



Technovations of Electrical Engineering in Green Energy System

Research Article

(2024) 2(4):65-81

Improving the Stability of a Power System Including SVC Based on Energy Function Minimization in a Multi-Model Optimal Coordinated Control Structure

Elahe Pagard¹, *PhD student*, Shahrokh Shojaeian¹, *Assistant Professor*, Mohammad Mahdi Rezaei¹ *Assistant Professor*

¹ Department of Electrical Engineering Khomeinishahr Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran

Abstract:

In this paper, the improvement of low frequency oscillation (LFO) damping in a power system including SVC is investigated. To achieve this goal, a new control strategy has been presented in which the multi-model controller is optimized using the linear optimal controller (LOC) and the particle swarm algorithm (PSO). The control bank in the multi-model controller includes three LOC controllers that generate optimal signals through the linearization of the nonlinear equations of the system and the minimization of an energy function to be combined by the Bayes recursive algorithm simultaneously to the generator excitation system and SVC. In order to generate an optimal linear signal, Riccati's equation must be solved; Riccati's equation includes two weight matrices R_{ric} and Q_{ric} . These matrices elements are optimized by PSO algorithm. The PSO algorithm has calculated the optimal R_{ric} and Q_{ric} with two different objective functions of maximizing the eigenvalues and minimizing the area under the speed curve. To evaluate the MMC-LOC-PSO control strategy, the symmetrical three-phase error is applied to the worst bus and the results of these two objective functions are compared. The simulation of the single machine power system has been done by MATLAB. The proposed control strategy, while maintaining stability, also effectively damps the LFOs, in addition, the permanent rotor speed and rotor angle error have also been favorably pushed to zero.

Keywords: Low frequency oscillations, Power system stability, Multi-model controller, Linear optimal controller, Particle swarm optimization algorithm.

Received: 22 December 2023

Revised: 25 February 2023

Accepted: 13 March 2023

Corresponding Author: Dr. Sh. Shojaeian, Shojaeian@iaukhsh.ac.ir

DOI: <http://dx.doi.org/teeges.2023.1990843.1083>





فناوری‌های نوین مهندسی برق در سیستم انرژی سبز

بهبود پایداری یک سیستم قدرت مجهز به SVC بر اساس کمینه سازی تابع انرژی در یک ساختار کنترل هماهنگ بهینه چند مدله

الهه پاگرد^۱، دانشجوی دکتری، شاهرخ شجاعیان^۱، استادیار، محمد مهدی رضایی^۱، استادیار
۱- دانشکده مهندسی برق، واحد خمینی شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

چکیده: در این مقاله، بهبود میرایی نوسانات فرکانس پایین (LFO) در یک سیستم قدرت شامل SVC بررسی شده است. برای نیل به این هدف، استراتژی کنترلی جدیدی ارائه شده که در آن کنترل‌کننده چندمدله با استفاده از کنترل‌کننده بهینه خطی (LOC) و الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) بهینه سازی می‌شود. بانک کنترل در کنترل‌کننده چند مدله، شامل سه کنترل‌کننده LOC است که از طریق خطی سازی معادلات غیر خطی سیستم و کمینه سازی یک تابع انرژی، سیگنال‌های بهینه‌ای را تولید می‌کنند تا پس از ترکیب شدن بوسیله الگوریتم بازگشتی بیز بطور همزمان به سیستم تحریک ژنراتور و به SVC اعمال شوند. برای ایجاد سیگنال بهینه خطی بایستی معادله ریکاتی حل شود؛ این معادله دارای دو ماتریس وزنی R_{ric} و Q_{ric} می‌باشد که بوسیله الگوریتم PSO بهینه سازی شده‌اند. الگوریتم PSO با دو تابع هدف ماکزیمم سازی کوچکترین جزء حقیقی در مقادیر ویژه و می‌نیمم‌سازی سطح زیر منحنی قدر مطلق انحراف سرعت، R_{ric} و Q_{ric} بهینه را محاسبه نموده است. برای ارزیابی استراتژی کنترلی MMC-LOC-PSO خطای سه فاز مقارنی بر روی بدترین باس اعمال شده و نتایج این دو تابع هدف با یکدیگر مقایسه شده است. شبیه‌سازی سیستم قدرت تک ماشینه با کد نویسی در MATLAB انجام شده و نشان می‌دهد استراتژی کنترلی پیشنهادی، ضمن حفظ پایداری، LFO را نیز بطور موثری میرا می‌کند، خطای ماندگار سرعت و زاویه روتور را نیز به طور مطلوبی به سمت صفر سوق داده است.

واژه های کلیدی: نوسانات فرکانس پایین، پایداری سیستم های قدرت، کنترل کننده چندمدله، کنترل کننده بهینه خطی، الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۰۴/۱۶

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۰۴/۱۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۴/۲۸

نویسنده‌ی مسئول: دکتر شاهرخ شجاعیان، Shojaeian@iaukhsh.ac.ir
DOI: <http://dx.doi.org/10.30486/teegees.2023.1990843.1083>



در سیستم های قدرت، نوسانات فرکانس پایین (LFO^1) که در حدود ۰/۱ تا ۲ هرتز هستند [۱]، می‌توانند منجر به کاهش حداکثر ظرفیت توان انتقالی و یا حتی ناپایداری سیگنال کوچک شوند. این نوسانات، وقتی مقدار زیادی توان از یک خط انتقال ضعیف عبور می‌کند یا وقتی در سیستم قدرت اختلالاتی مانند خطای سه فاز، تغییر ناگهانی بار و پارامترهای خط انتقال و یا تغییر توان خروجی توربین رخ می‌دهد، ممکن است ایجاد گردند. دینامیک سیستم تحریک ژنراتور سنکرون، تغییرات خازن‌های سری که با هدف جبران‌سازی در سیستم قدرت به کار می‌روند و افزایش وجود منابع انرژی نو و تزریق توان متغیرشان به شبکه نیز باعث ایجاد چنین نوساناتی در سیستم قدرت می‌شود [۲]. در برخی پژوهش‌ها، پایدار ساز سیستم قدرت (PSS) به فرم سنتی یا با ساختاری تغییر یافته برای میرانمودن بهتر LFO به کار رفته است. دو نمونه از این تکنیک‌ها که برای بهینه سازی PSS به کار رفته، الگوریتم وال و الگوریتم کایوت می‌باشند [۳، ۴]. در پژوهش‌های اخیر، ماشین سنکرون با مدل فضای حالت مرتبه چهار [۳] و مدل هفرون فیلپس [۴] مدل‌سازی شده است. اما این مدل‌ها دینامیک‌های پس از خطای ژنراتور سنکرون را به طور دقیق مدل نمی‌کنند. برای بهبود عملکرد PSS برخی مقالات کنترل کننده‌های ترکیبی مانند PID-PSS و lead-lag-PSS را نیز ارائه نموده‌اند [۵ و ۶]. در [۷] با بهره‌مندی از الگوریتم PSO² کنترل کننده‌های ترکیبی مانند PID-PSS و PI-PSS بهینه سازی شده و ضمن ارائه ضرایب بهینه‌شدهی آن‌ها، اثرشان بر LFO نیز با یکدیگر مقایسه گردیده است. دو نمونه طراحی جدید برای PSS نیز در [۸] و [۹] ارائه شده‌اند. از سوی دیگر، پژوهشگران زیادی روش‌های کنترل غیر خطی را برای کاهش LFO و افزایش پایداری در سیستم قدرت شامل ادوات FACTS به کار گرفته‌اند. مشهورترین این روش‌ها عبارتند از: کنترل پسگام^۲ [۱۰، ۱۱]، کنترل مود لغزشی [۱۵-۱۲] و کنترل خطی‌سازی با فیدبک [۱۶]. بر اساس پژوهش‌های انجام شده، روش‌های کنترل غیرخطی برای کاهش LFO بسیار موثر می‌باشند و لیکن پیچیدگی ساختاری و مسائل اجرای این روش‌ها در صنعت برق، نقص بزرگی محسوب می‌شود که هنوز هم مانع از گسترش جهان‌شمول آنها گردیده است.

اساس روش کنترل چند مدله برای کاهش LFO و نوسانات بین ناحیه‌ای که موضوع این مقاله می‌باشد، در [۱۹-۱۷] ارائه شده است. مرجع [۱۷] استراتژی کنترل چند مدله تطبیقی را برای کاهش نوسانات بین ناحیه‌ای سیستم قدرت مجهز به یک جبران‌ساز سری ترستوری قابل کنترل به کار برده و در آن، بانک کنترل شامل کنترل کننده‌های PID است. نمونه‌های دیگری از به کارگیری روش کنترل چند مدله برای بهبود میرایی LFO در [۱۸] و [۱۹] بررسی شده‌اند. در روش کنترل چند مدله، سیگنال‌های هر مدل با استفاده از روش بازگشتی بیز^۳ [۲۱] ترکیب می‌شوند. الگوریتم بیز بر اساس احتمال رخ دادن هر مدل در بانک مدل، ضریب وزنی تولید می‌کند تا بتوان ترکیب سیگنال‌های بانک کنترل را به صورت جبری در ضریب وزنی ضرب و سپس با یکدیگر جمع نموده و نهایتاً به شبکه تحت مطالعه اعمال کرد. در واقع در روش کنترل چند مدله، به سیگنال کنترلی تولید شده مربوط به مدل با احتمال کمتر، وزن کمتر و سیگنال کنترل مربوط به مدل با احتمال بیشتر، وزن بیشتری تعلق می‌گیرد. سیگنال کنترل نهایی از ترکیب خطی موزون سیگنال‌های کنترل مدل‌ها به دست می‌آید. لازم به ذکر است که هر مدل بر اساس یک نقطه کار از سیستم تعریف می‌شود.

