



The University of Tehran Press

## Bus Voltage Stabilization of DC Microgrid by Controlling the Charging and Discharging of Energy Storage Devices Using ANFIS

Ali Nahavandi<sup>1\*</sup> | Hossein Ahmadi Vahed<sup>2</sup>

1. Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Malayer University, Malayer, Iran. Email: [ali.nahavandi@malayeru.ac.ir](mailto:ali.nahavandi@malayeru.ac.ir)

2. Master's Graduate, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Malayer University, Malayer, Iran. Email: [h.ahmadvahed778@gmail.com](mailto:h.ahmadvahed778@gmail.com)

### ARTICLE INFO

**Article type:**  
Research Paper

**Article History:**  
Received 01 February 2025  
Revised 15 March 2025  
Accepted 09 April 2025  
Published Online 22 June 2025

**Keywords:**  
Microgrid,  
Distributed Generation Source,  
Fuzzy Controller,  
Teaching Learning Based Optimization  
(TLBO) Algorithm.

### ABSTRACT

In this paper, stabilization of a DC microgrid is investigated. The examined microgrid operates in an islanded mode, with a solar-based distributed generation source. The microgrid consists of four main components: a stochastic source, a stochastic load, a balancing load, and a stabilizer. The most crucial part of this circuit is the stabilizer branch, which includes a battery branch, a supercapacitor branch, and a voltage excess discharge branch. Various methods exist for controlling and stabilizing the voltage of microgrid, including the use of PI controllers and fuzzy control. In this paper, to reduce voltage ripple and stabilize the microgrid, the optimization of the membership functions of the fuzzy controller is performed using the Teaching-Learning-Based Optimization (TLBO) algorithm. The optimized outputs of the fuzzy controller with the TLBO algorithm lead to improvement in the switching rates of the three stabilizer branches, ultimately resulting in reduced voltage ripple, decreased battery charge and discharge cycles, and increased battery lifespan that is used in microgrid. The model of the examined microgrid is simulated in Matlab/Simulink, and three control methods—PI, fuzzy, and fuzzy optimized by TLBO algorithm—are investigated and compared.

**Cite this article:** Nahavandi, A. & Ahmadi Vahed, H. (2025). Bus Voltage Stabilization of DC Microgrid by Controlling the Charging and Discharging of Energy Storage Devices Using ANFIS. *Journal of Sustainable Energy Systems*, 4 (3), 311-338. DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.390599.1123>



© Ali Nahavandi, Hossein Ahmadi Vahed  
DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.390599.1123>

**Publisher:** University of Tehran Press.

### Introduction

The increasing penetration of distributed generation sources in power grids and the transformation of passive distribution networks into active distribution networks necessitate the aggregation of these resources to enhance participation, visibility, and create a suitable interface between these resources and the power grid. One method for aggregating distributed generation sources is through microgrids. In passive networks, there is no energy generation in the grid. However, in active networks, energy is generated depending on the number of energy generation sources, which can be less than or greater than the consumption of the consumers, based on the energy production capacity of these networks. Microgrids are low-voltage or medium-voltage active networks that can operate independently from the main grid and can function in an island mode due to their operational independence. Additionally, microgrids can achieve stability through the proper utilization of energy storage devices (such as supercapacitor banks and batteries), considering their different characteristics. Therefore, by using distributed energy generation resources in microgrids on one hand, and utilizing energy storage devices on the other hand, the reliability of a power network can be significantly enhanced. Furthermore, both classical methods and modern approaches can be employed to stabilize these

networks [1,2,3]. On the other hand, various control methods exist for managing microgrid operations. Including droop control, PI control, fuzzy control, neural networks, etc.

### **Methodology**

Based on the investigations conducted in this paper, a microgrid composed of four main components is examined: a variable source, a variable load, a bidirectional stabilizer, and a balanced load. The most crucial part of this circuit is the stabilizer branch, which consists of a battery branch, a capacitor branch, and an excess voltage discharge branch.

Various control methods are available for managing microgrids. One such method is classical control or Proportional-Integral (PI) control. The implementation approach is based on two cascading PI controllers, which has a pair controller designated for each branch. Another method is fuzzy control. In this approach, there are four inputs for the fuzzy controller: bus voltage error, integral of bus voltage error, battery voltage, and capacitor voltage. These inputs are utilized through a series of fuzzy rules to generate three reference currents as outputs: battery current, capacitor current, and excess voltage discharge current. The input and output values are normalized within ranges of  $[-1, 1]$  or  $[0, 1]$ . This normalization facilitates adjustments when the values of storage elements change.

In this paper, to reduce voltage ripple and stabilize the microgrid, optimization of the membership functions of the fuzzy controller is performed using teaching learning based optimization (TLBO) algorithm. The optimization algorithm employed is part of a set of metaheuristic methods and is used in this paper to properly adjust the fuzzy membership functions characteristics.

### **Results**

The introduced microgrid structure is simulated in Matlab/Simulink software. To compare the performance of the controllers, three different scenarios have been considered. The first scenario includes a Proportional-Integral (PI) controller, the second scenario includes a basic fuzzy controller, and the third scenario includes an optimized fuzzy controller. The generated power and consumed load have been determined randomly and applied to all three systems. The bus voltage of the microgrid is obtained for three different cases, and the three control methods PI, optimized fuzzy control, and the fuzzy control method have the lowest voltage ripple, respectively. However, the difference in bus voltage ripple in these three methods is very small and the voltage error of the three scenarios is almost the same, resulting in an error of less than 1%. Additionally, the battery and supercapacitor currents for the three control methods PI, fuzzy, and optimized fuzzy have been presented.

Another important parameter to consider is that the lifespan of batteries is dependent on their charge and discharge cycles; as the number of charge and discharge cycles increases, their lifespan decreases. In contrast, supercapacitors are not as sensitive to charging and discharging as batteries. Therefore, the charge and discharge rates of the battery have been taken into account during the fuzzy training phase. By comparing the battery current graphs in the three defined scenarios, it can be observed that the controllers have reached different outcomes in this regard. In fact, according to the simulation results obtained, the charge and discharge rates of the battery in the optimized fuzzy controller are lower than those of the other two controllers, leading to the conclusion that the optimized fuzzy controller is superior to the other two controllers.

### **Conclusion**

In this paper, a DC microgrid consisting of a photovoltaic source with random generation and random load has been investigated. When the load and generation are unpredictable and the grid operates in an island mode, stabilizing the microgrid becomes very challenging. By utilizing energy storage elements, it becomes possible to stabilize the grid by charging these elements during low load periods and discharging them during high load periods. In this paper, scenarios of more, less and equal power generation to consumption have been considered, and the performance of the microgrid in these three cases has been investigated. The results are compared in the presence of three controllers, Proportional-Integral (PI), fuzzy, and optimized fuzzy controllers. Ultimately, based on the comparison presented for these three types of controllers, it has been determined that the voltage error in the three scenarios is quite similar, resulting in an error of less than 1%. Another important feature for assessing and evaluating the controllers is the amount of battery charge and discharge over the simulation period. The simulation results showed that the optimized fuzzy control method performs better than PI and fuzzy control methods.



انتشارات دانشگاه تهران

## فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار

شاپا الکترونیک: ۸۶۹۳-۲۹۸۰

سایت نشریه: <https://ses.ut.ac.ir>

# پایدارسازی ولتاژ شین ریزشکه جریان مستقیم با کنترل نحوه شارژ و دشارژ ذخیره‌سازهای موجود در ریزشکه به روش ANFIS

علی نهاوندی<sup>۱\*</sup> | حسین احمدی واحد<sup>۲</sup>

۱. نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران. رایانامه: [ali.nahavandi@malayeru.ac.ir](mailto:ali.nahavandi@malayeru.ac.ir)
۲. کارشناسی ارشد، گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران. رایانامه: [h.ahmadivahed778@gmail.com](mailto:h.ahmadivahed778@gmail.com)

### چکیده

### اطلاعات مقاله

در این مقاله پایدارسازی ریزشکه DC مورد بررسی قرار گرفته است. ریزشکه مورد بررسی به صورت جزیره‌ای عمل می‌کند و منبع تولید پراکنده مورد استفاده در آن از نوع خورشیدی است. ریزشکه مورد بررسی از چهار بخش عمده تشکیل شده که عبارت‌اند از: منبع تصادفی، بار تصادفی، بار تعادلی و پایدارساز. مهم‌ترین قسمت این مدار، شاخه پایدارساز است که از شاخه باتری، شاخه ابرخازن و شاخه تخلیه ولتاژ مازاد تشکیل می‌شود. روش‌های مختلفی برای کنترل و پایدارسازی ولتاژ ریزشکه از جمله استفاده از کنترل‌کننده PI و کنترل فازی وجود دارد. در این مقاله به منظور کاهش ریبیل ولتاژ و پایدارسازی ریزشکه، بهینه‌سازی توابع عضویت کنترل‌کننده فازی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری (TLBO) انجام شده است. خروجی‌های بهینه‌شده کنترل‌کننده فازی با الگوریتم TLBO<sup>۱</sup> موجب بهینه‌سازی در نرخ کلیدزنی سه شاخه پایدارساز می‌شوند و در نهایت، به کاهش ریبیل ولتاژ، کاهش شارژ و دشارژ باتری و افزایش عمر باتری‌ها در ریزشکه منجر خواهند شد. در این مقاله مدل ریزشکه مورد بررسی در نرم‌افزار Matlab/Simulink شبیه‌سازی شده و سه روش کنترل PI، فازی و فازی بهینه‌شده توسط الگوریتم مبتنی بر آموزش و یادگیری مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته‌اند.

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۲۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۲۰

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۴/۰۱

کلیدواژه:

ریزشکه،

منبع تولید پراکنده،

کنترل‌کننده فازی،

الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و

یادگیری (TLBO).

**استناد:** نهاوندی، علی و احمدی واحد، حسین (۱۴۰۴). پایدارسازی ولتاژ شین ریزشکه جریان مستقیم با کنترل نحوه شارژ و دشارژ ذخیره‌سازهای موجود در ریزشکه به روش ANFIS. فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار، ۴ (۳) ۳۱۱-۳۳۸.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.390599.1123>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© علی نهاوندی، حسین احمدی واحد

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.390599.1123>



## ۱. مقدمه

افزایش نفوذ منابع تولید پراکنده در شبکه‌های برق و تبدیل شدن شبکه‌های توزیع غیرفعال به شبکه‌های توزیع فعال، لزوم جمع‌آوری این منابع با اهداف افزایش مشارکت، رویت‌پذیری و ایجاد واسطی مناسب میان این منابع و شبکه برق را بیشتر می‌کند. یکی از روش‌های جمع‌آوری منابع تولید پراکنده، ریزشبکه است. در شبکه‌های غیر فعال هیچ‌گونه تولید انرژی در شبکه وجود ندارد، ولی در شبکه‌های فعال با توجه به تعداد منابع تولید انرژی، مقداری از انرژی تولید می‌شود که با توجه به ظرفیت تولید انرژی در این شبکه‌ها به اندازه مصرف، کمتر، یا بیشتر از مصرف مشترکان برق تولید می‌شود. ریزشبکه‌ها شبکه‌های فعال ولتاژ پایین یا ولتاژ متوسطی هستند که به دلیل استقلال در بهره‌برداری، می‌توانند از شبکه اصلی جدا شده و به صورت جزیره‌ای بهره‌برداری شوند. همچنین، ریزشبکه‌ها را می‌توان از طریق استفاده صحیح از وسایل ذخیره‌سازی انرژی (بانک ابرخازن و باتری) به پایداری رساند. از این‌رو، با بهره‌گیری از منابع تولید انرژی پراکنده در شبکه‌های ریزشبکه از یک سو و استفاده از ادوات ذخیره انرژی از سوی دیگر، قابلیت اطمینان یک شبکه قدرت را می‌توان تا حد بالایی ارتقا داد. همچنین، در پایداری این شبکه‌ها می‌توان از روش‌های کلاسیک و نیز روش‌های نوین بهره گرفت. امروزه، بهره‌گیری از انرژی‌های نو در تمامی کشورهای دنیا در دستور کار قرار گرفته است. برای کمک به تولید انرژی از این طریق حتی شرکت‌های برق منطقه‌ای نیز حاضر هستند با بهایی بالاتر از قیمت واقعی این انرژی‌ها برق تولیدی از طریق مشترکان را خریداری کرده و به شبکه توزیع جهت استفاده سایر مشترکان تزریق کنند [۱-۳].

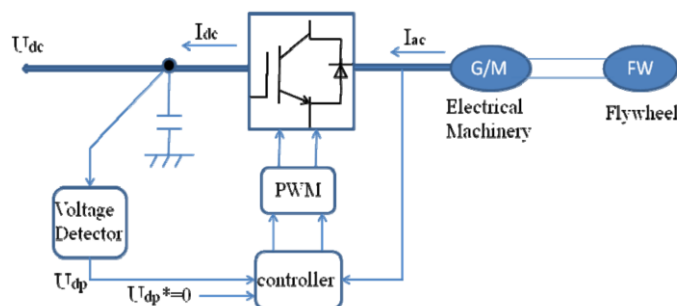
در پژوهش Thounthong و همکاران (۲۰۱۲) سیستم مورد بررسی، یک ژنراتور فتوولتائیک، پیل سوختی و یک بانک خازنی به شبکه متصل شده است. پیل سوختی به عنوان مکمل مستقیم برای فتوولتائیک به کار رفته است، و یک کنترلگر فازی با استفاده از بانک خازنی نقش پایداری را دارد. نتایج به دست آمده در مقاله یادشده نشان‌دهنده تنظیم خوب ولتاژ شین در حضور منابع تولید مکمل است [۴]. در پژوهش Sathishkumar و همکاران (۲۰۱۲) نیز یک مطالعه روی پایداری منابع فتوولتائیک به همراه باتری و بانک خازنی صورت گرفته است [۵]. در این مقاله، سیستم کنترلی تغییرات بار را به تغییرات بلندمدت و کوتاه‌مدت جداسازی کرده است، و با استفاده از باتری به تغییرات بلندمدت و به کمک بانک خازنی به تغییرات کوتاه‌مدت پاسخ گفته است. نتایج شبیه‌سازی کاهش فشار روی سیستم باتری را نشان می‌دهد، در حالی که باتری و بانک خازنی، برای رفع نیازمندی‌های توان بالا و کوتاه‌مدت، در سیستم یکپارچه شده‌اند.

در پژوهش Papadimitriou و همکاران (۲۰۰۹) بررسی شده است که چطور کنترلگر پایداری فازی ترکیبی پیل سوختی و باتری می‌تواند عملکرد مناسبی در حالت‌های متصل به شبکه و حالت جزیره‌ای داشته باشد [۶]. علاوه بر تنظیم ولتاژ در شرایط جزیره‌ای، سیستم طوری عمل می‌کند تا ضریب توان را هنگام وصل به شبکه اصلی نیز تصحیح کند. در پژوهش Morstyn و همکاران (۲۰۱۴) یک روش تعادل سطح انرژی دینامیکی بین وسایل ذخیره انرژی پراکنده به عنوان یک استراتژی برای بهبود تنظیم فرکانس و قابلیت اطمینان در ریزشبکه‌های با رهیافت «کنترل افت» معرفی شده است. این هدف با سیستم کنترل مشارکتی پراکنده حاصل شده است که توان خروجی وسیله ذخیره انرژی با کنترل افت را اصلاح می‌کند، به طوری که این وسایل ذخیره انرژی به حالت تعادل انرژی برسند [۷].

