DOR: 20.1001.1.24234931.1401.9.1.1.2

سال نهم، شماره اول، بهار و تابستان ۱۴۰۱، ص ص ۸-۲۰

فصل‌نامه علمی انرژی‌های تجدیدپذیر و نو

jrenew.ir

مقاله ترویجی

تاریخ دریافت: ۹۹/۰۶/۰۳

تاریخ پذیرش: ۰۰/۰۲/۱۷

ریزشبکه، بهترین بستر برای بهره‌وری اقتصادی و زیست‌محیطی از تولیدات تجدیدپذیر: اجزا، مفاهیم، چالش‌ها و فرصت‌ها

جواد معینی هادی‌زاده[1*]

۱-کارشناس ارشد مهندسی برق-قدرت، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

* کاشمر، ۹۶۷۱۹-۹۶۹۴۹، sjmoini1367@yahoo.com

چکیده

در سال‌های اخیر به دلایلی از قبیل پایان‌پذیری و آلایندگی سوخت‌های فسیلی و همچنین نیاز بیشتر به مصرف برق، توجه جامعه‌ی جهانی به استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر بیشتر شده‌است. از طرفی، به‌خدمت‌گرفتن انرژی‌های تجدیدپذیر در تولید انرژی الکتریکی مستلزم فراهم‌آوردن زیرساخت و بستر مناسب در سیستم قدرت است. این مسأله منجر به ظهور مفهومی به نام ریزشبکه شده است. ریزشبکه یک گروه محلّی از منابع و بارهای الکتریک ی است که به طور معمول به صورت متصل‌شده و همزمان با شبکه برق متمرکز سنّتی عمل می‌کند و می‌تواند منابع تولید پراکنده به خصوص منابع انرژی تجدیدپذیر را به طور مؤثری با هم ادغام کند. با توجه به تفاوت‌های ساختاری بین ریزشبکه و سیستم‌های قدرت سنّتی، چالش‌های متعدّدی پیش روی ریزشبکه‌ها قرار دارد. در این مقاله به بررسی مفهوم ریزشبکه، تجهیزات مورد استفاده، چالش‌های پیش رو و خلاءهای پژوهشی پرداخته‌شده‌است. مرور پژوهش‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که ریزشبکه‌ها در صورت رفع موانع فنی و حل چالش‌های پیش رو می‌توانند به عنوان بستری مناسب برای بهره‌برداری حداکثری از منابع انرژی تجدیدپذیر تلقی شوند و این انتظار می‌رود که سیستم‌های قدرت در آینده از این نوع باشند.

کلیدواژگان: منابع تجدیدپذیر، ریزشبکه، انرژی‌های نو، اینترنت انرژی

Microgrids, the best platform for economic and environmental productivity of renewable resources: An introduction to its concept, components, challenges, and opportunities

Javad Moeini Hadizadeh[1*]

1- Master of Electrical Power Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

* P.O.B. 9671996949 Kashmar, Iran, sjmoini1367@yahoo.com

Received: 24 August 2020 Accepted: 7 May 2021

Abstract

In recent years, for reasons such as the limitation and pollution of fossil fuels, as well as the growing electricity demand, the international community has paid more attention to the use of renewable energy. On the other hand, the use of renewable energy in the electricity generation requires the provision of appropriate infrastructure and platform in power system. This has led to the emergence of a concept called microgrids. A microgrid is a local group of electrical resources and loads normally operating in conjunction with a traditional integrated power grid and can effectively integrate distributed generations, especially renewable energy resources. Due to the structural differences between microgrids and traditional power systems, microgrids face several challenges. This paper presents the concept of microgrids, equipment used, challenges and research gaps. The research shows that, by removing the technical barriers and addressing the challenges ahead, microgrids can be considered as a suitable platform for maximum utilization of renewable energy resources. It is expected that power systems in the future will be of microgrid type.

Keywords: Renewable resources, Microgrid, New energy, Internet of energy

مالکیت معنوی این مقاله تحت گواهی بین المللی تخصیص ۴ کریتیو کامنز محفوظ است

۱- مقدمه

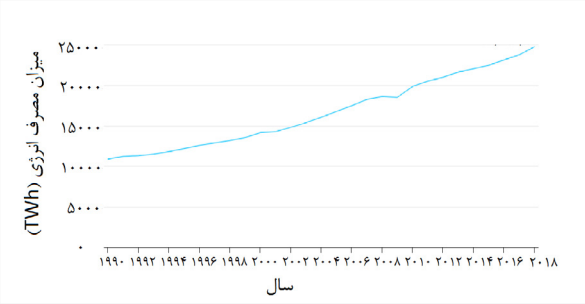
ریزشبکه یک گروه محلّی از منابع و بارهای الکتریکی است که به طور معمول به صورت متصل‌شده و همزمان با سیستم قدرت سنّتی عمل می‌کند؛ اما در حالت جزیره‌ای نیز می‌تواند به صورت جداگانه و خودگردان و با اعمال شرایط فیزیکی و اقتصادی مختلف بهره‌برداری شود [۱،۲]. به‌این ترتیب، یک ریزشبکه می‌تواند به طور مؤثری تولیدات پراکنده[1] مختلف (DG)، به خصوص منابع انرژی تجدیدپذیر[2] (RES) را با هم ادغام کند. به عنوان تعریفی دیگر می‌توان گفت: همین که نفوذ تولیدات پراکنده در شبکه توزیع زیاد شود یک ریزشبکه را خواهیم داشت [۳]. در واقع ریزشبکه، یک شبکه ولتاژ پایین و مقیاس کوچک متشکل از DGها، ذخیره‌سازها و بارهای قابل‌کنترل است [۳،۴]. با تعاریف بیان‌شده، دو مشخصه‌ی اصلی اعم از توزیع‌شدگی و هماهنگی بین تجهیزات و کمیت‌ها را برای ریزشبکه می‌توان قائل شد [۵]. شکل ۱ نمای ظاهری یک ریزشبکه را نشان می‌دهد.

شکل ۱ نمای ظاهری یک ریزشبکه

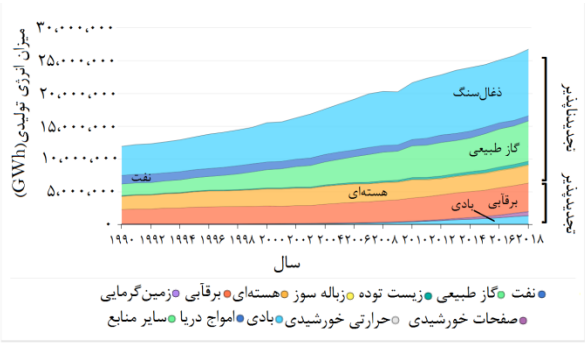
در سال‌های اخیر، افزایش نیاز جامعه جهانی به الکتریسیته، تغییر در شرایط اقلیمی جهان و مشکلات استفاده از سوخت‌های فسیلی از قبیل مسائل زیست‌محیطی و بهره‌وری ضعیف، تقاضا را برای انرژی‌های تجدیدپذیر افزایش داده است [۶-۸]. شکل ۲ افزایش تقاضای جهانی انرژی الکتریکی را در سالهای منتهی به ۲۰۱۸ میلادی نشان می‌دهد. در شکل ۳ میزان تولید انرژی الکتریکی به تفکیک منابع انرژی ملاحظه می‌شود. همان گونه که مشاهده می‌شود، استفاده از منابع تجدیدپذیر در تولید برق علی‌الخصوص در دهه اخیر افزایش زیادی داشته‌است. با این وجود، هنوز هم نیاز به تغییر منابع انرژی الکتریکی از سوخت‌های فسیلی و هسته‌ای به انرژی‌های تجدیدپذیر در ایران و جهان به شدت احساس می‌شود [۹]. یکی از موانع مهم پیش روی این مسیر که در این مقاله به آن پرداخته‌شده‌است، نبود زیرساخت و بستر مناسب برای استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر است.

مسأله‌ی فوق انگیزه‌ی اصلی برای معرفی ریزشبکه‌ها بوده است [۶]. از این دیدگاه می‌توان گفت ریزشبکه آمده است تا در عین حصول قابلیّت اطمینان بالاتر و با نیاز به الگوریتم های پیچیده کمتر، نفوذ انرژی‌های تجدیدپذیر به سیستم توزیع انرژی الکتریکی را بیشتر، ساده‌تر و امکان‌پذیرتر نماید [۱۱]. ریزشبکه، درصورت استفاده از استراتژی‌های بهره‌برداری مناسب، می‌تواند منافع فنّی، محیطی، اجتماعی و اقتصادی را نیز برای ذینفعان به ارمغان داشته‌باشد و رهیافت مناسبی برای تأمین تقاضای انرژی الکتریکی ارائه‌دهد [۶،۱۲،۱۱]. این منافع با شبیه‌سازی‌های انجام‌شده روی

1. Distributed Generation
2. Renewable Energy Resourse



شکل ۲ افزایش تقاضای جهانی انرژی الکتریکی در سالهای منتهی به ۲۰۱۸ [۱۰]



شکل ۳ افزایش میزان تولید انرژی الکتریکی در سطح جهان به تفکیک منابع تولید [۱۰]

سیستم‌های عملی اثبات شده‌است. نتایج نشان می‌دهد که در حضور تولیدات پراکنده‌ی تجدیدپذیر، ریزشبکه می‌تواند هزینه‌ی خالص فعلی[3] و هزینه‌ی انرژی را تا حدود ۴۴٪ و تولید گاز کربن‌دی‌اکسید را تا ۸۳٪ نسبت به سیستم‌های سنّتی با نیروگاه‌های سوخت فسیلی کاهش دهد [۱۳]. بدین ترتیب ریزشبکه‌ها در حال حاضر، بهترین بستر برای بهره‌وری اقتصادی و زیست محیطی از تولیدات تجدیدپذیر محسوب می گردند. در صورت استفاده از تجهیزات و برنامه‌ریزی‌های هوشمند مانند پاسخ‌گویی بار، خودروهای الکتریکی قابل‌کنترل و اتوماسیون سیستم توزیع و غلبه بر چالش‌های پیش رو، می‌توان بسیاری از ریزشبکه‌ها را به شبکه‌های هوشمند[4] تبدیل کرد که به آنها اینترنت انرژی[5] گفته می‌شود و سیستم‌های قدرت آینده را تشکیل خواهنددادد [۲،۵،۱۴].

در ادامه‌ی این مقاله، اجزا، مفاهیم، کاربری‌ها، چالش‌ها و فرصت‌های ریزشبکه مورد بحث و بررسی قرار خواهدگرفت. در بخش ۲ انواع ریزشبکه‌ها و روش‌های مختلف تقسیم‌بندی آن‌ها معرفی شده و در مورد ساختار هرکدام و مسائل مرتبط با آن‌ها بحث خواهدشد. در بخش۳ چالش‌ها و فرصت‌های مرتبط با اجزای ریزشبکه مرور می‌شود. در بخش ۴ به بررسی سایر چالش‌ها و فرصت‌های ریزشبکه از جمله مسائل مرتبط با بازار برق، پخش بار، سیستم مدیریت انرژی، برنامه‌های پاسخ‌گویی بار، طراحی ریزشبکه و اتصال ریزشبکه‌ها به یکدیگر پرداخته می‌شود. در بخش ۵ چالش‌های بیان‌شده دسته‌بندی گردیده و در مورد آنها بحث خواهدشد. نهایتاً در بخش ۶ مقاله جمع‌بندی و نتیجه‌گیری می‌گردد.

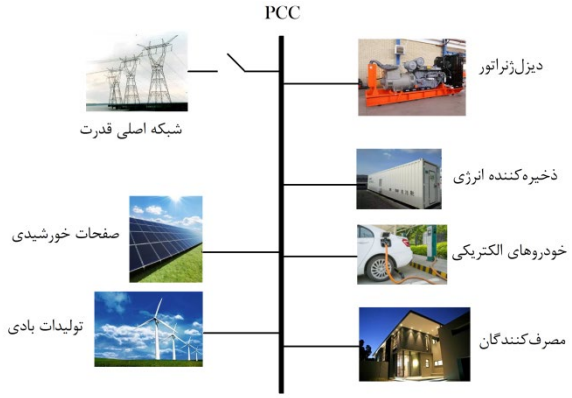
۲- مروری بر ساختارِ انواعِ ریزشبکه‌ها

3. Net present cost
4. Smart Grid
5. Internet of Energy

۲-۱- ریزشبکه‌های جزیره‌ای و متصل به شبکه

همان گونه که بیان شد ریزشبکه‌ها در دو حالت متصل به شبکه و جزیره‌ای مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. ریزشبکه‌ها در حالت متصل به شبکه می‌توانند به عنوان پشتیبانی شبکه در متعادل سازی عرضه و تقاضای شبکه اصلی [۷]، کاهش پیک [۱۷]،کنترل فرکانس و ولتاژ و افزایش قابلیّت انعطاف و قابلیّت اطمینان نقش ایفا کنند [۷]. در مقابل، هزینه‌های سرسام آور احداث و بهره‌برداری از خطوط انتقال فرصت مناسبی را برای احداث ریزشبکه‌ها در مناطق روستایی و دور از شبکه فراهم آورده است [۷،۱۸]. در این شرایط نصب ریزشبکه جزیره‌ای حداقل هزینه، انرژی و تلفات و همچنین فقدان هزینه‌های قابل توجه انتقال را به همراه دارد [۳،۷]. ریزشبکه‌های جزیره‌ای همچنین در سفینه‌های فضایی و عرشه کشتی‌ها و ... کاربرد دارند [۱۹].

