بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه تربیت مدرّس

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پایان‌نامه دوره‌ی کارشناسی ارشد مهندسی برق– قدرت

کنترل مبدل‌های موجود در ریزشبکه ترکیبی AC/DC در گذر از حالت متصل به شبکه به جزیره‌ای

رامین دهقانی

استاد راهنما:

دکتر محمودرضا حقی‌فام

استاد مشاور:

دکتر مصطفی محمدیان

شهریور ۱۳۹۲

دانشگاه تربیت مدرس
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد

آقای رامین دهقانی پایان نامه ۶ واحدی خود را با عنوان **کنترل مبدل های موجود در ریز شبکه ترکیبی AC/DC در گذر از حالت متصل به شبکه به جزیره ای** در تاریخ ۱۳۹۲/۶/۳۰ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این پایان نامه را از نظر فرم و محتوا تایید کرده، پذیرش آنرا برای اخذ درجه کارشناسی ارشد قدرت پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر محمودرضا حقی فام	استاد	
استاد مشاور	دکتر مصطفی محمدیان	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر علی یزدیان ورجانی	استادیار	
استاد ناظر	دکتر مجتبی خدرزاده	دانشیار	
مدیر گروه (یا نماینده گروه تخصصی)	دکتر محمدکاظم شیخ الاسلامی	استادیار	

آیین‌نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهشهای علمی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی و فناوری دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیأت علمی، دانشجویان، دانش‌آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد زیر را رعایت نمایند:

ماده ۱- حق نشر و تکثیر پایان نامه/ رساله و درآمدهای حاصل از آنها متعلق به دانشگاه می باشد ولی حقوق معنوی پدید آورندگان محفوظ خواهد بود.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان‌نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و با تایید استاد راهنمای اصلی، یکی از اساتید راهنما، مشاور و یا دانشجو مسئول مکاتبات مقاله باشد. ولی مسئولیت علمی مقاله مستخرج از پایان نامه و رساله به عهده اساتید راهنما و دانشجو می باشد.

تبصره: در مقالاتی که پس از دانش‌آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه/ رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب، نرم افزار و یا آثار ویژه (اثری هنری مانند فیلم، عکس، نقاشی و نمایشنامه) حاصل از نتایج پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی کلیه واحدهای دانشگاه اعم از دانشکده ها، مراکز تحقیقاتی، پژوهشکده ها، پارک علم و فناوری و دیگر واحدها باید با مجوز کتبی صادره از معاونت پژوهشی دانشگاه و براساس آئین نامه های مصوب انجام شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه یافته ها در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق معاونت پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این آیین‌نامه در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۸۷/۴/۱ در شورای پژوهشی و در تاریخ ۸۷/۴/۲۳ در هیأت رئیسه دانشگاه به تایید رسید و در جلسه مورخ ۸۷/۷/۱۵ شورای دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب در شورای دانشگاه لازم‌الاجرا است.

«اینجانب **رامین دهقانی** دانشجوی رشته **مهندسی برق- سیستم‌های قدرت** ورودی سال تحصیلی**۱۳۹۰** مقطع کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر متعهد می شوم کلیه نکات مندرج در آئین نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهش های علمی دانشگاه تربیت مدرس را در انتشار یافته های علمی مستخرج از پایان نامه / رساله تحصیلی خود رعایت نمایم. در صورت تخلف از مفاد آئین نامه فوق الاشعار به دانشگاه وکالت و نمایندگی می دهم که از طرف اینجانب نسبت به لغو امتیاز اختراع بنام بنده و یا هر گونه امتیاز دیگر و تغییر آن به نام دانشگاه اقدام نماید. ضمناً نسبت به جبران فوری ضرر و زیان حاصله بر اساس برآورد دانشگاه اقدام خواهم نمود و بدینوسیله حق هر گونه اعتراض را از خود سلب نمودم»

رامین دهقانی

آیین نامه چاپ پایان‌نامه (رساله)های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله)های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه، دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می‌شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله)ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل پایان نامه کارشناسی ارشد/ رساله دکتری نگارنده در رشته مهندسی برق- قدرت است که در سال ۱۳۹۲ در دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی جناب آقای دکتر محمودرضا حقی‌فام و مشاوره جناب آقای دکتر مصطفی محمدیان از آن دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه‌های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت‌چاپ) را به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می‌تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر درمعرض فروش قرار دهد.

ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت‌مدرس، تأدیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می‌دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده ۶: اینجانب **رامین دهقانی** دانشجوی رشته **مهندسی برق- سیستم‌های قدرت** مقطع **کارشناسی ارشد** تعهد فوق وضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی: **رامین دهقانی**

تاریخ و امضا:

۹۲/۱۱/۷

تقدیم به

روح پاک پدرم

که علی رغم آموخت تا چگونه در عرصه زندگی، اراده تغییر را تجربه نماییم

و به مادرم،

که ان فداکاری کامل و عشق که وجودم برای ایشان همواره رنج بود و وجودش برای ایشان همواره مهر

تقدیم به خواهر و برادرانم، همسر و فرزندان عزیزم که پشتوانه های زندگی ام.

