



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

جواد معینی هادی‌زاده<sup>۱\*</sup>

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

\* کاشمر، ۹۶۷۱۹-۹۶۹۴۹، [sjmoini1367@yahoo.com](mailto:sjmoini1367@yahoo.com)

### چکیده

در سال‌های اخیر به دلایلی از قبیل پایان‌پذیری و آلاینده‌گی 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 شده‌است. ریزشبکه یک گروه محلی از منابع و بارهای الکتریکی است که به‌طور معمول به صورت متصل‌شده و همزمان با شبکه برق متمرکز سنتی عمل می‌کند و می‌تواند منابع تولید پراکنده به خصوص منابع انرژی تجدیدپذیر را به‌طور مؤثری با هم ادغام کند. با توجه به تفاوت‌های ساختاری بین ریزشبکه و سیستم‌های قدرت سنتی، چالش‌های متعددی 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 به‌عنوان بستری مناسب برای بهره‌برداری حداکثری از منابع انرژی تجدیدپذیر تلقی شوند و این انتظار می‌رود که سیستم‌های قدرت در آینده از این نوع باشند.

**کلیدواژه‌گان:** 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<sup>1\*</sup>

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

\* P.O.B. 9671996949 Kashmar, Iran, [sjmoini1367@yahoo.com](mailto: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



۱- مقدمه

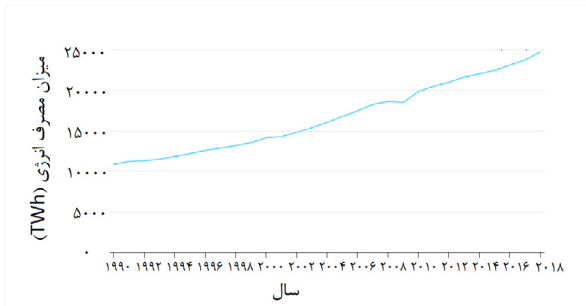
ریزشبکه یک گروه محلی از منابع و بارهای الکتریکی است که به طور معمول به صورت متصل شده و همزمان با سیستم قدرت سنتی عمل می‌کند؛ اما در حالت جزیره‌ای نیز می‌تواند به صورت جداگانه و خودگردان و با اعمال شرایط فیزیکی و اقتصادی مختلف بهره‌برداری شود [۱، ۲]. به‌لحاظ ترتیب، یک ریزشبکه می‌تواند به طور مؤثری تولیدات پراکنده<sup>۱</sup> مختلف (DG)، به خصوص منابع انرژی تجدیدپذیر<sup>۲</sup> (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 قابل کنترل است [۳، ۴]. با تعاریف بیان شده، دو مشخصه 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.



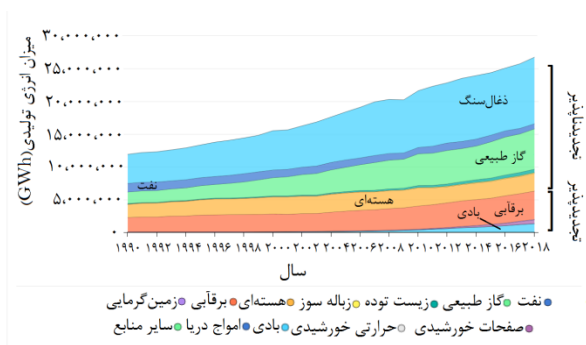
شکل ۱ نمای ظاهری یک ریزشبکه

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 پرداخته شده‌است، نبود زیرساخت و بستر مناسب برای استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر است.

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



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<sup>۳</sup> و هزینه‌ی انرژی را تا حدود ۴۴٪ و تولید گاز کربن‌دی‌اکسید را تا ۸۳٪ نسبت به سیستم‌های سنتی با نیروگاه‌های سوخت فسیلی کاهش دهد [۱۲]. بدین ترتیب ریزشبکه‌ها در حال حاضر، بهترین بستر برای بهره‌وری اقتصادی و زیست محیطی از تولیدات تجدیدپذیر محسوب می‌گردند. در صورت استفاده از تجهیزات و برنامه‌ریزی‌های هوشمند مانند پاسخ‌گویی بار، خودروهای الکتریکی قابل کنترل و اتوماسیون سیستم توزیع و غلبه بر چالش‌های پیش روی، می‌توان بسیاری از ریزشبکه‌ها را به شبکه‌های هوشمند<sup>۴</sup> تبدیل کرد که به آنها اینترنت انرژی<sup>۵</sup> گفته می‌شود و سیستم‌های قدرت آینده را تشکیل خواهند داد [۱۴، ۵، ۲].

در ادامه‌ی این مقاله، اجزاء، مفاهیم، کاربری‌ها، چالش‌ها و فرصت‌های ریزشبکه مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت. در بخش ۲ انواع ریزشبکه‌ها و روش‌های مختلف تقسیم‌بندی آن‌ها معرفی شده و در مورد ساختار هر کدام و مسائل مرتبط با آن‌ها بحث خواهد شد. در بخش ۳ 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 خواهد شد. نهایتاً در بخش ۶ مقاله جمع‌بندی و نتیجه‌گیری می‌گردد.

۲- مروری بر ساختار انواع ریزشبکه‌ها

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

1. Distributed Generation  
2. Renewable Energy Resource



## ۱-۲- ریزشبه‌های جزیره‌ای و متصل به شبکه

در حالت متصل به شبکه، فرکانس و ولتاژ ریزشبه‌ها به شدت متأثر از فرکانس و ولتاژ شبکه اصلی است که این موضوع نقش ریزشبه‌ها را در ارائه‌ی سرویس‌های کمکی محدود می‌سازد [۲۰]. در مقابل در ریزشبه‌های جزیره‌ای، ولتاژ و فرکانس توسط شبکه اصلی پشتیبانی نمی‌شود و این منابع تولید هستند که باید این کمیت‌ها 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 الکتریکی هر کدام از DG ها فراهم گردد که این موضوع جزو دشواری‌های طراحی و پیاده‌سازی ریزشبه‌ها است [۲۱]. به طور کلی بهره‌برداری از ریزشبه‌ها در حالت جزیره‌ای بسیار چالش‌برانگیزتر از سیستم‌های سنتی است [۲۴].

با توجه به اینکه بخش قابل توجهی از ریزشبه‌ها، برخاسته از شبکه‌های توزیع تغییر کاربری داده شده هستند، قابلیت اتصال به شبکه و جزیره‌ای شدن را توأمان دارند. با این چنین امکانی می‌توان مزایای ریزشبه‌های جزیره‌ای و متصل به شبکه را در یک قاب متصور شد. تغییر اتوماتیک حالت‌های کاری ریزشبه‌ها نیز از مسائل مورد علاقه در تاریخچه تحقیق می‌باشد [۲۲].

