

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



مؤسسه آموزش عالی غیر دولتی غیر انتفاعی انرژی

افزایش پایداری ریزشبکه های متصل و منفصل از شبکه اصلی توزیع برق با کنترل هماهنگ باتری های ذخیره ساز و منابع جهت بالانس بار

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی برق گرایش برنامه ریزی و مدیریت سیستم های انرژی الکتریکی

نام دانشجو:

مهدی فلاحکار گشتی

اساتید راهنما:

دکتر مجتبی میرزایی

دکتر مهدی طاهری

شهریورماه ۱۳۹۸



تأییدیه‌ی صحت و اصالت نتایج

باسمه تعالی

اینجانب مهدی فلاحتکار گشتی به شماره دانشجویی ۳۰۲۶ دانشجوی رشته برق گرایش برنامه ریزی و مدیریت انرژی مقطع تحصیلی ارشد تأیید می‌نمایم که کلیه‌ی نتایج این پایان‌نامه/رساله حاصل کار اینجانب و بدون هرگونه دخل و تصرف است و موارد نسخه‌برداری شده از آثار دیگران را با ذکر کامل مشخصات منبع ذکر کرده‌ام. در صورت اثبات خلاف مندرجات فوق، به تشخیص دانشگاه مطابق با ضوابط و مقررات حاکم (قانون حمایت از حقوق مؤلفان و مصنفان و قانون ترجمه و تکثیر کتب و نشریات و آثار صوتی، ضوابط و مقررات آموزشی، پژوهشی و انضباطی ...) با اینجانب رفتار خواهد شد و حق هرگونه اعتراض درخصوص احقاق حقوق مکتسب و تشخیص و تعیین تخلف و مجازات را از خویش سلب می‌نمایم. در ضمن، مسئولیت هرگونه پاسخگویی به اشخاص اعم از حقیقی و حقوقی و مراجع ذی صلاح (اعم از اداری و قضایی) به عهده‌ی اینجانب خواهد بود و دانشگاه هیچ‌گونه مسئولیتی در این خصوص نخواهد داشت.

نام و نام خانوادگی:

امضا و تاریخ:

مجوز بهره‌برداری از پایان‌نامه

بهره‌برداری از این پایان‌نامه در چهارچوب مقررات کتابخانه و با توجه به محدودیتی که توسط استاد راهنما به شرح زیر تعیین می‌شود، بلامانع است:

- ☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله برای همگان بلامانع است.
- ☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله با اخذ مجوز از استاد راهنما، بلامانع است.
- ☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله تا تاریخ ممنوع است.

نام استاد یا اساتید راهنما:

تاریخ:

امضا:

تقدیم به

به پاس تعبیر عظیم و انسانی شان از کلمه ایثار و از خودگذشتگی، به پاس عاطفه سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان که در این سردترین روزگاران بهترین پشتیبان است، به پاس قلب‌های بزرگشان که فریادرس است و سرگردانی و ترس در پناهشان به شجاعت می‌گراید و به پاس محبت‌های بی‌دریغشان که هرگز فروکش نمی‌کند.

این مجموعه را به همسر ، فرزند ، پدر ، مادر و برادران عزیزم تقدیم می‌کنم

سپاسگزاری

سپاس بی‌کران پروردگار یکتا را که هستی مان بخشید و به طریق علم و دانش رهنمون مان شد و به همنشینی رهروان علم و دانش مفتخرمان نمود و خوشه چینی از علم و معرفت را روزیمان ساخت. از اساتید گرامی ام جناب آقای دکتر طاهری و جناب آقای دکتر میرزایی بسیار سپاسگزارم چراکه در طول این پروژه من را مورد حمایت فکری قرار دادند و از تجارب ارزشمند خود بهره مند ساختند. همچنین لازم میدانم از مساعدت آقای دکتر جلیلیان، دکتر یاسی، دکتر واصفی و دکتر رضایی نیز قدردانی نمایم.

چکیده

در این پژوهش مسئله بهبود پایداری ریزشبکه در حالات مختلف متصل و منفصل از شبکه اصلی مدنظر قرار گرفته است. در این راستا کنترل هماهنگ باتری‌های ذخیره‌ساز و منابع تولید توان به منظور بالانس بار در ریزشبکه پیشنهاد شده است. همچنین تغییرات توان اکتیو و راکتیو در این مطالعه لحاظ و از اینورترهای منبع ولتاژ به منظور بهبود عملکرد ریزشبکه در حالت منفصل از شبکه اصلی استفاده شده است. لازم به ذکر است که در مطالعات گذشته ریزشبکه‌ها به صورت مقاومتی ارزیابی شده اند، در حالی که در این تحقیق خاصیت مقاومتی- سلفی ریزشبکه به منظور تأمین بار راکتیو نیز مدنظر قرار گرفته است. از این رو در روش پیشنهادی، استراتژی کنترلی به منظور تأمین توان اکتیو و راکتیو بصورت همزمان به کنترل منابع و ذخیره‌ساز پرداخته تا سبب بهبود پایداری ریز شبکه گردد. شبیه‌سازی‌ها در نرم‌افزار MATLAB در حضور و عدم حضور باترهای ذخیره‌ساز انرژی در دو حالت کاری متصل و منفصل از شبکه اصلی پیاده‌سازی و نتایج با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که روش کنترلی مورد مطالعه در این پژوهش قادر به حفظ ولتاژ و فرکانس در رنج قابل قبول در هر دو حالت کاری ریزشبکه می‌باشد. با سیستم پیشنهادی کنترلی این پایان نامه فرکانس و ولتاژ میکروگرید به ترتیب ۳۱۴,۴ رادیان بر ثانیه و ولتاژ هم با نوسان بسیار کم ۳۷۹,۷۷ ولت خواهد بود.

کلمات کلیدی: ریز شبکه، باتری‌های ذخیره‌ساز انرژی، پایداری ریزشبکه، منابع توان ریزشبکه

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

چکیده.....ز

فصل اول: مقدمه

۱-۱ مقدمه.....	۲
۲-۱ پیشینه تحقیق.....	۴
۳-۱ فرضیه تحقیق.....	۶
۴-۱ اهداف تحقیق.....	۶
۵-۱ نوآوری تحقیق.....	۶
۶-۱ ساختار گزارش.....	۶

فصل دوم: ریزشکه

۱-۲ ریز شبکه ها و اجزای آن.....	۹
۱-۱-۲ واحدهای تولید پراکنده بر اساس انرژی باد.....	۱۰
۲-۱-۲ انرژی خورشیدی.....	۱۲
۳-۱-۲ واحدهای تولید پراکنده - دیزل ژنراتور.....	۱۲
۴-۱-۲ واحدهای تولید پراکنده - پیل سوختی.....	۱۳
۱-۲-۴-۱ مزایای پیل های سوختی.....	۱۵
۲-۴-۱-۲ معایب پیل های سوختی.....	۱۶
۵-۱-۲ واحدهای تولید پراکنده - میکرو توربین.....	۱۶
۱-۲-۵-۱ مزایای میکرو توربین ها.....	۲۰
۲-۵-۱-۲ معایب میکرو توربین ها.....	۲۰
۲-۲ واحدهای تولید پراکنده - CHP.....	۲۰
۳-۲ واحد های ذخیره سازی پراکنده- نیروگاه تلمبه ذخیره ای.....	۲۴
۴-۲ واحد های ذخیره سازی پراکنده- سیستم های ذخیره سازی انرژی مغناطیسی با ابرسانای.....	۲۵
۵-۲ واحد های ذخیره سازی پراکنده- باتری یا پیل الکتریکی.....	۲۶

۶-۲ کانورتر های DC-AC در ریز شبکه ها ۲۸

فصل سوم: پایداری ریز شبکه

۱-۳ کنترل فرکانس شبکه ۳۱

۱-۱-۳ اهداف کنترل فرکانس شبکه قدرت ۳۱

۲-۳ کنترل کننده ها ۳۴

۳-۳ کنترل کلاسیک ۳۴

۱-۳-۳ زمان صعود ۳۵

۲-۳-۳ زمان نشست ۳۵

۳-۳-۳ بیشترین فراجهدش ۳۵

۴-۳-۳ انتگرال قدر مطلق خطا ۳۵

۴-۳ تنظیم پارامترهای کنترل کننده PID با روش زیگلر نیکولز ۳۶

۵-۳ ساختار ریز شبکه و کارکرد آنها در شرایط جزیره ای و متصل به شبکه ۳۷

۶-۳ پایداری در ریز شبکه ها ۴۱

۱-۶-۳ پایداری سیگنال کوچک ۴۳

۲-۶-۳ پایداری گذرا ۴۳

۳-۶-۳ پایداری ولتاژ ۴۴

۷-۳ بهبود پایداری در ریز شبکه ۴۵

۱-۷-۳ پایدار ساز ۴۵

۲-۷-۳ جبرانسازی توان راکتیو با DSTATCOM ۴۵

۳-۷-۳ سیستم ذخیره ساز انرژی ۴۶

۴-۷-۳ بارزدایی برای بهبود پایداری ۴۶

۸-۳ گذراهای جزیره ای شدن ۴۶

۹-۳ بارزدایی ۴۷

۱۰-۳ شاخص های استاتیک پایداری ولتاژ ۴۷

۱۱-۳ شاخص های نوع مرز ۴۹

۱-۱۱-۳ منحنی های $V-Q$ ۵۰

۵۱	.....$V - P$ منحنی های ۲-۱۱-۳
۵۲	.....جبران سازی راکتیو ۱۲-۳

فصل چهارم: شبیه سازی و نتایج عددی

۵۴	.....۱-۴ مقدمه
۵۶	.....۲-۴ مروری کلی بر ریز شبکه های اینورتری
۵۶	.....۱-۲-۴ ساختار کلی
۵۸	.....۲-۲-۴ الگوریتم کنترل منابع ریز شبکه
۶۰	.....۳-۴ کنترل اینورتر منابع ریز شبکه
۶۰	.....۱-۳-۴ کنترل کننده توان
۶۲	.....۲-۳-۴ کنترل کننده ولتاژ
۶۴	.....۳-۳-۴ کنترل کننده جریان
۶۵	.....۴-۳-۴ فیلتر LC خروجی و امپدانس متصل کننده
۶۵	.....۵-۳-۴ مدل بار
۶۶	.....۴-۴ شبیه سازی سیستم تحت مطالعه
۶۶	.....۱-۴-۴ پارامترهای شبیه سازی
۶۷	.....۲-۴-۴ نتایج مربوط به حالت عدم وجود منبع ذخیره ساز در شبکه
۷۰	.....۳-۴-۴ نتایج مربوط به حالت وجود منبع ذخیره ساز در شبکه

فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهاد ادامه کار

۷۵	.....۱-۵ نتیجه گیری
۷۵	.....۲-۵ پیشنهاد ادامه کار

منابع

فهرست اشکال

صفحه	عنوان
۱۳.....	شکل (۱-۲): تصویری از یک دیزل ژنراتور.....
۱۴.....	شکل (۲-۲): ساختار کلی پیل های سوختی.....
۱۸.....	شکل (۳-۲): نمایی برشی از درون یک میکرو توربین.....
۱۸.....	شکل (۴-۲): اجزای اصلی میکرو توربین ها.....
۲۳.....	شکل (۵-۲): طرحی کلی از ایده CHP.....
۲۴.....	شکل (۶-۲): نیروگاه تلمبه ای ذخیره ای سیاه بیشه.....
۲۶.....	شکل (۷-۲): نمایی از ساختار داخلی یک ذخیره ساز SMES.....
۲۶.....	شکل (۸-۲): تصویری از یک ذخیره ساز SMES.....
۲۹.....	شکل (۹-۲): ساختار کلی کانورترهای موجود در یک میکرو گرید برای حضور منابع تولید پراکنده و ذخیره سازی پراکنده.....
۳۲.....	شکل (۱-۳): تابع کنترلی کنترل کننده TCPS.....
۳۲.....	شکل (۲-۳): واحد خازنی ذخایر انرژی (CES).....
۳۳.....	شکل (۳-۳): شبکه ایزوله با کنترل کننده PI.....
۳۴.....	شکل (۴-۳): مدل کنترل فرکانسی ریز شبکه.....
۳۸.....	شکل (۵-۳): تصویری از یک میکرو گرید.....
۳۸.....	شکل (۶-۳): دیاگرام کلی از یک ریز شبکه حاصل از اتصال چندین منبع تولید انرژی پراکنده.....
۳۹.....	شکل (۷-۳): تغییرات جریان و ولتاژ یک ریز شبکه هنگام تغییر وضعیت از حالت متصل به شبکه به حالت جزیره ای.....
۴۰.....	شکل (۸-۳): ساختار کلی یک میکروگرید هنگامی که بارها توسط منابع تولید پراکنده تغذیه شوند.....
۴۱.....	شکل (۹-۳): ساختار کلی یک میکروگرید هنگامی که بارها توسط واحد های ذخیره سازی پراکنده تغذیه شوند.....
۵۵.....	شکل (۱-۴): نمایی از یک ریز شبکه.....
۵۷.....	شکل (۲-۴): ساختار کنترلی طراحی شده بدون باتری.....
۵۷.....	شکل (۳-۴): ساختار کنترلی طراحی شده با باتری.....

- شکل (۴-۴): بلوک دیاگرام اینورتر ۶۰
- شکل (۴-۵): شمای کنترلکننده توان ۶۱
- شکل (۴-۶): شمای کنترلکننده ولتاژ ۶۳
- شکل (۴-۷): شمای کنترلکننده ولتاژ پیادهسازی شده در نرم افزار MATLAB ۶۴
- شکل (۴-۸): شمای کنترلکننده جریان ۶۴
- شکل (۴-۹): بلوک دیاگرام کلی اینورتر به همراه کنترل کنندهها ۶۶
- شکل (۴-۱۰): تغییرات فرکانس ریزشبه در طول بازه شبیهسازی (عدم وجود باتری) ۶۸
- شکل (۴-۱۱): تغییرات ولتاژ ریزشبه در طول بازه شبیهسازی (عدم وجود باتری) ۶۸
- شکل (۴-۱۲): تغییرات توان اکتیو بار و منابع ریزشبه در طول بازه شبیهسازی (عدم وجود باتری) ۶۹
- شکل (۴-۱۳): تغییرات توان راکتیو بار و منابع ریزشبه در طول بازه شبیهسازی (عدم وجود باتری) ۷۰
- شکل (۴-۱۴): تغییرات فرکانس ریزشبه در طول بازه شبیهسازی (وجود باتری) ۷۱
- شکل (۴-۱۵): تغییرات ولتاژ ریزشبه در طول بازه شبیهسازی (وجود باتری) ۷۱
- شکل (۴-۱۶): تغییرات توان اکتیو بار و منابع ریزشبه در طول بازه شبیهسازی (وجود باتری) ۷۲
- شکل (۴-۱۷): تغییرات توان راکتیو بار و منابع ریزشبه در طول بازه شبیهسازی (وجود باتری) ۷۲
- شکل (۴-۱۸): مقایسه تغییرات ولتاژ در حالت عدم حضور و حضور باتری ۷۳
- شکل (۴-۱۹): مقایسه تغییرات فرکانس در حالت عدم حضور و حضور باتری ۷۳

فهرست جداول

صفحه	عنوان
۳۷	جدول (۱-۳): تنظیم ضرایب کنترل کننده کلاسیک با استفاده از روش زیگلر نیکولز.....
۶۷	جدول (۱-۴): مشخصات ریز شبکه تحت مطالعه.....



۱-۱ مقدمه

امروزه با گسترش فن‌آوری‌های تولید انرژی، افزایش توجه به مسائل زیست محیطی و علاقه برای بهبود قابلیت اطمینان شبکه‌های الکتریکی، امکان و انگیزه‌ی لازم برای تغییر شبکه‌های توزیع از حالت غیر فعال به فعال و رغبت در تولید انرژی‌های تجدیدپذیر در سطح سیستم توزیع فراهم شده است. این منابع تولید توان به علت ظرفیت کم آنها نسبت به واحدهای نیروگاهی در نزدیکی بار، به شبکه متصل می‌شوند. ریزشبکه‌ها، شبکه‌های توزیعی هستند که در آنها مرکز تولید توان به بار نزدیک است. تشکیل ریزشبکه‌ها بیانگر یک راهکار مناسب برای تأمین بدون وقفه‌ی بارهای حساس و مهم، در صورت عدم وجود شبکه می‌باشد. ریزشبکه شامل مجموعه‌ای از منابع تولید پراکنده و بارها می‌باشد که به صورت یک واحد مستقل و قابل کنترل فعالیت می‌کند. توان تولید شده توسط برخی منابع تولید پراکنده تابع شرایط الکتریکی بوده و توسط اپراتور سیستم قابل تعیین می‌باشد. حال آنکه توان تولید شده در برخی دیگر از منابع تولید پراکنده نظیر سلول‌های خورشیدی و توربین‌های بادی، به عوامل غیر الکتریکی نظیر شرایط آب و هوایی وابسته است. توان تولید شده توسط این قبیل منابع، متغیر بوده و توسط اپراتور سیستم قابل کنترل نمی‌باشد [۱].

ریزشبکه‌ها می‌توانند از طریق یک نقطه‌ی کوپلینگ مشترک به شبکه اصلی متصل شوند و یا به صورت مستقل از شبکه‌ی اصلی مورد بهره‌برداری قرار گیرند. طراحی اولیه‌ی ریزشبکه‌ها باید به نحوی باشد که در هنگام بهره‌برداری در حالت مستقل از شبکه اصلی، تعادل میان تولید و مصرف توان برقرار باشد. تحلیل پخش بار نیز برای سناریوهای مختلف طراحی باید انجام پذیرد تا از حفظ تنظیم ولتاژ مناسب اطمینان حاصل گردد. استانداردهای کنونی اجازه‌ی بهره‌برداری ریزشبکه‌ها در حالت مستقل از شبکه‌ی اصلی را نمی‌دهند. دلیل اصلی آن نیز مسائل ایمنی مرتبط با لحظه منفصل شدن از شبکه اصلی است. به عبارت دیگر، حالت گذرای ایجاد شده هنگام جزیره شدن ریزشبکه به خصوص هنگامی که ریزشبکه در حال تغذیه بار راکتیو محلی می‌باشد، می‌تواند امنیت هر دو سمت را به مخاطره بیندازد.

همچنین پیچیده بودن کنترل ولتاژ و فرکانس سمت ریزشبکه دلائل دیگری هستند که امکان جزیره شدن را با مشکل مواجه می‌سازند. از طرفی سیستم‌های ذخیره‌ی انرژی با ذخیره کردن انرژی الکتریکی در ساعت‌های کم باری و فروش انرژی ذخیره شده در ساعت‌هایی که قیمت برق بالا باشد، علاوه بر کسب سود

قابل توجه، به کاهش پیک بار نیز کمک می‌کنند. همچنین استفاده از سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی به عنوان روشی موثر جهت از بین بردن اثرات منفی ماهیت تناوبی و غیر قابل پیش‌بینی توان تولیدی واحدهای بادی و خورشیدی مطرح می‌باشد. با توجه به حضور منابع تجدیدپذیر مختلف در ریزشبکه‌ها و همچنین امکان حضور ریزشبکه‌ها در بازار برق، می‌توان نتیجه گرفت که ذخیره‌سازهای انرژی نقش مهمی در بهره‌برداری بهینه از ریزشبکه‌ها بر عهده دارند [۲].

از سویی دیگر با پیشرفت تکنولوژی و متناسب با آن افزایش حساسیت مصرف‌کننده‌ها به کیفیت توان و قابلیت اطمینان سیستم، نیاز به ایجاد بستر مناسب برای تأمین انرژی با استانداردهای بالا که منظر اقتصادی در آن لحاظ شده باشد بیش از پیش احساس می‌گردد. ریز شبکه‌ها با هدف مدیریت اقتصادی تولید، افزایش قابلیت اطمینان و کیفیت توان تولیدی به وجود آمده‌اند و تا حدود زیادی پاسخگوی نیازهای مصرف‌کننده‌های کنونی هستند. ریز شبکه‌ها با ارائه ساختار جدید در بخش توزیع با ویژگی‌هایی همچون، تعدد منابع به ازای واحد توان تولیدی نسبت به شبکه‌های سنتی و حضور بارهای حساس‌تر نوید چالش‌های کنترلی جدیدی را می‌دهند. بنابراین با توجه به اینکه ریز شبکه‌ها بعنوان تجمیعی از بار و تولیدات پراکنده، نقش بسیار مهمی در حال و آینده سیستم قدرت دارند، مسائل مختلف مربوط به آن باید بررسی شود. یکی از جنبه‌های مهم ریز شبکه بحث پایداری آن می‌باشد که باید با وجود انواع تولیدات پراکنده و بارها پایدار بماند. از این رو ساختار سیستم و توپولوژی کنترلی آن تا حد زیادی مرتبط با پایداری ریز شبکه خواهد بود [۳].

با توجه به موارد اشاره شده در این پژوهش مسئله پایداری ریزشبکه از نظر ولتاژ و فرکانس در دو حالت کاری متصل و منفصل از شبکه اصلی مد نظر قرار گرفته شده است. در این راستا با کنترل هماهنگ منابع تولید توان در ریزشبکه و سیستم‌های ذخیره ساز انرژی پایداری ریزشبکه در نرم افزار MATLAB ارزیابی شده است.

۱-۲ پیشینه تحقیق

در سال‌های اخیر، تحقیقات زیادی پیرامون بهبود عملکرد ریز شبکه و افزایش پایداری در آن ارائه شده است. در [۴] به ماکزیمم سازی میزان بارپذیری و همچنین می نیمم سازی تلفات در ریز شبکه با استفاده از تکنیک بازآرایی پرداخته شده است. در این تحقیق از یک شاخص بهبود یافته به منظور تخمین حاشیه پایداری ولتاژ در ریز شبکه های جزیره ای استفاده شده است. لازم به ذکر است که در این پژوهش مسئله افزایش بارپذیری در حالت منفصل از شبکه اصلی نسبت به حالت متصل بواسطه محدودیت های عملیاتی مد نظر قرار گرفته شده است. مطالعات با استفاده از الگوریتم چند هدفه جستجوی هارمونی برای شبکه های ۳۳ و ۶۳ شینه ارزیابی شده است. در [۵] مدیریت ریز شبکه ها در نظر گرفتن مسئله مشارکت واحدها و با استفاده از تکنیک بازآرایی احتمالاتی ارزیابی شده است. در این راستا از یک مدل احتمالاتی جهت مدیریت ریز شبکه در محیط بازار برق روزانه استفاده شده است. در واقع در این پژوهش تعیین ساختار بهینه جهت حداکثر سازی میزان سود با در نظر گرفتن توان مورد تقاضا و عدم قطعیت تولیدات بادی مد نظر قرار گرفته است. در [۶] مسئله پایداری گذرا در شبکه های توزیع در حضور ریز شبکه ها ارزیابی شده است. در این مطالعه موضوع پایداری گذرا در شبکه چند ماشینه بر اساس پایداری گذرای منطقه ای بررسی شده است. در [۷] ارتباط بین خروجی توان راکتیو و مشخصه تنظیم امپدانس مجازی جهت تعیین استراتژی تقسیم توان راکتیو در ریز شبکه ارزیابی شده است. در ادامه مقدار مرجع توان راکتیو برای هر منبع تولید پراکنده جهت تنظیم امپدانس مجازی به منظور جبران سازی در ریز شبکه تعیین شده است. در [۸] پایداری ریز شبکه دارای کنترل کننده افقی تحت شرایط بار غیر خطی ارزیابی شده است. در این راستا در ابتدا توان مولفه اصلی محاسبه و سپس خروجی توان اینورتر در حضور امپدانس مجازی تنظیم می گردد. در ادامه نیز از روش آنالیز پایداری سیگنال کوچک به منظور آنالیز توان هارمونیک مجازی نیز استفاده شده است. نتایج شبیه سازی نیز در شرایط بار خطی و غیر خطی با یکدیگر مقایسه شده اند. در [۹] بهینه سازی امپدانس مجازی جهت تقسیم توان راکتیو در ریز شبکه ارزیابی شده است. در این تحقیق با استفاده از کنترل کننده های امپدانس مجازی بهینه و با اندازه گیری بار محلی، تقسیم توان راکتیو در ریز شبکه صورت گرفته است. نتایج حاکی از آن است که بهینه سازی کنترل کننده امپدانس مجازی سبب بهبود عملکرد تقسیم توان راکتیو در ریز شبکه می گردد.

در [۱۰] مسئله کنترل ریز شبکه ولتاژ متوسط با استفاده از حلقه امیدانس مجازی توالی منفی ارزیابی شده است. در این راستا از منابع انرژی توزیع شده و بارهای نامتعادل بهره گرفته شده است. همچنین جهت تنظیم ولتاژ بار و توان متوسط میان منابع تولید پراکنده نیز از کنترل کننده تناسبی و افی استفاده شده است. لازم به ذکر است که کنترل کننده امیدانس مجازی توالی منفی به منظور جبران جریان توالی منفی در بارهای نامتعادل استفاده شده که در نهایت سبب بهبود کیفیت توان شده است. در [۱۱] مسئله تخصیص بهینه توان اکتیو و راکتیو در یک ریز شبکه جزیره ای با امیدانس مجازی با استفاده از یک کنترل کننده افی بهبود یافته ارزیابی شده است. لازم به ذکر است که در این تحقیق امیدانس معادل اینورتر با در نظر گرفتن مشخصه سلفی محاسبه شده است. روش مورد مطالعه در این پژوهش نیز با روش های قبلی مقایسه و نتایج حاکی از آن است که روش پیشنهادی توانایی تخصیص موثر توان اکتیو و راکتیو را بصورت همزمان دارا می باشد. در [۱۲] مسئله بهبود پایداری سیگنال کوچک و پایداری گذرا در ریز شبکه ارزیابی شده است. در این راستا در این تحقیق مسئله حاشیه پایداری سیستم با ترکیب های مختلف از اینورترها و منابع تولید توان با یکدیگر مقایسه شده اند. مطالعات در یک ریز شبکه ۱۳ شینه IEEE با استفاده از روش بردار حالت پیاده سازی شده است. لازم به ذکر است که در این تحقیق از روش کنترل افی در راستای بهبود پاسخ گذرا با حاشیه پایداری استفاده است. در [۱۳] دسته بندی جامع در رابطه با مسئله پایداری ریز شبکه ارائه شده است. در این مرجع انواع روش های پایداری ریز شبکه با در نظر گرفتن مشخصه های ریز شبکه و با لحاظ حالت عملکرد و همچنین نوع خطا در قالب زمانی ارزیابی شده است. در [۱۴] توانایی کنترل کننده های متمرکز جهت پایداری سازی اینورتر در ریز شبکه جزیره ای ارزیابی شده است. لازم به ذکر است که کنترل کننده متمرکز اندازه گیری های همزمان در ریز شبکه را با استفاده از PMU^۱ و به صورت WAM^۲ پیاده نموده است. همچنین در این تحقیق طراحی کنترل کننده بر اساس روش کنترلی LQG^۳ صورت گرفته و جهت اثبات کارایی کنترل کننده پیشنهادی سطوح مختلف بار نیز آنالیز شده است. در [۱۵] کنترل ریز شبکه با کنترل کننده مد لغزشی ارزیابی شده است. در این راستا از کنترل مد لغزشی جهت ملایم سازی حالت گذرا بین ریز شبکه های جزیره ای و متصل به شبکه بهره گرفته شده است.

^۱ Phasor Measurement Units

^۲ Wide Area Measurement

^۳ linear Quadratic Gaussian

۱-۳ فرضیه تحقیق

- ✓ ریزشبكة مورد مطالعه به صورت مقاومتی - سلفی در نظر گرفته شده است.
- ✓ استفاده از اینورترهای منبع ولتاژ سبب افزایش کارایی روش کنترلی می گردد.

۱-۴ اهداف تحقیق

در این پژوهش اهداف زیر دنبال می گردد:

- ✓ کنترل هماهنگ باتری های ذخیره ساز و منابع تولید توان
- ✓ بالانس بار و کنترل میزان تولید منابع در ریزشبكة
- ✓ لحاظ اثرات ناشی از تغییرات توان اکتیو و راکتیو
- ✓ بهبود پایداری ریز شبکه در حالت متصل و منفصل از شبکه

۱-۵ نوآوری تحقیق

به طور کلی نوآوری این پایان نامه شامل موارد زیر است:

- ✓ کنترل هماهنگ با مشارکت سیستم های ذخیره ساز انرژی و منابع تولید توان جهت بالانس بار در ریزشبكة
- ✓ افزایش پایداری ریزشبكة در حالت متصل و منفصل از شبکه با در نظر گرفتن تغییرات توان اکتیو و راکتیو
- ✓ در نظر گرفتن خاصیت مقاومتی - سلفی ریز شبکه با هدف تأمین بار راکتیو
- ✓ استفاده از اینورترهای منبع ولتاژ به منظور دریافت حداکثر توان منابع تولید پراکنده و افزایش کارایی ریزشبكة در حالت منفصل از شبکه اصلی

۱-۶ ساختار گزارش

در فصل دوم پژوهش پیش رو به معرفی ریزشبكة و اجزای مربوطه پرداخته شده است. در این راستا منابع بادی، خورشیدی، فیول سل و ... مورد ارزیابی قرار گرفته شده اند. در ادامه مسائل مربوط به پایداری

سیستم قدرت و ریزش‌بکه در فصل سوم تشریح شده است. نتایج شبیه‌سازی به همراه مسائل مربوط به ریزش‌بکه‌های اینورتری در فصل چهارم ارائه شده است. لازم به ذکر است که نتایج در سناریوهای مختلفی در حالت متصل و منفصل از شبکه اصلی در حضور و عدم حضور سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی تحلیل شده است. در نهایت نیز در فصل پنجم نتیجه‌گیری و پیشنهاد ادامه کار مطرح شده است.