سپاس بیکران پروردگار یکتا را که به انسان بخشید تا طریق علم و حقیقت بپیماید و زمان شد و به نخبگان و پژوهندگان علاقمند فرمان نیز ودوشه چینی ابلاغ علم و معرفت را روزی انسان ساخت.

حال که به حول وقوه الهی پایان نامه خود را به پایان رسیده است، بر خود لازم می دانم از کلیه عزیزانی که به طریقی در اتمام رساندن این پایان نامه یاری رسان بوده اند صمیمانه تشکر و قدردانی نمایم، هرچند کلام قادر به وصف فکر و تلاش ایشان نیست:

از جناب آقای دکتر مرتضی حقی فام عزیز که در ارائه راه حل های ارزشمند و راهگشا یاری داشت ایشان که در بسیاری از سختی ها برایم آستان نیز بودند.

از جناب آقای دکتر طغرل محمدیان که زحمت مشاوره این پایان نامه را متقبل شدند و کارنده را مورد لطف و محبت خود قرار داده اند.

از آقایان دکتر مرتضی بود که در محیط پارسا مقدم اساتید گرانقدر و برق سیستم های قدرت که در تکمیل بنده حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند،

و از جناب آقای دکتر مرتضی یزدیان که زحمت داوری این پایان نامه متقبل شدند کمال تشکر و قدردانی را دارم.

باشد که این خرد ترین، بخشی از زحمات آنان را سپاس گوید.

همچنین، از تمامی دوستانم در آزمایشگاه هوشی سیستم های انتقال و توزیع که همیشگی من در این راه بودند، تشکر و قدردانی می نمایم.

رامین دهقانی

تابستان ۹۲

چکیده

با افزایش بکارگیری منابع تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع، ساختار و مسائل مربوط به آن تغییر کرده و لذا جهت کنترل و بهره‌برداری این سیستم برای حفظ قابلیت اطمینان بارهای سیستم باید تمهیدات لازم فراهم آید تا در حالت عادی و خطاهای پیش آمده، از منابع تولید پراکنده نصب شده حداکثر استفاده شده و در نهایت تداوم انرژی الکتریکی مصرف‌کنندگان به نحو مطلوبی انجام شود. در این میان، جزیره‌ای شدن حالتی است که قسمتی از سیستم توزیع که از شبکه اصلی جدا شده است و شامل بارها و منابع تولید پراکنده می‌باشد بتواند انرژی‌دار باقی مانده و بارها تأمین گردند. در سال‌های اخیر مفهوم ریزشبکه یا Microgrid (شبکه‌های کوچک توزیع شامل منابع تولید پراکنده) بسیار مورد توجه قرار گرفته و تحقیقات در زمینه مسائل مربوط به آن انجام پذیرفته است.

در این پایان‌نامه به منظور تحقق بخشیدن به عملکرد بخشی از سیستم توزیع (فشار ضعیف) که مجهز به منابع تولید پراکنده بوده و پس از وقوع رویدادی بصورت جزیره‌ای درمی‌آید، تمهیداتی از طریق کنترل‌کننده‌های منابع موجود تولید پراکنده فراهم شده تا بتوان از حداکثر قابلیت این منابع استفاده شود. منابع تولید پراکنده بررسی شده در این تحقیق شامل دو نوع منبع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر از نوع پیل سوختی و فتوولتائیک می‌باشد که از منابع پاک و سازگار با محیط زیست می‌باشند.

در این پایان‌نامه برای ایجاد قابلیت عملکرد در حالت جزیره‌ای در یک شبکه توزیع مجهز به منابع تولید پراکنده، یک استراتژی کنترلی جهت گذر نرم از حالت وصل به شبکه به حالت جزیره‌ای پیشنهاد شده است که با استفاده از این طرح کنترلی ریزشبکه در حالت جزیره‌ای، که ناشی از وقوع یک رویداد کلیدزنی می‌باشد، قادر خواهد بود در حالت جزیره‌ای به کار خود ادامه داده و نیز حداکثر بار را در فرکانس و ولتاژ مناسب تغذیه کند.

شبیه‌سازی‌ها و مطالعات موردی متنوعی بر روی یک سیستم توزیع فشار ضعیف نمونه انجام گردیده و کارآیی الگوریتم پیشنهادی کنترلی مورد تحقیق و تأیید قرار گرفته است.

