تاسیس۱۳۰۷
دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

رساله دکتری

در رشته: مهندسی برق قدرت

عنوان:

کنترل سیستم های تولید پراکنده ترکیبی پیل سوختی/ذخیره ساز انرژی در مواجهه با فروافتادگیهای ولتاژ موجود در سیستم های توزیع

استاد راهنما

دکتر مسعود علی اکبر گلکار

نگارش

امین حاجی زاده گستج

بهمن ۸۸

تاسیس۱۳۰۷
دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

رساله دکتری
در رشته: برق قدرت

عنوان:

کنترل سیستم های تولید پراکنده ترکیبی پیل سوختی/ذخیره ساز انرژی در مواجهه با فروافتادگیهای ولتاژ موجود در سیستم‌های توزیع

استاد راهنما
دکتر مسعود علی اکبر گلکار

نگارش
امین حاجی زاده گستج

بهمن ۸۸

تقدیر و قدردانی

حمد و سپاس خدایی را که اوّل همه آثار هستی اوست و قبل از او اوّلی نبوده، و آخر است بی آنکه پس از او آخری باشد. خدایی که دیده بینندگان از دیدنش قاصر، و اندیشه و فهم وصف کنندگان از وصفش عاجز است.

خدای بزرگ را سپاس گزارم که مسیری را که آغاز کرده بودم توانستم با موفقیّت به پایان برسانم و اثری علمی را از خود بجای گذارم که برای تحقیقات آتی در این زمینه مفید واقع گردد.

بی شک موفقیت خود را در این زمینه مدیون راهنمایی های ارزنده استاد بزرگوار و فرزانه جناب آقای دکتر مسعود علی اکبر گلکار می دانم که همواره مرا در طی انجام تحقیقات یاری نمودند.

از همسر عزیز و مهربانم بخاطر تحمل سختیها و فداکاریهایش و فراهم نمودن شرایط آرامش در حین انجام رساله، تشکر و قدردانی می کنم.

ارج می نهم زحمت های پدر و مادر بزرگوارم که بخاطر فراهم نمودن شرایط ادامه تحصیل برای اینجانب زمینه رشد و موفقیت مرا ایجاد نمودند.

همچنین از Prof.Lars Norum که با ارسال دعوتنامه زمینه حضور اینجانب را در گروه تبدیل انرژی دانشکده مهندسی قدرت دانشگاه علم وفناوری نروژ (NTNU) فراهم ساخت و توانستم بر تجربیات علمی و تحقیقاتی خود در حین دوره فرصت مطالعاتی بیفزایم، تشکر و قدردانی می نمایم.

در پایان از کلیه استادان گروه مهندسی برق قدرت دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی که در طول دوران تحصیل در مقاطع کارشناسی ارشد و دکتری از راهنمایی ها و تجربیاتشان استفاده کرده ام، سپاس گزاری می نمایم.

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

تائیدیه هیات داوران

هیئت داوران پس از مطالعه پایان نامه و شرکت درجلسه دفاع از پایان نامه تهیه شده تحت عنوان:
کنترل سیستم های تولید پراکنده ترکیبی پیل سوختی/ذخیره ساز انرژی در مواجهه با فروافتادگیهای ولتاژ موجود در سیستم‌های توزیع
توسط آقای **امین حاجی زاده گستج** صحت و کفایت تحقیق انجام شده را برای اخذ درجه دکتری در رشته: **مهندسی برق** گرایش **قدرت** با رتبه **عالی** مورد تائید قرار می دهند.

ردیف	هیأت داوران	سمت	مرتبه علمی	امضاء
۱	دکتر مسعود علی اکبر گلکار	استاد راهنمای اول	دانشیار	
۲	دکتر محسن پارسا مقدم	استاد مدعو خارجی	دانشیار	
۳	دکتر حسین مختاری	استاد مدعو خارجی	دانشیار	
۴	دکتر سید محمد تقی بطحایی	استاد مدعو داخلی	دانشیار	
۵	دکتر محمد توکلی بینا	استاد مدعو داخلی	دانشیار	
۶	دکتر روح اللهی	نماینده تحصیلات تکمیلی دانشگاه	دانشیار	

اظهار نامه دانشجو

موضوع پایان نامه : کنترل سیستم های تولید پراکنده ترکیبی پیل سوختی/ذخیره ساز انرژی در مواجهه با فروافتادگیهای ولتاژ موجود در سیستم‌های توزیع

استاد راهنما: آقای دکتر مسعود علی اکبر گلکار
نام دانشجو: امین حاجی زاده گستج
شماره دانشجوئی: ۸۴۱۱۴۲۶

اینجانب **امین حاجی زاده گستج** دانشجوی دوره دکتری مهندسی برق گرایش قدرت دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی گواهی می نمایم که تحقیقات ارائه شده در این پایان نامه توسط شخص اینجانب انجام شده و صحت و اصالت مطالب نگارش شده مورد تائید می باشد، و در موارد استفاده از کار دیگر محققان به مرجع مورد استفاده اشاره شده است . بعلاوه گواهی می نمایم که مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی توسط اینجانب یا فرد دیگری د رهیچ جا ارائه نشده است و در تدوین متن پایان نامه چارچوب(فرمت) مصوب دانشگاه را بطور کامل رعایت کرده ام.

