بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

گروه قدرت

پایان‌نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته‌ی مهندسی برق - قدرت

عنوان

شبیه‌سازی و کنترل یک توربین بادی PMSG متصل به شبکه

استاد راهنما

پروفسور سید حسین حسینی

استاد مشاور

دکتر سعید قاسم زاده

پژوهشگر

آیدا باغبانی اسکوئی

شهریور ۱۳۹۱

تبریز- ایران

نام خانوادگی: باغبانی اسکوئی **نام:** آیدا

عنوان پایان‌نامه: شبیه سازی و کنترل یک توربین بادی PMSG متصل به شبکه

استاد راهنما: پروفسور سید حسین حسینی

استاد مشاور: دکتر سعید قاسم زاده

مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد **رشته:** مهندسی برق قدرت **گرایش:** سیستم و الکترونیک قدرت

دانشگاه: تبریز **دانشکده:** مهندسی برق و کامپیوتر **تاریخ فارغ‌التحصیلی:** شهریور ۱۳۹۱

تعداد صفحه: ۱۱۷

کلید واژه‌ها: توربین بادی سرعت متغیر، ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم، سیستم تبدیل انرژی باد، مبدل منبع ولتاژ، مبدل منبع امپدانس، الگوریتم محاسباتی برای تثبیت ولتاژ خازن.

چکیده:

همزمان با گسترش سیستم‌های تبدیل انرژی باد، فن‌آوری‌های مختلفی برای توسعه‌ی آن‌ها ارائه شده است؛ که ژنراتورهای سنکرون مغناطیس دائم، به دلیل ویژگی‌هایی چون، حجم و وزن کم، بازدهی بالا و امکان حذف گیربکس، مورد توجه این سیستم‌ها قرار گرفته است. در سیستم‌های تبدیل انرژی باد PMSG براساس یکسوساز کنترل‌نشده یک مبدل dc-dc میانی برای اتصال یکسوساز به اینورتر مورد نیاز است. این مبدل dc-dc میانی، علاوه بر افزایش ولتاژ عمل کنترلی برای حصول حداکثر توان را انجام می‌دهد. معمولترین مبدل dc-dc در کاربردهای تبدیل انرژی باد PMSG، چاپر افزاینده است، ولی اخیراً استفاده از شبکه‌ی امپدانسی، به عنوان جایگزینی برای چاپر اقزاینده، معرفی شده است که باعث افزایش قابلیت اطمینان سیستم می‌شود. همچنین، عدم وجود زمان Dead Time در سویچ‌زنی اینورتر منبع امپدانس، موجبات کاهش THD ولتاژ و جریان را فراهم می‌کند.

در این پایان‌نامه، الگوریتم محاسباتی برای تثبیت ولتاژ خازن در استفاده از چاپر افزاینده و شبکه‌ی امپدانسی معرفی و بهره-گیری از آن برای انتقال کل توان خروجی توربین بادی به شبکه پیشنهاد می‌شود. استفاده از این الگوریتم، در مقایسه با روش استفاده از کنترلر PI، مشکلات پیدا کردن ضرایب PI را ندارد. همچنین، قابلیت عملکرد در خازن‌های با اندازه‌ی کوچک را داراست و در آن، میزان خطا از مقدار مرجع قابل تنظیم می‌باشد. ولی پیچیدگی‌های حاصل از محاسبات، عیب این روش محسوب می‌شود. این الگوریتم، همچنین، باعث افزایش اندکی در THD جریان شبکه می‌شود. سیستم تبدیل انرژی باد PMSG با استفاده از اینورتر منبع ولتاژ با دو منبع dc جداگانه، ساختاری است که در ادامه ارائه می‌گردد؛ که در آن از دو توربین بادی متصل به PMSG که به صورت مستقل با استفاده از چاپر افزاینده‌ی مربوطه برای حصول MPPT

کنترل می‌شوند، استفاده می‌شود. مزایای ترانسفورماتور در این ساختار، عبارت است از: ایزولاسیون الکتریکی، جلوگیری از صدمه‌رسانی به ادوات الکترونیک قدرت هنگام ایجاد خطا در شبکه، کاهش سایز ترانسفورماتور اتصال به شبکه، کاهش THD ولتاژ خروجی و افزایش سطوح آن. همچنین برای جلوگیری از عدم تعادل ولتاژ لینک‌های خازنی در این سیستم، استفاده از پایدارساز چاپری پیشنهاد می‌شود. سیستم تبدیل انرژی باد PMSG با استفاده از اینورتر منبع ولتاژ چندسطحه، ساختار دیگری‌ست که در آن از n توربین بادی که به صورت مستقل کنترل می‌شود، استفاده می‌شود. در ادامه، سیستم‌های معادل با استفاده از شبکه‌ی امپدانسی معرفی می‌شوند که برای حصول MPPT در آن‌ها، شرایط توربین‌ها یکسان و سرعت روتور تقریباً برابر، فرض می‌شود. در تمامی این سیستم‌ها، کنترل توان اکتیو و راکتیو همانند حالت تک‌توربینه است، با این تفاوت که برای انتقال کل توان اکتیو به شبکه، تثبیت مجموع ولتاژ خازن‌ها درنظر گرفته می‌شود. برای سویچ‌زنی اینورتر منبع امپدانس چندسطحه نیز ، دو روش مدولاسیون پهنای پالس بردار فضایی (SVPWM) و کنترل بردار فضایی(SVC) پیشنهاد می‌شود؛ که روش SVC به دلیل THD ولتاژی و فرکانس سویچ‌زنی پایین و همچنین عدم افزایش چشمگیر تعداد سویچ‌زنی در صورت اعمال حالت Shoot Through، نسبت به روش SVPWM برتری دارد.

