
سپاس گذاری

بدون شک جایگاه و منزلت معلم، اجل از آن است که در مقام قدردانی از زحمات بی شائبه ی او، با زبان قاصر و دست ناتوان، چیزی بنگاریم.

اما از آنجایی که تجلیل از معلم، سپاس از انسانی است که هدف و غایت آفرینش را تامین می کند و سلامت امانت هایی را که به دستش سپرده اند، تضمین؛ بر حسب وظیفه و از باب " من لم یشکر المنعم من المخلوقین لم یشکر الله عزّ و جلّ " :از پدر و مادر عزیزم...این دو معلم بزرگوام... که همواره بر کوتاهی و درستی من، قلم عفو کشیده و کریمانه از کنار غفلت هایم گذشته اند و همسر مهربانم که با تمام نداری هایم ساخته و در تمام عرصه های زندگی یار و یاور ی بی چشم داشت برای من بوده است؛ از استاد با کمالات و شایسته؛ جناب آقای دکتر قدیمی

که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این رساله را بر عهده گرفتند؛ از استاد ، جناب آقای دکتر ابوالمعصومی ، مدیریت محترم کرسی گروه، که زحمت راهنمایی این رساله را در حالی متقبل شدند که بدون مساعدت ایشان، این پروژه به نتیجه مطلوب نمی رسید؛ و از استاد صبور و با تقوا و رفیق شفیعم جناب آقای دکتر رضا غفارپور بخاطر همه ی از خودگذشتگی ها و فداکارها؛ و از استاد فرزانه و دلسوز؛ جناب آقای دکتر سالمی که زحمت داوری این رساله را متقبل شدند؛ کمال تشکر و قدردانی را دارم.

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

چکیده

با توجه به افزایش روز افزون ظرفیت توربین بادی نصب شده در جهان و از طرفی کاهش کیفیت توان شبکه‌های توزیع انرژی الکتریکی به دلیل افزایش بارهای غیر خطی، مطالعه‌ی تأثیر پارامترهای کیفیت توان بر روی این توربین‌ها لازم و ضروری است. در توربین‌های بادی جدید استفاده از ژنراتور القایی دوسو تغذیه (DFIG) ، به دلیل داشتن مشخصه کنترلی مناسب مرسوم شده است. بررسی مدل ژنراتور القایی دو سو تغذیه نشان می‌دهد که کیفیت نامناسب ولتاژ شبکه در نقطه اتصال ژنراتور در عملکرد خود ژنراتور و سیستم کنترلی تأثیرات متعددی داشته و حتی می‌تواند باعث ناپایداری ژنراتور گردد.

در این پایان‌نامه موضوع تأثیر نامتعادلی ولتاژ شبکه (که امروزه یکی از مشکلات حاد در شبکه‌های توزیع می‌باشد) بر رفتار ژنراتور القایی دوسو تغذیه و سیستم کنترل موجود در یک نیروگاه بادی و ارائه‌ی راه‌کارهای اصلاحی مد نظر می‌باشد. اولین مشکل در اتصال توربین بادی فوق به شبکه نامتعادل، عدم تشخیص صحیح فاز شبکه می‌باشد که در این پایان‌نامه روش جدیدی ارائه شده که با تغییری در ساختار حلقه‌ی قفل شونده‌ی فاز، این مشکل حل و فاز توالی مثبت شبکه تشخیص داده می‌شود. در این روش ولتاژ شبکه به یک مبدل پارک داده می‌شود که به دلیل نامتعادل بودن آن، خروجی این مبدل نوسانی خواهد بود. با استفاده از یک فیلتر پایین‌گذر درجه‌ی دوم و کم کردن خروجی این فیلتر از مقدار اصلی این نوسانات قابل محاسبه است. سپس مجدداً با کم کردن مولفه‌ی نوسانی از موج اصلی، توالی مثبت استخراج شده و با عبور از حلقه‌ی قفل فاز معمولی فاز شبکه را به درستی تشخیص خواهد داد.

مشکل دوم در هنگام نامتعادلی شبکه، نامتعادل شدن جریان‌های القایی در روتور و در نتیجه نوسانی شدن مولفه‌های تبدیل پارک (d, q) جریان روتور می‌باشد. این نوسانات باعث نوسان در گشتاور الکترومغناطیسی ژنراتور و در نتیجه آسیب دیدن سیستم به دلیل تنش‌های مکانیکی وارد شده به شفت می‌شود. در این پایان‌نامه با جاگذاری یک فیلتر میان‌گذر بر روی جریان روتور، و یک فیلتر پایین‌گذر بر روی مرجع توان استاتور، نوسانات جزء q جریان روتور کم شده و در نتیجه باعث محدود شدن نوسانات گشتاور روتور می‌شود. نتایج شبیه‌سازی بر روی یک سیستم نمونه نشان از کم شدن نوسانات گشتاور تا ۲۵ درصد نوسانات خود در حالت معمول می‌شود.

