دانشگاه صنعتی شیراز

دانشکده مهندسی برق و الکترونیک گروه قدرت

پایان نامه کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی برق گرایش قدرت

بهبود عملکرد دینامیکی ریزشبکه با استفاده از ژنراتور القائی تغذیه دوگانه بادی

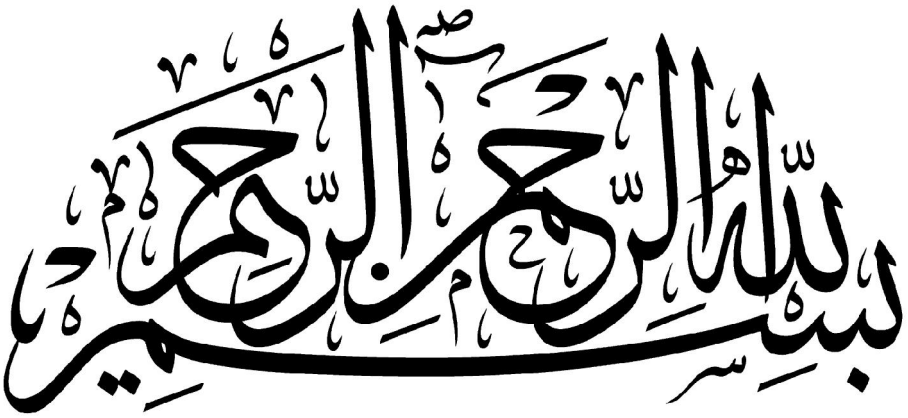
نگارش:

مصطفی ملک پور

استاد راهنما:

دکتر محمد مردانه

بهمن ماه ۱۳۹۱


بسم الله الرحمن الرحيم

بسمه تعالی

بهبود عملکرد دینامیکی ریزشبکه با استفاده از ژنراتور القائی تغذیه دوگانه بادی

پایان نامه ارائه شده به عنوان بخشی از فعالیتهای تحصیلی

نگارش:

مصطفی ملک پور

برای اخذ درجه کارشناسی ارشد

گروه قدرت دانشکده مهندسی برق و الکترونیک
دانشگاه صنعتی شیراز

ارزیابی پایان نامه توسط هیات داوران با درجه: بسیار خوب

دکتر محمد مردانه استادیار در رشته مهندسی برق – قدرت (استاد راهنما)

دکتر مجید نیری پور دانشیار در رشته مهندسی برق – قدرت (استاد داور)

دکتر جمشید آقایی استادیار در رشته مهندسی برق – قدرت (استاد داور)

مدیر امور آموزشی و تحصیلات تکمیلی دانشگاه:

حق چاپ محفوظ و مخصوص به دانشگاه صنعتی شیراز است.

تأییدیه‌ی صحت و اصالت نتایج

باسمه تعالی

اینجانب مصطفی ملک پور دانشجوی رشته برق - قدرت مقطع تحصیلی کارشناسی ارشد به شماره دانشجویی ۸۹۱۱۴۰۳۲ تأیید می‌نماید کلیه نتایج این پایان نامه/رساله، بدون هیچگونه دخل و تصرف، حاصل مستقیم پژوهش صورت گرفته توسط اینجانب است. در مورد اقتباس مستقیم و غیر مستقیم از سایر آثار علمی، اعم از کتاب، مقاله، پایان نامه و .... با رعایت امانت و اخلاق علمی، مشخصات کامل منبع مذکور درج شده است.

در صورت اثبات خلاف مندرجات فوق، به تشخیص مقامات ذی صلاح دانشگاه صنعتی شیراز، مطابق قوانین و مقررات مربوط و آئین نامه‌های آموزشی، پژوهشی و انضباطی و ... عمل خواهد شد و اینجانب حق هرگونه اعتراض و تجدیدنظر را، نسبت به رأی صادره، از خود ساقط می‌کند.

همچنین، هرگونه مسئولیت ناشی از تخلف نسبت به صحت و اصالت نتایج مندرج در پایان نامه/رساله در برابر اشخاص ذی نفع (اعم از حقیقی و حقوقی) و مراجع ذی صلاح (اعم از اداری و قضایی) متوجه اینجانب خواهد بود و دانشگاه صنعتی شیراز هیچ گونه مسئولیتی دراین زمینه نخواهند داشت.

تبصره ۱- کلیه حقوق مادی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شیراز است.

تبصره ۲- اینجانب تعهد می‌نماید بدون اخذ مجوز از دانشگاه صنعتی شیراز دستاوردهای این پایان نامه را منتشر نکند و یا در اختیار دیگران قرار ندهد.