تقدیم به پدرم

که با ابهت نگاهش خو گرفته‌ام و لحظه لحظه‌ی عمرم از مهرش زیباست و از عشقش سرشار ...

و تقدیم به مادرم

که آینه‌ی عشق آسمانی‌ست و خورشید ستارگان زمینی ...

و همواره ستایشگر محبتشان خواهم بود ...

تقدیر و تشکر

بدینوسیله لازم می‌دانم از زحمات بی‌دریغ جناب آقای پروفسور سید حسین حسینی، استاد راهنمای پایان‌نامه‌ی حاضر، جناب آقای دکتر سعید قاسم‌زاده، استاد مشاور، و گروه محترم مهندسی برق- قدرت، به ویژه جناب آقای دکتر محمدباقر بناءشریفیان، جناب آقای دکتر مهران صباحی و مدیر محترم گروه، جناب آقای دکتر ابراهیم بابایی تشکر و قدردانی نمایم. ضمناً از جناب آقای مهندس علیرضا دهقان‌زاده و سرکار خانم مهندس سارا حضرتی، که در این امر یاری رسانیده‌اند، کمال تشکر را دارم.

آیدا باغبانی اسکوئی

شهریور ۱۳۹۱

تبریز، ایران

فهرست مطالب

عنوان صفحه

مقدمه ۱

فصل اول: بررسی منابع ٤

۱-۱: مقدمه ٥

۱-۲: انرژی‌های تجدید پذیر و DG ٥

۱-۳: تاریخچه‌ی انرژی باد ٦

۱-٤: مدل توربین بادی و کنترل حداکثر توان ۷

۱-٥: انواع توربین‌های بادی ۹

۱-٥-۱: توربین‌های بادی محور افقی (HAWT) ۹

۱-٥-۲: توربین‌های بادی محور عمودی (VAWT) ۱۰

۱-٦: مزرعه‌ی بادی فراساحلی ۱۰

۱-۷: انواع سیستم‌های تبدیل انرژی باد ۱۱

۱-۷-۱: ساختارهای ارائه شده برای سیستم‌های تبدیل انرژی باد ۱۱

۱-۷-۱-۱: توربین‌های سرعت ثابت با ژنراتور القایی ۱۱

۱-۷-۱-۲: توربین‌های سرعت متغیر با ژنراتور القایی قفس سنجابی یا ژنراتور سنکرون ۱۲

۱-۷-۱-۳: توربین بادی سرعت متغیر با ژنراتور القایی از دو سو تغذیه شده ۱۲

۱-۷-۱-٤: توربین بادی سرعت متغیر با ژنراتور سنکرون با تعداد قطب بیشتر ۱۳

۱-۸: ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم (PMSG) ۱۳

۱-۸-۱: انواع ژنراتورهای سنکرون مغناطیس دائم ۱٤

۱-۸-۱-۱: ژنراتورهای سنکرون مغناطیس دائم قطب صاف با مغناطیس‌های سطحی ۱٥

۱-۸-۱-۲: ژنراتورهای سنکرون مغناطیس دائم قطب برجسته با مغناطیس‌های داخلی ۱٥

۱-۸-۲: مدل دینامیکی ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم ۱٦

۱-۸-۳: کنترل ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم ۱۷

۱-۸-۳-۱: کنترل جریان محور d در صفر ۱۷

۱-۸-۳-۲: کنترل نسبت گشتاور به جریان ماکزیمم ۱۷

۱-۸-۳-۳: کنترل ضریب توان واحد ۱۸

۱-۹: سیستم‌های تبدیل انرژی باد براساس PMSG ۱۹

۱-۹-۱: سیستم تبدیل انرژی باد PMSG براساس مبدل پشت به پشت ۲۰

۱-۹-۱-۱: سیستم تبدیل انرژی باد براساس ژنراتور مغناطیس دائم قطب صاف با روش کنترلی ZDC و کنترل گشتاور بهینه..... ۲۰
۱-۹-۱-۲: سیستم تبدیل انرژی باد براساس ژنراتور مغناطیس دائم قطب برجسته با روش کنترلی MTPA و کنترل فیدبک سرعت روتور..... ۲۲
۱-۹-۲: سیستم تبدیل انرژی باد PMSG براساس مبدل dc-dc میانی..... ۲٤
۱-۱۰: نمونه‌هایی از ایده‌های ارائه شده برای توربین بادی PMSG..... ۲٤

