دانشکده فنی و مهندسی

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی برق – قدرت

# حفاظت ضد جزیره‌ای و بهره‌برداری جزیره‌ای تولیدات پراکنده با حداقل ناحیه غیر قابل تشخیص

**حسان واحدی**

اساتید راهنما:

دکتر رضا نوروزیان

دکتر ابوالفضل جلیلوند

استاد مشاور:

دکتر گئورگ قره‌پتیان

پاییز ۱۳۸۹

بسم الله الرحمن الرحیم

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 پدر و مادر عزیزم تقدیم می کنم

**بر خود می‌دانم که،**

از زحمات بی‌دریغ، تلاش‌های بی‌وقفه و راهنمایی‌های ارزشمند اساتید گرامی **جناب آقای دکتر نوروزیان، جناب آقای دکتر جلیلوند** و **جناب آقای دکتر قره‌پتیان** تشکر و قدردانی نمایم .

درپایان از دوستان عزیزم، جناب آقایان مهندس صفری، بیات، کرد، روحانی، صادقی و خانم طالب که با محبت ها و همراهی های خالصانه اینجانب را در این مرحله حساس پشتیبانی کردند، صمیمانه تشکر می نمایم.

# چکیده

تقاضا روز افزون برای انرژی الکتریکی در سرتاسر دنیا باعث رویکـرد شـدیدی بـرای توسـعه‌ی ظرفیـت تولید و توزیع شده است که این یک مرحله‌ی نه چندان مطلوب در صنعت برق تجدید ساختار شده‌ی امـروزی که برای افزایش بهره وری با حداقل هزینه‌های عملی می کوشد، به حسـاب مـی‌آیـد. توسـعه‌ی سـرویس‌هـا و خدمات یک گزینه‌ی غیر عملی برای سرمایه گذاران است، بطوریکه حجم منابع مالی و چالش‌ها در بسـیاری از جوامع مانع ساخت نیروگاه های با ظرفیت بالا یا دکل‌های انتقال است. حتی اگر توسعه توسط سـرمایه گـذاران امکان پذیر باشد، سرانجام به افزایش نرخ ها برای مصرف کنندگان منجرخواهد شد. راه چاره‌ی اقتصادی آشکار آن، اجتناب از توسعه به روش سنتی و به جای آن بهره برداری از ظرفیت موجود تولید پراکنده، که می تواند در نزدیکی مصرف کننده توان مورد نیاز را تأمین نماید، می‌باشد.

استفاده از این دسته تولید کننده‌های توان در شبکه، در کنار مزایای متعددی که خواهد داشت، مشـکلاتی نیـز به همراه دارند. از جمله مشکلات ناشی از وجود تولیدات پراکنده درشبکه، پدیده جزیره‌ای شدن آنها می باشد. جزیره‌ای شدن تولیدات پراکنده به مفهوم آن است که یک یا چند تولیـد پراکنـده بـه همـراه بخشـی از بارهـای شبکه، از شبکه بالادست جدا شده و به‌طور مستقل به کار خود ادامه دهند. با توجه به استانداردهای شناخته شده مانند IEEE 1547 در این زمینه، لازم است که این پدیده در اسرع وقت شناسـایی و تولیـد پراکنـده از شـبکه جدا گردد.

تاکنون روشهای زیادی در قالب دسته بندیهای مختلف برای شناسایی این پدیده ارائه شده است که هر کدام مزایا و معایبی دارند. در این رساله سه روش شناسایی پدیده جزیره‌ای به تفکیک ارائه شده که همگی برای تولیدات پراکنده مبتنی بر اینورتر کاربرد دارند. نتیجه حاصل از انجام آزمایش های مختلف بر اساس این روشها، دستیابی به شناسایی دقیقتر پدیده جزیره‌ای در کوتاه ترین زمان ممکن می‌باشد.