نحوه شارژ و دشارژ باتری و خازن مورد استفاده در ریزشبکه‌ها در مقالات بسیاری مورد توجه بوده است. در پژوهش Jian و همکاران (۲۰۱۳) چند روش مهم مورد استفاده در پایداری ریزشبکه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است [۸]. در این مقاله چهار ایده کلی به منظور پایداری که عبارت‌اند از: دروپ کنترل<sup>۱</sup>، کنترل سلسله‌مراتبی، کنترل منطق فازی و معماری بر پایه سیستم‌های چندعاملی مطرح شده است. به منظور پایداری ریزشبکه در این مقاله به روش‌های مختلفی اشاره شده است. تنظیم نرخ کلیدزنی شاخه ذخیره‌ساز به منظور کنترل چگونگی شارژ و دشارژ یکی از ایده‌های مطرح شده بوده که در شکل ۱ یک روش نمایش داده شده است.

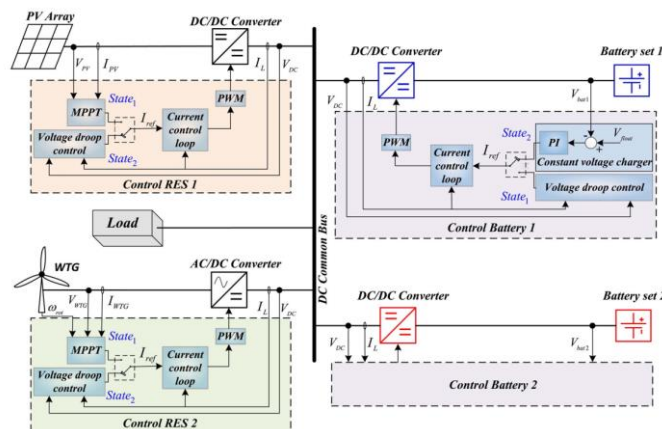
در پژوهش Diaz NL و همکاران (۲۰۱۴) به بررسی چگونگی کنترل ولتاژ ریزشبکه بدون استفاده از تکنیک دروپ کنترل

پرداخته شده است [۹]. در این مقاله مفهوم بدون دروپ به منظور تأمین توان مورد نیاز ریزشبه از دو منبع تولید پراکنده بادی و خورشیدی استفاده شده است. با توجه به شرایط سختی که منابع تولید پراکنده برای پایدار شدن دارند استفاده از تکنیک بدون دروپ در این مقاله مطرح شده است.



شکل ۱. بلوک دیاگرام کنترلی مورد استفاده در مقاله مورد بررسی

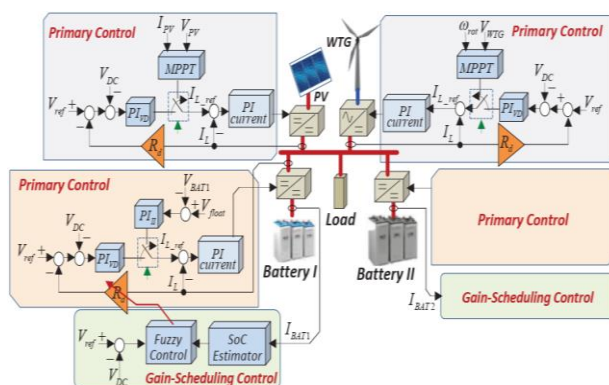
ایده مورد استفاده در پژوهش Diaz NL و همکاران جایگزین کردن ساختار فازی مقاوم به منظور جبران حلقه کنترل دروپ در سیستم مورد نظر است. در این مقاله با تنظیم درست توابع عضویت فازی می‌توان عناصر ذخیره‌ساز مورد استفاده در سیستم را به نحوی کنترل کرد که عملکرد کنترل دروپ پوشش داده شود. نحوه پیکربندی سیستم در شکل ۲ آورده شده است تا جایگاه کنترل دروپ در این سیستم مشخص شود. در این مقاله به منظور پیاده‌سازی دروپ کنترل بدون ساختار متعارف آن، از یک مقاومت استفاده می‌شود که این مقاومت توسط کنترل‌کننده منطق فازی تنظیم می‌شود.



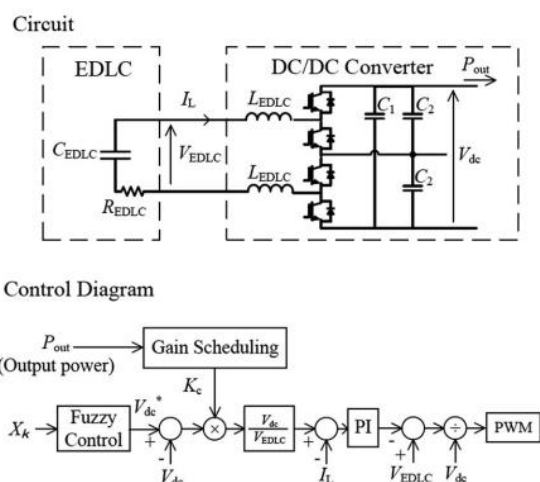
شکل ۲. نمایش ساختار کنترلی مورد استفاده در ریزشبه مورد بررسی

در پژوهش‌های پژوهش Diaz NL و همکاران (۲۰۱۴) و Lu X و همکاران (۲۰۱۳) ابتدا اهمیت استفاده از ریزشبه مورد بررسی قرار گرفته و سپس ساختار کنترلی مطرح شده است [۱۰ و ۱۱]. در این مقالات روش کنترل ریزشبه که شامل عناصر ذخیره‌ساز است، استفاده از کنترل مناسب به منظور جلوگیری از دشارژ کامل و اضافه شارژ در سیستم است. در این مقاله به منظور بهبود ساختار منطق فازی از جدول نرخ بهره استفاده شده است.

در ریزشبه‌ها عدم قطعیت بسیار زیادی وجود دارد و به منظور مقابله با این عدم قطعیت باید کنترل مناسبی در نظر گرفت و به همین منظور، استفاده از کنترل‌کننده منطق فازی بسیار مناسب بوده و به بهبود پایداری آن کمک می‌کند. در پژوهش Kakigano و همکاران (۲۰۱۲) به ارائه روشی که بر مبنای حلقه فازی موجود در مدار بوده پرداخته شده است [۱۲]. در این روش با توجه به پوششی که کنترل‌کننده منطق فازی در سیستم می‌دهد عدم قطعیت‌ها به صورت بسیار مناسبی در نظر گرفته شده و در نهایت، نتایج نشان‌دهنده عملکرد مناسب این کنترل‌کننده بوده است. ساختار مورد استفاده در شکل ۴ آورده شده است.



شکل ۳. شماتیک ریزشبه‌مورد بررسی با در نظر گرفتن کنترل با استفاده از جدول نرخ بهره

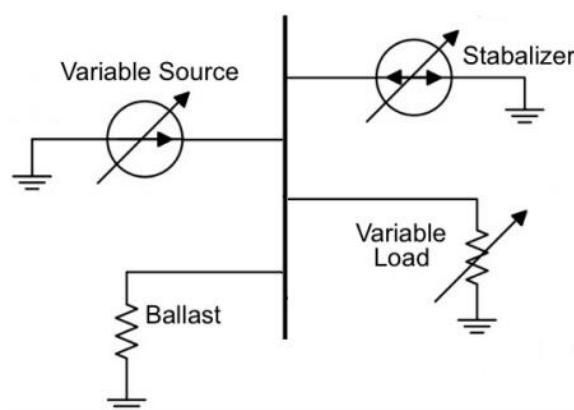


شکل ۴. نمایی از حلقه کنترل فازی مورد استفاده در شبیه‌سازی انجام‌شده در این مقاله

در پژوهش Alkawak و همکاران (۲۰۲۴) از یک روش ترکیبی برای تنظیم ولتاژ شین در ریزشبه DC استفاده شده است [۱۳]. در این روش با کنترل شارژ و دشارژ باتری ولتاژ شین تنظیم می‌شود. در این مقاله از یک الگوریتم ترکیبی که ترکیبی از الگوریتم بهینه‌سازی زنبور عنبوتی (SWO) و شبکه عصبی است، برای کنترل شارژ و دشارژ باتری استفاده کرده است. روش به‌کاررفته در این مقاله باعث کاهش هزینه و بهبود توان باتری می‌شود. در پژوهش Usvarman و همکاران (۲۰۲۴) از روش کنترلی PI و مد لغزشی برای کنترل و تعادل توان در ریزشبه DC استفاده شده است [۱۴]. در ریزشبه مورد بررسی در این مقاله از پنل‌های خورشیدی به عنوان منبع تولید توان استفاده شده است. همچنین، باتری و ابر خازن به عنوان منابع ذخیره‌کننده انرژی به کار رفته‌اند. برای ارتباط بین منابع ذخیره‌کننده انرژی و شین DC در این مقاله از مبدل Cuk استفاده شده است. در پژوهش Wu ZQ و همکاران (۲۰۲۴) از شبکه عصبی RBF برای حذف عدم قطعیت و فرونشاندن اغتشاشات سیستم در ریزشبه DC استفاده شده است که عملکردی بهتر از روش کنترلی PI دارد [۱۵]. در پژوهش Li X و همکاران (۲۰۲۴) ترکیبی از روش کنترل پیش‌بین و مد لغزشی برای کنترل و پایداری ولتاژ شین DC ریزشبه و کاهش نوسانات ولتاژ آن استفاده شده است [۱۶]. منبع تولید انرژی در این ریزشبه توربین‌های بادی و پنل‌های خورشیدی هستند. در این مقاله از مبدل‌های دوطرفه برای کنترل شارژ و دشارژ ذخیره‌کننده‌های انرژی استفاده شده است. در پژوهش Singh PN و همکاران (۲۰۲۳) یک ریزشبه DC که شامل نیروگاه زیست‌توده، نیروگاه گازی، ذخیره‌کننده‌های انرژی و بار است، مورد بررسی قرار گرفته است [۱۷]. در این مقاله برای کنترل ذخیره‌کننده‌های انرژی از کنترل‌کننده PI استفاده کرده است.

در پژوهش Louassaa K (۲۰۲۵) از دو لایه کنترلی برای ریزشبه DC استفاده شده است [۱۸]. در لایه اول از کنترل دروپ برای کنترل توان بین منابع تولید پراکنده استفاده شده است. در لایه دوم از ترکیبی از روش‌های کنترلی مد لغزشی و  $H_\infty$  برای کنترل و پایداری سازی ولتاژ شین استفاده شده است. در پژوهش Rajput AK و همکاران (۲۰۲۳) برای کنترل ریزشبه DC شامل منابع ذخیره‌کننده باتری و ابرخازن از روش کنترل بر پایه فیلتر کردن (FBC) و کنترل PI برای تولید سیگنال‌های مرجع استفاده شده است [۱۹].

در پژوهش Smith RD و همکاران (۲۰۱۸) ساختار یک ریزشبه مناسب به منظور بررسی انواع کنترل‌کننده‌ها ارائه شده که استفاده از کنترل‌کننده منطق فازی نتایج بسیار مناسب در بر داشته و به این منظور این نتایج با کنترل‌کننده تناسبی انتگرالی مقایسه شده است [۲۰]. استفاده از چهار قسمت اساسی در مدار ریزشبه مورد بررسی، اعمال منطق کنترلی مناسبی را امکان‌پذیر کرده است. در این مقاله هدف ثابت نگه داشتن ولتاژ باس روی ۱۰۰ ولت بوده است. ساختار شبکه مورد استفاده در این شبیه‌سازی به صورت شکل ۵ است.



شکل ۵. ساختار شبکه شبیه‌سازی شده در این مقاله

مقاله Smith RD و همکاران (۲۰۱۸) به مشخص کردن ساختاری مناسب برای مقالات دیگر منجر شده است. در این مقاله مشخص شده که با در نظر گرفتن کنترل‌کننده منطق فازی می‌توان سطح شارژ باتری را بالاتر نگه داشت. نتایج این مقاله نیز یک بار دیگر برتری کنترل‌کننده منطق فازی را نسبت به کنترل‌کننده تناسبی انتگرالی نشان داده است. با توجه به بررسی‌های صورت‌گرفته در این مقاله، ریزشبه‌ای که از چهار بخش عمده تشکیل شده که عبارت‌اند از: منبع متغیر، یک بار متغیر، یک پایداری‌ساز دوطرفه و یک بار تعادلی، مورد بررسی قرار می‌گیرد. مهم‌ترین قسمت این مدار شاخه پایداری‌ساز است، که از شاخه باتری، شاخه خازن و شاخه تخلیه ولتاژ مازاد تشکیل می‌شود. در این مقاله به منظور کاهش ریبیل ولتاژ و پایداری سازی ریزشبه، بهینه‌سازی توابع عضویت کنترل‌کننده فازی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری (TLBO) انجام می‌شود. در بخش ۲ به مدل‌سازی سیستم ریزشبه مورد بررسی پرداخته شده است. در بخش ۳ سیستم کنترلی مورد استفاده شرح داده شده است. در بخش ۴ نتایج شبیه‌سازی مورد بررسی قرار گرفته و در بخش ۵ نتیجه‌گیری آورده شده است.

## ۲. مدل سیستم

در این بخش ساختار ریزشبه مورد بررسی ارائه شده و مدل هریک از اجزای آن ارائه شده و معادلات مربوطه توضیح داده شده است. در این مدار چهار قسمت اصلی وجود دارد که عبارت‌اند از: شاخه تولید توان تصادفی، شاخه پایداری، شاخه بار تصادفی و شاخه بار تعادلی (بار بالاست<sup>۱</sup>). در این مدار تولید تصادفی از طریق خورشید بوده و دلیل اینکه نام تصادفی روی آن نهاده

1. Filtration-Based Control  
2. Ballast Load

شده، تغییرات ناخواسته‌ای است که طی روز بر اثر شرایط جوی روی سلول خورشیدی رخ می‌دهد. در ادامه، قسمت‌های مختلف این مدار با در نظر گرفتن معادلات آن تشریح می‌شوند.