فهرست عناوین

۱	فصل اول: مقدمه و اهداف پایان نامه	۱
۱.۱	تاریخچه	۲
۱.۲	شرح مشکل	۴
۱.۳	مرور کارهای دیگران	۵
۱.۴	کارهای انجام شده در این پایان نامه	۸
۱.۵	فصل بندی پایان نامه	۸
۲	فصل دوم: شرح مسئله	۱۰
۲.۱	مقدمه	Error! Bookmark not defined.
۲.۲	شرح دقیق اجزای سیستم توربین بادی	۱۱
۲.۲.۱	تجهیزات مکانیکی	۱۱
۲.۲.۲	تجهیزات الکتریکی	۱۳
۲.۳	ژنراتورهای مورد استفاده در توربین های بادی	۱۳
۲.۳.۱	ژنراتور القایی قفس سنجابی	۱۳
۲.۳.۲	ژنراتور سنکرون روتور سیم پیچی و سنکرون آهنربای دائم	۱۴
۲.۳.۳	ژنراتور القایی دوسو تغذیه	۱۴
۲.۴	ساختار مبدل های مورد استفاده در کنترل DFIG	۱۵
۲.۴.۱	مبدل سمت شبکه (GSC)	۱۶
۲.۴.۲	مبدل سمت روتور (RSC)	۱۷
۲.۵	عملکرد توربین بادی و ردیابی نقطه ی ماکزیمم توان	۱۸
۲.۵.۱	محاسبه ماکزیمم توان یک توربین (حد بتز)	۱۹
۲.۵.۲	روش های ردیابی حداکثر توان	۲۳
۲.۶	دینامیک ماشین القایی دوسو تغذیه (DFIG)	۲۴

۲۵	کنترل DFIG با روش کنترل برداری
۲۶	۲.۷.۱ اصول کنترل برداری
۳۱	۲.۷.۲ محدودیت‌های سرعت و جریان و توان در سیستم توربین بادی با DFIG
۳۲	۲.۸ روش‌های تولید پالس برای کنترل کلیدها
۳۳	۲.۸.۱ SPWM
۳۴	۲.۸.۲ SVM
۳۴	۲.۹ حلقه‌ی قفل شونده‌ی فاز
۳۶	۲.۹.۱ ساختار SRF-PLL
۳۸	۲.۹.۱.۱ ساختار MAF-PLL
۳۹	۲.۹.۲ دیگر ساختارهای پیشنهاد شده برای PLL
۴۱	۲.۱۰ رفتار سیستم کنترل و DFIG در حضور نامتعادلی شبکه
۴۲	۲.۱۰.۱ شرح نامتعادلی در سیستم قدرت
۴۲	۲.۱۰.۲ اثرات نامتعادلی در رفتار حلقه قفل شونده فاز
۴۳	۲.۱۰.۳ اثرات نامتعادلی در رفتار ژنراتور DFIG و سیستم کنترل
۴۶	۲.۱۰.۴ اثرات نامتعادلی در رفتار مبدلها
۴۷	۲.۱۱ نتیجه گیری
۴۸	۳ فصل سوم: روش‌های پیشنهادی برای بهبود عملکرد سیستم در حضور نامتعادلی
۴۹	۳.۱ مقدمه
۴۹	۳.۲ مروری بر اثرات نامتعادلی بر سیستم DFIG
۵۰	۳.۳ روش پیشنهادی برای حذف اثر اغتشاشات بر عملکرد حلقه قفل شونده‌ی فاز
۵۰	۳.۳.۱ ساختار پیشنهادی
۵۳	۳.۳.۲ مدل و روابط ساختار پیشنهادی
۵۶	۳.۴ فیلتر کردن نوسانات جریان روتور، برای حذف نوسانات گشتاور الکترو مغناطیسی ماشین
۵۷	۳.۵ اضافه کردن کنترل کننده‌ی سرعت به سیستم کنترل

۳.۶	نتیجه‌گیری	۵۸
۴	فصل چهارم: شبیه‌سازی ساختار پیشنهادی و تحلیل نتایج	۵۹
۴.۱	سیستم مورد مطالعه:	۶۰
۴.۲	سناریوهای شبیه‌سازی	۶۱
۴.۲.۱	پیاده‌سازی ساختار پیشنهادی برای حذف اثر اغتشاشات بر عملکرد حلقه قفل شونده‌ی فاز	۶۲
۴.۲.۲	مقایسه شرایط متعادل و نامتعادل برای سیستم مورد نظر، با استفاده از SRF-PLL:	۶۶
۴.۲.۳	اعمال همزمان ساختار PLL پیشنهادی و فیلترهای جریان و توان به سیستم اصلی	۷۴
۴.۳	نتیجه‌گیری	۷۹
۵	فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات	۸۰
۵.۱	نتیجه‌گیری	۸۱
۵.۲	پیشنهادات برای ادامه‌ی کار	۸۲

