



Computational Intelligence in Electrical Engineering
Vol. 13, No. 3, 2022
Research Paper

Chaos Synchronization in Josephson Junction Using Model Predictive Controller Based on Ant Colony Optimization Algorithm

Aylar Khooshehmehri ¹, Saeed Nasrollahi ²

¹ Researcher of Electrical and Computer engineering, Malek Ashtar University, Tehran, Iran

² Faculty of Electrical and Computer Engineering, Malek- Ashtar university of Technology, Tehran, Iran

Abstract:

The Josephson junction is a device consisting of two superconducting electrodes connected by a weak junction such as a thin insulation coating. The Josephson junction has chaotic behavior parameters not desirable in high-frequency applications. In this paper, a model predictive control approach based on an ant colony optimization algorithm is proposed to synchronize two Josephson junction models with different parameters. Here, the Josephson junction is described with a nonlinear model, and the synchronization is obtained using the slave–master technique. For this purpose, an appropriate objective function is defined to assess the particles within the state space. This objective function minimizes simultaneously the tracking error, control effort, and control smoothness. The dynamic optimization problem is solved using an ant colony optimization algorithm. Numerical simulations are conducted to assess the efficiency of the proposed algorithm. Also, a Monte Carlo evaluation is achieved to compute the statistic performance of the suggested controller. In addition, sensitivity analysis to changes in the number of ants and the number of iteration of the inner loop of the algorithm was performed. The results show that the controller is significantly sensitive to reducing the number of iteration of the inner loop.

Keywords: Ant colony optimization, Josephson junction, Chaos dynamic, Synchronization, Nonlinear model predictive control, Monte Carlo simulation.



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



<http://dx.doi.org/10.22108/isee.2021.126270.1433>

کنترل آشوب و سنکرون‌سازی در پیوند جوزفسون با استفاده از کنترل‌کننده پیش‌بین مبتنی

بر الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان

آیلار خوشه مهری^۱، سعید نصرالهی^{۲*}

۱- دانش‌آموخته دکتری، مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

khooshehmehri@mut.ac.ir

۲- استادیار، مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

nasrollahi@mut.ac.ir

چکیده: پیوند جوزفسون متشکل از دو الکتروود ابررسانا است که با یک اتصال ضعیف مانند یک لایه عایق نازک به هم متصل شده‌اند. پیوند جوزفسون به‌ازای پارامترهای مشخصی رفتار آشوبناک دارد که این رفتار در کاربردهای فرکانس بالا مطلوب نیست. در این مقاله، یک کنترل‌کننده پیش‌بین مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان برای کنترل و سنکرون‌سازی پیوند جوزفسون ارائه شده است. در اینجا، از مدل غیرخطی پیوند جوزفسون و نیز از رویکرد سیستم اصلی - فرعی برای کنترل و سنکرون‌سازی استفاده شده است. برای این منظور، یک تابع هزینه مناسب برای کمینه‌سازی، متشکل از خطای ردیابی و سیگنال کنترل ارائه شده است. مسئله بهینه‌سازی دینامیکی تخمین سیگنال کنترل در افق محدود با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان حل شده است. عملکرد الگوریتم معرفی شده برای حالتی بررسی شده است که دو پیوند دارای شرایط اولیه و پارامترهای متفاوتی‌اند. برای بررسی همگرایی الگوریتم کنترل پیشنهادی برای سنکرون‌سازی پیوند شبیه‌سازی مونت‌کارلو انجام شده است. همچنین، آنالیز حساسیت نسبت به تغییرات تعداد مورچه‌ها و تعداد تکرار حلقه داخلی الگوریتم انجام شده است. نتایج نشان می‌دهند کنترل‌کننده نسبت به کاهش تعداد تکرار حلقه داخلی دارای حساسیت چشمگیری است.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان، پیوند جوزفسون، دینامیک آشوب، سنکرون‌سازی، کنترل پیش‌بین

غیرخطی، شبیه‌سازی مونت‌کارلو

۱- مقدمه

[۱]. پیوند جوزفسون مانند بسیاری از سیستم‌های مکانیکی و الکترونیکی می‌تواند رفتاری آشوبناک داشته باشد. در مراجع [۲-۴]، محققان، آشوب را در ساختارهای مختلف پیوند جوزفسون بررسی کرده‌اند. با توجه به اینکه آشوب پدیده‌ای پیش‌بینی‌ناپذیر است و ممکن است به رفتار ناخواسته در سیستم منجر شود، باید در بسیاری از موارد سرکوب شود؛ برای مثال، در کاربردهایی مانند تقویت‌کننده‌های پارامتری جوزفسون [۵]، نوسان‌سازهای فرکانس بالا [۶]، مغناطیس‌سنج‌های اسکویید [۷]، ترانزیستور سالیتمانی [۸] و تولیدکننده پالس [۹] پدیده آشوب مطلوب نیست و باید کنترل شود. مطالعات متنوعی برای کنترل و سنکرون‌سازی رفتار آشوب پیوند جوزفسون

پیوند جوزفسون متشکل از دو الکتروود ابررسانا است که با یک اتصال ضعیف مانند یک لایه عایق نازک به هم متصل شده‌اند. اگر لایه عایق میانی به اندازه کافی نازک باشد، جفت الکترون از یک الکتروود ابررسانا به یک الکتروود دیگر منتقل می‌شود که به این پدیده اثر جوزفسون گفته می‌شود

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۹/۰۹/۱۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۲/۰۵

نام نویسنده مسئول: سعید نصرالهی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تهران - دانشگاه صنعتی مالک اشتر

- مجتمع برق و کامپیوتر

انجام شده است که در ادامه بیان خواهد شد.

در مرجع [۱۰]، از روش کنترل فعال برای کنترل و سنکرون‌سازی دو پیوند جوزفسون استفاده شده است. در این مقاله از یک مدل خطی برای طراحی کنترل‌کننده استفاده شده است؛ به طوری که سیستم فرعی فرکانس نوسان سیستم اصلی را دنبال می‌کند. در مرجع [۱۱]، یک کنترل‌کننده غیرخطی بازگشت به عقب برای کنترل آشوب در پیوند جوزفسون استفاده شده است. در این مقاله، با معرفی یک تابع لیاپانوف مناسب تحلیل پایداری سیستم حلقه بسته انجام شده است. در مرجع [۱۲]، از یک کنترل‌کننده غیرخطی مبتنی بر رویکرد بازگشتی برای حذف رفتار آشوب در دینامیک پیوند جوزفسون، مدل 'RCLSJ' استفاده شده است. در مرجع [۱۳]، از روش مدل‌گزشی برای سنکرون‌سازی و کنترل آشوب در حضور نامعینی در مدل استفاده شده است. در مرجع [۱۴]، از یک روش کنترل مبتنی بر یادگیری برای کنترل مدل خطی خطای بین سیستم اصلی و فرعی پیوند جوزفسون استفاده شده است. در مرجع [۱۵]، از یک کنترل‌کننده مدل‌گزشی فازی برای پایداری دینامیک خطای سیستم فرعی و اصلی استفاده شده است. برای خطی‌سازی سیستم غیرخطی از کنترل‌کننده فازی و برای مقابله با ترم نامعینی از کنترل‌کننده مدل‌گزشی استفاده شده است.

