





دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی برق و رباتیک  
رشته مهندسی برق-قدرت گرایش ماشینهای الکتریکی  
پایان نامه کارشناسی ارشد

**کنترل بار فرکانس در یک ریزشبهه شامل میکروتوربین و پیل سوختی و خودروهای برقی  
متصل به شبکه**

نگارنده : سید مهدی شبیری

استاد راهنما:

دکتر امین حاجی زاده

استاد مشاور:

دکتر مهدی بانژاد

تیر ۱۳۹۵

تقدیم به پدر و مادر:

به پاس عاطفه‌ی سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان که در این سردترین روزگاران  
بهترین پشتیبان است، به پاس قلب‌های بزرگشان که فریاد رس است و سرگردانی و ترس  
در پناهشان به شجاعت می‌گراید و به پاس محبت‌های بی‌دریغشان که هرگز فروکش  
نمی‌کند این مجموعه را به پدر و مادر عزیزم تقدیم می‌کنم. آنان که ناتوان شدند تا ما  
به توانایی برسیم... موهایشان سپید شد تا ما روسفید شویم...

## تشکر و قدردانی

به مصداق «من لم يشكر المخلوق لم يشكر الخالق» بسی شایسته است از استاد فرهیخته و فرزانه جناب آقای دکتر حاجی زاده که با کرامتی چون فورشید، سرزمین دل را روشنی بخشیدند و گلشن سرای علم و دانش را با راهنمایی های کار ساز و سازنده بارور ساختند، تقدیر و تشکر نمایم. همچنین از استاد با کمالات و شایسته جناب آقای دکتر بانژاد که در کمال سعه صدر، با مسن فلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت مشاوره ای این پایان نامه را بر عهده گرفتند، کمال تشکر را دارم.

## تعهد نامه

اینجانب سید مهدی شبیری دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته برق- قدرت دانشکده مهندسی برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه کنترل بار فرکانس در یک میکروشبکه شامل میکروتوربین و پیل سوختی و خودروهای برقی متصل به شبکه تحت راهنمایی دکتر امین حاجی زاده متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University Of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در بدست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تاثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ: ۱۳۹۵/۰۵/۲۰

امضای دانشجو

### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

## چکیده

در سیستم‌های قدرت، اگر چه اینرسی منابع تولید توان می‌تواند تا حدودی ناعادلی‌های توان که به دلیل اغتشاش بار یا نوسانات منابع تجدیدپذیر بوجود می‌آید را پوشش دهد اما هنوز هم حفظ تغییرات فرکانس سیستم‌های برق در رنج قابل قبول سخت می‌باشد. این موضوع در ریزشبه‌ها که بیش تر منابع تولید توان آنها مبتنی بر منابع تجدیدپذیر می‌باشد جدی‌تر است. استفاده از خودروهای الکتریکی که بصورت ذخیره‌ساز متحرک انرژی عمل می‌کنند می‌تواند یک راه حل برای حل مشکل کنترل بار فرکانس در ریزشبه‌ها باشد. در این کار، یک مدل جدید کنترل بار فرکانس برای یک ریزشبه با خودروهای الکتریکی، میکروتوربین و پیل سوختی ارائه شده است که در آن، خودروهای الکتریکی و سایر واحدها برای رسیدن به یک عملکرد رضایت بخش در کنترل بار فرکانس هماهنگ شده‌اند. در ریزشبه مورد مطالعه، میکروتوربین در شرایط عادی بخش عمده توان مورد نیاز بارها را فراهم می‌کند. همچنین، تعداد زیادی خودرو الکتریکی در سمت مصرف کننده در نظر گرفته شده است. در روش ارائه شده، فرکانس ریزشبه با کنترل هم‌زمان توان میکروتوربین، پیل سوختی و خودروهای الکتریکی تنظیم می‌شود. اساس این کار مبتنی بر کنترل کننده تناسبی-انتگرالی می‌باشد ولی برای تعیین میزان مشارکت میکروتوربین، پیل سوختی و خودروهای الکتریکی در کنترل فرکانس، یک روش جدید ارائه شده است. روش ارائه شده بر اساس ظرفیت نامی و توان تولیدی هر واحد پیش از تغییر فرکانس، میزان تغییرات توان هر واحد در پاسخ به تغییرات بار را به صورتی تعیین می‌کند که، تغییرات فرکانس در کم‌ترین زمان ممکن صفر شود. علاوه بر این، برای بهینه‌سازی ضرایب کنترل کننده توان میکروتوربین، پیل سوختی و خودروهای الکتریکی از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات استفاده شده است که دقت کنترل فرکانس را بیش از پیش بهبود می‌دهد.

کارایی الگوریتم ارائه شده با استفاده از شبیه‌سازی یک ریزشبه نمونه در نرم‌افزار Matlab نشان داده شده است. همچنین، تاثیر حضور یا عدم حضور پیل سوختی و خودرو الکتریکی در کنترل فرکانس، بررسی شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که کنترل کننده ارائه شده، یک پاسخ دینامیکی عالی با انحراف فرکانس قابل قبول فراهم می‌کند.

کلمات کلیدی: ریزشبه، خودرو الکتریکی، میکروتوربین، پیل سوختی، کنترل بار-فرکانس، بهینه

سازی ازدحام ذرات.

فصل ۱- مقدمه ..... ۱

۱-۱- مقدمه ..... ۲

۲-۱- اهداف پایان نامه ..... ۵

۳-۱- ساختار پایان نامه ..... ۶

فصل ۲- پیشینه تحقیق ..... ۷

۱-۲- مقدمه ..... ۸

۲-۲- کنترل فرکانس در سیستمهای قدرت ..... ۸

۱-۲-۲- حلقه بار فرکانس ..... ۱۱

۲-۲-۲- کنترل AGC در یک سیستم یک ناحیه‌ای ..... ۱۶

۳-۲- مروری بر تحقیقات گذشته ..... ۱۸

فصل ۳- ساختار ریز شبکه ..... ۲۹

۱-۳- مقدمه ..... ۳۰

۲-۳- مفهوم ریز شبکه ..... ۳۱

۳-۳- تعریف‌های مختلف ریز شبکه ..... ۳۴

۴-۳- تکنولوژی‌های ریز شبکه ..... ۳۷

۱-۴-۳- میکروتوربین (MT) ..... ۳۹

۲-۴-۳- پیل سوختی (FC) ..... ۴۳

۳-۴-۳- خودروهای الکتریکی ..... ۴۶

**فصل ۴- مدل سازی ریزشبکه و پیاده سازی کنترل کننده پیشنهادی ..... ۵۵**

۴-۱- مقدمه: ..... ۵۶

۴-۲- مدل سازی اجزای سیستم ..... ۵۶

۴-۲-۱- مدل خودرو الکتریکی ..... ۵۶

۴-۲-۲- مدل بار و خط انتقال ..... ۶۱

۴-۲-۳- مدل میکرو توربین ..... ۶۱

۴-۲-۴- مدل پیل سوختی ..... ۶۳

۴-۳- روش ارائه شده برای کنترل بار فرکانس ریزشبکه ..... ۶۹

**فصل ۵- نتایج شبیه سازی ..... ۸۱**

۵-۱- مقدمه ..... ۸۲

۵-۲- ساختار ریزشبکه ..... ۸۲

۵-۳- بهینه سازی پارامترهای کنترل کننده ..... ۸۴

۵-۴- عملکرد ریزشبکه در حالت اتصال به شبکه اصلی ..... ۸۶

۵-۴-۱- سناریو اول، افزایش ۲۵ درصدی بار ریزشبکه ..... ۸۶

۵-۴-۲- سناریو دوم، افزایش ۵۰ درصدی بار ریزشبکه ..... ۹۲

۵-۴-۳- سناریو سوم، کاهش ۵۰ درصدی بار ریزشبکه ..... ۹۴

۵-۵- عملکرد ریزشبکه در حالت جزیره ای ..... ۹۹

۵-۵-۱- سناریو ۱، افزایش ۵۰ درصدی بار ریزشبکه ..... ۹۹



۵-۵-۲- سناریو ۲، کاهش ۵۰ درصدی بار ریزش بکه ..... ۱۰۴

۱۱۱..... فصل ۶- نتیجه گیری و پیشنهاد

۱۱۲..... ۱-۶- نتیجه گیری

۱۱۵..... ۲-۶- پیشنهادات

۱۱۶..... مراجع

## فهرست شکل ها

- شکل ۱-۲. انحراف فرکانس از مقدار نامی بعد از ۱۳۲۰ مگاوات کاهش تولید [۶]. ۱۱
- شکل ۲-۲. کنترل بار فرکانس [۴]. ۱۲
- شکل ۳-۲. بلوک دیاگرام مدل ژنراتور و بار [۴]. ۱۳
- شکل ۴-۲. بلوک دیاگرام توربین [۴]. ۱۳
- شکل ۵-۲. مشخصه حالت ماندگار گاورنر [۴]. ۱۵
- شکل ۶-۲. بلوک دیاگرام گاورنر [۴]. ۱۵
- شکل ۷-۲. بلوک دیاگرام کنترل بار فرکانس [۴]. ۱۵
- شکل ۸-۲. کنترل AGC برای یک سیستم قدرت یک ناحیه‌ای [۴]. ۱۷
- شکل ۱-۳: ریزش‌بکه و اجزاء آن [۲۹]. ۳۸
- شکل ۲-۳: اجزای میکروتوربین [۳۰]. ۴۰
- شکل ۳-۳: ساختار الکتریکی میکروتوربین تک محور [۳۱]. ۴۲
- شکل ۴-۳: سیستم پیلسوختی [۳۵]. ۴۴
- شکل ۵-۳: نحوه شارژ انواع خودروهای برقی [۴۶]. ۴۹
- شکل ۱-۴. ساختار PHEV [۵۰]. ۵۷
- شکل ۲-۴. مدل خودروهای الکتریکی در کنترل بار فرکانس [۵۰]. ۵۸
- شکل ۳-۴. کنترل کننده ذخیره‌سازها. ۶۰
- شکل ۴-۴. کنترل کننده مبدل DC/AC. ۶۰
- شکل ۵-۴. مدل خط انتقال. ۶۱
- شکل ۶-۴. کنترل گشتاور مکانیکی توربین گازی [۵۱]. ۶۳

- شکل ۴-۷. مدار الکتریکی رفتار پیل سوختی..... ۶۸.....
- شکل ۴-۸. بلوک دیاگرام مدل خطی شده کنترل کننده فرکانس در حالت اتصال به شبکه [۸]..... ۷۲.....
- شکل ۴-۹. بلوک دیاگرام مدل خطی شده کنترل کننده فرکانس در حالت جزیره‌ای [۸]..... ۷۴.....
- شکل ۴-۱۰. فلوجارت بررسی امکان پاسخ‌گویی واحدها به سیگنال کنترلی..... ۷۸.....
- شکل ۵-۱. ساختار ریزشبکه مورد مطالعه..... ۸۳.....
- شکل ۵-۲. تغییرات تابع هزینه بر اساس تعداد تکرارها..... ۸۵.....
- شکل ۵-۳. فرکانس ریزشبکه در سناریو ۱ برای افزایش ۲۵ درصدی بار (حالت ۱)..... ۸۶.....
- شکل ۵-۴. توان تولیدی میکروتوربین در سناریو ۱ برای افزایش ۲۵ درصدی بار (حالت ۱)..... ۸۷.....
- شکل ۵-۵. توان انتقالی از ریزشبکه به شبکه اصلی در سناریو ۱ برای افزایش ۲۵ درصدی بار (حالت ۱)..... ۸۸.....
- شکل ۵-۶. توان خروجی ذخیره‌ساز و پیل سوختی در سناریو ۱ برای افزایش ۲۵ درصدی بار (حالت ۱)..... ۸۸.....
- شکل ۵-۷. فرکانس ریزشبکه در سناریو ۱ برای افزایش ۲۵ درصدی بار (حالت ۲)..... ۸۹.....
- شکل ۵-۸. توان تولیدی میکروتوربین در سناریو ۱ برای افزایش ۲۵ درصدی بار (حالت ۲)..... ۹۰.....
- شکل ۵-۹. توان ذخیره‌ساز و پیل سوختی در سناریو ۱ برای افزایش ۲۵ درصدی بار (حالت ۲)..... ۹۱.....
- شکل ۵-۱۰. تغییرات فرکانس ریزشبکه در حالت ۱ و ۲ برای سناریو ۱..... ۹۲.....
- شکل ۵-۱۱. تغییرات فرکانس ریزشبکه در حالت ۱ و ۲ برای سناریو ۲..... ۹۳.....
- شکل ۵-۱۲. توان ذخیره‌ساز و پیل سوختی در سناریو ۲ برای افزایش ۵۰ درصدی بار (حالت ۲)..... ۹۳.....
- شکل ۵-۱۳. فرکانس ریزشبکه در سناریو سوم برای کاهش ۵۰ درصدی بار ریزشبکه (حالت ۱)..... ۹۵.....
- شکل ۵-۱۴. توان ذخیره‌ساز و پیل سوختی در سناریو ۲ برای کاهش ۵۰ درصدی بار (حالت ۱)..... ۹۵.....
- شکل ۵-۱۵. توان تولیدی میکروتوربین و توان تزریق شده به شبکه برای سناریو ۳ (حالت ۱)..... ۹۶.....
- شکل ۵-۱۶. فرکانس ریزشبکه در سناریو سوم برای کاهش ۵۰ درصدی بار ریزشبکه (حالت ۲)..... ۹۶.....

- شکل ۵-۱۷. توان تولیدی میکروتوربین و توان تزریق شده به شبکه برای سناریو ۳ (حالت ۲) ..... ۹۷
- شکل ۵-۱۸. توان ذخیره‌ساز و پیل سوختی در سناریو ۳ برای کاهش ۵۰ درصدی بار (حالت ۲) ..... ۹۸
- شکل ۵-۱۹. فرکانس ریزش‌بکه در سناریو سوم برای کاهش ۵۰ درصدی بار ریزش‌بکه (حالت ۲) ..... ۹۸
- شکل ۵-۲۰. فرکانس ریزش‌بکه در حالت جزیره‌ای برای سناریو ۱ (حالت ۱) ..... ۹۹
- شکل ۵-۲۱. توان تولیدی میکروتوربین در حالت جزیره‌ای در سناریو ۱ (حالت ۱) ..... ۱۰۰
- شکل ۵-۲۲. توان پیل سوختی و ذخیره‌ساز در حالت جزیره‌ای در سناریو ۱ (حالت ۱) ..... ۱۰۱
- شکل ۵-۲۳. فرکانس ریزش‌بکه در حالت جزیره‌ای برای سناریو ۱ (حالت ۲) ..... ۱۰۲
- شکل ۵-۲۴. توان تولیدی میکروتوربین در حالت جزیره‌ای در سناریو ۱ (حالت ۲) ..... ۱۰۲
- شکل ۵-۲۵. توان پیل سوختی و ذخیره‌ساز در حالت جزیره‌ای در سناریو ۱ (حالت ۲) ..... ۱۰۳
- شکل ۵-۲۶. فرکانس ریزش‌بکه برای حالت ۱ و ۲ در سناریو ۱ ..... ۱۰۴
- شکل ۵-۲۷. فرکانس ریزش‌بکه در حالت جزیره‌ای برای سناریو ۲ (حالت ۱) ..... ۱۰۵
- شکل ۵-۲۸. توان تولیدی میکروتوربین در حالت جزیره‌ای در سناریو ۲ (حالت ۱) ..... ۱۰۵
- شکل ۵-۲۹. توان تولیدی پیل سوختی و ذخیره‌ساز در حالت جزیره‌ای در سناریو ۲ (حالت ۱) ..... ۱۰۶
- شکل ۵-۳۰. فرکانس ریزش‌بکه در حالت جزیره‌ای برای سناریو ۲ (حالت ۲) ..... ۱۰۷
- شکل ۵-۳۱. توان تولیدی میکروتوربین در حالت جزیره‌ای در سناریو ۲ (حالت ۲) ..... ۱۰۷
- شکل ۵-۳۲. توان تولیدی پیل سوختی و ذخیره‌ساز در حالت جزیره‌ای در سناریو ۲ (حالت ۲) ..... ۱۰۸
- شکل ۵-۳۳. فرکانس ریزش‌بکه برای حالت ۱ و ۲ در سناریو ۱ ..... ۱۰۹

# فصل ۱- مقدمه

## ۱-۱- مقدمه

افزایش استفاده از سوخت‌های فسیلی که انرژی‌های تجدیدناپذیر نامیده می‌شوند، موجب بالا رفتن آلاینده‌های هوا، افزایش گازهای گلخانه‌ای و پدیده گرم شدن زمین شده است. بخش بزرگی از تامین انرژی برای رونق صنعت در کشورهای مختلف از جمله کشورهای در حال توسعه از طریق این سوخت‌ها تامین می‌شود و در پی آن مشکلات زیست محیطی زیادی را برای زمین به وجود آورده است. افزایش استفاده از وسائل نقلیه جهت حمل و نقل و همچنین استفاده روزانه از سوخت‌های فسیلی به عنوان تامین‌کننده‌ی انرژی این وسائل نقلیه نیز باعث تسریع تولید گازهای گلخانه‌ای می‌شود. این وسائل نقلیه که خودروهای احتراق داخلی نامیده می‌شوند علاوه بر آلودگی محیط زیست، موجب آلودگی صوتی نیز می‌شوند.

از سوی دیگر منابع سوخت‌های فسیلی رو به اتمام است به طوری که اگر روند استفاده از این سوخت‌ها به همین منوال ادامه پیدا کند، انسان در دهه‌های آینده با مشکل اساسی تامین انرژی روبه رو خواهد شد. این روند کاهش منابع روز به روز باعث افزایش قیمت این سوخت‌ها می‌شود به طوری که پیش‌بینی می‌شود این منابع در آینده تنها در اختیار تعداد معدودی از کشورهای قدرتمند قرار گیرد. تمام این مشکلات باعث شد که کارشناسان به فکر جایگزین مناسبی برای خودروهای احتراق داخلی بیافتند. همچنین باید منابع انرژی مناسبی جایگزینی سوخت‌های فسیلی شوند به طوری که

این روند کاهش سطح منابع در آن‌ها مشاهده نشود و همچنین آلاینده‌هایی که سوخت‌های فسیلی ایجاد می‌کنند نیز در آن‌ها شاهد نباشیم.

این چالش مهم پژوهش‌گران را به ساخت ایده‌ای به نام خودروهای برقی واداشت. این خودروها که انواع مختلفی دارند با مصرف توان الکتریکی، دیگر آلودگی و سائل نقلیه احتراق داخلی را نخواهند داشت. از انواع خودروهای برقی می‌توان به سه نوع الکتریکی هیبریدی<sup>۱</sup> (HEV)، خودروهای باتری‌دار<sup>۲</sup> (BEV) و خودروهای پیل سوختی<sup>۳</sup> (FCV) اشاره کرد. امروزه مطالعات گسترده‌ای پیرامون اثرات زیست محیطی این خودروها انجام شده و مزایای آن در کاهش آلودگی زیست محیطی به اثبات رسیده است.

از طرفی متخصصین برای تامین انرژی الکتریکی این خودروها، مکان‌هایی که با نام پارکینگ خودروهای برقی شناخته می‌شود را تعبیه کرده‌اند. در این مکان‌ها که در هر جایی از جمله مسیرها، محل سکونت و حتی محل کار افراد توانایی قرارگیری دارند، خودروها قادر به تبادل توان با شبکه هستند.

---

<sup>1</sup> Hybrid Electric Vehicle

<sup>2</sup> Battery Electric Vehicle

<sup>3</sup> Fuel Cell Vehicle

مسئله مهم دیگری که برای کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی به آن اشاره شد استفاده از جایگزینی مناسب برای این تامین‌کنندگان توان است. امروزه استفاده از منابع تولید پراکنده با استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر<sup>1</sup> (RES)، روز به روز در حال افزایش است. استفاده از انرژی باد و تابش خورشید که منابع پایان‌ناپذیر و رایگان هستند در اولویت کار متخصصین قرار گرفته است. به‌علاوه، استفاده از پیل‌های سوختی که سوخت آن از هیدروژن تولیدی توسط دستگاه الکترولایزر تامین می‌شود و همچنین استفاده از توربین‌ها نیز می‌تواند به گسترش این انرژی‌ها کمک کند.

امروزه قرارگیری مناطق دور دست از شبکه اصلی که امکان انتقال توان به این مناطق را مشکل کرده است، بحث گسترش ریزشبکه‌ها را بیش از پیش مطرح کرده است. ریزشبکه‌ها، شبکه‌هایی هستند که از منابع تولید پراکنده به عنوان تامین‌کننده انرژی این شبکه‌ها بهره می‌برند و قادر به فعالیت در حالت مستقل و همچنین متصل به شبکه اصلی هستند. کنترل فرکانس یکی از مسائل اصلی برای حفظ پایداری در ریزشبکه‌ها است.

اتصال وسائل نقلیه الکتریکی در ساعات مختلف شبانه روز با تعداد مختلفی ممکن است باعث به وجود آمدن یک عدم تعادل ناگهانی توان تولیدی و مصرفی در ساعات مختلف شبانه روز شود. از آنجایی که اتصال این وسائل به شبکه قابل پیش‌بینی نیست، به وجود آمدن ناپایداری فرکانس در ریزشبکه‌ها، مسئله‌ای مهم و قابل بحث است.

---

<sup>1</sup> Renewable Energy Sources



## ۱-۲- اهداف پایان نامه

با توجه به مطالب گفته شده، کنترل فرکانس در ریزشبه‌ها که روز به روز در حال افزایش و پیشرفت می‌باشند بیش از شبکه‌های سنتی اهمیت دارد. زیرا، بیش‌تر منابع تولید توان ریزشبه‌ها مبتنی بر منابع تجدیدپذیر می‌باشد که علاوه بر نداشتن اینرسی، توان خروجی آن‌ها نوسانی و گاهی تصادفی می‌باشد. بنابراین لازم است تا بحث کنترل بار فرکانس در ریزشبه‌ها به طور دقیق‌تر و جامع‌تر بررسی و مطالعه شود.

در راستای این کار، در این پژوهش یک روش جدید برای کنترل فرکانس یک ریزشبه ارائه خواهد شد. ریزشبه مورد مطالعه از یک میکروتوربین برای تامین توان استفاده می‌کند ولی علاوه بر آن، دارای پیل سوختی نیز می‌باشد. ریزشبه دارای پارکینگ شارژ خودروهای الکتریکی نیز هست که امکان اتصال تعداد زیادی خودور الکتریکی به آن را ممکن می‌سازد. در روش ارائه شده، کنترل فرکانس ریزشبه از طریق هماهنگ‌سازی و کنترل هم‌زمان توان میکروتوربین، پیل سوختی و خودروهای الکتریکی انجام می‌شود. اساس این کار مبتنی بر کنترل کننده<sup>1</sup> PI می‌باشد ولی برای تعیین میزان مشارکت میکروتوربین، پیل سوختی و خودرو الکتریکی در کنترل فرکانس، یک الگوریتم جدید ارائه شده است.

---

<sup>1</sup> Proportional Integral

### ۱-۳- ساختار پایان نامه

با توجه به مطالب بیان شده، ساختار کلی پایان نامه به شرح زیر خواهد بود. در فصل دوم، مفهوم کنترل فرکانس توضیح داده خواهد شد و پس از بیان نحوه کنترل نوسانات فرکانس و روش‌های اولیه و سنتی در تنظیم آن، مرور مختصری بر مراجع و مقالات گذشته در زمینه کنترل فرکانس در ریزشبکه‌ها انجام می‌شود. در فصل سوم به معرفی ریزشبکه‌ها و پروژه‌های مختلف انجام شده در مناطق مختلف دنیا پرداخته می‌شود. در ادامه، اجزای مختلف ریزشبکه توضیح داده می‌شود.

در فصل چهارم، چگونگی مدل‌سازی اجزای مختلف ریزشبکه مورد مطالعه، بیان می‌شود و روش ارائه شده برای کنترل فرکانس ریزشبکه توضیح داده می‌شود. کارایی روش ارائه شده، با شبیه‌سازی ریزشبکه مورد مطالعه و اعمال روش ارائه شده به آن در نرم افزار MATLAB، اثبات شده است. ساختار ریزشبکه مورد مطالعه و نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی در فصل پنجم ارائه می‌شود. نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی در فصل شش تحلیل خواهد شد و در نهایت یک نتیجه‌گیری کلی ارائه می‌شود. در فصل ششم، پیشنهاداتی برای ادامه این زمینه مطالعاتی ارائه شده است.

# فصل ۲- پیشینه تحقیق

## ۲-۱- مقدمه

با توجه به اینکه هدف این پژوهش، کنترل فرکانس در ریزشبه‌ها می‌باشد لازم است تا ابتدا مفهوم کنترل فرکانس بیان شود و روش‌های ارائه شده برای کنترل فرکانس در ریزشبه‌ها مرور و بررسی شود. بنابراین، در این فصل ابتدا روش‌های کنترل فرکانس توضیح داده می‌شود و سپس، مقالات و کارهایی که به کنترل فرکانس در ریزشبه‌ها پرداخته‌اند بررسی خواهند شد.

## ۲-۲- کنترل فرکانس در سیستم‌های قدرت

در سیستم‌های قدرت، با تغییرات بار، به دلیل عدم تعادل در توان تولیدی منابع و توان مصرفی بارها، فرکانس سیستم از مقدار نامی خود منحرف می‌شود. برای عملکرد قابل قبول سیستم، تنظیم فرکانس در

یک مقدار از پیش تعیین شده، به وسیله حلقه‌ی کنترل بار فرکانس<sup>۱</sup> (LFC) انجام می‌شود [۱]. حذف نظارت بر صنعت برق، معرفی ظرفیت‌های بزرگ و دستگاه‌های مصرف سریع توان باعث به وجود آمدن مشکلات جدی در نوسانات فرکانس شده‌اند و امروزه مطابق با پیچیدگی‌های سیستم‌های قدرت، LFC از اهمیت بالاتری برخوردار شده‌است [۳،۲]. هدف اصلی LFC، حفظ فرکانس ثابت، به وسیله نگه داشتن تعادل بین توان تولیدی و مجموع توان مصرفی و تلفات توان است. در شرایط دینامیکی و گذرا نظیر خروج واحدهای تولیدی و تغییر ناگهانی بار، فرکانس شبکه دچار نوسان خواهد شد. برای حفظ پایداری شبکه قدرت در این شرایط، نوسانات فرکانس توسط کنترل‌کننده‌های ویژه‌ای میرا می‌شوند [۴]. اگر فرکانس نامی سیستم را ۶۰ هرتز در نظر بگیریم و تقاضا بیشتر از تولید توان باشد، فرکانس سیستم به زیر ۶۰ هرتز افت می‌کند و اگر تقاضا کمتر از تولید باشد، فرکانس به بیش از ۶۰ هرتز افزایش می‌یابد. در عمل، فرکانس با تغییرات کوچک بار به طور مداوم حول ۶۰ هرتز نوسان می‌کند. هنگامی که یک عدم تعادل قابل ملاحظه پیش بیاید، نوسان بزرگ فرکانس را در پی خواهد داشت. طبق مقررات سیستم قدرت، تغییرات فرکانس سیستم نباید بیش از یک درصد فرکانس نامی سیستم شود [۵].

---

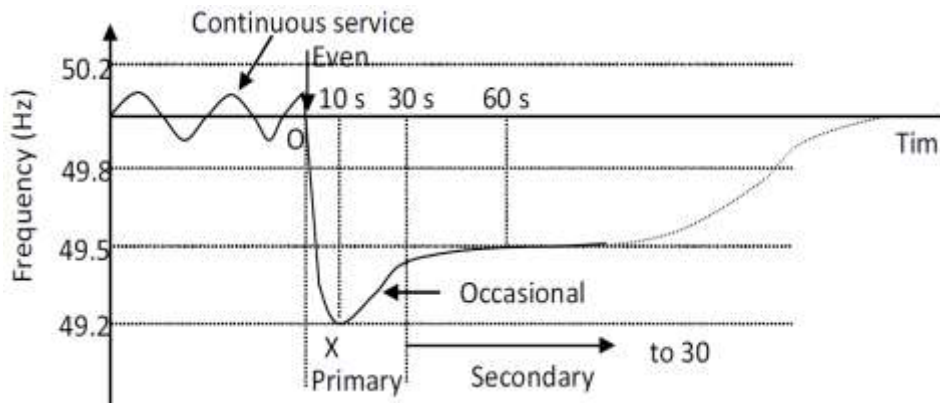
<sup>۱</sup> Load Frequency Control

در شکل (۱-۲)، تغییرات فرکانس برای تغییر توان به اندازه ۱۳۲۰ مگاوات برای یک سیستم نمونه نشان داده شده است [۶]. کنترل فرکانس طبق شکل (۱-۲) دارای دو مرحله است. کنترل اولیه<sup>۱</sup> و کنترل ثانویه<sup>۲</sup>. همانطور که در شکل (۱-۲) مشخص است، مرحله اولیه ۱۰ ثانیه پس از افت فرکانس آغاز می‌گردد و تقریباً تا ۲۰ ثانیه ادامه می‌یابد. این مرحله توسط حلقه کنترلی LFC انجام می‌شود. پس از تعادل سیستم، هنوز فرکانس سیستم از مقدار نامی خود فاصله دارد. در این مرحله واحدهای تولیدی شبکه وظیفه برگرداندن فرکانس سیستم به مقدار مطلوب را بر عهده دارند و فرکانس را به مقدار مطلوب می‌رسانند. این مرحله، کنترل ثانویه فرکانس نامیده می‌شود. این مرحله ۳۰ ثانیه پس از وقوع خطا شروع شده و تا سی دقیقه پس از آن نیز ادامه می‌یابد [۶].

---

<sup>1</sup> Primary Control

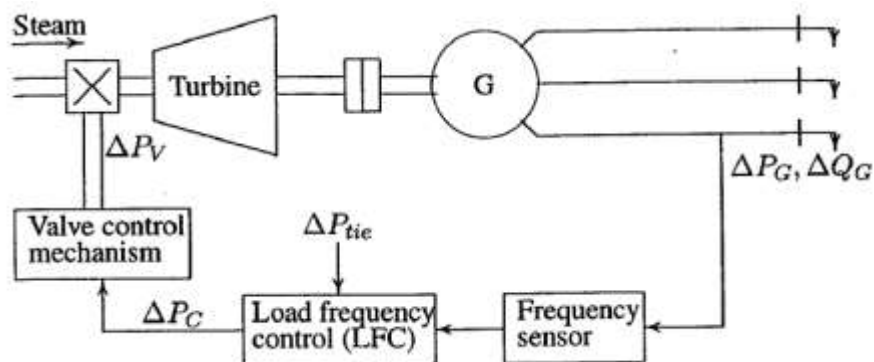
<sup>2</sup> Secondary Control



شکل ۲-۱. انحراف فرکانس از مقدار نامی بعد از ۱۳۲۰ مگاوات کاهش تولید [۶].

### ۲-۲-۱- حلقه بار فرکانس

در شکل ۲-۲ شماتیک یک حلقه LFC برای یک میکروتوربین آورده شده است.



شکل ۲-۲. کنترل بار فرکانس [۴]

اولین قدم در تحلیل و طراحی سیستم کنترلی، مدل ریاضی سیستم است. مشهورترین روش این کار استفاده از تابع تبدیل<sup>۱</sup> است [۴]. برای استفاده از تابع تبدیل، سیستم مورد نظر باید خطی گردد. برای یک سیستم با در نظر گرفتن خطی بودن اجزا، رفتار دینامیکی بار-تولید ژنراتور به صورت رابطه (۱-۲) بیان می‌شود.

$$2H \frac{d\Delta f}{dt} + D\Delta f = \Delta P_m - \Delta P_e \quad (1-2)$$

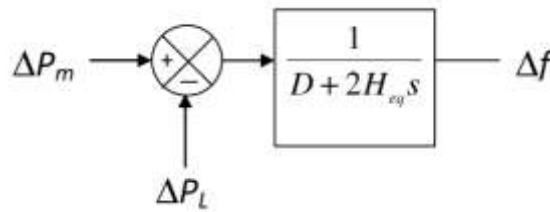
<sup>۱</sup> Transfer Function



در رابطه (۱-۲)،  $\Delta f$  انحراف فرکانس،  $\Delta P_m$  انحراف توان مکانیکی،  $\Delta P_e$  میزان تغییرات بار،  $H$  ثابت اینرسی و  $D$  ثابت میرایی است. با تبدیل لاپلاس گرفتن از معادله (۱-۲) رابطه (۲-۲) حاصل می‌شود.

