

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

دانشگاه تفرش

دانشکده مهندسی برق

پایان نامه کارشناسی ارشد

انتخاب استراتژی مناسب کنترل و طراحی کنترل کننده برای DFIG متصل به شبکه، در شرایط تغییر همزمان توان ورودی و خروجی

استاد راهنما:

آقای دکتر مجتبی پیشوایی

استاد مشاور:

آقای دکتر علی مددی

دانشجو:

آرش عابدی

۱۳۸۹

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

دانشگاه تفرش

دانشکده مهندسی برق

پایان نامه کارشناسی ارشد

**انتخاب استراتژی مناسب کنترل و طراحی کنترل
کننده برای DFIG متصل به شبکه، در شرایط تغییر
همزمان توان ورودی و خروجی**

استاد راهنما:

آقای دکتر مجتبی پیشوایی

استاد مشاور:

آقای دکتر علی مددی

دانشجو:

آرش عابدی

۱۳۸۹

تقدیم به:

پدر و مادر عزیزم

و

همسر مهربانم

تقدیر و تشکر

بدینوسیله از زحمات بی‌دریغ جناب آقای دکتر مجتبی پیشوایی به عنوان استاد راهنما و نیز استاد عالیقدر جناب آقای دکتر علی مددی استاد راهنمای دوم و همچنین جناب آقای دکتر همایون مشگین کلک، استاد مشاور اینجانب که در به انجام رساندن این پایان‌نامه با بردباری و توانایی‌های علمی خود اینجانب را راهنمایی نموده‌اند نهایت تشکر و قدردانی می‌نمایم.

چکیده:

ژنراتورهای القایی با توجه به مزیت‌های اقتصادی و فنی، کاربرد گسترده‌ای در تولید انرژی الکتریکی بخصوص در نیروگاه‌های بادی دارند. در این میان در سال‌های اخیر، ژنراتورهای القایی دوسوتغذیه (DFIG)، به دلیل انعطاف پذیری در کنترل و کاهش هزینه‌های مربوط به ادوات الکترونیک قدرت، مورد توجه بیشتری قرار گرفته و کاربرد آنها به سرعت در حال افزایش است. مقالات متعددی پیرامون کنترل پارامترهای ژنراتورهای القایی دوسوتغذیه توسط مولفان و محققان ارائه شده است. در این پایان‌نامه، هدف، طراحی کنترل‌کننده‌ایست که بتواند عملکرد مطلوبی را در تغییرات گسترده متغیرهای سیستم داشته باشد و همچنین توانایی عملکرد مطلوب در کنترل ولتاژ و کنترل مجزای توان اکتیو و راکتیو را به صورت توأمان دارا باشد. به علاوه، در هنگام بروز خطا، با هدف نگه‌داشتن ژنراتور در مدار و در عین حال، محافظت از آسیب رسیدن به مبدل قدرت متصل به روتور، مقاومت کروبار مناسب، تعیین شده است، که در زمان مناسب توسط کنترل‌کننده به مدار روتور اضافه گشته و نیز در زمان مناسب پس از رفع خطا از سیستم حذف می‌شود. به این ترتیب، کنترل‌کننده قادر است، هم در تغییرات پارامترهای ورودی سیستم نظیر تغییرات توان باد و هم در تغییرات پارامترهای خروجی سیستم، نظیر تغییرات بار، ولتاژ و یا بروز اتصال کوتاه، عملکرد مطلوبی را از خود نشان دهد. کنترل توان اکتیو و راکتیو ژنراتور از طریق کنترل برداری صورت گرفته است. با توجه به گستره عملکردی که برای کنترل‌کننده پیش‌بینی شده است، باید جهت بهبود رفتار کنترل‌کننده PI (تناسبی-انتگرالگیر) مورد استفاده در کنترل برداری، تمهیداتی اندیشیده شود. زیرا کنترل‌کننده PI در تغییرات گسترده پارامترهای ورودی سیستم، به ویژه در تغییرات همزمان آنها عملکرد متفاوتی را از خود نشان می‌دهد. به همین منظور برای بروز رسانی ضرایب k_p و k_i در کنترل‌کننده PI، یک کنترل‌کننده فازی نیز طراحی و به کار برده شده است. جهت بررسی عملکرد کنترل‌کننده، شبیه‌سازی‌ها در محیط Simulink نرم افزار MATLAB انجام شده است. به این ترتیب کنترل‌کننده طراحی شده در این پایان‌نامه، مزایای کنترل مجزای توان اکتیو و راکتیو، حفاظت روتور و مبدل در حین خطا، انعطاف‌پذیری در تغییرات گسترده متغیرهای سیستم، کنترل همزمان توان ورودی و خروجی و کنترل ولتاژ را خواهد داشت.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
	فصل اول : مقدمه
۱-۱-۱.....	نگاهی اجمالی بر نیروگاه‌های بادی
۲-۱-۲.....	آمار نیروگاه‌های بادی نصب شده در ایران و جهان
۳-۱-۳.....	تولید گسترده (DG) چیست؟
۴-۱-۴.....	بررسی اجمالی ژنراتور القایی دوسو تغذیه
۵-۱-۵.....	ساختار فصول پایان نامه
	فصل دوم - بررسی انواع توربین‌های بادی و معرفی DFIG
۱-۲-۸.....	مقدمه
۲-۲-۸.....	اجزای مختلف یک توربین بادی
۳-۲-۱۰.....	معادلات پایه مربوط به انرژی باد
۴-۲-۱۰.....	محاسبه توان استخراجی از باد
۱-۴-۲-۱۳.....	کنترل پدیده قطع
۲-۴-۲-۱۴.....	کنترل چرخشی ناسل توربین بادی
۳-۴-۲-۱۴.....	کنترل توان با تغییر زاویه پره
۴-۴-۲-۱۴.....	کنترل توان با روش استال غیر فعال
۵-۴-۲-۱۵.....	کنترل استال فعال
۵-۲-۱۵.....	معرفی انواع ژنراتورهای بکار رفته در توربین‌های بادی
۱-۵-۲-۱۶.....	ژنراتورهای القایی
۱-۱-۵-۲-۱۷.....	ژنراتور القایی قفس سنجابی
۲-۱-۵-۲-۱۹.....	ژنراتور القایی روتور سیم پیچی شده
۳-۱-۵-۲-۱۹.....	ژنراتورهای القایی دوسو تغذیه
۲-۵-۲-۲۲.....	ژنراتورهای سنکرون
۱-۲-۵-۲-۲۲.....	ژنراتور سنکرون با تحریک کلاسیک
۲-۲-۵-۲-۲۳.....	ژنراتورهای سنکرون با تحریک آهنربای دائم (PMSG)
۶-۲-۲۳.....	مقایسه انواع ژنراتورهای بکار رفته در نیروگاه‌های بادی
۷-۲-۲۶.....	مدل‌سازی توربین‌های بادی مجهز به DFIG
۱-۷-۲-۲۶.....	مدل آیرودینامیک پره
۲-۷-۲-۲۷.....	مدل جعبه دنده
۳-۷-۲-۲۹.....	مدل ژنراتور القایی دوسو تغذیه DFIG