نام و نام خانوادگی دانشجو: مصطفی ملک پور

تاریخ و امضاء

مجوز بهره‌برداری از پایان‌نامه

کلیه حقوق مادی و معنوی مترتب بر نتایج پایان نامه متعلق به دانشگاه و انتشار نتایج نیز تابع مقرارت دانشگاهی است و با موافقت استاد راهنما به شرح زیر، بلامانع است:

☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله برای همگان بلامانع است.

☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله با اخذ مجوز از استاد راهنما، بلامانع است.

☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله تا تاریخ ..... ممنوع است.

نام استاد راهنما: دکتر محمد مردانه

تاریخ:

امضا:

تقدیم به

آ. نورعلی نژاد

تشکر و قدردانی:

اکنون که این رساله به پایان رسیده است برخود فرض می‌دانم که از استاد ارجمندم دکتر محمد مردانه به خاطر درس‌های ارزشمندی که به اینجانب آموخته‌اند تشکر و قدردانی نمایم.

چکیده

بهبود عملکرد دینامیکی ریزشبکه با استفاده از ژنراتور القائی تغذیه دوگانه بادی

نگارش:

مصطفی ملک پور

این پایان نامه بهبود عملکرد دینامیکی ریزشبکه با استفاده از ژنراتور القائی تغذیه دوگانه بادی را بررسی می‌کند. ریزشبکه مورد مطالعه از یک فیدر توزیع تشکیل شده است که توسط دو ریزمنبع با سوخت فسیلی، یعنی میکروتوربین و سلول سوختی اکسید جامد، و یک منبع تجدیدپذیر انرژی یعنی ژنراتور القائی تغذیه دوگانه بادی تغذیه می‌شود. به علت ثابت زمانی بزرگ پاسخ‌های میکروتوربین و سلول سوختی اکسید جامد، ریزشبکه مورد مطالعه برای برقراری تعادل اولیه انرژی در شرایط اضطراری، از یک منبع ذخیره‌ساز انرژی از نوع باتری استفاده می‌کند.

سرعت ژنراتورهای القائی تغذیه دوگانه بادی تقریبا به طور کامل از فرکانس شبکه مجزاشده می‌باشد. با توجه به این امر، این نوع از توربین‌های بادی دارای پاسخ اینرسی در اغتشاش‌های فرکانسی نمی‌باشد. این پایان نامه یک ساختار جدید شبیه‌ساز اینرسی برای ژنراتورهای القائی تغذیه دوگانه بادی ارائه می‌دهد به گونه‌ای که پاسخ اینرسی و پاسخ گاورنری توربین بادی همزمان با هم بهبود داده می‌شود.

ریزشبکه به طور معمول در حالت متصل به شبکه ولتاژ متوسط عمل می‌کند؛ با این وجود جزیره‌شدن برنامه‌ریزی‌شده یا برنامه‌ریزی‌نشده می‌تواند برای آن رخ دهد. برای تحلیل عملکرد ریزشبکه و کنترل‌کننده پیشنهادی، موردهای مطالعاتی برای هر دو نوع ذکر شده جزیره‌ای شدن شبیه‌سازی شده است.

واژه‌های کلیدی: ریزشبکه، ژنراتور القائی تغذیه دوگانه بادی، شبیه‌ساز اینرسی، میکروتوربین، منبع ذخیره‌ساز انرژی از نوع باتری