در حالت اتصال به شبکه، بارها و تولیدات و همچنین شبکه بالادست از طریق نقطه اتصال مشترک[1] (PCC) یا نقطه اتصال داخلی[2] (POI) به یکدیگر متصل می‌شوند (شکل ۴). در حالی که در ریزشبکه‌های جزیره‌ای چنین نقطه اتصالی تعریف نمی‌شود [۳،۴،۱۱]. در حالت جدا از شبکه با داشتن



شکل ۴ نقش PCC در یک ریزشبکه

قابلیّت بلک‌استارت[3]، برای سیستم توزیع در شرایط اضطراری و یا وقوع خاموشی[4] قابلیّت انعطاف سیستم بیشتر می‌گردد [۴].

در حالت اتصال به شبکه، به دلیل نفوذ رو به افزایش منابع تجدیدپذیر، اینرسی کل سیستم کاهش می‌یابد. همچنین به زیرساخت‌های کنترلیِ بهتر و سریعتر نیاز است که این امر قیمت سرانه انرژی را افزایش می‌دهد. افزون‌بر این، افزایش پارامترهای کنترلی از قبیل تنظیم فرکانس، مدیریت ردیابی نقطه حداکثر توان[5] و سیستم‌های ذخیره انرژی چالش بهینه‌سازی مهمّ ی را سر راه بهره‌برداران این حوزه قرار داده است. در مقابل، کاهش تنش‌های منابع سنّتی در صورت همراهی با ذخیره‌کننده‌های ثانویه یا خودروهای الکتریکی و درنتیجه‌ی آن افزایش قابلیّت اطمینان و مدیریت سریع‌تر انحرافات فرکانس، از مزایای استفاده از ریزشبکه‌ها در اتصال با شبکه اصلی قدرت است [۷]. سه نیاز اصلی برای اتصال ریزشبکه به سیستم قدرت عبارت است از:

- تغییرات فرکانس نسبت به PCC کمتر از ۰/۱ هرتز
- تفاوت زاویه ولتاژ نسبت به PCC کمتر از ۱ درجه
- تفاوت اندازه ولتاژ نسبت به PCC کمتر از ۵ درصد [۱۱]

در حالت متصل به شبکه، فرکانس و ولتاژ ریزشبکه به‌شدّت متأثر از فرکانس و ولتاژ شبکه اصلی است که این موضوع نقش ریزشبکه را در ارائه‌ی سرویس‌های کمکی محدود می‌سازد [۲۰]. در مقابل در ریزشبکه‌های جزیره‌ای، ولتاژ و فرکانس توسط شبکه اصلی پشتیبانی نمی‌شود و این منابع تولید هستند که باید این کمیّت‌ها را در دامنه قابل قبول حفظ کنند [۴]. برای عملکرد پایدار و مطمئن سیستم خصوصاً در حالت جزیره‌ای، بررسی توپولوژی سیستم نیاز است. به این منظور لازم است مدل دینامیکی مفصلی برای سیستم‌های کنترلی و الکتریکیِ هرکدام از DG ها فراهم گردد که این موضوع جزو دشواری‌های طراحی و پیاده‌سازی ریزشبکه است [۲۱]. به طور کلی بهره‌برداری از ریزشبکه در حالت جزیره‌ای بسیار چالش‌برانگیزتر از سیستم‌های سنّتی است [۲،۴].

با توجه به اینکه بخش قابل توجهی از ریزشبکه‌ها، برخاسته از شبکه‌های توزیع تغییرِ کاربری داده‌شده هستند، قابلیّت اتصال به شبکه و جزیره‌ای‌شدن را توأمان دارند. با این چنین امکانی می‌توان مزایای ریزشبکه‌های جزیره‌ای و متصل به شبکه را در یک قاب متصوّر شد. تغییر اتوماتیک حالت‌های کاری ریزشبکه نیز از مسائل مورد علاقه در تاریخچه تحقیق می‌باشد [۲۲].

۲-۲- ریزشبکه‌های فیزیکی و تجاری

ریزشبکه‌ها را می‌توان از دیدگاه فنّی و اقتصادی به دو گروهِ ریزشبکه‌های فیزیکی و ریزشبکه‌های تجاری تقسیم‌بندی کرد. در نوع فیزیکی همه بارها و منابع از طریق یک نقطه اتصال مشترک (PCC) به یکدیگر وصل می‌شوند. در حالی که در نوع تجاری نقطه اتصال مشترکی وجود ندارد و بارها و منابع می‌توانند به خطوط فشارضعیف[6] (LV) یا فشارمتوسط[7] (MV) وصل شوند. ریزشبکه‌های فیزیکی به منظور پاسخ‌گویی به تقاضاهای فنّی، از جمله بالانس کردن عرضه و تقاضا در شبکه، مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ در حالی که ریزشبکه‌های تجاری برای دست‌یابی به منافع اقتصادی و مشارکت در بازار برق استفاده می‌شوند. به عبارتی در نوع تجاری مسائل اقتصادی از جمله خرید و فروش انرژی و مسائل مرتبط با بازار، اهمیّت بیشتری از مسائل فنّی دارند [۷].

۲-۳- ریزشبکه‌های AC و DC و هیبرید

ریزشبکه‌ها را از نظر نوع ولتاژ آنها می‌توان به سه گروه AC ، DC و هیبرید تقسیم‌بندی کرد. به دلیل اینکه زیرساخت‌های موجود غالباً AC می‌باشند، اقبال به احداث ریزشبکه‌های AC خصوصاً در نوع متصل به شبکه بیشتر است. همچنین به علّت فوق، بیشتر تسهیلات کنترلیِ ساخته‌شده و درحال ساخت روی ریزشبکه‌های AC تمرکز دارند؛ با این دیدگاه که به دلیل قابلیّت استفاده گسترده از اینورتر[8]های الکترونیک قدرت، امکان تبدیل توان DC تولید شده توسط برخی از منابع تجدیدپذیر به AC وجود دارد. در مقابل، ریزشبکه‌های DC به دلیل مزایای فراوان از قبیل تلفات کمتر، کاهش مراحل تبدیل انرژی، سادگی در کنترل و بهره‌برداری، فقدان هارمونیک‌ها و مسائل گذرای شبکه های AC و عدم نیاز به سنکرونیزم در اتصال منابع به یکدیگر، در شرایطی که نیاز به احداث زیرساخت‌های ریزشبکه وجود دارد، خصوصاً در شرایط جزیره‌ای بیشتر مورد توجه قرارگرفته‌اند [۲۳-۲۵]. از طرفی در سال‌های اخیر به دلیل روی‌آوریِ بیشتر به انرژی‌های تجدیدپذیر خصوصاً

1. Point of Common Coupling
2. Point Of Interconnection
3. Black start
4. Black out
5. Maximum power point tracking

6. Low Voltage
7. Medium Voltage
8. Inverter

صفحات خورشیدی و همچنین خودروهای الکتریکی، ریزشبکه‌های DC در حال مطرح شدن هستند [۲۶].

در ریزشبکه‌های AC همه بارها و تولیدات به PCC متصل می‌شوند. تبادل توان بین مصرف‌کنندگان و منابع تولید و همچنین بین ریزشبکه و شبکه بالادست از طریق PCC صورت می‌پذیرد [۲۷]. همچنین به منظور افزایش پایداری، امکان مشارکت چندین ریزشبکه‌ی AC با یکدیگر با بهره‌گیری از مبدّل‌های الکترونیک قدرت که قابلیّت تطابق توان اکتیو و راکتیو را دارند، میسّر است [۷].

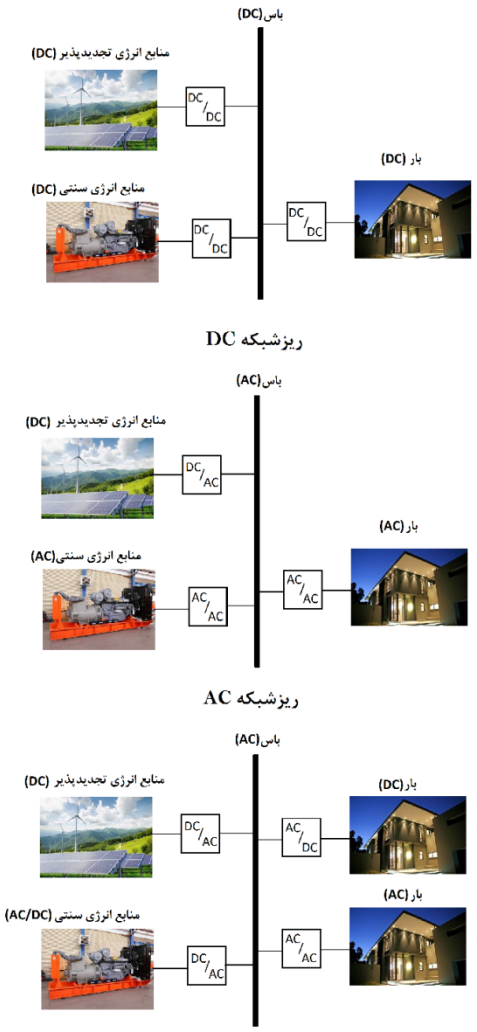
ریزشبکه‌های نوع DC در مقایسه با نوع AC ساده‌ترند. چرا که در آنها برخی از کمیت‌های فیزیکی مثل توان راکتیو و فرکانس وجود ندارد. همچنین در حالت DC خبری از فاز ولتاژ و جریان نیست که این موضوع پیوند بین وسایل و منابع DC را ساده‌تر می‌کند [۲۷]. کیفیّت توان بالاتر، تلفات تبدیل انرژی کمتر و امکان پشتیبانی بهتر در بارهای DC، کنترل ساده و بهره‌وری بالاتر از سایر مزایای ریزشبکه‌های DC محسوب می‌شوند [۲۸،۲۹]. در ریزشبکه‌های DC امکان اتصال ساده منابع تجدیدپذیر وجود دارد. صفحات خورشیدی، نیروگاه‌های بادی کوچک یا ریزبادی‌ها[1] و نیروگاه‌های آبی کوچک یا ریزآبی‌ها[2] که دارای ولتاژ خروجی DC هستند، امکان اتصال به ریزشبکه‌های نوع DC را دارند.

در ریزشبکه‌های هیبریدی، هر دو نوع منابع AC و DC حضور می‌یابند و باس‌های AC و DC هر دو موجود هستند. بارهای AC، تولیدات بادی و دیزل‌ژنراتورها به سمت AC شبکه و بارهای DC، صفحات خورشیدی و سایر منابع DC به طرف دیگر شبکه متصل هستند. ارتباط بین دو زیرشبکه معمولاً توسط یک کانورتر[3] دو جهته صورت می‌پذیرد [۳۰]. PCC نقش مهمّی در پخش‌بار برای این نوع ریزشبکه‌ها ایفا می‌نماید [۷]. این نوع ریزشبکه‌ها مزایای هر دو ریزشبکه‌های AC و DC را دارا هستند و در مقایسه با ریزشبکه‌های AC، در نوع هیبرید اتصال منابع تجدیدپذیر DC، ذخیره‌کننده‌های انرژی و بارها با سهولت و بهره‌وری بیشتری صورت می‌پذیرد [۳۱،۳۲]. بعلاوه تعداد کانورترهای مورد نیاز در این ریزشبکه‌ها کمتر است و این موضوع کاهش هزینه را به‌دنبال دارد [۳۲،۳۳]. این ریزشبکه‌ها، از آنجا که در آنها امکان استفاده از مزایای منابع تجدیدپذیر مختلف با خروجی‌های مستقیم و متناوب و نیز مشارکت بارها و ذخیره‌کننده‌های انرژی از هر دو نوع AC و DC مهیّا بوده و هزینه‌های تبدیل توان نیز به حداقل رسیده‌است، جذّاب به نظر می‌آیند و می‌توان انتظار داشت که ریزشبکه‌های آینده از این نوع باشند [۳۴]. البتّه باید توجه داشت که در ریزشبکه‌های هیبرید، به دلیل افزایش پارامترهای کنترلی، مانند توان راکتیو و مسائل فازها و فرکانس، مکانیزم‌های کنترل نسبت به نوع AC و DC پیچیده‌تر است [۷]. با این وجود پژوهش‌ها نشان می‌دهد که با تعیین یک الگوریتم برنامه‌بندی مناسبِ تعیین توپولوژی بهینه شبکه، اندازه مناسب تجهیزات و کاهش هزینه‌های بهره‌برداری به ازای سناریوهای مختلف امکان‌پذیر است [۳۵]. در شکل ۵ نمای اختصاری ریزشبکه‌های DC، AC و هیبرید مشاهده‌می‌شود.