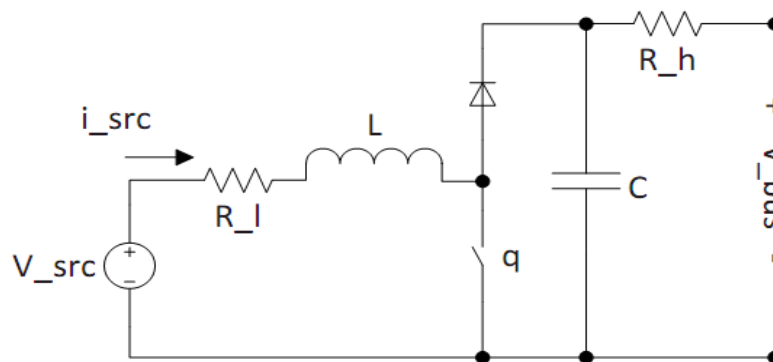
## ۲-۱. منبع تولید توان تصادفی

در این قسمت ابتدا مدل منبع توان تصادفی ارائه شده در مرجع [۲۱] آورده شده است. به دلیل ماهیت غیرقابل کنترل و متناوب منابع تجدیدپذیر فتوولتائیک، معمولاً از ردیابی نقطه حداکثر توان (MPPT<sup>۱</sup>) برای بهینه‌سازی انرژی استخراج شده از این منابع استفاده می‌شود. در اینجا، منبع تصادفی به عنوان یک منبع توان ثابت در نظر گرفته شده است؛ به این معنا که یک تولیدکننده عدد تصادفی، مقدار توان هدف را مشخص می‌کند و مبدل مربوطه می‌کوشد تا به این سطح توان دست یابد. در واقع، یک تولیدکننده عدد تصادفی، مقدار توان هدف را تعیین می‌کند و مبدل boost طوری کنترل می‌شود تا این نقطه کار (مقدار توان تعیین شده) را دنبال کند. در بخش کنترلی مبدل boost، ولتاژ ورودی اندازه‌گیری می‌شود و duty cycle سوئیچ طوری تنظیم می‌شود تا جریان ورودی را در مقداری تنظیم کند تا به سطح توان تعیین شده (مطلوب) برسد. شکل ۶ طرح شماتیک مورد استفاده در شبیه‌سازی منبع توان تصادفی را نشان می‌دهد. این طرح شامل مدل سازی تلفات در قالب مقاومت افزوده در طرف ولتاژ پایین و بالای کلید می‌شود (منظور از ولتاژ پایین و بالا در این قسمت، سمت ریزشکته ولتاژ بالا محسوب می‌شود و سمت منبع ولتاژ پایین محسوب می‌شود). معادلات ۱ و ۲ را در نظر بگیرید:

$$L \frac{di_{src}}{dt} = V_{src} - i_{src} R_l - (1-q)v_c \quad (۱)$$

$$C \frac{dv_c}{dt} = (1-q)i_{src} - \frac{v_c - V_{bus}}{R_h} \quad (۲)$$

این دو معادله دیفرانسیل توصیف کننده رفتار مبدل<sup>۲</sup> خواهند بود. به علاوه، در این معادلات و همه معادلات دیفرانسیل دیگر در این مقاله، همه متغیرهای با حروف کوچک، نشان دهنده سیگنال‌های متغیر با زمان هستند.



شکل ۶. شماتیک منبع تصادفی

با سنجش ولتاژ و کنترل جریان طرف ولتاژ پایین سیستم، خروجی مبدل به شین اساساً یک منبع توان ثابت نیست، زیرا تلفات ذاتی مبدل به صورت غیرخطی است. اگرچه تغییرات این تلفات در مقایسه با توان کل تحویلی به شین کوچک است و بنابراین، می‌توان از عامل غیرخطی صرف نظر کرد.

## ۲-۲. بار تصادفی

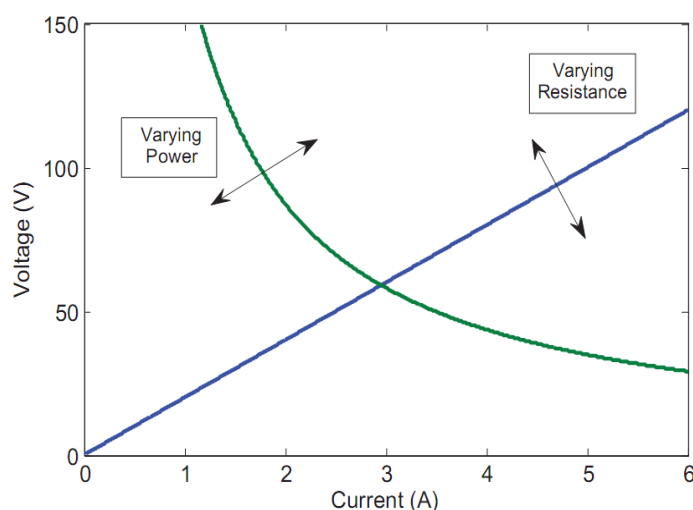
نوع بار تصادفی، به شکل بار «امپدانس ثابت» است. ابتدا یک عدد تصادفی به عنوان توان در ولتاژ نامی شین برای یک بازه از

1. Maximum Power Point Tracking  
2. Converter



زمان تولید می‌شود. سپس از رابطه ولتاژ و توان، مقاومت نامی معادل محاسبه می‌شود و در شبکه قرار می‌گیرد. این نوع بار برای سادگی به جای یک بار توان ثابت انتخاب شده است، در بارهای توان ثابت، توان با تغییرات دامنه ولتاژ تغییر نمی‌کند، به همین علت بارهای توان ثابت دارای یک اثر ناپایدارساز ذاتی در شبکه‌های قدرت هستند [۲۲]. علی‌رغم کاهش پیچیدگی، مدل ساده‌شده برای نشان دادن عملکرد سیستم‌های کنترل تناسبی - انتگرالی و منطق فازی کافی است. برای نحوه اعمال این عدد به عنوان بار تصادفی از نظر سخت‌افزاری از یک مبدل Buck استفاده شده است. ورودی مبدل buck به ولتاژ شین وصل شده و خروجی آن به یک بار ثابت مقاومتی متصل شده است. با تغییر duty cycle سوئیچ، ولتاژی که دو سر مقاومت بار می‌افتد تغییر می‌کند و در نتیجه، توان مصرفی بار تغییر می‌کند. صرف‌نظر از تلفات مبدل توان ورودی و توان خروجی مبدل DC-DC با یکدیگر برابر هستند. در نتیجه، با تغییر duty cycle سوئیچ مبدل buck، توان مصرفی بار و همچنین توان و جریان کشیده‌شده از شین (ورودی مبدل buck) تغییر می‌کند. به بیان دیگر، ابتدا یک عدد تصادفی برای مقدار توان مصرفی بار تعیین می‌شود. سپس، سیستم کنترلی duty cycle سوئیچ را برحسب این مقدار تصادفی تعیین می‌کند. از منظر دیگر، با استفاده از مبدل به جای اینکه مقدار مقاومت بار تغییر کند مقدار duty cycle سوئیچ تغییر می‌کند.

تطابق منبع توان با یک بار امپدانسی به یک شکل از پایداری ذاتی در کار بین دو وسیله منتج می‌شود. شکل ۷ چگونگی برخورد خط بار و منبع را نشان می‌دهد. با فرض کران‌های محدود با در نظر گرفتن ولتاژ، جریان، مقاومت و توان، یک نقطه تعادل همواره قابل حصول است.



شکل ۷. خطوط منبع و بار برای منبع توان و بار امپدانسی

ولتاژ بار با توجه به ولتاژ شین نوسان می‌کند؛ ولتاژ شین بزرگ‌تر به ولتاژ بار بالاتر منجر می‌شود، که ارائه‌کننده تأثیر بار مقاومتی است. رابطه ۳ را در نظر بگیرید:

$$R_{eff} = \frac{R_{conv}}{D_{conv}} \quad (3)$$

برای یک بار ایده‌آل بدون اندوکتانس و تلفات، رابطه ۳ مقاومت موثر اعمالی به شین را با فرض مقاومت بار واقعی و duty cycle مبدل توصیف می‌کند. مسئله‌ای که در اینجا وجود دارد این است که پیک جریان بالایی را در عمل تولید می‌کند و در نتیجه، به تنظیم ضعیف ولتاژ شین منجر می‌شود. با افزودن یک القاگر برای کاهش پیک جریان می‌توان این وضعیت را بهبود بخشید.

رابطه بین مقاومت مؤثر شین و بار، با توجه به ولتاژهای شین واقعی و نامی (به ترتیب با پسوندهای «a» و «n»)، توسط رابطه ۴ نشان داده می‌شود:

$$P_{nom} = \frac{V_{bus-n}^2}{R_{eff}} = \frac{V_{load-n}^2}{R_{load}} \quad (۴)$$

$$\rightarrow P_{act} = \frac{V_{bus-a}^2}{R_{eff}} = \frac{V_{load-a}^2}{R_{load}} \quad (۵)$$

معادله ۵ رابطه توان واقعی را با توان نامی و ولتاژ شین نشان می‌دهد.

$$P_{act} = \frac{P_{nom}}{P_{nom}} \frac{P_{act}}{1} = P_{nom} \frac{\frac{V_{bus-a}^2}{R_{eff}}}{\frac{V_{bus-n}^2}{R_{eff}}} = P_{nom} \frac{V_{bus-a}^2}{V_{bus-n}^2} \quad (۶)$$

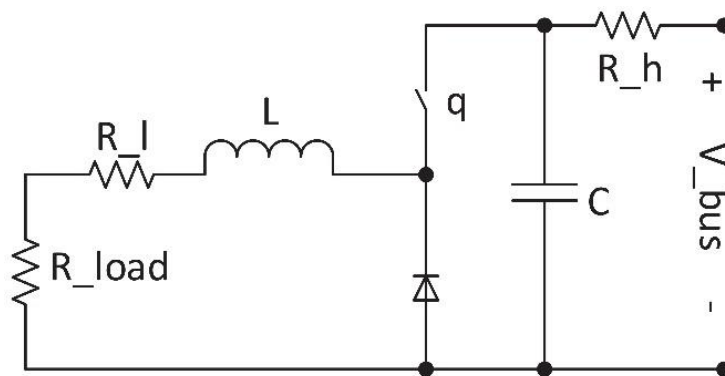
$$V_{load-a} = \sqrt{R_{load} P_{nom} \frac{V_{bus-a}^2}{V_{bus-n}^2}} \quad (۷)$$

با ترکیب معادله‌های ۴ و ۵ می‌توان به ارتباطی بین توان نامی، ولتاژ نامی شین، ولتاژ واقعی شین و مقاومت بار (که همگی مقادیر ثابت یا اندازه‌گیری شده هستند) با ولتاژ واقعی دست یافت که باید به بار اعمال شود. شکل ۸ شماتیک بار تصادفی را نشان می‌دهد. معادلات ۸ و ۹ رفتار آن را توصیف می‌کند:

$$0 = i(R_{load} + R_l) + L \frac{di}{dt} - v_c q \quad (۸)$$

$$\frac{V_{bus} - v_c}{R_h} = C \frac{dv_c}{dt} + iq \quad (۹)$$

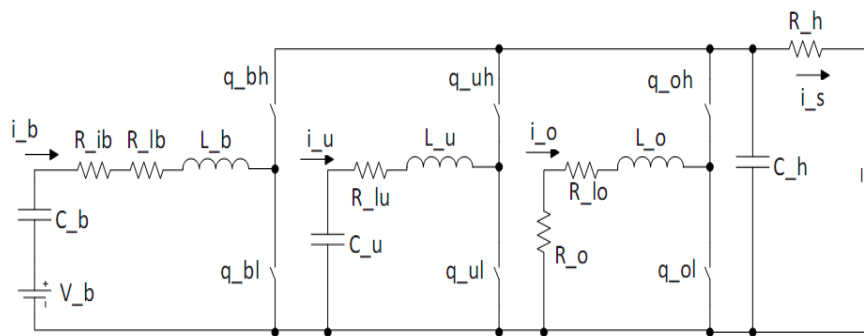
مقادیر اجزای غیرفعال مورد استفاده  $R_h = 0.2\Omega$ ،  $C = 1.018mF$ ،  $L = 1mH$ ،  $R_l = 0.4\Omega$  و  $R_{load} = 25\Omega$  است. برای کاهش ریپل جریان، بار به یک مبدل دوفازه توسعه داده شده، که هر شاخه دارای القاگر و مقاومت مشابه است و توان استخراجی به طور مساوی بین دو شاخه تقسیم می‌شود.



شکل ۸. شماتیک بار تصادفی

### ۳-۲- پایدارساز

پایدارساز شبکه دارای سه شاخه است. دو تا از شاخه‌ها<sup>۱</sup> به عناصر ذخیره انرژی اختصاص دارد و شاخه آخر برای اتلاف انرژی مزاد به کار می‌رود. شکل ۹ شماتیک کلی پایدارساز را نشان می‌دهد.



شکل ۹. شماتیک پایدارساز شبکه

خازن واسط شین و پایدارساز برای فرونشاندن حالت‌های گذرا در پایدارساز مورد استفاده قرار می‌گیرد. واکنش بین پایدارساز و شین با رابطه ۱۰ تعیین می‌شود:

$$\frac{V_{bus} - v_{C_h}}{R_h} = C_h \frac{dv_{C_h}}{dt} + q_{bh}i_b + q_{uh}i_u + q_{oh}i_o \quad (10)$$

مقادیر مورد استفاده در شبیه‌سازی  $C_h = 1.018 \text{ mF}$  و  $R_h = 0.2 \Omega$  است.

#### ۲-۴- شاخه باتری

رفتار شاخه باتری به عنوان بخشی از واحد پایدارساز توسط روابط ۱۱ و ۱۲ توصیف می‌شود:

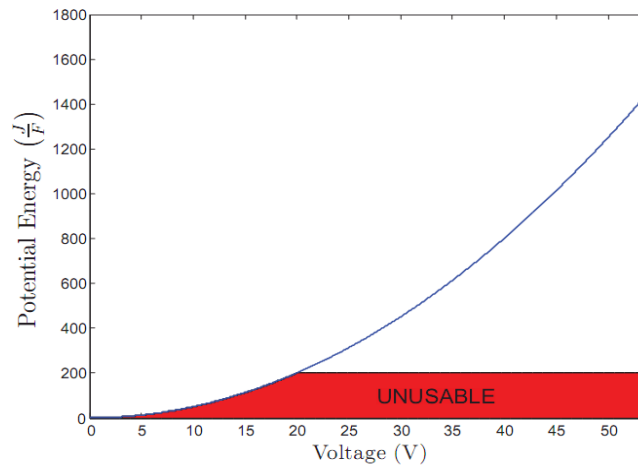
$$V_b + v_{C_b} = i_b (R_{ib} + R_{lb}) + L_b \frac{di_b}{dt} + q_{bh}v_{C_b} \quad (11)$$

$$C_b \frac{dv_{C_b}}{dt} = -i_b \quad (12)$$

مقادیر اجزای غیرفعال مورد استفاده در شبیه‌سازی برابر با  $R_{ib} = 0.2 \Omega$ ،  $L_b = 1.1 \text{ mH}$ ،  $C_b = 3 \text{ kF}$ ،  $V_b = 47.2 \text{ V}$  و  $R_{lb} = 0.4 \Omega$  است. مقدار ظرفیت خازن سه برابر کوچک‌تر از ظرفیت کامل باتری در نظر گرفته شده است. این کار به علت محدود کردن ظرفیت قابل استفاده حاصل از خطی‌سازی بوده، تا ظرفیت کاهش‌یافته حاصل از طول عمر به حساب آورده شود. برای تبدیل توان از یک مبدل dc-dc دوطرفه استفاده شده است. در این مبدل باتری در طرف ولتاژ پایین و شین به طرف ولتاژ بالا متصل شده است.

#### ۲-۵- شاخه بانک خازنی

ساختار مورد استفاده در این مقاله از یک بانک ۱۵۰ فارادی در ولتاژ ۵۴ ولت DC تشکیل شده است. از آنجا که بانک خازنی برای کار مؤثر باید درون یک بازه ولتاژ مشخص قرار گیرد، نقطه‌ای که در آن  $\text{SoC}^1$  صفر در نظر گرفته می‌شود در صفر ولت قرار ندارد، بلکه در سطح ولتاژ بالاتری است. این مقدار در ۲۰ ولت انتخاب شده است، که بانک خازنی را در بازه ولتاژی حفظ می‌کند که یک نسبت تبدیل منطقی با ولتاژ شین نامی ۱۰۰ ولتی دارد. به علاوه، نقطه‌ای که در آن بانک خازنی کاملاً پر در نظر گرفته می‌شود در ۵۰ ولت قرار دارد، که یک حاشیه امنیتی قبل از گذر از ولتاژ نامی و خطر آسیب دائمی را فراهم می‌کند. این محدودیت‌ها تا اندازه‌ای ظرفیت ذخیره انرژی قابل استفاده را محدود می‌کند و حد پایین در شکل ۱۰ نشان داده شده است. یک جنبه دیگر محدود کردن انرژی قابل استفاده در بازه ۲۰ تا ۵۰ ولتی این است که منحنی ولتاژ - انرژی در این بازه (در شکل ۱۰) با توجه به ولتاژ با خطای کمتر از ۱۰ درصد به صورت خطی است. این خطی‌سازی در کل این مقاله برای ساده کردن محاسبات و فهم بهتر انجام گرفته است.



