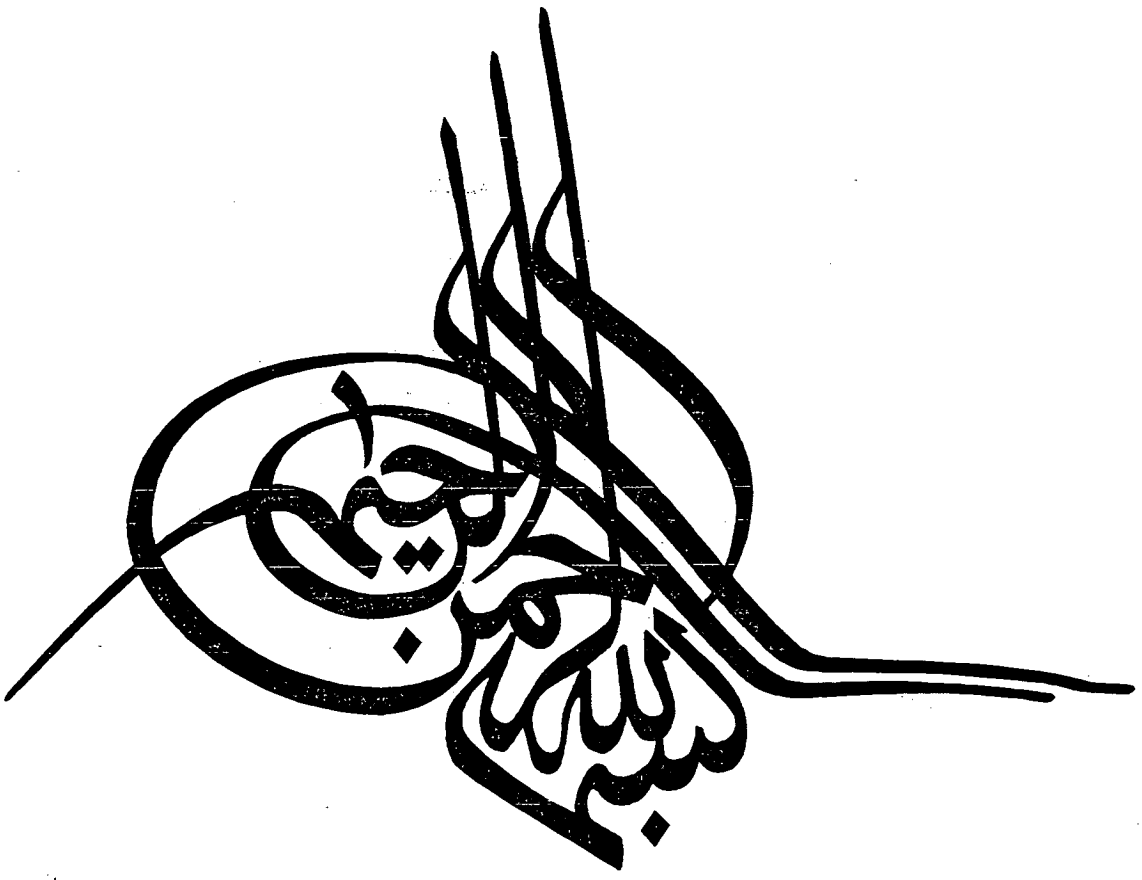

١٤٣١٢٦-٢٠١٣٣٩١

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

گروه قدرت

پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی‌ارشد در رشته مهندسی برق قدرت

عنوان

اتصال توربین بادی PMSG به شبکه با استفاده از مبدل منبع امپدانسی

اساتید راهنما

دکتر محمدرضا فیضی

دکتر محمدباقر بناءشریفیان

۱۳۸۹/۷/۱۷

پژوهشگر

مجید کلانتری

بهمن ۱۳۸۸

۱۴۳۱۲۶

نام‌خانوادگی دانشجو: کلانتری نام: مجید

عنوان پایان‌نامه: اتصال توربین بادی PMSG به شبکه با استفاده از مبدل منبع امپدانسی

اساتید راهنما: ۱- دکتر محمدرضا فیضی

۲- دکتر محمدباقر بناءشریفیان

مقطع تحصیلی: کارشناسی‌ارشد رشته: برق قدرت گرایش: درایو ماشین دانشگاه: تبریز

دانشکده: مهندسی برق و کامپیوتر تاریخ فارغ‌التحصیلی: ۸۸/۱۱/۲۷ تعداد صفحه:۱۴۸

کلید واژه‌ها: سیستم‌های تبدیل انرژی بادی (WECS)، مبدل منبع ولتاژ، مبدل منبع امپدانسی (ZSI)، مبدل DC به DC افزاینده، ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم(PMSG) ،کنترل حداکثر توان توربین بادی، مبدل‌های پشت به پشت