امضاء دانشجو:

تاریخ:

فرم حق طبع ونشر و مالکیت نتایج

۱- حق چاپ و تکثیر این پایان نامه متعلق به نویسنده آن می باشد. هرگونه کپی برداری بصورت کل پایان نامه یا بخشی از آن تنها باموافقت نویسنده یا کتابخانه دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی مجاز می باشد.

ضمنا متن این صفحه نیز باید در نسخه تکثیر شده وجود داشته باشد.

۲- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی می باشد و بدون اجازه کتبی دانشگاه به شخص ثالث قابل واگذاری نیست.

همچنین استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

در این رساله کنترل سیستم تولید پراکنده ترکیبی[1] پیل سوختی/ ذخیره ساز انرژی متصل به شبکه تحت بررسی قرار می گیرد. سیستم تولید پراکنده ترکیبی از طریق مبدل های الکترونیک قدرت به شبکه متصل شده تا بتوان از طریق این مبدّلها، توان اکتیو و راکتیو را در سیستم توزیع کنترل نمود. پیلهای سوختی به علت داشتن چگالی توان پایین بایستی با ذخیره سازهای انرژی نظیر باطریها و ابرخازن ها ترکیب شوند تا بتواند در سیستم ترکیبی تولید توان پیل سوختی/ ذخیره ساز انرژی به دو ویژگی چگالی انرژی بالای مربوط به پیلهای سوختی و چگالی توان بالای مربوط به ذخیره سازهای انرژی دست پیدا کرد. با توجه به اهمیت کنترل منابع تولید پراکنده در سیستم های توزیع و بررسی رفتار این منابع در هنگام رخ دادن پدیده فروافتادگی ولتاژ[2] به عنوان یکی از پدیده های مهم کیفیت توان، در این رساله دو موضع اساسی در ارتباط با کنترل سیستم های تولید پراکنده ترکیبی پیل سوختی/ ذخیره ساز انرژی مطرح می شود. اولین موضوع، طراحی ساختارکنترل توان در سیستم تولید پراکنده ترکیبی می باشد. برای این منظور، ابتدا براساس مدلهای توسعه یافته برای هریک از اجزاء سیستم تولید پراکنده ترکیبی شامل پیل سوختی، ذخیره ساز های انرژی (باطری، ابر خازن)، مبدلهای الکترونیک قدرت *DC-DC* و *DC-AC* ، شبیه سازی دینامیکی سیستم تولید پراکنده ترکیبی پیل سوختی/ ذخیره ساز انرژی با هدف ایجاد یک بستر سازی مناسب برای مطالعات کنترل توان انجام می گیرد. در این قسمت با هدف کنترل توان اکتیو و راکتیو در سیستم توزیع، ساختار کنترل مناسبی برای سیستم تولید توان ترکیبی ارائه می شود و سعی می گردد با طراحی کنترل کننده های مستقل برای هر یک از اجزا سیستم ترکیبی، عملکرد کل سیستم در شرایط مطلوب قرار گیرد.

موضوع دوم و دارای اهمیت که در این رساله مورد توجه قرار گرفته است، بررسی رفتار سیستم تولید پراکنده ترکیبی پیل سوختی/ ذخیره ساز انرژی در مواجهه با فرو افتادگی ولتاژ می باشد. در این قسمت

[1] Hybrid Distributed Generation System(HDGS)
[2] Voltage Sag(Dip)

سعی می گردد اثرات متقابل بین سیستم توزیع و سیستم تولید پراکنده ترکیبی در حین فروافتادگی ولتاژ بطور کامل مورد برسی قرار گیرد و با طراحی استراتژی کنترل مناسب، قابلیت گذر از فروافتادگی ولتاژ[1] که از ملزومات اساسی در کنترل منابع تولید پراکنده می باشد، بهبود یابد. نتایج حاصل از شبیه سازی و پیاده سازی عملی نشان دهنده موثر بودن استراتژی کنترل پیشنهادی می باشد.

کلمات کلیدی:

پیل سوختی، ذخیره ساز انرژی، سیستم تولید پراکنده ترکیبی، کنترل توان، فروافتادگی ولتاژ.

Index Terms: Energy Storage, Fuel Cell, Hybrid Distributed Generation System (HDGS), Power Control, Voltage Sag.