## ۲-۲- ریزشبه‌های فیزیکی و تجاری

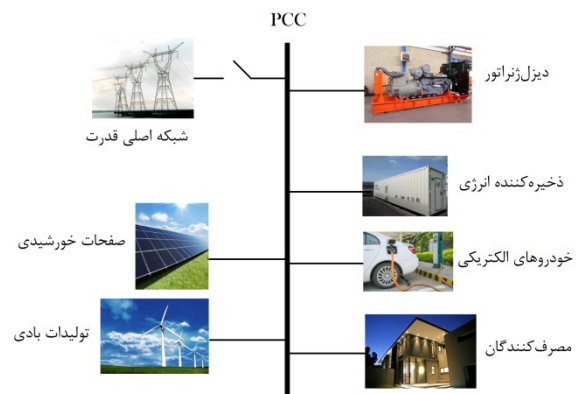
ریزشبه‌ها را می‌توان از دیدگاه فنی و اقتصادی به دو گروه ریزشبه‌های فیزیکی و ریزشبه‌های تجاری تقسیم‌بندی کرد. در نوع فیزیکی همه بارها و منابع از طریق یک نقطه اتصال مشترک (PCC) به یکدیگر وصل می‌شوند. در حالی که در نوع تجاری نقطه اتصال مشترکی وجود ندارد و بارها و منابع می‌توانند به خطوط فشارضعیف (LV) یا فشار متوسط (MV) وصل شوند. ریزشبه‌های فیزیکی به منظور پاسخ‌گویی به تقاضاهای فنی، از جمله بالانس کردن عرضه و تقاضا در شبکه، مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ در حالی که ریزشبه‌های 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، اهمیت بیشتری از مسائل فنی دارند [۷].

## ۳-۲- ریزشبه‌های AC و DC و هیبرید

ریزشبه‌ها 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 ریزشبه‌های AC خصوصاً در نوع متصل به شبکه بیشتر است. همچنین به علت فوق، بیشتر تسهیلات کنترلی ساخته شده و در حال ساخت روی ریزشبه‌های AC تمرکز دارند؛ با این دیدگاه که به دلیل قابلیت استفاده گسترده از اینورترهای الکترونیک قدرت، امکان تبدیل توان DC تولید شده توسط برخی از منابع تجدیدپذیر به AC وجود دارد. در مقابل، ریزشبه‌های DC به دلیل مزایای فراوان از قبیل تلفات کمتر، کاهش مراحل تبدیل انرژی، سادگی در کنترل و بهره‌برداری، فقدان هارمونیک‌ها و مسائل گذرای شبکه‌های AC و عدم نیاز به سنکرونیزم در اتصال منابع به یکدیگر، در شرایطی که نیاز به احداث زیرساخت‌های ریزشبه‌ها وجود دارد، خصوصاً در شرایط جزیره‌ای بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند [۲۳-۲۵]. از طرفی در سال‌های اخیر به دلیل روی‌آوری بیشتر به انرژی‌های تجدیدپذیر خصوصاً

همان گونه که بیان شد ریزشبه‌ها در دو حالت متصل به شبکه و جزیره‌ای مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. ریزشبه‌ها 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 قابلیت انعطاف و قابلیت اطمینان نقش ایفا کنند [۷]. در مقابل، هزینه‌های سرسام آور احداث و بهره‌برداری از خطوط انتقال فرصت مناسبی را برای احداث ریزشبه‌ها در مناطق روستایی و دور از شبکه فراهم آورده است [۱۸، ۱۷]. در این شرایط نصب ریزشبه‌ها جزیره‌ای حداقل هزینه، انرژی و تلفات و همچنین فقدان هزینه‌های قابل توجه انتقال را به همراه دارد [۷، ۳]. ریزشبه‌های 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<sup>۱</sup> (PCC) یا نقطه اتصال داخلی<sup>۲</sup> (POI) به یکدیگر متصل می‌شوند (شکل ۴). در حالی که در ریزشبه‌های جزیره‌ای چنین نقطه اتصالی تعریف نمی‌شود [۳، ۴، ۱۱]. در حالت جدا از شبکه با داشتن



شکل ۴ نقش PCC در یک ریزشبه

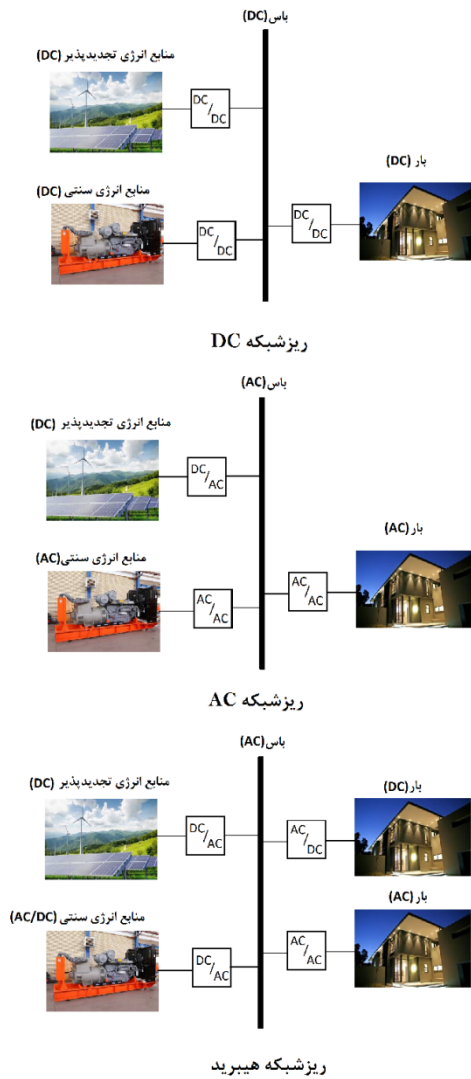
قابلیت بلک‌استارت<sup>۳</sup>، برای سیستم توزیع در شرایط اضطراری و یا وقوع خاموشی<sup>۴</sup> قابلیت انعطاف سیستم بیشتر می‌گردد [۴].