چکیده

همزمان با گسترش استفاده از انرژی باد فن‌آوریهای متفاوتی نیز برای توربین‌های بادی توسعه یافته‌است. در سالهای گذشته باتوجه به مزیت‌های ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم (PMSG) از جمله بازدهی بالا و امکان حذف گیربکس از این نوع ژنراتورها در توربین‌های بادی استفاده شده‌است. توربین‌های بادی سرعت متغیر باتوجه به مزایایی ازقبیل امکان کنترل حداکثر توان توربین بادی، افزایش کیفیت توان تزریقی به شبکه و کنترل توان راکتیو بسیار موردتوجه قرار گرفته‌اند. در سیستم‌های بادی سرعت متغیر ژنراتور توسط ادوات الکترونیک قدرت کنترل و به شبکه متصل می‌شود. مبدل منبع ولتاژ یکی از ادوات مورد استفاده در سیستم‌های توربین بادی سرعت متغیر است. این مبدل دارای مشکلاتی نظیر محدودیت رنج عملکرد و حساسیت به نویزهای الکترومغناطیسی (EMI) است و تنها به‌صورت کاهنده عمل می‌کند. لذا برای کاربردهایی که نیاز به افزایندگی داشته‌باشد نیاز به تبدیل دو مرحله‌ای با استفاده از مبدل افزاینده DC است. اخیرا مبدل منبع امپدانسی به‌عنوان جایگزینی مناسب برای مبدل‌های منبع ولتاژ پیشنهاد شده‌است. این مبدل با یک تبدیل تک مرحله‌ای توانایی عملکرد به صورت کاهندگی و افزایندگی را دارد.

در این پژوهش توربین بادی سرعت متغیر با استفاده از ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم مدنظر است که با استفاده از مبدل منبع امپدانسی کنترل و به شبکه متصل می‌شود. مبدل منبع امپدانسی دارای دو درجه آزادی برای کنترل است که با استفاده از آنها امکان کنترل حداکثر توان توربین بادی و

ادامه چکیده

انتقال توان تولیدی به شبکه فراهم می‌شود. در ضمن سایر سیستم‌های توربین بادی براساس PMSG نیز مطالعه و با سیستم ارائه‌شده براساس مبدل منبع امپدانسی مقایسه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که سیستم ارائه‌شده براساس مبدل منبع امپدانسی نسبت به سایر سیستم‌های موجود از لحاظ حفظ کیفیت توان شبکه عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد و از لحاظ راندمان عملکرد قابل قبولی دارد. این سیستم‌ها از لحاظ TSDPR که ملاکی از هزینه نیمه‌هادی‌ها است مقایسه شده‌اند و نتایج حاصله نشان می‌دهد که سیستم ارائه‌شده از لحاظ هزینه نیز توانایی رقابت با سایر سیستم‌های مشابه را دارا است.

در اینجا بر خود لازم می‌دانم از اساتید محترم گروه قدرت دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه تبریز جناب آقایان دکتر محمدرضا فیضی، دکتر محمدباقر بناء شریفیان، دکتر سیدحسین حسینی، مهندس قاسم اهرابیان، دکتر ابراهیم بابایی، دکتر قاسم علیزاده و دکتر مهران صباحی تشکر نمایم. همچنین از دوستان گرامی جناب آقایان مهندس یاسر محمدرضاپور و مهندس سامان ترابزاد کمال تشکر را دارم.

مجید کلانتری

تقدیم به

پدر و مادر

ستاره‌های همیشه درخشان آسمان زندگی و

اسطوره‌های همیشه جاویدان داستان زندگی‌ام

فهرست مطالب

فهرست جدول‌ها iv

فهرست اختصارات iv

فهرست شکل‌ها v

مقدمه ۱

فصل اول: بررسی منابع ۴

۱-۱- مقدمه ۵

۱-۲- منابع انرژی مرسوم ۵

۱-۳- منابع انرژی تجدیدپذیر ۶

۱-۴- انرژی باد به‌عنوان منبع توان تجدیدپذیر ۶

۱-۵- تاریخچه سیستم‌های تبدیل انرژی بادی ۷

۱-۶- سیستم‌های تبدیل انرژی بادی مرسوم ۹

۱-۶-۱- سیستم‌های توربین ژنراتور سرعت ثابت ۹

۱-۶-۲- سیستم‌های توربین ژنراتور با تغییرات سرعت محدود ۱۰

۱-۶-۳- سیستم‌های توربین ژنراتور سرعت متغیر با مبدل فرکانسی سایز کوچک ۱۱

۱-۶-۴- سیستم‌های توربین ژنراتور سرعت متغیر با مبدل‌های فرکانسی سایز کامل ۱۲

۱-۷- ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم در سیستم‌های تبدیل انرژی بادی ۱۳

