بسم الله الرحمن الرحیم

# هو العلیم الفتاح

دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)
دانشکده مهندسی برق

**رساله دکتری مهندسی برق- قدرت**

**عنوان:**

# کنترل بار مولدهای پیل سوختی در شبکه های مستقل

نگارش:
**علی اصغر قدیمی**

استاد راهنما: **دکتر حسن رستگار**
استاد مشاور: **پروفسور علی کیهانی**

تیر ماه ۱۳۸۷

بسمه تعالي

تـاريخ: .....

شماره مدرک

دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

**فـرم اطلاعات پایان‌نـامه**
**کارشنـاسی- ارشد و دکتـرا**
**کتابخـانه مرکـزی**

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| مشخصات دانشجو | نام خانوادگی : قدیمی | نام : علی اصغر | شماره دانشجویی: ۸۱۱۲۳۹۲۳ | |
| | دانشکده: مهندسی برق | رشته تحصیلی: برق | گروه: قدرت | |
| عنوان | **کنترل بار مولدهای پیل سوختی در شبکه های مستقل** | | | |
| **Title :** | **Load Sharing Control of Fuel Cell Generators in Stand-Alone Distribution Systems** | | | |
| استاد راهنما | نام خانوادگی : رستگار<br>نام: حسن | درجه و رتبه<br>استادیار | نام خانوادگی :<br>نام: | درجه و رتبه |
| استاد مشاور | نام خانوادگی : کیهانی<br>نام: علی | درجه و رتبه<br>استاد | نام خانوادگی :<br>نام: | درجه و رتبه |
| دانشنامه | کارشناسی ○ ارشد ○ دکترا ✹ | | سال تحصیلی: ۸۶-۸۷ | |
| نوع پروژه | کاربردی ✹ بنیادی○ توسعه ای✹ نظری○ | | | |
| مشخصات ظاهری | تعداد صفحات: ۱۹۴ | تصویر: ✹ | جدول: ✹ | نمودار: ✹ |
| | نقشه: ○ | واژه‌نامه: ○ | تعداد مراجع: ۱۷۰ | تعداد ضمائم: ۴ |
| زبان متن | فارسی ✹ انگلیسی ○ | چکیده | فارسی ✹ | انگلیسی ✹ |
| یاداشت | لوح فشرده ✹ دیسکت فلاپی○ | | | |
| توصیفگر | | | | |
| کلید واژه فارسی | سیستمهای تولید پراکنده (DG)، پیل سوختی، رفورمر، مبدل dc-dc، اینورتر، ابرخازن، تقسیم بار، ریزشبکه، کنترل، تخمین حالت، الگوریتم ژنتیک، شبکه عصبی مصنوعی، بهینه سازی | | | |
| کلید واژه لاتین | Distributed Generation (DG), MicroGrid, Fuel Cell, Reformer, DC-DC converter, Inverter, Supercapacitor, Modeling, Simulink/ Matlab, Load sharing, State Estimation, Genetic Algorithm, Artifical Neural Network, Optimization | | | |

**به پاس تعبیر عظیم و انسانی شان از کلمه ایثار و از خودگذشتگی**

**به پاس عاطفه سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان که در این سردترین روزگاران بهترین پشتیبان است**

**به پاس قلب های بزرگشان که فریادرس است و سرگردانی و ترس در پناهشان به شجاعت می گراید**

**و به پاس محبت های بی دریغشان که هرگز فروکش نمی کند**

**این مجموعه را به مادر فداکار و عزیز، پدر بزرگوار و همسر مهربانم تقدیم می کنم.**

# سپاسگذاری

در مدتی که تحقیق و انجام این رساله بطول انجامید همواره در فراز و نشیبهای راه از مساعدت اساتید گرامی و دوستان خوب خود بهره مند گشتم و اینک که به فضل خدای سبحان موفق به اتمام این پایان نامه شده ام، وظیفه خود می‌دانم از همه این عزیزان و بخصوص

استاد راهنمای محترم **جناب آقای دکتر حسن رستگار** که زحمت راهنمایی پایان نامه را عهده دار بودند

آقای **پروفسور علی کیهانی** استاد محترم مشاور، استاد بزرگوار جناب آقای **پروفسور مهرداد عابدی** و استاد مهربان و گرامی آقای **دکتر سید حمید فتحی** که بزرگوارانه با نقطه نظرات سودمند و سازنده خود اینجانب را راهنمایی فرمودند و همچنین آقای **دکتر احمد زاهدی** که امکان فرصت مطالعاتی در دانشگاه موناش استرالیا را برایم فراهم نمودند

**اعضای محترم هیئت داوری** آقایان دکتر حقی فام، دکتر پرنیانی، دکتر قره پتیان و دکتر صادقی که با وجود مشغله فراوان، داوری پروژهٔ اینجانب را پذیرفته و ضمن حضور در جلسهٔ دفاعیه با سؤالات روشنگر خود مرا راهنمایی کردند

**عموی عزیزم آقای حسین قدیمی** تکنسین دانشکده مهندسی برق که در طول مدت تحصیل پشتیبان من بودند

کارمندان زحمتکش دانشکده مهندسی برق بخصوص **سرکار خانم طاهری** و **سرکار خانم اسماعیلی** که بیش از انجام وظیفه با من همکاری داشتند

**خانواده خود و خانواده همسرم** که پشتیبانی و محبتهای بی منت خود را در مدت تحصیل از من دریغ ننمودند

و بالاخره **همسرم** که اگر همراهی و مهربانی او نبود هرگز به پایان رساندن این رساله برایم میسر نبود

با نهایت امتنان تقدیر و تشکر نمایم.

