TEEGES

Technovations of Electrical Engineering in Green Energy System

Research Article (2025) 4(2):17-34

A Brief Review of the Application and Control Strategies of Alternating Current Microgrids in the Power System

Ghazanfar Shahgholian[1,2], *Professor*, Majid Moazzami[1,2], *Associate Professor*, Majid Dehghani[1,2], *Assistant Professor*

[1] *Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran*
[2] *Smart Microgrid Research Center, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran*

Abstract:

Alternating current (AC) microgrids have occupied a central position in research since the evolution of the microgrid concept. In this article, a brief review of control and scientific strategies for AC microgrids is presented. AC microgrids consist of distributed energy sources and different loads, which are connected to a synchronous machine using an AC bus and through a power electronic converter. The mixed structure of alternating current microgrid reduces inertia, which increases frequency deviation and frequency change rate, and makes the overall stability of the power system more sensitive to disturbances. For constant production of all production units, a proper control method is needed. Applying appropriate hierarchical control makes the system flexible, so that it is possible to integrate more distributed power units in the system. Hierarchical control strategy is widely used in all three types of microgrids. Centralized control, decentralized control and distributed control are three basic control strategies based on the communication method. The main problem in control schemes based on communication channels is poor reliability in case of communication link failure. Also, two working modes of the microgrid connected to the network and island are mentioned. The correct control of the microgrid in both operating modes faces different challenges. This study will be useful for the comparative analysis and development of control strategies for AC microgrids for future research.

Keywords: Renewable energy, Control strategies, Microgrid, Hierarchical control, Distributed generation resources.

Received: 01 May 2024
Revised: 16 June 2024
Accepted: 07 August 2024
Corresponding Author: Dr. Majid Moazzami, m_moazzami@eng.ui.ac.ir
DOI: http://dx.doi.org/10.30486/TEEGES.2025.1121457

فناوری‌های نوین مهندسی برق در سیستم انرژی سبز

TEEGES

مقاله پژوهشی

یک مطالعه مروری کوتاه از کاربرد و راهبردهای کنترل ریزشبکه‌های جریان متناوب در سیستم قدرت

غضنفر شاهقلیان[۱،۲]، *استاد*، مجید معظمی[۱،۲]، *دانشیار*، مجید دهقانی[۱،۲]، *استادیار*

۱- *دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران*

۲- *مرکز تحقیقات ریزشبکه‌های هوشمند، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران*

چکیده: ریزشبکه‌های جریان متناوب (AC) جایگاه مرکزی در تحقیقات را از زمان تکامل مفهوم ریزشبکه به خود اختصاص داده‌اند. در این مقاله مروری کوتاه از راهبردهای کنترلی و علمیاتی برای ریزشبکه‌های AC ارائه شده است. ریزشبکه‌های AC از منابع انرژی تولید پراکنده و بارهای مختلف تشکیل شده که با استفاده از باس AC به هم و از طریق مبدل الکترونیکی قدرت به یک ماشین سنکرون متصل می‌شوند. ساختار مختلط ریزشبکه جریان متناوب باعث کاهش اینرسی می‌شود که انحراف فرکانس و نرخ تغییر فرکانس را افزایش می‌دهد و باعث حساس‌تر شدن پایداری کلی سیستم قدرت نسبت به اختلال‌ها می‌گردد. برای تولید ثابت همه واحدهای تولیدی نیاز به یک روش کنترل مناسب است. اعمال کنترل سلسله مراتبی مناسب باعث انعطاف‌پذیری سیستم می‌شود به طوری که ادغام واحدهای توان توزیع شده بیشتری در سیستم امکان‌پذیر است. راهبرد کنترل سلسله مراتبی در هر سه نوع ریزشبکه کاربرد فراوانی دارد. کنترل متمرکز، کنترل غیرمتمرکز و کنترل توزیع سه راهبرد کنترل اساسی بر اساس روش ارتباطی هستند. اشکال اصلی در طرح‌های کنترلی که مبتنی بر کانال‌های ارتباطی هستند، قابلیت اطمینان ضعیف در صورت خرابی پیوندهای ارتباطی است. همچنین دو حالت کار ریزشبکه متصل به شبکه و جزیره‌ای اشاره شده است. کنترل صحیح ریزشبکه در هر دو حالت عملیاتی با چالش‌ها متفاوتی مواجه است. این مطالعه برای تجزیه و تحلیل مقایسه‌ای و توسعه راهبردهای کنترلی در مورد ریزشبکه‌های ac برای تحقیقات آینده مفید خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: انرژی تجدیدپذیر، راهبردهای کنترلی، ریزشبکه، کنترل سلسله مراتبی، منابع تولید پراکنده

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۱۲

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۲۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۵/۱۷

نویسنده‌ی مسئول: دکتر مجید معظمی، m_moazzami@eng.ui.ac.ir

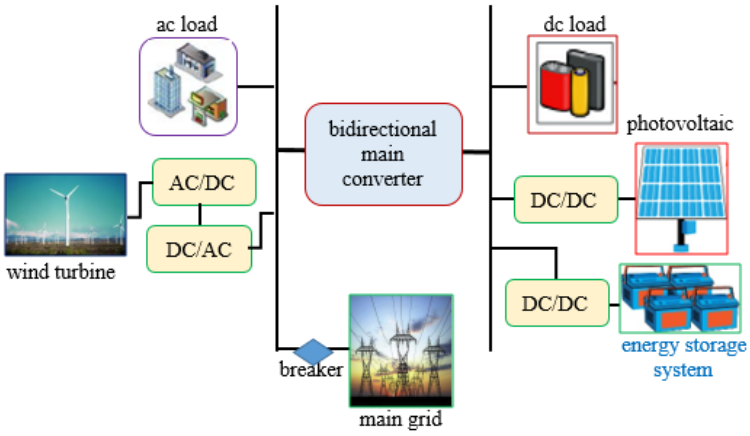
DOI: http://dx.doi.org/10.30486/TEEGES.2025.1121457

CC BY

۱- مقدمه

استفاده از انرژی برای رشد اقتصادی و توسعه اجتماعی بسیار مهم است. در جامعه مدرن امروزی توسعه صنعتی و اقتصادی پایدار و کاهش اثرات نامطلوب مصرف سوخت فسیلی، نیاز به تغییر از منابع انرژی تجدیدناپذیر [۱] به منابع انرژی تجدیدپذیر را بیشتر کرده است [۱،۲]. از مشکلات سیستم‌های تولید برق متمرکز می‌توان به وابستگی نیروگاه‌ها به سوخت فسیلی، تولید مقدار زیاد برق در یک مکان و انتقال آن به نقاط دور توسط خطوط انتقال، ایجاد تلفات برق و افت ولتاژ توسط خطوط انتقال و عدم ارائه راه‌حل اقتصادی برای تامین برق اشاره نمود [۳،۴]. تامین برق با کمترین هزینه هدف اصلی است و تنها زمانی اتفاق می‌افتد که تلفات انتقال و توزیع تقریباً صفر شود. انرژی‌های خورشیدی [۵]، باد [۲] [۶،۷]، آبی [۸،۹] و زمین گرمایی [۳] [۱۰،۱۱] نمونه‌هایی از منابع انرژی تجدیدپذیر هستند که برای کاهش کمبود سوخت‌های فسیلی در تولید برق استفاده می‌شوند [۱۲،۱۳]. این منابع علاوه بر فراهم نمودن انعطاف‌پذیری انرژی، باعث برطرف کردن نگرانی‌های زیست‌محیطی می‌شوند و کیفیت توان سیستم‌های قدرت را افزایش می‌دهند [۱۴،۱۵]. استفاده از تولید پراکنده [۴] برای تولید توان باعث ایجاد تغییرات زیادی در ساختار سیستم توزیعی می‌شود که منابع پراکنده به آن متصل هستند. جهت حفظ تعادل بین منابع انرژی پراکنده، بارها و واحدهای ذخیره‌سازی از راهبردهای مدیریت توان استفاده می‌شود.[۱۶،۱۷]. ریزشبکه‌ها [۵] یک راه‌حل مناسب برای انعطاف‌پذیر بودن مدیریت سیستم‌های قدرت الکتریکی هستند که علاوه بر افزایش تولید پراکنده، امکان استفاده هوشمندانه از توان الکتریکی موجود را فراهم می‌کنند [۱۸،۱۹]. ساختار کنترلی ریزشبکه بسیار متفاوت از نیروگاه‌های سنتی است و به همین علت طراحی خوب مدیریت توان [۶] برای یک ریزشبکه ضروری است [۲۰،۲۱].

شکل (۱) ساختار یک ریزشبکه شامل بارها، سیستم‌های ذخیره‌کننده انرژی [۷]، منابع انرژی پراکنده مانند فتوولتائیک [۸]، توربین باد [۹] و مبدل اصلی دوطرفه [۱۰] را نشان می‌دهد. امروزه برای مراکز صنعتی و تحقیقاتی توسعه سیستم‌های ریزشبکه برای بهبود قابلیت اطمینان انرژی شبکه برق اهمیت پیدا کرده به طوری که توسعه ریزشبکه‌ها یک راه عملی و مقرون به صرفه برای یکپارچه کردن منابع انرژی‌های تجدیدپذیر با رشد سریع است. منابع انرژی پراکنده توزیع شده بر خلاف ژنراتورهای سنکرون معمولی بدون اینرسی هستند [۲۲،۲۳]. با وجود انعطاف‌پذیری و قابلیت اطمینان کنترل‌کننده، ماهیت کم اینرسی اینورترهای منبع ولتاژ، ممکن است باعث تهدید پایداری سیستم در برابر اختلال‌ها احتمالی شوند [۲۴،۲۵].



