

Optimum Control of Voltage and Frequency Fluctuations of Connected Microgrid in Conditions of Severe Disturbances Using Combined PSO-ANN Algorithm

Sayid Mehran Moloudi¹, Hadi Tarimoradi²

¹ MSc student, Faculty of engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

m.moloudi1995@gmail.com

² Assistant Professor, Faculty of engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

h.tarimoradi@uok.ac.ir

Abstract :

In recent times, the use of renewable resources has expanded. However, due to their inherent nature, these resources are unstable (transient), leading to a decrease in power quality. Additionally, the unpredictability of renewable sources poses severe and unknown challenges. Energy storage systems play a fundamental role in the structure of microgrids. To address the mentioned problems, optimal utilization and expansion of energy storage systems can be a suitable option. In this article, a novel control strategy for battery energy storage systems is proposed. The goal of this control system is to recover voltage and frequency in the microgrid, thereby enhancing its power quality, especially in the presence of a wide spectrum of disturbances. To optimize the control system, the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm and an Artificial Neural Network (ANN) are employed. The controller coefficients are tuned using ANN training with a set of input-output data during the optimization process. Under various disturbances, the PSO algorithm dynamically adjusts the controller parameters online.

Keywords: Power quality, battery energy storage system, microgrids, PSO, ANN.

Article Type: Research

Received: 30. 04. 2024

Revised: 14. 08. 2024

Accepted: 29. 08. 2024

Corresponding author: H. Tarimoradi

Corresponding author's address: Faculty of Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, P.C: 66177-15175, Kurdistan, Iran



1. Motivation of the work

The increasing reliance on renewable energy sources, while beneficial for sustainability, introduces significant challenges due to their inherent instability and unpredictability. These challenges manifest as fluctuations in power quality, which can adversely affect the reliability and efficiency of microgrids. As energy storage systems become integral to the architecture of modern microgrids, there is a pressing need for advanced control strategies that can effectively manage these fluctuations.

This paper addresses this critical need by proposing a novel control strategy for battery energy storage systems aimed at stabilizing voltage and frequency within microgrids. By leveraging the combined strengths of the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm and Artificial Neural Networks (ANN), the proposed control system dynamically adjusts to a wide range of disturbances, ensuring optimal performance and enhanced power quality.

The motivation behind this research is to provide a robust solution that not only mitigates the adverse effects of renewable energy variability but also enhances the overall stability and reliability of microgrids. This work contributes to the ongoing efforts to integrate renewable energy sources more effectively, paving the way for a more resilient and sustainable energy infrastructure.

2. Contributions

We propose a control strategy for battery energy storage systems aimed at enhancing the power quality of microgrids. This strategy specifically addresses the challenges posed by the instability and unpredictability of renewable energy sources. The control system leverages the combined strengths of the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm and Artificial Neural Networks (ANN) to dynamically adjust controller parameters in real-time. This integration ensures optimal performance under a wide range of disturbances. The control system parameters were optimized using the PSO algorithm and train the ANN with a comprehensive set of input-output data. This approach allows for effective online tuning of the controller, adapting to varying conditions in the microgrid. Through detailed simulations, we compare the performance of the proposed control system with a traditional PI controller. Our results demonstrate the effectiveness of the proposed system in maintaining voltage and frequency stability under different disturbance scenarios. The findings of this research provide valuable insights into the design and implementation of advanced control systems for energy storage in microgrids, contributing to the development.

3. Procedures

- Set up the microgrid model including renewable energy sources, loads, and the battery energy storage system (BESS).
- Initialize the PI controllers for voltage and frequency control with initial coefficients.

- Apply various disturbances to the microgrid, such as load changes, renewable generation fluctuations, and faults.
- Record the system responses (voltage and frequency) and the corresponding disturbances.
- Configure the PSO algorithm parameters including population size, number of iterations, and convergence criteria.
- Define the objective function to minimize the error between the actual and reference values of voltage and frequency.
- Use the PSO algorithm to optimize the PI controller coefficients based on the recorded data.
- Arrange the optimized parameters and corresponding disturbances into input-output vector sets.
- Configure the ANN architecture including the number of layers, neurons, activation functions, and training algorithm.
- Train the ANN using the prepared input-output vectors to learn the relationship between disturbances and optimal controller coefficients.
- Integrate the trained ANN with the PSO algorithm to form the hybrid PSO-ANN controller.
- Implement the hybrid controller in the microgrid to dynamically adjust the PI controller coefficients in real-time based on disturbances.
- Define two scenarios with different disturbances to test the performance of the proposed controller.
- Run simulations for both scenarios and record the system responses.
- Compare the performance of the proposed PSO-ANN controller with the traditional PI controller in terms of voltage and frequency stability.
- Analyze the performance metrics such as voltage deviation, frequency deviation, and response time.
- Evaluate the effectiveness of the proposed controller in improving the power quality of the microgrid under various disturbances.

4. Findings

The proposed PSO-ANN control strategy significantly improved the power quality of the microgrid. The system effectively maintained voltage and frequency stability under various disturbances, demonstrating its robustness and reliability.

The hybrid PSO-ANN controller dynamically adjusted the PI controller coefficients in real-time, effectively managing a wide range of disturbances. This adaptability ensured minimal deviation from the reference values for both voltage and frequency.

The microgrid exhibited enhanced stability with the proposed control system. The optimized controller parameters, determined through the PSO algorithm, contributed to a more stable and resilient microgrid operation.

In scenarios with different disturbances, the PSO-ANN controller achieved better voltage and frequency regulation, leading to improved overall system performance. The algorithm quickly converged to optimal solutions, reducing the time and effort required for manual tuning of the PI controller coefficients. The trained ANN accurately predicted the optimal controller coefficients based on the magnitude of disturbances, enabling real-time tuning of the control system. These findings highlight the effectiveness and advantages of the proposed PSO-ANN control strategy in improving the power quality and stability of microgrids under various disturbances.

5. Conclusion

In this research, a battery energy storage system is used to enhance the power quality of a microgrid under various disturbances. In the proposed control system for the battery, the voltage and frequency of the microgrid are controlled using a PSO-ANN algorithm. The control system parameters are optimized using the PSO algorithm under different disturbances. Consequently, the optimized parameters and the corresponding disturbances are arranged in input and output vector sets to train the artificial neural network for online controller tuning. Finally, two scenarios involving different disturbances are applied to the microgrid, and the performance of the proposed controller is compared with that of a PI controller. The simulation results confirm the good and effective performance of the proposed controller.

کنترل بهینه نوسانات ولتاژ و فرکانس ریز شبکه متصل در شرایط اغتشاشات شدید به کمک الگوریتم ترکیبی PSO-ANN

سید مهران مولودی^۱، هادی طاریمردی^۲

۱- فارغ التحصیل ارشد- دانشکده مهندسی - دانشگاه کردستان- سنندج- ایران

m.moloudi1995@gmail.com

۲- استادیار- دانشکده مهندسی - دانشگاه کردستان- سنندج- ایران

h.tarimoradi@uok.ac.ir

چکیده: امروزه استفاده از منابع تجدیدپذیر گسترش یافته است اما این منابع دارای ماهیتی ناپایدار و نوسانی هستند که باعث کاهش قابلیت اطمینان و کیفیت توان سیستم می‌شود. علاوه بر غیرقابل پیش‌بینی بودن منابع تجدیدپذیر، بروز اغتشاشات شدید و ناشناخته نیز چالش برانگیز است. در این میان ذخیره‌سازهای انرژی نقش اساسی در ساختار ریزشبکه‌ها دارند. گسترش و استفاده بهینه از سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی برای برطرف کردن مشکلات ذکر شده، می‌تواند راه‌کار مناسبی باشد. در این مقاله یک استراتژی کنترلی جدید برای سیستم ذخیره‌ساز انرژی باتری ارائه شده است. هدف این سیستم کنترلی بازیابی ولتاژ و فرکانس ریزشبکه و در نتیجه افزایش کیفیت توان آن، در صورت بروز اغتشاشات مختلف است. برای بهینه‌سازی سیستم کنترلی از الگوریتم اجتماع ذرات و شبکه عصبی مصنوعی (PSO-ANN) استفاده شده است. ضرایب کنترل کننده‌ها به کمک یک شبکه عصبی مصنوعی که با مجموعه‌ای از داده‌های ورودی و خروجی آموزش دیده است، بدست آمده و در طی فرآیند بهینه‌سازی کنترل کننده‌ها تحت اختلالات مختلف با استفاده از PSO به صورت آنلاین تنظیم می‌شوند.