[1] Voltage Sag Ride-through

فهرست مطالب

(فصل اول) مقدمه ۲۲۵
۱-۱-تعریف مسئله ۱
۱-۲-خواص عمومی واحدهای تولید پراکنده ۲
۱-۳-اهداف موضوع پیشنهاد شده برای رساله دکتری ۴
۱-۴-نوآوریهای رساله ۷
۱-۵-سازمان دهی رساله ۷
(فصل دوم)مروری بر تحقیقات انجام شده در زمینه کنترل سیستم های تولید پراکنده پیل سوختی ۱۰
۲-۱- مقدمه ۱۱
۲-۲- بررسی تحقیقات انجام شده ۱۱
۲-۳- بررسی ساختارهای ترکیبی سیستم تولید توان پیل سوختی/ ذخیره ساز انرژی ۱۹
۲-۴- مروری بر رساله های دکتری انجام شده در زمینه کنترل سیستم های تولید پراکنده پیل سوختی ۲۱
۲-۵- جمع بندی ۲۲
(فصل سوم) اجزاء تشکیل دهنده سیستم تولید پراکنده ترکیبی پیل سوختی/ ذخیره ساز انرژی ۲۴
۳-۱- مقدمه ۲۵
۳-۲- اصول کار پیلهای سوختی ۲۶
۳-۳- انواع پیل های سوختی و کاربرد آنها ۲۷
۳-۴-مزایا و معایب پیلهای سوختی ۳۱
۳-۵- بخشهای مختلف یک سیستم تولید توان پیل سوختی ۳۲
۳-۶- بازده پیل سوختی و ولتاژ مدار باز ۳۳
۳-۷- انرژی آزاد گیبس ۳۴
۳-۸- معادله نرنست ۳۶
۳-۹- مدلسازی پیل سوختی با غشاء تبادل یونی ۳۷
۳-۱۰- بررسی انواع ذخیره سازهای انرژی ۴۰
۳-۱۱- انواع تکنولوژیهای ذخیره انرژی ۴۱
۳-۱۲-مقایسه بین انواع مختلف تکنولوژیهای ذخیره ساز انرژی ۴۵
۳-۱۳-کاربرد ذخیره سازهای انرژی در توسعه سیستم قدرت ۴۵
۳-۱۴-تکنولوژی باطریها ۴۷
۳-۱۵-توصیف مشخصه های الکتریکی باطری ۵۱
۳-۱۶-مدل ارائه شده برای ابر خازن ۵۳
۳-۱۷-مبدلهای DC-DC ۵۶
(فصل چهارم)بررسی پدیده فروافتادگی ولتاژ و اهمیت تحلیل رفتار منابع تولید پراکنده در حین فروافتادگی ولتاژ ۶۷
۴-۱- پدیده فروافتادگی ولتاژ ۶۸
۴-۲- تقسیم بندی انواع فروافتادگیهای ولتاژ ۷۲
۴-۳- تغییرات توالی های مثبت و منفی ولتاژ در حین فروافتادگی ولتاژ ۷۳
۴-۴- تحلیل رفتار منابع تولید پراکنده در حین فروافتادگی ولتاژ ۷۵

۴-۵- جمع بندی..... ۸۰
(فصل پنجم)ساختار کنترل توان برای سیستم تولید پراکنده ترکیبی پیل سوختی/ ذخیره ساز انرژی..... ۸۱
۵-۱- مقدمه..... ۸۲
۵-۲- ساختار سیستم تولید پراکنده ترکیبی پیل سوختی/ ذخیره سازی انرژی..... ۸۳
۵-۳- کنترل پخش توان در سیستم تولید پراکنده ترکیبی پیل سوختی / ذخیره ساز انرژی..... ۸۴
۵-۵- کنترل پخش توان در سیستم تولید پراکنده ترکیبی پیل سوختی/ ذخیره ساز انرژی در مواجهه با فروافتادگی ولتاژ ۹۰
۵-۶- طراحی کنترل کننده های مبدلهای الکترونیک قدرت و پیل سوختی..... ۹۲
۵-۶-۱- طراحی کنترل کننده برای سیستم تولید توان پیل سوختی..... ۹۳
۵-۶-۲- طراحی استراتژی کنترل مبدل DC-DC افزاینده جهت کنترل جریان پیل سوختی..... ۹۵
۵-۶-۳- طراحی استراتژی کنترل برای مبدلهای DC-DC دو طرفه..... ۹۹
۵-۶-۴- طراحی استراتژی کنترل جهت کنترل جریان اینورتر سه فاز در مواجهه با فروافتادگیهای ولتاژ..... ۱۰۴
۵-۷- کنترل پخش توان در سیستم تولید پراکنده ترکیبی پیل سوختی/ ذخیره ساز انرژی در حین فروافتادگی ولتاژ.. ۱۱۳
۵-۸- نتیجه گیری..... ۱۱۶
(فصل ششم)تحلیل نتایج حاصل از استراتژی کنترل پیشنهاد شده برای سیستم تولید پراکنده ترکیبی پیل سوختی/ ذخیره ساز انرژی..... ۱۱۷
۶-۱- توصیف سیستم ترکیبی شبیه سازی شده..... ۱۲۰
۶-۲- کنترل توان اکتیو و راکتیو در سیستم سیستم تولید پراکنده ترکیبی پیل سوختی / ذخیره ساز انرژی..... ۱۲۷
۶-۳- عملکرد سیستم تولید پراکنده پیل سوختی/ ذخیره ساز انرژی در مواجهه با فروافتادگی ولتاژ..... ۱۳۵
۳-۶-۱- کنترل و عملکرد سیستم تولید پراکنده ترکیبی پیل سوختی/ ذخیره ساز انرژی در حین فروافتادگی ولتاژ نامتقارن بدون در نظر گرفتن پرش فاز..... ۱۳۸
۳-۶-۲- کنترل و عملکرد سیستم تولید پراکنده ترکیبی پیل سوختی/ ذخیره ساز انرژی در حین فروافتادگی ولتاژ نامتقارن با در نظر گرفتن پرش فاز..... ۱۴۴
۶-۳-۳- بررسی رفتار سیستم تولید پراکنده ترکیبی در حین فرو افتادگی ولتاژ متقارن..... ۱۴۷
۶-۳-۴- تزریق جریان های متقارن برابر با جریان اینورتر در حین فروافتادگیهای ولتاژ نامتقارن..... ۱۴۹
۶-۳-۵- مدلسازی پیل سوختی 25KW موجود در سایت تحقیقاتی طالقان و کنترل توان اکتیو و راکتیو..... ۱۵۱
۶-۳-۶- پیاده سازی عملی و سیستم آزمایشگاهی استخراج نتایج عملی..... ۱۵۵
۶-۳-۷- تعیین حد قابلیت گذر از فروافتادگی ولتاژ برحسب میزان ذخیره انرژی..... ۱۶۱
(فصل هفتم)کنترل ولتاژ در سیستم های توزیع ضعیف با حضور سیستم تولید پراکنده ترکیبی پیل سوختی/ ذخیره ساز انرژی در حین فروافتادگی ولتاژ..... ۱۶۴
۷-۱- مقدمه..... ۱۶۵
۷-۲- محدودیتهای موجود در تنظیم ولتاژ..... ۱۶۷
۷-۳- طراحی استراتژی کنترل ولتاژ در شبکه های ضعیف با حضور سیستم تولید پراکنده ترکیبی پیل سوختی/ ذخیره ساز انرژی..... ۱۶۹
۷-۳-۱- طراحی کنترل کننده ولتاژ در حین فروافتادگی ولتاژ..... ۱۷۰
۷-۴- تحلیل نتایج..... ۱۷۳

