Energy Engineering and Management, Vol. 14, No. 1, PP. 2-29, Spring 2024

A Brief Review of the Performance and Control of Direct Current Microgrids in Power Systems

Ghaznafar Shahgholian

Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran
shahgholiangh@gmail.com

Keywords:
distributed generation
renewable energy
energy and environment
microgrid
distribution system
control

Original Research Article

Paper History:
Received: 09/02/2024
Revise: 04/03/2024
Accepted: 06/04/2024

Abstract: Microgrid is a system of generating and distributing electrical energy. Microgrids include various power systems, each of which has different power capacity and produces different oscillations. By producing reliable and flexible power, microgrids can ensure the safety and electrical reliability of the network and reduce energy costs. A microgrid is a small power system with distributed energy sources and loads, which can work in two modes connected to the grid and island. The controller in a microgrid must provide a seamless transition between different modes of operation. By reviewing the studies, the application of microgrids has expanded to respond to the growing energy demand and solve environmental pollution problems. In this paper, a brief overview of the effectiveness of direct current microgrids in the power system has been provided. Direct current microgrids do not need frequency synchronization and reactive power management, and in terms of stability, flexibility, and complexity, they are superior to alternating current microgrids. The source voltages are the variables that control the direct current microgrid power, so they must be well managed to achieve the desired voltage regulation. Various classifications have been stated for microgrids based on control methods, structures, performance, and other parameters. This review can be considered as an initial platform for research study in the development of direct current microgrids based on centralized and intelligent control.

How to cite this article: Shahgholian, Gh., "*A Brief Review on the Performance and Control of Direct Current Microgrids in Power Systems*", Energy Engineering and Management, Vol. 14, No. 1, PP. 2-29, Spring 2024. https://doi.org/10.22052/eem.2024.254389.1051
© 2023 University of Kashan Press.

This is an open access article under the CC BY license.(http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Introduction

Amicrogrid is a system of generating and distributing electrical energy. Microgrids include various power systems, each of which has different power capacity and produces different fluctuations. By producing reliable and flexible power, microgrids can guarantee the safety and electrical reliability of the network and reduce energy costs. A microgrid is a small power system with energy sources and distributed loads, which can work in two modes connected to the grid and island. The controller in a microgrid must provide a seamless transition between different modes of operation. By reviewing the studies, the use of microgrids has expanded to respond to the

growing energy demand and solve environmental pollution problems.

A microgrid is a complex system, which must manage the load of the system and achieve the balance between energy demand and its production, so it needs planning, monitoring, and management for efficient and effective operation. Energy management plays an important role in the optimization and maximum use of microgrids. So far, various studies have been presented in the field of development and application, energy management, exploitation, protection, stability, the improvement of power quality, modeling, architecture, optimization and control of micro-grids.

Materials and Methods

However, huge challenges have also been raised in the study of microgrids considering the intermittent and stochastic characteristics of renewable energies. In this article, the aim is to study the performance and control of direct current (dc) microgrids. The key innovations of this paper are as follows:

- The classification of different hierarchical control methods.
- The study of direct current microgrid with different control methods presented in the hierarchical control scheme.
- The classification of microgrids based on different parameters.

The structure of the article is arranged in five sections. The first section deals with the importance of the topic and the statement of the problem. In the second section, microgrids are divided based on different parameters such as distribution systemand operation mode; also, the advantages and disadvantages of DC microgrid are mentioned. Electric loads are usually intermittent in nature, so the sources are dynamically controlled in order to provid the power consumption of the load at any moment with the constant voltage of the consumer terminal. In that way, microgrid control methods prove to be an important field of study and application. In the third section, microgrid control methods, based on DC microgrid, are described. In the fourth section, drop control and in the fifth section virtual impedance are mentioned respectively. Finally, the conclusions and suggestions are provided in the sixth section.

Results

Microgrids provide conditions for optimal use of integrated energy systems containing renewable energy sources. A microgrid, on a small scale is a network with distributed energy sources, generation system, energy storage system and load, which work both off-grid or connected to the grid. The use of microgrids will increase in the coming years, and its development capabilities will rise. Microgrids are considered to be one of the most suitable solutions for integrating distributed renewable generation into the electric power system.

In this article, a brief overview of the effectiveness of direct current (dc) microgrids in the power system has been discussed. DC microgrids do not need frequency synchronization and reactive power management and are superior to alternating current (ac) microgrids in terms of stability, flexibility, and complexity. The source voltages are the variables that control the DC power microgrid, so they must be well managed to achieve the desired voltage regulation. Various classifications based on control methods, structures, performance, and other parameters have been stated for microgrids. This review can be considered an initial platform for research study in the development of direct current microgrids based on a centralized and intelligent control.

Discussion and Conclusion

Direct current microgrids can provide the possibility of integrating energy storage and electric vehicles. Due to the random nature of renewable energies and variable load demand, there are great challenges such as voltage regulation, frequency control, energy management, and the optimization of economic operations in the study of microgrids.

In this paper, an overview of the application and classification of microgrids based on direct current microgrids has been provided. Classification of microgrid has been stated based on different factors; five factors of operation modes, control system architecture, supervisory control system, applications, and distribution system were considered. Expansion of direct current microgrid is necessary and important for the future power systems to match the load demand with distributed generation.

نشریه مهندسی و مدیریت انرژی

سال چهاردهم، شمارهٔ اول/ بهار ۱۴۰۳/ صفحه ۲ـ۲۹

مروری کوتاه بر عملکرد و کنترل ریزشبکه‌های جریان مستقیم در سیستم‌های قدرت

غضنفر شاهقلیان

استاد گروه مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

shahgholiangh@gmail.com

چکیده: ریزشبکه یک سیستم تولید و توزیع انرژی الکتریکی است. ریزشبکه‌ها شامل سیستم‌های قدرت مختلف‌اند که هرکدام ظرفیت توان مختلف دارند و نوسانات متفاوتی تولید می‌کنند. ریزشبکه‌ها با تولید توان قابل اعتماد و انعطاف‌پذیر می‌توانند ایمنی و قابلیت اطمینان الکتریکی شبکه را تضمین کنند و هزینه‌های انرژی را کاهش دهند. ریزشبکه یک سیستم قدرت کوچک دارای منابع انرژی و بارهای توزیع‌شده است که در دو حالت متصل به شبکه و جزیره‌ای می‌تواند کار کند. کنترل‌کننده در یک ریزشبکه باید انتقال یکپارچه بین حالت‌های مختلف عملکرد را فراهم کند. با بررسی مطالعات انجام‌شده، کاربرد ریزشبکه‌ها برای پاسخ‌گویی به تقاضای روبه‌رشد انرژی و حل مشکلات آلودگی محیط‌زیست گسترش پیدا کرده است. در این مقاله مروری کوتاه بر اثربخشی ریزشبکه‌های جریان مستقیم (dc) در سیستم قدرت شده است. ریزشبکه‌های dc نیازی به همگام‌سازی فرکانس و مدیریت توان راکتیو ندارند و ازنظر پایداری، انعطاف‌پذیری و پیچیدگی نسبت به ریزشبکه جریان متناوب (ac) برتری دارند. ولتاژهای منبع متغیرهایی هستند که ریزشبکهٔ dc توان را کنترل می‌کنند، بنابراین باید به‌خوبی مدیریت شوند تا تنظیم ولتاژ مطلوب حاصل گردد. تقسیم‌بندی مختلفی براساس روش‌های کنترل، ساختار، عملکرد و مؤلفه‌های دیگر برای ریزشبکه بیان شده است. این مرور به‌عنوان یک بستر اولیه برای مطالعهٔ تحقیقاتی در توسعهٔ ریزشبکه‌های جریان مستقیم براساس کنترل متمرکز و هوشمند می‌تواند در نظر گرفته شود.

واژه‌های کلیدی:

تولید پراکنده

انرژی تجدیدپذیر

انرژی و محیط‌زیست

ریزشبکه

سیستم توزیع

کنترل

مقاله علمی‌پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۲۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۲/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۱۸

https://doi.org/10.22052/eem.2024.254389.1051

۱. مقدمه

توسعهٔ پیوستهٔ سطح اقتصاد جهانی باعث افزایش مصرف انرژی شده و صنعت برق با تعدادی چالش مانند افزایش مصرف بار، راندمان انرژی پایین، کیفیت توان پایین و مسائل زیست‌محیطی درگیر است. سیستم‌های قدرت به‌طورکلی متمرکزند و برق تولیدشده توسط نیروگاه‌ها، با استفاده از خطوط انتقال به مصرف‌کنندگان در مسافت‌های طولانی انتقال داده می‌شود [۱ و ۲]. در سال‌های اخیر به‌دلیل کمبود سوخت‌های فسیلی،[1] حفاظت محیط‌زیست و تقاضای بیشتر برای انرژی‌های تجدیدپذیر مانند انرژی باد [۳]، سیستم فتوولتائیک[2] [۴ و ۵] و انرژی آب [۶]، توسعهٔ منابع تولید پراکنده[3] (DG) سازگار با محیط‌زیست اهمیت پیدا کرده است. تولید مقدار زیادی از برق با منابع انرژی تجدیدپذیر امکان‌پذیر است، ولی این تولید به‌صورت متناوب و تقریباً غیرقابل پیش‌بینی است. سهم منابع انرژی تجدیدپذیر در تولید برق بدون تأثیر بر امنیت، پایداری سیستم و قابلیت اطمینان شبکه باید افزایش داده شود. انرژی‌های تجدیدپذیر، تنوع زیادی را در شبکهٔ برق ایجاد می‌کنند که نیاز به تعادل کامل در تمام زمان بر روی توان الکتریکی تولیدی و مصرفی دارد [۷ و ۸].

ضرورت کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای[4] ناشی از سوزاندن سوخت‌های فسیلی برای تولید برق، اهمیت توسعهٔ ریزشبکه‌های مبتنی‌بر منابع انرژی تجدیدپذیر را زیاد کرده است [۹]. سیستم ریزشبکه[5] از ژنراتورها، مصرف‌کنندگان، دستگاه‌های ذخیره‌سازی انرژی و سیستم‌های هیبریدی تشکیل شده و به‌دلیل توانایی آن‌ها در یکپارچه‌سازی منابع انرژی توزیع‌شده با بارها و دستگاه‌های ذخیره‌سازی توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند [۱۰ و ۱۱]. ریزشبکه معمولاً ازطریق رابط‌های مبتنی‌بر مبدل منبع ولتاژ به شبکهٔ اصلی متصل می‌شوند. ویژگی‌های واسط‌های الکترونیک قدرت با ماشین‌های الکتریکی معمولی بسیار متفاوت است و به سیستم کنترل و طرح‌های حفاظتی متفاوتی نیاز دارد [۱۲ و ۱۳].

برای کار در مناطق کوچک ریزشبکه طراحی می‌شود؛ ولی از شبکهٔ هوشمند[6] برای تأمین برق در مناطق بزرگ استفاده خواهد شد. شبکهٔ هوشمند فناوری دیجیتالی است که برای ارتباط دوطرفه بین شرکت‌ها و مصرف‌کنندگان در طول خطوط انتقال استفاده می‌شود.

امروزه مراکز صنعتی و تحقیقاتی به سیستم‌های ریزشبکه و توسعهٔ آن‌ها برای بهبود قابلیت اطمینان انرژی شبکهٔ برق اهمیت زیادی می‌دهند. استفاده از ریزشبکه‌ها برای بهینه‌سازی مصرف انرژی و بهبود بهره‌وری انرژی با توجه به کاهش وابستگی به شبکه‌های برق سنتی رو به افزایش است [۱۴ و ۱۵]. ریزشبکه می‌تواند مستقل از شبکهٔ اصلی کار کند و توان پاک و پایداری را به‌صورت محلی تولید و توزیع نماید و انعطاف‌پذیری در مدیریت انرژی را فراهم کند [۱۶].

ریزشبکه باعث کاهش اثرات نامطلوب نفوذ تولیدات پراکنده می‌شود. ریزشبکه باعث صرفه‌جویی هزینه در انتقال مسافت‌های طولانی می‌شود و با کاهش تلفات توان انتقالی باعث بهبود راندمان توان می‌شود. به‌طور خلاصه می‌توان از مزایای ریزشبکه‌ها به افزایش امنیت و بهره‌وری انرژی، بهبود قابلیت اطمینان الکتریکی، بهبود کیفیت توان و اثرات مثبت زیست‌محیطی را نام برد. از معایب ریزشبکه‌ها و مانع اصلی در راه استقرار گستردهٔ فناوری آن‌ها می‌توان به هزینهٔ اولیهٔ زیاد، پیچیدگی، پیروی از مقررات خاص، طراحی در مقیاس محدود، فقدان استانداردهای لازم و مشکلات فنی اشاره کرد [۱۷]. برای بهبود کیفیت و عملکرد ریزشبکه روش‌های کاهش هارمونیک شبکه بسیار مهم است. روش‌های کاهش هارمونیک را می‌توان به سه گروه تقسیم‌بندی کرد [۱۸]: روش‌های غیرفعال،[7] روش‌های یکسوکنندهٔ چند پالس[8] و روش‌های لغو هارمونیک فعال.[9]

ریزشبکه یک سیستم پیچیده‌ای است که باید بار سیستم را مدیریت کند و تعادل بین تقاضای انرژی و تولید آن را حاصل نماید، بنابراین برای عملکرد کارآمد و مؤثر به برنامه‌ریزی، نظارت و مدیریت نیاز دارد [۱۹]. مدیریت انرژی نقش مهمی در بهینه‌سازی و حداکثر استفاده از ریزشبکه‌ها ایفا می‌کند. تاکنون مطالعات مختلفی درزمینهٔ توسعه و کاربرد [۲۰]، مدیریت انرژی [۲۱]، بهره‌برداری [۲۲]، حفاظت [۲۳]، پایداری [۲۴]، بهبود کیفیت توان [۲۵]، مدل‌سازی [۲۶]، معماری [۲۷]، بهینه‌سازی [۲۸] و کنترل [۲۹] ریزشبکه‌ها ارائه شده است. در جدول (۱) مشارکت چند مقالهٔ مروری مربوط به چالش‌های ریزشبکه‌ها در زمینه‌های مختلف آمده است.

بااین‌حال، چالش‌های بزرگی نیز در مطالعهٔ ریزشبکه‌ها با در نظر گرفتن ویژگی‌های متناوب و تصادفی انرژی‌های تجدیدپذیر مطرح شده است.

1. Fossil Fuels
2. Photovoltaic System
3. Distributed Generation Resources
4. Greenhouse Gases
5. Microgrid System
6. Smart Grid
7. Passive Techniques
8. Multi-Pulse Rectifier Techniques
9. Active Harmonic Cancellation Techniques

جدول (۱): تعدادی از مطالعات مروری درزمینهٔ ریزشبکه‌ها

موضوع	مرجع	شرح
کیفیت توان	[۳۰]	نمای کلی از یک ریزشبکه و مدل‌سازی ارائه‌شده که در آن از داده‌های واقعی محیطی استفاده می‌شود. از روش‌های کنترل، دستگاه‌های مختلف و الگوریتم‌ها برای بهبود کیفیت توان استفاده شده است.
	[۳۱]	کیفیت توان ریزشبکه تحت‌تأثیر منفی ماهیت متناوب ذاتی منابع تجدیدپذیر و ماهیت کلیدزنی واسطهای الکترونیک قدرت قرار دارند. روش‌های افزایش کیفیت توان در ریزشبکه‌ها با استفاده از سیستم‌های انتقال ac انعطاف‌پذیر ارائه شده است.
مدیریت انرژی	[۳۲]	مدیریت انرژی در ریزشبکه‌ها یک سیستم اطلاعاتی و کنترلی است که تضمین انرژی با حداقل هزینه‌های عملیاتی را تأمین می‌کند. مدیریت انرژی در سیستم‌های ریزشبکه با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر ارائه شده که در آن تحلیل مقایسه‌ای از اهداف مختلف بهینه‌سازی و محدودیت‌ها بیان شده است.
	[۳۳]	تحلیل مقایسه‌ای از استراتژی‌های تصمیم‌گیری در سیستم‌های مدیریت انرژی ارائه شده است. روش‌ها براساس کاربردی بودن آن‌ها برای عملکرد بهینهٔ ریزشبکه انتخاب می‌شوند.
حفاظت	[۳۴]	ریزشبکه‌ها شامل دستگاه‌هایی هستند که تنظیمات حفاظتی را مطابق وضعیت سیستم تغییر می‌دهند. فناوری‌های ارتباطی نقش مهمی برای هماهنگی بین واکنش‌های دستگاه‌های تطبیقی دارد. تجزیه و تحلیلی از فناوری‌های ارتباطی اصلی ارائه شده و روش‌های بهینه‌سازی بررسی شده‌اند.
	[۳۵]	چالش‌های اصلی و رویکردهای مختلف حفاظتی از دو ریزشبکهٔ ac و dc بررسی شده و طرح‌های مورد استفاده طبقه‌بندی شده‌اند.
	[۳۶]	حفاظت ریزشبکه‌های dc و مشکلات موجود و الزامات کلیدی برای محافظت ریزشبکه‌ها ازنظر تشخیص خطا، مکان و قابلیت‌های طبقه‌بندی بررسی شده است. با توجه به فقدان استانداردها و راهنمایی لازم برای حفاظت سیستم dc، این سیستم‌ها باید بیشتر مطالعه شوند. تشخیص عیب و مکان سیستم‌های ac را نمی‌توان برای ریزشبکه‌های dc اعمال کرد و دستگاه حفاظتی رله‌ها باید برای استفاده در ریزشبکه‌های dc اصلاح شوند.
سیستم ذخیرهٔ انرژی	[۳۷]	سیستم ذخیره‌سازی انرژی هیبریدی مبتنی‌بر باتری–ابرخازن در کاهش تأثیر تبادلات دینامیکی توان بر طول عمر باتری در ریزشبکهٔ مستقل بررسی شده است. پیچیدگی فنی و پایداری اقتصادی سیستم ریزشبکهٔ مستقل بررسی شده و توپولوژی سیستم و مدیریت انرژی و استراتژی‌های کنترل مقایسه شده‌اند.
کنترل	[۳۸]	کنترل‌کنندهٔ مرکزی مهم‌ترین نقش برای عملکرد رضایت‌بخش خودکار و کنترل ریزشبکه در دو حالت کاری را دارد. تکامل و پیشرفت فناوری همراه با طبقه‌بندی کنترل‌کننده‌های مرکزی ریزشبکه ارائه شده است. کنترل‌کنندهٔ مرکزی در حفاظت ریزشبکه، پایداری و کیفیت توان نقش مهمی دارد.
	[۳۹]	مروری بر مدل‌سازی ارائه شده و روش‌های کنترل ریزشبکه و بررسی ترکیب ریزشبکه در شبکهٔ سراسری بررسی شده است.
	[۴۰]	رویکردهای حل مشکل کنترل ولتاژ اولیه و اشتراک توان راکتیو بین واحدهای تولید ارائه شده است. روش‌های بدون ارتباط مانند کنترل افتی بررسی شده‌اند. پیکربندی و پارامترها بر عملکرد شبکه تأثیر زیادی دارند و مقایسهٔ یکسان بین روش‌ها امکان‌پذیر نیست.
	[۴۱]	تکنیک‌های کنترل سلسله‌مراتبی برای مدیریت نوسان تولید انرژی‌های تجدیدپذیر و تغییرات بار ناگهانی به‌طور گسترده استفاده می‌شوند. رویکردهای مبتنی‌بر یادگیری ماشین در مدیریت کنترل و عملیات ریزشبکه‌ها بررسی شده است. یادگیری ماشین در کنترل سلسله‌مراتبی ریزشبکه دقت کنترل را افزایش می‌دهد و مشکل بهینه‌سازی سیستم را برطرف می‌کند.
	[۴۲]	ریزشبکهٔ هیبریدی از هر دو شبکهٔ dc و ac تشکیل شده که توسط یک مبدل به‌هم‌پیوسته متصل شده‌اند. مدیریت توان در ریزشبکهٔ هیبریدی برای کنترل ولتاژ و فرکانس مهم است. طرح‌های کنترل مختلف برای تنظیم ولتاژ و فرکانس در عملکرد مستقل و حالت انتقال ریزشبکهٔ هیبریدی ارائه شده است. استراتژی‌های مختلف مبدل به‌هم‌پیوسته مبتنی‌بر افتی و کنترل مبتنی‌بر ارتباطات بررسی شده است.
پایداری	[۴۳]	با توجه به ارتباط منابع انرژی پراکنده در ریزشبکه با شبکهٔ شهری توسط اینورترها، ویژگی‌های پایداری ریزشبکه بسیار متفاوت از یک شبکهٔ سنتی است. یک روش طبقه‌بندی پایداری براساس بررسی ویژگی‌های ریزشبکه با در نظر گرفتن حالت عملیات ریزشبکه، اختلال‌های مختلف و چارچوب زمانی ارائه شده است.
	[۴۴]	مطالعهٔ پایداری سیگنال کوچک در ریزشبکه‌ها به‌علت فقدان پارامترهای دقیق ریزشبکه و نوسانات تولید برق منابع تولید پراکنده مهم است. مروری بر روش‌های پایداری سیگنال کوچک در ریزشبکه‌ها ارائه شده است. چارچوبی براساس روش مبتنی‌بر آنتروپی منفرد و مداد ماتریس برای پایداری سیگنال کوچک ریزشبکه پیشنهاد شده است.