در حالت اتصال به شبکه، به دلیل نفوذ رو به افزایش منابع تجدیدپذیر، اینرسی کل سیستم کاهش می‌یابد. همچنین به زیرساخت‌های کنترلی 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<sup>۵</sup> و سیستم‌های ذخیره انرژی چالش بهینه‌سازی مهمی را سر راه بهره‌برداران این حوزه قرار داده است. در مقابل، کاهش تنش‌های منابع سنتی در صورت همراهی با ذخیره‌کننده‌های ثانویه یا خودروهای الکتریکی و در نتیجه‌ی آن افزایش قابلیت اطمینان و مدیریت سریع‌تر انحرافات فرکانس، از مزایای استفاده از ریزشبه‌ها در اتصال با شبکه اصلی قدرت است [۷]. سه نیاز اصلی برای اتصال ریزشبه‌ها 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]

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



شکل ۵ ریزشبكة های DC، AC و هیبرید [۷]

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

ریزشبکه‌های نظامی گونه‌ای دیگر از ریزشبكة‌ها هستند که در تأسیسات نظامی مورد استفاده قرار می‌گیرند. می‌توان گفت که این ریزشبكة‌ها به دلایلی از قبیل حمل و نقل سوخت به درون ریزشبكة، نیاز به قابلیت اطمینان بالا برای بارها [۳۸]، تعدد ژنراتورهای توان پایین دیزلی تقریباً هم‌اندازه و بارهای القایی زیاد و متغیر، تفاوت‌های زیادی با بقیه ریزشبكة‌ها دارند [۳۹].

### ۳- مروری بر اجزا و بخش‌های مختلف ریزشبكة و مسائل مرتبط ۳-۱- بارها

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

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

در ریزشبكة‌های AC همه بارها و تولیدات به PCC متصل می‌شوند. تبادل توان بین مصرف‌کنندگان و منابع تولید و همچنین بین ریزشبكة و شبکه بالادست از طریق PCC صورت می‌پذیرد [۲۷]. همچنین به منظور افزایش پایداری، امکان مشارکت چندین ریزشبكة‌ی AC با یکدیگر با بهره‌گیری از میدل‌های الکترونیک قدرت که قابلیت تطابق توان اکتیو و راکتیو را دارند، میسر 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]. کیفیت توان بالاتر، تلفات تبدیل انرژی کمتر و امکان پشتیبانی بهتر در بارهای DC، کنترل ساده و بهره‌وری بالاتر از سایر مزایای ریزشبكة‌های DC محسوب می‌شوند [۲۸،۲۹]. در ریزشبكة‌های DC امکان اتصال ساده منابع تجدیدپذیر وجود دارد. صفحات خورشیدی، نیروگاه‌های بادی کوچک یا ریزبادی‌ها<sup>۱</sup> و نیروگاه‌های آبی کوچک یا ریزآبی‌ها<sup>۲</sup> که دارای ولتاژ خروجی DC هستند، امکان اتصال به ریزشبكة‌های نوع DC را دارند.

در ریزشبكة‌های هیبریدی، هر دو نوع منابع AC و DC حضور می‌یابند و باس‌های AC و DC هر دو موجود هستند. بارهای AC، تولیدات بادی و دیزل ژنراتورها به سمت AC شبکه و بارهای DC، صفحات خورشیدی و سایر منابع DC به طرف دیگر شبکه متصل هستند. ارتباط بین دو ریزشبكة معمولاً توسط یک کانورتر<sup>۳</sup> دو جهته صورت می‌پذیرد [۳۰]. PCC نقش مهمی در پخش بار برای این نوع ریزشبكة‌ها ایفا می‌نماید [۷]. این نوع ریزشبكة‌ها مزایای هر دو ریزشبكة‌های AC و DC را دارا هستند و در مقایسه با ریزشبكة‌های AC، در نوع هیبرید اتصال منابع تجدیدپذیر DC، ذخیره‌کننده‌های انرژی و بارها با سهولت و بهره‌وری بیشتری صورت می‌پذیرد [۳۱،۳۲]. علاوه بر تعداد کانورترهای مورد نیاز در این ریزشبكة‌ها کمتر است و این موضوع کاهش هزینه را به دنبال دارد [۳۲،۳۳]. این ریزشبكة‌ها، 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 مهیا بوده و هزینه‌های تبدیل توان نیز به حداقل رسیده است، جذاب به نظر می‌آیند و می‌توان انتظار داشت که ریزشبكة‌های آینده از این نوع باشند [۳۴]. البته باید توجه داشت که در ریزشبكة‌های 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 مناسب تعیین توپولوژی بهینه شبکه، اندازه مناسب تجهیزات و کاهش هزینه‌های بهره‌برداری به ازای سناریوهای مختلف امکان‌پذیر است [۳۵]. در شکل ۵ نمای اختصاری ریزشبكة‌های AC، DC و هیبرید مشاهده می‌شود.

### ۲-۴- ریزشبكة‌های راه دور، سازمانی، صنعتی و نظامی

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

1. Micro wind  
2. Micro hydro  
3. Converter



بروات افزایش می‌یابد، یکی از مسأله مهم در طراحی، ساخت و نصب PV ها، بهینه‌سازی بین اندازه و توان تولیدی است [۷].

**تولیدات بادی:** نیروگاه‌های بادی سنتی یکی از مهم‌ترین تولیدات تجدیدپذیر به کاررفته در ریزشبه‌ها 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 به دنبال دارند [۴۲]. دینامیک‌های نیروگاه‌های بادی با تولیدات سنتی متفاوت است و آثار بادی 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 در PCC را نیز شتاب می‌بخشند. ارائه این راهکار، قابلیت استفاده از نیروگاه‌های بادی بیشتر به همراه اینورتر را در ریزشبه 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 ریزشبه‌ها را دارا هستند [۷]. البته 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، این واحدها نیز به‌عنوان DG در نظر گرفته شوند [۷]. این واحدها به دلیل تولید قابل‌کنترل و امکان همزمان کردن تولید آنها با تقاضا، جزو تولیدات سنکرون محسوب شده و اینرسی شبکه را افزایش می‌دهند [۷].

**بیوماس:** 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 امکان‌پذیر است. 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. **دیزل ژنراتور:** دیزل ژنراتورها 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 ریزشبه‌ها معمول است [۷].

### ۳-۳- تجهیزات ذخیره‌سازی

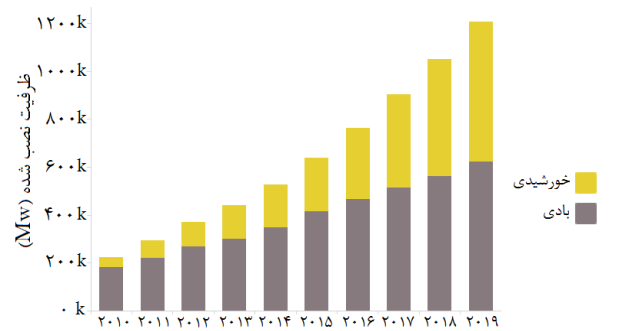
طول سال‌های اخیر دستخوش تغییر شده و چالش‌هایی به همراه آورده‌اند. تأثیر بد بارهای توان ثابت که نوعی از بارهای معمول در ریزشبه‌ها هستند، باعث بدتر شدن پاسخ ولتاژ و فرکانس شبکه به اغتشاشات می‌گردد [۴۰].