فهرست مطالب

۱.فصل اول: مقدمه ۱

۱-۱- زمینه و انگیزه تحقیق ۲

۱-۲- اهداف پایان نامه ۴

۱-۳- بخش‌های پایان نامه ۵

۲.فصل دوم: مروری بر تحقیقات انجام‌شده ۷

۲-۱- مروری بر تحقیقات انجام‌شده ۸

۳.فصل سوم: پشتیبانی اولیه فرکانس توسط توربین بادی سرعت متغیر ۱۲

۳-۱- مقدمه ۱۳

۳-۲- آیرودینامیک توربین بادی ۱۳

۳-۲-۱- تئوری اندازه حرکت عنصر پره ۱۵

۳-۲-۲- پدیده Stall ۱۸

۳-۳- روش‌های کنترل توان توربین بادی ۲۰

۳-۳-۲- کنترل توان به روش Passive Stall ۲۱

۳-۳-۳- کنترل توان به روش Pitch Control ۲۲

۳-۳-۴- کنترل توان به روش Passive Stall ۲۳

۳-۴- روش‌های کنترل سرعت توربین بادی ۲۴

۳-۵- مدل دینامیکی توربین بادی سرعت متغیر نوع C ۲۶

۳-۵-۱-ساختار توربین بادی سرعت متغیر ۲۹

۳-۵-۲- استراتژی‌های کنترلی توربین بادی سرعت متغیر ۳۰

۳-۵-۳- ژنراتور القایی تغذیه دوگانه ۳۶

۳-۵-۴- کنترل مبدل‌های توربین بادی نوع C به روش SVO ۳۷

۳-۶- توربین بادی سرعت متغیر در نرم افزار PowerFactory ۴۰

۳-۶-۲- ساختار کنترلی توربین بادی سرعت متغیر ۴۱

۳-۶-۳- کنترل‌کننده مبدل سمت رتور ۴۲

۳-۶-۴- کنترل‌کننده مبدل سمت شبکه ۴۷

۳-۶-۵- اعتبارسنجی مدل توربین بادی سرعت متغیر ۴۹

۳-۷- پشتیبانی اولیه فرکانس ۵۶

۳-۸- پشتیبانی اولیه فرکانس توسط توربین بادی سرعت متغیر ۵۷

۳-۸-۲- سناریو شماره ۱ ..... ۵۹
۳-۸-۳- سناریو شماره ۲ ..... ۶۲
۳-۸-۴- سناریو شماره ۳ ..... ۶۸
۳-۸-۵- فیلتر پیشنهادی ۷۴
۳-۸-۶- سناریو شماره ۴ ..... ۷۶
۳-۸-۷- سناریو شماره ۵ ..... ۷۹
۳-۹- نتیجه‌گیری ۸۲

۴.فصل چهارم: ریزشبکه‌ها و روش‌های کنترلی آن‌ها در شرایط اضطراری ۸۳
۴-۱- مقدمه ۸۴
۴-۲- ساختار ریزشبکه‌ها ۸۴
۴-۳- روش‌های کنترل ولتاژ و فرکانس ریزشبکه‌ها ۸۷
۴-۴- کنترل ریزشبکه‌ها به منظور عملکرد جزیره‌ای ۹۱
۴-۴-۱- عملکرد تک فرمان‌دهنده ۹۴
۴-۴-۲- عملکرد چند فرمان‌دهنده ۹۵
۴-۵- مدل‌سازی دینامیکی ریزمنابع ۹۶
۴-۶- سیستم ذخیره‌ساز انرژی از نوع باتری ۹۸
۴-۶-۱- مدل دینامیکی باتری ۹۸
۴-۶-۲- مدل دینامیکی باتری در نرم افزار PowerFactory ۱۰۱
۴-۶-۳- اعتبارسنجی مدل دینامیکی باتری ۱۰۷
۴-۷- میکروتوربین ۱۱۰
۴-۷-۲- مدل دینامیکی میکروتوربین ۱۱۲
۴-۷-۳- مدل دینامیکی میکروتوربین در نرم افزار PowerFctory ۱۱۷
۴-۷-۴- اعتبارسنجی مدل دینامیکی میکروتوربین ۱۲۲
۴-۸- سلول سوختی اکسید جامد ۱۲۵
۴-۸-۱- مدل دینامیکی سلول سوختی اکسید جامد ۱۲۵
۴-۸-۲- مدل دینامیکی سلول سوختی اکسید جامد در نرم افزار PowerFactory ۱۳۲
۴-۸-۳- اعتبارسنجی مدل دینامیکی سلول سوختی اکسید جامد ۱۳۶
۴-۹- مشخصه‌های افت ۱۴۰
۴-۹-۲- مشخصه‌های افت در شبکه‌های سلفی ۱۴۲
۴-۹-۳- مشخصه‌های افت در شبکه‌های مقاومتی ۱۴۸
۴-۱۰- نتیجه‌گیری ۱۵۷

۵.فصل پنجم: بهبود عملکرد دینامیکی ریزشبکه با استفاده از ژنراتور القائی تغذیه دوگانه بادی **۱۵۸**
۵-۱- مقدمه ۱۵۹
۵-۲- ریزشبکه مورد مطالعه ۱۵۹
۵-۳- جزیره‌شدن برنامه‌ریزی‌شده با عملکرد تک فرمان‌دهنده ۱۶۰
۵-۴- جزیره‌شدن برنامه‌ریزی‌نشده با عملکرد تک فرمان‌دهنده ۱۶۵
۵-۵- جزیره‌شدن برنامه‌ریزی‌نشده با عملکرد چند فرمان‌دهنده ۱۶۷
۵-۶- جزیره‌شدن برنامه‌ریزی‌نشده با عملکرد چند فرمان‌دهنده و پشتیبانی ثانویه فرکانس ۱۷۰
۵-۷- بهبود بازیابی فرکانس ریزشبکه با استفاده از ژنراتور القائی تغذیه دوگانه بادی ۱۷۲
۵-۸- نتیجه گیری ۱۷۷

