دانشگاه کاشان

دانشکده برق و کامپیوتر

پایان‌نامه

جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی برق – قدرت

عنوان:

مدیریت انرژی ریزشبکه‌ها به منظور بهره‌برداری اقتصادی

استاد راهنما:

دکتر حمیدرضا محمدی

توسط:

محمد حاجی‌جعفری

شهریورماه ۹۳

تقدیم به:

پدرم که عالمانه به من آموخت تا چگونه در عرصه زندگی، ایستادگی را تجربه نمایم

و به مادرم، دریای بی کران فداکاری و عشق که وجودم برایش همه رنج بود
و وجودش برایم همه مهر

و به:

همسرم، اسطوره زندگیم

پناه خستگیم و امید بودنم

سپاس بی کران...

پروردگار یکتا را که هستی‌مان بخشید و به طریق علم و دانش رهنمونمان شد و به همنشینی رهروان علم و دانش مفتخرمان نمود و خوشه‌چینی از علم و معرفت را روزیمان ساخت.

و با تشکر از...

تمامی استادانی که به من کلامی آموختند...

مخصوصا آقایان **دکتر حمیدرضا محمدی**

دکتر عباس کتابی و دکتر سید عباس طاهر

چکیده

با توجه به رشد روز افزون مصرف انرژی، به ویژه انرژی الکتریکی، و از طرفی محدود بودن منابع انرژی فسیلی، استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر روز به روز بیشتر می‌شود. علاوه بر محدود بودن منابع انرژی فسیلی، عوامل دیگری مانند سازگاری بیشتر با محیط زیست، حفاظت از منابع انرژی، افزایش قابلیت اطمینان، بهبود راندمان و فراهم آوردن سرویس بهتر جهت مشترکین، باعث ایجاد ساختار جدید در سیستم‌های قدرت شده است. در همین راستا، ریزشبکه‌ها نقش اساسی در سیستم‌های قدرت دارند. با اضافه شدن ریزشبکه‌ها به ساختار جدید سیستم قدرت، مباحث مختلفی مانند تغذیه بدون وقفه بار، مبادله انرژی با شبکه اصلی، پایداری ریزشبکه پس از جدا شدن از شبکه اصلی و بهره‌برداری اقتصادی از ریزشبکه مطرح می‌شود که در این خصوص تحقیقات گسترده‌ای توسط محققین در حال انجام است. یکی از مهم‌ترین این مباحث، مدیریت انرژی ریزشبکه به منظور بهره‌برداری اقتصادی از آن می‌باشد که موضوع مورد بحث ما در این پایان‌نامه است. در این پایان‌نامه ضمن بررسی تحقیقات گذشته در این زمینه، الگوریتم جدیدی ارائه شده است که با در نظر گرفتن پارامترهای مختلف، نواقص تحقیقات گذشته را برطرف نموده و الگوریتم کاملی در این خصوص ارائه می‌نماید. الگوریتم پیشنهاد شده قادر است، ریزشبکه‌ای شامل منابع تولید پراکنده، منابع انرژی تجدیدپذیر، عناصر ذخیره‌ساز انرژی و بار را در حالت متصل به شبکه اصلی و مستقل از آن، به منظور به حداقل رساند هزینه روزانه تولید توان، مدیریت نماید. این الگوریتم توانایی در نظر گرفتن پارامترهای مختلف مانند حداقل و حداکثر توان تولیدی منابع تولید پراکنده، خطای پیش‌بینی بار، خطای پیش‌بینی منابع انرژی تجدیدپذیر، ظرفیت عناصر ذخیره‌ساز

انرژی و مدت‌زمان شارژ و دشارژ آن، ظرفیت خط متصل به شبکه اصلی و ظرفیت خطوط بین نواحی مختلف ریزشبکه را دارا می‌باشد. ضمن بررسی این پارامترها، با انجام آزمایشات مختلف، تاثیر هر کدام از این پارامترها در هزینه تامین بار ریزشبکه نشان داده شده است. در ادامه، نتایج مدیریت انرژی ریزشبکه‌ای شامل تمام عناصر ذکر شده و با در نظر گرفتن تمام پارامترهای عناصر مختلف، در سه سناریو متفاوت در ارتباط با اتصال ریزشبکه به شبکه اصلی ارائه شده است.