### ۲-۳- منابع تولید

با توجه به انگیزه طراحی و بهره‌برداری ریزشبه‌ها، بخش عمده منابع تولید را تولیدات تجدیدپذیر تشکیل می‌دهند؛ هرچند که دیزل ژنراتورها نیز به دلایلی از قبیل پشتیبانی از عدم قطعیت تولیدات تجدیدپذیر و افزایش قابلیت اطمینان شبکه همچنان کاربرد خود را در ریزشبه حفظ کرده‌اند. چشم انداز DG با ترکیب مبدل‌های 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 به‌شدت به آب‌وهوا، اقلیم و موقعیت جغرافیایی وابسته‌اند. تغییرات تولیدات این منابع به‌شدت روی پایداری ریزشبه 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 ریزشبه‌ها 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 دیزل ژنراتورها و ریزآبی‌ها می‌شوند که خروجی قابل کنترل دارند و قادرند اینرسی شبکه را حفظ نمایند [۷]. ذیلاً منابع تولید پرکاربرد در ریزشبه معرفی می‌شوند:

**صفحات خورشیدی<sup>۱</sup> (PV):** با گسترش مبدل‌های الکترونیک قدرت، راه برای استفاده ساده‌تر و بهتر از انرژی خورشید باز شده‌است. مزارع صفحات خورشیدی در سقف خانه‌ها<sup>۲</sup> در سرتاسر جهان در حال افزایش است [۷]. در بیشتر نقاط جهان، توان خورشیدی رسیده به سطح زمین حدود  $1000 \text{ w/m}^2$  است که PV ها تنها ۲۰ درصد آن را می‌توانند کسب کنند [۷]. این مسأله، ظرفیت بالقوه 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 قانداً بدلیل افزایش صفحات خورشیدی است. استفاده از PV ها در ریزشبه، 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-



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

[۴۱]

1. Photo Voltaic
2. Rooftop PVs

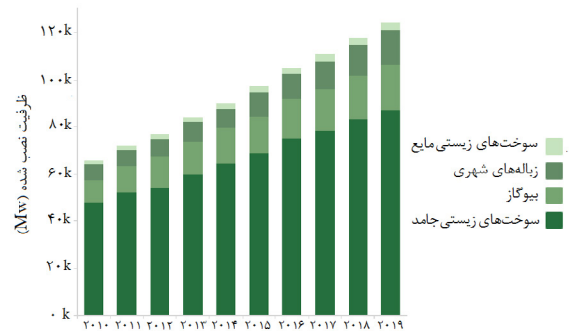
تحقیقات در این حوزه وجود این ظرفیت بالقوه را نشان می‌دهد که بتوان در حالت جزیره‌ای با استفاده از بسته‌های مشارکتی متشکل از هرکدام از واحدهای ذخیره‌ساز، سیستم‌های کنترلی مناسب طراحی کرد که قادر باشد با توجه به باقی‌مانده انرژی ذخیره‌سازها و فرکانس سیستم، عمل تثبیت فرکانس و استقلال از سیستم قدرت اصلی را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

به منظور بهبود در اجرای سیستم‌های ذخیره انرژی و افزایش طول عمر آنها لازم است برخی از شاخصه‌ها و نیازها از قبیل: حفاظت شارژ و دشارژ عمیق، مدیریت حرارتی و کنترل تعادل SOC در نظر گرفته شود [۴۶]. بالانس حالت شارژ چالش مهمی در ذخیره‌کننده‌های انرژی توزیع شده در ریزشبکه‌ها محسوب می‌شود [۴۲، ۵۲]. در [۴۲] یک روش برنامه‌بندی برای ولتاژ ارائه شده 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 مبادله شده در ذخیره‌کننده‌های انرژی می‌تواند بر مبنای تغییرات در حالت شارژ در هر کدام از واحدهای ذخیره انرژی کنترل شود. پژوهش انجام شده در [۴۶] مسأله فوق را در سیستم‌های ذخیره انرژی هیبرید برای اولین بار مطرح ساخته است. در این پژوهش از کنترل متمرکز برای واحدهای محلی و اصلاح کنترل دروپ استفاده شده است [۴۶].

ذخیره‌سازهای انرژی باتری<sup>۲</sup> (BESS) می‌توانند برای مبادله سریع توان اکتیو بین باتری و شبکه به منظور بهبود کیفیت توان در ریزشبکه‌ها به کار روند. همچنین از این سیستم‌ها به عنوان یک فیلتر هارمونیک می‌توان استفاده کرد. 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 داشته باشند [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 و کنترل 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 کیفیت بهتر در تحویل انرژی به مشترکین و امکان افزایش نفوذ DGها را به همراه دارد [۵۴]. مسأله بعدی در طراحی 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 به این ترتیب وظیفه تأمین ولتاژ ثابت و پایدار برای بارهای شبکه به دوش کانورتر ذخیره‌کننده انرژی می‌افتد. همین موضوع اهمیت طراحی یک کانورتر مناسب برای ریزشبکه را نشان می‌دهد [۱]. از طرفی در ریزشبکه‌های AC نیز احتیاج به استفاده از مبدل‌های الکترونیک قدرت در کنار ذخیره‌سازها وجود



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 مهمی 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 مهیا می‌سازد؛ مسائل تراکی شبکه را حل می‌کند و سرمایه‌گذاری‌های شبکه را به تعویق می‌اندازد [۲۴، ۴۴]. به دلیل ماهیت تغییرپذیر انرژی‌های نو، قابلیت اطمینان سیستم در حالت جزیره‌ای وابسته به ظرفیت ذخیره‌سازهای انرژی است [۱۹]. با توجه به اینکه قابلیت اطمینان یک ریزشبکه با قابلیت اطمینان باتری و اینورتر متصل به آن تعریف می‌شود، به نوعی می‌توان سیستم‌های ذخیره انرژی را پاشنه‌آشیل ریزشبکه دانست [۴۵]. باتری‌ها، سلول‌های سوختی، بانک‌های خازنی (خازن‌های سنتی و ابرخازن‌ها) و چرخ‌طیارها بیشترین ذخیره‌سازهای مورد استفاده هستند [۷]. براساس پیکربندی می‌توان این سیستم‌ها را به سه گروه: موازی، کاسکاد و هیبرید تقسیم‌بندی نمود [۴۶].

در ریزشبکه‌های DC، سیستم ذخیره انرژی از واحدهای ذخیره و کنترل‌های مرتبط با آن تشکیل شده که یک جزء مهم و ضروری برای احراز اطمینان از کیفیت قدرت در این شبکه‌هاست [۲۴، ۴۲]. در واقع اهمیت حفظ پایداری ولتاژ باس در عملکرد پایدار سیستم در ریزشبکه‌های DC، ضرورت حضور ذخیره‌سازهای انرژی را در تثبیت و پایداری این ریزشبکه‌ها دوچندان کرده است [۲۳]. استفاده از خودروهای الکتریکی و سیستم‌های ذخیره انرژی در ریزشبکه‌های DC با کنترل پخش بار دوجهته بین این تجهیزات و شبکه، با در نظر گرفتن حالت شارژ<sup>۱</sup> (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 بیش-شارژ شدن 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 استفاده کرد [۴۸].