کلمات کلیدی: کیفیت توان، سیستم ذخیره‌ساز انرژی باتری، ریزشبکه‌ها، الگوریتم PSO، شبکه‌های عصبی مصنوعی

نوع مقاله: پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۱۱

بازنگری: ۱۴۰۳/۰۵/۲۴

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۰۸

نام نویسنده‌ی مسئول: هادی طاریمردی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - سنندج - بلوار پاسداران - دانشگاه کردستان - دانشکده‌ی مهندسی

۱- مقدمه

برای یک واحد DG یا ES مبتنی بر اینورتر می‌تواند نقش کلیدی در الزامات کیفیت توان و بهبود آن بازی کند [۷]. روش‌های کنترل ریزش‌بکه بسته به حالت عملیاتی، ساختار و اهداف مورد نیاز، متفاوت هستند. در این رابطه یک کنترل سلسله مراتبی در [۸] ارائه شده است. این سیستم کنترلی، در سطح اولیه حلقه‌های کنترل داخلی و تنظیم نقاط اولیه توزیع توان را انجام می‌دهد، در سطح ثانویه، انحرافات فرکانس و دامنه ولتاژ بازیابی می‌شود و در سطح ثالثیه، توزیع توان بین ریزش‌بکه و شبکه اصلی در نقطه اتصال مشترک (PCC) را تنظیم می‌نماید.

یک سیستم کنترل غیر متمرکز در [۹] ارائه شده است، در این مقاله ریزش‌بکه در حالت‌های کاری متصل به شبکه و جزیره‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. در حالت متصل به شبکه کنترل توان انجام می‌شود و در حالت جزیره‌ای کنترل ولتاژ و فرکانس صورت می‌گیرد. سیستم کنترلی شامل کنترلر توان و کنترلر جریان است. از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) برای تنظیم ضرایب کنترل کننده‌ها استفاده شده است.

در [۱۰] از سیستم ذخیره انرژی باتری برای کاهش نوسانات توان و فرکانس استفاده شده است. سیستم کنترلی استفاده شده سه سطحی است. به واسطه دو سطح کنترلی اول، توان مرجع برای میراسازی نوسانات توان در سیستم‌های تولید پراکنده محاسبه می‌شود. فرآیند محاسبه توان مرجع با در نظر داشتن عمر مفید سیستم ذخیره ساز و حفاظت از آن، انجام شده است. سپس این توان مرجع به سطح کنترلی سوم داده می‌شود. سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی یک راه حل اساسی برای کاهش تلفات انرژی هستند. در [۱۱] از سیستم ذخیره انرژی ترکیبی شامل باتری و ابرخازن برای اهداف کاهش تلفات استفاده شده است. الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات و سیستم مدلسازی جبری عمومی برای فرآیند بهینه سازی بکار گرفته شده است.

یک طرح کنترل تطبیقی برای کنترل بار-فرکانس (LFC) به منظور افزایش کیفیت و پایداری توان در [۱۲] پیشنهاد شده است. سیستم کنترل شامل یک کنترل کننده اصلی بهبود یافته با نام کنترل حالت لغزشی (SMC) است. علاوه بر این، یک استراتژی برنامه‌ریزی پویا (ADP) برای تولید سیگنال کنترل تکمیلی استفاده شده که با تغییرات و عدم قطعیت‌های زمان واقعی برای تنظیم فرکانس سازگاری دارد. با این حال، تنظیم ولتاژ در این مقاله مورد بررسی قرار نگرفته است.

در [۱۳] و [۱۴] از سیستم‌های انرژی ذخیره‌ساز ترکیبی شامل باتری و ابرخازن برای کاهش نوسانات توان و ولتاژ ناشی از وجود منابع انرژی تجدیدپذیر و وقوع اغتشاش استفاده شده است. استراتژی‌های کنترلی مختلف برای انواع سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی و سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی ترکیبی (HESS) برای رسیدن به اهداف متفاوت در پژوهش‌های [۱۵] و [۱۶] مورد مطالعه قرار گرفته است. در [۱۷] از ESS برای کاهش نوسانات توان و فرکانس و افزایش کیفیت توان

منابع محدود تولید برق متداول در کنار نگرانی‌های زیست محیطی، نیاز به استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر جهت تولید برق را ایجاد کرده است. ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر باعث تغییر چشمگیر ساختاری شبکه‌های برق متداول از تولید برق متمرکز به تولید پراکنده شده است [۱]. با تغییر ساختار سیستم‌های قدرت، افزایش منابع انرژی تجدیدپذیر و با هوشمند شدن شبکه‌ها، سیستم‌های قدرت با چالش‌هایی از جمله عدم قطعیت در منابع انرژی مواجه شده‌است. راه حل مناسب برای مقابله با این چالش‌ها، استفاده از سیستم‌های ذخیره انرژی است [۲]. ریزش‌بکه‌های دارای منابع انرژی تجدیدپذیر، علاوه بر سازگاری بیشتر با محیط زیست، هزینه سرمایه گذاری کمتری را در مقایسه با سیستم‌های تولید برق متمرکز متداول دارد. علاوه بر این، ریزش‌بکه نسبت به وقفه‌ها و اختلالات خط انتقال حساسیت کمتری دارد [۳]. ریزش‌بکه‌های دارای منابع انرژی تجدیدپذیر در کنار مزایایی که دارند دارای معایب و چالش‌هایی نیز هستند، مانند:

- **قیمت‌گذاری توسط دولت:** سیستم‌های تولید انرژی تجدیدپذیر تحت سیاست‌های قیمت‌گذاری دولتی قرار دارند.

- **بازارهای برق غیر رقابتی:** عدم وجود بازارهای رقابتی برای برق می‌تواند بر توسعه سیستم‌های تولید انرژی تجدیدپذیر تأثیرگذار باشد.

- **مناطق مناسب جغرافیایی:** شناسایی مناطق جغرافیایی مناسب برای استقرار سیستم‌های تولید انرژی تجدیدپذیر همچنان یک چالش است.

- **چالش‌های فنی:** این چالش‌ها شامل تضعیف کیفیت توان، مسائل پایداری دینامیکی و هماهنگی رله‌های حفاظتی می‌شود.

سیستم‌های ذخیره انرژی تا حدودی می‌توانند مشکلات و چالش‌های ذکر شده را برطرف کنند. به لطف وجود سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر گسترش یافته است [۴]. امروزه به سبب رشد الکترونیک قدرت و پیشرفت در زمینه ساخت، انواع مختلفی از ذخیره‌سازها ساخته شده و کاربرد آنها نیز گسترش یافته است، که در بحث پایداری ریزش‌بکه‌ها و بطور کلی پایداری ریزش‌بکه، مدیریت توان، کیفیت توان و قابلیت اطمینان ریزش‌بکه نیز نقش کلیدی دارند [۵]. با توجه به تجدید ساختار در سیستم‌های قدرت، بازارهای مختلفی برای مشارکت بخش خصوصی در تامین انرژی الکتریکی مورد نیاز شبکه و حفظ قابلیت اطمینان آن ایجاد شده است. منابع ذخیره‌ساز مبتنی بر باتری با توجه به سرعت بالای ورود/خروج به/از مدار، گزینه‌های مناسبی برای بازارهای خدمات جانبی فرکانس می‌باشند [۶].

براساس پژوهش‌های پیشین، بهره‌برداری مقاوم و قابل اعتماد ریزش‌بکه به‌طور قابل‌توجهی متکی به طرح‌های کنترلی برای واحدهای تولید پراکنده و ذخیره‌ساز انرژی است. بنابراین، حلقه کنترل توان کارآمد

PI استفاده شده است. در این مقاله اغتشاشات مختلفی مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

در این تحقیق، کیفیت توان ریزشبه با تمرکز بر روی کنترل کننده‌های محلی عناصر ذخیره ساز، در صورت وجود اغتشاشات مختلف بررسی می‌شود. یعنی هر کنترل کننده از اطلاعات محلی منبع خود استفاده می‌کند و به کانال مخابراتی پیچیده بین ریزمنبع‌ها و عناصر ذخیره ساز نیاز نیست. کنترل تطبیقی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) در سطح محلی پیاده‌سازی می‌شود و بر اساس داده‌های محلی مانند ولتاژ، جریان، و توان سیستم، تصمیم‌گیری و کنترل را انجام می‌دهد. پس کنترل مرکزی نیازی به جمع‌آوری و پردازش داده‌های ریزشبه از راه دور ندارد. بنابراین، نیاز به ارسال داده‌های مداوم به مرکز کنترل و دریافت دستورات کنترلی از آن کاهش می‌یابد. این نوع پیاده‌سازی باعث کاهش بار ترافیک مخابراتی و کاهش وابستگی به یک زیرساخت مخابراتی پیچیده و گران‌قیمت می‌شود. به‌طور خاص، با توجه به اینکه ریزشبه‌ها می‌توانند در محیط‌های مختلف و با محدودیت‌های مخابراتی (مانند مناطق دورافتاده یا صنعتی) نصب شوند، این رویکرد می‌تواند بسیار مؤثر باشد. در واقع، شبکه عصبی به گونه‌ای آموزش داده می‌شود که بتواند شرایط مختلف عملیاتی و اغتشاشات محلی را تشخیص دهد و به صورت خودکار تصمیمات کنترلی مناسب را بدون نیاز به دستورات مرکزی اتخاذ کند.