فهرست شکل‌ها

شکل ۱-۲	بخش‌های مختلف توربین بادی با DFIG	۱۱
شکل ۲-۲	بخش‌های مکانیکی توربین بادی	۱۲
شکل ۳-۲	اتصال ژنراتور القایی قفس سنجابی در توربین بادی	۱۳
شکل ۴-۲	اتصال ژنراتور سنکرون آهنروبی دائم	۱۴
شکل ۵-۲	اتصال DFIG به شبکه	۱۵
شکل ۶-۲	چگونگی اتصالات تجهیزات پشت به پشت DFIG	۱۶
شکل ۷-۲	ساختار مبدل سمت شبکه	۱۶
شکل ۸-۲	ساختار مبدل سمت شبکه	۱۸
شکل ۹-۲	جریان مدور بسته هوا از توربین بادی ایده آل	۱۸
شکل ۱۰-۲	منحنی C_p و C_t بر حسب β های	۲۱
شکل ۱۱-۲	بر حسب زاویه C_p	۲۲
شکل ۱۲-۲	نمای سه بعدی از رابطه میان C_p ، θ	۲۳
شکل ۱۳-۲	مدل دینامیکی ماشین القای دوسو تغذیه (DFIG)	۲۴
شکل ۱۴-۲	محاسبه جریان‌های مرجع روتور از روی توان مطلوب استاتور	۲۷
شکل ۱۵-۲	محاسبه جریان‌های مرجع روتور با استفاده از توان مطلوب استاتور، بصورت حلقه بسته	۲۸
شکل ۱۶-۲	محاسبه زاویه تبدلات پارک	۲۹
شکل ۱۷-۲	رابطه ولتاژ و جریان روتور ماشین التایی	۳۰
شکل ۱۸-۲	شکل کلی سیستم کنترلی روتور موتور القایی	۳۰
شکل ۱۹-۲	بخش‌های مختلف و اتصالات داخلی سیستم کنترل برداری برای DFIG	۳۱
شکل ۲۰-۲	شارش توان در ژنراتور القایی	۳۲
شکل ۲۱-۲	روش مدولاسیون پهنای باند سینوسی	۳۳
شکل ۲۲-۲	بردارهای پایه‌ی روش SVPWM	۳۴
شکل ۲۳-۲	ساختار کلی حلقه‌ی قفل‌شونده‌ی فاز	۳۶
شکل ۲۴-۲	نمایش برداری قابهای مرجع ساکن و گردشی	۳۷
شکل ۲۵-۲	ساختار SRF-PLL سه فاز	۳۷
شکل ۲۶-۲	ساختار MAF-PLL	۳۸
شکل ۲۷-۲	پیاپی‌سازی اصل انطباق برای رفتار DFIG در ولتاژ نامتعادل	۴۵
شکل ۱-۳	بلوک دیاگرام ساختار پیشنهادی	۵۱
شکل ۲-۳	نمودار بود فیلتر پایین‌گذر استفاده شده	۵۲
شکل ۳-۳	نمودار بود فیلتر حاصل از کم کردن خروجی فیلتر پایین‌گذر از مقدار اصلی خروجی مبدل پارک	۵۲
شکل ۴-۳	سیستم کنترلی استفاده‌شده در پایان‌نامه	۵۷
شکل ۱-۴	سیستم مورد مطالعه	۶۰
شکل ۲-۴	ولتاژ شبکه با ۱۰ درصد توالی صفر و ۲۰ درصد توالی منفی	۶۲

شکل ۳-۴: مقایسه فرکانس زاویه‌ای تشخیص داده شده در ساختار پیشنهادی برای PLL با SRF-PLL در بسیت درصد توالی منفی و ده درصد توالی صفر	۶۳
شکل ۴-۴: مقایسه فاز و لتاژ تشخیص داده شده در ساختار پیشنهادی برای PLL با SRF-PLL در بسیت درصد توالی منفی و بیست درصد توالی صفر	۶۳
شکل ۴-۵: مقایسه‌ای بین فرکانس زاویه‌ای تشخیص داده شده در ساختار پیشنهادی با MAF-PLL	۶۴
شکل ۴-۶: تغییرات واقعی فرکانس شبکه	۶۴
شکل ۴-۷: مقایسه‌ای بین فاز و لتاژ ورودی تشخیص داده شده در ساختار پیشنهادی و MAF-PLL در فرکانس هرتر	۶۵
شکل ۴-۸: مقایسه‌ای بین فاز و لتاژ ورودی تشخیص داده شده در ساختار پیشنهادی و MAF-PLL در فرکانس ۵۲ هرتر	۶۵
شکل ۴-۹: مقایسه‌ای بین فاز و لتاژ ورودی تشخیص داده شده در ساختار پیشنهادی و MAF-PLL در فرکانس ۴۸ هرتر	۶۶
شکل ۴-۱۰: سرعت باد در محیط با شرایط متعادل و لتاژ شبکه	۶۷
شکل ۴-۱۱: مقایسه‌ی توان مرجع (خروجی بلوک MPPT) (خطوط غیر ممتد و پررنگ) و توان خروجی ژنراتور در مدت ۴۰ ثانیه (خطوط ممتد و گم‌رنگ)	۶۷
شکل ۴-۱۲: توان خروجی ژنراتور در حالت نامتعادل	۶۸
شکل ۴-۱۳: مقایسه توان خروجی ژنراتور در حالت متعادل و نامتعادل	۶۹
شکل ۴-۱۴: تجزیه‌ی فرکانسی توان خروجی ژنراتور در حالت نامتعادل	۶۹
شکل ۴-۱۵: گشتاور الکترومغناطیسی در شرایط متعادل و لتاژ شبکه	۷۰
شکل ۴-۱۶: گشتاور الکترومغناطیسی ژنراتور در شرایط نامتعادل و لتاژ شبکه	۷۰
شکل ۴-۱۷: مقایسه‌ی گشتاور الکترومغناطیسی ژنراتور در شرایط نامتعادل و متعادل و لتاژ شبکه	۷۱
شکل ۴-۱۸: تجزیه‌ی فرکانسی گشتاور الکترومغناطیسی ژنراتور در حالت نامتعادل	۷۱
شکل ۴-۱۹: مقایسه‌ی سرعت ژنراتور در حالت متعادل و نامتعادل	۷۲
شکل ۴-۲۰: سرعت زاویه‌ای تخمینی توسط SRF-PLL در شرایط متعادل و نامتعادل	۷۳
شکل ۴-۲۱: مقایسه‌ی و لتاژ شبکه با خروجی SRF-PLL در حالت متعادل	۷۳
شکل ۴-۲۲: مقایسه‌ی و لتاژ شبکه با خروجی SRF-PLL	۷۴
شکل ۴-۲۳: توان خروجی ژنراتور در حالت نامتعادل، بعد از اعمال روش‌های پیشنهادی	۷۵
شکل ۴-۲۴: مقایسه توان خروجی ژنراتور در حالت نامتعادل، قبل و بعد از اعمال روش‌های پیشنهادی	۷۵
شکل ۴-۲۵: تجزیه‌ی فرکانسی توان خروجی ژنراتور در حالت نامتعادل با اعمال روش پیشنهادی	۷۶
شکل ۴-۲۶: گشتاور الکترومغناطیسی در شرایط نامتعادل و لتاژ شبکه، بعد از اعمال روش پیشنهادی	۷۷
شکل ۴-۲۷: مقایسه‌ی گشتاور الکترومغناطیسی در شرایط نامتعادل و لتاژ شبکه با و بدون اعمال روش پیشنهادی	۷۷
شکل ۴-۲۸: مقایسه‌ی سرعت در شرایط نامتعادل و لتاژ شبکه قبل و بعد از اعمال روش پیشنهادی	۷۸
شکل ۴-۲۹: فرکانس تخمینی توسط ساختار پیشنهادی در شرایط نامتعادل و لتاژ	۷۸
شکل ۴-۳۰: مقایسه‌ی و لتاژ شبکه با خروجی ساختار پیشنهادی	۷۹