استفاده از باتری‌ها و ابرخازن‌ها با ساختار هیبرید در سیستم ذخیره انرژی در پیشینه تحقیق انجام شده است. مهیاسازی تراکم انرژی و تراکم توان بالا [۴۹]، افزایش طول عمر تجهیزات ذخیره انرژی [۴۹] و کاهش هزینه‌های بهره‌برداری از DGها [۵۰] از نتایج استفاده صحیح از سیستم‌های ذخیره انرژی هیبرید می‌باشد.

2. Battery Energy Storage Systems

1. State Of Charge



شود. همین ضرورت در ریزشبه‌های DC و برای تبدیل ولتاژ تولیدات بادی و دیزل ژنراتورها به ولتاژ DC شبکه وجود دارد. اینورترهای دوجبهته جهت اتصال بخش‌های مختلف ریزشبه‌های متصل به هم، اتصال دو زیر-شبکه AC و DC به یکدیگر در ریزشبه‌های هیبرید، تبدیل سطوح مختلف ولتاژ در ریزشبه-های DC، اتصال به شبکه بالادست برای ریزشبه‌های DC و ... کاربرد دارند. بنابراین یکی از اجزای جدایی‌ناپذیر ریزشبه‌کانورترها هستند و مطالعه آنها اهمیت فراوانی دارد. تاکنون پژوهش‌های زیادی در این حوزه انجام شده است [۶۲].

همان‌گونه که گفته شد ریزشبه معمولاً دارای تعداد زیادی اینورتر است. حضور اینورترها مسأله توانایی مواجهه ریزشبه با تنش‌های مختلف روی ولتاژ و فرکانس شبکه در اثر عوامل داخلی یا خارجی و یا وقوع اغتشاش را مطرح می‌سازد. اینورترهای آینده با داشتن قابلیت‌های اضافی از جمله توانایی مدیریت توان اکتیو و راکتیو، هارمونیک‌ها و سرویس‌های جانبی دیگر، خواهند توانست این مشکل را حل کنند [۶۳].

### ۳-۵- زیرساخت‌های ارتباطی

ریزشبه‌ها معمولاً دارای یک زیرساخت ارتباطی بین کنترلر مرکزی ریزشبه<sup>۲</sup> (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 داشته باشد. به منظور احراز اطمینان از بهینه‌سازی، پایداری و قابلیت اطمینان، سیستم کنترلی ریزشبه از مجموعه‌ای از نرم‌افزارها و سخت‌افزارها ساخته شده است. این سیستم کنترل ممکن است متمرکز یا توزیع شده باشد [۴].

با در نظر گرفتن اینکه شبکه‌های قدرت در آینده دارای مجموعه قابل ملاحظه‌ای از وسایل الکترونیکی هوشمند هستند، توسعه ارتباطات، سیستم‌های کنترلی و استانداردهای معماری شبکه دارای اولویت‌های بالایی خواهند بود. ارتباطات سریع و قابل اطمینان 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 ریزشبه به کار می‌روند، خود نیازهای جدیدی در حوزه اتوماسیون، مدیریت و کنترل ایجاد می‌نمایند و نیازمند افزایش دامنه‌ی مطالعات در آینده هستند [۱۴].

شبکه بی‌سیم مش بر مبنای ابری و هیبریدی، معرفی شده در [۶۵] و استفاده از ارتباط خطوط قدرت<sup>۳</sup> (PLC) که در [۶۶] پیشنهاد شده است، دو مورد از چهارچوب‌های ارتباطی مورد مطالعه در پیشینه تحقیق هستند. پژوهش انجام شده در [۶۵] روی ریزشبه‌های به هم پیوسته صورت پذیرفته است. چهارچوب شبکه در این پژوهش دوسطحی است که سطح پایینی، یک راه‌حل توزیع اقتصادی برای داخل ریزشبه‌ها و در میان منابع توزیع شده ارائه می‌کند؛ سطح بالایی یک توزیع بار بهینه کلی برای تبادل انرژی بین ریزشبه‌ها اعمال می‌نماید. نتایج نشان می‌دهد که چهارچوب ارائه شده، نیازهای ارتباطی را برای بهینه‌سازی توزیع شده ریزشبه‌های به هم پیوسته محقق می‌سازد.

با همه این تفاسیر، کنترل توزیع شده به علت مزایای آن از جمله عدم نیاز به خطوط ارتباطی و سرعت پاسخ‌دهی بالا بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. با بکارگیری رویکردهای کنترلی توزیع شده مناسب، می‌توان نیاز به

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

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

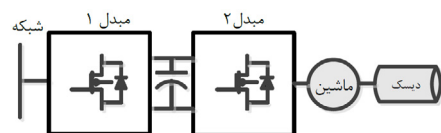
نوعی دیگر از ذخیره‌کننده‌های پر کاربرد در ریزشبه، سیستم ذخیره انرژی چرخ‌طیار<sup>۱</sup> است که مناسب برای ذخیره کوتاه‌مدت انرژی است. چرخ-طیار نوعی ماشین الکتریکی است که در حالت شارژ مانند یک موتور و در حالت دشارژ مانند یک ژنراتور- قادر است هم در فرکانس‌های پایین و هم در فرکانس‌های بالا کار کند. چرخ‌طیار نیاز به یک اینورتر دو طرفه دارد تا فرکانس متغیر تولید شده را به یک فرکانس ثابت برای سیستم قدرت تبدیل کند. چرخ‌طیار 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 ریزشبه است [۵۶-۵۸]. البته می‌توان با استفاده از چرخ‌طیار و باتری به صورت هیبرید برخی از مزایای هر دو را توأم داشت [۵۹]. الایندگی باتری-های اسید سرب، انگیزه‌ای برای پژوهش به منظور کاهش اندازه این باتری‌ها با همراهی چرخ‌طیار است [۶۰]. چرخ‌طیار گزینه‌ای مناسب برای برقراری پایداری ولتاژ و فرکانس در شرایط نفوذ زیاد انرژی‌های تجدیدپذیر می‌باشد [۲۰، ۵۷، ۶۱].

چرخ‌طیار، 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 ذخیره شده را به الکتریکی تبدیل کرده و به شبکه تزریق می‌نماید [۵۷، ۶۱].