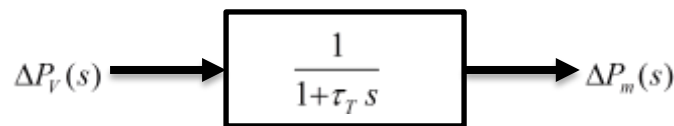
$$2HS \Delta f(s) + D \Delta f(s) = \Delta P_m(s) - \Delta P_e(s) \quad (2-2)$$

معادله (۲-۲) را می‌توان به صورت بلوک دیاگرام نشان داده شده در شکل (۳-۲) نمایش داد.



شکل ۲-۳. بلوک دیاگرام مدل ژنراتور و بار [۴].

برای بدست آوردن مدل کامل کنترل بار فرکانس، اجزای مختلف سیستم باید مدل‌سازی شود. یکی از این اجزای مهم، توربین است. ساده‌ترین مدل توربین با یک ثابت زمانی به صورت شکل (۴-۲) نمایش داده می‌شود.



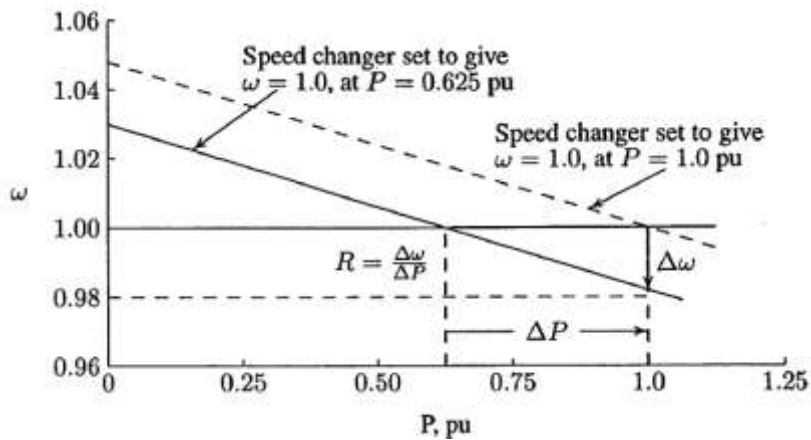
شکل ۴-۲. بلوک دیاگرام توربین [۴].

که در آن،  $\Delta P_v(s)$  موقعیت دریچه بخار و  $\tau_T$  ثابت زمانی توربین است که معمولاً در محدوده ۰/۲ تا ۲ ثانیه است.

گاورنر<sup>۱</sup> یکی دیگر از کنترل‌کننده‌های موثر در کنترل فرکانس می‌باشد. تغییرات در سرعت به وسیله گاورنر حس می‌شود که در واکنش به آن، موقعیت دریچه برای رساندن سرعت به حالت ماندگار عوض می‌شود. در نتیجه، تغییر بار جبران می‌شود و فرکانس به مقدار نامی باز می‌گردد. نحوه پاسخ‌گویی واحدهای تولیدی به تغییر فرکانس سیستم در شکل (۲-۵) نشان داده شده است. شیب منحنی نشان‌دهنده در شکل (۲-۵)، ضریب تنظیم سرعت نیروگاه را نشان می‌دهد که توسط اپراتور مشخص می‌شود و با R نمایش داده می‌شود. مثلاً اگر مقدار R، ۶٪ باشد، به این معنی است که ۶٪ انحراف در فرکانس، توان خروجی را به میزان ۱۰۰٪ تغییر می‌دهد و بالعکس، ۱۰۰٪ تغییر بار باعث تغییر فرکانس به میزان ۶٪ می‌شود.

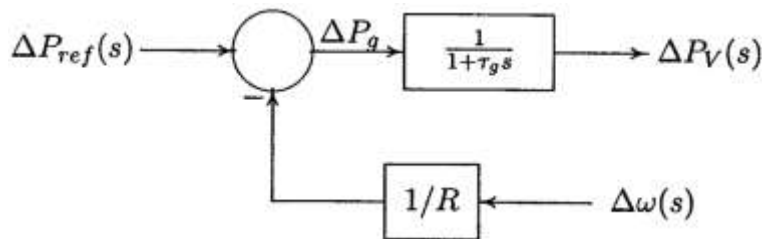
---

<sup>۱</sup> Governer



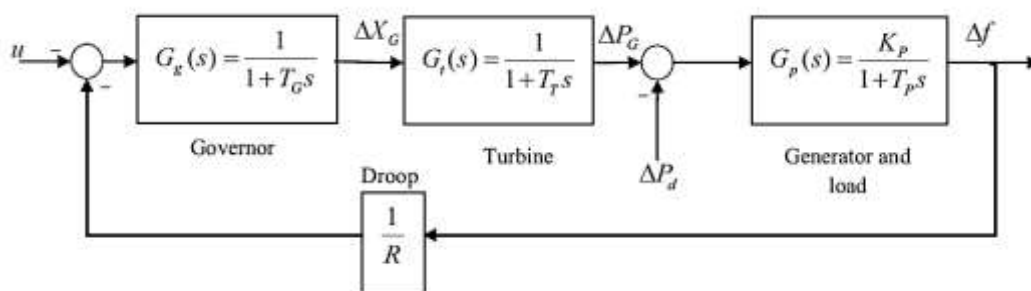
شکل ۲-۵. مشخصه حالت ماندگار گاورنر [۴]

در نتیجه بلوک دیاگرام گاورنر به صورت شکل (۲-۶) خواهد شد.



شکل ۲-۶. بلوک دیاگرام گاورنر [۴].

مدل حلقه کنترلی LFC با ترکیب مدل‌های ارائه شده، در شکل (۲-۷) نشان داده شده است [۴].



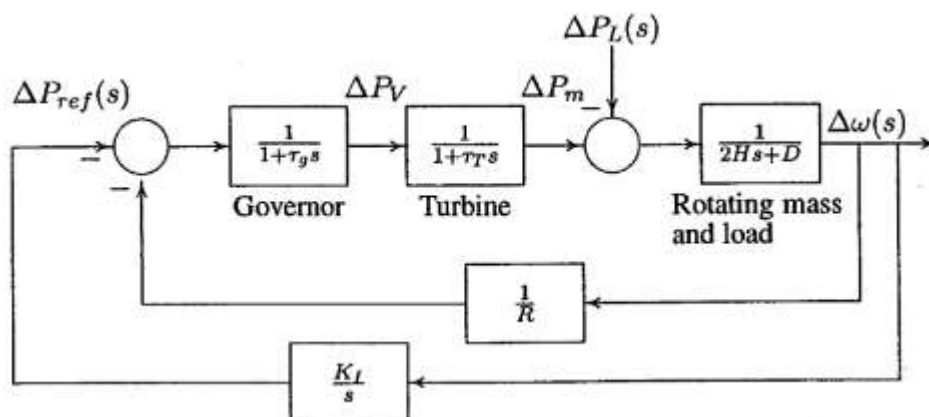
شکل ۲-۷. بلوک دیاگرام کنترل بار فرکانس [۴].

## ۲-۲-۲- کنترل<sup>۱</sup> AGC در یک سیستم یک ناحیه‌ای

با توجه به حلقه اولیه LFC، یک تغییر در بار سیستم منجر به انحراف فرکانس در حالت ماندگار خواهد شد که مقدار انحراف فرکانس به ضریب تنظیم سرعت گاورنر بستگی دارد. برای کاهش انحراف فرکانس به سمت صفر، باید عمل تکمیلی انجام شود که این عمل را می‌توان با اضافه کردن یک کنترل کننده انتگرالی به قسمت تنظیم بار مرجع، برای تغییر نقطه تنظیم سرعت انجام داد. کنترل کننده انتگرالی نوع سیستم را یک مرتبه افزایش می‌دهد که این خود انحراف فرکانس نهایی را به صفر می‌رساند. سیستم LFC با افزودن حلقه دوم، در شکل ۸-۲ نشان داده شده است. بهره کنترل کننده انتگرالی ( $K_I$ ) باید برای پاسخ گذرای مطلوب تنظیم شود [۴].

---

<sup>۱</sup> Automatic Generation Control



شکل ۲-۸. کنترل AGC برای یک سیستم قدرت یک ناحیه‌ای [۴]

در سیستم‌های چند ناحیه‌ای، LFC علاوه بر وظیفه کنترل فرکانس، تبادل توان خطوط ارتباطی<sup>۱</sup> بین دو ناحیه را نیز کنترل می‌نماید. در یک سیستم چند ناحیه‌ای، نواحی مجزا به وسیله خطوط انتقال به هم متصل می‌باشند. در این سیستم، انحراف فرکانس در هر ناحیه نه تنها ناشی از تغییرات بار آن ناحیه می‌باشد بلکه تغییرات توان خطوط انتقالی بین ناحیه‌ای نیز در آن تأثیرگذار می‌باشد.

کنترل بار فرکانس در هر ناحیه علاوه بر مسئولیت کنترل فرکانس در هر ناحیه، توان انتقالی خطوط را نیز کنترل می‌کند. لذا کنترل ثانویه بایستی انحراف توان عبوری از خطوط بین ناحیه‌ای را به صفر

<sup>۱</sup> Tie-line

برساند. این امر با اضافه کردن یک سیگنال جدید در حلقه کنترل فیدبک انجام می‌پذیرد. ترکیب خطی مناسب از انحراف توان و انحراف فرکانس به عنوان سیگنال خطای ناحیه کنترل<sup>1</sup> (ACE) تعریف می‌شود. سیگنال ACE پس از محاسبه وارد کنترل‌کننده  $K(s)$  می‌شود. سیگنال کنترلی تولیدی به توربین گاورنر مورد نظر اعمال می‌شود. لذا دیاگرام کنترلی پیشنهادی علاوه بر تامین اهداف اولیه کنترل بار فرکانس، باید مقدار توان عبوری از خطوط و همچنین فرکانس ناحیه را به مقدار مشخص شده برگرداند.

### ۲-۳- مروری بر تحقیقات گذشته

با افزایش استفاده از ریزشبكة‌ها در مناطق مختلف، استفاده از بارهایی با مصرف توان متغیر روز به روز گسترده‌تر می‌شود. یکی از این بارها، وسایل نقلیه الکتریکی متصل به شبکه هستند که در طی ۲۴ ساعت شبانه‌روز، با مصرف میزان توان مختلف باعث یک عدم تعادل در توان تولیدی و مصرفی می‌شوند. مهم‌ترین نتیجه‌ی این عدم تعادل، نوسانات فرکانس است که مشکلات کیفیت توان را برای شبکه به وجود می‌آورد. از سوی دیگر، استفاده گسترده از انواع منابع تولید پراکنده تاثیراتی بر روی کیفیت توان عرضه شده در یک ریز شبکه می‌گذارد که باعث مشکلات کنترلی فراوانی می‌شود. در نتیجه کنترل مناسب

---

<sup>1</sup> Area Control Error

شبکه برای برقراری تعادل در توان تولیدی و مصرفی از اولویتهای مطالعات انجام شده حول ریزشبکهها است.

در سالهای اخیر مقالات زیادی درباره نحوه کنترل مناسب ریزشبکههای دارای خودروهای الکتریکی انجام شده است. تحقیقات حول کنترل توان تولیدی توسط اجزای مختلف شبکه مانند پیل سوختی، میکروتوربین،<sup>1</sup> PVها، توربینهای بادی و سایر تولیدات پراکنده انجام شده است و به این موضوع اشاره دارد که در زمان کمبود توان ناشی از افزایش شارژ ناگهانی وسایل نقلیه الکتریکی که معمولاً در شب رخ می دهد، منابع تولید کننده باید تولید خود را افزایش دهند و بالعکس در زمان کاهش تعداد وسایل نقلیه متصل به شبکه در پارکینگهای شارژ که معمولاً در ساعات میانی روز رخ می دهد، منابع تولیدی ملزم به کاهش توان تولیدی خود هستند.

یکی دیگر از مواردی که در مقالات مختلف حول آن بحث شده است، استفاده از کنترل کننده مناسب برای انجام کنترل است. سیستم مشاهده و کنترل<sup>2</sup> (CMS) می تواند به عنوان یک ابزار برای کنترل توان و در نتیجه بهبود وضعیت فرکانس که باعث بهبود وضعیت کیفیت توان می شود، استفاده شود. در [۷] از

---

<sup>1</sup> Photovoltaic

<sup>2</sup> Control and Monitoring System

یک تولیدکننده رایج توان که پیل سوختی است، برای کنترل توان استفاده شده است. این سیستم دارای یک میکروتوربین، انرژی باد و سیستم خورشیدی است. همچنین سیستم الکترولایزر<sup>1</sup> (ES) که وظیفه تولید هیدروژن مورد نیاز پیل سوختی را برعهده دارد نیز به کار گرفته شده است که توان مورد نیاز آن از طریق سیستم خورشیدی و بادی تامین می‌شود.

توان تولیدی توربین باد و PV نوسانی بوده و دارای ماهیت تصادفی است. بنابراین در این نوع از سیستم‌ها با سایز کوچک، یک عدم تعادل ناگهانی در توان حقیقی و یا یک نوسان شدید در فرکانس می‌تواند به سادگی رخ دهد و در بعضی اوقات کاهش این نوسان‌ها، تنها به وسیله اجرای کنترل دینامیکی میکروتوربین ممکن نیست. علاوه بر این، وقتی خط انتقال توان برای اتصال به شبکه سراسری ۳۸۰ ولت AC طراحی شده است، دریافت توان از منبع AC یا DC ممکن است اغتشاشات هارمونیک ولتاژ و جریان را در پی داشته باشد. بنابراین استفاده گسترده از انواع منابع تولید پراکنده تأثیراتی بر روی کیفیت توان عرضه شده در یک ریزشبکه می‌گذارد که این موضوع باعث مشکلات کنترلی فراوانی می‌شود. در این پژوهش، نتایج هارمونیک که عمدتاً از ادوات الکترونیک قدرت ناشی می‌شوند در نظر گرفته نشده است و تنها نوسانات فرکانس ناشی از عدم تعادل توان حقیقی بررسی خواهد شد.

---

<sup>1</sup> Electrolyzer System



مصرف سوخت یک سیستم الکترولایزر می‌تواند در طول چند میلی‌ثانیه به وسیله تنظیم فشار در سیستم لوله‌گذاری کنترل شود. این کنترل فشار می‌تواند به وسیله سیستم مشاهده و کنترل انجام شود. بنابراین، سیستم الکترولایزر انعطاف‌پذیری و قابلیت بالایی برای تنظیم عدم تعادل در توان حقیقی دارا می‌باشد. با توجه به چنین توانایی‌هایی، در [۷] بر پایداری عملکرد ریز شبکه تمرکز شده است و ترکیبی از منابع شامل میکروتوربین، پیل سوختی و الکترولایزر برای پاسخ‌گویی به نوسانات فرکانس و عدم تعادل ناگهانی توان حقیقی پیشنهاد شده است.

علاوه بر کنترل جداگانه الکترولایزر و میکروتوربین، می‌توان برای تثبیت فرکانس از کنترل ترکیبی میکروتوربین و الکترولایزر نیز استفاده کرد. در شبکه‌ها، میکروتوربین معمولاً برای تولید توان استفاده می‌شود در حالی که الکترولایزر برای تولید هیدروژن به عنوان سوخت برای پیل سوختی، از شبکه توان می‌کشد. برای جلوگیری از نوسان فرکانس، میکروتوربین که معمولاً برای تغذیه توان بارها استفاده می‌شود، می‌تواند به صورت یک منبع توان قابل کنترل استفاده شود ولی به دلیل پاسخ دینامیکی کند آن، نمی‌تواند به طور کامل تغییرات بار را جبران کند.

برای افزایش تاثیر کنترلی<sup>1</sup> MT، الکترولایز می‌تواند به صورت یک جذب کننده‌ی توان قابل کنترل برای جذب توان نوسانی از سیستم استفاده شود. ES به عنوان مصرف کننده توان می‌تواند در سطح میلی-ثانیه به وسیله تنظیم فشار در سیستم لوله‌کشی مصرف کننده کنترل شود [۸].

در ریزشبکه‌ها، استفاده از منابع تولید پراکنده ضروری است. منابع پراکنده که غالباً در ساختار ریزشبکه‌ها مشارکت دارند، شامل سیستم‌های توربین بادی، ژنراتور دیزلی<sup>2</sup> (DEG)، PV، FC<sup>3</sup>، ذخیره‌ساز باتری<sup>4</sup> (BES) و ذخیره‌ساز چرخ طیار<sup>5</sup> (FES) هستند. ثابت‌های محیط زیستی و اقتصادی، فاکتورهای اصلی برای انتخاب نوع تولید پراکنده برای ریزشبکه می‌باشند. به دلیل این که توان تولیدی منابعی مانند PV و توربین بادی به شرایط آب و هوا بستگی دارد، ترجیحاً برای کنترل ثانویه فرکانس استفاده نمی‌شوند. واحدهای MT و DEG معمولاً توان مورد نیاز برای جبران کمبود توان مصرفی را تامین می‌کنند. ولی پاسخ زمانی آنها کند است و قادر به اداره ریزشبکه در مواقع تغییرات ناگهانی بار و تولید نیستند. در نتیجه

---

<sup>1</sup> Microturbine

<sup>2</sup> Diesel Engine Generator

<sup>3</sup> Fuel Cell

<sup>4</sup> Battery Energy Storage

<sup>5</sup> Flywheel Energy Storage

برای بهبود تاثیر کنترلی MT و DEG، هماهنگی با سیستم‌های ذخیره انرژی برای جبران سریع انحرافات، ضروری است.

کنترل ثانویه تضمین می‌کند که انحرافات فرکانس و ولتاژ بعد از هر تغییر در مقدار توان مصرفی یا میزان توان تولیدی به سمت صفر برود. دو ساختار اصلی برای کنترل ثانویه ریزش شبکه‌ها تعریف شده است.

(۱) ساختار متمرکز

(۲) ساختار غیر متمرکز

ساختار متمرکز مبتنی بر کنترل‌کننده مرکزی  $MG^1$  است و ساختار غیرمتمرکز اجازه‌ی تعامل واحدهای مختلف در داخل ریز شبکه را می‌دهد. به طور کلی ساختار متمرکز برای ریزش شبکه‌های مستقل مناسب‌تر است [۹].

در [۱۰، ۱۱] برخی از جنبه‌های کنترل ثانویه در ریزش شبکه‌ها بررسی شده است. در این مقاله‌ها، یک تابع پتانسیل برای واحدهای قابل کنترل در ریزش شبکه به دست آمده است و از کنترل‌کننده‌ی مرکزی برای کنترل استفاده شده است. برخلاف مرجع [۱۱]، در [۱۲] به منظور احتمال قطعی در لینک‌های

---

<sup>1</sup> Microgrid

ارتباطی، کنترل ثانویه در کنترل کننده‌ی مرکزی MG قرار نگرفته است بنابراین قطعی در لینک ارتباطی تأثیری بر واحدهای توزیع ندارد و کنترل ثانویه فرکانس به عنوان کنترل کننده محلی اعمال می‌شود. استفاده از قابلیت  $V2G^1$  خودروهای برقی نیز یکی دیگر از مواردی است که برای کنترل فرکانس در ریزشبکه‌ها مورد استقبال قرار گرفته است. هر خودروی برقی دارای مقداری انرژی ذخیره شده در باتری خود می‌باشد. این انرژی به تنهایی در مقایسه با کل انرژی مصرفی در شبکه قدرت بسیار ناچیز و نامحسوس است. چنانچه قرار باشد خودروهای برقی به عنوان تامین کننده بخشی از توان شبکه در هنگام بروز اغتشاشات و کنترل فرکانس شبکه مورد استفاده قرار گیرند، باید تعداد بسیار زیادی از این خودروها به صورت هماهنگ با شبکه در تعامل باشند. لذا معادل با ظرفیت باتری تمام خودروهای برقی در دسترس، مجموعه خودروهای برقی یک‌جا به صورت یک باتری خیلی بزرگ با ظرفیت زیاد مدل‌سازی می‌شوند.

از آنجا که باتری‌ها می‌توانند در حدود چند میلی‌ثانیه به ماکزیمم توان خروجی خود برسند، دارای قابلیت پاسخ‌گویی بسیار سریع می‌باشند. از سوی دیگر باتری‌ها توسط سخت‌افزارهایی که در خودروها و در پارکینگ‌ها نصب شده است، امکان مبادله توان دوطرفه با شبکه را خواهند داشت. لذا می‌توانند در

---

<sup>1</sup> Vehicle To Grid

مواقع لزوم شارژ یا دشارژ شوند. بنابراین در موارد خواسته شده به راحتی می توان از خودروهایی برقی به عنوان یک منبع تولید یا بار قابل کنترل در جهت کنترل فرکانس شبکه استفاده نمود.

انتخاب یک کنترل کننده مناسب نیز تأثیر بسزایی در کنترل شبکه‌ی مورد نظر دارد. روش‌های طراحی کنترل کننده در منابع مختلف بیان شده است. در LFC نیز مانند بسیاری از مشکلات صنعتی دیگر، کنترل کننده‌های  $PID^1$  به دلیل سادگی و قابل فهم بودن عملکرد، ترجیح داده می‌شوند [۱]. کنترل کننده‌های PI و PID در ۹۰٪ حلقه‌های کنترلی صنعتی در جهان استفاده می‌شوند، زیرا این کنترل کننده‌ها با وجود داشتن قیمت مناسب، عملکرد خوبی از خود ارائه می‌دهند [۷].

یک از مشکلات اصلی استفاده از کنترل کننده‌های PI، دشوار بودن تنظیم دقیق ضرایب آن‌ها می‌باشد یکی از راه‌حل‌هایی که برای این مشکل ارائه شده است ترکیب کنترل کننده PI و کنترل کننده فازی می‌باشد. کنترل فازی، یک روش کنترلی غیرخطی، تا حدودی هوشمند و از لحاظ مالی به صرفه است. انواع مختلف کنترل کننده‌های منطق فازی در [۱۳] آمده است. ترکیب روش کنترل فازی و کنترل کننده PI، باعث می‌شود که کنترل کننده PI ویژگی‌های غیر خطی و توانایی‌های هوشمند داشته باشد و امکان استفاده همزمان از کنترل فازی با ساختار کنترل کننده PI فراهم می‌شود. کنترل کننده‌های خود تطبیق،

---

<sup>1</sup> Proportional Integral Derivative

بهره‌های کنترل‌کننده PID را برای بهبود پاسخ خروجی در طول عملکرد سیستم، تنظیم می‌کند [۷, ۱۴]. در [۷] کنترل‌کننده خود تنظیم<sup>۱</sup> (SOPI) در ساختار کنترل میکروتوربین استفاده شده است. در [۹] کنترل‌کننده‌های مقاوم  $H_\infty$  و  $\mu$  سنتز بر روی ریزشبه نمونه تست شده و عملکرد و مقاومت کنترل‌کننده‌ها در حضور اغتشاشات مختلف و عدم قطعیت پارامترهای سیستم مورد امتحان قرار گرفته است. در [۹] نشان داده شده است که روش  $\mu$  سنتز با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های سیستم، عملکرد بهتری نسبت به روش کنترلی  $H_\infty$  دارد.

در [۱۵, ۱۶] الگوریتم‌های فوق ابتکاری بهینه‌سازی مانند روش شبکه عصبی فازی و ترکیب فازی با PSO<sup>۲</sup> برای تنظیم انحراف فرکانس استفاده شده است. در [۸] برای بهبود عملکرد کنترل‌کننده فرکانس و مقاومت در برابر عدم قطعیت‌ها، ترکیب  $H_\infty$  و PSO برای تنظیم پارامترهای PID استفاده شده است. در برخی مقالات، کاربرد بعضی روش‌های کنترلی کلاسیک و هوشمند در کنترل ریزشبه بررسی شده است. در استفاده از روش‌های کنترلی سنتی، دستیابی به یک مصالحه موفق بین عملکرد و پایداری، آسان نیست. همچنین تضمین عملکرد مقاوم و پایداری مقاوم بصورت همزمان در بازه‌ی وسیع اغتشاش و

---

<sup>۱</sup> Self-Organizing PI

<sup>۲</sup> Particle Swarm Optimization

عدم قطعیت، با استفاده از روش‌های هوشمند دشوار است. ولی روش‌های کنترل مقاوم با توجه به امکان فرمول‌بندی عدم قطعیت در فرآیند کنترل سنتز، این هدف را به صورت موثر محقق می‌کند [۹]. در [۱۷] تعدادی از مطالعات حول کاربرد کنترل مقاوم برای ریزشبکه‌های مختلف آورده شده است و یک استراتژی کنترل مقاوم نامتمرکز برای یک ریزشبکه‌ی مستقل آورده شده است.

بر اساس مطالب بیان شده، کنترل بار فرکانس در ریزشبکه‌ها بصورت کامل و جامع مطالعه نشده است. به علاوه، تنها در مرجع [۸]، میکروتوربین، پیل سوختی و خودرو الکتریکی به صورت همزمان در کنترل فرکانس ریزشبکه در نظر گرفته شده است و در هیچ مرجع دیگری، ساختار مورد مطالعه برای ریزشبکه در این پژوهش، بررسی نشده است. به علاوه، در مرجع [۸] برای کنترل کنترل فرکانس از الگوریتم‌های بهینه‌سازی استفاده شده است که باعث افزایش حجم محاسبات، پیچیدگی بالای کنترل‌کننده و هزینه بالای آن می‌شود.





# فصل ۲- ساختار ریز شبکه

### ۳-۱- مقدمه

در این فصل ابتدا مفهوم و ساختار ریزشبکه<sup>۱</sup> توضیح داده خواهد شد و سپس به اجزای اصلی ریزشبکه و اصول کارکرد آنها پرداخته می‌شود. همچنین، جزئیات منابعی که در مورد ریزشبکه مطالعه شده است در این فصل توضیح داده می‌شود.

---

<sup>۱</sup> Micro Grid

### ۳-۲- مفهوم ریزشبكة

ریزشبكة به شبکه‌هایی گفته می‌شود که از منابع تولید پراکنده<sup>۱</sup> (DG)، بار و یک کلید اتصال به شبکه تشکیل شده است و می‌تواند به صورت اتصال به شبکه و مستقل از شبکه (در حالت جزیره‌ای) به صورت پایدار کار کند. ریزشبكة علاوه بر بار و مصرف‌کننده می‌تواند شامل ذخیره‌کننده‌های انرژی نیز باشد که برای افزایش قابلیت اطمینان، افزایش پایداری و مسائل اقتصادی در ریزشبكة‌ها بکار می‌روند. ریزشبكة‌ها بر اساس سطح ولتاژ تولید یا مصرف توان می‌توانند به عنوان شبکه ولتاژ ضعیف<sup>۲</sup> یا ولتاژ متوسط<sup>۳</sup> طراحی شوند. امروزه ریزشبكة‌ها به طور معمول در مناطق روستایی استفاده می‌شوند که به دلیل مسائل زیست محیطی، دور بودن از شبکه توزیع و مسائل اقتصادی هنوز به شبکه اصلی متصل نشده‌اند [۸].

بسیاری از ریزشبكة‌ها برای رساندن توان به مناطق دور دست ایجاد شده‌اند. برای مثال در چین منابع انرژی تجدیدپذیر مانند انرژی بادی، انرژی خورشیدی، منابع ترکیبی<sup>۴</sup> و بیومس<sup>۱</sup> در مناطق وسیعی نصب

---

<sup>1</sup> Distribution Generation

<sup>2</sup> LOW VOLTAGE (LV)

<sup>3</sup> MEDIUM VOLTAGE (MV)

<sup>4</sup> hybrid

شده‌اند. در هند نیز، سیستم‌های انرژی خورشیدی برای مصارف خانگی در مناطق روستایی نصب شده‌اند. در کنار این‌ها، پروژه‌های بزرگ ریزشبکه در سراسر دنیا مانند پروژه‌ی باد-دیزل رامعا (واقع در کانادا)، پروژه‌ی هاچی‌نوعه (واقع در ژاپن)، پروژه‌ی سندای (واقع در ژاپن)، پروژه‌ی هسین‌چانگ (واقع در ژاپن) و پروژه‌ی ریزشبکه سنگال در حال انجام هستند [۲۱-۱۸]. یکی از مهم‌ترین مزایای ریزشبکه این است که می‌تواند به طور مستقل و همچنین به صورت متصل به شبکه اصلی فعالیت کند [۲۱،۶].

منابع انرژی پراکنده<sup>۲</sup> (DER)، شامل تولید پراکنده و ذخیره پراکنده<sup>۳</sup> (DS) منابع انرژی قرار گرفته در نزدیکی بارهای محلی هستند که مزایای زیادی از جمله بهبود قابلیت اطمینان در صورت عملکرد صحیح در سیستم توزیع الکتریکی، دارند. ریزشبکه‌ها شبکه‌های الکتریکی هستند که چندین DG را به چندین بار متصل می‌کنند. به طور معمول ریزشبکه‌های مبتنی بر DG از طریق سیستم‌های توان ترکیبی<sup>۴</sup> (HPS) می‌توانند تا حدود زیادی مشکل تقاضای انرژی در مناطق دور افتاده را حل کنند. زیرا شبکه‌های

---

<sup>۲</sup> biomass

<sup>۳</sup> Distributed Energy Resource

<sup>۳</sup> Distributed Storage

<sup>۴</sup> Hybrid Power System

HPS می‌تواند به شبکه اصلی متصل شوند یا این که به صورت مستقل فعالیت کنند. این موضوع به طور گسترده روند تولید و توزیع انرژی را تغییر داده است [۲۲].

برای کارکرد صحیح ریزشبكة در شرایطی که شبکه اصلی دچار مشکل شده است و یا کیفیت توان آن قابل قبول نمی‌باشد، کلید اتصال ریزشبكة به شبکه اصلی باز می‌شود و ریزشبكة به حالت جزیره‌ای می‌رود. در این حالت، منابع DER باید بتوانند توان مورد نیاز ریزشبكة را تامین کنند. بسته به تکنولوژی کلید، امکان وقوع وقفه‌های زودگذر در حالت انتقال از حالت مستقل به حالت متصل به شبکه وجود دارد. کنترل ریزشبكة در حالت مستقل سخت‌تر است. چون در حالت اتصال به شبکه، ولتاژ و فرکانس با مقادیر آن در شبکه اصلی برابر است. در حالت مستقل (جزیره‌ای) بعضی از منابع تولیدی بر روی نوسانات تولید و مصرف تاثیر می‌گذارند (توان باد و تابش خورشید) [۹]. در حالت مستقل برای حصول اطمینان از این که تنظیم ولتاژ مناسب صورت گرفته و DER توانایی اداره شبکه در حالت مستقل را دارد، باید تحلیل پخش بار صورت گیرد. DER باید توانایی تغذیه توان اکتیو و راکتیو در طول عملکرد مستقل شبکه و در حالتی که خطایی در شبکه پایین دست ایجاد می‌شود را داشته باشد. مهمترین تأثیر ریزشبكة، بهبود قابلیت اطمینان و کیفیت توان بهتر برای مصرف کنندگان است.

امروزه بحث ریزشبكة‌ها مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته و مسائل مختلف ریزشبكة در مقالات فراوانی بررسی شده است. در [۲۳-۲۶] چندین سیستم توان ترکیبی توسعه داده شده است. مدل دینامیکی سیستم توان ترکیبی در [۲۳] پس از تعیین ترکیب مناسب تولیدکنندگان بر اساس تغییرات بار، توسعه داده شده است. در [۲۴] یک شبکه‌ی مستقل برای تولید و ذخیره توان ولتاژ پایین بر اساس انرژی فتوولتائیک و باد، با در نظر گرفتن مدیریت انرژی و کنترل سیستم ترکیبی باد و خورشیدی توسعه داده شده است. در [۲۵] به این نکته اشاره شده است که سیستم توان ترکیبی با یک ترانسفورماتور

کوچک می‌تواند به شبکه توزیع ولتاژ پایین متصل شود. در [۲۶] یک سیستم ترکیبی متصل به شبکه برای تغذیه مصارف خانگی بر اساس سیستم خورشیدی و ژنراتور القایی مبتنی بر توان باد آورده شده است.

### ۳-۳- تعریف‌های مختلف ریزشبکه

امروزه تعاریف ریزشبکه در جهان یکسان نیست و در جوامع مختلف مانند آمریکا، ژاپن، اروپا و کانادا تعریف مختلف وجود دارد که این اختلاف‌ها بر اساس تمرکزی است که بر روی توسعه آن‌ها دارند [۲۷]. در ادامه تعریف ریزشبکه در برخی کشورهای مهم و صنعتی بیان شده است.