۳۳	۱۲-۲- جمع بندی
	فصل سوم - بررسی روشهای کنترل و طراحی کنترل کننده برای DFIG متصل به شبکه
۳۴	۱-۳- مقدمه
۳۵	۲-۳- دیاگرام کلی کنترل روتور
۳۷	۳-۳- کنترل میدل های بخش شبکه و بخش روتور
۳۷	۱-۳-۳- کنترل میدل بخش شبکه
۴۱	۱-۱-۳-۳- مدل لینک DC
۴۱	۲-۳-۳- کنترل میدل بخش روتور
۴۶	۴-۳- کنترل DFIG در طول اتصال کوتاه
۴۸	۱-۴-۳- تعیین مقاومت کربار بهینه
۵۲	۵-۳- روش های کنترلی غیرخطی و بهینه
۵۲	۱-۵-۳- کنترل کننده های فازی
۵۳	۱-۱-۵-۳- مجموعه های فازی
۵۳	۲-۱-۵-۳- توابع عضویت
۵۳	۳-۱-۴-۴- قوانین فازی
۵۸	۲-۵-۳- کنترل کننده فازی-عصبی
۶۰	۶-۳- جمع بندی و طرح نهایی کنترل کننده
۶۲	۱-۶-۳- محدودیت ظرفیت گرمایی
۶۲	۲-۶-۳- مقاومت کربار
۶۲	۳-۶-۳- طراحی کنترل کننده فازی
۶۴	۱-۳-۶-۳- تعیین توابع عضویت ورودی
۶۴	۲-۳-۶-۳- تعیین توابع عضویت خروجی
۶۵	۳-۳-۶-۳- تعیین قوانین فازی
	فصل چهارم - شبیه سازی کنترل کننده DFIG متصل به شبکه
۶۷	۱-۴- کنترل مستقل توان های اکتیو و راکتیو
۶۷	۲-۴- بررسی عملکرد کنترل کننده فازی
۷۰	۳-۴- تغییرات سرعت باد
۷۳	۴-۴- عملکرد در طول اتصال کوتاه متقارن
۷۵	۵-۴- بررسی مرتبه مدل در طول افت ولتاژ
	فصل پنجم - نتیجه گیری
۷۹	۱-۵- نتیجه گیری
۸۰	۲-۵- پیشنهادات
۸۱	پیوست
۸۶	منابع

فهرست جداول

عنوان	صفحه
جدول (۱-۱): ظرفیت نصب شده در نیروگاه منجیل و رودبار.....	۳
جدول (۲-۱): ظرفیت نصب شده در نیروگاه بینالود.....	۴
جدول (۱-۲): حالات عملکرد ممکن برای ژنراتور القایی دوسو تغذیه.....	۲۱
جدول (۲-۲): مزایا و معایب انواع ژنراتورها.....	۲۴
جدول (۳-۲): مدل ژنراتورهای القایی با مراتب مختلف.....	۳۳
جدول (۱-۳): قوانین فازی تعیین مقادیر ولتاژ و توان مربوط به کنترل کننده فازی.....	۵۵
جدول (۲-۳): قوانین فازی مربوط به تعیین ضرایب کنترل کننده PI در کنترل ترکیبی فازی-PI.....	۵۷
جدول (۳-۳): توضیح علائم اختصاری مربوط به توابع عضویت نمودارهای بخش (۳-۵).....	۵۸
جدول (۴-۳): ضرایب k_p و k_I از پیش تنظیم شده.....	۶۴
جدول (۵-۳): قوانین فازی در نظر گرفته شده برای کنترل کننده فازی.....	۶۵
جدول (۱-۴): تاثیر عوامل مختلف مدل سازی بر نتایج شبیه سازی.....	۷۸