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

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

که در آن I اینرسی لحظه‌ای است که نسبت مستقیم با جرم رتور دارد و  $\omega$  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 ریزشبه‌های AC به منظور تبدیل ولتاژ DC تولید شده توسط منابع تولید پراکنده از جمله PVها به ولتاژ شبکه، لازم است از مبدل‌های ولتاژ استفاده

2. Micro Grid Control Center  
3. Power Line Communication

1. Flywheel

#### ۴-۲- چالش‌های پخش‌بار

یک مسأله دیگر پیش روی ریزشکبه‌ها، پخش‌بار آنهاست. تغییر در تولیدات تجدیدپذیر و تغییرات زیاد در فرکانس سیستم نیاز پخش‌بار متفاوتی نسبت به شبکه‌های سنتی ایجاد می‌نماید [۳]. علاوه، 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 سنتی متفاوت باشد [۴]. نداشتن باس مرجع<sup>۲</sup>، کارکرد DGها بوسیله‌ی سیستم‌های کنترل سلسله‌مراتبی و تغییرات متناوب در ساختار ریزشکبه با تغییرات حالت کاری آن، لزوم بررسی پخش‌بار جداگانه را می‌طلبد [۷۲].

در حالت متصل به شبکه می‌توان از قواعد سنتی پخش‌بار (گوس-سایدل، نیوتون-رافسون ...) استفاده کرد؛ در این حالت با DGها مشابه منابع سنتی رفتار می‌شود و آنها را باید باس PV یا PQ فرض کرد. همچنین فرکانس سیستم ثابت فرض می‌شود چراکه به شبکه قدرت متصل است. اما در حالت جزیره‌ای قواعد پخش‌بار سنتی اعتبار خود را از دست می‌دهند. در حالت جزیره‌ای باس اسلک وجود ندارد و با فرکانس باید به عنوان یک متغیر برخورد کرد. همچنین از دروپ DGها باید استفاده نمود [۳]. مدلسازی خطوط کوتاه ریزشکبه‌ها نیز خود یک چالش است. در [۷۳] رهیافتی برای این چالش با ارائه روشهایی برای مدلسازی‌های خطوط کوتاه در نظر گرفته شده و مزایا و معایب آنها بررسی گردیده است [۷۳].

یک روش ساده و دقیق برای پخش‌بار در ریزشکبه‌های جزیره‌ای استفاده از روش گوس-سایدل است که در دو پله صورت می‌پذیرد: در پله اول محاسبات ولتاژ باس به روش سنتی انجام می‌شود و در پله دوم محاسبات فرکانس سیستم با استفاده از شاخصه‌های دروپ DGها انجام می‌گردد. این روش ساده و در ریزشکبه‌های 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 ذخیره‌کننده‌های انرژی الکتریکی برای ریزشکبه‌های DC معرفی شده است. این سیستم یک ولتاژ تنظیم‌شده را به صورت سری با خط توزیع معرفی می‌کند تا پخش‌بار بین ریزشکبه‌ها را با جهت مناسب کنترل کرده و قطعیت کنترل پخش‌بار بین ریزشکبه‌های به-هم‌پیوسته را افزایش می‌دهد. مفهوم ارائه‌شده پخش‌بار را ساده و پربازده می‌کند و انتظار می‌رود که در آینده خیلی مطرح شود. خوشبختانه تحقیقات در حوزه پخش‌بار اکتیو بین ریزشکبه‌های به-هم‌پیوسته امیدبخش است [۱۶].

#### ۴-۳- سیستم مدیریت انرژی

در ریزشکبه‌ها، به دلیل ماهیت اجزای تشکیل دهنده آنها، مسائلی از قبیل عدم قطعیت تولیدات تجدیدپذیر و قابلیت اطمینان، برجستگی بیشتری نسبت به سیستم‌های قدرت سنتی پیدا کرده‌اند. از طرفی ترکیب منابع مختلف انرژی که در ریزشکبه‌ها وجود دارد، یک فرصت مناسب برای برخورد با جنبه‌های تصادفی<sup>۳</sup> و مدیریت حوادث مختلف احتمالی است [۷۵]. برای این منظور طراحی یک سیستم مدیریت انرژی کارآمد، می‌تواند منجر به افزایش قابلیت اطمینان سیستم و افزایش طول عمر تجهیزات ذخیره انرژی گردد [۴۹، ۷۶].

سیستم‌های مدیریت انرژی سلسله‌مراتبی نیز در [۷۷] مورد بررسی قرار گرفته که هدف آن عملکرد امن ریزشکبه در اثر وقوع تغییرات تصادفی در نامتعادلی قدرت است. روش ارائه‌شده در [۷۷] توانسته شاخص خودمصرفی<sup>۴</sup>

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 ریزشکبه‌ها فراهم ساخته است [۶۸]. زیرساخت‌های ارتباطی و اطلاعاتی در ریزشکبه جزو موضوعاتی است که هنوز باز هستند و جای پژوهش و مطالعات بیشتر در آن بسیار زیاد است [۶۴].

#### ۴-۳-۱- مروری بر سایر چالش‌ها و فرصت‌ها

##### ۱-۴- مسائل مرتبط با بازار برق

نصب DGها در نزدیکی محل تقاضا بازار برق را با مسائل زیادی از قبیل افزایش تعداد بازیگران بازار مواجه ساخته است. تغییر کنترل شبکه از حالت متمرکز به توزیع‌شده که در ریزشکبه‌ها 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 داده است. با معرفی ریزشکبه‌ها، 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 ریزشکبه و شبکه بالادست وجود دارد، خرید و فروش انرژی به سیستم قدرت بالادست یک امکان بالقوه محسوب می‌شود. با مدیریت انرژی صحیح و بهینه در این حالت، خصوصاً در شرایطی که تولیدات انرژی تجدیدپذیر فراوانی در ریزشکبه وجود داشته باشد، حداقل‌سازی هزینه‌ی سوخت، بهبود بهره‌برداری و حفاظت و حداکثرسازی منافع اقتصادی ناشی از فروش انرژی به شبکه مقدر و میسر خواهد بود [۴۷].

استفاده از رهیاب قدرت هوشمند<sup>۱</sup> (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 ریزشکبه‌ها و کاهش هزینه‌های بهره‌برداری فراهم آورده است [۶۹].

هزینه‌های حفاظت و سوخت مورد نیاز و هزینه‌های خرید انرژی از شبکه حوزه‌های پژوهشی جدید است که ریزشکبه با هدف کاهش هزینه‌های بهره‌برداری ایجاد نموده است [۷۰]. این مسائل پایه‌های بهینه‌سازی در حوزه مطالعات ریزشکبه را تشکیل می‌دهند. تابع‌هدف در ریزشکبه‌ها به مسائل مختلفی از قبیل: منطقه‌ی جغرافیایی، ترجیحات بهره‌بردار، ظرفیت ریزشکبه، تجهیزات نصب‌شده، مقررات 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 ریزشکبه-باشد [۷۱].