فصل دوم: ریز شبکه

۲-۱ ریز شبکه‌ها و اجزای آن

مدیریت انرژی، به‌تنهایی و تحت تأثیر تعادل میان عرضه و تقاضای انرژی به وجود نخواهد آمد و لازم است دولت‌ها و مراجع سیاست‌گذار و تصمیم‌گیر از راهکارهای مناسب برای نیل به آن استفاده کنند. ازجمله راهکارهای در حال استفاده در کشورهایی که پیشرفت‌های بسیاری در این زمینه داشته‌اند، استفاده از تولیدات غیرمتمرکز است. تولیدات غیرمتمرکز می‌توانند از طریق تمرکززدایی و گوناگونی منابع انرژی اولیه می‌توان به کاهش مؤثر و اقتصادی در انتشار گازهای گلخانه‌ای رسید. منابع انرژی تجدیدپذیر به‌عنوان جایگزینی برای سوخت‌های فسیلی نقش بسیار مهمی در سیستم‌های انرژی آینده بازی می‌کنند [۱۶].

میکروگریدها، نمونه عملی از یک بستر مناسب برای تولید غیرمتمرکز می‌باشند. رشد و گسترش این واحدها نه‌تنها بازدهی متوسط نیروگاه‌های هر کشور را به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد، بلکه سبب کاهش تلفات انتقال شده و خودبه‌خود از دید کلان نیز به سود کشور است. تشکیل میکروگرید می‌تواند علاوه بر تأمین انرژی الکتریکی موردنیاز، امکان مبادله انرژی میان مصرف‌کنندگان انرژی با شبکه برق را با توجه به شرایط محیط جدید بازار برق فراهم آورد. در این میان، انتخاب و به‌کارگیری فناوری‌های مناسب و برنامه‌ریزی صحیح و طراحی دقیق نوع و ظرفیت اجزای تولید و ذخیره‌ساز انرژی در میکروگرید دارای اهمیت ویژه‌ای است. از سوی دیگر نیازهای اقتصادی و حرکت رو به رشد در بازارهای الکتریکی باعث افزایش توجه به استفاده از مدل‌ها و روش‌های بهینه‌سازی تصادفی به‌منظور مدیریت عدم قطعیت در سیستم‌های قدرت شده است [۱۷]. یک میکروگرید، مجموعه‌ای از منابع انرژی غیرمتمرکز است که به‌صورت هماهنگ جهت فراهم نمودن انرژی ارزان الکتریکی/حرارتی باقابلیت اطمینان بالا و سازگار با محیط‌زیست مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد. در یک طبقه‌بندی کلی یک ریز شبکه شامل واحدهای تولید پراکنده واحدهای و واحدهای ذخیره‌سازی پراکنده با مشخصات و ظرفیت‌های متفاوت می‌باشند؛ بنابراین می‌توان چنین دسته‌بندی کرد [۱۸].

واحدهای تولید پراکنده عبارت‌اند از:

- انرژی باد
- انرژی خورشید
- دیزل ژنراتور
- پیل سوختی

▪ میکرو توربین

۲-۱-۱ واحدهای تولید پراکنده بر اساس انرژی باد

تبدیل انرژی باد به نوعی مفید از انرژی (انرژی الکتریکی) با استفاده از توربین های بادی است. انرژی باد نظیر سایر منابع انرژی تجدید پذیر، به طور گسترده ولی پراکنده در دسترس می باشد. انرژی بادی می تواند در مقادیر زیاد در مزارع بادی تولید و به شبکه الکتریکی متصل می شود. باد یکی از شاخصه های اصلی انرژی خورشیدی و هوای متحرک است و فقط جزء کوچکی از انرژی خورشید به اتمسفر می رسد به انرژی باد تبدیل می شود. از جمله دلایل تمایل کشورها برای افزایش ظرفیت تولید برق بادی مزایا بسیار زیاد این روش تولید انرژی الکتریکی است چراکه انرژی بادی فراوان، تجدید پذیر و پاک است، در همه جای دنیا وجود دارد و همچنین در مقایسه با استفاده از انرژی سوخت های فسیلی میزان کمتری گاز گلخانه ای منتشر می کند [۱۹].

با توجه به تغییرات باد قابلیت پیش بینی محدودی (ساعتی یا روزانه) برای خروجی نیروگاه های بادی یا مراکز کوچک تولید پراکنده بر اساس انرژی باد وجود دارد؛ مانند دیگر منابع انرژی مراکز انرژی بادی نیز باید از قابلیت برنامه ریزی برخوردار باشد اما طبیعت باد این پدیده را ذاتاً متغیر می کند. گرچه از روش هایی برای پیش بینی تولید توان برای این واحدهای تولید استفاده می شود اما در کل قابلیت پیش بینی پذیری این نیروگاه ها پایین است. این عیب معمولاً به استفاده از روش های ذخیره سازی انرژی مانند استفاده از نیروگاه های آب تلمبه ای تا حدودی برطرف می شود. انتخاب مکان مناسب برای نصب نیروگاه بادی یا مراکز تولید پراکنده بادی در مقیاس های کوچک تر جهت نصب توربین ها در محل از نکات حیاتی برای توسعه اقتصادی این گونه مراکز تولید انرژی است.

گذشته از دسترسی باد مناسب در محل مورد بحث، عوامل مهم دیگری مانند دسترسی به خطوط انتقال، قیمت زمین مورد استفاده، ملاحظات استفاده از زمین و مسائل زیست محیطی ساخت و بهره برداری نیز در انتخاب یک محل برای نصب مؤثر است. از این رو استفاده از مراکز تولید متمرکز و نامتمرکز بادی در مناطق دور از ساحل ممکن است هزینه های مربوط به ساخت یا ضریب ظرفیت را با استفاده از کاهش هزینه های تولید برق جبران کنند. تجهیزات تولید برق بادی در مقیاس کوچک (۱۰۰ کیلووات یا کمتر) معمولاً برای تغذیه منازل، زمین های کشاورزی

یا مراکز تجاری کوچک مورد استفاده قرار می‌گیرد. در برخی از مکان‌های دورافتاده که مجبور به استفاده از ژنراتورهای دیزلی هستند. مالکان محل ترجیح می‌دهند که از توربین‌های بادی استفاده کنند تا از ضرورت سوزاندن سوخت‌ها جلوگیری شود. برای تغذیه منازل دورافتاده یا حضور آن‌ها در یک ریز شبکه از توربین‌های بادی با اتصال به باتری استفاده می‌شود. در ایالات متحده استفاده از توربین‌های بادی متصل به شبکه در رنج‌های ۱ تا ۱۰ کیلووات برای تغذیه منازل به‌طور فزاینده‌ای در حال گسترش است. توربین‌های متصل به شبکه در هنگام کار نیاز به استفاده از برق شبکه را از بین می‌برند. در سیستم‌های جدا از شبکه یا باید از برق به‌صورت دوره‌ای استفاده کرد و یا از باتری برای ذخیره‌سازی انرژی استفاده کرد. در مناطق شهری که امکان استفاده از باد در مقیاس‌های زیاد وجود ندارد نیز ممکن است از انرژی بادی استفاده شود اما باید بستر مناسب برای اتصال آن‌ها به شبکه الکتریکی (ایده ریز شبکه) فراهم گردد. از نظر هزینه اولیه توربین‌های برق بادی در مقایسه با مجموع موتور برق و هزینه سوخت آن کاملاً مقرون به‌صرفه می‌باشد. امروزه این توربین‌ها در مقیاس پایین تا قدرت ۱۰ کیلووات برای تأمین برق مورد نیاز مناطق جزیره مصرف مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ که می‌توان از آن در حالت ترکیبی با منابع فتوولتائیک با ژنراتورهای دیزلی استفاده کرد. پتانسیل انرژی بادی در ایران وجود دارد. طبق اطلس بادی تهیه‌شده و بر اساس اطلاعات دریافتی از ۶۰ ایستگاه و در مناطق مختلف کشور، میزان ظرفیت اسمی سایت‌ها در حدود ۶۰۰۰۰ مگاوات می‌باشد. بر پایه پیش‌بینی‌های صورت گرفته، میزان انرژی قابل استحصال بادی کشور از لحاظ اقتصادی بالغ بر ۱۸۰۰۰ مگاوات تخمین زده می‌شود که مؤید پتانسیل قابل توجه کشور در زمینه احداث نیروگاه‌های بادی و همچنین اقتصادی بودن سرمایه‌گذاری در صنعت انرژی بادی می‌باشد. البته در زمینه احداث توربین‌های بادی در مقیاس‌های کوچک‌تر جهت استفاده در ریز شبکه‌ها نیاز به مطالعات گسترده‌تر و طولانی‌تر است.

حضور توربین‌های بادی با مقیاس کوچک نیازمند زیرساخت‌های مناسب نظیر حضور گسترده شبکه‌های هوشمند است [۲۰].

۲-۱-۲ انرژی خورشیدی

انرژی خورشیدی منحصربه‌فردترین منبع «انرژی تجدید پذیر» در جهان است و منبع اصلی تمامی انرژی‌های موجود در زمین است. انرژی خورشیدی به‌صورت مستقیم و غیرمستقیم می‌تواند به اشکال دیگر انرژی تبدیل گردد.

با وجود آنکه انرژی خورشید و مزایای آن در قرون گذشته به‌خوبی شناخته‌شده بود ولی بالا بودن هزینه اولیه چنین سیستم‌هایی از یک طرف و عرضه نفت و گاز ارزان از طرف دیگر سد راه پیشرفت این سیستم‌ها شده بود تا اینکه افزایش قیمت نفت در سال ۱۹۷۳ باعث شد که کشورهای پیشرفته صنعتی مجبور شدند به مسئله تولید انرژی از راه‌های دیگر (غیر از استفاده سوخت‌های فسیلی) توجه جدی‌تری نمایند [۲۰].

۲-۱-۳ واحدهای تولید پراکنده - دیزل ژنراتور

دیزل ژنراتور شکل (۲-۱)، به ترکیبی از موتور دیزل، ژنراتور و انواع متعلقات فرعی از قبیل سیستم‌های کنترل، قطع‌کننده‌های اضطراری مدار، سیستم مولد گرما، سیستم استارت اتومات و غیره که به‌منظور تولید برق استفاده می‌شود، می‌گویند. دیزل ژنراتورها می‌توانند از ۱ تا ۲۰ کیلوولت آمپر برای منازل، فروشگاه‌ها، ادارات کوچک و تا چند مگاوات آمپر قابل‌استفاده برای مجتمع‌های اداری بزرگ و کارخانه‌ها برق تولید کنند. یک دیزل ژنراتور ۲۰۰۰ کیلوولت آمپر را می‌توان درون یک اتاقک ایزوله قابل‌حمل قرارداد. ژنراتورهای ۵ مگاوات برای ایستگاه‌های کوچک تولید برق استفاده می‌شوند و برای این منظور می‌توان از چندین دستگاه دیزل ژنراتور استفاده کرد. ژنراتورها در سایزهای بزرگ‌تر به‌صورت مجزا به محل نصب حمل و در آنجا مونتاژ و تجهیزات فرعی به آن‌ها اضافه می‌شود. این تجهیزات بر اساس ظرفیت تولید نرمال تا ماکزیمم و بر اساس قدرت تولیدی و به کیلووات طبقه‌بندی و نام‌گذاری شده و با توجه به نوع مصرف برای تولید برق مستمر یا اضطراری انتخاب می‌شوند.

دیزل ژنراتورهای کوچک تا ۲۵۰ کیلوولت آمپر نه‌تنها برای تولید برق اضطراری بلکه به جهت تأمین برق موردنیاز به‌صورت مستمر یا در زمان اوج مصرف و یا حتی در زمانی که کمبود ژنراتورهای بزرگ‌تر حس می‌شود استفاده می‌شوند. در نظر گرفتن سایز دیزل ژنراتور برای جلوگیری از کم شدن بار یا کمبود توان ضروری است. مجموعه دیزل ژنراتورها در مکان‌هایی

بدون اتصال به شبکه توان و در مواقعی که نیاز ضروری به فراهم کردن توان و انرژی است مورد استفاده قرار می گیرند.



شکل (۱-۲): تصویری از یک دیزل ژنراتور [۲۱].

یک یا چند دیزل ژنراتوری که بدون اتصال به شبکه برق عمل می کند در اصطلاح در وضعیت جزیره عمل می کنند. بار می تواند بین ژنراتورهای در حال فعالیت موازی از طریق تقسیم بار سهیم شود. تقسیم بار می تواند با استفاده از کنترل افت سرعت به وسیله فرکانس در ژنراتور کنترل شود، درحالی که به طور مداوم کنترل سوخت موتور برای تغییر بار تنظیم می شود و از منابع قدرت باقی مانده است.

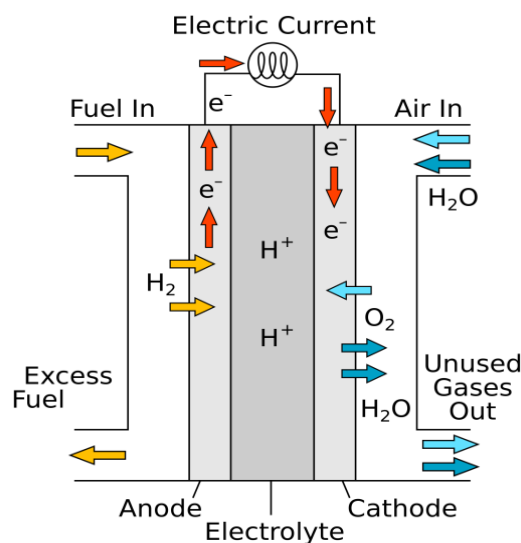
یک دیزل ژنراتور بار بیشتری می گیرد هنگامی که سوخت تأمینی برای احتراق در سیستم افزایش می یابد و بار رها خواهد شد اگر سوخت تأمینی کاهش یابد. علاوه بر وظایف شناخته شده مانند تأمین توان پس از قطع شبکه، دیزل ژنراتورها به طور معمول شبکه های قدرت اصلی در سراسر جهان را پشتیبانی می کنند.

۲-۱-۴ واحدهای تولید پراکنده - پیل سوختی

پیل سوختی یک مبدل انرژی شیمیایی به انرژی الکتریکی است. این تبدیل مستقیم بوده و بنابراین از بازده بالایی برخوردار است. درواقع می توان گفت که در این تبدیل از عمل عکس الکترولیز آب استفاده می گردد، به عبارت دیگر از واکنش بین هیدروژن و اکسیژن، آب، حرارت و الکتریسیته تولید می گردد. هر پیل سوختی دارای دو الکترود (آند و کاتد) و یک الکترولیت مابین

این دو الکتروود است. در قطب آند، هیدروژن با یک کاتالیزور واکنش نشان داده و تولید یک یون با بار مثبت و الکترون با بار منفی می‌کند. پروتون به وجود آمده از محیط الکتروولیت گذر کرده حال آنکه الکترون در فضای مدار حرکت می‌کند و تولید جریان می‌نماید. در قطب کاتد اکسیژن با یون و الکترون واکنش نشان داده و تولید آب و حرارت می‌نماید. این سلول به تنهایی ۰,۷ ولت نیروی محرکه الکتریکی تولید می‌کند که برای روشنایی یک لامپ کوچک کافی می‌باشد. اگر این پیل‌ها به صورت سری قرار گیرند قادر به تولید برق با توان چندین مگاوات می‌باشند. ساختار کلی یک پیل سوختی را در شکل (۲-۲) می‌بینید [۲۲-۲۴].

پیل‌های سوختی فناوری جدیدی برای تولید انرژی هستند که بدون ایجاد آلودگی‌های زیست محیطی و صوتی، از ترکیب مستقیم بین سوخت و اکسیدکننده، انرژی الکتریکی با بازدهی بالا تولید می‌کنند. تولید مستقیم الکتریسته جایگزینی برای چرخه کارنو جهت تبدیل انرژی شیمیایی حاصل از سوخت به انرژی گرمایی و مکانیکی و در نهایت الکتریسته می‌باشد که اتلاف انرژی را به حداقل ممکن می‌رساند. در پیل‌های سوختی اکسید جامد سرامیکی (اکسید سرامیک) رسانای یون در الکتروولیت است و از اهمیت بسزایی برخوردار است. این پیل در دمای بین ۶۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد کار می‌کند و با بازده در حدود ۶۰ درصد، توان الکتریکی معادل ۱۰۰ مگاوات دارد. در حال حاضر تعداد زیادی از محققان روی جنبه‌های مختلف پیل سوختی اکسید جامد، جهت بهبود خواص پیل کار می‌کنند. برای این کار روی خواص الکتروودها و الکتروولیت که مهم‌ترین قسمت‌های پیل می‌باشند را بهینه‌سازی می‌کنند و روی عناصر و مواد تشکیل‌دهنده آن‌ها مطالعه انجام می‌دهند.



شکل (۲-۲): ساختار کلی پیل‌های سوختی [۲۴].

پیل‌های سوختی در انواع مختلف موجود می‌باشند. پیل‌های سوختی بر اساس نوع الکترولیت استفاده‌شده در آن‌ها به پنج نوع اصلی طبقه‌بندی می‌شوند:

- پیل سوختی الکترولیت پلیمر یا غشاء مبادله‌کننده پروتون
- پیل سوختی قلیایی
- پیل سوختی اسید فسفریک
- پیل سوختی کربنات مذاب
- پیل سوختی اکسید جامد
- پیل سوختی میکروبی
- پیل سوختی اسید فرمیک
- پیل سوختی هوا-روی
- پیل سوختی سرامیکی

۲-۱-۴ مزایای پیل‌های سوختی

مزایای پیل‌های سوختی به‌طور کلی عبارت‌اند از:

- پیل سوختی آلودگی ناشی از سوزاندن سوخت‌های فسیلی را حذف نموده و تنها محصول جانبی آن آب می‌باشد.
- در صورتی که هیدروژن مصرفی حاصل از الکترولیز آب باشد نشر گازهای گلخانه‌ای به صفر می‌رسد.
- به دلیل وابسته نبودن به سوخت‌های فسیلی متداول نظیر بنزین و نفت، وابستگی اقتصادی کشورهای ناپایدار اقتصادی را حذف می‌کند.
- با نصب پیل‌های سوختی نیروگاهی کوچک، شبکه غیرمتمرکز نیرو گسترده می‌گردد.
- پیل‌های سوختی راندمان بالاتری نسبت به سوخت‌های فسیلی متداول نظیر نفت و بنزین دارد.
- هیدروژن در هر مکانی از آب و برق تولید می‌گردد. لذا پتانسیل تولید سوخت، غیرمتمرکز خواهد شد.
- اکثر پیل‌های سوختی در مقایسه با موتورهای متداول بسیار بی‌صدا هستند.

- انتقال گرما از پیل‌های دماپایین بسیار کم می‌باشد لذا آن‌ها را برای کاربردهای نظامی مناسب خواهد شد.
- زمان عملکرد آن‌ها از باتری‌های متداول بسیار طولانی‌تر است. فقط با دو برابر نمودن سوخت مصرفی می‌توان زمان عملکرد را دو برابر نمود و نیازی به دو برابر کردن خود پیل نیست.
- سوخت‌گیری مجدد پیل‌های سوختی به راحتی امکان‌پذیر می‌باشد و هیچ‌گونه اثرات حافظه‌ای بر جای نمی‌گذارد.
- به علت عدم وجود اجزای متحرک نگهداری از آن‌ها بسیار ساده می‌باشد.
- نصب و بهره‌برداری از پیل‌های سوختی بسیار ساده و مقرون به صرفه می‌باشد.
- پیل‌های سوختی مدو لار می‌باشند یعنی به راحتی توان تولیدی از آن‌ها قابل افزایش می‌باشد.
- این مولدها قابلیت تولید هم‌زمان برق و حرارت را دارند.
- امکان استفاده از سوخت‌های تجدید پذیر و سوخت‌های فسیلی پاک در آن‌ها وجود دارد.
- به میکرو توربین‌ها متصل می‌گردند.
- پیل سوختی به تغییر بار الکتریکی پاسخ می‌دهد.
- پیل سوختی امکان تولید برق مستقیم باکیفیت بالا را دارد.
- دانسیته نیروی بالا دارد. میزان بازدهی آنها نسبت به سلول‌های دیگر بالاتر است. [۲۳]

۲-۴-۱-۲ معایب پیل‌های سوختی

- معایب پیل‌های سوختی به‌طور کلی عبارت‌اند از:
- به مواد بیشتر و فرایندهای سریع‌تری نسبت به دیگر پیل‌ها نیاز دارد.
 - ممکن است در مدت طولانی کار، گرما مشکلاتی چون ناسازگاری عناصر و افت انرژی را موجب شود.
 - در صورت استفاده از سوخت ناخالص، کار و گرمای بیش از حد موجب رسوب کربن و درنهایت مسمومیت پیل می‌گردد. [۲۲]

۲-۱-۵ واحدهای تولید پراکنده - میکرو توربین

تولید توزیع شده انرژی الکتریکی یکی از اهدافی است که مدت‌ها مورد توجه بوده است. امروزه با گسترش سیستم‌های مختلف تولید انرژی الکتریکی در ساختمان‌های اداری و یا ساختمان‌ها و مجتمع‌های بزرگ و متوسط، روش‌های گوناگونی مانند استفاده از انرژی خورشیدی، انرژی باد، پیل‌های سوختی و انواع دیزل ژنراتورها مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ اما هر کدام از این روش‌ها دارای مزیت‌ها و معایب مخصوص به خود می‌باشد. داشتن یک سیستم تولید انرژی قابل اعتماد، کم‌هزینه و همیشه در دسترس، استفاده از توربین‌های گازی کوچک را به عنوان کاندید مهمی معرفی نموده است. میکرو توربین‌های گازی در واقع توربین‌های گازی با مقیاس بسیار کوچک و ساده‌تر می‌باشند. این توربین‌ها دارای ساختار و اندازه ساده‌ای بوده و به راحتی با استفاده از انواع سوخت‌ها می‌توانند به تولید انرژی الکتریکی با استفاده از ژنراتورهای ترکیب شده با خود پردازند [۱۶].

اکثر میکرو توربین‌ها تک مرحله‌ای بوده و از یک ژنراتور مغناطیس دائم سرعت بالا، برای تولید برق متناوب استفاده می‌کنند. همچنین به دلیل بالا بردن راندمان کلی سیستم و بهینه‌سازی انرژی می‌توان از گرمای حاصل از احتراق سوخت در این توربین‌ها نیز استفاده نمود. یکی از مهم‌ترین مزیت‌های میکرو توربین‌ها سادگی ساختار و کوچکی ابعاد آن‌ها می‌باشد. یک نمای برش خورده از یک میکرو توربین را در شکل (۲-۳) مشاهده می‌کنید. میکرو توربین‌ها اغلب برای مکان‌های تجاری و ساختمان‌های بزرگ مانند هتل‌ها، مراکز آموزشی و اداری مورد استفاده قرار می‌گیرند. این تولیدهای پراکنده قابل معرفی و ساختار بندی در یک میکرو گرید هستند.

سیستم میکرو توربین‌ها بر اساس مصرف و تولید انرژی شامل سه نوع می‌باشد که به طور خلاصه در زیر شرح داده شده‌اند:

۱- میکرو توربین‌های دارای رکوپراتور، به دلیل استفاده از گرمای خروجی اگزوز توربین، دارای بازده بیشتری می‌باشند.

۲- میکرو توربین‌های بدون رکوپراتور (دارای سیکل ساده) دارای بازدهی کمتری هستند اما در مقابل دارای قیمت پایین‌تری نیز می‌باشند.

۳- میکرو توربین‌ها بر اساس سیستم‌های تولید هم‌زمان (CHP)

اجزاء اصلی میکرو توربین عبارت است از:

۱- کمپرسور و توربین شعاعی تک مرحله‌ای

¹Combined Heat and Power

۲- ژنراتور مغناطیسی دائمی سرعت بالا (بالا تر از ۱۲۰۰۰۰ دور بر دقیقه)

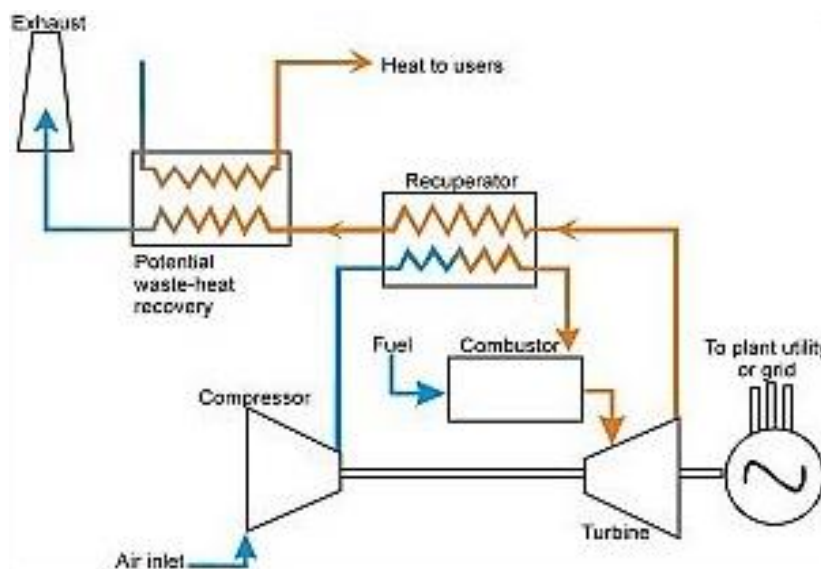
۳- رکوپراتور

۴- محفظه احتراق

۵- تجهیزات رگلاتور ولتاژ تولیدی و مبدل ها



شکل (۲-۳): نمایی برشی از درون یک میکرو توربین [۱۶].



شکل (۲-۴): اجزای اصلی میکرو توربین ها [۱۶].

همان‌طور که در شکل (۲-۴) مشخص است، هوای ورودی پس از گذر از فیلتر وارد کمپرسور و پس از فشرده شدن، از قسمت رکوپراتور عبور می‌کند. در این قسمت دمای هوا

به واسطه دمای گازهای خروجی از توربین افزایش پیدا می کند. هوا پس از گرم شدن وارد محفظه احتراق و پس از ترکیب با سوخت، مشتعل می گردد. هوای مشتعل و داغ با سرعت زیاد به توربین وارد شده و پس از برخورد به پره های توربین باعث به گردش درآوردن پره های توربین می شود. سپس در انتها گازهای داغ از آگزوز وارد قسمت رکوپراتور شده و سیکل به طور پیوسته تکرار می گردد.

بخشی از نیروی تولید شده توسط توربین صرف چرخاندن کمپرسور هوا و باقی مانده از طریق یک شفت رابط به ژنراتور منتقل می شود؛ و برق تولیدی توسط ژنراتور پس از تنظیم شدن به مصرف می رسد. بنابراین میکرو توربین ها سیستم های بسیار ساده ای هستند که معمولاً تنها دارای یک جزء متحرک می باشند. این جزء متحرک یک شافت سرعت بالا است که کمپرسور، چرخ توربین و ژنراتور را تحمل می کند. این شافت به جای سوار شدن بر روی یاتاقان روغن کاری شده که در اکثر توربین های احتراقی مورد استفاده قرار می گیرد، بر روی یاتاقان هوایی سوار شده است. این امر باعث کاهش هزینه تعمیرات و پیچیدگی فنی می گردد. البته میکرو توربین ها به طور کلی شامل دو نوع تک شافتی و دو شافتی می باشند.

در مدل تک شافتی، یک توربین، کمپرسور و ژنراتور را می چرخاند درحالی که در مدل های دو شافتی، توربین گرداننده کمپرسور بر روی یک شافت و توربین گرداننده ژنراتور بر روی شافت دیگر واقع شده است. در مدل های دو شافتی می توان با استفاده از یک توربین جداگانه برای ژنراتور و استفاده از جعبه دنده و به کار بردن ژنراتورهای سنکرون معمولی (مثلاً با سرعت گردش ۳۶۰۰ دربر دقیقه) فرکانس مناسب برای مصرف کننده را مستقیماً تولید نمود. در این نوع میکرو توربین ها فشارها کمتر و عمر ماشین طولانی تر خواهد بود. البته معمولاً هزینه این نوع میکرو توربین ها بیشتر از نوع تک شافتی می باشد. مدل های تک شافتی معمولاً برای بهره برداری در سرعت چرخش بسیار بالا (در برخی مدل ها بیش از ۱۰۰۰۰۰ دور بر دقیقه) طراحی می گردند و جریان متناوب تولید شده توسط ژنراتور آن ها دارای فرکانس بسیار بالایی می باشد. در ژنراتورهای سرعت بالای مدل های تک شافتی، معمولاً یک ماده مغناطیس دائم به کار می رود و لازم است که خروجی فرکانس بالای آن (در رنج ۱۰۰۰ تا ۳۰۰۰ هرتز) به فرکانس مطلوب (۵۰ یا ۶۰ هرتز) تبدیل شود. لازم به ذکر است که اکثر میکرو توربین ها از نوع تک شافتی می باشند و ژنراتورهای فرکانس بالا که فناوری جدیدتری هستند، مورد استفاده قرار می گیرند. در میکرو توربین های ساده در مقایسه با اجزای میکرو توربین های دسته اول رکوپراتور ندارند و چون

حرارت خروجی گازهای حاصل از احتراق توربین را برای پیش گرم کردن هوای محفظه احتراق بازیافت نمی‌کنند، مصرف سوخت بالاتری نسبت به میکرو توربین‌های رکوپراتوردار دارند و در نتیجه بازدهی آن‌ها نیز کمتر و در حدود ۱۵ درصد می‌باشد. سیستم عملکرد این میکرو توربین‌ها مشابه با میکرو توربین‌های رکوپراتور دار است.