در این مقاله هدف مطالعهٔ عملکرد و کنترل ریزشبکه‌های جریان مستقیم[1] (dc) است. نوآوری‌های کلیدی این مقاله به شرح زیر است:

ـ طبقه‌بندی روش‌های کنترل سلسله‌مراتبی مختلف مورد بحث قرار گرفته است.

ـ مطالعه دربارهٔ ریزشبکهٔ جریان مستقیم همراه با روش‌های کنترلی مختلف در طرح کنترل سلسله‌مراتبی[2] ارائه شده است.

ـ تقسیم‌بندی ریزشبکه براساس پارامترهای مختلف مانند کاربرد، مد عملکرد، سیستم توزیع و استراتژی کنترل بیان شده است.

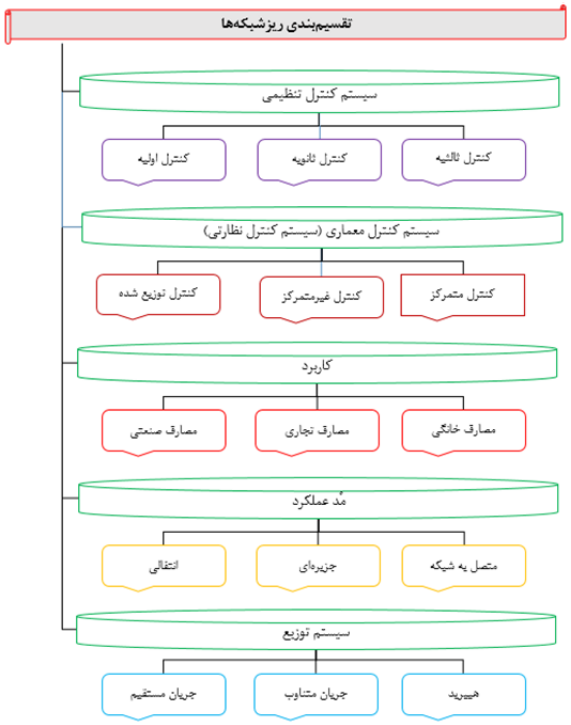
1. Direct Current Microgrids

2. Hierarchical Control

ساختار مقاله در پنج بخش تنظیم شده است: بخش اول به اهمیت موضوع و بیان مسئله می‌پردازد. در بخش دوم ریزشبکه‌ها براساس پارامترهای مختلف مانند سیستم توزیع[1] و حالت عملکرد تقسیم‌بندی می‌شوند و مزایا و معایب ریزشبکهٔ dc اشاره می‌گردد. بارهای الکتریکی معمولاً ماهیت متناوب دارند و بنابراین منابع به‌صورت دینامیک کنترل می‌شوند تا در هر لحظه توان مصرفی بار با ثابت بودن ولتاژ پایانهٔ مصرف‌کننده تأمین شود؛ بنابراین روش‌های کنترل ریزشبکه، یک حوزهٔ مهم مطالعه و کاربردی است. در بخش سوم روش‌های کنترل ریزشبکه‌ها با محوریت ریزشبکهٔ dc بیان شده است. در بخش چهارم کنترل افتی و در بخش پنجم امپدانس مجازی به‌ترتیب اشاره شده است؛ درنهایت نتیجه‌گیری و پیشنهادات در بخش ششم آمده است.

۲. تقسیم‌بندی ریزشبکه‌ها

ریزشبکه‌ها براساس موقعیت، زیرساخت‌ها، نوع توان، سیستم کنترل و کاربرد آن‌ها مطابق شکل (۱) طبقه‌بندی می‌شوند که در این قسمت به‌طور خلاصه اشاره می‌شود [۴۵ و ۴۶].



شکل (۱): تقسیم‌بندی ریزشبکه‌ها براساس کاربرد و کنترل

۱.۲. طبقه‌بندی ریزشبکه براساس مدهای عملکرد

ریزشبکه‌ها در دو حالت متصل به شبکه[2] و حالت جزیره‌ای[3] (خودمختار[4]) می‌توانند کار کنند [۴۷ و ۴۸]. در حالت متصل به شبکه منابع پراکنده به‌همراه منابع دیگر که در شبکهٔ اصلی قرار دارند، بار مصرفی را تأمین می‌کنند [۴۹ و ۵۰]. پس از اتفاق افتادن خاموشی در شبکه، ریزشبکه می‌تواند در حالت جزیره‌ای برای تأمین بار با منبع تغذیهٔ استاندارد کار کند [۵۱]. حفاظت از ریزشبکه، نیاز ضروری و مهم در اجرا و در دو حالت عملکرد ریزشبکه است [۵۲ و ۵۳]. ریزشبکه باید از اجزای خود پس از وقوع خطا محافظت کند [۵۴ و ۵۵].

الگوریتم کنترل برای سیستم متصل به شبکه بسیار ساده‌تر از الگوریتم کنترل برای سیستم جزیره‌ای است. تغییر سرعت چرخش دیزل ژنراتور در ریزشبکهٔ جزیره‌ای به‌دلیل اختلال بیش از اندازه زیاد می‌شود که تغییرات زیاد فرکانس را ممکن است به‌همراه داشته باشد و باعث ناپایداری ریزشبکه گردد [۵۶ و ۵۷]. اثرات امپدانس خط نامتناسب در ریزشبکهٔ جزیره‌ای باعث عدم تقسیم دقیق توان راکتیو با روش کنترل افتی معمولی[5] می‌شود [۵۸]. انتقال ناگهانی از ریزشبکهٔ متصل به شبکه به ریزشبکهٔ مستقل، یکی از حالت‌های عملیاتی بحرانی است؛ زیرا شبکه در طول انتقال با تغییرات ناگهانی روبه‌روست که ممکن است منجر به اختلال در عملکرد سیستم کنترل و احتمال خرابی در سیستم قدرت شود [۵۹ و ۶۰]. با توجه به اینکه ویژگی‌ها و ظرفیت تولید برق در منابع انرژی توزیع‌شده متفاوت است، ریزشبکهٔ حالت جزیره‌ای نسبت به ریزشبکهٔ حالت متصل نیاز به تنظیم سریع است [۶۱].

۲.۲. طبقه‌بندی ریزشبکه براساس منبع تغذیه

ریزشبکه‌ها براساس معماری (توپولوژی سیستم) یا سیستم توزیع به سه گروه ریزشبکهٔ جریان مستقیم [۶۲]، ریزشبکهٔ جریان متناوب[6] (ac) [۶۳] و ریزشبکهٔ هیبرید[7] [۶۴] تقسیم‌بندی می‌شوند.

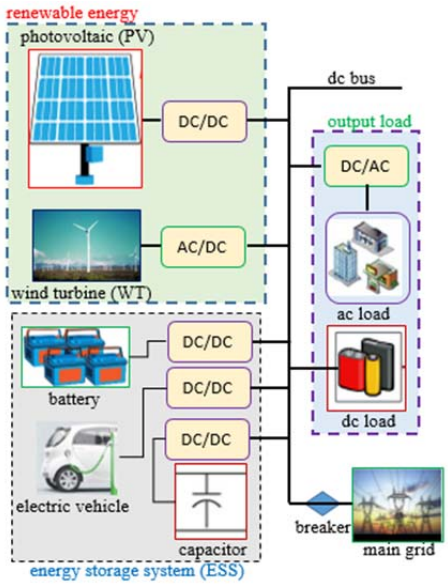
انتخاب بین ریزشبکه‌ها به هدف از کاربرد آن‌ها بستگی دارد. در کاربردهایی مانند کارخانه‌های صنعتی و بیمارستان‌ها که نیاز به توان بالا، ولتاژ بالا همراه با قابلیت اطمینان بالاست، از ریزشبکهٔ ac استفاده می‌شود. در کاربردهایی مانند دکل‌های مخابراتی و برق‌رسانی روستایی که به توان کم، ولتاژ پایین و راندمان بالا نیاز است، از ریزشبکهٔ dc استفاده می‌شود. ریزشبکهٔ dc به سه گروه تک‌قطبی،[8] دوقطبی[9] و هم‌قطبی[10] تقسیم‌بندی می‌شوند [۶۵].

1. Distribution System
2. Grid-Connected Mode
3. Isolated Mode
4. Autonomous
5. Conventional Droop Control
6. Alternating Current Microgrid
7. Hybrid Microgrid
8. Unipolar (Mono-Polar)
9. Bipolar
10. Homo-Polar

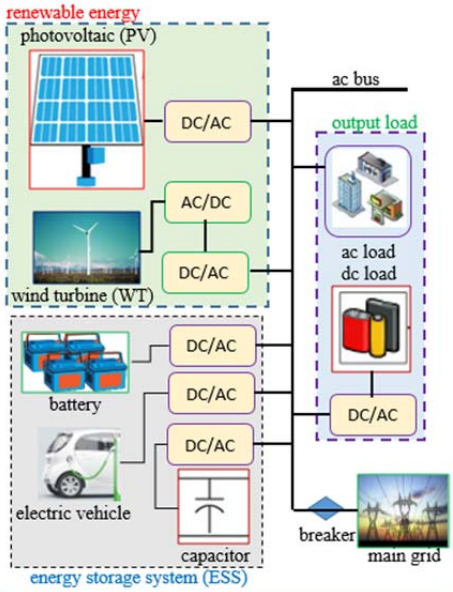
در یک سیستم ریزشبکهٔ هیبریدی، هر دو شبکهٔ dc و ac وجود دارند و برای ارتباط بین آن‌ها از یکسوکنندهٔ پل کامل سه‌فاز یا اینورتر منبع ولتاژ استفاده می‌شود [۶۶ و ۶۷]. اینورترها جرم چرخشی ندارند و اینرسی کل سیستم کاهش پیدا می‌کند که این کاهش اینرسی می‌تواند در شرایط عدم قطعیت بر انعطاف‌پذیری و پایداری ریزشبکه تأثیر گذارد [۶۸ و ۶۹]. اینرسی در حالت متصل به شبکه به‌اندازهٔ کافی وجود دارد و مسائل مربوط به پایداری توسط شبکهٔ اصلی حل می‌شود؛ ولی در حالت جزیره‌ای، ریزشبکه با مشکلات در ارتباط با پایداری روبه‌رو خواهد شد [۷۰ و ۷۱]. شکل‌های (۲) و (۳) به‌ترتیب ساختار یک نمونه از ریزشبکهٔ ac و هیبریدی را نشان می‌دهند.

در یک ریزشبکهٔ dc، ذخیرهٔ انرژی و بخش بزرگی از منابع پراکنده و بارها با استفاده از یک یا چند باس dc به هم متصل می‌شوند [۷۲ و ۷۳]. شکل (۴) یک نمونه از ریزشبکهٔ dc را نشان می‌دهد. در این ساختار، منابع با خروجی dc مستقیماً به باس dc متصل شده‌اند؛ ولی منابع با خروجی ac با استفاده از مبدل به باس dc متصل می‌شوند [۷۴ و ۷۵]. برای اطمینان از عملکرد عادی یک ریزشبکهٔ dc، سیستم ذخیرهٔ انرژی با یک راهبرد بهینه بسیار مهم است [۷۶ و ۷۷].

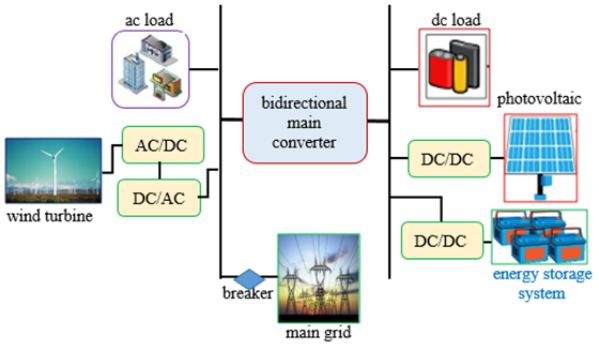
ریزشبکهٔ dc ازنظر کارایی سیستم، هزینه، کنترل غیرپیچیده، قابلیت اطمینان بالاتر و اندازهٔ سیستم نسبت به ریزشبکهٔ ac دارای مزیت است.



شکل (۲): یک نمونه از سیستم ریزشبکهٔ جریان مستقیم



شکل (۳): یک نمونه از سیستم ریزشبکهٔ جریان متناوب



شکل (۴): یک نمونه از سیستم ریزشبکهٔ هیبرید

توان dc بیشتر توسط منابع انرژی تجدیدپذیر تولید می‌شود و منابع تولیدکنندهٔ توان مانند ایستگاه شارژ خودروی الکتریکی[1] [۷۸]، پانل‌های فتوولتائیک[2] [۷۹] و سلول‌های سوختی [۸۰] به‌راحتی در یک سیستم dc قرار می‌گیرند. ریزشبکهٔ dc با توجه به اینکه اکثر دستگاه‌های سیستم‌های ذخیره‌کنندهٔ انرژی[3] (ESS) به‌صورت dc کار می‌کنند، تعداد کمتری مبدل الکترونیکی قدرت نیاز دارد و بنابراین راندمان در آن بهبود پیدا می‌کند. ریزشبکهٔ dc نسبت به ریزشبکهٔ ac دارای الگوی فلوی توان ساده‌تری است. سه متغیر ولتاژ، فرکانس و فاز در ریزشبکهٔ ac برای تعیین فلوی توان استفاده می‌شود؛ ولی در ریزشبکهٔ dc فقط از ولتاژ باس dc برای تعیین فلوی توان استفاده می‌گردد. بنابراین ریزشبکهٔ dc نیاز به هماهنگ‌سازی فرکانس و مدیریت توان راکتیو ندارد [۸۱ و ۸۲]. در ریزشبکهٔ dc امکان افزایش

1. Electric Vehicle Charging Station
2. Photovoltaic Panels
3. Energy Storage Systems

ظرفیت خط توزیع به‌دلیل نداشتن اثر پوستی وجود دارد [۸۳]. برای جلوگیری از شارژ و تخلیهٔ بیش از حد در سیستم‌های ذخیرهٔ انرژی، کنترل هماهنگ در ریزشبکه‌های dc نیاز است [۸۴ و ۸۵]. از معایب ریزشبکه‌های dc می‌توان به اتصال بارهای ولتاژ بالا مانند موتورهای القایی و توربین‌های بادی همراه با مبدل‌های حجیم و گران اشاره کرد [۸۶]. همچنین نیاز به سرمایه‌گذاری اولیه دارد و به‌علت داشتن سطوح جریان بالاتر و زمان رفع خطای کمتر، خطرات قوس الکتریکی و برق‌گرفتگی وجود دارد [۸۷]. یکی دیگر از معایب ریزشبکهٔ dc عدم اتصال مستقیم بارهای ac به ریزشبکه و عدم استاندارد بودن ولتاژ بارهای dc است. بنابراین مراحل توان اضافی برای تطبیق سطح باس dc یا تولید ولتاژ ac مورد نیاز است [۸۸]. ریزشبکهٔ dc ازنظر رفع خطا توسعهٔ قابل قبولی پیدا نکرده و فاقد تجهیزات حفاظتی اولیه مانند قطع‌کننده‌های مدار، فیوزها و رله‌های حفاظتی است [۸۹ و ۹۰]. طرح‌های حفاظتی مورد استفاده تحت‌تأثیر تغییر زمانی معماری ریزشبکهٔ جریان مستقیم قرار دارند که انواع جریان خطا و ماهیت آن‌ها تأثیر را بیشتر می‌کند [۹۱]. تخلیهٔ خازن پیوند dc مبدل باعث افزایش سریع جریان خطا در مدت‌زمان کوتاه می‌شود که مانعی برای حفاظت ریزشبکهٔ dc است [۹۲]. مقایسهٔ بین دو ریزشبکهٔ dc و ac در جدول (۲) به‌طور خلاصه آمده است [۹۳ و ۹۴].

۳.۲. طبقه‌بندی ریزشبکه براساس معماری

انتخاب توپولوژی یک ریزشبکهٔ dc مناسب بسیار اهمیت دارد؛ زیرا بر پارامترهای حیاتی سیستم قدرت مانند کنترل‌پذیری و انعطاف‌پذیری تأثیر دارد [۹۵]. در هنگام طراحی توپولوژی ریزشبکهٔ dc سطح ولتاژ باید در نظر گرفته شود. توپولوژی‌های یک ریزشبکهٔ dc به شش نوع مختلف طبقه‌بندی می‌شوند که عبارت‌اند از [۹۶]: توپولوژی شعاعی[1] [۹۷ و ۹۸]، توپولوژی چند باس[2] [۹۹ و ۱۰۰]، توپولوژی چندترمینال[3] [۱۰۱ و ۱۰۲]، توپولوژی باس‌حلقه[4] [۱۰۳ و ۱۰۴]، توپولوژی نردبانی[5] [۱۰۵] و توپولوژی منطقه‌ای[6] [۱۰۶ و ۱۰۷].

کنترل هماهنگ توزیع‌شده مبتنی‌بر سیستم چندعاملی دوسطحی برای ریزشبکهٔ dc شعاعی در مرجع [۱۰۸] ارائه شده که در آن تأخیرهای زمانی انتقال تمرکز در نظر گرفته شده‌اند. همچنین کنترل محلی با استفاده از عامل سطح اول و کنترل هماهنگ توزیع‌شده (شامل کنترل فیدبک محلی و قانون کنترل هماهنگ جداسازی) با استفاده از عامل سطح ثانویه اجرا شده است.

جدول (۲): مقایسه بین ریزشبکه‌های جریان مستقیم و جریان متناوب

ریزشبکهٔ جریان متناوب (ACMG)	ریزشبکهٔ جریان مستقیم (DCMG)	ریزشبکه / پارامتر
تحت‌تأثیر اختلالات خارجی	بی‌تأثیر از اختلالات خارجی	پایداری
کاهش راندمان	افزایش راندمان	راندمان تبدیل
نیاز دارد	نیاز ندارد	تنظیم فرکانس
کم	زیاد	هزینهٔ سیستم
زیاد	کم	هزینهٔ مبدل‌ها
ساده و کم‌هزینه	پیچیده و پرهزینه	سیستم حفاظتی
پیچیده	ساده	سیستم کنترل
کافی و توسعه‌یافته	کمبود استاندارد مورد نیاز	استانداردها
لازم دارد.	لازم ندارد.	هماهنگ‌سازی
کاهش راندمان به‌علت وجود مصرف‌کنندهٔ توان راکتیو	افزایش راندمان به‌علت فقدان مصرف‌کنندهٔ توان راکتیو	راندمان انتقال
سخت	آسان	ادغام در منابع تجدیدپذیر
دارد.	ندارد.	اثرپوستی
معمولاً سخت	آسان	کنترل و کیفیت توان

۳. کنترل ریزشبکه

تمرکززدایی تولید با ساختار کنترلی در ارتباط است تا زیرساخت شبکه‌ای را که در آن هدف مدیریت انرژی است، فراهم کند [۱۰۹ و ۱۱۰]. کنترل مناسب ریزشبکه برای عملکرد پایدار و اقتصادی آن لازم و ضروری است [۱۱۱ و ۱۱۲]. به‌علت عملکرد دوگانهٔ ریزشبکه‌ها، مدیریت متمرکز[7] آن‌ها آسان نیست. سیستم کنترل در ریزشبکه یک حوزهٔ تحقیقاتی بااهمیت است [۱۱۳ و ۱۱۴]. در انتخاب توپولوژی سیستم کنترل در یک ریزشبکه، عوامل مختلفی مانند ساختار ارتباطات، سطح مراحل کنترل، منابع انرژی، بارهای مصرف‌کننده، سیستم ذخیره‌سازی باید در نظر گرفته شود [۱۱۵ و ۱۱۶]. از وظایف ساختار کنترل ریزشبکه می‌توان به این موارد اشاره کرد [۱۱۷ و ۱۱۸]: الف) تنظیم ولتاژ و فرکانس برای دو حالت مختلف عملکرد و کنترل مستقل توان‌های اکتیو و راکتیو؛ ب) اشتراک گذاشتن مناسب بار و هماهنگی بین منابع انرژی پراکنده؛ ج) قطع فوری از شبکهٔ اصلی یا همگام‌سازی مجدد ریزشبکه با شبکهٔ اصلی؛ د) کنترل جریان برق بین

1. Radial Topology
2. Multi Bus Topology
3. Multi Terminal Topology
4. Ring Bus DC Microgrid Topology
5. Ladder Topology
6. Zonal Topology
7. Centralized Management

ریزشبکه و شبکهٔ اصلی؛ ه) بهینه‌سازی هزینهٔ عملیاتی ریزشبکه؛ و) مدیریت صحیح گذرا و بازگرداندن شرایط دلخواه هنگام جابه‌جایی بین دو حالت متصل و حالت جزیره‌ای؛ ز) کاهش عدم تطابق موقت بین تولید و بار با پیش‌بینی بار و تولید مؤثر.