صفحه

فهرست جداول

- جدول ۱-۱ - میزان تولید کشورهای برتر در زمینه ی تولید برق با توربین بادی (مگا وات) ۳
- جدول ۱-۴ - مشخصات توربین بادی سیستم ۶۰
- جدول ۲-۴ - مشخصات ژنراتور DFIG مورد استفاده ۶۱

فصل اول: مقدمه و اهداف

پايان نامه

۱.۱ تاریخچه

تاریخچه استفاده از انرژی باد به هزاران سال پیش بر می‌گردد. تبدیل انرژی باد به نوعی مفید از انرژی (مانند انرژی مکانیکی و الکتریکی) از گذشته‌های دور (در آسیاب‌های بادی یا پمپ‌های بادی و یا پیش‌رانش قایق‌ها و کشتی‌ها در قایق‌های بادبانی) تا به حال (مانند استفاده از توربین‌های بادی) در ذهن بشر بوده است. در آسیاب‌های بادی از انرژی باد مستقیماً برای خرد کردن دانه‌ها و یا پمپ‌کردن آب استفاده می‌شد. قدیمی‌ترین روش استفاده از انرژی باد، به ایران باستان باز می‌گردد. برای نخستین بار، ایرانیان موفق شدند با استفاده از نیروی باد، چرخ‌چاه را به گردش درآورده و از چاه‌های آب، آب را به سطح مزارع برسانند. در چند سال گذشته، میانگین رشد سالانه انرژی باد در دنیا حدود ۳۰ درصد گزارش شده است. در انتهای سال ۲۰۱۰، میزان ظرفیت نامی تولید برق بادی در سراسر جهان برابر ۱۹۷ گیگاوات بوده است. امروزه توان بادی در دنیا ظرفیت تولید سالانه ۴۳۰ تراوات ساعت انرژی الکتریکی را دارد که این میزان، ۲.۵٪ مصرف برق دنیاست. در ۵ سال گذشته، رشد متوسط سالانه در توان بادی دنیا ۲.۷۶٪ بوده و انتظار می‌رود که سهم باد در تولید انرژی الکتریکی دنیا تا سال ۲۰۱۳ به ۳.۳۵ درصد و تا سال ۲۰۱۸ به ۸ درصد برسد. اروپا در حال حاضر بیش از ۷۲ درصد از برق بادی جهان را تولید می‌کند. کشورهای دانمارک با ۲۱ درصد، پرتغال با ۱۸ درصد، اسپانیا با ۱۶ درصد، ایرلند با ۱۴ درصد و آلمان با ۹ درصد، در تولید برق بادی از کل تولید انرژی الکتریکی در جایگاه‌های نخست قرار دارند. در حال حاضر، مزرعه‌های بادی در آمریکا حدود ۱۷ میلیارد کیلو وات ساعت در سال، برق تولید می‌کنند که از نظر ملاحظات زیست محیطی و مبارزه با تولید گازهای گلخانه‌ای، این میزان انرژی باد می‌تواند سالانه از انتشار ۹ میلیون تن دی‌اکسید کربن جلوگیری کند. در سال ۲۰۱۱، ۸۳ کشور در دنیا از توان بادی برای تولید برق استفاده کرده‌اند. این در حالی است که کل ظرفیت نصب شده برق بادی در ایران در حدود ۷۰۰۰ مگا وات است. جدول ۱-۱ میزان تولید ۹ کشور برتر در زمینه‌ی تولید برق با توربین بادی و ایران را به همراه کل تولید برق بادی در جهان را برای سالهای ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۸ نشان می‌دهد. افزایش ظرفیت نصب شده در کشورهای مختلف و ناچیز بودن ظرفیت نصب شده در کشور عزیزمان ایران، بسیار بارز است. [۱]

جدول ۱-۱- میزان تولید کشورهای برتر در زمینه ی تولید برق با توربین بادی (مگا وات)