**واژگان کلیدی** : تولید پراکنده، جزیره‌ای شدن، اینورتر، حفاظت ولتاژی، حفاظت فرکانسی.

# فهرست مطالب


عنوان صفحه

چکیده..... الف

**فصل اول** پیشگفتار..... ۱

۱-۱- پیشگفتار..... ۲

**فصل دوم** مقدمه‌ای بر تولیدات پراکنده..... ٦

۲-۱- مقدمه..... ٦

۲-۲- تولید پراکنده و تعاریف مربوط به آن..... ۷

۲-۲-۱- ظرفیت تولید پراکنده..... ۷

۲-۲-۲- مکان تولید پراکنده..... ۹

۲-۲-۳- هدف تولید پراکنده..... ۹

۲-۳- گروه بندی تکنولوژیهای تولید پراکنده..... ۹

۲-۳-۱- بررسی انواع تکنولوژی های تولید پراکنده..... ۱۰

۲-۳-۱-۱- موتورهای احتراق داخلی..... ۱۰

۲-۳-۱-۲- توربین های گازی..... ۱۲

۲-۳-۱-۳- میکروتوربین ها..... ١٤

۲-۳-۱-۳-۱- توربین های گازی سیکل ساده ..... ۱۵

۲-۳-۱-۳-۲- توربین‌های گازی بهبود یافته ..... ۱۵

۲-۳-۱-۳-۳- توربین های گازی سیکل ترکیبی..... ۱۵

۲-۳-۱-٤- پیل های سوختی..... ۱۷

۲-۳-۱-۵- توربین های بادی..... ۲۲

۲-۳-۱-٦- سیستم های فتوولتاییک..... ۲۳

۲-۳-۱-۷- سیستم های حرارتی خورشیدی..... ۲۵

۲-۳-۱-۸- بیوماس..... ۲٦

۲-۳-۱-۹- زمین گرمایی..... ۲۷

۲-۳-۱-۱۰- وسایل ذخیره انرژی ..... ۲۸

۲-۳-۱-۱۰-۱- باتریها..... ۲۹

۲-۳-۱-۱۰-۲- ذخیره سازی انرژی مغناطیسی سوپرهادی..... ۲۹

۲-۳-۱-۱۰-۳- خازنها..... ۳۰

۲-۳-۱-۱۰-٤- چرخهای طیار..... ۳۱

۲-۳-۱-۱۰-۵- هیدروپمپ ها و CAES..... ۳۲

۲-٤- مشخصه عملکردی تکنولوژیهای تولید پراکنده..... ۳۲

۲-۵- مزایا و معایب استفاده از تولید پراکند..... ۳٤

۲-۵-۱- مزایای منابع تولید پراکنده برای مصرف کنندگان..... ۳٤

۲-۵-۲- مزایای منابع تولید پراکنده برای شرکتهای برق..... ۳٤

۲-۵-۳- مزایای ملی منابع تولید پراکنده..... ۳۵

۲-٦- کاربردهای تولید پراکنده..... ۳۷

۲-٦-۱- تولید پراکنده آماده به کار..... ۳۷

۲-٦-۲- اصلاح اوج بار..... ۳۷

۲-٦-۳- کاربردهای دوردست و محلی..... ۳۸

۲-٦-٤- تولید همزمان گرما و برق (CHP) ..... ۳۸

۲-٦-۵- بار پایه..... ۳۹

۲-٦-٦- پشتیبانی شبکه..... ۳۹