۱-۸- سیستم‌های تبدیل انرژی بادی براساس PMSG ۱۵

۱-۸-۱ توربین بادی PMSG براساس مبدل‌های پشت به پشت ۱۵

۱-۸-۲- توربین بادی PMSG با یکسوساز سمت ژنراتور و مبدل سمت شبکه ۱۵

۱-۸-۳- توربین بادی PMSG براساس مبدل DC-DC میانی ۱۷

۱-۹- مشخصه توربین‌های بادی و کنترل حداکثر توان ۱۸

۱-۱۰- مبدل منبع امپدانسی و کاربرد آن در منابع تولید پراکنده ۱۹

۱-۱۱- اشاره به برخی از منابع و مراجع ۲۱

فصل دوم: مواد و روش‌ها ۲۳

۲-۱- مقدمه ۲۴

۲-۲- ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم ۲۴

۲-۳- مبدل متصل به شبکه ۲۸

۲-۳-۱- کنترلر تناسبی- انتگرالی در حوزه پیوسته در زمان ۳۱
۲-۳-۲- طراحی کنترلر در حوزه گسسته در زمان ۳۵
۲-۴- مدل توربین بادی و حداکثر توان آن ۳۹
۲-۵- مدل باد ۴۲
۲-۶- سیستم بادی PMSG براساس مبدل‌های پشت به پشت ۴۳
۲-۶-۱- کنترل مبدل سمت ژنراتور ۴۳
۲-۶-۲- کنترل حداکثر توان آیرودینامیکی توربین ۴۶
۲-۶-۳- کنترل مبدل سمت شبکه ۴۷
۲-۶-۴- مدل‌سازی و نتایج سیستم بادی PMSG براساس مبدل‌های پشت به پشت ۴۸
۲-۷- سیستم تبدیل انرژی بادی براساس مبدل DC میانی ۵۲
۲-۷-۱- یکسوساز کنترل نشده ۵۲
۲-۷-۲- کنترل حداکثر توان توربین بادی در سیستم‌های ژنراتور- یکسوساز ۵۵
۲-۷-۳- مبدل DC به DC افزاینده ۵۷
۲-۷-۴- سیستم کنترل مبدل بوست ۵۹
۲-۷-۵- شبیه‌سازی و نتایج سیستم بادی براساس مبدل DC افزاینده ۵۹
۲-۸- مبدل‌های منبع امپدانسی ۶۷
۲-۹- روش‌های کنترل مبدل منبع امپدانسی ۷۴
۲-۹-۱- روش کنترلی ساده ۷۴
۲-۹-۲ روش کنترلی حداکثر بوست ۷۶
۲-۹-۳- روش کنترل حداکثر بوست ثابت ۷۸
فصل سوم: نتایج و بحث ۸۰
۳-۱- مقدمه ۸۱
۳-۲- سیستم تبدیل انرژی بادی براساس مبدل منبع امپدانسی ۸۱
۳-۲-۱- ساختار سیستم ۸۱
۳-۲-۲- کنترل حداکثر توان آیرودینامیکی توربین باد ۸۲
۳-۲-۳- کنترل مبدل متصل به شبکه ۸۴
۳-۲-۳-۱- کنترل ولتاژ ورودی به مبدل V_i ۸۵
۳-۲-۳-۲- کنترل ولتاژ خازن شبکه امپدانسی V_C ۸۵
۳-۲-۴- شبیه‌سازی و نتایج سیستم بادی PMSG براساس مبدل منبع امپدانسی ۸۶
۳-۳- سیستم مبدل منبع امپدانسی تغذیه شونده از یکسوساز ورودی ۹۶

۳-۳-۱- بررسی عملکرد و مدارهای معادل ۹۶
۳-۳-۱-۱- مد کاری اکتیو ۹۸
۳-۳-۱-۲- مد کاری صفر ۹۸
۳-۳-۱-۳- مد کاری اتصال کوتاه ۹۹
۳-۳-۲- نحوه کنترل مبدل منبع امپدانسی با یکسوساز ورودی ۱۰۰
۳-۴- سیستم بادی براساس مبدل منبع امپدانسی با یکسوساز ورودی ۱۰۲
۳-۴-۱- سیستم کنترل حداکثر توان توربین بادی ۱۰۲
۳-۴-۲- سیستم کنترل مبدل منبع امپدانسی متصل به شبکه ۱۰۳
۳-۴-۳- شبیه‌سازی و نتایج ۱۰۴
۳-۵- بررسی مقایسه‌ای سیستم‌های بادی PMSG ۱۱۰
۳-۵-۱- اعوجاج هارمونیکی جریان تزریقی به شبکه ۱۱۰
۳-۵-۲- راندمان انرژی و تلفات در سیستم‌های بادی PMSG ۱۱۳
۳-۵-۳- مقدار توان تجهیزات سوئیچینگ ۱۱۶
۳-۵-۳-۱- TSDPR در مبدل منبع ولتاژ معمولی ۱۱۷
۳-۵-۳-۲- TSDPR در مبدل منبع ولتاژ با مبدل DC-DC افزاینده ۱۱۸
۳-۵-۳-۳- TSDPR در مبدل منبع امپدانسی ۱۱۹
۳-۵-۳-۴- محاسبه TSDPR در سیستم بادی براساس مبدل‌های پشت به پشت ۱۲۰
۳-۵-۳-۵- محاسبه TSDPR در سیستم تبدیل انرژی بادی براساس مبدل افزاینده میانی ۱۲۱
۳-۵-۳-۶- محاسبه TSDPR در سیستم بادی براساس مبدل منبع امپدانسی ۱۲۲
۳-۵-۳-۷- TSDPR در سیستم بادی براساس مبدل منبع امپدانسی با یکسوساز ورودی ۱۲۳
۳-۶- روش کنترل حداکثر توان پیشنهادی ۱۲۵
۳-۶-۱- نتایج شبیه‌سازی ۱۲۹
۳-۷- حداقل مقدار ممکن ولتاژ لینک DC در سیستم بادی PMSG ۱۳۲
۳-۸- محاسبه تلفات کلیدزنی در سیستم بادی PMSG ۱۳۶
۳-۸-۱- مدل IGBT ۱۳۷
۳-۸-۲- اندازه‌گیری تلفات قسمت الکترونیک قدرت در سیستم‌های بادی PMSG ۱۳۸
فصل چهارم: نتیجه گیری و پیشنهادات ۱۴۲
۴-۱- نتیجه‌گیری ۱۴۳
۴-۲- پیشنهادها ۱۴۴
فهرست مراجع ۱۴۵