گروهی از منابع ریزشبکه مانند ژنراتورها [۱۱۹ و ۱۲۰]، باتری‌ها [۱۲۱ و ۱۲۲] و تولید همزمان گرما و برق[1] (CHP) [۱۲۳] کنترل‌پذیر و گروهی دیگر مانند سلول خورشیدی [۱۲۴]، توربین آبی [۱۲۵] و توربین بادی [۱۲۶] به‌صورت تولید پراکندهٔ احتمالی (غیرقابل کنترل) هستند که برای تولید توان استفاده می‌شوند [۱۲۷ و ۱۲۸]. مسئلهٔ مهم در کنترل ریزشبکه مربوط به منابع کنترل‌پذیر است. بنابراین برای کنترل ریزشبکه وجود حداقل یکی از منابع کنترل‌پذیر در ریزشبکه برای پایداری ریزشبکه ازنظر ولتاژ و فرکانس لازم است. در هنگام بروز خطای شبکه، استراتژی‌های کنترل واحد اصلی و زمان پاسخ آن‌ها تأثیر مهمی بر پایداری ریزشبکه دارند [۱۲۹ و ۱۳۰]. روش‌های کنترل تأثیر مهمی بر رفتار گذرا ریزشبکه‌های dc دارند؛ بنابراین تأثیر قابل توجهی بر جنبه‌های حفاظتی دارند [۱۳۱ و ۱۳۲]. محققان روش‌های مختلفی را برای کنترل ریزشبکه‌ها ارائه کرده‌اند که براساس هدف در نظر گرفته شده، راه‌حل‌های متفاوتی پیشنهاد شده است. راهبردهای کنترلی نقش کلیدی در بهبود عملکرد و کارایی ریزشبکه‌های dc دارد. تعدادی از مطالعات مروری کنترل ریزشبکهٔ dc در جدول (۳) آمده است.

جدول (۳): مطالعات مروری کنترل در ریزشبکه‌های جریان مستقیم

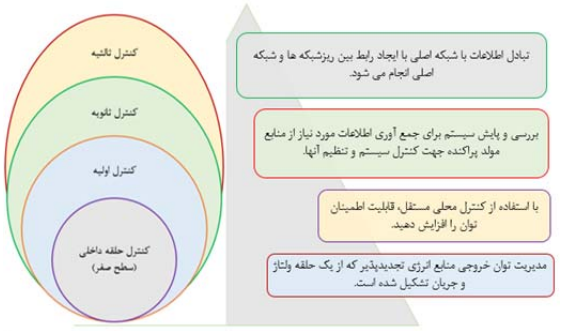
مرجع	موضوع	برجستگی تحقیق
[۱۳۳]	بررسی سیستماتیک استراتژی‌های کنترل قوی	مروری بر استراتژی‌های کنترل قوی و پیشرفتهٔ توسعه‌یافته همراه با کاربردهای آن‌ها در ریزشبکهٔ dc ارائه شده است.
[۱۳۴]	روش‌های کنترل ولتاژ	استراتژی کنترل ولتاژ و کنترل هماهنگ ریزشبکه‌های dc بررسی شده است.
[۱۳۵]	ساختار سلسله مراتبی و کنترل ولتاژ شین	ساختار کنترل چندسطحی در مقیاس زمانی مختلف برای اهداف کنترلی متمرکز شده و تضمین‌کنندهٔ عدم تأثیر اهداف کنترلی بر یکدیگر است. سطوح کنترل اولیه، ثانویه و ثالثیه براساس هدف کنترلی بررسی شده است. استراتژی کنترل ولتاژ باس dc بهبودیافته با بهره‌وری انرژی برای بهبود قابلیت سطح کنترل اولیه پیشنهاد شده است.
[۱۳۶]	اشتراک توان، بازیابی ولتاژ و پایداری	عملکرد پایدار و هماهنگ در ریزشبکه‌های dc براساس بر کنترل اولیه دشوار است. روش‌های کنترل ثانویه مانند طرح اشتراک جریان دینامیکی، کنترل سیستم عامل جهش و روش‌های کنترل ولتاژ مجازی برای تنظیم ولتاژ بررسی شده‌اند. همچنین رویکردهای کنترلی برای مطابقت با امپدانس بررسی شده است.
[۱۳۷]	تقسیم‌بندی براساس روش ارتباطی	راهبردهای کنترلی براساس عملکردهای مربوطه به کنترل محلی و هماهنگ طبقه‌بندی شده است. سه راهبرد کنترل اساسی عبارت‌اند از: کنترل متمرکز، کنترل غیرمتمرکز و کنترل توزیع‌شده که هرکدام ویژگی خاص خود را دارند.
[۱۳۸]	کنترل ثانویه	معمولاً از روش‌های سنتی کنترل افت در تنظیم تقسیم بار متناسب استفاده می‌شود. برای جلوگیری از معاوضه در تنظیم ولتاژ و دقت اشتراک توان، لایه‌های کنترل ثانویه در ساختار کنترل استفاده می‌شوند. مروری بر روش‌های کنترل اولیه و کنترل ثانویه با طبقه‌بندی آن‌ها انجام شده است.

۱.۳. کنترل چندسطحی ریزشبکه (سیستم کنترل تنظیمی)

در یک ریزشبکه برای بهبود بیشتر پایداری از سطوح کنترل مختلف به‌صورت متوالی استفاده می‌شود که هرکدام بخشی از وظیفهٔ پایداری را بر عهده دارند [۱۳۹]. ساختار کنترل سلسله‌مراتبی براساس تفاوت در مقیاس‌های زمانی الزام‌های مختلف کنترل است [۱۴۰]. در روش کنترل سلسله‌مراتبی ریزشبکه‌ها با استفاده از چندین حلقهٔ کنترل کار می‌کنند. ساختار کنترل سلسله‌مراتبی شامل کنترل‌کننده‌های محلی، سطح اول، سطح دوم و سطح سوم می‌شود که از میلی‌ثانیه تا ساعت یا یک روز متغیر است [۱۴۱]. کنترل محلی روی مبدل‌های قدرت دستگاه‌ها در ریزشبکه با استفاده از مدولاسیون پهنای پالس برای کنترل دینامیک مبدل‌ها عمل می‌کند [۱۴۲ و ۱۴۳].

ساختار کنترل سلسله‌مراتبی یک ریزشبکه را می‌توان در چهار سطح توصیف کرد: مسئول پردازش، سنجش و تنظیم، نظارت و سرپرستی، و نگهداری و بهینه‌سازی. مسئولیت سطح کنترل سلسله‌مراتبی، ارائهٔ کنترل بر تولید برق از منابع تجدیدپذیر است. ساختار کنترل سلسله‌مراتبی ریزشبکه‌ها مطابق شکل (۵) را می‌توان به چهار سطح کنترل طبقه‌بندی کرد [۱۴۴ و ۱۴۵]. سه سطح کنترل اصلی از روش‌های کنترل تنظیمی در ریزشبکه وجود دارد: سطح اول، سطح دوم و سطح سوم.

1. Combined Heat and Power

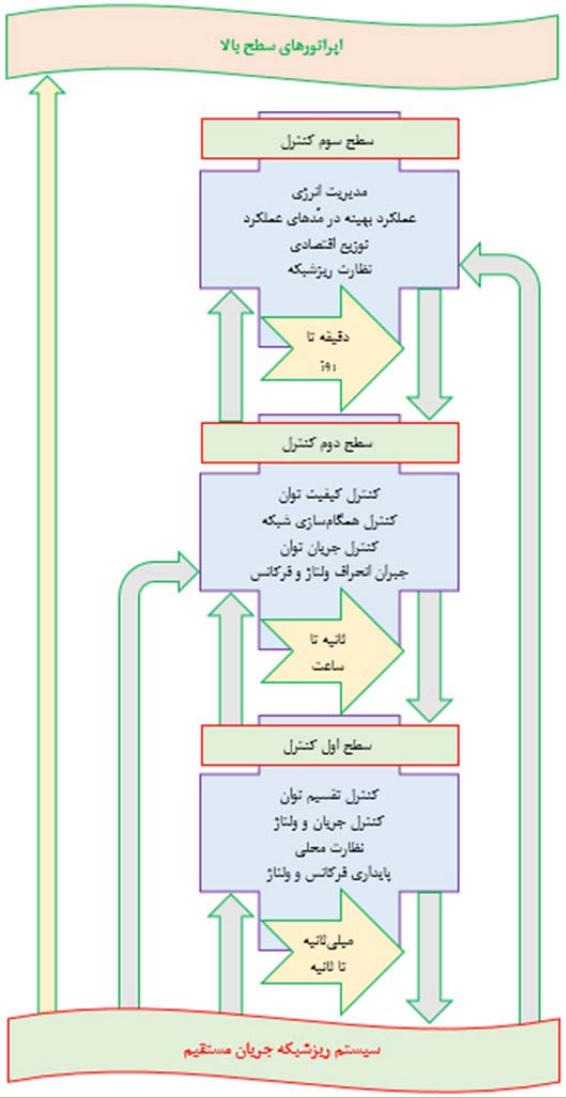


شکل (۵): ساختار کنترل سلسله‌مراتبی در ریزشبکه‌ها

اولین و اساسی‌ترین سطح در کنترل سلسله‌مراتبی، کنترل اولیه است [۱۴۶]. کنترل اولیه با تنظیم توان، پایداری را تضمین می‌کند و به‌صورت محلی کار می‌کند و نیازی به پیوند ارتباطی ندارد. این سطح کنترل در شبکه‌های معمولی براساس اینرسی چرخشی موجود در سیستم است [۱۴۷]. در ریزشبکه‌ها به‌دلیل استفاده از رابط الکترونیک قدرت، این ویژگی قابل توجه نیست [۱۴۸ و ۱۴۹].

کنترل ثانویه وظیفهٔ تنظیم انحراف فرکانس و ولتاژ به‌ازای تغییر بار یا تولید در ریزشبکه به‌سمت صفر را دارد. به عبارت دیگر، هدف از کنترل ثانویه حذف انحرافات فرکانس و ولتاژ است [۱۵۰]. کنترل ثانویه نسبت به سطح کنترل اولیه، دارای واکنش دینامیکی کندتر نسبت به تغییرات است [۱۵۱]. این سطح کنترل را می‌توان به کنترل متمرکز و کنترل غیرمتمرکز تقسیم کرد [۱۵۲]. در کنترل ثانویهٔ غیرمتمرکز، نظارت در ریزشبکه با استفاده از داده‌های هر منبع انرژی توزیع‌شده[1] (DER) انجام می‌شود. در کنترل ثانویهٔ متمرکز، کنترل‌کنندهٔ مرکزی استفاده می‌شود و اطلاعات جمع‌آوری‌شده برای گرفتن بهترین تصمیم کنترلی ممکن به کار برده می‌شوند [۱۵۳ و ۱۵۴].

اشتراک‌گذاری مناسب جریان بین مبدل‌ها یکی از مسائل مهم در ریزشبکهٔ dc است که ازطریق کنترل افتی برطرف شده ولی انحراف ولتاژ حاصل در باس dc باید جبران شود. یک طرح کنترل ثانویهٔ توزیع‌شده برای اشتراک جریان و بازیابی ولتاژ در مرجع [۱۵۵] ارائه شده که در آن پارامتر افت ولتاژ مجازی[2] ادغام شده است. در روش فوق نیازی به فیدبک از سیگنال ولتاژ باس dc نیست و در بارهای مقاومتی و بارهای توان ثابت کاربرد دارد. هدف از کنترل سطح سوم، مدیریت تولید با تنظیم ولتاژ و فرکانس دامنهٔ زمانی است که ریزشبکه در حالت متصل به شبکه است [۱۵۶ و ۱۵۷]. تبادل برق با شبکه در سطح سوم تنظیم می‌شود و عملکردهای پیشرفته مانند بازاریابی برق در این سطح دنبال می‌گردد. هر سطح مسئول کنترل ریزشبکه در مقیاس متفاوتی است و وظایف اصلی آن‌ها در شکل (۶) خلاصه شده است [۱۵۸ و ۱۵۹].

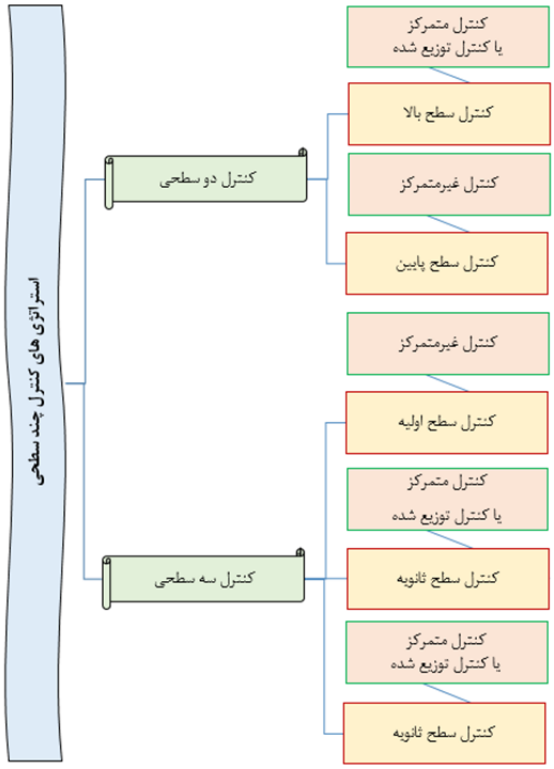


شکل (۶): وظایف سطوح کنترل در کنترل سلسله‌مراتبی

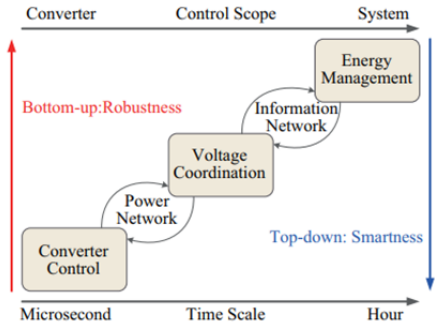
یکی از روش‌های اصلی برای مدیریت انرژی مستقل در ریزشبکه‌های جریان مستقیم، کنترل مبتنی‌بر ارتباطات متمرکز است که مشکل آن محدودیت پهنای باند ارتباطی و منابع محاسباتی است [۱۶۰]. با توجه به کاربرد ریزشبکهٔ جریان مستقیم، یک طرح کنترل قابل اعتماد و کارآمد مانند کنترل سلسله‌مراتبی برای کنترل ریزشبکهٔ dc نیاز است. استراتژی کنترل سلسله‌مراتبی شامل دو لایه سایبری[3] و لایهٔ فیزیکی[4] است و کاربرد زیادی در کنترل ریزشبکه‌های dc دارد. ساختار سلسله‌مراتبی ریزشبکهٔ جریان مستقیم در دو گروه معماری کنترل دوسطحی و معماری کنترل سه‌سطحی تقسیم‌بندی می‌شود [۱۶۱].

1. Distributed Energy Resource
2. Virtual Voltage Drop
3. Cyber Layer
4. Physical Layer

شکل (۷) تقسیم‌بندی استراتژی‌های چندسطحی در ریزشبکه‌های dc را نشان می‌دهد. برای ریزشبکهٔ dc سه سطح کنترل از پایین به بالا شامل سطح کنترل مبدل (کنترل توپولوژی‌های متنوع مبدل)، سطح هماهنگی ولتاژ (هماهنگ کردن فلوی توان در شبکهٔ قدرت) و سطح مدیریت انرژی (بهینه کردن عملکردها در محدودهٔ وسیع‌تر با استفاده از شبکهٔ اطلاعات) تعریف می‌شود. بنابراین اتکا به ارتباطات کاهش پیدا می‌کند و استحکام سیستم کنترل افزایش می‌یابد. شکل (۸) ترکیب استحکام و هوشمندی در کنترل ریزشبکهٔ dc را نشان می‌دهد [۱۶۲].



شکل (۷): استراتژی‌های کنترل چندسطحی در ریزشبکه‌های جریان مستقیم



شکل (۸): ترکیب استحکام و هوشمندی در کنترل ریزشبکهٔ جریان مستقیم

برای غلبه بر چالش کنترل مرتبط با هماهنگی چندین باتری در ریزشبکهٔ dc مستقل، یک استراتژی کنترل سلسله‌مراتبی دولایه در مرجع [۱۶۳] ارائه شده است. لایهٔ کنترل اولیه در سطح واحد با یک روش افت ولتاژ تطبیقی و لایهٔ کنترل ثانویه کنترل نظارتی برای استفاده از رابط ارتباطی با پهنای باند کم بین کنترل‌کنندهٔ مرکزی و منابع است.

استراتژی کنترل سلسله‌مراتبی مبتنی‌بر برنامهٔ دینامیکی تطبیقی و الگوریتم‌های اجماع در مرجع [۱۶۴] برای تحقق عملیات اقتصادی ریزشبکهٔ dc ارائه شده که در آن برای حفظ ولتاژ پایدار زمان تنظیم توان، یک روش کنترل ثانویه در لایهٔ فیزیکی استفاده شده است. یک الگوریتم اجماع مبتنی‌بر رویداد نیز در لایهٔ سایبری برای تنظیم منابع انرژی توزیع‌شده در لحظهٔ توان بهینهٔ خروجی استفاده می‌شود.

کنترل پیش‌بینی مدل با پاسخ سریع گذرا و انعطاف‌پذیری برای غلبه بر محدودیت‌ها در ریزشبکه‌ها استفاده می‌شود. مروری از کنترل پیش‌بینی مدل در ریزشبکه‌های مستقل و متصل‌به‌هم در مرجع [۱۶۵] ارائه شده که در آن استراتژی‌های کنترل سطح مبدل و سطح شبکه در سه لایهٔ معماری کنترل سلسله‌مراتبی در نظر گرفته شده است.

جدول (۴) مقایسه سطوح کنترلی در ریزشبکه ازنظر وظیفه و هدف سطح کنترلی آمده است.

جدول (۴): مقایسهٔ سطوح کنترلی در ریزشبکه

وظیفه	هدف	سطح
* جلوگیری از فروپاشی ولتاژ/فرکانس * کنترل اولیه در بازهٔ زمانی چند ثانیه کار می‌کند.	* پایداری اولیهٔ فرکانس/ زاویهٔ فرکانسی	اولیه
* رویدادهایی مانند جزیره‌ای شدن، تغییر بار و وقوع خطا باعث ایجاد خطای حالت ماندگار در متغیرهای اساسی می‌شود.	* جبران انحراف ولتاژ و انحراف فرکانس ناشی از کنترل اولیه	ثانویه
* نیاز به کنترل اصلی برای ایجاد هماهنگی در ریزشبکه است. * کنترل مدیریت توان در ریز شبکه	* کنترل ریزشبکه‌های گسترده با چند منبع کنترل‌پذیر ولتاژ	ثالثیه

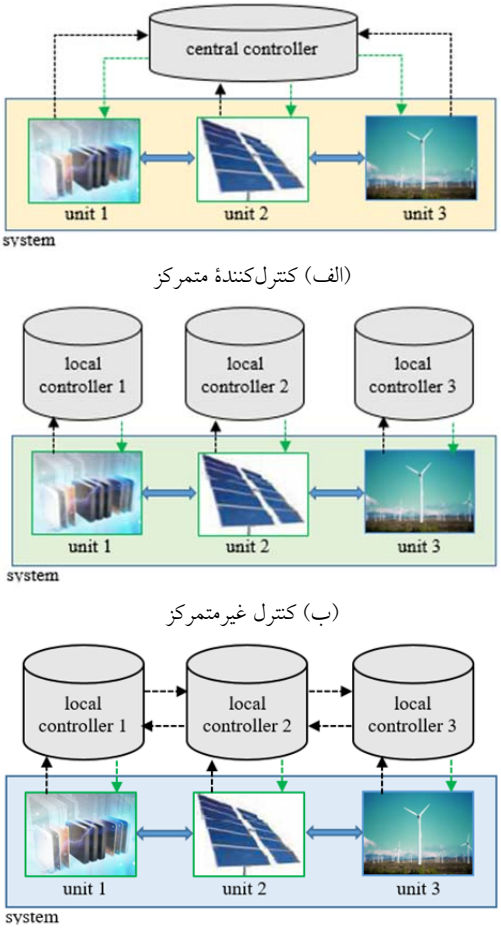
۲.۳. کنترل‌کنندهٔ نظارتی (معماری سیستم کنترل)

ارتباط یکی از عناصر اصلی سیستم کنترل است. کنترل‌کنندهٔ ریزشبکه براساس پیوند ارتباطی و معماری کنترل سیستم‌های قدرت به سه گروه کنترل اساسی شامل کنترل متمرکز [۱۶۶]، کنترل نیمه‌متمرکز [۱۶۷] و کنترل توزیع‌شده [۱۶۸] تقسیم‌بندی می‌شود [۱۶۹]. شکل (۹) نمونه طرح‌های فوق را نشان می‌دهد [۱۷۰ و ۱۷۱].