از باتری به عنوان سیستم ذخیره ساز انرژی استفاده شده است. ساختار کنترلی بسیار ساده است و از کنترل کننده PI است. در سیستم کنترلی این ذخیره‌ساز از الگوریتم PSO-ANN برای تعیین پارامترهای کنترل کننده‌ها استفاده می‌شود و هدف سیستم کنترل بازگردانی ولتاژ و فرکانس در شرایط بحرانی است. ابتدا نتایج برای کنترل کننده PI بدون اعمال روش پیشنهادی بدست آمده و در مرحله‌ی بعد نتایج با اعمال روش پیشنهادی بدست آمده و با نتایج مرحله‌ی قبل مقایسه شده است. نتایج، کارایی کنترل کننده‌های پیشنهادی تحت اغتشاشات مختلف را تأیید می‌کنند. مزیت اصلی این روش کنترلی اجرای ساده و پاسخ سریع جهت ترمیم ولتاژ و فرکانس است.

در بخش دوم این مقاله اجزای سیستم MG بیان می‌شود، در بخش سوم روش کنترل پیشنهاد شده و فرمول‌بندی مسئله آمده است. نتایج شبیه‌سازی در بخش چهارم ارائه و بررسی شده است. در پایان نیز خلاصه‌ی تحقیق و نتیجه‌گیری انجام شده است.

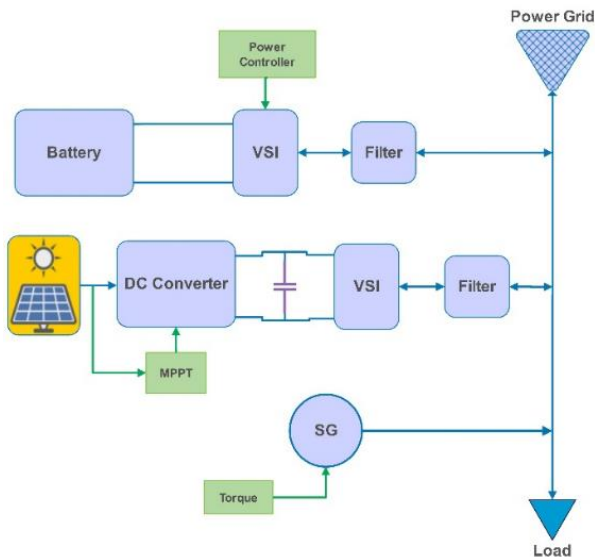
۲- مدل‌سازی ریزشبه

ساختار ریزشبه مورد مطالعه در شکل (۱) نشان داده شده است. که دارای یک سیستم ذخیره‌ساز باتری، یک نیروگاه برق خورشیدی و یک ژنراتور سنکرون است. ریز شبکه به شبکه‌ی قدرت متصل است و با آن مبادله‌ی توان دارد. روش مدل سازی سیستم فتوولتائیک، باتری‌های ذخیره ساز و ژنراتور سنکرون در ادامه ارائه خواهند شد.

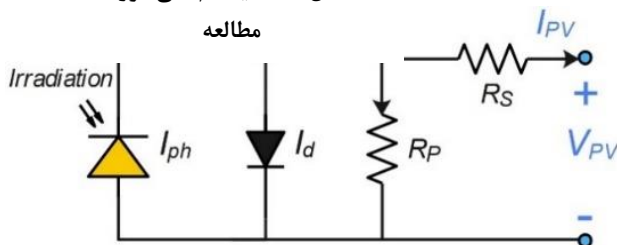
استفاده شده است. برای این منظور نویسندگان از کنترل دروپ استفاده کرده‌اند. مدت زمان لازم برای برطرف شدن نوسانات فرکانس طولانی بوده است. یک روش کنترل متمرکز برای کاهش نوسانات توان تولیدی و اغتشاش سریع بار و افزایش کیفیت توان در [۱۸] ارائه شده است. سیستم کنترل متمرکز وظیفه بررسی وضعیت کاری هریک از بخش‌های شبکه را برعهده دارد. اتصال هریک از منابع توان خورشیدی و بادی به شبکه، مقادیر مرجع واحدهای ذخیره ساز و مبدل واسط با شبکه و... از جمله وظایف این سیستم است. در [۱۹] یک کنترل عملکرد سه گانه برای بهبود کیفیت توان ارائه شده است. سیستم پیشنهادی شامل کنترل کننده تناسبی رزونانسی، جبران کننده‌ی هارمونیک انتخابی (SHC) و کنترل کننده‌ی پیش‌خور است. این مقاله برای تنظیم پارامترهای کنترل کننده از الگوریتم PSO استفاده کرده است. مرجع [۲۰] کنترل کننده‌ی را برای سیستم ذخیره ساز باتری پیشنهاد می‌کند که برای ترمیم ولتاژ و فرکانس در دوره‌ی گذرای سیستم MG طراحی شده است. کنترل کننده طراحی شده به طور خاص برای دو شرایط غیر طبیعی ریز شبکه، یعنی تغییرات ناگهانی بار و شرایط خطا آزمایش شده است. با این حال، عملکرد این دو کنترل کننده مبتنی بر سیستم ذخیره‌ساز باتری از نظر زمان پاسخ و میزان نوسانات رضایت بخش نبوده است.

کنترل فرکانس ریزشبه در حالت جزیره‌ای در [۲۱] مورد مطالعه قرار گرفته است. از الگوریتم PSO-Fuzzy برای تنظیم ضرایب کنترلرهای PI استفاده شده است. اما ولتاژ بخوبی تنظیم نشده است. کنترل فرکانس ریزشبه با استفاده از سیستم کنترل چند سطحی در [۲۲] بررسی شده است. در سطح اولیه به محدود کردن افت فرکانس ناشی از وقوع اغتشاش، عدم تعادل میان تولید و مصرف و اضافه بار ناگهانی می‌پردازد. حلقه کنترل اولیه افت فرکانس را محدود می‌کند اما در برگرداندن فرکانس به مقدار نامی ناتوان بوده و از این رو حلقه تکاملی دیگری به نام کنترل ثانویه فرکانس نیز استفاده شده است. در این سطح، از کنترل کننده PI برای برگرداندن فرکانس به مقدار اولیه استفاده شده است. برای تنظیم ضرایب کنترل کننده از شبکه عصبی مصنوعی (ANN) استفاده شده است. با این حال، سرعت همگرایی کند سیستم کنترلی و هزینه سرمایه‌گذاری زیاد و قابلیت اطمینان پایین به دلیل الزام وجود کانال مخابراتی از مشکلات این مقاله است. در [۲۳]، یک کنترل کننده مبتنی بر سیستم ذخیره‌ساز ابررسانا برای پشتیبانی از فرکانس ریزشبه پیشنهاد شده است. روش کنترل کننده براساس تئوری ارزش منحصر به فرد ساختاری (SUVT) و با استفاده از تکنیک بهینه‌سازی تکامل دیفرانسیل (DEO) است که برای بهینه‌سازی ضرایب کنترل کننده‌ها استفاده شده است. این روش به طور مؤثر از فرکانس ریزشبه برای جبران شرایط گذرای سیستم پشتیبانی می‌کند. با این حال، ولتاژ سیستم را بهبود نمی‌بخشد. در [۲۴] از الگوریتم بهینه‌سازی تکامل دیفرانسیل ترکیبی و عصبی مصنوعی (DEO-ANN)، برای تعیین پارامترهای کنترل کننده‌های

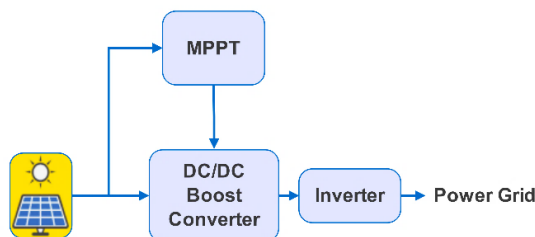
۱-۲- سیستم فتولتائیک



شکل (۱): سیستم کلی مورد



شکل (۲): مدار معادل یک سلول خورشیدی



شکل (۳): سیستم فتولتائیک

۲-۲- سیستم ذخیره انرژی باتری

باتری‌ها یکی از عناصر ذخیره‌ساز انرژی با صرفه اقتصادی هستند که امروزه در دسترس می‌باشند. هر باتری از سلول‌های الکتروشیمیایی تشکیل شده است که به صورت سری - موازی به هم متصل شده‌اند، این ترکیب سری - موازی از مجموعه‌ای از باتری‌های ولتاژ/ توان پایین تشکیل شده که مشخصه مطلوب الکتریکی را دارا می‌باشند. سیستم ذخیره‌ساز باتری مطابق شکل ۴ به وسیله یک منبع ولتاژ کنترل شونده سری با یک مقاومت ثابت براساس [۲۷] مدل شده است. وضعیت حالت شارژ باتری (SOC) در حقیقت نسبت مقدار ظرفیت انرژی موجود باتری به کل ظرفیت آن است که به صورت درصد بیان می‌شود و به صورت رابطه (۴) تعیین می‌گردد [۲۸].