در مهندسی کنترل، محققان به کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل^۲ به دلیل مزیت در نظر گرفتن قید، سادگی طراحی سیستم‌های چندمتغیره علاقه دارند. کنترل پیش‌بین در بسیاری از سیستم‌ها از جمله سیستم‌های شیمیایی [۱۶]، چهارپره [۱۷]، سیستم‌های هیبریدی [۱۸]، ریزشبکه قدرت [۱۹] و سیستم فتوولتائیک [۲۰] به کار رفته است. کنترل‌کننده‌های پیش‌بین به دو دسته خطی و غیرخطی تقسیم‌بندی می‌شوند [۲۱]. کنترل‌کننده‌های پیش‌بین غیرخطی شامل مسائل بهینه‌سازی غیرمحدب‌اند. همچنین، یک مسئله کنترل پیش‌بین را می‌توان به صورت یک مسئله تخمین سیگنال کنترل بیان کرد [۲۲]. همچنین، یک مسئله تخمین، یک مسئله بهینه‌سازی دینامیکی است. الگوریتم‌های مبتنی بر ذره به حل مسائل بهینه‌سازی غیرخطی قادرند. ترکیبی از کنترل پیش‌بین و الگوریتم‌های مبتنی بر ذره، ابزار

قدرتمندی را برای محاسبه سیگنال کنترل فراهم می‌کند. در مراجع [۲۲-۲۸]، از روش‌های مبتنی بر ذره برای تخمین سیگنال کنترل استفاده شده است. همچنین، در هیچ‌کدام از مراجع بیان‌شده از روش‌های مبتنی بر ذره برای کنترل و سنکرون‌سازی دو پیوند جوزفسون استفاده نشده است.

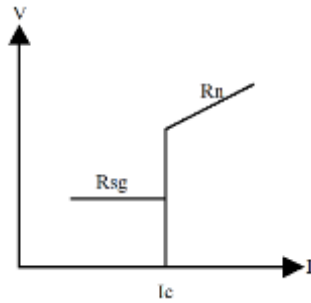
در این مقاله، یک کنترل‌کننده پیش‌بین غیرخطی مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی مورچه‌ها برای کنترل و سنکرون‌سازی دو پیوند جوزفسون، با مدل غیرخطی، با پارامترهای متفاوت ارائه شده است. مسئله بهینه‌سازی دینامیکی تعیین سیگنال کنترل در افق محدود به یک مسئله تخمین تبدیل شده و با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان حل شده است. کنترل‌کننده ارائه‌شده دو حلقه دارد: حلقه اصلی خارجی که تا انتهای زمان شبیه‌سازی تکرار می‌شود؛ و حلقه داخلی که وظیفه آن، یافتن بهترین تخمین از آینده سیگنال‌های کنترل است. برای این منظور، یک تابع هزینه مناسب برای کمینه‌سازی، متشکل از خطای ردیابی و سیگنال کنترل ارائه شده است. در این رویکرد، ذرات در فضای جستجو، تشکیل شده از بردار سیگنال کنترل در افق محدود، به دنبال موقعیتی‌اند که کمترین هزینه را از نظر خطای ردیابی و تلاش کنترلی داشته باشد. با انجام شبیه‌سازی کارایی الگوریتم معرفی شده بررسی شده است. همچنین، از شبیه‌سازی مونت‌کارلو برای بررسی همگرایی الگوریتم استفاده شده است. از نظر نویسندگان مقاله، تا کنون پژوهشی درخصوص سنکرون‌سازی دو پیوند جوزفسون با استفاده از کنترل‌کننده پیش‌بین مبتنی بر بهینه‌سازی کلونی مورچگان انجام نشده است.

در بخش دوم این پژوهش، به بیان مسئله و مدل‌سازی پیوند جوزفسون پرداخته شده است. در بخش سوم، کنترل‌کننده مبتنی بر بهینه‌سازی کلونی مورچگان بیان شده است. در بخش چهارم، نتایج شبیه‌سازی ارائه شده‌اند و در بخش انتها نتیجه‌گیری این پژوهش آورده شده است.

۲- بیان مسئله

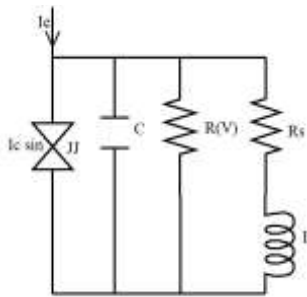
پیوند جوزفسون با مدل‌های الکتریکی مختلف از جمله

رفتار آشوبناک به ازای مقدار بحرانی جریان مشاهده می‌شود که ناشی از رفتار غیرخطی منحنی محل اتصال است [۳۰].



شکل (۲): نمودار جریان - ولتاژ پیوند جوزفسون

می‌توان با جایگزینی مقاومت غیرخطی $R(V)$ به جای مقاومت خطی در مدل RCSJ و اضافه کردن سلف به مدل RCLSJ در شکل (۳) رسید که معادلات آن به صورت زیر بیان می‌شوند:



شکل (۳): مدل RCLSJ

$$R(V) = \begin{cases} R_n & \text{if } |V| > V_g \\ R_{sg} & \text{if } |V| \leq V_g \end{cases} \quad (4)$$

$$C \frac{dv}{dt} + \frac{v}{R} + I_c \sin \theta + I_s = I_e = i_o + i_1 \sin(\omega t) \quad (5)$$

$$\left(\frac{h}{2\pi e}\right) \frac{d\theta}{dt} = v \quad (6)$$

$$L \frac{di_s}{dt} + R_s I_s = v \quad (7)$$

با نرمال‌سازی معادلات (۵) - (۷) داریم [۱۱]:

$$\beta_c \ddot{\theta} + g(V)\dot{\theta} + \sin \theta + I_s = i_o + i_1 \sin((\omega/\omega_0)\tau) \quad (8)$$

$$\dot{\theta} = V \quad (9)$$

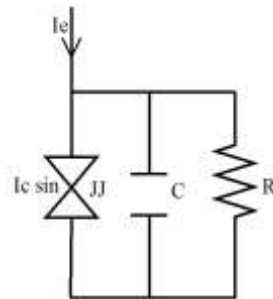
$$\beta_L \dot{I}_s + I_s = V \quad (10)$$

به طوری که $\tau = \omega_0 t$ و $V = (v/I_s R_s)$ است. هدف

RCLSJ و RCSJ بیان می‌شود [۱،۲]. در شکل (۱) مدل مداری RCSJ پیوند جوزفسون نشان داده شده است. در این شکل R و C به ترتیب مقاومت و ظرفیت خازنی پیوند است. مطابق با منحنی $I-V$ پیوند (شکل (۲)) با اعمال جریان خارجی I_e به پیوند ولتاژی دوسر پیوند افت نمی‌کند. با افزایش I_e و رسیدن به یک مقدار آستانه، یکباره ولتاژی دوسر پیوند مشاهده می‌شود. این مقدار آستانه، جریان بحرانی پیوند جوزفسون، نامیده و با I_c نمایش داده می‌شود. به این ترتیب، یک رفتار غیرخطی در مشخصه ولتاژ جریان اتصال مشاهده می‌شود. در شکل (۲) مقاومت نرمال پیوند R_{sg} - مقاومت زیر - شکاف پیوند است. معادلات دینامیک مدل ارائه‌شده در شکل (۱) به صورت زیرند [۱۱،۲۹]:

$$C \frac{dv}{dt} + \frac{v}{R} + I_c \sin \theta = I_e = i_o + i_1 \sin(\omega t) \quad (1)$$

$$\left(\frac{h}{2\pi e}\right) \frac{d\theta}{dt} = v \quad (2)$$



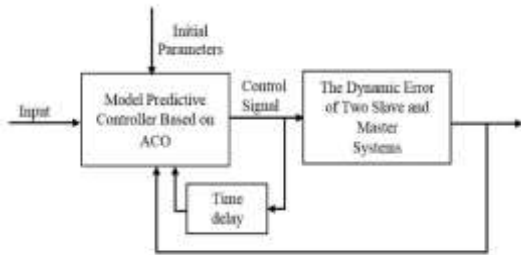
شکل (۱): مدل RCSJ

جایی که v ولتاژ دو سر پیوند، h ثابت پلانک و e واحد بار الکتریکی است. با جایگذاری معادله (۱) در معادله (۲) و نرمال‌سازی داریم [۱۱]:

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \beta \frac{d\theta}{dt} + \Omega_0^2 \sin \theta = A_0 + A_1 \sin(\omega t) \quad (3)$$

به طوری که، مقادیر $\beta = 1/RC$ و $A_0 = (2\pi e i_o / hC)$ ، $\Omega_0 = (2\pi e I_c / hC)^{0.5}$ و $A_1 = (2\pi e i_1 / hC)$ هستند. هنگامی که جریان متناوب خارجی به محل اتصال پیوند جوزفسون اعمال می‌شود،

شده است.