در روش کنترل متمرکز تمام اندازه‌گیری‌ها در واحد پردازش مرکزی جمع‌آوری می‌شود. هدف، هماهنگی و برنامه‌ریزی ژنراتورها

و بار قابل کنترل برای به حداکثر رساندن درآمد حاصل از مشارکت در بازار انرژی است. استراتژی کنترل اصلی–پیرو یک مثال معمولی از یک طرح کنترل متمرکز است.

در روش کنترل غیرمتمرکز از اندازه‌گیری‌های محلی استفاده می‌شود و براساس الگوریتم‌های ازپیش‌تعریف‌شده و تعبیه‌شده در هر گره، تصمیم‌گیری اقدامات انجام می‌شود. پیوندهای ارتباطی بین واحدهای مختلف سیستم در کنترل غیرمتمرکز نیاز نیست و لذا کنترل غیرمتمرکز یک طرح کنترل قابل اعتماد است.



(الف) کنترل‌کنندهٔ متمرکز

(ب) کنترل غیرمتمرکز

(ج) کنترل توزیع‌شده

شکل (۹): تقسیم‌بندی براساس معماری سیستم کنترل

در روش توزیع‌شده، هر کنترل‌کنندهٔ محلی با کنترل‌کننده‌های همسایهٔ خود برای دستیابی به برخی از مزایای روش متمرکز برای کل ریزشبکه ارتباط برقرار می‌کند [۱۷۲]. به عبارت دیگر هر دستگاه براساس اندازه‌گیری‌های محلی با در نظر گرفتن پاسخ همسایگان کنترل می‌شود. این روش ممکن است باعث تنظیم ضعیف ولتاژ شود؛ به‌خصوص زمانی که امپدانس‌های خط قابل توجه باشند [۱۷۳].

برای مدیریت توان در ریزشبکهٔ dc یک استراتژی کنترل غیرمتمرکز سازگار با حالت در مرجع [۱۷۴] ارائه شده که ریزشبکه دارای ژنراتورهای توزیع‌شدهٔ تجدیدپذیر و سیستم‌های ذخیرهٔ انرژی است. در این روش سیگنال ولتاژ باس dc برای فعال کردن اشتراک برق بین منابع مختلف و برای تعیین حالت‌های عملیات ریزشبکه و تسهیل انتقال حالت استفاده می‌شود. این رویکرد دارای تنظیم کاملاً خودانضباط مبدل‌های توزیع‌شده بدون مرکز کنترل اضافی یا پیوند ارتباطی است.

یک استراتژی کنترل توزیع‌شدهٔ یکپارچه مبتنی‌بر ادغام کنترل‌کننده‌های توزیع‌شده برای حالت‌های عملیاتی ریزشبکهٔ dc در مرجع [۱۷۵] ارائه شده که از سیگنال ولتاژ باس یا روش‌های تشخیص حالت استفاده نمی‌کند. در این روش متوسط ولتاژ باس ریزشبکه در مرجع ولتاژ تنظیم برای تمام حالت‌های عملیاتی تنظیم شده و سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی مستقل از حالت عملیاتی برای دستیابی و حفظ سطح انرژی متعادل کنترل می‌شوند.

متفاوت بودن مالکان ریزشبکه‌های dc مستقل باعث می‌شود تا استراتژی‌های کنترل مختلفی انتخاب شود و اجرای کنترل یکپارچه را با مشکل روبه‌رو نماید؛ لذا چالش بزرگی برای عملکرد بهینهٔ کنترل‌کننده به همراه دارد. در مرجع [۱۷۶] کنترل بهینهٔ توزیع‌شده ریزشبکهٔ dc با هدف حذف محدودیت‌ها ارائه شده که در آن مسئله جریان توان بهینهٔ ریزشبکه‌های dc مستقل با یک برنامهٔ مخروطی مرتبهٔ دوم نشان داده می‌شود و سپس یک الگوریتم حل دینامیکی مبتنی‌بر روش تجزیهٔ اولیه–دوگانه ارائه شده است.

یک چارچوب با توجه به ویژگی فیزیکی واحدهای قدرت ریزشبکه برای طراحی حالت‌های عملیات براساس تغییرات ولتاژ باس dc ریزشبکه‌های dc کنترل‌شدهٔ غیرمتمرکز بدون پیوندهای ارتباطی در مرجع [۱۷۷] ارائه شده که در آن برای عملکرد اقتصادی اولویت بهره‌برداری از انواع مختلف واحدها با شاخص اقتصادی معینی تعیین می‌شود.

تحلیل رفتار دینامیکی یک ریزشبکهٔ آزمایشگاهی dc مسکونی با کنترل ولتاژ در ساختارهای کنترلی متمرکز و توزیع‌شده در مرجع [۱۷۸] ارائه شده است. مدل‌های الکتریکی معادل تمام اجزای سیستم ریزشبکه در سطح الکتریکی شامل آرایهٔ فتوولتائیک، باتری‌های الکتروشیمیایی، پشته سلول‌های سوختی[1] و مبدل‌های قدرت برای شبیه‌سازی در نظر گرفته شده‌اند. پاسخ گذرای توان خروجی سیستم ریزشبکهٔ dc با ساختار کنترلی توزیع شده و ساختار کنترلی متمرکز ولتاژ به‌ترتیب در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) نشان داده شده است. همچنین پاسخ گذرای ولتاژ لینک dc برای این دو ساختار کنترلی در

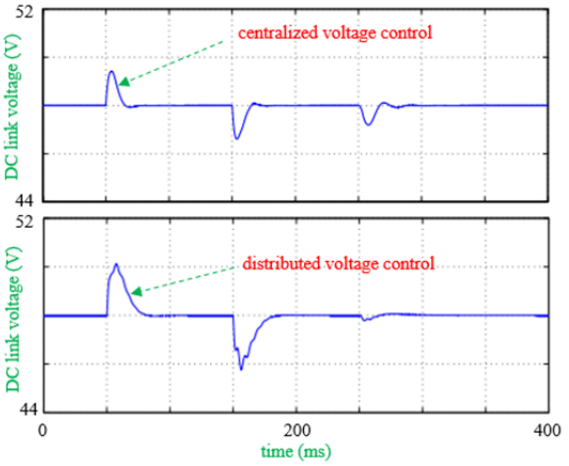
1. Fuel Cells Stack

شکل (۱۲) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پیکربندی کنترل با ساختار کنترلی متمرکز ازنظر کیفیت تنظیم ولتاژ بسیار بهتر از پیکربندی کنترل توزیع شده است. بااین‌حال، امکان خرابی در پیکربندی کنترل متمرکز زیاد است، زیرا فقط یک سیستم ولتاژ لینک dc را تنظیم می‌کند.

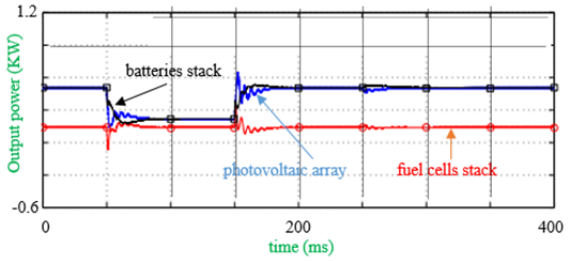
مقایسه بین روش‌های کنترل‌کنندهٔ نظارتی در جدول (۵) آمده که ویژگی‌های اصلی و مزایا و معایب هر روش به‌صورت خلاصه بیان شده است [۱۷۹ و ۱۸۰].

جدول (۵): مقایسه بین روش‌های کنترل‌کنندهٔ نظارتی

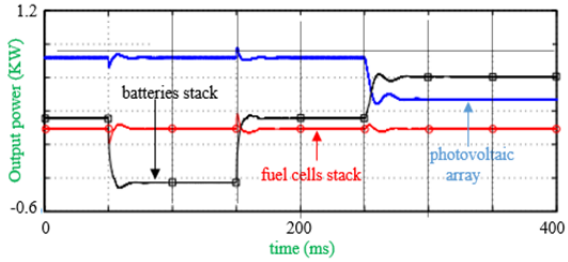
روش	مزایا	معایب
متمرکز	* ارائهٔ خدمات شبکه و تحویل انرژی با کیفیت بالا * پیاده‌سازی آسان * نگهداری آسان در صورت خرابی یک نقطه * پیاده‌سازی ساده * قابلیت مشاهده و کنترل قوی کل سیستم * مناسب برای ریزشبکه‌های محلی و کوچک	* افزایش بار محاسباتی و ارتباطی * کاهش شفافیت بازار و مقیاس‌پذیری شبکه * نیاز به جمع‌آوری داده‌ها از تمام اجزای ضروری ریزشبکه * از بین رفتن تمام عملکردها براثر خرابی کنترل‌کنندهٔ مرکزی * کاهش انعطاف‌پذیری و گسترش‌پذیری * عدم گسترش آسان و مناسب نبودن برای شبکه‌های هوشمند
غیرمتمرکز	* قابلیت اطمینان بالا * عدم نیاز به اطلاعات سایر بخش‌های سیستم * تنظیم کنترل‌کنندهٔ واحد مربوطه تنها با اطلاعات محلی * عدم نیاز به ارتباط بلادرنگ * نیاز فقط به اطلاعات محلی * عدم نیاز به یک ارتباط جامع دوطرفه با سرعت بالا	* پیچیده بودن مدیریت شبکه * عدم اطمینان به خدمات شبکه و تحویل انرژی با کیفیت بالا * محدود کردن عملکرد به‌علت فقدان پیوندهای ارتباطی بین عامل‌ها * مقیاس‌پذیری متوسط
توزیع‌شده	* گسترش آسان (مقیاس‌پذیری بالا) * هزینهٔ محاسباتی کم (محاسبات موازی) * از یک نقطهٔ شکست اجتناب می‌کند. * مناسب برای سیستم‌ها در مقیاس بزرگ * قرار نگرفتن تحت‌تأثیر تغییرات توپولوژی سیستم	* نیاز به طرح‌های ارتباطی و تبادل اطلاعات بین واحدهای توزیع‌شده برای تحقق هدف‌های کنترل یا بهینه‌سازی * نیاز به همگام‌سازی * نرخ همگرایی ممکن است تحت‌تأثیر توپولوژی شبکهٔ ارتباطی قرار گیرد * نیاز به یک زیرساخت ارتباطی دوطرفه * هزینهٔ ارتقای زیرساخت کنترل و ارتباط موجود



شکل (۱۲): پاسخ گذرای ولتاژ لینک dc با دو نوع ساختار کنترلی



شکل (۱۰): پاسخ گذرای توان خروجی سیستم ریزشبکه با ساختار کنترل ولتاژ توزیع‌شده



شکل (۱۱): پاسخ گذرای توان خروجی سیستم ریزشبکه با ساختار کنترل ولتاژ متمرکز

۳.۳. مدهای کنترل

استراتژی کنترل در ریزشبکه براساس مدهای کنترل به سه گروه اصلی–پیرو[1]، همتا–همتا و ترکیبی تقسیم‌بندی می‌شود [۱۸۱ و ۱۸۲].

1. Master–slave

استراتژی کنترل اصلی–پیرو ساده و آسان است. در این روش به یک منبع پراکنده به‌عنوان واحد اصلی و یک منبع پراکنده به‌عنوان واحد پیرو نیاز است. در ساختار کنترل اصلی–پیرو، زمان کار کردن ریزشبکه در حالت جزیره‌ای، ولتاژ و فرکانس در یکی از منابع تولید پراکنده یا ذخیرهٔ انرژی (کنترل‌کنندهٔ اصلی) برای سایر منابع تولید پراکنده و بارها (کنترل‌کنندهٔ پیرو) به‌عنوان مقدار مرجع استفاده می‌شود. هر کنترل‌کنندهٔ پیرو براساس کنترل‌کنندهٔ اصلی برای حالت عملکرد خود تصمیم‌گیری می‌کند. از معایب این روش می‌توان وابستگی بیش از حد به واحد اصلی را اشاره کرد [۱۸۳ و ۱۸۴].

در کنترل همتا به همتا، همهٔ منابع تولید پراکنده در سیستم کنترل ریزشبکه وضعیت یکسانی دارند. در این روش، کنترل‌کننده‌ها در وضعیت یکسان، برای کنترل هر قسمت از ریزشبکه از سیگنال اندازه‌گیری (ولتاژ و فرکانس) در نقطهٔ اتصالی استفاده می‌کنند. به عبارت دیگر کنترل به ارتباطات بستگی ندارد و هیچ سلسله‌مراتبی در بین کنترل‌کننده‌ها وجود ندارد [۱۸۵]. ریزشبکه با اتصال یا قطع هر ژنراتور می‌تواند به کار ادامه دهد و نیازهای انرژی همچنان برآورده گردد [۱۸۶]. معماری کنترل همتا به همتا از انعطاف‌پذیری و تاب‌آوری ریزشبکه‌ها می‌تواند بهره‌برداری کند [۱۸۷].

روش ترکیبی کنترل افتی و کنترل اصلی–پیرو برای عملیات همزمان و کنترل ریزشبکه‌های ac مستقل در مرجع [۱۸۸] برای به‌اشتراک‌گذاری دقیق بار بین اینورترهای منبع ولتاژ و بهبود تنظیم ولتاژ و فرکانس در ریزشبکه ارائه شده است. با استفاده از کنترل‌کنندهٔ افتی سلسله‌مراتبی اینورتر منبع ولتاژ اصلی ریزشبکه کنترل می‌شود و افت ولتاژ در سراسر امپدانس فیدر جبران می‌شود و ولتاژ بار در مقدار نامی ثابت می‌ماند. اینورتر منبع ولتاژ پیرو به‌صورت منبع جریان کار می‌کند و تقاضای بار ازطریق اینورتر منبع ولتاژ اصلی تأمین می‌گردد.

کنترل مبتنی‌بر اصلی–پیرو در مبدل‌های رابط ژنراتورهای توزیع‌شده در یک ریزشبکهٔ جزیره‌ای چهارسیمهٔ سه فاز در مرجع [۱۸۹] ارائه شده که در آن از تئوری توان محافظه‌کار[2] استفاده شده است. اینورترهای واقع در مجاورت نزدیک به‌عنوان یک گروه در حالت اصلی–پیرو عمل می‌کنند. اینورتر پیرو انرژی موجود را تزریق می‌کند و اینورتر اصلی توان بار باقی‌مانده را با گروه‌های دور به اشتراک می‌گذارد.

در سیستم‌های ریزشبکهٔ dc طرح‌های مبتنی‌بر کنترل افتی دارای محدودیت‌هایی مانند امپدانس بالا و تنظیم باس وجود دارد. یک روش کنترل سلسله‌مراتبی مبتنی‌بر اصلی–پیرو برای یک سیستم توزیع dc در مرجع [۱۹۰] ارائه شده که در آن از روش سیگنال‌دهی باس dc برای رفع وابستگی ارتباطی و محدودیت‌های توسعه‌پذیری روش اصلی–پیرو استفاده شده است.

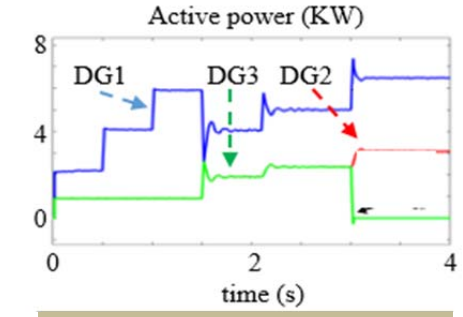
تجزیه و تحلیل پایداری ریزشبکهٔ dc با ساختار کنترل اصلی–پیرو در مرجع [۱۹۱] بررسی شده که در آن با تحلیل مقدار ویژه نشان داده شده که پایداری سیستم و پاسخ گذرا تحت‌تأثیر تغییر پارامترهای بار dc، تعداد منابع تولید پراکنده و نوع بار dc قرار دارد.

پایداری سیگنال کوچک ریزشبکهٔ dc با استراتژی کنترل اصلی–پیرو در مرجع [۱۹۲] مطالعه شده که در آن پایداری ریزشبکه با استفاده از محاسبهٔ مقادیر ویژهٔ ماتریس سیستم و براساس روش اول لیاپانوف تحلیل شده است. نتایج شبیه‌سازی در PSCAD نشان می‌دهد که امپدانس کابل‌های توزیع بزرگ‌تر باعث افزایش مقدار کمی در حاشیهٔ پایداری می‌شود و فرکانس نوسان ریزشبکه را کاهش داده می‌شود.

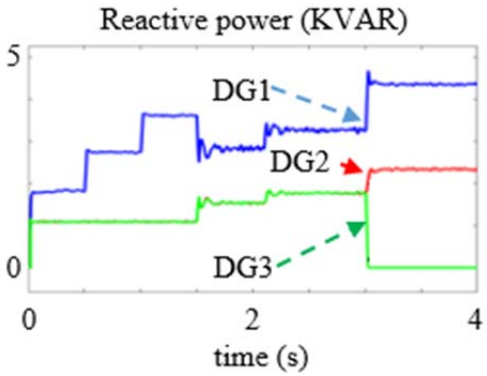
استراتژی کنترل ترکیبی اصلی–پیرو برای راه‌اندازی ژنراتورهای توزیع‌شدهٔ چندگانه در یک ریزشبکه در مرجع [۱۹۳] پیشنهاد شده است. نتایج شبیه‌سازی استراتژی کنترل ترکیبی اصلی–پیرو برای ژنراتورهای توزیع‌شدهٔ چندگانه در یک ریزشبکه در شکل‌های (۱۳)، (۱۴) و (۱۵) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مدت شبیه‌سازی ۴ ثانیه انتخاب شده است. بار مشترک ۴ کیلووات و ۴ کیلووار در ابتدا توسط سه منبع تولید پراکنده تأمین می‌شود و DG پیرو کنترل PQ سنتی را اتخاذ می‌کند. در لحظهٔ ۰/۵ ثانیه بار مشترک ناگهان به ۶ کیلووات و ۵ کیلووار افزایش پیدا می‌کند. در لحظهٔ ۱ ثانیه دوباره بار به ۸ کیلووات و ۶ کیلووار تغییر می‌کند. در لحظهٔ ۱/۵ ثانیه DG کنترل افتی بهبودیافته را اتخاذ می‌کند. در لحظهٔ ۲/۱ ثانیه بار مشترک ۲ کیلووات و ۱ کیلووار وارد می‌شود. در لحظهٔ ۳ ثانیه، DG3 خارج می‌شود و دو منبع دیگر بار مشترک را تأمین می‌کنند. هنگامی که کنترل سنتی PQ اتخاذ می‌شود، افت ولتاژ و فرکانس سیستم زیاد است و کیفیت توان آن کم است. بااین‌حال، DG پیرو می‌تواند در تنظیم توان بار سیستم به‌طور همزمان شرکت کند و افت ولتاژ و فرکانس را کاهش دهد.

خلاصه‌ای از مزایا و معایب دو روش همتا–همتا و اصلی–پیرو در جدول (۶) برای مقایسهٔ بهتر آمده است.

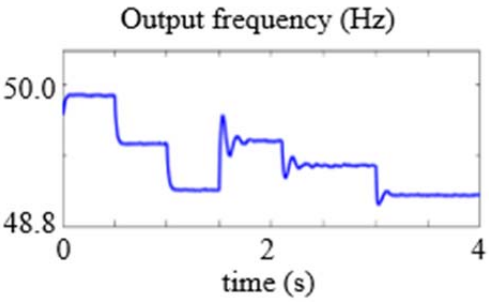
1. Peer to Peer
2. Conservative Power Theory



شکل (۱۳): توان اکتیو خروجی منابع تولید پراکنده



شکل (۱۴): توان راکتیو اکتیو خروجی منابع تولید پراکنده



شکل (۱۵): فرکانس خروجی سیستم

جدول (۶): مقایسه بین استراتژی‌های کنترل براساس مدهای کنترل

روش	مزایا	معایب
اصلی–پیرو	* متناسب برای روش‌های متمرکز و غیرمتمرکز * نیاز داشتن به دستگاه‌هایی با هزینهٔ کمتر	* ارتباط یک‌طرفه * ناکارآمد بودن روش
همتا–همتا	* لازم داشتن خط ارتباطی * کم‌هزینه بودن روش کنترلی * داشتن نقش اصلی توسط مشخصهٔ کنترل افتی	* مشکل بودن طراحی کنترل * راندمان کمتر * نیاز به دستگاه‌هایی با هزینهٔ بیشتر

۴. کنترل افتی

استفاده موازی از مبدل‌های الکترونیک قدرت برای رسیدن به اشتراک جریان یکی از جنبه‌های مهم در یک ریزشبکهٔ dc است. روش‌های مختلفی برای عملکرد موازی ریزشبکه‌ها ارائه شده که براساس شبکه ارتباطی متصل به دو گروه اشتراک بار[1] و کنترل‌کنندهٔ افتی (کنترل‌کنندهٔ دروپ) تقسیم‌بندی می‌شوند [۱۹۴]. کنترل افتی یک مثال معمولی از روش‌های کنترل غیرمتمرکز است که به‌طور گسترده در ریزشبکه‌های dc به کار برده می‌شود [۱۹۵ و ۱۹۶]. روش‌های غیرمتمرکز اشتراک توان بار معمولاً در سطح اول برای دستیابی به مدیریت مناسب منبع و توان بار اجرا می‌شود. کنترل افتی معمولاً در ریزشبکه‌های جریان مستقیم برای مدیریت و کنترل ریزمنبع‌های dc استفاده می‌شود که می‌تواند به‌طور مؤثر توزیع توان را به دست آورد. این نوع کنترل یک روش شناخته‌شده در ریزشبکه‌های جریان مستقیم است که در آن ولتاژ مرجع هر منبع با استفاده از ولتاژ خروجی اسمی، جریان خروجی و ضریب افت محاسبه می‌شود [۱۹۷]. روش‌های کنترل افتی به کنترل افتی متداول[2] و کنترل افتی پیشرفته[3] تقسیم‌بندی می‌شوند.