یک آرایه فتولتائیک شامل چندین ماژول فتولتائیک متصل به هم در آرایش سری- موازی می‌باشند مدار معادل یک سلول خورشیدی براساس نمایش تک دیودی مطابق شکل (۲) است. این مدار معادل شامل یک منبع جریان که نمایانگر جریان فتوالکتریک تولید شده توسط سلول خورشیدی در تابش نور است و به صورت مستقیم با شدت نور متناسب است. یک دیود که نمایانگر رفتار نیمه‌هادی سلول خورشیدی است و در حالت معکوس، از عبور جریان جلوگیری می‌کند مگر اینکه نور تابیده شود. مقاومت موازی که مدل کننده‌ی جریان ناشی نیمه هادی است و مقاومت سری که بیانگر مقاومت داخلی سلول خورشیدی است، این مقدار بر کارایی کلی سلول تأثیر می‌گذارد. معادلات این سیستم به شرح زیر است [۲۵].

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - \frac{I_{pv} + I_{pv}R_s}{R_p} \quad (1)$$

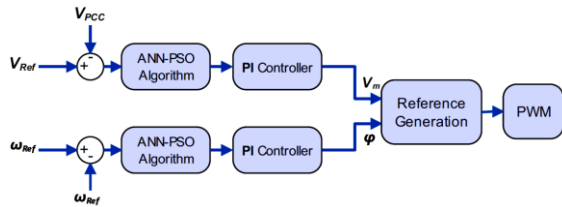
$$I_d = I_s e^{\left(\frac{q(V_{pv} + I_{pv}R_s)}{nkT} \right) - 1} \quad (2)$$

$$P_{pv} = I_{pv}V_{pv} \quad (3)$$

که در آن I_{pv} جریان خروجی سلول خورشیدی، I_s جریان اشباع معکوس دیود، I_{ph} جریان خروجی دیود نوری، I_d جریان دیود، V_{pv} ولتاژ خروجی سلول خورشیدی، R_s مقاومت سری سلول، R_p مقاومت موازی سلول، P_{pv} توان خروجی سلول، q بار یک الکترون، k ثابت بولتزمن، n ضریب ایده آل بودن و T درجه حرارت است.

برای اتصال سیستم فتولتائیک به ریزشبه از ساختار نشان داده شده در شکل (۳) بهره گرفته شده است [۲۶]. برای جذب حداکثر توان با کنترل مبدل بوست نشان داده شده در شکل (۳)، از الگوریتم تغییر و مشاهده^۱ استفاده شده است. الگوریتم تغییر و مشاهده یک روش یادگیری تقویتی است که در آن عامل یاد می‌گیرد که چگونه عملکرد خود را در یک محیط معین بهبود دهد. در این الگوریتم، عامل با مشاهده وضعیت محیط و اعمال اقدامات مختلف، پاداش وی را دریافت می‌کند و از این پاداش برای بهبود عملکرد خود استفاده می‌کند. این روش به عنوان یک روش یادگیری مداوم شناخته می‌شود زیرا عامل مدام در حال تغییر است و با توجه به بازخوردی که دریافت می‌کند، رفتار خود را تطبیق می‌دهد. این الگوریتم به ویژه در مواردی که محیط پویا یا غیرقطعی است، موثر است، زیرا عامل با مشاهده تغییرات در محیط و انطباق با آن می‌تواند عملکرد بهتری داشته باشد.

شده است و هدف این سیستم کنترلی، بازیابی ولتاژ و فرکانس تحت اغتشاشات ناشناخته است که با اینکار پایداری و کیفیت توان ریزشبه افزایش می‌یابد. کنترل کننده PI زمانی درست عمل می‌کند که ضرایب آنها بطور دقیق انتخاب شود. پیدا کردن ضرایب مناسب سخت و زمان بر است و وجود اغتشاشات مختلف و نامشخص این کار را سخت‌تر می‌کند. برای این منظور از الگوریتم PSO-ANN استفاده شده است. شکل (۵) بلوک دیاگرام کنترل پیشنهادی را نشان می‌دهد.



شکل (۵): بلوک دیاگرام روش پیشنهادی

ولتاژ و فرکانس جداگانه توسط دو کنترل کننده PI کنترل می‌شوند. خروجی کنترل کننده‌ها، زاویه فاز و شاخص مدولاسیون VSI است. زاویه فاز، توان اکتیو سیستم ذخیره‌ساز انرژی باتری را کنترل می‌کند. در حالی که، شاخص مدولاسیون میزان توان راکتیو مورد نیاز جهت تأمین یا جذب توسط سیستم ذخیره‌ساز باتری را کنترل می‌کند. همانطور که در معادلات (۱۰) و (۱۱) بیان شده است، ولتاژ و فرکانس با مقادیر مرجع که توسط شبکه اصلی تعیین می‌شود، مقایسه می‌شوند. وجود هر اختلافی نشانه‌ی وجود خطاست. این خطا به کنترل کننده های PI وارد می‌شود سپس الگوریتم ترکیبی پیشنهاد شده، براساس مقدار اغتشاش مقدار بهینه ضرایب کنترلرها را بدست می‌آورد.

$$V_m = K_{pv}e_v(t) + K_{Iv} \int_0^t e_v(t)dt \quad (10)$$

$$\varphi = K_{p\omega}e_\omega(t) + K_{I\omega} \int_0^t e_\omega(t)dt \quad (11)$$

PSO و ANN از محبوب‌ترین الگوریتم‌های بهینه‌سازی در حوزه‌ی هوش محاسباتی هستند. الگوریتم PSO از نظر اجرا، تعداد پارامتر و میزان استفاده از حافظه نسبت به سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی دارای برتری است. این الگوریتم در شاخه هوش جمعی یا اجتماعی قرار می‌گیرد به همین دلیل الگوریتمی است که یک الگوی جدیدی را در مقابل الگوریتم‌های تکاملی دیگر که تکامل محض است نشان می‌دهد که اصل و اساس آن به اشتراک‌گذاری اطلاعات و تجربیات است [۳۰].

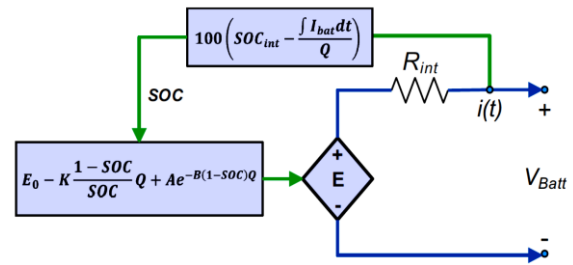
مزیت شبکه‌های عصبی مصنوعی در قابلیت یادگیری الگوها و روابط پیچیده در داده‌ها بدون نیاز به برنامه‌نویسی مبتنی بر روابط تحلیلی و مستقیم است. ANN قادر است با آموزش بر روی مجموعه داده‌های برچسب‌گذاری شده، عملکرد خود را بهبود بخشد و به مرور زمان تطابق‌پذیری آن‌ها را افزایش دهد. این ویژگی آن‌ها را برای وظایفی مانند طبقه‌بندی، رگرسیون و شناسایی الگو مناسب می‌سازد. علاوه بر این،

$$SOC = 100 \left(SOC_{int} - \frac{\int I_{bat} dt}{Q} \right) \quad (4)$$

که در آن SOC_{int} وضعیت حالت اولیه باتری و Q ظرفیت باتری است که به وسیله منبع ولتاژ کنترل شونده مبتنی بر رابطه (۵) مدل می‌شود.

$$E_{batt} = E_0 - K \frac{1 - SOC}{SOC} Q + A e^{-B(1 - SOC)Q} \quad (5)$$

در این رابطه E_{batt} ولتاژ مدار باز، E_0 ولتاژ نامی باتری، K ولتاژ پلاریزاسیون، A ولتاژ نامی و B ظرفیت نامی است.