فصل دوم: مواد و روش‌ها..... ۲۷

۲-۱: مقدمه..... ۲۸
۲-۲: اینورتر منبع ولتاژ..... ۲۸
۲-۲-۱: اینورتر منبع ولتاژ با دو منبع dc جداگانه..... ۲۸
۲-۲-۱-۱: روش سویچ‌زنی PWM برای اینورتر منبع ولتاژ با دو منبع dc جداگانه..... ۲۹
۲-۲-۱-۲: روش سویچ‌زنی SVM برای اینورتر منبع ولتاژ با دو منبع dc جداگانه..... ۲۹
۲-۲-۲: اینورتر منبع ولتاژ چندسطحه..... ۳۱
۲-۲-۲-۱: ساختارهای اینورتر منبع ولتاژ چندسطحه..... ۳۲
۲-۲-۲-۱-۱: اینورتر منبع ولتاژ چندسطحه با ساختار Cascaded H-Bridge..... ۳۲
۲-۲-۲-۱-۲: اینورتر منبع ولتاژ چندسطحه با ساختار جدید..... ۳۲
۲-۲-۲-۲: روش‌های سویچ‌زنی اینورتر منبع ولتاژ چندسطحه..... ۳۳
۲-۲-۲-۲-۱: روش سویچ‌زنی SVM برای اینورتر منبع ولتاژ چندسطحه..... ۳۳
۲-۲-۲-۲-۲: روش سویچ‌زنی SVC برای اینورتر منبع ولتاژ چندسطحه..... ۳٤
۲-۳: اینورتر منبع امپدانس..... ۳۵
۲-۳-۱: اینورتر منبع امپدانس با دو منبع dc جداگانه..... ۳۸
۲-۳-۲: اینورتر منبع امپدانس چندسطحه با ساختار Cascaded H-Bridge..... ۳۹
۲-٤: سیستم تبدیل انرژی باد PMSG براساس مبدل dc-dc با استفاده از الگوریتم جدید MPPT..... ٤۰
۲-٤-۱: سیستم تبدیل انرژی باد PMSG با استفاده از چاپر افزایند..... ٤۰
۲-٤-۲: سیستم تبدیل انرژی باد PMSG با استفاده از شبکه‌ی امپدانسی..... ٤۲

فصل سوم: روش‌ها و ساختارهای ارائه شده..... ٤٤

۳-۱: مقدمه..... ٤۵
۳-۲: سیستم تبدیل انرژی باد PMSG با استفاده از چاپر افزاینده..... ٤۵
۳-۲-۱: سیستم تبدیل انرژی باد PMSG با استفاده از اینورتر منبع ولتاژ تمام پل..... ٤۵

۳-۲-۱-۱: استفاده از کنترلر PI برای تثبیت ولتاژ لینک خازنی..... ٤٦
۳-۲-۱-۲: استفاده از الگوریتم محاسباتی برای تثبیت ولتاژ لینک خازنی..... ٤٧
۳-۲-۲: سیستم تبدیل انرژی باد PMSG با استفاده از اینورتر منبع ولتاژ با دو منبع dc جداگانه..... ٥٠
۳-۲-۳: سیستم تبدیل انرژی باد PMSG با استفاده از اینورتر منبع ولتاژ چندسطحه..... ٥٢
۳-۳: سیستم تبدیل انرژی باد PMSG با استفاده از شبکه‌ی امپدانسی..... ٥٣
۳-۳-۱: سیستم تبدیل انرژی باد PMSG با استفاده از اینورتر منبع امپدانس تمام پل..... ٥٣
۳-۳-۱-۱: استفاده از کنترلر PI برای تثبیت ولتاژ خازن شبکه‌ی امپدانسی..... ٥٣
۳-۳-۱-۲: استفاده از الگوریتم محاسباتی برای تثبیت ولتاژ خازن شبکه‌ی امپدانسی..... ٥٣
۳-۳-۲: سیستم تبدیل انرژی باد PMSG با استفاده از اینورتر منبع امپدانس با دو منبع dc جداگانه..... ٥٦
۳-۳-۳: سیستم تبدیل انرژی باد PMSG با استفاده از اینورتر منبع امپدانس چندسطحه..... ٥٨
۳-۳-۳-۱: روش سویچ‌زنی SVPWM برای اینورتر منبع امپدانس چندسطحه با ساختار Cascaded H-Bridge..... ٥٩
۳-۳-۳-۲: روش سویچ‌زنی SVC برای اینورتر منبع امپـــدانس چندسطحه با ساختار Cascaded H-Bridge..... ٦٠
۳-۳-۳-۲-۱: اعمال Shoot-Through در روش SVC با استفاده از کنترلر PI..... ٦٠
۳-۳-۳-۲-۲: اعمال Shoot-Through در روشSVC با استفاده از محاسبه‌ی محدوده‌ی زاویه‌ای..... ٦١

فصل چهارم: نتایج و بحث..... ٦٢

٤-۱: مقدمه..... ٦٣
٤-۲: توربین بادی و استحصال حداکثر توان..... ٦٣
٤-۳: سیستم تبدیل انرژی باد PMSG با استفاده از چاپر افزاینده..... ٦٥
٤-۳-۱: سیستم تبدیل انرژی باد PMSG با استفاده از اینورتر منبع ولتاژ تمام پل..... ٦٥
٤-۳-۱-۱: استفاده از کنترلر PI برای تثبیت ولتاژ لینک خازنی..... ٦٦
٤-۳-۱-۲: استفاده از الگوریتم محاسباتی برای تثبیت ولتاژ لینک خازنی..... ٦٩
٤-۳-۲: عملکرد اینورتر منبع ولتاژ با دو منبع dc جداگانه در سیستم تبدیل انرژی باد PMSG..... ٧٢
٤-۳-۲-۱: اینورتر منبع ولتاژ با دو منبع dc جداگانه با روش سویچ‌زنی PWM..... ٧٣
٤-۳-۲-۱-۱: اینورتر منبع ولتاژ با دو منبع dc جداگانه با روش سویچ‌زنی PWM با فرض تعادل ولتاژ لینک‌های خازنی..... ٧٣
٤-۳-۲-۱-۲: اینورتر منبع ولتاژ با دو منبع dc جداگانه با روش سویچ‌زنی PWM با فرض عدم تعادل ولتاژ لینک‌های خازنی..... ٧٤