۱.۴. کنترل افتی متداول

شبکهٔ ارتباطی با پهنای باند بالا با توجه به قابلیت اطمینان داده‌ها و هزینهٔ سرمایه‌گذاری برای استفاده در ریزشبکه‌ها به‌علت هزینه مناسب نیست، بنابراین استفاده از کنترل افتی گسترش پیدا کرده است. چهار مشخصهٔ فیزیکی اصلی ولتاژ، فرکانس، توان اکتیو و توان راکتیو مبنای عمل کنترل افتی هستند. مقاومت افت یک پارامتر اصلی در کنترل افتی است و مقدار آن در روش‌های متداول ثابت است که محدودیت مقاومت افت ثابت باعث کاهش بهبود اشتراک جریان و پروفایل ولتاژ باس dc می‌شود. از مزایای روش افتی می‌توان به نیاز نداشتن به سیگنال‌های ارتباطی بین واحدهای موازی اشاره کرد. بااین‌حال اجرای کنترل افتی بدون ارتباط افت عملکرد ضعیفی دارد و حتی ممکن است باعث ناپایداری فرکانس و یا ولتاژ شود. عملکرد ضعیف گذرا، نادیده گرفتن دینامیک بار، عملکرد ضعیف در شبکه‌های توزیع، ناتوانی در ارائه به اشتراک‌گذاری دقیق توان با خروجی از معایب روش کنترل افتی است که کاربرد آن در یک سیستم قدرت مدرن را محدود می‌کند. در طرح معمولی، افت فرکانس و افت ولتاژ خیلی ساده در اینورتر منبع ولتاژ پیاده‌سازی می‌شود. در این حالت عدم تطابق فرکانس یا ولتاژ براساس گرادیان کنترل افت به تغییرات توان

1. Load Sharing
2. Conventional Droop Control
3. Advance Droop Control

اکتیو یا توان راکتیو تبدیل می‌شود [۱۹۸ و ۱۹۹]. در حالت عملکرد ریزشبکه به‌صورت جزیره‌ای، منبع تولید پراکنده‌ای که از استراتژی کنترل افت استفاده می‌کند، در تنظیم ولتاژ و فرکانس در ریزشبکه اثر دارد. در سیستم کنترل dc موازی، روش کنترل افت به‌صورت گسترده استفاده می‌شود که در آن میزان به‌اشتراک‌گذاری توان با افزایش افت تعیین می‌شود. هنگامی که بهره‌های افت در یک مقدار ثابت تنظیم می‌شوند، جریان خروجی هر منبع انرژی توزیع‌شده دارای یک شیب ثابت است [۲۰۰].

روش کنترل افتی بهبودیافته مبتنی‌بر ارتباطات پهنای باند کم[1] برای تغییر مقادیر ولتاژ و جریان dc جهت بهبود عملکرد ریزشبکهٔ dc در مرجع [۲۰۱] ارائه شده که سیستم کنترل نیازی به کنترل‌کنندهٔ ثانویهٔ متمرکز در روش مرسوم ندارد و از کنترل‌کننده‌های محلی استفاده می‌شود.

یک استراتژی کنترل غیرمتمرکز مبتنی‌بر افت برای ریزشبکه‌های هیبریدی با اشتراک‌گذاری توان در مرجع [۲۰۲] پیشنهاد شده که متکی بر تنظیم مقدار ولتاژ یک باس مشترک در هر ریزشبکه است. ویژگی‌های افت پیشنهادی باعث به‌اشتراک‌گذاری توان اکتیو/ راکتیو بهتر ریزشبکه‌ها می‌شود درحالی‌که تنظیم ولتاژ نیز بهتر شده است.

۲.۴. کنترل افتی پیشرفته

کنترل افتی پیشرفته به کنترل افتی معکوس، کنترل افتی غیرخطی و کنترل افتی تطبیقی تقسیم‌بندی می‌شود.

الف) کنترل افت معکوس

کنترل افت معکوس یک روش جایگزین است که برای ریزشبکه‌های ولتاژ پایین استفاده می‌شود. در ریزشبکه‌ها از یک استراتژی کنترل افت معکوس برای کنترل واحدهای تولید توزیع استفاده می‌شود. در کنترل افت معکوس، توان اکتیو توسط یک افت ولتاژ و توان راکتیو توسط یک افت فرکانس کنترل می‌شوند [۲۰۳ و ۲۰۴]. از معایب کنترل افت معکوس می‌توان به عدم سازگار بودن با خطوط فشارقوی که عمدتاً القایی هستند و عدم اجرای دیسپاچ توان اکتیو انجام‌شده توسط اپراتورهای سیستم انتقال در سطوح بسیار بالای شبکه اشاره کرد [۲۰۵ و ۲۰۶].

ب) کنترل افتی بهبودیافته

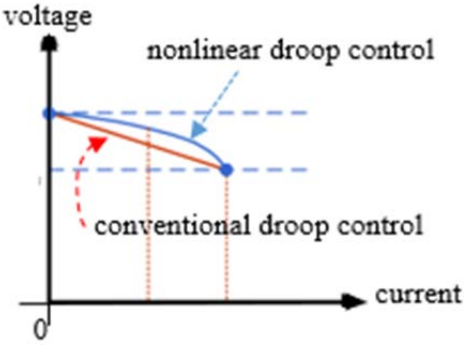
برای به‌اشتراک‌گذاری جریان بار در برنامه‌های ریزشبکهٔ dc از کنترل افتی به‌عنوان روش اصلی کنترل استفاده می‌شود. روش متداول کنترل افتی با کاهش خطی ولتاژ خروجی dc با افزایش جریان خروجی به دست می‌آید. که دارای دو محدودیت است: الف) کاهش دقت اشتراک جریان خروجی به‌علت عدم دقیق بودن ولتاژ خروجی هر مبدل؛ ب) افزایش انحراف ولتاژ باس dc به‌علت عمل افتی که به‌ترتیب با استفاده از حلقه‌های اشتراک جریان و حلقهٔ کنترل ثانویه حل می‌شوند [۲۰۷ و ۲۰۸].

طرح افت تطبیقی برای ریزشبکه‌های dc برای غلبه بر غیرخطی بودن سیستم در مرجع [۲۰۹] پیشنهاد شده است. برای حذف خطای اشتراک‌گذاری جریان هر واحد در ریزشبکه با استفاده از کنترل‌کنندهٔ PI مقاومت افت تنظیم می‌شود. همچنین برای تنظیم ولتاژ باس dc با جابه‌جایی خطوط افتی از کنترل‌کنندهٔ PI تطبیقی در حلقهٔ ثانویه استفاده می‌شود. در این روش تنها جریان و ولتاژ در باس dc ریزشبکه نیاز به انتقال ازطریق کانال‌های ارتباطی با پهنای باند کم به واحدهای جداگانه دارد.

کنترل هماهنگ سیستم‌های ذخیرهٔ انرژی توزیع‌شده در ریزشبکه‌های dc در مرجع [۲۱۰] بررسی شده است. روش کنترل افت تطبیقی مبتنی‌بر متعادل کردن حالت شارژ هر واحد ذخیرهٔ انرژی ارائه شده است. با استفاده از روش افت مبتنی‌بر متعادل کردن حالت شارژ، انرژی ذخیره‌شده در هر واحد ذخیرهٔ انرژی با SoC بیشتر نسبت به انرژی ذخیره‌شده با SoC کمتر، سریع‌تر کاهش پیدا می‌کند.

ج) کنترل افتی غیرخطی

به‌جای رابطهٔ افت خطی، افت غیرخطی با شیب منحنی افت برای افزایش اشتراک جریان می‌توان تنظیم کرد [۲۱۱]. شکل (۱۶) مقایسهٔ منحنی طراحی کنترل افتی را در دو حالت طراحی افتی متداول و طراحی افتی غیرخطی نشان می‌دهد.



شکل (۱۶): مقایسهٔ منحنی طراحی کنترل افتی در دو حالت متداول و غیرخطی

بهینه‌سازی ویژگی‌های کنترل افت غیرخطی در مرجع [۲۱۲] با استفاده از تابع توزیع احتمال جریان بار در یک سیستم ریزشبکهٔ dc مستقل پیشنهاد شده است که در آن اطلاعات جریان بار مورد

1. Low-Bandwidth Communication

استفاده از داده‌های تاریخی شناخته می‌شود یا از روش‌های پیش‌بینی بار تخمین زده می‌شوند.

یک کنترل افت فرکانس غیرخطی برای ایجاد یک اشتراک توان مؤثر بین ژنراتورهای توزیع‌شده در مرجع [۲۱۳] بررسی شده که نیازی به پیوندهای ارتباطی در ریزشبکه‌ها ندارد. پایداری ریزشبکه مبتنی‌بر اینورتر با توسعهٔ مدل فضای حالت سیگنال کوچک کامل از ریزشبکه تحلیل شده است. همچنین برای به حداقل رساندن هزینهٔ عملیاتی ریزشبکه، با استفاده از روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای بهینه‌سازی روابط افت فرکانس غیرخطی استفاده شده است.

اشتراک توان بین سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی یکی از چالش‌های مهم در سیستم ذخیره‌سازی انرژی هیبریدی شامل باتری و ابرخازن[1] است. برای کنترل فرکانس اولیه ازطریق سیستم‌های dc چندترمینالی که به منابع تجدیدپذیر متصل می‌شوند، یک روش کنترل غیرمتمرکز مبتنی‌بر کنترل افت دینامیکی غیرخطی در مرجع [۲۱۴] برای یک سیستم ذخیره‌سازی انرژی ترکیبی ارائه شده است. روش پیشنهادی باعث بهبود پایداری گذرا سیستم به‌دنبال خطاهای شبکه می‌شود، ولی پاسخ فرکانس اولیه را تحت تغییرات بار خالص و قطع تولید افزایش می‌دهد.

۵. امپدانس مجازی

طرح کنترل مبتنی‌بر اساس مجازی روشی مناسب در مبدل‌ها برای اصلاح پروفایل‌های دینامیکی آن‌هاست. امپدانس مجازی یک مفهوم کنترل مدار محور بدون تلفات است. در سیستم قدرت مبتنی‌بر dc، بار توان ثابت باعث ایجاد یک مقاومت افزایشی منفی می‌شود که ممکن است باعث بدتر شدن پایداری کل سیستم شود [۲۱۵]. اینرسی چرخشی یکی از ویژگی‌های ذاتی ماشین‌های دوار است که باعث افزایش پایداری در شبکه می‌شود [۲۱۶ و ۲۱۷].

دو هدف کنترلی اشتراک‌گذاری دقیق توان بار و تنظیم ولتاژ شین برای اطمینان از کیفیت توان و عملکرد قابل اعتماد ریزشبکه‌های dc مهم و حیاتی‌اند. تنظیم ولتاژ باس dc با اتخاذ یک حلقهٔ کنترل ثانویه خارجی انجام می‌شود؛ ولی عدم اشتراک درست توان/جریان بار بین مبدل‌ها به‌دلیل تطابق نادرست مقاومت‌های فیدر باید در نظر گرفته شوند. به‌دلیل وجود فاصله‌های گوناگون و پیچیدگی ریزشبکه‌ها، امپدانس خطوط بین فیدرهای تولیدهای پراکنده و بارها متفاوت است [۲۱۸ و ۲۱۹].

عدم تعادل انرژی ذخیره‌شده باعث ایجاد چالش در کنترل ریزشبکه براثر اضافه شدن واحدهای ذخیرهٔ انرژی توزیع‌شده می‌شود. استراتژی غیرمتمرکز مبتنی‌بر منطق فازی در [۲۲۰] برای ایجاد تعادل انرژی ذخیره‌شده با سیستم‌های ذخیرهٔ انرژی باتری توزیع‌شده در یک ریزشبکهٔ dc ارائه شده که در آن مقاومت‌های مجازی کنترل‌کننده‌های افتی مطابق با وضعیت شارژ هر واحد ذخیره‌سازی انرژی اصلاح می‌شوند. همچنین مقاومت مجازی برای کاهش انحراف ولتاژ در باس dc مشترک تنظیم می‌شود و فقط با استفاده از متغیرهای محلی واحدها کنترل می‌شوند.

یک استراتژی کنترلی برای میرایی نوسانات توان در یک ریزشبکهٔ dc چندمنبعی در مرجع [۲۲۱] ارائه شده است. کنترل‌کنندهٔ سیستم تبدیل قدرت ترکیبی برای مدیریت توان از یک کنترل‌کنندهٔ ولتاژ چندحلقه و یک‌حلقهٔ امپدانس مجازی تشکیل شده است. برای خنثی کردن نوسانات فرکانس پایین از یک بهره افت دینامیکی در کنترل اشتراک توان استفاده می‌شود.

روش تنظیم امپدانس مجازی مبتنی‌بر تقریب متوالی برای جبران دقیق عدم تطابق بین امپدانس‌های خط در [۲۲۲] ارائه شده است. تنظیم امپدانس مجازی تطبیقی براساس خطای بین توان راکتیو خروجی واقعی و مرجع آن با کنترل افتی Q-V ترکیب می‌شود و سپس در هر سیکل، مرجع توان راکتیو تنظیم امپدانس مجازی با آخرین تخمین کنترل افت Q-V تنظیم می‌شود.

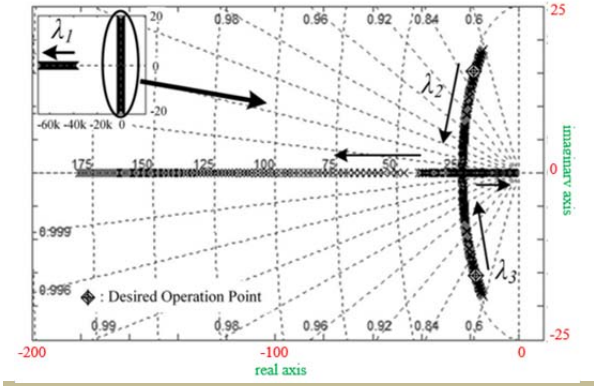
مقاومت منفی مجازی با مقاومت خط در برابر توان جداسازی مقابله می‌کند. کنترل افت معمولی برای ریزشبکهٔ ولتاژ پایین غیرعملی است، به‌خصوص زمانی که امپدانس خط در بین واحدهای تولید پراکنده مقاومتی است تا توان اکتیو و راکتیو تولید پراکنده هماهنگ شود. یک کنترل افت بهبودیافته براساس منبع توان مجازی[2] و امپدانس مجازی مرکب، که با یک مقاومت منفی و یک اندوکتانس منفی تشکیل شده، برای ریزشبکهٔ ولتاژ پایین در [۲۲۳] پیشنهاد شده است.

با استراتژی مدیریت انرژی مناسب ابرخازن می‌تواند به‌عنوان یک سیستم ذخیرهٔ انرژی مستقل در ریزشبکهٔ dc کنترل‌شده با افت استفاده شود. در [۲۲۴] از حلقهٔ امپدانس مجازی برای افزودن یک مقاومت مجازی و یک خازن مجازی متصل به‌صورت سری بین مبدل و باس dc استفاده شده است که جریان را بین سیستم ذخیرهٔ انرژی ابرخازن مستقل و سایر منابع تولید پراکنده جدا می‌کند. شکل (۱۷) مکان هندسی ریشه‌های معادلهٔ مشخصهٔ سیستم کنترل را با تغییر مقاومت مجازی در مد جبران‌کنندهٔ جریان نشان می‌دهد که

1. Supercapacitor

2. Virtual Power Source

عملکرد دینامیکی سیستم ذخیره‌کنندهٔ انرژی پیشنهادشده را با پیکربندی مختلف برای امپدانس مجازی نشان می‌دهد.



شکل (۱۷): مکان ریشه با مقاومت مجازی متغیر در حالت جبران جریان افزایشی

۶. نتیجه‌گیری

ریزشبکه‌ها شرایط استفادهٔ بهینه از سیستم‌های انرژی یکپارچهٔ حاوی منابع انرژی تجدیدپذیر را فراهم می‌کنند. ریزشبکه در مقیاس کوچک یک شبکه با منابع انرژی پراکنده، سیستم تولید، سیستم ذخیرهٔ انرژی و بار است که به دو صورت خارج از شبکه یا متصل به شبکه کار می‌کنند. کاربرد ریزشبکه‌ها در سال‌های آینده بیشتر خواهد شد و قابلیت‌های توسعه یافتن آن افزایش پیدا خواهد کرد. ریزشبکه‌ها یکی از راه‌حل‌های مناسب برای ادغام تولید پراکندهٔ تجدیدپذیر در سیستم قدرت الکتریکی محسوب می‌شوند. ریزشبکه‌های جریان مستقیم امکان ادغام ذخیره‌سازی انرژی و وسایل نقلیهٔ الکتریکی را می‌توانند فراهم کنند. به‌علت ماهیت تصادفی انرژی‌های تجدیدپذیر و متغیر بودن تقاضای بار، چالش‌های بزرگی مانند تنظیم ولتاژ، کنترل فرکانس، مدیریت انرژی و بهینه‌سازی عملیات اقتصادی در مطالعهٔ ریزشبکه‌ها وجود دارد. در این مقاله مروری بر کاربرد و تقسیم‌بندی ریزشبکه‌ها با مبنای ریزشبکه‌های جریان مستقیم ارائه شده است. طبقه‌بندی ریزشبکه براساس عوامل مختلف بیان شد که پنج عامل حالت‌های عملکرد، معماری سیستم کنترل، سیستم کنترل نظارتی، کاربردها و سیستم توزیع در نظر گرفته شده است. گسترش ریزشبکهٔ جریان مستقیم برای سیستم قدرت آینده لازم و مهم است تا نیاز بار با تولید پراکنده مطابقت داده شود.

مراجع

[1] Sen, S., Kumar, V., "*Microgrid control: A comprehensive survey*", Annual Reviews in Control, Vol. 45, pp. 118-151, 2018, https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2018.04.012.

[2] Fayazi, H., Moazzami, M., Fani, B., Shahgholian, G., "*Coordination of protection equipment in synchronous generator-based microgrids with regard to maintaining first swing stability*", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, Vol. 14, No. 53, pp. 1-14, June 2023. https://dor.org/20.1001.1.23223871.1402.14.54.2.8.

[3] Zhang, T., Yue, D., O'Grady, M. J., O'Hare, G. M. P. "*Transient oscillations analysis and modified control strategy for seamless mode transfer in micro-grids: A wind-PV-ES hybrid system case study*", Energies, Vol. 8, No. 12, pp. 13758–13777, 2015.

[4] Taheri, D., Shahgholian, G., Mirtalaei, M.M. "*Analysis, design and implementation of a high step-up multi-port non-isolated converter with coupled inductor and soft switching for photovoltaic applications*", IET Generation, Transmission and Distribution, Vol. 16, No. 17, pp. 3473-3497, Sept. 2022, 10.1049/gtd2.12537.

[5] Hussein Sachit, A., Fani, B., Delshad, M., Shahgholian, G., Golsorkhi Esfahani, A., "*Analysis and implementation of second-order step-up converter using winding cross coupled inductors for photovoltaic applications*", Journal of Solar Energy Research, Vol. 8, No. 2, pp. 1516-1525, April 2023, https://doi.org/10.22059/jser.2023.357285.1291.

[6] Movahednejad, H., Zanjani, S.M.A., Moazzami, M., Shahgholian, G., "*Studying and simulating the production unit system with hydro turbine and investigating the effect of transient droop compensation on the system dynamic behavior*", Technovations of Electrical Engineering in Green Energy System, Vol. 1, No. 3, pp. 17-26, Dec. 2022, https://doi.org/10.30486/teeges.2022.1963559.1024.

[7] Shahgholian, G., Moazzami, M., Zanjani, S.M. , Mosavi, A., Fathollahi, A., "*A hydroelectric power plant brief: Classification and application of artificial intelligence*", Proceeding of the IEEE/SACI, pp. 000141-000146, Timisoara, Romania, May 2023, https://doi.org/ 10.1109/SACI58269.2023.10158597.

[8] Fayazi, H., Moazzami, M., Fani, B., Shahgholian, G , "*A first swing stability improvement approach in microgrids with synchronous distributed generators*", International Transactions on Electrical Energy Systems, Vol. 31, No. 4, Article Number: e12816, April 2021, https://doi.org/ 10.1002/2050-7038.12816.