کلمات کلیدی: پخش‌بار اقتصادی، مدیریت انرژی، روش جستجوی مستقیم، ریزشبکه، منابع تولید پراکنده، خطای پیش‌بینی.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: مقدمه..... ۱

۱-۱-اهمیت موضوع ۳

۱-۲-اهداف پایان‌نامه ۱۲

۱-۳-ساختار پایان‌نامه ۱۳

فصل دوم: بهره‌برداری اقتصادی از ریزشبکه‌ها..... ۱۵

۲-۱- مقدمه ۱۷

۲-۲-بهره‌برداری اقتصادی از سیستم قدرت ۱۸

۲-۳-تفاوت‌های سیستم قدرت و ریزشبکه ۲۳

۲-۴-بهره‌برداری اقتصادی از ریزشبکه ۲۵

۲-۵-جمع‌بندی ۴۰

فصل سوم: الگوریتم جستجوی مستقیم..... ۴۳

۳-۱-مقدمه ۴۵

۳-۲- تخمین اولیه در روش جستجوی مستقیم ۴۵

۳-۳- مراحل جستجوی مستقیم ۴۶

۳-۴- روش جستجوی مستقیم چندسطحی ۴۹

۳-۴-۱- تعیین تعداد سطوح همگرایی ۴۹

۳-۴-۲-انتخاب گام مناسب برای هر سطح همگرایی ۵۰

۳-۵- محاسن و معایب روش جستجوی مستقیم ۵۲

فصل چهارم: الگوریتم پیشنهادی مدیریت انرژی به منظور بهره‌برداری اقتصادی از ریزشبکه ۵۵

۴-۱-مقدمه ۵۷

۴-۲- توصیف ریزشبکه مورد مطالعه ۵۷

۴-۲-۱- منابع تولید پراکنده ۵۹

۴-۲-۲-منابع انرژی تجدیدپذیر ۶۰

۴-۲-۳-بار ۶۰

۴-۲-۴-سیستم ذخیره‌ساز انرژی ۶۱

۴-۳-فرمول‌بندی مسئله ۶۲

۴-۳-۱-فرمول‌بندی ابتدایی مسئله و محدودیت‌ها ۶۳

۴-۳-۲-اصلاح رابطه توازن توان ۶۳

۴-۳-۳-اصلاح محدودیت واحدها برای جبران خطای پیش‌بینی منابع تجدیدپذیر ۶۴

۴-۳-۴-اصلاح محدودیت واحدها برای جبران خطای پیش‌بینی بار ۶۶

۴-۳-۵-سیستم ذخیره‌ساز انرژی ۶۷

۴-۴-معرفی الگوریتم پیشنهاد شده ۶۷

فصل پنجم: نتایج شبیه‌سازی..... ۷۵

۵-۱-مقدمه ۷۷

۵-۲-بررسی عملکرد روش جستجوی مستقیم ۷۷

۵-۲-۱-بررسی روش جستجوی مستقیم روی سیستمی شامل ۳ واحد ۷۸

۵-۲-۲-بررسی روش جستجوی مستقیم چندسطحی روی سیستمی شامل ۳ واحد..... ۷۹

۵-۲-۳-بررسی روش جستجوی مستقیم چندسطحی روی سیستمی شامل ۲ ناحیه..... ۸۱

۵-۳-بررسی عملکرد روش پیشنهاد شده ۸۶

۵-۳-۱-بررسی عملکرد روش پیشنهاد شده روی سیستمی شامل ۳ واحد ۸۶

۵-۳-۲-بررسی عملکرد روش پیشنهاد شده روی سیستمی شامل ۱۵ واحد ۸۸

۵-۳-۲-۱-بررسی تاثیر وجود منابع انرژی تجدیدپذیر در هزینه ۸۹

۵-۳-۲-۲-بررسی تاثیر خرید و فروش توان با شبکه اصلی در هزینه..... ۹۲

۵-۳-۲-۳-بررسی تاثیر ظرفیت عناصر ذخیره‌ساز انرژی در هزینه ۹۵

۵-۳-۲-۴-بررسی تاثیر خطای پیش‌بینی در هزینه ۹۶

۵-۳-۳-بررسی عملکرد روش پیشنهاد شده روی سیستمی شامل ۳ ناحیه..... ۹۸

۵-۳-۴-تبادل توان عناصر مختلف در ۳ سناریو متفاوت ۱۰۱

۵-۴-جمع‌بندی ۱۰۶

فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۱۰۹

۶-۱-نتیجه‌گیری ۱۱۱

۶-۲-پیشنهادات ۱۱۳

مراجع ۱۱۵

فهرست شکل‌ها

عنوان صفحه

شکل ۱-۱- میزان مصرف انرژی در جهان از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۰ میلادی و پیش‌بینی برای سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۴۰ ..... ۳