شکل (۴): بلوک دیاگرام کنترل‌کننده پیشنهادی برای کنترل پیوند جوزفسون

۳- الگوریتم کنترل مبتنی بر بهینه‌سازی کلونی مورچگان

روش بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها یک الگوریتم بهینه‌سازی است که از رفتار مورچه‌ها در طبیعت الهام گرفته است. مارکو دوریگو [۳۱] اولین نسخه الگوریتم مورچه‌ها را با عنوان «سیستم مورچه‌ها» در رساله دکتری خود معرفی کرد. فلوجارت الگوریتم کنترل‌کننده مبتنی بر بهینه‌سازی کلونی مورچه‌های پیوسته [۳۲] در شکل ۵ نشان داده شده است. کنترل‌کننده ارائه شده دو حلقه دارد: حلقه اصلی خارجی که تا انتهای زمان شبیه‌سازی تکرار می‌شود؛ و حلقه داخلی که وظیفه آن، یافتن بهترین تخمین از آینده سیگنال‌های کنترل است. در ابتدا پارامترها مقاداردهی و سپس فرمان‌های کنترل در یک افق محدود به صورت تصادفی مقاداردهی می‌شوند. در مرحله بعد، بردار متغیرهای حالت پیش‌بینی می‌شود. سپس، برای هر ذره تابع هزینه محاسبه می‌شود و بر اساس آن، توزیع فرمون به‌روز می‌شود. حلقه داخلی پس از یک تعداد تکرار از پیش تعریف شده خاتمه می‌یابد. در انتها، تخمین بردار کنترل براساس میانگین‌گیری انجام می‌شود. در ادامه، مراحل الگوریتم به تفصیل بیان می‌شوند.

۳-۱- مقاداردهی اولیه

کنترل‌کننده ارائه شده دارای پارامترهایی است که در ابتدا باید مقاداردهی شوند. این پارامترها شامل تعداد ذرات

از این مقاله، سنکرون‌سازی پیوند جوزفسونی با رفتار آشوبناک با پیوند جوزفسون دیگری است که با انتخاب مقادیر پارامترها و شرایط اولیه مناسب رفتار آشوبناک ندارد. برای این منظور، معادلات دینامیکی سیستم با فرض $\theta = x_1$ ، $V = x_2$ و $I_s = x_3$ به فرم فضای حالت به صورت زیر بازنویسی می‌شوند:

$$\dot{x}_1 = x_2 + u_1 \quad (11)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{\beta_c} (i_0 + i_1 \sin(\frac{\omega}{\omega_0} \tau) - g(x_2)x_2 - \sin(x_1) - x_3) + u_2 \quad (12)$$

$$\dot{x}_3 = \frac{1}{\beta_L} (x_2 - x_3) + u_3 \quad (13)$$

$$g(V) = \begin{cases} 0.366 & \text{if } |V| > 2.9 \\ 0.061 & \text{if } |V| \leq 2.9 \end{cases} \quad (14)$$

در ادامه، کنترل مدل پیش‌بین غیرخطی مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی مورچگان برای سنکرون‌سازی سیستم آشوبناک بیان خواهد شد. برای این منظور، سیستم فرعی با معادلات زیر در نظر گرفته خواهد شد:

$$\dot{\mathbf{x}}_s = \mathbf{F}_s(\mathbf{x}_s) + \mathbf{u} \quad (15)$$

در رابطه (۱۵)، بردار متغیرهای حالت سیستم فرعی، \mathbf{u} ورودی سیستم و \mathbf{F}_s تابع غیرخطی است. همچنین، معادلات فضای حالت سیستم اصلی به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$\dot{\mathbf{x}}_m = \mathbf{F}_m(\mathbf{x}_m) \quad (16)$$

در اینجا، هدف طراحی قانون کنترل به صورتی است که متغیرهای حالت سیستم فرعی، متغیرهای حالت سیستم اصلی را دنبال کنند. برای این منظور، خطای سنکرون‌سازی به صورت $\mathbf{e}(t) = \mathbf{x}_s - \mathbf{x}_m$ تعریف شده است. با استفاده از روابط (۱۵) و (۱۶)، معادله دینامیکی خطای دو سیستم اصلی و فرعی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\dot{\mathbf{e}} = \mathbf{F}_s(\mathbf{x}_s) - \mathbf{F}_m(\mathbf{x}_m) + \mathbf{u} \quad (17)$$

بلوک دیاگرام حلقه کنترل در شکل (۴) نشان داده شده است. در ادامه، الگوریتم کنترل مبتنی بر بهینه‌سازی کلونی مورچگان برای کنترل و سنکرون‌سازی پیوند جوزفسون بیان

$$\mathbf{u}'_j(k-1) = \hat{\mathbf{u}}(k-1) \text{ است.}$$

۳-۳- پیش‌بینی آینده بردار حالت

آینده بردار حالت برای ذره z در تکرار l به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\mathbf{x}'_j(k+i-1) = \mathbf{f}(\mathbf{x}'_j(k+i-2), \mathbf{u}'_j(k+i-2)) \quad (19)$$

$$, (i=1, \dots, T_p)$$

۳-۴- محاسبه تابع هزینه

در کنترل‌کننده پیشنهادی، تابع هزینه ذره z در تکرار l و گام زمانی k ، $J'_j(k)$ با روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$J'_j = \frac{\sum_{i=k+1}^{k+T_p} [\mathbf{x}'_j(i) - \mathbf{x}_d(i)]^T \mathbf{Q} [\mathbf{x}'_j(i) - \mathbf{x}_d(i)]}{N \sum_{j=1}^{k+T_p} [\mathbf{x}'_j(i) - \mathbf{x}_d(i)]^T \mathbf{Q} [\mathbf{x}'_j(i) - \mathbf{x}_d(i)]} \quad (20)$$

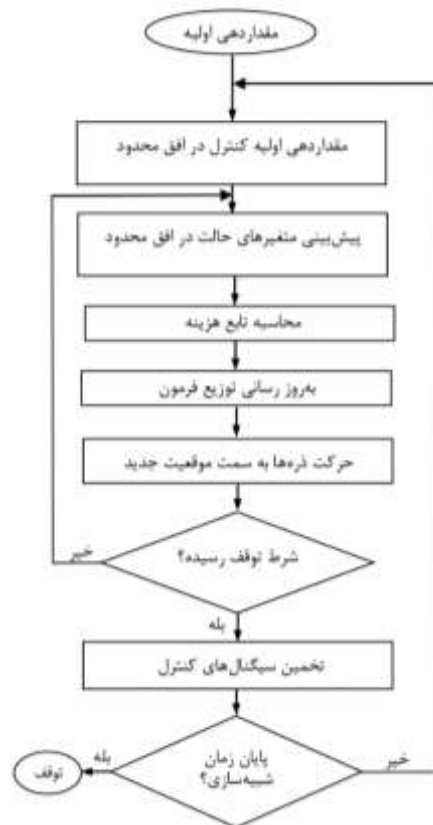
$$+ \frac{\sum_{i=k}^{k+T_p-1} \mathbf{u}'_j(i)^T \mathbf{R} \mathbf{u}'_j(i)}{N \sum_{j=1}^{k+T_p-1} \mathbf{u}'_j(i)^T \mathbf{R} \mathbf{u}'_j(i)}$$

در معادلات بالا، ترم اول تابع هزینه، جریمه در نظر گرفته شده برای خطای ردگیری است؛ و ترم دوم آن، جریمه در نظر گرفته شده برای تلاش کنترلی است؛ \mathbf{x}_d ورودی مطلوب است. همچنین، ماتریس‌های ثابت وزنی \mathbf{Q} و \mathbf{R} به ترتیب اهمیت خطای ردگیری و تلاش کنترلی هستند. مقادیر این پارامترها بر اساس اهمیت هر کدام از ترم‌های تابع هزینه با سعی و خطا بدست می‌آیند.