[9] Wang, G., Song, Y., Cao, S., Duan, J., "*Novel adaptive power distribution master–slave control strategy for a biogas–solar–wind battery islanded microgrid based on a microturbine*", Electric Power Systems Research, Vol. 224, Article Number: 109743, Nov. 2023, https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109743.

[10] Aghadavoodi, E., Shahgholian, G., "A new practical feed-forward cascade analyze for close loop identification of combustion control loop system through RANFIS and NARX", Applied Thermal

Engineering, Vol. 133, pp. 381-395, March 2018, https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.01.075.

[11] Bagheri, S., Moradi-CheshmehBeigi, H., "*DC microgrid voltage stability through inertia enhancement using a bidirectional dc-dc converter*", Proceeding of the IEEE/IWEC, pp. 1-5, Shahrood, Iran, May 2021, https://doi.org/10.1109/IWEC52400.2021.9467032.

[12] Nandanoori, S.P., Kundu, S., Du,W., Tuffner, F.K., Schneider, K.P., "*Distributed small-signal stability conditions for inverter-based unbalanced microgrids*", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 35, No. 5, pp. 3981-3990, Sept. 2020, https://doi.org/ 10.1109/TPWRS.2020.2982795.

[13] Fani,B., Shahgholian, G., Alhelou, H.H., Siano, P., "*Inverter-based islanded microgrid: A review on technologies and control*", e-Prime- Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy, Vol. 2, Article Number: 100068, 2022, https://doi.org/10.1016/j.prime.2022.100068.

[14] Siti, M.W., Mbungu, N.T., Tungadio, D.H., Banza, B.B., Ngoma, L., "*Application of load frequency control method to a multi-microgrid with energy storage system*", Journal of Energy Storage, Vol. 52, Article Number: 104629, Aug. 2022, https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104629.

[15] Hemmati, R., "*Demand management in off-grid 100% renewable energy microgrid integrated with electric vehicle charging station based on battery swappin*", Energy Engineering and Management, Vol. 13, No. 3, pp. 16-31, Dec. 2023, https://doi.org/ 10.22052/eem.2023.252837.1011.

[16] Rajaguru, V., Annapoorani, K.I., "*Virtual synchronous generator based superconducting magnetic energy storage unit for load frequency control of micro-grid using African vulture optimization algorithm*", Journal of Energy Storage, Vol. 65, Article Number: 107343, Aug. 2023, https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107343.

[17] Siad, S.B., Malkawi, A., Damm, G., Lopes, L., Dol, L.G., "*Nonlinear control of a dc microgrid for the integration of distributed generation based on different time scales*", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 111, pp. 93-100, Oct. 2019, https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.03.073.

[18] Kaur, S., Dwivedi, B., "*Power quality issues and their mitigation techniques in microgrid system- A review*", Proceeding of the IEEE/IICPE, pp. 1-4, Patiala, India, Nov. 2016, https://doi.org/ 10.1109/IICPE.2016.8079543.

[19] Werth, A., André, A., Kawamoto, D., Morita, T., Tajima, S., Tokoro, M., Yanagidaira, D., Tanaka, K., "*Peer-to-peer control system for dc microgrids*", IEEE Trans. on Smart Grid, Vol. 9, No. 4, pp. 3667-3675, July 2018, https://doi.org/ 10.1109/TSG.2016.2638462.

[20] Locment, F., Sechilariu, M., *"Modeling and Simulation of dc microgrids for electric vehicle charging stations*", Energies, Vol. 8, pp. 4335-4356, May 2015, https://doi.org/10.3390/en8054335.

[21] Roslan, M.F., Hannan, M.A., Ker, P.J., Mannan, M., Muttaqi, K.M., Mahlia, T.M.I., "*Microgrid control methods toward achieving sustainable energy management: A bibliometric analysis for future directions*", Journal of Cleaner Production, Vol. 348, Article Number: 131340, May 2022, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131340.

[22] Tazi, K., Abbou, F.M., Abdi, F., "*Multi-agent system for microgrids: Design, optimization and performance*", Artificial Intelligence Review, Vol. 53, pp. 1233–1292, 2020.

[23] Dizioli, F.A.S., Barra, P.H.A., Menezes, T.S., Lacerda, V.A., Coury, D.V., Fernandes, R.A.S., "*Multi-agent system-based microgrid protection using angular variation: An embedded approach*", Electric Power Systems Research, Vol. 220, Article Number: 109324, July 2023, https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109324.

[24] Afrin, N., Yang, F., Lu, J., "*Voltage support strategy for PV inverter to enhance dynamic voltage stability of islanded microgrid*", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 121, Article Number: 106059, Oct. 2020, https://doi.org/ 10.1016/j.ijepes.2020.106059.

[25] Shahparasti, M., Mohamadian, M., Baboli, P.T., Yazdianp, A., "*Toward power quality management in hybrid ac–dc microgrid using LTC-L utility interactive inverter: load voltage–grid current tradeoff*", IEEE Trans. on Smart Grid, Vol. 8, No. 2, pp. 857-867, March 2017.

[26] Ma, W.J., Wang, J., Lu, X., Gupta, V., "*Optimal operation mode selection for a dc microgrid*", IEEE Trans. on Smart Grid, Vol. 7, No. 6, pp. 2624-2632, Nov. 2016, https://doi.org/ 10.1109/TSG.2016.2516566.

[27] Zhao, J., Dörfler, F., *"Distributed control and optimization in dc microgrids*", Automatica, Vol. 61, pp. 18-26, Nov. 2015, https://doi.org/10.1016/j.automatica.2015.07.015.

[28] Eberlein, S., Rudion, K., "*Small-signal stability modelling, sensitivity analysis and optimization of droop controlled inverters in LV microgrids*", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 125, Article Number: 106404, Feb. 2021, https://doi.org/ 10.1016/j.ijepes.2020.106404.

[29] Papadimitriou, C.N., Zountouridou, E.I., Hatziargyriou, N.D., "*Review of hierarchical control in dc microgrids*", Electric Power Systems Research, Vol. 122, pp. 159-167, March 2015, https://doi.org/ 10.1016/j.epsr.2015.01.006.

[30] Gayatri, M.T.L., Parimi, A.M., Kumar, A.V.P., "*A review of reactive power compensation techniques in microgrids*", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 81, pp. 1030-1036, Jan. 2018, https://doi.org/ 10.1016/j.rser.2017.08.006.

[31] Urquizo, J., Singh, P., Kondrath, N., Hidalgo-León, R., Soriano, G., "*Using D-FACTS in microgrids for power quality improvement: A review*", Proceeding of the IEEE/ETCM, pp. 1-6, Salinas, Ecuador, oct, 2017, https://doi.org/ 10.1109/ETCM.2017.8247546.

[32] Dixit, S., Singh, P., Ogale, J., Bansal, P., Sawle, Y., "*Energy management in microgrids with renewable energy sources and demand response*", Computers and Electrical Engineering, Vol. 110, Article Number: 108848, Sept. 2023, https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2023.108848.

[33] Zia, M.F., Elbouchikhi, E., Benbouzid, M., "*Microgrids energy management systems: A critical review on methods, solutions, and prospects*", Applied Energy, Vol. 222, pp. 1033-1055, July 2018.

[34] Gutierrez-Rojas, D., Nardelli, P.H.J., Mendes, G., Popovski, P., "*Review of the state of the art on adaptive protection for microgrids based on communications*", IEEE Trans. on Industrial Informatics, Vol. 17, No. 3, pp. 1539-1552, March 2021, https://doi.org/10.1109/TII.2020.3006845.

[35] Mirsaeidi, S., Dong, X., Shi, S., Wang, B., "*AC and DC microgrids: A review on protection no.s and approaches*", Journal of Electrical Engineering and Technology, Vol. 12, No. 6, pp. 2089-2098, 2017, https://doi.org/ 10.5370/JEET.2017.12.6.2089.

[36] Bayati, B., Hajizadeh, A., Soltani, M., "*Protection in dc microgrids: A comparative review*", IET Smart Grid, Vol. 1, No. 3, pp. 66-75, Oct. 2018 (https://doi.org/ 10.1049/iet-stg.2018.0035).

[37] Jing, W., Lai, C.H., Wong, S.H.W., Wong, M.L.D., "*Battery-supercapacitor hybrid energy storage system in standalone dc microgrids: A review*", IET Renewable Power Generation, Vol. 11, No. 4, pp. 461-469, March 2017, https://doi.org/ 10.1049/iet-rpg.2016.0500.

[38] Kaur, A., Kaushal, J., Basak, P., "*A review on microgrid central controller*", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 55, pp. 338-345, March 2016, https://doi.org/ 10.1016/j.rser.2015.10.141.

[39] Mahmoud, M.S., Hussain, S.A., Abido, M.A., "*Modeling and control of microgrid: An overview*", Journal of the Franklin Institute, Vol. 351, No. 5, pp. 2822-2859, May 2014, https://doi.org/ 10.1016/j.jfranklin.2014.01.016.

[40] Rosini, A., Labella, A., Bonfiglio, A., Procopio, R., Josep, Guerrero, M., "*A review of reactive power sharing control techniques for islanded microgrids*", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 141, Article Number: 110745, May 2021, https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110745.

[41] Li, S., Oshnoei, A., Blaabjerg, F., Anvari-Moghaddam, A., "*Hierarchical control for microgrids: a survey on classical and machine learning-based methods*", Sustainability, Vol. 15, Article Number: 8952, June 2023, https://doi.org/10.3390/su15118952.

[42] Malik, S.M., Ai, X., Sun, Y., Zhengqi, C., Shupeng, Z., "*Voltage and frequency control strategies of hybrid ac/dc microgrid: A review",* IET Generation, Transmission and Distribution, Vol. 11, No. 2, pp. 303-313, Jan. 2017, https://doi.org/ 10.1049/iet-gtd.2016.0791.

[43] Shuai, Z., Sun, Y., Shen, Z.J., Tian, W., Tu, C., Li, Y., Yin, X., "*Microgrid stability: Classification and a review*", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 58, pp. 167-179, May 2016, https://doi.org/ 10.1016/j.rser.2015.12.201.

[44] Zeng, Z., Yang, H., Zhao, R., "*Study on small signal stability of microgrids: A review and a new approach*", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 15, No. 9, pp. 4818-4828, Dec. 2011, https://doi.org/ 10.1016/j.rser.2011.07.069.

[45] Shahgholian, G., "*A brief review on microgrids: Operation, applications, modeling, and control*", International Transactions on Electrical Energy Systems, Vol. 31, No. 6, Article Number. e12885, June 2021, https://doi.org/10.1002/2050-7038.12885.

[46] Shahgholian, G., "*A brief overview of microgrid performance improvements using distributed FACTS devices*", Journal of Renewable Energy and Environment, Vol. 10, No. 1, pp. 43-58, Jan. 2023, https://doi.org/10.30501/jree.2022.321435.1305.

[47] Ahmadi, S., Sadeghkhani, I., Shahgholian, G., Fani, B., Guerrero, J. M., "*Protection of LVDC microgrids in grid-connected and islanded modes using bifurcation theory*", IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, Vol. 9, No. 3, pp. 1-8, June 2021, https://doi.org/ 10.1109/JESTPE.2019.2961903.

[48] Foroushan-Asl, S.A., Gandomkar, M., Nikoukar, J., "*Optimal protection coordination in the micro-grid including inverter-based distributed generations and energy storage system with considering grid-connected and islanded modes*", Electric Power Systems Research, Vol. 184, Article Number: 106317, July 2020, https://doi.org/ 10.1016/j.epsr.2020.106317.

[49] Ortiz, L., Orizondo, R. , Aguila, A., Gonzalez, J.W., Lopez, G.J., Isaac,, I., "*Hybrid ac/dc microgrid test system simulation: Grid-connected mode*", Heliyon, Vol. 5, No. 12, pp. 1-21, Dec. 2019.

[50] Zeng, Z., Shao, W., "*Reconnection of micro-grid from islanded mode to grid-connected mode used sliding Goertzel transform based filter*", IET Renewable Power Generation, Vol. 11, No. 7, pp. 1041-1048, June 2017, https://doi.org/ 10.1049/iet-rpg.2016.0932.

[51] Karmi, H., Fani, B., Shahgholian, G., "*Coordinated protection scheme based on virtual impedance control for loop-based microgrids*", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, Vol. 12, No. 46, pp. 15-32, Sept, 2021, https://dorl.net/dor/20.1001.1.23223871.1400.12.2.2.0.

[52] Beheshtaein, S., Savaghebi, M., Vasquez, J.C., Guerrero, J.M., "*Protection of ac and dc microgrids: Challenges, solutions and future trends*", Proceeding of the IEEE/IECON, pp. 5253-5260, Yokohama, Japan, Nov. 2015, https://doi.org/ 10.1109/IECON.2015.7392927.

[53] Taleb, M., Fani, B., Shahgholian, G., Mosavi, A., Fathollahi, A., "*Maintaining fuse in the presence of distributed generation sources in the distribution network to improve protection system*", Proceeding of the IEEE/SACI, pp. 000455-000460, Timisoara, Romania, May 2023, https://doi.org/ 10.1109/SACI58269.2023. 10158560.

[54] Teymouriyan, S., Shahgholian, G., Fani, B., *"Adaptive protection based on intelligent distribution networks with the help of network factorization in the presence of distributed generation resources*", Energy Engineering and Management, Vol. 12, No. 3, pp. 34-51, Nov. 2022, https://doi.org/10.22052/12.3.34.

[55] Forouzesh, M., Shen, Y., Yari, K., Siwakoti, Y.P., Blaabjerg, F., "*High-efficiency high step-up DC–DC converter with dual coupled inductors for grid-connected photovoltaic systems*", IEEE Trans. on Power

Electronics, Vol. 33, No. 7, pp. 5967-5982, July 2018, https://doi.org/ 10.1109/TPEL.2017.2746750.

[56] Marei, M.I., Soliman, M.H., "*A coordinated voltage and frequency control of inverter based distributed generation and distributed energy storage system for autonomous microgrids*", Electric Power Com¬po¬nents and Systems, Vol. 41, No. 4, pp. 383-400, Jan. 2013, https://doi.org/10.1080/15325008.2012.749550.

[57] Guichi, A., Mekhilef, S., Berkouk, E.M., Talha, A., "*Optimal control of grid-connected microgrid PV-based source under partially shaded conditions*", Energy, Vol. 230, Article Number: 120649, Sept. 2021, https://doi.org/ 10.1016/j.energy.2021.120649.

[58] Han, H., Liu, Y., Sun, Y., Su, M., Guerrero, J.M., "*An improved droop control strategy for reactive power sharing in islanded microgrid*", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 30, No. 6, pp. 3133-3141, June 2015, https://doi.org/10.1109/TPEL.2014.2332181.

[59] Hmad, J., Houari, A., Bouzid, A.E.M., Saim, A., Trabelsi, H., "*A review on mode transition strategies between grid-connected and standalone operation of voltage source inverters-based microgrids*", Energies, Vol. 16, Article Number: 5062, June 2023, https://doi.org/10.3390/en16135062.

[60] Singh, A., Suhag, S., "*Frequency regulation in an ac microgrid interconnected with thermal system employing multiverse-optimised fractional order-PID controller*", International Journal of Sustainable Energy, Vol. 39, No. 3, pp. 250-262, 2020 https://doi.org/ 10.1080/14786451.2019.1684286.

[61] Keyvani, B., Fani, B., Karimi, H., Moazzami, M., Shahgholian, G., "*Improved droop control method for reactive power sharing in autonomous microgrids*", Journal of Renewable Energy and Environment, Vol. 9, No. 3, pp. 1-9, Sept. 2022, https://doi.org/ 10.30501/jree.2021.298138.1235.

[62] Liu, F., Liu, W., Zha, X., Yang, H., Feng, K., "*Solid-state circuit breaker snubber design for transient overvoltage suppression at bus fault interruption in low-voltage dc microgrid*", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 32, No. 4, pp. 3007-3021, April 2017, https://doi.org/ 10.1109/TPEL.2016.2574751.

[63] Baharizadeh, M., Karshenas, H.R., Guerrero, J.M., "*An improved power control strategy for hybrid ac-dc microgrids*", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 95, pp. 364-373, Feb. 2018.

[64] Gao, F., Kang, R., Cao, J., Yang, T., "*Primary and secondary control in DC microgrids: A review*", Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, Vol. 7, No. 2, pp. 227-242, March 2019, https://doi.org/ 10.1007/s40565-018-0466-5.

[65] Kakigano, H., Miura, Y., Ise, T., "*Low-voltage bipolar-type dc microgrid for super high quality distribution*", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 25, No. 12, pp. 3066-3075, Dec. 2010, https://doi.org/ 10.1109/TPEL.2010.2077682.

[66] Jiang, X., He, C., Jermsittiparsert, K., "Online optimal stationary reference frame *controller for inverter interfaced distributed generation in a microgrid system*", Energy Reports, Vol. 6, pp. 134-145, Nov. 2020.

[67] Sur, U., Biswas, A., Bera, J.N., Sarkar, G., "*A modified holomorphic embedding method based hybrid ac-dc* microgrid *load flow*", Electric Power Systems Research, Vol. 182, Article 106267, May 2020.

[68] Zamani, M., Shahgholian, G., Fathollahi, A., Mosavi, A., Felde, I., "*Improving interarea mode oscillation damping in multi-machine energy systems through a coordinated PSS and FACTS controller framework*", Sustainability, Vol. 15, Article Number: 16070, Nov. 2023, https://doi.org/10.3390/su152216070

[69] Karimi, H., Fani, B., Shahgholian, G., "*A multi agent-based strategy protecting the loop-based micro-grid via intelligent electronic device-assisted relays*", IET Renewable Power Generation, Vol. 14, No. 19, pp. 4132 – 4141, Dec. 2020, https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2019.1233.

[70] Latif, A., Hussain, S.M.S., Iqbal, A., Das, D.C., Ustun, T.S., Al-Durra, A., "*Concurrent frequency–voltage stabilization for hybrid microgrid with virtual inertia support*", IET Renewable Power Generation , Vol. 17, No. 9, pp. 2257-2275, July 2023, https://doi.org/10.1049/rpg2.12729.

[71] Perez, F., Damm, G., Verrelli, C.M., Ribeiro, P.F., "*Adaptive virtual inertia control for stable microgrid operation including ancillary services support*", IEEE Trans. on Control Systems Technology, Vol. 31, No. 4, pp. 1552-1564, July 2023, https://doi.org/10.1109/TCST.2023.3234282.

[72] Chakravarthi, B.N.C.V., Rao, G.V.S.K., "*A high gain novel double-boost converter for dc microgrid applications*", Journal of Circuits, Systems and Computers, Vol. 29, No. 15, Article Number: 2050246, July 2020, https://doi.org/10.1142/S0218126620502461.

[73] Chaturvedi, S., Fulwani, D., Guerrero, J.M., "*Adaptive-SMC based output impedance shaping in dc microgrids affected by inverter loads*", IEEE Trans. on Sustainable Energy, Vol. 11, No. 4, pp. 2940-2949, Oct. 2020, https://doi.org/ 10.1109/TSTE.2020.2982414.

[74] Ahmed, K., Hussain, I., Seyedmahmoudian, M., Stojcevski, A., Mekhilef, S., "*Voltage stability and power sharing control of distributed generation units in dc microgrids*", Energies, Vol. 16, Artiucle Number: 7038, Oct. 2023, https://doi.org/10.3390/en16207038.

[75] Monica, P., Kowsalya, M., Guerrero, J.M., "*Logarithmic droop-based decentralized control of parallel converters for accurate current sharing in islanded DC microgrid applications*", IET Renewable Power Generation, Vol. 15, No. 6, pp. 1240-1254, April 2021, https://doi.org/10.1049/rpg2.12103.

[76] Hou, L., Liu, B., Shi, H., Yi, H., Zhuo, F., "*New techniques for measuring islanded microgrid impedance characteristics based on current injection*", Proceeding of the IEEE/IPEC, pp. 577-581, Hiroshima, Japan, May 2014, https://doi.org/ 10.1109/IPEC.2014.6869643.

[77] Jian, Z.H., He, Z.Y., Jia, J., Xie, Y., "*A review of control strategies for dc micro-grid*", Proceeding of the IEEE/ICICIP, pp. 666-671, June 2013, Beijing, China, https://doi.org/ 10.1109/ICICIP.2013.6568157.

[78] Shen, L., Cheng, Q., Cheng, Y., Wei, L., Wang, Y., "*Hierarchical control of dc micro-grid for photovoltaic EV charging station based on flywheel and battery*

energy storage system", Electric Power Systems Research, Vol. 179, Article Number: 106079, Feb. 2020, https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.106079.

[79] Iovine, A., Siad, S.B., Damm, G., Santis, E., Benedetto, M.D., "*Nonlinear control of a dc microgrid for the integration of photovoltaic panels*", IEEE Trans. on Automation Science and Engineering, Vol. 14, No. 2, pp. 524-535, April 2017, https://doi.org/ 10.1109/TASE.2017.2662742.