فهرست جدول ها

جدول (۲-۱) مشخصات ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم ۲۷

جدول (۲-۲) پارامترهای سیستم در کنترل مبدل متصل به شبکه ۳۴

جدول (۲-۳) پارامترهای سیستم در کنترل مبدل متصل به شبکه با کنترلر Deadbeat ۳۸

جدول (۲-۴) پارامترهای سیستم بادی براساس مبدل بوست ۵۹

جدول(۲-۵) حالات کاری مبدل منبع ولتاژ ۶۸

جدول(۲-۶) حالت‌های کلیدزنی اتصال کوتاه شبکه امپدانسی ۶۹

جدول (۳-۱) پارامترهای شبکه امپدانسی ۸۶

جدول (۳-۲) حالت‌های ممکن برای هدایت دیودها و خازن‌ها ۹۷

جدول (۳-۳) THD جریان تزریقی به شبکه به‌ازای سه مقدار مختلف برای زمان تاخیری ۱۱۳

جدول (۳-۴) راندمان سیستم تبدیل انرژی بادی براساس مبدل‌های پشت به پشت ۱۱۴

جدول (۳-۵) راندمان سیستم تبدیل انرژی بادی براساس مبدل بوست میانی ۱۱۴

جدول (۳-۶) راندمان سیستم تبدیل انرژی بادی براساس مبدل منبع امپدانسی (۱) ۱۱۴

جدول (۳-۷) راندمان سیستم بادی براساس مبدل منبع امپدانسی با یکسوساز ورودی (۲) ۱۱۵

جدول(۳-۸) مقایسه TSDPR سوئیچ‌های مورد نیاز در سیستم‌های بادی PMSG ۱۲۳

جدول (۳-۹) مقایسه TSDPR نیمه‌هادی‌های مورد استفاده در سیستم‌های بادی PMSG ۱۲۴

جدول (۳-۱۰) منطق کنترل حداکثر توان ۱۲۸

جدول (۳-۱۱) مشخصات سیستم بادی مورد مطالعه ۱۳۴

جدول (۳-۱۲) مشخصات نیمه‌هادی‌های استفاده شده در مطالعه ۱۳۸

جدول (۳-۱۳) تلفات قسمت الکترونیک قدرت در چهار سیستم بادی در سرعت باد 12m/s ۱۴۱

فهرست اختصارات

PMSG	Permanent magnet synchronous generator
ZSI	Z-Source Inverter
VSI	Voltage Source Inverter
CSI	Current Source Inverter
TSDPR	Total Switching Device Power Rating
PI	Proportional-Integral
PWM	Pulse Width Modulation
WWEA	World Wind Energy Association
PV	Photovoltaic
PM	Permanent magnet
PCC	Point of Common Coupling
MPPT	Maximum Power Point Tracking
WECS	Wind Energy Conversion System
THD	Total Harmonic Distortion
EMI	Electromagnetic Interference

فهرست شکل‌ها

شکل(۱-۱) سیستم بادی سرعت ثابت ۱۰
شکل (۱-۲) سیستم بادی با رنج تغییرات سرعت محدود ۱۱
شکل (۱-۳) سیستم بادی براساس مبدل فرکانسی سایز کوچک ۱۱
شکل (۱-٤) سیستم بادی با مبدل‌های فرکانسی سایز کامل ۱۲
شکل (۱-٥) توربین بادی PMSG نصب شده در اکیناوای ژاپن ۱۴
شکل (۱-٦) سیستم توربین بادی PMSG با استفاده از مبدل‌های پشت به پشت ۱۵
شکل (۱-۷) توربین بادی PMSG براساس یکسوساز سمت ژنراتور و مبدل تریستوری سمت شبکه ۱۶
شکل (۱-۸) توربین بادی PMSG براساس یکسوساز سمت ژنراتور و مبدل سمت شبکه ۱۶
شکل (۱-۹) توربین بادی PMSG براساس مبدل DC-DC میانی ۱۷
شکل(۱-۱۰) توربین بادی PMSG با مبدل باک- بوست ۱۷
شکل(۱-۱۱) توربین بادی PMSG با مبدل بوست ۱۷
شکل (۱-۱۲) مشخصه توان خروجی توربین بادی برحسب سرعت چرخشی روتور ۱۸
شکل (۱-۱۳) سیستم بادی PMSG براساس مبدل منبع امپدانسی ۲۱
شکل (۲-۱) ماشین سنکرون مغناطیس دائم ۲۵
شکل (۲-۲) مدار معادل یک فاز ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم ۲۷
شکل (۲-۳) مدار اصلی مبدل منبع ولتاژ ۲۹
شکل (۲-۴) دیاگرام سه فاز VSI متصل به شبکه ۳۰
شکل (۲-۵) حلقه کنترل جریان‌ها در مبدل متصل به شبکه ۳۲
شکل (۲-۶) دیاگرام بودی تابع تبدیل حلقه‌باز جریان‌ها قبل از جبران‌سازی ۳۲
شکل (۲-۷) نمودار بودی سیستم کنترل حلقه‌باز جریان‌ها (جبران سازی‌شده) ۳۳
شکل (۲-۸) مبدل منبع ولتاژ متصل به شبکه و سیستم کنترل آن ۳۴
شکل (۲-۹) پاسخ جریان‌های اکتیو و راکتیو به ورودی مرجع پله‌ای ۳۵
شکل (۲-۱۰) جریان‌های سه فاز شبکه ۳۵
شکل (۲-۱۱) سیستم کنترل برداری جریان‌ها در حالت گسسته در زمان ۳۸
شکل (۲-۱۲) پاسخ جریان‌های اکتیو و راکتیو با سیستم کنترل deadbeat ۳۸
شکل (۲-۱۳) جریان‌های سه فاز تزریقی به شبکه ۳۹
شکل (۲-۱۴) منحنی C_p برحسب λ به ازای زاویه پره‌های مختلف ۴۰
شکل (۲-۱۵) مشخصه توان خروجی توربین برحسب سرعت چرخشی ژنراتور ۴۱
شکل (۲-۱۶) تغییرات سرعت باد ۴۲
شکل (۲-۱۷) سیستم بادی PMSG براساس مبدل‌های پشت به پشت ۴۳
شکل (۲-۱۸) سیستم کنترل جریان‌ها در مبدل سمت ژنراتور ۴۴
شکل (۲-۱۹) سیستم کنترل مبدل سمت ژنراتور ۴۶