۲-۴- ریزشبکه‌های راه دور، سازمانی، صنعتی و نظامی

بر مبنای کاربرد می‌توان ریزشبکه‌ها را به سه گروه ریزشبکه‌های راه دور، سازمانی و صنعتی تقسیم‌بندی کرد [۳۶]. در برخی مراجع ریزشبکه‌های نظامی را نیز به عنوان گروه چهارم درنظرگرفته‌اند [۱۸].

1. Micro wind
2. Micro hydro
3. Converter



شکل ۵ ریزشبکه های DC، AC و هیبرید [۷]

ریزشبکه‌های راه دور برای شرایطی که نیاز به تأمین برق برای مکان‌های دور از شبکه مانند روستاهای دورافتاده‌است، مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳۶]. هزینه حمل و نقل سوخت نقش مهمّی در تعیین توپولوژی بهینه این ریزشبکه‌ها ایفا می‌کند [۳۵]. ریزشبکه‌های سازمانی برای درون سازمان‌ها یا دانشگاه‌ها که ساختمان‌های نزدیک به هم دارند، جهت استحصال مزایای ریزشبکه احداث می‌گردند [۳۶،۳۷]. ریزشبکه‌های صنعتی یا تجاری مشابه ریزشبکه‌های سازمانی هستند؛ با این تفاوت که در این حالت، ریزشبکه با بارهای خاص مواجه است که رفتارهای متفاوتی نسبت به بارهای شهری و خانگی دارند [۳۶].

ریزشبکه‌های نظامی گونه‌ای دیگر از ریزشبکه‌ها هستند که در تأسیسات نظامی مورد استفاده قرار می‌گیرند. می‌توان گفت که این ریزشبکه‌ها به دلایلی از قبیل حمل و نقل سوخت به درون ریزشبکه، نیاز به قابلیّت‌اطمینان بالا برای بارها [۳۸]، تعدّد ژنراتورهای توان پایین دیزلیِ تقریباً هم‌اندازه و بارهای القایی زیاد و متغیّر، تفاوت‌های زیادی با بقیّه ریزشبکه‌ها دارند [۳۹].

۳- مروری بر اجزا و بخش‌های مختلف ریزشبکه و مسائل مرتبط

۳-۱- بارها

با توجه به نوع ولتاژ ریزشبکه، بارهای ریزشبکه تعیین می‌شوند. از طرفی ریزشبکه‌ها با کاربری‌های مختلف بارهای متفاوتی دارند. بارها در ریزشبکه در

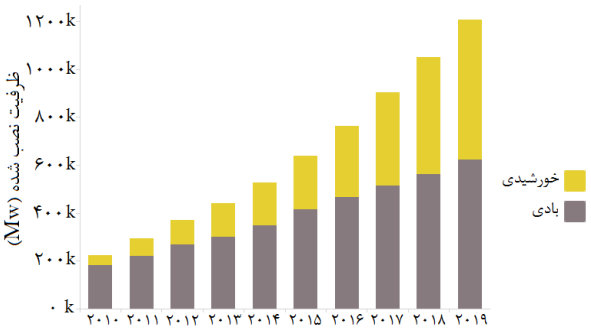
طول سال‌های اخیر دستخوش تغییر شده و چالش‌هایی به همراه آورده‌اند. تأثیر بد بارهای توان ثابت که نوعی از بارهای معمول در ریزشبکه‌ها هستند، باعث بدترشدن پاسخ ولتاژ و فرکانس شبکه به اغتشاشات می‌گردد [۴۰].

۳-۲- منابع تولید

با توجه به انگیزه طرّاحی و بهره‌برداری ریزشبکه‌ها، بخش عمده منابع تولید را تولیدات تجدیدپذیر تشکیل می‌دهند؛ هرچند که دیزل‌ژنراتورها نیز به دلایلی از قبیل پشتیبانی از عدم قطعیّت تولیدات تجدیدپذیر و افزایش قابلیّت اطمینان شبکه همچنان کاربرد خود را در ریزشبکه حفظ کرده‌اند. چشم انداز DGها با ترکیب مبدّل‌های الکترونیک قدرت و صفحات خورشیدی در حال تغییر است. همچنین به تازگی ریزبادی‌ها و ریزآبی‌ها هم در حال ظهور و استفاده هستند. با این وجود منابع DG پایدار و دائمی نیستند و به‌شدّت به آب‌وهوا، اقلیم و موقعیّت جغرافیایی وابسته‌اند. تغییرات تولیدات این منابع به‌شدّت روی پایداری ریزشبکه تأثیر می‌گذارد. به عنوان یکی از راه‌حل‌ها برای افزایش بخت این منابع برای عرضه قدرت پایدار و دائمی، می‌توان استفاده از ذخیره‌کننده‌های انرژی را نام برد [۷].

منابع تولید در ریزشبکه‌ها را به دو بخش عمده تقسیم می‌کنند: سنکرون و غیرسنکرون. به عنوان مثالی از تولیدات غیرسنکرون می‌توان منابع بادی را نام برد که تغییرات غیرقابل پیش‌بینی در تولید دارند و منابع سنکرون شامل مواردی مانند دیزل‌ژنراتورها و ریزآبی‌ها می‌شوند که خروجی قابل‌کنترل دارند و قادرند اینرسی شبکه را حفظ نمایند [۷]. ذیلاً منابع تولید پرکاربرد در ریزشبکه معرفی می‌شوند:

صفحات خورشیدی[1] *(PV):* با گسترش مبدّل‌های الکترونیک قدرت، راه برای استفاده ساده‌تر و بهتر از انرژی خورشید باز شده‌است. مزارع صفحات خورشیدی در سقف خانه ها[2] در سرتاسر جهان در حال افزایش است [۷]. در بیشتر نقاط جهان، توان خورشیدی رسیده به سطح زمین حدود 1000 w/m^2 است که PV ها تنها ۲۰ درصد آن را می‌توانند کسب‌کنند [۷]. این مسأله، ظرفیّت بالقوّه استفاده از این منبع بی‌انتهای انرژی را نشان می‌دهد. شکل ۶ افزایش تولیدات خورشیدی را نسبت به بادی در سالهای اخیر در سطح جهان نشان می‌دهد که قائدتاً بدلیل افزایش صفحات خورشیدی است. استفاده از PVها در ریزشبکه، یک راهکار عالی برای برق‌رسانی به مصرف‌کنندگانی که از سیستم اصلی قدرت فاصله دارند، خصوصاً در کشورهای در حال توسعه‌ای که به منابع خورشیدی بیشتری دسترسی دارند، فراهم ساخته است [۴۱]. با توجه به اینکه با افزایش اندازه صفحات، هزینه بروات افزایش می‌یابد، یکی از مسأله مهم در طرّاحی، ساخت و نصب PV ها، بهینه‌سازی بین اندازه و توان تولیدی است [۷].



شکل ۶ افزایش تولیدات بادی و خورشیدی در سطح جهان در مقایسه با یکدیگر [۴۱]

تولیدات بادی: نیروگاهای بادی سنّتی یکی از مهم‌ترین تولیدات تجدیدپذیر به‌کاررفته در ریزشبکه‌ها محسوب می‌شوند. ژنراتورهای القایی مورد استفاده در نیروگاه‌های بادی به دلیل تغییر پیوسته تقاضای راکتیوشان، مسائل مربوط به پایداری ولتاژ و متقابلاً پایداری توان را به‌دنبال دارند [۴۲]. دینامیک‌های نیروگاه‌های بادی با تولیدات سنّتی متفاوت است و آثار بدی بر روی پایداری سیستم می‌گذارد [۴۳]. همچنین از نتایج شبیه‌سازی‌های انجام‌شده در [۴۳] برمی‌آید که نفوذ بالای تولیدات بادی، اجرای بازگردانی ولتاژ بعد از خطا را بدتر می‌کند.

یک روش برای برخورد با چالش ناپایداری، استفاده از ابرخازن به منظور تأمین تقاضای راکتیو در حضور بارهای سنگین است [۴۲]. همچنین به منظور بهبود بازگردانی ولتاژ پس از خطا، جاگذاری سیستم‌های ذخیره‌ی انرژی پیشنهاد مناسبی است. سیستم‌های ذخیره انرژی نه تنها نوسانات ولتاژ در PCC را کاهش می‌دهند بلکه بازگردانی ولتاژ درPCC را نیز شتاب می‌بخشند. ارائه این راهکار، قابلیّت استفاده از نیروگاه‌های بادیِ بیشتر به همراه اینورتر را در ریزشبکه بهبود می‌دهد [۴۳].

ریزبادی‌ها: چالشی که در گذشته در مورد بهره‌برداری از انرژی باد وجود داشته‌است، عدم امکان تولید انرژی از باد در قدرت‌های پایین بوده که امروزه با ظهور ریزبادی‌ها این مسأله حل شده‌است. ریزبادی‌ها می‌توانند از چندین وات تا چند کیلووات انرژی تولید نمایند [۷]. ریزبادی‌ها هم در کنار سیستم‌های ذخیره انرژی امکان مشارکت در ریزشبکه‌ها را دارا هستند [۷]. البتّه در آن‌ها به دلیل درگیری واحدهای الکترومکانیکی تنها بخشی از توان را می‌توان دریافت کرد [۷].

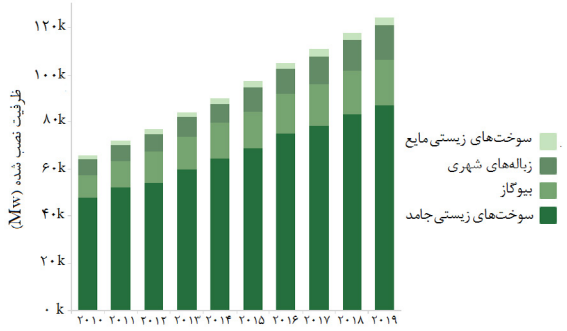
ریزآبی‌ها: همواره سدهای عظیم برای تولید انرژی الکتریکی از طریق برقآبی مورد استفاده قرار می‌گرفته است و واحدهای تولید برقآبی کوچک به دلیل نداشتن بهره‌وری کافی مورد استفاده نداشته‌اند. با گسترش تحقیقات اخیر در حوزه واحدهای برقآبی کوچک می‌توان مطمئن بود که در آینده، لی ن واحدها نیز به‌عنوان DG درنظرگرفته‌شوند [۷]. این واحدها به دلیل تولید قابل‌کنترل و امکان همزمان‌کردن تولید آنها با تقاضا، جزو تولیدات سنکرون محسوب شده و اینرسی شبکه را افزایش می‌دهند [۷].

بیوماس[3]*:* یکی از قابل اعتمادترین منابع انرژی که در عین حال به ندرت استفاده می‌شود، منابع بیوماس یا زیست‌انرژی است. استفاده از بیوماس به صورت کمپوست، سوخت‌های سبز و تولید حرارت از طریق سوختن ضایعات امکان‌پذیراست. روشی که در سرتاسر جهان برای استفاده از بیوماس استفاده می‌شود استفاده از گاز ناشی از آن و استفاده از محتوای انرژی‌زای آن می‌باشد. بیوماس را چه به صورت مستقیم و چه از طریق محصولات جانبی آن می‌توان در تولید انرژی برق دخیل ساخت [۷]. شکل ۷ سهم روش‌های مختلف استفاده از زیست‌انرژی را در افزایش تولید انرژی الکتریکی به این روش در سطح جهان، در سال‌های منتهی به ۲۰۱۹ نشان می‌دهد.

دیزل‌ژنراتور: دیزل‌ژنراتورها به دلیل ثابت زمانی کم، گزینه‌ی مناسبی برای ترکیب با منابع تجدیدپذیر مانند نیروگاه‌های بادی به جهت تثبیت بیشتر توان تولیدی آنها می‌باشند. از این رو استفاده از این نوع نیروگاه در ریزشبکه‌ها معمول است [۷].

۳-۳- تجهیزات ذخیره‌سازی

1. Photo Voltaic
2. Rooftop PVs
3. Biomass



شکل ۷ سهم روشهای مختلف تولید برق از زیست‌انرژی در سطح جهان در سالهای منتهی به ۲۰۱۹ [۴۱]

در شرایط حضور منابع تجدیدپذیر که دارای خروجی در حال تغییر هستند، ذخیره‌سازها نقش مهمّی ایفا می‌کنند. حضور ذخیره‌سازهای انرژی در شبکه‌های هوشمند به استراتژی‌های پیک‌زدایی و جابه‌جایی بار کمک می‌کند [۴۴]؛ در تنظیم فرکانس-توان اکتیو و ولتاژ-توان راکتیو مشارکت می‌کند [۴۴]؛ ذخیره توان برای تنظیم بازارهای الکتریکی را مهیّا می‌سازد؛ مسائل تراکمی شبکه را حل می‌کند و سرمایه‌گذاری‌های شبکه را به تعویق می‌اندازد [۲۴،۴۴]. به دلیل ماهیّت تغییرپذیر انرژی های نو، قابلیّت اطمینان سیستم در حالت جزیره‌ای وابسته به ظرفیّت ذخیره‌سازهای انرژی است [۱۹]. با توجه به اینکه قابلیّت اطمینان یک ریزشبکه با قابلیّت اطمینان باتری و اینورتر متصل به آن تعریف می‌شود، به نوعی می‌توان سیستم‌های ذخیره انرژی را پاشنه‌آشیل ریزشبکه دانست [۴۵]. باتری ها، سلول‌های سوختی، بانک‌های خازنی (خازن‌های سنّتی و ابرخازن‌ها) و چرخ‌طیّارها بیشترین ذخیره‌سازهای مورد استفاده هستند [۷]. براساس پیکربندی می‌توان این سیستم ها را به سه گروه: موازی، کاسکاد و هیبرید تقسیم‌بندی نمود [۴۶].

