter Stability by Gray Wolf Multi-Objective Algorithm

Seyed Mohamad Najji Esfahani¹, PhD Student, Seyed Hamid Zahiri¹, Professor, Majid Delshad², Associate Professor

¹ Department of Electrical and Computer Engineering, Birjand University, Birjand, Iran

² Department of Electrical Engineering, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Khorasgan, Isfahan, Iran

Abstract:

This paper investigates the closed loop stability of the SEPIC converter using an optimal PID controller; In this model, the parameters are adjusted using the Gray Wolf Multi-Objective (MOGWO) algorithm. The Gray Wolf Multi-Objective Algorithm is a random evolution-inspired random algorithm that has been widely used in recent years as an optimization technique in power electronics. The state mode average method has been used to model and achieve the transducer-based system transfer function. Therefore, the MOGWO-based PID controller has been studied and implemented in the system to enable the converter stability to be evaluated and compared with conventional PID controllers. To evaluate the stability of the system, various performance parameters such as overtaking percentage, peak time, settling time and peak size have been considered. The impact response of the closed-loop system is obtained by simulation in MATLAB. The performance of the model is evaluated to perform a general comparative analysis of the system.

Keywords: SEPIC Converter, PID Controllers, Gray Wolf Multi-Objective Algorithm

Received: 22 March 2022

Revised: 24 Jun 2022

Accepted: 17 July 2022

Corresponding Author: Dr. Seyed Hamid Zahiri, hzahiri@birjand.ac.ir

DOI: <http://dx.doi.org/10.30486/TEEGES.2022.1957809.1006>





مدل سازی و تحلیل پایداری مبدل سپیک به روش الگوریتم چند هدفی گرگ خاکستری

سید محمد ناجی اصفهانی^۱، دانشجوی دکتری، سید حمید ظهیری^۱، استاد، مجید دلشاد^۲، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

۲- دانشکده مهندسی برق، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، خوراسگان، اصفهان، ایران

چکیده: این مقاله پایداری حلقه بسته مبدل سپیک با به کارگیری کنترل کننده PID بهینه را بررسی می کند. در این مدل پارامترها با استفاده از الگوریتم چند هدفی گرگ خاکستری تنظیم می شوند. الگوریتم چند هدفی گرگ خاکستری، الگوریتم تصادفی الهام گرفته شده از تکامل طبیعی است و در سال های اخیر به صورت گسترده به عنوان تکنیک بهینه سازی در الکترونیک قدرت استفاده می شود. روش میانگین فضای حالت برای مدل سازی و دستیابی به تابع انتقال سیستم مبتنی بر مبدل استفاده شده است. بنابراین کنترل کننده PID مبتنی بر الگوریتم چند هدفی گرگ خاکستری در سیستم مطالعه و پیاده سازی شده است تا امکان ارزیابی پایداری مبدل و مقایسه آن با کنترل کننده PID مرسوم فراهم شود. برای بررسی پایداری سیستم، پارامترهای عملکردی مختلف مثل درصد فراجش، زمان اوج، زمان نشست و اندازه پیک در نظر گرفته شده اند. پاسخ ضربه سیستم حلقه بسته با شبیه سازی در متلب به دست آمده است. عملکرد مدل ارزیابی شده است تا تحلیل مقایسه ای کلی سیستم انجام شود.

واژه های کلیدی: مبدل سپیک، کنترل کننده PID، الگوریتم چند هدفی گرگ خاکستری

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۰۱/۰۲

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۰۴/۰۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۴/۲۶

نویسنده ی مسئول: دکتر سید حمید ظهیری ، hzahiri@birjand.ac.ir

DOI: <http://dx.doi.org/10.30486/TEEGES.2022.1957809.1006>

با توسعه و مدرن‌سازی سریع در حوزه الکترونیک قدرت، محققان مدل‌سازی و طراحی سیستم‌های مطمئن و مستحکم برای دستیابی به عملکرد و بهره‌وری بهتر استفاده می‌کنند. در این زمینه، مبدل‌های DC-DC به دلیل اپلیکیشن گسترده آن‌ها در شارژر باتری [۱]، ردیابی نقطه حداکثر توان، درایورهای LED [۲]، درایورهای موتور و غیره یکی از بهترین انتخاب‌ها هستند. با این حال، مبدل DC-DC از مدارات باک، بوست، باک-بوست، چوک، سپیک^۱ و سایر مدارات پیچیده استفاده می‌کند [۶]-[۳]. هر یک از این مدارات دارای مزایا و معایب مربوط به خود هستند. ریپل جریان ورودی در مبدل بوست، ریپل ولتاژ خروجی در مبدل باک، هارمونیک‌ها در مبدل باک-بوست، فشار الکتریکی روی اجزا در مبدل کاک برخی از پدیده‌های رایج مشاهده شده برای این مبدل‌ها است. بنابراین، مبدل سپیک نسبت به تمامی مبدل‌های دیگر عملکرد بهتری دارد و با از بین بردن بسیاری از مشکلات رایج، در اپلیکیشن‌های متعدد الکترونیک قدرت استفاده می‌شود: زیرا ویژگی بسیار مهم افزایش و کاهش ولتاژ بدون تغییر پولاریته، ریپل جریان ورودی کوچک و امکان ارائه چندین خروجی را فراهم می‌کند [۸]، [۷].

تکنیک‌های کنترلی مختلفی در مبدل سپیک به کار گرفته شده است تا عملکرد بهتر رگولاسیون ولتاژ خروجی به دست آید [۹]، [۱۰]، [۱۱]. در میان روش‌های کنترلی مختلف، کنترل کننده PID^۲ رایج‌ترین روش استفاده شده برای مبدل‌های قدرت است. علاوه بر این، بازه اپلیکیشن این مبدل از صنایع مقیاس کوچک تا صنایع تکنولوژیک [۱۱]، پالایشگاه‌ها و کشتی‌سازی‌ها را شامل می‌شود.

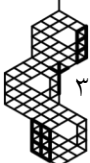
کنترل کننده PID شامل از سه جز تناسبی، انتگرالی و مشتقی تشکیل شده است که با روش‌های تجربی مانند روش زیگلر-نیکولاس [۱۲]، روش‌های تحلیلی و تکنیک‌های بهینه‌سازی مختلف تنظیم می‌شوند. جزء تناسبی از نسبت خطای سیستم برای کنترل آن استفاده می‌کند، جزء انتگرالی در سیستم، لگ ایجاد می‌کند و با انتگرال‌گیری پیوسته از سطح زیر منحنی خطا، کل تاریخچه خطا را ارزیابی می‌کند. مولفه مشتقی به نرخ تغییر خطا پاسخ می‌دهد و می‌تواند پیش از میل خطا به مقادیر بزرگ‌تر، آن را تصحیح کند. این پارامترها برای سیستم‌های حلقه بسته متفاوت با استفاده از روش‌های تنظیم مختلف تنظیم می‌شوند تا عملکرد سیستم را بهبود بخشند. با این حال، تعیین مقادیر دقیق این پارامترها دشوار است؛ زیرا اغلب روش‌های کلاسیک به مدل‌سازی ریاضیاتی نیروگاه مدنظر نیاز دارند و به دلیل اختلال‌های ورودی-خروجی یا رفتار غیرخطی نیروگاه، نتایج رضایت‌بخشی ارائه نمی‌کنند.