یکی از روش‌های رایج و سنتی بهینه‌سازی کنترل کننده در سیستم قدرت، روش LOC^۵ می‌باشد که از طریق می‌نیم‌سازی تابع انرژی سیگنال کنترل بهینه‌ای را بر طبق قانون کنترل فیدبک تولید می‌نماید. مقاله [۲۰] یک کنترل بهینه LOC تطبیقی ارائه داده است که نه تنها نوسان‌های فرکانس پایین و بالا را در یک سیستم SMIB کاهش می‌دهد؛ بلکه هزینه‌های سیستم را نیز کاهش می‌دهد. در [۲۱] روش کنترل چند مدله با قرار دادن کنترل کننده‌های LOC در بانک کنترل بهینه سازی شده است و بر روی سیستم قدرت تک ماشینه و با رخ دادن خطای سه فاز در روی یکی از باس‌های میانی سیستم قدرت ارزیابی شده است. در [۲۲] با بهینه‌سازی پارامترهای LOC و PSS کنترل کننده ترکیبی LOC-PSS معرفی شده و آن را به یک سیستم چند ماشینه اعمال نموده‌اند تا پاسخ دینامیکی سیستم قدرت را در شرایط اختلال بهبود دهند. در [۲۳]، کنترل کننده‌ای معرفی شده که ضمن به کارگیری LOC، برای طراحی ماتریس‌های وزنی در معادله ریکاتی (ماتریس‌های R و Q) از الگوریتم ژنتیک (GA) استفاده نموده است؛ یعنی ابتدا این ماتریس‌ها با استفاده از الگوریتم ژنتیک به دست آمده و سپس در محاسبه ورودی کنترلی روش LOC به کار می‌روند. مقاله [۲۴] جهت بهینه نمودن PSS دو تکنیک LOC و شبکه عصبی مصنوعی (ANN) را به کار گرفته تا سیستم قدرت در شرایط مختلف بارگذاری و اختلال، پاسخ دینامیکی بهتری داشته باشد. دو نمونه دیگر از به کارگیری LOC برای افزایش میرایی LFO و بهبود پایداری در [۲۵، ۲۶] ارائه شده‌اند. در بیشتر مقالات مربوط به LOC، ماتریس‌های وزنی R و Q، بر اساس سعی و خطا و یا با استناد به مقالات مشابه قبلی انتخاب شده‌اند. این در شرایطی



است که در مسئله LOC، کیفیت قانون کنترلی که از حل معادله ریکاتی به دست می‌آید، به شدت تحت تاثیر انتخاب ماتریس‌های وزنی R و Q می‌باشد و احتمالاً سعی و خطا راه خوبی برای تعیین آنها نیست. مراجع به کار رفته در این مقاله با موضوع میرا نمودن LFO در جدول (۱) بررسی و طبقه بندی شده است.

در پژوهش‌های قبلی پیرامون پایداری و میرا نمودن LFO از طریق کنترل چند مدله، مسئله بهینه‌سازی کمتر مورد توجه قرار گرفته است در این مقاله ضمن به کارگیری کنترل کننده‌های LOC در بانک کنترل روش چند مدله، ماتریس‌های وزنی R و Q در معادله ریکاتی از طریق سعی و خطا بدست نیامده و با استفاده از الگوریتم PSO و با پیشنهاد دو تابع هدف متفاوت، بهینه می‌شوند. از آنجا که هدف این پژوهش، افزایش پایداری دینامیکی و کاهش LFO می‌باشد، تابع هدف مورد استفاده در الگوریتم PSO برای بهینه‌سازی ماتریس‌های وزنی R و Q نیز به دو صورت در نظر گرفته شده است؛ در روش اول، PSO طوری طراحی شده که هدفش ماکزیمم سازی کوچکترین جزء حقیقی در مقادیر ویژه (برای افزایش پایداری دینامیکی) است. در روش دوم طراحی PSO به صورتی است که هدفش می‌نیمم کردن سطح زیر نمودار قدرمطلق انحراف سرعت از مقدار سنکرون می‌باشد. با هر دو پیشنهاد، ماتریس‌های وزنی R و Q بهینه‌ای به دست آمده‌اند. سپس کنترل کننده‌های LOC با ماتریس‌های وزنی بهینه شده، سیگنال کنترل هر مدل را تولید نموده و طبق سناریوی حاکم در روش چند مدله، این سیگنال‌ها با یکدیگر ترکیب شده و سیگنال کنترل نهایی تولید و به سیستم قدرت تحت مطالعه اعمال گردیده اند؛ با فرض رخ دادن خطای سه فاز متقارن بر روی بدترین باس، استراتژی کنترلی پیشنهادی ارزیابی شده و نتایج حاصل از این دو تابع هدف با یکدیگر مقایسه خواهند شد. شبیه سازی‌ها با کدنویسی در محیط MATLAB انجام شده اند.

جدول(۱): مروری بر مقالات با موضوع میرانمودن نوسانات فرکانس پایین

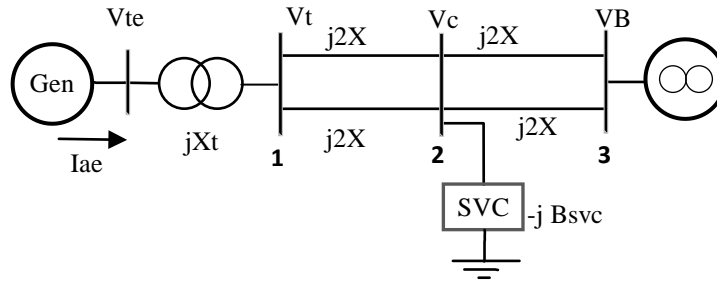
روش کنترل	مرجع	نوآوری - توضیحات
بهینه سازی PSS	[3]	الگوریتم بهینه سازی وال-مدلسازی ژنراتور با مدل فضای حالت مرتبه چهار
	[4]	الگوریتم بهینه سازی کابوت-مدلسازی ژنراتور با مدل هفرون فیلیپس
	[5]	کنترل کننده ترکیبی PID-PSS
	[6]	کنترل کننده ترکیبی lead-lag-PSS
	[7]	بهینه سازی کنترل کننده‌های ترکیبی مانند PID-PSS و PI-PSS با استفاده از الگوریتم PSO
کنترل غیر خطی	[10,11]	کنترل پسگام
	[12-15]	کنترل مود لغزشی
	[16]	کنترل خطی سازی با فیدبک
کنترل چند مدله	[17]	کنترل چند مدله تطبیقی درسیستم قدرت شامل جبران‌ساز سری ترپستوری قابل کنترل-کنترل کننده‌های PID در بانک کنترل
	[18,19]	کنترل چند مدله- روش بازگشتی بیز
	[21]	کنترل چند مدله؛ بانک کنترل شامل کنترل کننده های بهینه خطی LOC - روش بازگشتی بیز
کنترل بهینه خطی (LOC)	[22]	بهینه‌سازی پارامترهای LOC و PSS - کنترل کننده ترکیبی LOC-PSS
	[23]	استفاده از الگوریتم ژنتیک برای بهینه کردن ماتریس‌های وزنی R و Q در کنترل کننده LOC
	[24]	بهینه نمودن PSS با دو تکنیک LOC و شبکه عصبی مصنوعی (ANN)
	[25,26]	نمونه های دیگر به کار گیری LOC - قرار دادن ماتریس های R و Q بهینه نشده

۲- مدل سازی سیستم قدرت

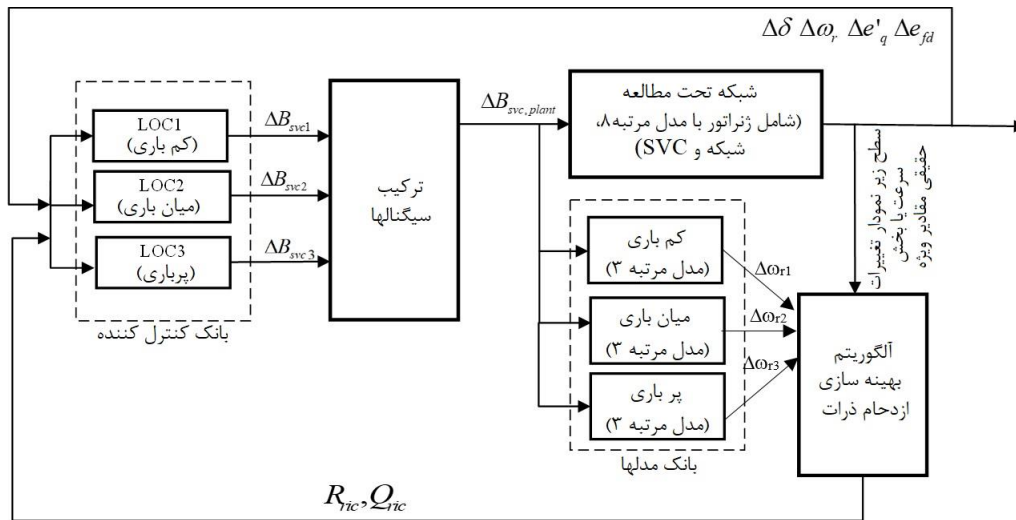
یک سیستم قدرت متصل به باس بی نهایت (SMIB) برای ارزیابی استراتژی کنترلی پیشنهادی در نظر گرفته شده که در شکل (۱) دیده می‌شود. ژنراتور سنکرون از طریق یک ترانسفورماتور و دوخط انتقال موازی به باس بی نهایت متصل شده و جبران ساز SVC⁶ در وسط خطوط قرار گرفته است. در این مقاله "شبکه تحت مطالعه" شامل ژنراتور سنکرون و سیستم قدرت متصل به آن و SVC می‌باشد ژنراتور سنکرون با معادلات مرتبه هشتم ماشین سنکرون شبیه سازی شده است [۲۷]. این معادلات با استفاده از روش عددی رانگ



کوتای^۷ مرتبه چهارم حل شده اند. معادلات جبری سیستم قدرت به گونه ای حل می شود که همزمان با رخ دادن خطای سه فاز متقارن بر روی باس ۳، سیگنال کنترل نهایی به طور هماهنگ ساخته شده و به SVC و تحریک ژنراتور سنکرون اعمال شود.