شکل (۱): نمایش ساختار یک ریزشبکه

منابع تولید پراکنده متغیر هستند و تاثیر آنها در تولید توان به شرایط آب و هوایی وابستگی دارند و می‌توانند باعث ایجاد اختلال در شبکه تولید شوند [۲۶،۲۷]. به عنوان مثال، یک منبع تولید پراکنده مبتنی بر تبدیل انرژی باد زمانی که سرعت باد بیشتر از سرعت قطع [۱۱] باشد، توان تولید می‌کند و زمانی که سرعت باد کمتر از سرعت قطع شود، منبع پراکنده قطع خواهد شد. ماهیت متناوب و متغیر انرژی‌های تجدیدپذیر همراه با نیاز به انطباق فنی و تقاضای توان متغیر رو به رشد، چالش‌های زیادی ایجاد کرده که می‌توان به ولتاژ یا فرکانس ناپایدار، مدیریت توان و تعامل با شبکه برق اشاره نمود [۲۸،۲۹]. یک ریزشبکه با شبکه توزیع متفاوت است و باعث کاهش تلفات شبکه توزیع، افزایش ظرفیت برق شبکه و بهبود قابلیت اطمینان می‌شود. همچنین ریزشبکه علاوه بر فراهم کردن پشتیبانی تنظیم

ولتاژ و فرکانس محلی، باعث کاهش هزینه سرمایه‌گذاری برای ارتقاء شبکه می‌شود [۳۰،۳۱]. همچنین پاسخ تقاضای ریزشبکه سریع‌تر است. با توجه به اینکه منابع تولید پراکنده (DG) با اینورترها معمولاً در ارتباط هستند، علاوه بر تنظیم ولتاژ متناوب، توانایی جبران ولتاژ نامتعادل و هارمونیک نیز در ریزشبکه وجود دارد. بنابراین ریزشبکه می‌تواند کیفیت توان بالایی را ارائه دهد [۳۲]. ریزشبکه‌ها بر اساس سیستم توزیع به ریزشبکه‌های جریان متناوب[۱۲] [۳۳]، ریزشبکه‌های جریان مستقیم[۱۳] [۳۴] و ریزشبکه‌های هیبرید[۱۴] [۳۵] تقسیم‌بندی می‌شوند. ریزشبکه‌ها از نظر اتصال به دو نوع مستقل (جزیره‌ای[۱۵]) [۳۶] و متصل به شبکه[۱۶] [۳۷] تقسیم‌بندی می‌شوند که با توجه به نیاز شبکه و کاربران کار می‌کنند و هر کدام شامل تنظیمات مختلفی هستند [۳۸]. معمولاً ریزشبکه در حالت متصل به شبکه کار می‌کند و منبع تولید پراکنده بر اساس فرمان کنترل‌کننده توان را تولید می‌کند [۳۹]. در حالت جزیره‌ای، برق مناطق روستایی با هزینه کمتر و حداقل تلفات برق توسط شبکه‌های میکرو تامین می‌شود. در این حالت به صورت الکتریکی قسمتی از شبکه توزیع شده از شبکه اصلی جدا می‌شود ولی بارها توسط منابع محلی پشتیبانی می‌شوند [۴۰]. در حالت متصل به شبکه، ریزشبکه‌ها می‌توانند با کنترل ولتاژ، کنترل فرکانس و روش‌های مختلف از طریق شبکه اصلی پشتیبانی شوند و انعطاف‌پذیری، کنترل و قابلیت اطمینان بیشتری توسط ریزشبکه فراهم می‌شود. نقش اساسی کنترل‌کننده در این حالت مدیریت انرژی است [۴۱]. سیستم مدیریت انرژی یک سیستم حیاتی است که که امکان عملکرد بهینه سیستم ریزشبکه را برای اطمینان از پایداری، کارایی و فعالیت اقتصادی فراهم می‌کند [۴۲،۴۳]. ویژگی‌های اصلی یک ریزشبکه عبارتند از [۴۴،۴۵]: تنظیم مقدار ولتاژ و فرکانس ریزشبکه در محدوده نرمال آنها، کنترل جریان توان اکتیو و توان راکتیو از واحدهای تولید پراکنده به بارها در هنگام کار، تامین انرژی الکتریکی و انرژی حرارتی به طور همزمان، ارائه یک انتقال مناسب بین حالت جزیره‌ای و حالت متصل به شبکه و عمل کردن به عنوان یک موجودیت واحد قابل کنترل از شبکه. بهره‌برداری از ریزشبکه‌ها و اهمیت کاربرد آنها در سیستم‌های قدرت، توسعه ریزشبکه‌ها با چالش‌های مختلفی روبرو شده است که مورد توجه محققان قرار گرفته است. در این راستا مطالعات مروری مختلفی ارائه شده که به تعدادی از آنها در جدول (۱) بر اساس موضوع اشاره شده است.

جدول (۱): تعدادی از مطالعات مروری انجام شده در زمینه‌های مختلف ریزشبکه‌ها

بیان اصلی	هدف اصلی تحقیق	مرجع
ریزشبکه‌ها از منابع مختلف توزیع شده تشکیل شده‌اند و لذا نیاز به یک راهبرد کنترل مناسب و سیستم نظارت برای تضمین انتقال توان ریزشبکه به طور موثر به بارهای حساس و شبکه اولیه است. راهبردهای کنترل ریزشبکه ارزیابی شده و بر اساس سطح حفاظت، تبدیل انرژی و یکپارچه‌سازی طبقه‌بندی می‌شوند و نقش اینترنت اشیا و سیستم های نظارتی برای مدیریت انرژی و تجزیه و تحلیل داده‌ها در ریزشبکه مرور شده است.	سیستم‌های نظارت و مدیریت	[۴۶]
کاربرد گسترده بارهای غیرخطی و نفوذ تولیدات انرژی پراکنده مبتنی بر تجهیزات الکترونیک قدرت باعث ایجاد مشکلات کیفیت توان در شبکه توزیع شده‌اند. مروری بر تجزیه و تحلیل کیفیت توان، جبران‌کننده‌ها و فناوری‌های کنترل ارائه شده است. فن‌آوری‌های کنترلی برای حل مشکلات کیفیت توان در شبکه هوشمند بیان شده است.	تجزیه و تحلیل کیفیت توان و فناوری کنترل	[۴۷]
ریزشبکه‌های ساختمانی جایگزین خوبی برای حفاظت از محیط زیست همزمان با تقویت سیستم توزیع برق هستند ولی توسعه گسترده آنها به دلایل مختلفی مانند عدم قطعیت تولید برق همراه با الزامات رعایت کیفیت توان محدود است. الگوریتم‌های کنترل سلسله مراتبی برای ساخت ریزشبکه‌ها با تاکید بر مهم‌ترین نقاط قوت و ضعف آن‌ها مرور شده است. نقش هر سطح کنترلی برای تطبیق ریزشبکه‌های ساختمانی با ساختارهای شبکه برق فعلی و آینده بیان شده است.	کاربرد کنترل سلسله مراتبی برای ساخت	[۴۸]
رابط الکترونیکی قدرت در سیستم منابع پراکنده مبتنی بر انرژی تجدیدپذیر با جبران توان راکتیو و تولید هارمونیک‌ها باعث ایجاد مشکل جدی کیفیت توان می‌شود که برای کاهش مشکلات، ریزشبکه‌ها گسترش پیدا کرده‌اند. یک نمای کلی از ریزشبکه و مدل‌سازی آن با استفاده از داده‌های واقعی محیطی با توجه به مسائل مربوط به کیفیت توان که ریزشبکه با آن روبرو است، ارائه شده و روش‌های بهبود کیفیت توان با استفاده از تکنیک‌ها، الگوریتم‌ها و دستگاه‌های مختلف کنترل مرور شده است.	جبران توان راکتیو	[۴۹]
ارتباط منابع انرژی پراکنده در ریزشبکه معمولاً از طریق اینورترها با شبکه شهری برقرار است، بنابراین ویژگی‌های پایداری ریزشبکه با یک شبکه سنتی متفاوت است. روش طبقه‌بندی پایداری ریزشبکه با توجه به ویژگی‌های ریزشبکه ارائه شده که حالت عملکرد ریزشبکه همراه با انواع اختلال‌ها و چارچوب زمانی در نظر گرفته شده است.	طبقه‌بندی پایداری	[۵۰]

همچنین مطالعات مختلفی در زمینه ریزشبکه‌های AC انجام شده که می‌توان به مدل‌سازی ریزشبکه‌های AC تغذیه شده با مبدل و تاثیر نفوذ زیاد بارهای رابط مبدل [۵۱]، بهبود اشتراک‌گذاری توان با بهینه‌سازی کنترل افت در ریزشبکه‌های جزیره‌ای AC [۵۲]، بررسی پایداری ریزشبکه چند اینورتری [۵۳]، مدل‌سازی ریزشبکه AC جزیره‌ای با در نظر گرفتن اغتشاش حالت [۵۴]، حفاظت ریزشبکه AC توسط رله ولتاژ پیشرفته [۵۵]، کنترل توزیع شده مبتنی بر اجماع PI [۵۶] و بهبود پایداری ریزشبکه AC تحت حملات سایبری [۵۷] اشاره کرد.

در این مقاله مروری کوتاه از کاربرد و روش‌های کنترلی مختلف در ریزشبکه‌ها با تاکید بر ریزشبکه‌های جریان متناوب ارائه شده است. به طور کلی می‌توان هدف از مرور انجام شده را به صورت زیر بیان کرد:

- دسته‌بندی تکنیک‌های مختلف کنترل در ریزشبکه جریان متناوب.
- بررسی روش‌های کنترل ریزشبکه جریان متناوب در سه سطح اولیه، ثانویه و ثالثیه.
- مقایسه روش‌های مختلف کنترل ریزشبکه جریان متناوب.