شکل ۱-۲- پیش‌بینی میزان تولید انرژی الکتریکی در جهان توسط منابع مختلف انرژی از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۴۰ ..... ۴

شکل ۱-۳- تغییرات توان تولیدی سلول‌های خورشیدی و تغییرات بار ۹

شکل ۲-۱- سیستم مدیریت انرژی هوشمند آقای Chen ۲۵

شکل ۲-۲- مدل پیشنهادی آقای خدایی برای بهینه‌سازی ریزشبکه ۳۵

شکل ۲-۳- نتایج آزمایشات آقای Yogesh ۳۷

شکل ۲-۴- ساختار سیستم مورد آزمایش مرجع [۳۹] ۴۰

شکل ۳-۱- الگوریتم روش جستجوی مستقیم ۴۸

شکل ۳-۲- فلوچارت روش جستجوی مستقیم چند سطحی ۵۲

شکل ۴-۱- ساختار ریزشبکه مورد مطالعه در حالت متصل به شبکه ۵۸

شکل ۴-۲- فلوچارت الگوریتم پیشنهاد شده ۷۴

شکل ۵-۱- ساختار سیستمی شامل چند ناحیه به صورت شعاعی و متصل به شبکه ۸۲

شکل ۵-۲- هزینه‌های روزانه ریزشبکه به ازای تعداد پنل فتوولتائیک مختلف ۹۱

شکل ۵-۳- تغییرات هزینه بر حسب تغییرات ظرفیت خط متصل به شبکه ۹۳
شکل ۵-۴- تغییرات هزینه روزانه بر حسب تغییرات ظرفیت عناصر ذخیره‌ساز انرژی ۹۵
شکل ۵-۵- تغییرات هزینه روزانه بر حسب تغییرات محدودیت خطوط بین نواحی ۱۰۰
شکل ۵-۶- توان عناصر مختلف در سناریو اول ۱۰۳
شکل ۵-۷- تون عناصر مختلف در سناریو دوم ۱۰۴
شکل ۵-۸- توان عناصر مختلف در سناریو سوم ۱۰۵

فهرست جدول‌ها

عنوان صفحه

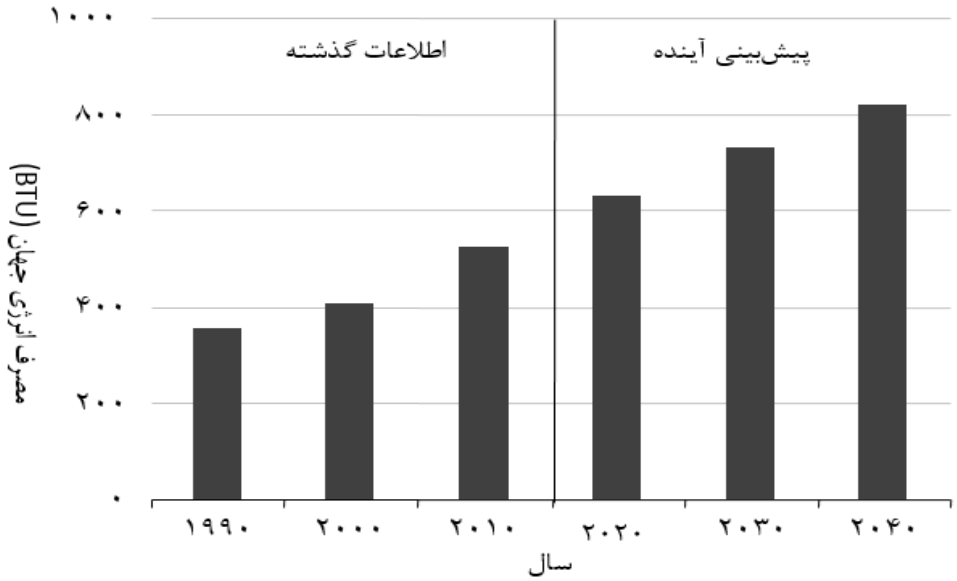
جدول ۲-۱- مقایسه نتایج سه الگوریتم روی سیستم آزمایشی ۱۳باسه IEEE (۵۰ تکرار) ۳۳
جدول ۵-۱- ضرایب تابع هزینه سه واحد تولید توان ۷۸
جدول ۵-۲- نتایج حاصل از روش جستجوی مستقیم چندسطحی روی سیستمی شامل ۳ واحد ۸۰
جدول ۵-۳- ضرایب تابع هزینه چهار واحد موجود در دو ناحیه ۸۳
جدول ۵-۴- نتایج شبیه‌سازی روش جستجوی مستقیم چندسطحی روی سیستمی شامل دو ناحیه ۸۴
جدول ۵-۵- ضرایب توابع هزینه سیستم ۱۵ واحدی ۸۸
جدول ۵-۶- نتایج روش جستجوی مستقیم چندسطحی و روش پیشنهادی روی سیستم ۱۵ واحدی ۸۹
جدول ۵-۷- پروفیل تغییرات بار در ۲۴ ساعت ۹۰
جدول ۵-۸- تولید توان پنل فتوولتائیک ۹۰ کیلو واتی در ساعات شبانه‌روز ۹۰
جدول ۵-۹- هزینه هر کیلو وات ساعت انرژی در بازار برق ۹۲
جدول ۵-۱۰- نتایج آزمایش برای بررسی تاثیر خطای پیش‌بینی در هزینه ۹۷
جدول ۵-۱۱- ضرایب توابع هزینه سیستمی شامل ۳ ناحیه و ۱۵ واحد ۹۹
جدول ۵-۱۲- مقایسه هزینه روزانه ریزشبکه در ۳ سناریو مختلف ۱۰۶