شکل (۱): سیستم قدرت تحت مطالعه



شکل (۲): استراتژی کنترل چند مدله بهینه MMC-LOC-PSO

۳- طراحی استراتژی MMC-LOC-PSO

در سیستم های قدرت واقعی حالت های مورد نیاز از شبکه اندازه گیری و به کنترل کننده داده می شوند. سپس سیگنال خروجی کنترل کننده به شبکه تحت مطالعه اعمال می گردد؛ بنابراین از نقطه نظر طراحی کفایت سیستم قدرت با یک مدل کاهش مرتبه یافته مدل سازی گردد. اما در شبیه سازی ها باید از یک مدل دقیق سیستم که بسیار شبیه شبکه تحت مطالعه واقعی است، استفاده کرد. بنابراین در این پژوهش برای شبیه سازی سیستم قدرت مدل هشتم ژنراتور به کار رفته است اما در طراحی کنترل کننده ها مدل مرتبه سوم لحاظ شده است. چنین انتخابی باعث می شود که هم از مزایای لحاظ کردن دینامیک های سیستم قدرت بهره مند شویم و هم طراحی کنترل کننده ساده تر انجام شود. خروجی شبکه تحت مطالعه شبیه سازی شده به کنترل کننده وارد می شود، کنترل کننده یک سیگنال کنترل تولید نموده و به شبکه تحت مطالعه اعمال می نماید. بلوک دیگرام استراتژی کنترلی چند مدله بهینه شده در شکل (۲) نشان داده شده است. استراتژی کنترلی چند مدله بهینه (MMC-LOC-PSO) به کمک روش بهینه سازی سنتی LOC بهبود داده شده است. به علاوه ماتریس های وزنی R و Q در روش LOC با استفاده از الگوریتم PSO بهینه می شوند. برای اجرای استراتژی اخیر، در بانک مدل، سه مدل کم باری، میان باری و بار کامل در نظر گرفته شده اند. ژنراتور در هر مدل با معادلات مرتبه سوم شبیه سازی شده و با روش عددی رانگ کوتا حل می شود. نقطه کار مدل ها بر اساس نقاط کاری رایج ژنراتور شبکه تحت مطالعه تعریف شده اند تا بتوان در تمام نقاط کاری و در شرایط پس از خطا رفتار دینامیکی ژنراتور شبکه تحت مطالعه را به درستی تخمین زد. هر مدل پارامترهای شبکه تحت مطالعه را تخمین می زند و سپس اختلاف بین مقدار تخمینی و مقادیر واقعی محاسبه می شود. بر طبق شکل (۲) استراتژی کنترلی چند مدله بهینه شامل سه بلوک اصلی و دو بلوک فرعی می باشد؛ قسمت های اصلی



عبارتند از: شبکه تحت مطالعه، بانک مدل و بانک کنترل کننده و قسمت‌های فرعی عبارتند از بلوک PSO و بلوک ترکیب کننده سیگنال‌ها که با استفاده از روش بازگشتی بیز [۲۱] سیگنال‌های LOC مربوط به هر مدل را با یکدیگر ترکیب می‌نماید.

۳-۱- بانک مدل

در بانک مدل برای ژنراتور و سیستم قدرت متصل به آن سه مدل کم باری، میان باری و بار کامل بر اساس نقاط کاری ژنراتور تعریف شده است. ژنراتور سنکرون در مدل کم باری در ۰/۵pu کار می‌کند و در مدل میان باری و بار کامل به ترتیب بر روی ۰/۸pu و ۱ pu قرار داده شده است. این تکنیک باعث می‌شود که رفتار دینامیکی ژنراتور سنکرون در تمام نقاط کاری مابین این نقاط به درستی تخمین زده شود. معادلات مرتبه سوم ژنراتور سنکرون در هر یک از مدل‌ها به کار رفته اند [۲۷] که با استفاده از روش رانگ کوتای مرتبه چهارم به صورت عددی حل می‌گردند.

۳-۲- بانک کنترل کننده

در بانک کنترل کننده برای هر مدل موجود در بانک مدل یک LOC قرار شده است؛ که در بخش بعد به طراحی آن پرداخته می‌شود. این کنترل کننده دو سیگنال خروجی تولید می‌کند که به سیستم تحریک ژنراتور سنکرون و به SVC اعمال می‌شود.

۳-۳- طراحی LOC

در این مقاله، در مرحله طراحی کنترل کننده LOC، مدل مرتبه سوم ژنراتور سنکرون استفاده شده است. مدل خطی سیستم تحریک ژنراتور سنکرون از نوع IEEE Type-ST1A می‌باشد [۲۷]. پارامترهای K_A و T_A به ترتیب بهره و ثابت زمانی سیستم تحریک می‌باشند. خطی‌سازی معادلات ماشین و سیستم متصل به آن بر اساس تغییرات سوسپتانس SVC انجام شده است.

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega_b (\omega_r - 1) \quad (1)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{M} (P_m - P_e) \quad (2)$$

$$\frac{de'_q}{dt} = \frac{1}{T_{d0}} [e_{fd} - (x_d - x'_d) i_d - e'_q] \quad (3)$$

$$\frac{de_{fd}}{dt} = \frac{1}{T_A} [-e_{fd} - K_A (v_{tr} - v_t)] \quad (4)$$

که در آن δ و ω_r به ترتیب زاویه روتور و سرعت زاویه ای روتور است. ω_b سرعت مبنای روتور است. P_m و P_e به ترتیب توان الکتریکی و مکانیکی ژنراتور سنکرون است. e_{fd} ولتاژ میدان تحریک روتور است. x_d و x'_d نیز به ترتیب راکتانس گذرای محور d و راکتانس سنکرون محور d هستند. e'_q ولتاژ پشت راکتانس گذرای محور q و T_{d0} ثابت زمانی مدار باز گذرای محور d است. M نیز ثابت اینرسی است؛ توان الکتریکی ورودی به شرح زیر محاسبه شده است:

$$P_e = v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs} \quad (5)$$

در این مقاله برای طراحی کنترل کننده بهینه خطی، خطی‌سازی معادلات ماشین و سیستم بر اساس تغییرات سوسپتانس SVC انجام شده است. خطی‌سازی سوسپتانس اولیه SVC، حول B_{0SVC} انجام می‌شود. روابط داخلی ماشین سنکرون بر طبق (۱) تا (۴) می‌باشند اما روابط خارج ماشین بر حسب سوسپتانس نوشته شده و سپس خطی‌سازی شده‌اند. برای به دست آوردن قانون کنترل، در گام اول بایستی خطی‌سازی سیستم قدرت تحت مطالعه انجام شود. از این رو در شکل (۳)، روابط مداری نوشته شده و روند خطی‌سازی، آغاز می‌شود در این روابط jX اندوکتانس خط انتقال می‌باشد که در این مقاله مقدار آن $j0.1pu$ فرض می‌شود. روابط مداری (۶) تا (۹) از شکل (۳) قابل استخراج می‌باشد:



$$i_1 = \frac{V_t - V_c}{jX} \quad (6)$$

$$i_2 = \frac{V_c - V_B}{jX} \quad (7)$$

$$V_t = V_{te} - jX_t \cdot i_1 \quad (8)$$

$$i_1 = i_2 - jV_c \cdot B_{SVC} \quad (9)$$

با جایگذاری (۶) و (۷) در (۹) نتیجه می‌شود:

$$\frac{V_t - V_c}{jX} = \frac{V_c - V_B}{jX} - jV_c \cdot B_{SVC} \quad (10)$$

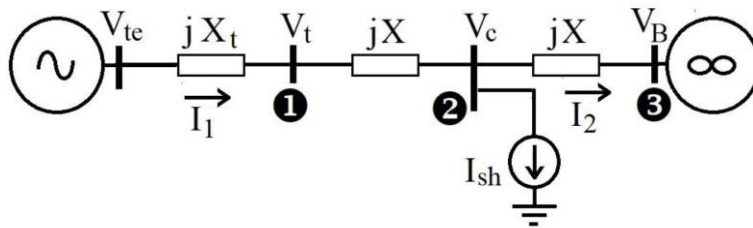
برای به دست آوردن V_c ، دو طرف (۱۰) باید در jX ضرب شود:

$$V_c = \frac{V_t + V_B}{2 + B_{SVC} \cdot X} \quad (11)$$

V_c به دست آمده در (۶) جایگذاری شده و پس از ساده سازی به صورت زیر در می‌آید:

$$V_t = jX \cdot i_1 + \frac{V_t + V_B}{2 + B_{SVC} \cdot X} \quad (12)$$

$$(1 + B_{SVC} X)V_t = jX i_1 (2 + B_{SVC} X) + V_B \quad (13)$$



شکل (۳): مدل سیستم قدرت تحت مطالعه

با جایگذاری (۱۳) در (۸) و ساده سازی آن نتیجه می‌شود:

$$(1 + B_{SVC} X)V_{te} = j[X(2 + B_{SVC} X) + (1 + B_{SVC} X)X_t]i_1 + V_B \quad (14)$$