**به امید موفقیت و شادکامی همه این عزیزان**

بنام آنکه جان را فکرت آموخت

# چکیده


با افزایش چشمگیر منابع تولید پراکنده در سالهای اخیر مفهوم ریزشبکه یا MicroGrid (شبکه های کوچک توزیع شامل منابع تولید پراکنده) و بکارگیری منابع تولید پراکنده در حالت مستقل از شبکه بسیار مورد توجه قرار گرفته است. کارکرد ریز شبکه بالا رفتن قابلیت اعتماد سیستم، حل بهتر مشکلات کارکرد و اتصال منابع تولید پراکنده و افزایش ظرفیت نصب شده این منابع را در پی داشته است. بکارگیری منابع تولید پراکنده در حالت مستقل از شبکه جهت حفظ پیوستگی برق مصرف کنندگان نیز از مسائلی است که مورد توجه صاحبان منابع تولید پراکنده، مشتریان برق و همچنین اپراتور شبکه برق می‌باشد. علیرغم مزایای زیاد نصب منابع تولید پراکنده در یک ریزشبکه مستقل، مسائل مختلفی باعث محدودیت کارکرد آنها می شود و در تحقیقات اخیر به برخی از آنها پرداخته شده است. یکی از مهمترین مسائل، کنترل تولید منابع تولید پراکنده در یک ریزشبکه مستقل برای حفظ ولتاژ و فرکانس سیستم در مقادیر مجاز و تأمین بدون وقفه و بهینه بارها می‌باشد که این رساله به آن می پردازد.

منابع تولید بررسی شده در این تحقیق پیل های سوختی می باشند که از طریق اینورتر به سیستم متصل می باشند ولی روشها قابل اجرا بر روی سایر منابع متصل شده از طریق اینورتر نیز می باشند. از آنجائیکه پیل سوختی تولید انرژی با سرعت کم، بصورت dc و با ولتاژ پایین انجام می دهد، لذا تجهیزات جانبی واحد پردازنده سوخت (جهت تولید هیدروژن)، مبدل dc-dc (برای تثبیت و تقویت ولتاژ)، ذخیره ساز انرژی (برای تغذیه تغییرات سریع توان) و اینورتر (برای تبدیل ولتاژ dc به سه فاز ac) در کنار آن وجود دارد که به مجموعه آنها سیستم پیل سوختی گفته می شود. در این رساله ابتدا تمامی اجزای سیستم پیل سوختی مدل سازی شده و نحوه کنترل آنها مورد بررسی قرار می گیرد و با شبیه سازیهای متنوع صحت مدلها و کارآیی کنترل کننده ها مورد تأیید قرار می‌گیرد.

سپس با بکارگیری تعدادی از سیستم های تولید در یک سیستم توزیع مستقل از شبکه (جزیره ای)، روشهایی برای کنترل مقدار تولید آنها جهت تأمین بارها با کیفیت مناسب ارائه خواهد شد. در حالت کلی هدف این است که سیستم های موجود تولید پراکنده در شبکه مستقل توان مورد نیاز بارها را بدون وقفه، بصورت بهینه و با ارضا کردن قیود سیستم توزیع تغذیه نمایند. در این رساله

دو راهکار کلی پیشنهاد شده و در هر حالت دو روش ارائه شده است. در راهکار اول که در شبکه های توزیع کوچک کارآیی بیشتری دارد کنترل با استفاده از سیگنالهای محلی انجام شده و نیازی به ارتباط مخابراتی بین واحدها نمی باشد و معمولاً کارکرد بصورت بهینه قابل اجرا نیست. در راهکار دوم با بکارگیری سیستم های مخابراتی، سیستم توزیع بصورت فعال درآمده و کنترل سیستم بصورت بهینه و با در نظر گرفتن همه قیود انجام می گردد. شبیه سازیهای مختلف بر روی سیستم های نمونه انجام گردیده و کارآیی کنترل کننده ها در حالتهای مختلف مورد آزمایش و تأیید قرار گرفته است.

## کلمات کلیدی

سیستمهای تولید پراکنده (DG)، پیل سوختی، رفورمر، مبدل dc-dc، اینورتر، ابرخازن، تقسیم بار، ریزشبکه، کنترل، تخمین حالت، الگوریتم ژنتیک، شبکه عصبی مصنوعی، بهینه سازی

# فصل اول: مقدمه و اهداف پروژه

## ۱-۱- مقدمه

امروزه با توجه به مسائل زیست محیطی، قیمت بالای سوختهای فسیلی، تشکیل بازارهای خصوصی صنعت برق و از طرفی پیشرفت‌های چشمگیر حاصل شده در ژنراتورهای کوچک، تجهیزات الکترونیک قدرت، ذخیره سازها و کشف روشهای مختلف تولید انرژی از انرژیهای تجدید پذیر علاقه زیادی به استفاده از سیستم های تولید پراکنده[1] در سرتاسر دنیا ایجاد شده است [۱]-[۲]. این سیستم ها در اندازه های کوچک و در قسمتهای مختلف شبکه توزیع نصب شده و در سالهای اخیر سرمایه گذاریهای بسیار زیادی توسط دولتهای مختلف بر روی آن انجام گردیده است. در کشور خودمان نیز خرید تضمینی برق از منابع تجدیدپذیر جهت تشویق سرمایه گذاران خصوصی به سرمایه گذاری در این زمینه در دولت مصوب شده است [۲]. از جمله این منابع می توان به میکرو توربین ها، سیستم های پیل سوختی، سلولهای خورشیدی و توربین های بادی اشاره نمود [۳]-[۸].