۳-۵- به‌روزرسانی توزیع فرمون

در الگوریتم معرفی شده، برای مدل کردن توزیع فرمون از یک تابع گوسی چندمتغیره استفاده شده است. توزیع فرمون در هر تکرار از حلقه داخلی با استفاده از دانش ذره‌ها به‌روزرسانی می‌شود. در فرآیند به‌روزرسانی باید با استفاده از تابع هزینه بهترین نقطه، $\chi_{l,\min}(k)$ ، متناظر با کمترین هزینه یافت شود. همچنین، با استفاده از واریانس وزنی تابع توزیع فرمون در بعد d ، فضای حالت به صورت زیر به‌روز می‌شود:

N ؛ افق پیش‌بینی، T_p ؛ وزن خطای ردگیری، \mathbf{Q} ؛ وزن تلاش کنترلی، \mathbf{R} ؛ و انحراف معیار σ_p است. همچنین، مقدار حدس اولیه هر ذره از آینده سیگنال‌های کنترلی به صورت تصادفی با توزیع یکنواخت مقداردهی می‌شوند. این مقداردهی باید در محدوده قابل قبول سیگنال کنترلی باشد.



شکل (۵): فلوچارت الگوریتم کنترل‌کننده مبتنی بر بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها

۳-۲- پیش‌بینی سیگنال کنترل

در تکرار l -ام حلقه داخلی، فرمان کنترل ذره z در زمان k به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\mathbf{u}'_j(k+i-1) = \mathbf{u}'_j(k+i-2) + \mathbf{v}'_{p_j}(k+i-2), \quad (i=1, \dots, T_p) \quad (18)$$

که \mathbf{v}_p یک متغیر تصادفی گوسی با انحراف معیار σ_{v_p} است. همچنین، k و l گام زمانی و تعداد تکرار حلقه داخلی است. لازم به ذکر است که مقدار

برای سنکرون‌سازی دو پیوند ارائه شده‌اند. پارامترهای ثابت دو سیستم اصلی و فرعی در جدول ۱ بیان شده‌اند. در اینجا، برای حل معادلات دیفرانسیل از دستور (ODE45^۴) نرم‌افزار متلب استفاده شده است. همچنین، پارامترهای کنترل‌کننده طراحی شده برابر است با: $\mathbf{R} = 10\mathbf{I}$ ، $\mathbf{Q} = 10\mathbf{I}$ ، $\sigma_v = 0.1$ و $N_t = 5$ ، $1 = 10$ ، $N = 30$ ، $T_p = 5$ ، مقادیر پارامترهای وزنی، اهمیت هر کدام از اجزای تشکیل‌دهنده تابع هزینه را مشخص می‌کند. همچنین، مقدار تعداد ذرات و تعداد تکرار بر عملکرد کنترل‌کننده تأثیر دارد؛ به طوری که کاهش این مقادیر موجب ناپایداری خروجی می‌شود. همچنین، مقدار افق پیش‌بین بر فراجش پاسخ تأثیر دارد و بازه تغییرات سیگنال کنترل نیز متأثر از مقدار σ_v است.

جدول ۱: پارامترهای مسئله RCLSJ

پارامتر	مدل اصلی	مدل فرعی
β_C	-0.05	0.0707
β_L	2.6	1.6
i_0	2	1.2

نمودار صفحه‌فاز سیستم فرعی برای شرایط اولیه (-، -2، 1، 7) در شکل (۶ الف)) نشان داده شده است. با توجه به شکل، سیستم فرعی به‌ازای این شرایط اولیه، رفتار آشوبناک دارد. نمودارهای اختلاف فاز، جریان و ولتاژ سیستم فرعی در شکل (۶ ب-ت)) نشان داده شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند اختلاف فاز سیستم فرعی، رفتاری ناپایدار و افزایشی در طول زمان دارد. این در حالی است که سیگنال‌های ولتاژ و جریان، رفتاری نوسانی دارند که مطلوب نیست و این رفتار در کاربردهای فرکانس بالا باید کنترل شود.

همچنین، نمودار صفحه‌فاز سیستم اصلی به‌ازای شرایط اولیه (5، 2، 10) در شکل (۷ الف)) نشان داده شده است. نمودارهای اختلاف فاز، ولتاژ و جریان برحسب زمان نیز به‌ترتیب در شکل (۷ ب-ت)) نشان داده شده‌اند. نتایج، رفتار پایدار و غیرنوسانی در سیستم اصلی را نشان می‌دهند.

$$[\sigma_i^d(k)]^2 = \frac{\sum_{j=1}^N \frac{1}{J_{i,j}(k) - J_{i,\min}(k)} [\chi_{i,j}^d(k) - \chi_{i,\min}^d(k)]^2}{\sum_{j=1}^N \frac{1}{J_{i,j}(k) - J_{i,\min}(k)}} \quad (21)$$

۳-۶- حرکت مورچه‌ها

در هر تکرار، حرکت مورچه‌ها از موقعیت فعلی به مقصد با استفاده از توزیع فرمون، که به‌صورت نرمال مدل شده است، اتفاق می‌افتد. این تابع توزیع نرمال در بعد d دارای مرکز $\chi_{i,\min}^d(k)$ و واریانس $[\sigma_i^d(k)]^2$ است.

۳-۷- شرط توقف

الگوریتم پیشنهادی دو حلقه دارد: حلقه اصلی خارجی که تا انتهای زمان شبیه‌سازی تکرار می‌شود و حلقه داخلی که وظیفه آن، یافتن بهترین تخمین از سیگنال کنترل است. شرط توقف حلقه داخلی رسیدن به مقدار بیشینه تکرار، l_{\max} است و شرط توقف حلقه خارجی خاتمه شبیه‌سازی است.