رتبه	کشور	۲۰۰۵	۲۰۰۶	۲۰۰۷	۲۰۰۸	رتبه	کشور	۲۰۰۵	۲۰۰۶	۲۰۰۷	۲۰۰۸
۱	آمریکا	۹۰۱۴	۱۱۰۶	۱۶۰۸	۲۵۰۲	۲	آلمان	۱۸۰۴	۲۰۰۶	۲۲۰۲	۲۳۰۹
۳	اسپانیا	۱۰۰۰	۱۱۰۶	۱۵۰۱	۱۶۰۷	۴	چین	۱۰۲۷	۲۰۰۶	۵۹۱۲	۱۲۰۲۱
۵	هند	۴۰۴۳	۶۰۲۷	۷۸۵۰	۹۰۵۹	۶	ایتالیا	۱۰۷۲	۲۰۱۲	۲۰۷۳	۳۰۷۳۶
۷	فرانسه	۷۷۹	۱۰۵۹	۲۰۴۸	۳۰۴۳	۸	انگلیس	۱۰۳۵	۱۰۹۶	۲۰۳۹	۳۰۲۸۸
۹	دانمارک	۳۰۱۳	۳۰۱۴	۳۰۱۳	۳۰۱۶	۳۵	ایران	۳۲	۴۷	۶۷	۸۳
		سال		۲۰۰۵	۲۰۰۶	۲۰۰۷	۲۰۰۸				
		تولید برق کل جهان از باد		۵۲۰۲۴	۷۴۰۱۵۱	۹۳۰۹۲۷	۱۲۱۰۱۸				

اما از جمله دلایل تمایل کشورها برای افزایش ظرفیت تولید برق بادی مزایا بسیار زیاد این روش تولید انرژی الکتریکی است. انرژی بادی فراوان ، تجدیدپذیر و پاک است، در همه جای دنیا وجود دارد و همچنین در مقایسه با استفاده از انرژی سوخت های فسیلی میزان کمتری گاز گلخانه ای منتشر می کند.

با توجه به هزینه ی بالای ساخت و نصب این مزارع، لزوم استفاده ی بهینه از ظرفیت این تجهیزات و بهره برداری اقتصادی از این سرمایه گذاری، الزامی به نظر می رسد. بررسی بیشتر مشخصه های توربین بادی نشان از این دارد که برای هر سرعت باد مشخص، نقطه حداکثر بازده در سرعت مشخصی از چرخش توربین اتفاق می افتد. تنظیم نقطه کار سیستم در این نقطه را ردیابی نقطه ماکزیمم توان سیستم را MPPT^۱ می گویند. این کار معمولاً توسط تنظیم مرجع سرعت یا توان تزریقی ژنراتور به شبکه انجام می شود.

استفاده از ژنراتوری که شرایط اتصال به شبکه و تولید برق در هر سرعتی، با قابلیت کنترلی بالا، برای توربین های بادی را داشته باشد، بسیار ایدآل است. این امر لزوم استفاده از یک سیستم با قابلیت کنترل سرعت چرخش توربین و ژنراتور و همچنین کنترل توان اکتیو(یا سرعت چرخش) و راکتیو تزریقی را نشان می دهد.

¹ : Maximum Power Point Traking

در نیروگاه های بادی، ژنراتورهای سنکرون و القایی قفس سنجابی به صورت گسترده استفاده می شوند. برای قابل کنترل بدون توان تزریقی یا سرعت این ژنراتورها، اتصال مستقیم آن ها به شبکه میسر نیست و می بایست توسط مبدل های الکترونیک قدرت (معمولاً توسط دو اینورتر پشت به پشت) به شبکه متصل شوند. ظرفیت و مقادیر نامی کلیدهای این مبدل ها به دلیل قرار گرفتن در مسیر توان تزریقی، می بایست به اندازه ی کافی بزرگ انتخاب شوند. این موضوع باعث بالاتر رفتن هزینه ی مجموعه می شود. همچنین توان تزریقی در این شرایط، به دلیل کلیدزنی ها و ساختار کلی مبدل های الکترونیک قدرت، دارای کیفیت مناسبی نبوده و باعث آلوده تر شدن شبکه می شود. سومین ژنراتوری که در این توربین ها استفاده می شود، ژنراتور القایی دوسو تغذیه یا همان DFİG² است. در این ژنراتور استاتور با صورت مستقیم به شبکه متصل می شود و روتور توسط دو اینورتر پشت به پشت به شبکه متصل است. با تنظیم فرکانس، فاز و دامنه ی ولتاژ اعمالی به روتور می توان توان اکتیو و راکتیو تزریقی استاتور را کنترل کرد. از مزایای این سیستم نسبت با ژنراتورهای دیگر می توان به بهتر بودن کیفیت توان تزریقی، کوچکتر بودن رنج کلیدهای قدرت انتخابی و در نتیجه کمتر بودن هزینه ها اشاره کرد. کوچک بودن رنج تغییرات سرعت ژنراتور و در نتیجه عدم استفاده ی حداکثری از انرژی باد در هر سرعتی از باد، از معایبی است که می توان به آن اشاره کرد. [۱]

۱.۲ شرح مشکل

درباره استفاده از نیروگاه های بادی با چالش های زیر روبرو هستیم.

۱. با توجه به اینکه نیروگاه بادی معمولاً به شبکه توزیع متصل می شوند و شبکه توزیع، به خاطر وجود بارهای تک فاز و بارهای غیرخطی، دارای مشکلات کیفیت توان می باشد، بررسی عملکرد نیروگاه بادی در این شرایط ضروری به نظر می رسد.

² Doubly Fed Induction Machine

۲. با توجه به ضعیف بودن شبکه توزیع در مناطق دوردست، عملکرد نامناسب سیستم بادی می‌تواند، باعث تشدید مسائل کیفیت توان می‌گردد.