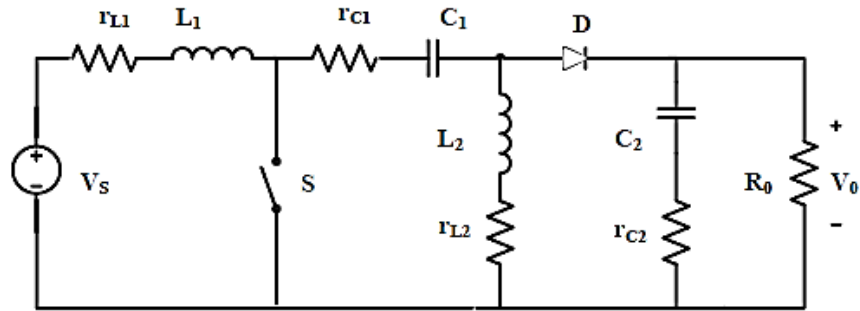
الگوریتم چند هدفه گرگ خاکستری^۳، به عنوان الگوریتم جست‌وجوی ابتکاری [۱۳]، قدرتمندترین تکنیک بهینه‌سازی در فضای راه‌حل بزرگ است و در سال‌های اخیر توجه زیادی در مهندسی کنترل به خود جلب کرده است. از این الگوریتم برای حل مسائل بهینه‌سازی محدود شده و بدون محدودیت استفاده می‌شود؛ عملکرد الگوریتم مبتنی بر انتخاب طبیعی است [۱۴]. این فرآیند منجر به تکامل بیولوژیک شده و جمعیت راه‌حل‌های فردی را به صورت پیوسته اصلاح می‌کند. در این مقاله، از الگوریتم چند هدفه ی گرگ خاکستری برای دستیابی به مقادیر بهینه کنترل کننده PID هنگام پیاده‌سازی در تحلیل حلقه بسته مبدل سپیک و بررسی پایداری سیستم استفاده شده است [۱۵]، [۱۶].

در بخش ۲، مدار مبدل سپیک مرسوم مطالعه شده و مدل‌سازی فضای حالت مبدل نمایش داده شده است. پیاده‌سازی الگوریتم چند هدفه گرگ خاکستری در بخش ۳ ذکر شده است؛ در این بخش، نمای کلی تابع هدف الگوریتم و طراحی کنترل کننده PID مبتنی بر الگوریتم چند هدفه ی گرگ خاکستری ذکر شده است [۱۷]. نتایج شبیه‌سازی و تحلیل پایداری سیستم در بخش ۴ نمایش داده شده و در خصوص آن بحث شده است. تحلیل مقایسه‌ای کلی بیان شده و شبیه‌سازی‌ها در محیط متلب انجام شده است. در نهایت، در بخش ۵ نتیجه‌گیری ارائه شده است.

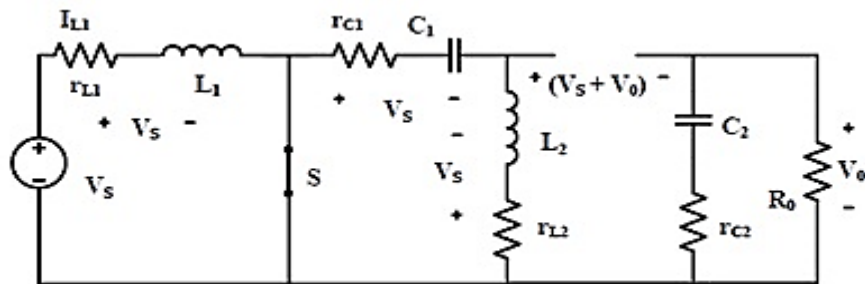
۲- روش میانگین فضای حالت^۴

مبدل سلف اولیه تک سر (سپیک) شامل دو سلف (L_1 و L_2)، دو خازن (C_1 و C_2)، یک سوئیچ (S) با ضریب وظیفه (d)، یک دیود (D) و یک بار مقاومتی (R_0) است. اجزای ایده‌آل فرض شده‌اند و مدار در حالت هدایت پیوسته عمل می‌کند. نمودار مدار مبدل سپیک مرسوم در شکل ۱ و مدارهای معادل در حالات روشن و خاموش به ترتیب در شکل‌های ۲ و ۳ نمایش داده شده است.

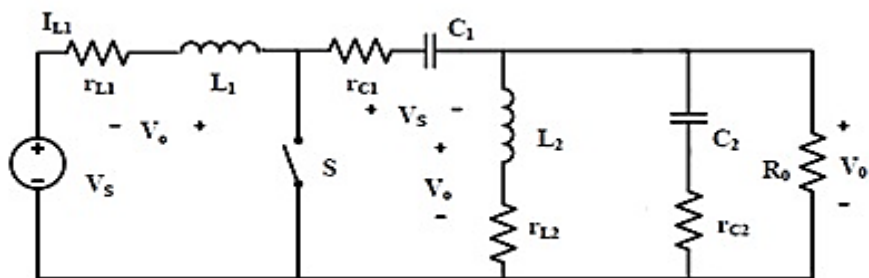




شکل (۱): نمودار مداری مبدل SEPIC مرسوم



(الف)



(ب)

شکل (۲): مدارهای مبدل سپیک هنگامی که سوئیچ (S) در حالت (الف) روشن و (ب) خاموش

مقادیر خازن C_1 بزرگ انتخاب شده است تا ولتاژ V_{C1} ریپل کمی داشته باشد. در سطح اولیه، زمانی که سوئیچ S باز است، با اعمال $V_{C1} = V_s$ رابطه KVL، زیرا ولتاژ میانگین روی L_1 و L_2 صفر است. پس از آن، با اعمال رابطه $I_{L2} = I_D = I_0$ برقرار می‌شود؛ زیرا جریان‌های میانگین روی خازن C_1 و C_2 برابر صفر است. زمانی که سوئیچ S روشن می‌شود، خازن D خاموش شده و جریان I_{L1} به مقدار زیر افزایش می‌یابد:

$$\frac{dI_{L1}}{dt} = \frac{V_s}{L_1}, 0 \leq t \leq dT \quad (1)$$

که T کل بازه زمانی است. با این حال، زمانی که سوئیچ S خاموش است، دیود D روشن می‌شود و جریان I_{L1} با نرخ زیر کاهش می‌یابد:

$$\frac{dI_{L1}}{dt} = -\frac{V_o}{L_1}, dt \leq t \leq T \quad (2)$$

بنابراین رابطه کلی به شکل زیر حاصل می‌شود:

$$\frac{V_s dT + (-V_o)(1-d)T}{dT} = 0 \quad (3)$$

$$V_o = \frac{dV_s}{1-d} \quad (4)$$

روش میانگین فضای حالت، تکنیکی مفید در نمایش مبدل سپیک با روابط دیفرانسیلی مرتبه اول است [۲۰]-[۱۸]. بنابراین، متغیرهای حالت داخلی و متغیرهای خروجی برای دستیابی به راه حل حوزه زمان تعیین می‌شوند. متغیرهای حالت سپیک به صورت جریان و ولتاژ در نظر گرفته می‌شوند. زمانی که مبدل در مود هدایت پیوسته است، می‌توان عملکرد آن را در دو حالت بررسی کرد:

(A) سوئیچ (S) روشن و دیود (D) خاموش باشد.

(B) سوئیچ (S) خاموش و دیود (D) روشن باشد.