کلید واژه : ادوات ذخیره‌ساز، جزیره‌ای، حالت گذر، ریزشبکه، کنترل ولتاژ و فرکانس، منابع تولید پراکنده

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست جدول‌ها ..... د

فهرست شکل‌ها ..... ه

فصل ۱- مقدمه ۱

۱-۱- پیشگفتار ۱

۱-۲- طرح موضوع تحقیق ۱

۱-۳- هدف تحقیق ۳

۱-۴- سوالات تحقیق ۳

۱-۵- پیش‌فرض‌ها ۴

۱-۶- ساختار پایان‌نامه ۴

فصل ۲- معرفی ریزشبکه و مروری بر عناصر و روش‌های کنترلی آن ۶

۲-۱- مقدمه ۶

۲-۲- تعریف ریزشبکه ۶

۲-۲-۱- تعریف مرسوم ۶

۲-۲-۲- تعریف ریزشبکه از دیدگاه CERTS ۸

۲-۳- ساختار و عناصر ریزشبکه ۹

۲-۳-۱- منابع انرژی پراکنده (DER) ۱۰

۲-۳-۱-۱- منابع تولید پراکنده ۱۰

۲-۳-۱-۲- منابع ذخیره‌کننده انرژی ۱۷

۲-۳-۲- کلیدهای اتصال به شبکه ۱۹

۲-۳-۳- بار در ریزشبکه ۲۰

۲-۴- حالات عملکرد ریزشبکه ۲۲

۲-۴-۱- حالت عملکرد متصل به شبکه ۲۲

۲-۴-۲- حالت عملکرد جدای از شبکه (جزیره ای) ۲۳

۲-۴-۳- حالت گذر بین عملکرد متصل به شبکه و عملکرد جزیره‌ای ۲۳

۲-۵- ساختار سیستم واصل DG به ریزشبکه ۲۴

۲-۵-۱- ساختار اینورتر ۲۴

۲-۵-۲- فیلترگذاری ۲۵
۲-۵-۲-۱- فیلتر اندوکتانس سری ۲۵
۲-۵-۲-۲- فیلتر LCL ۲۵
۲-۶- موازی‌سازی DG ها ۲۶
۲-۷- کنترل اینورترهای موازی ۲۸
۲-۷-۱- مقایسه کلی دو ساختار کنترلی با وجود لینک ارتباطی و ساختار کنترلی نظیر به نظیر ۲۸
۲-۷-۲- ساختار اینورترهای موازی با لینک ارتباطی ۳۱
۲-۷-۲-۱- ساختارکنترل مرکزی ۳۱
۲-۷-۲-۲- ساختار مرجع و پیرو ۳۲
۲-۷-۲-۳- ساختار تقسیم بار میانگین ۳۵
۲-۷-۲-۴- ساختار زنجیر حلقه‌ای (3C) ۳۶
۲-۷-۳- انتخاب ساختار کنترلی مناسب ۳۷
۲-۸- نتیجه‌گیری ۳۸

فصل ۳- مروری بر ادبیات موضوع کنترل ولتاژ و فرکانس ریزشبکه ۳۹

۳-۱- مقدمه ۳۹
۳-۲- مشکلات پایداری در ریزشبکه ۳۹
۳-۲-۱- کنترل فرکانس ۳۹
۳-۲-۲- کنترل ولتاژ ۴۱
۳-۲-۲-۱- کنترل ولتاژ از روی مشخصه افتی ۴۱
۳-۲-۲-۲- بلوک محاسبه اندازه ولتاژ ۴۳
۳-۳- مطالعات موردی جهت کنترل ولتاژ و فرکانس ریزشبکه در حالت جزیره‌ای ۴۴
۳-۴- کنترل اولیه فرکانس و ولتاژ در ریزشبکه توسط ذخیره‌سازها ۴۸
۳-۵- روش کنترل PQ ۵۶
۳-۶- کنترل ثانویه ریزشبکه پس از گذر از حالت وصل به شبکه به جزیره‌ای ۵۸
۳-۶-۱- کنترل ثانویه در سیستم کنترلی بدون نیاز به لینک ارتباطی ۵۹
۳-۶-۲- کنترل ثانویه در سیستم کنترلی دارای لینک ارتباطی با کنترل مرکزی ۵۹
۳-۷- بارزدایی در ریزشبکه ۶۱
۳-۷-۱- حذف بار فرکانسی متداول ۶۲
۳-۷-۲- حذف بار ولتاژی ۶۴
۳-۸- نتیجه‌گیری ۶۵

فصل ۴- الگوریتم پیشنهادی و نتایج و شبیه‌سازی ۶۶

۴-۱- مقدمه ۶۶
۴-۲- معرفی روش کنترلی در حالت گذر ۶۶
۴-۳- معرفی شبکه تست ۷۰
۴-۴- کنترل ریزشبکه در زمان کم‌باری ۷۳
۴-۵- کنترل ریزشبکه در زمان میان‌باری ۷۵
۴-۶- کنترل ریزشبکه در زمان پرباری بدون قطع بار ۷۷
۴-۷- قطع بار ولتاژی ۷۹
۴-۸- کنترل ریزشبکه در زمان پرباری با انجام یک مرحله از قطع بار ۷۹
۴-۹- کنترل ریزشبکه در زمان پرباری با انجام دو مرحله از قطع بار ۸۱
۴-۱۰- کنترل ریزشبکه در زمان پیک بار با انجام سه مرحله از قطع بار ۸۳
۴-۱۱- نتیجه‌گیری ۸۵