با جایگذاری $V_t = V_B \cos \delta - jV_B \sin \delta$ و $i_1 = i_q - j i_d$ ، $V_{te} = V_q - jV_d$ در (۱۴) و جداسازی قسمت‌های موهومی و حقیقی نتیجه می‌شود:

$$(1 + B_{SVC} X)V_q = (1 + B_{SVC} X)(X + X_t)i_d + X i_d + V_B \cos \delta \quad (15)$$

$$-(1 + B_{SVC} X)V_d = (1 + B_{SVC} X)(X_t + X)i_q + X i_q - V_B \sin \delta \quad (16)$$

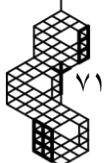
اکنون V_q و V_d در معادلات ماشین جایگذاری می‌شوند تا معادلات i_d و i_q بر حسب δ ، e'_q و B_{SVC} بدست آیند و سپس معادلات نهایی خطی سازی می‌شوند [۲۷]:

$$\begin{bmatrix} V_q \\ V_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} e'_q - \begin{bmatrix} r_s & X'_d \\ -X_q & r_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$r_s i_q + [X'_d + (X + X_t) + \frac{X}{1 + B_{SVC} X}] i_d = e'_q - \frac{V_B \cos \delta}{1 + B_{SVC} X} \quad (18)$$

$$-r_s i_d + [X_q + (X + X_t) + \frac{X}{1 + B_{SVC} X}] i_q = \frac{V_B \sin \delta}{1 + B_{SVC} X} \quad (19)$$

$$\begin{bmatrix} r_s & \alpha_1 \\ \alpha_4 & -r_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_q \\ \Delta i_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_2 & 1 \\ \alpha_5 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta e'_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \alpha_3 \\ \alpha_6 \end{bmatrix} \Delta B_{SVC} \quad (20)$$





در روابط فوق داریم:

$$\alpha_1 = X'_d + X + X_t + \frac{X}{1 + B_{0SVC} X} \quad (21)$$

$$\alpha_2 = \frac{V_B \sin \delta_0}{1 + B_{0SVC} X} \quad (22)$$

$$\alpha_3 = \frac{-X^2}{(1 + B_{0SVC} X)^2} \cdot i_{d0} - \frac{V_B X \cos \delta_0}{(1 + B_{0SVC} X)^2} \quad (23)$$

$$\alpha_4 = X_q + X + X_t + \frac{X}{(1 + B_{0SVC} X)} \quad (24)$$

$$\alpha_5 = \frac{V_B \cos \delta_0}{1 + B_{0SVC} X} \quad (25)$$

$$\alpha_6 = \frac{-V_B \sin \delta_0 X + X^2 i_{q0}}{(1 + B_{0SVC} X)^2} \quad (26)$$

Δi_d و Δi_q به صورت زیر خطی سازی می‌شوند:

$$\Delta i_q = K_1 \Delta \delta + K_2 \Delta e'_q + K_3 \Delta B_{SVC} \quad (27)$$

$$\Delta i_d = K_4 \Delta \delta + K_5 \Delta e'_q + K_6 \Delta B_{SVC} \quad (28)$$

که در آن، K_1 تا K_6 توابعی از α_1 تا α_6 می‌باشند. خطی سازی (۱۷) به صورت زیر انجام می‌شود:

$$\Delta V_q = -r_s \Delta i_q - X'_d \Delta i_d + \Delta e'_q \quad (29)$$

$$\Delta V_d = -r_s \Delta i_d + X_q \Delta i_q \quad (30)$$

با قرار دادن جریان‌های خطی شده (۲۶) و (۲۷) در روابط ولتاژ خطی شده فوق (۲۹) و (۳۰)، ΔV_{te} به دست آمده است:

$$\Delta V_{te} = \frac{V_{q0}}{V_0} \Delta V_q + \frac{V_{d0}}{V_0} \Delta V_d \quad (31)$$

$$\Delta V_{te} = c_1 \Delta \delta + c_2 \Delta e'_q + c_3 \Delta B_{SVC} \quad (32)$$

$$c_1 = \frac{V_{q0}}{V_0} (-r_s K_1 + X'_d K_4) + \frac{V_{d0}}{V_0} (-r_s K_4 + X_q K_1) \quad (33)$$

$$c_2 = \frac{V_{q0}}{V_0} (-r_s K_2 + X'_d K_5) + \frac{V_{d0}}{V_0} (-r_s K_5 + X_q K_2) \quad (34)$$

$$c_3 = \frac{V_{q0}}{V_0} (-r_s K_3 - X'_d K_6) + \frac{V_{d0}}{V_0} (-r_s K_6 + X_q K_3) \quad (35)$$

گشتاور الکتریکی با روابط (۳۶) تا (۴۱) خطی سازی شده است:

$$T_e = e'_q i_q + (X_q - X'_d) i_q i_d \quad (36)$$

$$\Delta T_e = \Delta e'_q i_{q0} + e'_{q0} \Delta i_q + (X_q - X'_d) i_{q0} \Delta i_d + (X_q - X'_d) \Delta i_q i_{d0} \quad (37)$$

$$\Delta T_e = K_7 \Delta \delta + K_8 \Delta e'_q + K_9 \Delta B_{SVC} \quad (38)$$

$$K_7 = e'_{q0} K_1 + (X_q - X'_d) (i_{d0} K_1 + K_4 i_{q0}) \quad (39)$$

$$K_8 = [i_{q0} + e'_{q0} K_2 + (X_q - X'_d) (i_{d0} K_2 + K_5 i_{q0})] \quad (40)$$

$$K_9 = e'_{q0} K_3 + (X_q - X'_d) (i_{d0} K_3 + K_6 i_{q0}) \quad (41)$$



خطی سازی مدل مرتبه سوم ماشین سنکرون برای بدست آمدن معادلات فضای حالت استفاده شده است [۲۷].

$$\dot{\Delta\delta} = \omega_b \Delta\omega_r \quad (42)$$

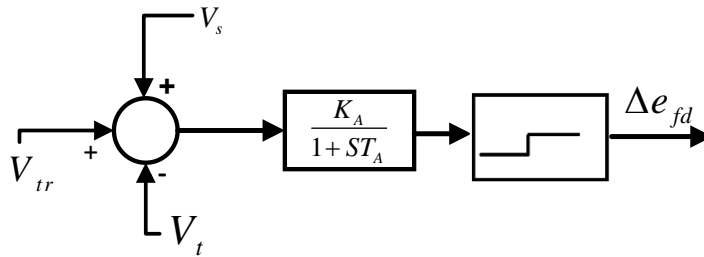
$$\Delta\omega_r = \frac{1}{M} (\Delta P_m - \Delta P_e) \quad (43)$$

با جایگذاری معادله گشتاور الکتریکی خطی شده (۳۶) در (۴۳) نتیجه می شود:

$$\Delta\omega_r = \frac{1}{M} [-K_7 \Delta\delta - K_8 \Delta e'_q - K_9 \Delta B_{SVC}] \quad (44)$$

خطی سازی (۳) به صورت زیر انجام شده است:

$$\Delta e'_q = \frac{1}{T_{do}} [\Delta e_{fd} - K_4 (X_d - X'_d) \Delta\delta - (K_5 (X_d - X'_d) + 1) \Delta e'_q - K_6 (X_d - X'_d) \Delta B_{SVC}] \quad (45)$$



شکل (۴): مدل سیستم تحریک

با در نظر گرفتن مدل سیستم تحریک در شکل (۴) و خطی سازی نتیجه می شود:

$$\dot{\Delta e}_{fd} = \frac{1}{T_A} [-\Delta e_{fd} + K_A (\Delta V_{te} + \Delta V_s)] \quad (46)$$

$$\dot{\Delta e}_{fd} = \frac{1}{T_A} [-\Delta e_{fd} + c_1 K_A \Delta\delta + c_2 K_A \Delta e'_q + c_3 K_A \Delta B_{SVC} + K_A \Delta V_s] \quad (47)$$

با تعریف $u = [\Delta V_s \ \Delta B_{SVC}]^T$ به عنوان خروجی کنترل کننده و $X = [\Delta\delta \ \Delta\omega_r \ \Delta e'_q \ \Delta e_{fd}]^T$ به عنوان بردار حالت از (۴۲)، (۴۴)، (۴۵) و (۴۷) معادلات حالت به صورت زیر حاصل می شوند:

$$\dot{X} = AX + Bu \quad (48)$$

که ماتریس های A و B در (۴۸) به صورت زیر می باشند:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \omega_b & 0 & 0 \\ -K_7/M & 0 & -K_8/M & 0 \\ -K_4(X_d - X'_d)/T_{do} & 0 & -K_5(X_d - X'_d) - 1/T_{do} & 1/T_{do} \\ -c_1 K_A/T_A & 0 & -c_2 K_A/T_A & -1/T_A \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -K_9/M \\ 0 & -K_6(X_d - X'_d)/T_{do} \\ K_A/T_A & -c_3 K_A/T_A \end{bmatrix}$$

۴-۳- استخراج قانون کنترل

روش کنترل LOC از طریق مینیمم کردن تابع انرژی J که در (۴۹) آمده است، یک سیگنال کنترل بهینه خطی تولید می کند:

$$J = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} (X^T Q X + u^T R u) dt \quad (49)$$

برای محاسبه ورودی کنترلی u ابتدا باید معادله ریکاتی (۵۰) حل شود و $K_{optimal}$ محاسبه شود. در این معادله، ماتریس وزنی R یک ماتریس حقیقی، مثبت معین و متقارن می باشد و ماتریس وزنی Q حقیقی، متقارن و نیمه معین مثبت می باشد. برای حل معادله ریکاتی ماتریس های وزنی R و Q بایستی از بلوک محاسبات PSO که در شکل (۲) نمایش داده شد، جایگزین شوند تا این معادله فقط یک مجهول K داشته باشد؛ پس از به دست آمدن $K_{optimal}$ ، در هر گام زمانی ورودی کنترلی از (۵۱) محاسبه می شود. نحوه محاسبه