٤-٣-٢-١-٣: اینورتر منبع ولتاژ با دو منبع dc جداگانه با روش سویچ‌زنی PWM
در صورت استفاده از پایدارساز چاپری برای متعادل‌سازی ولتاژ لینک‌های خازنی.....٧٦
٤-٣-٢-٢: اینورتر منبع ولتاژ با دو منبع dc جداگانه با روش سویچ‌زنی SVM.....٧٩
٤-٣-٢-٢-١: اینورتر منبع ولتاژ با دو منبع dc جداگانه با روش سویچ‌زنی SVM
با فرض تعادل ولتاژ لینک‌های خازنی.....٧٩
٤-٣-٢-٢-٢: اینورتر منبع ولتاژ با دو منبع dc جداگانه با روش سویچ‌زنی SVM
با فرض عدم تعادل ولتاژ لینک‌های خازنی.....٨١
٤-٣-٢-٢-٣: اینورتر منبع ولتاژ با دو منبع dc جداگانه با روش سویچ‌زنی SVM
در صورت استفاده از پایدارساز چاپری برای متعادل‌سازی ولتاژ لینک‌های خازنی.....٨٣
٤-٣-٣: عملکرد اینورتر منبع ولتاژ چندسطحه در سیستم تبدیل انرژی باد PMSG.....٨٦
٤-٣-٣-١: اینورتر منبع ولتاژ ٥ سطحه با ساختار Cascaded H-Bridge.....٨٦
٤-٣-٣-١-١: اینورتر منبع ولتاژ ٥ سطحه‌ی Cascaded H-Bridge با روش
سویچ‌زنی SVM.....٨٦
٤-٣-٣-١-٢: اینورتر منبع ولتاژ ٥ سطحه‌ی Cascaded H-Bridge با روش
سویچ‌زنی SVC.....٨٧
٤-٣-٣-٢: اینورتر منبع ولتاژ ٥ سطحه با ساختار جدید.....٨٨
٤-٣-٣-٢-١: اینورتر منبع ولتاژ ٥ سطحه با ساختار جدید با روش سویچ‌زنی
SVM.....٨٨
٤-٣-٣-٢-٢: اینورتر منبع ولتاژ ٥ سطحه با ساختار جدید با روش سویچ‌زنی
SVC.....٨٩
٤-٤: سیستم تبدیل انرژی باد PMSG با استفاده از شبکه‌ی امپدانسی.....٩٠
٤-٤-١: سیستم تبدیل انرژی باد PMSG با استفاده از اینورتر منبع امپدانس تمام پل.....٩١
٤-٤-١-١: استفاده از کنترلر PI برای تثبیت ولتاژ لینک خازنی.....٩١
٤-٣-١-٢: استفاده از الگوریتم محاسباتی برای تثبیت ولتاژ لینک خازنی.....٩٥
٤-٤-٢: عملکرد اینورتر منبع امپدانس با دو منبع dc جداگانه در سیستم تبدیل انرژی
باد PMSG.....٩٨
٤-٤-٢-١: اینورتر منبع امپدانس با دو منبع dc جداگانه با روش سویچ‌زنی PWM.....٩٩
٤-٤-٢-٢: اینورتر منبع امپدانس با دو منبع dc جداگانه با روش سویچ‌زنی SVM.....١٠٠
٤-٤-٣: عملکرد اینورتر منبع امپدانس چندسطحه در سیستم تبدیل انرژی باد PMSG.....١٠٢
٤-٤-٣-١: اینورتر منبع امپدانس ٥ سطحه با روش سویچ‌زنی SVPWM.....١٠٢
٤-٤-٣-٢: اینورتر منبع امپدانس ٥ سطحه با روش سویچ‌زنی SVC.....١٠٤

فصل پنجم: جمع‌بندی و پیشنهادات.....۱۰۶
٤-۱: جمع‌بندی.....۱۰۷
٤-۲: پیشنهادات.....۱۰۹