فصل ۵- جمع‌بندی، نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۸۷

۵-۱- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری کلی ۸۷
۵-۲- پیشنهادات ۸۹

فهرست مراجع ۹۱

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۲-۱: مقایسه دو ساختار کنترلی نظیر به نظیر و نیازمند به لینک ارتباطی..... ۳۰
جدول ۴-۱: منابع DG موجود در ریزشبکه و توان نامی مربوط به آن‌ها..... ۷۱
جدول ۴-۲: توان اکتیو تولیدی هریک از DG ها در حالت وصل به شبکه..... ۷۲
جدول ۴-۳: توان راکتیو تولیدی هریک از DG ها در حالت وصل به شبکه..... ۷۲
جدول ۴-۴: اطلاعات مربوط به خطوط واصل ریزشبکه..... ۷۲
جدول ۴-۵: اطلاعات مربوط به فیلتر LCL به کار رفته..... ۷۲
جدول ۴-۶: اندازه بارهای ریزشبکه در بار نامی..... ۷۳
جدول ۴-۷: اطلاعات مربوط به بار ریزشبکه و توان دریافتی از شبکه قبل از قطع مربوط به زمان کم‌باری..... ۷۴
جدول ۴-۸: اطلاعات مربوط به بار ریزشبکه و توان دریافتی از شبکه قبل از قطع مربوط به زمان میان‌باری..... ۷۶
جدول ۴-۹: اطلاعات مربوط به بار ریزشبکه و توان دریافتی از شبکه قبل از قطع مربوط به زمان پرباری بدون قطع بار..... ۷۷
جدول ۴-۱۰: میزان بار قطع‌شده در پله‌های مختلف..... ۷۹
جدول ۴-۱۱: اطلاعات مربوط به بار ریزشبکه و توان دریافتی از شبکه قبل از قطع مربوط به زمان پرباری با انجام یک مرحله از قطع بار..... ۸۰
جدول ۴-۱۲: اطلاعات مربوط به بار ریزشبکه و توان دریافتی از شبکه قبل از قطع مربوط به زمان پرباری با انجام دو مرحله از قطع بار..... ۸۲
جدول ۴-۱۳: اطلاعات مربوط به بار ریزشبکه و توان دریافتی از شبکه قبل از قطع مربوط به زمان پیک بار ریزشبکه با انجام سه مرحله از قطع بار..... ۸۴

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۲-۱: تصویر کلی از یک ریزشبکه ۷
شکل ۲-۲: ریزشبکه از دید CERTS ۹
شکل ۲-۳: سیستم پیل سوختی ۱۲
شکل ۲-۴: مدل تک دیودی سلول خورشیدی ۱۵
شکل ۲-۵: مشخصه جریان-ولتاژ سلول خورشیدی ۱۶
شکل ۲-۶: منحنی توان مصرفی ریزشبکه و شبکه سراسری ۱۸
شکل ۲-۷: جزئیات کلید اتصال به شبکه ۱۹
شکل ۲-۸: اتصال اینورتر به بار و شبکه قدرت ۲۴
شکل ۲-۹: توپولوژی اینورتر سه‌فاز چهارسیمه با باس DC مجزا ۲۵
شکل ۲-۱۰: استفاده از فیلتر با اندوکتانس سری برای اتصال اینورتر به شبکه یا بار ۲۵
شکل ۲-۱۱: استفاده از فیلتر LCL برای الف) اتصال اینورتر به شبکه و ب) اتصال اینورتر به بار ۲۶
شکل ۲-۱۲: موازی کردن DG ها الف) ساختار اول ب) ساختار دوم ۲۷
شکل ۲-۱۳: مشخصه افتی توان اکتیو بر حسب فرکانس و توان راکتیو بر حسب ولتاژ ۲۹
شکل ۲-۱۴: بلوک دیاگرام ساختار کنترل مرکزی ۳۱
شکل ۲-۱۵: بلوک دیاگرام ساختار کنترل مرکزی مبتنی بر تجزیه انحراف توان اکتیو و راکتیو ۳۲
شکل ۲-۱۶: بلوک دیاگرام ساختار کنترلی MS ۳۳
شکل ۲-۱۷: مدار معادل اینورترهای موازی در ساختار MS در (الف) حالت جزیره‌ای و (ب) حالت متصل به شبکه ۳۴
شکل ۲-۱۸: بلوک دیاگرام ساختار کنترلی ALS ۳۵
شکل ۲-۱۹: بلوک دیاگرام ساختار کنترلی 3C ۳۶
شکل ۲-۲۰: ساختار 3C به همراه لینک ارتباطی و کلیدهای موازی ۳۷
شکل ۳-۱: بلوک دیاگرام کنترل ولتاژ ۴۱
شکل ۳-۲: بلوک کنترل ولتاژ از طریق مشخصه افتی Q-V ۴۲
شکل ۳-۳: نمودار مشخصه افتی Q-V ۴۲
شکل ۳-۴: بلوک محاسبه اندازه ولتاژ ۴۳
شکل ۳-۵: بلوک دیاگرام فیلتر بکار رفته در بلوک محاسبه اندازه ولتاژ ۴۳