فصل اول:

مقدمه

۱–۱–اهمیت موضوع

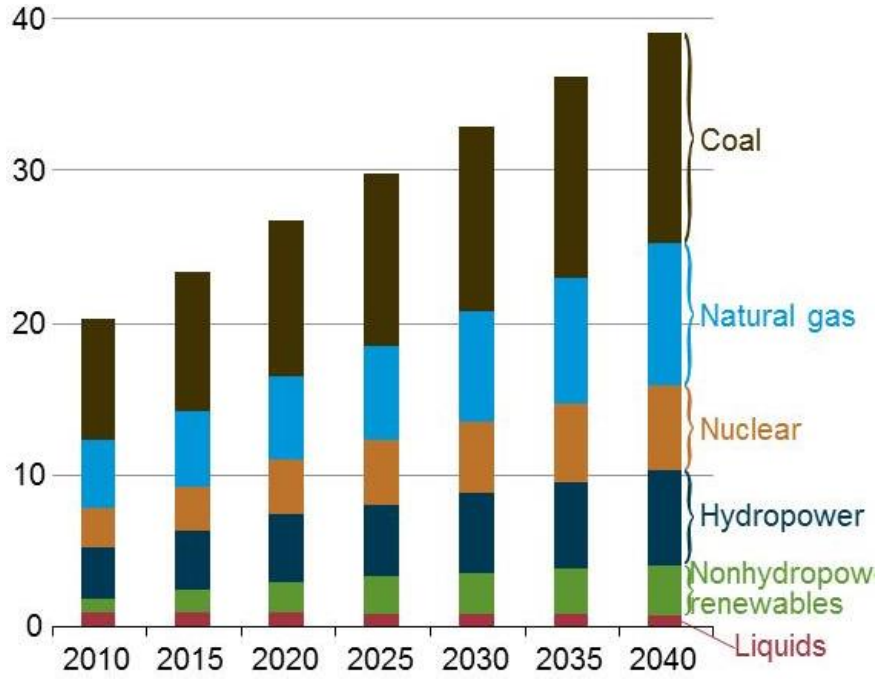
چشم‌انداز بین‌المللی انرژی۲۰۱۳ (IEO2013)، پیش‌بینی می‌کند مصرف انرژی در جهان در سال ۲۰۴۰ نسبت به سال ۲۰۱۰ تا ۵۶٪ رشد خواهد کرد. شکل (۱-۱) میزان مصرف انرژی در جهان از سال ۱۹۹۰ تا سال ۲۰۱۰ را نشان می‌دهد (بر حسب کادریلیون BTU (واحد حرارتی انگلیس)). همچنین در این شکل میزان مصرف انرژی در جهان از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۴۰ نیز پیش‌بینی شده است [۱].