اختصارات.....۱۱۱

مراجع.....۱۱۳

فهرست شکل‌ها

شکل صفحه

فصل اول

شکل (۱-۱) منحنی توان خروجی بر حسب سرعت روتور.....۹
شکل (۱-۲) نمونه‌هایی از توربین‌های بادی محور افقی.....۹
شکل (۱-۳) نمونه‌هایی از توربین‌های بادی محور عمودی.....۱۰
شکل (۱-٤) توربین بادی سرعت ثابت با ژنراتور القایی.....۱۲
شکل (۱-٥) توربین بادی سرعت متغیر با ژنراتور القایی قفس سنجابی یا ژنراتور سنکرون.....۱۲
شکل (۱-٦) توربین بادی سرعت متغیر با ژنراتور القایی از دو سو تغذیه شده.....۱۳
شکل (۱-۷) توربین بادی سرعت متغیر با ژنراتور سنکرون با تعداد قطب بیشتر.....۱۳
شکل (۱-۸) ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم قطب صاف با مغناطیس‌های سطحی
(ساختار ۱٦ قطبه).....۱٥
شکل (۱-۹) ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم قطب برجسته با مغناطیس‌های داخلی
(ساختار ٤ قطبه).....۱٦
شکل (۱-۱۰) مدل محور d-q برای PMSG در قاب مرجع سنکرون با میدان روتور.....۱٦
شکل (۱-۱۱) بلوک دیاگرام سیستم تبدیل انرژی باد براساس ژنراتور مغناطیس دائم
قطب صاف با روش کنترلی ZDC و کنترل گشتاور بهینه.....۲۱
شکل (۱-۱۲) بلوک دیاگرام سیستم تبدیل انرژی باد براساس ژنراتور مغناطیس دائم
قطب برجسته با روش کنترلی MTPA و کنترل فیدبک سرعت روتور.....۲۳
شکل (۱-۱۳) بلوک دیاگرام کنترل‌کننده سرعت روتور.....۲۳

شکل (۱-۱٤)بلوک دیاگرام سیستم تبدیل انرژی باد PMSG براساس مبدل dc-dc میانی.....۲٤

فصل دوم

شکل (۲-۱) ساختار مداری اینورتر منبع ولتاژ با دو منبع dc جداگانه.....۲۹
شکل (۲-۲) دیاگرام بردار فضایی دو پل اینورتر در ساختار اینورتر منبع ولتاژ
با دو منبع dc جداگانه.....۳۰
شکل (۲-۳) بردارهای فضایی اینورتر منبع ولتاژ با دو منبع dc جداگانه.....۳۰
شکل (۲-٤) بردارهای فضایی محدود شده‌ی اینورتر منبع ولتاژ با دو منبع dc جداگانه
برای حذف ولتاژ وجه مشترک.....۳۱
شکل (۲-۵) نمای ۵سطحه‌ی تکفاز ساختار Cascaded H-Bridge.....۳۲
شکل (۲-٦) نمای ۵سطحه‌ی تکفاز ساختار جدید.....۳۳
شکل (۲-۷) بردارهای فضایی برای اینورتر ۵سطحه.....۳٤
شکل (۲-۸) شکل بزرگنمایی شده‌ی بردار مرجع برای انتخاب بردار ولتاژ مناسب.....۳۵
شکل (۲-۹) ساختار اینورتر Z-Source.....۳٦
شکل (۲-۱۰) مدار معادل Z-Source در حالت Shoot-Through.....۳٦
شکل (۲-۱۱) مدار معادل Z-Source در حالت Non Shoot-Through ۳٦
شکل (۲-۱۲) الگوریتم کنترلی PWM اصلاح شده همراه با حالت Shoot-Through.....۳۷
شکل (۲-۱۳) ساختار مداری اینورتر منبع امپدانس با دو منبع dc جداگانه.....۳۸
شکل (۲-۱٤) ساختار اینورتر منبع امپدانس با ساختار Cascaded H-Bridge.....۳۹
شکل (۲-۱۵) بلوک دیاگرام کنترلی سیستم تبدیل انرژی باد PMSG با استفاده از چاپر افزاینده.....٤۰
شکل (۲-۱٦) بلوک دیاگرام کنترلی سیستم تبدیل انرژی باد PMSG با استفاده از اینورتر
منبع امپدانس تمام پل.....٤۲
شکل (۲-۱۷) روش سویچ‌زنی PWM برای اینورتر Z-Source.....٤۳

فصل سوم

شکل (۳-۱) بلوک دیاگرام کنترلی سیستم تبدیل انرژی باد PMSG با استفاده از اینورتر منبع ولتاژ
تمام پل.....٤٦
شکل (۳-۲) بلوک دیاگرام کنترلی سیستم تبدیل انرژی باد PMSG با استفاده از اینورتر منبع ولتاژ
با دو منبع dc جداگانه.....۵۰
شکل (۳-۳) ساختار مداری پایدارساز چاپری.....۵۱
شکل (۳-٤) کنترل پایدارساز چاپری با در نظر گرفتن یک باند هیسترزیس برای ولتاژ خازن.....۵۲

شکل (۳-۵) بلوک دیاگرام کنترلی سیستم تبدیل انرژی باد PMSG با استفاده از اینورتر منبع ولتاژ چندسطحه..... ۵۲
شکل (۳-٦) بلوک دیاگرام کنترلی سیستم تبدیل انرژی باد PMSG با استفاده از اینورتر منبع امپدانس تمام پل..... ۵٤
شکل (۳-۷) بلوک دیاگرام کنترلی سیستم تبدیل انرژی باد PMSG با استفاده از اینورتر منبع امپدانس با دو منبع dc جداگانه..... ۵۷
شکل (۳-۸) بلوک دیاگرام کنترلی سیستم تبدیل انرژی باد PMSG با استفاده از اینورتر منبع امپدانس چندسطحه..... ۵۸
شکل (۳-۹) امواج مرجع و حامل برای اعمال حالت Shoot-Through در سویچ‌زنی اینورتر..... ۵۹
شکل (۳-۱۰) بلوک دیاگرام کنترل محدوده‌ی زاویه‌ای اعمال Shoot-Through..... ٦۱