شکل (۲-۲۰) سیستم تبدیل انرژی بادی براساس مبدل‌های پشت به پشت ۴۷
شکل (۲-۲۱) حداکثر توان مکانیکی قابل دسترس و توان مکانیکی توربین ۴۸
شکل(۲-۲۲) سرعت بهینه و سرعت واقعی روتور ۴۹
شکل (۲-۲۳) ولتاژ لینک DC ۴۹
شکل (۲-۲۴) توان مکانیکی توربین و توان اکتیو تزریقی به شبکه ۵۰
شکل (۲-۲۵) توان راکتیو تزریقی به شبکه (ضریب توان واحد مد نظر است) ۵۰
شکل (۲-۲۶)جریان‌های تزریقی به شبکه در سرعت باد 12m/s ۵۱
شکل (۲-۲۷) جریان‌های ژنراتور در سرعت باد 12m/s ۵۱
شکل (۲-۲۸) نمودار هارمونیکی جریان ژنراتور ۵۱
شکل (۲-۲۹) ساختار سیستم تبدیل انرژی بادی براساس مبدل بوست میانی ۵۲
شکل (۲-۳۰) یکسوساز دیودی تمام موج سه فاز ۵۳
شکل (۲-۳۱) کموتاسیون جریان در یکسوساز تمام موج سه فاز ۵۴
شکل (۲-۳۲) نحوه تعیین ولتاژ DC برحسب سرعت بهینه روتور ۵۶
شکل(۲-۳۳) ولتاژ DC خروجی یکسوساز برحسب سرعت چرخشی بهینه ژنراتور ۵۶
شکل (۲-۳۴) برازش منحنی ولتاژ DC خروجی یکسوساز توسط تابع ployfit ۵۷
شکل (۲-۳۵) مبدل DC به DC بوست ۵۸
شکل (۲-۳۶) سیستم کنترل مبدل بوست براساس رگولاتور PI و معادله (۲-۱۱۰) ۵۹
شکل (۲-۳۷) سیستم تبدیل انرژی بادی براساس مبدل بوست و سیستم کنترل آن ۶۰
شکل (۲-۳۸) حداکثر توان آیرودینامیکی و توان مکانیکی توربین بادی ۶۰
شکل (۲-۳۹) تغییرات سرعت توربین- ژنراتور ۶۱
شکل (۲-۴۰) توان مکانیکی توربین و توان اکتیو تزریقی به شبکه ۶۱
شکل (۲-۴۱) ولتاژ خازن ورودی مبدل (ولتاژ لینک DC) ۶۲
شکل (۲-۴۲) توان راکتیو تزریقی به شبکه (ضریب توان یک مد نظر است) ۶۲
شکل (۲-۴۳) جریان سه فاز تزریقی به شبکه و تغییرات آن ۶۳
شکل (۲-۴۴) جریان سه فاز ژنراتور و تغییرات آن ۶۳
شکل (۲-۴۵) مقدار بهینه ولتاژ DC خروجی یکسوساز (بالا) و مقدار واقعی آن (پایین) ۶۳
شکل (۲-۴۶) تغییرات سیکل کاری مبدل بوست ۶۴
شکل (۲-۴۷) تغییرات جریان در سلف مبدل بوست ۶۴
شکل (۲-۴۸) جریان سلف مبدل بوست در سرعت باد 12m/s ۶۵
شکل (۲-۴۹) جریان سلف و ریپل‌های ناشی از کلیدزنی مبدل بوست ۶۵
شکل (۲-۵۰) جریان‌های تزریقی به شبکه در سرعت باد 12m/s ۶۶
شکل (۲-۵۱) جریان‌های ژنراتور در سرعت باد 12m/s ۶۶
شکل (۲-۵۲) نمودارهارمونیکی جریان ژنراتور ۶۷
شکل (۲-۵۳) هارمونیک‌های جریان ژنراتور با وضوح بیشتر ۶۷