۷-۴-۱- کنترل ولتاژ در حین فرو افتادگی ولتاژ نامتقارن ۱۷۴
(فصل هشتم)نتیجه گیری و پیشنهاد ها ۱۷۹
۸-۱- نتیجه گیری ۱۸۰
۸-۲- پیشنهادهایی جهت ادامه کار ۱۸۳
لسیت مقالات استخراج شده ۱۸۴
مراجع ۱۸۶
ضمائم ۱۹۷
ضمیمه۱: جعبه ابزار Fuzzy ۱۹۸
ضمیمه ۲: طراحی الگوریتم فازی عصبی مبتنی بر لیاپانوف برای بهینه سازی ساختار کنترل کننده فازی ۲۰۶

فهرست شکلها

شکل(۱-۱) ساختار سیستم تولید پراکنده ترکیبی پیل سوختی / ذخیره ساز انرژی و استراتژی کنترل پیشنهادی ۶
شکل(۳-۱) ساختار تولید انرژی در یک پیل سوختی ۲۷
شکل(۳-۲) ورودی و خروجی های یک سیستم پیل سوختی ۳۴
شکل(۳-۳) مدار معادل باطری ۵۲
شکل(۳-۴) مدار معادل ساده شده باطری ۵۳
شکل(۳-۵)تغییرات تخلیه خودی یک ابرخازن ۵۵
شکل(۳-۶) مدار معادل ابرخازن ۵۵
شکل(۳-۷) مدار معادل مبدل DC/DC افزاینده ۵۶
شکل(۳-۸) مدار معادل مبدل DC/DC افزاینده- کاهنده ۵۷
شکل(۳-۹) نتایج شبیه سازی مدل میانگین مبدل DC-DC افزاینده ۶۰
شکل(۳-۱۰) نتایج شبیه سازی مدل دقیق مبدل DC-DC افزاینده ۶۱
شکل(۳-۱۱) مدار معادل اینورتر سه فاز سه سیمه با فیلتر R-L ۶۲
شکل(۳-۱۲) ولتاژ خروجی اینورتر براساس مدل میانگین و براساس مدل دقیق ۶۴
شکل(۳-۱۳) توان خروجی اینورتر براساس مدل میانگین و براساس مدل دقیق ۶۵
شکل(۴-۱) نمونه ای از فرو افتادن ولتاژ به همراه مشخصه های آن[۷۶] ۷۰
شکل(۴-۲) سیستم قدرت به همراه شبکه انتقال، زیر انتقال و توزیع ۷۱
شکل(۴-۳) مدل مقسم ولتاژ برای ارزیابی فرو افتادن ولتاژ ۷۱
شکل(۴-۴) سیستم توزیع نمونه جهت طبقه بندی انواع فرو افتادگی ولتاژ ۷۳
شکل(۴-۵) تغییر بردارهای ولتاژ سه فاز شبکه در حین انواع فروافتادگی های ولتاژ[۷۸] ۷۷
شکل(۴-۶) تغییرات جریان استاتور ماشین سنکرون در حین فروافتادگی ولتاژ[۷۹] ۷۹
شکل(۴-۷) جریانهای تزریق شده به شبکه از طرف اینورتر سه فاز در حین فروافتادگی ولتاژ نوع C با کاهش به اندازه ۶۰٪ ۸۰
شکل (۴-۸) تغییرات بیشینه جریان شبکه در حین فروافتادگی های ولتاژ نامتقارن نوع C برحسب کاهش ولتاژ ۸۰
شکل(۵-۱) ساختار پیشنهادی تولید توان برای سیستم تولید پراکنده ترکیبی ۸۵
شکل(۵-۲) ساختار کنترلی پیشنهاد شده برای سیستم تولید پراکنده ترکیبی پیل سوختی/ ذخیره ساز انرژی ۸۶
شکل(۵-۳) ساختار کنترل کننده فازی جهت توزیع توان بین پیل سوختی و باطری ۸۸
شکل(۵-۴) صفحه فازی کنترل کننده فازی ممدانی بر حسب توان درخواستی، حالت شارژ باطری و توان پیل سوختی . ۸۹
شکل(۵-۵) نقشه بازده برای یک پیل سوختی 50kW ۹۰
شکل(۵-۶) صفحه فازی کنترل کننده فازی سوگنو بر حسب توان درخواستی، حالت شارژ باطری و توان پیل سوختی... ۹۱
شکل(۵-۷) محدوده عملکردی مناسب برای ولتاژ خروجی پیل سوختی ۹۵
شکل(۵-۸) حلقه کنترل ریفورمر جهت کنترل نرخ عبور متان ۹۶
شکل(۵-۹) ساختار کنترلی جریان پیل سوختی ۹۷
شکل(۵-۱۰) صفحه فازی کنترل کننده فازی ممدانی برای کنترل مبدل DC-DC افزاینده ۱۰۰
شکل(۵-۱۱) ساختار کنترلی پیشنهاد شده برای مبدل DC-DC دو طرفه ۱۰۲
شکل(۵-۱۲) ساختار کنترلی پیشنهاد شده برای اینورتر سه فاز ۱۰۶