مطالعات ریزشبکه در آمریکا به وسیله موسسه انرژی<sup>۱</sup> (DOE) ایالات متحده سازمان‌دهی می‌شود و توسط مرکز تکنولوژی برق قابل اطمینان ایالات متحده<sup>۲</sup> (CERTS)، دانشگاه Wisconsin، شرکت جنرال الکتریک و سازمان‌های دیگر هدایت می‌شود. در میان آن‌ها تعریف ارائه شده توسط CERTS اولویت دارد.

---

<sup>۱</sup> Department Of Energy

<sup>۲</sup> Consortium for Electric Reliability Technology Solutions

طبق تعریف ارائه شده توسط CERTS، ریزشبكة از ریزمنابع و بار تشکیل شده است که ویژگی‌های زیر را دارا باشد.

(۱) اجازه تولید همزمان دارد.

(۲) انرژی تولیدی توسط ادوات الکترونیک قدرت تبدیل می‌شود.

(۳) یک شبکه قابل کنترل برای شبکه‌ی اصلی است.

(۴) کیفیت توان و قابلیت اطمینان را مهیا می‌کند.

در ژاپن تکنولوژی ریزشبكة توسط موسسه‌ی توسعه‌ی تکنولوژی صنعت انرژی نو<sup>۱</sup> (NEDO) هماهنگ و توسط تعدادی از دانشگاه‌ها و آزمایشگاه‌ها اجرا می‌شود. همکاری شرکت Mitsubishi باعث قرار گرفتن شبکه سیستم قدرت سنتی مستقل در گروه ریزشبكة‌ها شده است که این گستره‌ی تعریف ریزشبكة از دید CERTS را افزایش می‌دهد.

ریزشبكة تعریف شده توسط اتحادیه اروپا<sup>۲</sup> (EU) دارای ویژگی‌هایی به صورت زیر است [۲۸]:

---

<sup>۱</sup> New Energy Technology Development Organization

<sup>۲</sup> European Union

- (۱) می‌توانند از انرژی‌های اولیه استفاده کنند.
  - (۲) می‌توانند از ریزمنابع شامل سه نوع کنترل‌ناپذیر، کنترل‌پذیر نسبی و کنترل‌پذیر استفاده کنند.
  - (۳) توانایی تولید سرما، گرما و برق را دارند.
  - (۴) از ذخیره‌سازهای انرژی استفاده می‌کنند.
  - (۵) تنظیم انرژی توسط ادوات الکترونیک قدرت انجام می‌شود.
- ویژگی‌های ریز شبکه تعریف شده در چین نیز دارای ویژگی‌هایی می‌باشد که در زیر بیان شده است.

- (۱) استفاده از انرژی اولیه
  - (۲) استفاده از ریزمنابع
  - (۳) توانایی تولید برق، سرمایش و گرمایش
  - (۴) نصب ذخیره‌سازهای انرژی
  - (۵) نصب ادوات الکترونیک قدرت
  - (۶) مهیا کردن انرژی با کیفیت مناسب و قابلیت اطمینان بالا
  - (۷) معادل یک واحد کنترل‌پذیر از دید شبکه سراسری
  - (۸) فعالیت در دو حالت مستقل و متصل به شبکه
- در سایر کشورها از جمله کانادا، سنگاپور، کره جنوبی و کشورهای دیگر مطالعات زیادی روی ریز شبکه انجام شده است و تعاریف مختلفی بر طبق شرایط هر کشور برای ریز شبکه داده شده است. دانشگاه تورنتو معتقد است که ریز شبکه باید شامل منابع تولید پراکنده و بار باشد و توانایی فعالیت در دو

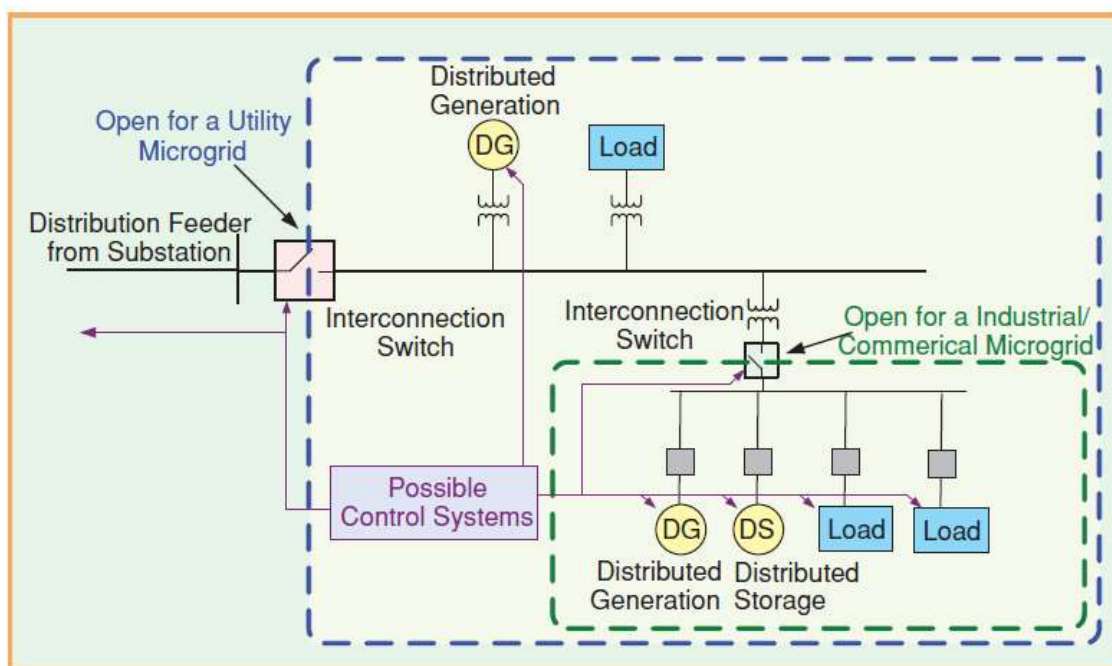


حالت مستقل و متصل به شبکه اصلی را دارا است. دانشگاه صنعتی نانیانگ در سنگاپور ساختاری از ریزشبکه ارائه داده که شامل منابع تولید پراکنده، بار، ذخیره ساز انرژی و ادوات الکترونیک قدرت است که توانایی فعالیت در دو حالت مستقل و متصل به شبکه را دارد. مرکز تحقیقاتی شبکه هوشمند دانشگاه میونخ میونخ، ریزشبکه را یک سیستم کامل که شامل منابع تولید پراکنده، بار، ذخیره ساز انرژی و تجهیزات بازیابی گرما تعریف می کند که توانایی استفاده کامل برای گرما و برق را دارد و در حالت مستقل فعالیت می کند.

### ۳-۴- تکنولوژی های ریزشبکه

برای عملکرد ریزشبکه ها، وجود چندین تکنولوژی ضروری است. این تکنولوژی ها شامل DG، DS، کلیدهای اتصال و سیستم کنترلی می باشد. یکی از چالش های تکنیکی برای طراحان ریزشبکه، دسترسی ارزان به تجهیزاتی با قابلیت اطمینان بالا می باشد. در شکل (۳-۱)، یک ریزشبکه نمونه و اجزای تشکیل دهنده آن نشان داده شده است.

همانطور که بیان شد، واحدهای DG، منابع کوچک انرژی در نزدیکی بارها هستند. تکنولوژی DGها معمولاً شامل پنل های فتوولتائیک، توربین بادی، پیل سوختی، میکروتوربین و موتورهای احتراق داخلی رفت و برگشتی با ژنراتورها است. این سیستم ها ممکن است با سوخت های فسیلی یا انرژی های تجدیدپذیر عمل کنند.



شکل ۳-۱: ریز شبکه و اجزاء آن [۲۹]

بعضی از انواع منابع تولید پراکنده می‌توانند ترکیب گرما و توان را به وسیله‌ی بازیابی گرمای تولید شده به وسیله منابعی مانند میکروتوربین‌ها مهیا کنند. این منابع می‌توانند به طور مشخص بازده‌ای واحد-های DG را افزایش دهند.

بیشتر تکنولوژی‌های DG، نیازمند یک رابط الکترونیک قدرت به منظور تبدیل توان DC به توان AC با فرکانس مورد نظر هستند. رابط‌های الکترونیک قدرت شامل مدارهای لازم برای تبدیل توان از یک نوع به نوع دیگر می‌باشد. این مبدل‌ها ممکن است شامل یکسوساز و اینورتر یا تنها یک اینورتر باشند. این مبدل‌ها برای تولید ولتاژ و فرکانس سازگار با شبکه، دارای فیلترهایی در خروجی هستند.

در ریزشبه مورد مطالعه، میکروتوربین و پیل سوختی منابع تولید توان می‌باشند به علاوه، خودروهای الکتریکی نیز به صورت بار قابل کنترل یا ذخیره‌ساز مدل می‌شوند. بنابراین، در ادامه این قسمت، این سه واحد به صورت جزئی‌تر بررسی می‌شوند.

### ۳-۴-۱- میکروتوربین (MT)

انتظار می‌رود که منابع تولید پراکنده نقش اصلی را در سیستم‌های قدرت در آینده بازی کنند و میکروتوربین‌ها یکی از بهترین انتخاب‌ها برای استفاده در این سیستم‌ها هستند. سیاست‌های عمومی محیط زیست و توسعه تقاضای توان، موقعیت را برای توسعه میکروتوربین برای تبدیل شدن به منابع مهم انرژی فراهم کرده‌است. میکروتوربین‌ها به دلیل داشتن اندازه کوچک، هزینه سرمایه‌گذاری نسبتاً پایین، هزینه نگهداری و عملکرد پایین و کنترل خودکار انتظار می‌رود که سهم قابل توجهی از بازار DGها را تصاحب کنند.

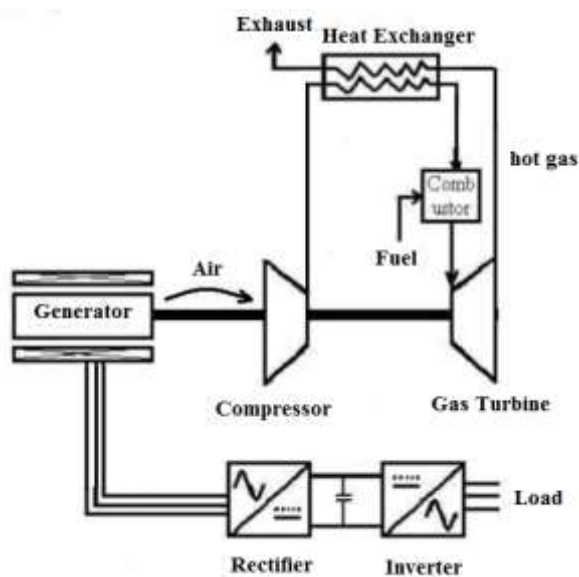
میکروتوربین‌ها در اندازه‌ی کوچک و توربین‌گازی‌هایی با سیکل ساده با خروجی ۲۵ تا ۳۰۰ کیلووات هستند. آن‌ها قسمتی از یک تکامل کلی در تکنولوژی توربین‌گازی هستند. به طور کلی میکروتوربین استفاده شده در ریزشبه، توربین‌گازی با قدرتی از ده‌ها کیلووات تا چندصد کیلووات می‌باشد. با توجه به محور توربین و ژنراتور، میکروتوربین‌ها به دو دسته تک محور و دو محور تقسیم می‌شوند. برای سادگی تک محور بررسی می‌شود که شامل توربین‌گازی، ژنراتور، کمپرسور، محفظه احتراق و تقویت‌کننده است [۳۰]. جریان متناوب با دامنه ولتاژ ۳۸۰ ولت در فرکانس ۶۰ هرتز قابل انتقال از ادوات الکترونیک قدرت برای تغذیه مستقیم بار خروجی یک سیستم میکروتوربین متداول را تشکیل می‌دهد. سیستم میکروتوربین به سه بخش زیر تقسیم می‌شود:

۱. سیستم سوختی و مکانیکی میکروتوربین

۲. ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم و یکسوساز AC/DC

۳. اینورتر DC/AC منبع ولتاژ و کنترل کننده PWM<sup>۱</sup>

در شکل (۲-۳) ساختار میکروتوربین نشان داده است.



شکل ۲-۳: اجزای میکروتوربین [۳۰]

<sup>۱</sup> Pulse width modulation

در یک میکروتوربین، کمپرسور، هوای ورودی را فشرده می‌کند که پس از آن در مدل حرارتی توسط گرمای خروجی از اگزوز گرم می‌شود. در مرحله بعدی، هوای گرم شده با سوخت در محفظه احتراق ترکیب شده و گاز احتراق داغ از طریق محفظه گسترش می‌یابد و به توربین نیرو وارد می‌کند. چرخش توربین، کمپرسور و در مدل تک محور ژنراتور را نیز می‌چرخاند. مدل‌های دو محوره از بخار کمپرسور محرک توربین، برای نیرو دادن به توربین دوم که باعث حرکت ژنراتور می‌شود، استفاده می‌کند. در نهایت، مبدل حرارتی از بخار توان توربین برای گرم کردن هوای کمپرسور استفاده می‌کند.

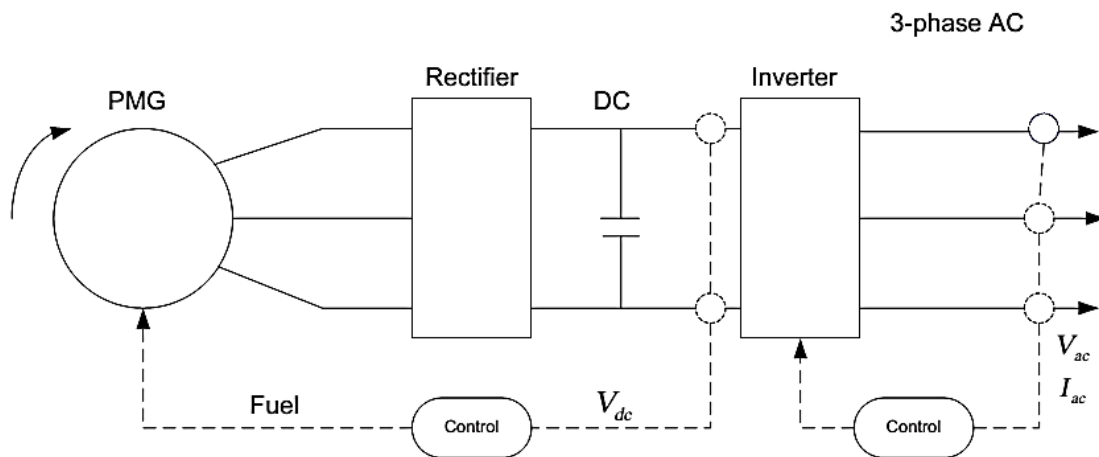
مدل‌های تک محور معمولاً در سرعت‌های ۶۰۰۰۰ دور در دقیقه کار می‌کنند و توان الکتریکی فرکانس بالا تولید می‌کنند. این توان تبدیل به جریان DC می‌شود و سپس به صورت متناوب با فرکانس ۵۰ یا ۶۰ هرتز برای استفاده‌ی معمول درمی‌آید [۳۱]. قسمت‌های اصلی میکروتوربین کمپرسور، ژنراتور و مبدل حرارتی می‌باشند که در ادامه توضیح داده خواهند شد.

قلب میکروتوربین کمپرسور است که معمولاً روی یک محور همراه ژنراتور الکتریکی قرار دارد. دو یاتاقان محور را حمایت می‌کنند. در میکروتوربین‌ها، محور کمپرسور با سرعت بالا در حدود ۹۶۰۰۰ دور در دقیقه در رنج توان ۳۰ کیلووات و ۸۰۰۰۰ دور در دقیقه در رنج توان ۷۵ کیلووات می‌چرخد [۳۲]. مبدل‌های حرارتی تبدیل‌کنندگان گرما هستند که از بخار داغ گاز توربین (در حدود ۱۲۰۰ درجه فارنهایت) برای حرارت دادن به هوای فشرده (معمولاً حدود ۳۰۰ درجه فارنهایت) استفاده می‌کنند. کنترل‌کننده‌های توربین گازی شامل سه حلقه اصلی می‌شوند:

۱. راه‌اندازی
۲. سرعت
۳. دما

کنترل سرعت نیازمند بیشترین توجه است. دلیل آن این است که در زمان راه اندازی، واحد فعال نیست و در حالت کنترل دما گاورنر به تغییرات فرکانس سیستم پاسخ نمی‌دهد.

میکروتوربین از طریق یک ژنراتور سرعت بالا در حال چرخش بر روی محور کمپرسور توان الکتریکی تولید می‌کند. همانطور که بحث شد، میکروتوربین‌های تک محوره دارای ویژگی کنترل دیجیتال برای تبدیل توان فرکانس بالا به توانی با فرکانس مورد نیاز شبکه هستند. توان فرکانس بالای AC به DC تبدیل می‌شود و سپس با اینورتر به فرکانس ۵۰ یا ۶۰ بازگردانده می‌شود و در مرحله بعد برای کاهش هارمونیک فیلتر می‌شود. این یک عضو مهم میکروتوربین تک محوره است که نشان دهنده اهمیت طراحی بخصوص برای هماهنگ کردن خروجی با بار است. ساختار الکتریکی میکروتوربین تک محور در شکل (۳-۳) نشان داده است.



شکل ۳-۳: ساختار الکتریکی میکروتوربین تک محور [۳۱]

برای مقابله با پدیده‌های گذرا و نوسانات ولتاژ، طراحی ادوات الکترونیک قدرت بکار رفته در این سیستم، قادر به تحمل هفت برابر ولتاژ نامی است. معمولاً مدل میکروتوربین استفاده شده از نوع تک محور است. سیستم کنترلی میکروتوربین شامل کنترل سرعت، کنترل دما و کنترل شتاب است.

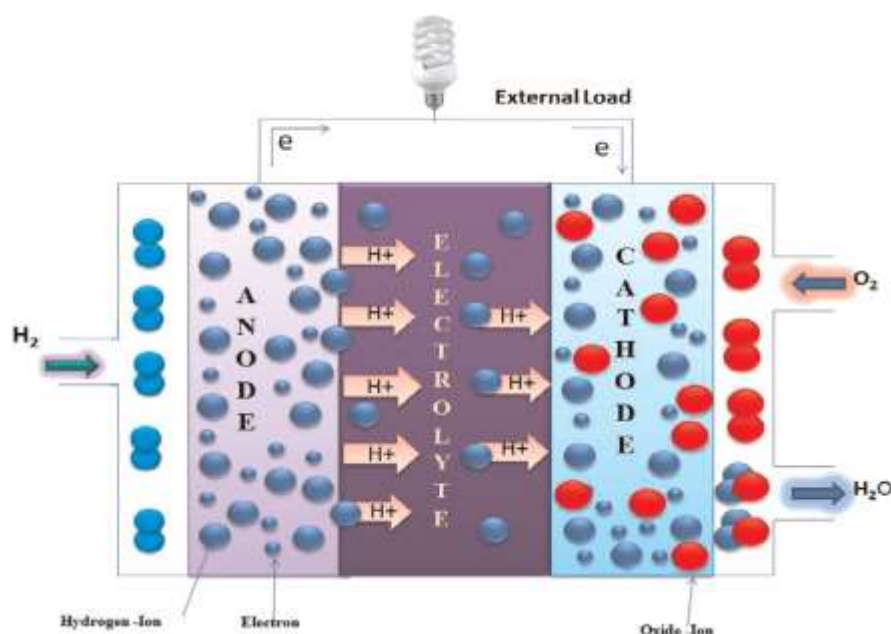
### ۳-۴-۲- پیل سوختی (FC)

تکنولوژی پیل سوختی دارای مزایای زیادی است که به سختی توسط دیگر تکنولوژی‌های تولید توان ارائه می‌شود. به دلیل آن که سوخت استفاده شده در این تکنولوژی به فراوانی در طبیعت یافت می‌شود و پایدار است. تکنولوژی پیل سوختی دارای تنوع کاربردی بصورت نیروگاه‌های ثابت و نیروگاه‌های قابل حمل است. فراوانی سوخت در طبیعت و تنوع کاربرد تکنولوژی پیل سوختی آن را به عنوان انتخاب اولیه برای مهیا کردن انقلابی در توسعه‌ی صنعت انرژی قرار داده است. با توجه به این که پیل سوختی توانی ارزان‌تر نسبت به سایر منابع انرژی ارائه می‌دهد لازم است تا بیش از پیش مورد مطالعه قرار گیرد.

یک پیل سوختی استاندارد انرژی شیمیایی را به انرژی الکتریکی به صورت موثر و بدون احتراق تبدیل می‌کند و از این نظر شبیه باتری سرب است. هر چند تفاوت‌های اساسی در کارکرد دو دستگاه وجود دارد. در FC، سوخت به طور مداوم از بیرون تغذیه می‌شود در حالی که در باتری‌های سرب، مواد شیمیایی در داخل ذخیره می‌شوند و می‌تواند توسط منابع خارجی مجدداً شارژ شود. در FC بعضی از سوخت‌های تجدیدپذیر مانند گاز هیدروژن، گاز طبیعی و بیومس مورد استفاده قرار می‌گیرند. این سوخت تجدیدپذیر است زیرا به صورت فراوان در دنیا در دسترس است و می‌تواند بدون اتمام تجدید یابد. هیدروژن می‌تواند از آب و بسیاری دیگر از منابع به دست بیاید. هیدروژن همچنین در اتمسفر زمین به قدر کافی در دسترس است. این دو المان برای فعالیت پیل سوختی که حاصل آن تولید گرما، توان و آب به صورت بخار است، کاربرد دارند [۳۳].

پیل سوختی همچنین دارای دو الکتروود است که به وسیله‌ی الکتروولیت متراکم از هم جدا شده‌اند. یک کاتالیزور که معمولاً پلاتین است برای شتاب دادن به پروسه استفاده می‌شود. هیدروژن و اکسیژن به ترتیب در آند و کاتد تغذیه می‌شوند و پروسه‌ی اکسیداسون در آند در حضور یک کاتالیزور شکل می‌گیرد

که در این مسیر هیدروژن تبدیل به الکترون و پروتون می‌شود. هر دو حامل‌های بار در حال حاضر تحت فشار قرار دارند، اگرچه از مسیرهای جداگانه، الکترون از مسیری خارجی برای تولید توان حرکت می‌کند و پروتون از طریق الکترولیت که با اکسیژن برای تولید گرما و آب ترکیب می‌شود [۳۳، ۳۴]. اصول کار پیل سوختی در شکل (۳-۴) نشان داده شده است.



شکل ۳-۴: سیستم پیل سوختی [۳۵]

از شکل (۳-۴) مشخص است که، در آند، هیدروژن در حضور کاتالیزور به پروتون و الکترون تبدیل می‌شود و در کاتد، پروتون و الکترون با اکسیژن برای تولید آب ترکیب می‌شوند. سلول‌های سوختی معمولاً با توجه به نوع ماده‌ی الکترولیت دسته‌بندی می‌شوند. انواع زیادی از الکترولیت‌ها برای ساخت یک پیل سوختی وجود دارد. انواع پیل‌های سوختی را می‌توان به صورت زیر نام برد [۳۳، ۳۴، ۴۲-۳۶]:

- پیل سوختی با غشاء تبادل پروتون (PEMFC)
- پیل سوختی فسفریک اسید (PAFC)



- پیل سوختی کربنات مذاب (MCFC)
- پیل سوختی اکسید جامد (SOFC)
- پیل سوختی قلیایی (AFC)
- پیل سوختی متانول مستقیم (DMFC)
- پیل سوختی روی-هوا (ZAFC)
- پیل سوختی احیاکننده (RFC)

الکترولیت‌های جامد فواید زیادی دارند زیرا اجازه‌ی خوردگی نمی‌دهند و کنترل آن در مقایسه با الکترولیت مایع راحت‌تر است. پیل‌های سوختی برای بسیاری از سیستم‌ها مفید هستند. با این وجود سه حوزه مهم زیر، تمرکز بیشتری بر روی استفاده از پیل سوختی دارند [۳۶،۳۴،۳۳].

۱. حوزه‌ی حمل و نقل مانند: خودروها، اتوبوس‌ها، کامیون‌ها، زیردریایی‌ها، کشتی‌ها و فضاپیماها.
۲. حوزه‌های توان ثابت مانند: توان برای مناطق‌های دورافتاده، توان پشتیبانی، پست‌های برق برای شهرها، تولید پراکنده برای ساختمان‌ها و تولید ترکیبی.
۳. توان قابل حمل مانند: موبایل‌ها، رادیوها و لب‌تاب‌ها.

پیل‌های سوختی پتانسیل بالایی برای کاربردهای ذکر شده با در نظر گرفتن فواید منابع انرژی حال حاضر دارند. در ادامه چند مورد از مهم‌ترین مزایای پیل سوختی بیان شده است.

- ۱) موثر بودن: دما یکی از پارامترهای مهمی است که بهره‌وری یک ماشین گرمایی را محدود می‌کند. پیل‌های سوختی شامل هیچ فرآیند احتراقی نمی‌شوند و بنابراین عاری از این‌گونه محدودیت‌ها هستند [۳۶-۳۸].

۲) بدون آلودگی: پیل‌های سوختی فضا را آلوده نمی‌کنند زیرا هیچ‌گونه آلاینده ندارند. آنها آب و گرما را به عنوان یک محصول جانبی تولید می‌کنند که می‌توانند برای مقاصد دیگر مورد استفاده قرار گیرند [۳۶-۳۸].

۳) سادگی: پیل‌های سوختی به این دلیل که ساختار آنها بدون هیچ قسمت محرک است، بسیار ساده، قابل اطمینان و بی صدا هستند. عمر بسیار طولانی‌ای دارند که می‌تواند تا ۴۰ هزار ساعت باشد [۳۶-۳۸].

### ۳-۴-۳- خودروهای الکتریکی

یکی از عوامل اساسی در آلودگی محیط زیست و افزایش گازهای گلخانه‌ای<sup>۱</sup> (GHG) استفاده بی‌رویه از سوخت‌های فسیلی به منظور تامین توان خودروهای احتراق درون‌سوز<sup>۲</sup> (ICEV) برای حمل و نقل است. افزایش آلاینده‌هایی نظیر گاز  $CO_2$  و همچنین افزایش قیمت سوخت‌های فسیلی به دلیل کاهش سطح منابع باعث شد تا کارشناسان به فکر جایگزینی مناسب برای این خودروها باشند. امروزه تمام تولید-

---

<sup>۱</sup> Green House Gases

<sup>۲</sup> Internal Combustion Engine

کنندگان وسائل نقلیه، یا در حال تولید مدلی از وسائل نقلیه الکتریکی<sup>۱</sup> (EV) هستند، یا برنامه‌ای برای تولید آن در بازار دارند. این موضوع نشان می‌دهد که وسائل نقلیه الکتریکی می‌توانند نقش مهمی در صنعت حمل و نقل آینده ایفا کنند. نفوذ بالای EV می‌تواند فواید زیاد اجتماعی، اقتصادی و زیست محیطی داشته باشد که از جمله آن می‌توان به کاهش آلاینده‌ها و کاهش وابستگی به سوخت‌ها فسیلی اشاره کرد. در نتیجه سیاست‌های دولت‌ها به سوی بهره‌وری و استفاده بیشتر از این وسائل سوق پیدا کرده است [۴۳].

خودروهای متعارف از نوع درون‌سوز برای ادامه حرکت خود از سوخت‌های فسیلی توسط موتور احتراق داخلی استفاده می‌کنند. آلودگی ناشی از این خودروها نسبتاً زیاد بوده و راندمان آنها در سرعت‌های مختلف متغیر و نسبتاً کم است. از سوی دیگر خودروهای برقی دارای راندمانی بالا هستند و با محیط زیست سازگاری بیشتری دارند. در حالت کلی خودروهای برقی به سه گروه زیر تقسیم می‌شوند.

- خودرو برقی هیبرید (HEV)
- خودرو برقی باتری‌دار (BEV)

---

<sup>۱</sup> Electric Vehicle

- خودرو برقی پیل سوختی (FCV)

خودروهای هیبریدی علاوه بر باتری و موتور الکتریکی، دارای موتور احتراق داخلی نیز می‌باشند. سیستم الکتریکی و موتور درون‌سوز می‌توانند با ساختارهای سری یا موازی، نیروی لازم برای حرکت خودرو را فراهم کنند. در بعضی از ساختارهای خودروهای هیبریدی جهت شارژ باتری و ادامه حرکت، از دو نوع منبع تغذیه شامل باتری الکتریکی و منبع سوخت فسیلی استفاده می‌شود. مطالعات نشان می‌دهد علی‌رغم استفاده از منابع سوخت‌های فسیلی، میزان آلودگی این نوع خودروها در مقایسه با خودروهای متعارف کمتر است [۴۴]. همچنین این خودروها توانایی شارژ شدن از طریق شبکه برق را دارند که در این حالت به آن‌ها خودروهای برقی هیبرید متصل به شبکه<sup>۱</sup> (PHEV) می‌گویند. خودروهای برقی هیبرید قابلیت اطمینان بیشتری نسبت به انواع دیگر دارند. خودروهای باتری‌دار انرژی را به صورت شیمیایی در خود ذخیره می‌کنند.

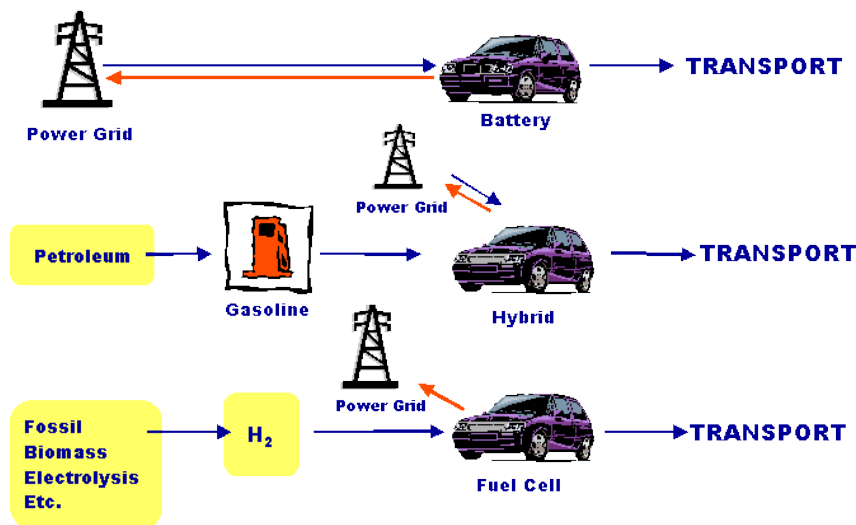
همانطور که در بحث پیل سوختی مطرح شد، از ترکیب اکسیژن و هیدروژن سه محصول گرما، آب و برق تولید می‌شود و در زمان عملکرد معکوس آب به هیدروژن و اکسیژن تقسیم می‌شود. در خودرو برقی

---

<sup>۱</sup> Plug-in Hybrid Electric Vehicle

پیل سوختی، از ترکیب پیل سوختی و باتری استفاده می‌شود و با توجه به ساختار آن آلودگی در این ترکیب بسیار کم است [۴۵]. اما امروزه با توجه به هزینه‌بر بودن ساخت، کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در شکل (۳-۵)، نحوی شارژ انواع خودروهایی که توضیح داده شد نشان داده شده است.



شکل ۳-۵. نحوه شارژ انواع خودروهای برقی [۴۶]

از مزایای EVها نسبت به خودروهای درون‌سوز به عوامل متعددی می‌توان اشاره نمود. انرژی مصرفی خودروهای درون‌سوز سوخت‌های فسیلی می‌باشد در حالیکه خودروهای برقی با مصرف برق، انرژی مورد نیاز خود را تامین می‌کنند. در مواردی که انرژی الکتریکی مورد نیاز EVها از سوختن سوخت‌های فسیلی در نیروگاه‌ها تامین شود، باز هم استفاده از خودروهای برقی برای سیستم و محیط به صرفه‌تر است. در این حالت به جای اینکه مقدار زیادی از سوخت‌های فسیلی در موتور خودروهای درون‌سوز با بازده نسبتاً پایین مصرف شوند، در نیروگاه‌ها با بازده بالاتری مورد استفاده قرار می‌گیرند. موتور الکتریکی خودروهای برقی دارای بازده نسبتاً بالایی بوده و تولید انرژی الکتریکی در مقیاس زیاد نیز با بازده بالاتری صورت می‌گیرد. بدین ترتیب راندمان کل سیستم افزایش می‌یابد [۴۷].