با توجه به تعداد زیاد این منابع در شبکه، سیستم قدرت در آینده تحت تأثیر این واحدها قرار گرفته و ساختار شعاعی سیستمهای توزیع دچار تغییر خواهد شد. بعبارت دیگر بسیاری از مسائل بهره برداری و کنترل سیستم توزیع نظیر کنترل ولتاژ، حفاظت، قابلیت اطمینان و ... با حضور این منابع دچار تغییر خواهد شد. این منابع جهت بهبود قابلیت اطمینان و قابلیت گسترش تغذیه سیستم قدرت، پایدار سازی، بهینه سازی سیستم توزیع، تهیه ذخیره پشتیبان و کاهش هزینه های انتقال و توزیع مناسب بوده که همگی مورد علاقه و به سود شرکتهای برق می باشند. برای مشتریان نیز با توجه به تأمین توان در ساعتهای قطع برق و کاهش قیمت در هنگام پیک این منابع مفید بوده و

[1] Distributed Generation (DG)

سرانجام بعلت کاهش آلودگی این منابع برای جوامع مختلف حائز اهمیت می باشند [۹]-[۱۲]. لذا در این پروژه به حل برخی مسائل بهره برداری این گونه سیستم ها پرداخته خواهد شد.

## ۱-۲- طرح مسئله

سیستم توزیع بعنوان بخش مهمی از سیستم قدرت بعنوان پل بین تولید کننده و مصرف کننده، همواره تحت تأثیر خطاهای مختلفی است که به نحوی باعث قطع ارتباط شده و وقفه هایی برای مصرف کننده ها پیش می آورند. با توجه به اینکه بیشتر خطاهای اتفاق افتاده در سیستم قدرت مربوط به سیستمهای توزیع می باشد، لذا در سالهای اخیر جهت کاهش قطعی های ناشی از خطاها در موارد غیر لزوم و بالا بردن قابلیت اطمینان شبکه های توزیع راهکارهای مختلفی از جمله اتوماسیون سیستم توزیع در بسیاری از کشورها از جمله کشور خودمان پیاده سازی شده است. در سالهای آتی نیز بخاطر بکار گیری تعداد زیاد منابع تولید پراکنده در شبکه های توزیع، ساختار این سیستم شعاعی با سیلان توان یکطرفه تغییر کرده و لذا جهت کنترل و حفاظت این سیستم جهت حفظ قابلیت اطمینان بارهای سیستم باید تمهیدات لازم انجام گیرد تا در حالت عادی و خطاهای پیش آمده اولاً از سیستم های تولید پراکنده نصب شده حداکثر استفاده شود و ثانیاً مسائل حفاظتی و بهره برداری اقتصادی شبکه و در نهایت پیوستگی برق مصرف کنندگان به نحو احسن انجام گیرد.

در حال حاضر خطاهای پیش آمده در سیستم توزیع باعث قطع کلیدها و در نتیجه خاموشی بارها شده و استانداردهای فعلی لزوم قطع منابع تولید پراکنده را در این حالت اشاره کرده اند [۱۳]. اما جزیره ای شدن[1] حالتی است که قسمتی از سیستم توزیع که از شبکه اصلی جدا شده است و شامل بارها و منابع تولید پراکنده می باشد بتواند انرژی دار مانده و بارها تأمین گردند. این مسئله در سالهای جاری بخاطر افزایش رقابت در امنیت مشترکین باعث افزایش فزاینده فشار به شرکتهای تولید برق گردیده تا با راهکارهای مختلف نظیر جزیره ای شدن، کیفیت برق و خدمات خود را افزایش دهند. لذا قطع منابع تولید پس از بروز هر خطا در محیط های خصوصی برق راه حل عملی و اقتصادی نمی باشد [۱۴] و انتظار می رود در آینده ای نزدیک این سیاست تغییر کند و سیستمهای توزیع مستقل از شبکه[2] جهت تأمین برق مصرف کنندگان در ساعتهای قطع برق مورد استفاده قرار گیرند که این مسئله در استاندارد IEEE-1547 [۱۵] نیز اشاره شده است.

[1] Islanding
[2] Stand-Alone

اگر یک سیستم توزیع بخواهد بصورت مستقل یا جزیره ای به کار خود ادامه دهد باید ولتاژ و فرکانس نرمال و مناسب بارها کنترل و تثبیت گردد و هر گونه تغییر در سیستم نیز تحت کنترل باشد تا اینکه پیوستگی برق بارها و عملکرد درست تجهیزات مختلف رعایت شود. از جمله مسائلی که هنگام کار یک سیستم توزیع بصورت مستقل مطرح می باشند کنترل تولید کننده ها و تقسیم بار بین آنها، حفاظت سیستم، قیمت برق و نحوه عرضه آن به مشتریان، میزان قابلیت اطمینان، امکان اتصال مجدد به شبکه و سنکرونیزاسیون می باشد.