ماتریس های وزنی R و Q در بلوک الگوریتم PSO در بخش بعدی توضیح داده خواهد شد. سیگنال کنترل u ، تغییرات سوسپتانس SVC و تغییرات ولتاژ تحریک ژنراتور سنکرون را به صورت بهینه تنظیم می نماید.

$$A^T K + KA - KBR^{-1}K^T + Q = 0 \quad (50)$$

$$u = -R^{-1}B^T K_{optimal} X \quad (51)$$

۴- الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات

در الگوریتم PSO ، هر جواب مسئله یک ذره نامیده می شود. در فضای جستجوی D بعدی، هر ذره یک نقطه در فضا است. جمعیتی E تایی از ذرات در نظر گرفته می شود که در تعامل با یکدیگر به سمت مقداری بهینه حرکت می کنند. مقدار انتخابی برای E بر سرعت محاسبات الگوریتم و همگرایی تأثیر می گذارد. $X_i = (X_{i1}, X_{i2}, X_{i3}, \dots, X_{iD})$ موقعیت برداری D بعدی از ذرات i ($i=1, 2, \dots, E$) می باشد. برای محاسبه تابع هدف مقدار فعلی X_i می تواند کیفیت موقعیت ذره را بیان کند. $V_i = (V_{i1}, V_{i2}, V_{i3}, \dots, V_{iD})$ سرعت حرکت ذره i ام و $P_i = (P_{i1}, P_{i2}, P_{i3}, \dots, P_{iD})$ موقعیت بهینه ذره ای است که تاکنون جستجو شده است، $P_g = (P_{g1}, P_{g2}, P_{g3}, \dots, P_{gD})$ موقعیت بهینه در کل ذرات است که تاکنون جستجو شده اند. در هر تکرار موقعیت و سرعت ذره بر طبق (52) و (53) بروزرسانی می شود.

$$V_{id}^{k+1} = V_{id}^k + c_1 r_1 (P_{id} - X_{id}^k) + c_2 r_2 (P_{gd} - X_{id}^k) \quad (52)$$

$$X_{id}^{k+1} = X_{id}^k + V_{id}^{k+1} \quad (53)$$

که در (52) و (53)، $d = 1, 2, 3, \dots, D$ ، $i = 1, 2, 3, \dots, E$ ، k تعداد تکرار است. r_1 و r_2 اعداد تصادفی بین $[0, 1]$ هستند؛ که می توانند تنوع جمعیت را تضمین نمایند. c_1 ضریب وزنی بهترین موقعیت ذره (P_{id})، و c_2 ضریب وزنی بهترین موقعیت عمومی ذره (P_g) است. این دو پارامتر را برای شتاب دادن به همگرایی می توان تنظیم نمود [7]. در این مقاله، قیود بهینه سازی به کار رفته عبارتند از مثبت معین بودن ماتریس های R و Q و منفی بودن قسمت حقیقی مقادیر ویژه در تابع هدف اول. در این مقاله براساس تجربه اجراهای مکرر، اندازهی جمعیت ذرات ۲۵ و تعداد تکرار ۱۰۰ بار در نظر گرفته شده است. ماتریس های وزنی R و Q قطری بوده و به ترتیب 2×2 و 4×4 هستند. بنابراین تعداد متغیرهایی که باید بهینه یابی شوند ۶ عدد می باشد. برای به دست آوردن ماتریس های وزنی R و Q ، مسئله PSO با دو تابع هدف به شرح زیر حل شده و پاسخها با یکدیگر مقایسه شده اند.

۱. می نیمم سازی مساحت زیر نمودار سرعت زاویه ای روتور

۲. ماکزیمم سازی کوچکترین جزء حقیقی در مقادیر ویژه (یعنی مقدار ویژه ای که دارای کوچکترین مقدار بخش حقیقی است،

بیشترین فاصله را با محور موهومی صفحه مختلط پیدا کند)

۵- نتایج شبیه سازی

سیستم قدرت شکل (۱) و استراتژی کنترلی $MMC-LOC-PSO$ پیشنهادی در شکل (۲) با کدنویسی در $MATLAB$ و با گام زمانی 10^{-4} ثانیه شبیه سازی شد. سناریوی خطا شامل اعمال یک خطای سه فاز متقارن روی باس بی نهایت (بدترین باس) در $t=0/5s$ و حذف آن بعد از $0/1s$ می باشد. برای حل معادلات دیفرانسیل غیر خطی شبکه تحت مطالعه و مدلها از روش عددی رانگ کوتا مرتبه چهارم استفاده شده است. پارامترهای ژنراتور سنکرون در جدول (۲) مقاله آورده شده اند [۲۱]. پارامترهای خط انتقال و ترانس به ترتیب $X=0/1 pu$ و $X_t=0/6 pu$ در نظر گرفته شده است.

جدول (۲): مشخصات فنی ژنراتور سنکرون

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
S (MVA)	835	$x_{ifd}(pu)$	0.1414
V (KV)	26	$r_{fd}(pu)$	0.000929
$\omega_r (rad / s)$	377	$x_{ikd}(pu)$	0.08125
$r_s(pu)$	0.0019	$r_{kdK}(pu)$	0.01334
$x_{is}(pu)$	0.19	$x_{ikq1}(pu)$	0.8125
$x_d(pu)$	1.8	$r_{kq1}(pu)$	0.00178
$x_q(pu)$	1.8	$x_{ikq2}(pu)$	0.0939



در این پژوهش، مهمترین هدف، افزایش پایداری و افزایش میرایی LFO می‌باشد. به این ترتیب که دینامیک‌های پس از خطای ژنراتور سنکرون به وسیله روش چند مدله تخمین زده شده و کنترل‌کننده LOC برای تولید سیگنال کنترل به کار گرفته شده‌اند. سیگنال‌های LOC هر مدل برای ایجاد سیگنال کنترل نهایی با یکدیگر ترکیب می‌شوند که برای ترکیب سیگنال‌ها روش بازگشتی بیز به کار رفته است. در استراتژی کنترلی $MMC-LOC-PSO$ سیگنال کنترل نهایی بر اساس احتمال رخ دادن هر مدل (مدل‌های کم باری، میان باری و بار کامل) به دست می‌آید. به گونه‌ای که سیگنال کنترلی مربوط به مدل با احتمال بیشتر وزن بیشتری می‌گیرد و سیگنال کنترلی مربوط به مدل با احتمال کمتر وزن کمتری می‌گیرد. برای ارزیابی استراتژی، در آغاز شبیه سازی برای کنترل توان راکتیو در حالت ماندگار سوسپیتانس SVC روی مقدار ثابتی $(0.1 pu)$ تنظیم می‌شود. سپس خطای سه فاز اتفاق می‌افتد و کنترل‌کننده پیشنهادی، سوسپیتانس SVC را برای میرا نمودن LFO تغییر می‌دهد. لازم به ذکر است که LOC ها در بانک کنترل با مقدار R و Q به دست آمده از بلوک PSO محاسبات را انجام می‌دهند (شکل (۲)). در واقع مقادیر R و Q در بلوک PSO بهینه شده و به بلوک بانک کنترل‌کننده وارد می‌شوند تا هر LOC سیگنال کنترل بهتری را تولید نمایند. محاسبات PSO با دو تابع هدف انجام شده است و نتایج آن‌ها با هم مقایسه شده است. تابع هدف اول می‌نیم‌سازی مساحت زیر نمودار سرعت زاویه‌ای روتور و تابع هدف دوم، ماکزیمم سازی کوچکترین جزء حقیقی در مقادیر ویژه می‌باشد. شکل (۵) بهترین تجربه عمومی ذرات با تابع هدف می‌نیم‌سازی مساحت زیر نمودار سرعت زاویه‌ای روتور را نشان می‌دهد که به مقدار $34/5345$ همگرا شده، شکل (۶) نیز مجموع بهترین تجربه شخصی ذرات را برای همین تابع هدف نشان می‌دهد که به مقدار $863/3575$ همگرا شده است. شکل (۷) بهترین تجربه عمومی ذرات با تابع هدف می‌نیم‌سازی مساحت زیر نمودار سرعت زاویه‌ای روتور را با میانگین بهترین تجربه شخصی آن‌ها مقایسه نموده است. تجربه اجراهای مکرر الگوریتم نشان داد که حداکثر تکرار 100 برای همگرایی الگوریتم در تابع هدف می‌نیم‌سازی مساحت زیر نمودار سرعت کاملاً کفایت می‌کند. در تابع هدف دوم، کوچکترین جزء حقیقی در بین مقادیر ویژه ماکزیمم سازی می‌شود. شکل‌های (۸) و (۹) به ترتیب بهترین تجربه عمومی ذرات و مجموع بهترین تجربه عمومی را با این تابع هدف نمایش می‌دهند. در شکل (۸) جزء حقیقی مقدار ویژه به $2/12224$ و شکل (۹) که نشان دهنده مجموع بهترین تجربه‌های شخصی همه‌ی ذرات می‌باشد، به $53/056$ همگرا شده است. شکل (۱۰) بهترین تجربه عمومی ذرات با تابع هدف ماکزیمم سازی کوچکترین جزء حقیقی در بین مقادیر ویژه آن‌ها مقایسه نموده است. تجربه اجراهای مکرر الگوریتم نشان داد که حداکثر تکرار 1000 برای همگرایی الگوریتم در تابع هدف ماکزیمم‌سازی کوچکترین جزء حقیقی در بین مقادیر ویژه کفایت می‌کند. مقادیر همگرایی نمودارها و ماتریس‌های R و Q بهینه شده با هر تابع هدف در جدول (۳) ارائه شده است.