۲-۱-۵-۱ مزایای میکرو توربین‌ها

مزایای میکرو توربین‌ها عبارت‌اند از:

۱- تعداد کم قطعات متحرک

✓ اندازه کوچک

✓ وزن سبک

✓ بازدهی خوب در تولید هم‌زمان

✓ آلاینده‌گی کم

✓ استفاده از سوخت‌های زائد

✓ فواصل طولانی تعمیرات

✓ عمل در فشارهای کم‌گاز

۲-۱-۵-۲ معایب میکرو توربین‌ها

معایب میکرو توربین‌ها:

✓ بازدهی کم و نرخ گرمای بالاتر

✓ هزینه سرمایه‌گذاری بالا

۲-۲ واحدهای تولید پراکنده - CHP

تولید هم‌زمان گرما و برق یا به اختصار معروف به CHP، یکی از مهم‌ترین کاربردهای تولید پراکنده است که عبارت است از تولید هم‌زمان و توأم ترمودینامیکی دو یا چند شکل انرژی از یک منبع ساده اولیه. در مولدهای قدرت امروزی، معمولاً از سوزاندن سوخت‌های فسیلی و گرمای حاصله برای تولید قدرت محوری و سپس تبدیل آن به انرژی الکتریسیته استفاده می‌شود. متداول‌ترین این نوع سیستم‌ها، نیروگاه‌های عظیم برق هستند. در نیروگاه‌های حرارتی که سهم عمده‌ای در تأمین نیاز الکتریسیته جوامع مختلف دارند، به‌طور متوسط تنها یک‌سوم از انرژی سوخت ورودی، به انرژی مفید الکتریسیته تبدیل می‌شود. در این نوع نیروگاه‌ها، مقدار زیادی

انرژی حرارتی از طرق مختلف نظیر کندان سور، دیگ بخار، برج خنک‌کن، پمپ‌ها و سیستم لوله‌کشی موجود در تأسیسات، به هدر می‌رود.

از این گذشته، در شبکه‌های انتقال برق نیز حدود ۱۵ درصد از انرژی الکتریسیته تولیدی، تلف می‌شود. اگر تولید برق در محل مصرف صورت بگیرد، این مقدار اتلاف عملاً وجود نخواهد داشت. استفاده هرچه بیشتر از گرمای آزاد شده در حین فرایند سوختن سوخت، باعث افزایش بازده انرژی و کاهش مصرف سوخت و در نتیجه کاهش هزینه‌های مربوط به تأمین انرژی اولیه می‌شود. از گرمای اتلافی بازیافتی از این سیستم‌ها، می‌توان برای مصارف گرمایشی، سرمایشی و بسیاری از فرایندهای صنعتی استفاده کرد. تولید هم‌زمان برق و گرما، می‌تواند علاوه بر افزایش بازده و کاهش مصرف سوخت، باعث کاهش انتشار گازهای آلاینده شود. در CHP، از انرژی گرمایی تولیدی به‌عنوان منبع انرژی در فرایند تولید قدرت استفاده می‌شود. مصرف‌کنندگانی که به مقدار انرژی گرمایی زیادی در طول روز نیاز دارند (صنایع تولیدی، بیمارستان‌ها، ساختمان‌ها، دفاتر بزرگ، خشک‌شویی‌ها و ...) می‌توانند برای کاهش هزینه‌های خود به نحوی مطلوب از CHP بهره ببرند [۱۶].

سابقه تاریخی استفاده از گرمایش مرکزی، به زمان امپراتوری‌های پیشرفته یونان و روم بازمی‌گردد. آن‌ها برای اولین بار، آب گرم خروجی از لایه‌های آهکی را با حفر کانال به حمام‌های عمومی، ورزشگاه، قصرها و قلعه‌های نظامی منتقل کردند. در اوایل قرن بیستم، اغلب کارخانه‌های صنعتی، برق موردنیاز خود را با استفاده از دیگ‌های زغال‌سوز و ژنراتورهای توربین بخار، تولید می‌کردند. در بسیاری از این کارخانه‌ها، از بخار داغ خروجی در فرایندهای صنعتی استفاده می‌شد به طوری که در اوایل ۱۹۰۰ در آمریکا، حدود ۸۵ درصد از کل توان تولیدی توسط نیروگاه‌های صنعتی در محل مصرف، به‌صورت تولید هم‌زمان بوده است. [۲۵]

هنگامی که نیروگاه‌های برق مرکزی و شبکه‌های قابل اطمینان برق ساخته شدند، هزینه‌های تولید و تحویل برق، پایین بود و بسیاری از کارخانه‌های صنعتی شروع به خریداری برق از این شبکه‌ها کرده و تولید برق خود را متوقف کردند. دیگر عواملی که در کاهش استفاده تولید هم‌زمان دخیل بودند عبارت‌اند از: قانونمند شدن تولید برق، سهم اندک هزینه‌های خرید برق از شبکه در مجموع هزینه‌های جاری کارخانه‌ها، پیشرفت فناوری‌های دیگ‌های بخار نیروگاهی، فراهم بودن سوخت‌های مایع و گازی در پایین‌ترین قیمت و نبود یا کمبود محدودیت‌های زیست‌محیطی.

در ۱۹۷۳، پس از افزایش هنگفت هزینه‌های سوخت و متعاقب آن بروز بحران انرژی در اغلب کشورهای جهان، روند یادشده در تولید هم‌زمان، به‌صورت معکوس آغاز شد. بر اثر کاهش منابع سوخت فسیلی و افزایش قیمت‌ها، این سیستم‌ها که دارای بازده انرژی بالاتری بودند، بسیار موردتوجه قرار گرفتند [۲۵].

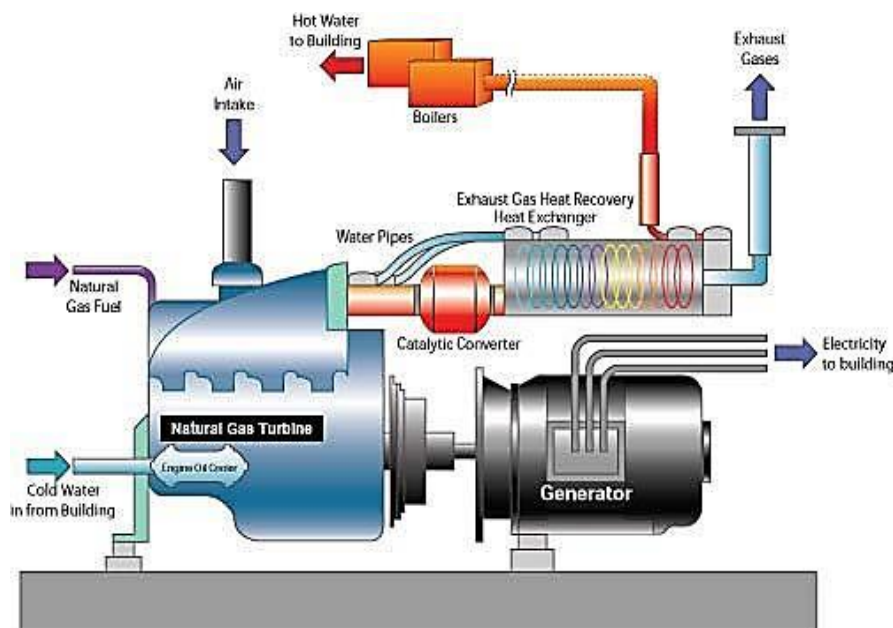
تولید هم‌زمان، علاوه بر کاهش مصرف سوخت، میزان گازهای آلاینده را نیز کاهش می‌دهد. به همین علت، کشورهای اروپایی و امریکا، اقداماتی را در زمینه افزایش استفاده از تولید هم‌زمان، انجام دادند. در سال‌های اخیر نیز تولید هم‌زمان نه تنها در صنعت بلکه در دیگر بخش‌های کسب‌وکار توسعه یافته است. در مدل‌سازی سیستم تولید هم‌زمان برق و حرارت، فرض شده است که می‌توان، تلفات ناشی از گازهای داغ خروجی از توربین‌های گازی را به‌صورت بازیافت حرارت، وارد شبکه تولید هم‌زمان برق و حرارت کرد.

انتخاب‌های مطرح برای استفاده از بازیافت حرارت، استفاده از نیروگاه سیکل ترکیبی معمولی برای تولید برق، استفاده از بویلر بازیافت حرارت برای تولید آبگرم و استفاده از توربین بخار پس فشاری برای تولید برق و آبگرم است. بر اساس اطلاعات موجود، بازده توربین گازی پس از نصب سیستم بازیافت حرارت، از حدود ۳۴ درصد به بیش از ۷۰ درصد افزایش می‌یابد. لذا تلفات توربین‌های گازی از حدود ۶۶ درصد به کمتر از ۳۰ درصد می‌رسد.

سیستم CHP، دارای یک مولد قدرت، مبدل‌های حرارتی بازیافت گرما، ژنراتور، لوله‌ها و اتصالات و دیگر تجهیزات نظیر پمپ‌ها و عایق‌ها و غیره است. اگر این سیستم مجهز به مصارف سرمایشی شود، به یک چیلر تراکمی یا جذبی نیاز دارد. به این نوع سیستم‌ها CCHP می‌گویند که از توانایی تولید هم‌زمان برق، گرما و سرما برخوردارند. مولد قدرت اولیه در سیستم‌های CHP، معمولاً موتورهای احتراقی، توربین گازی، میکرو توربین و پیل سوختی است. کیفیت گرمای خروجی هر یک از این فناوری‌ها، متفاوت بوده و بسته به کاربردهای مختلف و نیاز گرمایشی، می‌توان یکی از آن‌ها را به کاربرد. امروزه از نظر هزینه نصب و راه‌اندازی، موتورهای احتراقی دارای پایین‌ترین قیمت و سیستم‌های پیل سوختی با توجه به اینکه هنوز به مرحله تجاری شدن نرسیده‌اند، بالاترین هزینه را دارند. در این سیستم‌ها، بازده انرژی افزایش قابل توجهی می‌یابد. در سیستم‌های معمولی، ۲۰ درصد از انرژی ورودی به انرژی مفید تبدیل می‌شود. این میزان در نیروگاه‌های سیکل ترکیبی به ۴۰ درصد می‌رسد. البته نباید تلفات زیاد انرژی در خطوط انتقال نیرو و مصارف داخلی نیروگاه‌ها را نادیده گرفت. در سیستم CHP

حدود ۸۰ درصد از انرژی ورودی به انرژی مفید تبدیل می‌شود. اگر از پیل سوختی استفاده شود، بازده به ۹۰ درصد می‌رسد. از دیگر مزایای این سیستم، کاهش هزینه‌های انرژی اولیه برای مصرف‌کنندگان است. در سیستم‌های معمولی مصرف‌کننده مجبور است برق را از شبکه‌های تولید و توزیع برق خریداری کند. برای مصارف گرمایشی نیز باید گاز طبیعی یا فسیلی خریداری شود. در سیستم CHP، مصرف‌کننده از شبکه برق مستقل شده و چون از گاز و یا سوخت فسیلی در بالاترین حد بهره‌وری استفاده می‌کند، هزینه‌هایش به شدت پایین می‌آیند. در CHP ها، از یک مبدل برای تبدیل برق از DC به AC در خروجی سیستم استفاده می‌شود که باعث یکنواخت شدن و بدون نوسان بودن ولتاژ و فرکانس می‌شود و هیچ آسیبی به دستگاه‌ها و تجهیزات برقی وارد نمی‌آید. در صورتی که برق شبکه‌ها، دارای نوسان ولتاژ و افت فرکانس بوده و مقدار زیادی از انرژی الکتریسیته، از طریق خطوط انتقال نیرو به هدر می‌رود [۲۶].

در CHP از آنجا که برق در محل مصرف، تولید می‌شود، این بخش از تلفات به صفر می‌رسد. تولیدکنندگان برق از این طریق می‌توانند بخشی از برق تولیدی خود را در ساعات اوج مصرف، به شبکه برق بفروشند. این اتفاق در ساختارهای شبکه‌های هوشمند رخ می‌دهد. تولید هم‌زمان گرما و برق، می‌تواند علاوه بر افزایش بازده و کاهش مصرف سوخت باعث کاهش انتشار گازهای آلاینده گردد. شمای کلی CHP در شکل (۲-۵) نشان داده شده است.



شکل (۲-۵): طرحی کلی از ایده CHP [۱۶].

۲-۳ واحد های ذخیره سازی پراکنده- نیروگاه تلمبه ذخیره ای

سیستم های ذخیره ساز انرژی بسیار متنوع هستند که می توانند در مقیاس های متنوع به صورت پراکنده یا متمرکز بکار گرفته شوند. در ذیل به تعدادی از آنها اشاره می کنیم:

نیروگاه تلمبه ذخیره ای نوعی نیروگاه است که برای استفاده از برق مازاد بر مصرف و بازتولید این برق در زمان هایی که تقاضای مصرف زیاد است به کار می رود. اگرچه ذخیره کردن الکتریسیته به طور مستقیم عملی نیست، نیروگاه تلمبه ذخیره ای توانایی افزایش ظرفیت هیدرولیکی را از طریق تلمبه آب از یک مخزن پایین تر به یک مخزن بالاتر در مواقعی که تقاضای مصرف برق کم است (مثلاً هنگام شب) می دهد. این آب بعداً می تواند در مواقعی که تقاضا زیاد است یا نیاز به برق ذخیره باشد به مخزن پایین برگردد تا توربین ها را بچرخاند و در نهایت ژنراتور را به گردش درآورد. برای این که چنین نیروگاهی مقرون به صرفه باشد باید اختلاف ارتفاع دو مخزن پایین دست و بالادست، لااقل ۳۰۰ متر باشد [۲۷].

در ایران نیروگاه تلمبه ای ذخیره ای سیاه بیشه با دو سد بلند اولین نوع از این نیروگاه است که در شکل (۲-۶) مشاهده می کنید.



شکل (۲-۶): نیروگاه تلمبه ای ذخیره ای سیاه بیشه [۲۸].

۲-۴ واحد های ذخیره سازی پراکنده - سیستم های ذخیره سازی انرژی

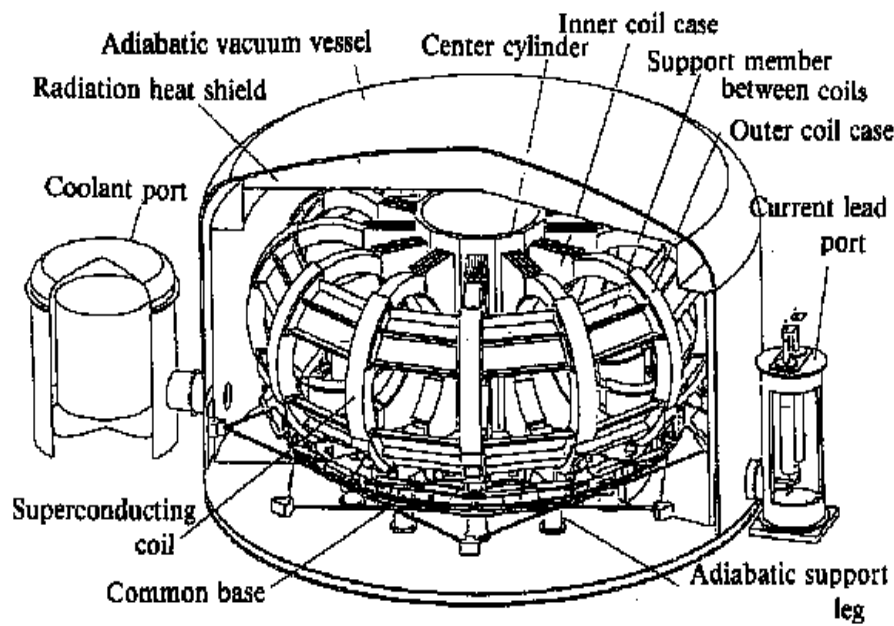
مغناطیسی با ابرسانای

سیستم های ذخیره سازی انرژی مغناطیسی با ابرسانایی انرژی را در میدان مغناطیسی که با استفاده از شار جریان مستقیم در یک سیم پیچ ابرسانایی که زیر دمای ابرسانایی اش خنک نگه داشته شده است، ذخیره می کنند. نمایی از این سیستم ذخیره سازی انرژی مغناطیسی با ابرسانای را در شکل (۲-۷) می بینید و نمونه ای از آن را در شکل (۲-۸) می بینید. یک سیستم ذخیره سازی انرژی مغناطیسی با ابرسانایی نمونه از سه قسمت تشکیل شده است: سیم پیچ ابرسانا، سیستم مدیریت قدرت و یخچال سرد شده. وقتی سیم پیچ ابرسانا شارژ می شود، انرژی مغناطیسی تخلیه نمی شود و می توان از آن به عنوان ذخیره ساز انرژی استفاده کرد. انرژی ذخیره شده قابلیت آزادسازی در شبکه از طریق تخلیه الکتریکی سیم پیچ را دارد. سیستم مدیریت قدرت از یک مبدل یکسوساز برای تبدیل جریان متناوب به جریان مستقیم یا برعکس استفاده می کند.

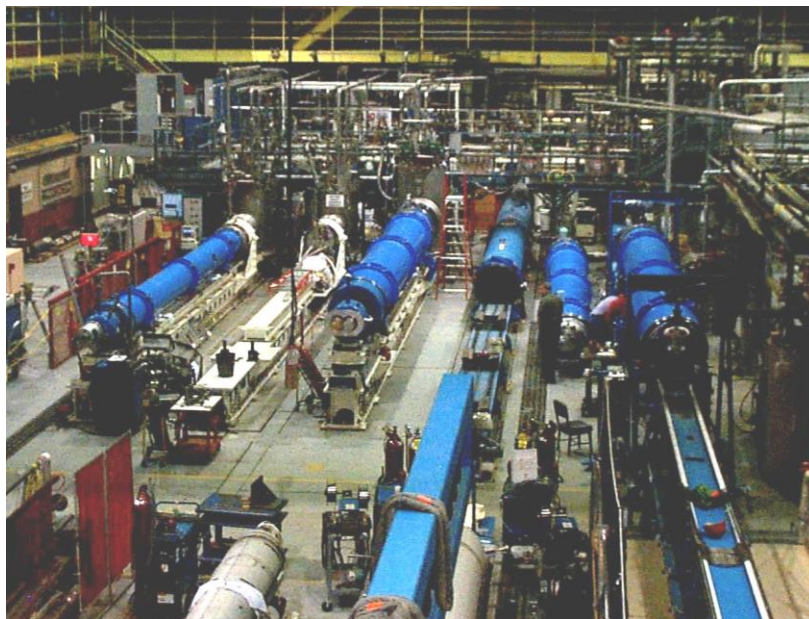
مبدل یکسوساز موجب اتلاف ۲-۳ درصدی انرژی در هر مسیر می شود. اتلاف در طول مراحل ذخیره انرژی در مقایسه با دیگر روشهای ذخیره انرژی کمترین اتلاف برق را دارد. این سیستم بسیار کارآمد است. راندمان رفت و برگشت بیشتر از ۹۵٪ است. انرژی مغناطیسی ذخیره شده در یک سیم پیچ حامل جریان [۲۹]:

$$E = \frac{1}{2} LI^2 \quad (2-1)$$

که E انرژی به ژول، L اندوکتانس به هانری و I جریان به آمپر است.



شکل (۷-۲): نمایی از ساختار داخلی یک ذخیره ساز SMES [۲۹].



شکل (۸-۲): تصویری از یک ذخیره ساز SMES [۲۹].

۲-۵ واحدهای ذخیره سازی پراکنده- باتری یا پیل الکتریکی

باتری یا پیل الکتریکی منبعی از انرژی پتانسیل الکتریکی است که در درون آن با انجام واکنش‌های شیمیایی، انرژی شیمیایی به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود، این انرژی در قطب‌های باتری قابل دریافت است. انرژی قابل دریافت در قطب‌های باتری به ازای واحد بار الکتریکی را نیروی محرکه الکتریکی باتری می‌گویند و آن را با یکای ولت اندازه‌گیری می‌کنند. قطب مثبت

باتری را آند و قطب منفی آن را کاتد می نامند . (در فرهنگ عامیانه به قطب‌ها، سر مثبت و سر منفی نیز گفته می‌شود).

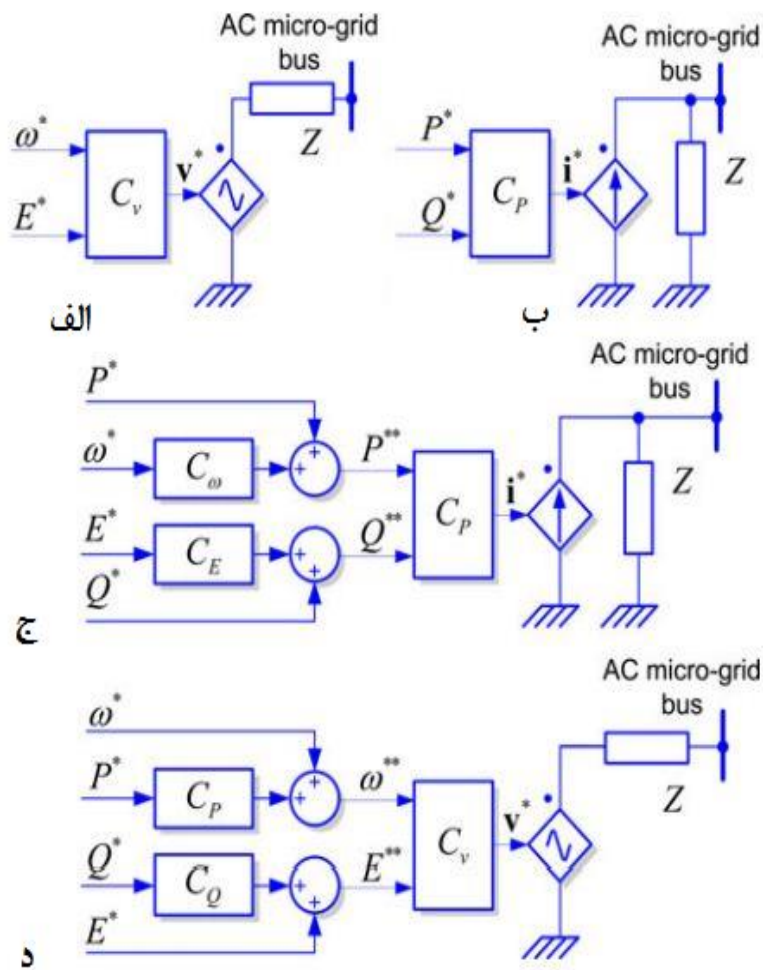
معمولاً هر باتری از چند سلول کوچک داخلی تشکیل شده است، در باتری‌ها ممکن است سلول‌ها برای افزایش جریان با هم موازی شده یا برای افزایش ولتاژ با هم سری شوند، هر سلول شامل دو نیم سلول است که به صورت سری توسط ماده‌ای الکترولیت - شامل یون‌های مثبت و یون‌های منفی - که رسانای الکتریکی می‌باشد به هم متصل اند. با اتصال باتری به مصرف کننده یون‌های منفی از طریق سیم هادی به مصرف کننده وارد شده و بعد از ایجاد انرژی در آن به سمت یون‌های مثبت حرکت می‌کنند و به تدریج یون‌های مثبت (که در اینجا حفره‌ها هستند) را خنثی می‌کنند. با گذشت زمان یون‌های مثبت بیشتری خنثی شده و به تدریج انرژی باتری کم شده و مقاومت داخلی آن افزایش می‌باشد در این حالت بعد از گذشت مدت زمانی که معمولاً با آمپر ساعت باتری مشخص می‌شود باتری به صورت کامل تخلیه می‌شود. مثلاً یک باتری ۶۰ آمپر ساعت می‌تواند ۶۰ آمپر را تا یک ساعت تأمین کند، این باتری بعد از گذشت یک ساعت و با کشیدن جریان ۶۰ آمپر از آن به صورت کامل تخلیه می‌شود. با کاهش جریان دریافتی از باتری می‌توان مدت زمان کارایی آن را افزایش داد، در این حالت باید پارامترهای مانند دما، لرزش و مقدار تنش موجود در جریان را نیز در زمان نهایی لحاظ کرد. به عنوان مثال باتری ۶۰ آمپر ساعتی در حالت تئوری باید جریان ۲۰ آمپر را برای مدت زمان ۳ ساعت تأمین کند در حالی که با توجه به ساختار باتری و همچنین دمای محیط ممکن است این زمان تا نیم ساعت نیز کاهش یابد. بر اساس شرایط محیطی و شرایط الکتریکی مورد استفاده بایستی از باتریهای متفاوت استفاده نمود که دارای مشخصات گوناگون تحت شرایط دشوار می‌باشند. باتری‌های سامانه‌های حفاظتی، روشنایی، امنیتی و سامانه‌های کنترل که باید دارای عمر و پایداری بالایی باشند. بطور کلی باتریها به دو دسته قابل شارژ و غیر قابل شارژ تقسیم بندی می‌شوند [۳۰].

باتری‌های قابل شارژ برای مقاصد گوناگونی استفاده و طراحی می‌گردد. بنابراین امکان حضور آنها به صورت گسترده در سطح شبکه توزیع هوشمند با سطوح توانی متفاوت قابل پیش بینی است. این باتری‌ها پس از دشارژ، با عبور جریان در جهت مخالف جریان دشارژ، بصورت الکتریکی قابل شارژ می‌باشند و با نام باتری‌های ذخیره یا باتری شارژی نیز شناخته می‌شوند، عمر این باتری بیشتر از ۵ سال است و بارها می‌توان آنها را شارژ و دشارژ کرد. در سال های

اخیر به دلیل گسترش روز افزون تکنولوژی باتری ها، ورود آنها به ریز شبکه ها ممکن گردید. از جمله باتری های مناسب برای این منظور می توان به باتری های لیتیومی اشاره کرد [۳۰].

۲-۶ کانورترهای DC-AC در ریز شبکه ها

اجزای یک میکروگرید، منابع تولید پراکنده و منابع ذخیره سازی هستند که اغلب آنها انرژی الکتریکی را به صورت DC تولید می کنند. بنابراین برای اتصال آنها به یک ریز شبکه نیاز به کانورترهای DC-AC می باشد. در شکل (۲-۹) ساختار کلی یک کانورتور در یک میکروگرید را می توانید ببینید. کنترل این کانورترها چه به صورت محلی و چه به صورت غیر محلی در عملکرد میکروگریدها بسیار تأثیر گذار است. کانورترها فارغ از هر توپولوژی باید بر اساس آنچه که در شکل زیر نشان داده شده است کنترل گردند. در حالت الف و د کانورترها بر اساس ولتاژ کنترل میگردند. این نوع کنترل به کنترل ولتاژ مد معروف است. در دیگر حالت ها کنترل بر اساس جریان است. در حالت ج توان اکتیو و راکتیو خروجی بر اساس کنترل جریان مد صورت گرفته است. در حالت د ولتاژ و فرکانس سیستم بر اساس مد ولتاژ کنترل می گردد [۳۱].



شکل (۲-۹): ساختار کلی کانورترهای موجود در یک میکرو گرید برای حضور منابع تولید پراکنده و ذخیره سازی پراکنده. [۳۱].

فصل سوم: پایداری ریز شبکه

۳-۱ کنترل فرکانس شبکه

فرکانس یک سیستم به تعادل توان حقیقی بستگی دارد. در حقیقت زمانی که تغییر در بار یا در تولید رخ می‌دهد، این تغییر به صورت لحظه ای در گشتاور خروجی ژنراتور، اثر می‌گذارد که منجر به ایجاد عدم تطابق بین گشتاور مکانیکی و گشتاور الکتریکی می‌شود که به نوبه خود باعث تغییر سرعت می‌شود و نهایتاً تغییر فرکانس سیستم را در پی دارد. در واقع می‌توان گفت در عملکرد حالت ماندگار سیستم قدرت، تقاضای افزایش یا کاهش بار نخست در شکل انرژی جنبشی ذخیره شده در مجموعه محرک‌ها در ژنراتورها تأمین می‌شود که نتیجتاً تغییرات سرعت در روتور ژنراتورها و تغییر فرکانس را ایجاد می‌نماید. کنترل بار فرکانس که برای چندین سال به عنوان بخشی از کنترل کننده‌ها در طرح سیستم‌های قدرت استفاده می‌شود و برای بهره برداری ایمن از سیستم قدرت ضروری است [۳۲].

۳-۱-۱ اهداف کنترل فرکانس شبکه قدرت

کنترل بار فرکانس یک مسئله بسیار مهم در بهره برداری سیستم‌های قدرت و کنترل برای تأمین برق مورد نیاز و قابل اعتماد با کیفیت مطلوب است. کنترل ضریب اتوماتیک یک سیستم کنترل بازخورد، تنظیم قدرت خروجی ژنراتور است تا فرکانس را در مقدار تعیین شده‌ای تثبیت کند. یکی از اهداف AGC^۱ که حفظ فرکانس سیستم در مقدار اسمی ۵۰ هرتز است. که به منظور کنترل آن در لحظات اولیه پس از وقوع اختلال بار تولید کنترل اولیه فرکانس نیاز می‌باشد. هدف از کنترل اولیه فرکانس بازگرداندن فرکانس به محدوده مجاز و حفظ فرکانس در آن محدوده تا زمانی که کنترل ثانویه وارد عمل گردد، می‌باشد. وظیفه اصلی کنترل اولیه فرکانس به عهده گاورنر واحدها می‌باشد و از آنجایی که در پی وقوع یک اختلال تمام گاورنرهای شبکه عمل می‌نمایند تنظیم مناسب این کنترل کننده‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است بنابراین با تنظیم پارامترهای گاورنر می‌توان سهم هر واحد در کنترل فرکانس و زمان وارد عمل شدن آن را تنظیم نمود.