فهرست اشکال

صفحه	عنوان
۲.....	شکل (۱-۱): رشد استفاده از انرژی باد در تولید انرژی الکتریکی.....
۱۰.....	شکل (۱-۲): اجزای بکار رفته در یک نمونه از توربین بادی.....
۱۱.....	شکل (۲-۲): جریان باد در اطراف توربین.....
۱۸.....	شکل (۳-۲): نحوه اتصال ژنراتورهای القایی قفس سنجابی به شبکه.....
۱۸.....	شکل (۴-۲): نحوه اتصال سیستم راه‌انداز به ژنراتور القایی.....
۲۰.....	شکل (۵-۲): نحوه اتصال DFIG به شبکه.....
۲۱.....	شکل (۶-۲): دیاگرام عملکرد یک ژنراتور DFIG (الف) زیر سنکرون (ب) فوق سنکرون.....
۲۲.....	شکل (۷-۲): نحوه اتصال ژنراتورهای SG.....
۲۷.....	شکل (۸-۲): مدل نظری جعبه دنده شامل سرعت، گشتاور و میرایی‌های رتور و ژنراتور.....
۲۹.....	شکل (۹-۲): مدار معادل DFIG.....
۳۲.....	شکل (۱۰-۲): بلوک دیاگرام شبیه‌سازی ژنراتور به روش فضای حالت.....
۳۵.....	شکل (۱-۳): نحوه اتصال مبدل قدرت به DFIG و شبکه.....
۳۶.....	شکل (۲-۳): کنترل اعمال شده در سمت روتور ژنراتور.....
۳۷.....	شکل (۳-۳): دیاگرام بلوکی کنترل‌کننده مبدل بخش شبکه.....
۳۸.....	شکل (۴-۳): مبدل بخش شبکه.....
۳۹.....	شکل (۵-۳): انتقال قاب ساکن در امتداد موقعیت مکانی بردار ولتاژ استاتور.....
۴۰.....	شکل (۶-۳): بلوک دیاگرام مبدل بخش شبکه با کنترل برداری.....
۴۱.....	شکل (۷-۳): بلوک دیاگرام لینک DC.....
۴۲.....	شکل (۸-۳): دیاگرام بلوکی کنترل‌کننده مبدل بخش روتور.....
۴۳.....	شکل (۹-۳): مشخصه کنترل ولتاژ-جریان راکتیو پایانه DFIG.....
۴۴.....	شکل (۱۰-۳): بلوک دیاگرام کامل کنترل‌کننده مبدل بخش رتور، در اتصال با ژنراتور و مبدل قدرت.....
۴۴.....	شکل (۱۱-۳): نحوه انتقال قاب‌های موردنظر به قابی در راستای محور d شار استاتور.....
۴۷.....	شکل (۱۲-۳): نحوه اتصال مقاومت کربار به ژنراتور.....
۵۴.....	شکل (۱۳-۳): دیاگرام کلی کنترل‌کننده فازی بخش ۳-۵-۱-الف.....
۵۶.....	شکل (۱۴-۳): دیاگرام کلی کنترل فازی-برداری DFIG.....
۵۹.....	شکل (۱۵-۳): ساختار شبکه فازی-عصبی نمونه‌ای با دو ورودی X_1 و X_2
۵۹.....	شکل (۱۶-۳): محل استقرار کنترل‌کننده فازی-عصبی.....
۶۱.....	شکل (۱۷-۳): دیاگرام بلوکی و ساده شده کنترل‌کننده DFIG.....

شکل (۳-۱۸): تولید سیگنال مرجع توان راکتیو با هدف دستیابی به ضریب توان مطلوب ۶۲

شکل (۴-۱): سیستم مورد استفاده در شبیه‌سازی ۶۶

فهرست نمودارها

عنوان	صفحه
نمودار (۲-۱): نمودار ضریب عملکرد روتور برحسب نسبت سرعت باد ورودی و خروجی توربین	۱۲
نمودار (۲-۲): منحنی توان - سرعت توربین	۱۵
نمودار (۲-۳): منحنی توان سرعت با دو سرعت سنکرون	۱۷
نمودار (۲-۴): نمودار دایره‌ای درصد هزینه تقریبی قسمت‌های مختلف یک توربین بادی	۲۵
نمودار (۲-۵): نمودار منحنی نصب انواع ژنراتورها در نیروگاه‌های بادی تا سال ۲۰۰۵	۲۵
نمودار (۲-۶): نمودار C_p بر حسب λ برای مقادیر مختلف زاویه‌ی پره	۲۷
نمودار (۳-۱): الزامات در طول افت ولتاژ در شبکه NERC	۴۷
نمودار (۳-۲): بیشینه جریان روتور به ازای تغییر مقاومت کربار	۴۸
نمودار (۳-۳): مساحت زیر منحنی جریان روتور در طول خطا به ازای تغییر مقاومت روتور	۴۹
نمودار (۳-۴): تغییر بیشینه ولتاژ فاز روتور به ازای تغییر مقاومت کربار	۵۰
نمودار (۳-۵): منحنی گشتاور در طول خطا به ازای افزایش مقاومت روتور	۵۰
نمودار (۳-۶): مساحت زیر منحنی گشتاور در طول خطا به ازای افزایش مقاومت روتور	۵۱
نمودار (۳-۷): مساحت توان راکتیو مصرفی بعد از برطرف شدن خطا به ازای افزایش مقاومت کربار	۵۱
نمودار (۳-۸): نمودارهای توابع عضویت مربوط به یک کنترل‌کننده فازی قسمت ۳-۵-۱ الف	۵۴
نمودار (۳-۹): توابع عضویت ورودی و خروجی‌های کنترل‌کننده فازی	۵۷
نمودار (۳-۱۰): توابع عضویت در نظر گرفته شده برای ورودی‌های بخش فازی کنترل‌کننده فازی-عصبی	۵۹
نمودار (۳-۱۱): توابع عضویت ورودی‌های کنترل‌کننده فازی طراحی شده	۶۳
نمودار (۳-۱۲): توابع عضویت مربوط به ضریب K_p	۶۳
نمودار (۳-۱۳): نمودار توابع عضویت مربوط به ضریب K_i	۶۳
نمودار (۴-۱): منحنی مشخصه توان تولیدی بر حسب سرعت باد	۶۶
نمودار (۴-۲): کنترل مستقل در تغییرات مقادیر مرجع توان اکتیو و راکتیو	۶۷
نمودار (۴-۳): منحنی خطا در تولید توان‌های اکتیو و راکتیو	۶۷
نمودار (۴-۴): منحنی تغییرات دامنه جریان استاتور در تغییرات توان اکتیو و راکتیو استاتور	۶۸
نمودار (۴-۵): منحنی تغییرات مولفه‌های متعامد جریان روتور	۶۸
نمودار (۴-۶): منحنی جریان لحظه‌ای فاز a استاتور	۶۹
نمودار (۴-۷): منحنی گشتاور الکتریکی ژنراتور	۶۹
نمودار (۴-۸): توان اکتیو و راکتیو تولیدشده در شبیه‌سازی با کنترل‌کننده فازی-PI	۷۰
نمودار (۴-۹): منحنی خطا در تولید توان‌های اکتیو و راکتیو با استفاده از کنترل‌کننده فازی-PI	۷۰