۳-۸- تخمین سیگنال‌های کنترل

پس از خاتمه حلقه داخلی، ذرات براساس هزینه اختصاص یافته به هر کدام رتبه‌بندی می‌شوند و سیگنال‌های کنترل در گام زمانی k بر مبنای میانگین‌گیری از موقعیت بهترین ذرات به‌صورت زیر به دست می‌آیند:

$$\hat{\chi}(k) = \frac{1}{N_t} \sum_{j \in \mathcal{N}_t} \hat{\chi}_j^{\max}(k) \quad (22)$$

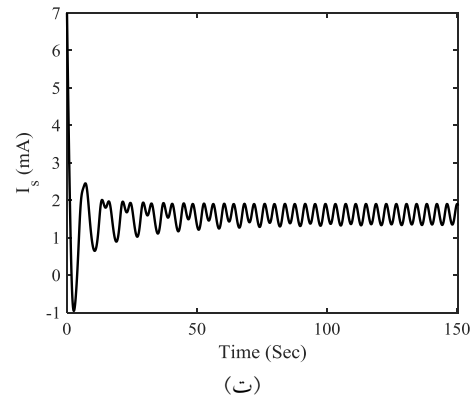
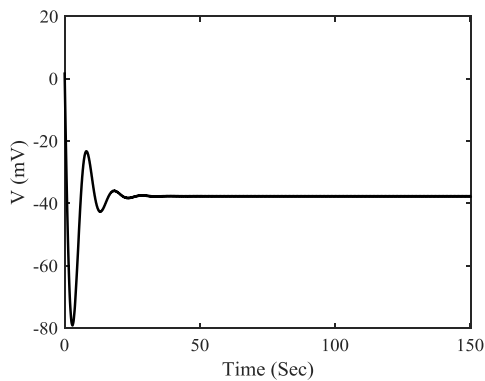
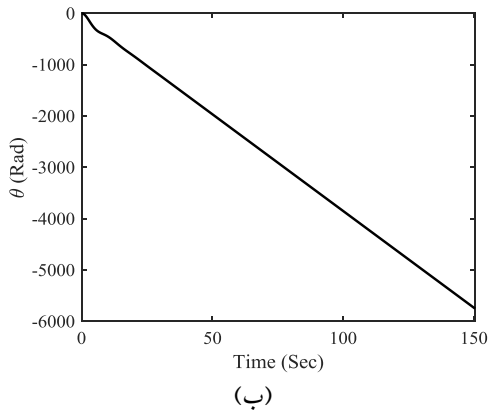
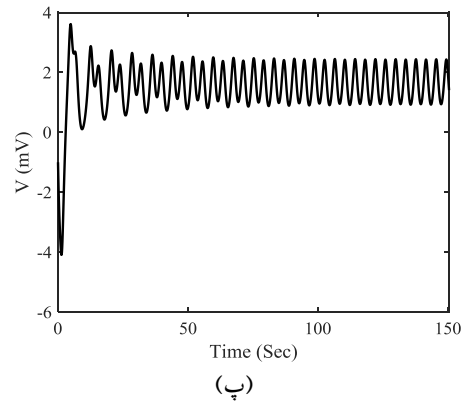
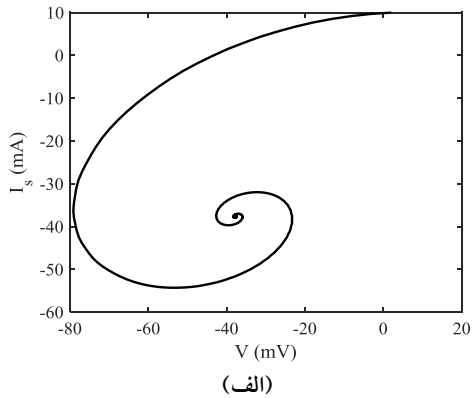
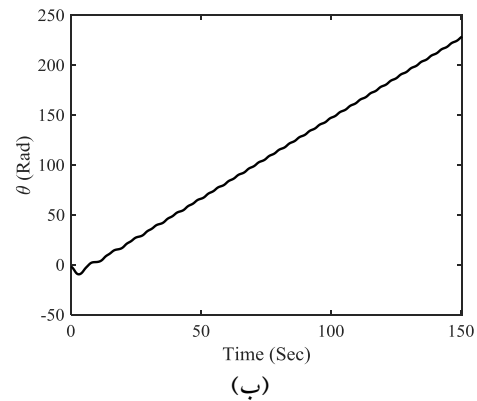
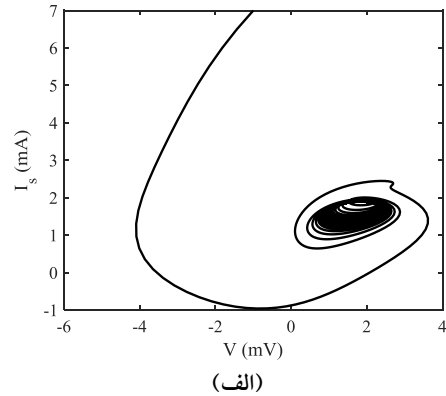
در معادله (۲۲) $N_t = |\mathcal{N}_t| < N$ مشخص‌کننده تعداد بهترین ذرات (یکی از پارامترهای الگوریتم) است. بنابراین، سیگنال کنترل تخمین‌زده شده (عناصر $1 \dots T_p - 1$ از $\hat{\mathbf{X}}(k)$) با استفاده از تخمین بهترین ذرات (عناصر $1 \dots T_p - 1$ از $\hat{\mathbf{X}}_j^{\max}$) بدست می‌آید.

۴- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش، نتایج حاصل از شبیه‌سازی کنترل‌کننده

فاز، (پ) ولتاژ، (ت) جریان بر حسب زمان

در شکل (۸) متغیرهای حالت سیستم اصلی و فرعی بعد از اعمال کنترل کننده به سیستم فرعی نشان داده شده است. با توجه به شکل (۸ الف)-(پ)، هدف سنکرون سازی سیستم فرعی با سیستم اصلی است؛ به طوری که پارامترها و شرایط اولیه دو سیستم متفاوت اند. در این سناریوی شبیه سازی، مقدار مطلوب اختلاف فاز یک نمودار رمپ با شیب $3/8$ است. مقدار مطلوب ولتاژ $37/7$ و جریان نیز $37/7$ است. نتایج نشان می دهند اختلاف فاز، ولتاژ و جریان سیستم فرعی بعد از 30 ثانیه، 28 و 27 ثانیه به مقدار مطلوب رسیده اند.

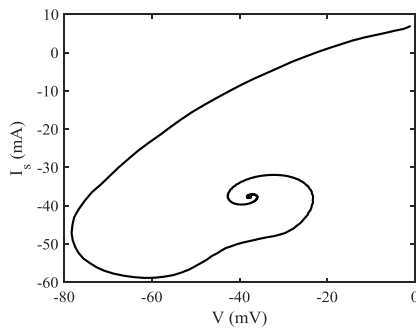


شکل (۶): سیستم فرعی: (الف) نمودار صفحه فاز، (ب) اختلاف

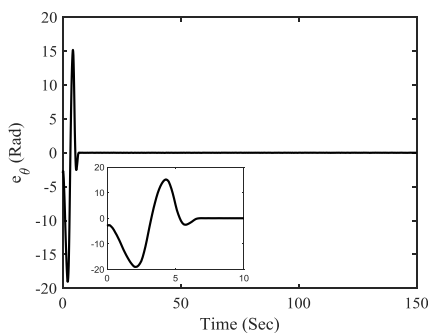
(پ)

شکل (۸): متغیرهای حالت سیستم اصلی و فرعی بعد از اعمال کنترل کننده: (الف) اختلاف فاز، (ب) ولتاژ، (پ) جریان برحسب زمان

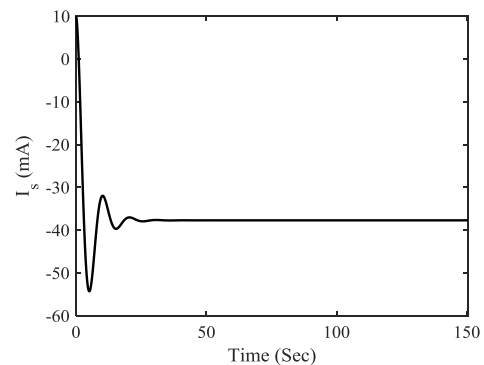
نمودار صفحه فاز سیستم فرعی بعد از اعمال کنترل کننده در شکل (۹) نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می شود سیستم فرعی رفتاری پایدار، مطلوب و سنکرون شده با سیستم اصلی دارد. در شکل (۱۰) (الف) - (پ) نمودارهای خطای ردیابی سه متغیر حالت نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود خطاهای ردیابی بعد از گذشت زمان گذرا به مقدار صفر همگرا شده اند که نشان دهنده پایداری دینامیک خطای بین سیستم اصلی و فرعی است. در شکل (۱۱) (الف) - (پ) سیگنال های کنترلی برای سنکرون سازی سیستم فرعی با اصلی پیوند جوزفسون نشان داده شده اند. نتایج نشان می دهند سیگنال های کنترل بعد از گذشت زمان گذرا به مقادیر نقاط کار مطلوب خود رسیده اند.