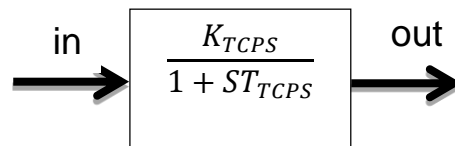
اهمیت تنظیمات فوق زمانی مشخص می‌گردد که بدانیم این کنترل کننده‌ها در تمام شرایط بهره‌برداری و در پاسخ به تمام اختلالات بار تولید محتمل در شبکه بایستی به طور مناسب عمل نمایند و فرکانس را به بهترین صورت کنترل نمایند. سیستم قدرت به هم پیوسته است و به چند حوزه فرکانس تقسیم می‌شود. فرم یکپارچه برای تمام ژنراتورها در جهت تشکیل یک گروه کنترلی منسجم استراتژی مورد نیاز است که نه تنها حفظ ثبات فرکانس را داشته باشد بلکه قدرت پیوند به حالت خطای صفر ماندگار را دارد و تغییر فرکانس در یک جای شبکه بر دیگر نقاط آن اثر می‌گذارد [۳۲]. با توجه به رشد مداوم سیستم برق در اندازه، پیچیدگی

^۱Automatic generation control

و تنوع منابع مشکل نوسانات فرکانس با توجه به تغییرات غیر قابل پیش بینی بار به موضوعی جدی تبدیل شده است. این تغییرات بار تصادفی در نتیجه عدم تطابق توان تولیدی و مصرفی است، این عدم تطابق باید اصلاح شود زیرا تولید و توزیع برق کافی و قابل اطمینان با کیفیت مطلوب بسیار مهم است و در غیر این آسیمی جدی به تجهیزات وارد می‌آیند [۳۳].

با توجه به شبکه دو ناحیه [۳۴]:

دو نوع مختلف از تجهیزات کنترلی برای بهینه‌سازی حالت گذرا AGC استفاده شده است. از جمله این تجهیزات کنترلی افزودن یک واحد فاز شیفر کنترلی تریستری (TCPS) در Tie line می‌باشد. شکل (۱-۳) تابع کنترلی کنترل کننده TCPS می‌باشد.



شکل (۱-۳): تابع کنترلی کنترل کننده TCPS. [۳۴]

دیگر تجهیز کنترلی تعبیه واحدهای خازنی ذخایر انرژی (CES) در هر یک از نواحی می‌باشد.

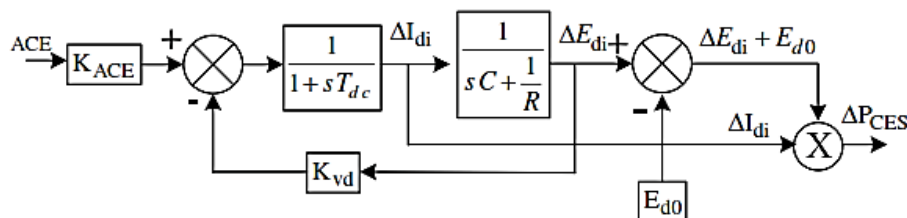


Fig. 5. Basic circuit configuration of CES.

شکل (۲-۳): واحد خازنی ذخایر انرژی (CES). [۳۴]

با سه نوع الگوریتم هوشمند کارایی این دو تجهیز مورد مقایسه قرار گرفته شده است، الگوریتم CRPSO بهینه‌ترین بهره‌ها و بهترین پاسخ را نسبت به دو الگوریتم دیگر داده است. با مقایسه تجهیز TCPS و CES در نتایج مشهود است که قرار دادن واحد کنترلی CES در هر دو ناحیه کارایی حالت گذرا را برای محدوده وسیعتری از اختلالات بار فراهم می‌کند و پاسخ حالت گذرا را بهبود می‌دهد [۳۴]. این تجهیز کنترلی

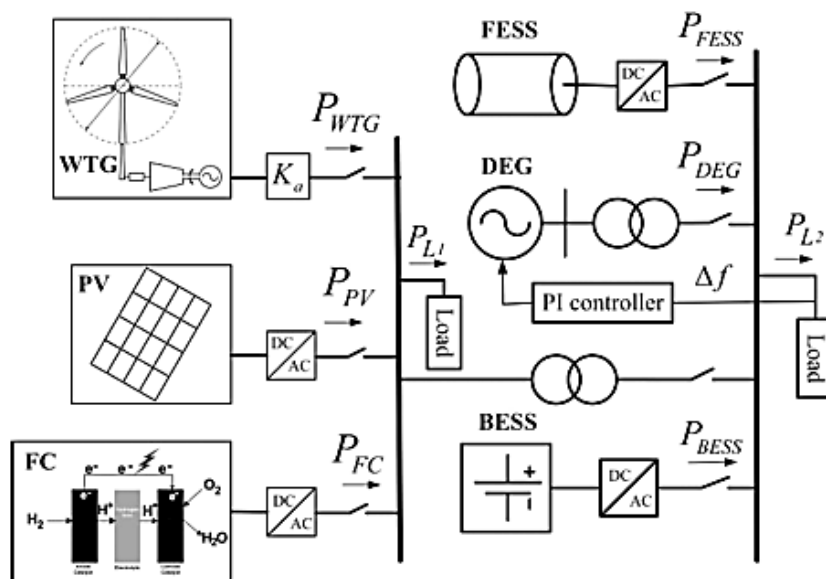
¹ Thyristor-Controlled Phase Shifter

² Craziness Based Particle Swarm Optimization

³ Capacitive Energy Storage

توانسته انحراف فرکانس سیستم را بین بازه $[0-0.008]$ محدود کند و بعد از ۱۲ ثانیه به مقدار صفر برساند. شکل (۳-۲) [۳۴].

سیستم‌های قدرت امروزی مستلزم افزایش هوش و انعطاف‌پذیری در کنترل و بهینه‌سازی برای تضمین حفظ تعادل میان بار و تولید به دنبال یک اختلال جدی هستند. ریز شبکه‌ها اکثراً از انرژی‌هایی برای تولید الکتریسیته استفاده می‌کنند که به طور طبیعی دستخوش تغییرند. این عدم قطعیت در سیستم‌های قدرت باعث ناتوان شدن سیستم‌های کنترل کلاسیک شده است. برای حل این مشکل روش ترکیب قواعد فازی بهینه شده با الگوریتم هوشمند ازدحام ذرات برای کنترل کننده PI ارائه شده است [۳۵]. شکل (۳-۳) شبکه ایزوله با کنترل کننده PI می‌باشد که متشکل از یک واحد دیزل، یک واحد خورشیدی و بادی و پیل سوختی به همراه باتری و چرخ طیار می‌باشد.

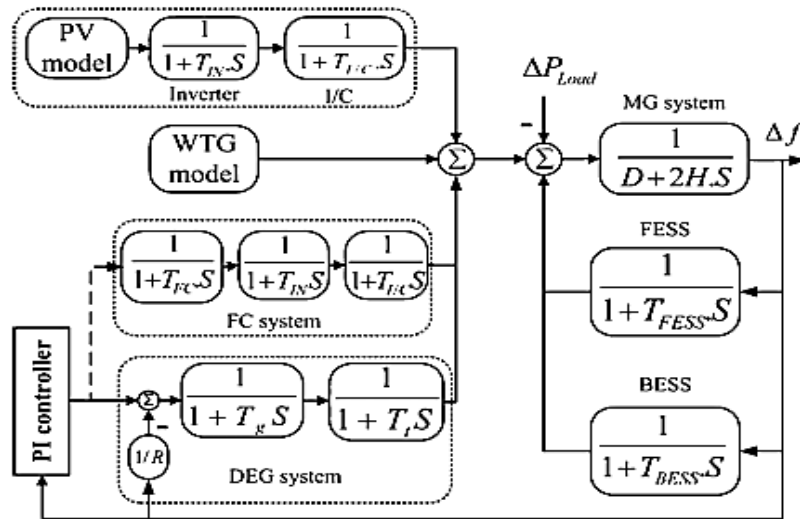


شکل (۳-۳): شبکه ایزوله با کنترل کننده PI. [۳۵]

تغییرات بار را به صورت پله در نظر گرفت با تغییرات ۲٪ و از سه کنترل کننده PI و PI-Fuzzy و PI-pso Fuzzy استفاده کرده که بهترین نتایج با کنترل کننده PI-pso Fuzzy می‌باشد به طوری که انحراف فرکانس کل سیستم را بین بازه $[0-0.012]$ محدود کرد و ۴ ثانیه طول می‌کشد که انحراف فرکانس به صفر برسد. دو استراتژی کنترلی دیگر هم پیاده شده که در استراتژی اول تنها دیزل در کنترل فرکانس شرکت

^۱ Proportional Integral
^۲ Proportional Integral_Fuzzy
^۳ Proportional Integral_Particle Swarm Optimization

می‌کند و در استراتژی دوم پیل سوختی هم در کنار دیزل در این کنترل مشارکت می‌کند. شکل (۳-۴) مدل کنترل فرکانسی ریز شبکه می‌باشد [۳۵].



شکل (۳-۴): مدل کنترل فرکانسی ریز شبکه. [۳۵]

با توجه به یافته‌های مقاله مشارکت پیل سوختی با دیزل ژنراتور برای کنترل فرکانس پاسخ بهتری را به دست می‌دهد چرا که انحراف فرکانس را از -0.012 به -0.08 هرتز رسانده است [۳۵].

۳-۲ کنترل کننده‌ها

در مطالعات کنترل کننده جهت تنظیم قدرت خروجی سیستم تولید پراکنده به کار می‌رود که جهت رسیدن به وضعیت تعادل قدرت بر اساس تغییرات ناگهانی تولید و یا بار استفاده می‌شود. بر اساس کاهش انحراف فرکانس عدم تعادل بین تولید و تقاضا در وضعیت تولید و بار حذف می‌شود و توسط کنترل کننده ها تنظیم می‌گردند [۳۶].

۳-۳ کنترل کلاسیک

منظور از کنترل کننده کلاسیک برای یک سیستم، تعیین ضرایب K_p ، K_i و K_d است. بسته به کاربرد، عملکرد مطلوب خروجی سیستم می‌توان به شیوه‌های متفاوتی بیان شود. در این بخش از نوشتار، چهار ویژگی مهم زمانی پاسخ یک سیستم استفاده شده و معیار ما از مطلوبیت خروجی سیستم به واسطه آن‌ها تعریف

خواهد شد. این ویژگی‌ها عبارتند از: زمان صعود، زمان نشست، بیشترین فراجش و انتگرال قدر مطلق خطا. در ادامه تعریف مختصری از هر یک از این ویژگی‌ها بیان شده و از روی آن‌ها معیار و بهینگی پاسخ خروجی تعریف می‌شود [۳۷].

۳-۳-۱ زمان صعود

زمان صعود زمانی است که در طی آن پاسخ سیستم از ۱۰ درصد مقدار نهایی خود به ۹۰ درصد آن می‌رسد.

۳-۳-۲ زمان نشست

زمان نشست به زمانی اطلاق می‌شود که بعد از آن زمان پاسخ سیستم در فاصله ۲ درصدی از پاسخ نهایی‌اش باقی می‌ماند.

۳-۳-۳ بیشترین فراجش

ماکزیمم فراجش^۳ به صورت تفاضل مقدار دو پاسخ y_{ss} و y_{max} تعریف می‌شود. y_{ss} و y_{max} به ترتیب مقدار بیشینه پاسخ و حد نهایی آن را نشان می‌دهد.

۳-۳-۴ انتگرال قدر مطلق خطا

انتگرال قدر مطلق خطا به صورت معادله (۳-۱) تعریف می‌شود.

$$IEA = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (۳-۱)$$

به خاطر پیاده سازی زمان گسسته در محاسبه انتگرال حد بالای آن تا حد معین (معمولا تا سه برابر زمان نشست) در نظر گرفته می‌شود که جواب قابل قبولی برای این انتگرال به دست می‌دهد. بیش از ۹۰٪ کنترل کننده های امروزی کنترل کننده از نوع کلاسیک هستند. علت این امر آسانی و قابل فهم بودن این نوع کنترل کننده‌ها، آسانی توضیح آن‌ها به دیگران و کاربرد آسان آن‌ها است. کنترل کننده هر سیستم به عنوان مغز فرمان دهنده در آن سیستم مهم‌ترین نقش را در راستای عملکرد مطلوب آن دارد [۳۸]. برای کنترل موثر هر سیستم باید آن سیستم ابتدا درک و مدل سازی گردد. اکثر قریب به اتفاق فرآیندهای

^۱Rise time

^۲Settling Time

^۳Over Shoot

کنترلی استفاده از نظریه فیدبک منفی برای رساندن خروجی به یک سطح و یا نگه داشتن آن در یک محدوده مشخص می‌باشد. به این صورت سیگنال خطا یا اختلاف بین خروجی فرآیند و ورودی آن برای کنترل فرآیند استفاده می‌شود و در این میان کنترل کننده دارای نقش اساسی می‌باشد.

برای دستیابی به پاسخ سریع با درصد فراجش کم در سیستم‌های حلقه بسته در ابتدای پاسخ یعنی زمانی که سیگنال ورودی تازه اعمال شده است، باید از سیگنال کنترل بزرگ و کنترل سریع استفاده نمود ولی هنگامی که پاسخ به مقدار مطلوب نزدیک شد باید سیگنال کنترل را کوچک نمود و از کنترلی کند استفاده کرد. مهمترین عاملی که در طراحی مورد نظر قرار می‌گیرد درصد فراجش است. این مقدار از آن جهت اهمیت دارد که مقدار زیاد آن باعث وارد شدن زیان به سیستم می‌شود اما در بسیاری از سیستم‌ها برای سرعت بخشیدن به پاسخ سیستم مجبوریم مقداری فراجش را قبول کنیم. بنابراین هدف اغلب طراحی، کاهش دادن درصد فراجش بدون لطمه خوردن به پاسخ سیستم می‌باشد. متداول‌ترین نوع کنترل کننده کلاسیک، کنترل کننده دارای سه بخش تناسبی، مشتقی و انتگرالی یا PID می‌باشد که دارای فرم کلی به صورت معادله (۲-۳) است [۳۸].

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(t) dt + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2-3)$$

در این حالت ضریب k_p جهت افزایش سرعت پاسخ سیستم، افزایش دقت به کار می‌رود و اگر ضریب k_p بسیار بزرگ باشد سرعت انحراف بیشتر می‌شود و ممکن است سیستم به حالت ناپایداری برسد. ضریب k_d جهت افزایش و بهبود عملکرد دینامیکی سیستم به کار می‌رود و همچنین ضریب k_i جهت حذف خطای حالت ماندگار به کار می‌رود ولی اگر مقدار آن بیش از حد زیاد باشد باعث پدیده اشباع در سیستم شده و ناپایداری را در سیستم به همراه می‌آورد. اغلب جهت تنظیم این ضریب در کنترل کننده PID^۱ از روش زیگلر-نیکولز استفاده می‌شود.

۳-۴ تنظیم پارامترهای کنترل کننده PID با روش زیگلر-نیکولز

در این روش مقادیر انتگرالی و مشتق گیر را برابر صفر قرار داده و k_p را طوری تنظیم می‌کنیم که پاسخ مطلوب بدون در نظر گرفتن خطای نهایی به دست آید. سپس k_p را افزایش می‌دهیم و T_d را طوری تنظیم می‌کنیم که فراجش سیستم کاهش یابد آنگاه k_i را طوری تنظیم می‌کنیم که مقدار خطای حالت ماندگار

^۱ Proportional Integral Derivative

به حداقل برسد این مراحل را تا حدی ادامه می‌دهیم که k_p به اندازه کافی و ممکن بزرگ باشد. ایراد اصلی کنترل کننده‌های PID مدت زمان زیاد جهت تنظیم پارامترها و سختی آن جهت تنظیم نهایی که باید به صورت بهینه باشد است [۳۹ و ۴۰].

مراحل کار در این روش به صورت زیر است:

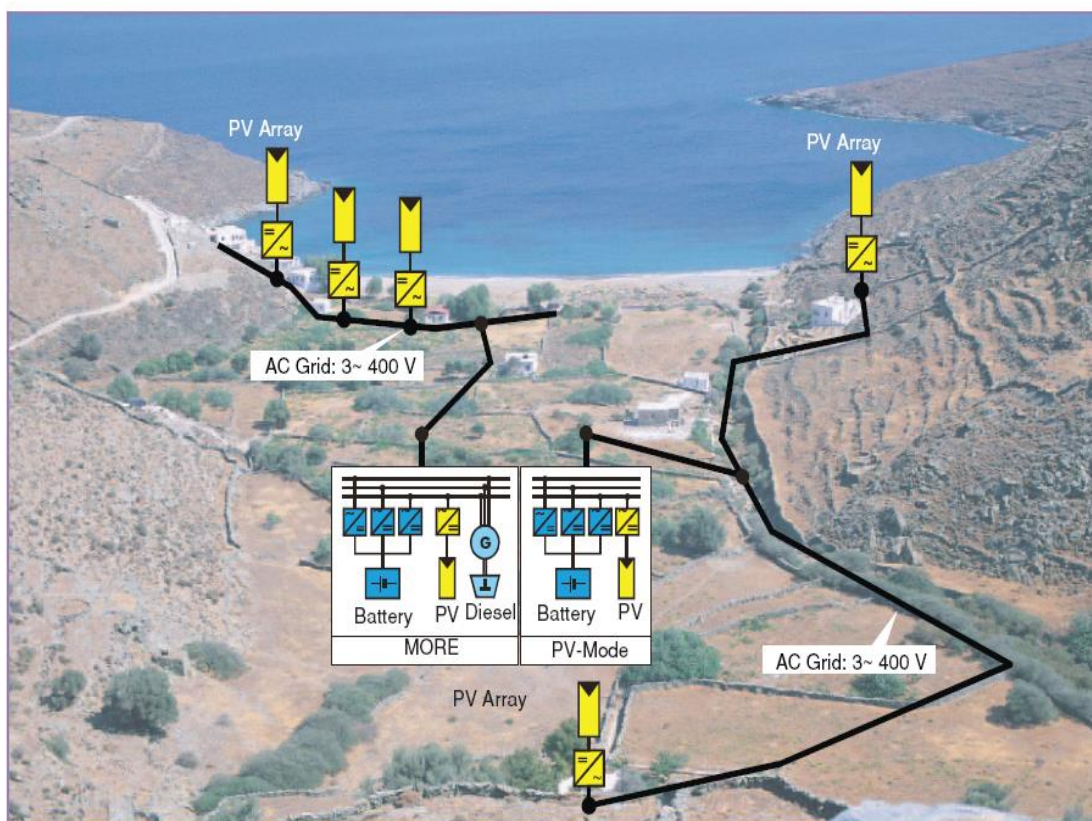
- ۱- k_p را تا حدی افزایش می‌دهیم سیستم نوسان کند این گین را k_u می‌نامیم.
- ۲- زمان بین دو پیک خروجی سیستم را اندازه گرفته آن را t_u می‌نامیم.
- ۳- مقادیر گین های کنترل کننده ها را از روی جدول (۳-۱) تنظیم می‌کنیم.

جدول (۳-۱): تنظیم ضرایب کنترل کننده کلاسیک با استفاده از روش زیگلر نیکولز [۴۰]

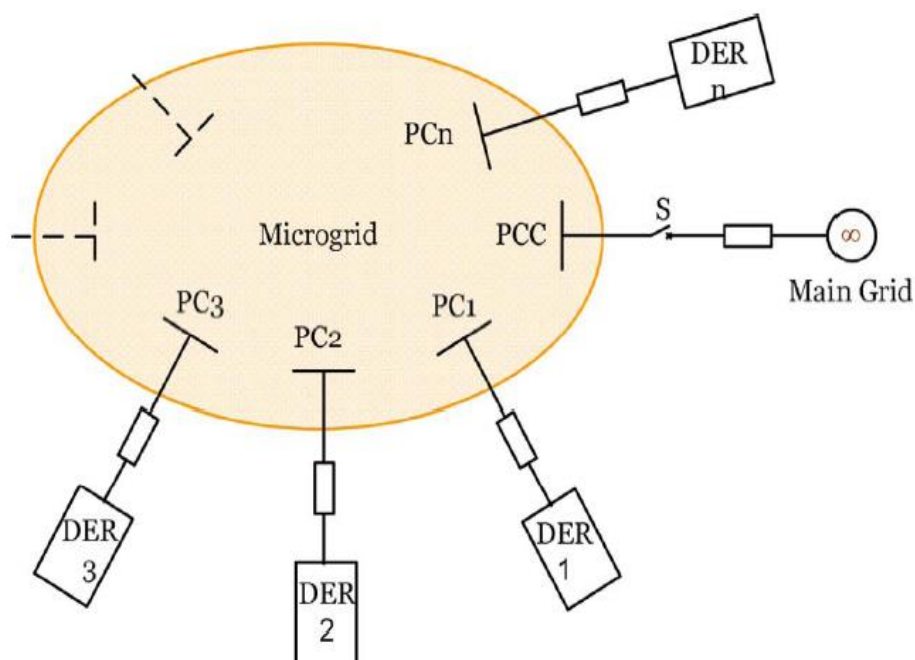
	k_p	T_i	T_d
P	$0.5 k_u$		
PI	$0.45 k_u$	$T_u/1/2$	
PID	$0.6 k_u$	$T_u/1/2$	$T_u/8$

۳-۵ ساختار ریز شبکه و کارکرد آنها در شرایط جزیره ای و متصل به شبکه

میکروگریدها دارای تعداد زیادی واحد های ذخیره سازی انرژی و واحد های تولید انرژی هستند و عملکرد آنها وابستگی شدیدی به سیستم مدیریت و سنسور های پیشرفته و استراتژی های مناسب حفاظتی/کنترلی دارد. در واقع ریز شبکه ها به عنوان عناصر مهم و اصلی شبکه های هوشمند به شمار می آیند. نمونه ای از یک میکروگرید با منطقه تحت پوشش آن را در شکل (۳-۵) مشاهده می کنید.

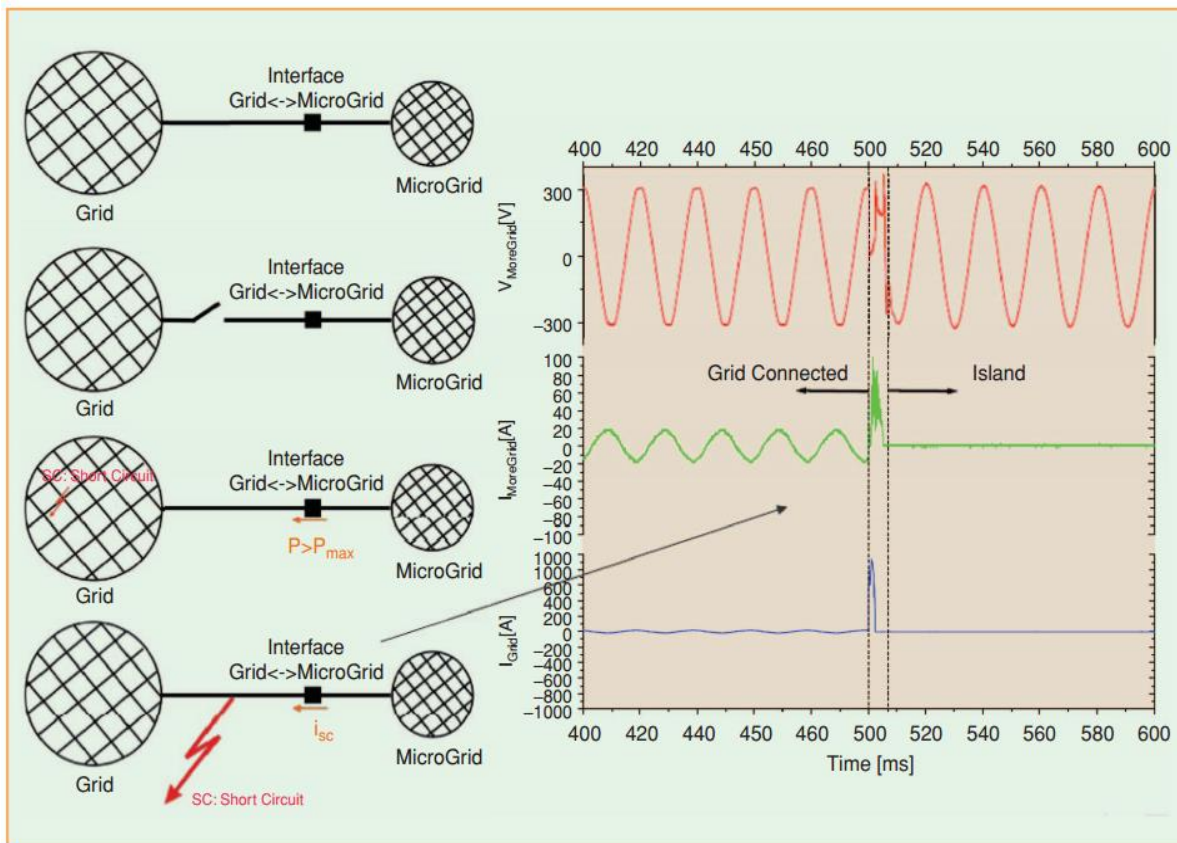


شکل (۳-۵): تصویری از یک میکرو گرید. [۴۱].



شکل (۳-۶): دیاگرام کلی از یک ریز شبکه حاصل از اتصال چندین منبع تولید انرژی پراکنده. [۴۱].

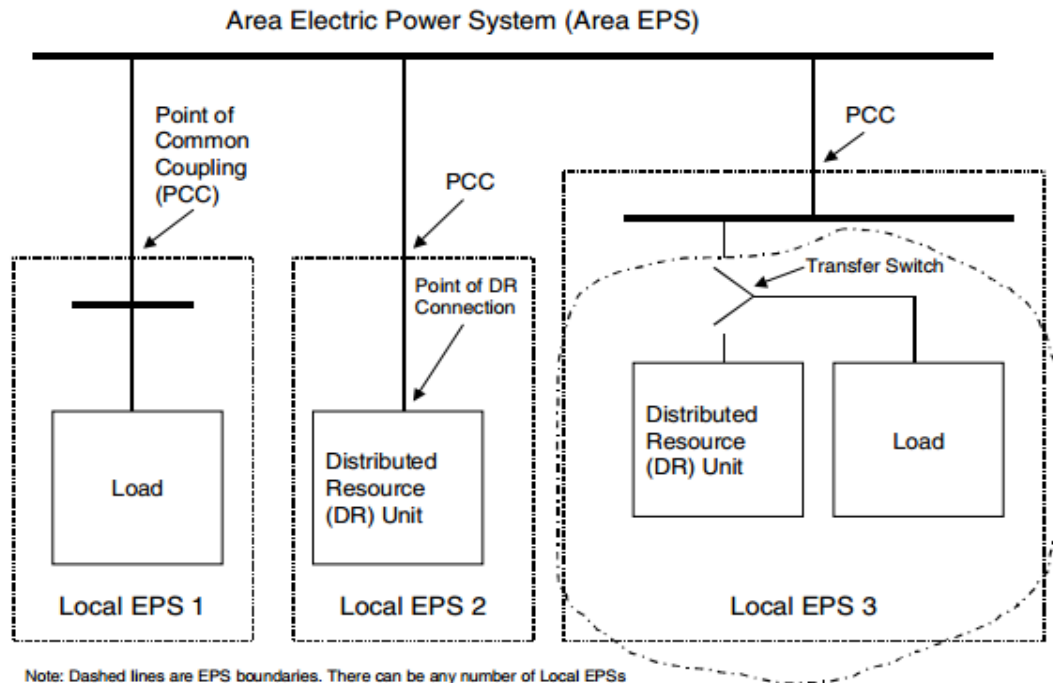
شکل (۳-۶) طرحی کلی از یک میکرو گرید را نشان می‌دهد که می‌تواند هر ساختار متفاوتی را به خود بگیرد. نقطه اتصال هر یک از واحدها PC^1 نامیده می‌شود. سطح ولتاژی آن در سطح ولتاژ شبکه توزیع است و با شبکه برق در نقطه PCC^2 برخورد دارد. بنابراین ریز شبکه می‌تواند در سه حالت متصل به شبکه، جزیره و یا در حالتی ما بین این دو قرار داشته باشد. (شکل (۳-۷) این سه حالت را نشان می‌دهد) [۴۲].



شکل (۳-۷): تغییرات جریان و ولتاژ یک ریز شبکه هنگام تغییر وضعیت از حالت متصل به شبکه به حالت جزیره ای [۴۳]

در استانداردهای IEEE برای توصیف یک ریز شبکه از لحاظ ساختار حالت‌های کلی زیر در نظر گرفته شده است.