- نمودار (۴-۱۰): منحنی تولید توان اکتیو و راکتیو در حالت اول..... ۷۱
- نمودار (۴-۱۱): منحنی خطا در تولید توان اکتیو و راکتیو در حالت اول..... ۷۱
- نمودار (۴-۱۲): منحنی تغییرات دامنه جریان استاتور در حالت اول..... ۷۱
- نمودار (۴-۱۳): منحنی جریان لحظه‌ای استاتور در حالت اول..... ۷۲
- نمودار (۴-۱۴): منحنی تغییرات مولفه‌های متعامد جریان روتور در حالت اول..... ۷۲
- نمودار (۴-۱۵): منحنی تغییرات تولید گشتاور الکتریکی در حالت اول..... ۷۲
- نمودار (۴-۱۶): منحنی تغییرات تولید توان های اکتیو و راکتیو با استفاده از کنترل کننده فازی-PI..... ۷۳
- نمودار (۴-۱۷): منحنی تغییرات خطا در تولید توان های اکتیو و راکتیو با استفاده از کنترل کننده فازی-PI..... ۷۳
- نمودار (۴-۱۸): منحنی تغییرات جریان روتور در سه مقدار مختلف مقاومت کروبار..... ۷۴
- نمودار (۴-۱۹): منحنی تغییرات ولتاژ مقاومت کروبار در سه مقدار مختلف مقاومت کروبار..... ۷۴
- نمودار (۴-۲۰): منحنی تغییرات گشتاور الکتریکی در سه مقدار مختلف مقاومت کروبار..... ۷۴
- نمودار (۴-۲۱): منحنی توان راکتیو پس از رفع خطا در سه مقدار مختلف مقاومت کروبار..... ۷۵
- نمودار (۴-۲۲): مقایسه اثر مدل روتور بر جریان استاتور در طول افت ولتاژ..... ۷۵
- نمودار (۴-۲۳): مقایسه اثر مدل روتور بر سرعت روتور در طول افت ولتاژ..... ۷۶
- نمودار (۴-۲۴): منحنی ضریب عملکردی روتور در طول افت ولتاژ..... ۷۶
- نمودار (۴-۲۵): مقایسه تغییر توان خروجی در طول افت ولتاژ..... ۷۷
- نمودار (۴-۲۶): گشتاور الکترومغناطیسی به ازای مرتبه‌های مختلف ژنراتور..... ۷۸
- نمودار (۴-۲۷): جریان استاتور به ازای مرتبه‌های مختلف ژنراتور..... ۷۸

فصل اول

مقدمه

۱-۱- نگاهی اجمالی بر نیروگاه‌های بادی

مصرف گسترده انرژی حاصل از سوخت‌های فسیلی اگر چه رشد سریع اقتصادی جوامع مدرن را میسر نمود، اما پیامدهای نشر آلاینده‌های حاصل از احتراق و گرمایش روز افزون جو کره زمین، جهان را با تغییرات مخاطره آمیزی مواجه کرده است.

گسترش نیروگاه‌های کوچک در دنیا، پس از بحران انرژی در اوایل دهه ۷۰ میلادی رشد چشمگیری داشت. این نیروگاهها اغلب بر مبنای استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر عمل می‌کنند. در این میان آب و باد به عنوان منابع انرژی ارزان و تجدیدپذیر بیشتر مورد توجه قرار گرفتند. سازگار کردن منابع تجدیدپذیر با سیستم فعلی مصرفی انرژی در جهان هنوز با مشکلاتی همراه است، که بررسی و رفع آنها حجم عظیمی از تحقیقات علمی در دهه‌های اخیر جهان را به خود اختصاص داده است.

اولین قدم در طراحی یک نیروگاه کوچک، انتخاب نوع ژنراتور است. در بیشتر موارد از بین ژنراتورهای القایی و سنکرون باید یکی را بعنوان مولد انتخاب کرد. ابتدا ژنراتورهای القایی خود تحریک قفسه سنجابی، با توجه به فاکتورهایی مانند ساختمان ساده و بدون جاروبک روتور، پایین بودن هزینه واحد، قابلیت نگهداری بالا، و عدم وابستگی به یک تحریک dc جداگانه، مورد توجه بیشتری قرار گرفتند. اما مشکل عمده این ژنراتورها و در کل ژنراتورهای القایی، نیاز آنها به یک منبع خارجی برای تامین میدان مغناطیسی است و در صورت اتصال به شبکه، توان راکتیو نسبتاً زیادی را از شبکه دریافت خواهند کرد [۱].