مزایای ریزشکبه‌ها را باید با افزایش هزینه‌ی ناشی از جایگذاری DGها مقایسه کرد. براین اساس، یک آنالیز سود و زیان قبل از اجرای یک پروژه ریزشکبه الزامی است؛ طبیعتاً برای مدیریت هزینه‌ها و سودهای اقتصادی و فنی نیز باید از بهینه‌سازی استفاده کرد [۳]. توجه به اندازه و تعداد بهینه منابع تجدیدپذیر نیز جهت کاهش هزینه‌ها و بهبود بهره‌وری ریزشکبه مهم و مؤثر است [۷۰].

2. Slack  
3. Stochastic  
4. Self-consumption

1. Smart Power Router



را در اثر وقوع اغتشاش، در محدوده بیش از ۸۰ درصد و شاخص خودبهره‌وری<sup>۱</sup> را در محدوده بیش از ۳۰ درصد حفظ کند.

#### ۴-۴- اعمال برنامه‌های پاسخ‌گویی بار

در سال‌های اخیر برنامه‌های پاسخ‌گویی تقاضا به علت محدودیت منابع انرژی و ضعف سیستم‌های انرژی متمرکز بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند [۷۸-۸۲]. برنامه‌های پاسخ‌گویی بار شامل قابلیت‌های متنوعی از قبیل کنترل مستقیم بار، قیمت‌گذاری زمان استفاده<sup>۲</sup> و قیمت‌گذاری زمان واقعی<sup>۳</sup> می‌شود [۸۳]. امروزه می‌توان برنامه‌های مدیریت سمت تقاضا را به عنوان نیروگاه‌های مجازی در سیستم‌های هوشمند و در ریزشبکه‌ها دانست. این برنامه‌ها در شرایط پیک بار می‌توانند به کمک بخش تولید بیابند و سیستم را از مشکلات ناشی از پیک بار نجات دهند؛ نیاز به احداث نیروگاه‌ها و زیرساخت‌های ارتباطی را مرتفع نموده و ظرفیت تجهیزات سیستم را بالا ببرند [۶۹]؛ همچنین باعث کاهش هزینه‌های خانوارها و بهبود عملکرد تسهیلات شوند [۸۴]. افزایش ظرفیت عرضه انرژی، بهبود پروفایل ولتاژ و بهبود قابلیت اطمینان از دیگر ثمرات برنامه‌های پاسخ‌گویی بار در پژوهش‌های انجام شده است [۷۹، ۸۵، ۸۶].

اجرای برنامه‌های پاسخ‌گویی بار می‌تواند انگیزشی یا قیمت‌محور باشد [۸۱]. می‌توان با اجرای برنامه‌های انگیزشی به طور مؤثری مصرف‌کنندگان خانگی را به مصرف کمتر در ساعات پیک تشویق کرد. این کار را می‌توان با استفاده از الگوریتم‌های پیش‌بینی، مانند شبکه عصبی در ترکیب با بهینه‌سازی برای پیش‌بینی منحنی تقاضای مشترکین و میزان تولید صفحات خورشیدی به منظور بهبود پروفایل بار استفاده کرد؛ کاری که در [۸۴] به آن پرداخته شده است. ثابت شده است که علاوه بر بهبود پروفایل بار، ضریب قدرت و هزینه‌های برق مصرفی مشترکین را نیز می‌توان کاهش داد. با توجه به جذابیت سیستم‌های مدیریت انرژی در پژوهش‌های اخیر، امکان ترکیب سیستم‌های مدیریت انرژی با برنامه‌های پاسخ‌گویی بار به منظورهای مختلف خصوصاً انتفاع اقتصادی مشترکین وجود دارد [۸۰].

در [۷۸] یک برنامه بهره‌برداری از DG ها و سیستم‌های ذخیره انرژی باتری ارائه شده است. هدف، حداقل‌سازی سوخت و کاهش هزینه‌های تجهیزات با استفاده از بهینه‌سازی از ظرفیت تجهیزات در حضور پاسخ‌گویی تقاضا بوده که در این روش محقق شده و همچنین کاهش توان مازاد را برآورده ساخته است. در [۶۹] روشی جدید برای افزایش تأثیر سیستم‌های الکتریکی و حرارتی به عنوان دو بخش مهم از ریزشبکه‌های هوشمند آینده ارائه شده است. در این پژوهش از پاسخ‌گویی بار به عنوان یک امکان بالقوه برای کاهش هزینه‌های بهره‌برداری استفاده شده است. شبیه‌سازی‌های انجام شده نشان می‌دهد که در حضور برنامه‌های پاسخ‌گویی بار و ذخیره‌سازهای انرژی حرارتی و الکتریکی، هزینه‌های بهره‌برداری به شدت کاهش می‌یابد.

حضور برنامه‌های پاسخ‌گویی بار در ریزشبکه‌های DC نیز بسیار مفید و درخور توجه است. در ریزشبکه‌های DC می‌توان با برنامه‌ریزی هوشمند برای شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی به کاهش بار پیک و بهبود پروفایل ولتاژ کمک کرد [۸۷]. البته نحوه اعمال برنامه‌های پاسخ‌گویی تقاضا با در نظر گرفتن حجم قابل توجه خودروهای الکتریکی در کنار عدم قطعیت منابع تجدیدپذیر یک چالش است. در صورت اجرای طرح و برنامه‌های مناسب، می‌توان این چالش را به فرصت تبدیل کرد. چرا که کاربران

خودروهای الکتریکی، می‌توانند در پیک‌سازی شرکت داشته باشند و معامله برد-برد برای شبکه و مشترکین محقق می‌گردد [۸۸].

مزیت دیگر این برنامه‌ها، بهبود پروفایل بار است. پروفایل بار مصرف‌کننده در حضور برنامه‌های پاسخ‌گویی بار بهتر می‌تواند خروجی ژنراتورهای تجدیدپذیر را دنبال کند. شبیه‌سازی‌های انجام شده در [۸۹] نشان می‌دهد که حضور برنامه‌های پاسخ‌گویی بار در ریزشبکه‌های به هم پیوسته نیز قادر است هزینه‌های انرژی و توان مصرفی را کاهش دهد.

استفاده از برنامه‌های پاسخ‌گویی بار به همراه استراتژی‌های جانبی به جهت غلبه بر عدم قطعیت می‌تواند نتایج منطقی تری به دنبال داشته باشد [۹۰، ۹۱]. استفاده از واحدهای تولید حرارتی در کنار PV ها و تولیدات بادی و همچنین سیستم‌های ذخیره انرژی برای دست‌یابی به انرژی امن و اقتصادی نیروگاه‌های تجدیدپذیر در پژوهش انجام شده در [۹۰] پیشنهاد می‌شود. سپس با هدف حداقل‌سازی هزینه تولید در ریزشبکه و براساس اطلاعات خروجی از تولیدات تجدیدپذیر می‌توان استراتژی پاسخ‌گویی بار را بر اساس قیمت برق اجرا کرد. ثابت می‌شود که این مسأله تأثیر به‌سزایی در پیک‌سازی و دره‌زدایی و همچنین کاهش هزینه‌های تولید در ریزشبکه دارد. با توجه به پیشینه پژوهش و اهمیت موضوع، تحقیقات در این حوزه رو به افزایش است.