۲-۷- مقایسه انواع فن آوری های تولید پراکنده ..... ٤٠

۲-۸- تولیدات پراکنده مبتنی بر اینورتر ..... ٤٢

۲-۹- جمع بندی و نتیجه گیری ..... ٤٥

**فصل سوم** مروری بر پدیده جزیره‌ای ..... ٤٦

۳-۱- معرفی پدیده جزیره‌ای ..... ٤٧

۳-۲- اثرات جزیره‌ای شدن ..... ٤٧

۳-۳- روش های تشخیص جزیره‌ای شدن ..... ٤٨

۳-۳-۱- روش کنترل از راه دور ..... ٥١

۳-۳-۱-۱- ارتباط با استفاده از حامل های خطوط انتقال ..... ٥٢

۳-۳-۱-۲- انتقال سیگنال قطع ..... ٥٦

۳-۳-۲- روش های پسیو ..... ٥٧

۳-۳-۳- روش های اکتیو ..... ٦٣

۳-٤- جمع بندی و نتیجه گیری ..... ٦٩

**فصل چهارم** روش پیشنهادی اول ..... ٧٠

٤-۱- مقدمه ..... ٧١

٤-۲- سیستم مورد مطالعه ..... ٧١

٤-۳- روش پیشنهادی ..... ٧٧

٤-۳-۱- خطی سازی معادلات حالت سیستم ..... ٧٨

٤-۳-۲- مشخصه $V_{dc}$ - $V_{PCC}$ تولید پراکنده ..... ٨٢

٤-۳-۳- ارزیابی کارایی روش پیشنهادی ..... ٨٨

٤-٤- نتایج شبیه سازی ..... ٩٢

٤-٤-۱- نتایج آزمایش **UL 1741** ..... ٩٢

٤-٤-٢- تأثیر سوئیچنگ بار برای ارزیابی روش پیشنهادی..... ۹۸
٤-٤-٣- تأثیر ضریب کیفیت بار برای ارزیابی روش پیشنهادی..... ۱۰۱
٤-٤-٤- حالت بهره برداری سیستم با چند تولید پراکنده..... ۱۰۳
٤-٤-٥- مقایسه روش پیشنهادی از نقطه نظر کیفیت توان..... ۱۰٤
٤-٥- جمع بندی و نتیجه گیری..... ۱۰۷

**فصل پنجم** روش پیشنهادی دوم..... ۱۰۸
٥-١- مقدمه..... ۱۰۹
٥-٢- سیستم مورد مطالعه..... ۱۱۰
٥-٣- معیار ناپایداری روش **SFS**..... ۱۱۳
٥-٤- روش پیشنهادی..... ۱۱٦
٥-٤-١- الگوریتم غذایابی باکتری..... ۱۱۷
٥-٤-١-١- حرکت ..... ۱۱۷
٥-٤-١-٢- عملکرد گروهی..... ۱۱۸
٥-٤-١-٣- تولید مثل..... ۱۱۹
٥-٤-١-٤- حذف وپراکندگی..... ۱۲۰
٥-٤-٢- انتخاب پارامترهای بهینه روش **SFS**..... ۱۲۰
٥-٤-٣- نحوه عملکرد روش ***Q-f***..... ۱۲۳
٥-٥- نتایج شبیه سازی..... ۱۲۷
٥-٥-١- ضریب بهینه روش تشخیص جزیره‌ای **SFS**..... ۱۲۷
٥-٥-٢- روش تشخیص جزیره‌ای پیشنهادی..... ۱۲۹
٥-٦- جمع بندی و نتیجه گیری..... ۱۳۰