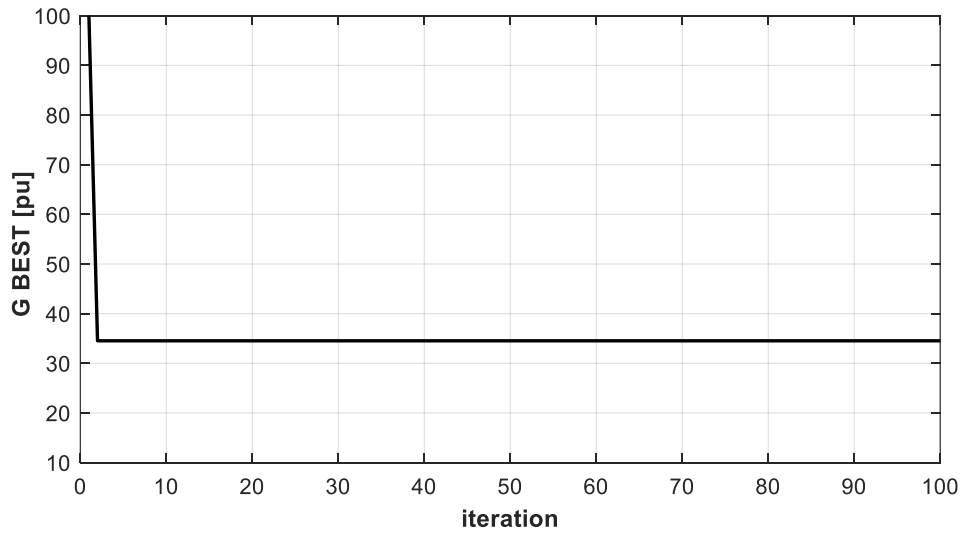
جدول (۳): مقادیر همگرایی نمودارها و ماتریس‌های R و Q بهینه شده با دو تابع هدف مختلف

تابع هدف	R_{ric}	Q_{ric}	بهترین تجربه عمومی	مجموع بهترین تجربه شخصی
می‌نیم‌سازی مساحت زیر نمودار سرعت زاویه‌ای روتور	$1e8 \times diag([1.5735 \ 1.2801])$	$1e8 \times diag([2.5376 \ 0.2411 \ 1.0743 \ 1.9117])$	34.5345	863.3575
ماکزیمم‌سازی قدرمطلق قسمت حقیقی کوچکترین مقدار ویژه	$1e7 \times diag([1.4826 \ 0.396])$	$1e7 \times diag([1.078 \ 0.0267 \ 0.5189 \ 0.0573])$	2.12224	53.056

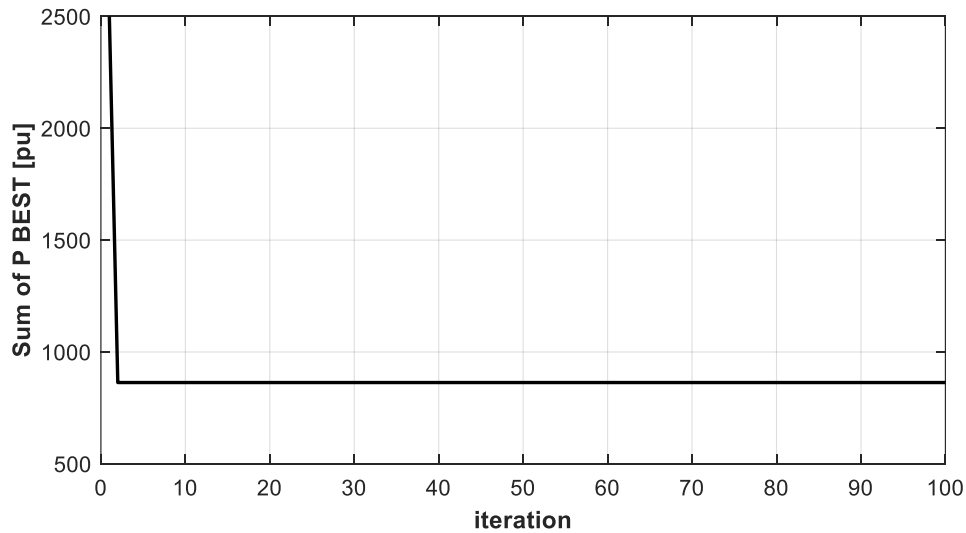
برای ارزیابی عملکرد کنترل‌کننده $MMC-LOC-PSO$ کنترل‌کننده فازی بر روی سیستم قدرت تحت مطالعه قرار داده شد و نتایج آن با نتایج کنترل پیشنهادی مقایسه گردید. کنترل‌کننده فازی به کار رفته در این مقاله از نوع ممدانی است و با دو ورودی $\Delta\omega_r$ ، $\Delta\delta$ و یک خروجی ΔB_{SVC} طراحی شده است؛ توابع عضویت مثلثی و ۲۵ قانون کنترل در نظر گرفته شده است [29]. همچنین کنترل‌کننده چند مدله با فرارگیری کنترل‌کننده‌های بهینه خطی در بانک کنترل (MMLOC) و ثابت بودن ماتریس‌های R و Q بر روی سیستم قدرت آزمایش شد [21] و نتایج کنترل فازی و MMLOC بر روی نتایج کنترل‌کننده $MMC-LOC-PSO$ قرار داده شد. نوسانات سرعت زاویه‌ای و زاویه روتور ژنراتور سنکرون با دو تابع هدف فوق‌الذکر و کنترل فازی و چند مدله بهینه خطی (MMLOC)، به ترتیب در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) ترسیم شده است. در شکل (۱۱) می‌توان دید که استراتژی کنترلی $MMC-LOC-PSO$ به طور



چشمگیری LFO را میرا نموده است و دامنه نوسان سرعت به صفر می‌رسد. تا پیش از رخ دادن خطا در $t=0/5s$ سرعت بر روی $1 pu$ قرار گرفته و پس از رخ دادن خطا کنترل کننده در $2/5$ ثانیه توانسته سرعت را به محدوده پاسخ $(1/0.1 pu)$ برساند. دستیابی به این نتیجه به نوع تابع هدفی که برای PSO در نظر می‌گیریم مرتبط نمی‌باشد و هر دو تابع هدف LFO را به خوبی میرا می‌کنند.

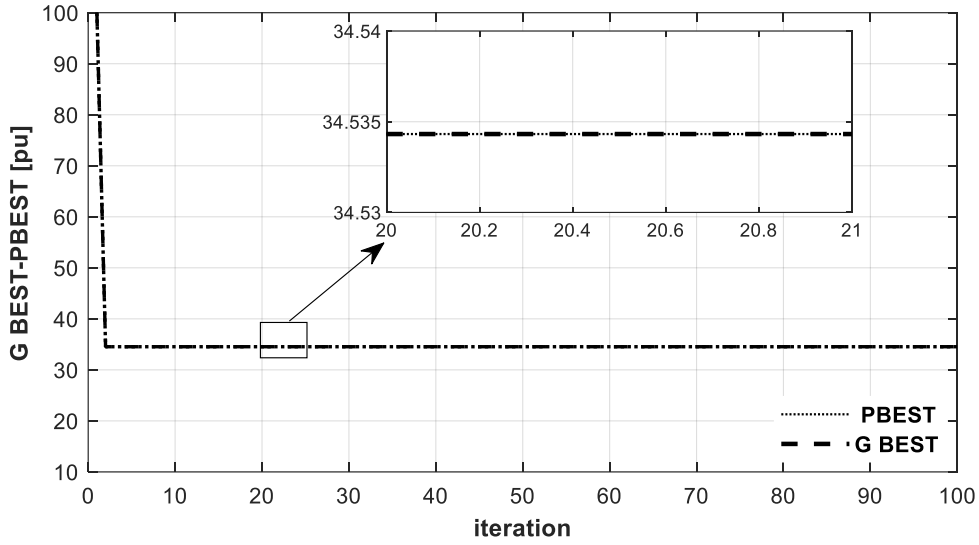


شکل (۵): بهترین تجربه عمومی ذرات با تابع هدف می‌نیمم سازی مساحت زیر نمودار سرعت زاویه ای روتور

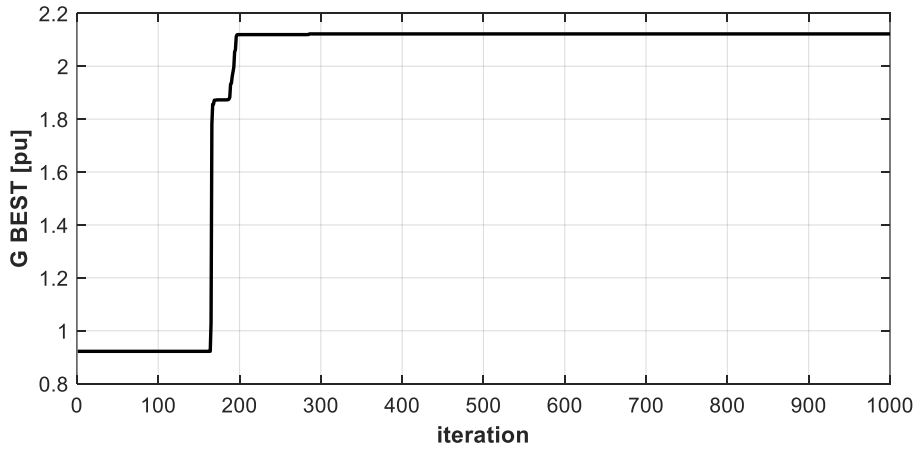


شکل (۶): مجموع بهترین تجربه شخصی ذرات با تابع هدف می‌نیمم سازی مساحت زیر نمودار سرعت زاویه‌ای روتور