¹ Point of Connection
² Point of Common Coupling

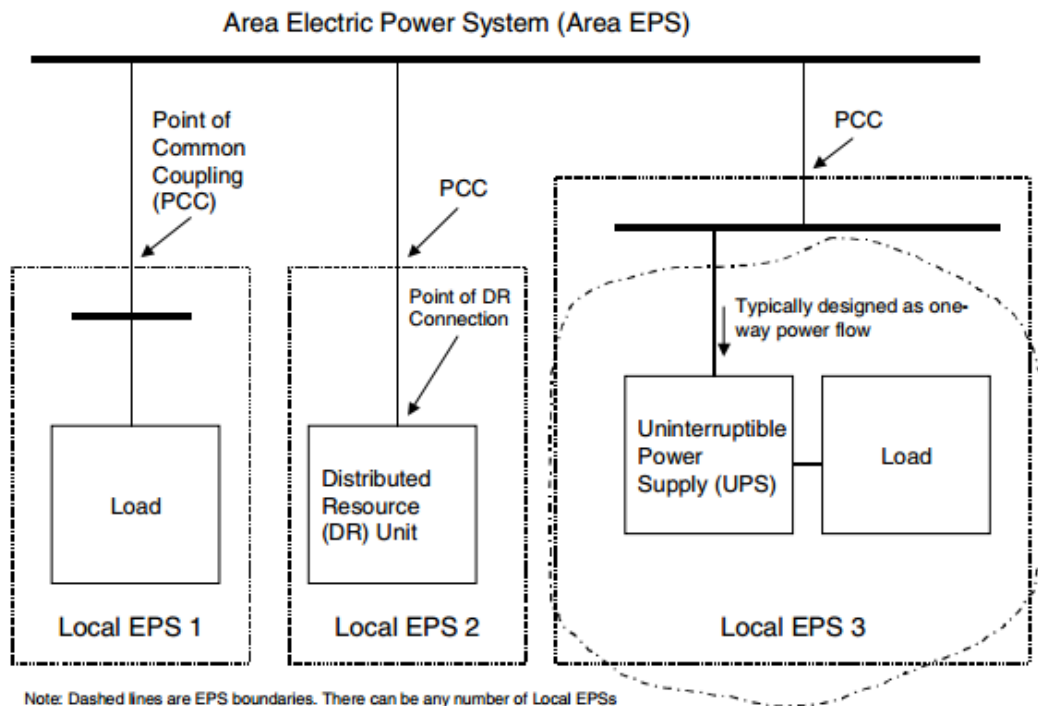


شکل (۳-۸): ساختار کلی یک میکروگرید هنگامی که بارها توسط منابع تولید پراکنده تغذیه شوند [۴۴].

منابع تولید پراکنده میتوانند بارهای محلی را در قالب عناصر یک میکرو گرید تغذیه کنند. هنگامی که یک منطقه در PCC اتصال خود را با شبکه از دست میدهد، منبع تولید کننده انرژی کار خود را آغاز خواهند کرد. این راه اندازی از ۱۰۰ میلی ثانیه تا چندین دقیقه به طول می انجامد که بستگی به ساختار و نوع سیستم دارد. شکل بالا ساده ترین وضعیت یک ریز شبکه را در شرایط اضطراری که از شبکه اصلی جدا میگردد توصیف می کند. با تغییر وضعیت کلیدها می توان به ساده ترین نوع کنترل و مدیریت انرژی رسید. این ساختار کلی در شکل (۳-۸) دیده می شود. [۴۵].

برای بهبود قابلیت یک سیستم، یک UPS^۱ را می توان برای تغذیه بارهای الکتریکی جایگزین کرد. این سیستم باید شامل سیستم های ذخیره سازی انرژی باشد و بتواند بار نامی را تغذیه کند. این سیستم علی رغم اینکه قابلیت اطمینان بالایی را به مشتریان می دهد اما گران قیمت است. ساختار این سیستم با UPS در شکل (۳-۹) مشاهده می شود [۴۵].

^۱ Uninterruptible Power Supply



شکل (۳-۹): ساختار کلی یک میکروگرید هنگامی که بارها توسط واحد های ذخیره سازی پراکنده تغذیه شوند. [۴۴].

۳-۶ پایداری در ریز شبکه ها

یک ریز شبکه می تواند با ریز منابع و بارهای مختلف نشان داده شود. ریز منابع، بارها، پارامترهای شبکه و توپولوژی های کنترل در ریز شبکه های مختلف فرق می کنند [۴۶].

بصورت عمومی، ریز شبکه با عنوان "سیستم انرژی یکپارچه شامل منابع انرژی توزیع شده و چندین بار الکتریکی که بصورت واحد، مستقل و به موازات شبکه و یا بصورت جزیره ای از شبکه ی قدرت فعلی بهره برداری می شود" توصیف می شود. از نقطه نظر پایداری تفاوت های عمده ای می تواند به شرح زیر بیان شود:

✓ یک ریز شبکه ی تأسیساتی که در یک نقطه به شبکه (البته ممکن است برای قابلیت اطمینان بیشتر در چند نقطه) به اتصال مشترک (PCC) وصل می شود، می تواند در حالت جزیره ای در گستره جغرافیایی وسیع (نسبت به ریز شبکه ی تسهیل عمل کرده و شامل انواع مختلف ریز منابع و بارهاست).

- ✓ یک ریزشبکه‌ی راه دور که هرگز به شبکه وصل نمی‌شود و اغلب با روش‌های کنترل غیرمتمرکز بهره‌برداری می‌شود. حداکثر توان استفاده برای مشترکین محدود می‌باشد و الزامات کیفیت توان نسبت به ریزشبکه‌ی تسهیل راحت تر برآورده می‌شود.
- ✓ یک ریزشبکه‌ی تسهیل که معمولاً به شبکه با میزبانی شبکه متصل می‌شود و معمولاً ریزشبکه واحد بصورت نهادی تجاری می‌باشد. این ریزشبکه می‌تواند بصورت عمدی یا ناخواسته در حالت عملکرد جزیره‌ای بهره‌برداری شود. ریزشبکه‌های تسهیل می‌توانند یک ریزشبکه‌ی صنعتی یا سازمانی باشند.

مشابه سیستم قدرت بزرگ، مباحث پایداری در یک ریزشبکه در سه دسته‌ی پایداری سیگنال کوچک، پایداری گذرا و پایداری ولتاژ می‌تواند دسته‌بندی شود. عوامل برانگیزنده‌ی هر کدام از مسائل پایداری است. پایداری سیگنال کوچک در یک ریز شبکه به کنترل فیدبک، سوئیچینگ پیوسته بار، حد توان ریزمنابع و ... مربوط می‌شود. یک خطا با جزیره شدن متعاقب، بسیاری از مشکلات پایداری ولتاژ را در یک ریزشبکه پدید می‌آورد. قیود توان راکتیو، دینامیک بارها و تپ چنجرها بسیاری از مشکلات پایداری ولتاژ را ایجاد می‌کنند. در حالیکه حلقه‌های کنترل کمکی، پایدارسازها و کنترل هماهنگ ریز منابع می‌تواند پایداری سیگنال کوچک و پایداری گذرا را با استفاده از ذخیره ساز، بارزدایی و تجهیزات حفاظت تطبیقی بهبود دهد.

از سوی دیگر، تنظیم ولتاژ با DGها، جبرانسازی توان راکتیو و کنترل کننده‌ی پیشرفته‌ی بار و محدود کننده‌ی جریان تغییر یافته مربوط به ریزمنابع می‌تواند پایداری ریزشبکه را تضمین کند. بسته به نوع ریزشبکه، مباحث مختلف پایداری می‌تواند مشاهده شود که کنترل کننده فیدبک DG با روش‌های کنترل غیرمتمرکز بسیاری از مباحث پایداری سیگنال کوچک را در ریزشبکه‌ی راه دور بدنبال دارد؛ در حالیکه در یک ریزشبکه‌ی تأسیساتی رایج ترین دلیل محدود کننده‌ی جریان می‌باشد. در ریزشبکه‌ی تسهیل، سوئیچینگ پرتکرار بار در یک ناحیه‌ی کوچک اغلب مشکلات پایداری سیگنال کوچک را به بار می‌آورد.

خطاها مشکلات پایداری گذرای واضحی در تمام انواع ریزشبکه‌ها ایجاد می‌کنند. در حالی که یک خطا و جزیره‌ای شدن بعد از بروز آن خطا، در یک ریزشبکه‌ی تسهیل یا تأسیساتی جنبه‌های نوعی از پایداری گذرا را نشان می‌دهند؛ در ریزشبکه‌ی راه دور، یک خطا در ریزشبکه و ایزوله نمودن بخشی از شبکه که شامل خطا است، مشکلات پایداری گذرا را ایجاد می‌کند.

پایداری ولتاژ در ریزشبکه‌ی راه دور به جبرانسازی توان راکتیو آن شبکه مربوط می‌شود اما در یک شبکه‌ی تأسیساتی منبع اصلی بروز مشکلات پایداری ولتاژ تب چنجرها می‌باشند. با تعداد کم منبع و بار

¹ Distributed Generation

محدود، محدود کننده‌ها در ریزمنابع و بارزدایی در حالت افت ولتاژ عمده‌ی مسائل پایداری ولتاژ در یک شبکه‌ی تسهیل را ایجاد می‌کند.

۳-۶-۱ پایداری سیگنال کوچک

پایداری سیگنال کوچک در یک ریزشبکه با مدل خطی شده‌ی ریزمنابع و بارها آنالیز می‌شود. سرعت حلقه‌های کنترل در یک VSC در شکل نشان داده شده است. بسیاری از مشکلات پایداری در حلقه‌ی کنترلی مبدل (در یک ریزشبکه) برخاسته از کنترل کننده‌های خارجی توان و بهره‌های کنترلی مربوط به آنهاست.

مدل مبدل با ولتاژ خازن مبدل ($V_{cf dq}$)، جریان مبدل $i_{Td q}$ و حالت‌های جریان خروجی $i_{od q}$ نشان داده می‌شود. هرکدام از کنترل کننده‌های مبدل با حالت آن مطابق شکل مدلسازی می‌شود. علاوه بر زاویه ولتاژ خروجی δ ، توان اکتیو و راکتیو خروجی (P, Q) در کنترل کننده‌های توان (δ, P, Q)، حالت‌های کنترل کننده‌ی ولتاژ G_V و کنترل کننده‌ی جریان G_I ، حالت فیلتر LCL مبدل برای استنتاج مدل فضای حالت مبدل همراه کنترل کننده‌ها ترکیب می‌شوند.

این امر برای هر مبدل بصورت جداگانه در دستگاه مرجع خود صورت می‌پذیرد (dq). بار و شبکه نیز با استفاده از معادلات حالت مربوط به خود مدل می‌شوند. بسته به مکان DGها و بارها در شبکه، معادلات فضای حالت برای فرمول‌بندی معادلات فضای حالت کل ریزشبکه در یک دستگاه مرجع مشترک (DQ) ترکیب می‌شوند. طراحی کنترل کننده‌ها بایستی با مدل فضای حالت مرکب و از طریق آنالیز پایداری سیگنال کوچک حاصل شود [۴۷].

۳-۶-۲ پایداری گذرا

پایداری گذرای یک ریزشبکه می‌تواند با یک مدل غیرخطی (با ترکیب مدل‌های کنترل کننده‌ی droop با معادلات شبکه) ارزیابی شود. یک روش آنالیز بر پایه‌ی ساختار تابع لیاپانوف می‌باشد. یک مدل ریز شبکه برای آنالیز حالت گذرا با منابع متصل شده مبدل، در شکل (۳-۸) نشان داده شده است.

خروجی توان حقیقی و راکتیو مبدل‌ها، معادلات فضای حالت هر مبدل از معادلات شبکه را ربط می‌دهد تا مدل سیستم استنتاج شود. برای اعمال روش مستقیم آنالیز حالت گذرا، لازم است که یک تابع

لیاپانوف تشکیل داده شود. تابع لیاپانوف برای یک ریز شبکه می تواند از متغیرهای کنترل کننده ی droop انتخاب شود که فرکانس کار مبدل (ω) و ولتاژ فیلتر خازنی $(V_{cf dq})$ می باشند. این تابع می تواند بصورت زیر نوشته شود:

$$f(x) = f(\omega_1, \omega_2, V_{cf dq1}, V_{cf dq2}) \quad (3-3)$$

تابع می تواند با ثابت جداگانه برای هر متغیر حالت یا ترکیبی از آنها که ضوابط تابع لیاپانوف را برآورده سازد، می توان بیان شود. اگر یک ماشین سنکرون در شبکه موجود باشد، می توان با استفاده از یک روش ساده سازی شده که طی آن ژنراتور های سنکرون طبق مدل کلاسیک با معادلات swing بیان می شوند، آنها را مدلسازی نمود. بارهای امپدانس ثابت عموماً در این تابع دخالت داده نمی شوند. با این حال، با یک بار دینامیک، این تکنیک ها می تواند به وابستگی بار به پایداری گذرای ولتاژ تعمیم داده شود. رفتار بار و منبع می تواند به سیستم های فرعی کند و تند تجزیه شود تا برای آنالیز گذرا مهیا باشد.

۳-۶-۳ پایداری ولتاژ

همانطور که در بخش بالا اشاره شد، مشکلات پایداری ولتاژ می تواند بدلیل عوامل متعددی در یک ریز شبکه ظاهر شود. این مشکل می تواند با استفاده از منحنی های $P - V$ و $Q - V$ نمایش داده شود. منحنی $P - V$ بارپذیری حداکثر و منحنی $Q - V$ مقدار توان راکتیو لازم جهت تزریق به پایانه ی بار برای رسیدن به ولتاژ مطلوب را نشان می دهد. در ریز شبکه ای که یک VSC توان را به بار (P_L, Q_L) تزریق می کند، توان بار می تواند به ولتاژ ترمینال (V_{cf}) و ولتاژ بار (V_t) مرتبط باشد.

تولید توان راکتیو (Q_G) می تواند بر حسب ولتاژ ترمینال (V_{cf}) ، ولتاژ بار (V_t) و توان بار (P_L) نوشته شود. لازم به ذکر است که کنترل توان راکتیو با یک VSC نسبت به ماشین سنکرون سریعتر انجام می گیرد. توزیع توان راکتیو با یک تغییر ناگهانی در توان راکتیو دیماند یا تولیدی می بایست بصورت مناسبی کنترل شود تا حد راکتیو مبدل و یا نوسان سیستم جلوگیری شود. با انواع مختلف بارها، توان راکتیو دیماند ممکن است با مشخص بار تغییر کند. سه معیار پایداری ولتاژ مربوط به توان راکتیو است. برای تمامی وضعیت ها، منحنی پایداری سیستم با s برای نقاط پایداری و با u برای نقاط ناپایداری مشخص شده است. وضعیت منحنی پایداری برای تولید توان راکتیو (Q_G) و مصرف توان راکتیو (Q_L) را نشان می دهد.

سیستم پایدار است اگر dQ_G/dQ_L مثبت باشد؛ نرخ تغییر توان راکتیو مصرفی نسبت به ولتاژ بار با نرخ تغییر توان راکتیو تولیدی نسبت به ولتاژ در وضعیت ۱ و وضعیت ۲ مقایسه شده است. وضعیت ۳ از

وضعیت ۱ و ۲ استنتاج شده است که معیار پایداری برای نرخ تغییرات ولتاژ ترمینال نسبت به ولتاژ بار نشان می دهد. بحث کلیدی در این آنالیز می تواند:

۱. استراتژی کنترل توان راکتیو ۲. مشخصات بار ۳. افزایش کند توان دیمانند ۴. خروج بخشی از شبکه باشد.

۳-۷ بهبود پایداری در ریز شبکه

المان های مختلفی در راستای بهبود پایداری ریز شبکه موثر می باشند که در این بخش، روش های متعددی برای ارتقاء پایداری در یک ریز شبکه مطرح می شوند.

۳-۷-۱ پایدارساز

پایدارسازها می توانند در ریز منابع متصل شده با VSC^۱ جهت بهبود پایداری سیگنال کوچک مورد استفاده واقع شود. می توان مشاهده نمود که دامنه ی ولتاژ، فرکانس و توان خروجی DG متصل شده به پایدارساز داده می شود. لازم به ذکر است که شامل هرگونه ی حلقه ی کنترلی دیگر باشد؛ تجهیزات پایداری کننده ی جداگانه (برای VSC های موجود) یا یک حلقه ی کنترلی کمکی می تواند پایداری یک DG متصل با VSC را ارتقاء دهد.

- مدولاسیون ΔI_d و ΔI_q پاسخ پایدارسازی سریعی فراهم می کند ولی هنگام سناریو سوئیچینگ تغییر بار بصورت پیوسته منجر به نوسان سیستم می شود.
- مدولاسیون ΔV_d و ΔV_q نیز حلقه ی پایدارسازی موثری فراهم می کند. این گزینه هم برای منابع متصل به شبکه و هم برای منابع تشکیل دهنده ی شبکه مناسب است.
- مدولاسیون ΔP و ΔQ پایدارسازی آهسته تری فراهم می کند ولی برای سناریوهای ریز شبکه ی راه دور موثر است، جایی که تنظیم ها از لحاظ زمانی بحرانی نیستند.

۳-۷-۲ جبران سازی توان راکتیو با STATCOM

جبران سازی توان راکتیو در یک ریز شبکه برای حفظ ولتاژ در مقادیر قابل قبول ضروری است. مشکلات تنظیم ولتاژ در ریز شبکه های راه دور و شبکه بیشتر رخ می دهد.

(۱) در مد متصل به شبکه، مشکل تنظیم ولتاژ اغلب در انتهای بار فیدر دیده می شود.

¹ Vehicle Stability Control

² Static Synchronous Compensator

(۲) در مد جزیره ای، ممکن است ولتاژهای جای جای شبکه از حد قابل قبول کمتر شود و در این صورت مشخص نمودن مکان برای جبران آن مشکل است.

۳-۷-۳ سیستم ذخیره ساز انرژی

سیستم ذخیره سازی انرژی می تواند پایداری یک ریز شبکه را با تزریق توان اکتیو (گاهی اوقات توان راکتیو)، حین نقصان توان، خارج شدن DG (تریپ DG)، جزیره ای شدن، دینامیک بار و تا زمان شروع به کار (معادل با گذر از خطا) مجموعه ژنراتور دیزلی فراهم آورد. تجهیزات ذخیره سازی انرژی متعددی در بازار وجود دارند. چرخ طیار یکی از راهکارهای موثر در ذخیره ی انرژی است. با یک سیستم چرخ طیار امکان تزریق توان MW حتی در طول یک چهارم سیکل وجود دارد. ساختار اساسی یک سیستم چرخ طیار متصل شده به ریز شبکه است. سیستم چرخ طیار به ریز شبکه با مبدل پشت به پشت متصل می شود. اولین مبدل به عنوان محرک چرخ طیار عمل کرده و ولتاژ سمت DC را تأمین می کند. مبدل سمت شبکه توان اکتیو و راکتیو را مبتنی بر فرکانس و ولتاژ اندازه گیری به شبکه تزریق می کند. تزریق توان معمولاً براساس کنترل droop خارج یک بازه ی قابل قبول از فرکانس و ولتاژ عمل می کند [۴۸].

۳-۷-۴ بارزدایی برای بهبود پایداری

نقش تعیین کننده ی بارزدایی در پایداری ریز شبکه حین رخداد جزیره ای شدن می باشد. نبود ناگهانی شبکه عدم تعادل توان را موجب می شود و بارزدایی برای متعادل کردن توان در یک ریز شبکه از لحاظ زمانی بحرانی است. بارزدایی می تواند با روش های مختلف حاصل شود؛ اینترلاک بریکر (بریکری که برای تغییر پیکر بندی شبکه کاربرد دارد): کلید ثابت با سوئیچ جزیره ای شدن اینترلاک می باشد و تغییر حالت آن برخی بارهای ثابت را از سیستم می زداید. این روش سریع و موثر اما ثابت است.

۳-۸ گذراهای جزیره ای شدن

در این قسمت مباحث پایداری گذرا پس از جزیره ای شدن نشان داده می شود. فاکتورهای متعددی در یک خطا و جزیره ای شدن ناشی از آن وجود دارند.

- برای رسیدن به تعادل توان بایستی برخی از بارها حذف شوند.
- اما فرآیند حذف بار مدت زمانی به طول می انجامد.

- در یک خطا، سیستم ممکن است قبلاً از اینکه حذف بار صورت بپذیرد، سریعاً ناپایدار شود. قابلیت گذر از خطا می تواند با یک STATCOM فراهم شود.
- حمایت STATCOM زمان بارزدایی را فراهم می کند.
- مقدار خازن dc تغذیه کننده ی STATCOM بایستی طوری انتخاب شود که افت قابل توجهی در ولتاژ باس dc حین گذرا پدید نیاید.
- بنابراین خازن DC از انرژی موردنیاز حین گذرا استنتاج می شود.
- لازم به ذکر است که پشتیبانی STATCOM با ظرفیت نامی تجهیز محدود می شود.

ذخیره ساز می تواند عمل پایدارساز را تماماً در هر دو مد متصل به شبکه و جزیره ای انجام دهد. با ذخیره ساز باتری امکان تأمین توان به مدت طولانی تر فراهم می شود و این برای شبکه ی بعد از عدم تعادل ها عمده ی توان مانند جزیره ای شدن، مفید است. پاسخ سیستم هنگام جزیره ای شدن را در حضور پشتیبانی ذخیره ساز نشان می دهد. می توان مشاهده نمود که نیاز بار اضافی در ۰,۱۵ ثانیه (جزیره ای) توسط باتری تأمین می شود و در ۰,۶۵ ثانیه توان خروجی ذخیره ساز به دلیل انجام شدن کامل حذف بار، به صفر کاهش می یابد.

۳-۹ بارزدایی

- تأثیر بارزدایی بر پایداری سیستم در این قسمت نشان داده می شود. با ریز شبکه ی جزیره ای شدن با ۲۰٪ بار اضافی شبیه سازی شده است. جزیره ای شدن با انجام حذف بار برای رسیدن به تعادل توان پیگیری شده است. پاسخ های سیستم با روش های مختلف بارزدایی است.
- می توان مشاهده نمود که کارایی رله ی فرکانسی متدوال در حضور بار موتوری تقلیل می یابد. برای شبکه ی بحرانی توصیه می شود که روش پیشرفته ی حذف بار با عملکرد بهتر استفاده شود.
 - زمان نشست در ریز شبکه های مختلف است. می توان دید که با بار موتوری، بارزدایی مبتنی بر فرکانس زمان نشست طولانی داشته و برای یک ریز شبکه راه دور مقدار کاملاً زیادی محسوب می شود.

۳-۱۰ شاخص های استاتیک پایداری ولتاژ

این شاخص ها، در یک نقطه کار مشخص، جهت ارزیابی امنیت ولتاژ، با استفاده از مدل های پخش بار، محاسبه می شوند. بدین منظور، این شاخص ها باید استحکام سیستم رادر مقابل خارج شدن عناصر یا

افزایش بار، نشان دهند. از نظر محاسباتی، به راحتی و با سرعت محاسبه شوند و تحلیل آنها (حتی توسط اپراتورهای غیر مهندس) آسان باشد.

از نظر سیگره، شاخص‌های استاتیک به صورت زیر طبقه بندی می شوند:

(الف) شاخص‌های بنا شده روی حالت کار مشخص.

(ب) شاخص‌های بنا شده روی انحراف بزرگ.

در شاخص‌هایی که ناپیوستگی‌هایی همچون حدود جریان ژنراتورها در نظر گرفته می‌شوند، بر مبنای توانایی سیستم در مقابل افزایش بار یا انتقال توان، یک فاصله یا مرز MW یا MVar از نقطه کار فعلی به نقطه انتقال حداکثر، تعیین می‌شود. این کار می‌تواند توسط محاسبه یک منحنی $V - P$ یا $V - Q$ یا محاسبه مستقیم ظرفیت انتقال حداکثر، انجام شود.

شاخص‌های نوع (الف)، روی یک حالت پخش توان حل شده یا یک نقطه کار سیستم بنا می‌شوند. برخی از این شاخص‌ها عبارتند از:

- ذخیره توان راکتیو، یک شاخص ساده و با ارزش است.
- مشاهده اندازه ولتاژها نیز مفید است، ولی معمولاً یک شاخص حساس همچون ذخیره توان راکتیو نیست.
- روش‌های حساسیت بنا شده روی خطی سازی حول یک نقطه کار که معمولاً در چندین نقطه در طول منحنی‌های $V - P$ یا $V - Q$ استفاده می‌شوند این شاخص‌ها بهتر از اندازه ولتاژها امنیت ولتاژ سیستم را نشان می‌دهند.

شاخص‌های دیگری تحت عنوان شاخص «نزدیکی به فرو پاشی ولتاژ» مطرح می‌شوند این شاخص به صورت زیر تعریف شده‌اند:

$$vcpl_{pi} = \frac{\sum \Delta Q_g}{\Delta p_i} \quad (۴-۳)$$

$$vcpl_{Qi} = \frac{\sum \Delta Q_g}{\Delta Q_i} \quad (۵-۳)$$

که ΔQ_g تغییر در خروجی توان راکتیو ژنراتورها و SVC ها به ازای تغییری در بار راکتیو یا حقیقی باس است.

۳-۱۱ شاخص‌های نوع مرز

شاخص‌های نوع مرز موقعیت نقطه کار را نسبت به یک نقطه بحرانی مشخص می‌کنند. مثلاً در منحنی $V - Q$ ، مرز $(Q^0 - Q^*)$ ، اندازه ای صریح از فاصله تا فروپاشی بر حسب کمیت‌های معنادار از نظر یک اپراتور است. Q^0 نقطه کار فعلی و Q^* توان راکتیو در نقطه دماغه منحنی است. به علاوه، برخلاف برخی از شاخص‌های دیگر، این مرز همچنان برای بعد از فروپاشی هم تعریف می‌شود و فقط علامت آن منفی می‌گردد.

در رابطه با تعریف و استفاده از این مرزها، حداقل دو دیدگاه اساسی وجود دارد:

الف) در جستجوی یک «حد بارگذاری شبکه» هستیم؛ یعنی می‌خواهیم حداکثر باری را که می‌تواند تحمل کند، بدون اینکه ناپایداری ولتاژ واقع گردد، تعیین کنیم. این دیدگاه، در سیستم‌هایی که عامل اصلی فروپاشی ولتاژ، افزایش بار است، غالب است. در این حالت، برای به دست آوردن حد پایداری، تغییر بار باید واقعی، یعنی باید شامل توان حقیقی و راکتیو باشد.

ب) در جستجوی «اندازه از استحکام سیستم»، نسبت به وقایعی که احتمالاً باعث فروپاشی ولتاژ می‌شوند، هستیم. این اندازه، باید به طور درست و صادقانه، فاصله بین نقطه کار فعلی و حد موجود برای یک حل پخش بار را منعکس کند.

یکی از مهمترین شاخص‌های نوع مرز، «مرز توان راکتیو» است که در دسته دوم قرار می‌گیرد. مرز توان راکتیو، به عنوان اختلاف بین بار راکتیو حداکثری که می‌تواند در یک ناحیه معین مصرف شود و بار راکتیو، در نقطه فعلی (که استحکام سیستم، در آن بررسی می‌شود)، تعریف می‌گردد. برای تعیین این مرز، تنها افزایش توان راکتیو در نظر گرفته می‌شود، زیرا:

- مرز توان راکتیو، حد بارگذاری شبکه را تعیین نمی‌کند، بلکه افزایش بار راکتیو، باید به عنوان یک انحراف بزرگ اعمال شده به سیستم، به منظور ارزیابی استحکام آن، ملاحظه شود.

- مرز توان راکتیو، به طور ضمنی، فشار وارد بر سیستم ناشی از انتقال توان‌های حقیقی را منعکس می‌کند، زیرا این مرز، ذخیره توان راکتیو، پس از تحمیل بار حقیقی است. به عنوان مثال، اگر فرضاً سیستم فقط از طریق افزایش بار حقیقی به فروپاشی میل کند، مرز توان راکتیو نیز به صفر می‌رود.

- هنگامی که فقط افزایش توان راکتیو در نظر گرفته شود، محاسبه مرز آسانتر است و به تغییر جدول تولید توان حقیقی نیازی نیست. بنابراین، از پیش آمدن برخی موارد اجتناب می‌شود. برای مثال، تأمین

افزایش تقاضای توان حقیقی ممکن است به واحدهای جدید نیاز داشته باشد. بنابراین، آرایش سیستم تحت مطالعه تغییر می‌یابد و مشکلات جدیدی پیش می‌آید [۴۹].

مرز MW می‌تواند به خارج شدن اجباری تولید در یک ناحیه بار ارتباط داده شود. بدین معنا که مرز MW کافی، تضمین می‌کند که پایداری برای پیشامدهای محتمل حفظ می‌شود. برای مثال، اگر فاصله بین نقطه کار و نقطه بحرانی 500MW باشد، آنگاه در صورت قطع ژنراتورهای کوچکتر از 500MW، پایداری حفظ می‌شود.

مرز MVar، جاذبه زیادی دارد، زیرا ولتاژ و توان راکتیو با یکدیگر ارتباط قوی دارند. مرز MVar می‌تواند به اندازه بانک‌های خازن شنت یا SVC^۱ های ناحیه ارتباط داده شود. برای مثال، اگر یک بانک خازنی شنت 150MVar در ناحیه موجود باشد، مرز بزرگتر از 150MVar اطمینان می‌دهد که در صورت از دست رفتن این منبع راکتیو، پایداری حفظ می‌شود. مرز MVar همچنین افزایش بار از مقدار پیش بینی شده را اجازه می‌دهد. در طی بارهای سنگین، هر مگا وات بار اضافی، ممکن است به دو یا سه مگا وار پشتیبانی توان راکتیو نیاز داشته باشد.

۳-۱۱-۱ منحنی‌های $V - Q$

این منحنی‌ها، نمودار ولتاژ، در یک باس تست یا بحرانی، بر حسب توان راکتیو همان باس می‌باشند.