برای S روشن و D خاموش:

$$\frac{dI_{L1}}{dt} = \frac{1}{L_1} (-r_{L1}I_{L1} + V_s) \quad (5)$$

$$\frac{dI_{L2}}{dt} = \frac{1}{L_2} [-(r_{C1} + r_{L2})I_{L2} + V_{C1}] \quad (6)$$

$$\frac{dV_{C1}}{dt} = -\frac{1}{C_1} I_{L2} \quad (7)$$

$$\frac{dV_{C2}}{dt} = -\frac{1}{C_2} \frac{1}{R_0 + r_{C2}} V_{C2} \quad (8)$$

برای S خاموش و D روشن:

$$\frac{dI_{L1}}{dt} = \frac{1}{L_1} [-(r_{C1} + r_{L1} + r_{C2}r_A)I_{L1} - r_{C2}r_A I_{L2} - V_{C1} - r_A V_{C2} + V_s] \quad (9)$$

$$\frac{dI_{L2}}{dt} = \frac{1}{L_2} [-r_{C2}r_A I_{L1} - (r_{L2} + r_{C2}r_A)I_{L2} - r_A V_{C2}] \quad (10)$$

$$\frac{dV_{C1}}{dt} = -\frac{1}{C_1} I_{L1} \quad (11)$$

$$\frac{dV_{C2}}{dt} = \frac{1}{C_2} [r_A I_{L1} + r_A I_{L2} - \frac{1}{R_0 + r_{C2}} V_{C2}] \quad (12)$$

$$r_A = \frac{R_0}{(R_0 + r_{C2})} \quad (13)$$

که با قرار دادن مقادیر $r_A = 1$, $r_{C1} = r_{C2} = 0$ در معادلات فوق، فرم ساده شده به دست می‌آید و به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

برای S روشن و D خاموش:

$$\frac{dI_{L1}}{dt} = \frac{1}{L_1} (-r_{L1}I_{L1} + V_s) \quad (14)$$

$$\frac{dI_{L2}}{dt} = \frac{1}{L_2} [-r_{L2}I_{L2} + V_{C1}] \quad (15)$$

$$\frac{dV_{C1}}{dt} = -\frac{1}{C_1} I_{L2} \quad (16)$$

$$\frac{dV_{C2}}{dt} = -\frac{1}{C_2 R_0} V_{C2} \quad (17)$$

برای S خاموش و D روشن:

$$\frac{dI_{L1}}{dt} = \frac{1}{L_1} [-r_{L1}I_{L1} - V_{C1} - V_{C2} + V_s] \quad (18)$$

$$\frac{dI_{L2}}{dt} = \frac{1}{L_2} [-r_{L2}I_{L2} - V_{C2}] \quad (19)$$

$$\frac{dV_{C1}}{dt} = -\frac{1}{C_1} I_{L1} \quad (20)$$

$$\frac{dV_{C2}}{dt} = \frac{1}{C_2} [I_{L1} + I_{L2} - \frac{1}{R_0} V_{C2}] \quad (21)$$

معادله فضای حالت با میانگین‌گیری از عملکرد روشن و خاموش به دست می‌آید:

$$x(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (22)$$

$$y(t) = Cx + Du(t) \quad (23)$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} \frac{-r_{L1}}{L_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{(r_{C1} + r_{L2})}{L_2} & \frac{1}{L_2} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{C_2(R + r_{C1})} \end{bmatrix} \quad (24)$$



$$A_2 = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & -\frac{1}{L_1} & -S_{13} \\ \frac{C_2 R_E}{C_1 L_2} & \frac{R_E - r_{L_2}}{L_2} & 0 & \frac{R_E}{L_2 r_{C_2}} \\ \frac{1}{C_1} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{R_E}{C_1 r_{C_2}} & \frac{R_E}{C_2 r_{C_2}} & 0 & -\frac{1}{C_2 (R + r_{C_1})} \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$B_1 = B_2 = B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$C_1 = \left[0 \quad 0 \quad 0 \quad \frac{R_E}{r_{C_2}} \right] \quad (27)$$

$$C_2 = \left[R_E \quad R_E \quad 0 \quad \frac{R_E}{r_{C_2}} \right] \quad (28)$$

$$E_1 = E_2 = E = [0] \quad (29)$$

$$G_{dv} = C(SI - A)^{-1}B_d + E_d \quad (30)$$

$$A = A_1 d + A_2 (I - d) \quad (31)$$

$$B = B_1 d + B_2 (I - d) \quad (32)$$

$$C = C_1 d + C_2 (I - d) \quad (33)$$

$$E = E_1 d + E_2 (I - d) \quad (34)$$

$$B_d = (A_1 - A_2)X + (B_1 - B_2)V_d \quad (35)$$

$$G_{vv} = C(SI - A)^{-1}B \quad (36)$$

$$X = -A^{-1}BV_d \quad (37)$$

در اینجا A ، B و C به ترتیب ماتریس سیستم، ماتریس کنترل و ماتریس خروجی هستند. $Du(t)$ غایب است؛ زیرا اتصال مستقیمی بین ورودی و خروجی برقرار نیست. d نشان دهنده ضریب وظیفه، X بردار حالت و Y خروجی بردار است. A_1 و B_1 نشان دهنده حالت روشن و A_2 و B_2 نشان دهنده حالت خاموش هستند. برای ایجاد مدل میانگین با تکنیک میانگین فضای حالت از روابط دیفرانسیلی استفاده شده است و از متلب برای انجام محاسبات لازم کمک گرفته شده است.



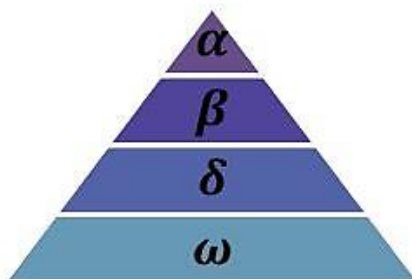


۳- پیاده‌سازی الگوریتم چند هدفه گرگ خاکستری

۳-۱- نمای کلی الگوریتم چند هدفه ی گرگ خاکستری :

مهندسان کنترل در عصر مدرن از الگوریتم چند هدفه گرگ خاکستری به‌عنوان روش جست‌وجوی تصادفی و ابزاری مفید برای بهینه‌سازی عملکرد مبدل‌های توان مختلف استفاده می‌کنند. الگوریتم گرگ خاکستری براساس رفتار زندگی گرگ‌های خاکستری طراحی شده است [۲۱]. گرگ‌های خاکستری ترجیح می‌دهند در یک گروه (دسته) زندگی کنند؛ هر گروه به‌طور متوسط ۱۲-۵ عضو دارد. همه اعضای این گروه دارای سلسله مراتب تسلط اجتماعی بسیار دقیق هستند و وظایف خاصی دارند. در هر گله از گرگ‌ها برای شکار کردن ۴ درجه وجود دارد که مانند شکل ۳ به‌صورت یک ساختار هرمی مدل می‌شود [۲۲].

- گرگ‌های رهبر گروه، alpha نامیده می‌شوند که می‌توانند مذکر یا مونث باشند. این گرگ‌ها بر گله تسلط دارند.
- گرگ‌های beta: کمک به گرگ‌های alpha در فرایند تصمیم‌گیری بوده و همچنین مستعد انتخاب شدن به جای آن‌ها هستند.
- گرگ‌های delta: پایین‌تر از گرگ‌های beta و شامل گرگ‌های پیر، شکارچی‌ها و گرگ‌های مراقبت‌کننده از نوزادان هستند.
- گرگ‌های omega: پایین‌ترین مرتبه در هرم سلسله مراتب که کمترین حق را نسبت به بقیه اعضای گروه دارند. بعد از همه غذا می‌خورند و در فرایند تصمیم‌گیری مشارکتی ندارند.