۶.فصل ششم: جمع‌بندی و پیشنهادها **۱۷۹**
۶-۱- جمع‌بندی ۱۸۰
۶-۲- پیشنهادها ۱۸۱

مراجع **۱۸۳**

پیوست **۱۸۷**

فهرست شکل‌ها

شکل ۳-۱ لوله جریان هوا ۱۴
شکل ۳-۲ چگونگی چرخش و سرعت پره‌ها ۱۶
شکل ۳-۳ سرعت‌های مختلف عنصر پره ۱۷
شکل ۳-۴ نیروهای مختلف وارد شده بر عنصر پره ۱۸
شکل ۳-۵ بال هواپیما در حالت Stall ۱۸
شکل ۳-۶ نمودارهای ضرایب C_l و C_d بر حسب زاویه برخورد α ۱۹
شکل ۳-۷ نسبت $\frac{C_l}{C_d}$ بر حسب زاویه برخورد α ۱۹
شکل ۳-۸ ضریب C_P بر حسب λ ۲۰
شکل ۳-۹ منحنی توان توربین بادی بر حسب سرعت باد ۲۱
شکل ۳-۱۰ کنترل توان به روش Passive Stall ۲۲
شکل ۳-۱۱ کنترل توان به روش Pitch Control ۲۳
شکل ۳-۱۲ کنترل توان به روش Active Stall ۲۴
شکل ۳-۱۳ انواع مختلف توربین‌های بادی ۲۵
شکل ۳-۱۴ ضریب توان C_P برحسب سرعت توربین، در سرعت‌های مختلف باد ۲۷
شکل ۳-۱۵ ضریب توان C_P برحسب نسبت سرعت لبه، برای مقادیر مختلف زاویه گام ۲۸
شکل ۳-۱۶ ضریب گشتاور C_t برحسب نسبت سرعت لبه، برای مقادیر مختلف زاویه گام ۲۹
شکل ۳-۱۷ ساختار کلی یک توربین بادی سرعت متغیر ۲۹
شکل ۳-۱۸ مشخصه توان مکانیکی توربین بادی بر حسب سرعت باد ۳۱
شکل ۳-۱۹ مشخصه توان الکتریکی ژنراتور بر حسب سرعت آن ۳۱
شکل ۳-۲۰ کنترل‌کننده سرعت ۳۳
شکل ۳-۲۱ توان توربین بادی بر حسب سرعت آن، برای سرعت‌های مختلف باد ۳۴
شکل ۳-۲۲ کنترل‌کننده زاویه گام ۳۵
شکل ۳-۲۳ سرعت ژنراتور و زاویه گام بر حسب سرعت باد ۳۵
شکل ۳-۲۴ ژنراتور القائی تغذیه دوگانه متصل به شبکه ۳۶
شکل ۳-۲۵ جهت شارش توان‌ها در حالت‌های فوق سنکرون و زیر سنکرون ۳۷
شکل ۳-۲۶ دیاگرام بردار مکانی DFIG در روش کنترلی SVO ۳۸

شکل ۳-۲۷ نمودار تک خطی توربین بادی سرعت متغیر در نرم افزار PowerFactory ۴۰
شکل ۳-۲۸ ساختار کنترلی توربین بادی سرعت متغیر نوع C ۴۱
شکل ۳-۲۹ کنترل‌کننده مبدل سمت رتور ۴۲
شکل ۳-۳۰ کنترل‌کننده سرعت ژنراتور ۴۳
شکل ۳-۳۱ کنترل‌کننده زاویه گام ۴۴
شکل ۳-۳۲ شبیه‌ساز سرعت باد ۴۵
شکل ۳-۳۳ مدل محور دوجرمه ۴۵
شکل ۳-۳۴ کنترل‌کننده توان اکتیو و راکتیو ۴۶
شکل ۳-۳۵ کنترل‌کننده مولفه‌های جریان ۴۷
شکل ۳-۳۶ کنترل‌کننده مبدل سمت شبکه ۴۸
شکل ۳-۳۷ کنترل‌کننده دامنه ولتاژ لینک *dc* ۴۸
شکل ۳-۳۸ کنترل‌کننده توان راکتیو رتور ۴۹
شکل ۳-۳۹ مشخصه‌های توان مکانیکی- سرعت باد و توان الکتریکی- سرعت ژنراتور ۵۰
شکل ۳-۴۰ تغییرات زاویه گام و سرعت ژنراتور بر حسب سرعت باد ۵۰
شکل ۳-۴۱ شکل موج سرعت باد ۵۱
شکل ۳-۴۲ نقاط کار توربین بادی در سرعت‌های باد ۶ و ۹ متر بر ثانیه ۵۲
شکل ۳-۴۳ توان اکتیو استاتور، رتور و مجموع آن‌ها ۵۲
شکل ۳-۴۴ تغییرات ضریب توان و نسبت سرعت لبه ۵۵
شکل ۳-۴۵ سرعت ژنراتور و گشتاورهای الکتریکی و مکانیکی آن ۵۵
شکل ۳-۴۶ پشتیبانی اولیه فرکانس ۵۶
شکل ۳-۴۷ شبکه مورد مطالعه ۵۸
شکل ۳-۴۸ گاورنر توربین بخار شامل توزیع‌کننده توان ۶۰
شکل ۳-۴۹ تغییرات فرکانس شبکه در سناریوی شماره ۱ ..... ۶۱
شکل ۳-۵۰ تغییرات توان اکتیو واحد ST02 و مزرعه بادی در سناریوی شماره ۱ ..... ۶۲
شکل ۳-۵۱ مجهز نمودن کنترل‌کننده سمت رتور به شبیه‌ساز اینرسی ۶۳
شکل ۳-۵۲ شبیه‌ساز اینرسی در سناریوی شماره ۲ ..... ۶۴
شکل ۳-۵۳ تغییرات فرکانس در سناریوی شماره ۲ ..... ۶۵
شکل ۳-۵۴ تغییرات توان اکتیو واحد ST02 و مزرعه بادی در سناریوی شماره ۲ ..... ۶۶