## ۱-۳- هدف پروژه

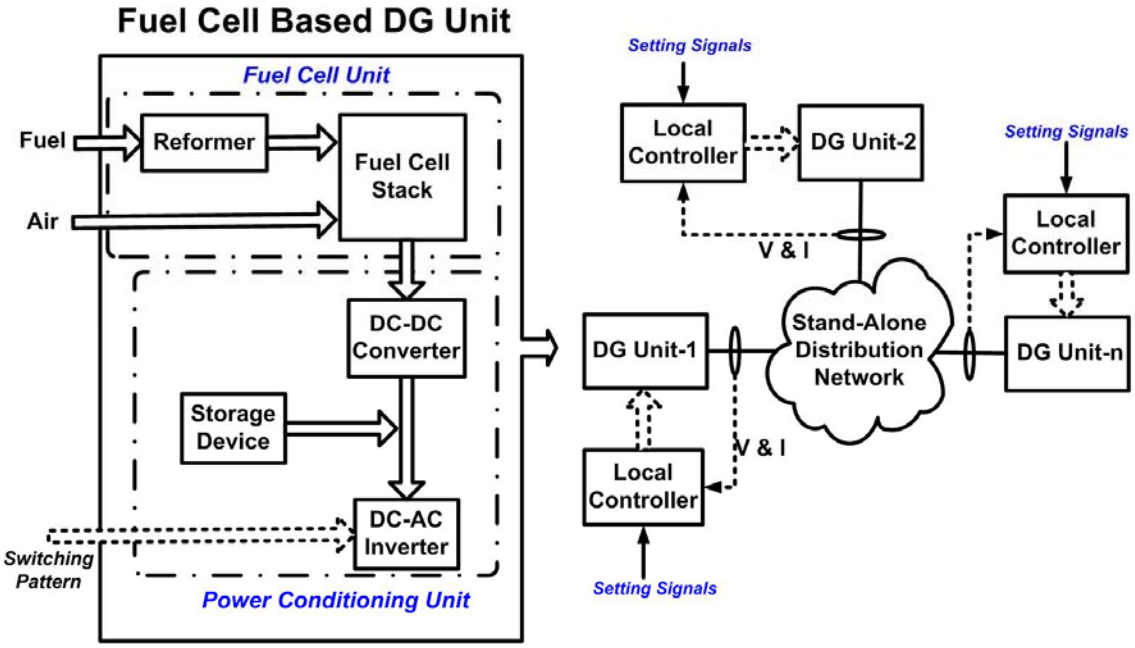
بدلیل مزایای زیاد پیل سوختی از آن به عنوان منبع انرژی بسیار مهمی در سالهای آتی نام برده می شود و با توجه به سرمایه گذاریهای کلان انجام شده توسط دولتهای مختلف، استفاده از آن و ساخت و تولید آن بصورت تجاری خواهد شد. در کشور خودمان هم با توجه به تعریف پروژه ملی و برنامه‌ریزی ۱۵ ساله جهت ساخت و تولید و بدست آوردن دانش فنی و تکنولوژی این عنصر تولید پراکنده [۱۶]، نیاز به حل مسائل مرتبط با آن در هنگام بکارگیری در سیستمهای تولید انرژی احساس می‌شود.

لذا در این پروژه یک سیستم توزیع جدا از شبکه شامل چندین منبع تولید کننده پیل سوختی با مشخصات و محدودیتهای متفاوت و بارهای خطی مختلف با طبیعت متغیر در نظر گرفته خواهد شد. این شبکه دارای توپولوژی ثابت بوده و در آن بارهای مختلف الکتریکی و تولید کننده های پیل سوختی در نقاط مختلف موجود هستند. هدف این رساله طراحی یک سیستم کنترل اتوماتیک تولید برای سیستم توزیع اشاره شده جهت هدایت سیستمهای تولید کننده پیل سوختی با مقادیر نامی و محدودیتهای عملکردی مختلف به تولید توان اکتیو و راکتیو مورد نیاز بارها در سریعترین زمان پس از هر گونه تغییر و با در نظر گرفتن دینامیک پیل سوختی می باشد. در مرحله بعدی هدف کنترل کننده تثبیت پارامترهای مهم سیستم در مقادیر نامی می باشد. در این سیستم برای هر یک از مبدلها یک سیستم کنترل محلی طراحی خواهد شد که با فیدبک گیری از متغیرهای محلی ولتاژ و جریان و تغییرات در پالس های کلیدزنی مراجع سیستم کنترل را ایجاد نمایند. یک سیستم کنترل و نظارت نیز باید بگونه ای طراحی شود که پس از هر گونه تغییر در بارها یا تولید کننده ها میزان توان مورد نیاز شبکه را تشخیص داده و با تغییر نقاط مرجع مبدلها توان را بین آنها تقسیم نماید.

در هنگام کنترل یک سیستم توزیع شامل چندین تولید کننده با مشخصات و توابع کارکرد متفاوت و توزیع شده در نقاط مختلف شبکه, مسائل زیر پیش خواهد آمد که حل آنها از اهداف انجام این تحقیق است:

- نحوه تشخیص عدم تعادل بین توان تولیدی و مصرفی شبکه پس از بروز اغتشاش (نظیر تغییر بار یا خروج مولد) در شبکه بزرگ توزیع برای کنترل تولید مولدها و جلوگیری از ناپایداری شبکه
- نحوه تعیین نقاط مرجع[1] ولتاژ و توان برای کنترل کننده های هر یک از مبدلها جهت تأمین توان اکتیو و راکتیو شبکه در سریعترین زمان
- نحوه تقسیم توان به مقدار دلخواه و قابل تنظیم بین مبدلها جهت عملکرد بهینه سیستم

شکل (۱-۱) شمای کلی سیستم توزیع مستقل مورد مطالعه در این تحقیق را نشان می دهد. همانگونه که ملاحظه می‌شود، سیستم دارای n منبع تولید پراکنده پیل سوختی است که هر یک دارای کنترل کننده محلی می باشند و مراجع کنترلی هر یک از آنها نیز توسط یک سیستم کنترل سطح بالاتر تعیین می‌شود. هر یک از تولید کننده ها مطابق شکل سمت چپ شامل پیل سوختی و مبدل های مربوطه می باشد که در فصل‌های آتی بطور مفصل به آنها پرداخته خواهد شد.