شکل (۳): سلسله مراتب گرگ خاکستری (تسلط از بالا به پایین کاهش می‌یابد) [۲۱].

مسئولیت و تصمیم‌گیری در زمینه‌های حمله و زمان آن بر عهده رهبر گروه، آلفا است. این الگوریتم از شیوه شکار اینگونه از حیوانات برای بهینه‌سازی تابع هدف الهام گرفته شده است که شامل سه مرحله است:

۱: ردیابی تعقیب و نزدیک شدن به شکار،

۲: نزدیک شدن، حلقه زدن به دور شکار و گمراه کردن آن تا زمانی که از حرکت باز بماند،

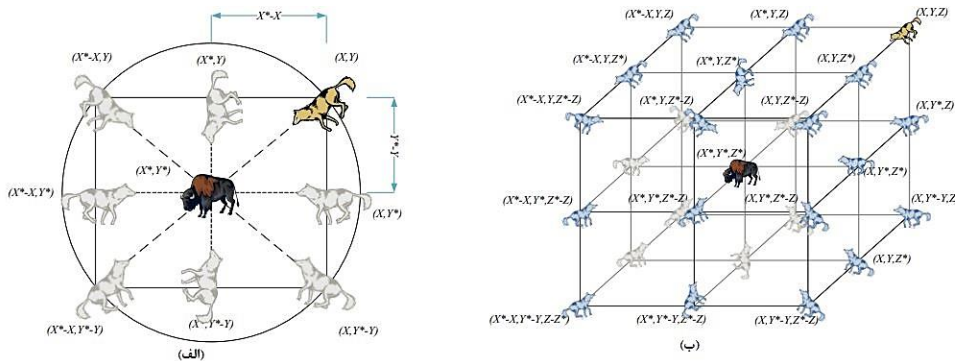
۳: حمله به طرف شکار.

بنابراین الگوریتم چند هدفه گرگ خاکستری قادر به بهینه‌سازی راه‌حل مسائل پیچیده مختلف است.

در الگوریتم چند هدفه گرگ خاکستری، تابع برازش، نوع خاصی از تابع هدف است که برای بیان معیاری واحد از میزان نزدیکی راه‌حل طراحی به دستیابی اهداف تعیین‌شده استفاده می‌شود. در این الگوریتم توابع برازش برای هدایت شبیه‌سازی‌ها به سمت راه‌حل‌های طراحی بهینه استفاده می‌شود.

بردارهای موقعیت مکان‌های احتمالی بعدی گرگ‌های خاکستری در شکل ۴ نمایش داده شده است.





شکل (۴): بردارهای موقعیت دو بعدی و سه بعدی و مکان های احتمالی بعدی آن‌ها [۲۱].

۳-۲- تابع هدف

به منظور پیاده سازی الگوریتم چند هدفه گرگ خاکستری، توابع هدف انتخاب شده است تا تناسب کروموزم ارزیابی شود [۲۲]. در این مقاله، سه شاخص عملکردی برای به حداقل رساندن خطای انتخاب شده است که به صورت انتگرال مقدار مطلق خطا (IAE)، انتگرال زمان ضرب در مقدار مطلق خطا (ITAE)، و انتگرال مربع خطا (ISE) تعریف می شوند. معادلات مربوط به شاخص های عملکردی به صورت زیر تعریف می شود:

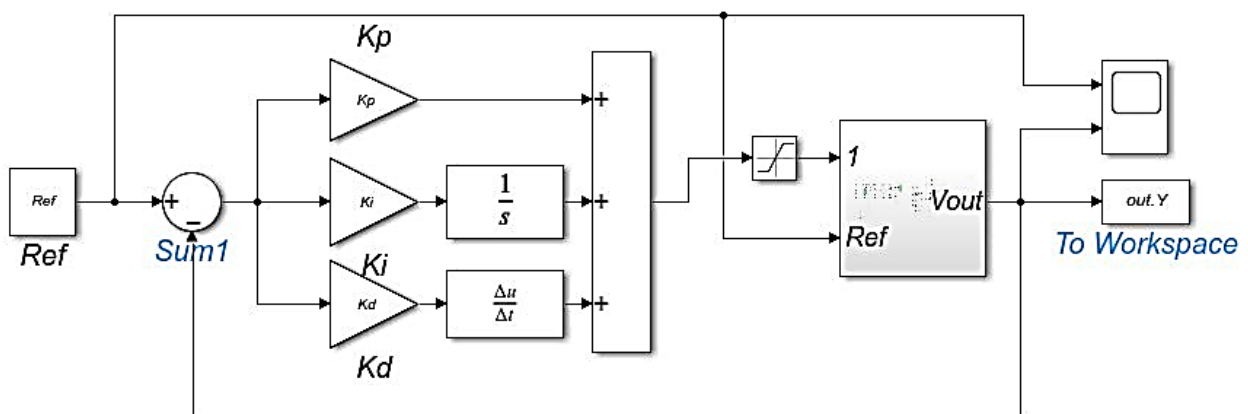
$$IAE = \int_0^T |e(t)| dt \quad (38)$$

$$ITAE = \int_0^T t |e(t)| dt \quad (39)$$

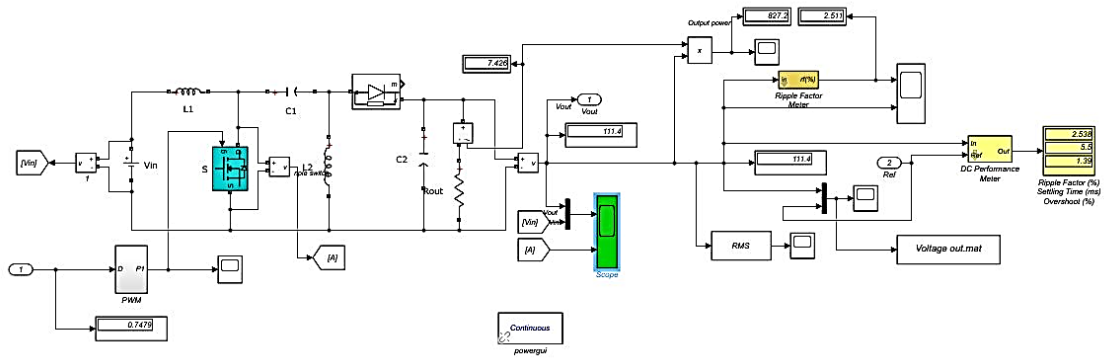
$$ISE = \int_0^T e(t)^2 dt \quad (40)$$

۳-۳- طراحی کنترل کننده PID مبتنی بر الگوریتم چند هدفه ی گرگ خاکستری

کنترل تناسبی-انتگرالی-مشتقی (PID) یکی از رایج ترین روش ها در تحلیل حلقه بسته مبدل های قدرت است [۲۳]. بنابراین، در اینجا از این تکنیک برای مشاهده عملکرد بهینه حلقه بسته مبدل سپیک با بهره گیری از الگوریتم چند هدفه گرگ خاکستری استفاده شده است. بلوک دیاگرام پایه ای سیستم در شکل ۵ نشان داده شده است. تنظیم پارامترهای کنترل کننده PID بهینه از طریق الگوریتم چند هدفه گرگ خاکستری، k_p ، k_I و k_D انجام شده است. هدف اصلی مطالعه، به حداقل رساندن خطای بین ورودی و خروجی سیستم است.