**فصل ششم** بهره‌برداری جزیره‌ای..... ۱۳۱

٦-١- مقدمه ..... ١٣٢

٦-٢- استراتژی کنترلی تولید پراکنده ..... ١٣٤

٦-٢-١- استراتژی کنترلی در شرایط متصل به شبکه ..... ١٣٦

٦-٢-٢- استراتژی کنترلی در شرایط بهره برداری جزیره‌ای ..... ١٣٧

٦-٢-٣- الگوریتم تشخیص جزیره برای یافتن لحظه ایجاد جزیره ..... ١٣٧

٦-٢-٣-١- روش اول: نرخ تغییرات فرکانس (ROCOF) ..... ١٣٨

٦-٢-٣-٢- روش دوم: روش ترکیب رله ROCOF و روش SFS ..... ١٤٢

٦-٢-٤- الگوریتم حفاظتی در شرایط بهره برداری جزیره‌ای ..... ١٤٣

٦-٢-٥- بلوک سنکرون ساز ..... ١٤٣

٦-٣- سیستم مورد مطالعه ..... ١٤٤

٦-٣-١- سیستم مورد مطالعه اول ..... ١٤٨

٦-٣-١-١- حالت متصل به شبکه ..... ١٤٨

٦-٣-١-٢- بهره برداری جزیره‌ای با اضافه بار ..... ١٥٠

٦-٣-١-٣- بهره برداری جزیره‌ای امن و بازگشت شبکه ..... ١٥٢

٦-٣-٢- سیستم مورد مطالعه دوم ..... ١٥٥

٦-٣-٢-١- روش پیشنهادی اول تشخیص جزیره‌ای ..... ١٥٥

٦-٣-٢-٢- روش پیشنهادی دوم تشخیص جزیره‌ای ..... ١٥٧

٦-٣-٣- سیستم مورد مطالعه سوم ..... ١٦١

٦-٤- جمع بندی و نتیجه گیری ..... ١٦٤

**فصل هفتم** نتیجه‌گیری و پیشنهادات ..... ١٦٥

٧-١- نتیجه‌گیری ..... ١٦٦

٧-٢- پیشنهادات ..... ١٦٧

# فصل اول:

# پیشگفتار

## ۱-۱- پیشگفتار

تقاضا برای تأمین الکتریسیته در سرتاسر دنیا باعث افزایش فشار برای توسعه‌ی ظرفیت تولید و توزیع شده است. راه چاره‌ی اقتصادی آشکار آن، اجتناب از توسعه به طریق سنتی و بهره برداری از ظرفیتهای موجود تولید پراکنده[1] می باشد [۱]. برای بهره برداری از DG ها، استانداردهای IEEE 929 ، IEEE 1547 و UL 1741 حفاظت ضد جزیره‌ای را امری اجتناب ناپذیر برشمرده‌اند [۲]، [۳] و[۴]. از دلایل این اجبار می‌توان مشکلات کیفیت توان، تداخل در حفاظت شبکه وحتی خطر جانی افراد را برشمرد. به طور کلی، روش های متداول حفاظت ضد جزیره‌ای به سه بخش اصلی شامل اکتیو، پسیو و کنترل از راه دور تقسیم می شوند.

روش پسیو که به دلیل سادگی در پیاده سازی کاربرد زیادی دارد تنها با اندازه گیری پارامترهای سیستم ومقایسه حدود بالایی و پایینی پارامترها، حالت جزیره‌ای را تشخیص می دهد. از پر کاربرد ترین آنها می توان به حفاظت های ولتاژی[2]، حفاظت های فرکانسی[3] و تشخیص پرش فاز[4] اشاره کرد [۵] و [۶]. مقادیر آستانه بالایی و پایینی منظور شده در حفاظت های ولتاژی و فرکانسی، برای جلو گیری ازوقوع وقفه در سیستم به ازای اختشاشات معمول شبکه می باشد و متأسفانه به ازای بارهای نزدیک توان خروجی DG مقدار فرکانس یا ولتاژ

[1] Distributed Generation (DG)
2 Over / Under Voltage Protection
[3] Over / Under Frequency Protection
[4] Phase Jump Detection

از مقادیر آستانه تجاوز نکرده و حالت جزیره‌ای قابل تشخیص نمی‌باشد [۵] و [۷]. بنابراین روشهای پسیو دارای ناحیه غیر قابل تشخیص[1] بزرگی می باشند که برای غلبه بر این مشکل، از روش های ترکیبی مانند مانیتورینگ نامتعادلی ولتاژ و THD استفاده می‌شود [۸].

روشهای اکتیو با تزریق یک اعوجاج عمدی به شبکه و مانیتورینگ پاسخ شبکه به این اعوجاج، قادر به تشخیص حالت جزیره‌ای می‌باشند [۹]. به عنوان مثال، روشهای اکتیو شامل مد لغزشی شیفت فرکانس[2] [۹]، انحراف فرکانس اکتیو[3] یا بایاس فرکانس[4] [۱۰] و شیفت فرکانس سندیا[5] [۵] می باشند. این روشها دارای ناحیه غیر قابل تشخیص کوچکتری نسبت به روشهای پسیو می‌باشند ولی از طرفی باعث کاهش کیفیت توان سیستم می شوند [۸]. برخی از روش‌های اکتیو دیگر بر اساس تزریق عمدی جریان توالی منفی [۱۱] و تزریق سیگنال اعوجاج از طریق محور $d$ یا محور $q$ کنترلر جریان [۱۲] نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

همچنین روشهای کنترل از راه دور، دارای NDZ بسیار پایین هستند. از معایب این روشها، هزینه بالا نسبت به روشهای ذکر شده پیشین می‌باشد. روشهای پسیو و اکتیو قبلی غالباً توانایی کافی را نداشته و ناحیه غیر قابل تشخیص بزرگی داشتند. در این رساله سعی بر آن بوده است تا با ارائه روشهای جدید تشخیص جزیره‌ای، تا حد ممکن ناحیه غیر قابل تشخیص را کاهش داده و در کمترین زمان ممکن این پدیده تشخیص داده شود. لازم به ذکر است که تمامی شبیه سازیهای انجام شده در این رساله در محیط نرم افزاری MATLAB / Simulink می‌باشد.