**شکل (۱-۱): شمای کلی یک سیستم توزیع مستقل شامل منابع تولید پیل سوختی**

[1] Set Points

## ۱-۴- سوابق کارهای انجام شده در زمینه کنترل تقسیم بار[1]

کنترل ولتاژ، فرکانس و توان در سیستم های قدرت سنتی (شامل تولید کننده ها با ماشین های دوار) و سیستم های قدرت جدید (شامل منابع مختلف تولید پراکنده) به روشهای مختلفی انجام گردیده که در این قسمت به طور خلاصه به معرفی و شرح آنها پرداخته شده تا مشکلات و کمبودها بیشتر درک شده و از ایده ها و روشهای موجود نیز بیشترین بهره برداری انجام گیرد.

### ۱-۴- ۱- کنترل بار- فرکانس در سیستمهای قدرت سنتی

برای عملکرد رضایت‌بخش یک سیستم قدرت باید فرکانس ثابت بماند. کنترل نسبتاً دقیق فرکانس، ثبات سرعت موتورهای القائی و سنکرون و مشکلات کمتر در هنگام راه‌اندازی آنها را در پی خواهد داشت [۱۷]. در مصرف کننده های حساس امروزی نیز فرکانس متغیر باعث صدمه به عملکرد آنها می شود. فرکانس یک سیستم بستگی به تعادل توان حقیقی دارد. از آنجا که در سیستمهای قدرت کنونی فرکانس عامل مشترکی در سرتاسر سیستم است، هر تغییر در تقاضای توان حقیقی یک نقطه بصورت تغییری در فرکانس کل سیستم منعکس می‌شود و باید وسایلی مهیا شود تا این تغییر توان مورد تقاضا را بین واحدهای مختلف تولید تقسیم نماید. گاورنر سرعت هر ژنراتور در یک واحد تولیدی تابع اولیه کنترل را فراهم می‌آورد و باعث می‌شود که ژنراتورها به تغییر فرکانس حساسیت نشان دهند. مشابه حالت فرکانس، در هنگام تغییر ولتاژ باید توان راکتیو تغییر یابد. در سیستمهای قدرت بزرگ و بهم پیوسته شامل چند ناحیه، علاوه بر کنترل فرکانس باید تولید را به نحو برنامه‌ریزی شده سوق داد که این سیستم کنترل به سیستم کنترل بار – فرکانس[2] (LFC) معروف است [۱۷].

پس از انجام نوسانات اولیه ناشی از اغتشاش (مثلاً درخواست اضافه بار) و آرام گرفتن سیستم در نقطه کار جدید برای بازگرداندن فرکانس، ولتاژ و توانهای خطوط به محدوده قابل قبول، سیستمهای کنترل توان حقیقی و توان راکتیو وارد عمل می‌شوند. با کم و زیاد کردن توانهای حقیقی تولیدی در واحدهای مختلف (بصورت دستی یا اتوماتیک) فرکانس شبکه کنترل شده و با تغییر توان راکتیو در بخش‌های مختلف شبکه ولتاژ شین‌ها کنترل می‌شود.

در سیستم کنترل بار – فرکانس با توجه به انحراف فرکانس از مقدار نامی و میزان مورد نیاز توان، یک سیگنال کنترلی ساخته شده و از طریق گاورنر نیروگاهها به هر واحد اعمال می‌شود. سیستم های

---

[1] Load Sharing Control
[2] Load Frequency Control

کنترل بار–فرکانس معمولاً بصورت شیب افتی[1] هستند و با استفاده از گین انتگرالگیر حلقه فیدبک در سیستم کنترل (معروف به ضریب دروپ) که قابل تنظیم توسط اپراتور نیز می‌باشد، عمل تقسیم بار بین واحدها را انجام می‌دهند. اگر ضریب دروپ صفر باشد میزان مشارکت واحد در صفر کردن خطای فرکانس صد در صد بوده و واحد حداکثر تلاش خود را انجام می‌دهد ولی اگر این ضریب صفر نباشد واحد کمی خطا را می‌پذیرد و با آن کنار می‌آید. به هر حال در یک سیستم شامل چند نیروگاه مختلف، بسته به ضرایب دروپ تقسیم بار بین واحدها انجام می‌شود و واحد دارای ضریب دروپ کوچکتر تغییر بار بیشتری را بر عهده خواهد گرفت.

موازی با کنترل توان حقیقی، کنترل ولتاژ در یک سیستم قدرت برای عملکرد درست تجهیزات باید انجام شود. این کار با تزریق توان راکتیو در نقاط مختلف شبکه در مواقع لزوم انجام می‌شود. برای کاهش تلفات، بالا بردن ظرفیت انتقال خطوط و پایداری نیز تزریق توان راکتیو لازم است. تنها تفاوت اصولی بین کنترل فرکانس و ولتاژ در این است که توان حقیقی توسط ژنراتورهای سنکرون نیروگاهها در سطح سیستم تولید می‌شود ولی توان راکتیو را می‌توان بصورت محلی در هر نقطه شبکه با استفاده از وسایل جبران‌ساز نظیر خازن و راکتور شنت، تپ ترانس، SVC و ... انجام داد [۱۷].