شکل (۹): نمودار صفحه فاز سیستم فرعی بعد از اعمال کنترل کننده

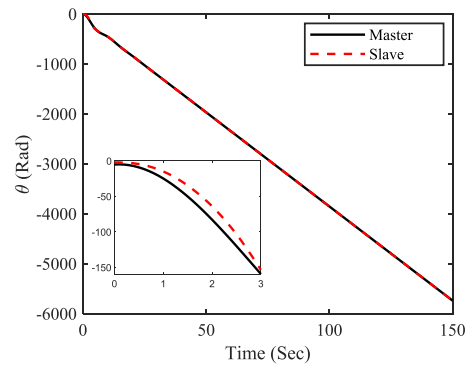


(پ)

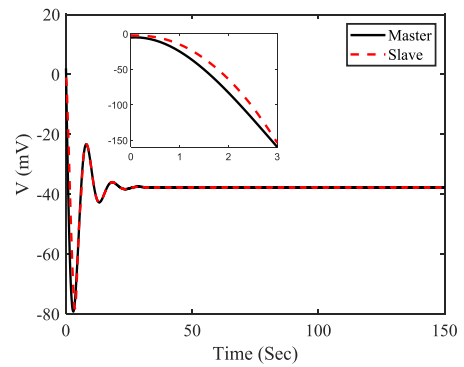


(ت)

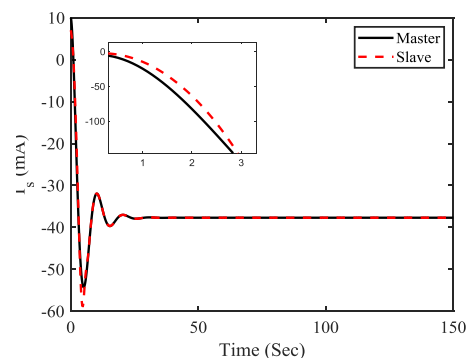
شکل (۷): سیستم اصلی: (الف) نمودار صفحه فاز، (ب) اختلاف فاز، (پ) ولتاژ، (ت) جریان برحسب زمان

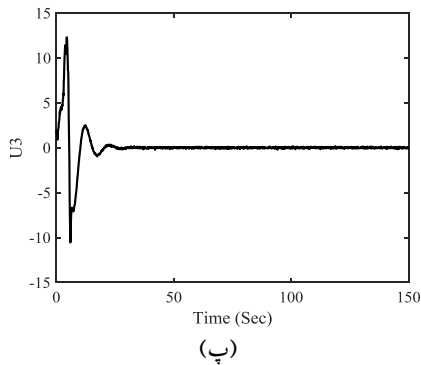


(الف)



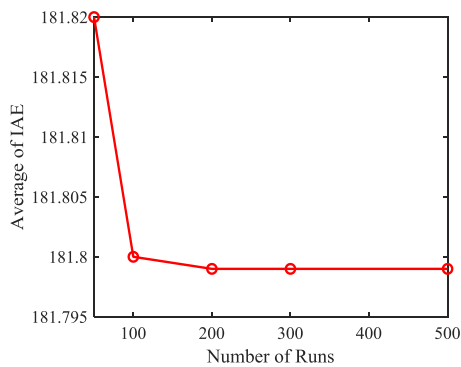
(ب)





شکل (۱۱): سیگنال‌های کنترل نسبت به زمان: (الف) سیگنال u_1 ، (ب) سیگنال u_2 ، (پ) سیگنال u_3 بر حسب زمان

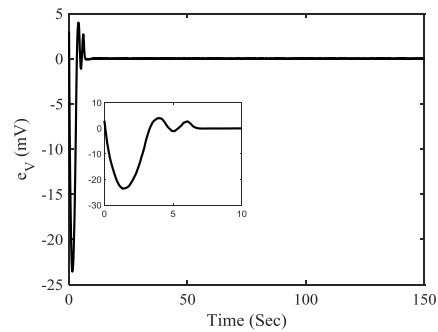
یکی از نقاط ضعف الگوریتم کنترل معرفی شده، ارائه اثبات پایداری به صورت تحلیلی است. از این نظر، برای اثبات پایداری از شبیه‌سازی عددی استفاده شده است. در ادامه، برای بررسی همگرایی الگوریتم کنترل پیشنهادی برای سنکرون‌سازی پیوند جوزفسون، شبیه‌سازی مونت کارلو انجام شده است. برای این منظور، مقدار انتگرال قدرمطلق خطای ردیابی متغیر حالت جریان بر حسب تعداد اجرا محاسبه شده است. این نمودار برای تعداد اجرای ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ محاسبه شده است و نتایج آن در شکل (۱۲) نشان داده شده‌اند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند تغییرات مقدار انتگرال قدرمطلق خطا برای اجراهای بیشتر از ۱۰۰ تغییر چندانی نداشته است.



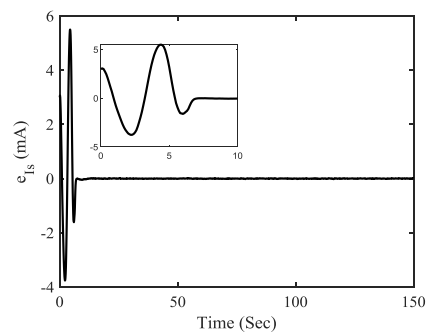
شکل (۱۲): میانگین خطا بر حسب تعداد دفعات اجرا

در ادامه، برای بررسی عملکرد الگوریتم کنترل معرفی شده، یک آنالیز حساسیت نسبت به تغییرات تعداد ذرات (مورچه‌ها)، تعداد تکرار حلقه داخلی و مقدار افق

(الف)

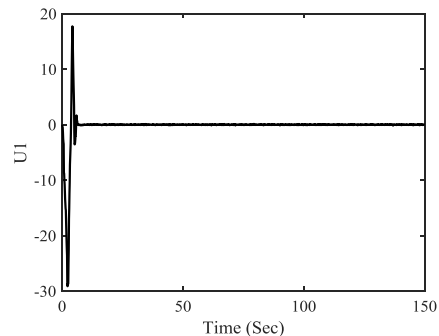


(ب)

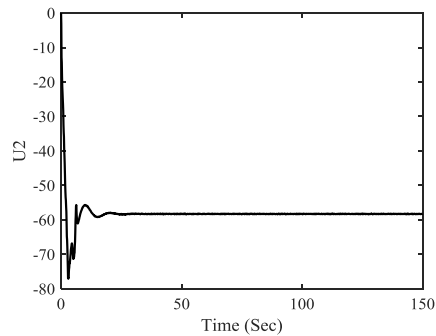


(پ)