در ریزشبکه‌های DC ، سیستم ذخیره انرژی از واحدهای ذخیره و کنترلرهای مرتبط با آن تشکیل‌شده که یک جزء مهم و ضروری برای احراز اطمینان از کیفیّت قدرت در این شبکه‌هاست [۲۴،۴۲]. در واقع اهمیّت حفظ پایداری ولتاژ باس در عملکرد پایدار سیستم در ریزشبکه‌های DC، ضرورت حضور ذخیره‌سازهای انرژی را در تثبیت و پایداری این ریزشبکه‌ها دوچندان کرده‌است [۲۳]. استفاده از خودروهای الکتریکی و سیستم‌های ذخیره انرژی در ریزشبکه‌های DC با کنترل پخش‌بار دوجهته بین این تجهیزات و شبکه، با درنظرگرفتن حالت شارژ[1] (SOC) ، می‌تواند مسائل مربوط به بالانس ولتاژ و تنظیمات آن را در ریزشبکه حل کند [۴۷]. همچنین در صورت ارائه راه‌حل‌های عملی برای مدیریت جریان ابرخازن‌ها و حصول اطمینان از بیش‌شارژشدن آنها و تخلیه کامل در هنگام دشارژ و توانایی پشتیبانی سیستم پس از دشارژ کامل، می‌توان از ترکیب ابرخازن‌ها و باتری‌ها به منظور افزایش طول عمر باتری استفاده‌کرد [۴۸].

استفاده از باتری‌ها و ابرخازن‌ها با ساختار هیبرید در سیستم ذخیره انرژی در پیشنیه تحقیق انجام‌شده‌است. مهیّاسازی تراکم انرژی و تراکم توان بالا [۴۹]، افزایش طول عمر تجهیزات ذخیره انرژی [۴۹] و کاهش هزینه‌های بهره‌برداری از DG ها [۵۰] از نتایج استفاده صحیح از سیستم‌های ذخیره انرژی هیبرید می‌باشد.

تحقیقات در این حوزه وجود این ظرفیّت بالقوّه را نشان می‌دهد که بتوان درحالت جزیره‌ای با استفاده از بسته‌های مشارکتی متشکل از هرکدام از واحدهای ذخیره‌ساز، سیستم‌های کنترلی مناسب طرّاحی کرد که قادر باشد با توجه به باقی‌مانده انرژی ذخیره‌سازها و فرکانس سیستم، عمل تثبیت فرکانس و استقلال از سیستم قدرت اصلی را محقّق کند [۵۱].

به منظور بهبود در اجرای سیستم‌های ذخیره انرژی و افزایش طول‌عمر آنها لازم است برخی از شاخصه‌ها و نیازها از قبیل: حفاظت شارژ و دشارژ عمیق، مدیریت حرارتی و کنترل تعادل SOC درنظرگرفته‌شود [۴۶]. بالانس حالت شارژ چالش مهمّی در ذخیره‌کننده‌های انرژی توزیع‌شده در ریزشبکه‌ها محسوب می‌شود [۴۲،۵۲]. در [۴۲] یک روش برنامه‌بندی برای ولتاژ ارائه‌شده که هدف آن حفظ بالانس حالت شارژ در طی تغییرات بار است که در کنار آن، ولتاژ باس نیز در محدوده مجاز حفظ می‌گردد؛ همچنین توان مبادله‌شده در ذخیره‌کننده‌های انرژی می‌تواند بر مبنای تغییرات در حالت شارژ در هر کدام از واحدهای ذخیره انرژی کنترل شود. پژوهش انجام‌شده در [۴۶] مسأله فوق را در سیستم‌های ذخیره انرژی هیبرید برای اولین بار مطرح ساخته‌است. در این پژوهش از کنترل متمرکز برای واحدهای محلّی و اصلاح کنترل دروپ استفاده‌شده‌است [۴۶].

ذخیره‌سازهای انرژی باتری[2] (BESS) می‌توانند برای مبادله سریع توان اکتیو بین باتری و شبکه به منظور بهبود کیفیّت توان در ریزشبکه‌ها به‌کار روند. همچنین از این سیستم‌ها به عنوان یک فیلتر هارمونیک می‌توان استفاده‌کرد. در صورت همراهی با کنترل‌های کاسکاد و مستقل برای جریان و توانهای اکتیو و راکتیو، BESS ها می‌توانند بالانس توان راکتیو را حفظ کرده و در نتیجه پایداری ولتاژ را به همراه داشته‌باشند [۵۳].

ترکیبات شیمیایی مورد استفاده در ساخت BESSها برای کاربری در ریزشبکه، لیتیوم-یون و نوتریوم-سولفید است. باید توجه داشت که باتری‌ها برای بهره‌برداری پایدار به کنترل شارژ نیاز دارند [۷]. در نوعی از BESS مورد استفاده در شبکه، از یک سیستم حفاظتی و کنترلی ادغام شده در یک سیستم مدیریت باتری استفاده می‌شود. BESSها در پیک‌زدایی، تنظیم فرکانس وکنترل ولتاژ و فرکانس ریزشبکه استفاده می‌شوند. این سیستم‌ها همچنین قادرند به عنوان فیلترینگ هارمونیک اکتیو، جریان فاز در PCC را خیلی صاف تر و مطلوب‌تر نمایند و طیف هارمونیک جریانها در PCC را بهبود بخشند [۵۳].

سیستم‌های ذخیره انرژی قادرند بالانس قدرت اکتیو و تنظیمات ولتاژ را در یک زمان فراهم کنند. این سیستم‌ها در حالت متصل به شبکه قادرند سطح‌بندی بار را پوشش دهند و انتقال قدرت را نیز کم کنند که این مسأله باعث بهره‌برداری انعطاف‌پذیرتر و کارآمدتر می‌شود؛ همچنین کیفیّت بهتر در تحویل انرژی به مشترکین و امکان افزایش نفوذ DGها را به همراه دارد [۵۴].

مسأله بعدی در طرّاحی سیستم‌های ذخیره انرژی، کانورترها هستند. در ریزشبکه‌های متصل به شبکه، در هنگام وقوع حادثه در شبکه اصلی، کلید قدرت بین دو شبکه، ریزشبکه را از سیستم قدرت اصلی جدا می‌نماید و به‌این‌ترتیب وظیفه تأمین ولتاژ ثابت و پایدار برای بارهای شبکه به دوش کانورتر ذخیره‌کننده انرژی می‌افتد. همین موضوع اهمیّت طرّاحی یک کانورتر مناسب برای ریزشبکه را نشان می‌دهد [۱]. از طرفی در ریزشبکه‌های AC نیز احتیاج به استفاده از مبدّل‌های الکترونیک قدرت در کنار ذخیره‌سازها وجود

1. State Of Charge

2. Battery Energy Storage Systems

دارد که در مجموع به دلیل ابعاد هارمونیک‌های این مبدّل‌ها، نباید از تأثیرات مخربشان بر شبکه غافل شد [۷].

امروزه زیرساخت‌های وسایل نقلیه الکتریکی در همکاری با ریزشبکه‌های هوشمند به علّت نه تنها قابلیّت جابه‌جایی، بلکه قابلیّت انعطاف آنها در پشتیبانی از شبکه قدرت مطرح شده اند [۴۴]. اقبال به استفاده از خودروهای الکتریکی در ریزشبکه‌های راه دور و نیز سازگاری آنها با محیط زیست به دلیل اثرات گازهای گلخانه ای ناشی از خودروهای با سوخت فسیلی، فرصت را به ریزشبکه می‌دهد تا از خودروهای الکتریکی به عنوان منبعی برای ذخیره انرژی استفاده‌کند. به منظور انطباق‌پذیری مؤثرتر خودروهای الکتریکی نیاز به برنامه‌ریزی‌های بیشتری در این حوزه وجود دارد [۵۵].

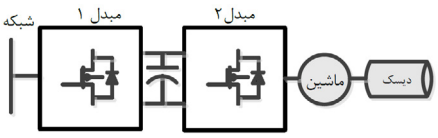
نوعی دیگر از ذخیره‌کننده‌های پر کاربرد در ریزشبکه، سیستم ذخیره انرژی چرخطیّار [1] است که مناسب برای ذخیره کوتاه‌مدت انرژی است. چرخ-طیّار نوعی ماشین الکتریکی است که- در حالت شارژ مانند یک موتور و در حالت دشارژ مانند یک ژنراتور- قادر است هم در فرکانس‌های پایین و هم در فرکانس‌های بالا کار کند. چرخطیّار نیاز به یک اینورتر دوطرفه دارد تا فرکانس متغیّر تولید شده را به یک فرکانس ثابت برای سیستم قدرت تبدیل کند. چرخطیّار به دلیل طول عمر بیشتر، امتیازات زیست‌محیطی، پاسخ زمانی خیلی سریع و توانایی تأمین توان بالا در بازه زمانی کوتاه، نیاز به تعمیر و نگهداری کمتر و توانایی ذخیره انرژی در سطوح مگاژول، صاحب امتیازات عالی نسبت به باتری‌های ذخیره‌کننده انرژی، به منظور کاربردهای مختلف در ریزشبکه است [۵۶-۵۸]. البتّه می‌توان با استفاده از چرخطیّار و باتری به صورت هیبرید برخی از مزایای هر دو را توأمان داشت [۵۹]. آلایندگی باتری-های اسید سرب، انگیزه‌ای برای پژوهش به منظور کاهش اندازه این باتری‌ها با همراهی چرخطیّار است [۶۰]. چرخطیّار گزینه‌ای مناسب برای برقراری پایداری ولتاژ و فرکانس در شرایط نفوذ زیاد انرژی‌های تجدیدپذیر می‌باشد [۲۰،۵۷،۶۱].

چرخطیّار، انرژی را به صورت مکانیکی در خود ذخیره می‌کند؛ به این صورت که انرژی الکتریکی ورودی را توسط یک موتور الکتریکی جذب کرده و موتور، محور را شتاب می‌دهد. در هنگام دشارژ، همین موتور به صورت ژنراتور عمل می‌کند و انرژی مکانیکی ذخیره‌شده را به الکتریکی تبدیل کرده و به شبکه تزریق می‌نماید [۵۷،۶۱].

انرژی چرخشی ذخیره شده در چرخطیّار به صورت رابطه (۱) است.

$$E = \frac{1}{2} I \omega^2 \qquad (۱)$$

که در آن I اینرسی لحظه‌ای است که نسبت مستقیم با جرم رتور دارد و ω سرعت زاویه‌ای می‌باشد [۵۷،۶۱]. نمای کلی چرخ طیار به همراه مبدل-های ولتاژ در شکل ۸ مشاهده می‌شود.



شکل ۸ طرح ساده یک چرخ طیار [۶۱]

۳-۴- کانورترها

در ریزشبکه‌های AC به منظور تبدیل ولتاژ DC تولیدشده توسط منابع تولید پراکنده ازجمله PVها به ولتاژ شبکه، لازم است از مبدّل‌های ولتاژ استفاده شود. همین ضرورت در ریزشبکه‌های DC و برای تبدیل ولتاژ تولیدات بادی و دیزل‌ژنراتورها به ولتاژ DC شبکه وجود دارد. اینورترهای دوجهته جهت اتصال بخش‌های مختلف ریزشبکه‌های متصل به هم، اتصال دو زیر-شبکه AC وDC به یکدیگر در ریزشبکه‌های هیبرید، تبدیل سطوح مختلف ولتاژ در ریزشبکه-های DC، اتصال به شبکه بالادست برای ریزشبکه‌های DC و ... کاربرد دارند. بنابراین یکی از اجزای جدایی‌ناپذیر ریزشبکه کانورترها هستند و مطالعه آنها اهمیّت فراوانی دارد. تاکنون پژوهش‌های زیادی در این حوزه انجام‌شده‌است [۶۲].

همان‌گونه که گفته شد ریزشبکه معمولاً دارای تعداد زیادی اینورتر است. حضور اینورترها مسأله توانایی مواجهه‌ی ریزشبکه با تنش‌های مختلف روی ولتاژ وفرکانس شبکه در اثر عوامل داخلی یا خارجی و یا وقوع اغتشاش را مطرح می‌سازد. اینورترهای آینده با داشتن قابلیّت‌های اضافی ازجمله توانایی مدیریت توان اکتیو و راکتیو، هارمونیک‌ها و سرویس‌های جانبیِ دیگر، خواهندتوانست این مشکل را حل کنند [۶۳].

۳-۵- زیرساخت‌های ارتباطی

ریزشبکه‌ها معمولاً دارای یک زیرساخت ارتباطی بین کنترلر مرکزی ریزشبکه [2] (MGCC)، سوئیچ‌ها، کنترلرهای اولیه و اجزا و تجهیزات اندازه-گیری هستند [۴]. بر اساس نیازها و توپولوژی شبکه بالادست، ممکن است یک خط لوله ارتباطی بین MGCC و لایه کنترل ثالثیه وجود داشته‌باشد. به منظور احراز اطمینان از بهینه‌سازی، پایداری و قابلیّت‌اطمینان، سیستم کنترلی ریزشبکه از مجموعه‌ای از نرم‌افزارها و سخت‌افزارها ساخته‌شده‌است. این سیستم کنترل ممکن است متمرکز یا توزیع‌شده باشد [۴].