یکی دیگر از برتری این خودروها این است که در هنگام توقف مصرف توانی ندارند. این در حالی است که ICEVها زمان زیادی را در حال توقف مخصوصاً در پشت چراغ قرمز هستند و در این زمان انرژی زیادی مصرف می‌کنند. آلودگی صوتی EVها نسبت به خودروهای درون‌سوز بسیار کمتر می‌باشد که یکی از مهم‌ترین عامل‌های برتری این خودروها نسبت به ICEVها است. به طور کلی موتورهای الکتریکی نسبت به موتورهای احتراقی، صدای کمتری تولید می‌کنند. این در حالیست که امروزه با افزایش روزافزون تعداد خودروها، آلودگی صوتی ناشی از تردد این خودروها به یک مشکل جدی تبدیل شده است.

در خودروهای درون‌سوز انرژی جنبشی خودرو در هنگام ترمزگیری به صورت گرما در لنت ترمز هدر می‌رود در حالی که از بارزترین ویژگی‌های خودروهای برقی امکان بکارگیری سیستم‌های تولید مجدد<sup>1</sup> در موتورهای محرک این خودروها می‌باشد. این سیستم در هنگام حرکت انرژی ذخیره شده در باتری خودرو را دریافت نموده و به انرژی جنبشی تبدیل می‌کند. در خودروهای برقی این امکان وجود دارد که به هنگام ترمزگیری، موتور الکتریکی خودرو وارد حالت ژنراتوری شده و با دریافت انرژی جنبشی خودرو و تبدیل آن به انرژی الکتریکی، به شارژ باتری خودرو کمک کند. در نتیجه این عمل به افزایش راندمان سیستم کمک می‌کند.

---

<sup>1</sup> Regenerative

اما گذشته از مزایای EVها، این وسائل دارای معایبی هم هستند. از عمده‌ترین این معایب می‌توان به عدم توانایی EVها برای طی کردن مسافت‌های زیاد به دلیل ظرفیت محدود باتری‌های این وسائل اشاره کرد. به همین دلیل امروزه سازندگان، محل‌هایی به عنوان پارکینگ شارژ خودروهای برقی مخصوصا در بین مسیرهای ارتباطی برای رفع این مشکل تعبیه کرده‌اند. از معایب دیگر می‌توان به مدت زمان شارژ طولانی این خودروها و طول عمر کم باتری‌های استفاده شده اشاره کرد.

تقاضا برای خودروهای برقی روز به روز در حال افزایش است. همانطور که بیان شد خودروهای برقی با سیستم پیل سوختی به دلیل هزینه‌بر بودن کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. اما طبق پیش‌بینی‌ها در آینده با پیشرفت تکنولوژی و کاهش هزینه‌ها، این وسائل جایگاه ویژه‌ای خواهند داشت.

مزایای عمده EVها و سازگاری آن‌ها با تکنولوژی مدرن منجر به گسترش روزافزون تقاضای این تکنولوژی در سراسر دنیا شده است. همزمان با افزایش تعداد این خودروها، تقاضای انرژی برای شارژ آنها افزایش می‌یابد. افزایش خودروهای برقی، آینده شبکه قدرت را با تحول بزرگی مواجه خواهد ساخت. به گونه‌ای که در آینده بخش قابل توجهی از بار شبکه‌های قدرت را انرژی مورد نیاز برای شارژ EVها تشکیل خواهد داد

یکی از اعضای مهم هر EV یا HEV سیستم ذخیره انرژی<sup>1</sup> (ESS) آن است. باتری‌ها شناخته شده‌ترین و معمول‌ترین ابزار ذخیره انرژی هستند و نقش اساسی در ساختار ESS از زمان پیدایش ایفا می‌کنند [۴۸]. ویژگی‌های مختلف باتری‌ها در مورد هزینه، چگالی انرژی، امنیت، بهره‌وری انرژی، تخریب و امثال این موارد، آن‌ها را برای استفاده در EVها، PHEVها و V2Gها مناسب می‌کند.

امروزه باتری‌ها با وجود داشتن معایبی نظیر قیمت بالا، پیچیدگی فنی و محدودیت در عملکرد طولانی هنوز یک عضو مهم در صنعت خودروهای برقی هستند. یکی از مشخصه‌های مهم باتری، ظرفیت باتری است. ظرفیت باتری خودروهای برقی به صورت حداکثر انرژی قابل ذخیره‌سازی در باتری بر حسب کیلووات ساعت تعریف می‌شود. بسیاری از قابلیت‌های خودروهای برقی متأثر از ظرفیت باتری آن می‌باشد. معمولاً باتری‌های مورد استفاده در خودروهای الکتریکی دارای ظرفیت ۱ تا ۳۰ کیلووات ساعت می‌باشند.

پیشرفت‌های اخیر در تکنولوژی تولید باتری‌های با حجم کمتر و ظرفیت بیشتر، امکان افزایش بیشتر در توان موتور خودروهای برقی را فراهم آورده است. این پیشرفت‌ها به طور خاص بر باتری‌های نوع لیتیوم‌یون تمرکز یافته است. این نوع باتری‌ها به دلیل برتری‌های خاصی از قبیل عدم وابستگی راندمان

---

<sup>1</sup> Energy Storage System



باتری به درجه حرارت محیط و چگالی انرژی بیشتر، بیش از سایر انواع باتری‌ها در ساخت EVها گسترش یافته است [۴۹].

وضعیت لحظه‌ای شارژ باتری<sup>۱</sup> (SOC) نیز یکی دیگر از ویژگی‌های باتری در ساعات مختلف شبانه‌روز است. این پارامتر به صورت نسبت انرژی ذخیره شده در باتری به کل ظرفیت آن تعریف می‌شود. SOC در محدوده صفر تا یک تغییر می‌کند. وقتی باتری از شبکه انرژی دریافت کرده و پر است، SOC تا مقدار ۱ افزایش می‌یابد اما هنگامی که باتری تخلیه کامل شده است،  $SOC = 0$  است.

---

<sup>۱</sup> State Of Charge



# فصل ۴- مدل سازی ریز شبکه و

## پیاده سازی کنترل کننده پیشهادی

#### ۴-۱- مقدمه:

در فصل‌های قبلی مفهوم کنترل فرکانس در شبکه‌های برق توضیح داده شد و برخی از کارهای مهم که تاکنون در این زمینه انجام شده است مرور شد. در این فصل، ابتدا چگونگی مدل‌سازی اجزای مختلف سیستم در بررسی FLC توضیح داده خواهد شد و سپس روش کنترلی پیشنهادی برای کنترل فرکانس در یک ریزشبکه شامل میکروتوربین، پیل سوختی و خودروهای الکتریکی توضیح داده می‌شود.

#### ۴-۲- مدل‌سازی اجزای سیستم

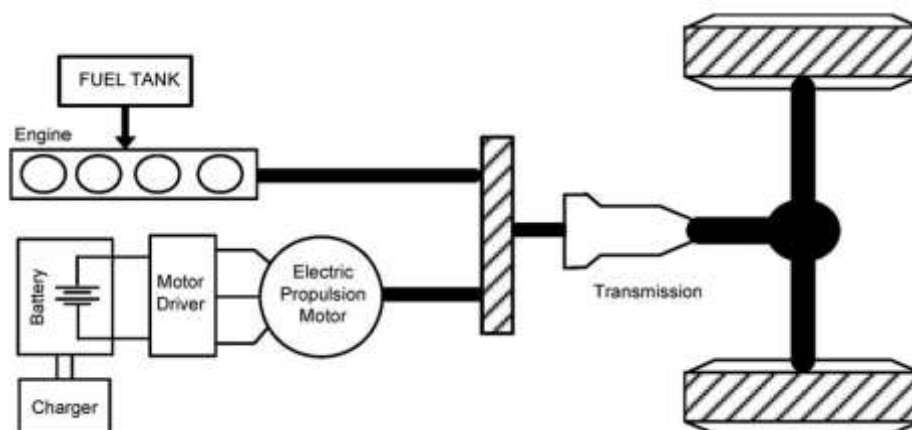
سیستم مورد مطالعه در این پژوهش از میکروتوربین، پیل سوختی و خودروهای الکتریکی قابل اتصال به شبکه تشکیل شده است. در ادامه چگونگی مدل‌سازی هر یک از این اجزا در کنترل بار-فرکانس توضیح داده می‌شود.

#### ۴-۲-۱- مدل خودرو الکتریکی

هر خودرو الکتریکی دارای یک ذخیره‌ساز انرژی می‌باشد ولی اندازه ظرفیت آن نسبت به انرژی کل سیستم ناچیز است. بنابراین برای بررسی تاثیر خودرو الکتریکی در شبکه، باید این خودروها به

صورت هماهنگ با هم فعالیت کنند. در نتیجه برای مدل سازی این خودروها، آنها به صورت تجمیع شده و به صورت یک باتری بزرگ مدل شده اند.

در شکل (۴-۱)، ساختار یک PHEV نشان داده شده است. از دید شبکه برق PHEV به صورت یک مبدل و یک ذخیره ساز انرژی دیده می شود. بنابراین برای مطالعه تاثیر PHEV بر روی کنترل فرکانس، می توان PHEV را به صورت یک باتری و یک مبدل AC/DC با قابلیت تبادل توان دو جهته مدل سازی کرد که در حالت شارژ از شبکه توان دریافت می کند و در حالت دشارژ به آن توان تزریق می کند.



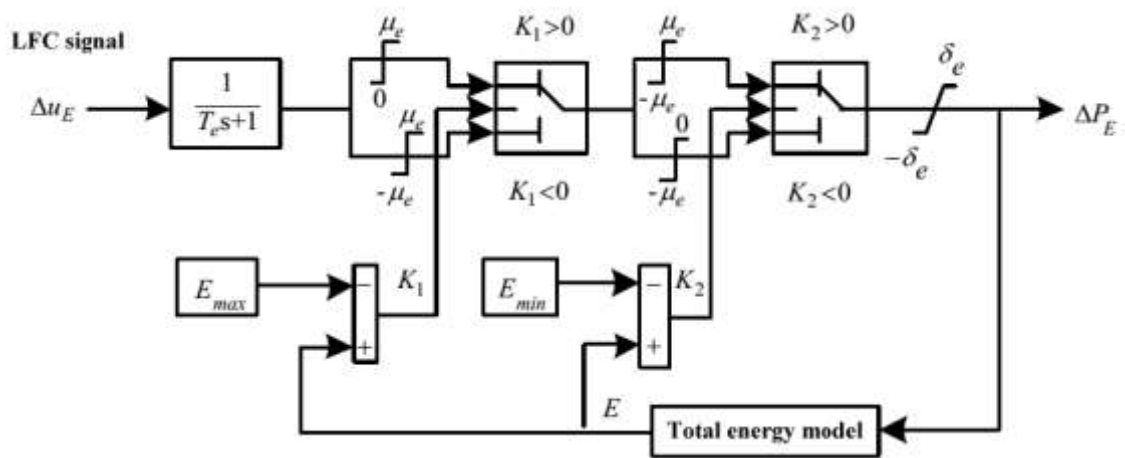
شکل ۴-۱. ساختار PHEV [۵۰]

ساده ترین شکل مدل سازی باتری بصورت یک منبع ولتاژ قابل کنترل و یک مقاومت سری می باشد که مقاومت سری برای مدل سازی تلفات داخلی باتری استفاده می شود. ولتاژ باتری خودروهای برقی می تواند مقادیر متفاوتی داشته باشد، بنابراین گاهی لازم است تا باتری ها توسط یک مبدل Buck-Boost به اینورتر سه فاز متصل شوند.

در کنترل بار فرکانس، خودروهای الکتریکی را می توان بصورت یک تأخیر و چند قید مدل سازی کرد. مدل نشان داده در شکل (۴-۲) در مرجع [۵۰] برای مدل سازی خودروهای الکتریکی در کنترل

## فصل چهارم: مدل سازی ریزشبهه و پیاده سازی کنترل کننده پیشنهادی

بار فرکانس ارائه شده است. در شکل (۴-۲)، پارامتر  $T_e$  ثابت زمانی EV بوده و  $\Delta u_E$  سیگنالی است که توسط AGC برای EV ارسال می شود.  $\pm \mu_e$  نشان دهندهی حدود ظرفیت و  $\pm \delta_e$  نیز نشان دهندهی حدود نرخ شیب تغییرات توان مبدل باتری خودرو الکتریکی می باشد.  $E$  مقدار انرژی موجود باتری EV را نشان می دهد و  $E_{min}$  و  $E_{max}$  نیز به ترتیب حداکثر و حداقل انرژی قابل کنترل باتری EV را نشان می دهند.



شکل ۴-۲. مدل خودروهای الکتریکی در کنترل بار فرکانس [۵۰]

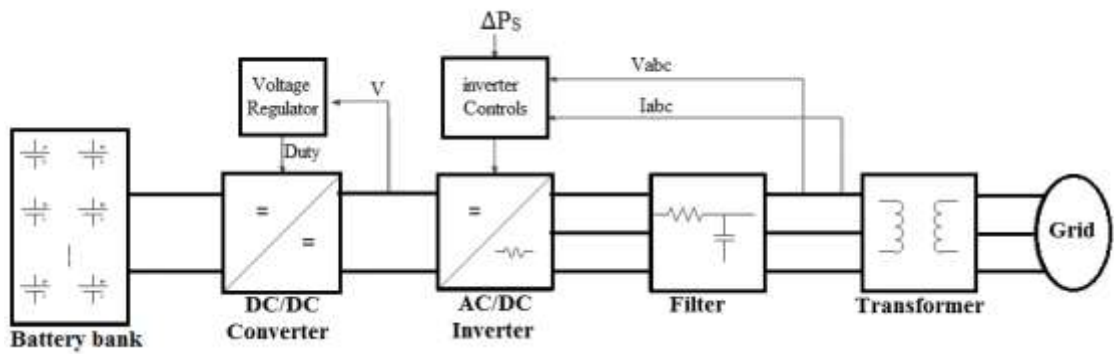
ثابت های  $K_1$  و  $K_2$  اختلاف بین توان در دسترس باتری EV با حدود بالا و پایین انرژی باتری می باشند و با استفاده از رابطه (۴-۱) محاسبه می شوند.

$$K_1 = E - E_{\max} \quad , \quad K_2 = E - E_{\min} \quad (1-4)$$

$\Delta P_E$  توانی است که باتری EV در پاسخ به سیگنال  $\Delta u_E$  با شبکه تبادل می کند. اگر  $\Delta P_E$  صفر باشد معنی آن این است که EV توانی با شبکه تبادل نمی کند  $\Delta P_E > 0$  نشان دهنده ی حالت شارژ و  $\Delta P_E < 0$  نشان دهنده ی حالت دشارژ برای باتری می باشد.

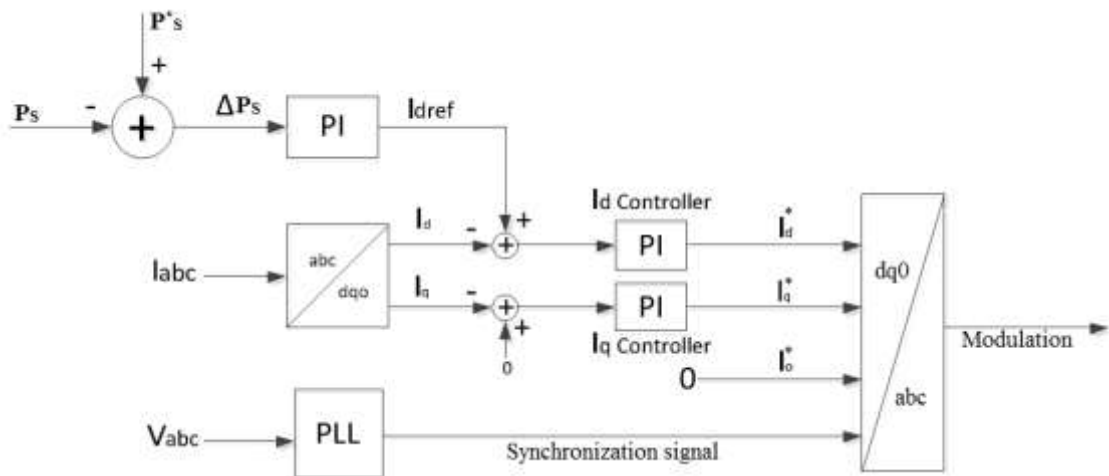
کنترل ذخیره سازها به روش کنترل در مرجع<sup>1</sup> dq انجام می شود. در شکل (۳-۴)، ساختار کنترل کننده ذخیره سازها نشان داده شده است. همانطور که از شکل (۳-۴) مشخص است. باتری یا هر ذخیره ساز دیگر می تواند با استفاده از یک مبدل DC/DC و یک اینورتر DC به AC به ریزشبه متصل شود. مبدل DC/DC برای تنظیم سطح ولتاژ باتری استفاده می شود و اینورتر DC به AC برای تبدیل توان DC به توان AC و همچنین تنظیم توان خروجی باتری استفاده می شود. این ساختار برای پیل سوختی یا هر منبع با ولتاژ خروجی DC قابل استفاده می باشد. همانطور که در شکل (۳-۴) مشاهده می شود، خروجی اینورتر با استفاده از یک فیلتر به ترانسفورماتور و شبکه متصل می شود. این فیلتر برای حذف هارمونیک های ناشی از کلیدزنی مبدل ها استفاده می باشد.

<sup>1</sup> Direct and Quadratic



شکل ۴-۳. کنترل‌کننده ذخیره‌سازها

در شکل (۴-۴)، روش کنترل اینورتر نشان داده شده است. همانطور که بیان شد هدف اینورتر تنظیم توان خروجی باتری می‌باشد بنابراین، مقدار توان مرجع باتری ورودی کنترل‌کننده می‌باشد و خروجی کنترل‌کننده اندیس مودولاسیون است که برای تولید سیگنال کلیدزنی به مبدل فرستاده می‌شود.



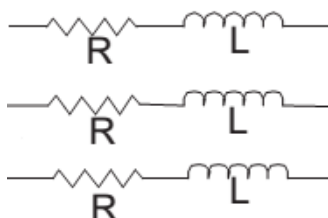
شکل ۴-۴. کنترل‌کننده اینورتر

در کنترل‌کننده بالا از یک PLL نیز استفاده شده است که برای سنکرون کردن عملکرد ذخیره‌ساز با شبکه استفاده می‌شود.



#### ۴-۲-۲- مدل بار و خط انتقال

در یک شبکه، بار به صورت مصرف توان اکتیو و راکتیو ظاهر می شود. در نتیجه برای مدل سازی بار در سیستم می توان از مقاومت و سلف استفاده کرد. در مطالعات دینامیکی کافی است که از مدل فشرده خط استفاده شود. در این مدل به جای گسترده شدن خازن در طول خط، خاصیت خازنی به طور فشرده در ابتدا و انتهای خط قرار دارد که مدل را ساده تر می کند. شکل زیر مدل ساده ی خط انتقال را نشان می دهد.



شکل ۴-۵. مدل خط انتقال

#### ۴-۲-۳- مدل میکرو توریب

مدل میکروتوربین در فصل دوم توضیح داده شد. برای ساده کردن مدل سازی میکروتوربین می توان از یک ژنراتور سنکرون استفاده کرد. رفتار کل سیستم بستگی به نحوه عملکرد ژنراتور سنکرون

دارد. ژنراتور سنکرون یک سیستم الکترومکانیکی است که از دو قسمت الکتریکی و مکانیکی تشکیل شده است. بخش مکانیکی (رتور) با یک معادله دیفرانسیل درجه دو مدل‌سازی می‌شود و بخش الکتریکی (برحسب این‌که چه مرتبه‌ای برای قسمت الکتریکی در نظر گرفته شود) آن با مدل‌های درجه ۰، ۱، ۳ و ۵ مدل می‌شود.

در مطالعات پخش بار و تحلیل حالت دائمی سیستم، مدل مرتبه صفر استفاده می‌شود، در مطالعات فرکانس پایین سیستم<sup>۱</sup> (LFO) از مدل مرتبه ۱ و با در نظر گرفتن قسمت مکانیکی مدل مرتبه ۳ ماشین استفاده می‌شود و در زمان‌هایی که هدف مطالعه مدل خطی ماشین سنکرون است از مدل مرتبه ۳ (مدل هفرون فیلیپس) استفاده می‌شود [۵۱].

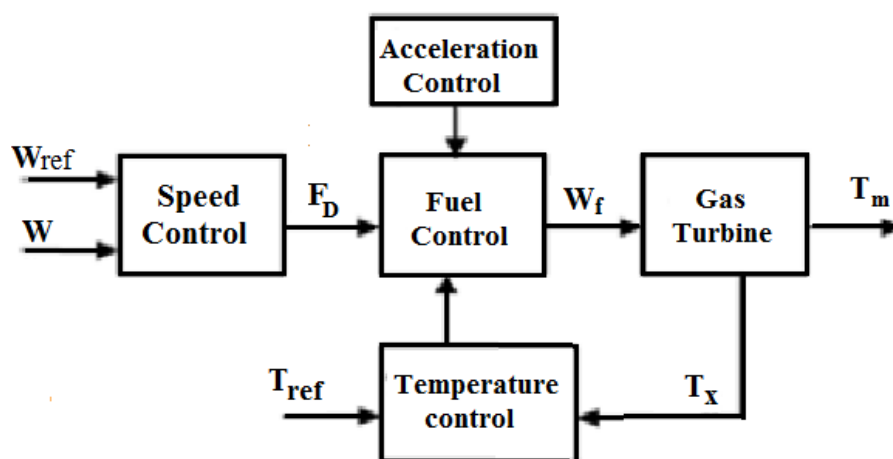
یک ژنراتور سنکرون از سه سیم‌پیچ  $a$ ،  $b$  و  $c$  برای استاتور، یک سیم‌پیچ برای تحریک روی روتور، یک سیم‌پیچ دمپر در راستای محور طولی و دو سیم‌پیچ دمپر در راستای محور عرضی تشکیل شده است. سیم‌پیچ‌های دمپر روی روتور توزیع شده است ولی با تقریب به صورت سیم‌پیچ‌های عمود بر هم، بر روی محورهای  $dq$  در نظر گرفته می‌شوند.

میکروتوربین شبیه‌سازی شده در این پژوهش از ژنراتور سنکرون و توربین گازی تشکیل شده است. کنترل دامنه ولتاژ ژنراتور سنکرون یا به عبارت دیگر توان راکتیو آن، به وسیله سیستم تحریک

---

<sup>۱</sup> Low Frequency oscillation

ژنراتور انجام می شود که برای این کار از سیستم تحریک موجود در نرم افزار متلب استفاده شده است. کنترل فرکانس یا توان اکتیو آن نیز با کنترل گشتاور مکانیکی توربین گازی انجام می شود این کار با کنترل مقدار سوخت ورودی توربین گازی قابل انجام است. در فصل دوم ساختار میکروتوربین و توربین گازی توضیح داده شد. در این پژوهش، کنترل توربین گازی بصورت شکل (۴-۶) انجام می شود که هدف آن کنترل مقدار  $T_m$  از طریق کنترل مقدار سوخت می باشد. که این کار با کنترل سرعت روتور انجام می شود.



شکل ۴-۶. کنترل گشتاور مکانیکی توربین گازی [۵۱]

#### ۴-۲-۴- مدل پیل سوختی

همانطور که در فصل دوم توضیح داده شد، پیل های سوختی دستگاه های الکتروشیمیایی هستند که با استفاده از هیدروژن و هوا به عنوان سوخت، انرژی الکتریکی تولید می کنند. از بین انواع مختلف پیل ها، مدل PEM با توجه بازدهی بالا، دمای پایین عملکرد (۵۰-۱۰۰)، چگالی توان بالا و عمر طولانی، به عنوان یک گزینه ی جذاب انتخاب می شود [۵۲].

مدل کردن پیل سوختی به ۳ روش زیر قابل انجام است.

۱. روش تحلیلی

۲. روش تجربی

۳. روش نیمه تجربی

روش تحلیلی نسبت به روش تجربی مدل دقیق تری ارائه می دهد. کارهای گذشته در مدل کردن PEMFC شامل مدل هایی بودند که در درجه اول برای اهداف الکتروشیمیایی توسعه داده شده اند. اما برای طراحی سیستم پیل سوختی، ایجاد یک مدل الکتریکی لازم است.

یک واحد کامل پیل سوختی می تواند از تعدادی پیل سوختی که بصورت سری برای رسیدن به توان مطلوب به یکدیگر متصل شده اند تشکیل شده باشد. تعداد پیل های قرار گرفته به صورت سری، ولتاژ کلی مجموعه پیل را مشخص می کند.

مدل دینامیکی پیل سوختی، تغییرات ولتاژ خروجی ناشی از تغییرات جریان را مدل سازی می کند. تغییرات ولتاژ خروجی PEMFC به صورت معادله (۲-۴) است [۵۳].

$$V_{stack} = n \times [E_{nemst} - Losses] \quad (2-4)$$

که در آن  $V_{stack}$  ولتاژ خروجی مجموعه پیل‌ها،  $n$  تعداد پیل‌ها،  $E_{Nernst}$  ولتاژ به دست آمده در حالت مدار باز و  $Losses$  تلفات ولتاژ را نشان می‌دهد. تلفات ولتاژ شامل تلفات فعال سازی، تلفات غلظت و تلفات اهمی می‌باشد [۵۴]. در ادامه برخی از مفاهیم پیل سوختی توضیح داده شده است.

۱. ولتاژ Nernst ( $E_{Nernst}$ ): ولتاژ نرنست<sup>۱</sup> یا ولتاژ برگشت پذیر<sup>۲</sup> پیل سوختی، توان به دست آمده از پیل در حالت مدار باز ترمودینامیکی است. این ولتاژ به صورت رابطه (۳-۴) نشان داده می‌شود [۵۳].

$$E_{Nernst} = E^{\circ} - \frac{RT}{2F} (\ln PH_2 + 0.5 \ln PO_2) \quad (3-4)$$

۲. تلفات فعال سازی ( $V_a$ ): تلفات فعال سازی نتیجه‌ی مراحل پیچیده‌ی واکنش‌های الکتروشیمیایی است که هر سطح، نرخ واکنش و انرژی فعال سازی خود را دارد. تلفات به صورت زیر بیان می‌شود:

$$V_a = - (a_1 + a_2 \times T + a_3 \times T \times \ln(Co) + a_4 \times T \times \ln(I_{fc})) \quad (4-4)$$

مقدار  $Co$  به صورت رابطه (۵-۴) مشخص می‌شود.

$$Co = \left( \frac{Po}{5.08 \times 10^6 e^{-498/T}} \right) \quad (5-4)$$

<sup>1</sup> Nernst

<sup>2</sup> Reversible

۳. تلفات اهمی (Vohm): تلفات اهمی به دلیل مقاومت جریان یون‌ها در الکترولیت و مقاومت جریان الکترون‌ها در الکتروود رخ می‌دهد. این تلفات به صورت ضرب  $R_i$  نشان داده می‌شود که  $i$  جریان و  $R$  مجموع مقاومت‌های داخل سلول است.

$$Vohm = Ifc \times (Re + Rp) \quad (۶-۴)$$

در رابطه (۶-۴)،  $Re$  مقاومت تولید شده توسط غشاء برای عبور الکترون و  $Rp$  مقاومت تولید شده توسط غشاء برای عبور پروتون است.  $Rp$  ثابت است و  $Re$  به صورت رابطه (۷-۴) نشان داده می‌شود.

$$Re = \rho \cdot \frac{l}{A} \quad (۷-۴)$$

که در آن داریم [۵۳]:

$$\rho = 181.6 \frac{\left[ 1 + 0.03 \left( \frac{Ifc}{A} \right) + 0.062 \left( \frac{Ifc}{A} \right)^{2.5} \left( \frac{T}{303} \right)^2 \right]}{\left[ \left( 14 - 0.634 - 3 \left( \frac{Ifc}{A} \right) \right) e^{4.18 \left( \frac{T-303}{T} \right)} \right]} \quad (۸-۴)$$

۴. افت ولتاژ تراکم<sup>۱</sup> ( $V_{conc}$ ): این تلفات، به علت تغییرات در غلظت راکتانت<sup>۲</sup> در الکترودها به عنوان سوختی برای انجام واکنش است که باعث کاهش ولتاژ می شود و به صورت رابطه (۹-۴) بیان می شود.

$$V_{conc} = -B \cdot \ln \left( 1 - \left( \frac{i}{i_{max}} \right) \right) \quad (9-4)$$

در رابطه بالا،  $B$  ضریب پارامتری در ولتاژها است که به سلول و حالت عملکردی آن بستگی دارد،  $i$  چگالی واقعی جریان سلول ( $A/cm^2$ ) و  $i_{max}$  بیشینه چگالی جریان ( $A/cm^2$ ) است. با ترکیب تلفات توضیح داده شده، ولتاژ یک پیل سوختی با استفاده از رابطه (۱۰-۴) قابل محاسبه می باشد [۵۳].

$$V_{cell} = E_{nemst} - V_a - V_{conc} - V_{ohm} \quad (10-4)$$

در پیل سوختی PEM، یک پدیده به نام "شارژ دولایه"<sup>۳</sup> مشاهده می شود. الکترون ها در آند از طریق یک بار خارجی حرکت می کنند و به کاتد می آیند، جایی که یون های هیدروژن، در همان زمان می رسند. در نتیجه، دو لایه شارژ شده با پلاریته های مختلف در سراسر مرز بین کاتد و غشاء شکل می گیرد. این لایه می تواند به عنوان یک خازن در نظر گرفته شود. مجموعه ای این ها یک مدار الکتریکی که

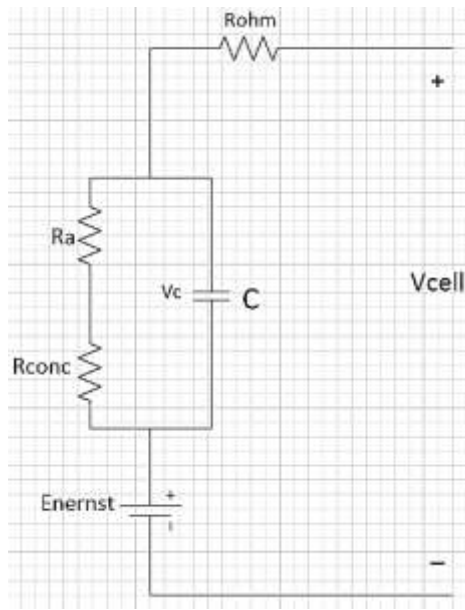
<sup>1</sup> Concentration Voltage losses

<sup>2</sup> Reactant

<sup>3</sup> Charged double layer

## فصل چهارم: مدل سازی ریزشبهه و پیاده سازی کنترل کننده پیشنهادی

مربوط به ولتاژ فعال سازی و ولتاژ غلظت می باشد را تشکیل می دهند. بنابراین زمانی وجود دارد که ولتاژهای فعال سازی و غلظت اجازه عبور را به جریان می دهند. اما افت ولتاژ اهمی بلافاصله باعث تغییر جریان می شود. این رفتار را می توان به وسیله ی مدار الکتریکی شکل (۷-۴) توصیف کرد.



شکل ۷-۴. مدار الکتریکی رفتار پیل سوختی [۵۳]

با در نظر گرفتن  $V_c$  به عنوان ولتاژ دینامیکی، معادله ولتاژ سلول به صورت رابطه (۱۱-۴) نوشته

می شود [۵۳].

$$\frac{dV_c}{dt} = \frac{1}{C} \cdot I_{fc} - \frac{1}{\tau} V_c \quad (11-4)$$

که در آن،  $\tau$  ثابت زمانی برای مدار RC است و با استفاده از رابطه (۱۲-۴) محاسبه می شود.

$$\tau = C \cdot (R_a + R_{conc}) \quad (12-4)$$

بنابراین، ولتاژ کلی سلول به صورت زیر نمایش داده می شود [۵۳].



$$V_{cell} = E_{nemst} - V_{ohm} - V_C \quad (۱۳-۴)$$

بر اساس روابط بیان شده و شکل (۷-۴)، پیل سوختی را می توان در سیمولینک متلب مدل سازی کرد.