اما ژنراتورهای القایی روتورسیم پیچی شده^۱، با انتخاب یک روش کنترلی مناسب می‌توانند، گزینه بهتری برای تولید توان در نیروگاههای کوچک باشند. روش‌های مختلفی برای کنترل یک ژنراتور القایی وجود دارد که عمدتاً به دو دسته کنترل اسکالر و کنترل برداری^۲ تقسیم می‌شوند. در روش کنترل اسکالر امکان کنترل مستقل میدان و گشتاور الکتریکی وجود ندارد، از شاخه‌های کنترل اسکالر می‌توان کنترل لغزشی، کنترل ولتاژ فرکانس $\left(\frac{V}{F} = \text{cte}\right)$ ، کنترل شار و ... را نام برد.

اصول کنترل برداری، بر مبنای تقریب عملکرد ماشین القایی به ماشین DC می‌باشد و به وسیله تقسیم جریان به دو مولفه عمود بر هم انجام می‌شود. یک مولفه، مولد شار (میدان) بوده و همواره در راستای حرکت میدان می‌باشد و مولفه دیگر که همواره بر آن عمود است، مولفه مولد گشتاور می‌باشد. از آنجائیکه میدان با سرعت سنکرون در حال چرخش است این جریانها نیز باید در یک دستگاه مرجع باشند که با سرعت سنکرون در حال چرخش است [۲-۴].

¹ - Wound rotor Induction Generator

² - Vector Control

توربین‌های بادی، انرژی جنبشی مکانیکی باد را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. توربین‌های بادی می‌توانند بصورت متصل به شبکه و منفصل از آن بکار گرفته شوند، اما بیشترین ظرفیت توربین‌های بکار گرفته شده در سالهای اخیر بصورت متصل به شبکه بوده است. در نواحی دور افتاده بیشتر از توربین‌های منفصل استفاده می‌شود. در حال حاضر شرکت وستاس (Vestas)، انرکون (Enercon) و شرکت ان ای جی مایکون (NEG Micon) هستند که بیشترین درصد از بازار جهان را در اختیار دارند، اطلاعاتی که از بررسی بازار تکنولوژی باد در آلمان بعنوان کشوری پیشتاز در صنعت باد جهان بدست آمده است، بیانگر روند رو به رشد این صنعت در سال‌های اخیر می‌باشد [۵]. توربین‌های بادی را می‌توان به دو دسته کلی تقسیم کرد:

۱- توربین‌های بادی با سرعت ثابت

۲- توربین‌های بادی با سرعت متغیر

برای توربین‌های بادی با سرعت ثابت، ژنراتور مورد استفاده معمولاً آسنکرون است و غالباً بصورت مستقیم به شبکه متصل می‌شود. یک توربین بادی با سرعت متغیر عموماً این ویژگی را دارد که در محدوده وسیعی از تغییرات سرعت باد بکار خود ادامه دهد و بازدهی نسبتاً بیشتری نسبت به نوع اول دارد. در انواع پیشرفته توربین‌های بادی می‌توان جهت‌گیری آن را نسبت به وزش باد نیز تنظیم کرد که شامل ساختمان پیچیده‌تر و هزینه گرانتری خواهد بود. مزایای مختلفی جهت استفاده از توربین‌های بادی با سرعت متغیر وجود دارد. از جمله این مزیت‌ها می‌توان به کاهش نویز صوتی (Acoustic) و امکان کنترل توان‌های اکتیو و راکتیو اشاره کرد [۶].

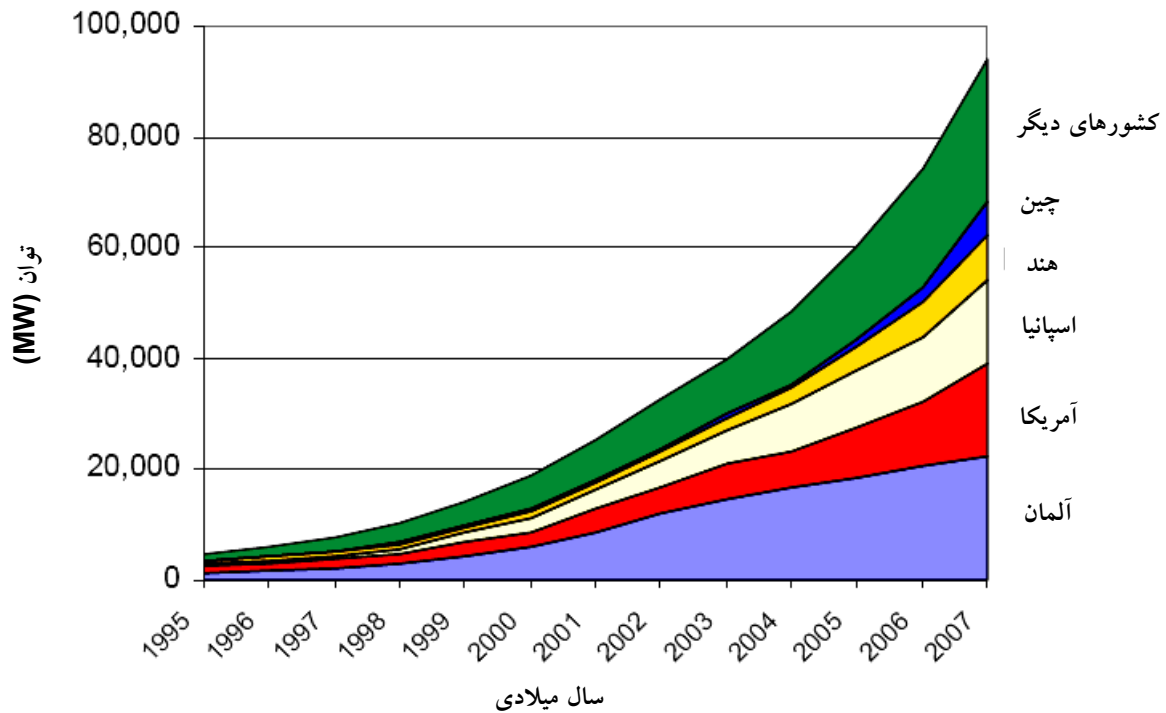
مزیت کاهش استرس ساختار مکانیکی و بهره برداری از سرعت‌های مختلف باد در [۷] بررسی شده است. بازده تولید انرژی در توربین‌های بادی با سرعت متغیر، ۲۸ تا ۳۰ درصد بیشتر از توربین‌های با سرعت ثابت است. معمولی‌ترین و به صرفه‌ترین ژنراتور مورد استفاده در توربین‌های بادی سرعت متغیر، ژنراتور القایی دوسو تغذیه^۱ (DFIG) می‌باشد [۸]. منظور از ژنراتور القایی دوسو تغذیه، ژنراتور القایی است که دارای روتور سیم پیچی شده می‌باشد و مدار روتور آن به وسیله ادوات الکترونیک قدرت به شبکه متصل است. در نتیجه این نوع ژنراتور برخلاف ژنراتور القایی قفس سنجابی، قادر خواهد بود توان راکتیو مورد نیاز خود را از شبکه دریافت نماید. از علل عمده استفاده از DFIG، می‌توان به ارزان بودن مبدل، کاهش تلفات، تولید توان با استفاده از روتور و استاتور و عدم نیاز به بانک خازنی نام برد. در [۹] بررسی شده است که انرژی بدست آمده از باد می‌تواند در توربین بادی مجهز به DFIG، تا حدود ۶۰٪ نسبت به سیستم توربین بادی سرعت ثابت افزایش داشته باشد. در مراجع [۱۰-۱۲]، مطالعات و محاسبات مربوط به بازده DFIG بررسی شده است. در [۱۳]، پایداری DFIG با نشان دادن مدل دینامیکی DFIG، مورد مطالعه قرار گرفته است.