شکل (۴): مدل غیر خطی باتری

۲-۳- ژنراتور سنکرون

ژنراتورهای سنکرون از اجزای اصلی سیستم قدرت هستند که در نیروگاه‌های برق وجود داشته و بخش بزرگی از برق مورد نیاز شبکه را تأمین می‌کنند. این تجهیزات الکتریکی توانی با فرکانس ثابت تولید می‌کنند و می‌توانند در ضریب توان پیش‌فاز و پس‌فاز کار کنند. معادلات دیفرانسیل زیر رفتار دینامیکی ژنراتور سنکرون را توصیف می‌کنند [۲۹].

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega_0(\omega - 1) \quad (6)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{2H}(P_m - P_e) \quad (7)$$

$$\frac{dE_{fd}}{dt} = \frac{1}{\tau E} [\alpha E(V_{g0} - V_g) - (E_{fd} - E_{fd0})] \quad (8)$$

$$\frac{d\dot{E}_q}{dt} = \frac{1}{T_{d0}} [E_{fd} - \dot{E}_q - (x_d - x'_d)i_d] \quad (9)$$

که در آن δ زاویه روتور، ω سرعت زاویه‌ای الکتریکی ماشین، H نسبت انرژی جنبشی در سرعت نامی روتور بر توان مینا، P_m توان مکانیکی ورودی، P_e توان الکتریکی عبوری از فاصله هوایی، E ولتاژ خروجی تحریک کننده، E_{fd} ولتاژ تحریک، T_{d0} ثابت زمانی گذرای مدار باز محور طولی، x_d راکتانس طولی ماشین، x'_d راکتانس گذرای طولی ماشین و i_d جریان مدار میراکننده است.

۳- روش پیشنهادی

کنترل فرکانس از مهمترین وظایف متولی شبکه می‌باشد که در آن بهره‌بردار شبکه به منظور برقراری تعادل بین تولید و مصرف، بخشی از ظرفیت منابع تولیدی خود را به صورت آماده پیش‌بینی می‌کند [۲۹]. در این تحقیق از کنترل کننده PI در سیستم کنترلی باتری استفاده

۶- **تطبيق و بهبود:** در صورت لزوم، پارامترهای الگوریتم PSO-ANN با توجه به نتایج مرحله آزمون و ارزیابی تنظیم مجدد می‌شوند تا عملکرد بهینه‌تری حاصل شود.

چون از الگوریتم فرابتکاری استفاده می‌کنیم، تابع هدف معیاری ویژه است که برای ارزیابی جستجوی تکراری الگوریتم‌هایی مانند PSO بکار می‌رود. در این حالت، صرف‌نظر از هدف‌های کنترل، حداقل‌سازی تابع خطا، مهم‌ترین هدف است. بدین منظور از انتگرال مربع خطا^۳ هم برای سیستم کنترل ولتاژ و هم کنترل فرکانس به عنوان تابع هدف استفاده می‌شود [۳۱].

$$\min \int_0^t (e_v(t))^2 dt = \int_0^t (\Delta V)^2 dt = \int_0^t (V_0 - V)^2 dt \quad (12)$$

$$\min \int_0^t (e_\omega(t))^2 dt = \int_0^t (\Delta \omega)^2 dt = \int_0^t (\omega_0 - \omega)^2 dt \quad (13)$$

برای اینکه اطمینان حاصل شود که پاسخ سیستم محدودیت‌های عملیاتی تعیین شده برای ولتاژ و فرکانس را نقض نکند، انتخاب این قیود معمولاً براساس محدودیت‌های فیزیکی و عملیاتی سیستم و تجربیات پیشین انجام شده است. قیود حداقل و حداکثر به گونه‌ای تنظیم شده است که تضمین کننده پایداری و عملکرد مطلوب سیستم در تمامی شرایط کاری است. قیودی که در نظر گرفته شده است به شرح زیر می‌باشند:

$$0.95 \leq V \leq 1.05, \quad 0.997 \leq f \leq 1.003$$

برای ضرایب کنترلرها نیز محدودیت‌هایی در نظر گرفته شده است.

$$[k_{pv} \ k_{Iv} \ k_{p\omega} \ k_{I\omega}] = [1 \ 0.1 \ 50 \ 50] \quad \text{حد پایین:}$$

$$[k_{pv} \ k_{Iv} \ k_{p\omega} \ k_{I\omega}] = [150 \ 10 \ 250 \ 250] \quad \text{حد بالا:}$$

روش انجام الگوریتم ترکیبی PSO-ANN برای این مسئله در شکل (۶) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، الگوریتم با اعمال یک سطح اغتشاش به سیستم ریز شبکه از 0 تا 2.0pu با گام‌های 0.2pu شروع می‌شود. که در مجموع ۱۰ سطح اغتشاش برای بررسی نوسانات ولتاژ و فرکانس اعمال شده است. این اغتشاشات، تغییرات ناگهانی توان مکانیکی ورودی ژنراتور سنکرون را شبیه‌سازی می‌کنند. میزان تغییرات توان مکانیکی ورودی ژنراتور سنکرون در جدول (۱) آمده است. پس از اعمال هر سطح از اغتشاش، الگوریتم PSO برای یافتن پارامترهای بهینه‌ی هر دو کنترل کننده‌ی PI اجرا می‌شود. سپس از پارامترهای بهینه‌ی به دست آمده و همچنین سطح اغتشاش، برای توسعه و آموزش شبکه عصبی استفاده می‌شود. ورودی ANN سطح اغتشاش است و خروجی ANN پارامترهای بهینه‌ی کنترل کننده است. شبکه عصبی توسعه یافته یک شبکه عصبی پیش خور چند لایه است که از یک لایه ورودی، یک لایه مخفی با ۱۰ نورون و یک لایه خروجی با چهار نورون تشکیل شده است. در این مقاله، از رویکرد سازنده برای توسعه سلول‌های عصبی لایه پنهان در یک شبکه عصبی مصنوعی استفاده شده است. توابع فعال‌سازی برای سلول‌های عصبی پنهان و نورونهای خروجی به ترتیب سیگموئید تانژانت و عملگر خطی است.

ANN قادر است به روابط غیرخطی و داده‌های نویزی به طور مؤثری پاسخ دهند که این ویژگی آن‌ها را در کاربردهای مختلف جهان واقعی قوی می‌سازد. در کل، ANN مزایایی مانند سرعت پاسخ‌دهی، همگرایی، انعطاف‌پذیری، تطابق‌پذیری و پایداری را ارائه می‌دهد.

الگوریتم PSO-ANN قابلیت‌های بهینه‌سازی PSO را با قابلیت‌های یادگیری ANN ترکیب می‌کند. در این رویکرد ترکیبی، از الگوریتم PSO برای بهینه‌سازی پارامترهای یک مدل ANN استفاده می‌شود. الگوریتم PSO با در نظر گرفتن این پارامترها به عنوان ذرات در فضای جستجو، وزن‌ها و بایاس‌های بهینه شبکه عصبی را جستجو می‌کند. تابع تناسب در PSO بر اساس عملکرد مدل شبکه عصبی بر روی یک مجموعه داده مشخص، تعریف می‌شود.

الگوریتم PSO-ANN را می‌توان برای کارهایی مانند انتخاب ویژگی، تنظیم پارامتر و بهینه‌سازی مدل در برنامه‌های کاربردی مبتنی بر شبکه عصبی استفاده کرد. هدف ترکیب PSO و ANN استفاده از نقاط قوت هر دو تکنیک بهینه‌سازی برای افزایش عملکرد کلی مدل شبکه عصبی است. این رویکرد ترکیبی اغلب منجر به بهبود سرعت و دقت همگرایی در مقایسه با استفاده از PSO یا ANN به تنهایی می‌شود که با موفقیت در مسائل مختلف بهینه‌سازی، به ویژه در آموزش مدل‌های پیچیده شبکه‌های عصبی، استفاده شده است. در ادامه، فرایند کلی از نحوه عملکرد معمول الگوریتم ترکیبی PSO-ANN آمده است:

- ۱- **آماده‌سازی داده:** این مرحله شامل جمع‌آوری و آماده‌سازی داده‌ها برای استفاده در شبکه عصبی مصنوعی (ANN) می‌شود که شامل ورودی‌ها، خروجی‌ها و داده‌های آموزش و تست است.
- ۲- **آموزش ANN با استفاده از PSO:** در این مرحله، الگوریتم PSO برای بهینه‌سازی وزن‌ها و پارامترهای مدل ANN استفاده می‌شود به نحوی که عملکرد مدل در پیش‌بینی و یا طبقه‌بندی بهینه شود. سپس پارامترهای ANN با استفاده از بهترین ذره‌ای که توسط PSO پیدا شده است به‌روزرسانی می‌شوند.
- ۳- **ارزیابی و تنظیم مدل:** مدل ANN پس از آموزش توسط PSO ارزیابی می‌شود و از طریق فرآیند تنظیم و بهبود، پارامترهای مدل برای بهبود عملکرد نهایی تنظیم می‌شوند.
- ۴- **آزمون و ارزیابی:** در این مرحله، مدل آموزش دیده با داده‌های تست ارزیابی می‌شود تا عملکرد آن بر روی داده‌هایی که دیده نشده‌اند، اندازه‌گیری شود. این مرحله به تنظیم نهایی الگوریتم کمک می‌کند و اطمینان حاصل می‌شود که مدل به درستی عمل می‌کند.
- ۵- **تکرار:** تکرار مراحل ۲ تا ۴ تا زمانی که شرایط توقف (مانند دستیابی به حداکثر تعداد تکرار یا دستیابی به سطح عملکرد مطلوب) برآورده شود.