شکل(۵-۱۳) روش ارائه شده برای استخراج توالی های مثبت و منفی مولفه های dq ۱۱۲
شکل(۵-۱۴) ساختار حلقه قفل فاز جهت تخمین فرکانس ۱۱۳
شکل(۵-۱۵) ساختار پخش توان را بین منبع تولید توان پیل سوختی و ذخیره ساز انرژی در لینک dc..... ۱۱۴
شکل(۵-۱۶) ساختار کنترل کننده فازی جهت تعیین میزان جریان ابرخازن ۱۱۵
شکل(۶-۱) سیستم تولید توان ترکیبی شبیه سازی شده ۱۲۰
شکل(۶-۲) نمودار بود و فاز تابع تبدیل حلقه باز مبدل DC-DC..... ۱۲۴
شکل(۶-۳) نمودار مکان ریشه تابع تبدیل حلقه باز مبدل DC-DC..... ۱۲۴
شکل(۶-۴) نمودار بود و فاز تابع تبدیل حلقه باز مبدل DC-DC با اعمال کنترل کننده کلاسیک.....۱۲۵
شکل(۶-۵) تغییرات ولتاژ باطری برحسب ظرفیت باطری.....۱۲۶
شکل(۶-۶) مشخصه توان اکتیو وراکتیو درخواستی از طرف بار ۱۲۷
شکل(۶-۷) توان اکتیو و راکتیو تولید شده توسط سیستم تولید توان ترکیبی ۱۲۸
شکل(۶-۸) توان اکتیو و راکتیو تولید شده توسط شبکه ۱۲۹
شکل(۶-۹) توان ، ولتاژ و جریان پیل سوختی ۱۲۹
شکل(۶-۱۰) توان، ولتاژ و حالت شارژ باتریها ۱۳۰
شکل (۶-۱۱) تغییرات توان پیل سوختی و تغییرات توان باطری برپایه استراتژی کنترل فازی سوگنو..... ۱۳۱
شکل(۶-۱۲) حالت شارژ باتریها ۱۳۲
شکل(۶-۱۳) جریانهای تزریق شده به شبکه از طرف سیستم تولید توان ترکیبی ۱۳۳
شکل(۶-۱۴) تغییرات ولتاژ لینک DC (تغییرات خازن خروجی مبدل DC-DC)..... ۱۳۴
شکل(۶-۱۵) ماکزیمم جریان اینورتر برحسب اندازه های مختلف از فروافتادگی ولتاژ نامتقارن نوع C..... ۱۳۵
شکل(۶-۱۶) ماکزیمم جریان اینورتر برحسب اندازه های مختلف از فروافتادگی ولتاژ متقارن نوع A ۱۳۶
شکل(۶-۱۷) فروافتادگی ولتاژ نامتقارن نوع C با دامنه 60%..... ۱۳۸
شکل(۶-۱۸) توان اکتیو و راکتیو لحظه ای و میانگین تزریق شده به شبکه در حین فروافتادگی ولتاژ نامتقارن بدون در نظر گرفتن پرش فاز ۱۳۹
شکل(۶-۱۹) جریان های سه فاز تزریق شده به شبکه در حین فروافتادگی ولتاژ نامتقارن بدون در نظر گرفتن پرش فاز ۱۴۰
شکل(۶-۲۰) تغییرات توان و جریان ابر خازن در حین فروافتادگی ولتاژ ۱۴۰
شکل(۶-۲۰) تغییرات ولتاژ خروجی خازن مربوط به مبدل DC-DC افزاینده(ولتاژ لینک DC) ۱۴۱
شکل(۶-۲۱) توان اکتیو و راکتیو لحظه ای و میانگین تزریق شده به شبکه در حین فروافتادگی ولتاژ نامتقارن بدون در نظر گرفتن پرش فاز ۱۴۵
شکل(۶-۲۲) توان، جریان و تغییرات ولتاژ پیل سوختی در حین فرو افتادگی ولتاژ نامتقارن نوع C.....۱۴۳
شکل(۶-۲۳) ولتاژهای شبکه به همراه جریانهای تزریق شده از طرف سیستم تولید پراکنده ترکیبی در حین فروافتادگی ولتاژ نامتقارن نوع B ۱۴۳
شکل(۶-۲۴) توان اکتیو و راکتیو لحظه ای و میانگین تزریق شده به شبکه در حین فروافتادگی ولتاژ نامتقارن نوع B.۱۴۳
شکل(۶-۲۵) تغییرات جریان پیل سوختی، ولتاژ خروجی مبدل DC-DC افزاینده و جریان ابرخازن در حین فروافتادگی ولتاژ نامتقارن نوع B.....۱۴۴
شکل(۶-۲۶) توان اکتیو و راکتیو لحظه ای و میانگین تزریق شده به شبکه در حین فروافتادگی ولتاژ نامتقارن بدون در نظر گرفتن پرش فاز.....۱۴۵