#### ۴-۳- روش ارائه شده برای کنترل بار فرکانس ریزشبه

با مدل سازی اجزای ریزشبه، می توان روش ارائه شده برای کنترل فرکانس را پیاده سازی کرد. قبلا بیان شد که ریزشبه دارای دو منبع تولید توان از نوع میکروتوربین و پیل سوختی بوده و می تواند از ذخیره سازی خودروهای الکتریکی برای کنترل فرکانس استفاده کند. میکروتوربین رنج تغییرات توان بیشتر دارد و می تواند تا حدودی نوسانات توان بار و همچنین نوسانات فرکانس ناشی از شارژ خودروهای الکتریکی را جبران کند. ولی قطعا مشارکت خودروهای الکتریکی و پیل سوختی در کنترل فرکانس، می تواند سرعت پاسخ گویی به تغییرات توان را بیشتر کند زیرا بر خلاف میکروتوربین، ذخیره سازها که به عنوان مدلی برای خودروهای الکتریکی در نظر گرفته شده اند، دارای دینامیک بسیار سریعی هستند و در چند دهم ثانیه می توانند تغییرات توان را جبران کنند.

هدف کنترل فرکانس، حفظ تعادل توان تولیدی و توان مصرفی ریزشبه می باشد. برای این کار، فرکانس ریزشبه به صورت لحظه ای رصد می شود و در صورت تغییر آن، توان تولیدی نیز بر اساس آن تغییر می کند. ابتدا بر اساس مقدار تغییرات فرکانس ریزشبه، مقدار تغییرات توان تولیدی باید محاسبه شود. در مرحله بعد لازم است تا میزان تغییر توان تولیدی هر واحد بصورت جداگانه محاسبه شده و به واحد مربوطه ارسال شود. میزان مشارکت هر واحد در جبران سازی تغییرات فرکانس مهم می باشد که با استفاده از یک ضریب قابل تنظیم می باشد.

تغییرات توان هر یک از قسمت های سیستم از قبیل: توان مصرفی بار، توان شارژ یا دشارژ خودروهای الکتریکی، توان تولیدی میکروتوربین، توان مبادله ای با شبکه اصلی و توان تولیدی پیل سوختی منجر به تغییرات فرکانس سیستم می شود. اگر کل تغییرات توان اکتیو سیستم را  $\Delta P$  فرض کنیم در پاسخ به آن، فرکانس سیستم به اندازه  $\Delta f$  تغییر خواهد کرد. اندازه  $\Delta f$  به مشخصات سیستم و مقدار تغییرات توان وابسته است. مشخصه سیستم را می توان به صورت یک رابطه درجه ۱ مدل کرد، بنابراین، با ضرب مجموع تغییرات توان در معادله درجه ۱، مقدار  $\Delta f$  بدست می آید که در رابطه (۴-۱۴) نشان داده شده است.

$$\Delta f = \frac{1}{Ms + D} \cdot \Delta P \quad (۴-۱۴)$$

در رابطه (۴-۱۴)،  $\Delta P$  مجموع تمام تغییرات توان ریزشبهه می باشد که برابر مجموع تغییرات توان تولیدی منهای مجموع تغییرات توان مصرفی می باشد. با توجه به این که کنترل کننده های میکروتوربین، پیل سوختی و ذخیره ساز (تجمیع خودروهای الکتریکی) با فرکانس سیستم سنکرون می باشند تغییر فرکانس سیستم به اندازه  $\Delta f$ ، می تواند توان تولیدی هر یک از این سه واحد را تغییر دهد که مقدار این تغییر، به اندازه  $\Delta f$  و مشخصه هر یک از واحدها بستگی دارد. مشخصه هر یک از واحدها با یک ضریب و یک ثابت زمانی قابل تعریف می باشد به عنوان مثال برای پیل سوختی رابطه  $\frac{K_{FC}}{T_{FC}s + D}$  را داریم که  $K_{FC}$  نشان دهنده ی میزان تغییر توان پیل سوختی به دلیل تغییر فرکانس سیستم است و  $T_{FC}$  نیز ثابت زمانی تغییرات توان پیل سوختی می باشد.

علاوه بر سه واحد بیان شده، تغییر فرکانس ریزشبهه بر روی توان حقیقی مبادله شده بین ریزشبهه و شبکه اصلی نیز تاثیر می گذارد. تغییرات توان مبادله شده بین ریزشبهه و شبکه اصلی با استفاده از رابطه (۴-۱۵) قابل محاسبه می باشد.

$$\Delta P_{tie} = \frac{V_G V_{MG} \sin(\Delta \delta)}{X_{tie}} \quad \text{and} \quad \Delta \delta = \frac{2\pi \Delta f}{s} \quad (۴-۱۵)$$

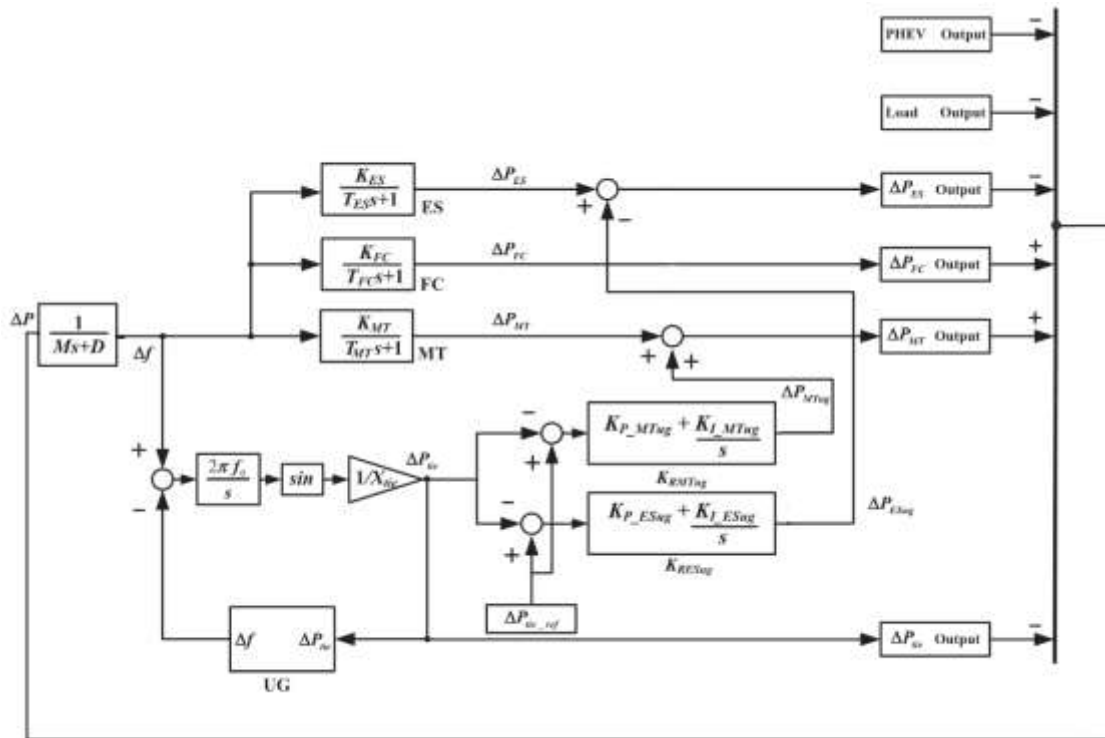
در رابطه (۴-۱۵)،  $\Delta P_{tie}$  توانی است که برای جبران  $\Delta f$ ، بین ریزشبه و شبکه اصلی مبادله می شود.  $\Delta \delta$  اختلاف زاویه فاز بین ولتاژ ریزشبه و شبکه اصلی می باشد و به مقدار  $\Delta f$  بستگی دارد که چگونگی محاسبه آن نشان داده شده است.  $X_{tie}$  نیز راکتانس خط و ترانسفورماتوری است که ریزشبه و شبکه اصلی را بهم متصل می کند.

اگر شبکه اصلی  $\Delta P_{tie}$  را تامین کند  $\Delta f$  جبران شده و تغییرات فرکانس به صفر میل می کند ولی گاهی این کار به دلیل محدود بودن مقدار مجاز توان مبادله ای با شبکه ممکن نیست و یا به دلیل بالا بودن قیمت خرید برق از شبکه، مطلوب نیست. بنابراین ممکن است که لازم باشد درصد مشخصی از  $\Delta P_{tie}$  به وسیله شبکه تامین شود و مابقی آن توسط منابع ریزشبه جبران شود.

اگر مقدار توان مرجعی که باید بین ریزشبه و شبکه اصلی مبادله شود را با  $\Delta P_{tie-ref}$  نشان دهیم برای جبران  $\Delta f$ ، منابع ریزشبه باید مقدار توان تولیدی خود را به اندازه  $\Delta P_{tie} - \Delta P_{tie-ref}$  تغییر دهند. این کار با استفاده از یک کنترل کننده PI قابل انجام می باشد. برای این کار مقدار  $\Delta P_{tie} - \Delta P_{tie-ref}$  به عنوان سیگنال کنترلی به کنترل کننده PI واحدهایی که در کنترل فرکانس مشارکت دارند، ارسال می شود. هر واحد در پاسخ به سیگنال دریافتی، توان خروجی خود را تغییر می دهد، کنترل کننده PI باعث می شود که در نهایت، مجموع تغییرات توان همه منابعی که در کنترل فرکانس شرکت کرده اند برابر  $\Delta P_{tie} - \Delta P_{tie-ref}$  شود. برای بدست آوردن مقدار کلی تغییرات توان هر واحد، لازم است تا مقدار تغییر توان ناشی از تغییر فرکانس و مقدار تغییر توان ناشی از سیگنال کنترلی با هم جمع شود.

بر اساس مطالب بیان شده، مدل خطی شده کنترل فرکانس ریزشبه در حالت اتصال به شبکه مانند شکل (۴-۸) خواهد شد. همانطور که مشخص است در این حالت، فرض شده است که توان خروجی پیل سوختی ثابت بوده و در کنترل فرکانس مشارکت نمی کند. بنابراین، سیگنال کنترلی فقط برای ذخیره ساز و میکروتوربین ارسال می شود. همچنین، EV به دو صورت بار و ذخیره ساز مدل شده

است که هر یک از آنها به ترتیب مدل خودروهای الکتریکی در حالت شارژ و دشارژ را مدل سازی می کنند [۸].



شکل ۴-۸. بلوک دیاگرام مدل خطی شده کنترل کننده فرکانس در حالت اتصال به شبکه [۸]

بر اساس شکل (۴-۸)، رابطه بین تغییرات توان ریزشبهه و تغییرات توان میکروتوربین و ذخیره سازها در حالت اتصال به شبکه، بصورت رابطه (۴-۱۶) و (۴-۱۷) می باشد.

$$\Delta P_{MTug} = K_{RMTug}(s) \Delta P_{tie} \quad (۴-۱۶)$$

$$\Delta P_{ESug} = K_{RESug}(s) \Delta P_{tie} \quad (۴-۱۷)$$

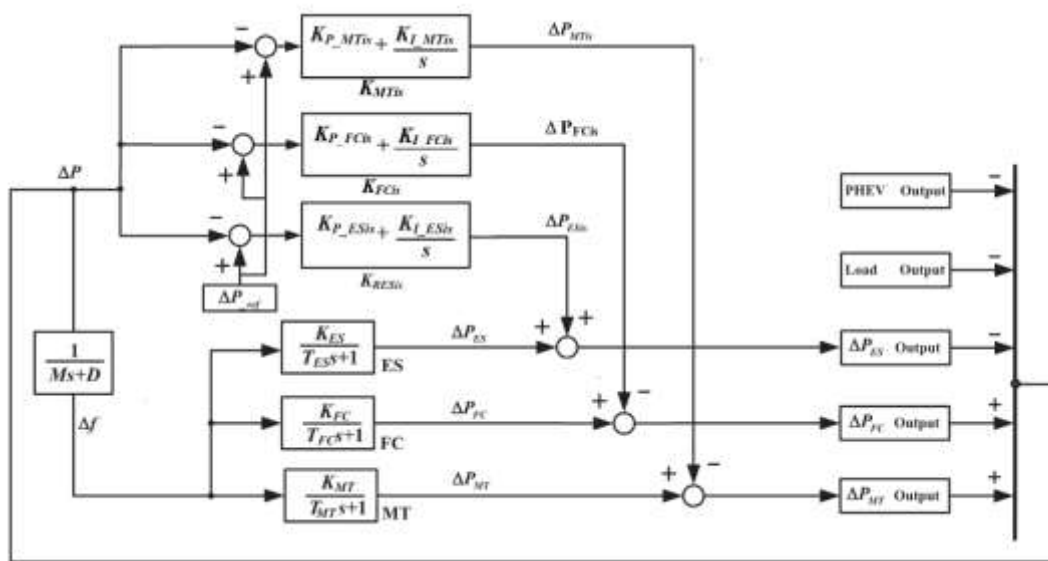
در صورت مشارکت پیل سوختی در کنترل فرکانس، رابطه تغییرات توان آن مشابه با میکروتوربین و ذخیره سازها می باشد که در روابط بالا نشان داده شد. در روابط بالا  $K_{RMTug}$ ،  $K_{RESug}$  به ترتیب کنترل کننده های PI میکروتوربین و ذخیره ساز می باشند که در حالت اتصال به شبکه، بصورت روابط زیر تعریف می شوند [۸].

$$K_{RMTug}(s) = K_{P-MTug} + \frac{K_{I-MTug}}{s} \quad (18-4)$$

$$K_{RESug}(s) = K_{P-RESug} + \frac{K_{I-RESug}}{s} \quad (19-4)$$

که در این معادلات،  $K_{I-MTug}$  و  $K_{P-MTug}$  به ترتیب ضرایب انتگرالی و تناسبی کنترل کننده-های PI میکروتوربین در حالت متصل به شبکه و  $K_{I-RESug}$  و  $K_{P-RESug}$  به ترتیب انتگرالی و تناسبی کنترل کننده‌های PI ذخیره‌ساز در حالت متصل به شبکه می‌باشند. با استفاده از روابط بالا و مقدار تغییرات توان اکتیو ریزشبکه، می‌توان تغییرات توان تولیدی هر واحد را محاسبه کرد.

در حالت جزیره‌ای ریزشبکه از شبکه اصلی جدا می‌باشد و کل  $\Delta P$  باید توسط منابع ریزشبکه تامین یا جبران شود. بنابراین تنها تفاوت این حالت با حالت متصل به شبکه این است که، به جای ارسال  $\Delta P_{ie} - \Delta P_{ie-ref}$  به واحدهای مشارکت کننده در کنترل فرکانس، مقدار  $\Delta P$  برای آن‌ها ارسال می‌شود و مابقی فرآیند مانند حالت اتصال به شبکه می‌باشد. شکل (۴-۹)، بلوک دیاگرام مدل خطی شده کنترل کننده فرکانس در حالت جزیره‌ای را نشان می‌دهد. از شکل مشخص است که در این حالت علاوه بر میکروتوربین و ذخیره‌ساز، پیل سوختی نیز در کنترل فرکانس مشارکت می‌کند [۸].



شکل ۴-۹. بلوک دیاگرام مدل خطی شده کنترل کننده فرکانس در حالت جزیره‌ای [۸]

بر اساس بلوک دیاگرام کنترلی، رابطه بین تغییرات توان ریزشبهه و تغییرات توان میکروتوربین، تغییرات توان ذخیره‌سازها و تغییرات توان پیل سوختی در حالت جزیره‌ای، بصورت روابط (۴-۲۰) الی (۴-۲۲) قابل بیان است.

$$\Delta P_{MTis} = K_{RMTis}(s) \Delta P \quad (۴-۲۰)$$

$$\Delta P_{ESis} = K_{RESis}(s) \Delta P \quad (۴-۲۱)$$

$$\Delta P_{FCis} = K_{FCis}(s) \Delta P \quad (۴-۲۲)$$

در روابط بالا،  $K_{RMTis}$ ،  $K_{RESis}$  و  $K_{FCis}$  به ترتیب کنترل کننده‌های PI میکروتوربین، ذخیره‌سازها و پیل سوختی می‌باشند که در حالت جزیره‌ای، بصورت روابط زیر تعریف می‌شوند.

$$K_{RMTis}(s) = K_{P-MTis} + \frac{K_{I-MTis}}{s} \quad (۴-۲۳)$$

$$K_{RESis}(s) = K_{P-ESis} + \frac{K_{I-ESis}}{s} \quad (۴-۲۴)$$

$$K_{FCis}(s) = K_{P-FCis} + \frac{K_{I-FCis}}{s} \quad (۴-۲۵)$$

مانند حالت قبل، در حالت جزیره‌ای نیز با استفاده از روابط بالا و مقدار تغییرات توان اکتیو ریزشبهه، می‌توان تغییرات توان تولیدی هر واحد را محاسبه کرد. که در این معادلات،  $K_{I-MTis}$  و  $K_{P-MTis}$  به ترتیب ضرایب انتگرالی و تناسبی کنترل کننده‌های PI میکروتوربین در حالت مستقل از شبکه،  $K_{I-FCis}$  و  $K_{P-FCis}$  به ترتیب ضرایب انتگرالی و تناسبی کنترل کننده‌های PI پیل سوختی در حالت مستقل از شبکه و  $K_{I-ESis}$  و  $K_{P-ESis}$  به ترتیب ضرایب انتگرالی و تناسبی کنترل کننده‌های PI ذخیره‌ساز در حالت مستقل از شبکه می‌باشند.

کنترل کننده PI با وجود ساختار ساده‌ای که دارد به دلیل عملکرد بسیار خوب، در بسیاری از کنترل کننده‌های صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. با وجود کارایی بسیار خوب این کنترل کننده، اگر

تنظیم ضرایب این کنترل کننده با دقت انجام نشود، می تواند عملکرد کل سیستم را تحت تاثیر قرار دهد. برای تنظیم ضرایب کنترل کننده PI، روش ها و الگوریتم های زیادی ارائه شده است. در این پژوهش از روش ارائه شده در مرجع [۵۵] برای تنظیم ضرایب کنترل کننده PI میکروتوربین، پیل سوختی و خودروهای الکتریکی استفاده شده است.

در [۵۵] برای انتخاب بهینه ضرایب کنترل کننده PI از الگوریتم بهینه سازی PSO استفاده شده است. تابع هزینه PSO در این پژوهش، اندازه فراجش، خطای ماندگار و زمان نشست پاسخ فرکانس ریز شبکه انتخاب شده است. بنابراین، تابع هزینه بهینه سازی PSO به صورت رابطه (۴-۲۶) قابل بیان می باشد.

$$C = \alpha.(SE) + \beta.(OS) + \gamma.(ST) \quad (۴-۲۶)$$

در رابطه (۴-۲۶)، پارامترهای SE، OS و ST به ترتیب خطای ماندگار، فراجش و زمان نشست پاسخ هر واحد به تغییرات پله ای بار و توان تولیدی دیگر واحدها می باشد. همچنین  $\alpha$ ،  $\beta$  و  $\gamma$  ضرایب وزنی هستند که میزان اهمیت هر یک از مشخصه ها را نشان می دهند.

برای اجرای بهینه سازی پارامترهای کنترل کننده با استفاده از PSO، در ابتدا پارامترها به طور تصادفی انتخاب می شوند و برای آنها تابع هزینه محاسبه می شود. در ادامه، با استفاده از فرآیند PSO، در هر تکرار تعدادی پاسخ به عنوان پارامترهای کنترل کننده انتخاب می شود و با محاسبه تابع هزینه برای آنها، میزان شایستگی آنها مشخص می شود. این کار تا زمانی ادامه پیدا می کند که بهینه سازی به تعداد تکرارهای مشخصی برسد که در پایان، پاسخ بهینه سازی به عنوان ضرایب کنترل کننده های PI واحدها انتخاب می شوند.

در این پژوهش یک روش جدید برای تعیین میزان مشارکت هر واحد تولیدی در تنظیم فرکانس ارائه شده است که می تواند سرعت کنترل فرکانس را بهبود دهد. بر اساس روش ارائه شده، میزان

مشارکت هر واحد تولید توان در پاسخ‌گویی به تغییرات فرکانس، بر اساس توان خروجی و توان نامی آن واحد بدست می‌آید. چگونگی این کار در ادامه توضیح داده شده است.

اگر بار سیستم به طور ناگهانی افزایش یابد لازم است تا واحدهای تولید توان، توان تولیدی خود را افزایش دهند تا تغییرات توان بار جبران شود. در این حالت، میزان افزایش توان تولیدی واحدها یکسان نمی‌باشد و هر واحد بر اساس توان نامی خود و میزان توان تولیدی در لحظه قبل، می‌تواند توان تولیدی خود را افزایش دهد. به عنوان مثال، اگر توان نامی میکروتوربین از توان نامی پیل سوختی بیش‌تر باشد میزان افزایش توان تولیدی آن در برابر افزایش بار، بیش‌تر از میزان افزایش توان تولیدی پیل سوختی خواهد بود. البته این موضوع به شرطی ممکن است که توان تولیدی میکروتوربین در لحظه قبل، نزدیک به توان نامی آن نباشد. ولی اگر در لحظه قبل از افزایش بار، میکروتوربین در حال توان نامی خود باشد دیگر قادر به افزایش توان نخواهد بود. بنابراین، این موضوع باید در لحظه ارسال سیگنال کنترلی برای واحدها در نظر گرفته شود. روش رایج برای این کار، استفاده از چند قید می‌باشد که مقدار توان هر واحد را بین حداکثر و حداقل مقدار آن محدود می‌کند. ولی در این پژوهش علاوه بر استفاده از این قیدها، یک محاسبه جانبی انجام می‌شود تا سیگنال کنترلی که باید برای هر واحد مشارکت‌کننده در کنترل فرکانس ارسال شود، بدست آید.

با فرض اینکه هر سه میکروتوربین، پیل سوختی و ذخیره‌ساز در کنترل فرکانس شرکت داشته باشند کل توان قابل تولید ریزش‌بکه با استفاده از رابطه (۴-۲۷) قابل محاسبه می‌باشد.

$$P_t = P_{N\_MT} + P_{N\_FC} + P_{N\_ES} \quad (۴-۲۷)$$

در رابطه (۴-۲۳)،  $P_t$  کل توان نامی ریزش‌بکه می‌باشد و  $P_{N\_MT}$ ،  $P_{N\_FC}$  و  $P_{N\_ES}$  به ترتیب توان

نامی میکروتوربین، پیل سوختی و مجموعه ذخیره‌سازها می‌باشند.



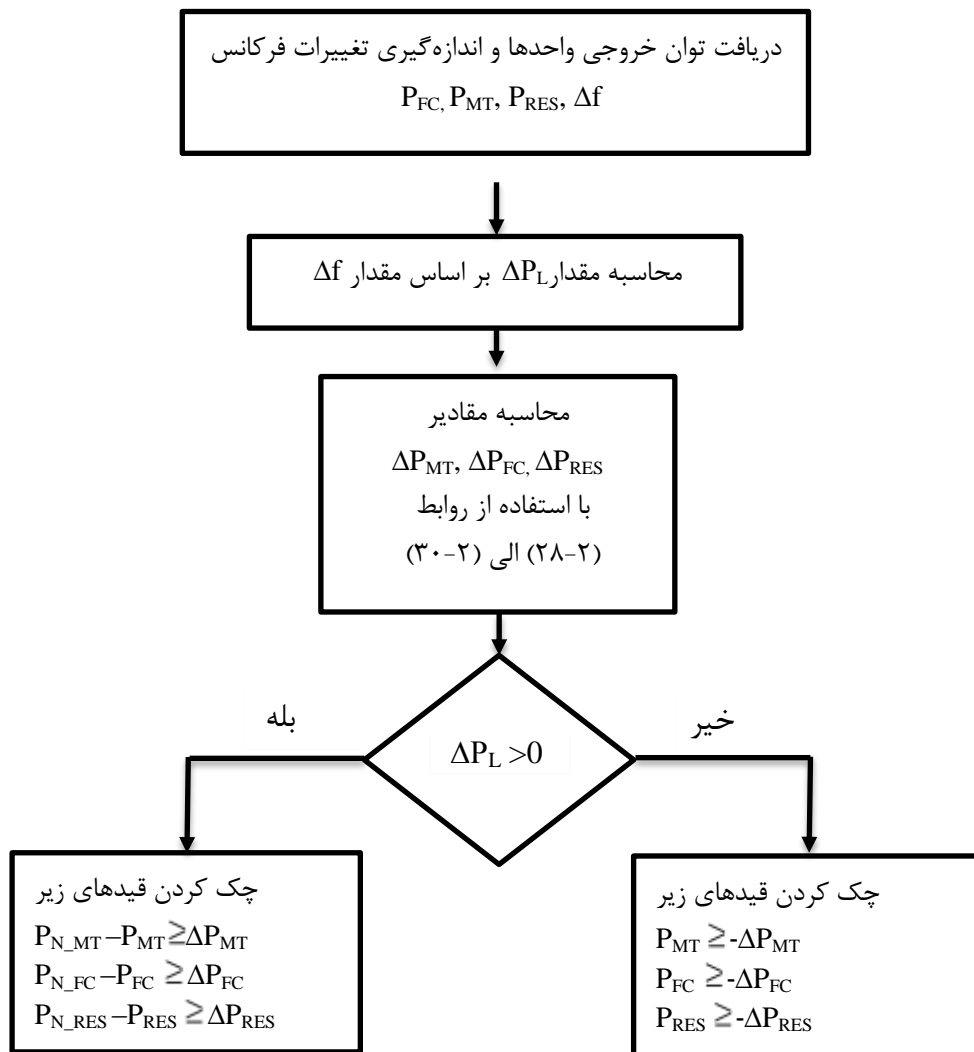
بر اساس روش بیان شده اگر در لحظه  $t$  مقدار بار به اندازه  $\Delta P_L$  تغییر کند مقدار تغییر توان میکروتوربین، پیل سوختی و ذخیره ساز به ترتیب با استفاده از روابط (۲۸-۴) تا (۳۰-۴) محاسبه می شود.

$$\Delta P_{MT} = \frac{P_{N\_MT}}{P_t} \times \Delta P_L \quad (28-4)$$

$$\Delta P_{FC} = \frac{P_{N\_FC}}{P_t} \times \Delta P_L \quad (29-4)$$

$$\Delta P_{RES} = \frac{P_{N\_RES}}{P_t} \times \Delta P_L \quad (30-4)$$

در مرحله بعد باید بررسی شود که آیا هر یک از سه واحد بالا امکان تغییر توان تولیدی به اندازه ای که در مرحله قبل برای آن ها محاسبه شد را دارند یا خیر. در صورتی که این امکان برای آن ها فراهم باشد مقدار تغییرات توان مرجع برای آن ها ارسال می شود اما اگر هر یک از واحدها این امکان را نداشته باشد محاسبات دوباره انجام می شود و حد مورد نظر برای واحدی که امکان محقق کردن مقدار تغییر توان تولیدی محاسبه شده در مرحله قبل را نداشت اعمال می شود. بررسی این که آیا واحدهای تولید توان می توانند مقادیر بدست آمده از روابط (۲۸-۴) الی (۳۰-۴) را محقق کنند یا خیر، با استفاده از فلوچارت شکل (۱۰-۴) انجام می شود.



شکل ۴-۱۰. فلوجارت بررسی امکان پاسخ‌گویی واحدها به سیگنال کنترلی

در فلوجارت بالا، سمت راست برای حالتی است که  $\Delta P_L$  منفی می‌شود که نشان دهنده‌ی کاهش بار می‌باشد و سمت چپ نیز برای حالتی است که  $\Delta P_L$  مثبت بوده و نشان دهنده‌ی افزایش بار می‌باشد.

برای مثال در حالتی که  $\Delta P_L$  مثبت است اگر مقدار توان تولیدی پیل سوختی نزدیک مقدار نامی باشد و پیل سوختی نتواند مقدار  $\Delta P_{FC}$  را که با استفاده از رابطه (۲۸-۴) محاسبه شده است را محقق کند مقدار توان تولیدی آن برابر مقدار توان نامی تنظیم می‌شود و مقدار  $\Delta P_L - (P_{N\_FC} - P_{FC})$  باید

توسط دو واحد دیگر تامین شود. در نتیجه در ادامه، رابطه (۳۱-۴) جایگزین رابطه (۲۷-۴) می شود و  $\Delta P'_L$  نیز با استفاده از رابطه (۳۲-۴) دوباره محاسبه می شود.

$$P_t = P_{N\_MT} + P_{N\_ES} \quad (۳۱-۴)$$

$$\Delta P'_L = \Delta P_L - (P_{N\_FC} - P_{FC}) \quad (۳۲-۴)$$

در ادامه،  $\Delta P'_L$  جایگزین مقدار  $\Delta P_L$  در رابطه (۲۸-۴) و (۳۰-۴) می شود و مقادیر  $\Delta P_{MT}$  و  $\Delta P_{RES}$  دوباره محاسبه می شوند. در این حالت باز هم لازم است تا قیدهایی نشان داده شده در فلوچارت شکل (۱۰-۴) بررسی شود و در صورتی که یکی از قیدها نقض شده بود باید روند اصلاح مقادیر  $\Delta P_{RES}$  و  $\Delta P_{MT}$  باز هم تکرار شود. این روند تا جایی ادامه پیدا می کند که هیچ قیدی نقض نشود و بعد از آن مقادیر مرجع برای تغییر توان تولیدی برای کنترل کننده های PI منابع ارسال می شود.

کارایی کنترل کننده ارائه شده، در فصل بعد با شبیه سازی یک ریزش شبکه نمونه در نرم افزار matlab بررسی خواهد شد.



# فصل ۵- نتایج شبیه سازی

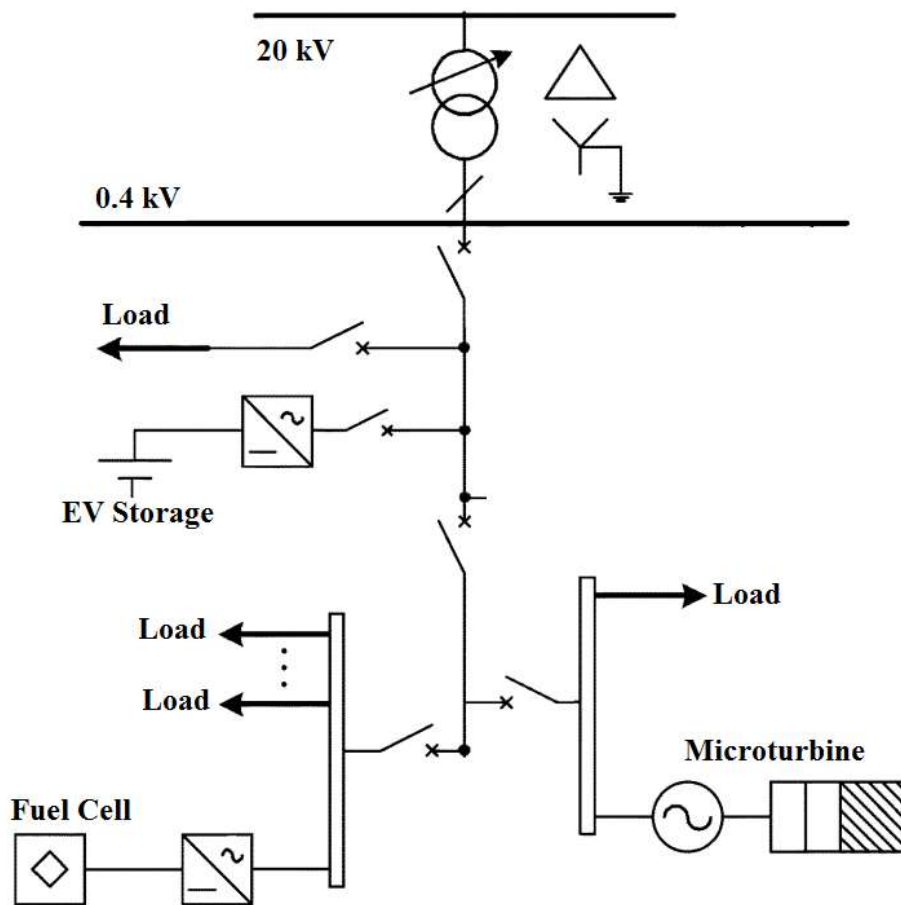
## ۵-۱- مقدمه

در این فصل کنترل‌کننده ارائه شده در فصل قبل بر روی یک ریزشبکه نمونه اعمال می‌شود تا کارایی آن بررسی شود. ریزشبکه نمونه از یک میکروتوربین، یک پیل سوختی و ذخیره‌ساز تشکیل شده است که ساختار آن در فصل قبل توضیح داده شده است. ریزشبکه مورد مطالعه می‌تواند بصورت متصل به شبکه اصلی و یا در حالت جزیره‌ای کار کند.

برای بررسی کارایی روش ارائه شده برای کنترل فرکانس، سناریو و مدهای کاری مختلف برای ریزشبکه در نظر گرفته می‌شود تا بیش‌تر شرایط کاری سیستم مدل شود و رفتار سیستم با استفاده از کنترل‌کننده ارائه شده، بررسی شود.