۳. در مورد ژنراتور القایی دوسو تغذیه، به علت اتصال مستقیم استاتور به شبکه، نامتعادلی و دیگر اغتشاشات در رفتار ژنراتور بسیار تأثیرگذار است. این مسائل بر روی میدان گردان استاتور مؤثراند. نامتعادلی ولتاژ شبکه باعث ایجاد یک میدان گردان چپگرد در فضای استاتور می‌شود و گشتاور ضربانی ماشین را باعث می‌شوند. همچنین نامتعادل بودن ولتاژ استاتور، نامتعادل شدن ولتاژ روتور را نتیجه می‌دهد. این موضوع باعث نامتعادل شدن جریان‌های تزریقی به روتور توسط مبدل‌های الکترونیک قدرت می‌شود و توان تزریقی به شبکه را نوسانی کرده و باعث بیشتر شدن نامتعادلی شبکه می‌شود. همچنین نامتعادلی در جریان روتور، علاوه بر تأثیری که روی عملکرد خود ژنراتور دارد، باعث ایجاد نوسان در سیگنال‌های سیستم کنترل شده و ممکن است باعث ناپایداری توربین شود.

۴. مشکلاتی که هارمونیک ولتاژ شبکه می‌تواند بر عملکرد و پایداری ژنراتور ایجاد کند بیش از نامتعادلی نباشد، کمتر هم نسیت. هارمونیک ولتاژ شبکه نیز باعث ایجاد میدان گردانی با سرعت چند برابر مؤلفه‌ی اصلی میدان می‌گردد. این موضوع تأثیر زیادی بر جریان‌های تزریقی روتور داشته و باز هم گشتاور ضربانی و نوسان جریان روتور را به همراه دارد و باعث بدتر شدن پایداری سیستم و بعضاً ناپایداری مجموعه می‌گردد.

۱.۳ مرور کارهای دیگران

در [۲] با استفاده از کنترل مد لغزشی، یک راه کار برای بهبود عملکرد DFIG برای در شرایط نامتعادلی و هارمونیکی ارائه شده‌است، که با استفاده از روش کنترل مد لغزشی مبدل سمت روتور، گشتاور موتور را تا حدودی ثابت نگه می‌دارد. پیچیدگی سیستم کنترل در این روش بسیار بارز است.

در [۳] با استفاده از DVR^۳ و اعمال روش کنترل برداری ، DFIG را در شرایط نامتعادل کنترل می‌کند. این روش کنترل بر روی مبدل سمت روتور پیاده شده‌است. این روش برای راه اندازی سیستم توربین بادی با DFIG پیشنهاد شده است. در حالت دائمی رفتار مناسبی ندارد. در [۴] با استفاده از جبران سازی ولتاژ روتور در کنترل کننده برداری، از روی نوسانات توان و گشتاور استاتور، عملکرد DFIG در شرایط نامتعادلی بهبود بخشیده شده است. این روش دارای پیچیدگی زیادی است و به دلیل استفاده از سیستم حلقه‌ی قفل شونده‌ی فاز معمولی، در هنگام تغییر فرکانس شبکه، پاسخ مناسبی ندارد.

در [۵] یک روش کنترلی جدید برای کنترل DFIG ارائه شده است که با استفاده از محاسبه‌ی نامتعادلی جریان‌های روتور با تبدیل پارک، کار می‌کند. این مقاله نیز به دلیل بکار بردن سیستم حلقه‌ی قفل شونده‌ی فاز مناسب، در هنگام تغییر فرکانس شبکه، پاسخ مناسبی ندارد.

در [۶] با استفاده از ظرفیت مبدل سمت روتور، عملکرد ژنراتور در نامتعادلی شبکه تا حدی بهبود داده شده است. به دلیل محدود بودن ظرفیت این مبدل، این کار معمولاً غیر کارآمد خواهد بود.

در [۷] یک تنظیم کننده‌ی هیستریزیس برداری^۴، با ساختاری بسیار ساده، برای کنترل کننده‌ی مبدل سمت روتور، برای بهبود شرایط DFIG در نامتعادلی ولتاژ، ارائه شده است. در [۸] از روش کنترل مستقیم گشتاور به وسیله‌ی کنترل دامنه و زاویه‌ی ولتاژ روتور استفاده شده‌است. برای این کار از روش کنترل فضای برداری حالت. و کلیدهای فرکانس متغیر استفاده شده‌است. همچنین با کنترل زاویه‌ی گشتاور ماشین، از ضربان گشتاور در شرایط نامتعادلی شبکه جلوگیری می‌شود. به دلیل به کار بردن روش کنترل مستقیم، نیاز به سنسور شار وجود دارد که از معایب این کار محسوب می‌شود.

³ Dynamic Voltage Restorer

⁴ VBHCR

در [۹] یک طرح جدید کنترل جریان، متشکل از یک کنترل تناسبی-رزونانسی، ارائه شده است که در قاب ثابت مرجع $\alpha\beta$ مدل شده و قادر به فراهم آوردن کنترل جریان دقیق برای دو تحریک ژنراتور القایی دو سو تغذیه است. اما پیچیدگی سیستم کنترل در این مقاله، مشهود است. در [۱۰] با ارائه سه توپولوژی جدید و استفاده از روش‌های تخمین گر سرعت، روی عمکرد DFIG در شرایط هارمونیک و نامتعادلی کار شده است.

در [۱۱] برای مقابله با شار توالی منفی، از یک سری سیم‌بندی دمپ‌کننده، در طراحی ماشین استفاده شده است.

در [۱۲] پیشنهاد استفاده از یک کنترل تکراری تناسبی و انتگرالگیر را می‌دهد، که موجب کاهش سطوح هارمونیک و عدم تعادل در ترمینال استاتور DFIG می‌شود را می‌دهد. این ساختار ساده‌تر و نیاز به محاسبات بسیار کمتر نسبت به روش‌های موجود را دارد.