شکل (۲-۵۴) ساختار مبدل منبع امپدانسی ۶۸
شکل (۲-۵۵) وضعیت مدار در حالت صفر (لینک DC می‌تواند صفر شود) ۶۹
شکل (۲-۵۶) مدار معادل مبدل منبع امپدانسی در حالت اتصال کوتاه (الف) و در حالت اکتیو (ب) ۷۰
شکل (۲-۵۷) شکل موجهای متغیرهای مدار معادل مبدل منبع امپدانسی ۷۲
شکل (۲-۵۸) روش کنترل ساده ۷۵
شکل(۲-۵۹) نمودار بهره به‌ازای شاخص مدولاسیون در روش کنترل ساده ۷۶
شکل(۲-۶۰) روش کنترل حداکثر بوست ۷۷
شکل(۲-۶۱) روش کنترل حداکثر بوست با تزریق هارمونیک سوم ۷۷
شکل(۲-۶۲) روش کنترل حداکثر بوست ثابت ۷۸
شکل (۲-۶۳) روش کنترل حداکثر بوست ثابت با تزریق هارمونیک سوم ۷۸
شکل (۳-۱) سیستم تبدیل انرژی بادی براساس مبدل منبع امپدانسی ۸۲
شکل (۳-۲) کنترل سیکل کاری حالت اتصال کوتاه و کنترل حداکثر توان توربین بادی ۸۴
شکل (۳-۳) سیستم کنترل مبدل منبع ولتاژ متصل به شبکه و تثبیت ولتاژ لینک DC ۸۵
شکل (۳-۴) سیستم تبدیل انرژی بادی براساس مبدل منبع امپدانسی با جزئیات کامل ۸۶
شکل (۳-۵) حداکثر توان مکانیکی قابل استحصال و توان مکانیکی جذب‌شده توسط توربین ۸۷
شکل (۳-۶) توان مکانیکی جذب‌شده توسط توربین (خط چین) و توان اکتیو تحویلی به شبکه ۸۷
شکل (۳-۷) تغییرات سرعت توربین- ژنراتور ۸۸
شکل (۳-۸) مقدار بهینه ولتاژ خروجی یکسوساز (بالا) و مقدار واقعی ولتاژ خروجی یکسوساز (پایین) ۸۸
شکل (۳-۹) تغییرات شاخص مدولاسیون و V_p ۸۹
شکل (۳-۱۰) توان راکتیو تزریقی به شبکه (ضریب قدرت واحد مد نظر است) ۸۹
شکل (۳-۱۱) ولتاژ خازن شبکه امپدانسی ۹۰
شکل (۳-۱۲) ولتاژ ورودی مبدل ۹۰
شکل (۳-۱۳) تغییرات جریان سلف شبکه امپدانسی ۹۱
شکل (۳-۱۴) تغییرات دامنه جریان‌های تزریقی به شبکه ۹۱
شکل (۳-۱۵) تغییرات جریان‌های ژنراتور ۹۲
شکل (۳-۱۶) جریان تزریقی به شبکه در سرعت باد 12m/s ۹۲
شکل (۳-۱۷) ولتاژ خط به خط تولیدی توسط مبدل منبع امپدانسی ۹۲
شکل (۳-۱۸) جریان سلف شبکه امپدانسی در سرعت باد 12m/s ۹۳
شکل (۳-۱۹) جریان سلف و ریپل‌های ناشی از کلیدزنی شبکه امپدانسی ۹۳
شکل (۳-۲۰) ولتاژ ورودی مبدل در سرعت باد 12m/s ۹۴
شکل (۳-۲۱) ولتاژ ورودی شبکه امپدانسی ۹۴
شکل (۳-۲۲) جریان‌های ژنراتور در سرعت باد 12m/s ۹۵
شکل(۳-۲۳) نمودار هارمونیکی جریان ژنراتور ۹۵
شکل (۳-۲۴) نمودار هارمونیکی جریان ژنراتور با وضوح بیشتر ۹۵

شکل (۳-۲۵) ساختار مبدل منبع امپدانسی در سیستم تبدیل انرژی بادی ۹۶
شکل (۳-۲۶) مدار معادل یکسوساز از دید شبکه امپدانسی ۹۷
شکل (۳-۲۷) مدار معادل در زمانی که ولتاژ V_{ab} بزرگترین است ۹۷
شکل (۳-۲۸) مدار معادل سیستم در حالت کاری اکتیو ۹۸
شکل (۳-۲۹) مدار معادل در حالت کاری صفر ۹۹
شکل (۳-۳۰) مدار معادل سیستم در مد کاری اتصال کوتاه ۹۹
شکل (۳-۳۱) درنظر گرفتن یکسوساز و منبع AC متصل به آن به‌عنوان یک منبع ولتاژ DC ۱۰۰
شکل (۳-۳۲) سیستم تبدیل انرژی بادی براساس مبدل منبع امپدانسی تغذیه شونده از یکسوساز دیودی ۱۰۲
شکل (۳-۳۳) سیستم کنترل حداکثر توان توربین بادی ۱۰۳
شکل (۳-۳۴) سیستم بادی براساس مبدل منبع امپدانسی با یکسوساز ورودی و سیستم کنترل آن ۱۰۳
شکل (۳-۳۵) حداکثر توان قابل استحصال و توان مکانیکی جذب‌شده ۱۰۴
شکل (۳-۳۶) توان مکانیکی توربین (خط چین) و توان اکتیو تحویلی به شبکه ۱۰۴
شکل (۳-۳۷) توان راکتیو تزریقی به شبکه (ضریب قدرت واحد مدنظر است) ۱۰۵
شکل (۳-۳۸) ولتاژ خازن شبکه امپدانسی ۱۰۵
شکل (۳-۳۹) تغییرات جریان سلف شبکه امپدانسی ۱۰۶
شکل (۳-۴۰) تغییرات سرعت روتور ۱۰۶
شکل (۳-۴۱) تغییرات جریان‌های تزریقی به شبکه ۱۰۷
شکل (۳-۴۲) تغییرات جریان‌های ژنراتور ۱۰۷
شکل (۳-۴۳) جریان سلف شبکه امپدانسی در سرعت باد 12m/s ۱۰۷
شکل (۳-۴۴) ولتاژ ورودی مبدل در سرعت باد 12m/s ۱۰۸
شکل (۳-۴۵) ولتاژ خروجی یکسوساز (ولتاژ ورودی شبکه امپدانسی) ۱۰۸
شکل (۳-۴۶)جریان‌های تزریقی به شبکه در سرعت باد 12m/s ۱۰۹
شکل (۳-۴۷)جریان‌های ژنراتور در سرعت باد 12m/s ۱۰۹
شکل (۳-۴۸) نمودار هارمونیکی جریان ژنراتور ۱۰۹
شکل (۳-۴۹) نمودار هارمونیکی جریان ژنراتور با وضوح بیشتر ۱۱۰
شکل (۳-۵۰) جریان تزریقی به شبکه توسط سیستم بادی براساس مبدل بوست با در نظر گرفتن تاخیرزمانی ۱۱۲
شکل (۳-۵۱) جریان‌های تزریقی به شبکه توسط سیستم بادی براساس مبدل منبع امپدانسی ۱۱۲
شکل (۳-۵۲) مقایسه نمودار هارمونیکی جریان تزریقی به شبکه توسط سیستم بادی با مبدل DC و ZSI ۱۱۲
شکل (۳-۵۳) محاسبه توان‌ها در سرعت‌های بادی مختلف در سیستم بادی براساس مبدل منبع امپدانسی ۱۱۴
شکل (۳-۵۴) مقایسه راندمان چهار سیستم بادی PMSG ۱۱۵
شکل (۳-۵۵) مقایسه جریان ژنراتورها در چهار سیستم بادی PMSG ۱۱۶
شکل (۳-۵۶) مدار معادل مبدل در حالت اتصال کوتاه ۱۲۰
شکل (۳-۵۷) مقایسه TSDPR سیستم‌های بادی براساس PMSG ۱۲۴
شکل(۳-۵۸) سیستم کنترل حداکثر توان براساس مشخصه ولتاژ DC بهینه برحسب سرعت چرخشی ۱۲۵