شکل ۳-۵۵ تغییرات گشتاور مکانیکی و سرعت توربین بادی در سناریوی شماره ۲ ..... ۶۷
شکل ۳-۵۶ تغییرات ضریب توان توربین بادی در سناریوی شماره ۲ ..... ۶۷
شکل ۳-۵۷ مشخصه زاویه مرجع-توان (بالا) و مشخصه افت زاویه- فرکانس (پایین) ۶۹
شکل ۳-۵۸ مجهز نمودن کنترل‌کننده زاویه گام به مشخصه افت زاویه- فرکانس ۷۰
شکل ۳-۵۹ سرعت باد در موردهای مطالعاتی سناریوی شماره ۳ ..... ۷۱
شکل ۳-۶۰ تغییرات فرکانس در سناریوی شماره ۳ ..... ۷۲
شکل ۳-۶۱ تغییرات توان اکتیو واحد ST02 و مزرعه بادی در سناریوی شماره ۳ ..... ۷۳
شکل ۳-۶۲ تغییرات گشتاور مکانیکی و سرعت توربین بادی در سناریوی شماره ۳ ..... ۷۳
شکل ۳-۶۳ تغییرات ضریب توان و زاویه گام توربین بادی در سناریوی شماره ۳ ..... ۷۴
شکل ۳-۶۴ شبیه‌ساز اینرسی شامل فیلتر پیشنهادی ۷۵
شکل ۳-۶۵ تغییرات فرکانس در سناریوی شماره ۴ ..... ۷۷
شکل ۳-۶۶ مقایسه بازیابی فرکانس در فیلتر پیشنهادی با فیلتر Dual DT1 ..... ۷۸
شکل ۳-۶۷ توان اکتیو مزرعه بادی در موردهای مطالعاتی فیلتر پیشنهادی و فیلتر Dual DT1 ... ۷۸
شکل ۳-۶۸ تغییرات فرکانس در سناریوی شماره ۵ ..... ۸۰
شکل ۳-۶۹ بازیابی و پشتیبانی اولیه فرکانس در سناریوی شماره ۵ ..... ۸۱
شکل ۳-۷۰ توان اکتیو مزرعه بادی در سناریوی شماره ۵ ..... ۸۱
شکل ۴-۱ ساختار ریزشبکه ۸۵
شکل ۴-۲ کنترل‌کننده توان اکتیو ریزمنبع ۸۸
شکل ۴-۳ روش‌های کنترل توان راکتیو ریزمنابع: الف- مشخصه افت ولتاژ- توان راکتیو؛ ب-
کنترل ولتاژ؛ ج- تصحیح ضریب توان بار ۹۰
شکل ۴-۴ عملکرد تک فرمان‌دهنده ریزشبکه ۹۴
شکل ۴-۵ عملکرد چند فرمان‌دهنده ریزشبکه ۹۵
شکل ۴-۶ اجزاء مختلف ریزمنبع متصل‌شده به ریزشبکه توسط مبدل الکترونیک قدرت ۹۷
شکل ۴-۷ مدار معادل ساده شده باتری اسید - سربی ۹۹
شکل ۴-۸ وابستگی ولتاژ و مقاومت داخلی باتری اسید- سربی به پارامتر وضعیت شارژ ۱۰۰
شکل ۴-۹ مدل دینامیکی یک سلول باتری اسید- سربی ۱۰۱
شکل ۴-۱۰ نمودار تک خطی سیستم ذخیره‌ساز از نوع باتری ۱۰۲
شکل ۴-۱۱ ساختار کنترلی منبع ذخیره‌ساز انرژی از نوع باتری ۱۰۳