شکل (۵): بلوک دیاگرام پایه ای کنترل کننده PID مبتنی بر الگوریتم چند هدفه ی گرگ خاکستری .



شکل (۶): بلوک دیاگرام پایه‌ای کنترل کننده PID مبتنی بر الگوریتم چند هدفه ی گرگ خاکستری .

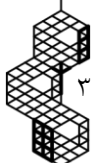
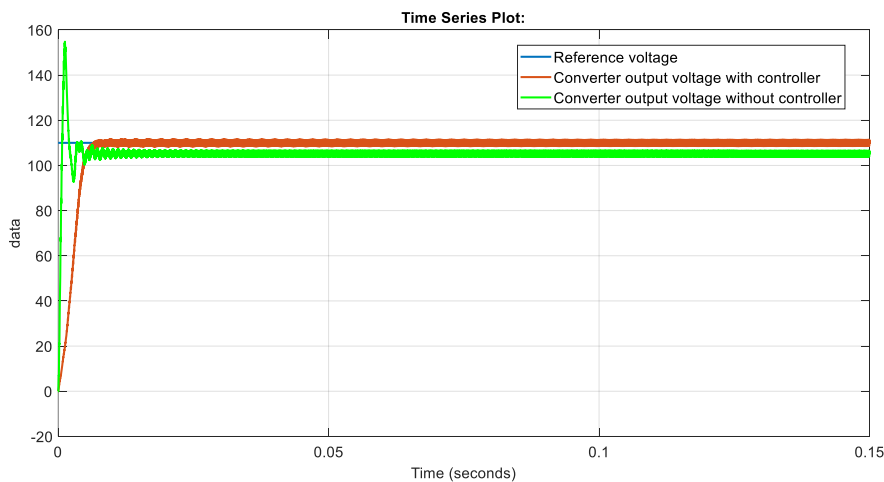
۴- نتایج شبیه‌سازی و تحلیل پایداری

با کمک معادلات به‌دست آمده پیشین و با هدف شبیه‌سازی پایداری سیستم، مدل فضای حالت به تابع انتقال مرتبه بالا تبدیل می‌شود. تکنیک کاهش مرتبه مدل در متلب پیاده‌سازی شده است تا بتوان سیستم را به شکلی ساده‌تر تبدیل کرد. جدول ۱ پارامترهای مدل را نمایش می‌دهد که برای محاسبه ریاضیاتی و شبیه‌سازی پایداری مدل اسپیک استفاده شده‌اند.

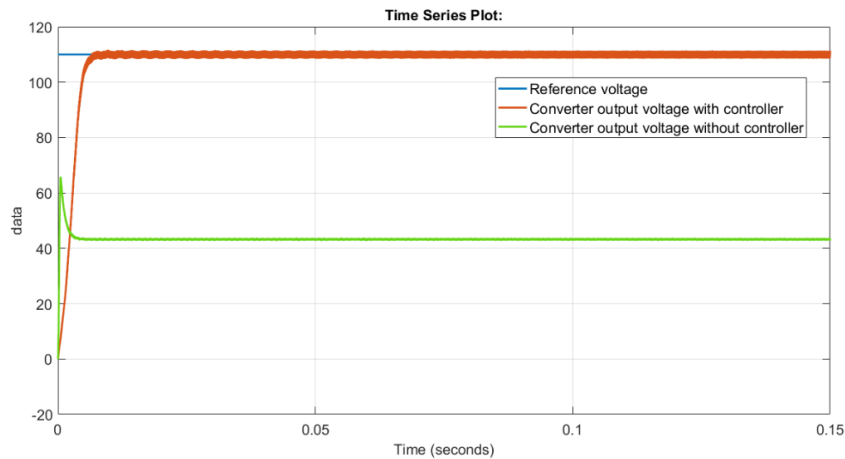
جدول (۱): پارامترهای مدل اسپیک

پارامتر	سمبل	مقادیر
ولتاژ ورودی	V_{in}	40V
فرکانس سوئیچینگ	f_w	20 kHz
ضریب وظیفه	d	0.74
سلف	L_1, L_2	150 Mh
مقاومت	r_{L1}, r_{L2}	1 mΩ
	r_{C1}	3 mΩ
	r_{C2}	1 mΩ
خازن	C_1, C_2	100 μF
مقاومت بار	R_o	15 Ω
ولتاژ خروجی	V_o	110 V

برای ارزیابی پایداری سیستم، همزمان مدل اسپیک با کنترل کننده PID بهینه و بدون استفاده از کنترل کننده با ضریب وظیفه ۰.۷ و ۰.۵ به کار گرفته شده است. پاسخ ولتاژ خروجی مدل در اشکال ۷ و ۸ نشان داده شده است.



شکل (۷): پاسخ ولتاژ خروجی مبدل با کنترل کننده PID بهینه و ضریب وظیفه ۰.۷



شکل (۸): پاسخ ولتاژ خروجی مبدل با کنترل کننده PID بهینه و ضریب وظیفه ۰.۵

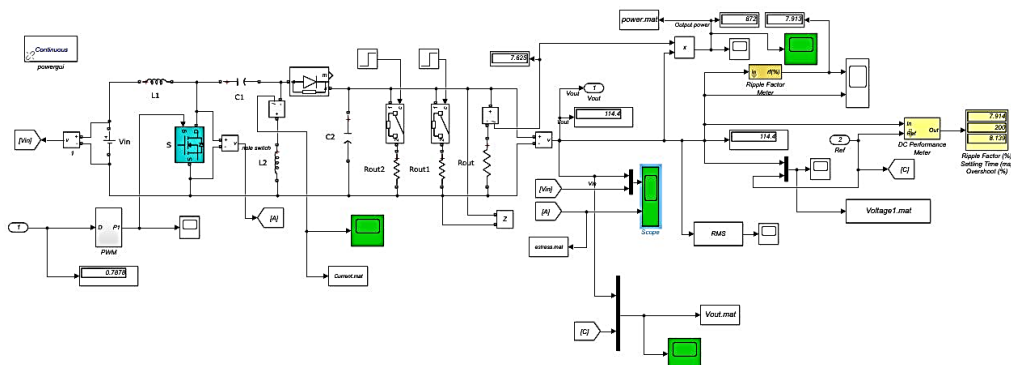
پس از آن، الگوریتم چند هدفی گرگ خاکستری در سیستم پیاده می‌شود تا مقادیر بهینه کنترل کننده PID بهینه را تعیین کند. به منظور دستیابی به مقادیر بهینه k_P ، k_I و k_D ، پارامترهای الگوریتم چند هدفی گرگ خاکستری با فرآیند سعی و خطا انتخاب می‌شوند. پس از شبیه‌سازی در متلب، مقادیر k_P ، k_I و k_D برای سه شاخص عملکردی کنترل کننده PID مبتنی بر الگوریتم چند هدفی گرگ خاکستری به دست می‌آید. این مقادیر همراه با مقادیر کنترل کننده PID بهینه که در جدول ۲ آمده، نمایش داده شده است.