سازمان‌دهی مقاله در ادامه به این شرح است. در قسمت ۲ ساختار ریزشبکه همراه با تقسیم‌بندی آن برحسب پارامترهای مختلف مانند سیستم توزیع و مُدهای عملکرد بیان شده است. در قسمت ۳ راهبردهای کنترل ریزشبکه AC برحسب پارامترهای مختلف مانند زمان پاسخگویی و عملکرد کنترل‌کننده ارائه شده است. در نهایت در قسمت ۴ نتیجه‌گیری بیان شده است.

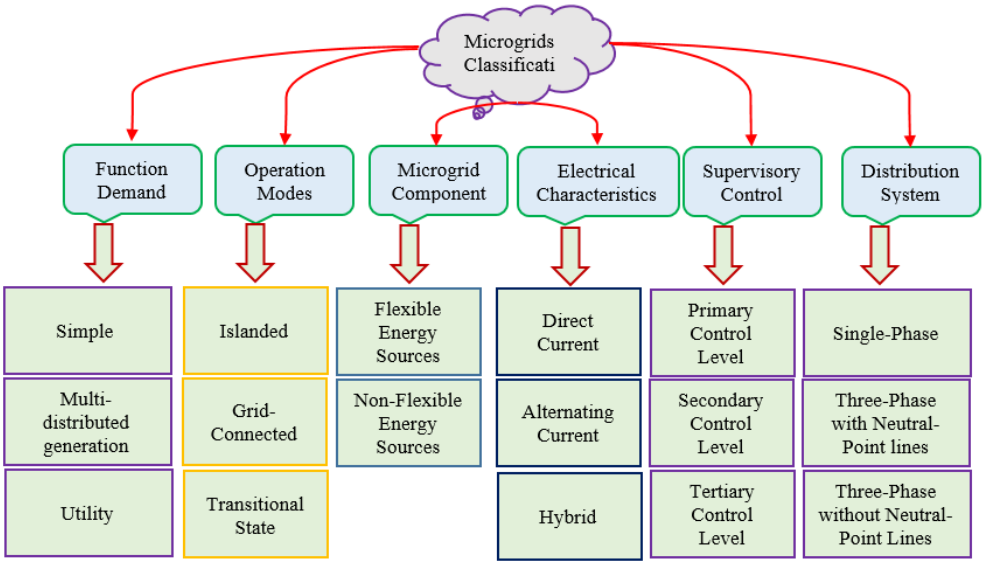
۲- طبقه‌بندی ریزشبکه‌ها

ریزشبکه‌ها مطابق شکل (۲) بر اساس معیارهای مختلف مانند نوع ولتاژ، سیستم توزیع، ساختار و حالت عملیات تقسیم‌بندی می‌شوند. منابع تولید پراکنده مانند آرایه‌های فتوولتائیک[۱۷] [۵۸]، توربین‌های بادی کوچک [۵۹]، پیل‌های سوختی[۱۸] [۶۰]، موتورهای احتراق داخلی[۱۹] [۶۱] و میکروتوربین‌ها [۶۲]، دستگاه‌های ذخیره انرژی توزیع شده مانند ذخیره‌سازی مغناطیسی ابررسانا[۲۰] [۶۳]، سیستم‌های هوای فشرده [۶۴] و باتری‌ها [۶۵] همراه با بارها تشکیل دهنده اجزای یک ریزشبکه هستند [۶۶]. ریزشبکه از منابع انرژی انعطاف‌پذیر[۲۱] مانند سیستم ذخیره‌ساز انرژی و منابع انرژی انعطاف‌ناپذیر[۲۲] مانند منابع انرژی تجدیدپذیر تشکیل شده است [۶۷]. ریزشبکه‌ها بر اساس تقاضای عملکرد به ریزشبکه‌های ساده قابل مدیریت توسط مشتریان، ریزشبکه‌های شهری قابل مدیریت توسط شرکت‌ها و ریزشبکه‌های چند منبع تولید پراکنده قابل مدیریت توسط شرکت‌ها یا مشتریان تقسیم‌بندی می‌شوند [۶۸].

ریزشبکه‌ها بر اساس مشخصات توان تزریقی به شبکه توزیع به سه گروه ریزشبکه DC، ریزشبکه AC و ریزشبکه هیبریدی طبقه‌بندی می‌شوند. هر دو شبکه AC و DC در یک سیستم ریزشبکه هیبریدی وجود دارند و برای اتصال بین آنها از یکسوکننده پل کامل سه فاز یا اینورتر منبع ولتاژ استفاده می‌شود. سیستم توزیع یک ریزشبکه AC به سه نوع تک فاز[۲۳]، سه فاز با خطوط نقطه خنثی[۲۴] و سه فاز بدون خطوط نقطه خنثی[۲۵] طبقه‌بندی می‌شوند. انتخاب بین ریزشبکه‌های جریان مستقیم و جریان متناوب به کاربرد آنها و اهداف خاص سیستم بستگی دارد [۶۹،۷۰]. ریزشبکه‌های AC برای کاربردهایی مانند کارخانه‌های صنعتی، بیمارستان‌ها و پایگاه‌های نظامی که به توان، ولتاژ و قابلیت اطمینان بالا نیاز دارند، مناسب هستند. ریزشبکه جریان متناوب سیستمی است که منابع تولید پراکنده متفاوت مانند باد، خورشید و آبی را با فرکانس متغیر و ولتاژهای مختلف از طریق مبدل‌های الکترونیک قدرت (اینورتر) به یک ماشین سنکرون متصل می‌کند و نیاز به تبدیل معکوس در شبکه‌های جریان متناوب یا جریان مستقیم را به حداقل می‌رساند [۷۱،۷۲]. از مزایای دیگر ریزشبکه‌های AC می‌توان اتصال مستقیم به برق از شبکه اصلی را نام برد [۷۳،۷۴]. در ریزشبکه AC متصل به شبکه، شرایط ولتاژ و فرکانس فیدرها مشابه با شبکه بوده به طوری که بارها، ژنراتورها و دستگاه‌های ذخیره انرژی باید مطابق با شبکه باشند. مقایسه بین ریزشبکه‌های AC و DC در جدول (۲) براساس پارامترهای مختلف به طور خلاصه آمده است [۷۵،۷۶].

۳- روش‌های کنترل ریزشبکه

برای مدیریت رفتار تولید تصادفی منابع تولید پراکنده در ریزشبکه وجود یک راهبرد کنترلی مناسب ضروری است. یک راهبرد کنترلی مناسب سیستم کنترل ریزشبکه برای موثر و کارآمد بودن باید در سطوح مختلف عملیات اعمال شود. کنترل‌کننده استفاده بهینه از منابع انرژی موجود و حداقل کردن تلفات انرژی را باید تضمین کند. بنابراین کنترل‌کننده باید در هر لحظه میزان استفاده از منابع انرژی را کنترل کند و بر اساس آنها توزیع انرژی را تنظیم نماید و باعث کاهش هزینه‌های عملیاتی شود.



شکل (۲): طبقه‌بندی ریزشبکه‌ها براساس پارامترهای مختلف

جدول (۲): مقایسه بین دو نوع ریزشبکه جریان متناوب و جریان مستقیم

ریزشبکه جریان متناوب	ریزشبکه جریان مستقیم	پارامتر
تحت تاثیر اغتشاشات خارجی	مستقل از اغتشاشات خارجی	پایداری
نیاز دارد	نیاز ندارد	سنکرونیزم
اتصال به شبکه از طریق مبدل رابط کاربری (کوپل ضعیف)	اتصال به شبکه از طریق قطع کننده (کوپل شدید)	استقلال
کاهش راندمان در اثر تلفات جریان راکتیو پیوسته	افزایش راندمان در اثر عدم وجود جریان راکتیو	راندمان انتقال
پیچیده بودن فرآیند کنترل به دلیل فرکانس	کنترل ساده	سیستم کنترل
طرح‌های حفاظتی ساده و ارزان	اجزای حفاظتی پیچیده و پرهزینه	سیستم حفاظت
سخت است به علت دور بودن مبدل‌ها از یکدیگر	آسان است به علت نزدیک بودن مبدل‌ها به یکدیگر	مدیریت ذخیره‌سازی انرژی
دارد به علت نیاز به حداقل تغییرات	ندارد به علت نیاز به تغییرات زیاد	امکان پیکربندی مجدد
نیاز به سه متغیر (ولتاژ AC ، فاز و فرکانس)	نیاز به یک متغیر (ولتاژ DC)	الگوی فلوی توان
نیاز زیاد و خیلی پیچیده	نیاز کم و ساده	رابط الکترونیکی قدرت
کم	زیاد	کیفیت انرژی

کنترل تمام اجزای سیستم ریزشبکه مانند منابع انرژی تجدیدپذیر، وسایل نقلیه الکتریکی و سیستم‌های ذخیره انرژی دارای اهمیت است. روش‌های کنترل در ریزشبکه برای بهبود پایداری و کیفیت توان به کار برده می‌شود [۷۷]. بنابراین کنترل فرکانس و ولتاژ، تعادل بین عرضه و تقاضا، ارتباط بین اجزای ریزشبکه فراهم می‌شود. به طور کلی وظایف اصلی سیستم کنترل ریزشبکه در تمام تغییرات شرایط هواشناسی و تقاضای بار عبارتند از [۷۸،۷۹]:

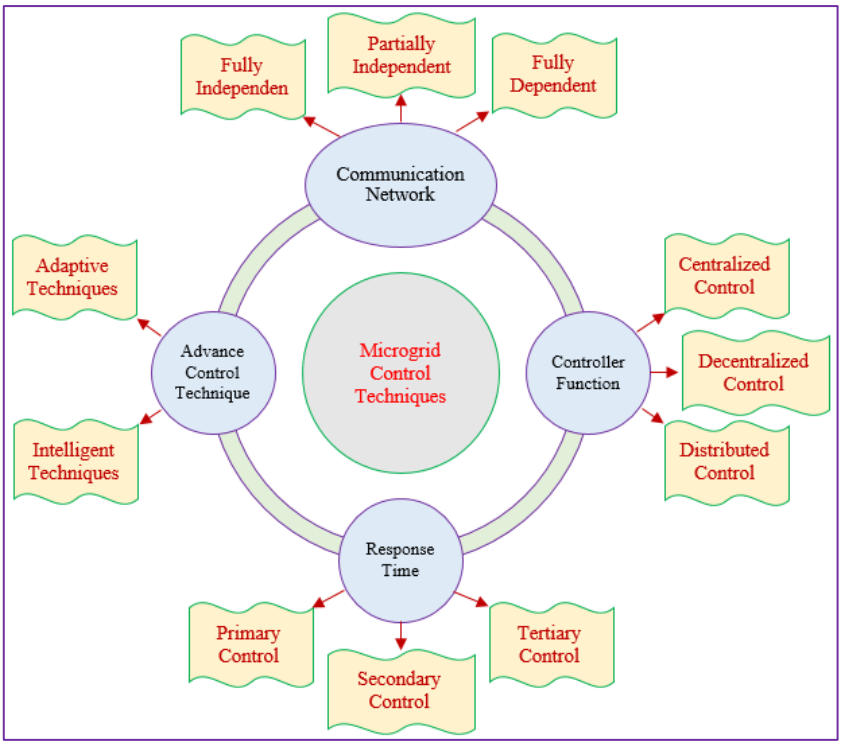
الف- بهینه‌سازی هزینه کار ریزشبکه

ج- تنظیم ولتاژ و فرکانس در هر دو حالت کاری

ه- عمل کردن مستقل ریزشبکه‌ها و داشتن تعامل با شبکه اصلی

و- اصلاح کاهش ولتاژ و عدم تعادل سیستم

بر اساس مطالعات انجام شده، طبقه‌بندی روش‌های کنترل در ریزشبکه بر اساس زمان پاسخ‌دهی، عملکرد کنترل‌کننده و پیوند ارتباطی می‌توانند مطابق شکل (۳) تقسیم‌بندی شود. در این قسمت به طور مختصر به هر روش و کاربرد آن در ریزشبکه AC اشاره می‌شود.



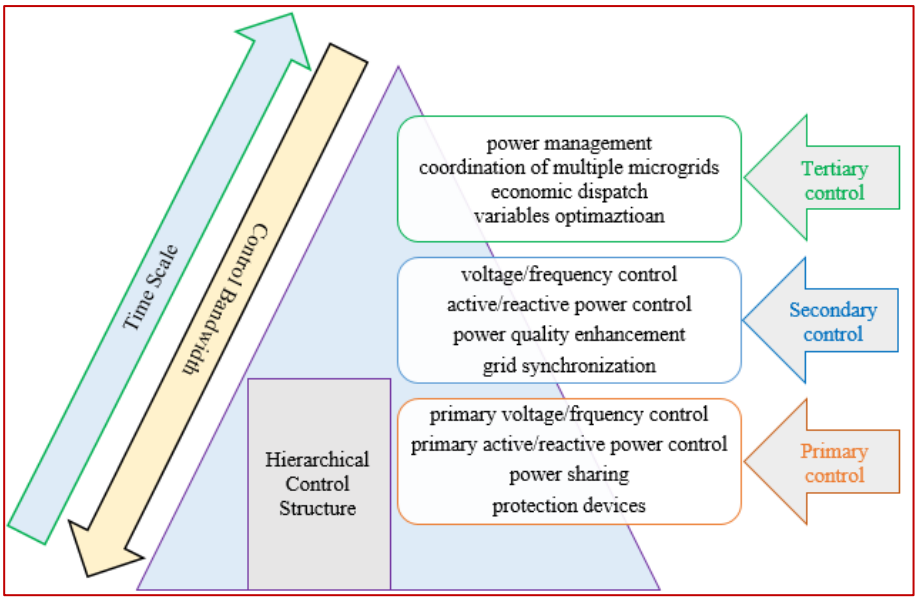
شکل (۳): طبقه‌بندی روش‌های مختلف کنترل ریزشبکه

۳-۱- تقسیم‌بندی بر اساس زمان پاسخگویی

زمانی که اتصال سیستم‌های مختلف تولید برق مبتنی بر فن‌آوری‌ها و توان‌های خروجی متفاوت تشکیل دهنده یک ریزشبکه هستند، یک ساختار کنترل سلسله مراتبی برای حداقل کردن هزینه عملیات همزمان با حداکثر کارایی، قابلیت اطمینان و کنترل‌پذیری لازم است. براساس زمان پاسخگوی[۲۶] کنترل‌کننده به سه دسته تقسیم‌بندی می‌شود. کنترل سلسله مراتبی از سطح کنترل اولیه[۲۷]، سطح کنترل ثانویه[۲۸] و سطح کنترل ثالثیه[۲۹] تشکیل شده است [۸۰،۸۱]. سرعت پاسخ و چارچوب زمانی که در آن کار می‌کنند برای سطوح کنترل متفاوت است. همچنین این سطوح در زیرساخت‌های مورد نیاز مانند الزامات ارتباطی تفاوت دارند. علاوه بر این، طرح‌های کنترلی می‌توانند به صورت متمرکز یا غیرمتمرکز ایجاد شوند [۸۲،۸۳].

سطح اول که شامل منبع محلی و کنترل‌کننده بار است که وظیفه کنترل ولتاژ باس مشترک و فرکانس را بر عهده دارد. همچنین نوسانات ولتاژ و فرکانس در ریزشبکه در کنترل سطح اول کاهش می‌یابد. روش‌های کنترل اصلی-پیرو[۳۰] (رئیس-کارگر[۳۱]) و کنترل افت از روش‌های کاربردی در کنترل سطح اول هستند. راهبرد کنترل غیرمتمرکز برای ارائه مدیریت توان می‌تواند در لایه اولیه در سیستم استفاده شود.

قرار گرفتن فرکانس و ولتاژ در مقادیر برنامه‌ریزی شده در ریزشبکه در سطح دوم کنترل تضمین می‌شود. امکان استفاده از طرح‌های کنترلی مختلف با توجه به زیرساخت‌های ارتباطی در ریزشبکه برای لایه کنترل ثانویه وجود دارد. با توجه به پیوندهای ارتباطی، این سطح کنترلی می‌تواند به یکی از سه روش کنترل متمرکز، غیرمتمرکز و توزیع شده در نظر گرفته شود [۸۴،۸۵]. در این لایه کنترل‌کننده مرکزی به پیوند ارتباطی با پهنای کم برای انتقال اطلاعات کنترلی نیاز دارد. کنترل توزیع شده برای تبادل اطلاعات بین ریزشبکه‌ها به پیوند ارتباطی با پهنای باند کم نیاز دارد و لذا جهت کاهش خطاها در سطح کنترل ثانویه استفاده می‌شود. در سطح سوم کنترل عبور توان و مدیریت توزیع بین شبکه و ریزشبکه انجام می‌شود. همچنین هماهنگی سیستم‌های ذخیره انرژی در سطح سوم کنترلی انجام می‌شود. شکل (۴) ساختار کنترل چند سطحی و وظیفه کنترل در هر سطح را برای ریزشبکه نشان می‌دهد[۸۶،۸۷].



شکل (۴): معماری کنترل سلسله مراتبی و وظایف آن در هر سطح

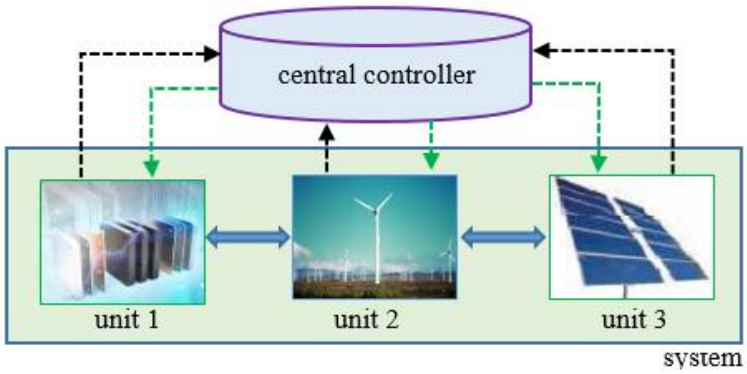
۳-۲- تقسیم‌بندی بر اساس عملکرد کنترل‌کننده

ارتباط بین سیستم‌ها عنصر اصلی کنترل است. روش‌های کنترل در ریزشبکه که با سطح ارتباط متمایز می‌شوند به سه روش کنترل متمرکز[۳۲]، کنترل غیرمتمرکز[۳۳] و کنترل توزیع شده[۳۴] تقسیم‌بندی می‌شوند [۸۸]. کنترل متمرکز و کنترل غیرمتمرکز در حالت عملکرد مستقل از شبکه می‌توان استفاده کرد.