[1] Non-Detection Zone (NDZ)
[2] Slide-mode frequency shift
[3] Active Frequency drift
[4] Frequency bias
[5] Sandia frequency shift

در فصل بعد، به مروری کلی انواع تولیدات پراکنده، مزایا و معایب آنها پرداخته شده است. همچنین در فصل سوم انواع روشهای موجود در تشخیص جزیره‌ای تشریح شده است. در فصل چهارم روش جدید تشخیص جزیره‌ای بر پایه کنترل ولتاژ DC ارائه شده و بطور کامل مورد ارزیابی قرار گرفته است. درفصل پنجم نیز روش تشخیص جزیره‌ای ترکیبی جدیدی ارائه و مورد ارزیابی قرار گرفته است.

در فصل ششم، روش تشخیص جزیره‌ای ترکیبی دیگری برای تعیین زمان جزیره‌ای شدن به همراه روش جدید کنترلی جهت بهره‌برداری تولید پراکنده در زمان جزیره‌ای شدن ارائه و بطور کامل مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. در فصل هفتم نتیجه گیری و پیشنهادات مورد نظر ارائه شده است.

# فصل دوم:

# مقدمه‌ای بر تولیدات پراکنده

## ۲-۱- مقدمه

امروزه با تغییرات و پیشرفت‌های روز افزون در صنعت برق شاهد بروز تحولات عمده‌ای که تحت عنوان کلی تجدید ساختار صنعت برق مطرح می گردند، هستیم. انقلابی که آهسته آهسته روش ارتباط ما را با بازار انرژی تغییر می‌دهد. بخشی از این تحول اجتناب ناپذیر که در بخش تولید توان انجام می شود، تکنولوژی تولید پراکنده است [۱۳].

تولیدات پراکنده منابع تولید انرژی الکتریکی هستند که به شبکه توزیع متصل می گردند. این منابع در مقایسه با ژنراتورهای بزرگ و نیروگاهها، حجم و ظرفیت تولید کمتری داشته و با هزینه پایین‌تری راه اندازی می شوند. همچنین اتصال این تولیدات به شبکه های توزیع منافع زیادی به دنبال دارد. ازجمله مواردی که استفاده از واحدهای تولید پراکنده را مورد توجه قرار می‌دهد می‌توان به مسائلی نظیرمسائل اقتصادی درتوسعه نیروگاهها، کاهش آلودگی محیط زیست، بالا بودن بازدهی این منابع در تولید برق، بالا بردن کیفیت برق رسانی به مشتریان، کاهش تلفات در شبکه های توزیع، بهبود پروفیل ولتاژ، آزاد سازی ظرفیت شبکه و بسیاری از موارد دیگر اشاره نمود. بررسی های صورت گرفته نشان می دهد که در واقع تولید به روش پراکنده نقشی اساسی را در تهیه نیازهای انرژی الکتریکی آینده جهان ایفا خواهد کرد. مطالعه EPRI نشان می دهد که تا سال 2012 میلادی حدود 20% از تولید برق جهان به صورت تولید پراکنده صورت خواهد گرفت. با توجه به این مطالب، مطالعه در مورد واحدهای تولید پراکنده امری ضروری است [۱۴]. در ادامه جهت آشنایی با مبحث تولید پراکنده موضوعاتی در رابطه با آن ارائه شده است.