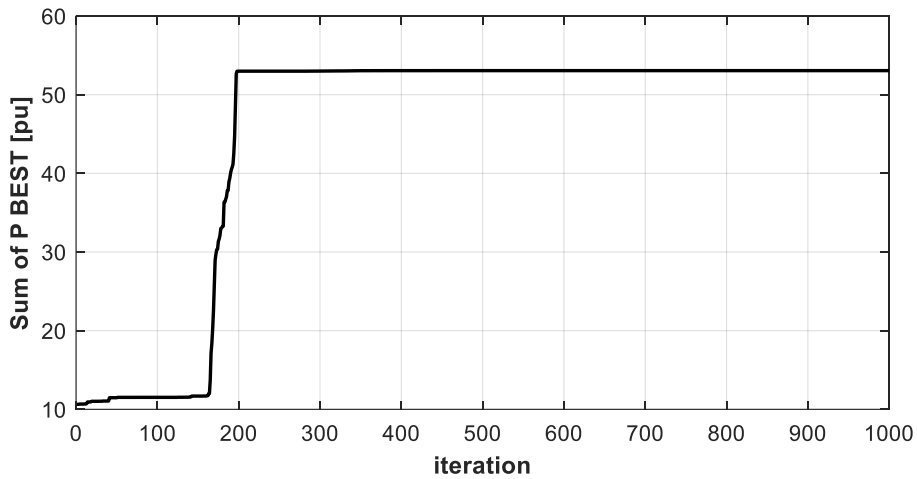




شکل (۷): بهترین تجربه عمومی ذرات با تابع هدف می نیمم سازی مساحت زیر نمودار سرعت زاویه ای روتور - میانگین بهترین تجربه شخصی

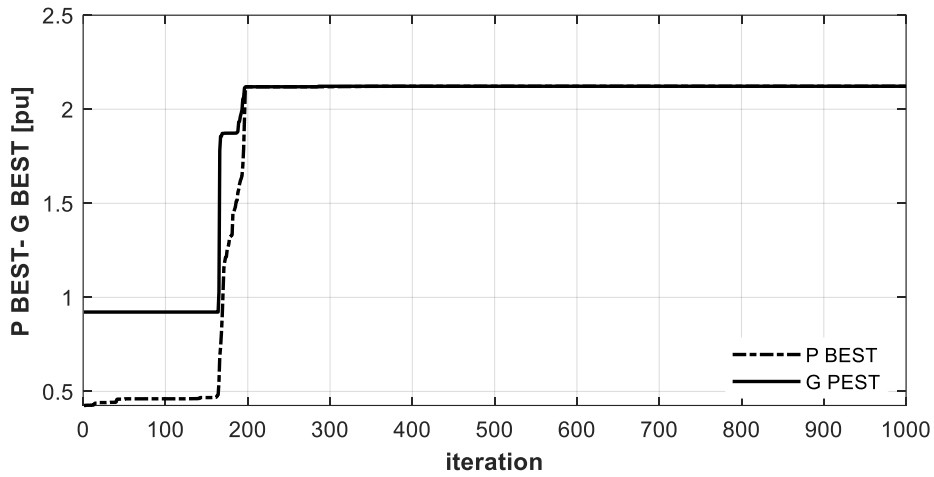


شکل (۸): بهترین تجربه عمومی ذرات با تابع هدف ماکزیمم سازی کوچکترین جزء حقیقی در مقادیر ویژه

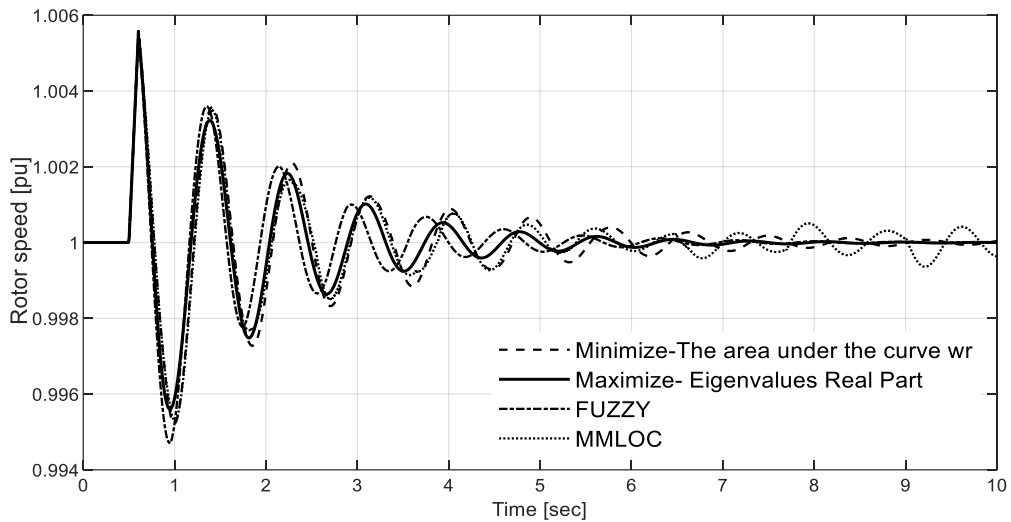


شکل (۹): مجموع بهترین تجربه شخصی ذرات با تابع هدف ماکزیمم سازی کوچکترین جزء حقیقی در مقادیر ویژه

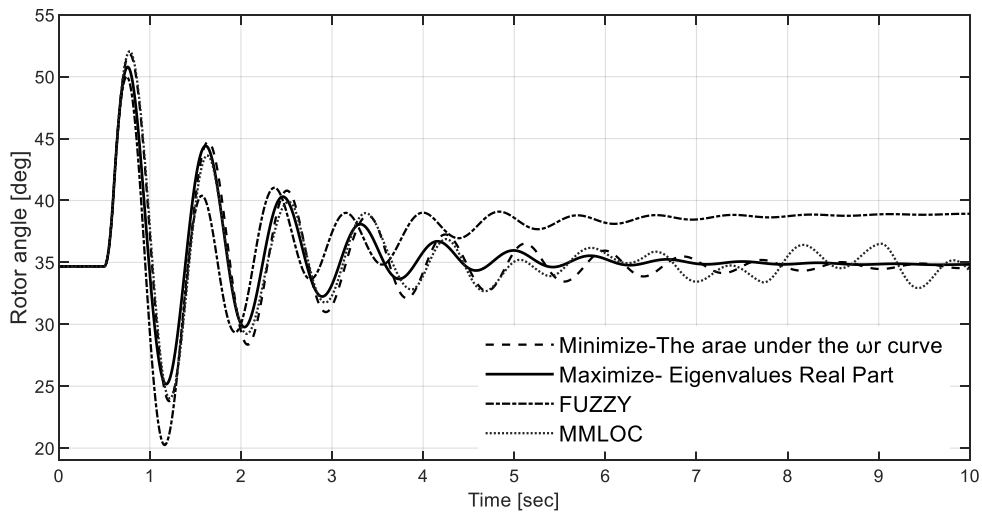




شکل (۱۰): بهترین تجربه عمومی ذرات با تابع هدف ماکزیمم سازی کوچکترین جزء حقیقی در مقادیر ویژه - میانگین بهترین تجربه شخصی



شکل (۱۱): سرعت روتور ژنراتور با استراتژی MMC-LOC-PSO - مقایسه دو تابع هدف مختلف و کنترل فازی و MMLOC



شکل (۱۲): زاویه روتور ژنراتور با استراتژی MMC-LOC-PSO - مقایسه دو تابع هدف مختلف و کنترل فازی و MMLOC



اگرچه ماکزیمم سازی کوچکترین جزء حقیقی در مقادیر ویژه تاثیر بیشتری بر میرایی LFO گذاشته است. در شکل (۱۲) کنترل کننده $MMC-LOC-PSO$ به طور چشمگیری دامنه نوسان زاویه روتور را کاهش داده است خطای ماندگار زاویه روتور را به صفر رسانده است. در شرایطی که خطای سه فاز در بدترین باس (باس بینهایت) رخ داده است زاویه روتور را به کمتر از ۴۵ درجه هدایت نموده است. بنابراین کنترل کننده پیشنهادی توانسته به لحاظ پایداری زاویه روتور عملکرد مطلوبی داشته باشد.