شکل ۱۰. ظرفیت قابل استفاده در مقابل ظرفیت کل

معادلات ۱۳ و ۱۴ رفتار حاکم بر سیستم را توصیف می‌کنند:

$$v_{C_u} = i_u R_{lu} + L_u \frac{di_u}{dt} + q_{uh} v_{C_h} \quad (13)$$

$$C_u \frac{dv_{C_u}}{dt} = -i_u \quad (14)$$

مقادیر اجزای غیرفعال مورد استفاده در شبیه‌سازی به قرار  $R_{lu} = 0.4\Omega$ ،  $L_u = 1.1mH$  و  $C_u = 150F$  است.

## ۶-۲. شاخه تخلیه ولتاژ مازاد OVD<sup>۱</sup>

در حالی که ذخیره انرژی تا حد امکان برای مصرف آینده مطلوب است، محدودیت‌هایی در مقدار انرژی در عناصر ذخیره وجود دارد. برای چنین شرایطی که عناصر ذخیره انرژی در حداکثر ظرفیت خود قرار دارند، باید به روشی از شارژ بیشتر این عناصر جلوگیری کرد. شاخه تخلیه مازاد ولتاژ به این دلیل در مدار پایدارساز استفاده شده است. کار شاخه OVD در سیستم پایدارساز با رابطه ۱۵ توصیف می‌شود:

$$0 = i_o (R_o + R_{lo}) + L_u \frac{di_o}{dt} + q_{oh} v_{C_h} \quad (15)$$

دقت شود که با توجه به پلاریته مشخص شده در رابطه ۱۴ مقدار  $i_o$  همواره نامثبت است.

## ۷-۲. برقراری تعادل شین

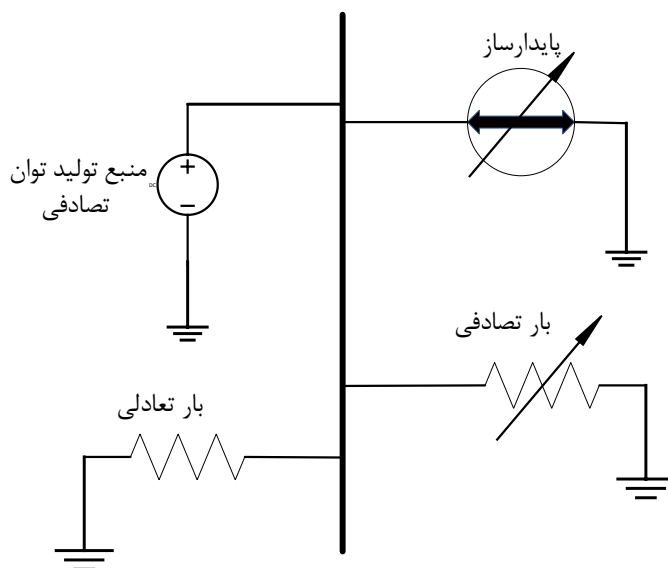
با توجه به اینکه برخی از واحدهای متصل به ریزشبه در غالب مبدل‌های افزایشنده (Boost) هستند، داشتن حداقل بار در شبکه در همه زمان‌ها مناسب است، در واقع یک مبدل Boost در حال کار بدون بار ناپایدار است. یک بار RC ثابت به شین اعمال می‌شود. این کار پاسخ متقابل بین منبع تصادفی، بار تصادفی و پایدارساز را حفظ می‌کند، در حالی که باعث جذب توان می‌شود که شبکه می‌تواند در بیشتر از آن کار کند. این کار همچنین درجه‌ای از حفاظت را فراهم می‌کند، در شرایطی که بار تصادفی از شبکه جدا می‌شود.

علاوه بر مقاومت ۵۰ اهمی که قسمت عمده بار بالاست را تشکیل می‌دهد، یک خازن ۲۰ میکروفارادی برای کاهش ریبیل ولتاژ به آن اضافه می‌شود. جریان و ولتاژ شین با رابطه ۱۶ تعیین می‌شود:

$$C_{bus} \frac{dv_{C_{bus}}}{dt} = i_{source} + i_{stabilizer} - i_{load} - \frac{v_{C_{bus}}}{R_{bus}} \quad (16)$$

## ۸-۲- مدل ساده‌شده

در نهایت، با توجه به توضیحاتی که در مورد بخش‌های مختلف این ساختار داده شده است، در این قسمت لازم است که مدل ساده‌شده‌ای از ریزشیکه مورد نظر ارائه شود تا بتوان با دقت در این مدل ساده‌شده به راحتی ارتباط و نحوه تعامل عناصر و مدارات معرفی‌شده پیش از این را بهتر درک کرد. در شکل ۱۱ یک تصویر ساده‌شده‌ای از ریزشیکه تحت بررسی ارائه شده است. چهار عنصر تصویرشده شامل منبع متغیر، بار متغیر، پایدارساز دوطرفه و بار تعادلی<sup>۱</sup> می‌شود. عناصر یادشده توسط یک شین مشترک به هم متصل شده‌اند، در حالی که این سیستم برای درک و مدل‌سازی خیلی ساده است، یک ریزشیکه عملی از وسایل خیلی پیچیده‌تری تشکیل یافته است.



شکل ۱۱. مدل ساده‌شده ریزشیکه

## ۳. روش کنترلی مورد استفاده در این مقاله

در این مقاله روش کنترلی پیشنهادی و دو روش دیگر که قبلاً مورد استفاده قرار گرفتند، بررسی شده‌اند. روش کنترلی پیشنهادی بر مبنای الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری (TLBO) است.

## ۳-۱. کنترل‌کننده PI

روش کنترلی اول روش کنترل کلاسیک یا کنترل‌کننده انتگرالی - تناسبی (PI) است. شیوه پیاده‌سازی بر مبنای دو کنترلگر تناسبی انتگرالی آبخاری است، که برای هر شاخه یک جفت کنترلی در نظر گرفته شده است. دو کنترلگر به طوری مرتب می‌شوند که حلقه بیرونی خطای بین ولتاژ نامی و واقعی شین را صفر می‌کند. این حلقه یک جریان مرجع را برای حلقه درونی فراهم می‌کند، که اختلاف بین این مقدار مرجع و جریان شاخه واقعی را صفر می‌کند و یک فرمان duty cycle را برای پایدارساز فراهم می‌آورد.

## ۳-۲. کنترل فازی

روش دوم روش کنترل فازی است. در این روش چهار ورودی برای کنترلگر فازی وجود دارد: خطای ولتاژ شین، انتگرال خطای ولتاژ شین، ولتاژ باتری و ولتاژ خازن. این ورودی‌ها با استفاده از یک سری از قوانین فازی برای تولید سه مرجع جریان به عنوان خروجی مورد استفاده قرار می‌گیرند: جریان باتری، جریان خازن و جریان تخلیه ولتاژ مازاد. مقادیر ورودی و خروجی در بازه‌های

1. Ballast

[۱ و -۱] یا [۱ و ۰] نرمالیزه می‌شوند. این کار باعث سهولت در تنظیم، زمانی که مقدار عناصر ذخیره تغییر می‌یابد می‌شود (به عنوان مثال، دو برابر شدن ظرفیت بانک باتری می‌تواند خروجی جریان را تقریباً دو برابر کند). درواقع، بانک خازنی بیشتر جریان مورد نیاز برای پایداری‌سازی شین را فراهم کند تا باتری کمتر مورد استفاده قرار بگیرد، به جز تحت دو حالت کلی: (۱) بانک خازنی نزدیک به حدود SoC خود باشد و نتواند اعمال مورد نیاز را انجام دهد، و (۲) بانک باتری نزدیک به حدود SoC خود باشد و نیاز به برگرداندن آن به حالت‌های میانی بازه باشد. به علاوه، اگر دو بانک در محدوده‌های پایانی مخالف هم باشند، انتقال انرژی بین آن‌ها انجام می‌شود تا به تعادل برسند. شاخه OVD تنها زمانی به کار می‌آید که بانک‌ها نزدیک به ظرفیت کامل باشند و نیاز به برگرداندن آن‌ها به میانه‌های بازه SoC باشد.

### ۳-۳. کنترل فازی بهینه‌شده با الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری (TLBO)

روش سوم استفاده از کنترل فازی بهینه‌شده با استفاده از الگوریتم آموزش و یادگیری است. الگوریتم بهینه‌سازی مورد استفاده از مجموعه روش‌های فراابتکاری بوده و در این مقاله به منظور جای‌دهی درست توابع عضویت و تنظیم مشخصات این توابع استفاده شده است. پیش از این لازم است در مورد الگوریتم مورد استفاده که مبتنی بر آموزش و یادگیری است و نیز منطق فازی توضیحاتی آورده شود.

الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر تدریس - یادگیری یک روش بهینه‌سازی کارآمد است که ابتدا در مرجع [۲۳] معرفی شد. مشابه سایر تکنیک‌های بهینه‌سازی تکاملی، TLBO یک الگوریتم برگرفته از طبیعت است و براساس تأثیر یک مدرس روی یادگیری کلاس کار می‌کند. این الگوریتم از یک جمعیتی از جواب‌ها برای دستیابی به جواب کلی استفاده می‌کند. جمعیت به عنوان گروهی از یادگیران یا دانش‌آموزان یک کلاس در نظر گرفته می‌شوند. یک مدرس تلاش می‌کند تا با آموزش به یادگیران، سطح دانش کلاس را افزایش دهد و دانش‌آموز به نمره یا رتبه خوبی مطابق با توانایی خودش دست یابد.

در حقیقت، یک مدرس خوب کسی است که دانش‌آموز خود را به سطح دانش خودش برساند. مدرس یک شخص با دانش بالا در جامعه بوده که علم خود را با دانش‌آموزان خود تقسیم می‌کند، به طوری که بهترین جواب (بهترین عضو جمعیت) در همان تکرار به عنوان مدرس عمل می‌کند. اما لازم است به این نکته اشاره شود که شاگردان مطابق با کیفیت آموزش ارائه‌شده توسط مدرس و وضعیت شاگردان حاضر در کلاس دانش کسب می‌کنند. به علاوه، شاگردان از تراکشی متقابل بین خودشان (بحث گروهی، ارائه‌ها و ...) که به وضعیتشان کمک می‌کند، آموزش می‌بینند.

بنابراین، فرایند TLBO به دو فاز تقسیم می‌شود، فاز اول فاز مدرس، که شامل فراگیری از استاد است و فاز دوم فاز یادگیرنده، که شاگردان از تراکشی متقابل همدیگر آموزش می‌بینند. بعد از تولید جمعیت اولیه و ارزیابی تابع هدف برای هر عضو از جمعیت فاز مدرس و یادگیرنده به صورت زیر بیان می‌شود:

فاز مدرس: مدرس برای تغییر میانگین امتیاز کلاس (جمعیت) به سوی موقعیت خودش تلاش می‌کند، این فاز با یک فرایند تصادفی مطابق رابطه ۱۷ برای تولید یک عضو یا موقعیت جدید در جمعیت ادامه می‌یابد:

$$X_{new, D} = X_{old, D} + r (X_{teacher, D} - T_f M_D) \quad (17)$$

اندیس D بیانگر تعداد موضوعات یا دروس (متغیر مسئله)،  $X_{old, D}$  عضو قدیمی، که هنوز برای افزایش سطح دانش مجبور است از مدرس بیاموزد و شامل یک بردار  $D \times 1$  بوده که نتیجه مربوط به هر موضوع یا درس خاص را در بر می‌گیرد،  $r$  یک عدد تصادفی در بازه [۰ و ۱] است،  $X_{teacher, D}$  بهترین عضو جمعیت در این تکرار است که برای تغییر میانگین کلاس (جمعیت) به سمت موقعیت خودش تلاش می‌کند،  $T_f$  فاکتور تدریس، و  $M_D$  یک بردار  $D \times 1$  است که شامل مقادیر میانگین نتایج کلاس برای هر موضوع است. مقدار  $T_f$  می‌تواند ۱ یا ۲ باشد که یک گام ابتکاری بوده و به صورت تصادفی با احتمال مساوی در نظر گرفته می‌شود. عضو جدید  $X_{new, D}$  در صورتی که بهتر از عضو قدیمی باشد پذیرفته می‌شود.

فاز یادگیرنده: به منظور شبیه‌سازی افزایش دانش هر یادگیرنده در اثر تراکنش تصادفی متقابل با سایر دانش‌آموزان، (۱۷) روی تمامی یادگیرنده‌ها اعمال می‌شود، در این صورت، یک دانش‌آموز برخی چیزهای جدیدی را از سایر دانش‌آموزان یاد خواهد گرفت به شرط آنکه سایرین دانش بالایی نسبت به او داشته باشند:

$$X_{new,i} = X_{old,i} + r_i (X_j - X_k) \quad (18)$$

اندیس  $i$  از یک تا تعداد کل اعضا تغییر می‌کند،  $X_{old,i}$  عضو قدیمی است که تا کنون از تراکنش متقابل با سایر دانش‌آموزان چیزی یاد نگرفته است،  $r_i$  یک عدد تصادفی در بازه  $[0, 1]$  است، و  $X_i$  و  $X_k$  دو دانش‌آموز هستند که به صورت تصادفی با شرط  $j \neq k$  و شرط بهتر بودن تابع هدف  $X_j$  نسبت به  $X_k$  انتخاب شده‌اند. عضو جدید  $X_{new,i}$  در صورتی که بهتر از عضو قدیمی  $X_{old,i}$  باشد پذیرفته می‌شود.

در مرجع [۲۴] به منظور بهبود عملکرد یا قابلیت این الگوریتم برای جست‌وجوی نقاط مطلق و فرار از همگرایی سریع و نقاط بهینه محلی یک عملگر دیگر به نام جهش به ساختار الگوریتم موجود افزوده شد. در ادامه فاز جهش از مرجع یادشده برگرفته شده و به این مقاله افزوده شده است.