شکل(۶-۲۷) جریانهای توالی مثبت و منفی مربوط به مولفه های dq به همراه مقادیر مرجعشان ۱۴۶
شکل(۶-۲۸) جریانهای سه فاز تزریق شده به شبکه در حین فروافتادگی ولتاژ نامتقارن با زاویه پرش فاز ۱۴۶
شکل (۶-۲۹) تغییرات جریان ابرخازن به همراه جریان مرجع درخواستی آن و تغییرات ولتاژ ابرخازن ۱۴۷
شکل(۶-۳۰) توان اکتیو و راکتیو تزریق شده به شبکه در حین فروافتادگی ولتاژ متقارن.....۱۴۸
شکل(۶-۳۱) جریان های تزریق شده به شبکه در حین فروافتادگی ولتاژ متقارن.....۱۴۸
شکل(۶-۳۲) تغییرات توان ابرخازن، جریان ابرخازن و ولتاژ لینک DC در حین فروافتادگی ولتاژ متقارن ۱۴۹
شکل(۶-۳۳) جریان های تزریق شده متقارن به شبکه در حین فروافتادگی ولتاژ نا متقارن ۱۵۰
شکل(۶-۳۴) توان اکتیو و راکتیو تزریق شده به شبکه در حین فروافتادگی ولتاژ نا متقارن با هدف تزریق جریانهای متقارن.....۱۵۰
شکل(۶-۳۵) تغییرات جریان ابرخازن، توان ابرخازن و ولتاژ لینک DC در حین فروافتادگی ولتاژ نا متقارن با هدف تزریق جریانهای متقارن ۱۵۱
شکل(۶-۳۶) پیل سوختی 25KW موجود در سایت تحقیقاتی طالقان ۱۵۲
شکل(۶-۳۷)منحنی تغییرات ولتاژ بر حسب جریان پیل سوختی برای پیل سوختی 12.5KWسایت طالقان ۱۵۳
شکل(۶-۳۸) تغییرات توان خروجی و ولتاژ پیل سوختی PEM موجود در سایت طالقان ۱۵۴
شکل(۶-۳۹) تغییرات ولتاژ لینک DC ۱۵۴
شکل(۶-۴۰) تجهیزات بکار رفته جهت پیاده سازی عملی ۱۵۶
شکل(۶-۴۱) ولتاژ های شبکه در حین فروافتادگی ولتاژ نامتقارن ۱۵۷
شکل(۶-۴۲) ولتاژ یک فاز خروجی اینورتر سه فاز ۱۵۷
شکل(۶-۴۳) جریانهای خروجی اینورتر در حین فروافتادگی ولتاژ نامتقارن ۱۵۸
شکل(۶-۴۴) مقدار توان اکتیو تزریقی به شبکه در حین فروافتادگی ولتاژ نامتقارن ۱۵۹
شکل(۶-۴۵) جریانهای خروجی اینورتر در حین فروافتادگی ولتاژ نامتقارن با هدف متقارن سازی جریان.....۱۶۰
شکل(۶-۴۶) مقدار توان اکتیو تزریقی به شبکه در حین فروافتادگی ولتاژ نامتقارن با هدف متقارن سازی جریان ۱۶۱
شکل (۶-۴۷) تغییرات میزان توان جذب شده توسط ابر خازن برحسب دامنه های مختلف از فروافتادگی های ولتاژ متقارن و نامتقارن ۱۶۲
شکل(۷-۱) ساختار اتصال به سیستم توزیع ضعیف سیستم تولید پراکنده ترکیبی پیل سوختی/ ذخیره ساز انرژی ۱۶۷
شکل(۷-۲) ساختار پخش توان در سیستم توزیع ضعیف ۱۶۷
شکل(۷-۳) روش جداسازی توالی های مثبت و منفی مولفه هایdq ولتاژ ۱۷۱
شکل(۷-۴) حلقه کنترل ولتاژ مبتنی بر کنترل مود لغزشی-فازی ۱۷۳
شکل(۷-۵) فروافتادگی ولتاژ نامتقارن ایجاد شده با دامنه 85% ۱۷۴
شکل(۷-۶) تغییرات جریانهای توالی مثبت مولفه های dq تزریق شده به منظور جبران سازی ولتاژ ۱۷۵
شکل(۷-۷) تغییرات جریانهای توالی منفی مولفه های dq تزریق شده به منظور جبران سازی ولتاژ..... ۱۷۵
شکل(۷-۸) ولتاژ تنظیم شده در PCC در حین فروافتادگی ولتاژ نامتقارن.....۱۷۶
شکل(۷-۹) توالی های مثبت مولفه های dq از ولتاژ تنظیم شده در PCC ۱۷۶
شکل(۷-۱۰) توالی های منفی مولفه های dq از ولتاژ تنظیم شده در PCC.....۱۷۶
شکل(۷-۱۱) جریان های سه فاز تزریق شده به شبکه با هدف تنظیم ولتاژ در حین فروافتادگی ولتاژ نامتقارن.....۱۷۷