## ۵-۲- ساختار ریزشبکه

ساختار سیستم مورد مطالعه در شکل (۵-۱) نشان داده شده است. همانطور که از شکل (۵-۱) مشخص است سیستم مورد مطالعه یک ریزشبکه با رنج ولتاژ فاز به فاز ۴۰۰ ولت می‌باشد که با استفاده از یک ترانسفورماتور کاهنده به سیستم توزیع ۲۰ کیلو ولت متصل می‌باشد فرکانس نامی ریزشبکه ۵۰ هرتز است و از یک میکروتوربین، چهار بار، یک پیل سوختی و یک ذخیره‌ساز تشکیل شده است. ذخیره‌ساز استفاده شده، تجمیع باتری همه خودروهای الکتریکی می‌باشد.



شکل ۵-۱. ساختار ریزشبکه مورد مطالعه

همانطور که در فصل قبل توضیح داده شد برای میکروتوربین از ژنراتور سنکرون استفاده شده است که ولتاژ خروجی و فرکانس آن برابر مقادیر نامی ریزشبکه می‌باشد بنابراین، میکروتوربین به طور مستقیم و بدون مبدل به ریزشبکه متصل شده است. پیل سوختی و ذخیره‌ساز خودروهای الکتریکی با استفاده از یک مبدل DC به AC به ریزشبکه متصل می‌شوند که امکان کنترل توان خروجی آن‌ها را فراهم می‌کند. چگونگی کنترل پیل سوختی و ذخیره‌ساز الکتریکی در فصل چهارم توضیح داده شد. میکروتوربین یک ژنراتور سنکرون ۲۰۰ KVA می‌باشد که محرک آن توربین گازی می‌باشد. ظرفیت پیل سوختی ۵ KW است و ظرفیت ذخیره‌ساز نیز ۷۰ KWh می‌باشد. کل بار ریزشبکه در حالت عادی ۸۰ KW می‌باشد.

سیستم مورد مطالعه می‌تواند در دو حالت کلی اتصال به شبکه اصلی و جزیره‌ای کار کند. بنابراین، در ابتدا دو بخش کلی در نظر گرفته شده است که در سناریو اول فرض شده است که ریزشبهه متصل به شبکه بوده و می‌تواند با شبکه تبادل توان داشته باشد و در سناریو دوم فرض شده است که ریزشبهه از شبکه اصلی جدا شده است و بصورت جزیره‌ای کار می‌کند. نتایج شبیه‌سازی برای هر یک از سناریوها با در نظر گرفتن مدها و تغییرات متفاوت در سیستم، در ادامه نشان داده می‌شود.

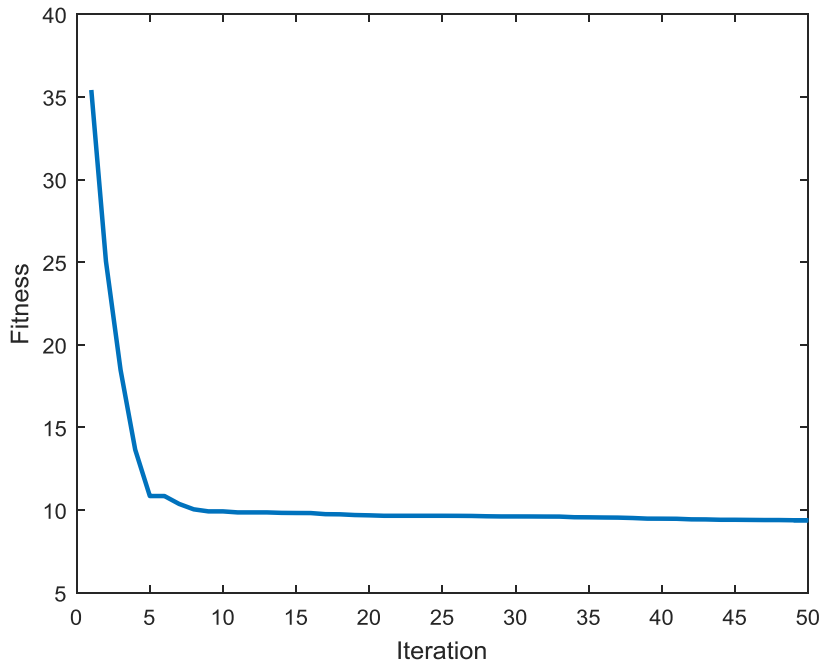
### ۳-۵- بهینه‌سازی پارامترهای کنترل‌کننده

در ابتدا ضرایب کنترل‌کننده‌های PI برای میکروتوربین، پیل سوختی و خودروهای الکتریکی بهینه‌سازی می‌شود برای این کار از الگوریتم PSO استفاده می‌شود. تابع هزینه PSO در فصل سوم ارائه شد.

در تابع هزینه که در رابطه (۴-۲۷) نشان داده شد، ضرایب  $\alpha$ ،  $\beta$  و  $\gamma$  به ترتیب ۱۰، ۱ و ۱ تنظیم می‌شود. علت بزرگ بودن  $\alpha$  نسبت به دو پارامتر دیگر این است که صفر شدن خطای ماندگار مهمتر از کاهش فراجهدش و زمان نشست می‌باشد.

برای الگوریتم PSO، تعداد ذرات برابر ۱۰۰ و حداکثر تعداد تکرارها برابر ۵۰ تنظیم شده است. شکل (۵-۲) تغییرات تابع هزینه بر اساس تعداد تکرارها را نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، مشخص است که با افزایش تعداد تکرارها، تابع هزینه کاهش می‌یابد که نشان دهنده‌ی بهبود عملکرد کنترل‌کننده‌ها می‌باشد. جدول (۵-۱) ضرایب بدست آمده برای کنترل‌کننده PI سه واحد میکروتوربین، پیل سوختی و ذخیره‌ساز (تجمیع خودروهای الکتریکی) را نشان می‌دهد. در این جدول  $K_p$  نشان دهنده‌ی ضریب تناسبی و  $K_I$  نشان دهنده‌ی ضریب انتگرالی کنترل‌کننده PI می‌باشد.





شکل ۵-۲. تغییرات تابع هزینه بر اساس تعداد تکرارها

جدول ۵-۱. پارامترهای کنترل کننده‌ها

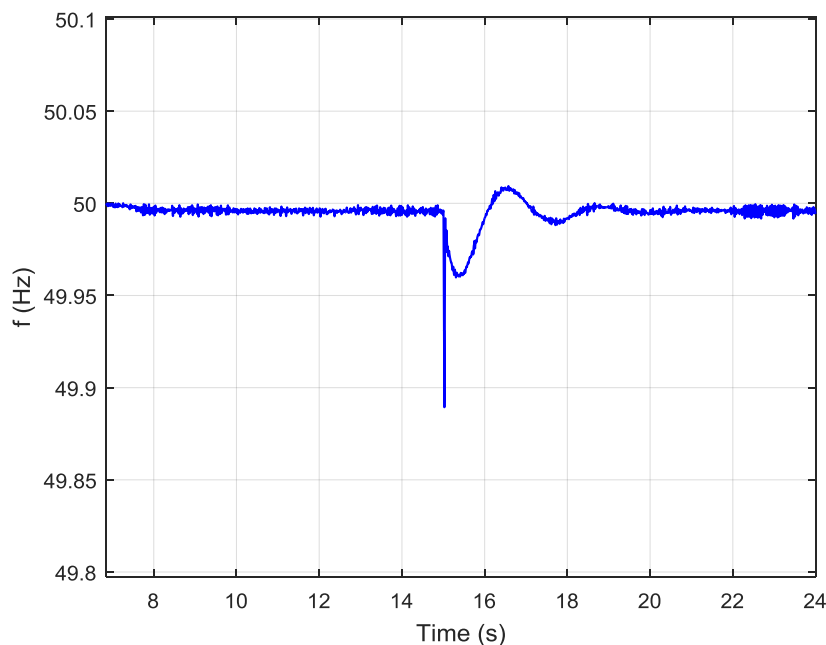
واحد تولیدی	پارامتر	مقدار
میکروتوربین	$K_{p\_WT}$	۰.۵
	$K_{I\_WT}$	۱
پیل سوختی	$K_{p\_FC}$	۰.۲
	$K_{I\_FC}$	۱۰
خودرو الکتریکی	$K_{p\_EV}$	۰.۱
	$K_{I\_EV}$	۴

#### ۵-۴- عملکرد ریزشبهه در حالت اتصال به شبکه اصلی

شبکه اصلی می‌تواند در هر لحظه کمبود یا افزایش توان در ریزشبهه را جبران کرده و فرکانس آن را تنظیم کند بنابراین، در زمان‌هایی که ریزشبهه به شبکه اصلی متصل می‌باشد، کنترل فرکانس ریزشبهه مسئله مشکل‌سازی نخواهد بود و تغییرات بار یا توان تولیدی در ریزشبهه، توسط شبکه اصلی جبران می‌شود که از تغییرات بزرگ فرکانس جلوگیری می‌کند.

#### ۵-۴-۱- سناریو اول، افزایش ۲۵ درصدی بار ریزشبهه

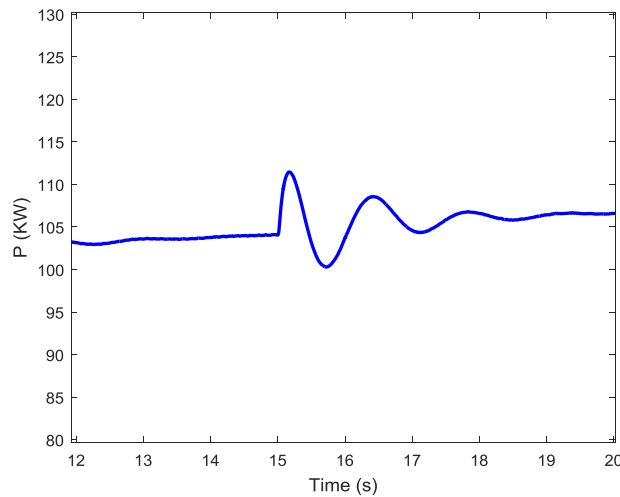
**حالت ۱:** در حالت اول فرض شده است تنها میکروتوربین در کنترل فرکانس شرکت دارد. ریزشبهه در حالت اتصال به شبکه با بار ۸۰ کیلو وات در حال کار می‌باشد، میکروتوربین حدود نصف توان نامی‌اش را تولید می‌کند و مازاد توان ریزشبهه به شبکه تزریق می‌شود. در ثانیه ۱۵، بار ریزشبهه ۲۵ درصد افزایش می‌یابد. برای این حالت، فرکانس ریزشبهه در شکل (۵-۳) نشان داده شده است.



شکل ۵-۳. فرکانس ریزشبهه در سناریو ۱ برای افزایش ۲۵ درصدی بار (حالت ۱)

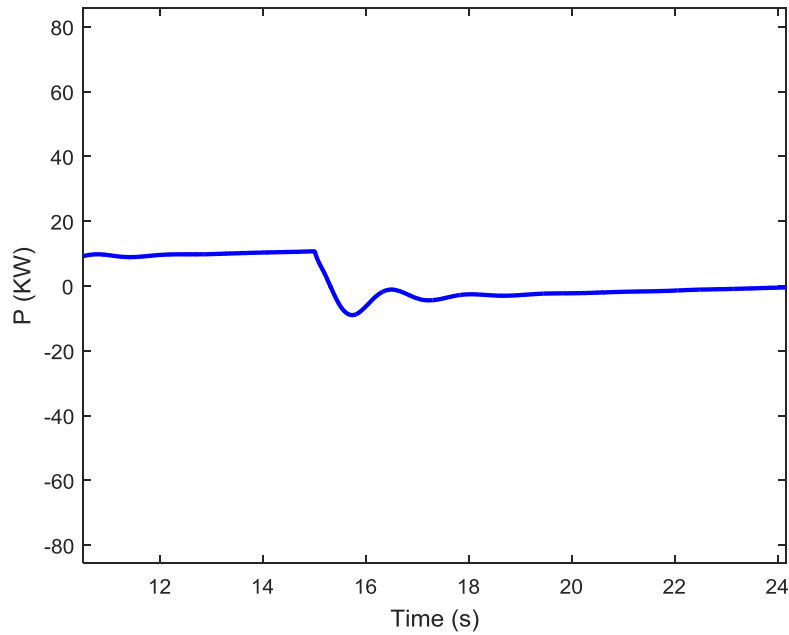
با توجه به شکل (۳-۵) مشخص است که در این حالت، فرکانس ریزش‌بکه تغییرات بزرگی ندارد چون همانطور که قبلاً هم توضیح داده شد بعد از هر گونه تغییر بار، شبکه اصلی با جذب یا تزریق توان به ریزش‌بکه، به سرعت تعادل توان در ریزش‌بکه را برقرار می‌کند.

در شکل (۴-۵) توان تولیدی میکروتوربین در این حالت نشان داده شده است. مشخص است که با وجود تغییر ۲۵ درصدی بار، توان خروجی میکروتوربین تغییر بزرگی ندارد علت آن این است که، تغییرات توان به سرعت توسط شبکه جبران می‌شود. بنابراین لازم نیست که میکروتوربین تمام تغییرات بار را جبران کند. این موضوع از شکل (۵-۵) مشخص است.



شکل ۴-۵. توان تولیدی میکروتوربین در سناریو ۱ برای افزایش ۲۵ درصدی بار (حالت ۱)

شکل (۵-۵) توان مبادله ای ریزش‌بکه و شبکه اصلی را نشان می‌دهد. مقدار مثبت نشان دهنده ی انتقال توان از ریزش‌بکه به شبکه اصلی می‌باشد. مشخص است که با افزایش بار، توان انتقالی از ریزش‌بکه به شبکه کاهش می‌یابد تا از افت فرکانس در ریزش‌بکه جلوگیری شود.

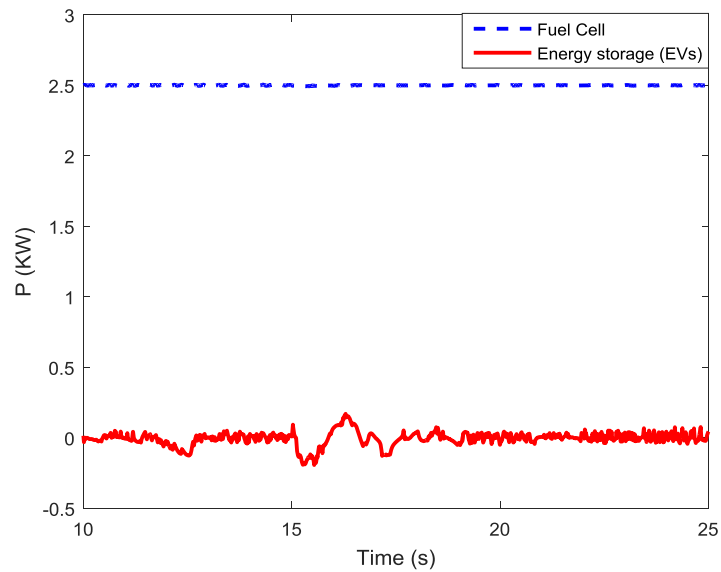


شکل ۵-۵. توان انتقالی از ریزشبه به شبکه اصلی در سناریو ۱ برای افزایش ۲۵ درصدی بار (حالت ۱)

در شکل (۵-۶)، توان خروجی پیل سوختی و ذخیره‌ساز برای حالت ۱ نشان داده شده است. با

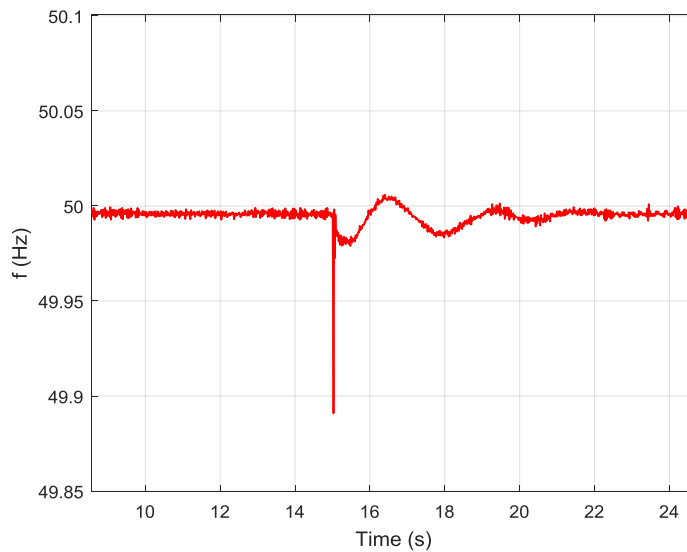
توجه به این دو شکل مشخص است که با وجود تغییر بار ریزشبه، توان پیل سوختی و ذخیره‌ساز

تغییر نمی‌کند که دلیل آن عدم شرکت این دو واحد در کنترل فرکانس می‌باشد.



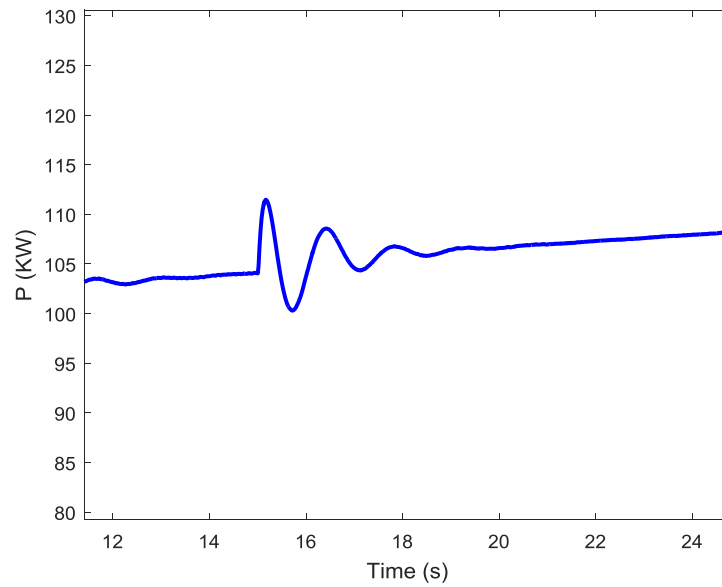
شکل ۵-۶. توان خروجی ذخیره‌ساز و پیل سوختی در سناریو ۱ برای افزایش ۲۵ درصدی بار (حالت ۱)

**حالت ۲:** در حالت دوم فرض می‌شود که مانند حالت قبل بار سیستم ۲۵ درصد بیش‌تر می‌شود ولی در این حالت، پیل سوختی و ذخیره‌ساز نیز در کنترل فرکانس مشارکت دارند. شکل (۷-۵) فرکانس ریزشبه در این حالت را نشان می‌دهد. مشخص است که در این حالت، تغییرات فرکانس نسبت به حالت قبل کم‌تر می‌شود.



شکل ۷-۵. فرکانس ریزشبه در سناریو ۱ برای افزایش ۲۵ درصدی بار (حالت ۲)

شکل (۸-۵) تغییرات توان تولیدی میکروتوربین در حالت ۲ را نشان می‌دهد مشخص است که در این حالت، همانند حالت قبل با افزایش بار ریزشبه توان تولیدی میکروتوربین نیز افزایش می‌یابد تا فرکانس ریزشبه افت نکند.

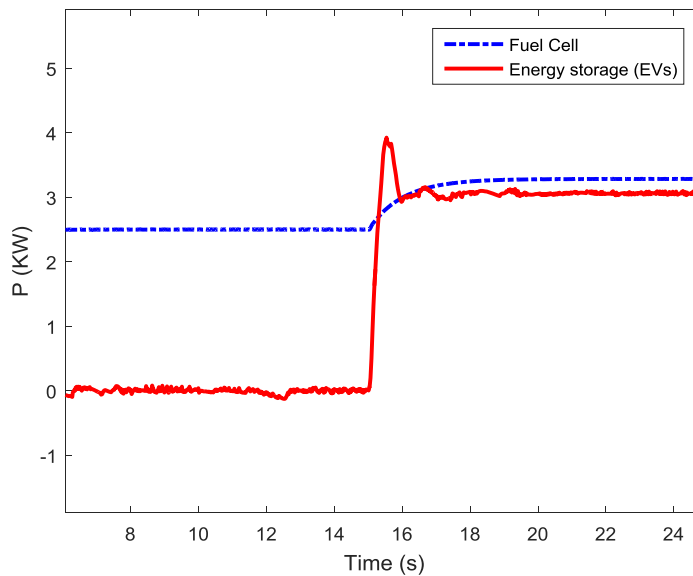


شکل ۵-۸. توان تولیدی میکروتوربین در سناریو ۱ برای افزایش ۲۵ درصدی بار (حالت ۲)

شکل (۹-۵) تغییرات توان پیل سوختی و ذخیره‌ساز در حالت ۲ را نشان می‌دهد. از شکل (۹-۵) مشخص است که در این حالت با افزایش بار ریزش‌بکه، توان تولیدی پیل سوختی افزایش می‌یابد و ذخیره‌ساز نیز شروع به دشارژ می‌کند تا تعادل توان سریع‌تر برقرار شود و فرکانس ریزش‌بکه افت نکند. با توجه به شکل (۹-۵) دو نکته مهم زیر قابل برداشت می‌باشد:

۱. تغییرات توان ذخیره‌ساز در پاسخ به تغییرات بار بیشتر از تغییرات توان خروجی پیل سوختی است.

۲. تغییرات توان ذخیره‌ساز سریعتر از تغییرات توان پیل سوختی می‌باشد.



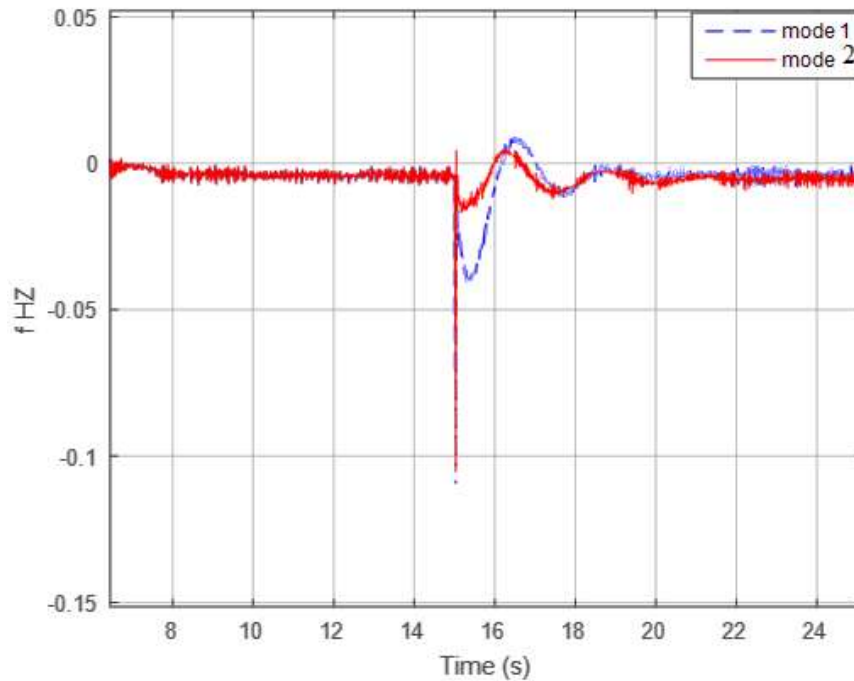
شکل ۵-۹. توان ذخیره‌ساز و پیل سوختی در سناریو ۱ برای افزایش ۲۵ درصدی بار (حالت ۲)

همانطور که در شکل (۵-۹) قابل مشاهده می‌باشد با تغییر ۲۵ درصدی بار، توان خروجی پیل سوختی کمتر از یک کیلو وات افزایش می‌یابد ولی توان دشارژ ذخیره ساز نزدیک به ۳ کیلووات افزایش می‌یابد. دلیل این موضوع این است که همانطور که در فصل سوم توضیح داده شد، هر واحد به میزان ظرفیت نامی و مقدار توان رزرو خود در کنترل فرکانس مشارکت می‌کند. در این جا، ظرفیت پیل سوختی ۵ کیلووات و ظرفیت ذخیره ساز ۷۰ کیلو وات است و از طرف دیگر قبل از تغییر بار، پیل سوختی در حال تولید نصف توان نامی خود بود در حالی که توان دشارژ ذخیره ساز صفر بود بنابراین در لحظه افزایش بار، توان رزرو ذخیره‌ساز بیشتر بود. با توجه به این دو دلیل، طبیعی است که میزان تغییر توان ذخیره‌ساز در پاسخ به تغییر بار بیش‌تر از پیل سوختی باشد.

ذخیره‌سازها دارای دینامیک بسیار سریعی می‌باشند. با توجه به تحقیقات فراوانی که انجام شده است دینامیک ذخیره سازها چندین برابر سریع‌تر از پیل سوختی است. با توجه به این موضوع، مشخص است که تغییرات توان ذخیره‌ساز در پاسخ به تغییرات بار، بسیار سریع‌تر از تغییرات توان پیل سوختی خواهد بود که این موضوع در شکل (۵-۹) قابل مشاهده می‌باشد.

برای مقایسه عملکرد کنترل کننده فرکانس، تغییرات فرکانس ریزش‌بکه در حالت ۱ و ۲ در

شکل (۵-۱۰) نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۰. تغییرات فرکانس ریزش‌بکه در حالت ۱ و ۲ برای سناریو ۱

با توجه به شکل (۵-۹) مشخص است که تغییرات فرکانس ریزش‌بکه در حالت ۲ بسیار کم‌تر از

حالت ۱ می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مشارکت پیل سوختی و ذخیره‌ساز می‌تواند باعث

بهبود کنترل فرکانس شود.

#### ۵-۴-۲- سناریو دوم، افزایش ۵۰ درصدی بار ریزش‌بکه

در سناریو دوم همانند سناریو اول فرض می‌شود که در حالت ۱، فقط میکروتوربین در کنترل

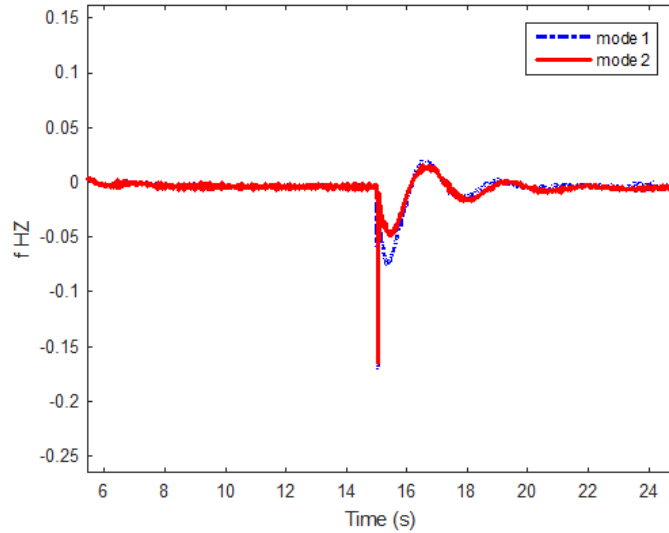
فرکانس مشارکت داشته باشد و در حالت ۲ علاوه بر میکروتوربین، پیل سوختی و ذخیره‌ساز نیز

کنترل فرکانس شرکت دارند. در این سناریو فرض شده است که در ثانیه ۱۵، بار سیستم ۵۰ درصد

افزایش یابد. در شکل (۵-۱۱)، تغییرات فرکانس ریزش‌بکه برای حالت ۱ و ۲ نشان داده شده است.



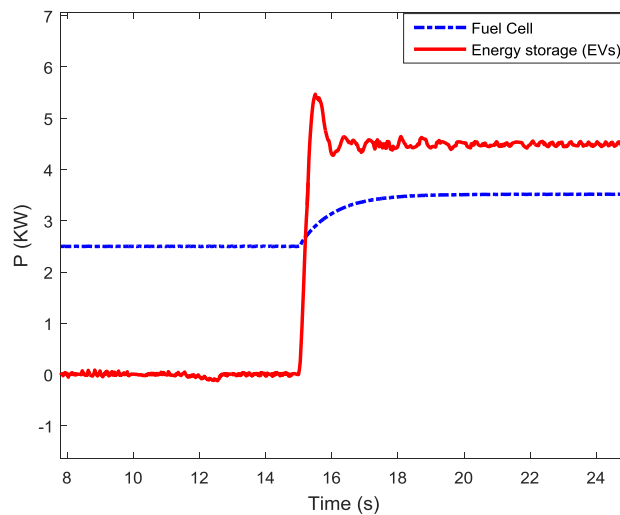
بر اساس شکل (۵-۱۱)، مشخص است که مانند سناریو ۱، تغییرات فرکانس برای حالت ۲ کم‌تر از حالت ۱ می‌باشد که علت آن، مشارکت پیل سوختی و ذخیره‌ساز در کنترل فرکانس می‌باشد.



شکل ۵-۱۱. تغییرات فرکانس ریزش‌بکه در حالت ۱ و ۲ برای سناریو ۲

شکل (۵-۱۲)، تغییرات توان پیل سوختی و ذخیره‌ساز در سناریو دوم برای حالت ۲ را نشان

می‌دهد.



شکل ۵-۱۲. توان ذخیره‌ساز و پیل سوختی در سناریو ۲ برای افزایش ۵۰ درصدی بار (حالت ۲)

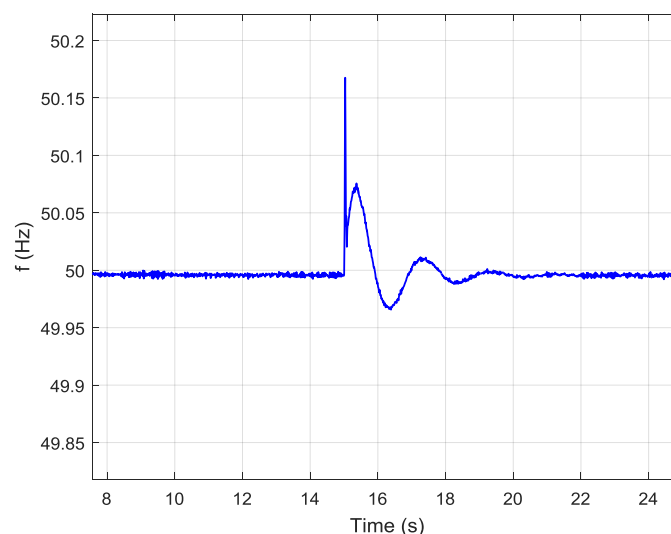
با توجه به شکل (۵-۱۲) مشخص است که با افزایش بار ریزش‌بکه، مقدار توان تولیدی پیل سوختی افزایش می‌یابد و ذخیره‌ساز نیز شروع به دشارژ می‌کند تا تعادل توان تولیدی و مصرفی سریع‌تر برقرار شود. از این شکل مشخص است که مقدار تغییرات توان پیل سوختی و ذخیره‌ساز نسبت به سناریو ۱ افزایش یافته است که علت آن بیش‌تر شدن مقدار افزایش بار ریزش‌بکه است. همانند سناریو ۱، تغییرات توان ذخیره‌ساز بیش‌تر و سریع‌تر از تغییرات توان پیل سوختی می‌باشد که علت آن در قسمت قبل توضیح داده شد.

### ۵-۴-۳- سناریو سوم، کاهش ۵۰ درصدی بار ریزش‌بکه

در سناریو سوم فرض می‌شود که توان ریزش‌بکه در ثانیه ۱۵، ۵۰ درصد کاهش یابد.