۷۷ تغییر در گشتاور مکانیکی ورودی ژنراتور سنکرون به صورت پله ای از ۰ تا ۲.۰ pu با گام‌های ۰.۰۲۵ pu اعمال شده است. از روش ارزیابی متقابل^۴ برای تعیین دقت و اعتبار سنجی نتایج استفاده شده است. نتایج شبیه سازی برای دو حالت، یکی برای کاهش پله‌ای به میزان ۰.۲ pu و دیگری افزایش پله‌ای به اندازه ی ۱.۰ pu در گشتاور مکانیکی ژنراتور سنکرون که در زمان $t=1$ s اعمال شده‌اند، ارائه شده است.

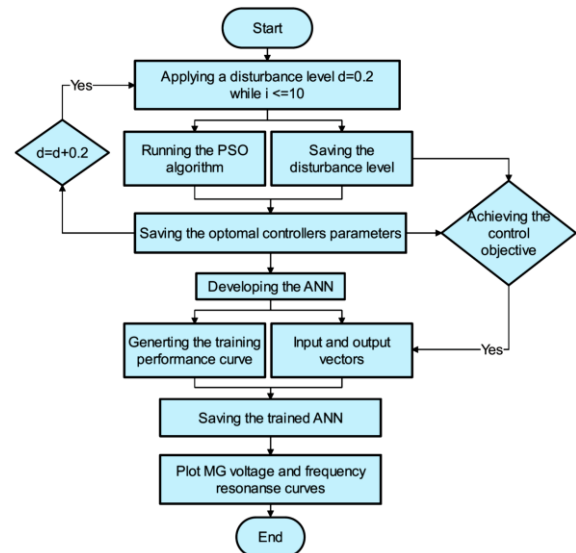
در شکل (۷) نتایج برای حالت اول یعنی کاهش پله‌ای به میزان ۰.۲ pu نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود الگوریتم استفاده شده در میرایی همه‌ی پاسخ‌های دینامیکی ولتاژ، فرکانس، و توان‌های اکتیو و راکتیو عملکرد بسیار بهتری از روش سنتی در تنظیمات پارامترهای کنترل کننده‌های PI دارد. نوسانات فرکانس و ولتاژ به سرعت میرا شده و در کمتر از ۱.۵ ثانیه به حالت پایدار رسیده است. همچنین، مقدار فراجشش فرکانس و زمان نشست نیز کمتر شده و فرکانس و ولتاژ سریع‌تر به مقدار مرجع باز می‌گردد که نشان از برتری کنترل کننده پیشنهادی است. در این حالت سیستم ذخیره انرژی باتری با تزریق یا جذب توان‌های اکتیو و راکتیو به ترتیب فرکانس و ولتاژ را بازپایی می‌کند و به این ترتیب نوسانات ریزشبه را کاهش داده و کیفیت توان ریزشبه را بهبود می‌دهد. همین اتفاق در میرایی نوسانات توان‌های اکتیو و راکتیو نیز افتاده است.

جدول (۲): پارامترهای الگوریتم PSO

پارامترهای الگوریتم	مقدار
تعداد متغیرهای تصمیم	۴
حداکثر تعداد تکرار	۲۰
ابعاد ازدحام	۱۰
وزن اینرسی	۱.۳۶
نسبت میرایی وزن اینرسی	۰.۹۵
ضریب آموزش شخصی	۲.۷۸
ضریب آموزش کلی	۲.۷۸

پارامترها کنترل کننده‌های PI هوشمند و سنتی در جدول (۳) نشان داده شده است. پارامترهای کنترل کننده سنتی از طریق روش سعی و خطا بدست آمده است. در اینجا سعی شده بهترین مقادیر برای کنترل کننده PI معمولی در نظر گرفته شوند.

شکل (۸) نتایج را برای حالت دوم یعنی افزایش پله‌ای به میزان ۱.۰ pu نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است کنترل کننده پیشنهادی در زمان کمتر از ۱.۵ ثانیه نوسانات را میرا می‌کند. پارامترها کنترل کننده پیشنهادی و سنتی در جدول (۳) نشان داده شده است. با توجه به نتایج،



شکل (۶): فلوچارت الگوریتم ترکیبی PSO-ANN

با استفاده از تابع آموزش "trainlm" که در جعبه ابزار ANN نرم افزار MATLAB موجود است، شبکه عصبی برای شرایط عملیاتی مختلف با استفاده از نتایج بهینه‌سازی آموزش داده می‌شود. سپس، با استفاده از بهینه‌سازی Levenberg-Marquardt [۳۲]، سیگنال خطا مجدداً تنظیم می‌شود تا ماتریس‌های وزن و بایاس‌ها بهینه شوند. فرآیند آموزش تا رسیدن به یک ANN بهینه ادامه می‌یابد که قادر به شناسایی پارامترهای کنترل کننده بهینه برای هر سطح اغتشاش در محدوده آموزش باشد. جدول (۲) پارامترهای الگوریتم PSO استفاده شده را نشان می‌دهد.

جدول (۱): تغییرات گشتاور مکانیکی ورودی ژنراتور سنکرون

سناریو	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
$P_{m,1}$	۰	۰	۰	۰	۰	۱.۰	۱.۰	۱.۰	۱.۰	۱.۰
$P_{m,2}$	۰.۲۰	۰.۴۰	۰.۶۰	۰.۸۰	۱.۰	۰	۰.۲۰	۰.۴۰	۰.۶۰	۰.۸۰
ΔP	۰.۲۰	۰.۴۰	۰.۶۰	۰.۸۰	۱.۰	-۱.۰	-۰.۸۰	-۰.۶۰	-۰.۴۰	-۰.۲۰

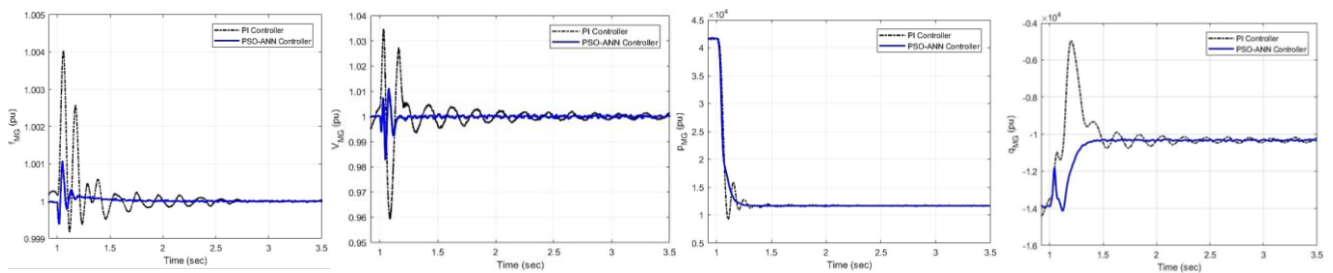
۴- نتایج شبیه‌سازی

برای بررسی عملکرد سیستم کنترلی پیشنهادی، دو اغتشاشات مختلف از جمله تغییرات ناگهانی گشتاور مکانیکی ورودی ژنراتور سنکرون و اتصال کوتاه سه‌فاز، به ریزشبه اعمال شده و پاسخ دینامیکی سیستم در حضور کنترل کننده PI با روش تنظیم سنتی ضرایب و در حضور کنترل کننده پیشنهادی بررسی و مقایسه شده است. این اغتشاشات در قالب دو سناریو مختلف اعمال و نتایج بررسی شده‌اند.