امنیت ولتاژ، ارتباط نزدیکی با توان راکتیو دارد و یک نقاط مختلف، در طول یک منحنی $V - Q$ ، حد توان راکتیو را باس تست، به دست می‌دهد. این منحنی می‌تواند در نقاط مختلف، در طول یک منحنی $V - P$ ، برای بررسی استحکام سیستم، محاسبه شود. مشخصه‌های جبران راکتیو (خازن، SVC یا کندانسور سنکرون) را می‌توان در دستگاه $V - Q$ رسم نمود. تقاطع مشخصه $V - Q$ سیستم و مشخصه جبران توان راکتیو، نقطه کار سیستم است. این روش مفید است، چون جبران راکتیو، یکی از راه حل‌های مسأله پایداری ولتاژ است. شیب منحنی $V - Q$ ، استحکام باس تست را نشان می‌دهد. هنگامی که ژنراتورها به حد توان راکتیویشان می‌رسند، این شیب کمی تندتر می‌شود و نقطه دماغه نزدیک می‌گردد.

برای سیستم‌های بزرگ، منحنی‌های $V - Q$ به وسیله یک سری پخش توان به دست می‌آیند. بدین منظور، یک کندانسور سنکرون فرضی در باس تست قرار داده می‌شود و در برنامه رایانه ای، این باس به

^۱ Static Var Compensator

صورت یک باس PV، بدون حد روی توان راکتیو آن، در نظر گرفته می شود. پخش توان، برای یک سری از ولتاژهای معین در باس تست، انجام و خروجی راکتیو کنداسور، برحسب ولتاژ رسم می گردد. واگرایی فقط هنگامی رخ می دهد که ولتاژها در باس های دور، نسبت به باس PV، به مقدار زیادی کاهش یابند. مسائل مربوط به جدول تولید، حداقل هستند، چون تنها به واسطه تغییر تلفات، در توان حقیقی، تغییر ایجاد می شود. برای هر پخش توان، با شروع از مقادیر حل قبلی، حل بعدی به طور سریع به دست می آید.

منحنی های $V - Q$ یکی از ساده ترین روشها برای تعیین پایداری ولتاژ هستند. این منحنیها می توانند برای شرایط قبل و بعد از اختلال و برای فرضهای مدل سازی بار مختلف، محاسبه شوند. برای تعیین باسهای تست مناسب، به منظور محاسبه منحنیهای $V - Q$ به تجربه نیاز است. بهترین باس تست، ممکن است به اختلال مورد نظر، بستگی داشته باشد. زمانی که نواحی کنترل ولتاژ مجزا بتوانند تعیین شوند، منحنیهای $V - Q$ دارای بیشترین اطلاعات ممکن هستند.

امروزه، منحنی های $V - Q$ روش بررسی پایداری ولتاژ در بسیار از کمپانی های برق هستند. چون این روش به طور مصنوعی تنها یک باس را تحت فشار قرار می دهد، نتایج باید به وسیله روشهای واقعی تر تایید شوند. برای سیستمهای با مقیاس بزرگ، منحنیهای $V - Q$ خیلی واقعی نیستند و روشهای بهتر و کاملتری در حال حاضر قابل دسترس هستند. در این روشها، توان راکتیو، در کلیه باس های سیستم و یا یک ناحیه از سیستم، طبق الگویی، افزایش می یابد.

۳-۱۱-۲ منحنی های $V - P$

این منحنی ها برای بررسی مفهومی پایداری ولتاژ و برای مطالعه یک ناحیه و V ولتاژ در باس بحرانی یا باس نماینده است، استفاده می شود. P همچنین می تواند توان انتقالی در یک خط مهم ارتباطی باشد. ولتاژ بر حسب P می تواند در چندین باس رسم شود. طرز عمل رسیدن به این منحنی ها، افزایش بار ناحیه به وسیله توزیع مجدد طولی بین نیروهاست. روش توزیع تولید، به منظور تأمین افزایش بار مهم است و به دستگاه زمانی شبیه سازی بستگی دارد.

این روش، دو عیب عمده دارد:

- الف) شبیه سازی پخش توان، در نزدیکی نقطه توان حداکثر (نقطه دماغه)، واگرا می شود. این مشکل، می تواند با به کار بردن برخی روشهای عددی برطرف گردد.
- ب) با افزایش بار ناحیه، تولید باید بین نیروگاهها توزیع شود.

به منظور مطالعه استحکام سیستم به دنبال یک اختلال بزرگ، در شرایط اختلال، توان انتقالی افزایش و منحنی $V - P$ مربوط به دست می آید. در این صورت، توانایی سیستم، برای ایستادگی در مقابل اختلال های بعدی یا افزایش بار می تواند تعیین شود. برای مطالعه تأثیر افزایش بار، در شرایط بدون اختلال، بار افزایش و منحنی $V - P$ محاسبه می گردد. فاصله تا نقطه دماغه منحنی، مرز پایداری ولتاژ است. توانایی ایستادگی در مقابل اختلال ها، در سطوح بار یا انتقال مختلف، نیز می تواند شبیه سازی شود. در خاتمه این بخش، به این نکته اشاره می گردد که شیب منحنی $(\Delta V / \Delta P) V - P$ یا شیب منحنی $(\Delta V / \Delta P) V - Q$ ، در یک نقطه کار می تواند یک شاخص امنی ولتاژ باشد. تغییری بزرگ در ولتاژ حاصل از تغییر کوچک در بارگذاری به معنای فشار زیاد غیر معمول، با این امکان که برخی از ژنراتورها به حد تولید توان راکتیو خود رسیده اند، می باشد. [۳۹]

۳-۱۲ جبرانسازی راکتیو

شیوهی جبرانسازی راکتیو با DSTATCOM در انواع مختلف ریزشبکه استفاده شده است. همانطور که اشاره شد، جبرانسازی با کنترل هماهنگ DSTATCOM و سایر DG ها حاصل می شود. این مسئله مقدار موثر ولتاژ فیدر را بهبود می بخشد. می توان مشاهده نمود که بدون جبرانسازی ولتاژ بشدت از حداقل مجاز پایین تر می آید. افت مقدار موثر ولتاژ (%) برای ریزشبکه های مختلف با جبرانسازی راکتیو است [۵۱]. لازم به ذکر است که:

- برای ریزشبکه های شبکه و تسهیل افت ولتاژ به خوبی در مقدار مجاز خود باقی می ماند
- اما برای ریزشبکه ی راه دور افت ولتاژ حدود ۶ الی ۸ درصد می باشد. (عموما مقدار قابل قبول برای چنین شبکه هایی ۱۰٪ است)؛
- بار بحرانی (در ریزشبکه ی راه دور) می تواند نزدیک DSTATCOM یا هر تجهیز کیفیت توان باشد که تنظیم ولتاژ موثرتری صورت بگیرد.

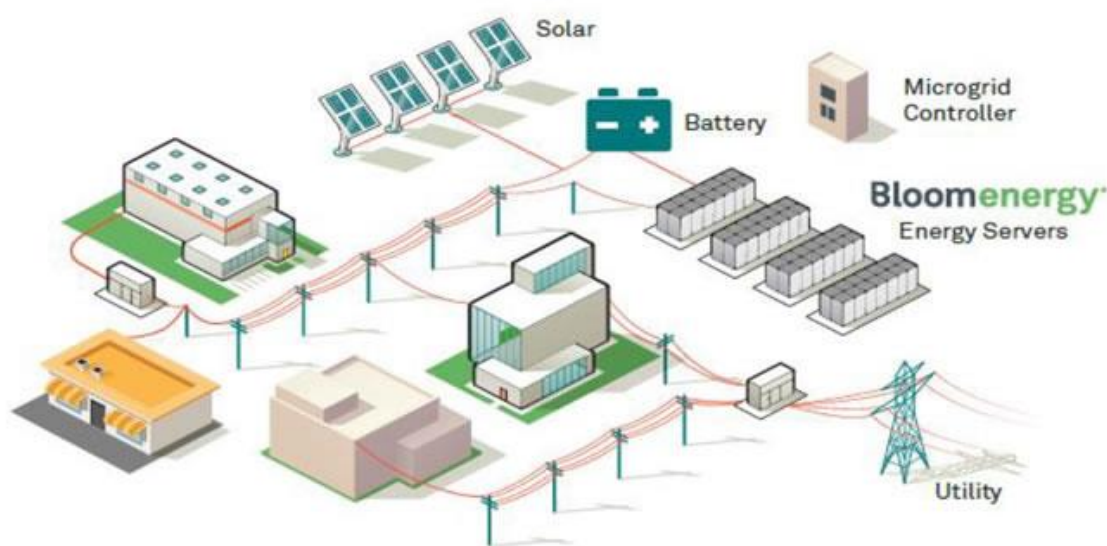
فصل چهارم: شبیه‌سازی و نتایج عددی

۴-۱ مقدمه

امروزه با توجه به مسایل زیست محیطی، قیمت بالای سوخت های فسیلی، تشکیل بازار برق و تغییر مالکیت و مدیریت صنعت برق از حالت سنتی به رقابتی و از طرفی پیشرفت های چشمگیر حاصل شده در ژنراتورهای کوچک، تجهیزات الکترونیک قدرت، ذخیره سازها و کشف روشهای مختلف تولید انرژی از انرژی های تجدیدپذیر علاقه زیادی به استفاده از سیستم های تولید پراکنده در سرتاسر دنیا ایجاد شده است.

شاید مهمترین مزیت استفاده از سیستم های تولید پراکنده، نزدیکی به مصرف کننده و در نتیجه کاهش و یا حذف هزینه های مربوط به سیستم انتقال و توزیع باشد. در کنار آن می توان به حذف محدودیت مکانی و جغرافیایی تولیدات کوچک نسبت به نیروگاه های بزرگ، ریسک کمتر سرمایه گذاری، زمان نصب کمتر، شرایط محیط زیست بهتر، کیفیت و قابلیت اطمینان بیشتر، تکنولوژی در زمینه ساخت ژنراتورهای کوچک با توان تولیدی بالا و استفاده از انرژی های تجدید پذیر مانند باد و خورشید اشاره کرد.

از آنجا که سیستم های توزیع موجود بدون در نظر گرفتن منابع تولید پراکنده طراحی شده اند، به کارگیری این منابع می تواند موجب بروز شرایط غیر مطلوبی در کیفیت برق، قابلیت اطمینان، بازده، حفاظت شبکه توزیع، مسائل ایمنی و غیره شود. از طرفی کاربرد مستقل سیستم های تولید پراکنده به صورت جزیره ای جهت تأمین بار مصرف کنندگان، برای صنایع و واحدهایی که قطع برق خسارات فراوانی را برای آنها در برداشته باشد و یا به طور کلی مکان هایی که امکان دسترسی به انرژی برق از طریق شبکه سراسری با قیمت مناسب را نداشته باشند، بسیار مفید می باشد. بر این اساس به منظور کاهش اثرات نامطلوب منابع تولید پراکنده و بهره گیری از امکان کاربرد مستقل این سیستم ها مفهومی به نام ریزشبکه در شبکه های توزیع مطرح می شود. ریزشبکه فرم جزیره ای از تجهیزاتی هستند که در یک شبکه توزیع قرار می گیرند و حداقل از یک منبع تولید پراکنده و بارهای متصل به آن تشکیل می شود. ریزشبکه ها در حالت بهره برداری مناسب و بهینه دارای منافع زیادی برای مشترکین و شرکت های توزیع خواهند بود. بارها و منابع تولید انرژی ریزشبکه ها به راحتی می توانند بدون آنکه قطعی و یا اختلالی در تأمین بار رخ دهد، به شبکه وصل و یا از آن جدا شوند و به طور مستقل عمل نمایند. شکل (۴-۱) شمایی از یک ریزشبکه را نمایش می دهد.



شکل (۴-۱): نمایی از یک ریزشبکه [۵۱].

وقتی شبکه از سمت فیدرهای اصلی و یا منابع تولید عمده که نیروگاه‌های بزرگ هستند، دچار قطعی و در نتیجه خاموشی شوند، ریزشبکه با قطع اتوماتیک کلیدهای اتصال به شبکه (PCC)، خود را از شبکه اصلی جدا نموده و از طریق منابع تولید پراکنده و یا ذخیره‌سازها، بارهای قسمت جداشده را تأمین می‌نمایند که این امر موجب کاهش مدت زمان خاموشی و انرژی از دست رفته خواهد شد و قابلیت اطمینان افزایش خواهد یافت. با توجه به تکنولوژی کلیدهای اتصالی ممکن است در حالت تغییر از حالت متصل به شبکه به حالت جزیره‌ای، وقفه‌های لحظه‌ای رخ دهد. همچنین منابع تولید انرژی در ریزشبکه باید این توانایی را داشته باشند که پس از جداسازی از شبکه، به سرعت خود را تنظیم کنند و بارهای محلی را با کیفیت مناسب تغذیه نمایند. این منابع به کمک مبدل‌های الکترونیک قدرتی که از طریق آن‌ها به ریزشبکه متصل‌اند می‌توانند جهت کنترل توان اکتیو و توان راکتیو، تصحیح افت ولتاژها، تصحیح نامتعادلی و سایر مسائل کیفیت توان در شبکه توزیع به کار روند.

در این پایان نامه کنترل هماهنگ ذخیره ساز انرژی از نوع باتری و منابع تولید توان به منظور بالانس بار و میزان تولید منابع با در نظر گرفتن تغییرات توان اکتیو و راکتیو و با هدف بهبود پایداری ریز شبکه در حالت متصل و منفصل از شبکه بررسی خواهد شد. در مقاله پایه از اینورترهای منبع جریان استفاده شده است که در زمان استفاده از ریز شبکه به صورت منفصل از شبکه اصلی کارایی لازم را دارا نمی باشد.

¹ Point of Common Coupling

در این پایان نامه از اینورترهای منبع ولتاژ استفاده خواهد شد و برخلاف مقاله پایه که ریز شبکه را مقاومتی خالص در نظر گرفته است و از خازن برای تثبیت ولتاژ استفاده کرده است، ریز شبکه تحت مطالعه در این پایان نامه اثر بارهای راکتیو را نیز در نظر خواهد گرفت و خازن نیز از ریز شبکه حذف خواهد شد تا منابع تولید پراکنده وظیفه تأمین توان راکتیو را بر عهده گیرند. در این راستا در صورت استفاده از اینورترهای منبع ولتاژ، امکان حصول حداکثر توان از منابع تولید پراکنده نیز وجود خواهد داشت که در این پایان نامه مد نظر قرار خواهد گرفت.

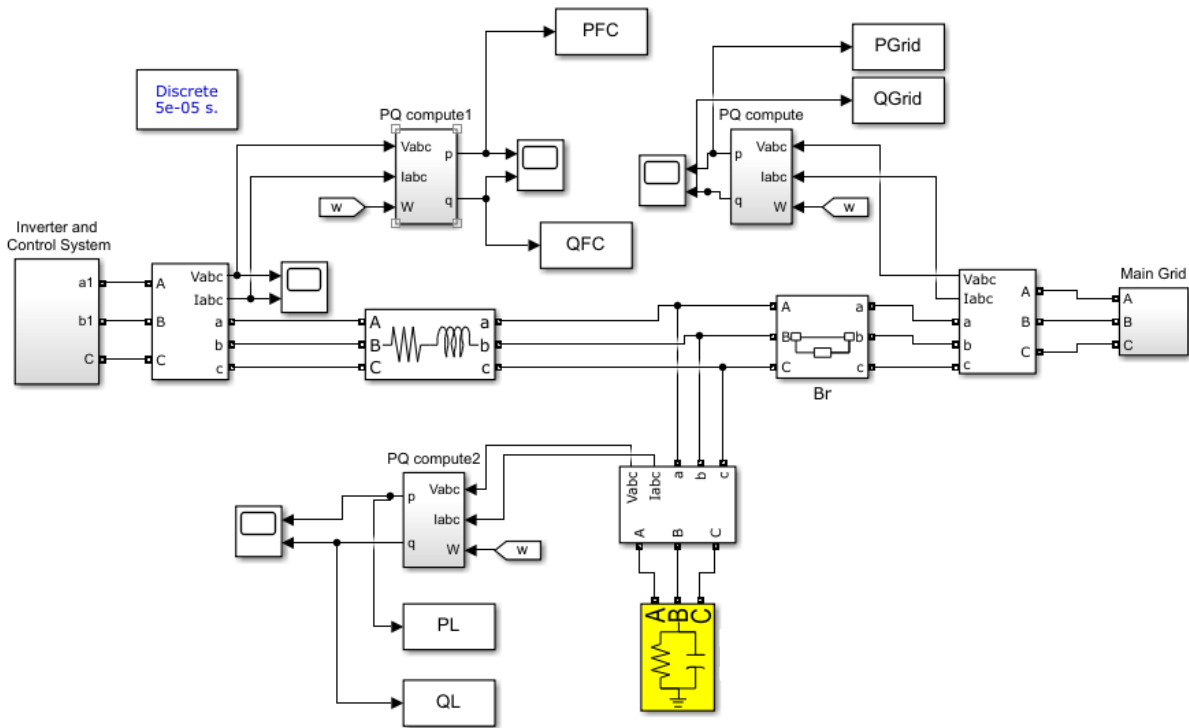
علاوه بر این در مقاله پایه برای کنترل باتری، از تغییرات ولتاژ برای مشخص شدن تغییر بار استفاده شده است و با توجه به فرض عدم وجود بار راکتیو در ریز شبکه مشکلی بروز نخواهد کرد. در حالی که در صورت تغییر بار راکتیو در ریز شبکه های واقعی خازن های شبکه قادر به پاسخگویی نمی باشند و پاسخ دینامیکی مناسبی نخواهد داشت و شبکه با مشکلات پایداری روبرو خواهد شد. از این رو در روش پیشنهادی این پایان نامه، روش کنترلی به منظور تأمین توان اکتیو و راکتیو بصورت همزمان توسط باتری ارائه خواهد شد تا سبب بهبود پایداری ریز شبکه گردد.

۴-۲ مروری کلی بر ریز شبکه های اینورتری

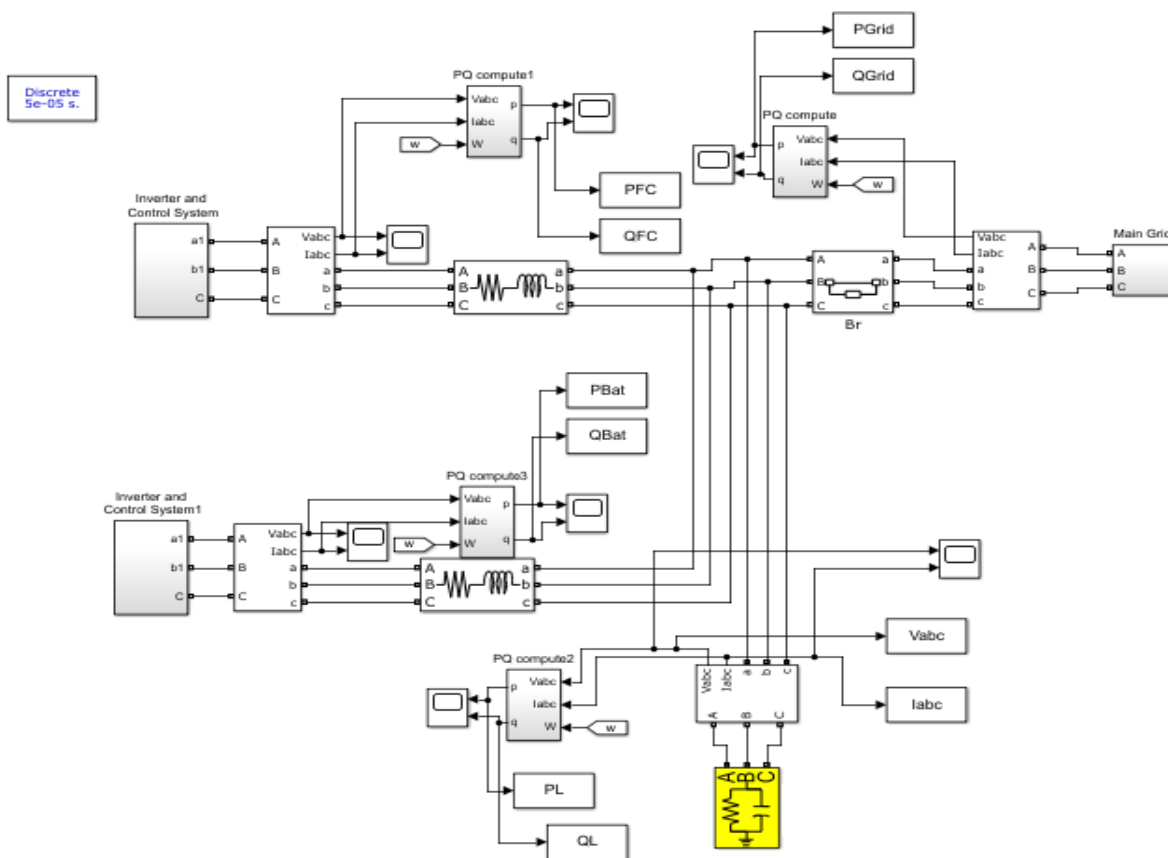
در این بخش به ارزیابی ساختار کلی ریز شبکه اینورتری، الگوریتم کنترل منابع در ریز شبکه و کنترل کننده های اینورتر منابع نظیر کنترل کننده ولتاژ، توان و جریان پرداخته شده است. علاوه بر این در رابطه با فیلتر های خروجی و امپدانس اتصال و همچنین مدل بار نیز توضیحاتی ارائه شده است.

۴-۲-۱ ساختار کلی

در شکل (۴-۲) و (۴-۳) ساختار کلی ریز شبکه اینورتری طراحی شده بدون باتری و با باتری نشان داده شده است. همانطور که در این شکل ها قابل مشاهده است توان خروجی DC منابع تولید از طریق اینورتر به توان AC تبدیل و پس از عبور از فیلتر های مربوطه به شینه اصلی ریز شبکه تزریق می شوند. در ادامه ساختار کنترلی جهت کنترل ولتاژ و فرکانس در حالات مختلف کاری اعم از متصل به شبکه اصلی و منفصل از شبکه اصلی تشریح و قواعد حاکم ارزیابی می گردد.



شکل (۴-۲): ساختار کنترلی طراحی شده بدون باتری.



شکل (۴-۳): ساختار کنترلی طراحی شده با باتری.

۴-۲-۲ الگوریتم کنترل منابع ریزشبه

تا به امروز ماشین های سنکرون الکترومکانیکی، نقش اصلی را در بین ادوات تولید توان الکتریکی ایفا نموده اند. مشخصه خاص این ژنراتورها سبب پایداری نسبتاً بالای شبکه های بزرگ و توازن اتوماتیک توان می شود. پایداری فرکانس توسط ترکیبی از اینرسی گردشی (جرم رتورها) در ماشین های سنکرون شبکه و یک الگوریتم کنترلی که روی سرعت تعدادی از ژنراتورهای سنکرون اصلی عمل می کند، اجرا می شود. هنگامی که واحدهای غیرسنکرون کوچک، بخش زیادی از ظرفیت تولید توان سنکرون را به خود اختصاص می دهند، اینرسی چرخشی ژنراتورهای سنکرون به طور چشمگیری کاهش می یابد. این مسأله سبب ایجاد انحرافات فرکانس بزرگ شده که می تواند منجر به ناپایداری سیستم شود. یک روش پایداری فرکانس منابع غیرسنکرون، ترکیب الکترونیک قدرت با رفتار ماشین سنکرون است. در این روش می توان اینورترها را به گونه ای کنترل نمود که نسبت به شبکه مانند یک ژنراتور سنکرون مجازی^۱ VSG عمل می نمایند تا انحرافات فرکانس شبکه با درصد مشارکت منابع پراکنده را کاهش دهند.

روش تولید مجازی سنکرون به عنوان یکی از مهم ترین روش های کنترل منابع در ریزشبکه مطرح می باشد. این روش بر پایه مدل گذرای ژنراتور سنکرون بوده که اثرات رتور و استاتور در آن لحاظ شده است. در ادامه فرمولاسیون مربوط به مشخصه های مکانیکی VSG و کنترل کننده فرکانس/توان مربوطه تشریح می گردد.

$$\delta = \omega - \omega_0 \quad (۱-۴)$$

$$J\dot{\omega} = P_m - P_e - P_D \quad (۲-۴)$$

در روابط بالا J ثابت اینرسی ژنراتور سنکرون مجازی، ω سرعت زاویه ای مکانیکی و ω_0 سرعت زاویه ای شبکه است. همچنین رابطه مربوط به توان مکانیکی P_m نیز بصورت رابطه (۳-۴) ارائه شده است.

$$P_m = P_{ref} + K_{\omega}(\omega_{ref} - \omega) \quad (۳-۴)$$

^۱ Virtual Synchronous Generation

P_m توان مکانیکی، P_{ref} توان اکتیو مرجع و ω_{ref} سرعت زاویه‌ای مرجع می باشد. K_ω ضریب مربوط به تنظیم کننده سرعت است. همچنین P_e توان الکترومغناطیسی و P_D توان میراکننده می باشد. رابطه P_D بصورت زیر می باشد.

$$P_D = D(\omega - \omega_0) \quad (۴-۴)$$

که در آن D ضریب میرایی توان می باشد. همچنین کنترل کننده ولتاژ/توان راکتیو در یک ژنراتور سنکرون از روابط زیر تبعیت می کنند.

$$I_f = I_0 + I_U + I_Q \quad (۵-۴)$$

$$\tau \dot{U} = -U + I_f k_e \quad (۶-۴)$$

در روابط اشاره شده I_f جریان تحریک، I_0 جریان بی باری، و I_U جریان خروجی سیستم تحریک ژنراتور بوده که از طریق رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$I_U = k_v(U_{ref} - U) \quad (۷-۴)$$

لازم به ذکر است که در رابطه بالا U_{ref} ولتاژ مرجع استاتور و U ولتاژ خروجی بوده و همچنین k_v ضریب تنظیم کننده ولتاژ می باشد. علاوه بر این رابطه مربوط به تنظیم کننده توان راکتیو I_Q بصورت زیر تبیین می گردد.

$$I_Q = k_q(Q_{ref} - Q_e) \quad (۸-۴)$$

همانطور که در رابطه (۸-۴) مشاهده می شود Q_{ref} توان راکتیو مرجع و Q_e توان راکتیو خروجی ژنراتور می باشند. لازم به ذکر است که k_q ضریب تنظیم کننده توان راکتیو، U ولتاژ حالت ماندگار استاتور، τ ثابت زمانی روتور، k_q ضریب تقویت کنندگی تحریک بوده که برای سادگی برابر با ۱ در نظر گرفته شده اند. با توجه به توضیحات ارائه شده توان خروجی VSG را می توان بر اساس روابط زیر ارائه نمود.

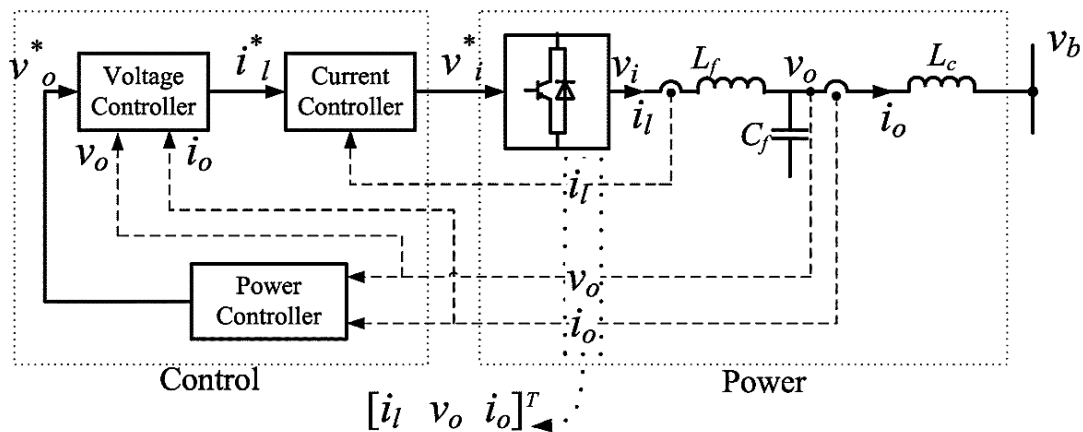
$$P_e = \frac{3U^2}{Z} \cos \theta - \frac{3UV}{Z} \cos(\theta + \delta) \quad (۹-۴)$$

$$Q_e = \frac{3U^2}{Z} \sin \theta - \frac{3UV}{Z} \sin(\theta + \delta) \quad (۱۰-۴)$$

که V مقدار موثر ولتاژ فاز شبکه و Z و θ زاویه و اندازه امپدانس خط هستند.

۴-۳ کنترل اینورتر منابع ریزشبه

روش کنترل منبع ولتاژ و روش کنترل منبع جریان به صورت کلی به عنوان دو راهکار جهت کنترل اینورتر در ریزشبه مطرح می باشند. توپولوژی کلی این مبدل ها به دو دسته کلی تقسیم می شوند. اینورتر منبع ولتاژ و اینورتر منبع جریان. در مدلسازی اینورتر منبع ولتاژ خروجی ولتاژ به طور مستقل کنترل می شود. در اینورتر منبع جریان خروجی جریان به طور مستقل کنترل می شود. ذکر این نکته حائز اهمیت است که در ریزشبه های دارای منابع تولید پراکنده استفاده از اینورتر منبع ولتاژ به اینورتر منبع جریان ترجیح داده می شود. در شکل (۴-۴) ساختار کلی اینورترهای منبع ولتاژ ارائه شده است.