شکل ۱-۱- میزان مصرف انرژی در جهان از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۰ میلادی و پیش‌بینی برای سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۴۰

در این بازه زمانی، تولید انرژی الکتریکی در جهانی ۹۳٪ افزایش خواهد داشت (از ۲۰/۲ تریلیون کیلووات ساعت در سال ۲۰۱۰ به ۳۹ تریلیون کیلووات ساعت در سال ۲۰۴۰). در بسیاری

از نقاط جهان، نگرانیها در مورد امنیت عرضه انرژی و پیامدهای زیست‌محیطی انتشار گازهای گلخانه‌ای از سیاست‌های دولت است که باعث حمایت از افزایش منابع انرژی تجدیدپذیر شده است. در نتیجه، همانطور که در شکل (۱-۲) مشاهده می‌شود، پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد، منابع انرژی تجدیدپذیر بیشترین رشد را در میان منابع تولید انرژی الکتریکی خواهند داشت.



شکل ۱-۲- پیش‌بینی میزان تولید انرژی الکتریکی در جهان توسط منابع مختلف انرژی از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۴۰

سیستم‌های قدرت الکتریکی در حال تغییر برای پاسخ گفتن به نیازهایی مانند مسائل زیست محیطی، حفاظت از منابع انرژی، قابلیت اطمینان بیشتر شبکه، بهبود بازده عملکرد، و سرویس‌دهی بهتر به مصرف‌کننده است. بدین منظور منابع انرژی تجدیدپذیر برای بهره‌برداری به صرفه‌تر

سیستم قدرت پیشنهاد می‌شوند. به دلایل زیادی استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر حائز اهمیت است که از جمله آنها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ✓ توان تولید شده دوستار محیط زیست است.
- ✓ این منابع در معرض بی‌ثباتی قیمت نیستند و رایگان می‌باشند.
- ✓ این منابع تجدیدپذیر بوده و نگرانی بابت اتمام ذخایر آنها همچون سوخت‌های فسیلی وجود ندارد.

نظارت دولتها بر مصرف‌کنندگان صنعت برق و نگرانی‌های شدید در مورد مسائل زیست محیطی، و همچنین افزایش مصرف انرژی، باعث افزایش در ظرفیت واحدهای تولید پراکنده نصب شده و سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی شده است. بر اساس نوع و تعداد واحدهای منبع تولید پراکنده، ویژگیهای بار و محدودیتهای کیفیت توان، و روشهای مشارکت در بازار برق، روشهای کنترل و عملکرد یک ریزشبکه می‌تواند به طور قابل توجهی با سیستمهای قدرت سنتی متفاوت باشد. دلایل اصلی این تفاوتها را می‌توان به صورت زیر بیان کرد [۲]:

- ✓ ویژگیهای حالت گذرا و ماندگار واحدهای تولید پراکنده، مخصوصا واحدهای همراه با کنترل‌کننده‌های الکترونیکی، با واحدهای توربین-ژنراتور بزرگ قدیمی متفاوت است.
- ✓ در یک ریزشبکه به دلیل حضور بارهای تکفاز و واحدهای تولید پراکنده به طور ذاتی درجه قابل توجهی از نامتعادلی وجود دارد.
- ✓ بخش قابل توجهی از تولیدات توان یک ریزشبکه، ممکن است توسط منابع غیرقابل برنامه‌ریزی مانند واحدهای خورشیدی و بادی باشد.

- ✓ واحدهای ذخیره انرژی کوتاه‌مدت و بلند مدت، نقش اساسی در عملکرد یک ریزشبکه دارد.
- ✓ اغلب مسائل اقتصادی، قطع و وصل بودن واحدهای تولید پراکنده و بارها را تعیین می‌کند، در حالی که در یک ریزشبکه بایستی عملکرد پایدار در حالت مستقل از شبکه نیز مدنظر قرار گیرد.
- ✓ یک ریزشبکه ممکن است ملزم به ارائه یک سطح کیفیت توان مشخص یا خدمات ترجیحی برای بعضی بارها باشد.
- ✓ علاوه بر انرژی الکتریکی، اغلب یک ریزشبکه مسئول تولید و تامین گرمای مورد نیاز تمام یا بخشی از بارها می‌باشد.