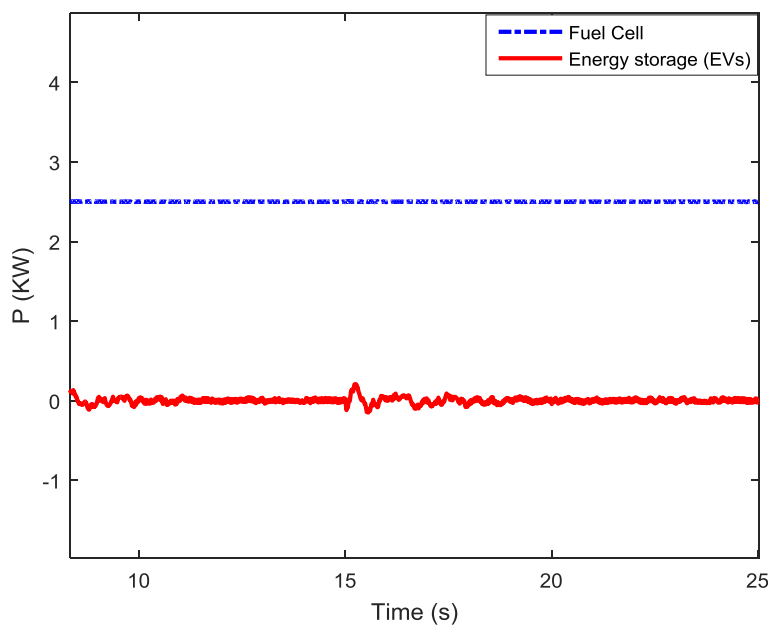
**حالت ۱:** برای این حالت، فرکانس ریزش‌بکه در شکل (۵-۱۳) نشان داده شده است. با توجه به

شکل (۵-۱۳) مشخص است که در ثانیه ۱۵، با کاهش توان ریزش‌بکه فرکانس آن افزایش می‌یابد ولی افزایش فرکانس سریعاً متوقف می‌شود و پس از کمی نوسان، فرکانس سیستم باز هم برابر مقدار نامی آن می‌شود. با توجه به اینکه ریزش‌بکه به شبکه اصلی متصل است، تغییرات فرکانس نسبت به تغییرات بار کم می‌باشد.



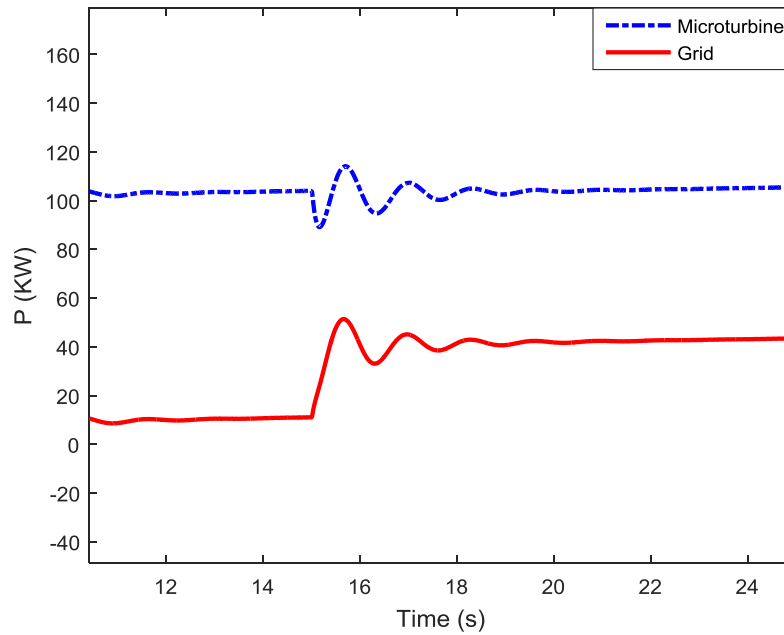
شکل ۵-۱۳. فرکانس ریزش شبکه در سناریو سوم برای کاهش ۵۰ درصدی بار ریزش شبکه (حالت ۱)

در شکل (۵-۱۴)، توان تولیدی پیل سوختی و توان مبادله‌ای ذخیره‌ساز با ریزش شبکه نشان داده شده است. با توجه به این که در حالت ۱، این دو واحد در کنترل فرکانس شرکت ندارد طبیعی است که با وجود تغییر بار، مقدار توان آنها تغییر نمی‌کند. البته در لحظه کاهش بار، توان ذخیره‌ساز کمی نوسان می‌کند که علت آن نوسان فرکانس ریزش شبکه می‌باشد.



شکل ۵-۱۴. توان ذخیره‌ساز و پیل سوختی در سناریو ۲ برای کاهش ۵۰ درصدی بار (حالت ۱)

در شکل (۵-۱۵)، توان تولیدی میکروتوربین و توان تزریق شده به شبکه نشان داده شده است، با توجه به شکل مشخص است که با کاهش بار ریزش شبکه، در ابتدا توان میکروتوربین کمی کاهش می‌یابد ولی بلافاصله توان تزریقی به شبکه افزایش یافته و تعادل توان در ریزش شبکه برقرار می‌شود.

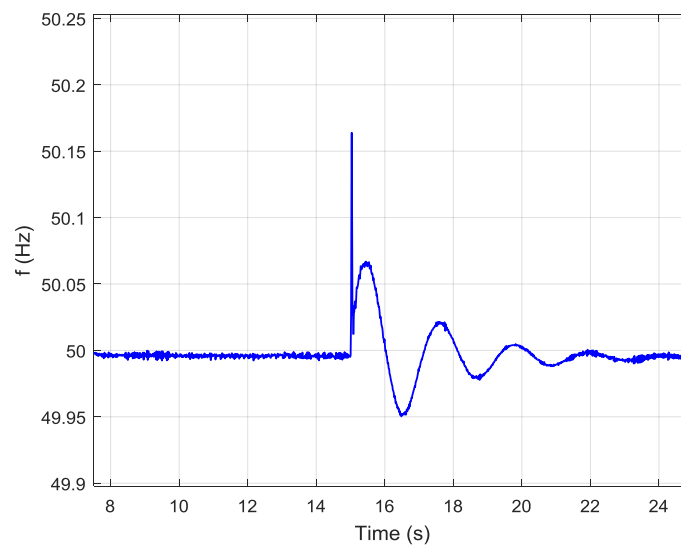


شکل ۵-۱۵. توان تولیدی میکروتوربین و توان تزریق شده به شبکه برای سناریو ۳ (حالت ۱)

**حالت ۲:** در این حالت علاوه بر میکروتوربین، پیل سوختی و ذخیره‌ساز نیز در کنترل فرکانس

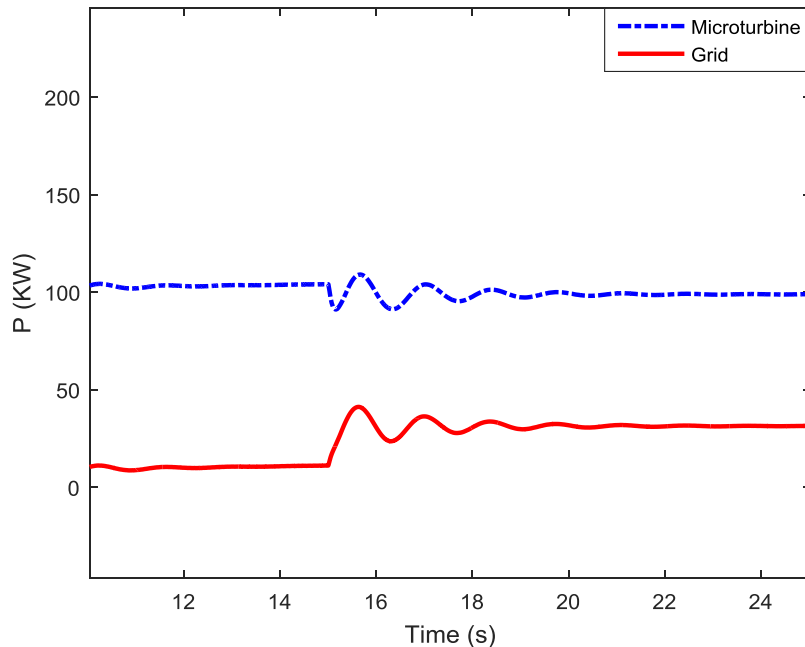
شرکت دارند. برای این حالت فرکانس ریزشبه در شکل (۵-۱۶) نشان داده شده است. مشخص است

که با وجود کاهش پنجاه درصدی بار، فرکانس سیستم تغییر محسوسی ندارد.



شکل ۵-۱۶. فرکانس ریزشبه در سناریو سوم برای کاهش ۵۰ درصدی بار ریزشبه (حالت ۲)

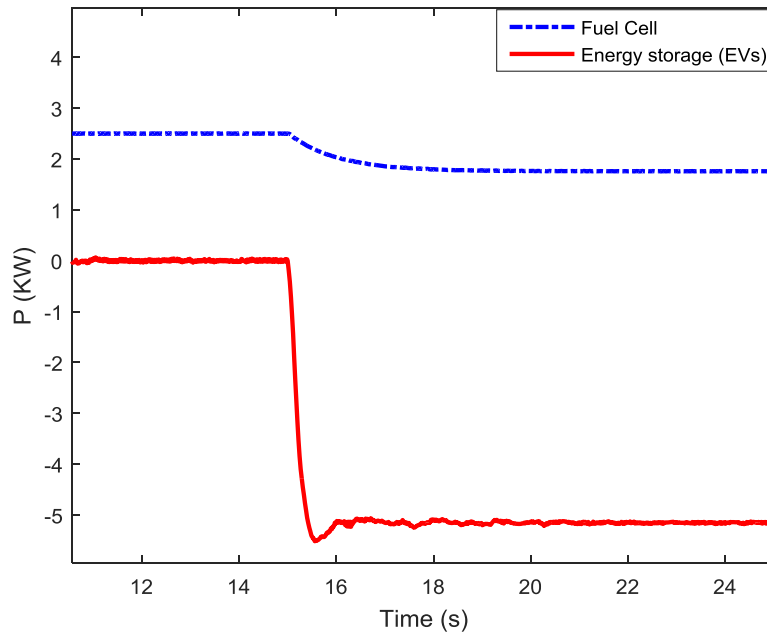
در شکل (۵-۱۷) توان تولیدی میکروتوربین و توان تزریقی به شبکه نشان داده شده است. مشخص است که بعد از کاهش بار ریزشبه، توان تزریقی به شبکه افزایش می‌یابد.



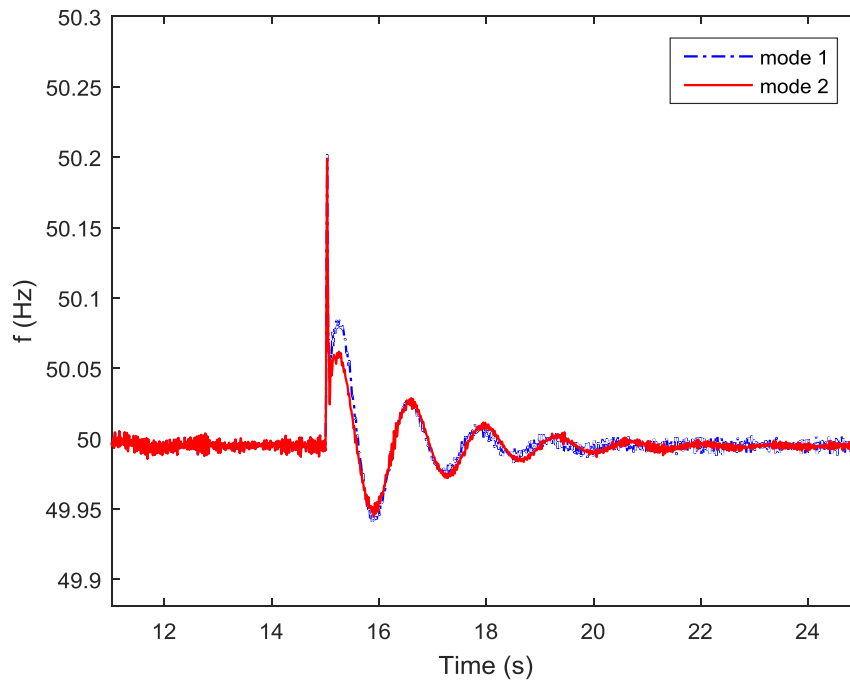
شکل ۵-۱۷. توان تولیدی میکروتوربین و توان تزریق شده به شبکه برای سناریو ۳ (حالت ۲)

در شکل (۵-۱۸)، توان تولیدی پیل سوختی و توان ذخیره‌ساز نشان داده شده است. مشخص است که بعد از کاهش بار، توان تولیدی پیل سوختی کاهش می‌یابد تا در تنظیم فرکانس مشارکت داشته باشد. به علاوه، بعد از کاهش بار ریزشبه، ذخیره‌ساز شروع به شارژ شدن می‌کند تا با دریافت توان از ریزشبه، به متعادل ساختن توان تولیدی و مصرفی ریزشبه کمک کند. مانند سناریوهای قبلی، مقدار تغییرات توان ذخیره‌ساز سریع‌تر و بیش‌تر از تغییرات توان تولیدی پیل سوختی می‌باشد که علت آن بیش‌تر بودن ظرفیت نامی و ظرفیت رزرو ذخیره‌ساز است که این موضوع قبلاً به صورت مفصل توضیح داده شد.

در شکل (۵-۱۹)، فرکانس ریزشبه برای حالت ۱ و ۲ نشان داده شده است. بر اساس این شکل مشخص است که تغییرات فرکانس در حالت ۲ کم‌تر از حالت ۱ می‌باشد.



شکل ۵-۱۸. توان ذخیره‌ساز و پیل سوختی در سناریو ۳ برای کاهش ۵۰ درصدی بار (حالت ۲)



شکل ۵-۱۹. فرکانس ریزش‌بکه در سناریو سوم برای کاهش ۵۰ درصدی بار ریزش‌بکه (حالت ۲)

## ۵-۵- عملکرد ریزشبكة در حالت جزیره‌ای

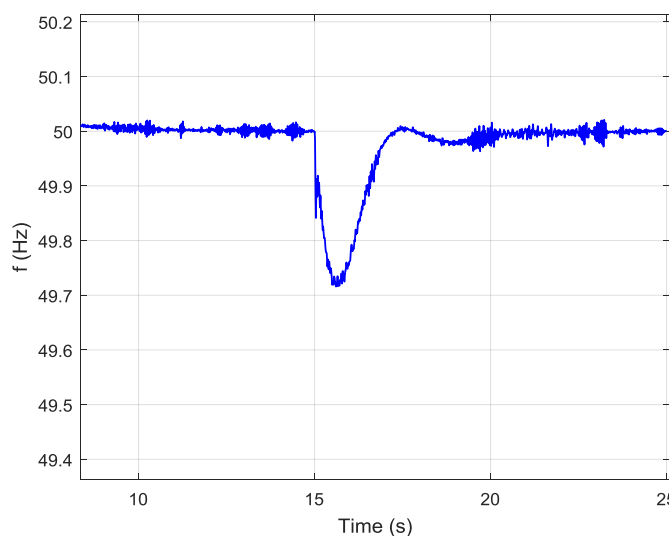
در حالت جزیره‌ای، کنترل فرکانس اهمیت بسیار بالاتری دارد زیرا در این حالت تعادل توان تولیدی و مصرفی در ریزشبكة، تماما باید توسط منابع ریزشبكة انجام شود. موضوع مهم در این حالت این است که بار ریزشبكة نباید از مجموع حداکثر توان تولیدی منابع ریزشبكة بیش‌تر شود زیرا باعث ناتعادلی توان و افت فرکانس می‌شود. در این قسمت مانند قسمت قبل چند سناریو در نظر گرفته شده است و در هر سناریو دو حالت فرض شده است در حالت اول فقط میکروتوربین در کنترل فرکانس شرکت می‌کند ولی در حالت دوم علاوه بر میکروتوربین، پیل سوختی و ذخیره‌ساز نیز در کنترل فرکانس مشارکت دارند. در تمام سناریوها، بار اولیه ریزشبكة ۶۰ کیلو وات فرض شده است.

### ۵-۵-۱- سناریو ۱، افزایش ۵۰ درصدی بار ریزشبكة

در سناریو ۱ فرض می‌شود که بار ریزشبكة در ثانیه ۱۵ به اندازه ۵۰ درصد افزایش یابد.

**حالت ۱:** در حالت ۱، تنها میکروتوربین وظیفه کنترل فرکانس را بر عهده دارد در این حالت،

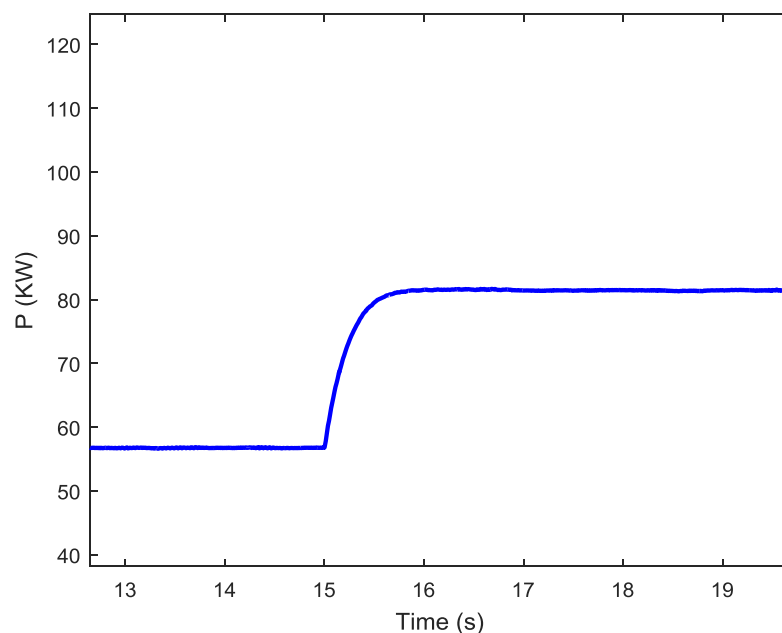
فرکانس ریزشبكة در شکل (۵-۲۰) نشان داده شده است.



شکل ۵-۲۰. فرکانس ریزشبكة در حالت جزیره‌ای برای سناریو ۱ (حالت ۱)

بر اساس شکل (۵-۲۰) مشخص است که بر خلاف حالت قبل که ریزشبه به شبکه اصلی متصل بود در این حالت که ریزشبه در حالت جزیره‌ای می‌باشد، تغییرات بار باعث تغییرات بزرگتری در فرکانس ریزشبه می‌شود. در حالت اتصال به شبکه اصلی، افزایش ۵۰ درصدی بار باعث افت فرکانس به اندازه ۰.۰۷ هرتز شد در حالی که در حالت جزیره‌ای این مقدار به ۰.۲۸ هرتز افزایش یافته است که نشان دهنده اهمیت بیش از پیش کنترل فرکانس در حالت جزیره‌ای می‌باشد.

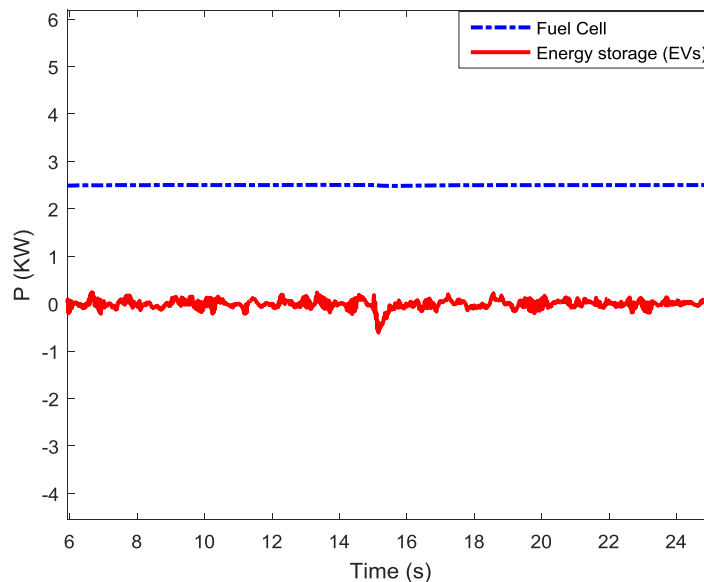
در شکل (۵-۲۱)، تغییرات توان میکروتوربین برای حالت ۱ نشان داده شده است. بر اساس این شکل مشخص است که بعد از افزایش بار، میکروتوربین به سرعت توان تولیدی خود را افزایش می‌دهد تا کمبود توان را جبران کند و از افت فرکانس جلوگیری شود. ولی با توجه به دینامیک توربین گازی، مدتی طول می‌کشد تا توان میکروتوربین به مقدار لازم برسد که همین موضوع افت موقتی فرکانس را در پی دارد که در شکل (۵-۲۰) نشان داده شد.



شکل ۵-۲۱. توان تولیدی میکروتوربین در حالت جزیره‌ای در سناریو ۱ (حالت ۱)

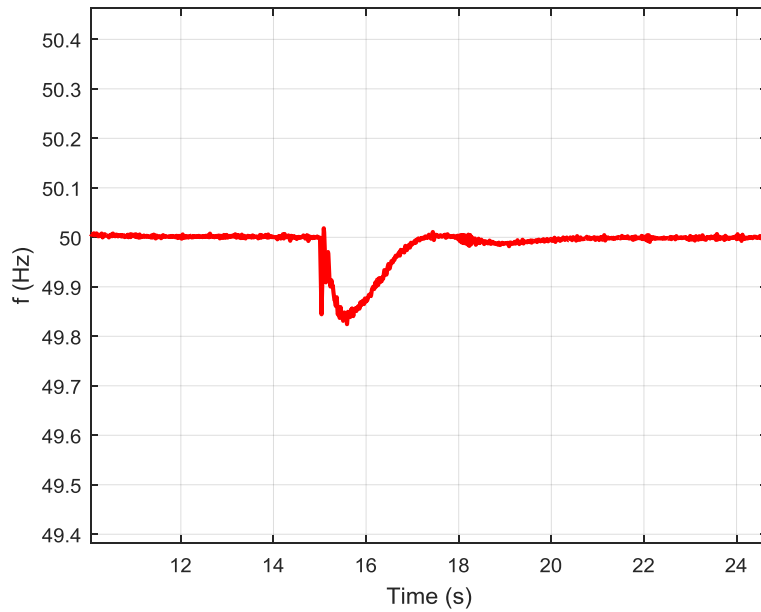


شکل (۵-۲۲) توان پیل سوختی و ذخیره‌ساز برای حالت ۱ را نشان می‌دهد. بر اساس شکل مشخص است که با وجود افزایش بار ریزش‌بکه، توان این دو واحد تغییر نمی‌کند که علت آن، عدم مشارکت این دو واحد در کنترل فرکانس می‌باشد.



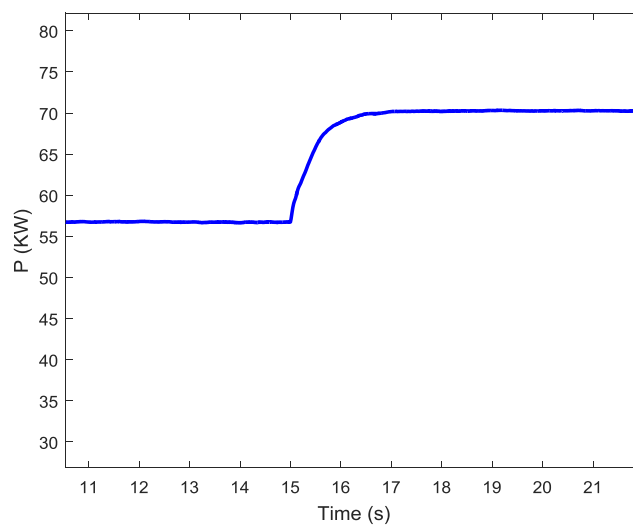
شکل ۵-۲۲. توان پیل سوختی و ذخیره‌ساز در حالت جزیره‌ای در سناریو ۱ (حالت ۱)

حالت ۲: در این حالت، علاوه بر میکروتوربین، پیل سوختی و ذخیره‌ساز نیز در کنترل فرکانس مشارکت دارند. برای این حالت، فرکانس ریزش‌بکه قبل و بعد از افزایش ۵۰ درصدی بار در شکل ۵-۲۳ نشان داده شده است. همانطور که در شکل (۵-۲۳) نشان داده شده است، بعد از افزایش بار، فرکانس ریزش‌بکه کاهش می‌یابد ولی مجدداً به مقدار نامی خود باز می‌گردد. مشخص است که در این حالت، افت فرکانس کمتر از حالت ۱ می‌باشد که علت آن، مشارکت پیل سوختی و ذخیره‌ساز در کنترل فرکانس می‌باشد.



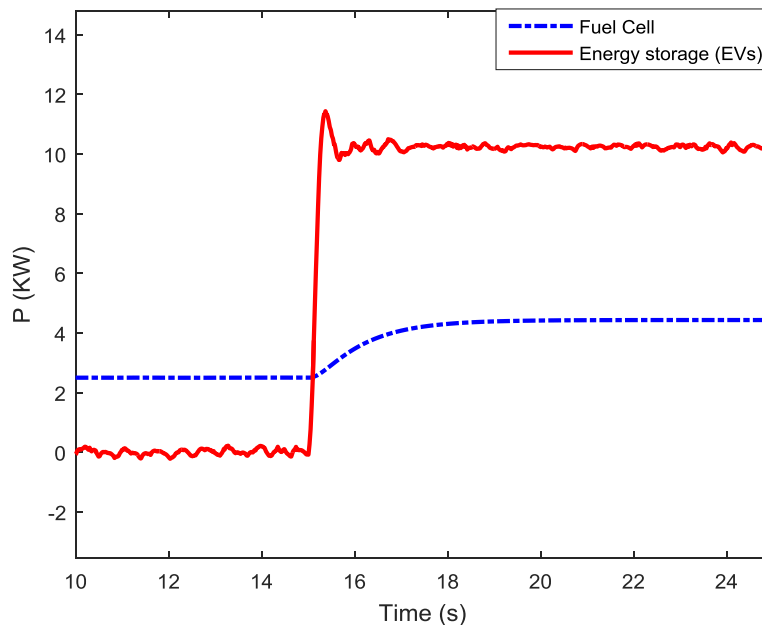
شکل ۵-۲۳. فرکانس ریزش‌بکه در حالت جزیره‌ای برای سناریو ۱ (حالت ۲)

در شکل (۵-۲۴)، توان میکروتوربین برای حالت ۲ نشان داده شده است. مشخص است که با افزایش بار در ثانیه ۱۵، توان تولیدی میکروتوربین نیز افزایش می‌یابد ولی مقدار افزایش توان میکروتوربین در این حالت، کمتر از حالت یک می‌باشد که دلیل آن این است که در این حالت، بخشی از کمبود توان بوسیله پیل سوختی و ذخیره‌ساز تامین می‌شود.



شکل ۵-۲۴. توان تولیدی میکروتوربین در حالت جزیره‌ای در سناریو ۱ (حالت ۲)

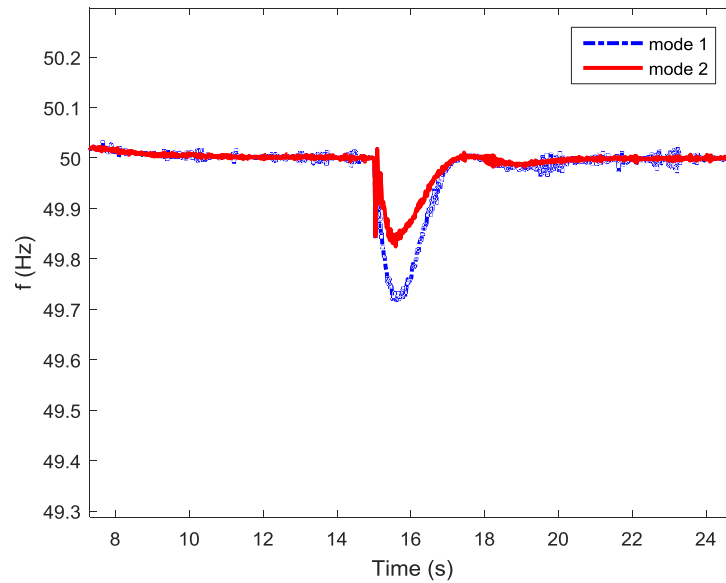
شکل (۵-۲۵)، توان پیل سوختی و ذخیره‌ساز برای افزایش ۵۰ درصدی بار در حالت ۲ را نشان می‌دهد. بر اساس شکل (۵-۲۵) مشخص است که بعد از افزایش بار، پیل سوختی توان تولیدی خود را افزایش می‌دهد و ذخیره‌ساز شروع به دشارژ می‌کند. مشخص است که افزایش توان پیل سوختی و ذخیره‌ساز بیش از حالتی است که ریزش‌بکه به شبکه اصلی متصل بود. به علاوه مشخص است که سرعت و مقدار افزایش توان ذخیره‌ساز بیشتر از پیل سوختی است که علت آن در قسمت‌های قبل بیان شد.



شکل ۵-۲۵. توان پیل سوختی و ذخیره‌ساز در حالت جزیره‌ای در سناریو ۱ (حالت ۲)

در شکل (۵-۲۶) تغییرات فرکانس ریزش‌بکه برای حالت ۱ و ۲ نشان داده شده است. بر اساس شکل (۵-۲۶) مشخص است که مقدار افت فرکانس حالت ۲، بسیار کمتر از افت فرکانس در حالت ۱ است. این موضوع نشان می‌دهد که استفاده از پیل سوختی و ریزش‌بکه می‌تواند کنترل فرکانس ریزش‌بکه بخصوص در حالت جزیره‌ای را بهبود ببخشد. علت این کاهش افت فرکانس، بیشتر به خاطر

دینامیک سریع ذخیره‌ساز است که باعث می‌شود کمبود توان حقیقی ریزش‌بکه به سرعت جبران شود که همین موضوع مانع از افت زیاد فرکانس در ریزش‌بکه می‌شود.



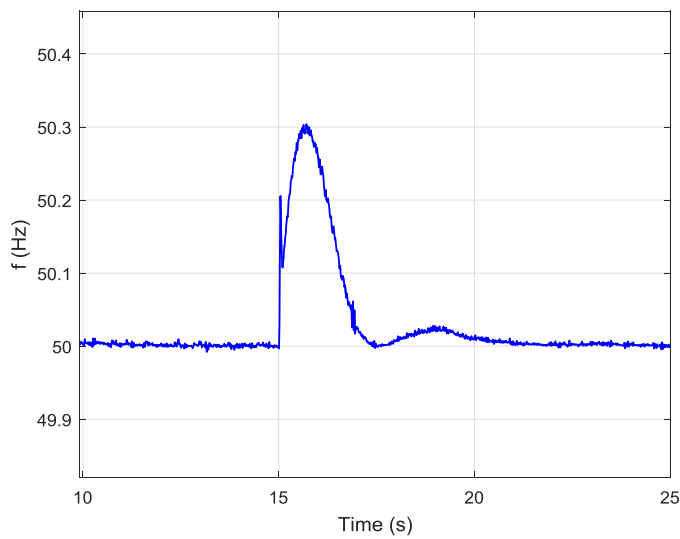
شکل ۵-۲۶. فرکانس ریزش‌بکه برای حالت ۱ و ۲ در سناریو ۱

### ۵-۵-۲- سناریو ۲، کاهش ۵۰ درصدی بار ریزش‌بکه

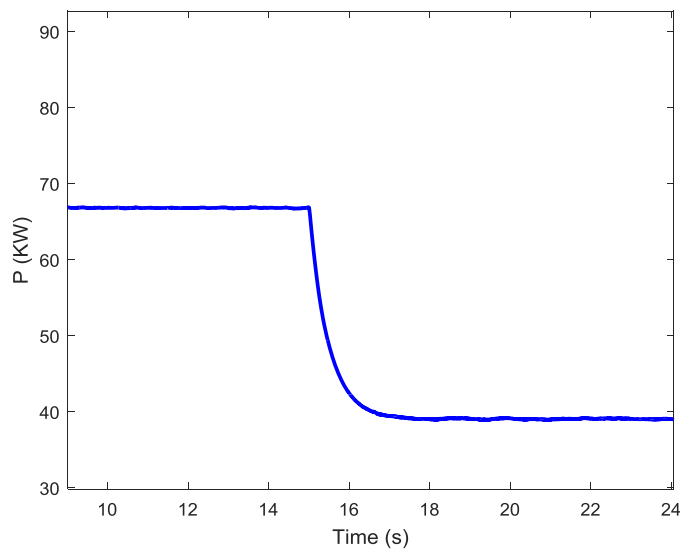
در این سناریو فرض می‌شود که در ثانیه ۱۵، توان ریزش‌بکه ۵۰ درصد کاهش می‌یابد. همچنین، توان ذخیره‌ساز مانند سناریوهای قبل صفر نیست و ذخیره‌ساز توان ده کیلووات از ریزش‌بکه دریافت می‌کند و در حالت شارژ می‌باشد.

**حالت ۱:** مانند سناریوهای قبل، در این حالت فقط میکروتوربین در کنترل فرکانس شرکت دارد. برای این حالت، تغییرات فرکانس ناشی از کاهش ۵۰ درصدی بار در شکل (۵-۲۷) نشان داده شده است. بر اساس شکل (۵-۲۷) مشخص است که با کاهش بار در ثانیه ۱۵، فرکانس ریزش‌بکه افزایش می‌یابد ولی افزایش فرکانس به سرعت جبران شده و فرکانس سیستم به مقدار نامی خود باز می‌گردد.