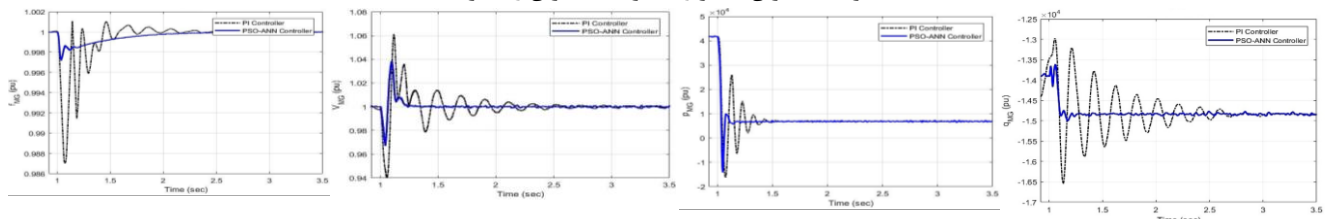
۴-۱- سناریوی اول تغییرات توان مکانیکی ژنراتور

سنکرون

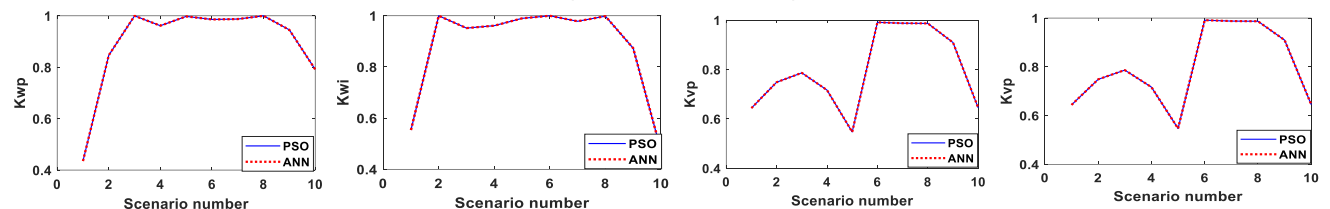
در این سناریو نوسانات ولتاژ و فرکانس در صورت بروز تغییرات در گشتاور مکانیکی ژنراتور سنکرون بررسی می‌شوند. برای بررسی و اعتبار سنجی الگوریتم شبکه عصبی در یافتن ضرایب بهینه‌ی کنترلر، تعداد



شکل (۷): رفتار دینامیکی ریز شبکه در مقابل تغییرات 0.2pu در توان مکانیکی ژنراتور سنکرون، (a) نوسانات ولتاژ، (b) نوسانات فرکانس، (c) نوسانات توان اکتیو و (d) نوسانات توان راکتیو



شکل (۸): رفتار دینامیکی ریز شبکه در مقابل تغییرات 0.1pu در توان مکانیکی ژنراتور سنکرون، (a) نوسانات ولتاژ، (b) نوسانات فرکانس، (c) نوسانات توان اکتیو و (d) نوسانات توان راکتیو



شکل (۹): مقایسه‌ی نتایج PSO و ANN آموزش داده شده

است اما دقت روش کم نشده است. در شکل (۹) نتایج ضرایب کنترلرها حاصل از اجرای شبکه عصبی آموزش دیده با تعداد ۱۰ سطح تغییرات پله در توان مکانیکی و نتایج حاصل از اجرای الگوریتم PSO نمایش داده شده است. پارامترها به صورت نرمالایز شده نشان داده شده‌اند. مشخص است که شبکه عصبی آموزش داده شده با دقت تقریباً ۱۰۰ درصدی قادر به تعیین ضرایب کنترل کننده فرکانس و ولتاژ براساس مقدار تغییرات گشتاور ورودی ژنراتور سنکرون بوده است.

جدول (۴): ضرایب کنترلرها برای تغییرات توان مکانیکی

حالت	K_{Pv}	K_{Iv}	$K_{P\omega}$	$K_{I\omega}$
۱	۹۰,۸۸	۲۱۵,۷۴	۴,۹۴	۸۶,۰۳
۲	۲۱۱,۶۶	۲۵۰	۷,۴۸	۱۴۳,۳۴
۳	۲۵۰	۲۳۷,۹۷	۷,۸۶	۱۲۸,۲۴
۴	۲۴۰,۳۹	۲۴۰,۳۲	۷,۱۶	۱۲۷,۲۲
۵	۲۴۹,۴۶	۲۴۷,۴۹	۵,۴۶	۱۴۷,۶۵
۶	۲۴۶,۴۸	۲۵۰	۹,۹۱	۱۵۰
۷	۲۴۶,۸۶	۲۴۴,۶۳	۹,۸۷	۱۴۹,۸۹
۸	۲۵۰	۲۴۹,۶۲	۹,۸۶	۱۴۹,۱۱
۹	۲۳۶,۳۲	۲۱۸,۳۸	۹,۰۹	۱۵۰
۱۰	۱۹۷,۹۲	۱۱۸,۶۸	۶,۴۴	۱۴۹,۶۹

تأثیرگذاری مثبت کنترل کننده PSO-ANN بر روی ریز شبکه تأیید می‌شود. در جدول (۴) مقادیر پارامترهای بهینه کنترل کننده ها با اعمال تغییرات نشان داده شده است.

کنترل کننده PSO-ANN در هر 10 تغییری که اعمال شد به خوبی عملکرد کرده است. این کنترل کننده به سرعت نوسانات ولتاژ و فرکانس و توان‌های اکتیو و راکتیو را میرا می‌کند و کیفیت توان را بهبود می‌بخشد. نتایج شبیه‌سازی اثربخشی و مقاومت رویکرد کنترل پیشنهادی را اثبات کرده است.

جدول (۳): ضرایب کنترلرها برای تغییرات 0.2pu در توان مکانیکی ورودی ژنراتور سنکرون در دو روش مقایسه شده

روش سنتی	روش هوشمند	پارامترهای کنترل کننده
۹۰	۹۰,۸۸	K_{Pv}
۱۵۰	۲۱۵,۷۴	K_{Iv}
۱	۴,۹۴	$K_{P\omega}$
۵۰	۸۶,۰۳	$K_{I\omega}$

همانطور از نتایج سناریو اول مشخص شد الگوریتم پیشنهادی دارای سرعت بالا در تعیین ضرایب بهینه است. با اینکه روش پیشنهادی سریع

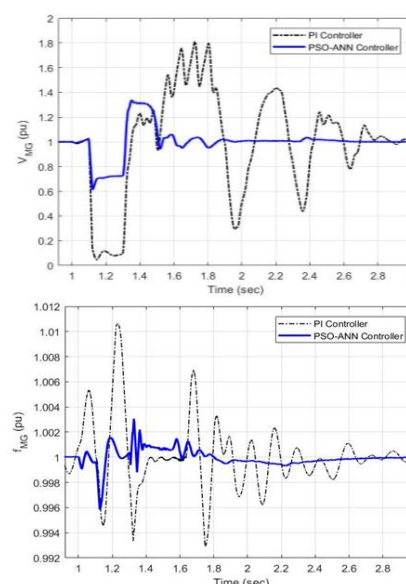
شبیه‌سازی‌ها عملکرد خوب و مؤثر کنترل‌کننده پیشنهادی را تایید می‌کند.

مراجع

- [1] A. Keyhani, "Design of Smart Power Grid Renewable Energy Systems", Smart Grid, WILEY, Chapter 2 (2011), pp. 93-170.
- [2] Z. Esmaili, M. R. Namavar Zeini Vandi, E. Anani, and M. Ehsan, "A Review on Energy Storage Systems Planning in Active Distribution Networks and its Applications", Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, vol. 19, pp. 255-275, 2022.
- [3] C.W. Gellings, "The smart grid: enabling energy efficiency and demand response", routledge CRC Press 1 (2009), pp.120-180.
- [4] R. Etz, T. Patarau, S. Daraban, D. Petreus, "Microgrid model for fast development of energy management algorithms, International Spring Seminar on Electronics Technology", International Spring Seminar on Electronics Technology, (2012), pp. 297-302.
- [5] F. Nejabatkhah, Y.W. Li, H. Tian, "Power Quality Control of Smart Hybrid AC/DC Microgrids: An Overview", IEEE Access, 7 (2019), pp. 52295-52318.
- [6] E. Sadeghi, M. Gholami, "Optimal Scheduling of Battery Energy Storage Systems for Simultaneous Participation in the Energy and Automatic Frequency Restoration Reserve Markets.", Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers 2023; 20 (2) :43-52, URL: <http://jiaeee.com/article-1-1456-fa.html>
- [7] A. Alkahtani, et al. (2020). "Power Quality in Microgrids Including Supraharmonics: Issues, Standards, and Mitigations", IEEE Access 8: 127104-127122
- [8] N. Hatziaargyriou, "Microgrids Architectures and Control", Smart Grid -WILEY, Chapter 2&3 (2014), pp. 22-80.
- [9] X. Feng, A. Shekhar, F. Yang, R. E. Hebner, P. Bauer, "Comparison of Hierarchical Control and Distributed Control for Microgrid", Electric Power Components and Systems, 45 (2017), pp.1043-1056.
- [10] W. Al-Saedi, S.W. Lachowicz, D. Habibi, O. Bass, "Voltage and frequency regulation-based DG unit in an autonomous microgrid operation using Particle Swarm Optimization", Electrical Power & Energy Systems, 53 (2013), pp.742-751.
- [11] H. Bevrani, F. Habibi, P. Babahajyani, M. Watanabe, Y. Mitani, Intelligent "Frequency Control in an AC Microgrid: Online PSO-Based Fuzzy Tuning Approach", IEEE Transactions on Smart Grid, 3 (2012), pp. 1935-1944.
- [12] T. Wu, X. Shi, L. Liao, C. Zhou, H. Zhou, Y. Su, "A Capacity Configuration Control Strategy to Alleviate Power Fluctuation of Hybrid Energy Storage System Based on Improved Particle Swarm Optimization", Energies, 12(4) (2019), p.642.
- [13] C. Mu, Y. Tang and H. He, "Improved Sliding Mode Design for Load Frequency Control of Power System Integrated an Adaptive Learning Strategy", in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 64(2017), no. 8, pp. 6742-6751.
- [14] Wu. Tiezhou, Ye. Fanchao, Su. Yuehong, Wang. Yubo, Riffat. Saffa, "Coordinated control strategy of DC microgrid with hybrid energy storage system to smooth