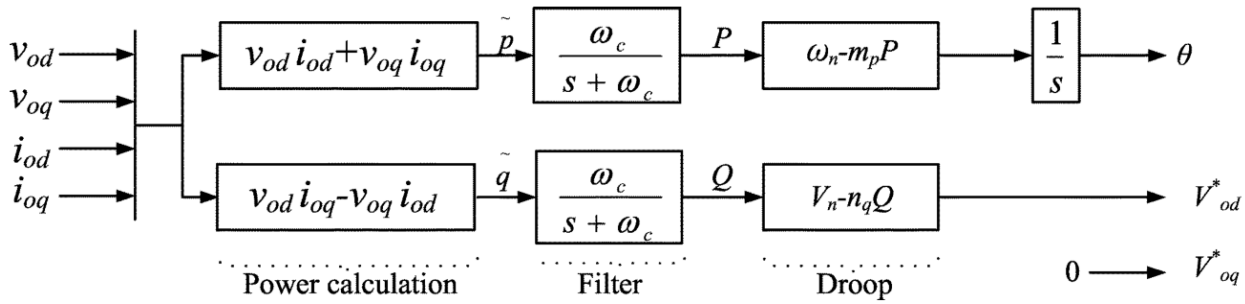


شکل (۴-۴): بلوک دیاگرام اینورتر. [۵۲].

همانطور که در شکل بالا مشاهده می شود سیستم کنترل منابع تولیدپراکنده را می توان به سه بخش مختلف تقسیم بندی نمود. بخش اول مربوط به حلقه کنترل توان خارجی بوده که بزرگی و فرکانس ولتاژ خروجی برای مولفه اصلی ولتاژ را بر اساس مشخصه افتی توان اکتیو و راکتیو، تعیین می کند. لازم به ذکر است که بخش مربوط به توان شامل یک مبدل الکترونیک قدرت، یک فیلتر LC خروجی و امپدانس واسط بین اینورتر و شبکه می باشد. بخش دوم و سوم به ترتیب شامل حلقه های کنترل ولتاژ و جریان می باشند. در ادامه مدل فضای حالت برای تمامی بخش های کنترل توان، ولتاژ و جریان از جمله ساختار کلی حلقه های کنترلی، فیلتر خروجی و امپدانس متصل کننده تشریح می گردد تا در ادامه بر مبنای مدل مشخص اینورتر بتوان روش پیشنهادی در این تحقیق را پیاده سازی نمود.

۴-۳-۱ کنترل کننده توان

ایده اصلی برای کنترل کننده افقی، در نظر گرفتن معادلی برای گاورنر یک ژنراتور سنکرون می باشد. در سیستم های قدرت سنتی، کنترل کننده افقی در زمان افزایش بار، با کاهش فرکانس، مقدار بار را بین واحدهای مختلف تقسیم می کند. این مفهوم در اینورترها با کاهش فرکانس مرجع در هنگام افزایش بار قابل پیاده سازی می باشد. بطور مشابه، توان راکتیو نیز می تواند توسط یک کنترل کننده افقی بر اساس ولتاژ کنترل شود. همانطور که در شکل زیر نشان داده شده است، توان های اکتیو و راکتیو لحظه ای می توانند بر اساس جریان و ولتاژهای خروجی اندازه گیری شده با استفاده از روابط (۱۱-۴) و (۱۲-۴) محاسبه شوند.



شکل (۴-۵): شمای کنترل کننده توان [۵۲].

$$\tilde{p} = v_{od}i_{od} + v_{oq}i_{oq} \quad (۴-۱۱)$$

$$\tilde{q} = v_{od}i_{oq} - v_{oq}i_{od} \quad (۴-۱۲)$$

همانطور که در شکل بالا نشان داده شده است، توان های لحظه ای از یک فیلتر پایین گذر عبور داده می شوند تا مقادیر P و Q مربوط به مولفه اصلی بدست آیند. ω_c نشان دهنده فرکانس قطع فیلتر پایین گذر می باشد. روابط P و Q به شرح زیر می باشد.

$$P = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \tilde{p} \quad (۴-۱۳)$$

$$Q = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \tilde{q} \quad (۴-۱۴)$$

تقسیم توان اکتیو بین چند اینورتر با بکارگیری یک مشخصه افقی مجازی برای فرکانس امکان پذیر است. رابطه مربوط به این مشخصه افقی به صورت زیر می باشد.

$$\omega = \omega_n - m_p P \quad (۴-۱۵)$$

با استفاده از این رابطه، فرکانس ω بر اساس ضریب افتی m_p تنظیم می شود. اینکار باعث در نظر گرفتن مشخصه های مربوط به اینرسی و گاورنر در ژنراتورهای سنتی می شود و باعث فراهم کردن یک فیدبک منفی برای سیستم می شود. در رابطه بالا ω_n بیانگر فرکانس طبیعی مرجع می باشد. به منظور تقسیم توان راکتیو بین چند اینورتر، می توان از یک مشخصه افتی برای ولتاژ استفاده کرد. مشخصه افتی در نظر گرفته شده برای ولتاژ بصورت زیر می باشد.

$$v_{od}^* = V_n - n_q Q \quad (16-4)$$

$$v_{oq}^* = 0 \quad (17-4)$$

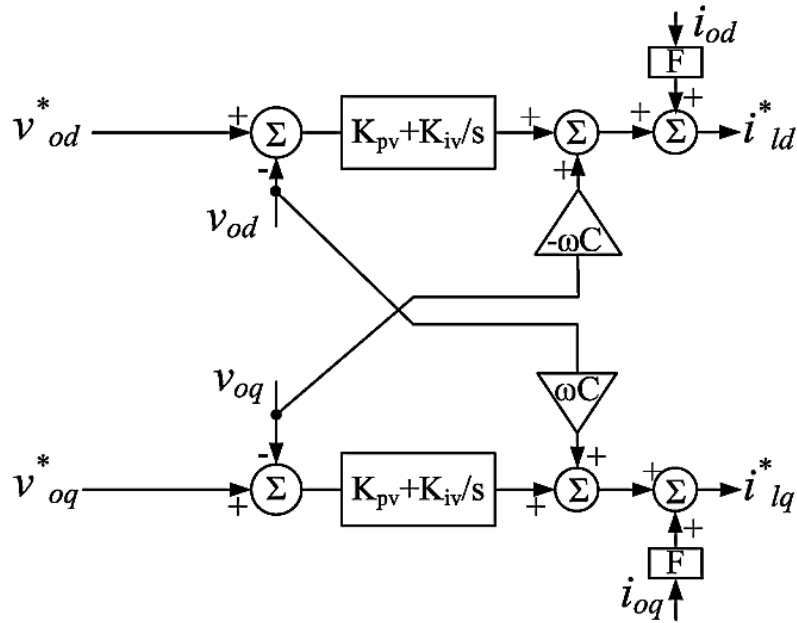
که در آن V_n ولتاژ نامی تنظیم شده برای ولتاژ خروجی محور d می باشد. راهکار کنترلی بگونه ای انتخاب می شود که اندازه ولتاژ خروجی منطبق بر راستای محور d باشد و ولتاژ خروجی محور q برابر با صفر باشد. این نکته قابل ذکر است که تمامی مولفه های سه فاز abc ، به مولفه های $dq0$ در چهارچوب مرجع تبدیل شده اند. سرعت چرخش چهارچوب مرجع برابر با سرعت مرجع (ω_{com}) می باشد. با توجه به اینکه هر اینورتر در حالات گذرا مقادیر ω متفاوتی از مقدار سرعت مرجع دارد، زاویه δ برای نشان دادن زاویه بین اینورتر با چهارچوب مرجع، تعریف می شود و طبق رابطه زیر محاسبه می گردد.

$$(18-4)$$

$$\delta = \int (\omega - \omega_{com})$$

۴-۳-۲ کنترل کننده ولتاژ

شکل زیر بلوک دیاگرام مربوط به کنترل کننده ولتاژ را با تمامی فیدبک های آن نشان می دهد. ولتاژ خروجی توسط یک کنترل کننده PI، کنترل می شود. خروجی کنترل کننده ولتاژ، جریان مرجع را برای کنترل کننده جریان فراهم می کند.



شکل (۶-۴): شمای کنترل کننده ولتاژ [۵۳].

معادلات مربوط به کنترل کننده PI به صورت زیر می باشد.

$$\frac{d\phi_d}{dt} = v_{od}^* - v_{od} \quad (۱۹-۴)$$

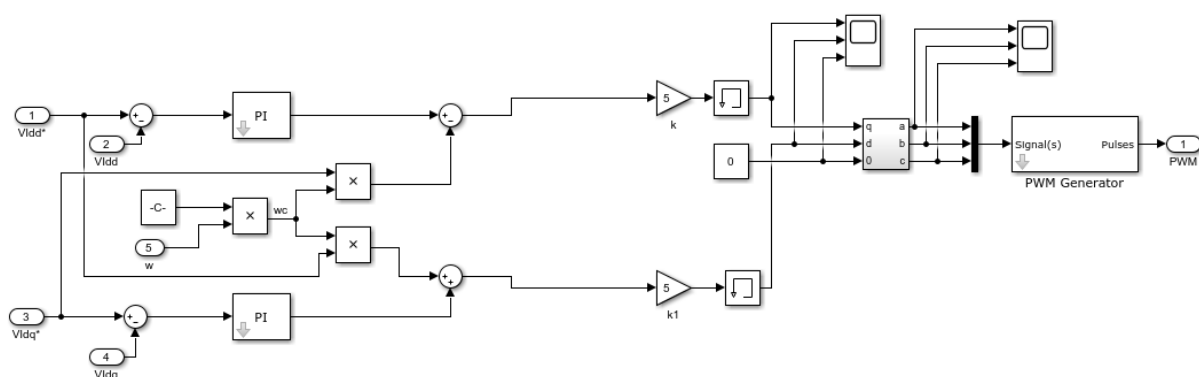
$$\frac{d\phi_q}{dt} = v_{oq}^* - v_{oq} \quad (۲۰-۴)$$

معادلات جبری حاکم بر کنترل کننده ولتاژ که مربوط به جریان های مرجع هستند به صورت زیر می باشند.

$$i_{ld}^* = F i_{od} - \omega_n C_f v_{oq} + K_{pv}(v_{od}^* - v_{od}) + K_{iv} \phi_d \quad (۲۱-۴)$$

$$i_{lq}^* = F i_{oq} - \omega_n C_f v_{od} + K_{pv}(v_{oq}^* - v_{oq}) + K_{iv} \phi_q \quad (۲۲-۴)$$

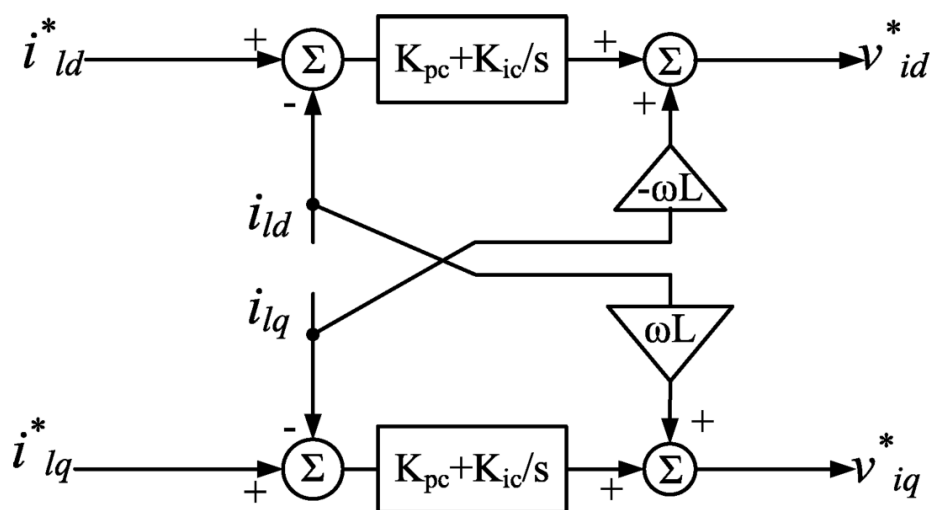
همانطور که ذکر گردید در این پایان نامه از کنترل کننده های ولتاژ به منظور کنترل اینورترهای شبکه استفاده شده است. شکل (۷-۴) مدل پیاده سازی شده در نرم افزار MATLAB را نشان می دهد.



شکل (۷-۴): شمای کنترل کننده ولتاژ پیاده سازی شده در نرم افزار MATLAB

۳-۳-۴ کنترل کننده جریان

شکل زیر کنترل کننده جریان را نشان می دهد. جریان عبوری از فیلتر توسط کنترل کننده استاندارد PI کنترل می شود. خروجی های کنترل کننده جریان ولتاژ مرجع را برای تولید سیگنال های کلیدزنی، تولید می کند. معادلات حالت مربوط به کنترل کننده جریان بصورت زیر می باشد.



شکل (۸-۴): شمای کنترل کننده جریان [۵۳].

$$\frac{dv_d}{dt} = i_{ld}^* - i_{ld} \quad (۲۳-۴)$$

$$\frac{dv_q}{dt} = i_{lq}^* - i_{lq} \quad (۲۴-۴)$$

معادلات جبری مربوط به ولتاژهای خروجی کنترل کننده جریان به شرح زیر می باشد.

$$v_{id}^* = -\omega_n L_f i_{lq} + K_{pc}(i_{ld}^* - i_{ld}) + K_{ic} \gamma_d \quad (25-4)$$

$$v_{iq}^* = -\omega_n L_f i_{ld} + K_{pc}(i_{lq}^* - i_{lq}) + K_{ic} \gamma_q \quad (26-4)$$

۴-۳-۴ فیلتر LC خروجی و امپدانس متصل کننده

با فرض اینکه اینورتر بصورت ایده آل باشد و ولتاژ درخواستی را تولید کند ($v_i = v_i^*$)، مدل سیگنال کوچک مربوط به فیلتر LC خروجی و امپدانس متصل کننده اینورتر به شبکه می تواند توسط معادلات حالت زیر بیان گردد.

$$\frac{di_{ld}}{dt} = -\frac{\gamma_f}{L_f} i_{ld} + \omega i_{lq} + \frac{1}{L_f} i_{lq} - \frac{1}{L_f} v_{od} \quad (27-4)$$

$$\frac{di_{lq}}{dt} = -\frac{\gamma_f}{L_f} i_{lq} + \omega i_{ld} + \frac{1}{L_f} v_{lq} - \frac{1}{L_f} v_{oq} \quad (28-4)$$

$$\frac{dv_{od}}{dt} = \omega v_{oq} + \frac{1}{C_f} i_{ld} - \frac{1}{C_f} i_{od} \quad (29-4)$$

$$\frac{dv_{oq}}{dt} = -\omega v_{od} + \frac{1}{C_f} i_{lq} - \frac{1}{C_f} i_{oq} \quad (30-4)$$

$$\frac{di_{od}}{dt} = -\frac{r_c}{L_c} i_{od} + \omega i_{oq} + \frac{1}{L_c} v_{od} - \frac{1}{L_c} v_{bd} \quad (31-4)$$

$$\frac{di_{oq}}{dt} = -\frac{r_c}{L_c} i_{oq} + \omega i_{od} + \frac{1}{L_c} v_{oq} - \frac{1}{L_c} v_{bq} \quad (32-4)$$

امپدانس متصل کننده اینورتر به شبکه بصورت $z = r_c + jx_c$ در نظر گرفته شده است.

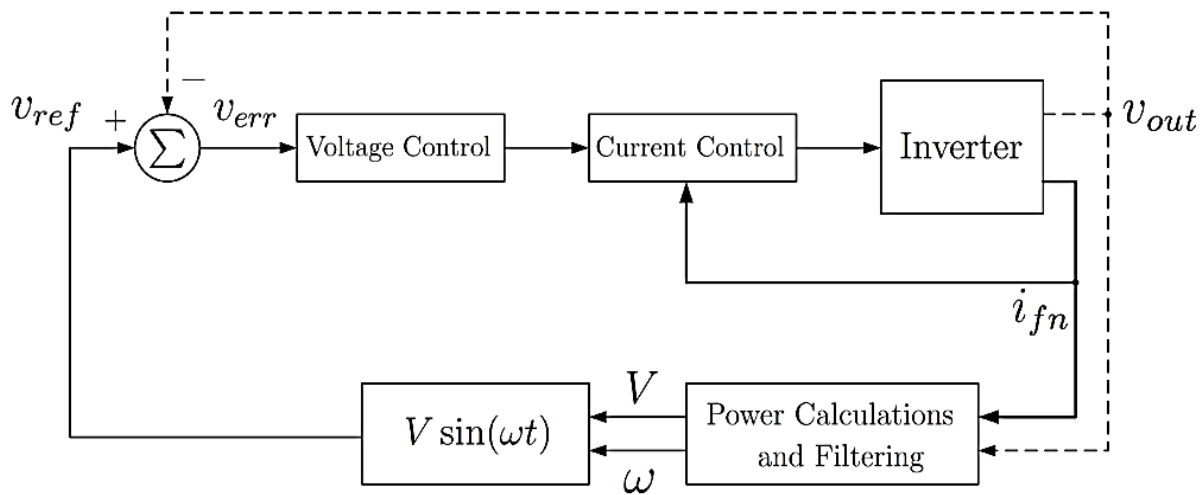
۴-۳-۵ مدل بار

اگرچه بارهای مختلفی در یک ریزشبه وجود دارد، در این پایان نامه یک بار RL بصورت کلی در نظر گرفته شده است. معادلات حالت مربوط به بار RL که با i ام شبکه متصل است بصورت زیر می باشد.

$$\frac{di_{loadDi}}{dt} = -\frac{R_{loadi}}{L_{loadi}} i_{loadDi} + \omega i_{loadQi} + \frac{1}{L_{loadi}} v_{bDi} \quad (33-4)$$

$$\frac{di_{loadQi}}{dt} = -\frac{R_{loadi}}{L_{loadi}} i_{loadQi} - \omega i_{loadDi} + \frac{1}{L_{loadi}} v_{bQi} \quad (34-4)$$

تا اینجا مدل کامل مربوط به یک اینورتر با تمامی کنترل کننده‌های آن به همراه بار RL بیان شد. بلوک دیاگرام کلی اینورتر به همراهی کنترل کننده‌های آن در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل (۹-۴): بلوک دیاگرام کلی اینورتر به همراه کنترل کننده‌ها [۵۴].

۴-۴ شبیه سازی سیستم تحت مطالعه

در این بخش نتایج شبیه سازی ارائه شده است. لازم به ذکر است که شبیه سازی‌ها در دو حالت وجود و عدم وجود منبع ذخیره ساز در ریزش شبکه تحت مطالعه پیاده سازی و تحلیل شده است. به عبارت دیگر حضور و عدم حضور ذخیره ساز در دو حالت کاری مختلف متصل و منفصل از شبکه اصلی ارزیابی شده است. در ادامه پارامترهای در نظر گرفته شده برای شبیه سازی بیان و سپس نتایج شبیه سازی ارائه می‌گردد.

۴-۴-۱ پارامترهای شبیه سازی

در این بخش متغیرها و پارامترهای در نظر گرفته شده در نرم افزار MATLAB پیاده سازی و شبیه سازی شده است. اطلاعات مربوط ریزش شبکه تحت مطالعه در جدول (۱-۴) بیان شده است. از این رو ریزش شبکه به یک شبکه اصلی سه فاز با سطح ولتاژ ۳۸۰ ولت با فرکانس ۵۰ هرتز متصل بوده و شبیه سازی برای دو حالت کاری متصل به شبکه و منفصل از شبکه اصلی تحلیل شده است. لازم به ذکر است که ریزش شبکه در زمان ۰,۵ ثانیه از شبکه اصلی جدا شده و در حالت جزیره ای بهره برداری خواهد شد. ذکر این نکته ضروری

است که در حالت منفصل از شبکه اصلی ذخیره ساز انرژی کارایی خود را به وضوح نشان داده و سبب بهبود پایداری ریزشبکه خواهد شد.

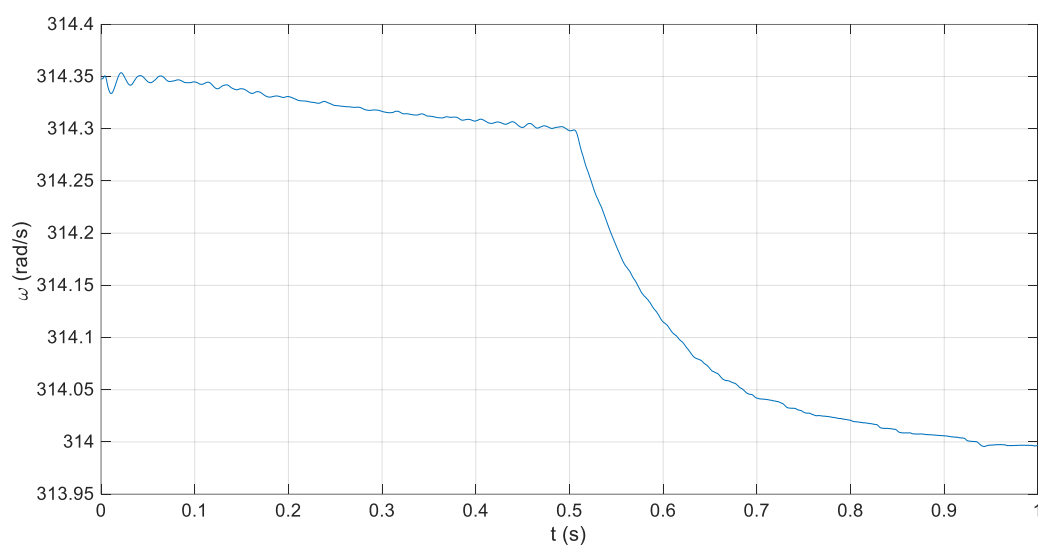
جدول (۴-۱): مشخصات ریزشبکه تحت مطالعه

پارامتر	مقدار
فرکانس نامی (Hz)	۵۰
ولتاژ نامی (V)	۳۸۰
زمان جدا شدن از شبکه (جزیره ای شدن)	۰/۵
مدل بار ریزشبکه	بار امپدانس ثابت
توان بار (kW)	۲۰
نوع فیولسل	PEMFC
توان فیولسل (kW)	۵۰
K_I	۱۰
K_P	۱۰۰

۴-۴-۲ نتایج مربوط به حالت عدم وجود منبع ذخیره ساز در شبکه

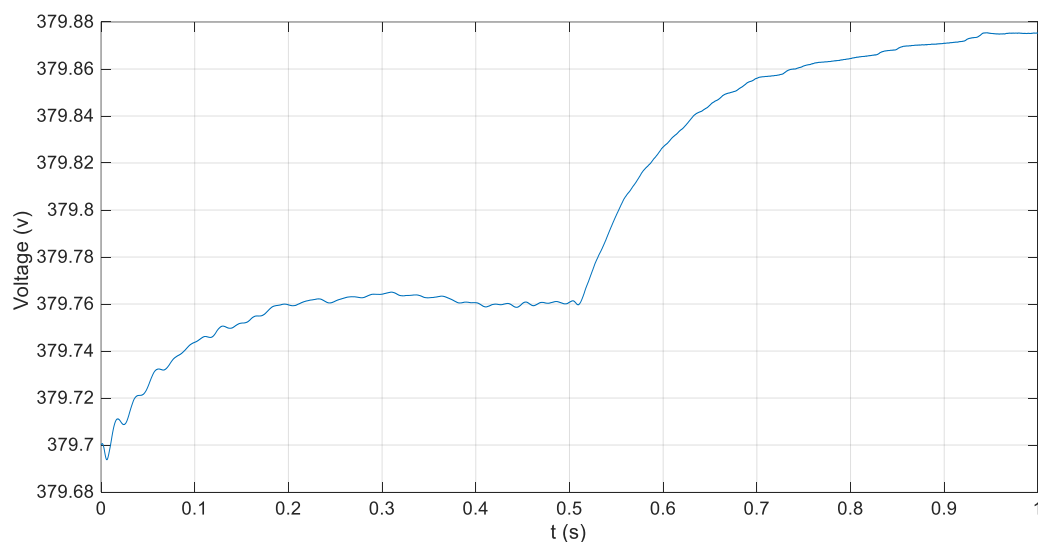
در این حالت نتایج شبیه سازی برای حالتی که پیل سوختی به عنوان منبع تولید توان در ریزشبکه موجود است و از ذخیره ساز نیز استفاده نشده است، تشریح شده است. به عبارت دیگر در این سناریو از ذخیره ساز به عنوان پشتیبان در ریزشبکه استفاده نشده است.

در ادامه تغییرات فرکانس و ولتاژ ریزشبکه در دو حالت کاری متصل و منفصل از شبکه اصلی ارائه و نتایج آنالیز شده است. شکل (۴-۱۰) و (۴-۱۱) تغییرات فرکانس و ولتاژ ریزشبکه در طول بازه شبیه سازی در دو حالت متصل و منفصل از شبکه اصلی را نشان می دهد.



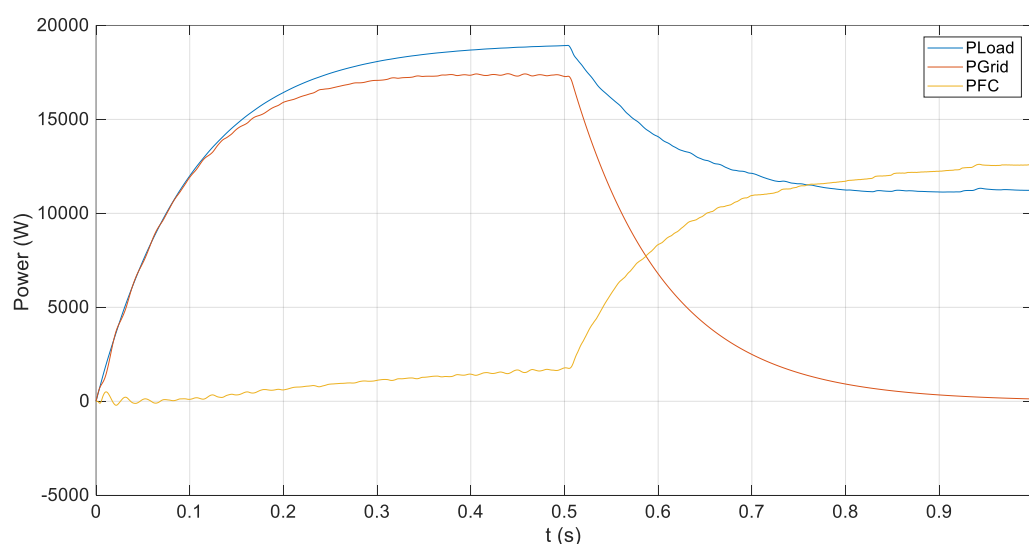
شکل (۴-۱۰): تغییرات فرکانس ریزشبه در طول بازه شبیه سازی (عدم وجود باتری).

همانطور که در شکل (۴-۱۰) مشاهده می شود فرکانس ریزشبه بعد از طی کردن حالات گذرای اولیه روی مقدار ۳۱۴ رادیان بر ثانیه ثابت شده است. در زمان ۰,۵ ثانیه و پس از بروز حالت جزیره ای در ریزشبه، فرکانس ریزشبه به دلیل عدم ارتباط با شبکه اصلی کمی افت کرده است. علاوه بر این ولتاژ ریزشبه در زمان اتصال به شبکه اصلی در مقدار ۳۷۹,۷۶ ولت ثابت بوده است و در اثر بروز حالت جزیره ای در ریزشبه ولتاژ ریزشبه نیز تا حدودی ناپایدار می گردد.

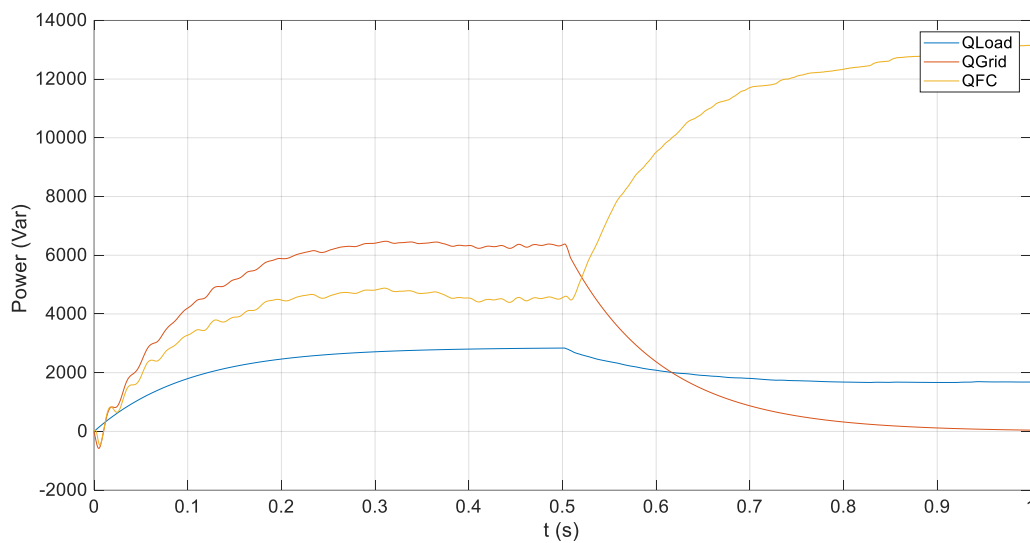


شکل (۴-۱۱): تغییرات ولتاژ ریزشبه در طول بازه شبیه سازی (عدم وجود باتری)

در ادامه نیز تغییرات توان منابع ریزشبه، بار و توان انتقالی از شبکه اصلی در دو حالت کاری متصل و منفصل از شبکه اصلی ارائه شده است. از این رو در شکل های (۴-۱۲) و (۴-۱۳) تغییرات توان اکتیو و راکتیو بار و منابع موجود در ریزشبه نشان داده شده است. طبق شکل مشاهده می شود که قبل از جدا شدن ریزشبه از شبکه اصلی بار از طریق پیل سوختی و شبکه اصلی تأمین و پس از زمان ۰,۵ ثانیه تنها پیل سوختی به تأمین بار اکتیو و راکتیو پرداخته است. به عبارت دیگر جدا شدن ریزشبه از شبکه اصلی، منبع پیل سوختی میزان کمبود توان اکتیو و راکتیو را جبران می کند. از این رو بعد از بروز حالت جزیره ای میزان توان اکتیو و راکتیو تولیدی توسط پیل سوختی به میزان قابل توجهی افزایش یافته تا بار تأمین و پایداری فرکانس و ولتاژ در ریزشبه برقرار بماند.