شکل(۷-۱۲) توان اکتیو و راکتیو لحظه ای و میانگین تزریق شده به شبکه از طرف سیستم تولید پراکنده ترکیبی به شبکه ۱۷۸
شکل(ض-۱) ساختار یک سیستم فازی خالص ۱۹۹
شکل(ض-۲)ساختار اصلی سیستم فازی TSK ۲۰۰
شکل(ض-۳) ساختار اصلی یک سیستم فازی با فازی ساز و غیر فازی ساز ۲۰۱
شکل(ض-۴) تابع عضویت μ را برحسب $e(t)$ نشان می دهد. ۲۰۲
شکل(ض-۵) نمایش گرافیکی غیر فازی ساز مرکز ثقل ۲۰۴
شکل(ض-۶) نمایش گرافیکی غیر فازی ساز میانگین مراکز ۲۰۴
شکل(ض-۷) ساختار استراتژی کنترل فازی-عصبی ۲۰۶

فهرست جدولها

جدول (۳-۱) مقایسه انواع پیلهای سوختی موجود در صنعت ۳۱
جدول(۳-۲) پارامترهای مورد نیاز در تحلیل واکنشهای شیمیایی ۳۵
جدول (۳-۳) پارامترهای مورد استفاده برای مدل پیل سوختی مورد استفاده شده ۳۹
جدول (۳-۴) مقایسه انواع ذخیره سازهای انرژی ۴۵
جدول(۳-۵) پارامترهای مدل RC باطری ۵۲
جدول(۳-۶) مقایسه مشخصات باطریها و ابرخازنها ۵۴
جدول(۴-۱) طبقه بندی انواع فرو افتادگی ولتاژ ۷۴
جدول(۴-۲) تغییرات توالی های مثبت و منفی ولتاژ در حین فروافتادگی ولتاژ[۷۸] ۷۵
جدول(۴-۳) تغییرات توالی های مثبت و منفی ولتاژ در حین فروافتادگی ولتاژ[۷۸] ۷۶
جدول(۵-۱) پایگاه قوانین فازی برای کنترل کننده فازی..... ۸۸
جدول(۵-۲) قوانین فازی برای کنترل سیکل وظیفه مبدل DC-DC ۹۹
جدول(۶-۱) مشخصات مربوط به پشته پیل سوختی 5kW ۱۲۲
جدول(۶-۲) پارامترهای مبدل DC-DC افزاینده..... ۱۲۲
جدول(۶-۳) پارامترهای کنترل کنترل کننده پسفاز..... ۱۲۵
جدول(۶-۴) پارامترهای مربوط به مبدل منبع ولتاژ ۱۲۶
جدول (۶-۵) مشخصات پیل سوختی 25KW موجود در سایت تحقیقاتی طالقان..... ۱۵۳
جدول(۷-۱) پارامترهای شبکه توزیع ضعیف..... ۱۷۳

(فصل اول)