فصل چهارم

شکل (٤-۱) منحنی مشخصه‌ی توربین بادی..... ٦٤
شکل (٤-۲) تغییرات V_{DC} برحسب سرعت بهینه‌ی روتور و تقریب غیرخطی آن..... ٦٤
٤-۳:
شکل (٤-۳) منحنی تغییرات سرعت باد..... ٦۵
٤-۳-۱-۱:
شکل (٤-٤) ولتاژ لینک خازنی..... ٦٦
شکل (٤-۵) توان راکتیو تزریقی به شبکه..... ٦٦
شکل (٤-٦) توان مکانیکی ژنراتور..... ٦۷
شکل (٤-۷) توان مکانیکی و توان اکتیو تزریقی به شبکه..... ٦۷
شکل (٤-۸) توان اکتیو تزریقی به شبکه..... ٦۷
شکل (٤-۹) جریان شبکه..... ٦۷
شکل (٤-۱۰) شکل موج بزرگنمایی شده‌ی جریان شبکه..... ٦۸
شکل (٤-۱۱) طیف هارمونیکی جریان شبکه..... ٦۸
شکل (٤-۱۲) جریان سلف چاپر افزاینده..... ٦۸
شکل (٤-۱۳) شکل موج بزرگنمایی شده‌ی جریان سلف چاپر افزاینده..... ٦۸
شکل (٤-۱٤) ولتاژ و جریان استاتور ژنراتور..... ٦۹
٤-۳-۱-۲:
شکل (٤-۱۵) ولتاژ لینک خازنی..... ٦۹
شکل (٤-۱٦) توان راکتیو تزریقی به شبکه..... ٦۹
شکل (٤-۱۷) توان مکانیکی ژنراتور..... ۷۰

شکل (٤-١٨) توان مکانیکی و توان اکتیو تزریقی به شبکه..... ٧٠
شکل (٤-١٩) توان اکتیو تزریقی به شبکه..... ٧٠
شکل (٤-٢٠) جریان شبکه..... ٧١
شکل (٤-٢١) شکل موج بزرگنمایی شده‌ی جریان شبکه..... ٧١
شکل (٤-٢٢) طیف هارمونیکی جریان شبکه..... ٧١
شکل (٤-٢٣) جریان سلف چاپر افزاینده..... ٧٢
شکل (٤-٢٤) شکل موج بزرگنمایی شده‌ی جریان سلف چاپر افزاینده..... ٧٢
شکل (٤-٢٥) ولتاژ و جریان استاتور ژنراتور..... ٧٢
٤-٣-٢-١-١:
شکل (٤-٢٦) ولتاژ خازن C_1..... ٧٣
شکل (٤-٢٧) ولتاژ خازن C_2..... ٧٣
شکل (٤-٢٨) ولتاژ خط خروجی اینورتر فوقانی..... ٧٣
شکل (٤-٢٩) ولتاژ خط خروجی اینورتر تحتانی..... ٧٤
شکل (٤-٣٠) ولتاژ فاز خروجی اینورتر..... ٧٤
شکل (٤-٣١) ولتاژ خط خروجی اینورتر..... ٧٤
شکل (٤-٣٢) جریان شبکه..... ٧٤
٤-٣-٢-١-٢:
شکل (٤-٣٣) ولتاژ خازن C_1..... ٧٥
شکل (٤-٣٤) ولتاژ خازن C_2..... ٧٥
شکل (٤-٣٥) ولتاژ خط خروجی اینورتر فوقانی..... ٧٥
شکل (٤-٣٦) ولتاژ خط خروجی اینورتر تحتانی..... ٧٥
شکل (٤-٣٧) ولتاژ فاز خروجی اینورتر..... ٧٦
شکل (٤-٣٨) ولتاژ خط خروجی اینورتر..... ٧٦
شکل (٤-٣٩) جریان شبکه..... ٧٦
٤-٣-٢-١-٣:
شکل (٤-٤٠) ولتاژ خازن C_1..... ٧٧
شکل (٤-٤١) ولتاژ خازن C_2..... ٧٧
شکل (٤-٤٢) شکل موج بزرگنمایی شده‌ی ولتاژ خازن C_1..... ٧٧
شکل (٤-٤٣) شکل موج بزرگنمایی شده‌ی ولتاژ خازن C_2..... ٧٧
شکل (٤-٤٤) ولتاژ خط خروجی اینورتر فوقانی..... ٧٨
شکل (٤-٤٥) ولتاژ خ خروجی اینورتر تحتانی..... ٧٨
شکل (٤-٤٦) ولتاژ فاز خروجی اینورتر..... ٧٨