#### ۴-۵- مسائل مرتبط با طراحی ریزشبکه

انتخاب نوع ریزشبکه را باید با توجه به شاخص‌هایی از قبیل: پایداری، قابلیت اتصال به شبکه، ظرفیت کلی، منابع و زیرساخت‌های موجود انجام داد [۷]. ظرفیت کل ریزشبکه مورد نیاز، مسأله مهمی برای طراحی آن است چرا که در ظرفیت‌های پایین امکان عدم تعادل زیاد است. در ریزشبکه‌های با ظرفیت بالا به دلیل زیاد بودن ظرفیت تولید و تقاضای شبکه، اینرسی بالایی وجود دارد و تغییر در شرایط بارها و توان تولیدی نوسانات کمتری ایجاد می‌کند [۷]. معمولاً برای کنترل نوسانات و تغییرات قدرت، به منظور طراحی ریزشبکه لازم است ظرفیت منابع موجود نیز در نظر گرفته شود [۷].

مسأله مهم دیگر انتخاب نوع ولتاژ ریزشبکه است. برخی از منابع غیرسنکرون موجود (صفحات خورشیدی و نیروگاه‌های بادی) ولتاژ خروجی DC و برخی دیگر ولتاژ AC با سطوح ولتاژ مختلف تولید می‌کنند که این عوامل در شرایط مربوط به انتخاب ولتاژ و جریان ریزشبکه تعیین‌کننده هستند [۷]. از طرفی، با توجه به اینکه زیرساخت‌های موجود غالباً AC هستند، ریزشبکه‌های متصل به شبکه از نوع AC انتخاب می‌شوند و ریزشبکه‌های جدا از شبکه از نوع DC ولتاژ پایین هستند که تلفات کمتری نسبت به نوع AC دارند و همچنین با پیشرفت الکترونیک قدرت در آینده امکان اتصال آنها به شبکه وجود خواهد داشت [۷].

#### ۴-۶- اتصال ریزشبکه‌ها به یکدیگر

ظرفیت محدود ریزشبکه‌ها یکی از مشکلات بزرگ آنهاست که باعث توسعه و تکامل ریزشبکه‌های به هم پیوسته<sup>۴</sup> شده است. این شبکه‌ها، یک مجموعه‌ی به هم پیوسته از ریزشبکه‌ها هستند که می‌توانند با یا بدون پشتیبانی شبکه اصلی کار کنند [۳]. مشکلات ریزشبکه‌های جزیره‌ای از قبیل الگوی متغیر تولیدات تجدیدپذیر و عدم قطعیت‌های بار خصوصاً در ریزشبکه‌های DC که اتصال آنها به شبکه اصلی دشوار است، می‌طلبد که از اتصال چند ریزشبکه به یکدیگر استفاده گردد [۱۵]. افزایش قابلیت اطمینان، طول عمر و بهره‌وری

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

4. Multi-microgrid



سیستم، امکان استفاده جامع از تمام ظرفیت‌های تجدیدپذیر در کل ریزشبهه و نتیجتاً بهره‌برداری بهینه از مزایای این نوع شبکه‌هاست [۱۵]. مضاف‌براین، در ریزشبهه‌های به‌هم‌پیوسته، تأثیرات تغییر در تولید در اثر شرایط مختلف 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 ریزشبهه‌ها و سیستم‌های قدرت سنتی، هر بخشی از مطالعات در حوزه‌ی ریزشبهه‌ها 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 ریزشبهه 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 ریزشبهه‌ها 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 ریزشبهه و منابع تجدیدپذیر و کنترل آن مسائل مرتبط با کنترل دروپ آسیب پذیری و ناپایداری ولتاژ باس در ریزشبهه های DC در اثر تغییرات تولیدات تجدیدپذیر مسائل ناپایداری و بازگردانی ولتاژ در حضور ژنراتورهای بادی ناپایداری گذرا در ریزشبهه 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
کانورها	طراحی کانورها کنترل کانورها
ریزشبهه‌های به هم پیوسته	کنترل پخش بار بین ریزشبهه‌ها 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 ریزشبهه‌های DC	انتقال اتوماتیک بین حالت‌های مختلف بهره برداری مسائل مربوط به ریزشبهه‌های دوقطبی (ارتباط بین سطوح مختلف ولتاژ)
ریزشاخت‌های ارتباطی	تأخیرهای ارتباطی استفاده از سیستم‌های ارتباطی مختلف
ریزشبهه‌های سازمانی و نظامی	آنالیزهای اقتصادی و فنی، طراحی و بهره‌برداری مسائل کنترلی
بازار برق	کاهش مصرف انرژی و هزینه‌های سوخت بهره‌برداری بهینه از ریزشبهه‌های خاص



- microgrid, *Protection and Control of Modern Power Systems*, March 2019.
- [7] Ritu Shrivastwa, Ahmad Hably, Kaouther 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

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 مجموعه‌ای از مهم‌ترین چالش‌های پیش روی ریزشبکه در حوزه‌های کاری مختلف ذکر شده 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 پژوهش‌های 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 دوجبه‌ی 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 سنتی متفاوت است و این مساله باعث ناکارآمدی قواعد 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 می‌توان نتیجه گرفت که با وجود چالش‌های پیش رو، ریزشبکه بهترین بستر برای بهره‌وری اقتصادی و زیست‌محیطی از انرژی‌های تجدیدپذیر تلقی می‌شود و در آینده 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. Farrokhbadi 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



- Solution, *2019 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, Macao, Macao, pp. 1-5, 2019.
- [44] M. Brenna, F. Fioiadelli, 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, *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, Adaptive 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, *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, *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, *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, *IEEE Access*, vol. 7, pp. 149202-149223, 2019.
- [29] Chandan 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, *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. Mirsaedi, X. Dong, S. Shi and D. Tzelepis, Challenges, advances and future directions in protection of hybrid AC/DC microgrids, *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, *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, *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 13, no. 1, pp. 81-91, Jan. 2019.
- [35] S. Mohamed, M. F. Shaaban, M. Ismail, E. Serpedin and K. A. Qaraqe, An Efficient Planning Algorithm for Hybrid Remote Microgrids, *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, *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 Microgrid, *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. Hilairat and M. Benne, Model Predictive Control for Micro Grid stabilisation in case of