### ۱-۴-۲- کنترل تقسیم بار در اینورترها

در سیستم های تغذیه بدون وقفه[2] (UPS) از چندین اینورتر موازی جهت بالابردن قابلیت اطمینان و گسترش مصرف کننده ها استفاده می گردد. کنترل تقسیم بار بین اینورترهای موازی در مقالات متعددی مورد بررسی قرار گرفته و در آزمایشگاهها مورد آزمایش عملی قرار گرفته است. چندین تکنیک برای تقسیم بار بین اینورترهای موازی وجود دارد که آنها را می توان به سه دسته اساسی تقسیم کرد:

- تکنیک Master/Slave
- تکنیک افت ولتاژ و فرکانس
- تکنیک تزریق جریان

#### الف- تکنیک Master-Slave

در این تکنیک از یک اینورتر PWM با ولتاژ کنترل شده به عنوان واحد Master و اینورترهای PWM با جریان کنترل شده به عنوان واحدهای Slave استفاده می شود. واحد Master ولتاژ خروجی

[1] Droop
[2] Unintuptable Power Supply

را در حالت سینوسی حفظ می کند و فرمان های مناسب برای واحدهای Slave را ایجاد می کند. در این روش جریان کل بار اندازه گیری شده و بر تعداد واحدهای سیستم تقسیم می شود تا میانگین جریان هر واحد محاسبه شود. جریان واقعی هر واحد اندازه گیری می شود و اختلاف از مقدار میانگین محاسبه می شود تا سیگنال کنترلی برای تقسیم بار تولید شود [۱۸]- [۱۹]. با استفاده از یک حلقه جریانی با سرعت بالا که در [۲۰]-[۲۱] پیشنهاد شده می توان به سرعت اختلاف در تقسیم بار را جبران کرد. این تکنیک ویژگی های بسیار خوبی دارد. از جمله قابلیت توسعه آسان و بی تأثیر بودن امپدانس خطوط ارتباطی در نحوه تقسیم بار می باشد. اما این تکنیک چندین نقطه ضعف اساسی دارد. یکی از اساسی ترین عیب های این سیستم آن است که چنانچه واحد Master خراب شود تمام سیستم از کار می افتد. عیب دیگر این سیستم آن است که پایداری سیستم به تعداد واحدهای Slave وابسته است. برای عملکرد این سیستم لازم است که سیگنال های از طریق واحد Master به تمام واحدهای Slave فرستاده شود و این سیم کشی برای انتقال سیگنالها باعث کاهش قابلیت اعتماد سیستم می شود چون احتمال وقوع خطا در این اتصالات وجود دارد. در [۲۲] استفاده از یک میکروپروسسور برای تشخیص واحد معیوب و جانشین سازی واحد دیگری به جای آن به عنوان واحد Master پیشنهاد شده است. همچنین این تکنیک عملکرد بسیار ضعیفی در مورد بارهای غیر خطی دارد [۲۳].

**ج- تکنیک افت ولتاژ و فرکانس**

در [۲۴]-[۲۶] سیستم کنترل کاملاً مستقلی برای عملکرد موازی اینورترها پیشنهاد شده است. در این طرح تنها متغیرهائی فیدبک می شوند که در محل اینورتر قابل اندازه گیری هستند و نیازی به انتقال سیگنال های کنترلی بین اینورترها نیست. این ویژگی (عدم نیاز به انتقال سیگنال های کنترلی بین اینورترها) برای عملکرد سیستم های ac بزرگ، که فاصله زیاد بین اینورتر ها انتقال سیگنالهای کنترلی را مشکل می سازد حائز اهمیت است. همچنین در سیستم های UPS با قابلیت اعتماد بالا حفظ عملکرد سیستم در صورت قطع ارتباط مهم است.

این تکنیک از جهتی شبیه تقسیم بار در سیستمهای قدرت سنتی می باشد. در این حالت برای هر کدام از اینورتر ها دو مشخصه افت تعریف می شود. یک مشخصه افت توان اکتیو-فرکانس و یک مشخصه افت توان راکتیو-ولتاژ. این مشخصه های افت با توجه به میزان تنظیم ضرایب، تقسیم مناسب توان بین اینورترها را تضمین می کنند.

در این روش که بطور مفصل در مرجع [۲۵] ارائه شده و مورد ارزیابی عملی نیز قرار گرفته، بر اساس مقادیر اندازه گیری شده توان اکتیو و توان راکتیو در ترمینال هر اینورتر، نقاط مرجع ولتاژ و

فرکانس با استفاده از مشخصه دروپ آنها محاسبه می شوند. برای مرجع فرکانس، یک مشخصه دروپ P-ω برای هر اینورتر بصورت رابطه (۱-۱) تعریف می شود:

$$\omega_i = \omega_{0i} - m_i(P_{0i} - P_i) \qquad (۱-۱)$$

که در اینجا i شماره واحد، $\omega_{0i}$ فرکانس زاویه ای نامی، $P_{0i}$ توان نامی واحد i ام و $P_i$ توان واقعی اندازه گیری شده از دو سر واحد می باشند. $m_i$ شیب مشخصه دروپ واحد i ام است و این ضریب نسبت تقسیم توان بین واحدها را تعیین می کند. اگر مقادیر شیب مشخصه دروپ واحدهای مختلف به نسبت مقادیر نامی آنها در نظر گرفته شود، تغییر توان در سیستم به نسبت مقادیر نامی هر یک از واحدها بین آنها تقسیم می شود. از طرفی با تغییر هر یک از مقادیر نامی و شیب یعنی تغییر مشخصه می توان در حین کار سیستم، توان تولیدی آن را تغییر داد.