با درنظرگرفتن اینکه شبکه‌های قدرت در آینده دارای مجموعه قابل ملاحظه‌ای از وسایل الکترونیکی هوشمند هستند، توسعه ارتباطات، سیستم-های کنترلی و استانداردسازی معماری شبکه دارای اولویت‌های بالایی خواهندبود. ارتباطات سریع و قابل‌اطمینان می‌تواند تعداد مشترکین و DG های متأثر از خطا در شبکه را کاهش دهد و تغییرات کوچک در ساختار شبکه را نظارت نماید [۶۴]. برنامه‌های پاسخ‌گویی بار، زیرسیستم‌های ذخیره انرژی و DGها که در ریزشبکه به‌کار می روند، خود نیازهای جدیدی در حوزه اتوماسیون، مدیریت و کنترل ایجاد می‌نمایند و نیازمند افزایش دامنه‌ی مطالعات در آینده هستند [۱۴].

شبکه بی‌سیم مش برمبنای ابری و هیبریدی، معرفی‌شده در [۶۵] و استفاده از ارتباط خطوط قدرت [3] (PLC) که در [۶۶] پیشنهادشده‌است، دو مورد از چهارچوب‌های ارتباطی مورد مطالعه در پیشینه تحقیق هستند. پژوهش انجام‌شده در [۶۵] روی ریزشبکه‌های به‌هم‌پیوسته صورت پذیرفته-است . چهارچوب شبکه در این پژوهش دوسطحی است که سطح پایینی، یک راه‌حل توزیع اقتصادی برای داخل ریزشبکه‌ها و در میان منابع توزیع‌شده ارائه می‌کند؛ سطح بالایی یک توزیع بار بهینه کلی برای تبادل انرژی بین ریزشبکه‌ها اعمال می‌نماید. نتایج نشان می‌دهد که چهارچوب ارائه‌شده، نیازهای ارتباطی را برای بهینه‌سازی توزیع‌شده‌ی ریزشبکه‌های به‌هم‌پیوسته محقّق می‌سازد.

با همه‌ی این تفاسیر، کنترل توزیع‌شده به علّت مزایای آن از جمله عدم نیاز به خطوط ارتباطی و سرعت پاسخ‌دهی بالا بیشتر مورد توجه قرارگرفته-است. با بکارگیری رویکردهای کنترلی توزیع‌شده مناسب، می‌توان نیاز به

1. Flyweel

2. Micro Grid Control Center
3. Power Line Communication

زیرساخت‌های ارتباطی را در بخش‌هایی از سیستم کنترل شبکه، کمتر یا مرتفع نمود [۶۷]. از طرفی توسعه شگفت‌انگیز فناوری ارتباطات در سال‌های اخیر نیز فرصت مناسبی برای حضور کنترل توزیع‌شده در ریزشبکه‌ها فراهم ساخته‌است [۶۸]. زیرساخت‌های ارتباطی و اطلاعاتی در ریزشبکه جزو موضوعاتی است که هنوز باز هستند و جای پژوهش و مطالعات بیشتر در آن بسیار زیاد است [۶۴].

۴- مروری بر سایر چالش‌ها و فرصت‌ها

۴-۱- مسائل مرتبط با بازار برق

نصب DGها در نزدیکی محل تقاضا بازار برق را با مسائل زیادی از قبیل افزایش تعداد بازیگران بازار مواجه ساخته‌است. تغییر کنترل شبکه از حالت متمرکز به توزیع‌شده که در ریزشبکه‌ها در حال وقوع است، فرصت بروز نقش مؤثری برای بهره‌برداران سیستم توزیع شده و علاوه بر این، بازار فرصت‌هایی از قبیل توانایی مشارکت در معاملات را به بازیگران جدید داده‌است. با معرفی ریزشبکه‌ها، توسعه سرمایه‌گذاری در بازار برق در حال ساده‌تر شدن است و بازیگران را قادر می‌سازد که در بازارهای مختلفی دخیل شوند [۷].

در حالت متصل به شبکه، که امکان مبادله دوطرفه انرژی بین ریزشبکه و شبکه بالادست وجود دارد، خرید و فروش انرژی به سیستم قدرت بالادست یک امکان بالقوّه محسوب می‌شود. با مدیریت انرژی صحیح و بهینه در این حالت، خصوصاً در شرایطی که تولیدات انرژی تجدیدپذیر فراوانی در ریزشبکه وجود داشته‌باشد، حداقل‌سازی هزینه‌ی سوخت، بهبود بهره‌برداری و حفاظت و حداکثرسازی منافع اقتصادی ناشی از فروش انرژی به شبکه مقدور و میسّر خواهد بود [۴۷].

استفاده از رهیاب قدرت هوشمند[1] (SPR) برای کنترل پخش‌بار و همچنین مدیریت بهتر هزینه‌های برق برای مالک گزینه‌ی خوبی است [۷]. در شبکه‌هایی که از SPR استفاده می‌کنند، معمولاً بارها از نوع DC هستند [۷]. توسعه ذخیره‌کننده‌های الکتریکی و حرارتی نیز در سال‌های اخیر فرصت مناسبی برای استفاده در ریزشبکه‌ها و کاهش هزینه‌های بهره‌برداری فراهم آورده‌است [۶۹].

هزینه‌های حفاظت و سوخت مورد نیاز و هزینه‌های خرید انرژی از شبکه حوزه‌های پژوهشی جدید است که ریزشبکه با هدف کاهش هزینه‌های بهره‌برداری ایجاد نموده‌است[۷۰]. این مسائل پایه‌های بهینه‌سازی در حوزه مطالعات ریزشبکه را تشکیل می‌دهند. تابع‌هدف در ریزشبکه‌ها به مسائل مختلفی از قبیل: منطقه‌ی جغرافیایی، ترجیحات بهره‌بردار، ظرفیّت ریزشبکه، تجهیزات نصب‌شده، مقرّرات حکومتی، تولید و ذخیره‌سازی انرژی ، نوع تعرفه و ... بستگی دارد[۷]. در هنگام اتصال به شبکه اصلی و دریافت انرژی از آن، تابع هدف می‌تواند حداقل‌سازی هزینه‌های بهره‌برداری و نگه‌داری از سیستم و هزینه خرید انرژی از شبکه بالادست باشد؛ در حالت جدا از شبکه، تابع هدف حداکثرسازی سود-درآمد ناشی از فروش انرژی منهای هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری از ریزشبکه- باشد [۷۱].

مزایای ریزشبکه‌ها را باید با افزایش هزینه‌ی ناشی از جایگذاری DGها مقایسه‌کرد. براین‌اساس، یک آنالیز سود و زیان قبل از اجرای یک پروژه ریزشبکه الزامی است؛ طبیعتاً برای مدیریت هزینه‌ها و سودهای اقتصادی و فنّی نیز باید از بهینه‌سازی استفاده‌کرد [۳]. توجه به اندازه و تعداد بهینه منابع تجدیدپذیر نیز جهت کاهش هزینه‌ها و بهبود بهره‌وری ریزشبکه مهم و مؤثر است [۷۰].

1. Smart Power Router

۴-۲- چالش‌های پخش‌بار

یک مسأله دیگرِ پیش روی ریزشبکه‌ها، پخش‌بار آنهاست. تغییر در تولیدات تجدیدپذیر و تغییرات زیاد در فرکانس سیستم نیاز پخش‌بار متفاوتی نسبت به شبکه‌های سنّتی ایجاب می‌نماید [۳]. بعلاوه، کوتاه‌بودن فیدرها و در نتیجه مقاومت و راکتانس پایین و نرخ R/X بیشتر، باعث شده که ارتباط کلی بین ولتاژها، زاویه‌ها و پخش‌بار اکتیو و راکتیو با سیستم‌های قدرت سنّتی متفاوت باشد [۴]. نداشتن باس مرجع[2]، کارکرد DGها بوسیله‌ی سیستم‌های کنترل سلسله‌مراتبی و تغییرات متناوب در ساختار ریزشبکه با تغییرات حالت کاری آن، لزوم بررسی پخش‌بار جداگانه را می‌طلبد [۷۲].

در حالت متصل به شبکه می‌توان از قوائد سنّتی پخش‌بار (گوس-سایدل، نیوتون‌رافسون ...) استفاده‌کرد؛ در این حالت با DGها مشابه منابع سنّتی رفتار می‌شود و آنها را باید باسPV یا PQ فرض کرد. همچنین فرکانس سیستم ثابت فرض می‌شود چراکه به شبکه قدرت متصل‌است. اما در حالت جزیره‌ای قوائد پخش‌بار سنّتی اعتبار خود را از دست می‌دهند. در حالت جزیره‌ای باس اسلک وجود ندارد و با فرکانس باید به عنوان یک متغیّر برخوردکرد. همچنین از دروپ DGها باید استفاده نمود [۳]. مدلسازی خطوط کوتاه ریزشبکه‌ها نیز خود یک چالش است. در [۷۳] رهیافتی برای این چالش با ارائه روشهایی برای مدلسازی‌های خطوط کوتاه درنظرگرفته‌شده و مزایا و معایب آنها بررسی گردیده‌است [۷۳].

یک روش ساده و دقیق برای پخش‌بار در ریزشبکه‌های جزیره‌ای استفاده از روش گوس‌سایدل است که در دو پله صورت می‌پذیرد: در پله اول محاسبات ولتاژ باس به روش سنّتی انجام می‌شود و در پله دوم محاسبات فرکانس سیستم با استفاده از شاخصه‌های دروپ DGها انجام می‌گردد. این روش ساده و در ریزشبکه‌های کوچک، کارآمد است اما اگر اندازه شبکه افزایش یابد باید تعداد تکرارها را بیشتر کرد [۳]. در [۷۴] یک کنترلر پخش-بار اکتیو یونیورسال با پشتیبانی ذخیره‌کننده های انرژی الکتریکی برای ریزشبکه‌های DC معرفی شده‌است. این سیستم یک ولتاژ تنظیم‌شده را به صورت سری با خط توزیع معرفی می‌کند تا پخش‌بار بین ریزشبکه‌ها را با جهت مناسب کنترل کرده و قطعیّت کنترل پخش‌بار بین ریزشبکه‌های به-هم‌پیوسته را افزایش می‌دهد. مفهوم ارائه‌شده پخش‌بار را ساده و پربازده می-کند و انتظار می‌رود که در آینده خیلی مطرح شود. خوشبختانه تحقیقات در حوزه پخش‌بار اکتیو بین ریزشبکه‌های به‌هم‌پیوسته امیدبخش است [۱۶].

۴-۳- سیستم مدیریت انرژی

در ریزشبکه‌ها، به دلیل ماهیّت اجزای تشکیل دهنده آنها، مسائلی از قبیل عدم قطعیّت تولیدات تجدیدپذیر و قابلیّت اطمینان، برجستگی بیشتری نسبت به سیستم‌های قدرت سنّتی پیدا کرده‌اند. از طرفی ترکیب منابع مختلف انرژی که در ریزشبکه‌ها وجود دارد، یک فرصت مناسب برای برخورد با جنبه‌های تصادفی[3] و مدیریت حوادث مختلف احتمالی است [۷۵]. برای این منظور طرّاحی یک سیستم مدیریت انرژی کارآمد، می‌تواند منجر به افزایش قابلیّت اطمینان سیستم و افزایش طول عمر تجهیزات ذخیره انرژی گردد [۴۹،۷۶].

سیستم‌های مدیریت انرژی سلسله‌مراتبی نیز در [۷۷] مورد بررسی قرارگرفته که هدف آن عملکرد امن ریزشبکه در اثر وقوع تغییرات تصادفی در نامتعادلی قدرت است. روش ارائه‌شده در [۷۷] توانسته شاخص خودمصرفی[4]

2. Slack
3. Stochastic
4. Self-consumption

را در اثـر وقـوع اغتشـاش، در محـدوده بـیش از ۸۰ درصـد و شـاخص خودبهره‌وری[1] را در محدوده بیش از ۳۰ درصد حفظ کند.