در [۱۳] یک روش جدید برای کنترل DFIG متصل به یک شبکه برق نامتعادل ارائه شده است. هدف این سیستم، تضمین کیفیت بهتر انرژی رد و بدل شده بین سیستم توربین بادی و شبکه نامتعادل است. اما در این روش به گشتاور القایی ماشین توجه نشده است.

در [۱۴] با استفاده از کنترل فازی، سیستم توربین بادی و DFIG کنترل شده و نتایج با کنترل‌کننده‌های معمولی مقایسه شده است.

در [۱۵] مدل دینامیکی ژنراتور القایی دوسو تغذیه با سیستم کنترل برداری بررسی شده و رفتار سیستم در شرایط نامتعادل ولتاژ شبکه بررسی شده است. در پایان با گنجاندن یک فیلتر میان‌گذر بر روی جریان‌های روتور، نوسان گشتاور را کم می‌کند. توان ماشین نوسانات شدیدی به خود می‌گیرد.

در [۱۶] ابتدا مدل باد و توربین بادی مفصلاً بررسی می‌شود. سپس کارکرد انواع ژنراتورها در سیستم توربین بادی با انواع سیستم‌های کنترل بررسی می‌شود. در آخر به بررسی تأثیرات اغتشاشات شبکه بر روی سیستم می‌پردازد.

در [۱۷] با بررسی مدل توربین بادی و مدل دینامیکی ژنراتورهای مختلف، مزایا و معایب DFIG را بررسی می‌کند. سپس چند روش کنترل برای آن معرفی می‌کند. با بررسی تأثیرات اغتشاشاتی مثل نامتعادلی و هارمونیک بر روی عملکرد DFIG و سیستم کنترل آن، یک روش برای بهبود شرایط، ارائه می‌کند.

لازم به تذکر است که کارهای انجام شده در زمینه طراحی حلقه‌ی قفل‌شونده‌ی فاز، در بخش ۲.۸ آورده شده‌است.

۱.۴ کارهای انجام شده در این پایان نامه

در این پایان نامه پس از آشنایی با تجهیزات موجود در سیستم نیروگاه بادی، کارهای زیر انجام شده است.

۱. مدل سازی DFIG با توجه به معادلات حالت
۲. مدل‌سازی توربین بادی
۳. طراحی و پیاده سازی مبدل‌های اتصال به شبکه و روتور به همراه سیستم کنترل برداری
۴. بررسی رفتار DFIG در شرایط متعادل ولتاژ شبکه
۵. بررسی رفتار DFIG در شرایط نامتعادلی ولتاژ شبکه
۶. ارائه یک حلقه قفل شونده برای عملکرد مناسب در شرایط نامتعادلی
۷. طراحی فیلتر مناسب در ساختار سیستم کنترل، به منظور حذف نوسانات گشتاور الکترومغناطیسی به طور مشخص، موارد ۶ و ۷ نوآوری انجام شده در این پایان نامه می‌باشد.

۱.۵ فصل‌بندی پایان نامه

جهت دستیابی به اهداف مورد نظر، این پایان‌نامه در ۵ فصل تنظیم شده‌است. پس از بررسی تاریخچه و مرور کارهای پیشین در این فصل، در فصل ۲ تجهیزات توربین بادی معرفی و مدل شده‌اند. در پایان این فصل تأثیر نامتعادلی بر روی این سیستم بررسی و شرح داده شده‌است.

فصل ۳ به بررسی راه کارهای لازم برای بهبود عملکرد این سیستم در شرایط نامتعادلی پرداخته شده است. در این فصل با ارائه‌ی یک ساختار جدید برای سیستم حلقه‌ی قفل‌شونده‌ی

فاز و گنجاندن چند فیلتر مناسب در ساختار سیستم کنترل، عملکرد سیستم تا حدودی بهبود داده شده است.

فصل ۴ نتایج شبیه سازی را شامل می شود. این شبیه سازی ها ابتدا برای دو حالت متعادل و نامتعادل با هم مقایسه شده اند. سپس با پیاده سازی روش پیشنهادی بر روی سیستم، نتایج با حالت قبل مقایسه شده است.

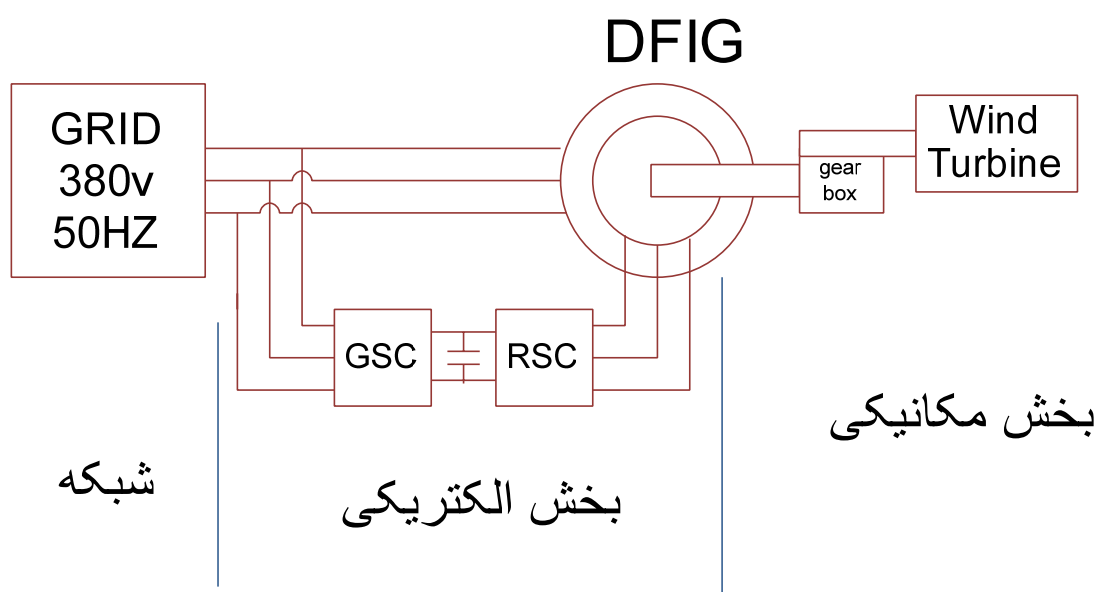
فصل ۵ به ارائه ی نتایج حاصل از تحقیق، اختصاص داشته و در پایان این فصل چند پیشنهاد برای ادامه ی کار ارائه می شود.