نحوه عملکرد این روش بدین گونه است که وقتی یک بار اضافی وارد شبکه شود، فرکانس همه اینورترها با توجه به مشخصه دروپ تغییر داده می شود و این تغییر فرکانس باعث تغییر فاز ولتاژ شین های مختلف و مشارکت واحدها در تأمین توان اضافی می گردد.

در حالت مشابهی نقطه مرجع ولتاژ ترمینال $E_i$ با تغییر مشخصه دروپ Q-V برای سیستم بصورت زیر انجام می گیرد. این دروپ مشارکت واحدها در توان راکتیو مورد نیاز سیستم را تعیین می کند.

$$E_i = E_{0i} - n_i(Q_{0i} - Q_i) \qquad (۲-۱)$$

که در اینجا $E_{0i}$ ولتاژ نامی شبکه، $Q_{0i}$ توان نامی اینورتر واحد i ام، $n_i$ شیب مشخصه دروپ ولتاژ-توان راکتیو و $Q_i$ مقدار واقعی توان راکتیو واحد i ام می باشند.

روش ارائه شده برای بارهای خطی تقسیم بار را به خوبی انجام می دهد. اما برای بارهای غیرخطی یا شدیداً القائی و همچنین در مواردی که امپدانس خطوط اتصال اینورترها متفاوت است قادر نیست تقسیم توان راکتیو را به خوبی به انجام رساند. برای بهبود این روش در تقسیم بار بصورت سریع و بدون نوسان در بارهای گوناگون روش دروپ بهبود یافته در مراجع [۲۷]-[۲۸] ارائه شده است.

**د- تکنیک تزریق جریان**

هنگامی که اینورترهایی با ظرفیت یکسان به طور موازی وصل می شوند، به علت تفاوت در پارامترهای واحدها و امپدانس خطوط، تقسیم توان راکتیو بین واحدها ممکن است متفاوت باشد. بر طبق این تکنیک، یک جریان با فرکانس متفاوت با شبکه از هر یک از واحدها به کل سیستم تزریق می شود. فرکانس جریان تزریقی هر واحد به عنوان تابعی از خروجی توان راکتیو آن واحد افت داده می شود. چون تقسیم بار راکتیو بین واحدها متفاوت است، واحدهای مختلف فرکانس های متفاوتی تزریق خواهند کرد. از این اختلاف فرکانس در طول زمان انتگرال گیری خواهد شد و منجر به اختلاف فاز بین واحدها می شود و این اختلاف فاز به حلقه کنترل ولتاژ فرکانس اصلی اینورتر اضافه می شود. لذا واحدی که توان راکتیو خروجی‌اش بیشتر است فرکانسش بیشتر افت می کند و این امر منجر به کاهش زاویه فاز این واحد می شود. واحدی که خروجی توان راکتیوش کمتر است فرکانس آن کمتر افت می کند بنابراین زاویه فاز آن افزایش می یابد. این فرایند ادامه می یابد تا تقسیم مناسب توان راکتیو بین واحدها حاصل شود. این تکنیک به منظور جبران سازی اثر امپدانس خط، به طور خودکار زاویه فاز را به عنوان تابعی از امپدانس خط تنظیم می کند و با استفاده از این تکنیک تقسیم توان راکتیو همواره مناسب است [۲۹].

در این روش جهت مرتفع کردن نقص روش افت در کنترل تقسیم توان راکتیو و بارهای غیر خطی بین تولید کننده ها از تزریق سیگنال در هر یک از منابع استفاده می کند. این روش جهت کنترل مبدلها در حالتهای مختلف نظیر وجود بار غیرخطی، عدم تعادل در امپدانس خط و .. جوابگو بوده و نتایج مناسبی در بر داشته است. اما این روش نیاز به تزریق سیگنال با فرکانس غیر از شبکه داشته و لذا مسئله فیلترینگ و اندازه گیری این فرکانس باعث افزایش قیمت و پیچیدگی می شود.

## ۱-۴-۳- کنترل تقسیم بار در سیستمهای تولید پراکنده

همانگونه که اشاره شد در سیستمهای قدرت کنونی شامل نیروگاههای حرارتی، آبی و هسته ای که از ژنراتورهای سنکرون استفاده می کنند، با تغییر تقاضای بار در هر نقطه فرکانس کل سیستم دچار تغییر شده و سیستم LFC جهت کنترل و تثبیت فرکانس، بار را بین واحدها تقسیم می‌نماید. در این سیستم‌ها فرکانس بعنوان یک عامل مشترک در کل سیستم وجود داشته و از روی آن می‌توان به میزان بار مورد نیاز دستیابی پیدا کرد. بعبارت دیگر فرکانس بعنوان یک سیگنال مخابراتی بین واحدها عمل نموده و با تنظیم ضریب دروپ میزان توان تولیدی واحدها کنترل می‌شود.

با توجه به اینکه در سیستمهای تولید پراکنده متصل شده با اینورترها می‌توان دامنه، فرکانس و فاز ولتاژ خروجی اینورتر ها را کنترل نمود لذا با بکار گیری روشهای مختلف سعی در کنترل تقسیم بار بین مبدلها با استفاده از این پارامترها گردیده است. مرجع [۳۰]، یک کنترل کننده مود لغزشی برای اینورترهای سه فاز چهار سیمه ارائه نموده است. مرجع [۳۱] با استفاده از یک تکنیک PWM جدید روشی برای تولید ولتاژ سینوسی با وجود بارهای غیر خطی در سیستم ارائه نموده است. مرجع [۳۲] یک استراتژی کنترل برای هر دو حالت متصل به شبکه و جدا از شبکه ارائه نموده است که دارای خاصیت تشخیص جزیره ای شدن[1] داخلی می باشد. همچنین مرجع [۳۳] یک استراتژی کنترل جدید برای کنترل یک واحد تولید پراکنده متصل شده با اینورتر ارائه داده است. همه این مقالات بر روی کنترل اینورترها در حالت مستقل و تنها یک اینورتر و تعدادی بار تمرکز نموده اند.