جدول (۲): مقادیر بهره برای کنترل کننده PID مبتنی بر الگوریتم چند هدفی گرگ خاکستری

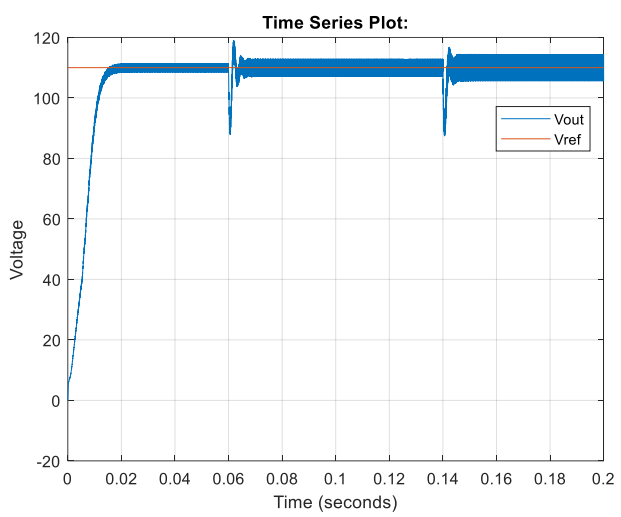
مقدار	بهره‌ها
۰.۰۰۴۳	k_P
۳.۶۴۸۸	k_I
۰.۰۰۱۳	k_D

۴-۱- پاسخ دینامیکی مبدل سپیک به تغییرات بار

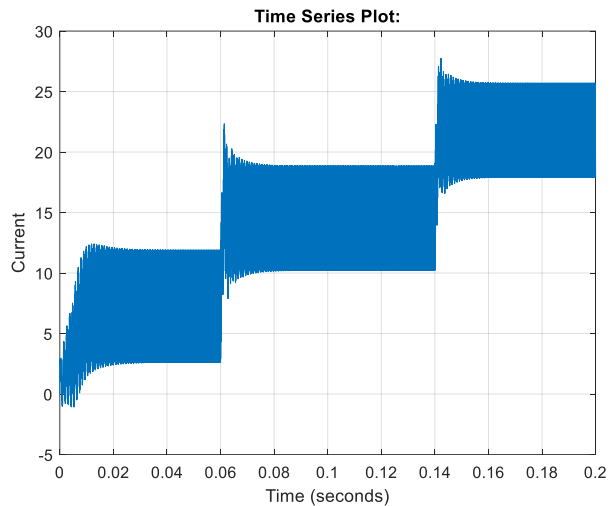
به منظور تحلیل پایداری سیستم، بار در زمان‌های ۰.۰۶ و ۰.۱۴ ثانیه سنگین‌تر شده است (مطابق شکل ۹ و به کمک وارد کردن مقاومت‌های موازی). همانطور که از شکل ۱۰ مشاهده می‌شود ولتاژ خروجی مبدل طی ۰.۰۱ ثانیه توسط کنترل کننده بهینه PID با فرایند ۱.۲۹۲٪، زمان نشست ۹.۸۴۶ ثانیه و زمان اوج ۸.۸۲۹ ثانیه به ولتاژ مرجع می‌رسد. شکل ۱۱ شکل موج جریان سلف L2 را نشان می‌دهد که با سنگین‌تر شدن بار خروجی سطح آن افزایش یافته است.



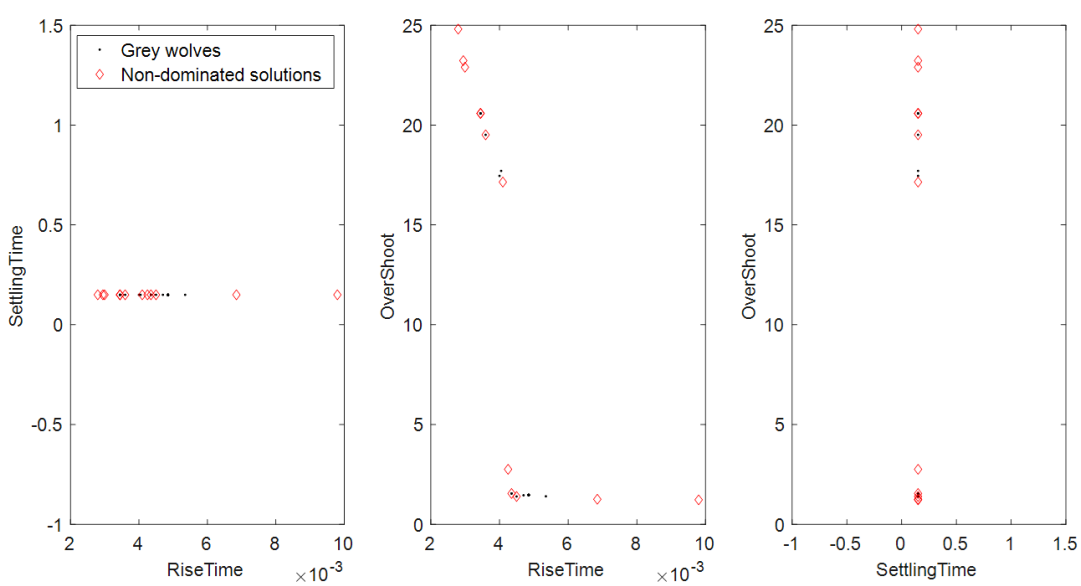
شکل (۹): بلوک دیاگرام اعمال بار لحظه‌ای به مبدل سپیک



شکل (۱۰): ولتاژ خروجی مبدل بعد از تغییر بار.

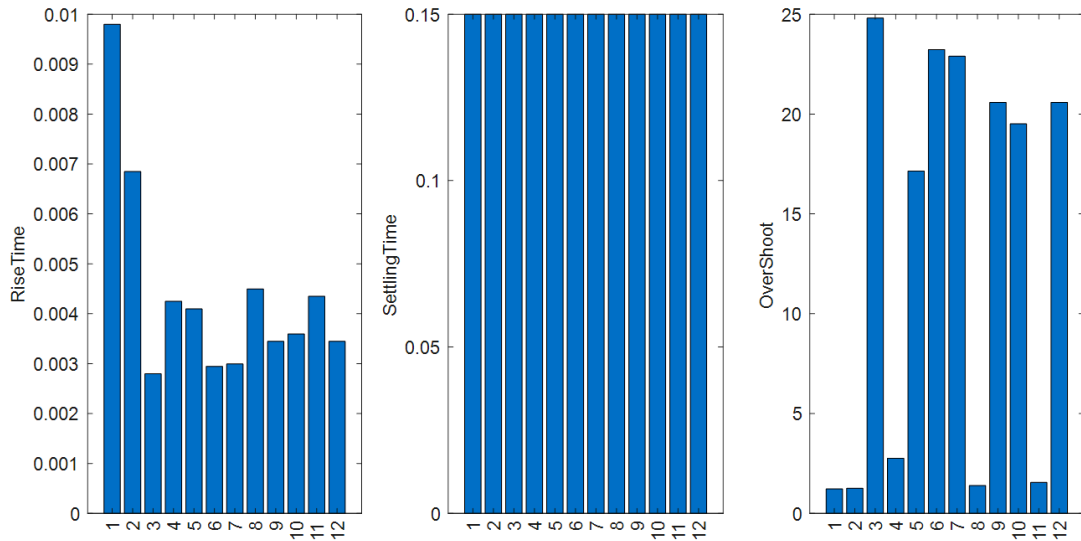


شکل (۱۱): جریان سلف L_2 بعد از اعمال بار لحظه‌ای به مبدل.



شکل (۱۲): جبهه پرتو پارامترهای بهینه مبدل اسپیک نسبت به یکدیگر.





شکل (۱۳): نمودار میله‌ای پارامترهای بهینه مبدل سپیک.