شکل (۳-۵۹) مشخصه توان خروجی توربین برحسب سرعت چرخشی روتور ۱۲۶
شکل (۳-۶۰) سیستم کنترل حداکثر توان توربین بادی ۱۲۹
شکل (۳-۶۱) تغییرات سرعت باد ۱۳۰
شکل (۳-۶۲) حداکثر توان مکانیکی قابل استحصال و توان مکانیکی توربین ۱۳۰
شکل (۳-۶۳) جریان‌های تزریقی به شبکه ۱۳۰
شکل (۳-۶۴) جریان سلف شبکه امپدانسی ۱۳۱
شکل (۳-۶۵) عملکرد سیستم کنترل حداکثر توان براساس مشخصه ولتاژ DC برحسب سرعت چرخشی ۱۳۱
شکل (۳-۶۶) عملکرد سیستم کنترل حداکثر توان پیشنهادی در هنگام کاهش خاصیت مغناطیسی PMها ۱۳۲
شکل (۳-۶۷) مدل‌سازی IGBT ۱۳۷
شکل (۳-۶۸) مشخصه خاموش شدن IGBT ۱۳۸
شکل (۳-۶۹) شکل‌موج‌های ولتاژ، جریان، توان تلفاتی و انرژی تلف شده در IGBT ۱۳۹
شکل (۳-۷۰) شکل‌موج‌های ولتاژ، جریان، توان تلفاتی و انرژی تلف شده در IGBT با وضوح بیشتر ۱۳۹
شکل (۳-۷۱) شکل‌موج‌های ولتاژ، جریان، توان لحظه ای و انرژی تلف شده در کلید مبدل بوست ۱۴۰
شکل (۳-۷۲) شکل‌موج‌های ولتاژ، جریان، توان و انرژی در کلید مبدل بوست با وضوح بیشتر ۱۴۰
شکل (۳-۷۳) شکل‌موج‌های ولتاژ، جریان، توان و انرژی تلفاتی در یک IGBT ساق اول ۱۴۱

مقدمه

نیاز روزافزون به انرژی الکتریکی، افزایش مشکلات زیست‌محیطی، افزایش آگاهی عمومی از نقش صنعت در تولید گازهای آلاینده و محدودیت منابع انرژی مرسوم استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در تولید توان الکتریکی را از اهمیت بالایی برخوردار ساخته و این استفاده روزبه‌روز در حال افزایش است. انرژی باد یکی از منابع انرژی تجدیدپذیر است و توجیه اقتصادی مناسبی دارد. رشد سریع استفاده از انرژی باد و افزایش روبه گسترش ایجاد واحدهای تولید انرژی بادی دلیل این مدعاست.

در سال‌های اخیر توسعه در زمینه ماشین‌های الکتریکی و الکترونیک قدرت تشدیدیافته و مهندسین برق سعی در استفاده از این دو زمینه در توربین‌های بادی دارند و ساختارهای مختلفی برای سیستم‌های بادی ارائه کرده‌اند. برخی از این ساختارها براساس ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم استوار است. به‌علت مزایایی از جمله امکان حذف گیربکس، راندمان بالا، قابلیت اطمینان خوب و امکان ساخت مغناطیس دائم‌های پرانرژی استفاده از این نوع ژنراتور در سیستم‌های بادی روزبه‌روز در حال افزایش است.

امروزه یکی از زمینه‌های مناسب برای کاربرد درایوهای سرعت متغیر، سیستم‌های بادی سرعت متغیر است. این سیستم‌ها به‌خاطر ویژگی‌هایی از جمله تولید توان بیشتر، بهبود کیفیت توان و عرضه توان راکتیو از توجه بالایی برخوردار شده‌اند. جهت تزریق توان تولیدی توسط سیستم بادی سرعت متغیر به شبکه عمدتا از مبدل منبع ولتاژ استفاده می‌شود. این مبدل دارای مشکلاتی نظیر حساسیت به EMI و رنج عملکرد محدود است. اخیرا مبدل منبع امپدانسی به‌عنوان جایگزینی مناسب جهت غلبه بر مشکلات مبدل‌های معمولی پیشنهاد شده‌است.