شکل ۳-۶: دیاگرام بود فیلتر بکار رفته در بلوک محاسبه اندازه ولتاژ ۴۴
شکل ۳-۷: استراتژی کنترلی برای عملکرد جزیره‌ای ۵۰
شکل ۳-۸: ساختار BESS ۵۱
شکل ۳-۹: بلوک دیاگرام کنترل‌کننده شبکه ۵۱
شکل ۳-۱۰: طرح کنترل جریان ESS ۵۲
شکل ۳-۱۱: بلوک دیاگرام کنترل جریان ۵۲
شکل ۳-۱۲: بلوک دیاگرام PLL ۵۲
شکل ۳-۱۳: ساختار کنترلی ترکیبی واحد ذخیره‌ساز ۵۳
شکل ۳-۱۴: بلوک دیاگرام دینامیکی باتری ۵۴
شکل ۳-۱۵: طرح کنترلی اینورتر واسط منبع ذخیره‌ساز جهت کنترل محلی توان اکتیو و متمرکز توان راکتیو [۵۴] ۵۵
شکل ۳-۱۶: طرح کنترلی اینورتر واسط منبع ذخیره‌ساز جهت کنترل محلی توان اکتیو و راکتیو [۵۴] ۵۵
شکل ۳-۱۷: شماتیک کلی اتصال منبع تولید پراکنده به شبکه ۵۶
شکل ۳-۱۸: سیستم کنترل استفاده شده برای واحد واحدهای پیرو و مرجع در حالت متصل به شبکه و واحدهای پیرو در حالت جزیره‌ای ۵۸
شکل ۳-۱۹: کنترل توان اکتیو منابع قابل کنترل ۵۹
شکل ۳-۲۰: ساختار استراتژی کنترلی شراکتی ارائه شده ۶۰
شکل ۳-۲۱: تولید دستور مجموع توان ۶۱
شکل ۳-۲۲: محاسبه نقاط تنظیم توان خروجی ریزمنبع ۶۱
شکل ۴-۱: سیستم کنترلی واحد FC (در حالت جزیره‌ای) ۶۸
شکل ۴-۲: سیستم کنترلی پیشنهادی برای اینورتر متصل به منابع موجود در ریزشبکه در حالت جزیره‌ای ۶۹
شکل ۴-۳: شماتیک کلی ریزشبکه مورد بررسی ۷۱
شکل ۴-۴: توان‌های راکتیو تولیدی توسط DG ها و همچنین توان راکتیو دریافتی از شبکه در زمان کم‌باری ۷۴
شکل ۴-۵: توان‌های اکتیو تولیدی توسط DG ها و همچنین توان اکتیو دریافتی از شبکه در زمان کم‌باری ۷۵
شکل ۴-۶: ولتاژ باس‌های مختلف ریزشبکه در زمان کم‌باری ۷۵