شکل (٤-٤٧) ولتاژ خط خروجی اینورتر..... ٧٨
شکل (٤-٤٨) جریان شبکه..... ٧٩
٤-٣-٢-٢-١:
شکل (٤-٤٩) ولتاژ خازن C_1..... ٧٩
شکل (٤-٥٠) ولتاژ خازن C_2..... ٧٩
شکل (٤-٥١) ولتاژ خط خروجی اینورتر فوقانی..... ٨٠
شکل (٤-٥٢) ولتاژ خط خروجی اینورتر تحتانی..... ٨٠
شکل (٤-٥٣) ولتاژ فاز خروجی اینورتر..... ٨٠
شکل (٤-٥٤) ولتاژ خط خروجی اینورتر..... ٨٠
شکل (٤-٥٥) جریان شبکه..... ٨١
شکل (٤-٥٦) ولتاژ وجه مشترک..... ٨١
٤-٣-٢-٢-٢:
شکل (٤-٥٧) ولتاژ خازن C_1..... ٨١
شکل (٤-٥٨) ولتاژ خازن C_2..... ٨٢
شکل (٤-٥٩) ولتاژ خط خروجی اینورتر فوقانی..... ٨٢
شکل (٤-٦٠) ولتاژ خط خروجی اینورتر تحتانی..... ٨٢
شکل (٤-٦١) ولتاژ فاز خروجی اینورتر..... ٨٢
شکل (٤-٦٢) ولتاژ خط خروجی اینورتر..... ٨٣
شکل (٤-٦٣) جریان شبکه..... ٨٣
شکل (٤-٦٤) ولتاژ وجه مشترک..... ٨٣
٤-٣-٢-٢-٣:
شکل (٤-٦٥) ولتاژ خازن C_1..... ٨٤
شکل (٤-٦٦) ولتاژ خازن C_2..... ٨٤
شکل (٤-٦٧) شکل موج بزرگنمایی شده‌ی ولتاژ خازن C_1..... ٨٤
شکل (٤-٦٨) شکل موج بزرگنمایی شده‌ی ولتاژ خازن C_2..... ٨٤
شکل (٤-٦٩) ولتاژ خط خروجی اینورتر فوقانی..... ٨٥
شکل (٤-٧٠) ولتاژ خط خروجی اینورتر تحتانی..... ٨٥
شکل (٤-٧١) ولتاژ فاز خروجی اینورتر..... ٨٥
شکل (٤-٧٢) ولتاژ خط خروجی اینورتر..... ٨٥
شکل (٤-٧٣) جریان شبکه..... ٨٥
شکل (٤-٧٤) ولتاژ وجه مشترک..... ٨٦

٤-٣-٣:
شکل (٤-٧٥) ولتاژ لینک‌های خازنی.....٨٦
٤-٣-٣-١-١:
شکل (٤-٧٦) ولتاژ فاز خروجی اینورتر.....٨٧
شکل (٤-٧٧) ولتاژ خط خروجی اینورتر.....٨٧
شکل (٤-٧٨) جریان شبکه.....٨٧
٤-٣-٣-١-٢:
شکل (٤-٧٩) ولتاژ فاز خروجی اینورتر.....٨٨
شکل (٤-٨٠) ولتاژ خط خروجی اینورتر.....٨٨
شکل (٤-٨١) جریان شبکه.....٨٨
٤-٣-٣-٢-١:
شکل (٤-٨٢) ولتاژ فاز خروجی اینورتر.....٨٩
شکل (٤-٨٣) ولتاژ خط خروجی اینورتر.....٨٩
شکل (٤-٨٤) جریان شبکه.....٨٩
٤-٣-٣-٢-٢:
شکل (٤-٨٥) ولتاژ فاز خروجی اینورتر.....٩٠
شکل (٤-٨٦) ولتاژ خط خروجی اینورتر.....٩٠
شکل (٤-٨٧) جریان شبکه.....٩٠
٤-٤-١:
شکل (٤-٨٨) منحنی تغییرات سرعت باد.....٩١
٤-٤-١-١:
شکل (٤-٨٩) ولتاژ لینک خازنی.....٩٢
شکل (٤-٩٠) توان راکتیو تزریقی به شبکه.....٩٢
شکل (٤-٩١) توان مکانیکی ژنراتور.....٩٢
شکل (٤-٩٢) توان مکانیکی و توان اکتیو تزریقی به شبکه.....٩٣
شکل (٤-٩٣) توان اکتیو تزریقی به شبکه.....٩٣
شکل (٤-٩٤) جریان شبکه.....٩٣
شکل (٤-٩٥) شکل موج بزرگنمایی شده‌ی جریان شبکه.....٩٣
شکل (٤-٩٦) طیف هارمونیکی جریان شبکه.....٩٤
شکل (٤-٩٧) جریان سلف شبکه‌ی امپدانسی.....٩٤
شکل (٤-٩٨) شکل موج بزرگنمایی شده‌ی جریان سلف شبکه‌ی امپدانسی.....٩٤
شکل (٤-٩٩) ولتاژ و جریان استاتور ژنراتور.....٩٥