۴-۴- اعمال برنامه‌های پاسخ‌گویی بار

در سال‌های اخیر برنامه‌های پاسخ‌گویی تقاضا به علّت محدودیت منابع انـرژی و ضعف سیستم‌های انرژی متمرکز بسیار مورد توجـه قرارگرفته‌انـد [۷۸-۸۲]. برنامه‌های پاسخ‌گویی بار شامل قابلیّت‌های متنوعی از قبیل کنتـرل مسـتقیم بار، قیمت‌گذاری زمان استفاده[2] و قیمت‌گذاری زمـان واقعـی[3] می‌شـود [۸۳]. امروزه می‌توان برنامـه‌های مـدیریت سـمت تقاضـا را بـه عنـوان نیروگاه‌هـای مجازی در سیستم‌های هوشـمند و در ریزشـبکه‌ها دانسـت. ایـن برنامـه‌ها در شرایط پیک بار می‌توانند به کمک بخش تولید بیایند و سیستم را ازمشـکلات ناشی از پیک بار نجـات دهنـد؛ نیـاز بـه احـداث نیروگاه‌هـا و زیرسـاخت‌های ارتبـاطی را مرتفـع نمـوده و ظرفیّـت تجهیـزات سیسـتم را بـالا ببرنـد [۶۹]؛ همچنین باعث کاهش هزینه‌های خانوارها و بهبـود عملکـرد تسـهیلات شـوند [۸۴]. افزایش ظرفیّت عرضـه انـرژی، بهبـود پروفایـل ولتـاژ و بهبـود قابلیّـت اطمینان از دیگر ثمرات برنامه‌های پاسخ‌گویی بـار در پژوهش‌هـای انجام‌شـده است [۷۹،۸۵،۸۶].

اجرای برنامه‌های پاسخ‌گویی بار می‌تواند انگیزشـی یـا قیمـت‌محور باشـد [۸۱]. می‌توان با اجرای برنامه‌های انگیزشی به طور مـؤثری مصـرف‌کننـدگان خانگی را به مصرف کمتر در ساعات پیک تشویق کرد. این کـار را می‌تـوان بـا اسـتفاده از الگـوریتم هـای پیش‌بینـی، ماننـد شـبکه عصـبی در ترکیـب بـا بهینه‌سازی برای پیش‌بینی منحنی تقاضای مشترکین و میزان تولید صـفحات خورشیدی به منظور بهبود پروفایل بار استفاده‌کرد؛ کاری کـه در [۸۴] بـه آن پرداخته‌شده‌است. ثابت شده‌است که علاوه بر بهبود پروفایل بار، ضریب قـدرت و هزینه‌های برق مصرفی مشترکین را نیز می‌تـوان کـاهش داد. بـا توجـه بـه جذابیّت سیستم‌های مـدیریت انـرژی در پژوهش‌هـای اخیـر، امکـان ترکیـب سیستم‌های مدیریت انرژی با برنامه‌های پاسخ‌گویی بار به منظورهای مختلـف خصوصاً انتفاع اقتصادی مشترکین وجود دارد [۸۰].

در [۷۸] یک برنامه بهره‌برداری از DG ها و سیسـتم‌های ذخیـره انـرژی باتری ارائه‌شده‌است. هدف، حداقل‌سازی سوخت و کاهش هزینه‌های تجهیزات با استفاده‌ی بهینه از ظرفیّت تجهیزات در حضور پاسخ‌گویی تقاضا بوده که در این روش محقّق شده و همچنین کاهش توان مازاد را برآورده ساخته‌است. در [۶۹] روشی جدید برای افزایش تـأثیر سیسـتم‌های الکتریکـی و حرارتـی بـه عنوان دو بخش مهم از ریزشبکه‌های هوشـمند آینـده ارائه‌شده‌است. در ایـن پژوهش از پاسخ‌گویی بار به عنوان یک امکان بالقوّه بـرای کـاهش هزینـه‌های بهره‌برداری استفاده‌شده‌است. شبیه‌سازی‌های انجام‌شده نشان می‌دهـد کـه در حضور برنامه‌های پاسخ‌گویی بار و ذخیره‌سازهای انرژی حرارتـی و الکتریکـی، هزینه‌های بهره‌برداری به‌شدّت کاهش می‌یابد.

حضور برنامه‌های پاسخ‌گویی بار در ریزشبکه‌های DC نیـز بسـیار مفیـد و درخور توجه است. در ریزشبکه‌های DC می‌توان با برنامه‌ریزی هوشمند بـرای شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی به کاهش بار پیک و بهبود پروفایـل ولتـاژ کمـک کـرد [۸۷]. البتّـه نحـوه اعمـال برنامـه‌های پاسـخ‌گویی تقاضـا بـا درنظرگرفتن حجم قابل توجـه خودروهـای الکتریکـی در کنـار عـدم قطعیّـت منـابع تجدیدپـذیر یـک چـالش اسـت. درصـورت اجـرای طـرح و برنامـه‌های مناسب، می‌تـوان ایـن چـالش را بـه فرصـت تبـدیل کـرد. چـرا کـه کـاربران خودروهای الکتریکی، می‌توانند در پیک‌سـایی شـرکت داشته‌باشـند و معاملـه برد-برد برای شبکه و مشترکین محقّق می‌گردد [۸۸].

مزیـت دیگـر ایـن برنامـه‌ها، بهبـود پروفایـل بـار اسـت. پروفایـل بـار مصرف‌کننده در حضـور برنامـه‌های پاسـخ‌گویی بـار بهتـر می‌توانـد خروجـی ژنراتورهای تجدیدپذیر را دنبال کند. شبیه‌سازی‌های انجام‌شده در [۸۹] نشان می‌دهد که حضور برنامه‌های پاسخ‌گویی بار در ریزشبکه‌های به‌هم‌پیوسته نیـز قادر است هزینه‌های انرژی و توان مصرفی را کاهش دهد.

استفاده از برنامه‌های پاسخ‌گویی بار بـه همـراه اسـتراتژی‌های جـانبی بـه جهت غلبه بر عدم قطعیّت می‌توانـد نتـایج منطقی‌تـری بـه‌دنبال داشته‌باشـد [۹۰،۹۱]. استفاده از واحدهای تولید حرارتی در کنار PVها و تولیدات بادی و همچنین سیستم‌های ذخیره انرژی برای دست‌یابی به انرژی امـن و اقتصـادی نیروگاه‌هـای تجدیدپـذیر در پـژوهش انجام‌شـده در [۹۰] پیشـنهاد می‌شـود. سپس با هدف حداقل‌سـازی هزینـه تولیـد در ریزشـبکه و براسـاس اطلاعـات خروجی از تولیدات تجدیدپذیر می‌توان اسـتراتژی پاسخ‌گویی بـار را بـر اسـاس قیمت برق اجـرا کـرد. ثابـت می‌شـود کـه ایـن مسـأله تـأثیر بـه سـزایی در پیک‌سایی و دره‌زدایی و همچنین کاهش هزینه‌های تولیـد در ریزشـبکه دارد. با توجه به پیشینه پژوهش و اهمیّت موضوع، تحقیقـات در ایـن حـوزه رو بـه افزایش است.

۴-۵- مسائل مرتبط با طراحی ریزشبکه

انتخاب نوع ریزشبکه را باید با توجه به شاخص‌هایی از قبیل : پایداری، قابلیّـت اتصال به شبکه، ظرفیّت کلی، منابع و زیرسـاخت‌های موجـود انجـام داد [۷]. ظرفیّت کل ریزشبکه مورد نیاز، مسأله مهمّی برای طرّاحی آن اسـت چـرا کـه در ظرفیّت‌های پایین امکان عدم تعادل زیاد است. در ریزشبکه‌های با ظرفیّـت بالا به دلیل زیاد بودن ظرفیّت تولید و تقاضای شـبکه، اینرسـی بـالایی وجـود دارد و تغییر در شرایط بارها و توان تولیدی نوسـانات کمتـری ایجـاد می‌کنـد [۷]. معمولاً برای کنترل نوسانات و تغییرات قدرت، به‌منظور طرّاحی ریزشبکه لازم است ظرفیّت منابع موجود نیز درنظرگرفته‌شود [۷].

مسأله مهم دیگـر انتخـاب نـوع ولتـاژ ریزشـبکه اسـت. برخـی از منـابع غیرسنکرون موجود (صفحات خورشیدی و نیروگاه‌های بـادی) ولتـاژ خروجـی DC و برخی دیگر ولتاژ AC با سطوح ولتاژ مختلـف تولیـد می‌کننـد کـه ایـن عوامل در شرایط مربـوط بـه انتخـاب ولتـاژ و جریـان ریزشـبکه تعیین‌کننـده هسـتند [۷]. از طرفـی، بـا توجـه بـه اینکـه زیرسـاخت‌های موجـود غالبـاً ACهستند، ریزشبکه‌های متصـل بـه شـبکه از نـوع AC انتخـاب می‌شـوند و ریزشبکه‌های جدا از شبکه از نوع DC ولتاژ پایین هستند کـه تلفـات کمتـری نسبت به نوع AC دارند و همچنین بـا پیشـرفت الکترونیـک قـدرت در آینـده امکان اتصال آنها به شبکه وجود خواهدداشت [۷].

۴-۶- اتصال ریزشبکه‌ها به یکدیگر

ظرفیّت محدود ریزشبکه‌ها یکی از مشکلات بزرگ آنهاست که باعث توسـعه و تکامل ریزشبکه‌های به‌هم‌پیوسته[4] شده‌است. این شبکه‌ها، یک مجموعه‌ی به-هم‌پیوسته از ریزشبکه‌ها هستند که می‌تواننـد بـا یـا بـدون پشـتیبانی شـبکه اصلی کار کنند [۳]. مشکلات ریزشبکه‌های جزیـره‌ای از قبیـل الگـوی متغیّـر تولیدات تجدیدپذیر و عدم قطعیّت‌های بار خصوصاً در ریزشبکه‌هـای DC کـه اتصال آنها به شبکه اصلی دشوار است، می‌طلبد که از اتصال چند ریزشبکه بـه یکدیگر استفاده گردد [۱۵]. افزایش قابلیّت اطمینان، طـول عمـر و بهـره‌وری

1. Self-sufficiency
2. Time-of-use
3. Real-Time

4. Multi-microgrid

سیستم، امکان استفاده جامع از تمام ظرفیّت‌های تجدیدپذیر در کل ریزشبکه و نتیجتاً بهره‌برداری بهینه از مزایای این نوع شبکه‌هاست [۱۵]. مضاف‌براین، در ریزشبکه‌های به‌هم‌پیوسته، تأثیرات تغییر در تولید در اثر شرایط مختلفِ آب و هوایی کمتر می‌شود و همچنین نیازهای ذخیره‌سازی انرژی و متعاقباً هزینه‌های بهره‌برداری به طور مؤثری کاهش می‌یابد [۱۶].

۵- بحث و بررسی

با توجه به تفاوت‌های ساختاری بین ریزشبکه‌ها و سیستم‌های قدرت سنتی، هر بخشی از مطالعات در حوزه‌ی ریزشبکه‌ها با چالش‌های جدیدی رو به روست. بیشترین این چالش‌ها مرتبط با تولیدات تجدیدپذیر و پراکندگی منابع تولید است که مسائلی از قبیل عدم قطعیت، تخریب کیفیت توان و ... را در پی دارد. بخش مهمی از مشکلات ایجاد شده به علت ایجاد ناپایداری در اثر اینرسی پایین ریزشبکه است که تاکنون راهکارهایی از قبیل استفاده از چرخ طیار، ذخیره‌سازهای باتری و استفاده از منابع سنتی انرژی برای آن ارائه شده است. از طرفی ذخیره‌سازهای انرژی خود با مشکلات متعددی از جمله حفظ بالانس حالت شارژ، هماهنگی بین ذخیره‌سازها و مسائل اقتصادی روبرو هستند. اتصال ریزشبکه‌ها به یکدیگر نیز-که خود به عنوان راهکاری برای

جدول ۱ مرور برخی از مهم‌ترین چالش‌های مورد توجه در پیشینه‌ی تحقیق

حوزه کاری	چالش‌های مرتبط
پایداری ولتاژ و فرکانس	مسائل ناپایداری در حالت اتصال به شبکه اصلی اینرسی پایین ریزشبکه و منابع تجدیدپذیر و کنترل آن مسائل مرتبط با کنترل دروپ آسیب پذیری و ناپایداری ولتاژ باس در ریزشبکه های DC در اثر تغییرات تولیدات تجدیدپذیر مسائل ناپایداری و بازگردانی ولتاژ در حضور ژنراتورهای بادی ناپایداری گذرا در ریزشبکه های DC و هیبرید ناپایداری در اثر از دست رفتن واحد تولید ناپایداری‌های مرتبط با بارها
ذخیره‌کننده‌های انرژی	حفظ بالانس حالت شارژ در واحدهای ذخیره‌ی انرژی ابعاد ذخیره‌کننده‌های انرژی و مسائل اقتصادی آن مسائل مرتبط با خودروهای الکتریکی هماهنگی بین چرخ طیار با سیستم‌های ذخیره انرژی باتری و ژنراتورها و مسائل کنترلی مرتبط
کانورترها	طراحی کانورترها کنترل کانورترها
ریزشبکه‌های به‌هم پیوسته	کنترل پخش بار بین ریزشبکه‌ها مدیریت تجمع تولیدات پراکنده زیرساخت‌های ارتباطی بهبود پروفایل ولتاژ، بهبود بهره‌وری و قابلیت اطمینان
مدیریت انرژی	بهینه‌سازی مدیریت انرژی در حضور برنامه‌های پاسخ‌گویی بار مدیریت سمت تقاضا مسائل زیست‌محیطی مدیریت تجهیزات ذخیره انرژی مشترکین بالانس انرژی و افزایش قابلیت اطمینان
مدیریت حالت‌های مختلف کاری- مدیریت برقراری ارتباط بین سطوح مختلف ولتاژ در ریزشبکه‌های DC	انتقال اتوماتیک بین حالت‌های مختلف بهره برداری مسائل مربوط به ریزشبکه‌های دوقطبی (ارتباط بین سطوح مختلف ولتاژ)
ریزساخت‌های ارتباطی	تأخیرهای ارتباطی استفاده از سیستم‌های ارتباطی مختلف
ریزشبکه‌های سازمانی و نظامی	آنالیزهای اقتصادی و فنی، طراحی و بهره‌برداری مسائل کنترلی
بازار برق	کاهش مصرف انرژی و هزینه‌های سوخت بهره‌برداری بهینه از ریزشبکه‌های خاص

افزایش ظرفیت ریزشبکه‌ها و بهبود قابلیت اطمینان و پایداری ریزشبکه‌ها پیشنهاد شده‌است- با چالش‌های قابل توجهی در حوزه‌ی پخش بار، زیرساخت‌های ارتباطی لازم و مدیریت تولیدات مختلف تجدیدپذیر رویاروست. در جدول ۱ مجموعه ای از مهم‌ترین چالش‌های پیش روی ریزشبکه در حوزه‌های کاری مختلف ذکرشده است. در بخش‌های قبلی برخی از راهکارهایی که در پیشینه تحقیق برای حل این چالش‌ها ارائه شده، بیان گردید. با این وجود خلاءهای پژوهشی بسیاری وجود دارد که انجام کارهای بیشتر را می‌طلبد.