شکل ۴-۷: توان‌های راکتیو تولیدی توسط DG ها و همچنین توان راکتیو دریافتی از شبکه در زمان میان‌باری ۷۶
شکل ۴-۸: توان‌های اکتیو تولیدی توسط DG ها و همچنین توان اکتیو دریافتی از شبکه در زمان میان‌باری ۷۶
شکل ۴-۹: ولتاژ باس‌های مختلف ریزشبکه در زمان میان‌باری ۷۷
شکل ۴-۱۰: توان‌های راکتیو تولیدی توسط DG ها و همچنین توان راکتیو دریافتی از شبکه در زمان پرباری بدون قطع بار ۷۸
شکل ۴-۱۱: توان‌های اکتیو تولیدی توسط DG ها و همچنین توان اکتیو دریافتی از شبکه در زمان پرباری بدون قطع بار ۷۸
شکل ۴-۱۲: ولتاژ باس‌های مختلف ریزشبکه در زمان پرباری بدون قطع بار ۷۸
شکل ۴-۱۳: توان‌های راکتیو تولیدی توسط DG ها و همچنین توان راکتیو دریافتی از شبکه در زمان پرباری با انجام یک مرحله از قطع بار ۸۰
شکل ۴-۱۴: توان‌های اکتیو تولیدی توسط DG ها و همچنین توان اکتیو دریافتی از شبکه در زمان پرباری با انجام یک مرحله از قطع بار ۸۱
شکل ۴-۱۵: ولتاژ باس‌های مختلف ریزشبکه در زمان پرباری با انجام یک مرحله از قطع بار ۸۱
شکل ۴-۱۶: توان‌های راکتیو تولیدی توسط DG ها و همچنین توان راکتیو دریافتی از شبکه در زمان پرباری با انجام دو مرحله از قطع بار ۸۲
شکل ۴-۱۷: توان‌های اکتیو تولیدی توسط DG ها و همچنین توان اکتیو دریافتی از شبکه در زمان پرباری با انجام دو مرحله از قطع بار ۸۳
شکل ۴-۱۸: ولتاژ باس‌های مختلف ریزشبکه در زمان پرباری با انجام دو مرحله از قطع بار ۸۳
شکل ۴-۱۹: توان‌های راکتیو تولیدی توسط DG ها و همچنین توان راکتیو دریافتی از شبکه در زمان پیک بار ریزشبکه با انجام سه مرحله از قطع بار ۸۴
شکل ۴-۲۰: توان‌های اکتیو تولیدی توسط DG ها و همچنین توان اکتیو دریافتی از شبکه در زمان پیک بار ریزشبکه با انجام سه مرحله از قطع بار ۸۵
شکل ۴-۲۱: ولتاژ باس‌های مختلف ریزشبکه در زمان پیک بار ریزشبکه با انجام سه مرحله از قطع بار ۸۵

فصل ۱– مقدمه

۱–۱– پیشگفتار

محدودیت منابع انرژی در جهان و لزوم اجرای کنوانسیون‌های بین‌المللی محیط زیست، کشورها و شرکت‌های برق را به استفاده هر چه بیشتر از منابع تجدیدپذیر تشویق کرده است.

امروزه با توجه به مسایل زیست محیطی، قیمت بالای سوخت‌های فسیلی، تشکیل بازار برق و تغییر مالکیت و مدیریت صنعت برق از حالت سنتی به رقابتی و از طرفی پیشرفت‌های چشمگیر حاصل شده در ژنراتورهای کوچک، تجهیزات الکترونیک قدرت، ذخیره‌سازها و کشف روشهای مختلف تولید انرژی از انرژی‌های تجدیدپذیر علاقه زیادی به استفاده از سیستم‌های تولید پراکنده در سرتاسر دنیا ایجاد شده است [۱].

شاید مهمترین مزیت استفاده از سیستم‌های تولید پراکنده، نزدیکی به مصرف‌کننده و در نتیجه کاهش و یا حذف هزینه‌های مربوط به سیستم انتقال و توزیع باشد. در کنار آن می‌توان به حذف محدودیت مکانی و جغرافیایی تولیدات کوچک نسبت به نیروگاه‌های بزرگ، ریسک کمتر سرمایه‌گذاری، زمان نصب کمتر، شرایط محیط زیست بهتر، کیفیت و قابلیت اطمینان بیشتر، تکنولوژی در زمینه ساخت ژنراتورهای کوچک با توان تولیدی بالا و استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر مانند باد و خورشید اشاره کرد [۱].

استفاده از تولیدات پراکنده قطعاً بر سیستم‌های کنترل، مراکز کنترل توان و بهره‌برداری شبکه‌های توزیع تأثیر خواهد گذاشت، چرا که در این حالت تعداد زیادی ژنراتور با توان اندک به سیستم اضافه شده است.

با وجود تولیدات پراکنده، گزینه‌های جدیدی در طراحی و بهره‌برداری از شبکه‌های توزیع مطرح خواهد شد که این امر ضمن ایجاد امکان بهره‌گیری اقتصادی‌تر، فضای حاکم بر برنامه‌ریزی و بهره‌برداری را نیز پیچیده‌تر می‌سازد.

۱–۲– طرح موضوع تحقیق

امروزه تغییرات وسیعی در هر دو حوزه انتقال و توزیع سیستم‌های قدرت در حال وقوع است. تراکم حضور مزارع بادی بزرگ، منابع زمین گرمایی و خورشیدی در سطوح انتقال و منابع تجدیدپذیر کوچک همانند سلول‌های خورشیدی و سلول‌های سوختی در سطوح توزیع روز به روز در حال افزایش است. این

افزایش حضور منابع تجدیدپذیر در سیستم‌های توزیع، موجب معرفی ساختار جدیدی به نام ریزشبکه شد [۲]. یک ریزشبکه مجموعه‌ای از بارها و منابع تولید پراکنده است که به صورت یک سیستم واحد برای تولید توان و گرما فعالیت می‌کنند.

حل مشکلات شبکه‌های انتقال و توزیع قدیمی، نیاز به هزینه‌های بالایی برای ترمیم و احداث مجدد دارد. تعریف شبکه‌های‌کوچک متصل به توزیع، موسوم به ریزشبکه بر پایه حل مشکلات یادشده استوار است. ریزشبکه‌ها با تولید کنندگان DER، علاوه بر کاهش مشکلات فوق، قادر به تامین انرژی با سطوح بالایی از قابلیت اطمینان و دسترس‌پذیری توان می‌باشند.