## ۲-۲- تولید پراکنده و تعاریف مربوط به آن

بر اساس قوانین و مقررات کشورهای مختلف، تعاریف مختلفی بر اساس مکان تولید پراکنده، هدف بکارگیری آنها و نیز ظرفیت توان تولیدی آنها ارائه شده است. یک تعریف کلی و مشترک که در اغلب این تعاریف وجود دارد، این است که تولید پراکنده به واحدهای تولید توان الکتریکی با ظرفیت تولید محدود در داخل شبکه های توزیع و یا در طرف مصرف کنندگان اطلاق می شود [۱۵].

### ۲-۲-۱- ظرفیت تولید پراکنده

بر اساس تعاریف صورت گرفته برای منابع تولید پراکنده، ظرفیت تولید آنها از چندین ده کیلووات تا چندین ده مگاوات تغییر می کند. در جدول زیر یک تقسیم بندی از واحدهای تولید پراکنده بر اساس ظرفیت تولیدی آنها ارائه شده است [۱۵].

جدول (۲-۱) تقسیم بندی تولید پراکنده بر اساس ظرفیت تولید

| نوع تولید پراکنده | محدوده تولید |
|---|---|
| Micro | 1W – 5 kW |
| Small | 5 kW – 5 MW |
| Medium | 5 MW – 50 MW |
| Large | 50 MW – 300 MW |

جدول (۲-۲) برخی از تکنولوژی های تولید پراکنده و ظرفیت قابل دسترس

| تکنولوژیهای تولید پراکنده | ظرفیت قابل دسترس |
|---|---|
| توربین گازی سیکل ترکیبی | 35 – 400 MW |
| موتورهای احتراق داخلی | 5 kW – 10 MW |
| توربین احتراقی | 1 – 250 MW |
| میکروتوربین | 35 kW – 1 MW |
| هیدرو کوچک | 1 – 100 MW |
| میکرو هیدرو | 25 kW – 1 MW |
| توربین بادی | 200 W – 3 MW |
| آرایه فتوولتاییک | 20 W – 100 kW |
| حرارتی خورشیدی (دریافت کننده مرکزی) | 1 – 10 MW |
| حرارتی خورشیدی (سیستم لوتز) | 10 – 80 MW |
| بیوماس | 100 kW – 20 MW |
| پیل سوختی (PAFC) | 200 kW – 20 MW |
| پیل سوختی (MCFC) | 250 kW – 2 MW |
| پیل سوختی (PEMFC) | 1 kW – 250 kW |
| پیل سوختی (SOFC) | 250 kW – 5 MW |
| زمین گرمایی | 5 – 100 MW |
| انرژی موج | 100 kW – 1 MW |
| موتور استرلینگ | 2 – 10 kW |
| ذخیره سازی باتری | 500 kW – 5 MW |

### ۲-۲-۲- مکان تولید پراکنده

عموماً منابع تولید پراکنده در شبکه های توزیع و در نزدیکی مصرف کنندگان نصب می شوند. واضح است که با توجه به توان مصرفی بار شبکه های توزیع، در این شبکه ها، واحدهای تولید پراکنده با ظرفیت تولید متناسب با این شبکه ها به کار گرفته می شود [۱۵].

### ۲-۲-۳- هدف تولید پراکنده

بر اساس تعاریف صورت گرفته، هدف اصلی از بکار گیری واحدهای تولید پراکنده، تأمین توان اکتیو در شبکه می باشد. البته برخی از واحدهای تولید پراکنده که قادر به تولید توان راکتیو نیز می باشند، بخشی از توان راکتیو بارها را نیز تأمین می نمایند [۱۵].

## ۲-۳- گروه بندی تکنولوژیهای تولید پراکنده

تولید پراکنده دارای انواع گوناگونی می باشد. از متداولترین واحدهای تولید پراکنده می توان به موتورهای احتراقی، توربین‌های احتراقی، میکروتوربین‌ها، وسایل ذخیره انرژی، توربین‌های بادی، انرژی بیوماس، پیل های سوختی و سلولهای فتوولتاییک اشاره کرد. این تکنولوژی ها را می توان به سه دسته کلی تقسیم بندی کرد:

۱. تکنولوژی هایی که بر اساس سوختهای فسیلی کار می کنند. این دسته شامل موتورهای احتراقی، میکروتوربین ها، پیل های سوختی می باشد.