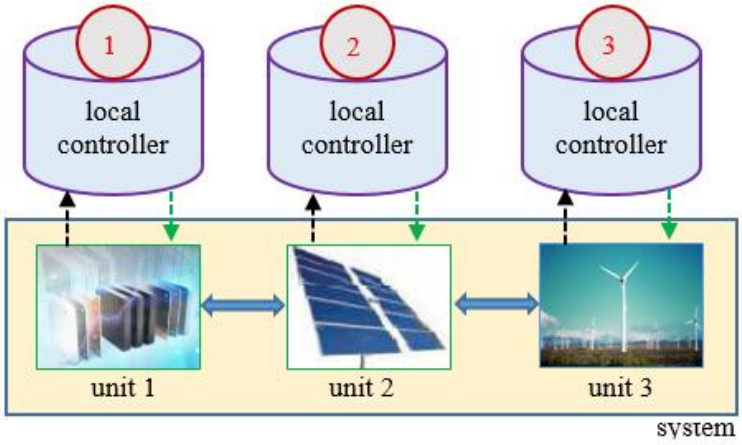
الف- کنترل غیرمتمرکز: پیکربندی پایه شماتیک روش کنترل غیرمتمرکز در شکل (۵) نشان داده شده است. در این روش نیازی به پیوند ارتباطی بین واحدهای مختلف نیست و هر واحد توزیع شده بر اساس متغیرهای محلی خود توسط کنترل‌کننده مستقل کنترل می‌شوند. به علت عدم نیاز به لینک ارتباطی بین واحدهای توزیع شده، این روش طرح کنترلی قابل اعتماد نسبت به روش‌های دیگر است. از معایب این روش می‌توان کمبود داده در مورد تولید پراکنده را بیان کرد. کنترل غیرمتمرکز زمانی که تقاضای انرژی از تولید کمتر است، به کار برده می‌شود. کنترل افت یا کنترل اصلی-پیرو یا ترکیبی از هر دو را در حالت غیرمتمرکز می‌توان پیاده‌سازی کرد [۸۹،۹۰]. با توجه به در دسترس بودن شبکه ارتباطی، کنترل غیرمتمرکز را می‌توان به سه حالت عملیاتی کاملاً وابسته، کاملاً مستقل و تا حدی مستقل طبقه‌بندی کرد. با وجود انعطاف‌پذیری برای حالت‌های عملیاتی ساختار کنترل غیرمتمرکز، این نوع کنترل‌کننده در مقایسه با کنترل متمرکز به علت زمان پاسخ کم و اطلاعات ناقص در مورد نصب ریزشبکه عملکرد پایینی را ارائه می‌دهد [۹۱،۹۲].

ب- کنترل متمرکز: شکل (۶) پیکربندی پایه شماتیک برای روش کنترل متمرکز را نشان می‌دهد. در این حالت کنترل‌کننده مرکزی همه واحدهای توزیع شده را کنترل می‌کند و ارتباطات مهم است. پیوندهای ارتباطی دارای پهنای باند بالا هستند. کنترل قوی و قابلیت مشاهده از مزایای این روش است. اشکال اصلی این طرح کنترلی قابلیت اطمینان ضعیف در اثر خرابی پیوندهای ارتباطی است. کنترل متمرکز در شبکه‌های توزیع برای مسافت کوتاه همراه با مدیریت سلسله مراتبی منابع و بارها به کار برده می‌شود [۹۳،۹۴].

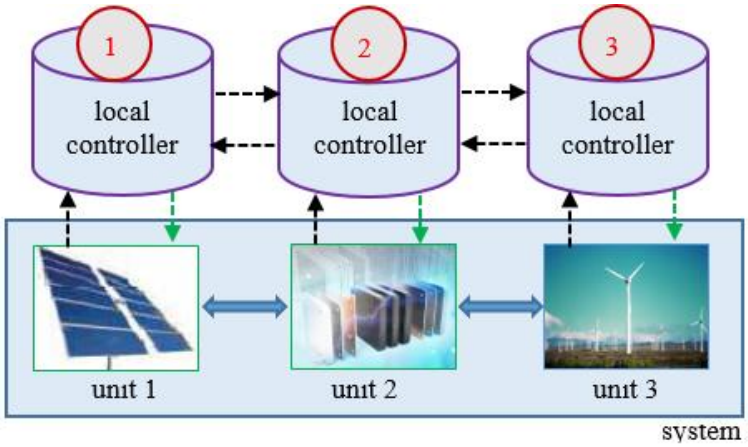
ج- کنترل توزیع شده: شکل (۷) پیکربندی پایه شماتیک برای روش کنترل توزیع شده را نشان می‌دهد. این روش کنترلی معمولاً برای مبدل‌های موازی به کار برده می‌شود. در ریزشبکه AC جزیره‌ای، واحدهای تولید پراکنده مبتنی بر اینورترهای موازی بارهای مصرفی را تامین می‌کنند [۹۵]. اشتراک گذاری متوسط جریان لحظه‌ای برای مبدل‌های موازی استفاده می‌شود که در آن مدار کنترل جداگانه در هر اینورتر استفاده می‌شود، ولی نیازی به کنترل‌کننده مرکزی نیست. از یک پیوند ارتباطی دیجیتالی در این کنترل‌کننده استفاده می‌شود [۹۶،۹۷].



شکل (۵): دیاگرام شماتیکی برای طرح کنترل غیرمتمرکز



شکل (۶): دیاگرام شماتیکی برای طرح کنترل متمرکز



شکل (۷): دیاگرام شماتیکی برای طرح کنترل توزیع شده

۳-۳- تکنیک‌های کنترل پیشرفته

بهبود عملکرد کنترل برای سیستم‌های کنترل ریزشبکه یک هدف اصلی است، بنابراین به طور معمول از تکنیک‌های کنترل پیشرفته در این سیستم‌ها استفاده می‌شود [۹۸]. از تکنیک‌های کنترل پیشرفته می‌توان به تکنیک‌های تطبیقی [۹۹،۱۰۰] و تنکیک‌های هوشمند [۱۰۱،۱۰۲] اشاره کرد. از روش‌های تطبیقی در ریزشبکه می‌توان به کنترل سطح لغزش تطبیقی [۱۰۳،۱۰۴] و کنترل‌کننده PID تطبیقی [۱۰۵] اشاره کرد و از تکنیک‌های هوشمند در ریزشبکه می‌توان کنترل فازی [۱۰۶]، شبکه عصبی [۱۰۷] و بهینه‌سازی ازدحام ذرات[۳۰] (PSO) [۱۰۸] را نام برد.

یک روش کنترل‌کننده نظارتی مبتنی بر منطق فازی در [۱۰۹] برای کنترل توان و انرژی باتری در یک ریزشبکه شامل باتری، فتوولتائیک و بار ارائه شده است. باس AC برای کاهش توان تولید شده توسط فتوولتائیک استفاده می‌شود و کنترل‌کننده منطق فازی فرکانس باس AC را تغییر می‌دهد.

پایداری فرکانس ریزشبکه با اینرسی کم در اثر نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر یک مسئله مهم است که کمبود اینرسی در ریزشبکه توسط سیستم‌های ذخیره انرژی مبتنی بر کنترل اینرسی مجازی قابل افزایش است. انتخاب مشدار ثابت اینرسی بر پایداری فرکانس ریزشبکه در سطوح مختلف نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر ثاثیر دارد. یک سیستم کنترل اینرسی مجازی خود تطبیقی در [۱۱۰] با استفاده از منطق فازی برای تضمین تثبیت فرکانس پایدار در ریزشبکه در حضور نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر پیشنهاد شده که در آن بر اساس سیگنال‌های ورودی تزریق توان واقعی منابع انرژی تجدیدپذیر و انحراف فرکانس سیستم، ثابت اینرسی مجازی به طور خودکار تنظیم می شود.

مدل‌سازی ریزشبکه جزیره‌ای AC شامل چند واحد تولید پراکنده و طراحی راهبرد کنترلی حالت لغزشی مرتبه دوم به صورت غیرمتمرکز برای کنترل ریزشبکه در [۱۱۱] بررسی شده است. در این روش تمام پارامترهای خط اتصال در نظر گرفته شده و طراحی تحت تأثیر دینامیک بار ناشناخته و عدم قطعیت‌های مدل انجام شده است. نتایج شبیه‌سازی برای یک ریزشبکه با توپولوژی حلقه‌ای و چهار منبع تولید پراکنده عملکرد الگوریتم پیشنهادی را بررسی می‌کند.

یک راهبرد کنترل حالت لغزشی ولتاژ مبتنی بر ناظر حالت توسعه یافته اصلاح شده برای ریزشبکه جزیره‌ای AC در [۱۱۲] ارائه شده که در آن عدم قطعیت‌های سیستم مانند تغییرات بار در نظر گرفته شده است که در آن هدف ردیابی سریع و دقیق ولتاژ خروجی سیستم از ولتاژ مرجع است. برای این منظور برای برآورد اغتشاشات خارجی و داخلی یک ناظر حالت توسعه یافته اصلاح شده انجام شده است. همچنین یک مدل از سیستم ریزشبکه جزیره‌ای AC در فضای حالت در نظر گرفته شده است.

ریزشبکه با طرح کنترل سلسله مراتبی بهبود یافته می‌تواند دارای عملکرد گذرا خوبی در انتقال از حالت جزیره‌ای به حالت متصل به شبکه داشته باشد. یک راهبرد کنترل عملیات چند حالته را برای ریزشبکه انعطاف‌پذیر بر اساس ساختار سلسله مراتبی سه لایه مستقل، مشارکتی و زمان‌بندی در [۱۱۳] ارائه شده است. مدیریت عبور توان بین ریزشبکه و شبکه بر عهده کنترل‌کننده زمانبندی است. وظیفه حذف انحراف‌های ولتاژ/فرکانس تولید شده و آماده‌سازی برای اتصال به شبکه بر عهده کنترل‌کننده مشارکتی است. یک حلقه ولتاژ مستقیم و یک حلقه توان کاهش یافته بهبود یافته به ترتیب برای افزایش عملکرد رد اختلال سیستم و دقت اشتراک توان استفاده شده که آنها بر اساس حالت لغزشی تطبیقی و امپدانس منفی مجازی طراحی شده‌اند.