[80] Badar, M., Ahmad, I., Rehman, S., Nazir, S., Waqas, A., "*Hierarchical control of hybrid direct current microgrid with variable structure based sliding mode control and fuzzy energy management system*", Journal of the Franklin Institute, Vol. 359, No. 13, pp. 6856-6892, Sept. 2022, https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2022.06.044.

[81] Khushoo, M., Sharma, A., Kaur, G., "*DC microgrid-A short review on control strategies*", Materials Today: Proceedings, Vol. 71, No. 2, pp. 362-369, 2022, https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.09.409.

[82] Shahgholian, G., Khani, K., Moazzami, M., "*Frequency control in autanamous microgrid in the presence of DFIG based wind turbine*", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, Vol. 6, No. 23, pp. 3-12, December 2015, https://dorl.net/dor/20.1001.1.23223871.1394.6.23.1.9.

[83] Taye, B.A., Choudhury, N.B.D., "*A dynamic droop control for a dc microgrid to enhance voltage profile and proportional current sharing*", Electric Power Systems Research, Vol. 221, Article Number: 109438, Aug. 2023, https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109438.

[84] Wu, D., Tang, F., Dragicevic, T., Guerrero, J.M., Vasquez, J.C., "*Coordinated control based on bus-signaling and virtual inertia for islanded dc microgrids*", IEEE Trans. on Smart Grid, Vol. 6, No. 6, pp. 2627–2638, Nov. 2015, https://doi.org/10.1109/TSG.2014.2387357.

[85] Zhao, X., Li, Y.W., Tian, H., Wu, X., "*Energy management strategy of multiple supercapacitors in a dc microgrid using adaptive virtual impedance*", IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, Vol. 4, No. 4, pp. 1174-1185, Dec. 2016, https://doi.org/10.1109/PEDG.2016.7527044.

[86] Ahmed, M., Vahidnia, A., Datta, M., Meegahapola, L., "*An adaptive power oscillation damping controller for a hybrid ac/dc microgrid*", IEEE Access, Vol. 8, pp. 69482-69495, 2020, https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2985978.

[87] Li, W. , Wang, Y., Wu, X., Zhang, X., "*A novel solid-state circuit breaker for on-board dc microgrid system*", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 66, No. 7, pp. 5715-5723, July 2019, https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2854559.

[88] Patrao, I., Figueres, E., Garcerá, G., González-Medina, R., "*Microgrid architectures for low voltage distributed generation*", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 43, pp. 415–424, March 2015, https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.054.

[89] Wang, Y., Li, W., Wu, X., Wu, X., "*A novel bidirectional solid-state circuit breaker for dc microgrid*", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 66, No. 7, pp. 5707-5714, July 2019, https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2878191.

[90] Perez, F., Iovine, A., Damm, G., Galai-Dol, L., Ribeiro, P., "*Regenerative braking control for trains in a dc microgrid using dynamic feedback linearization techniques*", IFAC-PapersOnLine, Vol. 52, No. 4, pp. 401-406, 2019, https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.08.243.

[91] Farhang, S., Shahgholian, G., Fani, B., "*Dynamic behavior improvement of control system in inverter-based island microgrid by adding a mixed virtual impedance loop to voltage control loop*", International Journal of Smart Electrical Engineering, Vol. 11, No. 1, pp. 27-34, March 2022, https://dorl.net/dor/20.1001.1.22519246.2022.11.1.4.0.

[92] Chandra, A., Singh, G. K., Pant, V., "*Protection techniques for dc microgrid- A review*", Electric Power Systems Research, Vol. 187, Article Number: 106439, Oct. 2020, https://doi.org/ 10.1016/j.epsr.2020.106439.

[93] Hossain, M.A., Pota, H.R., Hossain, M.J., Blaabjerg, F., "*Evolution of microgrids with converter-interfaced generations: Challenges and opportunities*", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 109, pp. 160-186, July 2019, https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.01.038.

[94] Rangarajan, S.S., Raman, R., Singh, A., Shiva, C.K., Kumar, R., Sadhu, P.K., Collins, E.R., Senjyu, T., "*DC microgrids: A propitious smart grid paradigm for smart cities*", Smart Cities, Vol. 6, No. 4, pp. 1690-1718, July 2023, https://doi.org/10.3390/smartcities6040079.

[95] Che, L., Zhang, X., Shahidehpour, M., Alabdulwahab, A., Al-Turki, Y., "*Optimal planning of loop-based microgrid topology*", IEEE Trans. on Smart Grid, Vol. 8, No. 4, pp. 1771-1781, July 2017, https://doi.org/ 10.1109/TSG.2015.2508058.

[96] Modu, B., Abdullah, M.P., Sanusi, M.A., Hamza, M.F., "*DC-based microgrid: Topologies, control schemes, and implementations*", Alexandria Engineering Journal, Vol. 70, pp. 61-92, May 2023, https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.02.021.

[97] Wong, Y.C.C., Lim, C.S., Rotaru, M.D., Cruden, A., Kong, X., "*Consensus virtual output impedance control based on the novel droop equivalent impedance concept for a multi-bus radial microgrid*", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 35, No. 2, pp. 1078-1087, June 2020, https://doi.org/ 10.1109/TEC.2020.2972002.

[98] Vuyyuru, U., Maiti, S., Chakraborty, C., Pal, B.C., "*A series voltage regulator for the radial dc microgrid*", IEEE Trans. on Sustainable Energy, Vol. 10, No. 1, pp. 127-136, Jan. 2019, https://doi.org/10.1109/TSTE.2018.2828164.

[99] Bai, H., Zhang, H., Cai, H., Schiffer, J., "*Voltage regulation and current sharing for multi-bus DC microgrids: A compromised design approach*", Automatica, Vol. 142, Article Number: 110340, Aug. 2022, https://doi.org/10.1016/j.automatica.2022.110340.

[100] Rashidirad, N., Hamzeh, M., Sheshyekani, K., Afjei, E., "*A simplified equivalent model for the analysis of low-frequency stability of multi-bus dc microgrids*", IEEE Trans. on Smart Grid, Vol. 9, No. 6, pp. 6170-

6182, Nov. 2018, https://doi.org/10.1109/TSG.2017.2705194.

[101] Yang, Y., Huang, C., Zhou, D., Li, Y., "*Fault detection and location in multi-terminal DC microgrid based on local measurement*", Electric Power Systems Research, Vol. 194, Article Number: 107047, May 2021, https://doi.org/ 10.1016/j.epsr.2021.107047.

[102] Nougain, V., Mishra, S., Nag, S.S., Lekić, A., "*Fault location algorithm for multi-terminal radial medium voltage dc microgrid*", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 38, No. 6, pp. 4476-4488, Dec. 2023, https://doi.org/10.1109/TPWRD.2023.3318689.

[103] Anjaiah, K., Pattnaik, S.R., Dash, P.K., Bisoi, R., "*A real-time dc faults diagnosis in a DC ring microgrid by using derivative current based optimal weighted broad learning system*", Applied Soft Computing, Vol. 142, Article Number: 110334, July 2023, https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.110334.

[104] Mohanty, R., Pradhan, A.K., "*Protection of smart dc microgrid with ring configuration using parameter estimation approach*", IEEE Trans. on Smart Grid, Vol. 9, No. 6, pp. 6328-6337, Nov. 2018, https://doi.org/10.1109/TSG.2017.2708743.

[105] Fong, Y.C., Cheng, K.W.E., Raman, S.R., "*A current allocation strategy based balancing technique of voltage source string in switch-ladder inverter and its switched-capacitor variety*", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 36, No. 2, pp. 1081-1089, June 2021, https://doi.org/10.1109/TEC.2020.3031224.

[106] She, X., Huang, A.Q., Lukic, S., Baran, M.E., "*On integration of solid-state transformer with zonal dc microgrid*", IEEE Trans. on Smart Grid, Vol. 3, No. 2, pp. 975-985, June 2012, https://doi.org/10.1109/TSG.2012.2187317.

[107] Sun, Q., Li, Y., Ma, D., Zhang, Y., Qin, D., "*Model predictive direct power control of three-port solid-state transformer for hybrid ac/dc zonal microgrid applications*", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 37, No. 1, pp. 528-538, Feb. 2022, https://doi.org/10.1109/TPWRD.2021.3064418.

[108] Dou, C., Yue, D., Guerrero, J.M., Xie, X., Hu, S., "*Multiagent system-based distributed coordinated control for radial dc microgrid considering transmission time delays*", IEEE Trans on Smart Grid, Vol. 8, No. 5, pp. 2370-2381, Sept. 2017.

[109] Samantaray, S.R., Kamwa, I., Joos, G., "*Phasor measurement unit based wide- area monitoring and information sharing between micro-grids*", IET Generation, Transmission and Distribution, Vol. 11, No. 5, pp. 1293-1302, May 2017.

[110] Rashad, M., Ashraf, M., Bhatti, A.I., MustafaMinhas, D., "*Mathematical modeling and stability analysis of dc microgrid using SM hysteresis controller*", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 95, pp. 507-522, Feb. 2018.

[111] Ostrowska, A., Michalec, L., Skarupski, M., Jasiński, M., Sikorski, T., Kostyła, P., Lis, R., Mudrak, G., Rodziewicz, T., "*Power quality assessment in a real microgrid-statistical assessment of different long-term working conditions*", Energies, Vol. 15, No. 21, Article Number: 8089, Oct. 2022, https://doi.org/10.3390/en15218089.

[112] Hossain, M.R., Ginn, H.L., "*Real-time distributed coordination of power electronic converters in a dc shipboard distribution system*", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 32, No. 2, pp. 770-778, June 2017, https://doi.org/10.1109/TEC.2017.2685593.

[113] Altin, N., Eyimaya, S.E., "*A review of microgrid control strategies*", Proceeding of the IEEE/ICRERA, pp. 412-417, Sept. 2021, Istanbul, Turkey, https://doi.org/10.1109/ICRERA523¬34.20-21.95¬98699.

[114] Albarakati, A.J., Boujoudar, Y., Azeroual, M., Eliysaouy, L., Kotb, H., Aljarbouh, A., Alkahtani, H.K., Mostafa, S.M., Tassaddiq, A., Pupkov, A., "*Microgrid energy management and monitoring systems: A comprehensive review*", Frontiers in Energy Research, Vol. 10, Article Number: 1097858, Dec. 2022, https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.1097858.

[115] Abhishek, A., Ranjan, A., Devassy, S., Verma, B.K., Ram, S.K., Dhakar, A.K., "*Review of hierarchical control strategies for dc microgrid*", IET Renewable Power Generation, Vol. 14, No. 10, pp. 1631-1640, 2020, https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2019.1136.

[116] Sadegheian, M., Fani, B., Sadeghkhani, I., Shahgholian, G., "*A local power control scheme for electronically interfaced in islanded microgrids*", Iranian Electric Industry Journal of Quality and Productivity, Vol. 8, No. 3, pp. 47-58, 2020.

[117] Bidram, A., Davoudi, A., "*Hierarchical structure of microgrids control system*", IEEE Trans. on Smart Grid, Vol. 3, No. 4, pp. 1963-1976, Dec. 2012, https://doi.org/10.1109/TSG.2012.2197425.

[118] Uddin, M., Mo, H., Dong, D., Elsawah, S., Zhu, J., Guerrero, J.M., "*Microgrids: A review, outstanding issues and future trends*", Energy Strategy Reviews, Vol. 49, Article Number: 101127, Sept. 2023, https://doi.org/10.1016/j.esr.2023.101127.

[119] Ashabani, S.M., Mohamed, Y.A.R.I., "*General interface for power management of micro-grids using nonlinear cooperative droop control*", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 28, pp. 2929–2941, Aug 2013, https://doi.org/10.1109/TPWRS.2013.2254729.

[120] Nayanar, V., Kumaresan, N., Ammasai-Gounden, N., "*A single-sensor-based MPPT controller for wind-driven induction generators supplying dc microgrid*", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 31, No. 2, pp. 1161-1172, Feb. 2016.

[121] Moradi, H., Azizi, N., "*Distributed control of voltage and frequency of multi-machine systems with capability of active and reactive power control utilizing battery energy storage systems*", Energy Engineering and Management, Vol. 9, No. 4, pp. 36-45, Jan. 2020, https://doi.org/10.22052/9.4.4.

[122] Morstyn, T., Savkin, A.V., Hredzak, B., Agelidis, V.G., "*Multi-agent sliding mode control for state of charge balancing between battery energy storage systems distributed in a dc microgrid*", IEEE Trans. on Smart Grid, Vol. 9, No. 5, pp. 4735-4743, Sept. 2018. https://doi.org/10.1109/TSG.2017.2668767.

[123] He, W., Xiong, J., Chen, W., Zhao, W., Wang, C., "*Optimal scheduling of combined heat and power based microgrid*", *Proceeding of the IEEE/IAS*, Weihai, China, pp. 1411-1415, Sept. 2020, https://doi.org/10.1109/ICPSAsia48933.2020.9208417.

[124] Rahimi, M., Fani, B., Moazzami, M., Dehghani, M., Shahgholian, G., "*An online free penetration multi-stage fuse saving protection scheme in distribution systems with photovoltaic sources*", Iranian Electric Industry Journal of Quality and Productivity, Vol. 9, No. 2, pp. 24-35, 2020, https://doi.org/10.29252/ieijqp.9.2.24.

[125] Ion, C.P., Marinescu, C., "*Autonomous micro-grid based on micro hydro power plants*", Proceeding of the IEEE/OPTIM) Brasov, pp. 941-946, Brasov, Romania, May 2012, https://doi.org/10.1109/OPTIM.2012.6231918.

[126] Hemmatpour, M.H., Mohammadian, M., Gharaveisi, A.A., "*Simple and efficient method for steady-state voltage stability analysis of islanded microgrids with considering wind turbine generation and frequency deviation*", IET Generation, Transmission and Distribution, Vol. 10, No. 7, pp. 1691-1702, May 2016.

[127] Mhankale, S.E., Thorat, A.R., "*Droop control strategies of dc microgrid: A review*", Proceeding of the IEEE/ICCTCT, pp. 372-376, Coimbatore, India, March 2018, https://doi.org/ 10.1109/ICCTCT.2018.8550854.

[128] Kulkarni, S.V., Gaonkar, D.N., "*Improved droop control strategy for parallel connected power electronic converter based distributed generation sources in an islanded microgrid*", Electric Power Systems Research, Vol. 201, Article Number: 107531, Dec. 2021, https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107531.

[129] Mohammadzamani, F., Hashemi, M., Shahgholian, G., "*Adaptive control of nonlinear time delay systems in the presence of output constraints and actuator's faults*", International Journal of Control, Vol. 96, No. 3, pp. 541-553, March 2023, https://doi.org/10.1080/00207179.2021.2005257.

[130] Perez, F., Iovine, A., Damm, G., Galai-Dol, L., Ribeiro, P.F., "*Stability analysis of a dc microgrid for a smart railway station integrating renewable sources*", IEEE Trans. on Control Systems Technology, Vol. 28, No. 5, pp. 1802-1816, Sept. 2020, https://doi.org/10.1109/TCST.2019.2924615.

[131] Bisheh, H., Moazzami, M., Fani, B., Shahgholian, G., "*A new method for controlling microgrids protection settings with the high penetration of distributed generation*", Computational Intelligence in Electrical Engineering, Vol. 10, No. 4, pp. 71-90, Winter 2020, https://doi.org/10.22108/isee.2019.116834.1219.

[132] Zhang, L., Tai, N., Huang, W., Liu, J., Wang, Y., "*A review on protection of dc microgrids*", Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, Vol. 6, No. 6, pp. 1113-1127, Nov. 2018, https://doi.org/10.1007/s40565-018-0381-9.

[133] Jin, X., Shen, Y., Zhou, Q., "*A systematic review of robust control strategies in DC microgrids*", The Electricity Journal, Vol. 35, No. 5, Article Number: 107125, June 2022, https://doi.org/10.1016/j.tej.2022.107125.

[134] Lu, Z., Wang, L., Wang, P., "*Review of voltage control strategies for dc microgrids*", Energies, Vol. 16, No. 17, Article Number: 6158, Aug. 2023, https://doi.org/10.3390/en16176158.

[135] Shuaia, Z., Fanga, J., Ninga, E., Shenb, Z.J., "*Hierarchical structure and bus voltage control of dc microgrid*", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 82, pp. 3670-3682, Feb. 2018, https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.096.

[136] Han, Y., Ning, X., Yang, P., Xu, L., "*Review of power sharing, voltage restoration and stabilization techniques in hierarchical controlled dc microgrids*", IEEE Access, Vol. 7, pp. 149202-149223, Oct. 2019, https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2946706.

[137] Zhang, L., Zhang, W., Zeng, F., Yang, X., "*A review of control strategies in dc microgrid*", Journal of Physics: Conference Series, Vol. 1087, No. 4, 2018, https://doi.org/10.1088/1742-6596/1087/4/042035.

[138] Dadi, R., Meenakshy, K., Damodaran, S., "*A review on secondary control methods in dc microgrid*", Journal of Operation and Automation in Power Engineering, Vol. 11, No. 2, pp. 105-112, Aug. 2023, https://doi.org/10.22098/joape.2022.9157.1636.

[139] Jain, D., Saxena, D., "*Comprehensive review on control schemes and stability investigation of hybrid ac-dc microgrid*", Electric Power Systems Research, Vol. 218, Article Number: 109182, May 2023, https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109182.

[140] Meng, L., Shafiee,Q., Trecate, G.F., Karimi, H., Fulwani, D., Lu, X., Guerrero, J.M., "*Review on control of dc microgrids and multiple microgrid clusters*", IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, Vol. 5, No. 3, pp. 928 – 948, Sept. 201, https://doi.org/10.1109/JESTPE.2017.2690219.

[141] Sahoo, S.K., Sinha, A.K., Kishore, N.K., "*Control techniques in ac, dc, and hybrid ac–dc microgrid: A review*", IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, Vol. 6, No. 2, pp. 738-759, June 2018, https://doi.org/10.1109/JESTPE.2017.2786588.

[142] Židonis, A., Aggidis, G.A., "*State of the art in numerical modelling of Pelton turbines*", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 45, pp. 135–144, May 2015, https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.037.

[143] Nagasri, D.L.S., Marimuthu, R., "*Review on advanced control techniques for microgrids*", Energy Reports, Vol. 10, pp. 3054-3072, Nov. 2023, https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.09.162.

[144] Palizban, O., Kauhaniemi, K., "*Hierarchical control structure in microgrids with distributed generation: Island and grid-connected mode*", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 44, pp. 797-813, April 2015, https://doi.org/10.1016/j. rser.2015.01.008.

[145] Arfeen, Z.A., Khairuddin, A.B., Larik, R.M., Saeed, M.S., "*Control of distributed generation systems for microgrid applications: A technological review*", International Transactions on Electrical Energy Systems, Vol. 29, No. 9, Sept. 2019, https://doi.org/10.1002/2050-7038.12072.

[146] Porco, J.W.S., Shafiee, Q., Dorfler, F., Vasquez, J.C., Guerrero, J., Bullo, F., "*Secondary frequency and voltage control of islanded kficrogrids via distributed*

averaging", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 62, No. 11, pp. 7025-7038, Nov. 2015.

[147] Li, D., Zhao, B., Wu, Z., Zhang, X., Zhang, L., "*An improved droop control strategy for low-voltage microgrids based on distributed secondary power optimization control*", Energies, Vol. 10, No. 9, Article Number: 1347, Sept. 2017, https://doi.org/10.3390/en10091347.

[148] Aboushal, M.A., Moustafa, M.M.Z., "*A new unified control strategy for inverter-based micro-grid using hybrid droop scheme*", Alexandria Engineering Journal, Vol. 58, No. 4, pp. 1229-1245, 2019, https://doi.org/10.1016/j.aej.2019.10.006.

[149] Cucuzzella, M., Lazzari, R., Trip, S., Rosti, S., Sandroni, C., Ferrara, A., "*Sliding mode voltage control of boost converters in dc microgrids*", Control Engineering Practice, Vol. 73, PP. 161-170, April 2018.

[150] Li, G., He, G., Bao, W., Sun, Y., Hao, M., "*A hierarchical control strategy of micro-grid based on grid-friendly distributed generation technology*", Proceeding of the IEEE/POWERCON, pp. 3181-3185, Chengdu, China, Oct. 2014, https://doi.org/10.1109/POWERCON.2014.6993684.

[151] Keyvani-Boroujeni, B., Shahgholian, G., Fani, B., "*A distributed secondary control approach for inverter-dominated microgrids with application to avoiding bifurcation-triggered instabilities*", IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, Vol. 8, No. 4, pp. 3361-3371, Dec. 2020, https://doi.org/10.1109/JESTPE.2020.2974756.

[152] Wang, J., Jin, C., Wang, P., "*A uniform control strategy for the interlinking converter in hierarchical controlled hybrid AC/DC microgrids*", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 65, No. 8, pp. 6188-6197, Aug. 2018, https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2784349.

[153] Morstyn, T., Hredzak, B., Agelidis, V.G., "*Control strategies for microgrids with distributed energy storage systems: An overview*", IEEE Trans. on Smart Grid, Vol. 9, No. 4, pp. 3652-3666, July 2018, https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2637958.