در جدول ۳، پارامترهای عملکردی مانند درصد فراجش ($\%OS$)، زمان اوج (Tr)، زمان نشست (Ts) و اندازه پیک کنترل کننده PID مرسوم و مبتنی بر الگوریتم چند هدفی گرگ خاکستری نمایش داده شده است. از نتایج مشاهده می‌شود که IAE نسبت به سایر کنترل کننده‌ها نتایج بهتری دارد. تاثیر کنترل کننده PID روی مبدل سپیک در جدول ۴ نشان داده شده است.

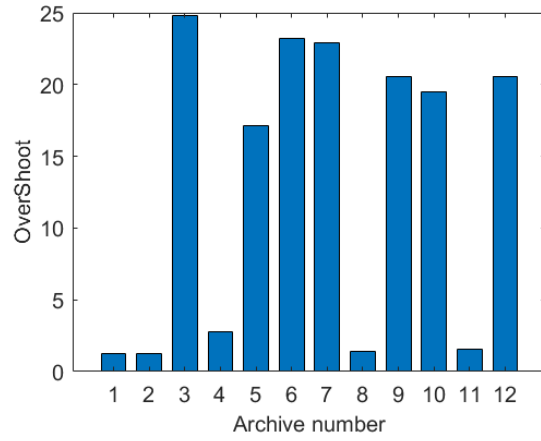
جدول (۳): پارامترهای عملکرد برای مبدل PID بهینه و مبتنی بر الگوریتم چند هدفی گرگ خاکستری

MOGWO-PID		PID بهینه	پارامترهای عملکرد
۰.۰۰۸۳۸۹	ITAE	۳.۷۸۱ms	اوج زمان
۲۲.۹	ISE	۴.۰۴۵ms	نشست زمان
۰.۳۹۹۵	IEA	۱.۵۳۱%	فراجش
۰.۰۲۶۶۴	MSE	۱.۱۱	اندازه پیک

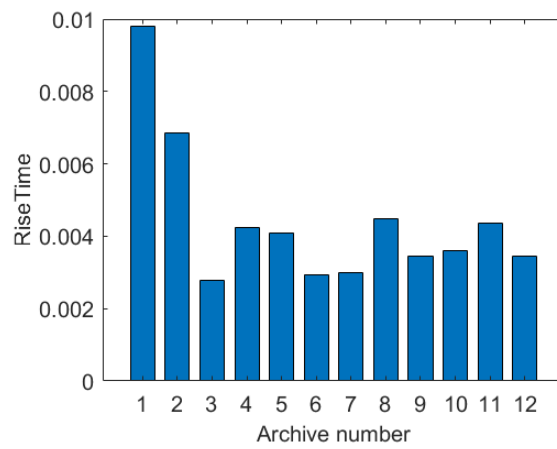
جدول (۴): تأثیر کنترل کننده PID روی مبدل سپیک

نوع کنترل کننده	زمان اوج	فراجش	زمان نشست	خطای حالت ماندگار
تناسبی	کاهش	افزایش	تغیر اندک	کاهش
انتگرالی	کاهش	افزایش	افزایش	حذف
مشتقی	تغیر اندک	کاهش	کاهش	بی تاثیر

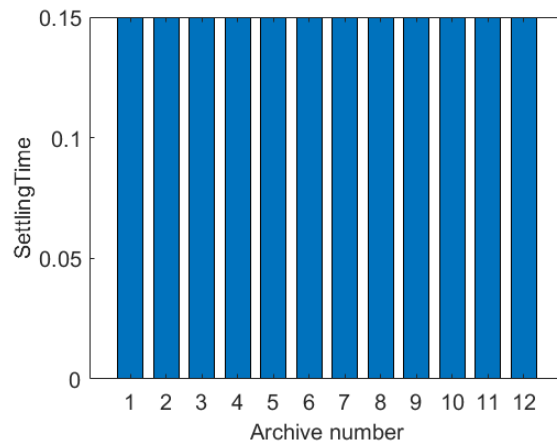
نمایش گرافیکی پارامترها برای کنترل PID بهینه و مبتنی بر الگوریتم چند هدفی گرگ خاکستری نسبت به تعداد بردار موقعیت‌های مختلف قرار گرفتن جواب‌های بهینه در شکل‌های ۱۴، ۱۵ و ۱۶ نمایش داده شده است و شکل موج ولتاژ خروجی مبدل و مسافت در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ نمایش داده شده است.



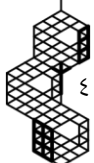
شکل (۱۴): تحلیل مقایسه‌ای درصد فراجش.

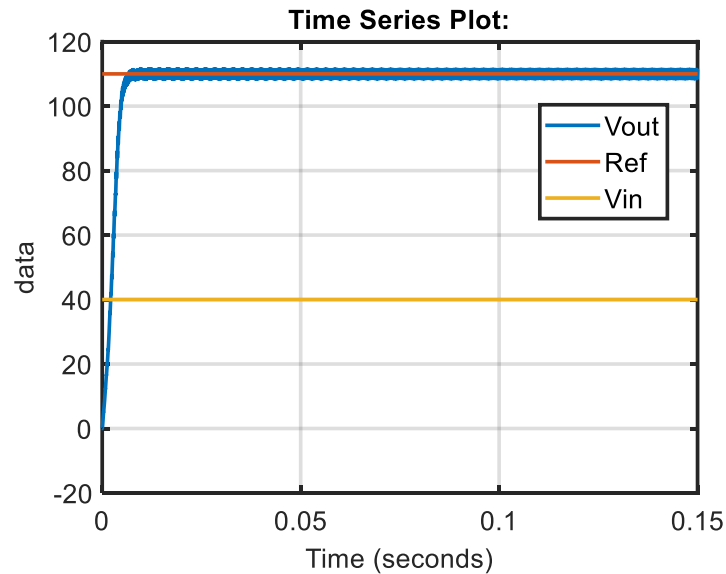


شکل (۱۵): تحلیل مقایسه‌ای زمان اوج (T_r).

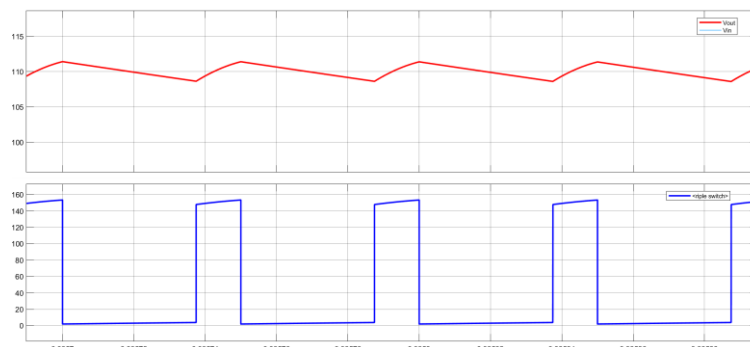


شکل (۱۶): تحلیل مقایسه‌ای زمان نشست (T_s).





شکل (۱۷): نسبت تغییر ولتاژ خروجی به ولتاژ ورودی مبدل سپیک.



شکل (۱۸): شکل موج ولتاژهای خروجی مبدل سپیک و درین - سورس ماسفت.