۴- نتیجه‌گیری

ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر به شبکه توزیع در طول سالیان اخیر افزایش یافته است. چالش‌ها و فرصت‌ها با هم در فرآیند توسعه ریزشبکه مطابق مطالعات انجام شده وجود دارند. در این مقاله مروری مختصر بر روش‌های کنترل در ریزشبکه‌ها با تاکید بر ریزشبکه AC ارائه شده است. دو عامل اصلی پایداری و کنترل بر عملکرد ریزشبکه تاثیر دارد. در یک ریزشکبه کنترل فرکانس و کنترل ولتاژ از اهداف اصلی است. به علت شرایط مختلف عملکرد شبکه، مسائل دیگری مانند پایداری شبکه و اشتراک‌گذاری توان‌های اکتیو و راکتیو بررسی می‌شود. از نظر مُد عملکردی ریزشبکه به دو گروه جزیره‌ای و متصل به شبکه تقسیم‌بندی می‌شود. عملکرد جزیره‌ای که جدایی ریزشبکه از شبکه اصلی است، می‌تواند به صورت برنامه‌ریزی شده یا تصادفی باشد. ریزشبکه‌ها از نظر سیستم توزیع به سه دسته طبقه‌بندی می‌شوند. ریزشبکه‌های هیبریدی از نظر اقتصادی و کارایی دارای مزایای بیشتری نسبت به دو گروه دیگر هستند ولی عیب اصلی ریزشبکه‌های هیبریدی نیاز به راهبردهای کنترلی پیچیده‌تر در مقایسه با ریزشبکه‌های DC و AC برای مدیریت و کنترل توان است. روش سلسله مراتبی (سه سطح کنترل) و راهبردهای کنترلی مختلف (غیرمتمرکز، متمرکز، توزیع شده) برای برای دستیابی به اهداف تعیین شده کنترلی در ریزشبکه بسیار کاربرد دارد. دو رویکرد متضاد متمرکز و غیرمتمرکز برای کنترل ریزشبکه وجود دارد که ارتباط گسترده بین کنترل‌کننده مرکزی و کنترل‌کننده محلی در روش کنترل متمرکز مورد نیاز است. ولی در روش کنترل غیرمتمرکز، کنترل‌کننده محلی هر واحد مربوط به خود را کنترل می‌کند که تنها اندازه‌گیری‌های محلی دریافت می‌کند.

مراجع

[1] W. Chen, M. Alharthi, J. Zhang, I. Khan, "The need for energy efficiency and economic prosperity in a sustainable environment", *Gondwana Research*, vol. 127, pp. 22-35, March 2024, doi: 10.1016/j.g-r.2023.03.025.

[2] G. Shahgholian, "A brief review on the performance and control of direct current microgrids in power systems", *Energy Engineering and Management*, Articles in Press, 2024, doi: 10.22052/eem.2024.25-4389.1051.

[3] E. Pagard, S. Shojaeian, M.M. Rezaei, "Improving power system low-frequency oscillations damping based on multiple-model optimal control strategy using polynomial combination algorithm", *Energy Reports*, vol. 10, pp. 1228-1237, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.egyr.2023.07.060.

[4] O. Sharifiyana, M. Dehghani, G. Shahgholian, S.M.M. Mirtalaei, M. Jabbari, "Non-isolated boost converter with new active snubber structure and energy recovery capability", *Journal of Circuits, Systems and Computers*, vol. 32, no. 5, Article Number: 2350084, March 2023, doi: 10.1142/S0218-126623500846 .

[5] G. Shahgholian, A. Fathollahi, "Analyzing small-signal stability in a multi-source single-area power system with a load-frequency controller coordinated with a photovoltaic system", *AppliedMath*, vol. 4, no. 2, pp. 452-467, April 2024, doi: 10.3390/appliedmath4020024.

[6] A. Sotoudeh, M.M. Rezaei , "Robust control of isolated SCIG-based WECS feeding constant power load using adaptive backstepping and fractional order PI methods", *International Journal of Dynamics and Control*, vol. 12, no. 2, pp. 452-462, Feb. 2024, doi: 10.1007/s40435-023-01196-4.

[7] E. Hosseini, G. Shahgholian, "Different types of pitch angle control strategies used in wind turbine system applications", *Journal of Renewable Energy and Environment*, vol. 4, no. 1, pp. 20-35, Feb. 2017. doi: 10.30501/jree.2017.70103.

[8] G. Shahgholian, "Comparison and analysis of dynamic behavior of load frequency control in power system with steam, hydro and gas power plants", *Hydrogen, Fuel Cell and Energy Storage*, vol. 10, no. 4, pp. 311-325, Dec. 2023, doi: 10.22104/hfe.2024.6619.1283.

[9] G. Shahgholian, "An overview of hydroelectric power plant: Operation, modeling, and control", *Journal of Renewable Energy and Environment*, vol. 7, no. 3, pp. 14-28, July 2020, doi: 10.30501/JR-EE.2020.221567.1087.

[10] O. Bamisile, D. Cai, H. Adun, M. Taiwo, J. Li, Y.Hu, Q. Huang, "Geothermal energy prospect for decarbonization, EWF nexus and energy poverty mitigation in East Africa; the role of hydrogen production", *Energy Strategy Reviews*, vol. 49, Article Number: 101157, Sept. 2023, doi: 10.1016/j.e-sr.2023.101157.

[11] X. Wang, L. Liang, X. Zhang, H. Sun, "Distributed real-time temperature and energy control of energy efficient buildings via geothermal heat pumps", *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, vol. 9, no. 6, pp. 2289-2300, Nov. 2023, doi: 10.17775/CSEEJPES.2020.05840.

[12] M.M. Rana, M. Uddin, M.R. Sarkar, S.T. Meraj, G.M. Shafiullah, S.M. Muyeen, M.A. Islam, T. Jamal, "Applications of energy storage systems in power grids with and without renewable energy integration- A comprehensive review", *Journal of Energy Storage*, vol. 68, Article Nimber: 107811, Sept. 2023, doi: 10.1016/j.est.2023.107811.

[13] O. Sharifiyana, M. Dehghani, G. Shahgholian, S.M.M. Mirtalaee, "Presenting a new high gain boost converter with inductive coupling energy recovery snubber for renewable energy systems- simulation, design and construction", *Journal of Solar Energy Research*, vol. 8, no. 2, pp. 1417-1436, April 2023, doi: 10.22059/jser.2023.356571.1283.

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

[15] S. Teymouriyan, G. Shahgholian, B. Fani, "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, doi: 10.22052/12.3.34.

[16] G. Shahgholian, "Comparison and analysis of dynamic behavior of load frequency control in power system with steam, hydro and gas power plants", *Hydrogen, Fuel Cell and Energy Storage*, vol. 10, no. 4, pp. 311-325, Dec. 2023, doi: 10.22104/hfe.2024.6619.1283.

[17] G. Shahgholian, M. Dehghani, M.R. Yousefi, S.M.M. Mirtalaei, "Small signal stability analysis and frequency control in a single-area multi-source electrical energy system.", *Hydrogen, Fuel Cell and Energy Storage*, vol. 11, no. 2, pp. 107-116, June 2024, doi: 10.22104/hfe.2024.6799.1291.

[18] J. Yang, S, Guenter, G, Buticchi, C, Gu, Z, Zou, Z, Wang, P, Wheeler, "Identification and stabilization of constant power loads in ac microgrids", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 71, no. 2, pp. 1665-1674, Feb. 2024, doi: 10.1109/TIE.2023.3257386.

[19] H. Bisheh, B. Fani, G. Shahgholian, "A novel adaptive protection coordination scheme for radial distribution networks in the presence of distributed generation", *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 31, no. 3, Article Number: e12779, March 2021, doi: 10.1002/2050-7038.12779.

[20] B. Fani, G. Shahgholian, H.H. Alhelou, P. Siano, "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, doi: 10.1016/j.prime.2022.100068.

[21] M. García, J. Aguilar, M.D. R-Moreno, "An autonomous distributed coordination strategy for sustainable consumption in a microgrid based on a bio-inspired approach", *Energies*, vol. 17, no. 3, Article Number: 757, Feb. 2024, doi: 10.3390/en17030757.

[22] B. Keyvani, B. Fani, G. Shahgholian, "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, doi: 10.22108/ISEE.2020.122341.1358.

[23] M.Y. Yousef, M.A. Mosa, A.A. Ali, S.M.E. Masry, A.M.A. Ghany, "Frequency response enhancement of an ac micro-grid has renewable energy resources based generators using inertia controller", *Electric Power Systems Research*, vol. 196, Article Number: 107194, July 2021, doi: 10.1016/j.epsr.2021.107194.

[24] B. Keyvani-Boroujeni, G. Shahgholian, B. Fani, "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, doi: 10.1109/JESTPE.2020.2974756.

[25] S.B. Siad, A. Malkawi, G. Damm, L. Lopes, L.G. Dol, "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, doi: 10.1016/j.ijepes.2019.-03.073.

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

[27] O. Merabet, A. Kheldoun, M. Bouchahdane, A. Eltom, Ahmed Kheldoun, "An adaptive protection coordination for microgrids utilizing an improved optimization technique for user-defined DOCRs characteristics with different groups of settings considering N-1 contingency", *Expert Systems with Applications*, vol. 248, Article Number: 123449, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.eswa.2024.123449.

[28] A. Hussein Sachit, B. Fani, M. Delshad, G. Shahgholian, A. Golsorkhi Esfahani, "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, doi: 10.22059/jser.2023.357285.1291.

[29] H. Fayazi, B. Fani, M. Moazzami, G. Shahgholian, "An offline three-level protection coordination scheme for distribution systems considering transient stability of synchronous distributed generation", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 131, Article Number:107069, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.ijepes.2021.107069.

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

[31] H. Fayazi, M. Moazzami, B. Fani, G Shahgholian, "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, doi: 10.1002/2050-7038.12816.

[32] Y. Sabri, N.E. Kamoun, F. Lakrami, "A survey: Centralized, decentralized, and distributed control scheme in smart grid systems", *Proceeding of the IEEE/CMT*, pp. 1-11, Fez, Morocco, Oct. 2019, doi: 10.1109/CMT.2019.8931370.