۶- جمع‌بندی

با توجه به عدم سازگاری سیستم‌های قدرت سنتی با مشکلات ناشی از منابع انرژی تجدیدپذیر، استفاده از بستر ریزشبکه برای افزایش امکان بهره‌برداری از این منابع خدادادی ضروری است. در این مقاله با مرور جدیدترین پژوهش-های انجام‌شده، اجزا، مفاهیم و کاربری‌های ریزشبکه معرفی شده و جدیدترین چالش‌های پیش روی آن‌ها بررسی گردید. تفاوت‌های ساختاری بین ریزشبکه‌ها و سیستم‌های قدرت سنتی موجب شده که در هر بخش از شبکه از جمله بارها، منابع تولید و ... چالش‌ها و فرصت‌های جدیدی پیش روی بهره‌برداران سیستم قدرت قرار گیرد. به علاوه، اجزا و مفاهیم تازه از قبیل ذخیره‌سازها، کانورترها، زیرساخت‌های ارتباطی و ... رویارویی با مسائل غیرمنتظره و بعضاً پیچیده‌ای را در پی داشته‌است. همچنین نصب منابع تولید در نزدیکی تقاضا و شارش دوجهته‌ی توان مسائل جدیدی را در بازار برق موجب شده که نیازمند کارهای پژوهشی بیشتر است. افزون بر این، در ریزشبکه ارتباط کلی بین ولتاژها، زاویه‌ها و پخش‌بار اکتیو و راکتیو با سیستم‌های قدرت سنّتی متفاوت است و این مساله باعث ناکارآمدی قوائد سنتی پخش بار شده است. چالش‌ها و فرصت‌های جدید در حوزه‌های دیگر از قبیل طراحی، برنامه‌های پاسخ‌گویی بار، سیستم مدیریت انرژی و ... نیز در این مقاله مورد بحث و بررسی قرار گرفت. از مرور پژوهش‌های انجام‌شده می-توان نتیجه گرفت که با وجود چالش‌های پیش رو، ریزشبکه بهترین بستر برای بهره‌وری اقتصادی و زیست‌محیطی از انرژی‌های تجدیدپذیر تلقی می-شود و در آینده‌ی نزدیک در مقیاس وسیعی مورد استفاده قرار خواهد گرفت. از این رو، ریزشبکه به شدت مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته و مسائل مرتبط با آن و خلاءهای موجود، فرصت‌های پژوهشی زیادی را بوجود آورده-است.

۷- مراجع

[1] L. Liu, M. Tsai, C. Hsu, K. Lo and Y. Chang, Design of an energy storage converter for microgrid applications, *2015 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, Palermo, pp. 305-310, 2015.

[2] A. S. Dobakhshari, S. Azizi and A. M. Ranjbar, Control of microgrids: Aspects and prospects, *2011 International Conference on Networking, Sensing and Control*, Delft, 2011, pp. 38-43.

[3] Faisal Mumtaz, Islam Safak Bayram, Planning, Operation, and Protection of Microgrids: An Overview, *Energy Procedia*, Vol. 107, pp. 94-100, 2017.

[4] M. Farrokhabadi et al., Microgrid Stability Definitions, Analysis, and Examples, in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 35, no. 1, pp. 13-29, Jan. 2020.

[5] J. Zeng, Q. Wang, J. Liu, J. Chen and H. Chen, A Potential Game Approach to Distributed Operational Optimization for Microgrid Energy Management With Renewable Energy and Demand Response, *in IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 6, pp. 4479-4489, June 2019.

[6] Faisal R. Badal, Purnima Das, Subrata K. Sarker and Sajal K. Das, A survey on control issues in renewable energy integration and microgrid, *Protection and Control of Modern Power Systems*, March 2019.

[7] Ritu Shrivastwa, Ahmad Hably, Kaouthar Melizi, Seddik Bacha, Understanding Microgrids and Their Future Trends, *IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT 2019)*, Melbourne, Australia, Feb. 2019.

[8] A. Haghighi and A. Babapoor, Using of renewables energies such as effective way to reduce environmental pollution, *Journal of Renewable and New Energy*, vol. 5, pp. 41-51, 2018. (in Persian)

[9] R. Pourdarbani, Review of Current Status and Future Demand for Renewable Energy in Iran and its Marketing, *Journal of Renewable and New Energy*, vol. 7, pp. 118-124, 2020. (in Persian)

[10] *Explore energy data by category, indicator, country or region*, https://www.iea.org/data-and-statistics.

[11] Kayode Timothy Akindeji, Rémy Tiako, Innocent E. Davidson, Use of Renewable Energy Sources in University Campus Microgrid – A Review, *2019 International Conference on the Domestic Use of Energy (DUE)*, Wellington, South Africa, 25–27 March 2019.

[12] M. Bagheri, E. Zare, A. Abadi and A. Enzebati, Investigating the Effect of Using Renewable Resources on Electricity Supply Demand Presenting a two-objective Mathematical Model, *Journal of Renewable and New Energy*, vol. 6, pp. 38-46, 2019. (in Persian)

[13] S. Abu-Elzait and R. Parkin, Economic and Environmental Advantages of Renewable-based Microgrids over Conventional Microgrids, *2019 IEEE Green Technologies Conference(GreenTech)*, Lafayette, LA, USA, pp. 1-4, 2019.

[14] T. Mohn, Campus microgrids: Opportunities and challenges, *2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, San Diego, CA, pp. 1-4, 2012.

[15] R. Babazadeh-Dizaji and M. Hamzeh, Distributed Hierarchical Control for Optimal Power Dispatch in Multiple DC Microgrids, *in IEEE Systems Journal*, vol. 14, no. 1, pp. 1015-1023, March 2020.

[16] U. Vuyyuru, S. Maiti and C. Chakraborty, Active Power Flow Control Between DC Microgrids, *in IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 10, no. 5, pp. 5712-5723, Sept. 2019.

[17] C. Marnay, N. DeForest and J. Lai, A green prison: The Santa Rita Jail campus microgrid, *2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, San Diego, CA, pp. 1-2, 2012.

[18] P. Brijesh, K. Jiju, P. R. Dhanesh and A. Joseph, Microgrid for sustainable development of remote villages, *TENCON 2019 - 2019 IEEE Region 10 Conference (TENCON)*, Kochi, India, pp. 2433-2438, 2019.

[19] G. V. Somanath Reddy, V. P. Mini, N. Mayadevi and R. Hari Kumar, Optimal Energy Sharing in Smart DC Microgrid Cluster, 2020 IEEE International Conference on Power Electronics, *Smart Grid and Renewable Energy (PESGRE2020)*, Cochin, India, pp. 1-6, 2020.

[20] A. A. Khodadoost Arani and G. B. Gharehpetian, Enhancement of microgrid frequency control subsequent to islanding process using flywheel energy storage system, *2014 Smart Grid Conference (SGC)*, Tehran, pp. 1-6, 2014.

[21] N. Beg, A. Armstorfer, A. Rosin and H. Biechl, Mathematical Modeling and Stability Analysis of a Microgrid in Island Operation, *2018 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)*, Sevilla, pp. 1-6, 2018.

[22] F. Gonzalez-Espin, V. Valdivia, D. Hogan, D. Diaz and R. F. Foley, Operating modes of a commercial and industrial building microgrid with electrical generation and storage, 2014 *IEEE 5th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*, Galway, pp. 1-5,2014.

[23] Tan Shucheng, Dong Ge, Zhang Hui, Zhi Na, Xiao Xi, Virtual DC machine control strategy of energy storage converter in DC microgrid, *2016 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC)*, Ottawa, ON, Canada, 12-14 Oct. 2016.

[24] T. K. Roy, M. A. Mahmud, A. M. T. Oo, M. E. Haque, K. M. Muttaqi and N. Mendis, Nonlinear adaptive backstepping controller design for controlling bidirectional power flow of BESSs in DC microgrids, *2016 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, Portland, OR, pp. 1-8, 2016.

[25] Z. Yi, X. Zhao, D. Shi, J. Duan, Y. Xiang and Z. Wang, Accurate Power Sharing and Synthetic Inertia Control for DC Building

Solution, *2019 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, Macao, Macao, pp. 1-5, 2019.

[44] M. Brenna, F. Foiadelli, M. Longo, S. Bracco and F. Delfino, Smart microgrids in smart campuses with electric vehicles and storage systems: Analysis of possible operating scenarios, *2016 IEEE International Smart Cities Conference (ISC2)*, pp. 1-6, Trento, 2016.

[45] A. Vukojevic, Lessons learned from microgrid implementation at electric utility, 2018 *IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*, Washington, DC, pp. 1-5, 2018.

[46] Wang Hui, Wu Zhenxi, Guangze Shi, Liu Zhangjie, SOC Balancing Method for Hybrid Energy Storage System in Microgrid, *2019 3rd IEEE International Conference on Green Energy and Applications (ICGEA)*, Taiyuan University of Technology, China, March 16-18, 2019.

[47] K. Nisha and D. N. Gaonkar, Predictive Control of Three Level Bidirectional Converter in Bipolar DC Microgrid for EV Charging Stations, 2020 *IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid and Renewable Energy (PESGRE2020)*, Cochin, India, pp. 1-6, 2020.

[48] G. Oriti, N. Anglani and A. L. Julian, Hybrid Energy Storage Control in a Remote Military Microgrid With Improved Supercapacitor Utilization and Sensitivity Analysis, *in IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 55, no. 5, pp. 5099-5108, Sept.-Oct. 2019.

[49] D. M. R. Korada, M. K. Mishra and R. S. Yallamilli, Dynamic Energy Management in DC Microgrid using Composite Energy Storage System*, 2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid and Renewable Energy (PESGRE2020)*, Cochin, India, pp. 1-6, 2020.

[50] J. Wang, M. Wang, H. Li, W. Qin and L. Wang, Energy Management Strategy for Microgrid Including Hybrid Energy Storage, *2018 Asian Conference on Energy, Power and Transportation Electrification (ACEPT)*, Singapore, pp. 1-6, 2018.

[51] Y. R. Rodrigues, M. R. Monteiro, A. C. Zambroni de Souza, P. F. Riberiro, L. Wang and W. Eberle, Adaptative Secondary Control for Energy Storage in Island Microgrids, *2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, Portland, OR, pp. 1-5, 2018.

[52] A. Solanki and A. Nasiri, Energy storage size and fuel consumption reduction in a microgrid using virtual droop control framework, *2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Milwaukee, WI, pp. 1-5, 2016.

[53] Markus Ovaskainen, Jyri Öörni, Aki Leinonen, Superposed control strategies of a BESS for power exchange and microgrid power quality improvement*, 2019 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2019 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, Genova, Italy, 11-14 June 2019.

[54] Ryszard Pawelek, Irena Wasiak, Piotr Gburczyk, R Mienski, on operation of energy storage in electrical power microgrid - Modeling and simulation, *14th International Conference on Harmonics and Quality of power (ICHQP)*, Bergamo, Italy, 26-29 Sep. 2010.

[55] M. F. Shaaban, S. Mohamed, M. Ismail, K. A. Qaraqe and E. Serpedin, Joint Planning of Smart EV Charging Stations and DGs in Eco-Friendly Remote Hybrid Microgrids, *in IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 10, no. 5, pp. 5819-5830, Sept. 2019.

[56] A. Saleh, A. Awad and W. Ghanem, Modeling, Control, and Simulation of a New Topology of Flywheel Energy Storage Systems in Microgrids, *in IEEE Access*, vol. 7, pp. 160363-160376, 2019.

[57] Wencong Su, Tao Jin and Shaohui Wang, Modeling and simulation of short-term energy storage: Flywheel, *2010 International Conference on Advances in Energy Engineering*, Beijing, pp. 9-12, 2010.