شکل ۴-۱۲ کنترل‌کننده توان اکتیو باتری ۱۰۳
شکل ۴-۱۳ کنترل‌کننده توان راکتیو باتری ۱۰۴
شکل ۴-۱۴ کنترل‌کننده جریان مبدل الکترونیک قدرت باتری..... ۱۰۵
شکل ۴-۱۵ ساختار باتری اسید- سربی ساده ۱۰۵
شکل ۴-۱۶ مدل دینامیکی باتری اسید- سربی ساده ۱۰۶
شکل ۴-۱۷ کنترل‌کننده وضعیت شارژ باتری..... ۱۰۷
شکل ۴-۱۸ تغییرات توان اکتیو تولیدی باتری و شارژ کشیده‌شده از آن..... ۱۰۸
شکل ۴-۱۹ تغییرات پارامتر وضعیت شارژ باتری در زمان دشارژ شدن..... ۱۰۸
شکل ۴-۲۰ تغییرات ولتاژ (بالا) و جریان (پایین) باتری در زمان دشارژ شدن..... ۱۰۹
شکل ۴-۲۱ نحوه وابستگی ولتاژ و مقاومت هر سلول باتری به پارامتر وضعیت شارژ ۱۱۰
شکل ۴-۲۲ سرعت تغییر توان اکتیو باتری..... ۱۱۰
شکل ۴-۲۳ بخش‌های مختلف میکروتوربین تک محوره..... ۱۱۱
شکل ۴-۲۴ اجزاء اصلی میکروتوربین تک محوره و ساختار کنترلی آن..... ۱۱۳
شکل ۴-۲۵ کنترل کننده توان اکتیو میکروتوربین ۱۱۳
شکل ۴-۲۶ مدل ساده یک توربین..... ۱۱۴
شکل ۴-۲۷ مدار معادل ژنراتور مغناطیس دائم و یکسوساز دیودی..... ۱۱۴
شکل ۴-۲۸ مدل دینامیکی ژنراتر مغناطیس دائم و یکسوساز دیودی ۱۱۶
شکل ۴-۲۹ نمودار تک خطی میکروتوربین متصل به شبکه..... ۱۱۷
شکل ۴-۳۰ ساختار کنترلی میکروتوربین ۱۱۸
شکل ۴-۳۱ کنترل‌کننده توان اکتیو میکروتوربین ۱۱۹
شکل ۴-۳۲ مدل توربین با تابع تبدیل مرتبه اول..... ۱۱۹
شکل ۴-۳۳ مدل ژنراتور مغناطیس دائم و یکسوساز دیودی ۱۲۰
شکل ۴-۳۴ کنترل‌کننده توان راکتیو میکروتوربین ۱۲۱
شکل ۴-۳۵ کنترل‌کننده جریان مبدل الکترونیک قدرت میکروتوربین ۱۲۱
شکل ۴-۳۶ تغییرات توان اکتیو میکروتوربین و مقدار مرجع آن ۱۲۲
شکل ۴-۳۷ تغییرات گشتاور مکانیکی و الکتریکی (بالا)، و سرعت (پایین) میکروتوربین ۱۲۳
شکل ۴-۳۸ تغییرات سرعت (بالا) و توان اکتیو (پایین) میکروتوربین در مورد مطالعاتی ردیابی توان ۱۲۴