[33] R.M. Seresht, M. Miri, M. Zand, M.A. Nasab, P. Sanjeevikumar, B. Khan, "Frequency control scheme of an ac islanded microgrid based on modified new self-organizing hierarchical PSO with jumping time-varying acceleration coefficients", *Cogent Engineering*, vol. 10, no. 1, 2023, doi: 10.1080/23311916.2022.2157982.

[34] S. Ahmadi, I. Sadeghkhani, G. Shahgholian, B. Fani, J. M. Guerrero, "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, doi: 10.1109/JESTPE.2019.29-61903.

[35] B. Sahoo, S.K. Routray, P.K. Rout, "Ac, dc, and hybrid control strategies for smart microgrid application: A review", *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 31, no. 1, Article Number: e12683, Jan, 2021, doi: 10.1002/2050-7038.12683.

[36] R. Ghobadi, G Shahgholian, "Providing improved structure and adaptive control strategy for solar system with the ability to improve power quality in islanded microgrid", *Technovations of Electrical Engineering in Green Energy System*, vol. 2, no. 4, pp. 19-37, March 2024, doi: 10.30486/teeges.2023.1986388.1073.

[37] M. Ahmed, L. Meegahapola, A. Vahidnia, M. Datta, "Stability and control aspects of microgrid architectures- A comprehensive review", *IEEE Access*, vol. 8, pp. 144730-144766, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3014977.

[38] A. Rashwan, A. Mikhaylov, T. Senjyu, M. Eslami, A.M. Hemeida, D.S.M. Osheba, "Modified droop control for microgrid power-sharing stability improvement", *Sustainability*, vol. 15, Article Number: 11220, July 2023, doi: 10.3390/su151411220.

[39] L. Meng, C. Su, J. Wu, T. Ren, Z. Wang, H. Yi, "Design and parameter analysis of an improved pre-synchronization method for multiple inverters based on virtual synchronization generator control in microgrid", *Energy Reports*, vol. 8, pp. 928-937, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.egyr.2022.02.111.

[40] J. Lu, X. Liu, M. Savaghebi, X. Hou, P. Wang, "Distributed event-triggered control for harmonic voltage compensation in islanded ac microgrids", *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 13, no. 6, pp. 4190-4201, Nov. 2022, doi: 10.1109/TSG.2022.3186284.

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

[42] M.F. Roslan, M.A. Hannan, P.J. Ker, M. Mannan, K.M. Muttaqi, T.M.I. Mahlia, "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, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.131340.

[43] S. Farhang, G. Shahgholian, B. Fani, "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, dor: 20.1001.1.22519246.2022.11.1.4.0.

[44] S.M. Dawoud, X. Lin, M.I. Okba, "Hybrid renewable microgrid optimization techniques: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 2039-2052, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.08.007.

[45] S. Mansour, M.I. Marei, A.A. Sattar, "Droop based control strategy for a microgrid", *Global Journal of Research in Engineering*, vol. 16, no. 7, 2016.

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

[47] A.A. Khan, M. Naeem, M. Iqbal, S. Qaisar, A. Anpalagan, "A compendium of optimization objectives, constraints, tools and algorithms for energy management in microgrids", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 58, pp. 1664-1683, May 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.12.259.

[48] D.Y. Yamashita, I. Vechiu, J.P. Gaubert, "A review of hierarchical control for building microgrids", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 118, Article Number: 109523, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.rser.2019.109523.

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

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

[51] A. Radwan, Y. Mohamed, "Modeling, analysis, and stabilization of converter-fed ac microgrids with high penetration of converter-interfaced loads", *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 3, no. 3, pp. 1213–1225, Sept. 2012, doi: 10.1109/TSG.2012.2183683.

[52] M.Q. Taha, S. Kurnaz, "Droop control optimization for improved power sharing in ac islanded microgrids based on centripetal force gravity search algorithm", *Energies*, vol. 16, no. 24, Article Number: 7953, Dec. 2023, doi: 10.3390/en16247953.

[53] S. Patel, S. Chakraborty, B. Lundstrom, S.M. Salapaka, M.V. Salapaka, "Isochronous architecture-based voltage-active power droop for multi-inverter systems", *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 12, no. 2, pp. 1088-1103, March 2021, doi: 10.1109/TSG.2020.3037159.

[54] M. Juneja, S.K. Nagar, S.R. Mohanty, "PSO based reduced order modelling of autonomous ac microgrid considering state perturbation", *Automatika*, vol. 61, no. 1, pp. 66-78, Jan. 2020, doi: 10.1080/00051144.2019.1682867.

[55] G.P. Santos, A. Tsutsumi, J.C.M. Vieira, "Enhanced voltage relay for ac microgrid protection", *Electric Power Systems Research*, vol. 220, Article Number: 109310, July 2023, doi: 10.1016/j.epsr.2023.109310.

[56] M. Shi, X. Chen, J. Zhou, Y. Chen, J. Wen, H. He, "PI-consensus based distributed control of ac microgrids", *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 35, no. 3, pp. 2268-2278, May 2020, doi: 10.1109/TPWRS.2019.2950629.

[57] G. Raman, K. Liao, J.C.H. Peng, "Improving ac microgrid stability under cyberattacks through timescale separation", *IEEE Trans. on Circuits and Systems*, vol. 70, no. 6, pp. 2191-2195, June 2023, doi: 10.1109/TCSII.2023.3234073.

[58] R. Zhang, B. Hredzak, "Nonlinear sliding mode and distributed control of battery energy storage and photovoltaic systems in ac microgrids with communication delays", *IEEE Trans. on Industrial Informatics*, vol. 15, no. 9, pp. 5149-5160, Sept. 2019, doi: 10.1109/TII.2019.2896032.

[59] E. Hosseini, G. Shahgholian, "Partial- or full-power production in WECS: A survey of control and structural strategies", *European Power Electronics and Drives*, vol. 27, no. 3, pp. 125-142, Dec. 2017, doi: 10.1080/09398368.2017.1413161.

[60] A.H. Tariq, S.A.A. Kazmi, M. Hassan, S.A.M. Ali, M. Anwar, "Analysis of fuel cell integration with hybrid microgrid systems for clean energy: A comparative review", *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 52, pp. 1005-1034, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.07.238.

[61] A. Baccioli, A. Liponi, J. Milewski, A. Szczęśniak, U. Desideri, "Hybridization of an internal combustion engine with a molten carbonate fuel cell for marine applications", *Applied Energy*, vol. 298, Article Number: 117192, Sept. 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.117192.

[62] J.G. Matos, F.S.F. Silva, L.A.S. Ribeiro, "Power control in ac isolated microgrids with renewable energy sources and energy storage systems", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 6, pp. 3490-3498, June 2015, doi: 10.1109/TIE.2014.2367463.

[63] A. Singh, S. Suhag, "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, doi: 10.1080/14786451.2019.1684286.

[64] H. Ibrahim, K. Belmokhtar, M. Ghandour, "Investigation of usage of compressed air energy storage for power generation system improving - application in a microgrid integrating wind energy", *Energy Procedia*, vol. 73, pp. 305-316, June 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.07.694.

[65] Palizban, K. Kauhaniemi, "Distributed cooperative control of battery energy storage system in ac microgrid applications", *Journal of* Energy Storage, vol. 3, pp. 43-51, Oct. 2015, doi: 10.101-6/j.est.2015.08.005.

[66] M.B. Delghavi, S. Shoja-Majidabad, A. Yazdani, "Fractional-order sliding-mode control of islanded distributed energy resource systems", *IEEE Trans. on Sustainable Energy*, vol. 7, no. 4, pp. 1482-1491, Oct. 2016, doi: 10.1109/TSTE.2016.2564105.

[67] D. Voumick, P. Deb, M. Khan, "Operation and control of microgrids using IoT (Internet of things)", *Journal of Software Engineering and Applications*, vol. 14, pp. 418-441, Aug. 2021, doi: 10.4236/jsea.2021.148025.

[68] M. Islam, F. Yang, M. Amin, "Control and optimisation of networked microgrids: A review", *IET Renewable Power Generation*, vol. 15, no. 6, pp. 1133-1148, April 2021, doi: 10.1049/rpg2.12111.

[69] U. Sur, A. Biswas, J. N. Bera, G. Sarkar, "A modified holomorphic embedding method based hybrid ac-dc microgrid load flow", *Electric Power Systems Research*, vol. 182, Article 106267, May 2020, doi: 10.1016/j.epsr.2020.106267.

[70] S. Mirsaeidi, X. Dong, S. Shi, B. Wang, "Ac and dc microgrids: A review on protection isseues and approaches", *Journal of Electrical Engineering and Technology*, vol. 12, no. 6, pp. 2089-2098, 2017, doi: 10.5370/JEET.2017.12.6.2089.

[71] S.M. Behinnezhad, G. Shahgholian, B. Fani, "Simulation of a PV connected to an electrical energy distribution network with internal current loop control and voltage regulator", *International Journal of Smart Electrical Engineering*, vol. 12, no. 1, pp. 23-30, Feb. 0223, doi: 10.30495/ijsee.2021.6-85745.

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

[73] G. Shahgholian, "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 (doi: 10.1002/2050-7038.12885).

[74] F. Gao, R. Kang, J. Cao, T. Yang, "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, doi: 10.1007/s40565-018-0466-5.

[75] M. A. Hossain, H. R. Pota, M.J. Hossain, F. Blaabjerg, "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. doi: 10.1016/j.ijepes.2019.01.038.

[76] F. Katiraei, R. Iravani, N. Hatziargyriou, A. Dimeas, "Microgrids management", *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 6, no. 3, pp. 54-65, May/June 2008, doi: 10.1109/MPE.2008.918702.