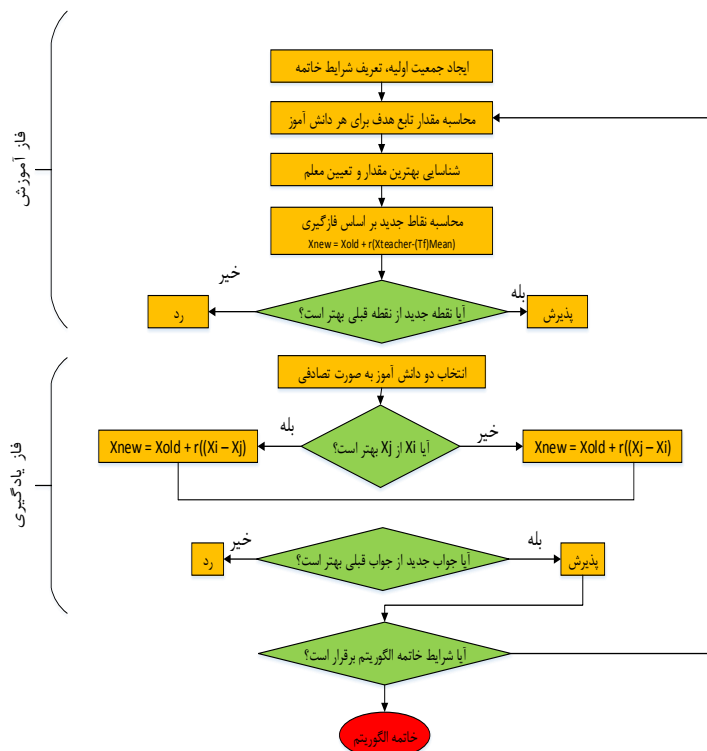
فاز جهش: در هر تکرار یک بردار جهش یا دانش‌آموزان اصلاح‌شده به صورت رابطه ۱۹ تولید می‌شود:

$$X_{mut} = X_{rand1} + r (X_{rand2} - X_{rand3}) \quad (19)$$

که  $X_{rand1}$  و  $X_{rand2}$  و  $X_{rand3}$  دانش‌آموز تصادفی غیر همشکل هستند که برای یادگیرنده نام جمعیت ( $X_i$ ) انتخاب می‌شوند،  $r$  (ضریب مقیاس‌بندی جهش) یک عدد تصادفی در بازه  $[0, 1]$  است. سپس رابطه ۲۰ استفاده می‌شود:

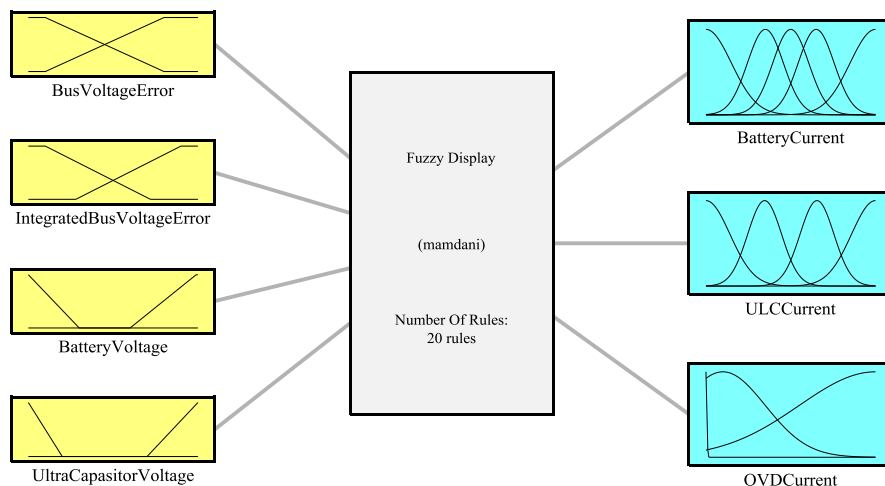
$$X_{new} = \begin{cases} X_{mut} & \text{if } r_1 \geq r_2 \\ X_i & \text{otherwise} \end{cases} \quad (20)$$

پارامترهای  $r_1$  و  $r_2$  دو عدد تصادفی در بازه  $[0, 1]$  است که در آن  $X_i$  بیان  $i$  امین عضو یا دانش‌آموز جمعیت و  $X_{mut}$  یک بردار جهش یافته که برای  $X_i$  تولید شده است. در نهایت، عضو اصلاح‌یافته  $X_{new}$  در صورتی که بهتر از  $X_i$  باشد پذیرفته می‌شود. در شکل ۱۲ فلوچارت بهینه‌سازی مورد استفاده در این مقاله ارائه می‌شود.



شکل ۱۲. فلوچارت بهینه‌سازی مورد استفاده

در این مقاله به بهینه‌سازی پارامترهای توابع عضویت مورد استفاده در کنترل‌کننده منطق فازی سیستم مورد بررسی پرداخته شده است. در این قسمت روند نمای بهینه‌سازی مورد استفاده در این مقاله ارائه می‌شود. در این مقاله به منظور بررسی نتایج چند نمودار از مقایسه بین توابع عضویت قبل و بعد از بهینه‌سازی ارائه شده است.



شکل ۱۳. ورودی خروجی‌های کنترل‌کننده منطق فازی مورد استفاده در این مقاله

همان‌طور که در شکل ۱۳ دیده می‌شود برای بهینه‌سازی این سیستم چهار ورودی و سه خروجی در نظر گرفته شده است. ورودی‌ها به ترتیب خطای ولتاژ باس، انتگرال خطای ولتاژ باس، ولتاژ باتری و ولتاژ سوپر خازن هستند. در طرف دیگر، در خروجی duty cycle کلیدزنی سه شاخه مورد استفاده در پایدارساز بهینه‌سازی شده‌اند. در ادامه، نمودارهای قبل و بعد از بهینه‌سازی آورده شده است.

در این بخش به بهینه‌سازی توابع عضویت سیستم فازی پرداخته شده است. همان‌گونه که در قبل اشاره شد، سیستم فازی دارای چهار ورودی خطای ولتاژ، انتگرال خطای ولتاژ و ولتاژ باتری و سوپر خازن بوده و خروجی نیز مقدار مرجع برای جریان باتری، جریان ابر خازن و جریان شاخه OVD بوده است. با مروری به توابع عضویت تعریف‌شده برای سیستم فازی مشاهده می‌شود که ورودی اول و دوم هر یک دارای دو تابع عضویت و هر تابع عضویت دارای دو نقطه تنظیم است (رئوس تابع عضویت). همچنین، برای SoC باتری و خازن دو تابع عضویت مثلثی در نظر گرفته شده که هر کدام دارای دو پارامتر تنظیم است. در نتیجه، در مجموع توابع عضویت ورودی دارای ۱۶ پارامتر هستند. برای جریان باتری و ابر خازن و OVD که سه خروجی مد نظر هستند توابع عضویت به صورت گوسی در نظر گرفته شده که به ترتیب دارای ۵ و ۴ و ۳ تابع عضویت است که هر تابع عضویت گوسی دارای ۲ پارامتر (مرکز و انحراف معیار) است و در نتیجه، تعداد پارامترهای توابع عضویت خروجی برابر با ۲۴ پارامتر می‌شود. در نتیجه، تعداد کل پارامترها ۴۰ می‌شود. از طرفی دیگر، برای بهینه‌سازی سیستم استنتاج فازی نیاز است که هر باری که سیستم استنتاج فازی جدید توسط الگوریتم بهینه‌سازی ساخته می‌شود سیمولینک با سیستم استنتاج فازی جدید اجرا شود تا خروجی سیستم با این سیستم فازی جدید ارزیابی شود. از آنجا که زمان شبیه‌سازی یک اجرا ۱۵۰ ثانیه‌ای برای این سیستم حدود نیم ساعت زمان می‌برد، با در نظر گرفتن فضای جست‌وجوی با ۴۰ پارامتر به تعداد اجرای حداقل ۶ هزار بار نیاز است که این زمان، زمان بسیار زیادی است. درخور یادآوری است که با افزایش تعداد پارامترهای فضای جست‌وجو بزرگ‌تر شده و در نتیجه رسیدن به جواب مطلوب سخت‌تر می‌شود. با در نظر گرفتن این نکات در حالت اول فقط خروجی‌های سیستم را که دارای تعداد متغیر ۲۴ عدد است بهینه‌سازی شده و اگر این بهینه‌سازی به جواب مطلوب همگرا نشد دوباره بهینه‌سازی سیستم فازی با در نظر گرفتن تمام متغیرها اجرا می‌شود. همچنین، این نکته نیز حایز اهمیت است که مکان توابع عضویت خروجی دارای اهمیت بیشتری از توابع عضویت ورودی هستند، چرا که به طور مثال مقدار سطح شارژ



(SoC) باتری یا شارژ خازن و مقدار خطای ولتاژ و خطای انتگرال خطای ولتاژ به خوبی تعریف شده‌اند و فقط با بهینه‌سازی توابع خروجی امکان رسیدن به پاسخ بهینه بسیار محتمل است.

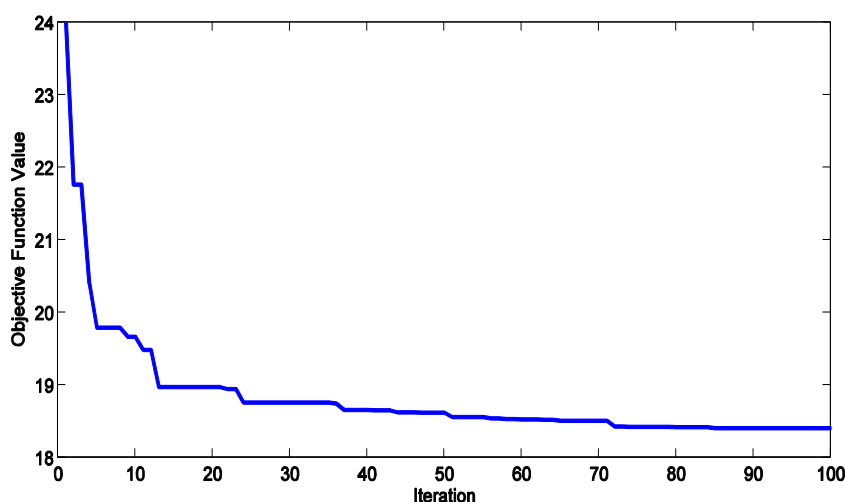
تابع هدف بهینه‌سازی از دو بخش خطای ولتاژ و بهینه‌سازی شارژ و دشارژ باتری تشکیل شده که به صورت رابطه ۲۱ است:

$$OF = \int_0^{\alpha} (v_{bus} - 100)^2 dt + 0.1 * \int_0^{\alpha} I_{battery}^2 dt \quad (21)$$

تعداد تکرار بهینه‌سازی ۱۰۰ تا و تعداد جمعیت ۶۰ تا که در نتیجه ۶ هزار بار تکرار شده است.

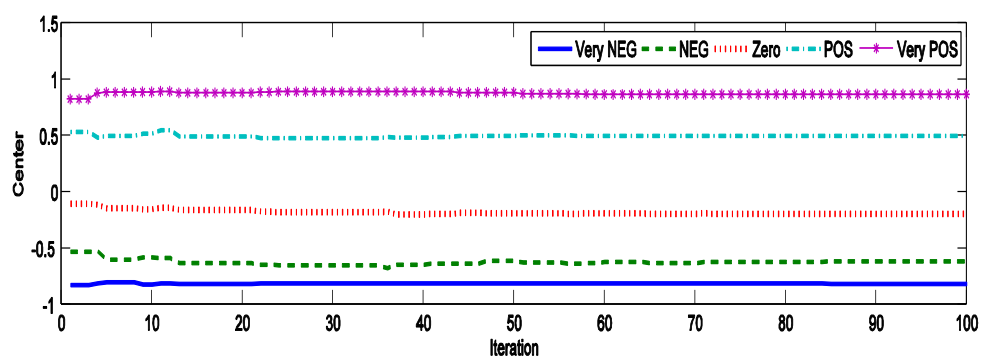
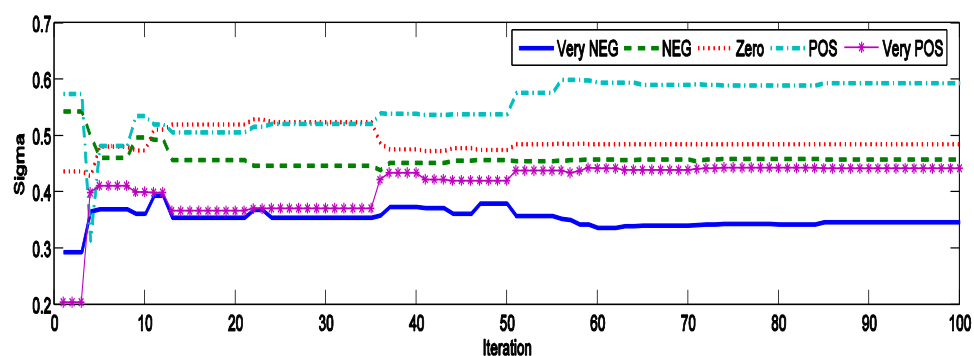
برای شبیه‌سازی این حالت، بار و توان یک بار به صورت تصادفی تولید شده و سپس این داده‌ها برای تمامی مراحل بهینه‌سازی یکسان قرار داده شده است تا مقادیر خروجی هر تکرار با هم قابل مقایسه باشند. طبیعی است که اگر در هر تکرار بار و منبع تولید پراکنده مقدار متفاوتی را انتخاب کنند نتایج خروجی اجراها با هم قابل مقایسه نبوده است. همچنین، برای پوشش دادن طیف وسیعی از تغییرات بار و منبع تولید پراکنده زمان شبیه‌سازی ۱۵۰ ثانیه در نظر گرفته شده که بیانگر ۵۰ بار تغییر بار و ۱۵ بار تغییر توان منبع تولید پراکنده است.

همان‌طور که در شکل ۱۴ دیده می‌شود، تابع هزینه که به آن اشاره شد طی این بهینه‌سازی به خوبی از مقدار ۲۴ با یک نرخ نزولی به مقدار ۱۸ همگرا شده است.

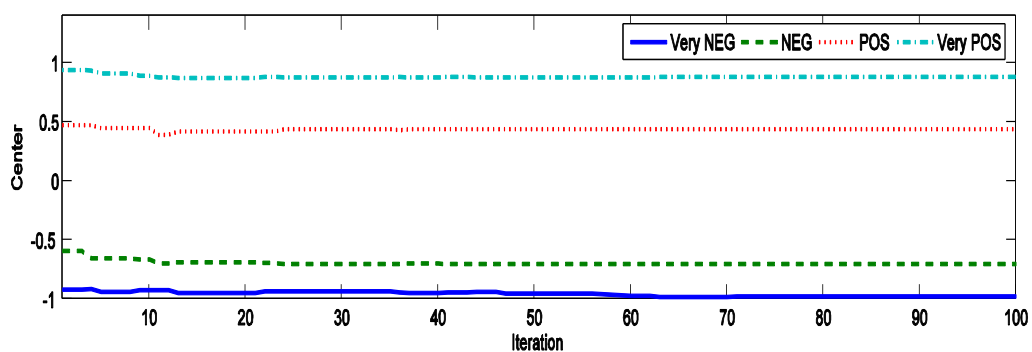
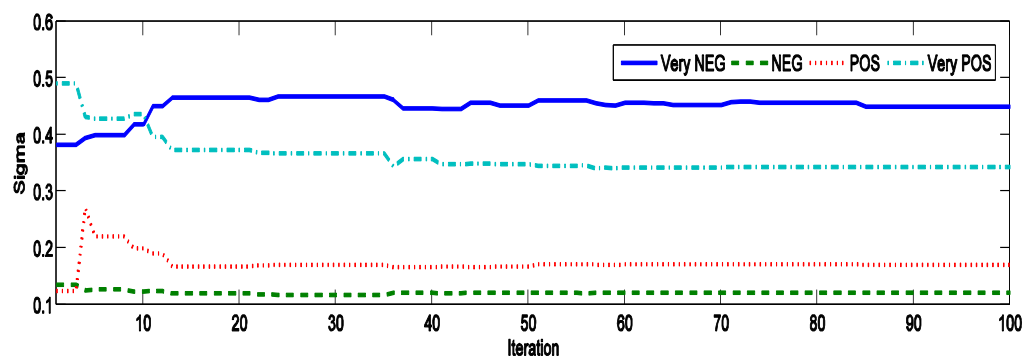