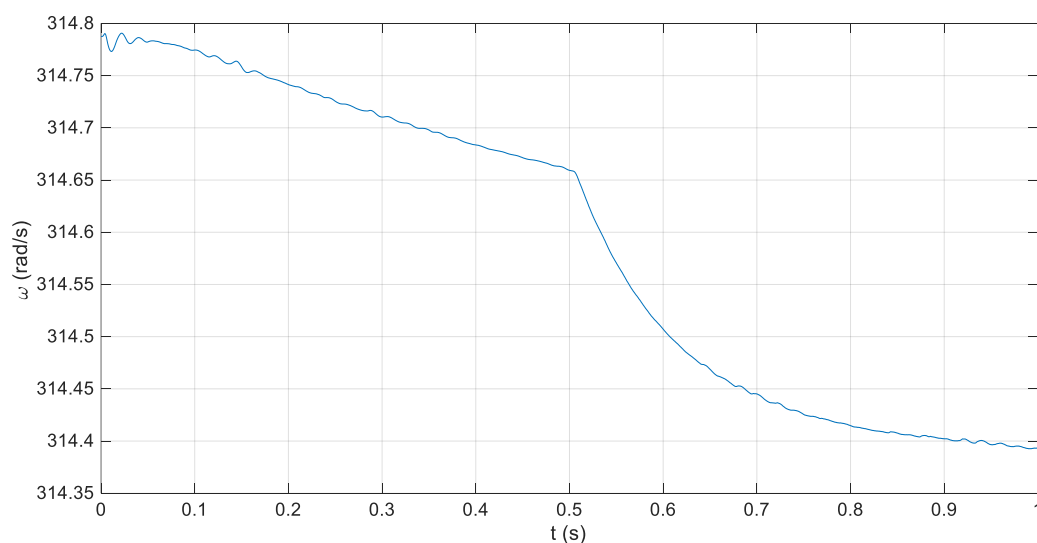
شکل (۴-۱۲): تغییرات توان اکتیو بار و منابع ریزشبه در طول بازه شبیه سازی (عدم وجود باتری).



شکل (۴-۱۳): تغییرات توان راکتیو بار و منابع ریزشبکه در طول بازه شبیه سازی (عدم وجود باتری).

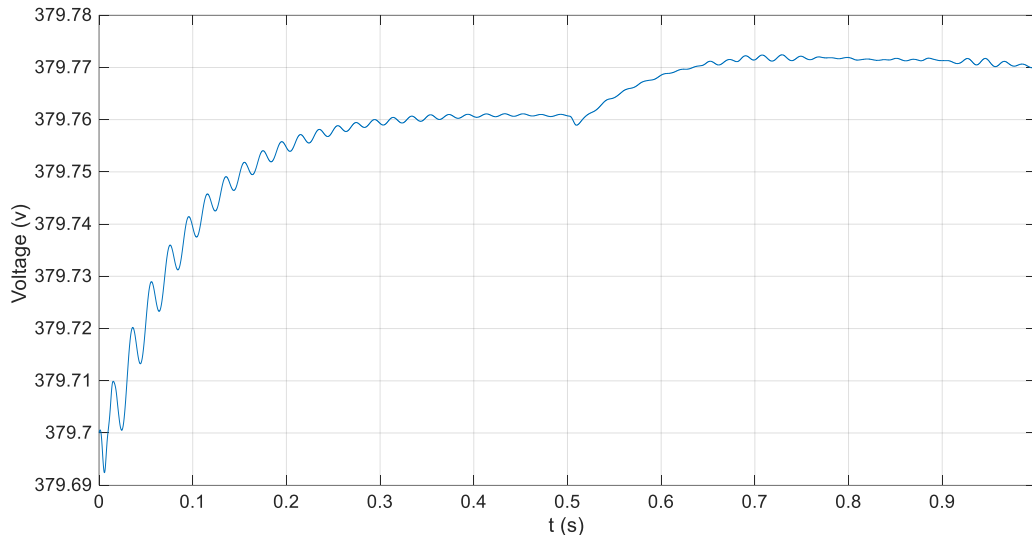
۴-۴-۳ نتایج مربوط به حالت وجود منبع ذخیره ساز در شبکه

در این حالت نتایج شبیه سازی در زمان حضور ذخیره ساز و پیل سوختی به عنوان منابع تولید توان در ریزشبکه تشریح شده است. به عبارت دیگر در این سناریو از ذخیره ساز به عنوان پشتیبان در ریزشبکه استفاده شده است. در ادامه تغییرات فرکانس و ولتاژ ریزشبکه در دو حالت کاری متصل و منفصل از شبکه اصلی ارائه و نتایج آنالیز شده است. شکل (۴-۱۴) و (۴-۱۵) تغییرات فرکانس و ولتاژ ریزشبکه در طول بازه شبیه سازی در دو حالت متصل و منفصل از شبکه اصلی را نشان می دهد.



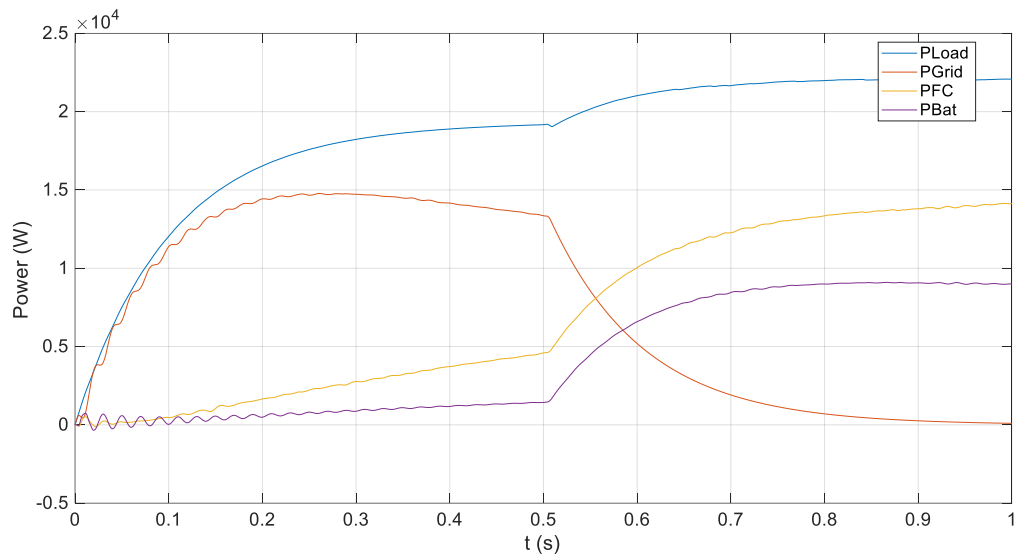
شکل (۴-۱۴): تغییرات فرکانس ریزشبه در طول بازه شبیه سازی (وجود باتری)

طبق شکل مشاهده می شود که فرکانس ریزشبه در اثر بروز حالت جزیره ای کاهش یافته و تغییرات ولتاژ ریزشبه نیز بواسطه عملکرد منفصل ریزشبه از شبکه اصلی محسوس است.

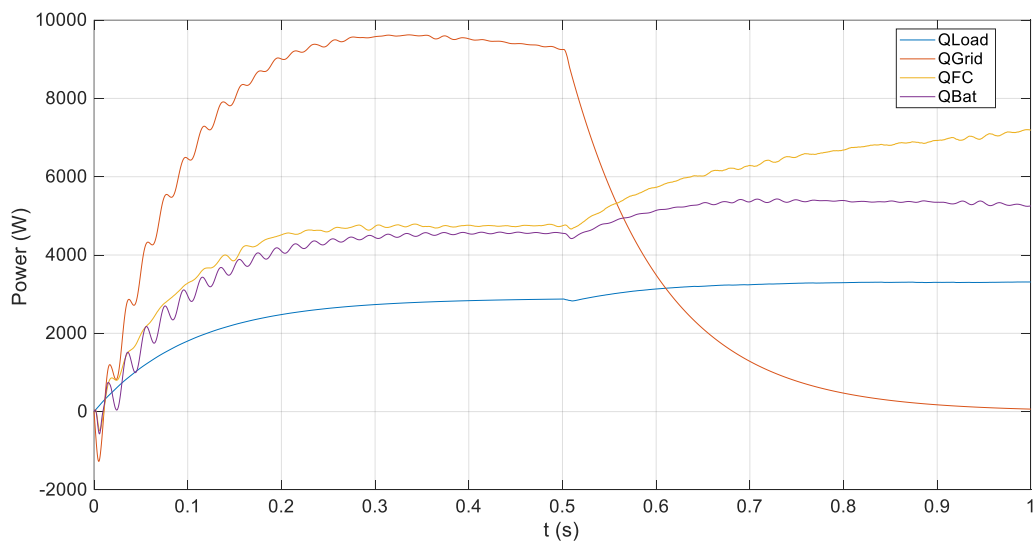


شکل (۴-۱۵): تغییرات ولتاژ ریزشبه در طول بازه شبیه سازی (وجود باتری)

لازم به ذکر است که با مقایسه شکل های مربوط به فرکانس و ولتاژ در دو حالت حضور و عدم حضور ذخیره ساز در ریزشبه، مشاهده می شود که میزان انحراف فرکانس و ولتاژ ریزشبه در حالت وجود منبع ذخیره ساز باتری نسبت به حالت عدم وجود این منبع کمتر می باشد. بنابراین حضور ذخیره ساز بر عملکرد ریزشبه تأثیر مثبتی داشته و سبب بهبود پایداری در ریزشبه شده است. در شکل های (۴-۱۶) و (۴-۱۷) نیز میزان تغییرات توان اکتیو و راکتیو بار، پیل سوختی، ذخیره ساز و شبکه اصلی نشان داده شده است. در این حالت نیز قبل از بروز حالت جزیره ای بار توسط پیل سوختی، ذخیره ساز و شبکه اصلی تأمین شده است و پس از بروز حالت جزیره ای در زمان ۰,۵ ثانیه توان تولیدی از شبکه اصلی به صفر رسیده و توان اکتیو و راکتیو تولیدی توسط پیل سوختی و باتری به میزان قابل توجهی افزایش داشته است. بنابراین با جداشدن ریزشبه از شبکه اصلی، منبع پیل سوختی با کمک منبع ذخیره ساز باتری میزان کمبود توان اکتیو و راکتیو را جبران کرده است و از این رو سبب بهبود پایداری ریزشبه شده است.

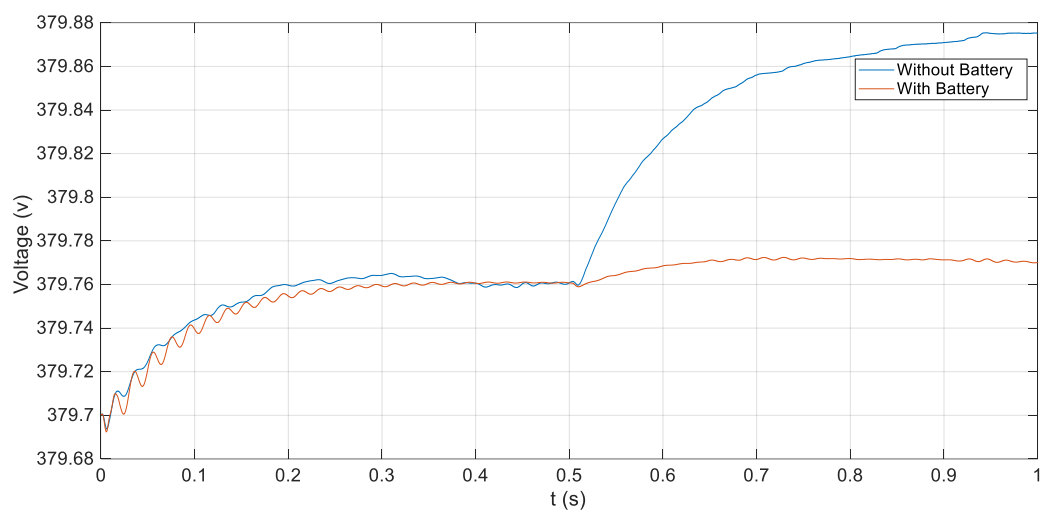


شکل (۴-۱۶): تغییرات توان اکتیو بار و منابع ریزشبه در طول بازه شبیه سازی (وجود باتری).

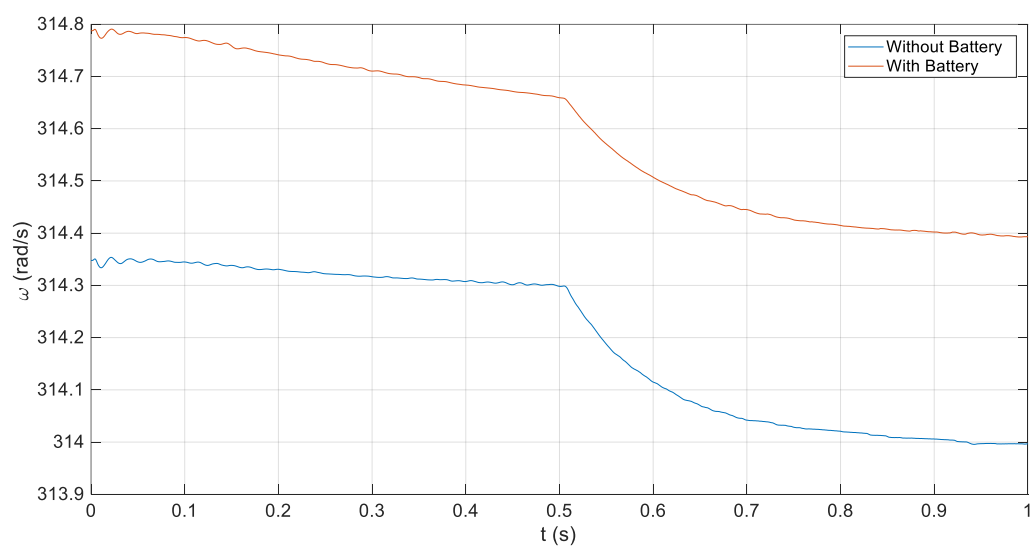


شکل (۴-۱۷): تغییرات توان راکتیو بار و منابع ریزشبه در طول بازه شبیه سازی (وجود باتری).

در نهایت به منظور مقایسه بهتر تغییرات ولتاژ و فرکانس در حالت های عدم وجود باتری و در حضور باتری در شکل های (۴-۱۸) و (۴-۱۹) به صورت همزمان نشان داده شده است.



شکل (۴-۱۸): مقایسه تغییرات ولتاژ در حالت عدم حضور باتری و حضور باتری



شکل (۴-۱۹): مقایسه تغییرات فرکانس در حالت عدم حضور باتری و حضور باتری

فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهاد ادامه کار

۵-۱ نتیجه گیری

هدف اصلی از مطالعه و تحقیق در این طرح پژوهشی بهبود بهبود پایداری ریز شبکه در حالات مختلف بوده است. از این رو دو حالت کاری ریز شبکه از حضور و عدم حضور سیستم های ذخیره ساز انرژی در این پژوهش ارزیابی شده است. در این راستا مسئله کنترل هماهنگ باتری های ذخیره ساز و منابع تولید توان به عنوان پیشنهاد مطرح شد. در واقع با کنترل هماهنگ باتری های ذخیره ساز انرژی و منابع تولید توان در ریز شبکه، علاوه بر بالانس بار امکان افزایش پایداری ریز شبکه نیز میسر می گردد. علاوه بر این تغییرات توان اکتیو و راکتیو نیز با در نظر گرفتن خاصیت مقاومتی-سلفی ریز شبکه لحاظ و از اینورترهای منبع ولتاژ به منظور بهبود عملکرد ریز شبکه در حالت منفصل از شبکه اصلی استفاده شده است. به عبارت دیگر در روش پیشنهادی در این تحقیق تأمین توان اکتیو و راکتیو مورد نیاز باتوجه به خاصیت مقاومتی-سلفی ریز شبکه با کنترل همزمان باتری های ذخیره ساز انرژی و منابع تولید توان میسر شده که متعاقباً سبب بهبود پایداری ریز شبکه نیز شده است. نتایج شبیه سازی در سناریوهای مختلف از حضور و عدم حضور باتری ذخیره ساز ارزیابی شده است. از تحلیل نتایج می توان نتیجه گرفت که حضور باتری های ذخیره ساز و کنترل هماهنگ آن با منابع تولید توان می تواند سبب حفظ ولتاژ و فرکانس شبکه در مقادیر نامی در ریز شبکه گردد و از این رو پایداری ریز شبکه را بهبود بخشد.

به جهت استفاده از اینورتر منبع ولتاژ که موجب دریافت حداکثر توان از منابع تولید پراکنده شده و استفاده از باتری و فیول سل به جهت سرعت پاسخ دهی بالا، سیستم کنترلی طراحی شده این مقاله نسبت به سایر سیستم های مقالات دیگر دارای افت ولتاژ کمتر و سرعت پاسخ دهی بالاتری می باشد. با توجه به عدم یکسان بودن سطح ولتاژ کاری این سیستم با سایر مقالات، امکان مقایسه وجود ندارد.

۵-۲ پیشنهاد ادامه کار

✓ بهینه سازی پارامترهای کنترلی موجود در ریز شبکه در زمان بروز حالت خطا

فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهاد ادامه کار

✓ ارزیابی مسئله پایداری ریز شبکه در زمان اتصال چندین ریز شبکه مختلف به یکدیگر

منابع

- [1] Bagal, Shamal, and Sangita Nikumbh. "Interconnected islanded microgrid system using smart frequency bus signaling method with PV integration." 2017 International Conference on Intelligent Sustainable Systems (ICISS). IEEE, 2017.
- [2] Rangel, Camilo Alberto Sepulveda, et al. "Methodology for ESS-type selection and optimal energy management in distribution system with DG considering reverse flow limitations and cost penalties." IET Generation, Transmission & Distribution 12.5 (2017): 1164-1170.
- [3] Bevrani, H., Watanabe, M., & Mitani, Y. Microgrid Control: Synthesis Examples.
- [4] Hemmatpour, M. H., Mohammadian, M., & Gharaveisi, A. A Optimum islanded microgrid reconfiguration based on maximization of system loadability and minimization of power losses. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, . (2016). 78, 343-355.
- [5] Jabbari-Sabet, R., Moghaddas-Tafreshi, S. M., & Mirhoseini, S. S Microgrid operation and management using probabilistic reconfiguration and unit commitment. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, . (2016). 75, 328-336.
- [6] Zhang, Y., & Xie, L. A Transient Stability Assessment Framework in Power Electronic-Interfaced Distribution Systems.
- [7] Zhu, Y., Liu, B., Wang, F., Zhuo, F., & Zhao, Y. (2015, June). A virtual resistance based reactive power sharing strategy for networked microgrid. In 2015 9th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia) (pp. 1564-1572). IEEE.
- [8] Wang, W., Zeng, X., Tang, X., & Tang, C Analysis of microgrid inverter droop controller with virtual output impedance under non-linear load condition. IET Power Electronics, . (2014). 7(6), 1547-1556.
- [9] Zhu, Y., Zhuo, F., Wang, F., Liu, B., Gou, R., & Zhao, Y. A virtual impedance optimization method for reactive power sharing in networked microgrid. IEEE Transactions on Power Electronics, (2016). 31(4), 2890-2904.
- [10] Hamzeh, M., Karimi, H., Mokhtari, H., & Mahseredjian, J. (2014, February). Control of a microgrid with unbalanced loads using virtual negative-sequence impedance loop. In Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC), 2014 5th (pp. 78-83). IEEE.
- [11] Liu, H., Chen, Y., Li, S., & Hou, Y. (2013, July). Improved droop control of isolated microgrid with virtual impedance. In 2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting (pp. 1-5). IEEE.
- [12] Dheer, D. K., Soni, N., & Doolla, S. (2016). Improvement of small signal stability margin and transient response in inverter-dominated microgrids. Sustainable Energy, Grids and Networks, 5, 135-147.

- [13] Shuai, Z., Sun, Y., Shen, Z. J., Tian, W., Tu, C., Li, Y., & Yin, X. Microgrid stability: Classification and a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, . (2016). 58, 167-179.
- [14] Raju, P. E. S. N., & Jain, T. (2014, December). Wide area measurements based centralized controller to stabilize an inverter fed islanded microgrid. In *Power India International Conference (PIICON), 2014 6th IEEE* (pp. 1-6). IEEE.
- [15] Esmaeli, A. Stability analysis and control of microgrids by sliding mode control. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, (2016).78, 22-28.
- [16] Kwasinski, A. A microgrid architecture with multiple-input dc/dc converters: applications, reliability, system operation, and control. ProQuest. (2007).
- [17] Sioshansi, F. P. (Ed.). *Smart grid: integrating renewable, distributed & efficient energy*. Academic Press. (2011).
- [18] Makartchouk, A. *Diesel engine engineering: thermodynamics, dynamics, design, and control* (Vol. 143). Andrei Makartchouk. (2002).
- [19] Hau, E., & von Renouard, H. *Windmills and Windwheels*. Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics, (2006). 1-21.
- [20] Shultz, G. P., & Talbott, S. *Distributed Power in the United States: Prospects and Policies* (No. 632). J. Carl (Ed.). Hoover Press. (2013).
- [21] Boldea, Ion. *Synchronous generators*. CRC Press, 2015.
- [22] Logan, B. E. Essential data and techniques for conducting microbial fuel cell and other types of bioelectrochemical system experiments. *ChemSusChem*, (2012). 5(6), 988-994.
- [23] Choudhury, A., Chandra, H., & Arora, A. Application of solid oxide fuel cell technology for power generation—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (2013). 20, 430-442.
- [24] Wu, W., & Bucknall, R. W. (2013, September). Conceptual evaluation of a fuel-cell-hybrid powered bus. In *Power Engineering Conference (UPEC), 2013 48th International Universities'* (pp. 1-5). IEEE.
- [25] Brown, Kevin, and Simon Minett. "History of CHP developments and current trends." *Applied energy* 53.1-2 (1996): 11-22.
- [26] Verbruggen, Aviel. "An introduction to CHP issues." *International Journal of Global Energy Issues* 8.4 (1996): 301-318.
- [27] Rehman, Shafiqur, Luai M. Al-Hadhrani, and MdMahbubAlam. "Pumped hydro energy storage system: A technological review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 44 (2015): 586-598.
- [28] Mirsaeidi, Sohrab, et al. "Power system load regulation by pumped storage power plants." *2012 Proceedings of 17th Conference on Electrical Power Distribution*. IEEE, 2012.

- [29] Yuan, Weijia, et al. "Design and test of a superconducting magnetic energy storage (SMES) coil." *IEEE transactions on applied superconductivity* 20.3 (2010): 1379-1382.
- [30] Divya, K. C., and Jacob Østergaard. "Battery energy storage technology for power systems—An overview." *Electric power systems research* 79.4 (2009): 511-520.
- [31] Dragičević, Tomislav, and Yunwei Li. "AC and DC Microgrid Control." *Control of Power Electronic Converters and Systems*. Academic Press, 2018. 167-200.
- [32] Miller, R. H., Malinowski, J. *HPower System Operation*. McGraw-Hill Professional. . (1994).
- [33] Donde, V., Pai, M. A., & Hiskens, I. A. *Simulation and optimization in an AGC system after deregulation*. *IEEE transactions on power systems*, . (2001).16(3), 481-489.
- [34] Bhatt, P., Roy, R., & Ghoshal, S. PGA/particle swarm intelligence based optimization of two specific varieties of controller devices applied to two-area multi-units automatic generation control. *International journal of electrical power & energy systems*, . (2010). 32(4), 299-310.
- [35] Bevrani, H., Habibi, F., Babahajyani, P., Watanabe, M., & Mitani, Y. Intelligent frequency control in an ac microgrid: online PSO-based fuzzy tuning approach. *IEEE transactions on smart grid*, (2012). 3(4), 1935-1944.
- [36] Das, D. C., Roy, A. K., & Sinha, N. (2011, December). PSO based frequency controller for wind-solar-diesel hybrid energy generation/energy storage system. In *Energy, Automation, and Signal (ICEAS), 2011 International Conference on* (pp. 1-6). IEEE.
- [37] Liu, C., & Yan, C. (2012, March). Development of an improved particle swarm optimization algorithm and its application in the optimal design of nuclear power system. In *2012 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference* (pp. 1-4). IEEE.
- [38] Tan, M. K., Loh, C. S. X., & Teo, K. T. K. Hybrid system based fuzzy-pid control schemes for unpredictable process. *ICTACT Journal on Soft Computing: Special Issue on Fuzzy in Industrial and Process Automation*, (2011). 2(1), 211-217.
- [39] Bevrani, H., Habibi, F., Babahajyani, P., Watanabe, M., & Mitani, Y. Intelligent frequency control in an ac microgrid: online PSO-based fuzzy tuning approach. *IEEE transactions on smart grid*, (2012). 3(4), 1935-1944.
- [40] Erenoglu, I., Eksin, I., Yesil, E., & Guzelkaya, M. (2006, May). An intelligent hybrid fuzzy PID controller. In *European Conference on Modelling and Simulation* (pp. 62-67).
- [41] Hatziargyriou, Nikos, ed. *Microgrids: architectures and control*. John Wiley & Sons, 2014.
- [42] Clement-Nyns, K., Haesen, E., & Driesen, J. The impact of vehicle-to-grid on the distribution grid. *Electric Power Systems Research*, (2011). 81(1), 185-192.
- [43] Katiraei, Faridaddin, Mohammad Reza Iravani, and Peter W. Lehn. "Micro-grid autonomous operation during and subsequent to islanding process." *IEEE Transactions on power delivery* 20.1 (2005): 248-257.

[44] Ota, T., et al. "Study of load frequency control for a microgrid." 2007 Australasian Universities Power Engineering Conference. IEEE, 2007.

[45] Kroposki, B., Basso, T., & DeBlasio, R. (2008, July). Microgrid standards and technologies. In Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE (pp. 1-4). IEEE.

[46] He, J., & Li, Y. W. (2010, September). Analysis and design of interfacing inverter output virtual impedance in a low voltage microgrid. In 2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (pp. 2857-2864). IEEE.

[47] [14] Kundur, P., Paserba, J., Ajarapu, V., Andersson, G., Bose, A., Canizares, C., ... & Van Cutsem, T. Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions. IEEE transactions on Power Systems, (2004). 19(3), 1387-1401.

[48] Kundur, P. Power system stability and control (Vol. 7). N. J. Balu, & M. G. Lauby (Eds.). New York: McGraw-hill. . (1994).

[49] Ajarapu, V. Computational techniques for voltage stability assessment and control. Springer Science & Business Media. (2007).

[50] Carta, J. A. Integration of renewable energy systems into remote micro-grids. In Stand-alone and hybrid wind energy systems (pp. 425-474). Woodhead Publishing Limited Oxford. . (2010).

[51] <https://www.bloomenergy.com/datasheets/microgrid-energy>.

[52] Khaledian, A., B. Vahidi, and M. Abedi. "Harmonic Distorted Load Control in a Microgrid." Journal of applied research and technology 12.4 (2014): 792-802.

[53] Khaledian, Amir, and Masoud Aliakbar Golkar. "Analysis of droop control method in an autonomous microgrid." Journal of applied research and technology 15.4 (2017): 371-377.

[54] Rowe, Christopher N., et al. "Implementing the virtual output impedance concept in a three phase system utilising cascaded PI controllers in the dq rotating reference frame for microgrid inverter control." 2013 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE). IEEE, 2013.

Abstract

In this thesis, Improving the stability of microgrid in connected and island modes is evaluated. In this regard, the cooperative control of battery energy storage systems and micro sources is proposed to balance load and further improve the stability. In addition, the variation of active and reactive power is also considered and the voltage source inverters are also used to improve the stability of the microgrid in the island mode. It is worth mentioning to point that, the microgrid under study is not assumed to be purely resistive and the effect of reactive load has been taken into consideration. Therefore, the proposed control strategy simultaneously coordinates the battery energy storage systems and the power sources to supply the active and reactive loads of the microgrid. Simulation is conducted in MATLAB software considering the presence and absence of battery energy storage systems in two different connected and stand alone modes of the micro grid. Results demonstrate the high capability of the proposed strategy in stabilizing both voltage and frequency of micro grid. With the proposed control system, the frequency and voltage of microgrid will be 314.4 radians / s and the voltage will be 379.77 volts, respectively.

Key Word: Micro grid, Battery energy storage systems, stabilizing Microgrid, Micro Sources.



Energy Institute of Higher Education

Thesis Title:

**Imroving the stability of microgrid in both stand alone
and connected modes through the coooperative control
of the energy storage systems and micro sources to
balance load**

**Advisors A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for
the Degree of Master of Science in Electrical Engineering**

By:

Mehdi Falahatkar Gashti

Supervisors:

Dr. Mojtaba Mirzaei

Dr. Mehdi Taheri

September 2019