در دهه‌های گذشته سیستم‌های توزیع را به عنوان سیستم‌های تابع و غیر فعال در نظر می‌گرفتند، از آن جایی که فقط با وجود سیستم انتقال موجودیت پیدا می‌کردند و همیشه به عنوان یک واحد مصرف‌کننده تعریف می‌شدند. با پیدایش تولید پراکنده و ریزشبکه، سیستم‌های توزیع به یک سیستم فعال با دو جنبه مصرف و تولید تبدیل می‌شوند.

با بکارگیری تعداد زیاد منابع تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع، ساختار این سیستم شعاعی با سیلان توان یکطرفه تغییر کرده و لذا جهت کنترل این سیستم برای حفظ قابلیت اطمینان بارهای سیستم باید تمهیدات لازم انجام پذیرد تا در حالت عادی و خطاهای پیش آمده از سیستم‌های تولید پراکنده نصب شده حداکثر استفاده شود و در نهایت تداوم انرژی الکتریکی مصرف‌کنندگان به نحو احسن انجام شود.

در حال حاضر خطای پیش آمده در سیستم توزیع باعث قطع کلیدها و در نتیجه خاموشی بارها شده و استانداردهای فعلی بر لزوم قطع منابع تولید پراکنده در این حالت اشاره دارند [۳]. اما جزیره‌ای شدن حالتی است که بخشی از سیستم توزیع که از شبکه اصلی جدا شده است و شامل بارها و منابع تولید پراکنده می‌باشد بتواند انرژی‌دار مانده و بارها تأمین گردند. این مسأله در سال‌های اخیر به خاطر افزایش رقابت در امنیت مشترکین باعث افزایش فزاینده فشار به شرکت‌های تولید برق گردیده تا با راهکارهای مختلف نظیر جزیره‌ای شدن خدمات خود را افزایش دهند. لذا قطع منابع تولید پس از بروز هر خطا راه حل مناسب و اقتصادی نمی‌باشد و انتظار می‌رود در آینده‌ای نزدیک این سیاست تغییر کند تا بهره‌مندی از فواید منابع تولید پراکنده بطور کامل محقق شود.

اگر بخشی از سیستم توزیع بخواهد بصورت جزیره‌ای به کار خود ادامه دهد باید ولتاژ و فرکانس نرمال و مناسبی برای بارها کنترل و تثبیت گردد و هر گونه تغییر درسیستم نیز تحت کنترل باشد تا اینکه تداوم برقراری انرژی الکتریکی بارها و عملکرد درست تجهیزات مختلف رعایت شود.

۱-۳-هدف تحقیق

در این پایان‌نامه به منظور تحقق بخشیدن به عملکرد صحیح بخشی از شبکه توزیع (فشار ضعیف) که مجهز به منابع تولید پراکنده بوده و پس از وقوع حادثه‌ای بصورت جزیره‌ای در می‌آید، تمهیداتی از طریق کنترل‌کننده‌های منابع موجود تولید پراکنده فراهم شده است تا بتوان از قابلیت این منابع حداکثر استفاده بشود. در این تحقیق یک سیستم توزیع فشار ضعیف شامل دو نوع منبع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر بصورت پیل سوختی و منبع فتوولتائیک و همچنین بارهای خطی و باتری به عنوان عنصر ذخیره‌ساز در نظر گرفته شده است. این شبکه دارای ساختار ثابت بوده و بارها و منابع تولید پراکنده در نقاط مختلف آن موجود هستند.

هدف این پایان‌نامه طراحی و ارائه یک استراتژی کنترلی به گونه‌ای می‌باشد که پس از وقوع رویداد کلیدزنی، شبکه باقیمانده شامل منابع تولید پراکنده و بارها و ادوات ذخیره‌ساز گذر نرمی را بین دو حالت وصل به شبکه و جزیره‌ای تجربه کرده و بتواند در حالت جزیره‌ای به کار خود ادامه داده و نیز بار در فرکانس و ولتاژ مجاز تأمین گردد.

در حالت متصل به شبکه، شبکه اصلی بصورت یک شین بینهایت عمل کرده و نیازهای توان اکتیو و راکتیو را در طول حالات گذرا برآورده ساخته و همچنین سبب تثبیت فرکانس نیز می‌شود. در حالت عملکرد جزیره‌ایِ شبکه باقیمانده، توان قابل دسترس واحدهای تولید پراکنده باید کل تقاضای بار را تأمین کند، در غیر اینصورت سیستم باید در معرض قطع بار قرار گیرد تا تولید و مصرف به تعادل برسند. یکی از اهداف این تحقیق تأمین حداکثر بار شبکه باقیمانده می‌باشد که در صورت نیاز به قطع بار، عملیات قطع بار باید با حداقل قطع بار انجام شود.