فصل دوم: شرح مسئلہ

این فصل هدف مدل سازی سیستم توربین بادی سرعت متغیر، به همراه تمامی تجهیزات و بررسی این تجهیزات در شرایط نامتعادل شبکه می باشد.

۲.۱ شرح دقیق اجزای سیستم توربین بادی

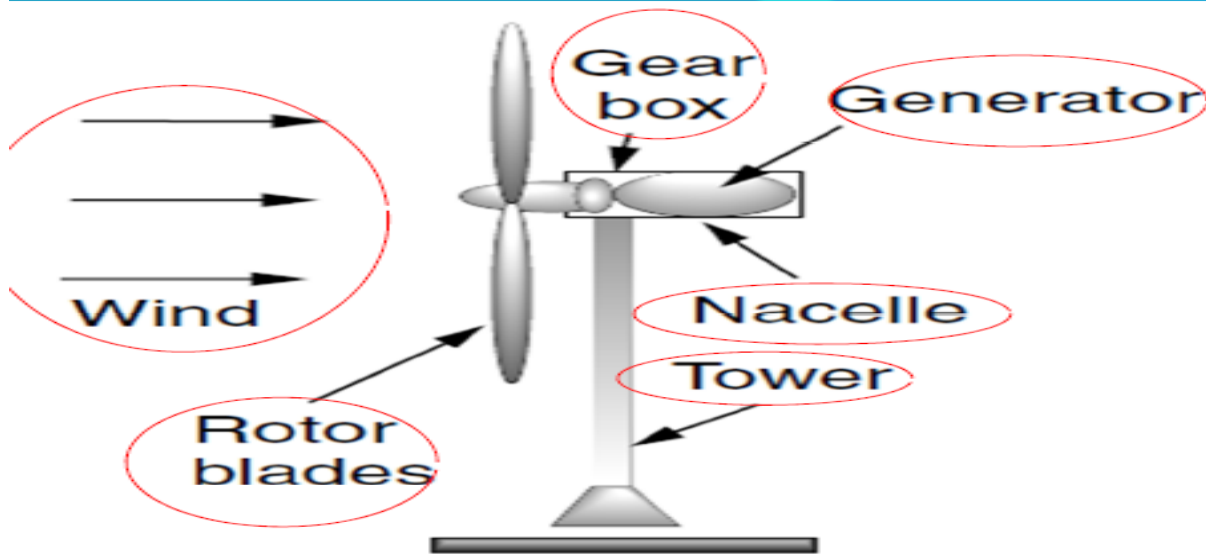
در شکل ۱-۲ شمای کلی از یک سیستم توربین بادی با ژنراتور القایی دوسو تغذیه (DFIG) به همراه بخش های مختلف آن نشان داده شده است. به طور کلی تجهیزات مختلف توپین های بادی را می توان به دو زیر بخش شامل بخش های مکانیکی و الکتریکی تقسیم بندی کرد که در ادامه به بررسی هر یک پرداخته می شود.



شکل ۱-۲- بخش های مختلف توربین بادی با DFIG

۲.۱.۱ تجهیزات مکانیکی

این تجهیزات وظیفه ی تبدیل انرژی باد به صورت چرخشی و تبدیل سرعت این چرخش به حد متعارف و نامی ژنراتور و به عبارت دیگر آماده سازی این انرژی برای اعمال به شفت ژنراتور را برعهده دارند.



شکل ۲-۲ بخش‌های مکانیکی توربین بادی

در شکل ۲-۲ این بخش‌ها قابل مشاهده می‌باشند. این تجهیزات شامل موارد زیر می‌باشد:

(۱) پایه ۱: وظیفه‌ی نگه‌داری برج و دیگر تجهیزات مربوطه، در ارتفاع مشخص و تحمل تنش‌های وارده از باد به توربین را بر عهده دارد. اندازه و شکل این بخش به وزن تجهیزات و میزان تنش وارده بستگی دارد.

(۲) برج ۲: سرعت باد در ارتفاع بالا یکنواخت‌تر از سطح زمین بوده و نیز تأثیر ناهمواری‌های زمین کمتر است. به همین دلیل بهتر است تجهیزات در ارتفاع مشخص که به شرایط منطقه بستگی دارد قرار گیرند که برای این کار از برج استفاده می‌شود.

(۳) نشیمنگاه: ۳ نشیمنگاه مکانی است که تجهیزاتی نظیر پره‌ها، ژنراتور، گیربکس و شفت در داخل آن قرار می‌گیرند. وظیفه‌ی گیربکس، تبدیل سرعت پره‌ها به سرعتی در حدود سرعت نامی ژنراتور است. در واقع به دلیل سرعت پایین چرخش پره‌ها، معمولاً استفاده از یک گیربکس ثابت برای رساندن این سرعت به مقدار نامی سرعت ژنراتور، لازم است.

¹ base

² tower

³ Nacelle