۱-۲- آمار نیروگاه‌های بادی نصب شده در ایران و جهان

با توجه به مزایای موجود در بکارگیری از منابع بادی، کشورها بطور قابل توجهی در این زمینه سرمایه‌گذاری کرده‌اند. گزارش منتشر شده توسط انجمن انرژی باد جهان^۲ GWEC، در فوریه ۲۰۰۸ که شامل ارقام مربوط به توسعه انرژی باد در بیش از ۷۰ کشور در سراسر دنیا می‌باشد، نشان می‌دهد که در این سال، میزان نصب توربین بادی در دنیا به ۲۰۰۷۳ مگاوات رسیده است. در شکل (۱-۱)، انرژی بدست آمده از نیروگاه‌های بادی تا سال ۲۰۰۷ و به ازای سهم کشورهای پیشتاز در این زمینه نشان داده شده است. با توجه به شکل (۱-۱)، آلمان، آمریکا و اسپانیا از جمله کشورهایی می‌باشند که بیشترین میزان توان بادی نصب شده را دارند.

^۱ - Doubly-Fed Induction Generator

^۲ - Global Wind Energy Council



شکل (۱-۱): رشد استفاده از انرژی باد در تولید انرژی الکتریکی

مطالعات و محاسبات انجام شده در زمینه تخمین پتانسیل انرژی باد در ایران نشان می‌دهد که میزان ظرفیت اسمی سایت‌ها، در ۲۶ منطقه از کشور، (شامل بیش از ۴۵ سایت مناسب)، با در نظر گرفتن راندمان کلی ۳۳٪، در حدود ۶۵۰۰ مگاوات است.

نیروگاه بادی رودبار و منجیل، اولین نیروگاه بادی است که در ایران، جهت تولید انرژی الکتریکی مورد بهره‌برداری قرار گرفته است. در جدول (۱-۱)، اطلاعاتی در مورد ظرفیت مزارع بادی نصب شده در سایت‌های منجیل، هرزیول و سیاهپوش در استان گیلان، در سال‌های مختلف آمده است.

جدول (۱-۱): ظرفیت نصب شده در نیروگاه منجیل و رودبار

تاریخ	مجموع ظرفیت نصب شده (مگاوات)	تعداد	توان نامی توربین بادی (کیلو وات)	ردیف
۱۳۸۲	۱۲	۲۸	۵۵۰ & ۳۰۰	۱
۱۳۸۴	۳	۱۰	۳۰۰	۲
۱۳۸۵	۵/۵	۱۰	۵۵۰	۳
۱۳۸۵	۱۴/۵۲	۲۲	۶۶۰	۴
۱۳۸۶	۱۱/۲۲	۱۷	۶۶۰	۵
۴۶/۲۴		مجموع ظرفیت نصب شده (مگاوات)		

نیروگاه بادی بینالود با هزینه ۲۸۰ میلیارد ریال و در زمینی به مساحت ۷۰۰ هکتار با ظرفیت اسمی ۲۸/۳ مگاوات شامل ۴۳ دستگاه توربین بادی ۶۶۰ کیلوواتی ساخته شده است، براساس گزارش سازمان انرژی‌های نو ایران، ساخت این نیروگاه به گونه‌ای است که سبب صرفه‌جویی ۲۰ میلیون مترمکعب گاز و جلوگیری از تولید گاز آلاینده‌ی دی‌اکسید کربن به میزان ۴۰ میلیون مترمکعب در سال خواهد شد. در جدول (۱-۲)، ظرفیت مزارع بادی نصب شده در این سایت، واقع در استان خراسان رضوی نشان داده شده است.