شکل ۴-۳۹ تغییرات جریان (بالا) و ولتاژ (پایین) لینک dc در مورد مطالعاتی ردیابی توان.....۱۲۴
شکل ۴-۴۰ مدل دینامیکی سلول سوختی اکسید جامد.....۱۳۱
شکل ۴-۴۱ نمودار تک خطی سلول سوختی اکسید جامد متصل به شبکه.....۱۳۲
شکل ۴-۴۲ ساختار کنترلی سلول سوختی اکسید جامد و مبدل الکترونیک قدرت آن.....۱۳۳
شکل ۴-۴۳ کنترل‌کننده توان اکتیو سلول سوختی اکسید جامد.....۱۳۴
شکل ۴-۴۴ محدودساز جریان انباره سلول سوختی اکسید جامد.....۱۳۴
شکل ۴-۴۵ مدل دینامیکی انباره سلول سوختی اکسید جامد.....۱۳۵
شکل ۴-۴۶ کنترل‌کننده جریان مبدل الکترونیک قدرت سلول سوختی اکسید جامد.....۱۳۶
شکل ۴-۴۷ تغییرات توان اکتیو سلول سوختی اکسید جامد و مقدار مرجع آن.....۱۳۷
شکل ۴-۴۸ تغییرات ولتاژ و جریان انباره سلول سوختی اکسید جامد.....۱۳۸
شکل ۴-۴۹ محدودسازی جریان انباره سلول سوختی اکسید جامد.....۱۳۹
شکل ۴-۵۰ تغییرات ضریب بهره‌وری سلول سوختی اکسید جامد.....۱۳۹
شکل ۴-۵۱ تغییرات فشار گازهای هیدروژن و اکسیژن (بالا) و اختلاف آن‌ها (پایین).....۱۴۰
شکل ۴-۵۲ نمودار تک خطی شبکه، سیستم ذخیره‌ساز از نوع باتری و امپدانس بین آن‌ها.....۱۴۱
شکل ۴-۵۳ مدار معادل شبکه شکل ۴-۵۲ با فرض سلفی بودن امپدانس.....۱۴۲
شکل ۴-۵۴ مشخصه افت فرکانس – توان اکتیو.....۱۴۴
شکل ۴-۵۵ تغییرات توان اکتیو مبدل الکترونیک قدرت (بالا) و فرکانس (پایین) در شبکه سلفی با فرض استفاده از مشخصه افت معمولی.....۱۴۵
شکل ۴-۵۶ تغییرات توان راکتیو مبدل الکترونیک قدرت (بالا) و ولتاژ آن (پایین) در شبکه سلفی با فرض استفاده از مشخصه افت معمولی.....۱۴۶
شکل ۴-۵۷ تغییرات زاویه (بالا) و دامنه (پایین) ولتاژ مبدل الکترونیک قدرت در شبکه سلفی با فرض استفاده از مشخصه افت معمولی.....۱۴۷
شکل ۴-۵۸ تغییرات توان راکتیو مبدل الکترونیک قدرت (بالا) و ولتاژ آن (پایین) در شبکه سلفی با فرض استفاده از مشخصه افت معمولی و ناچیز بودن راکتانس خط.....۱۴۸
شکل ۴-۵۹ مدار معادل شبکه شکل ۴-۵۲ با فرض مقاومتی بودن امپدانس.....۱۴۸
شکل ۴-۶۰ تغییرات توان اکتیو مبدل الکترونیک قدرت (بالا) و فرکانس (پایین) در شبکه مقاومتی با فرض استفاده از مشخصه افت معمولی معکوس.....۱۵۳

شکل ۴-۶۱ تغییرات توان راکتیو مبدل الکترونیک قدرت (بالا) و ولتاژ آن (پایین) در شبکه مقاومتی با فرض استفاده از مشخصه افت معمولی معکوس ۱۵۳
شکل ۴-۶۲ تغییرات زاویه (بالا) و دامنه ولتاژ مبدل الکترونیک قدرت (پایین) در شبکه مقاومتی با فرض استفاده از مشخصه افت معمولی معکوس ۱۵۴
شکل ۴-۶۳ تغییرات توان اکتیو مبدل الکترونیک قدرت (بالا) و فرکانس (پایین) در شبکه مقاومتی با فرض استفاده از مشخصه افت معمولی ۱۵۵
شکل ۴-۶۴ تغییرات توان راکتیو مبدل الکترونیک قدرت (بالا) و ولتاژ آن (پایین) در شبکه مقاومتی با فرض استفاده از مشخصه افت معمولی ۱۵۶
شکل ۴-۶۵ تغییرات زاویه (بالا) و دامنه ولتاژ مبدل الکترونیک قدرت (پایین) در شبکه مقاومتی با فرض استفاده از مشخصه افت معمولی ۱۵۷
شکل ۵-۱ نمودار تک خطی ریزشبکه مورد مطالعه ۱۶۰
شکل ۵-۲ تغییرات توان اکتیو ریزمنابع و باتری در حالت جزیره شدن برنامه‌ریزی‌شده با عملکرد تک فرمان‌دهنده ۱۶۲
شکل ۵-۳ تغییرات توان راکتیو ریزمنابع و باتری در حالت جزیره شدن برنامه‌ریزی‌شده با عملکرد تک فرمان‌دهنده ۱۶۳
شکل ۵-۴ تغییرات توان اکتیو و راکتیو تزریقی به ریزشبکه توسط شبکه، در حالت جزیره شدن برنامه‌ریزی‌شده با عملکرد تک فرمان‌دهنده ۱۶۴
شکل ۵-۵ تغییرات ولتاژ و فرکانس ریزشبکه در حالت جزیره شدن برنامه‌ریزی‌شده با عملکرد تک فرمان‌دهنده ۱۶۴
شکل ۵-۶ تغییرات توان اکتیو ریزمنابع و باتری در حالت جزیره شدن برنامه‌ریزی‌نشده با عملکرد تک فرمان‌دهنده ۱۶۶
شکل ۵-۷ تغییرات توان راکتیو ریزمنابع و باتری در حالت جزیره شدن برنامه‌ریزی‌نشده با عملکرد تک فرمان‌دهنده ۱۶۶
شکل ۵-۸ تغییرات ولتاژ و فرکانس ریزشبکه در حالت جزیره شدن برنامه‌ریزی‌نشده با عملکرد تک فرمان‌دهنده ۱۶۷
شکل ۵-۹ تغییرات توان اکتیو ریزمنابع و باتری در حالت جزیره شدن برنامه‌ریزی‌نشده با عملکرد چند فرمان‌دهنده ۱۶۸