۵- نتیجه گیری

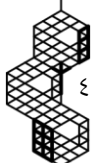
در این مقاله، تحلیل پایداری مبدل سپیک حلقه بسته انجام شده است. از الگوریتم چند هدفه گرگ خاکستری برای بهینه سازی پارامترهای کنترل کننده PID استفاده شده است. مشاهده شد که IAE نسبت به سایر شاخص های عملکردی، از نظر فراجهدش (۱.۵۳۱٪)، زمان اوج (۳.۷۸۱ ثانیه)، زمان نشست (۴۵.۰۴۵ ثانیه) و اندازه پیک (۱.۰۱) نتایج بهینه تری ارائه می کند. تحلیل مقایسه ای کلی پاسخ پله، تصویری از پایداری مبدل ارائه می کند. بنابراین، عملکرد کنترل کننده PID مبتنی بر الگوریتم چند هدفه ی گرگ خاکستری بهتر از عملکرد کنترل کننده PID مرسوم با تنظیم دستی است. بنابراین، می توان با استفاده از این تکنیک های بهینه سازی، سیستم های بهینه را طراحی و تحلیل کرد.

مراجع

- [1] V. A. K. Prabhala, P. Fajri, V. S. P. Gouribhatla, B. P. Baddipadiga, and M. Ferdowsi, "A DC-DC Converter with High Voltage Gain and Two Input Boost Stages," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 6, pp. 4206–4215, 2016, doi: 10.1109/TPEL.2015.2476377.
- [2] H. L. Cheng, Y. N. Chang, L. C. Hwang, H. C. Yen, S. Y. Chan, and W. F. Yang, "A high-power-



- factor dimmable led driver with integrated boost converter and half-bridge-topology converter,” *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 8, 2020, doi: 10.3390/APP10082775.
- [3] M. Khodabandeh, E. Afshari, and M. Amirabadi, “A Family of ĆUK, Zeta, and SEPIC Based Soft-Switching DC-DC Converters,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 34, no. 10, pp. 9503–9519, Oct. 2019, doi: 10.1109/TPEL.2019.2891563.
- [4] M. R. Banaei and S. G. Sani, “Analysis and Implementation of a New SEPIC-Based Single-Switch Buck-Boost DC-DC Converter with Continuous Input Current,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 33, no. 12, pp. 10317–10325, 2018, doi: 10.1109/TPEL.2018.2799876.
- [5] D. Kumar, R. A. Gupta, and H. Tiwari, “A Novel High Voltage Gain SEPIC Converter Based on Hybrid Split-Inductor for Renewable Application,” *IETE J. Res.*, vol. 0, no. 0, pp. 1–17, 2020, doi: 10.1080/03772063.2020.1768904.
- [6] L. Bachouch, L. Bouslimi, and L. El Amraoui, “Power losses minimization in the SEPIC DC-DC converter using Particle Swarm Optimization technique (PSO),” *19th Int. Conf. Sci. Tech. Autom. Control Comput. Eng. STA 2019*, pp. 388–393, 2019, doi: 10.1109/STA.2019.8717286.
- [7] T. Shamsi, M. Delshad, E. Adib, and M. R. Yazdani, “A New Simple-Structure Passive Lossless Snubber for DC-DC Boost Converters,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 0046, no. c, pp. 1–1, 2020, doi: 10.1109/tie.2020.2973906.
- [8] F. Ghasemi, M. R. Yazdani, and M. Delshad, “Step-Up DC-DC Switching Converter with Single Switch and Multi-Outputs Based on Luo Topology,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 16871–16882, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3150316.
- [9] B. Pid, D. S. Converter, M. M. Nishat, F. Faisal, A. Hoque, and A. J. Evan, “Stability Analysis and Optimization of Simulated Annealing (SA) Algorithm Stability Analysis and Optimization of Simulated Annealing (SA) Algorithm Based PID Controller for DC-DC SEPIC Converter,” no. September, 2019.
- [10] M. R. Banaei and S. G. Sani, “Analysis and Implementation of a New SEPIC-Based Single-Switch Buck-Boost DC-DC Converter with Continuous Input Current,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 33, no. 12, pp. 10317–10325, Dec. 2018, doi: 10.1109/TPEL.2018.2799876.
- [11] P. I. D. Tuner, “Designing PID for Disturbance Rejection,” pp. 1–8, 2017.
- [12] K. S. Chia, “Ziegler-nichols based proportional-integral-derivative controller for a line tracking robot,” *Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 9, no. 1, pp. 221–226, 2018, doi: 10.11591/ijeecs.v9.i1.pp221-226.
- [13] Q. Al-Tashi *et al.*, “Binary Multi-Objective Grey Wolf Optimizer for Feature Selection in Classification,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 106247–106263, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3000040.
- [14] Z. K. Pourtaheri, S. H. Zahiri, and S. M. Razavi, “Stability investigation of multi-objective heuristic ensemble classifiers,” *Int. J. Mach. Learn. Cybern.*, vol. 10, no. 5, pp. 1109–1121, 2019, doi: 10.1007/s13042-018-0789-6.
- [15] M. I. Solihin, L. F. Tack, and M. L. Kean, “Tuning of PID Controller Using Particle Swarm Optimization (PSO),” *Int. J. Adv. Sci. Eng. Inf. Technol.*, vol. 1, no. 4, p. 458, 2011, doi: 10.18517/ijaseit.1.4.93.
- [16] I. Behravan, O. Dehghantanha, and S. H. Zahiri, “An optimal SVM with feature selection using multi-objective PSO,” *1st Conf. Swarm Intell. Evol. Comput. CSIEC 2016 - Proc.*, vol. 2016, pp. 76–81, 2016, doi: 10.1109/CSIEC.2016.7482135.
- [17] S. Ravikumar, H. Vennila, and R. Deepak, “Hybrid power generation system with Total Harmonic Distortion minimization using improved Rider Optimization Algorithm: Analysis on converters,” *J. Power Sources*, vol. 459, no. August 2019, p. 228025, 2020, doi: 10.1016/j.jpowsour.2020.228025.
- [18] N. Elsayad, H. Moradisizkoohi, and O. Mohammed, “A New SEPIC-Based Step-Up DC-DC Converter with Wide Conversion Ratio for Fuel Cell Vehicles: Analysis and Design,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 0046, no. c, pp. 1–1, 2020, doi: 10.1109/tie.2020.3007110.
- [19] S. Durgadevi and M. G. Umamaheswari, “Analysis and Design of Single Phase Power Factor Correction using DC-DC SEPIC Converter with Bang-Bang and PSO based Fixed PWM Techniques,” *Energy Procedia*, vol. 117, pp. 79–86, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.05.109.
- [20] S. Mirjalili, S. M. Mirjalili, and A. Lewis, “Grey Wolf Optimizer,” *Adv. Eng. Softw.*, vol. 69, pp. 46–61, 2014, doi: 10.1016/j.advengsoft.2013.12.007.
- [21] S. Mirjalili, S. Saremi, S. M. Mirjalili, and L. D. S. Coelho, “Multi-objective grey wolf optimizer: A novel algorithm for multi-criterion optimization,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 47, pp. 106–119, 2016, doi:





- 10.1016/j.eswa.2015.10.039.
- [22] A. Y. Jaen-Cuellar, R. D. J. Romero-Troncoso, L. Morales-Velazquez, and R. A. Osornio-Rios, "PID-controller tuning optimization with genetic algorithms in servo systems," *Int. J. Adv. Robot. Syst.*, vol. 10, 2013, doi: 10.5772/56697.
- [23] M. H. B. Chaleshtari, E. Norouzi, and H. Ahmadi, "Optimizing control motion of a human arm with PSO-PID controller," *J. Comput. Appl. Res. Mech. Eng.*, vol. 7, no. 1, pp. 23–34, 2017, doi: 10.22061/JCARME.2017.645.

زیر نویس ها

-
- ¹ SEPIC Converter
 - ² PID Controllers
 - ³ Gray Wolf Multi-Objective Algorithm
 - ⁴ State mode average method