جدول (۱-۲): ظرفیت نصب شده در نیروگاه بینالود

تاریخ	مجموع ظرفیت نصب شده (مگاوات)	تعداد	توان نامی توربین بادی (کیلووات)	ردیف
۱۳۸۴ & ۱۳۸۳	۱۳/۲	۲۰	۶۶۰	۱
۱۳۸۶	۱۵/۱۸	۲۳	۶۶۰	۲
۲۸/۳۸		مجموع ظرفیت نصب شده (مگاوات)		

۱-۳- تولید گسترده^۱ (DG) چیست؟

طی دهه‌های گذشته، توجهات اقتصادی کشورهای جهان نسبت به مولدهای پراکنده نسبتاً همسو شده است. انجمن IEEE^۲، تولید گسترده را اینگونه تعریف می‌کند: ((مولدهایی که برق را توسط تاسیساتی تولید می‌کنند که کاملاً کوچکتر از نیروگاههای مستقر مرکزی هستند)). تعریفی که توسط CIRED^۳ در سال ۱۹۹۹ بر مبنای جمع‌آوری پرسشنامه‌های فرستاده شده به تعدادی کشورها، ارائه شده است، نشان می‌دهد که برخی کشورها این مولدها را براساس سطح ولتاژ تعریف می‌کنند، در حالیکه برخی دیگر از این اصل حمایت می‌کنند که مولدهای پراکنده به مدارهایی متصل می‌شوند که بارهای مصرف‌کننده را به طور مستقیم تغذیه می‌کنند.

۱-۴- بررسی اجمالی ژنراتور القایی دوسو تغذیه

با توجه به نحوه کاربرد ژنراتور القایی دوسو تغذیه در شبکه‌های قدرت و اتصال مستقیم استاتور این ژنراتورها به سیستم قدرت، این ژنراتورها به تغییرات شبکه حساس می‌باشند. تغییرات شبکه را بطور کلی به دو صورت تغییرات فرکانس و یا تغییر در ولتاژ شبکه می‌توان در نظر گرفت، تغییرات فرکانس در نتیجه‌ی عدم تعادل بین تولید و مصرف و یا ورود و خروج یک بار بزرگ از سیستم قدرت به وجود می‌آید و بر عملکرد واحدهای متصل شده به سیستم قدرت اثر می‌گذارد. تحلیل این موضوع بر نیروگاه‌های بادی مختلف، متفاوت است. در حالت کنترلی معمول ژنراتورهای القایی دوسو تغذیه به دلیل داشتن مبدل الکترونیک قدرت، تاثیر چندانی از تغییرات فرکانسی نمی‌پذیرند. بحث پاسخ اینرسی، تغییرات سرعت باد و فرکانس و عملکرد ژنراتور در تبادل توان در طول انحراف فرکانسی، از موارد تحقیق است.

^۱ -Distributed Generation

^۲ -Institute of Electrical and Electronics Engineers

^۳ -Congress International des Réseaux Electriques de Distribution

در مرجع [۱۴]، پاسخ گشتاور ژنراتور القایی دو سو تغذیه و ژنراتور القایی قفس سنجابی، به تغییرات فرکانسی شبکه مقایسه شده است. این مرجع نشان می‌دهد، ژنراتور القایی دوسو تغذیه بدون کنترل اضافی، حساسیت زیادی نسبت به تغییرات فرکانس شبکه از خود نشان نمی‌دهد. در مرجع [۱۵]، عامل دیگری که برای ژنراتور به عنوان اغتشاش در نظر گرفته می‌شود، افت ولتاژ است. افت ولتاژ عمدتاً به دلیل عدم توانایی تامین توان راکتیو مورد نیاز شبکه پدید می‌آید و می‌تواند بصورت افت ولتاژ متعادل و نامتعادل باشد. شدت افت ولتاژ روی عملکرد ژنراتور القایی تاثیرگذار است. اگر افت ولتاژ در حدی باشد که به ادوات مبدل الکترونیک قدرت آسیب برساند، سیستم تغییر حالت می‌دهد، معمول‌ترین روش در این حالت، اتصال مقاومت کربوار (Crowbar) به سیم‌پیچی روتور است.

در مرجع [۱۶]، معرفی مدل مکانیکی توربین بطور جامع پرداخته شده و در مرجع [۱۷]، عملکرد ژنراتور در طول خطا را با در نظر گرفتن همین مدل بررسی کرده است، همچنین در مراجع [۱۸-۲۰]، اثر مرتبه مدلسازی ژنراتور بر نتایج افت ولتاژ نیز بررسی شده است.

در طول افت ولتاژهای کم، سیستم کنترل اعمالی به روتور، در نحوه عملکرد ژنراتور موثر است. در ادامه، اثر استراتژی‌های کنترلی مختلف بر عملکرد ژنراتور در یک سیستم قدرت، با افزایش پله‌ای بار بررسی شده است. در این زمینه مقالات گوناگون در مورد توانایی تولید توان، راکتیو این ژنراتورها در طول تغییرات شبکه و خطاها بحث کرده‌اند. بعنوان مثال مراجع [۲۱،۲۲] از این دسته مقالات می‌باشند. استراتژی‌های مختلف کنترل توان اکتیو و راکتیو ژنراتور القایی دوسو تغذیه، در مقالات گوناگون از جمله مراجع [۲۳،۲۴،۴]، مورد مطالعه قرار گرفته شده و در مرجع [۲۵]، مقایسه‌ای بین روش‌های مختلف کنترل توان DFIG بصورت مشروح انجام شده است. در [۲۶]، یک سیستم کنترلی بیرونی، برای بهبود عملکرد کنترل توان DFIG پیشنهاد شده است. در مراجع [۲۷-۲۹]، برای بهبود عملکرد سیستم کنترلی و افزایش دقت در تعیین مقدار ضرائب کنترل‌کننده‌های تناسبی و مشتق‌گیر از سیستم‌های استنتاج فازی^۱ استفاده شده و نتایج شبیه‌سازی‌ها نیز با روش‌های کنترل کلاسیک مورد مقایسه و بررسی قرار گرفته است.