مقدمه

۱-۱- تعریف مسئله

مصرف جهانی انرژی در دو دهه آینده پیش بینی می شود به اندازه ٪۵۷ رشد پیدا کند[۱]. واضح است که در سال های اخیر بیشترین سهم تولید انرژی توسط سوختهای فسیلی (حدود ٪۸۶) بوده است. استفاده از سوختهای فسیلی برای تولید دارای محدودیتهایی چون آلودگی هوا و عدم دسترسی آسان در هر جا برای استفاده می باشد و بصورت توزیع شده ای در سراسر دنیا وجود ندارد. از اینرو استفاده از تکنولوژیهای مدرن برای تولید توان امروزه به عنوان یکی از بحثهای مهم می باشد. استفاده از منابع تولید توزیع شده در کنار مصرف کننده ها به عنوان یک انتخاب برای تولید توان الکتریکی مد نظر قرار گرفته است. منظور از واحدهای تولید پراکنده[1]، واحدهای تولید توانی است که نزدیک مصرف کننده قرار دارند و می توانند بطور مستقل یا متصل به شبکه سراسری، برق تولید نمایند. بطور کلی این منابع بسته به تکنولوژی و انرژی که استفاده می کنند، به دو نوع سنتی و جدید تقسیم بندی می شوند[۲]. منابع تولید پراکنده سنتی شامل توربین های گازی، موتورهای احتراقی و تولیدهای آبی می باشد. در مقابل منابعی

[1] Distributed Generation(DG)

نظیر نیروگاههای خورشیدی، بادی، ژئوترمال (زمین گرمایی)، پیل سوختی و ... منابع تولید پراکنده جدید هستند. علاوه بر آنچه گفته شد با توسعه استفاده از منابع انرژی تجدید پذیر، نیروگاههای تولید پراکنده برای مصرف کننده های کوچک که دور از شبکه سراسری برق قرار دارند مناسب گردیده است. علاوه بر این، این واحدها برای استفاده در فضا و زیر آب و مصارف پزشکی کاربرد دارند. همچنین تقریباً بیش از یک میلیون روستای پراکنده در جهان وجود دارند که امکان دسترسی به شبکه سراسری برق را ندارند و استفاده از تولید پراکنده بهترین راه رساندن برق به این مناطق است.

۱-۲- خواص عمومی واحدهای تولید پراکنده[۳-۴]

منابع تولید پراکنده اگرچه از لحاظ عملکرد متفاوت و دارای خواص منحصر بفرد می باشند، ولی دارای خواص مشترکی نیز می باشند که می تواند بصورت ذیل تقسیم بندی گردد.

- استفاده از چندین منبع انرژی اولیه
- استفاده بطور مستقل یا متصل به شبکه
- استفاده برخی از آنها از منابع خیلی خاص
- قرارگرفتن در نزدیکی محل مصرف
- استفاده در نقاط دور از شبکه سراسری برق

انگیزه های استفاده از واحدهای تولید پراکنده را می توان بطور مختصر بصورت ذیل بیان نمود[۲].

- استفاده برخی از منابع تولید پراکنده از منابع انرژی تجدید پذیر
- جاگذاری و نصب آسانتر
- قابلیت اطمینان و امکان دسترسی بیشتر
- جاگذاری نزدیک مصرف کننده که باعث کاهش هزینه توزیع، انتقال و تلفات ناشی از آنها می‌گردد.
- عدم استفاده از سوخت های فسیلی در برخی از انواع این منابع

- عدم انتشار گازهای آلوده کننده محیط زیست در تعدادی از این منابع نظیر فتوولتایی، بادی و...
- عدم نیاز برخی از تکنولوژی ها به فضای زیاد جهت احداث نسبت به نیروگاههای بزرگ

فناوریهای زیادی برای تولید پراکنده ارائه شده و به کار گرفته شده اند. توان تولیدی نیروگاههای تولید پراکنده بسته به کاربرد آنها تا مگاوات تغییر می یابد. تعدادی از این فناوریها در زیر ارائه شده است .

- نیروگاههای فتوولتاییک
- سیستمهای تبدیل انرژی بادی به الکتریکی
- نیروگاههای ژئوترمال (زمین گرمایی)
- سیستمهای تبدیل انرژی موجی و جزر و مدی به الکتریکی
- پیلهای سوختی
- سیستمهای تبدیل انرژیهای خورشیدی- گرمایی- الکتریکی
- استفاده و بازیافت توده های زیست محیطی[1] (بیومس)

در میان انواع منابع تولید توان که تا کنون مورد استفاده قرار گرفته است، تحقیقات بر روی پیل های سوختی در سالهای اخیر مورد توجه بسیاری از مراکز تحقیقاتی و دانشگاهها بوده است. اگر بخواهیم دلایل اصلی برای این امر را بیان نماییم، می توان آن را در ویژگیهای منحصر بفرد مربوط به پیل سوختی جستجو کرد. در ذیل برخی از مهمترین ویژگیهای مربوط به این منبع تولید توان اشاره شده است[۴]:

- عملکرد در بازدهی بالا
- آلایندگی پایین
- انعطاف پذیری در سوخت مصرفی
- قابلیت بکار گیری در سیستم های تولید همزمان گرما و توان
- سادگی در نصب و امکان ساخت بصورت مدولار

[1] Biomass