در این پژوهش سیستم بادی سرعت متغیر با استفاده از ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم که توسط مبدل منبع امپدانسی کنترل و به شبکه اتصال می‌یابد مدنظر است. جهت انجام این تحقیق ساختار پایان‌نامه به این ترتیب مدون گردیده‌است: در فصل اول به اهمیت انرژی باد، سیستم‌های بادی مرسوم و سیستم‌های بادی متداول براساس ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم پرداخته و معرفی شده‌اند. در فصل دوم دو نوع سیستم بادی مرسوم براساس ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم مطالعه و با استفاد از نرم‌افزار MATLAB/Simulink مدل‌سازی شده‌اند. علاوه‌بر آن در فصل دوم به مقدمات موردنیاز در فصل سوم نیز پرداخته شده‌است که شامل مطالعه ژنراتور، یکسوساز، مبدل منبع امپدانسی و کنترل حداکثر توان توربین بادی است. در فصل سوم به مدل‌سازی و مطالعه سیستم بادی براساس

مبدل منبع امپدانسی پرداخته و دو نوع سیستم ارائه گردیده‌است. در انتهای فصل سوم مقایسه‌ای بین سیستم‌های بادی براساس ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم انجام و براساس این مقایسه در فصل چهارم نتیجه‌گیری صورت گرفته‌است. علاوه‌بر آن در انتهای فصل سوم یک روش کنترل حداکثر توان توربین بادی پیشنهاد شده‌است و مطالعه‌ای درباره مقدار حداقل ولتاژ لینک DC انجام شده و به محاسبه تلفات مبدل‌های الکترونیک قدرت در یک سرعت باد ثابت پرداخته شده‌است.

نتایج نشان می‌دهد سیستم بادی ارائه‌شده براساس مبدل منبع امپدانسی سبب کاهش هارمونیک‌های جریان ژنراتور نسبت به سایر سیستم‌های مشابه می‌شود. از لحاظ حفظ کیفیت توان شبکه سیستم مبتنی‌بر مبدل منبع امپدانسی برتری قابل توجهی نسبت به سایر سیستم‌های بادی دارد. راندمان انرژی و هزینه سیستم نیز جزء ملاک‌های مقایسه است. نتایج نشان می‌دهد سیستم ارائه شده از نظر راندمان و هزینه توانایی رقابت با سایر سیستم‌های مشابه را دارد.

فصل اول

بررسی منابع

۱-۱- مقدمه

تولید توان الکتریکی توسط نیروگاه‌های بزرگ یکی از عوامل آلوده‌کننده هوا است و امروزه کره خاکی با رنج وسیعی از گازهای گلخانه‌ای مواجه شده که تهدیدکننده محیط زیست، سلامتی، طول عمر و اقتصاد است. با افزایش آگاهی عمومی از نقش صنعت در تولید گازهای آلاینده جایگزین ساختن منابع انرژی متداول با منابع انرژی پاک از اهمیت دو چندانی برخوردار شده‌است. در سال‌های اخیر روش‌های مختلفی برای تولید توان الکتریکی بدون انتشار آلودگی پیشنهاد و مطرح شده از جمله می‌توان به توان خورشیدی و توان آبی با سایز کوچک اشاره کرد و انرژی باد نیز یکی از این منابع تجدیدپذیر[1] است.

۱-۲- منابع انرژی مرسوم

انرژی آبی، زغال‌سنگ، انرژی هسته‌ای، نفت و گاز طبیعی منابع مرسوم تولید توان الکتریکی را تشکیل می‌دهند. منظور از توان آبی نیروگاه‌های آبی بزرگ است. هر چند تولید توان از نیروی آب هیچ‌گونه آلودگی هوا ایجاد نمی‌کند اما اثرات مخربی از جمله خطر ایجاد سیل، آثار سوء برروی کیفیت آب و محیط زیست ماهی‌ها و حیوانات وحشی دارد. زغال‌سنگ یکی از آلوده‌کننده‌ترین منابع تولید توان است. به‌عنوان مثال در حدود ۶۵٪ دی اکسید گوگرد، ۳۳٪ دی‌اکسیدکربن و ۲۵٪ اکسید نیتروژن تولیدی در ایالات‌متحده توسط سوزاندن زغال‌سنگ در نیروگاه‌ها وارد جو زمین می‌شود که اثرات مخربی بر روی شرایط زیست‌محیطی و لایه ازون دارد. انرژی هسته‌ای حتی اگر آلودگی هم نداشته باشد خطر بزرگ و بالقوه‌ای برای سلامتی بشر و محیط زیست ایجاد می‌کند و در حال حاضر بسیاری از کشورها از دست‌یابی به آن محدودیت دارند. نفت نسبت به زغال‌سنگ پاک‌تر است اما این منبع انرژی نیز مقدار زیادی آلودگی به‌ازای هر واحد انرژی تولید می‌کند. گاز طبیعی ارزان و محیط دوست‌تر است زیرا آلودگی ایجادشده توسط سوزاندن گاز طبیعی نسبت به سایر منابع فسیلی بسیار کمتر است. کلیه منابع اشاره شده از یک سو آثار مخرب برروی محیط و بشر دارند و از سوی دیگر دارای محدودیت هستند و به اتمام خواهندرسید، بنابراین جایگزین‌سازی آنها با سایر منابع انرژی از اهمیت بالایی برخوردار است.

---

[1] Renewable Energy