[154] Yadav, M., Pal, N., Saini, D.K., "*Microgrid control, storage, and communication strategies to enhance resiliency for survival of critical load*", IEEE Access, Vol. 8, pp. 169047-169069, 2020, https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3023087.

[155] Xing, L., Mishra, Y., Guo, F., Lin, P., Yang, Y., Ledwich, G., Tian, Y.C., "*Distributed secondary control for current sharing and voltage restoration in dc microgrid*", IEEE Trans. on Smart Grid, Vol. 11, No. 3, pp. 2487-2497, May 2020, https://doi.org/10.1109/TSG.2019.2956515.

[156] Guerrero, J.M., Vásquez, J.C., Matas, J., Castilla, M., Vicuña, L.G.D., Castilla, M., "*Hierarchical control of droop-controlled ac and dc microgrids- A general approach toward standardization*", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 58, pp. 158–172, Jan. 2011.

[157] Chandorkar, M.C., Divan, D.M., Adapa, R., "*Control of parallel connected inverters in standalone ac supply systems*", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 29, No. 1, pp. 136-143, Jan./Feb. 1993, https://doi.org/10.1109/28.195899.

[158] Unamuno, E., Barrena, J.A., "*Hybrid ac/dc microgrids-Part II: Review and classification of control strategies*", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 52, pp. 1123-1134, Dec. 2015.

[159] Ali, S., Zheng, Z., Aillerie, M., Sawicki, J.P., Péra, M.C., Hissel, D., "*A review of dc microgrid energy management systems dedicated to residential applications*", Energies, Vol. 14, No. 14, Article Number: 4308, July 2021, https://doi.org/10.3390/en14144308.

[160] Saleh, M., Esa, Y., Mohamed, A.A., "*Communication-based control for dc microgrids*", IEEE Trans. on Smart Grid, Vol. 10, No. 2, pp. 2180-2195, March 2019, https://doi.org/10.1109/TSG.2018.2791361.

[161] Onaolapo, A.K., Sharma, G., Bokoro, P.N., Aluko, A., Pau, G., "*A distributed control scheme for cyber-physical dc microgrid systems*", Energies, Vol. 16, No. 15, Article Number: 5611, July 2023, https://doi.org/10.3390/en16155611.

[162] Gu, Y., Yang, H., Sun, W., Chi, Y., Li, W., He, X., "*Hierarchical control of dc microgrids robustness and smartness*", CSEE Journal of Power and Energy Systems, Vol. 6, No. 2, pp. 384-393, June 2020, https://doi.org/10.17775/CSEEJPES.2017.00920.

[163] Dragičević, T., Guerrero, J.M., Vasquez, J.C., Škrlec, D., "*Supervisory control of an adaptive-droop regulated dc microgrid with battery management capability*", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 29, No. 2, pp. 695-706, Feb. 2014, https://doi.org/10.1109/TPEL.2013.2257857.

[164] Zhang, B., Dou, C., Yue, D., Zhang, Z., Zhang, T., "*Hierarchical control strategy for networked dc microgrid based on adaptive dynamic program and event-triggered coansensus algorithm considering economy and actuator fault*", Journal of the Franklin Institute, Vol. 357, No. 13, pp. 8631-8656, Sept. 2020.

[165] Hu, J., Shan, Y., Guerrero, J.M., Ioinovici, A., Chan, K.W., Rodriguez, J., "*Model predictive control of microgrids– An overview*", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 136, Article Number: 110422, Feb. 2021, https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110422.

[166] Olivares, D.E., Mehrizi-Sani, A., Etemadi, A.H., Cañizares, C.A., Iravani, R., Kazerani, M., Hajimiragha, A.H., Gomis-Bellmunt, O., Saeedifard, M., Palma-Behnke, R., Jiménez-Estévez, G.A., Hatziargyriou, N. D., "*Trends in microgrid control*", IEEE Trans. on Smart Grid, Vol. 5, No. 4, pp. 1905-1919, May 2014, https://doi.org/10.1109/TSG.2013.2295514.

[167] Ngamroo, I., Surinkaew, T., "*Coordinated decentralized and centralized microgrid control for distributed renewable energy sources with integrated batteries*", IET Renewable Power Generation, Vol. 16, No. 15, pp. 3251-3266, Nov. 2022, https://doi.org/10.1049/rpg2.12576.

[168] Bandeiras, F., Gomes, A., Gomes, M., Coelho, P., "*Exploring energy trading markets in smart grid and microgrid systems and their implications for sustainability in smart cities*", Energies, Vol. 16, No. 2, Article Number: 801, Jan. 2023, https://doi.org/10.3390/en16020801.

[169] Raju, P.E.S.N., Jain, T., "*Development and validation of a generalized modeling approach for islanded inverter-based microgrids with static and dynamic loads*", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 108, pp. 177-190, June 2019, https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.01.002.

[170] Kumar, J., Agarwal, A., Agarwal, V., "*A review on overall* control *of dc* microgrids", Journal of Energy Storage, Vol. 21, pp. 113-138, Feb. 2019, https://doi.org/10.1016/j.est.2018.11.013.

[171] Khadka, N., Bista, A., Adhikari, B., Shrestha, A., Bista, D., Adhikary, B., "*Current practices of solar photovoltaic panel cleaning system and future prospects of machine learning implementation*", IEEE Access, Vol. 8, pp. 135948-135962, July 2020, https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3011553.

[172] Fattollahi, A., Shahgholian, G., Fani, B., "*Decentralized synergistic control of multi-machine power system using power system stabilizer*", Signal Processing and Renewable Energy, Vol. 4, No. 4, pp. 1-21, Dec. 2020, https://dorl.net/dor/20.1001.1.25887327.2020.4.4.1.9.

[173] Mehdi, M., Kim, C., Saad, M., "*Robust centralized control for dc islanded microgrid considering communication network delay*", IEEE Access, Vol. 8, pp. 77765-77778, April 2020, https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2989777.

[174] Gu, Y., Xiang, X., Li, W., He, X., "*Mode-adaptive decentralized control for renewable dc microgrid with enhanced reliability and flexibility*", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 29, No. 9, pp. 5072-5080, Sept. 2014, https://doi.org/ 10.1109/TPEL.2013.2294204.

[175] Morstyn, T., Hredzak, B., Demetriades, G.D., Agelidis, V.G., "*Unified distributed control for dc microgrid operating modes*", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 31, No. 1, pp. 802-812, Jan. 2016, https://doi.org/10.1109/TPWRS.2015.2406871.

[176] Wang, Z., Liu, F., Chen, Y., Low, S. H., Mei, S., "*Unified distributed control of stand-alone dc microgrids*", IEEE Trans. on Smart Grid, Vol. 10, No. 1, pp. 1013-1024, Jan. 2019, https://doi.org/ 10.1109/TSG.2017.2757498.

[177] Ahmadi, R., Ferdowsi, M., "*Improving the performance of a line regulating converter in a converter-dominated dc microgrid system*", IEEE Trans. on Smart Grid, Vol. 5, No. 5, pp. 2553-2563, Sept. 2014, https://doi.org/10.1109/TSG.2014.2319267.

[178] Gulin, M., Vašak, M., Pavlović, T., "*Dynamical behaviour analysis of a dc microgrid in distributed and centralized voltage control configurations*", Proceeding of the IEEE/ISIE, pp. 2365-2370, Istanbul, Turkey, June 2014, https://doi.org/10.1109/ISIE.2014.6864989.

[179] Xu, S., Pourbabak, H., Su, W., "*Distributed cooperative control for economic operation of multiple plugin electric vehicle parking decks*", International Transactions on Electrical Energy Systems, Vol. 27, No. 9, Article Number: e2348, Sept. 2017, https://doi.org/10.1002/etep.2348.

[180] Pourbabak, H., Ajao, A., Chen, T., Su, W., "*Fully distributed AC power flow (ACPF) algorithm for distribution systems*", IET Smart Grid, Vol. 2, No. 2, pp. 155–162,June 2019, https://doi.org/10.1049/iet-stg.2018.0060.

[181] Guo, L., Wang, C., Guo, L., Cao, J., "*Dynamical characteristic of microgrid with peer to peer control*", Proceeding of the IEEE/CICED, pp. 1-7, Guangzhou, China, Dec. 2008, https://doi.org/10.1109/CICED.2008.5211780.

[182] Xiao, Z., Wu, J., Jenkins,N., "*An overview of microgrid control*", Journal Intelligent Automation and Soft Computing, Vol. 16, No. 2, pp. 199-212, 2010, https://doi.org/10.1080/10798587.2010.10643076.

[183] Hernandez, B., Giraldo, E., Ospina, S., Garces, A., "*Master-slave operation of dc microgrids: An adaptive control approach with estimation*", Proceeding of the IEEE/CCAC, pp. 1-6, Medellin, Colombia, Oct. 2019, https://doi.org/10.1109/CCAC.2019.8921087.

[184] Karami, P., Baharizadeh, M., Golsorkhi, M.S., Ershadi, M.H., "*A coordinated control of hybrid ac/dc microgrids based on master–slave method*", Electrical Engineering, Vol. 104, pp. 3619–3629, May 2022, https://doi.org/10.1007/s00202-022-01573-w.

[185] Hu, J., Zhang, T., Du, S., Zhao, Y., "*An overview on analysis and control of micro-grid system*", International Journal of Control and Automation, Vol. 8, No. 6, pp. 65-76, 2015.

[186] Lai, J., Lu, X., Wang, F., Dehghanian, P., Tang, R., "*Broadcast gossip algorithms for distributed peer-to-peer control in ac microgrids*", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 55, No. 3, pp. 2241-2251, May/June 2019, https://doi.org/10.1109/TIA.2019.2898367.

[187] Wang, Y., Nguyen, T.L., Xu, Y., Tran, Q.T., Caire, R., "*Peer-to-peer control for networked microgrids: Multi-layer and multi-agent architecture design*", IEEE Trans. on Smart Grid, Vol. 11, No. 6, pp. 4688-4699, Nov. 2020, https://doi.org/10.1109/TSG.2020.3006883.

[188] Kalke, D., Suryawanshi, H.M., Talapur, G.G. Deshmukh, R., Nachankar, P., "*Modified droop and master-slave control for load sharing in multiple standalone ac microgrids*", Proceeding of the IEEE/IECON, Lisbon, Portugal, pp. 1862-1867, Oct. 2019, https://doi.org/10.1109/IECON.2019.8927575.

[189] Mortezaei, A., Simões, M.G., Savaghebi, M., Guerrero, J.M., Al-Durra, A., "*Cooperative control of multi-master–slave islanded microgrid with power quality enhancement based on conservative power theory*", IEEE Trans. on Smart Grid, Vol. 9, No. 4, pp. 2964-2975, July 2018, https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2623673.

[190] Lee, S.W., Cho, B.H., "*Master–slave based hierarchical control for a small power dc-distributed microgrid system with a storage device*", Energies, Vol. 9, No. 11, Article Number: 880, Oct. 2016, https://doi.org/10.3390/en9110880.

[191] Guo, L., Feng, Y., Li, X., Wang, C., Li, Y., "*Stability analysis of a dc microgrid with master-slave control structure*", Proceeding of the IEEE/ECCE, pp. 5682-5689, Pittsburgh, PA, USA, Sept. 2014, https://doi.org/10.1109/ECCE.2014.6954180.

[192] Gu, H., Jiao, Z., Liu, J., "*Small-signal model and stability analysis of dc microgrids with master-slave control strategy*", Proceeding of the IEEE/PESGM), pp.

1-5, Atlanta, GA, USA, Aug. 2019, pp. 1-5, https://doi.org/10.1109/PESGM40551.2019.8974020.

[193] Chen, Y., Li, J., Wen, Y., Sehnan, M., Xu, W., "*A hybrid master–slave control strategy for multiple distributed generators in microgrid*", Energies, Vol. 16, No. 2, Article Number: 968, Jan. 2023, https://doi.org/10.3390/en16020968.

[194] Khaledian, A., Golkar, M.A., "*Analysis of droop control method in an autoNomous microgrid*", Journal of Applied Research and Technology, Vol. 15, No. 4, pp. 371-377, Aug. 2017, https://doi.org/10.1016/j.jart.2017.03.004.

[195] Zandi, F., Fani, B., Golsorkhi, A., "*A visually driven nonlinear droop control for inverter-dominated islanded microgrids*", Electrical Engineering, Vol. 102, pp. 1207–1222, 2020, https://doi.org/10.1007/s00202-020-00942-7.

[196] Rajesh, K.S., Dash, S.S., Rajagopal, R., Sridhar, R., "*A review on control of ac microgrid*", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 71, pp. 814–819, 2017, http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.106.

[197] Ghanbari, N., Mobarrez, M., Bhattacharya, S., "*A review and modeling of different droop control based methods for battery state of the charge balancing in dc microgrids*", Proceeding of the IEEE/IECON, pp. 1625-1632, Washington, DC, USA, Oct. 2018, https://doi.org/10.1109/IECON.2018.8591739.

[198] Lai, H., Xiong, K., Zhang, Z., Chen, Z., "*Droop control strategy for microgrid inverters: A deep reinforcement learning enhanced approach*", Energy Reports, Vol. 9, No. 8, pp. 567-575, Sept. 2023, https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.04.263.

[199] Ibanez, F., Mahmoud, A., Yaroslav, V., Peric, V. Vorobev, P., "*Improving the power sharing transients in droop-controlled inverters with the introduction of an angle difference limiter*", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 153, Article Number: 109371, Nov. 2023, https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109371.

[200] Liu, S., Miao, H., Li, J., Yang, L., "*Voltage control and power sharing in dc Microgrids based on voltage-shifting and droop slope-adjusting strategy*", Electric Power Systems Research, Vol. 214, Article Number: 108814, Jan. 2023, https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108814.

[201] Lu, X., Guerrero, J.M., Sun, K., Vasquez, J.C., "*An improved droop control method for dc microgrids based on low bandwidth communication with dc bus voltage restoration and enhanced current sharing accuracy*", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 29, No. 4, pp. 1800-1812, April 2014, https://doi.org/10.1109/TPEL.2013.2266419.

[202] Villa, A., Belloni, F., Chiumeo, R., Gandolfi, C., "*Conventional and reverse droop control in islanded microgrid: Simulation and experimental test*", Proceeding of the IEEE/SPEEDAM, pp. 288-294, Capri, Italy, June 2016, https://doi.org/10.1109/SPEEDAM.2016.7526020.

[203] Cao, W., Han, M., Meng, X., Xie, W., Khan, Z.W., Guerrero, J.M., Tinajero, G.D.A., "*Reverse droop control-based smooth transfer strategy for interface converters in hybrid ac/dc distribution networks*", CSEE Journal of Power and Energy Systems, Vol. 9, No. 1, pp. 122-134, Jan. 2023, https://doi.org/10.17775/CSEEJPES.2020.02070.

[204] Xu, G. , Sha, D., Liao, X., "*Decentralized inverse-droop control for input-series–output-parallel dc–dc converters*", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 30, No. 9, pp. 4621-4625, Sept. 2015, https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2396898.

[205] Shahgholian, G., Fani, B., Keyvani, B., Karimi, H., Moazzami, M., "*Improve the reactive power sharing by uses to modify droop characteristics in autonomous microgrids*", Energy Engineering and Management, Vol. 9, No. 3, pp. 64-71, 2019, Oct. https://doi.org/10.22052/9.3.64.

[206] Tayab, U.B., Roslan, M.A.B., Hwai, L.J., Kashif, M., "*A review of droop control techniques for microgrid*", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol.76, pp. 717-727, Sept. 2017, https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.028.

[207] Bintoudi, A.D., Zyglakis, L., Tsolakis, A.C., Ioannidis, D., Hadjidemetriou, L., Zacharia, L., Al-Mutlaq, N., Al-Hashem, M., Al-Agtash, S., Kyriakides, E., Demoulias, C., Tzovaras, D., "*Hybrid multi-agent-based adaptive control scheme for ac microgrids with increased fault-tolerance needs*", IET Renewable Power Generation, Vol. 14, No. 1, pp. 13-26, 2020, https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2019.0468.

[208] Hatahet, W., Marei, M.I., Mokhtar, M., "*Adaptive controllers for grid-connected dc microgrids*", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 130, Article Number: 106917, Sept. 2021, https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.106917.

[209] Mokhtar, M., Marei, M.I., El-Sattar, A.A., "*An adaptive droop control scheme for dc microgrids integrating sliding mode voltage and current controlled boost converters*", IEEE Trans. on Smart Grid, Vol. 10, No. 2, pp. 1685-1693, March 2019, https://doi.org/10.1109/TSG.2017.2776281.

[210] Lu, X., Sun, K., Guerrero, J.M., Vasquez, J.C., Huang, I., "*State-of-charge balance using adaptive droop control for distributed energy storage systems in dc microgrid applications*", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 61, No. 6, pp. 2804-2815, June 2014, https://doi.org/10.1109/TIE.2013.2279374.

[211] Li, F., Zhuo, S., Huangfu, Y., Wang, X., Song, S., Gan, Z., "*An improved nonlinear droop control method applied to dc microgrid*", Proceeding of the IEEE/IAS, pp. 1-6, Nashville, TN, USA, Oct./Nov. 2023, https://doi.org/10.1109/IAS54024.2023.10407011.

[212] Sharma, S., Iyer, V.M., Bhattacharya, S., "*An optimized nonlinear droop control method using load profile for dc microgrids*", IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics, Vol. 4, No. 1, pp. 3-13, Jan. 2023, https://doi.org/10.1109/JESTIE.2022.3208513.

[213] Abdelgabir, H., Boynuegri, A.R., Elrayyah, A., Sozer, Y., "*A complete small signal modelling and adaptive stability analysis of nonlinear droop-controlled microgrids*", Proceeding of the IEEE/APEC, pp. 3333-3339, San Antonio, TX, USA, March 2018, https://doi.org/10.1109/APEC.2018.8341581.

[214] Shadabi, H., Kamwa, I., "*A decentralized non-linear dynamic droop control of a hybrid energy storage system bluefor primary frequency control in integrated AC-MTDC systems*", International Journal of Electrical

Power & Energy Systems, Vol. 136, Article Number: 107630, March 2022, https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107630.

[215] Liu, S., Su, P., Zhang, L., "*A virtual negative inductor stabilizing strategy for dc microgrid with constant power loads*", IEEE Access, Vol. 6, pp. 59728-59741, Oct. 2018, https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2874201.

[216] Yengijeh, N.P., Moradi-CheshmehBeigi, H., Hajizadeh, A., "*Inertia emulation with the concept of virtual supercapacitor based on SOC for distributed storage systems in islanded DC microgrid*", IET Renewable Power Generation, Vol. 61, No.13, pp. 2805-2815, 5 Oct. 2022, https://doi.org/10.1049/rpg2.12537.

[217] Keyvani, B., Fani, B., Shahgholian, G., "*Preventing of bifurcation consequences in VSI-dominated micro-grids using virtual impedance theory*", Computational Intelligence in Electrical Engineering, Vol. 12, No. 1, pp. 48-60, 2021, https://doi.org/10.22108/ISEE.2020.122341.1358.

[218] Kamali, M., Fani, B., Shahgholian, G., Gharehpetian, G.B., Shafiee, M., "*Harmonic compensation and micro-grid voltage and frequency control based on power proportional distribution with adaptive virtual impedance method*", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, Vol. 14, No. 53, pp. 33-60, June 2023, https://dorl.net/dor/20.1001.1.23223871.1402.14.53.3.7.

[219] Mohammed, N., Callegaro, L., Ciobotaru, M., Guerrero, J.M., "*Accurate power sharing for islanded DC microgrids considering mismatched feeder resistances*", Applied Energy, Vol. 340, Article Number: 121060, June 2023, https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121060.

[220] Diaz, N.L., Dragičević, T., Vasquez, J.C., Guerrero, J.M., "*Intelligent distributed generation and storage units for dc microgrids- A new concept on cooperative control without communications beyond droop control*", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 5, No. 5, pp. 2476-2485, Sept. 2014, https://doi.org/10.1109/TSG.2014.2341740.

[221] Hamzeh, M., Ghafouri, M., Karimi, H., Sheshyekani, K., Guerrero, J.M., "*Power oscillations damping in dc microgrids*", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 31, No. 3, pp. 970-980, Sept. 2016, https://doi.org/10.1109/TEC.2016.2542266.

[222] An, R., Liu, Z., Liu, J., "*Successive-approximation-based virtual impedance tuning method for accurate reactive power sharing in islanded microgrids*", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 36, No. 1, pp. 87-102, Jan. 2021, https://doi.org/10.1109/TPEL.2020.3001037.

[223] Dou, C., Zhang, Z., Yue, D., Song, M., "*Improved droop control based on virtual impedance and virtual power source in low-voltage microgrid*", IET Generation, Transmission and Distribution, Vol. 11, No. 4, pp. 1046-1054, March 2017, https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2016.1492.

[224] Zhang, Y., Li, Y.W., "*Energy management strategy for supercapacitor in droop-controlled dc microgrid using virtual impedance*", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 32, No. 4, pp. 2704-2716, April 2017, https://doi.org/10.1109/TPEL.2016.2571308.