[58] A. M. Aly, A. M. Kassem, K. Sayed and I. Aboelhassan, Design of Microgrid with Flywheel Energy Storage System Using HOMER Software for Case Study, *2019 International Conference on Innovative Trends in Computer Engineering (ITCE)*, Aswan, Egypt, pp. 485-491, 2019.

Microgrids With Guaranteed Performance, *in IEEE Access*, vol. 7, pp. 63698-63708, 2019.

[26] S. Roy, S. Nayar, S. Kumar, A. Alam and T. Ghose, Bidirectional Power Flow in DC Microgrid and its Islanding Detection Using Support Vector Machine, *2019 International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICCS)*, Madurai, India, pp. 42-47,2019.

[27] R. Sabzehgar, A review of AC/DC microgrid-developments, technologies, and challenges, *2015 IEEE Green Energy and Systems Conference (IGESC)*, Long Beach, CA, pp. 11-17, 2015.

[28] Y. Han, X. Ning, P. Yang and L. Xu, Review of Power Sharing, Voltage Restoration and Stabilization Techniques in Hierarchical Controlled DC Microgrids, in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 149202-149223, 2019.

[29] Chendan Li, Tomislav Dragicevic, Nelson L. Diaz, Juan C. Vasquez, Josep M. Guerrero, Voltage scheduling droop control for State-of-Charge balance of distributed energy storage in DC microgrids, *2014 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON)*, Cavtat, Croatia, 13-16 May 2014.

[30] X. Li, Z. Li, L. Guo, J. Zhu, Y. Wang and C. Wang, Enhanced Dynamic Stability Control for Low-Inertia Hybrid AC/DC Microgrid With Distributed Energy Storage Systems, *in IEEE Access*, vol. 7, pp. 91234-91242, 2019.

[31] D. Truong, M. N. Thi, H. Le, V. Do, V. Ngo and A. Hoang, Dynamic Stability Improvement Issues with a Grid-Connected Microgrid System, *2019 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE)*, Dong Hoi, Vietnam, pp. 214-218, 2019.

[32] S. Mirsaeidi, X. Dong, S. Shi and D. Tzelepis, Challenges, advances and future directions in protection of hybrid AC/DC microgrids, *in IET Renewable Power Generation*, vol. 11, no. 12, pp. 1495-1502, Nov. 2017.

[33] P. Lin et al., A Distributed Power Management Strategy for Multi-Paralleled Bidirectional Interlinking Converters in Hybrid AC/DC Microgrids, *in IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 10, no. 5, pp. 5696-5711, Sept. 2019.

[34] Z. Liu, S. Miao, Z. Fan, J. Liu and Q. Tu, Improved power flow control strategy of the hybrid AC/DC microgrid based on VSM, *in IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 13, no. 1, pp. 81-91, Jon. 2019.

[35] S. Mohamed, M. F. Shaaban, M. Ismail, E. Serpedin and K. A. Qaraqe, An Efficient Planning Algorithm for Hybrid Remote Microgrids*, in IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 10, no. 1, pp. 257-267, Jan. 2019.

[36] L. Hadjidemetriou et al., Design factors for developing a university campus microgrid, *2018 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON)*, Limassol, 2018, pp. 1-6.

[37] N. Savic, V. Katic, B. Dumnic, D. Milicevic, Z. Corba and N. Katic, Cost-benefit analysis of the application of a distributed energy sources in the university campus microgrid proposal*, IEEE EUROCON 2019 -18th International Conference on Smart Technologies*, Novi Sad, Serbia, pp. 1-6, 2019.

[38] S. C. Shabshab et al., Demand Smoothing in Military Microgrids Through Coordinated Direct Load Control, *in IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 11, no. 3, pp. 1917-1927, May 2020.

[39] T. Podlesak et al., Auto-Tuning for Military Microgrids, *2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Baltimore*, MD, USA, pp. 6270-6277, 2019.

[40] B. Blanco-Contreras, J. Meneses-Silva, P. Mendoza-Araya and G. Jiménez-Estévez, Effect of constant power load models on the stability of isolated Microgrids, *2019 IEEE CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)*, Valparaiso, Chile, pp. 1-6, 2019.

[41] *International Renewable Energy Agency, Renewable energy sources*, https://www.irena.org/.

[42] Syed Qalb-E-Abbas Kazmi, Abdul Waheed Khawaja, Zunaib Maqsood Haider, Tauheed-ur-Rahman, Syed Muhammad Ali Musa Kazmi, Voltage Stability of Wind Turbine Based Micro Grid Using Simulation Platforms, *2019 International Conference on Power Generation Systems and Renewable Energy Technologies (PGSRET)*, Istanbul, Turkey, 26-27 Aug. 2019.

[43] S. Arif, A. E. Rabbi and T. Aziz, Post-Fault Operation Scenerio in a Wind Integrated Microgrid: Voltage Recovery Issue and

loss of units, *2019 IEEE 58th Conference on Decision and Control (CDC)*, Nice, France, pp. 3266-3271, 2019.
[76] H. Du, S. Liu, Q. Kong, W. Zhao, D. Zhao and M. G. Yao, A microgrid energy management system with demand response, *2014 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*, Shenzhen, pp. 551-554, 2014.
[77] D. Y. Yamashita, I. Vechiu and J. P. Gaubert, Hierarchical Control Structure for Optimising Building Microgrid Self-consumption, *2019 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)*, Porto, Portugal, pp. 1-6, 2019.
[78] M. Sugimura, T. Senjyu, N. Krishna, P. Mandal, M. Abdel-Akher and A. M. Hemeida, Sizing and Operation Optimization for Renewable Energy facilities with Demand Response in Micro-grid, *2019 20th International Conference on Intelligent System Application to Power Systems (ISAP)*, New Delhi, India, pp. 1-5, 2019.
[79] H. Haddadian and R. Noroozian, Multi-Microgrid-Based Operation of Active Distribution Networks Considering Demand Response Programs, *in IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 10, no. 4, pp. 1804-1812, Oct. 2019.
[80] S. B. Raha and D. Biswas, Fuzzy Controlled Demand Response Energy Management for Economic Microgrid Planning, *2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid and Renewable Energy (PESGRE2020)*, Cochin, India, pp. 1-6, 2020.
[81] M. H. Imani, K. Yousefpour, M. T. Andani and M. Jabbari Ghadi, Effect of Changes in Incentives and Penalties on Interruptible/Curtailable Demand Response Program in Microgrid Operation, *2019 IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC)*, College Station, TX, USA, pp. 1-6, 2019.
[82] D. Papadaskalopoulos, D. Pudjianto and G. Strbac, Decentralized Coordination of Microgrids With Flexible Demand and Energy Storage, *in IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 5, no. 4, pp. 1406-1414, Oct. 2014.
[83] P. U. Herath et al., Computational Intelligence-Based Demand Response Management in a Microgrid, *in IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 55, no. 1, pp. 732-740, Jan.-Feb. 2019.
[84] Hossein Mohammadi Rouzbahani, Abolfazl Rahimnezhad, Hadis Karimipour, Smart Households Demand Response Management with Micro Grid, *2019 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*, Feb. 2019.
[85] M. Vahedipour-Dahraie, H. Rashidizadeh-Kermani, M. Shafie-Khah, M. Lotfi and J. P. S. Catalão, Economic-Reliability Risk-Constrained Scheduling for Resilient-Microgrids Considering Demand Response Actions, *IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Lisbon, Portugal, pp. 4139-4144, 2019.
[86] A. Aderibole, H. H. Zeineldin, M. Al Hosani and E. F. El-Saadany, Demand Side Management Strategy for Droop-Based Autonomous Microgrids Through Voltage Reduction, *in IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 34, no. 2, pp. 878-888, June 2019.
[87] H. Dagdougui, A. Ouammi and L. A. Dessaint, Peak Load Reduction in a Smart Building Integrating Microgrid and V2B-Based Demand Response Scheme, *in IEEE Systems Journal*, vol. 13, no. 3, pp. 3274-3282, Sept. 2019.
[88] Y. Li and K. Li, Incorporating Demand Response of Electric Vehicles in Scheduling of Isolated Microgrids With Renewables Using a Bi-Level Programming Approach, *in IEEE Access*, vol. 7, pp. 116256-116266, Aug. 2019.
[89] Min Fu, Zhiyu Xu, Xiaoyu Lyu, Weisheng Xu, Ning Wang, Two-Stage Load-Source Coordination for Multi-Microgrid System: a Joint Approach of Demand Response and Peer-to-Peer Transaction, *Proceedings of the 38th Chinese Control Conference*, Guangzhou, China, 27-30 July, 2019.
[90] Y. Zhang, H. Zhang, Y. Wang and J. Wu, Optimized Scheduling Model for Isolated Microgrid of Wind-Photovoltaic-Thermal-Energy Storage System With Demand Response, *2019 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*, Wellington, New Zealand, pp. 1170-1175, 2019.
[91] S. Hadayeghparast, A. S. Farsangi, H. Shayanfar and H. Karimipour, Employing Composite Demand Response Model in Microgrid Energy Management, *2019 IEEE 7th International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE)*, Oshawa, ON, Canada, pp. 37-41, 2019.
[59] J. Hou, Z. Song, H. Hofmann and J. Sun, Control Strategy for Battery/Flywheel Hybrid Energy Storage in Electric Shipboard Microgrids, *in IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Feb. 2020.
[60] S. Rokocakau, H. Mudaliar, D. Kumar, D. Aitchison, M. Cirrincione and A. Mohammadi, A Flywheel Energy Storage System in a Microgrid for Powering Small Villages in Remote Islands in the South Pacific, *2019 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, Melbourne, Australia, pp. 338-342, 2019.
[61] A. Khodadoost Arani, G. Gharehpetian and B. Zaker, Modeling and Simulation of Flywheel Energy Storage System as V/f Reference in Islanded Microgrid, *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*, vol. 13, pp. 11-18, 2016. (In Persian)
[62] J. Ning, J. Zeng and X. Du, A Four-port Bidirectional DC-DC Converter for Renewable Energy-Battery-DC Microgrid System, *2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Baltimore, MD, USA, pp. 6722-6727, 2019.
[63] D. Cornforth, T. Moore and S. Sayeef, Challenges and opportunities for inverters in microgrids, *IECON 2011 - 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Melbourne, VIC, pp. 3111-3116, 2011.
[64] S. Beheshtaein, M. Savaghebi, J. C. Vasquez and J. M. Guerrero, Protection of AC and DC microgrids: Challenges, solutions and future trends, *IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Yokohama, pp. 005253-005260, 2015.
[65] Eric Harmon, Utku Ozgur, Mehmet Hazar Cintuglu, Ricardo de Azevedo, Kemal Akkaya, Osama A. Mohammed, The Internet of Microgrids: A Cloud-Based Framework for Wide Area Networked Microgrids, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Volume: 14 , Issue: 3 , pp. 1262–1274, March 2018.
[66] D. Sharma, A. Dubey, S. Mishra and R. K. Mallik, A Frequency Control Strategy Using Power Line Communication in a Smart Microgrid, *in IEEE Access*, vol. 7, pp. 21712-21721, 2019.
[67] Y. Khayat et al., Estimation-based Consensus Approach for Decentralized Frequency Control of AC Microgrids, *2019 21st European Conference on Power Electronics and Applications (EPE '19 ECCE Europe)*, Genova, Italy, pp. 1-8, 2019.
[68] Lai Jingang, Lu Xiaoqing, Yu Xinghuo, Stochastic Distributed Frequency and Load Sharing Control for Microgrids With Communication Delays, *IEEE Systems Journal*, PP 99, Feb. 2019.
[69] Sobhan Dorahaki, Rahman Dashti, Hamid Reza Shaker, The Optimal Energy Management in the Smart Microgrid Considering Demand Response Program and Energy Storage, *2019 International Symposium on Advanced Electrical and Communication Technologies (ISAECT)*, Rome, Italy, 27-29 Nov. 2019.
[70] B. Namvar, M. Aghashafiei, M. Abolghasemi, M. Moradi-Dalvand and M Ahmadian, Optimal Sizing of DERs in Islanded MG for Supplying Electrical and Thermal Load Considering the Impact of Investment, Operation and Environmental Cost, *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*, vol. 12, pp. 35-46, 2015. (In Persian)
[71] A. T. Eseye, D. Zheng, H. Li and J. Zhang, Grid-Price Dependent Optimal Energy Storage Management Strategy for Grid-Connected Industrial Microgrids, *2017 Ninth Annual IEEE Green Technologies Conference (GreenTech)*, Denver, CO, pp. 124-131, 2017.
[72] F. Feng and P. Zhang, Enhanced Microgrid Power Flow Incorporating Hierarchical Control, in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 35, no. 3, pp. 2463-2466, May 2020.
[73] H. Lahiji, F. B. Ajaei and G. Stevens, Modeling Short Lines for Time-Domain Simulation of the DC Microgrid, *2018 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC)*, Toronto, ON, pp. 1-5, 2018.
[74] Umamaheswararao Vuyyuru, Suman Maiti, Chandan Chakraborty, Universal Active Power Flow Controller with Common Energy Storage Support for DC-microgrids, *IECON 2019-45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Lisbon, Portugal, 14-17 Oct. 2019.
[75] F. K. Bidi, C. Damour, D. Grondin, M. Hilairet and M. Benne, Model Predictive Control for Micro Grid stabilisation in case of