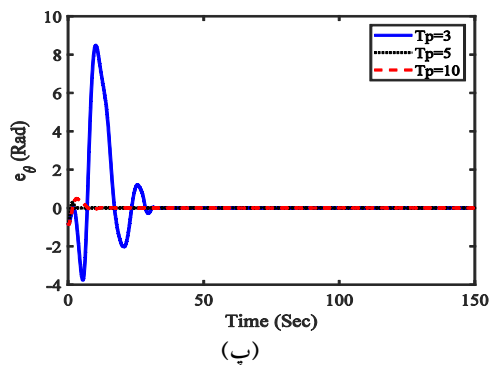
شکل (۱۰): خطای ردگیری: (الف) اختلاف فاز، (ب) ولتاژ، (پ) جریان نسبت به زمان



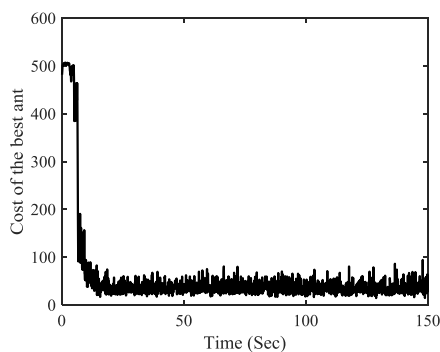
(الف)



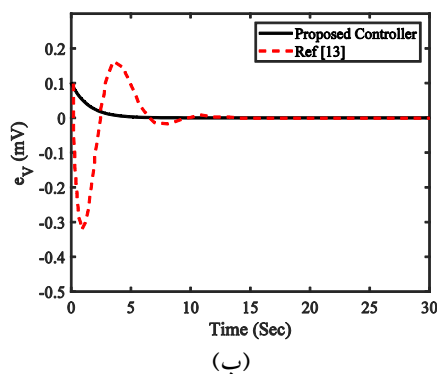
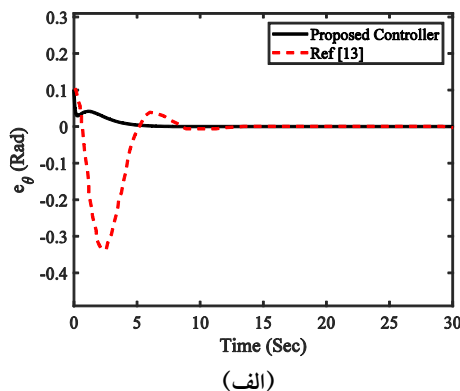
(ب)



شکل (۱۳): آنالیز حساسیت نسبت به پارامترهای کنترل کننده: (الف) تغییرات تعداد تکرار l , (ب) تغییرات تعداد مورچه‌ها N , (پ) تغییرات افق پیش بین T_p

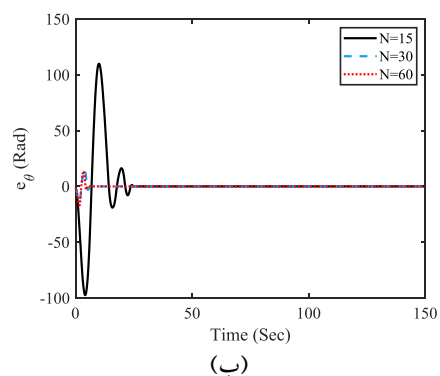
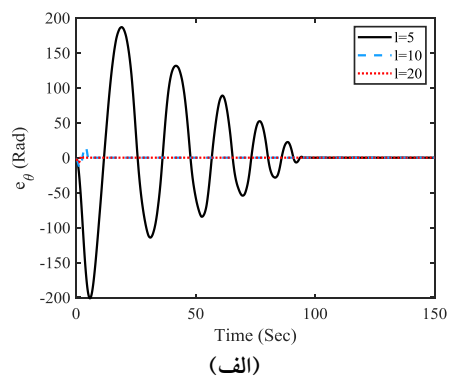


شکل (۱۴): مقدار تابع هزینه بهترین مورچه بر حسب زمان



پیش بین انجام شده است (شکل (۱۳)). تحلیل نتایج نشان می‌دهد با کاهش تعداد ذرات و تکرار حلقه، عملکرد کاهش می‌یابد و با افزایش عملکرد تغییر محسوس نداشت؛ همچنین، حساسیت الگوریتم نسبت به کاهش تعداد تکرار حلقه داخلی بیشتر است. همچنین، با کاهش افق پیش بین، مقدار بیشینه پاسخ در حالت گذرا بسیار زیاد می‌شود (شکل (۱۳)). در شکل (۱۴) نمودار تابع هزینه بهترین مورچه در آخرین تکرار حلقه داخلی بر حسب زمان نشان داده شده است. مقدار تابع هزینه برای بهترین مورچه با گذشت زمان و کاهش خطای ردیابی روند کاهشی دارد. در شکل (۱۵) عملکرد کنترل کننده ارائه شده با نتایج مرجع [۱۳] مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار فرجهش و زمان نشست پاسخ منتج از کنترل کننده معرفی شده کمتر از مرجع [۱۳] است.

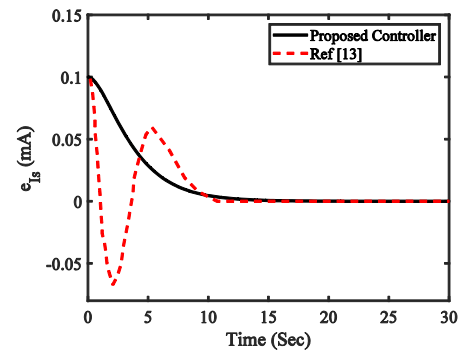
الگوریتم کنترل ابتکاری ارائه شده در نرم افزار MATLAB و در یک کامپیوتر با مشخصات پردازنده Core i5 2.5 GHz و رم 6 GByte پیاده سازی شده است. زمان محاسبه شده برای هر گام زمانی تقریباً 0.04 s است؛ در حالی که زمان گسسته سازی این مسئله 0.1 s است؛ البته با پیاده سازی الگوریتم در ++C هزینه محاسباتی کاهش می‌یابد.



از شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده شد. همچنین، ارائه اثبات پایداری برای الگوریتم به صورت تحلیلی کار دشواری است که می‌تواند زمینه خوبی برای کارهای پژوهشی آتی باشد.

مراجع

- [1] KK. Likharev, "Dynamics of Josephson Junctions and Circuits". Gordon and Breach science publishers, 1986.
- [2] SK. Dana, DC. Sengupta, KD.Edoh, "Chaotic Dynamics in Josephson Junction". IEEE Trans Circuits Syst I Fundam Theory, Vol. 48, No. 8, April 2001.
- [3] F. Salam, S.Sastry, "Dynamics of the Forced Josephson Junction Circuit: the Regions of Chaos". IEEE Trans Circuits Syst, Vol. 32, No. 8, August 1985.
- [4] H. Mehrara, F. Raissi, A. Erfanian, "Vortex-Antivortex Pair Interaction With Microwave Standing Waves: A Chaos Analysis of Josephson Fluxonic Diode for Microwave Applications". IEEE Trans Appl Supercond, Vol. 29, No. 7, October 2019.
- [5] C. Eichler, A.Wallraff, "Controlling the Dynamic Range of a Josephson Parametric Amplifier". EPJ Quantum Technol, Vol. 1, No. 2, December 2014.
- [6] DS. Goldobin, LS. Klimenko, "Resonances and Multistability in a Josephson Junction Connected to a Resonator". Phys Rev E, Vol. 97, No. 2, February 2018.
- [7] J. Diggins, JF. Ralph, TP. Spiller, TD. Clark, H. Prance, RJ. Prance, et al, "Chaos Generated Noise in Radio Frequency SQUID Magnetometers". AIP Conf. Proc., Vol. 371, No. 1, April 1996.
- [8] F. Raissi, A. Khooshemehri, A.Erfanian, "Three-Terminal Superconducting Digital Transistor". IEEE Trans Appl Supercond, Vol. 29, No. 4, December 2018.
- [9] CA. Donnelly, JA. Brevik, NE. Flowers-Jacobs, AE. Fox, PD. Dresselhaus, PF. Hopkins, et al, "Quantized Pulse Propagation in Josephson Junction Arrays". IEEE Trans Appl Supercond, Vol. 30, No. 3, July 2019.
- [10] A. Uçar, KE. Lonngren, E-W, Bai, "Chaos Synchronization in RCL-Shunted Josephson Junction Via Active Control". Chaos, Solitons & Fractals, Vol. 31, No. 1, January 2007.
- [11] AM. Harb, BA. Harb, "Controlling Chaos in Josephson-Junction Using Nonlinear Backstepping Controller". IEEE Trans Appl Supercond, Vol. 16, No. 4, December 2006.
- [12] UE. Vincent, A. Ucar, JA. Laoye, SO. Kareem, "Control and Synchronization of Chaos in RCL-Shunted Josephson Junction Using Backstepping Design". Phys C Supercond, Vol. 485, No. 5, March 2008.
- [13] D-Y. Chen, W-L. Zhao, X-Y. Ma, R-F. Zhang, "Control and Synchronization of Chaos in RCL-Shunted Josephson Junction with Noise Disturbance Using Only One Controller Term". Abstr. Appl. Anal., Vol 2012, No. 1, July 2012.