که این کار با ایجاد تعادل در توان اکتیو ریزش‌بکه انجام می‌شود. با توجه به اینکه فقط میکروتوربین به تغییر توان در ریزش‌بکه واکنش نشان می‌دهد، افزایش فرکانس سیستم نسبتاً قابل توجه است که علت آن کند بودن دینامیک میکروتوربین می‌باشد. در شکل (۵-۲۸) توان تولیدی میکروتوربین در این حالت نشان داده شده است.



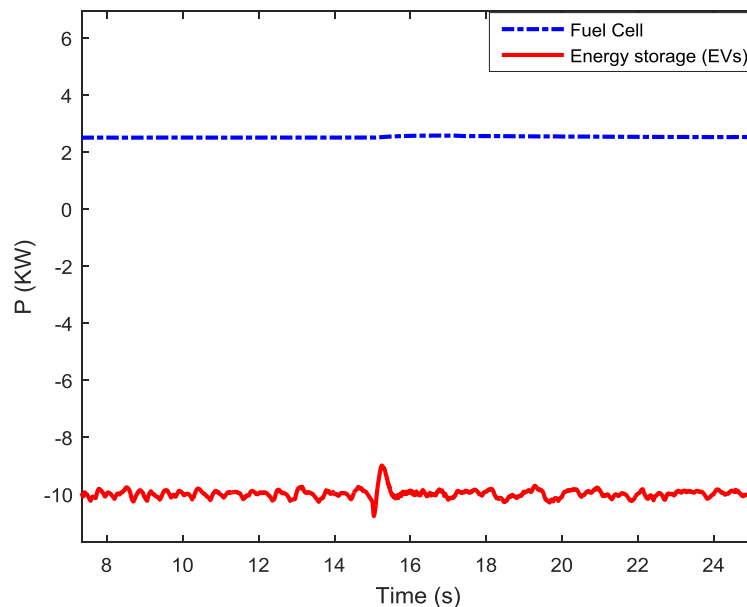
شکل ۵-۲۷. فرکانس ریزش‌بکه در حالت جزیره‌ای برای سناریو ۲ (حالت ۱)



شکل ۵-۲۸. توان تولیدی میکروتوربین در حالت جزیره‌ای در سناریو ۲ (حالت ۱)

با توجه به شکل (۵-۲۸) مشخص است که با کاهش بار سیستم، توان تولیدی میکروتوربین نیز کاهش می‌یابد ولی برای رسیدن توان تولیدی میکروتوربین به مقدار مشخص، مدتی زمان لازم است که همین موضوع باعث افزایش موقتی فرکانس ریزش شبکه می‌شود.

در شکل (۵-۲۹) توان پیل سوختی و ذخیره‌ساز نشان داده شده است. با توجه به شکل مشخص است که توان خروجی پیل سوختی ثابت است و ذخیره‌ساز در حال شارژ بوده و ۱۰ کیلووات توان از ریزش شبکه دریافت می‌کند. همچنین مشخص است که توان این دو واحد با کاهش بار تغییر نمی‌کند زیرا در کنترل فرکانس شرکت نکرده‌اند.

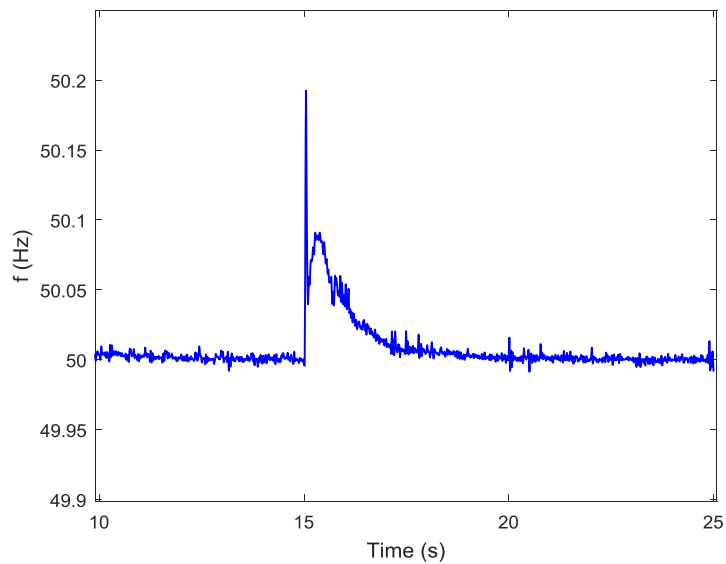


شکل ۵-۲۹. توان تولیدی پیل سوختی و ذخیره‌ساز در حالت جزیره‌ای در سناریو ۲ (حالت ۱)

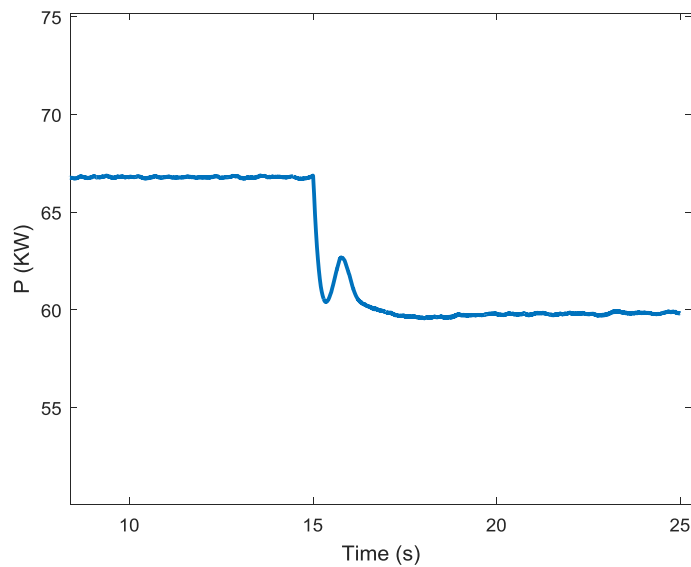
**حالت ۲:** در این حالت، پیل سوختی و ذخیره‌ساز نیز در کنترل فرکانس مشارکت می‌کنند. برای این حالت فرکانس ریزش شبکه در شکل (۵-۳۰) نشان داده شده است.

از شکل (۵-۳۰) مشخص است که در این حالت، افزایش فرکانس بسیار کمتر از حالت ۱ می‌باشد که علت آن مشارکت پیل سوختی و ذخیره‌ساز در کنترل فرکانس است. شکل (۵-۳۱) توان تولیدی میکروتوربین را نشان می‌دهد. مشخص است که توان تولیدی میکروتوربین بعد از کاهش بار ریزش شبکه

کاهش می‌یابد ولی نسبت به حالت ۱ مقدار کاهش کمتری دارد که علت آن کاهش توان تولیدی پیل سوختی و افزایش نرخ شارژ ذخیره‌ساز می‌باشد که با هدف کمک به کنترل فرکانس و متعادل کردن توان اکتیو ریزش‌بکه انجام می‌شود. این موضوع در شکل (۵-۳۲) قابل مشاهده است.

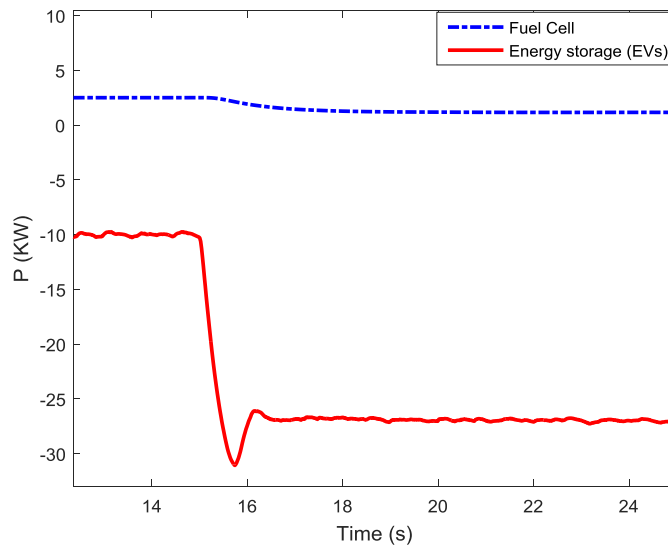


شکل ۵-۳۰. فرکانس ریزش‌بکه در حالت جزیره‌ای برای سناریو ۲ (حالت ۲)



شکل ۵-۳۱. توان تولیدی میکروتوربین در حالت جزیره‌ای در سناریو ۲ (حالت ۲)

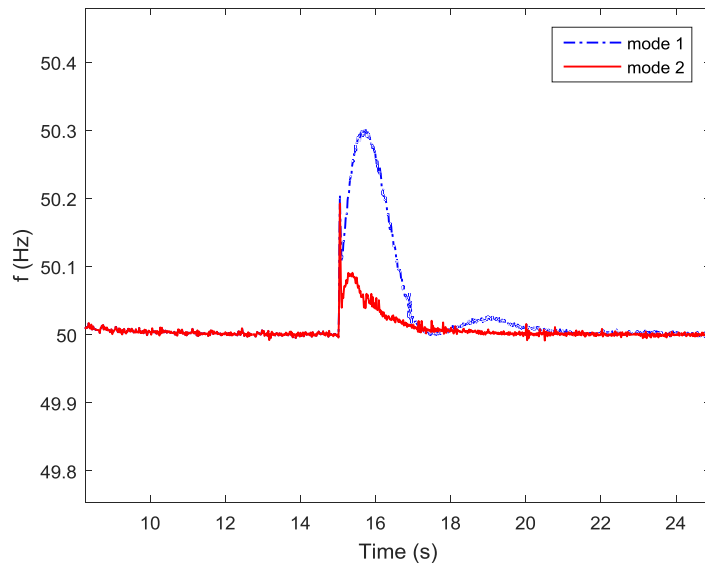
بر اساس شکل (۵-۳۲) و همانطور که قبلاً هم چند بار بیان شد مشخص است که سرعت پاسخ‌گویی ذخیره‌ساز به تغییر بار سریع‌تر از پیل سوختی است که علت این موضوع، دینامیک سریع‌تر ذخیره‌ساز می‌باشد.



شکل ۵-۳۲. توان تولیدی پیل سوختی و ذخیره‌ساز در حالت جزیره‌ای در سناریو ۲ (حالت ۲)

در شکل (۵-۳۳) فرکانس ریزش‌بکه در حالت ۱ و ۲ نشان داده شده است. در این شکل به خوبی مشخص است که در حالت ۲، افزایش فرکانس ناشی از کاهش بار به مراتب کم‌تر از افزایش فرکانس در حالت ۱ می‌باشد. این موضوع نشان دهنده‌ی تاثیر فراوان پیل سوختی و ذخیره‌ساز بر روی کنترل فرکانس می‌باشد.





شکل ۵-۳۳. فرکانس ریزش‌بکه برای حالت ۱ و ۲ در سناریو ۱



# فصل ۶- نتیجہ گیری و پیشہ ماہی

## ۶-۱- نتیجه‌گیری

در فصل‌های گذشته درباره کنترل بار فرکانس و بخصوص کنترل فرکانس در ریزشبکه‌ها بحث شد. هدف این پژوهش ارائه یک روش کارآمد برای کنترل بار فرکانس در ریزشبکه‌های دارای میکروتوربین، پیل سوختی و خودروهای الکتریکی بود. در راستای این کار، ابتدا در فصل یک ضرورت انجام این پژوهش بیان شد. در فصل دوم، مفهوم کنترل بار فرکانس توضیح داده شد و کارهایی که تاکنون در این زمینه برای کنترل فرکانس ریزشبکه‌ها انجام شده است، توضیح داده شد.

با توجه به هدف پژوهش، لازم بود که ابتدا مفهوم و ساختار ریزشبکه توضیح داده شود که این کار در فصل سوم انجام شد و ضمن ارائه یک تعریف نسبتاً جامع برای ریزشبکه، اجزای تشکیل دهنده‌ی آن به طور مختصر توضیح داده شد.

در فصل چهارم، چگونگی مدل‌سازی سیستم مورد مطالعه بیان شد و روش ارائه شده برای کنترل فرکانس یک ریزشبکه شامل میکروتوربین، پیل سوختی و تعدادی خودرو الکتریکی توضیح داده شد. روش ارائه شده در این پژوهش بر اساس ارزیابی ظرفیت و نقطه کار هر واحد انجام می‌شد که چگونگی آن در فصل چهارم توضیح داده شد.

در فصل پنجم یک ریزشبکه نمونه معرفی شد تا روش ارائه شده در فصل چهارم، بر روی آن مورد آزمایش قرار گیرد. برای شبیه‌سازی، سناریوها و حالت‌های مختلفی در نظر گرفته شد تا مطالعه رفتار ریزشبکه تا حد امکان جامع باشد.

در ابتدا فرض شد که ریزشبكة در حالت اتصال به شبکه باشد. در این حالت سه سناریو در نظر گرفته شد. در سناریو اول، بار ریزشبكة ۲۵ درصد افزایش می‌یافت. این سناریو ابتدا برای حالتی که تنها میکروتوربین در کنترل فرکانس مشارکت داشت بررسی شد. نتیجه شبیه‌سازی نشان داد که در این حالت، شبکه اصلی به سرعت کمبود توان در ریزشبكة را جبران می‌کند و از انحراف فرکانس جلوگیری می‌شود. اما در این حالت، بخشی از کمبود توان در لحظات اولیه به‌وسیله میکروتوربین جبران می‌شد تا انحراف فرکانس سریع‌تر جبران شود.

در ادامه برای سناریو اول فرض شد که علاوه بر میکروتوربین، پیل سوختی و خودرو الکتریکی نیز در کنترل فرکانس مشارکت داشته باشند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که در این حالت نسبت به حالت قبل، انحراف فرکانس سریع‌تر جبران می‌شود که علت آن را می‌توان دینامیک بسیار سریع ذخیره‌سازهای خودروهای الکتریکی دانست.

برای حالت اتصال به شبکه دو سناریو دیگر نیز در نظر گرفته شده است. در سناریو دوم و سوم بار ریزشبكة به ترتیب ۵۰ درصد افزایش و ۵۰ درصد کاهش می‌یافت. در هر یک از این سناریوها نیز دو حالت در نظر گرفته شده است. در حالت اول فقط میکروتوربین در کنترل فرکانس مشارکت داشت ولی در حالت دوم علاوه بر میکروتوربین، پیل سوختی و خودروهای الکتریکی نیز در کنترل فرکانس شرکت داشتند. در این دو سناریو نیز مانند سناریو اول، در هر دو حالت فرکانس ریزشبكة پایدار بوده و انحراف آن بسیار کم بود. همچنین در حالت دوم، مشارکت پیل سوختی و خودروهای الکتریکی انحراف فرکانس در لحظه تغییر بار را کاهش می‌داد.

در ادامه، رفتار ریزشبكة در حالت جدا از شبکه اصلی بررسی شد. برای این حالت دو سناریو در نظر گرفته شد. در سناریو اول، بار ریزشبكة ۵۰ درصد افزایش می‌یافت. برای این سناریو در حالتی که تنها میکروتوربین در کنترل فرکانس مشارکت داشت انحراف فرکانس در لحظه تغییر بار نسبتاً زیاد بود و فرکانس ریزشبكة برای چند ثانیه افت محسوسی داشت که علت آن کند بودن نسبی دینامیک

میکروتوربین می‌باشد. در حالت دوم برای این سناریو فرض شد که علاوه بر میکروتوربین، پیل سوختی و خودروهای الکتریکی نیز در کنترل فرکانس مشارکت دارند. در این حالت، انحراف فرکانس در لحظه تغییر بار نسبت به حالت اول به صورت قابل توجه کاهش یافت که علت اصلی آن دینامیک سریع ذخیره‌سازهای خودروهای الکتریکی می‌باشد علاوه بر این، پیل سوختی نیز به نوبه‌ی خود با جبران تغییرات توان باعث بهبود کنترل فرکانس می‌شود.

در سناریو دوم برای حالت جزیره‌ای ریزش‌بکه، فرض شد که توان ریزش‌بکه ۵۰ درصد کاهش یابد. در این سناریو، برای حالت اول که فقط میکروتوربین در کنترل فرکانس شرکت داشت در لحظه کاهش بار، فرکانس ریزش‌بکه به طور محسوس افزایش می‌یافت و این افزایش فرکانس برای چند لحظه ادامه داشت ولی در حالت دوم که پیل سوختی و خودروهای الکتریکی نیز در کنترل فرکانس مشارکت داشتند، افزایش فرکانس ریزش‌بکه در لحظه کاهش بار به شدت کاهش یافت. این موضوع نشان دهنده‌ی تأثیر قابل توجه حضور پیل سوختی و خودروهای الکتریکی در کنترل بار فرکانس ریزش‌بکه می‌باشد.

بر اساس نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی، مشخص شد که روش ارائه شده، هم در حالت اتصال به شبکه و هم در حالت جزیره‌ای می‌تواند عملکرد متعادل و پایدار ریزش‌بکه را تضمین کند. این موضوع در تمام سناریوها و حالت‌هایی که در نظر گرفته شد صادق بود. همچنین مشخص شد که روش ارائه شده حتی در حالتی که تنها میکروتوربین در کنترل فرکانس شرکت کرده است کارایی قابل قبولی از خود نشان می‌دهد.

موضوع بسیار مهم دیگری که بر اساس نتایج شبیه‌سازی بدست آمد، تأثیر فراوان پیل سوختی و تجمع باتری خودروهای الکتریکی بصورت یک ذخیره‌ساز در کنترل فرکانس بود. بر اساس نتایج شبیه‌سازی، استفاده از پیل سوختی و ذخیره‌ساز می‌تواند تنظیم فرکانس ریزش‌بکه و حفظ فرکانس

ریزشبکه در برابر اغتشاشات وارد بر سیستم را به شدت بهبود دهد و افت فرکانس ناشی از افزایش بار و افزایش فرکانس ناشی از کاهش بار را تا حدود زیادی کمینه‌سازی کند.

همانطور که در فصل دوم بیان شد، تنها مرجعی که ساختار مورد مطالعه برای ریزشبکه را بررسی کرده است مرجع [۸] می‌باشد و در هیچ مقاله دیگری، ریزشبکه مورد مطالعه از نظر کنترل فرکانس بررسی نشده است.

قبلا توضیح داده شد که روش ارائه شده در [۸] بر اساس استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی است که حجم محاسبات را بالا برده و ساختار پیچیده‌تری دارد. در مقایسه با روش ارائه شده در [۸]، روش ارائه شده در این پژوهش با وجود داشتن ساختار ساده و قابل فهم، عملکرد بسیار خوبی دارد که این موضوع با شبیه‌سازی ریزشبکه و کنترل کننده ارائه شده در نرم‌افزار matlab نشان داده شد.

### ۶-۲- پیشنهادات

در این پژوهش، مجموع تمام خودروهای الکتریکی بصورت یک باتری یا یک ذخیره‌ساز در نظر گرفته شد. این موضوع تا حدود زیادی درست است ولی نیازمند مطالعات بیشتر می‌باشد. زیرا اولاً، در هر لحظه تعداد خودروهای الکتریکی که به ریزشبکه متصل هستند می‌تواند تغییر کند بنابراین ظرفیت در دسترس ذخیره‌ساز معادل در هر لحظه متغیر خواهد بود. ثانياً، میزان شارژ یا دشارژ هر خودرو باید بر اساس برخی مقررات انجام شود. بنابراین، مدل‌سازی خودروهای الکتریکی در کنترل فرکانس، کار بسیار پیچیده‌ای است که نیاز به مطالعات بیشتر دارد. این موضوع می‌تواند موضوع تحقیقات و پژوهش‌های آینده باشد.

- [1] M. N. Anwar and S. Pan, "A new PID load frequency controller design method in frequency domain through direct synthesis approach," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 67, pp. 560-569, 2015.
- [2] K. Jayant, N. Kahhoe, and S. Gerald, "AGC Simulator for Price-based Operation, Part I: A Model," *IEEE Trans on Power Systems*, vol. 12, pp. 527-532, 1997.
- [3] R. Raineri, S. Rios, and D. Schiele, "Technical and economic aspects of ancillary services markets in the electric power industry: an international comparison," *Energy policy*, vol. 34, pp. 1540-1555, 2006.
- [4] H. Saadat, *Power system analysis: McGraw-Hill Primis Custom*, 2002.
- [5] G. Strbac, A. Shakoor, M. Black, D. Pudjianto, and T. Bopp, "Impact of wind generation on the operation and development of the UK electricity systems," *Electric Power Systems Research*, vol. 77, pp. 1214-1227, 2007.
- [6] I. Erinmez, D. Bickers, G. Wood, and W. Hung, "NGC experience with frequency control in England and Wales-provision of frequency response by generators," in *Power Engineering Society 1999 Winter Meeting, IEEE*, 1999, pp. 590-596.
- [7] X. Li, Y.-J. Song, and S.-B. Han, "Frequency control in micro-grid power system combined with electrolyzer system and fuzzy PI controller," *Journal of Power Sources*, vol. 180, pp. 468-475, 2008.
- [8] S. Vachirasricirikul and I. Ngamroo, "Robust controller design of microturbine and electrolyzer for frequency stabilization in a microgrid system with plug-in hybrid electric vehicles," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 43, pp. 804-811, 2012.
- [9] H. Bevrani, M. R. Feizi, and S. Ataei, "Robust frequency control in an islanded microgrid:  $H_\infty$  and  $\mu$ -synthesis approaches," *IEEE*, 2015.
- [10] R. Lasseter, A. Akhil, C. Marnay, J. Stephens, J. Dagle, R. Guttromson, et al., "The CERTS microgrid concept, white paper on integration of distributed energy resources," *California Energy Commission, Office of Power Technologies-US Department of Energy, LBNL-50829*, <http://certs.lbl.gov>, 2002.



- 
- [11] A. Mehrizi-Sani and R. Iravani, "Potential-function based control of a microgrid in islanded and grid-connected modes," *Power systems, IEEE transactions on*, vol. 25, pp. 1883-1891, 2010.
- [12] Q. Shafiee, J. M. Guerrero, and J. C. Vasquez, "Distributed secondary control for islanded microgrids—A novel approach," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 29, pp. 1018-1031, 2014.
- [13] G. Klir and B. Yuan, *Fuzzy sets and fuzzy logic vol. 4: Prentice Hall New Jersey*, 1995.
- [14] A. Rubaai and V. Udo, "Self-tuning load frequency control: multilevel adaptive approach," *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, vol. 141, pp. 285-290, 1994.
- [15] H. Bevrani, F. Habibi, P. Babahajyani, M. Watanabe, and Y. Mitani, "Intelligent frequency control in an ac microgrid: online PSO-based fuzzy tuning approach," *Smart Grid, IEEE Transactions on*, vol. 3, pp. 1935-1944, 2012.
- [16] W. Gu, W. Liu, Z. Wu, B. Zhao, and W. Chen, "Cooperative control to enhance the frequency stability of islanded microgrids with DFIG-SMES," *Energies*, vol. 6, pp. 3951-3971, 2013.
- [17] A. H. Etemadi, E. J. Davison, and R. Iravani, "A decentralized robust control strategy for multi-DER microgrids—Part I: Fundamental concepts," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 27, pp. 1843-1853, 2012.
- [18] M. Barnes, J. Kondoh, H. Asano, J. Oyarzabal, G. Ventakaramanan, R. Lasseter, et al., "Real-world microgrids-an overview," in *2007 IEEE International Conference on System of Systems Engineering*, 2007.
- [19] J. Alzola, I. Vechiu, H. Camblong, M. Santos, M. Sall, and G. Sow, "Microgrids project, Part 2: Design of an electrification kit with high content of renewable energy sources in Senegal," *Renewable Energy*, vol. 34, pp. 2151-2159, 2009.
- [20] J. Ping, Z. X. Xin, and W. Shouyuan, "Review on sustainable development of island microgrid," in *Advanced Power System Automation and Protection (APAP), 2011 International Conference on*, 2011, pp. 1806-1813.
- [21] M. Mohammadi, S. Hosseinian, and G. Gharehpetian, "GA-based optimal sizing of microgrid and DG units under pool and hybrid electricity markets," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 35, pp. 83-92, 2012.

- 
- [22] Q. Yang, Z. Bao, W. Yan, and T. Wu, "Smart Energy Management in Microgrid with Wind Power Generators and Plug-in Electric Vehicles," in *Plug In Electric Vehicles in Smart Grids*, ed: Springer, 2015, pp. 249-277.
- [23] I. Vechiu, H. Camblong, G. Tapia, B. Dakyo, and C. Nichita, "Dynamic simulation model of a hybrid power system: performance analysis," in *Wind Energy Conference*, London, England, 2004.
- [24] C. Saldaña, G. Calzolari, and G. Cerecetto, "ATP modelling and field tests of the ac voltage regulator in the Palmar hydroelectric power plant," *Electric power systems research*, vol. 76, pp. 681-687, 2006.
- [25] M. Dali, J. Belhadj, and X. Roboam, "Design of a stand-alone hybrid Photovoltaic-Wind generating system with battery storage," in *ICEEDT Conference*, 2008.
- [26] S. B. Skretas and D. P. Papadopoulos, "Efficient design and simulation of an expandable hybrid (wind–photovoltaic) power system with MPPT and inverter input voltage regulation features in compliance with electric grid requirements," *Electric Power Systems Research*, vol. 79, pp. 1271-1285, 2009.
- [27] R. Caire, N. Retiere, S. Martino, C. Andrieu, and N. Hadjsaid, "Impact assessment of LV distributed generation on MV distribution network," in *Power Engineering Society Summer Meeting, 2002 IEEE*, 2002, pp. 1423-1428.
- [28] Y. Bamberger, J. Baptista, D. Botting, B. M. Buchholz, R. Charnah, M. Chebbo, et al., "strategic research agenda for europe's electricity networks of the future: European Technology Platform SmartGrids," *Office for Official Publications of the European Communities 9279037277*, 2007.
- [29] B. Kroposki, R. Lasseter, T. Ise, S. Morozumi, S. Papatlianassiou, and N. Hatziargyriou, "Making microgrids work," *Power and Energy Magazine, IEEE*, vol. 6, pp. 40-53, 2008.
- [30] Z. Shihang, "The development of microturbine with new concept," *Gas Turbine Technology*, vol. 14, pp. 8-13, 2001.
- [31] S. Abdollahi and A. Vahedi, "Dynamic Modeling of Micro-Turbine Generation Systems Using Matlab/Simulink," in *18th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution*, 2005.
- [32] "<http://www.capstoneturbine.com>."
- [33] B. Cook, "Introduction to fuel cells and hydrogen technology," *Engineering Science & Education Journal*, vol. 11, pp. 205-216, 2002.
- [34] K. Kordesch and G. Simader, *Fuel cells and their applications*: VCH, 1996.

- 
- [35] R. Raza, N. Akram, M. S. Javed, A. Rafique, K. Ullah, A. Ali, et al., "Fuel cell technology for sustainable development in Pakistan—An over-view," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 53, pp. 450-461, 2016.
- [36] "National Fuel Cell Research Center at the University of California. Available from: <http://www.nfccrcc.com>..
- [37] H. Raza, R. Chaudhry, M. A., "Development and study of proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) in Pakistan," *Proceedings of the 3rd international conference on materials for advanced technologies*, 2005.
- [38] B. Holland, J. Zhu, and L. Jamet, "Fuel cell technology and application," *University of Technology*, Sydney, 2007.
- [39] C. Rayment and S. Sherwin, "Introduction to fuel cell technology," *Department of Aerospace and Mechanical Engineering, University of Notre Dame, Notre Dame, IN*, vol. 46556, pp. 11-12, 2003.
- [40] J. Larminie, A. Dicks, and M. S. McDonald, *Fuel cell systems explained vol. 2: Wiley New York*, 2003.
- [41] Y. Zhe, L. Qizhao, and B. Zhu, "Thermodynamic analysis of ITSOFC hybrid system for polygenerations," *International journal of hydrogen energy*, vol. 35, pp. 2824-2828, 2010.
- [42] R. Raza, H. Qin, Q. Liu, M. Samavati, R. Lima, and B. Zhu, "Advanced Multi-Fuelled Solid Oxide Fuel Cells (ASOFCs) Using Functional Nanocomposites for Polygeneration," *Advanced Energy Materials*, vol. 1, pp. 1225-1233, 2011.
- [43] E. Azadfar, V. Sreeram, and D. Harries, "The investigation of the major factors influencing plug-in electric vehicle driving patterns and charging behaviour," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 42, pp. 1065-1076, 2015.
- [44] J. J. MacKenzie, "The keys to the car: Electric and hydrogen vehicles for the 21st century," 1994.
- [45] W. Kempton and J. Tomić, "Vehicle-to-grid power fundamentals: Calculating capacity and net revenue," *Journal of power sources*, vol. 144, pp. 268-279, 2005.
- [46] "Online available: <http://www.futurelab.net>."
- [47] C. Guille and G. Gross, "A conceptual framework for the vehicle-to-grid (V2G) implementation," *Energy policy*, vol. 37, pp. 4379-4390, 2009.
- [48] A. Ostadi and M. Kazerani, "Optimal Sizing of the Battery Unit in a Plug-in Electric Vehicle," *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol. 63, pp. 3077-3084, 2014.

- 
- [49] S. K. Mullen, "Plug-in hybrid electric vehicles as a source of distributed frequency regulation," University of Minnesota ,2009.
- [50] Yang J, Zeng Z, Tang Y, Yan J, He H, Wu Y. Load frequency control in isolated micro-grids with electrical vehicles based on multivariable generalized predictive theory. *Energies*. 2015 Mar 18;8(3):2145-64.
- [51] P. Kundur, N. J. Balu, and M. G. Lauby, *Power system stability and control* vol. 7: McGraw-hill New York, 1994.
- [52] K. Thanapalan, F. Zhang, G. Premier, J. Maddy, and A. Guwy, "Control-oriented PEM fuel cell system modeling and repetitive controller design," in *Intelligent Control and Information Processing (ICICIP)*, 2011 2nd International Conference on, 2011, pp. 1055-1060.
- [53] J. T. Pukrushpan, A. G. Stefanopoulou, and H. Peng, *Control of fuel cell power systems: principles, modeling, analysis and feedback design*: Springer Science & Business Media, 2004.
- [54] U. S. D. o. E. O. o. Fossil and N. E. T. L. Energy, *Fuel Cell Handbook* By EG&G Technical Services: National Energy Technology Laboratory, 2004.
- [55] Solihin MI, Tack LF, Kean ML. Tuning of PID controller using particle swarm optimization (PSO). *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*. 2011;1(4):458-61.

## Abstract

In power systems, although the inertia energy in power sources can partly cover power unbalances caused by load disturbance or renewable energy fluctuation, it is still hard to maintain the frequency deviation within acceptable ranges. Especially in microgrids, that it's most power sources is renewable energy base. Nowadays, with the vehicle-to-grid (V2G) technique, electric vehicles (EVs) can act as mobile energy storage units, which could be a solution for load frequency control (LFC) in a microgrids. In this work, a new LFC model of micro-grid with EVs, Microturbine (MT) and fuel cell (FC) is proposed, where EVs and other sources are coordinated to achieve a satisfied performance on LFC. In the studied microgrid, the MT is normally used to provide the main power to the loads. Also, the large numbers of EVs are utilized in the consumer side. In this method, microgrid frequency adjusting by controlling the output power of microturbines, fuel cells and electric vehicles. It is based on proportional-integral controller, but to determine the participation factor of microturbines, fuel cells and electric vehicles in frequency control, a new method is proposed. The proposed method is based on the rated capacity and power product before changing the frequency for any unit. In addition, to optimize the controller parameters for microturbines, fuel cells and electric vehicles, particle swarm optimization (PSO) algorithm is used that improves the accuracy of frequency control. The effectiveness of the proposed algorithm is proved using simulation of a microgrid in Matlab software. Also, the impact of the presence or absence of fuel cell and electric vehicles in frequency control is investigated. The simulation results show that the proposed controller provides an excellent dynamic response with acceptable frequency deviation.

Keywords: Microgrid, Electric Vehicle, Microturbine, Fuel Cell, Load-Frequency Control, particle swarm optimization



Shahrood University Of Technology  
Faculty of Electrical and Robotic Engineering

MSc Thesis in Electrical Machines Engineering

**Load Frequency Control of Micro grid Including Fuel Cell/  
Microturbine and Plug-in Electric Vehciles**

By: Seyed Mahdi Shobeiri

Supervisor:

Dr. AminHajizadeh

Advisor:

Dr. Mahdi Banejad

June 2016