۶- نتیجه گیری

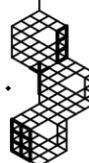
در این مقاله با هدف افزایش پایداری دینامیکی و کاهش LFO ، استراتژی کنترلی جدیدی به نام $MMC-LOC-PSO$ ارائه گردید. در این استراتژی ضمن به کارگیری کنترل کننده‌های LOC در بانک کنترل روش چند مدله، ماتریس‌های وزنی R و Q در معادله ریکاتی با استفاده از الگوریتم PSO بهینه می‌گردند. در الگوریتم PSO برای بهینه‌سازی ماتریس‌های وزنی R و Q دو تابع هدف در نظر گرفته شده است؛ تابع هدف اول PSO ، می‌نیمم سازی سطح زیر نمودار قدر مطلق انحراف سرعت و تابع هدف دوم ماکزیمم‌سازی کوچکترین جزء حقیقی در بین مقادیر ویژه می‌باشند. پس از آن کنترل کننده‌های LOC با ماتریس‌های وزنی بهینه شده، سیگنال کنترل هر مدل را تولید نموده سپس، سیگنال‌ها با یکدیگر ترکیب شده و سیگنال کنترل نهایی (برای اعمال به SVC) تولید می‌گردد. برای بررسی اثربخشی کنترل پیشنهادی، خطای سه فاز مقارنی بر روی باس بینهایت اعمال و بعد از $0.1s$ برداشته شد و دینامیک سرعت و زاویه روتور ژنراتور بررسی شد. با مقایسه کنترل چند مدله بهینه شده $MMC-LOC-PSO$ با کنترل کننده فازی و کنترل چند مدله بهینه خطی ($MMLOC$) نتایج شبیه سازی ارزیابی شده است. نتایج مقایسه ای نشان می‌دهد که کنترل کننده پیشنهادی در میرایی LFO و افزایش پایداری موثرتر است. همچنین نتایج شبیه سازی افزایش میرایی LFO و افزایش پایداری دینامیکی را با به کار بردن استراتژی کنترلی پیشنهادی به ازای هر دو تابع هدف نشان داده است. علاوه بر این دیده شد که اگر تابع هدف بر اساس ماکزیمم‌سازی کوچکترین جزء حقیقی در بین مقادیر ویژه باشد، LFO میرایی بهتری خواهد داشت.

مراجع

- [1] K. S. Shim, S. J. Ahn, and J. H. Choi, "Synchronization of low-frequency oscillation in power systems," *Energies*, vol. 10, no. 4, p. 558, 2017, doi: 10.3390/en10040558.
- [2] Y. Sang and M. Sahraei-Ardakani, "Economic benefit comparison of d-Facts and Facts in transmission networks with uncertainties," in *IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, Portland, OR, USA, 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/PESGM.2018.8585939, doi: 10.1109/PESGM.2018.8585939
- [3] B. Dasu, M. Sivakumar, and R. Srinivasarao, "Interconnected multi-machine power system stabilizer design using whale optimization algorithm," *Protection and Control of Modern Power Systems*, vol. 4, pp. 1–11, 2019, doi: 10.1186/s41601-19-0116-6.
- [4] T. Guesmi, B. M. Alshammari, Y. Almalaq, A. Alateeq, and K. Alqunun, "New coordinated tuning of SVC and PSSs in multimachine power system using coyote optimization algorithm," *Sustainability*, vol. 13, no. 6, p. 3131, 2021, doi: 10.3390/su13063131.
- [5] J. Morsali and T. G. Bolandi, "Proposing FOPID-based PSS2B stabilizer using MGSO to improve damping of electromechanical oscillations in a multi-machine power system," in *27th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, pp. 742–747, IEEE, 2019, doi: 10.1109/IranianCEE.2019.8786726.
- [6] S. Jalali and G. Shahgholian, "Designing of power system stabilizer based on the root locus method with lead-lag controller and comparing it with PI controller in multi-machine power system," *Journal of Power Technologies*, vol. 98, no. 1, pp. 45-56, 2018.
- [7] D. Acharya, D. K. Das and A. Rai, Particle Swarm Optimization (PSO) based 2-DoF-PID power system stabilizer design for damping out low frequency oscillations in power systems," in *2nd International Conference on Innovations in Electronics, Signal Processing and Communication (IESC)*, Shillong, India, 2019, pp. 148-153, doi: 10.1109/IESPC.2019.8902378.
- [8] W. Du, W. Dong, Y. Wang, and H. Wang, "A method to design power system stabilizers in a multi-machine power system based on single-machine infinite-bus system model," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 36, no. 4, pp. 3475–3486, 2020, doi: 10.1109/TPWRS.2020.3041037.
- [9] C. Abdelghani, L. Chaib, and S. Arif, "Robust control design of PSS for dynamic stability enhancement of power system," *Journal of Electrical Systems*, vol. 13, pp. 376-386, 06/01 2017.



- [10] S. Shojaeian and J. Soltani, "Low frequency oscillations damping of power system including unified power flow controller based on adaptive backstepping control," *Rev. Roum. Sci. Techn.-Électrotechn. et Énerg*, vol. 58, no. 2, pp. 193–204, 2013.
- [11] C. Liu, G. Cai, J. Gao, and D. Yang, "Design of nonlinear robust damping controller for power oscillations suppressing based on backstepping fractional order sliding mode," *Energies*, vol. 10, no. 5, p. 676, 2017, doi: 10.3390/en10050676.
- [12] E. Sharifi and A. Mazinan, "On transient stability of multi-machine power systems through takagi-sugeno fuzzy-based sliding mode control approach," *Complex & Intelligent Systems*, vol. 4, pp. 171–179, 2018, doi: 10.1007/s40747-017-0063-7.
- [13] S. Huang, L. Xiong, J. Wang, P. Li, Z. Wang, and M. Ma, "Fixed-time fractional-order sliding mode controller for multimachine power systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 36, no. 4, pp. 2866–2876, 2020, doi: 10.1109/TPWRS.2020.3043891.
- [14] S. Tummala, R. Inapakurthi, and P. Ramanarao, "Observer based sliding mode frequency control for multi-machine power systems with high renewable energy," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 6, pp. 473–481, 2018, doi: 10.1007/s40565-017-0363-3.
- [15] Z. Liu, S. Liu, Z. Li, and I. A. Tasiu, "A novel approach based on extended state observer sliding mode control to suppress voltage low frequency oscillation of traction network," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 52440–52454, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2912219.
- [16] S. Shojaeian, J. Soltani, and G. A. Markadeh, "Damping of low frequency oscillations of multi-machine multi-upfc power systems, based on adaptive input-output feedback linearization control," *IEEE Transactions on power systems*, vol. 27, no. 4, pp. 1831–1840, 2012, doi: 10.1109/TPWRS.2012.2194313.
- [17] B. Chaudhuri, R. Majumder, and B. C. Pal, "Application of multiple-model adaptive control strategy for robust damping of interarea oscillations in power system," *IEEE transactions on control systems technology*, vol. 12, no. 5, pp. 727–736, 2004, doi: 10.1109/TCST.2004.833409.
- [18] L. Zhou, X. Yu, B. Li, C. Zheng, J. Liu, Q. Liu, and K. Guo, "Damping inter-area oscillations with large-scale pv plant by modified multiple model adaptive control strategy," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 8, no. 4, pp. 1629–1636, 2017, doi: 10.1109/TSTE.2017.2697905.
- [19] Mostajabi, S. Shojaeian, and M. Lotfi, "Improving low frequency oscillation damping of a multi-area power system using multi-model adaptive control approach," *International Journal of Mechatronics, Electrical and Computer Technology*, vol. 4, no. 11, pp. 628–646, 2014.
- [20] M. Sayidi, M. A. Nekoui and N. S. Boghrabidi, "Adaptive Optimal Control for a One-Machine Infinite-Bus Power System," in *International Conference on Computational Intelligence for Modelling Control & Automation*, Vienna, Austria, 2008, pp. 202-207, doi: 10.1109/CIMCA.2008.164.
- [21] E. Pagard, S. Shojaeian, M. M. Rezaei, "Damping of low-frequency oscillations in a power system, based on multiple-model optimal control strategy," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 2023, doi: 10.1155/2023/3992158.
- [22] H. Abniki, A. Asadi, P. Khajavi and M. T. Nabavi-Razavi, "A novel optimization technique for Linear Optimal Control and Power System Stabilizer in multi-machine power systems," in *10th International Conference on Environment and Electrical Engineering*, Rome, Italy, 2011, pp. 1-4, doi: 10.1109/EEEIC.2011.5874718.
- [23] M. Jazaeri and H. F. Wang, "Multi-mode genetic algorithm based linear optimal control design for power systems," in *International Conference on Sustainable Power Generation and Supply*, Nanjing, China, 2009, pp. 1-6, doi: 10.1109/SUPERGEN.2009.5347920.
- [24] M. Z. Youssef, P. K. Jain and E. A. Mohamed, "A robust system stabilizer configuration using artificial neural network based on linear optimal control (student paper competition)," in *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Toward a Caring and Humane Technology (Cat. No.03CH37436)*, Montreal, QC, Canada, 2003, pp. 569-573 vol.1, doi: 10.1109/CCECE.2003.1226460.
- [25] H. Abniki, A. Asadi, P. Khajavi, and M. Nabavi-Razavi, "A novel optimization technique for linear optimal control and power system stabilizer in multi-machine power systems," in *10th International Conference on Environment and Electrical Engineering*, pp. 1–4, IEEE, 2011, doi: 10.1109/EEEIC.2011.5874718.
- [26] R. Fazal and M. Choudhry, "Design of non-linear static var compensator based on synergetic control theory," *Electric Power Systems Research*, vol. 151, pp. 243–250, 2017, doi: 10.1016/j.epsr.2017.05.014.





- [27] P. Krause, O. Wasynczuk, and S. D. Sudhoff., et al. Analysis of electric machinery and drive systems. Vol. 2., *New York: IEEE press*, 2002.
- [28] R. Badar, M. Z. Khan, and M. A. Javed, "Mimo adaptive bspline-based wavelet neuro fuzzy control for multi-type facts," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 28109–28122, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2969387.
- [29] A. Gupta, A., Sharma, P., 2013. "Fuzzy based Svc auxiliary controller for damping low frequency oscillations in a power system," in *The Next Generation Information Technology Summit (4th International Conference)*. IET, pp. 87–91, doi: 10.1049/cp.2013.2298.

-
- ¹ Low Frequency Oscillation
 - ² Particle Swarm Optimization
 - ³ Backstepping
 - ⁴ Bayes recursive Algorithm
 - ⁵ Linear Optimal Controller
 - ⁶ Static Var Compensator
 - ⁷ Runge Kutta