(پ)

شکل (۱۵): مقایسه با نتایج مرجع [۱۳]: (الف) خطای ردیابی اختلاف فاز؛ (ب) خطای ردیابی ولتاژ؛ (پ) خطای ردیابی جریان

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، یک الگوریتم کنترل ابتکاری پیش‌بین غیرخطی مبتنی بر بهینه‌سازی کلونی مورچگان برای سنکرون‌سازی پیوند جوزفسون ارائه شد. در اینجا، از مدل غیرخطی پیوند جوزفسون و همچنین از رویکرد سیستم اصلی - فرعی برای کنترل و سنکرون‌سازی استفاده شد. مسئله بهینه‌سازی دینامیکی تعیین سیگنال کنترل در افق محدود به یک مسئله تخمین تبدیل شده و این مسئله با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان حل شده است. برای این منظور، یک تابع هزینه مناسب برای کمینه‌سازی، متشکل از خطای ردیابی و سیگنال کنترل ارائه شد. عملکرد الگوریتم معرفی شده برای حالتی بررسی شد که دو پیوند دارای شرایط اولیه و پارامترهای متفاوتی اند. علاوه بر این، آنالیز حساسیت نسبت به تغییرات تعداد مورچه‌ها، تعداد تکرار حلقه داخلی و افق پیش‌بین انجام شد. نتایج شبیه‌سازی نشان دادند الگوریتم نسبت به کاهش تعداد تکرار حلقه در مقابل تعداد ذره حساسیت بیشتری دارد و عملکرد الگوریتم کاهش می‌یابد. مقایسه‌ای بین عملکرد کنترل‌کننده معرفی شده و کنترل‌کننده غیرخطی مبتنی بر تئوری لیپانوف انجام شد. نتایج نشان دادند مقدار زمان نشست و فراجش پاسخ سیستم برای کنترل‌کننده ارائه شده کمتر از کنترل‌کننده مبتنی بر تئوری لیپانوف است. همچنین، برای بررسی همگرایی الگوریتم کنترل پیشنهادی،

- [23] S. Botchu, S. Ungarala, "Nonlinear Model Predictive Control Based on Sequential Monte Carlo State Estimation". IFAC Proc, Vol. 40, No. 5, January 2007.
- [24] D. Stahl, J. Hauth, "PF-MPC: Particle Filter-Model Predictive Control". Syst & Control Lett, Vol. 60, No. 8, August 2011.
- [25] F. Rajabi, B. Rezaie, Z. Rahmani, "A Novel Nonlinear Model Predictive Control Design Based on a Hybrid Particle Swarm Optimization-Sequential Quadratic Programming Algorithm: Application to an Evaporator System". Trans Inst Meas Control, Vol. 38, No. 1, December 2016.
- [26] M. Sarailoo, Z. Rahmani, B. Rezaie, "A Novel Model Predictive Control Scheme Based on Bees Algorithm in a Class of Nonlinear Systems: Application to a Three Tank System". Neurocomputing, Vol. 152, No. 1, March 2015.
- [27] H. Nobahari, S. Nasrollahi, "A Nonlinear Estimation and Control Algorithm Based on Ant Colony Optimization". IEEE Congr. Evol. Comput., p. 5120-7, November 2016.
- [28] H. Nobahari, S. Nasrollahi, "A Nonlinear Robust Model Predictive Differential Game Guidance Algorithm Based on the Particle Swarm Optimization". J Franklin Inst, Vol. 357, No. 15, October 2020.
- [29] AM. Harb, BA. Harb, "Chaos Synchronization in Josephson Junctions". J Supercond Nov Magn, Vol. 25, No. 6, August 2012.
- [30] T. Van Duzer, CW. Turner, "Principles of Superconductive Devices and Circuits", Edward Arnold, USA, 1981.
- [31] M. Dorigo, "Optimization, Learning and Natural Algorithms". Ph D Thesis, Politec Di Milano, Italy 1992.
- [32] SH, Pourtakdoust, H. Nobahari, "An Extension of Ant Colony System to Continuous Optimization Problems". Ant colony Optim. swarm Intell., Springer, p. 294-301, September 2004.
- [14] C-K .Cheng, PC-P. Chao, "Chaos Synchronization Between Josephson Junction and Classical Chaotic System via Iterative Learning Control". IEEE Int. Conf. Appl. Syst. Invent., p. 1232-5, June 2018.
- [15] TBT. Nguyen, "Adaptive MIMO Controller Design for Chaos Synchronization in Coupled Josephson Junctions via Fuzzy Neural Networks". J Adv Eng Comput, Vol. 1, No. 1, December 2017.
- [16] M. Sarailoo, B. Rezaie, Z. Rahmani, "Fuzzy Predictive Control of Three-Tank System Based on a Modeling Framework of Hybrid Systems". Proc Inst Mech Eng Part I J Syst Control Eng, Vol. 228, No. 6, March 2014.
- [17] S. Jalili, B. Rezaie, Z. Rahmani, "A Novel Hybrid Model Predictive Control Design with Application to a Quadrotor Helicopter". Optim Control Appl Methods Vol. 39, No. 4, January 2018.
- [18] MR. Zamani, Z. Rahmani, B. Rezaie, "A Novel Model Predictive Control for a Piecewise Affine Class of Hybrid System with Repetitive Disturbance". ISA Trans, Vol. 108, No. 1, February 2021.
- [19] F. Amiri, A. Hatami, "A Model Predictive Control Method for Load-Frequency Control in Islanded Microgrids", Journal of Computational Intelligence in Electrical Engineering, Vol. 8, No. 1, Spring 2017.
- [20] L. samani, R. Mirzaei, "Improvement of Model Predictive Control in Maximum Power Tracking in a Photovoltaic System using Fuzzy Control in the Presence of Uncertainty in the Model", Journal of Computational Intelligence in Electrical Engineering, Vol. 10, No. 4, Winter 2020.
- [21] E. Camacho, Alba C. "Model Predictive Control", Springer science & business media, 2013.
- [22] H. Nobahari, S. Nasrollahi, "A Non-Linear Estimation and Model Predictive Control Algorithm Based on Ant Colony Optimization". Trans Inst Meas Control, Vol. 41, No. 4, February 2019.

¹ Resistive Capacitive Inductive Shunted Josephson

² Model Predictive Control

³ Resistive Capacitive Shunted Josephson

⁴ Ordinary Differential Equation