۴-۲- سناریوی دوم اتصال کوتاه

یکی از اغتشاشات بزرگ در شبکه‌های قدرت و همچنین در ریزشبکه‌ها، خطای اتصال کوتاه است. در این قسمت عملکرد روش پیشنهادی در مقابل این اغتشاش، ارزیابی خواهد شد. اتصال کوتاه سه فاز که یکی از خطاهای شدید در شبکه است، در نقطه‌ی اتصال مشترک به شبکه اعمال خواهد شد. خطا در زمان ۱,۱ ثانیه اتفاق می‌افتد و در زمان ۱,۳ ثانیه رفع می‌شود. همانطور که در شکل (۱۰) نشان داده شده است، ولتاژ و فرکانس شبکه در روش پیشنهادی کمتر افت کرده و بعد از رفع خطا خیلی سریع و در ۰,۶ ثانیه به حالت پایدار رسیده‌اند. در حالی که در کنترل‌کننده سنتی بعد از رفع خطا، ولتاژ دارای نوسانات زیادی است و زمان زیادی طول می‌کشد تا به حالت پایدار برسد. چون خطای اتصال کوتاه، اغتشاش شدید محسوب می‌شود، قیود تغییرات ولتاژ و فرکانس در مقادیر بزرگتری تنظیم شده‌اند.



شکل (۱۰): مقایسه‌ی نوسانات ولتاژ و فرکانس ریزشبکه بعد از خطای اتصال کوتاه سه فاز

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق از سیستم ذخیره انرژی باتری برای افزایش کیفیت توان ریزشبکه تحت اغتشاشات مختلف استفاده شده است. در سیستم کنترلی پیشنهاد شده برای باتری، ولتاژ و فرکانس ریزشبکه با استفاده از الگوریتم PSO-ANN کنترل می‌شود. پارامترهای کنترل‌کننده سیستم کنترلی با استفاده از الگوریتم PSO تحت اغتشاشات مختلف بهینه شده‌اند. در نتیجه، پارامترهای بهینه‌شده و اغتشاش مربوطه در مجموعه‌های بردار ورودی و بردار خروجی مرتب می‌شوند تا شبکه عصبی مصنوعی را برای تنظیم آنلاین کنترل‌کننده‌ها آموزش دهند. در نهایت ۲ سناریو شامل اغتشاشات مختلف به ریزشبکه اعمال شده و عملکرد کنترل‌کننده پیشنهادی با کنترل‌کننده PI مقایسه شده است. نتایج

- optimised model predictive control by PSO", IET Renew. Power Gener. 16 (2022), pp.2088–2100.
- [25] L. M. Kandasamy, J. Kanakaraj and S. J, "Artificial Neural Network Based Intelligent Controller Design for Grid-Tied Inverters of Microgrid under Load Variation and Disturbance", 2021 4th International Conference on Recent Developments in Control, Automation & Power Engineering (RDCAPE), Noida, India, (2021), pp.148-153.
- [26] H. Li, X. Wang, and J. Xiao, "Differential evolution-based load frequency robust control for micro-grids with energy storage systems", *Energies*, vol. 11, no. 7, p. 1686, Jun. 2018.
- [27] J. ALSHEHRI, M. KHALID, "Power Quality Improvement in Microgrids Under Critical Disturbances Using an Intelligent Decoupled Control Strategy Based on Battery Energy Storage System", *IEEE Access*, 7 (2019), pp. 147314-147326.
- [28] Ma. Tao, Yang. Hongxing, Lu. Lin, "Solar photovoltaic system modeling and performance prediction", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 36 (2014), pp. 304-315.
- [29] M. Rouholamini and M. Rashidinejad, "Simultaneous Scheduling of Energy and Primary Reserve Considering Congestion Constraints in Transmission Lines", *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*, vol. 9, pp. 1-10, 2012.
- [30] R. Venkateswari, S. Sreejith, "Factors influencing the efficiency of photovoltaic system", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101 (2019), pp. 376-394.
- [31] M.A. Hannan, S.B. Wali, P.J. Ker, M.S. Abd Rahman, M. Mansor, V.K. Ramachandramurthy, K.M. Muttaqi, T.M.I. Mahlia, Z.Y. Dong "Battery energy-storage system: A review of technologies, optimization objectives, constraints, approaches, and outstanding issues", *Journal of Energy Storage*, 42 (2021), pp.103023.
- [32] L. Maharjan, S. Inoue, H. Akagi and J. Asakura, "State-of-Charge (SOC)-Balancing Control of a Battery Energy Storage System Based on a Cascade PWM Converter", in *IEEE Transactions on Power Electronics*, 24(2009), pp. 1628-1636.
- power output fluctuation", *International Journal of Low-Carbon Technologies*, Vol 15, (2020), pp. 46–54.
- [15] W. Ma, W. Wang, X. Wu, R. Hu, F. Tang, W. Zhang, "Control Strategy of a Hybrid Energy Storage System to Smooth Photovoltaic Power Fluctuations Considering Photovoltaic Output Power Curtailment", *Sustainability* (2019),11(5), p.1324.
- [16] N.R. Tummuru, U. Manandhar, A. Ukil, H.B. Gooi, Sathish K. Kollimalla, S. Naidu, "Control strategy for AC-DC microgrid with hybrid energy storage under different operating modes", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 104 (2019), pp.807-816.
- [17] B. Anindya, P.K. Ray, B. Subudhi, A. Ghosh, "Power Management Strategies in a Hybrid Energy Storage System Integrated AC/DC Microgrid: A Review", *Energies*, 15(19) (2022), pp.7176.
- [18] Yu. Jie, Liao. Siyang, Xu. Jian, "Frequency control strategy for coordinated energy storage system and flexible load in isolated power system", *Energy Reports*, 8(5) (2022), pp. 966-979.
- [19] M. Maaruf, K. Khan, M. Khalid, "Robust Control for Optimized Islanded and Grid-Connected Operation of Solar/Wind/Battery Hybrid Energy", *Sustainability*, 14(9) (2022), pp.5673.
- [20] A.E.-S. Salem, O.M. Salim, S.I. Arafa, "New triple-action controller for inverter power quality improvement", *Computers & Electrical Engineering*, 81 (2020), p. 106543.
- [21] M. E. Akdogan, S. Ahmed, "Improving Power Quality and Power Sharing in Unbalanced Multi-Microgrids Using Energy Storage System", 2021 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Phoenix, AZ, USA, (2021), pp. 2733-2739.
- [22] M. Kermani, "Transient voltage and frequency stability of an isolated microgrid based on energy storage systems", in *Proc. 16th Int. Conf. Environ. Electr. Eng. (EEEIC)*, Florence, Italy, Jun. 2016, pp. 1–5
- [23] Kaushal, Jitender; Basak, Prasenjit, "Power quality control through automated demand side management in microgrid equipped with battery energy storage for protection", *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2020, 14, (12), p. 2389-2398.
- [24] M. Dashtdar, A. Flah, C.Z. El-Bayeh, M. Tostado-Véliz, A. Al Durra, S.H.E. Abdel Aleem, Z.M. Ali, "Frequency control of the islanded microgrid based on

زیر نویس ها

¹ The Change and Observation Algorithm

² State Of Charge

³ Integral-Squared Error

⁴ Cross-Validation