شکل ۱۴. مقدار تابع هدف طی مدت زمان بهینه‌سازی

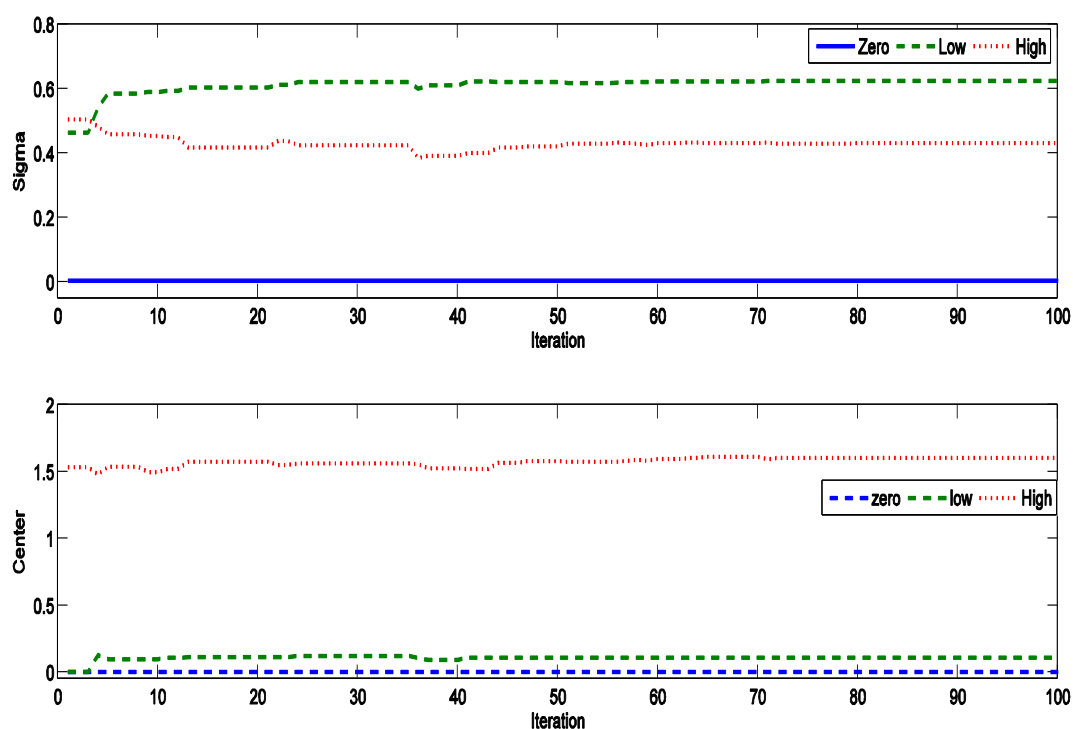
در شکل‌های ۱۵ تا ۱۷ تغییرات مقادیر سیگما و مرکز (مشخصات اصلی یک تابع عضویت گوسی) طی بهینه‌سازی نشان داده شده است. ابتدا یک تابع عضویت یعنی یک سیگما و یک انحراف معیار برای مقداردهی تابع عضویت گوسی به ورودی داده می‌شود (که در اینجا مقادیر اولیه مقادیر همان توابع عضویت سیستم فازی اولیه است) و الگوریتم بر مبنای آموزش و یادگیری به ازای هر یک از اعضای جمعیت و به تعداد تکرارهای در نظر گرفته شده شروع به بهینه‌سازی این سیگما و مرکز می‌کند و طبق سیگما و مرکزی که تازه به دست آمده است، سیستم فازی جدید را تشکیل می‌دهد و سیمولینک را اجرا کرده و یک بار دیگر مقدار تابع هزینه را محاسبه می‌کند. این عملیات به اندازه تعداد تکرار و تعداد جمعیت تکرار می‌شود تا بهینه‌سازی به جواب مطلوب همگرا شود.



شکل ۱۵. تغییرات سیگما و مرکز طی بهینه‌سازی برای خروجی جریان باتری

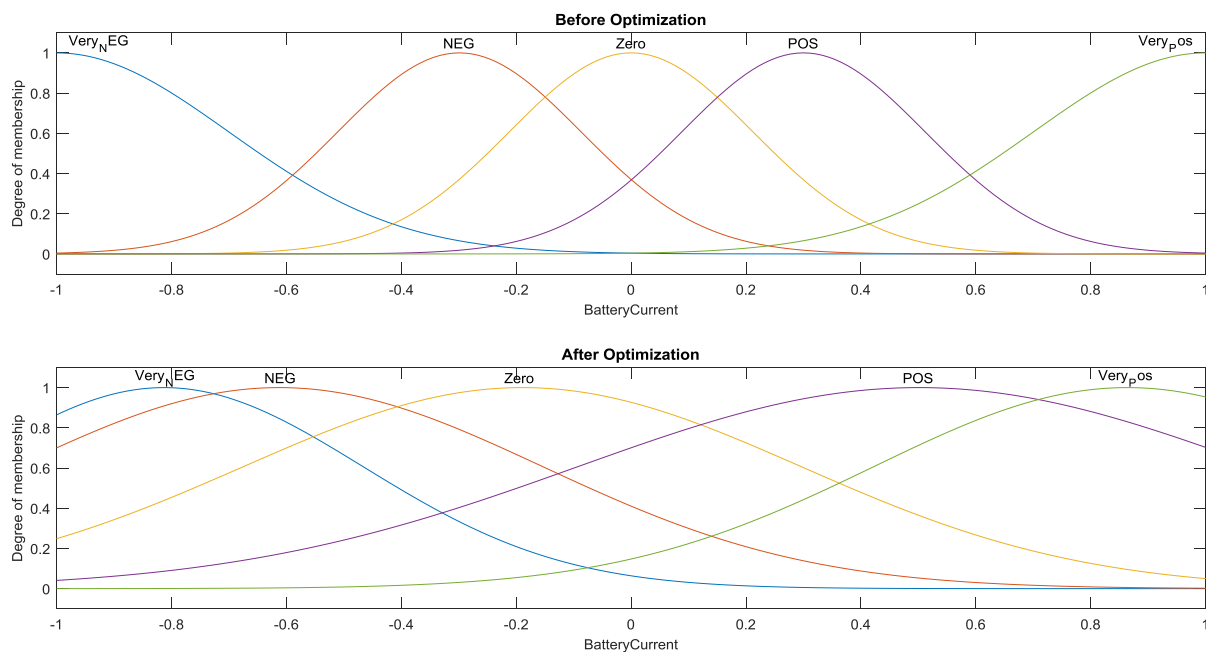


شکل ۱۶. تغییرات سیگما و مرکز طی بهینه‌سازی برای خروجی جریان ابرخازن

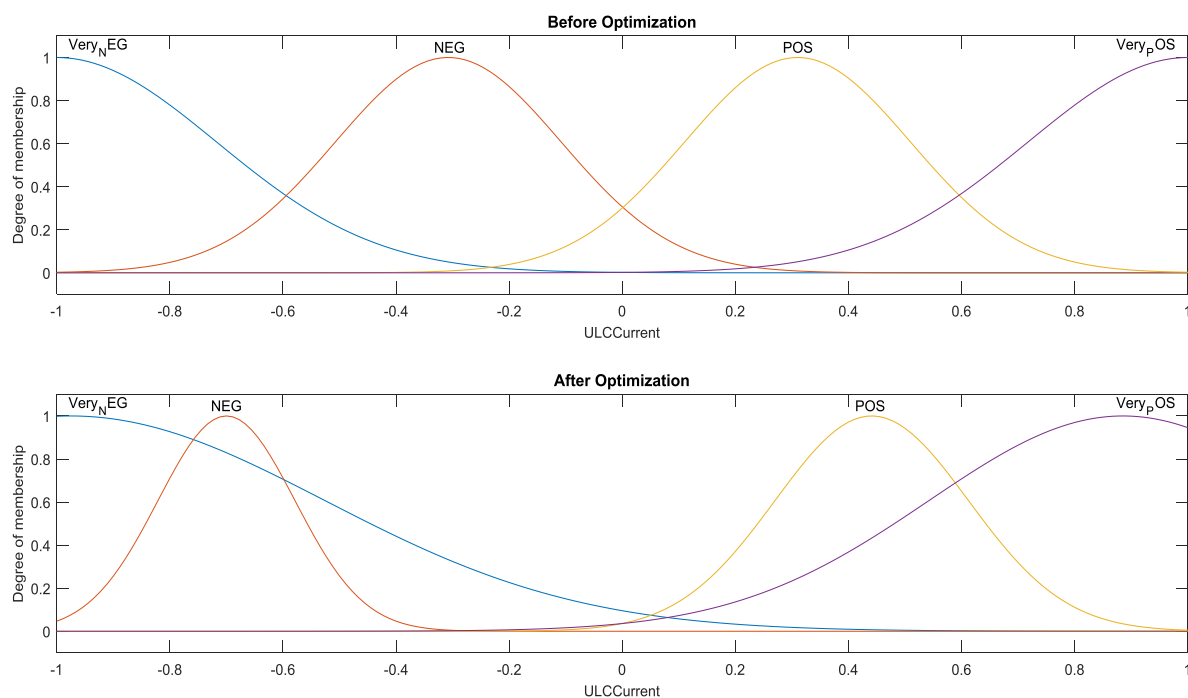


شکل ۱۷. تغییرات سیگما و مرکز طی بهینه‌سازی برای خروجی جریان OVD

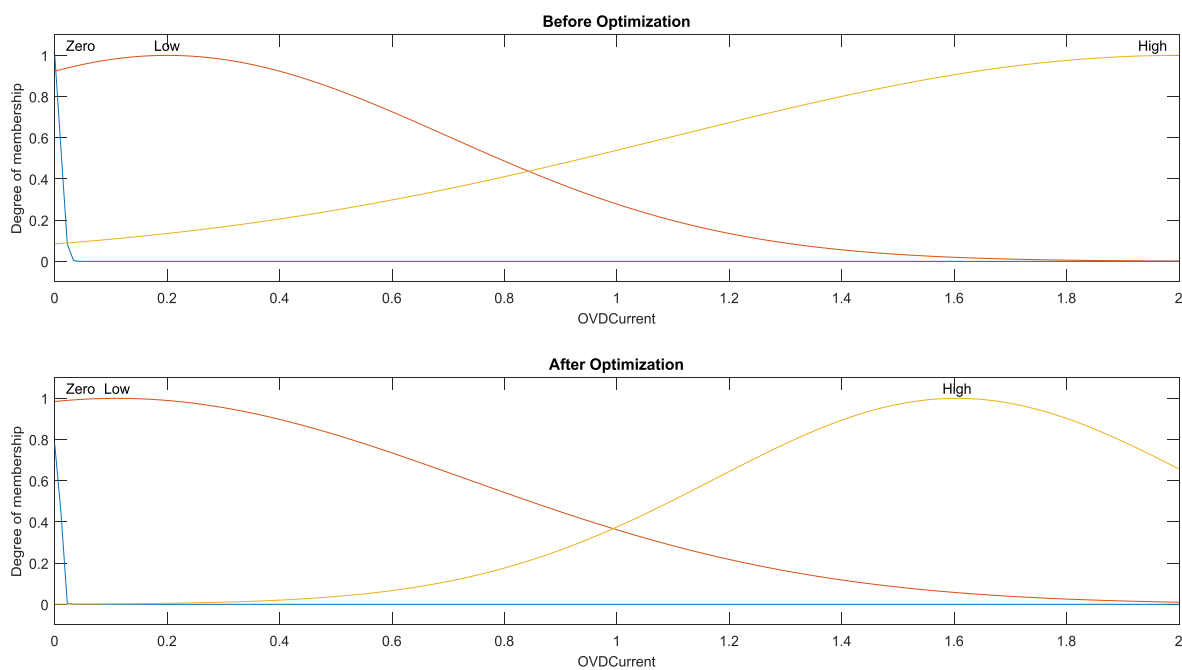
توابع عضویت بهینه‌شده برای این سه شاخه در شکل‌های ۱۸ تا ۲۰ با توابع عضویت قبلی مقایسه شده است. با مقایسه این توابع عضویت با توابع عضویتی که ابتدا برای ورودی در نظر گرفته شده‌اند، دیده می‌شود که کار بهینه‌سازی به‌خوبی انجام شده است. فلوجارت روش مورد استفاده برای بهینه‌سازی توابع عضویت فازی در این مقاله در شکل ۲۱ نشان داده شده است.



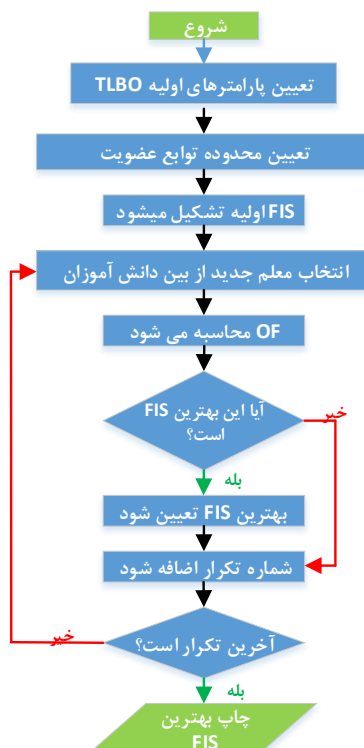
شکل ۱۸. خروجی اول قبل و بعد از بهینه‌سازی



شکل ۱۹. توابع عضویت خروجی دوم قبل و بعد از بهینه‌سازی



شکل ۲۰. توابع عضویت خروجی سوم قبل و بعد از بهینه‌سازی



شکل ۲۱. روند نمای مورد استفاده در این مقاله به منظور بهینه‌سازی توابع عضویت فازی

#### ۴. نتایج شبیه‌سازی

در این بخش ساختار ریز شبکه معرفیه شده در بخش‌های قبلی در نرم‌افزار Matlab شبیه‌سازی شده است. برای مقایسه عملکرد کنترل‌کننده‌ها، سه سناریوی مختلف در نظر گرفته شده است. سناریوی اول، سیستم شامل کنترل‌کننده تناسبی - انتگرالی، سناریوی دوم شامل کنترل‌کننده فازی اولیه، و سناریوی سوم، شامل کنترل‌کننده فازی بهینه‌شده است. ابتدا هر یک سناریوها به طور مجزا بررسی و سپس با یکدیگر مقایسه می‌شوند. قبل از اینکه به نتایج شبیه‌سازی برای سناریوهای مختلف پرداخته شود، فرضیات در نظر گرفته شده به صورت زیر است:

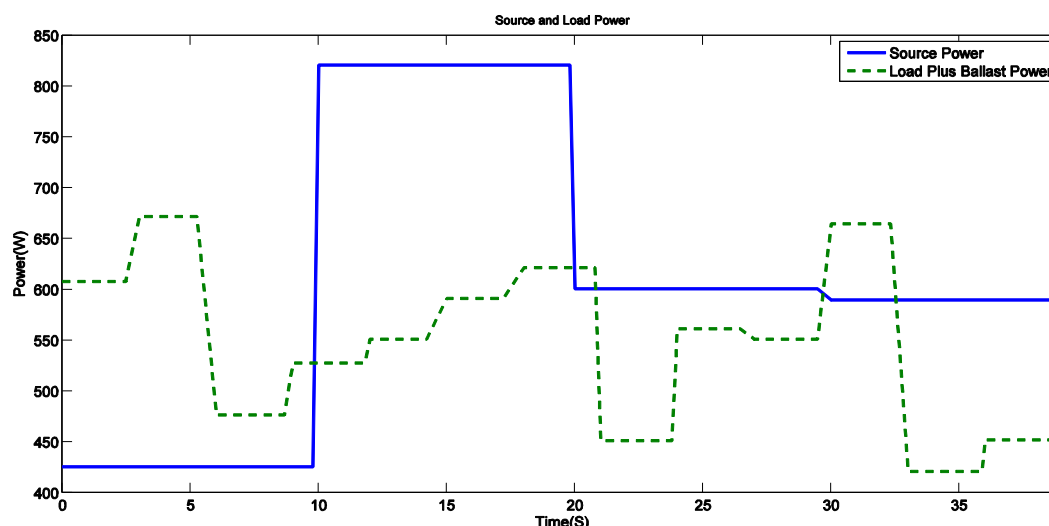
۱. حداقل و حداکثر جریان باتری  $\pm 5$  آمپر در نظر گرفته شده است.
۲. ولتاژ باتری بین  $47/2$  تا  $50/8$  ولت تغییر می‌کند در صورتی که ولتاژ باتری بیش از  $50$  ولت باشد باتری پر در نظر گرفته می‌شود.
۳. حداقل و حداکثر جریان ابرخازن  $\pm 11$  آمپر در نظر گرفته شده است.
۴. ولتاژ ابرخازن بین  $20$  تا  $50$  ولت تغییر می‌کند، در صورتی که ولتاژ ابرخازن بیش از  $45$  ولت باشد ابرخازن پر در نظر گرفته می‌شود.
۵. جریان شاخه OVD بین  $0$  تا  $6$  آمپر است.