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

[78] H. Karmi, B. Fani, G. Shahgholian, "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, dor: 20.1001.1.23223871.1400.12.2.2.0.

[79] A.D. Bintoudi, L. Zyglakis, A.C. Tsolakis, D. Ioannidis, L. Hadjidemetriou, L. Zacharia, N. Al-Mutlaq, M. Al-Hashem, S. Al-Agtash, E. Kyriakides, C. Demoulias, D. Tzovaras, "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, doi: 10.1049/iet-rpg.2019.0468.

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

[81] X. Feng, A. Shekhar, F. Yang, R.E. Hebner, P. Bauer, "Comparison of hierarchical control and distributed control for microgrid", *Electric Power Components and Systems*, vol. 45, no. 10, pp. 1043-1056, 2017, doi: 10.1080/15325008.2017.1318982.

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

[83] A. Villalón, M. Rivera, Y. Salgueiro, J. Muñoz, T. Dragičević, F. Blaabjerg, "Predictive control for microgrid applications: A review study", *Energies*, vol. 13, no. 10, Article Number: 2454, May 2020, doi: 10.3390/en13102454.

[84] N. Sheykhi, A. Salami, J.M. Guerrero, G.D. Agundis-Tinajero, T. Faghihi, "A comprehensive review on telecommunication challenges of microgrids secondary control", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 140, Article Number: 108081, Sept. 2022, doi: 10.1016/j.ijepes.2022.108081.

[85] A.A. Memon, K. Kauhaniemi, "A critical review of ac microgrid protection issues and available solutions", *Electric Power Systems Research*, vol. 129, pp. 23-31, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.epsr.2015.07.006.

[86] Z. Yang , L. Huang, Z. Yi, Y. Hu, "A review on hierarchical control strategy in microgrid", *Proceeding of the ICITEE*, pp. 1-6, Dec. 2019, doi: 10.1145/3386415.3387038.

[87] B. Keyvani, B. Fani, H. Karimi, M. Moazzami, G. Shahgholian, "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, doi: 10.30501/jree.2021.298138.1235.

[88] R. Dadi, K. Meenakshy, S. Damodaran, "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, doi: 10.22098/joape.2022.9157.1636.

[89] S.K. Sahoo, A.K. Sinha, N.K. Kishore, "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, doi: 10.1109/JESTPE.2017.2786588.

[90] P. Borazjani, N.I.A. Wahab, H.B. Hizam, A.B.C. Soh, "A review on microgrid control techniques", *Proceeding of the IEEE/ISGT*, pp. 749-753, Kuala Lumpur, Malaysia, May 2014, doi: 10.1109/ISGT-Asia.2014.6873886.

[91] A.L. Dimeas, N.D. Hatziargyriou, "Operation of a multiagent system for microgrid control", *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 20, no. 3, pp. 1447-1455, Aug. 2005, doi: 10.1109/TPWRS.20-05.852060.

[92] T. Logenthiran, R.T. Naayagi, W.L. Woo, V.T. Phan, K. Abidi, "Intelligent control system for microgrids using multiagent system", *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 3, no. 4, pp. 1036-1045, Dec. 2015, doi: 10.1109/JESTPE.2015.2443187.

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

[94] S.K. Mazumder, M. Tahir, K. Acharya, "Master–slave current-sharing control of a parallel dc–dc converter system over an RF communication interface", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 1, pp. 59-66, Jan. 2008, doi: 10.1109/TIE.2007.896138.

[95] F. Deng, W. Yao, X. Zhang, Y. Tang, P. Mattavelli, "Review of impedance-reshaping-based power sharing strategies in islanded ac microgrids", *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 14, no. 3, pp. 1692-1707, May 2023, doi: 10.1109/TSG.2022.3208752.

[96] O. Sharifiyana, M. Dehghani, G. Shahgholian, S. Mirtalaee, M. Jabbari, "An overview of the structure and improvement of the main parameters of non-isolated dc/dc boost converters", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 12, no. 47, pp. 1-29, Dec. 2021, dor: 20.1001.1.23223871.1400.12.48.6.6.

[97] A. Elmouatamid, R. Ouladsine, M. Bakhouya, N.E. Kamoun, M. Khaidar, K. Zine-Dine, "Review of control and energy management approaches in micro-grid systems", *Energies*, vol. 14, no. 1, Article Number: 168, Dec. 2021, doi: 10.3390/en14010168.

[98] F. Mohammadzamani, M. Hashemi, G. Shahgholian, "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, doi: 10.1080/00207179.2021.2005257.

[99] F. Mohammadzamani, M. Hashemi, G. Shahgholian, "Adaptive neural control of non-linear fractional order multi-agent systems in the presence of error constraints and input saturation", *IET Control Theory and Applications*, vol. 16, no. 13, pp. 1283-1298, Sept. 2022, doi: 10.1049/cth2.12291.

[100] Y. Liu, Q. Zhang, C. Wang, N. Wang, "A control strategy for microgrid inverters based on adaptive three-order sliding mode and optimized droop controls", *Electric Power Systems Research*, vol. 117, pp. 192–201, Dec. 2014, doi: 10.1016/j.epsr.2014.08.021.

[101] M. Yousif, Q. Ai, Y. Gao, W.A. Wattoo, Z. Jiang, R. Hao, "An optimal dispatch strategy for distributed microgrids using PSO", *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, vol. 6, no. 3, pp. 724-734, Sept. 2020, doi: 10.17775/CSEEJPES.2018.01070.

[102] M. Dashtdar, A. Flah, S.M.S. Hosseinimoghadam, C.R. Reddy, H. Kotb, K.M. AboRas, E.C. Bortoni, "Improving the power quality of island microgrid with voltage and frequency control based on a hybrid genetic algorithm and PSO", *IEEE Access*, vol. 10, pp. 105352-105365, 2022, doi: 10.1109/ACCES-S.2022.3201819.

[103] S. Chaturvedi, D. Fulwani, J. M. Guerrero, "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, doi: 10.1109/TSTE.2020.2982414.

[104] Z. Chen, A. Luo, H. Wang, Y. Chen, M. Li, Y. Huang, "Adaptive sliding-mode voltage control for inverter operating in islanded mode in microgrid", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 66, pp. 133–143, March 2015.

[105] A.M. Hussien, J. Kim, A. Alkuhayli, M. Alharbi, H.M. Hasanien, M. Tostado-Véliz, R.A. Turky, F. Jurado, "Adaptive PI control strategy for optimal microgrid autonomous operation", *Sustainability*, vol. 14, no. 22, Article Number: 14928, Nov. 2022, doi: 10.3390/su142214928.

[106] J. Kaushal, P. Basak, "A decision making methodology to assess power quality monitoring index of an ac microgrid using fuzzy inference systems", *Electric Power Components and Systems*, vol. 47, no. 14-15, pp. 1349-1361, 2019, doi: 10.1080/15325008.2019.1689448.

[107] X. Shen, H. Wang, J. Li, Q. Su, L. Gao, "Distributed secondary voltage control of islanded microgrids based on RBF-neural-network sliding-mode technique", *IEEE Access*, vol. 7, pp. 65616-65623, May 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2915509.

[108] M.A. Hossain, H.R. Pota, S. Squartini, A.F. Abdou, "Modified PSO algorithm for real-time energy management in grid-connected microgrids", *Renewable Energy*, vol. 136, pp. 746-757, June 2019, doi: 10.1016/j.renene.2019.01.005.

[109] R.A. Badwawi, W.R. Issa, T.K. Mallick, M. Abusara, "Supervisory control for power management of an islanded ac microgrid using a frequency signalling-based fuzzy logic controller", *IEEE Trans. on Sustainable Energy*, vol. 10, no. 1, pp. 94-104, Jan. 2019, doi: 10.1109/TSTE.2018.2825655.

[110] T. Kerdphol, M. Watanabe, K. Hongesombut, Y. Mitani, "Self-adaptive virtual inertia control-based fuzzy logic to improve frequency stability of microgrid with high renewable penetration", *IEEE Access*, vol. 7, pp. 76071-76083, June 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2920886.

[111] M. Cucuzzella, G.P. Incremona, A. Ferrara, "Decentralized sliding mode control of islanded ac microgrids with arbitrary topology", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 8, pp. 6706-6713, Aug. 2017, doi: 10.1109/TIE.2017.2694346.

[112] H. Pan, Q. Teng, D. Wu, "MESO-based robustness voltage sliding mode control for ac islanded microgrid", *Chinese Journal of Electrical Engineering*, vol. 6, no. 2, pp. 83-93, June 2020, doi: 10.23919/CJEE.2020.000013.

[113] Q. Zhang, Y.Liu, Y. Zhao, N.Wang, "A multi-mode operation control strategy for flexible microgrid based on sliding-mode direct voltage and hierarchical controls", *ISA Transactions*, Vol. 61, pp. 188-198, March 2016, doi: 10.1016/j.isatra.2015.11.027.

زیرنویس‌ها

[1] Non-renewable energy sources
[2] Wind
[3] Geothermal
[4] Distributed generation
[5] Microgrids
[6] Power management
[7] Energy storage systems
[8] Photovoltaic
[9] Wind turbine
[10] Bidirectional main converter
[11] Speed cut
[12] Alternating current microgrids
[13] Direct current microgrids
[14] Hybrid microgrids
[15] Islanded
[16] Grid-connected
[17] Photovoltaic arrays
[18] Fuel cells
[19] Internal combustion engines

[20] Superconducting magnetic storage
[21] Flexible energy sources
[22] Non-flexible energy sources
[23] Single phase
[24] Three-phase with neutral-point lines
[25] Three-phase without neutral-point lines
[26] Response time
[27] Primary control level
[28] Secondary control level
[29] Tertiary control level
[30] Master–slave
[31] Boss-worker
[32] Centralized control
[33] Decentralized control
[34] Distributed control
[35] Particle swarm optimization