در برخی دیگر از مقالات [۳۴]-[۴۱] ، مفهوم دروپ توان اکتیو-فرکانس و توان راکتیو-ولتاژ شبیه سیستمهای قدرت کنونی برای کنترل توان منابع تولید متصل شده توسط اینورتر مورد استفاده قرار گرفته است. ایده اصلی این روش بر تقسیم وظیفه تأمین توان بارها بین منابع مختلف تولید پراکنده بر اساس تعریف مشخصه دروپ برای هر یک از واحدها می باشد. در این روش با هر گونه تغییر در بار سیستم کلیه واحد های تولیدی به نسبت مشخصه تعریف شده به تغییرات پاسخ می دهند. این روش فرکانس سیستم را بعنوان یک سیگنال ارتباطی مخابراتی بین واحدها جهت کنترل توان اکتیو مورد استفاده قرار می دهد. با هر افزایش بار، افت فرکانس اتفاق افتاده و باعث افزایش توان اکتیو تولیدی آن واحد با توجه به پارامترهای تنظیم شده دروپ آن می گردد. ضریب دروپ دیگری برای مشارکت دادن واحدهای مختلف جهت تأمین توان راکتیو با استفاده از دامنه ولتاژ تعریف می شود. در این حالت هر گونه اغتشاش و تغییر در سیستم باعث مشارکت همه واحدها در تأمین توان اکتیو و راکتیو می گردد. خاصیت این روش این است که نیاز به ارتباط مخابراتی بین واحدها نبوده و کنترل منابع با توجه به اطلاعات محلی انجام می گیرد. تاکنون این روش در مقالات مختلف جهت تقسیم بار بین منابع تولید پراکنده در سیستمهای توزیع از جنبه های مختلف مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. اما علیرغم مزایای اشاره شده دارای معایبی به شرح ذیل است [۳۴]-[۴۲]:

- در این روش فرکانس سیستم با توجه به میزان بار متغیر بوده و این فرکانس متغیر برای بارهای حساس سیستم می تواند زیان آور و گاهی مختل کننده باشد.
- استراتژی کنترل ثانویه جهت بازگرداندن فرکانس به مقدار نامی پس از هر تغییر مورد نیاز است.

[1] Islanding Detection

- استراتژی کنترلی فوق برای بارهای شدیداً سلفی مثل موتورها و بارهای غیر خطی جوابگو نمی باشد.
- کنترل نسبتاً پیچیده ای در این روش مورد نیاز است.
- تقسیم بار بین واحدهای تولید به منظور کارکرد بهینه در شبکه و برآورده کردن همه قیود سیستم با این روش امکان پذیر نمی باشد.

در این پروژه پس از فهم کامل نحوه کنترل یک سیستم تولید پراکنده اینورتری اثرات آنها در یک شبکه توزیع ولتاژ پایین یا متوسط مستقل در نظر گرفته شده و روشهایی برای کنترل تقسیم توان بین منابع جهت کارکرد مطمئن و بهینه سیستم و با در نظر گرفتن قیود سیستم و منابع تولید ارائه خواهد شد. در روشهای ارائه شده که برای سیستم های متصل شده با اینورتر قابل استفاده است، فرکانس سیستم توسط اینورترها در مقدار ۵۰ یا ۶۰ هرتز تثبیت می شود و این تثبیت فرکانس باعث کیفیت بهتر ولتاژ و ساده تر شدن سیستم کنترلی می شود. روشهای ارائه شده در حالتهای مختلف و در شبکه های نمونه ارزیابی و بررسی شده تا صحت عملیات کنترلی مشخص گردد.

## ۱-۵- فصل بندی پروژه

با توجه به اهداف پروژه فصول مختلف این رساله به شرح زیر نحوه انجام پروژه و دستیابی به اهداف مورد نظر را معین می کنند.

**فصل د**وم به بررسی سیستم های تولید پراکنده مستقل از شبکه و مشخصات و شرایط و کنترل کننده های مورد نیاز این سیستم ها در هنگام کار مستقل پرداخته است.

**در فصل سوم** سیستم پیل سوختی معرفی و تمامی اجزای آن مدل سازی و شبیه سازی گشته تا نحوه بکار گیری مؤثر آن معین گردد.

در **فصل چهارم** روشهایی برای کنترل تولید کننده های پیل سوختی در سیستم تولید پراکنده مستقل از شبکه بدون استفاده از ارتباط مخابراتی بین واحدها ارائه شده و در حالتهای مختلف تشریح گردیده اند. شبیه سازی های متنوعی نیز جهت ارزیابی روشهای ارائه شده و صحت آنها انجام شده است.

در **فصل پنجم** مدیریت فعال سیستم توزیع شامل منابع تولید پراکنده معرفی شده و روشهایی جهت کنترل شبکه های مستقل با استفاده از ارتباط مخابراتی بین واحدها ارائه و با شبیه سازی متنوعی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

سرانجام در **فصل ششم** نتایج پروژه و پیشنهادهایی برای ادامه کار ارائه شده است.

# فصل دوم: سيستم هاي توليد پراكنده مستقل