شکل ۵-۱۰ تغییرات توان راکتیو ریزمنابع و باتری در حالت جزیره شدن برنامه‌ریزی‌نشده با عملکرد چند فرمان‌دهنده..... ۱۶۹
شکل ۵-۱۱ تغییرات ولتاژ و فرکانس ریزشبکه در حالت جزیره شدن برنامه‌ریزی‌نشده با عملکرد چند فرمان‌دهنده..... ۱۷۰
شکل ۵-۱۲ تغییرات توان اکتیو ریزمنابع و باتری در حالت جزیره شدن برنامه‌ریزی‌نشده با عملکرد چند فرمان‌دهنده و پشتیبانی ثانویه فرکانس..... ۱۷۱
شکل ۵-۱۳ تغییرات فرکانس ریزشبکه در حالت جزیره شدن برنامه‌ریزی‌نشده با عملکرد چند فرمان‌دهنده و پشتیبانی ثانویه فرکانس..... ۱۷۲
شکل ۵-۱۴ تغییرات توان اکتیو ریزمنابع و باتری در حالت جزیره شدن برنامه‌ریزی‌نشده با عملکرد چند فرمان‌دهنده و با مشارکت توربین بادی در پشتیبانی اولیه فرکانس..... ۱۷۴
شکل ۵-۱۵ تغییرات فرکانس ریزشبکه در حالت جزیره شدن برنامه‌ریزی‌نشده با عملکرد چند فرمان‌دهنده و با مشارکت توربین بادی در پشتیبانی اولیه فرکانس..... ۱۷۵
شکل ۵-۱۶ تغییرات فرکانس ریزشبکه مربوط به سه مورد مطالعاتی، در بازه پشتیبانی اولیه فرکانس..... ۱۷۶
شکل ۵-۱۷ تغییرات توان اکتیو باتری و توربین بادی مربوط به سه مورد مطالعاتی، در بازه پشتیبانی اولیه فرکانس..... ۱۷۶
شکل ۵-۱۸ تغییرات فرکانس ریزشبکه مربوط به سه مورد مطالعاتی، در لحظه‌های اولیه پس از جزیره شدن ریزشبکه..... ۱۷۷
پ-۱ فیلتر پس‌فاز - مشتق‌گیر..... ۱۸۸
پ-۲ پاسخ فرکانسی فیلتر پس‌فاز - مشتق‌گیر..... ۱۸۸
پ-۳ پاسخ پله فیلتر پس‌فاز - مشتق‌گیر..... ۱۸۹
پ-۴ فیلتر پس‌فاز..... ۱۸۹
پ-۵ پاسخ فرکانسی فیلتر پس‌فاز..... ۱۹۰
پ-۶ پاسخ پله فیلتر پس‌فاز..... ۱۹۱
پ-۷ فیلتر پس‌فاز مشتق‌گیر - پس‌فاز..... ۱۹۲
پ-۸ پاسخ پله فیلتر پس‌فاز مشتق‌گیر - پس‌فاز..... ۱۹۲

فهرست جدول‌ها

جدول ۳-۱ تقسیم‌بندی توربین‌های بادی ۲۶
جدول ۳-۲ مشخصات شبکه مورد مطالعه..... ۵۸
جدول ۳-۳ موردهای مطالعاتی سناریو شماره ۱..... ۶۰
جدول ۳-۴ موردهای مطالعاتی سناریو شماره ۲..... ۶۴
جدول ۳-۵ موردهای مطالعاتی سناریو شماره ۳..... ۷۱
جدول ۳-۶ موردهای مطالعاتی سناریو شماره ۴..... ۷۶
جدول ۳-۷ موردهای مطالعاتی سناریو شماره ۵..... ۷۹
جدول ۴-۱ مشخصه‌های امپدانسی خطوط با سطح ولتاژهای مختلف ۱۴۱
جدول ۴-۲ نقاط کار پایدار مشخصه افت معمولی در شبکه‌های مقاومتی..... ۱۵۱
جدول پ-۱ مشخصات ژنراتور القائی تغذیه دوگانه ۱۹۳
جدول پ-۲ مشخصات مکانیکی توربین بادی..... ۱۹۳
جدول پ-۳ مشخصات سیستم ذخیره‌ساز انرژی از نوع باتری ۱۹۴
جدول پ-۴ مشخصات میکروتوربین..... ۱۹۴
جدول پ-۵ مشخصات سلول سوختی اکسید جامد..... ۱۹۵
جدول پ-۶ مشخصات ریزشبکه مورد مطالعه..... ۱۹۶