ریزشبکه‌ها در حال تبدیل شدن به این واقعیت هستند که انرژی‌های تجدیدپذیر، منابع تولید پراکنده، و سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی را می‌توان به شبکه متصل کرد و جزئی از آن در نظر گرفت. این مفاهیم نه تنها به دلیل جنبه‌های زیست محیطی بلکه بخاطر منافع اجتماعی، اقتصادی و سیاسی در حال رشد هستند. برخی از انرژیهای تجدیدپذیر مانند سلولهای خورشیدی و انرژی باد، متکی بر پدیده‌های طبیعی مانند نور خورشید و یا باد می‌باشند و بنابراین ماهیت متغیری دارند. در نتیجه پیش‌بینی توان تولیدی توسط این منابع کاری بسیار دشوار است، و لزوما نمی‌توان مطمئن بود که در هر لحظه، توان مورد نیاز بار توسط این منابع تامین شود. از این رو، اگر ما بخواهیم بارهای محلی به صورت بدون وقفه تغذیه شوند، به سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی نیاز

داریم. بدین منظور برخی از سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی مانند باتری، خازن، فلای‌ویل[1] ، سلف ابررسانا و یا دستگاه‌های هوای فشرده را می‌توان مورد استفاده قرار داد [۳].

ریزشبکه شامل منابع تولید پراکنده مختلفی شامل موتورهای دیزلی، میکرو توربین، سلولهای سوختی، CHP، سلولهای خورشیدی، توربینهای بادی کوچک، توربینهای آبی کوچک و غیره می‌باشد که ظرفیت این منابع از چند کیلووات تا ۱-۲ مگاوات متغیر است. در یک ریزشبکه، عملکرد و کنترل منابع تولید پراکنده، وسایل ذخیره‌ساز انرژی و بارهای کنترل‌پذیر به صورت مرکزی هماهنگ و کنترل می‌شود. ریزشبکه‌ها اغلب به صورت متصل به شبکه اصلی کار می‌کنند اما در مواقعی که یک خطای خارجی رخ دهد، ریزشبکه به صورت مستقل از شبکه اصلی عمل می‌کند [۴].

ریزشبکه یک مجموعه‌ای از بار و منابع کوچک فرض می‌شود که به عنوان یک سیستم قابل کنترل مستقل عمل می‌کند و می‌تواند توان الکتریکی و گرمایی ناحیه محلی خود را تامین کند. این مفهوم یک الگوی جدید برای تعریف عملکرد منابع تولید پراکنده ارائه می‌کند. در سیستم قدرتی که شامل ریزشبکه باشد، برای استفاده از ریزشبکه می‌توان آن را به عنوان یک قسمت قابل کنترل سیستم قدرت در نظر گرفت. همچنین، ریزشبکه می‌تواند برای تامین نیازهای خاص مصرف‌کنندگان از قبیل قابلیت اعتماد بالا، کاهش تلفات، تامین ولتاژ محلی مورد نیاز، افزایش بهره‌وری از طریق انرژی حرارتی تلف شده، اصلاح افت ولتاژ و اطمینان از وجود برق بدون وقفه طراحی شود [۵].

[1] . flywheels

قابلیت اضافه کردن تعدادی از مولدهای کوچک مانند سلولهای خورشیدی، توربینهای بادی، توربینهای آبی، سلولهای سوختی، توربینهای گازی، همچنین باتری و ابر خازن، باعث می‌شود که ریزشبکه این امیدواری را ایجاد کند که در محل مصرف‌کننده، توان مورد نیاز تولید شود. در سیستمهای قدرت مدرن که سیاستهای دولت مردم را تشویق به تولید توان مورد نیاز خود، در قالب منابع تولید پراکنده، و در محل مصرف می‌کند، مفهوم ریزشبکه نقش مهمی در راستای حل مسائل مربوط به کنترل‌پذیری منابع تولید پراکنده دارد.

مبدلهای الکترونیک قدرت برای ریزشبکه بسیار مهم هستند. اکثر منابع تولید توان کوچک برای داشتن انعطاف‌پذیری مورد نیاز، باید بر پایه المانهای الکترونیک قدرت طراحی شده باشند تا مطمئن باشیم که ریزشبکه می‌تواند به عنوان یک سیستم یکپارچه واحد عمل کند [۶].

به دلیل ماهیت متغیر منابع انرژی تجدیدپذیر و تغییرات پیوسته بار، معمولا در ریزشبکه به عناصر ذخیره‌ساز انرژی نیاز می‌شود. میزان توان تولیدی منابع انرژی تجدیدپذیر و منحنی تغییرات بار، دو فاکتور مهمی هستند که بوسیله آنها می‌توان میزان ظرفیت عناصر ذخیره‌ساز انرژی را تعیین کرد. تغییرات توان تولید شده یک سلول خورشیدی به همراه تغییرات بار در یک منطقه مسکونی، در شکل (۱-۳) نشان داده شده است [۷].