#### ۴-۱. بررسی عملکرد سیستم با کنترل‌کننده PI

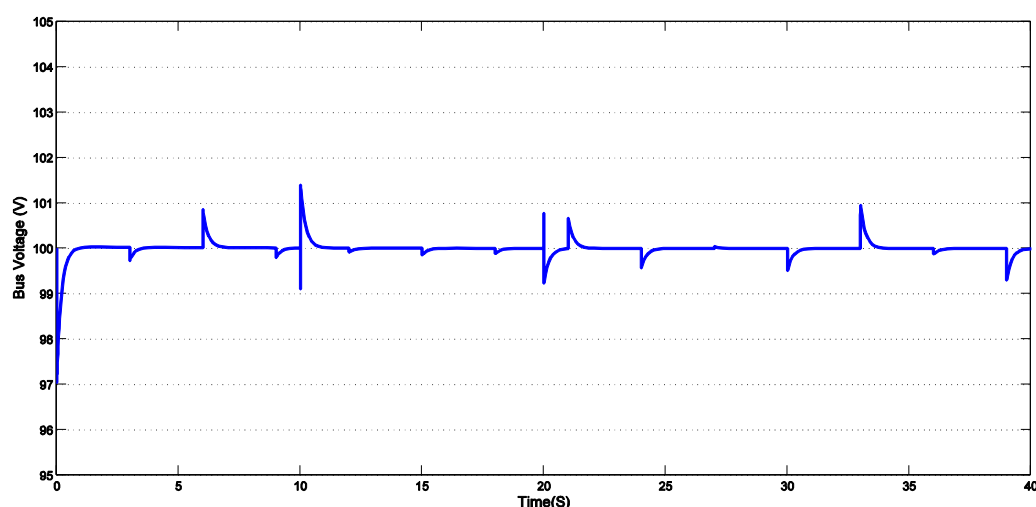
ابتدا، عملکرد سیستم با کنترل‌کننده PI مورد بررسی قرار گرفته است. توان تولیدی و بار مصرفی به صورت تصادفی تعیین شده و به سیستم اعمال شده است. مقادیر توان تولیدی و مصرفی در شکل ۲۲ نشان داده شده است. در این حالت فرض می‌شود که باتری و ابرخازن در حالت نیمه‌شارژ هستند که هم می‌توانند از شبکه توان بگیرند و هم به شبکه توان تحویل دهند. تغییرات بار به صورت پله‌ای در نظر گرفته شده است و در هر سه ثانیه یک پله تغییر می‌کند. توان مصرفی بار به صورت تصادفی بین  $200$  تا  $500$  وات انتخاب شده است که با در نظر گرفتن مصرف بار تعادلی (که  $200$  وات است) توان مجموع بار تعادلی و بار بین  $400$  تا

۷۰۰ وات تغییر خواهد کرد. همچنین، توان تولیدی منبع تولید پراکنده به صورت تصادفی بین ۴۰۰ تا ۹۰۰ وات است که در هر ده ثانیه تغییر می‌کند. این موضوع در شکل ۲۲ نشان داده شده است.

در شکل ۲۲ مشاهده می‌شود در زمان‌های بین صفر تا ۱۰ ثانیه تولید از مصرف کمتر بوده و در نتیجه شاخه پایدارساز انرژی را به شبکه تزریق می‌کند و از توان ذخیره‌شده در باتری و ابرخازن مصرف می‌شود. در شکل ۲۲ ولتاژ شین نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، خطای ولتاژ کمتر از یک درصد بوده و ولتاژ شین به‌خوبی تنظیم شده است.



شکل ۲۲. تولید و مصرف توان در حالت استفاده از کنترل‌کننده PI

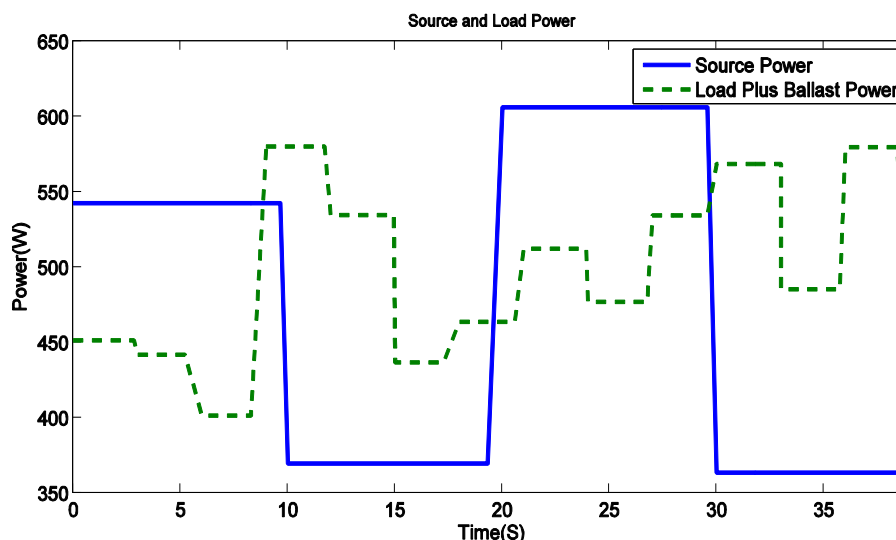


شکل ۲۳. ولتاژ شین با کنترل‌کننده PI

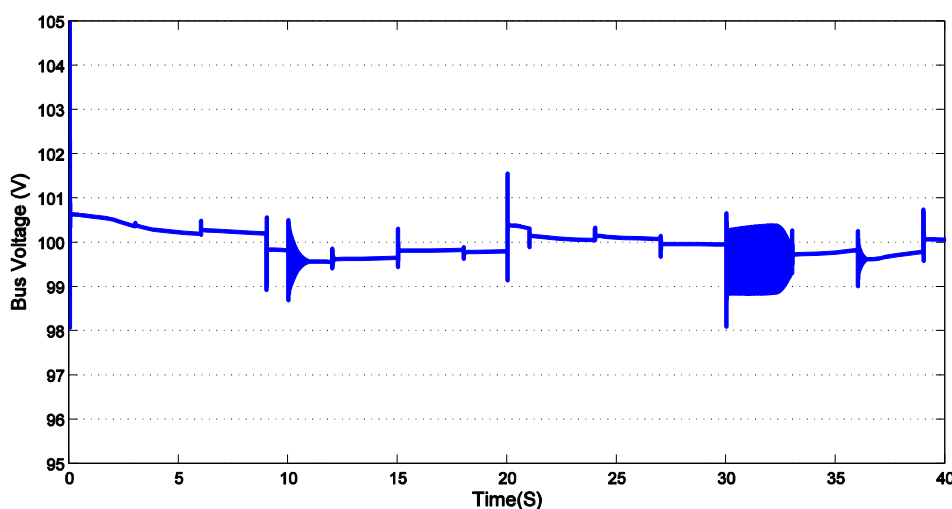
#### ۲-۴. بررسی عملکرد سیستم با کنترل‌کننده فازی

در این بخش به بررسی و ارزیابی سیستم فازی اولیه پرداخته شده است. برای ارزیابی این سیستم استنتاج فازی منبع تولید پراکنده به صورت تصادفی بین مقادیر ۳۵۰ تا ۶۵۰ وات توان تولید می‌کند و بار مصرفی به همراه بار تعادلی ۴۰۰ تا ۶۰۰ تغییر می‌کند و همچنین فرض شده است که باتری در حالت نیمه‌شارژ است. در شکل ۲۴ تولید و مصرف توان ریزشکه نشان داده شده است. با توجه به شکل ۲۵ مشاهده می‌شود که با وجود تغییرات شدید توان منبع تولید پراکنده و تغییرات بار، سیستم نه تنها پایدار می‌ماند، بلکه جواب نسبتاً قابل قبولی دارد. با نگاهی به نمودار ولتاژ مشاهده می‌شود که خطای ولتاژ در این حالت اندکی از خطای ریزشکه با کنترل‌کننده تناسبی انتگرالی بیشتر بوده و همچنین در دو زمان (ثانیه ۱۰ و ۳۰) ولتاژ شین دارای نوساناتی

است که ممکن است بر اثر رخدادی این نوسانات افزایش یابد. از آنجا که توابع و قوانین فازی توسط اپراتور انسانی انجام شده، ممکن است این توابع و قوانین به صورت بهینه تعریف نشده باشند و این امکان وجود دارد که با بهره‌گیری از یک الگوریتم بهینه سازی پاسخ سیستم بهتر شود و در نتیجه در بخش بعد، از پیاده‌سازی الگوریتم بر مبنای یادگیری و آموزش برای بهینه‌سازی توابع عضویت خروجی بهره گرفته شده است.



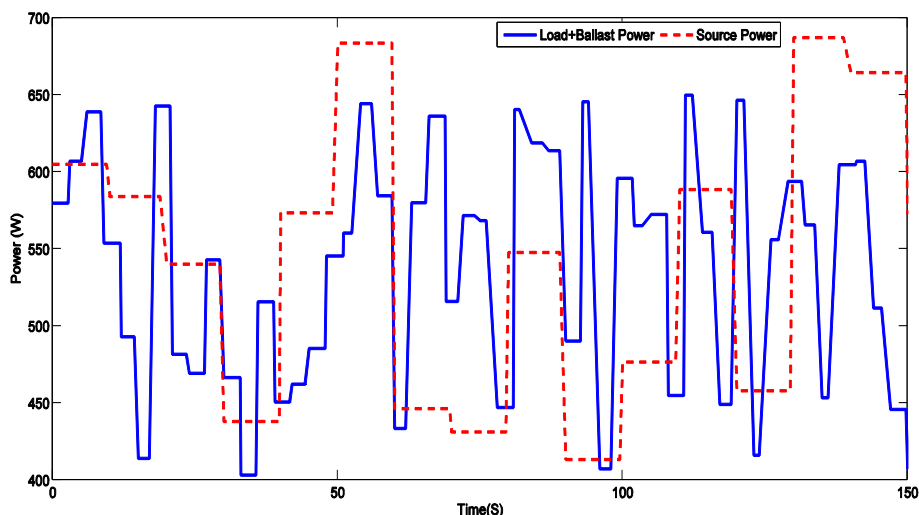
شکل ۲۴. تولید و مصرف توان در حالت استفاده از کنترل‌کننده فازی



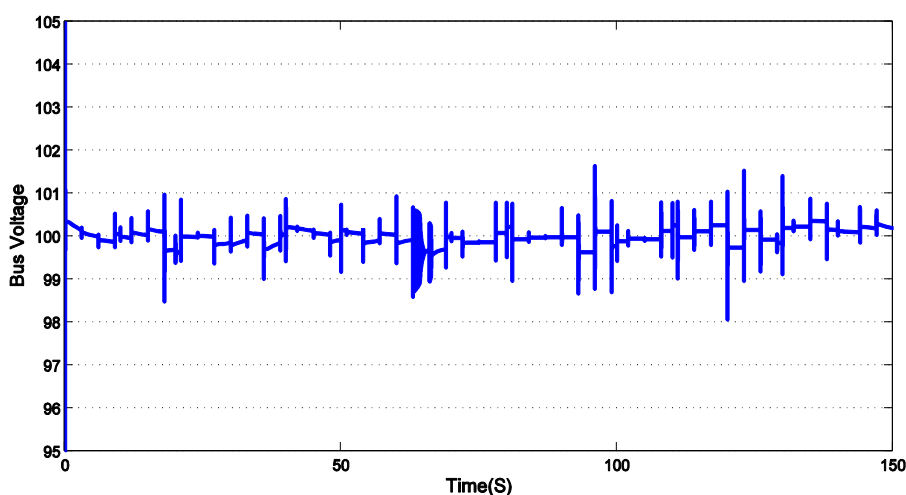
شکل ۲۵. ولتاژ شین بر اساس عملکرد کنترل‌کننده فازی

#### ۳-۴. بهینه‌سازی سیستم فازی با استفاده از TLBO

در این بخش توابع عضویت فازی طبق آنچه در بخش‌های قبلی توضیح داده شد، با الگوریتم TLBO بهینه‌سازی شده است. تغییرات بار برای تمامی مراحل بهینه‌سازی یکسان تعیین شده است. در شکل ۲۶ نمودار توان منبع و بار مصرفی نشان داده شده است. همچنین، پاسخ ولتاژ سیستم به ازای سیستم فازی بهینه‌شده در شکل ۲۷ به نمایش درآمده است که نشان می‌دهد ولتاژ شین مقدار ۱۰۰ ولت را به‌خوبی دنبال کرده است. درخور یادآوری است نمودار توان تولیدی و مصرفی ریزشبه در این حالت نوسانات شدیدتری نسبت به دو حالت قبل دارد.