٤-٣-١-٢:
شکل (٤-١٠٠) ولتاژ لینک خازنی..... ٩٥
شکل (٤-١٠١) توان راکتیو تزریقی به شبکه..... ٩٥
شکل (٤-١٠٢) توان مکانیکی ژنراتور..... ٩٦
شکل (٤-١٠٣) توان مکانیکی و توان اکتیو تزریقی به شبکه..... ٩٦
شکل (٤-١٠٤) توان اکتیو تزریقی به شبکه..... ٩٧
شکل (٤-١٠٥) جریان شبکه..... ٩٧
شکل (٤-١٠٦) شکل موج بزرگنمایی شده‌ی جریان شبکه..... ٩٧
شکل (٤-١٠٧) طیف هارمونیکی جریان شبکه..... ٩٧
شکل (٤-١٠٨) جریان سلف شبکه‌ی امپدانسی..... ٩٨
شکل (٤-١٠٩) شکل موج بزرگنمایی شده‌ی جریان سلف شبکه‌ی امپدانسی..... ٩٨
شکل (٤-١١٠) ولتاژ و جریان استاتور ژنراتور..... ٩٨
٤-٤-٢:
شکل (٤-١١١) ولتاژ V_{DC}..... ٩٩
٤-٤-٢-١:
شکل (٤-١١٢) ولتاژ خروجی شبکه‌ی امپدانسی..... ٩٩
شکل (٤-١١٣) ولتاژ فاز خروجی اینورتر..... ١٠٠
شکل (٤-١١٤) ولتاژ خط خروجی اینورتر..... ١٠٠
شکل (٤-١١٥) جریان شبکه..... ١٠٠
٤-٤-٢-٢:
شکل (٤-١١٦) ولتاژ خروجی شبکه‌ی امپدانسی..... ١٠٠
شکل (٤-١١٧) ولتاژ فاز خروجی اینورتر..... ١٠١
شکل (٤-١١٨) ولتاژ خط خروجی اینورتر..... ١٠١
شکل (٤-١١٩) جریان شبکه..... ١٠١
شکل (٤-١٢٠) ولتاژ وجه مشترک..... ١٠٢
٤-٤-٣:
شکل (٤-١٢١) ولتاژ V_{DC}..... ١٠٢
٤-٤-٣-١:
شکل (٤-١٢٢) ولتاژ خروجی شبکه‌ی امپدانسی..... ١٠٣
شکل (٤-١٢٣) ولتاژ فاز خروجی اینورتر..... ١٠٣
شکل (٤-١٢٤) ولتاژ خط خروجی اینورتر..... ١٠٣
شکل (٤-١٢٥) جریان شبکه..... ١٠٣

٤-٤-٣-٢:
شکل (٤-١٢٦) ولتاژ خروجی شبکه‌ی امپدانسی..... ١٠٤
شکل (٤-١٢٧) ولتاژ فاز خروجی اینورتر..... ١٠٤
شکل (٤-١٢٨) ولتاژ خط خروجی اینورتر..... ١٠٤
شکل (٤-١٢٩) جریان شبکه..... ١٠٥

فهرست جداول

جدول صفحه

فصل چهارم

جدول (٤-١) پارامترهای ژنراتور سنکرون..... ٦٤
٤-٣:
جدول (٤-٢) پارامترهای چاپر افزاینده..... ٦٥
٤-٣-١:
جدول (٤-٣) پارامترهای خط انتقال..... ٦٥
٤-٣-٢:
جدول (٤-٤) پارامترهای خط انتقال..... ٧٢
٤-٣-٣:
جدول (٤-٥) پارامترهای خط انتقال..... ٨٦
٤-٤:
جدول (٤-٦) پارامترهای شبکه‌ی امپدانسی..... ٩١
٤-٤-١:
جدول (٤-٧) پارامترهای خط انتقال..... ٩١
٤-٤-٢:
جدول (٤-٨) پارامترهای خط انتقال..... ٩٩
٤-٤-٣:
جدول (٤-٩) پارامترهای خط انتقال..... ١٠٢

مقدمه

امروزه سهم انرژی الکتریکی در زندگی روزمره رو به افزایش می‌باشد؛ به طوریکه تقاضا برای مصرف انرژی الکتریکی با رشد قابل ملاحظه‌ای همراه شده است؛ که این امر به نوبه‌ی خود باعث تخلیه‌ی منابع سوخت فسیلی گردیده است [۱]. از اینرو منابع تجدیدپذیر[1] به علت ماهیت پاک و رایگان آن، بسیار مورد توجه واقع شده‌اند.

به طور کلی انرژی‌های تجدیدپذیر، که با نام انرژی‌های نو نیز شناخته می‌شوند، شامل انرژی‌های گرمایش خورشیدی، فتوولتائیک، زیست انرژی، برقابی، جزر و مدی، بادی و زمین‌گرمایی است [۲]. در این میان انرژی باد[2] با توجه به ویژگی پیوستگی و دسترسی آسان، بستر توجهات فراوان گردیده است [۳]. پژوهش و کاربرد این نوع انرژی در ایران از سال ۱۳٥٤ آغاز شده است و در حال حاضر در منجیل و بینالود، به ترتیب با ۳۰ و ۱٥۰ مگاوات تولید الکتریسیته به شبکه سراسری، در حال توسعه تا چشم انداز ۲۰۰۰ مگاوات در آینده می‌باشد [۲].

ژنراتورهای سنکرون در سیستم‌های تبدیل انرژی باد سرعت متغیر، بسیار مورد توجه قرار می‌گیرند. این ژنراتورها شامل ژنراتورهای مغناطیس دائم و ژنراتورهای روتور سیم‌پیچی شده، با رنج توانی چند کیلو وات تا چند مگاوات می‌باشند؛ که قابلیت ساخت با تعداد قطب‌های بالا و اتصال مستقیم به توربین را دارا هستند [٤]، [٥]. این امر موجبات کاهش هزینه‌های نصب و نگهداری را فراهم می‌نماید. کنترل این

[1] Renewable Sources
[2] Wind Energy