همانطوری که بیان شد ریزشبکه مورد بررسی در این پایان‌نامه فقط شامل منابع پاک و سازگار با محیط زیست شامل پیل سوختی و فتوولتائیک می‌باشد که منابعی با تولید DC بوده و از طریق اینورتر به شبکه وصل می‌باشند و در نتیجه ریزشبکه‌ای کاملاً اینورتری خواهد بود. درنتیجه هدف، کنترل اینورترهای موازی منابع تولید پراکنده موجود و باتری به گونه‌ای می‌باشد که فرکانس ریزشبکه ثابت مانده و ولتاژ ریزشبکه پس از گذر در کمترین زمان به مقدار نامی برگردد و کمترین قطع بار را در ریزشبکه داشته باشیم.

۱-۴-سوالات تحقیق

در مجموع در این پایان‌نامه تلاش می‌شود به این سؤالات پاسخ داده شود:

- امکان تشکیل ریزشبکه‌ای کاملاً اینورتری بدون حضور منابع تولید پراکنده مبتنی بر ژنراتور سنکرون و همچنین بدون منابع با محرک اولیه چرخان و عملکرد آن در حالت پایدار به صورت جزیره‌ای وجود دارد؟
- روش مناسب کنترل اینورترهای موجود جهت کار در حالت جزیره‌ای پس از جدا شدن از شبکه اصلی چیست؟
- امکان کنترل اینورترها در حالت گذر به صورت فرکانس ثابت و کمترین میزان افت ولتاژ وجود دارد؟
- روش مناسب برای قطع بار به منظور تامین بیشترین بار در ریزشبکه و با وجود فرکانسِ ثابت چیست؟
- تأثیر ظرفیت‌های مختلف مبدل‌های اینورتری موجود بر روش کنترلی چیست؟

۱–۵– پیش‌فرض‌ها

- مطالعات مورد نظر در ریزشبکه نمونه ۴۰۰ ولت و ۵۰ هرتز انجام خواهد شد.
- اطلاعات بار ریزشبکه مورد مطالعه در دوره زمانی مطالعه مشخص است.
- شرایط محیطی در مدت زمان شبیه‌سازی ثابت بوده و در نتیجه تولید مولدهای فتوولتائیک ثابت خواهد بود.
- شارژ باتری در مدت زمان شبیه‌سازی کافی بوده و می‌تواند حداکثر میزان توان مورد نیاز را در حدود ظرفیت نامی خود تولید کند.
- ریزشبکه در حالت وصل به شبکه در حالت عملکرد عادی و پایدار بوده و تولید باتری صفر می‌باشد.
- تولید توان اکتیو و راکتیو منابع تولید پراکنده موجود در حالت وصل به شبکه بدون توجه به بار ریزشبکه ثابت و برابر می‌باشد.

۱–۶– ساختار پایان‌نامه

این پایان‌نامه شامل ۵ فصل به شرح زیر می‌باشد.

- در فصل ۱، مقدمهٔ کلی موضوع تحقیقاتی پایان‌نامه، اهداف تحقیق و ساختار آن ارائه شده است.

- در فصل دوم، مفهوم ریزشبکه و حالات مختلف عملکرد آن و شرایط کاری مربوط به هر حالت مورد بحث قرار گرفته است. سپس عناصر موجود در ریزشبکه معرفی شده و نحوه مدسازی آن‌ها در پایان‌نامه ارائه شده است. در ادامه نیز روش‌های کنترلی مختلف ریزشبکه مورد بررسی قرار گرفته و در انتها روش کنترلی مورد استفاده در پایان‌نامه معرفی شده است.
- در فصل سوم، روش‌های کنترلی مختلف ولتاژ و فرکانس ریزشبکه در مطالعات پیشین مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین مطالعاتی که در آن‌ها بحث کنترل اولیه ریزشبکه توسط ذخیره‌سازها و همچنین کنترل ثانویه بیان شده بررسی شده است. در نهایت به مرور مطالعاتی که در زمینه قطع بار ولتاژی و فرکانسی می‌باشند پرداخته شده است.
- در فصل چهارم، روش‌های کنترلی مورد استفاده در حالت گذر معرفی شده و سپس به معرفی شبکه نمونه پرداخته شده است. در ادامه روش‌های مورد نظر بر روی شبکه توزیع فشار ضعیف نمونه و با استفاده از نرم‌افزار PSCAD/EMTDC پیاده‌سازی شده و سناریوهای مختلفی مورد شبیه‌سازی قرار گرفته تا صحت عملکرد روش‌های موجود تحقیق و تایید شود.
- در فصل ۵، نتیجه‌گیری کلی حاصل از تحقیقات پایان‌نامه و پیشنهادهایی برای تحقیقات آتی آمده است.