شکل ۲۶. مقدار بار و توان در حالت استفاده از کنترل کننده فازی بهینه‌شده با TLBO

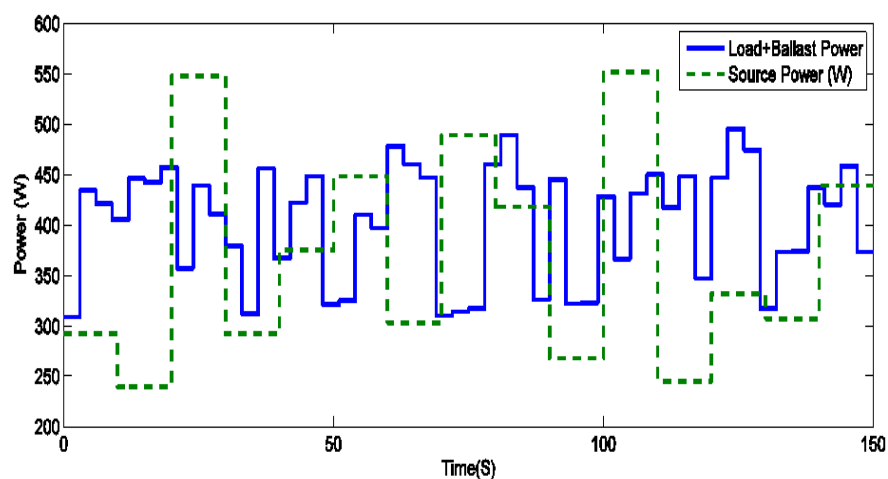


شکل ۲۷. پاسخ بهینه‌شده برای ولتاژ شین با کنترل کننده فازی بهینه‌شده با TLBO

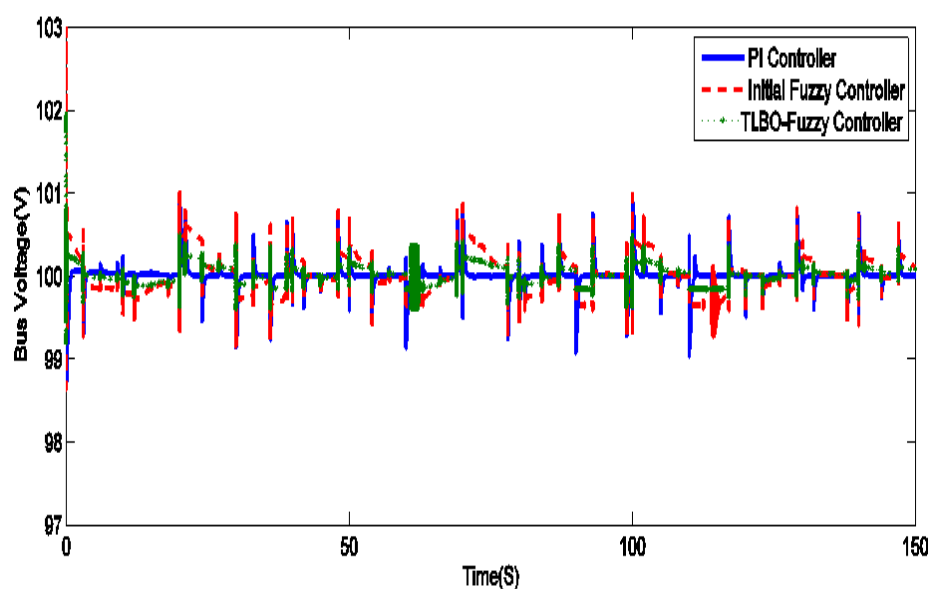
#### ۴-۴. مقایسه نتایج شبیه‌سازی سه روش کنترلی

نتایج شبیه‌سازی به‌دست‌آمده در بخش‌های قبلی در شرایط متفاوت توان تولیدی و مصرفی بود. در این بخش هدف مقایسه سه روش کنترلی تحت شرایط یکسان است. در شکل ۲۸ نمودار توان تولیدی و مصرفی ریزشکه نشان داده شده است. پاسخ ولتاژ شین سیستم برای سه روش مختلف کنترلی در شکل ۲۹ نشان شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، هر سه روش کنترل کننده PI، کنترل فازی بهینه‌شده با TLBO و روش کنترل فازی به‌ترتیب دارای کمترین رپیل ولتاژ هستند. البته همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، تفاوت در رپیل ولتاژ شین در این سه روش خیلی کم و خطای ولتاژ سه سناریو تقریباً همانند هم بوده و خطای کمتر از ۱ درصد را منجر شده‌اند. همچنین، جریان باتری و ابرخازن به‌ترتیب در شکل‌های ۳۰ و ۳۱ برای سه روش کنترلی PI، فازی و فازی بهینه‌شده نشان داده شده‌اند. یک پارامتر مهم دیگری نیز باید مد نظر قرار گیرد و آن این است که عمر باتری‌ها وابسته به میزان شارژ و دشارژ آن است و با افزایش تکرار شارژ و دشار عمر آن کاهش می‌یابد. در مقابل ابرخازن‌ها مانند باتری‌ها در مقابل شارژ و دشارژ آن‌چنان حساس نبوده است. به همین دلیل، مقدار شارژ و دشارژ باتری در مراحل آموزش فازی مد نظر قرار گرفته است. با مقایسه نمودار جریان باتری در سه سناریوی تعریف‌شده مشاهده می‌شود که کنترل‌کننده‌ها به جواب مختلفی در این زمینه رسیده‌اند. همان‌طور که در شکل ۳۰ مشاهده می‌شود، میزان شارژ و دشارژ باتری در کنترل کننده فازی بهینه‌شده از دو کنترل کننده دیگر کمتر بوده و در نتیجه می‌توان کنترل کننده فازی بهینه‌شده با TLBO را نسبت به دو کنترل کننده دیگر برتر دانست.

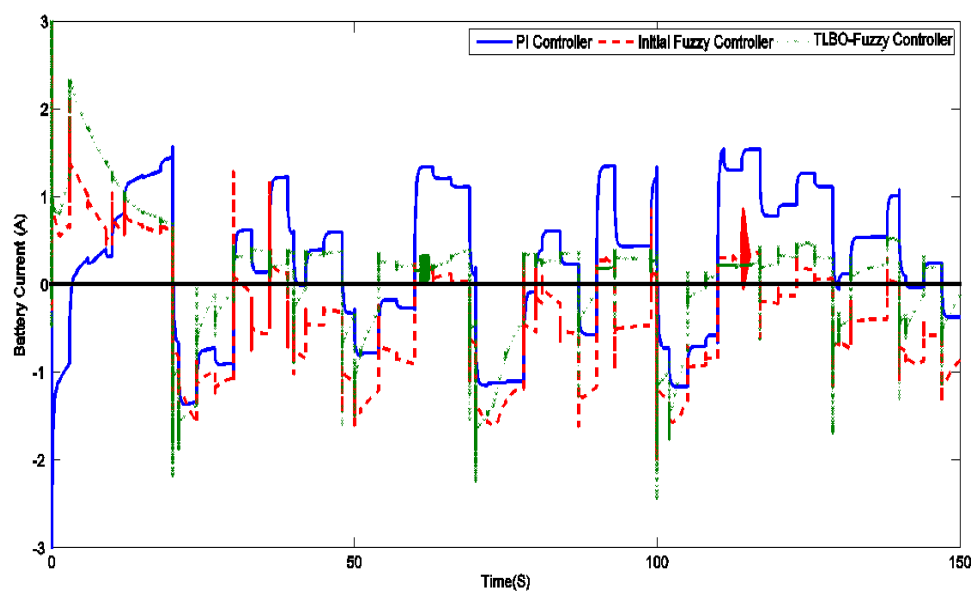




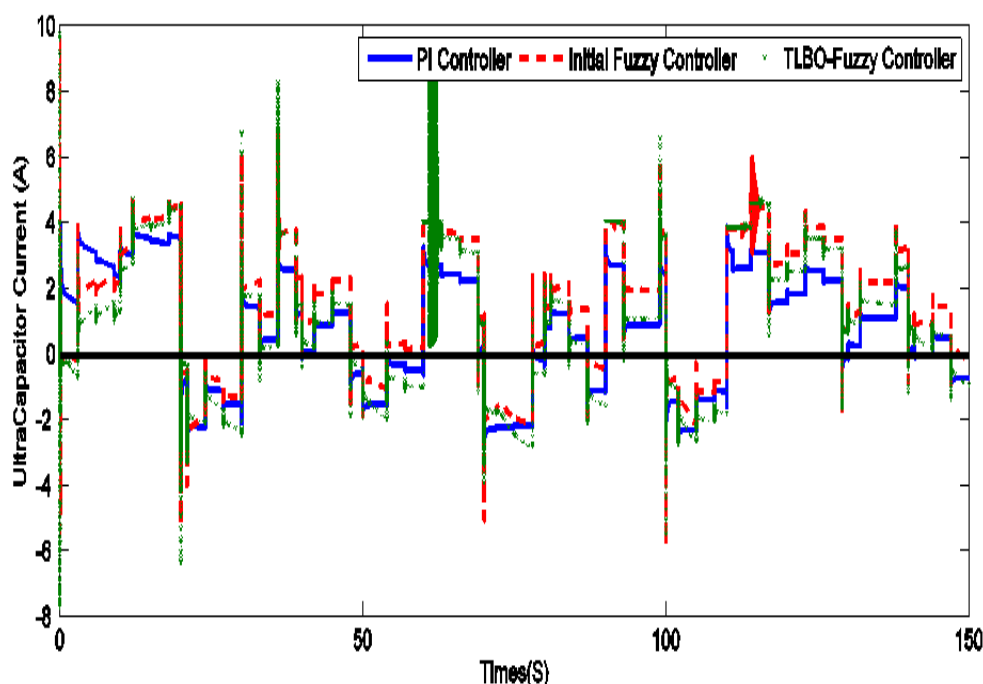
شکل ۲۸. مقدار توان بار و توان منبع



شکل ۲۹. مقایسه ولتاژ شین تحت سه کنترل کننده PI، فازی ساده و نیز فازی بهینه شده



شکل ۳۰. مقایسه جریان باتری تحت سه کنترل کننده PI و فازی ساده و نیز فازی بهینه شده



شکل ۳۱. مقایسه جریان ابرخازن تحت سه کنترل کننده PI و فازی ساده و نیز فازی بهینه شده

## ۵. نتیجه گیری

در این مقاله ریزشبه جریان مستقیم شامل منبع فتوولتائیک با تولید تصادفی و نیز بار تصادفی بررسی شده است. در حالتی که بار و تولید قابل پیش بینی نیستند و شبکه به صورت جزیره‌ای عمل می‌کند، پایدارسازی ریزشبه بسیار مشکل است. با استفاده از عناصر ذخیره‌ساز انرژی این امکان فراهم می‌شود که با شارژ این عناصر در مواقع کم‌باری و دشارژ آن‌ها در حالت پرباری شبکه پایدار شود. در این مقاله سناریوهای تولید بیشتر، کمتر و برابر با مصرف در نظر گرفته شده و در این سه حالت عملکرد ریزشبه مورد توجه قرار گرفته است. نتایج در حضور سه کنترل کننده تناسبی انتگرالی، فازی و فازی بهینه شده مقایسه شده است. در نهایت، با توجه به مقایسه ارائه شده برای این سه نوع کنترل کننده مشخص شده است که خطای ولتاژ سه سناریو تقریباً همانند هم بوده و خطای کمتر از ۱ درصد را منجر شده‌اند. شاخص مهم دیگری برای سنجش و ارزیابی کنترل کننده‌ها مورد توجه قرار می‌گیرد و آن هم میزان شارژ و دشارژ باتری طی زمان شبیه‌سازی است که نتایج شبیه‌سازی نشان دادند روش کنترل فازی بهینه شده از دو روش PI و کنترل فازی عملکرد بهتری دارد.

## منابع

- [1] Eidiani M, Kargar M. Frequency and voltage stability of the microgrid with the penetration of renewable sources. In: 2022 9th Iranian Conference on Renewable Energy Distributed Generation (ICREDG). IEEE; 2022.
- [2] Muchande S, Thale S. Hierarchical control of a low voltage DC microgrid with coordinated power management strategies. Eng Technol Appl Sci Res. 2022;12(1):8045-8052.
- [3] Jena S, Padhy NP. Distributed cooperative control for autonomous hybrid AC/DC microgrid clusters interconnected via back-to-back converter control. In: 2020 IEEE Power Energy Society General Meeting (PESGM). IEEE; 2020. p. 1-5.
- [4] Thounthong P, Sikkabut S, Luksanasakul A, Koseeyapor P, Sethakul P, Pierfederici S, Davat B. Fuzzy logic based dc bus voltage control of a standalone photovoltaic/fuel cell/super capacitor power plant. In: 11th International Conference on Environment and Electrical Engineering; May 2012. p. 725–730.
- [5] Sathishkumar R, Kollimalla S, Mishra M. Dynamic energy management of microgrids using battery super capacitor combined storage. In: India Conference (INDICON); 2012 Annual IEEE; Dec 2012. p. 1078–1083.
- [6] Papadimitriou C, Vovos N. A fuzzy-logic control strategy for a hybrid fuel cell-battery system offering ancillary services. In: 13th European Conference on Power Electronics and Applications; Sept 2009. p. 1–10.
- [7] Morstyn T, Herdzak B, Agelidis VG. Distributed cooperative control of microgrid storage. IEEE Trans Power Syst. 2014;29(4):2780-2789.
- [8] Jian Z, et al. A review of control strategies for DC micro-grid. In: 2013 Fourth International Conference on Intelligent Control and Information Processing (ICICIP). IEEE; 2013.
- [9] Diaz NL, et al. Intelligent distributed generation and storage units for DC microgrids—A new concept on cooperative control without communications beyond droop control. IEEE Trans Smart Grid. 2014;5(5):2476-2485.
- [10]. Diaz NL, et al. Fuzzy-logic-based gain-scheduling control for state-of-charge balance of distributed energy storage systems for DC microgrids. In: 2014 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC); 2014.
- [11] Lu X, et al. State-of-charge balance using adaptive droop control for distributed energy storage systems in DC microgrid applications. IEEE Trans Ind Electron. 2013;61(6):2804-2815.
- [12] Kakigano H, Miura Y, Ise T. Distribution voltage control for DC microgrids using fuzzy control and gain-scheduling technique. IEEE Trans Power Electron. 2012;28(5):2246-2258.
- [13] Alkawak OA, Saghafi H, Abdullah Albakry AA, Fani B, Delshad M. Regulation of bus voltage on DC microgrid using hybrid technique through charger/discharger storage. Journal of Energy Storage. 2024;101:113620.
- [14] Usarman R, Munawar K, Ramil MAM, Mehedi iM. Bus Voltage Stabilization of a Sustainable Photovoltaic-Fed DC Microgrid with Hybrid Energy Storage Systems. Sustainability. 2024;16(6):1-27.
- [15] Wu ZQ, Geng SC, Xie ZK. Bus voltage stability control of DC microgrid considering voltage constraints. Journal of Industrial and Management Optimization. 2024;20(3):1203-1219.
- [16] Li X, He Y, Li M. Control Strategy for Bus Voltage in a Wind–Solar DC Microgrid Incorporating Energy Storage. Electronics. 2024;13(24):5018.
- [17] Singh PN, Ranjan R, Karanki SB. Stabilization of DC Bus Voltage of an Isolated DC Microgrid. IEEE 8th Southern Power Electronics Conference and 17th Brazilian Power Electronics Conference (SPEC/COBEP); Nov 2023; Florianopolis, Brazil.
- [18] Louassaa K, Guerrero JM, Boukerdja M, Chouder A, Khan B, Cherifi A, Yousaf MZ. A novel hierarchical control strategy for enhancing stability of a DC microgrid feeding a constant power load. Scientific Reports. 2025;15:7061.
- [19] Rajput AK, Lather JS. Energy Management and DC bus Voltage Stabilization in a HRES based DC Microgrid using HESS. Serbian Journal of Electrical Engineering. 2023;20(2).

- [20] Smith RD, Lukowski JT, Weaver W. DC microgrid stabilization through fuzzy control of interleaved heterogeneous storage elements. In: 2018 IEEE 19th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL); 2018.
- [21] Smith R, Lukowski JT, Weaver W. Fuzzy control of energy storage systems in DC microgrids. In: 2019 20th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL); 2019.
- [22] Rahimi AM, Emadi A. Discontinuous-conduction mode DC/DC converters feeding constant-power loads. IEEE Trans Ind Electron. 2009;57(4):1318-1329.
- [23] Rao RV, Savsani VJ, Vakharia D. Teaching-learning-based optimization: a novel method for constrained mechanical design optimization problems. Comput Aided Des. 2011;43(3):303-315.
- [24] Rao RV, Savsani VJ, Vakharia D. Teaching-learning-based optimization: an optimization method for continuous non-linear large scale problems. Inf Sci. 2012;183(1):1-15.