برای طراحی یک کنترل‌کننده خوب و ایده‌آل، باید سعی شود تا بدترین شرایطی را که یک سیستم تحت کنترل، در طول عملکرد خود ممکن است با آن مواجه شود، پیش‌بینی کرد و راهکارهای لازم را برای مواجهه با این شرایط در سیستم کنترلی ارائه نمود. در مقالات و تالیفاتی که در زمینه‌ی کنترل پارامترهای ژنراتورهای القایی دوسو تغذیه ارائه گردیده است، عملکرد کنترل‌کننده تنها در تغییرات محدودی، به عنوان مثال، تنها در تغییرات سرعت باد و یا فقط در تغییرات پارامترهای شبکه بررسی شده‌اند، به عنوان نمونه در [۸]، عملکرد سیستم کنترلی تنها در تغییرات نقاط تنظیم توان‌های اکتیو و راکتیو بررسی شده است و رفتار کنترل‌کننده در حالتیکه افت ولتاژ ناشی از کمبود توان راکتیو نیز در پایانه‌های ژنراتور رخ دهد، بررسی نشده است. هدف از نگارش این پایان نامه طراحی کنترل‌کننده‌ای برای ژنراتور القایی دوسو تغذیه است که قادر باشد در محدوده وسیعی از تغییرات ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم کنترل، عملکرد مطلوبی داشته باشد. در اینجا منظور از ورودی‌های سیستم کنترلی، مقادیر مرجع توان‌های اکتیو و راکتیو است که به اختیار کاربر به سیستم اعمال می‌شود و در سیستم‌هایی که مرجع توان اکتیو، متناسب با حداکثر انرژی دریافتی از باد تنظیم می‌گردد، منظور از ورودی‌های سیستم کنترلی، تغییرات سرعت باد می‌باشد. تغییرات بار و ولتاژ پایانه‌های ژنراتور متصل به شبکه و وقوع اتصال کوتاه در پایانه‌های آن نیز به عنوان تغییرات و اغتشاشات خروجی کنترل‌کننده در نظر گرفته شده است. در اغلب مراجعی که در این پایان‌نامه مورد بررسی قرار گرفته است، اساس کنترل بر استفاده از کنترل‌کننده‌های PI^2 استوار است. یکی از دلایلی که در بیشتر مقالات، عملکرد سیستم کنترلی، تنها در تغییرات یکی از متغیر-های سیستم نظیر باد و یا توان خروجی بررسی شده است، حساسیت این نوع کنترل‌کننده‌ها به تغییرات گسترده یا پیش‌بینی نشده‌ی سرعت باد، دما و تغییرات همزمان دو یا چند پارامتر می‌باشد. اگر بتوان ضرایب کنترل‌کننده PID را حین این تغییرات

^۱-Fuzzy Inference

^۲- Proportional-Integral Controller

به روز رسانی نمود، می توان دقت عملکرد کنترل کننده را در تغییرات گسترده متغیرها بهبود بخشید. در این پایان نامه، این مشکل با بهره گیری از کنترل کننده فازی، برای به روز رسانی ضرایب کنترل کننده PID، برطرف گردیده است.

به منظور کنترل توان های اکتیو و راکتیو DFIG، می توان دو سیاست کنترلی کلی برای سیستم در نظر گرفت: نخست اینکه هدف از کنترل، تولید مقادیر مرجع توان اکتیو و راکتیوی باشد که با صلاحدید کاربر و نیز با توجه به سرعت باد تعیین می گردد، و یا اینکه هدف کنترل کننده، کنترل ولتاژ پایانه های ژنراتور باشد. برای نیل به هدف نخست، تقریباً در تمامی مراجع، از شیوهی کنترل مجزای^۱ توان های اکتیو و راکتیو استفاده شده است. در این روش تا جاییکه محدودیت های ظرفیت نامی و ظرفیت گرمایی ماشین نقض نشود، تغییرات مقادیر مرجع توان اکتیو یا راکتیو، تاثیری بر مقادیر تولیدی یکدیگر ندارند. کنترل کننده ای که در این پایان نامه طراحی و شبیه سازی شده است، توانایی عملکرد در هر دو روش کنترل ولتاژ و کنترل مجزای توان های اکتیو و راکتیو را دارد. کنترل مجزا به شیوهی کنترل برداری انجام می شود. برای انعطاف پذیری عملکرد کنترل کننده در تغییرات گسترده متغیرهای سیستم، یک کنترل کننده فازی جهت به روز رسانی ضرایب کنترل کننده PID طراحی شده است. به علاوه به منظور افزایش کارایی کنترل کننده و جلوگیری از آسیب دیدگی روتور در شرایط اتصال کوتاه در پایانه های DFIG، از مقاومت کربار در مدار روتور استفاده شده است. به این ترتیب، کنترل کننده، از آسیب رسیدن به مبدل الکترونیک قدرت و نیز از بروز ناپایداری در سیستم جلوگیری می نماید.

۱-۵- ساختار فصول پایان نامه:

در فصل دوم این پایان نامه، پس از بررسی انواع توربین های بادی و اجزای تشکیل دهنده ای آنها، به محاسبات مربوط به انرژی باد و توان استخراجی از آن پرداخته خواهد شد. سپس انواع ژنراتورهای مورد استفاده در نیروگاه های بادی و خصوصاً ژنراتور القایی دوسو تغذیه و مدار معادل آن معرفی خواهد شد. در این فصل به بیان روابط مربوط به استخراج توان از DFIG خواهیم پرداخت و با توجه به اهمیت مدلسازی صحیح ماشین در مطالعات دینامیکی و گذرا، به بررسی و مدلسازی اجزای تشکیل دهنده ای یک نیروگاه بادی مجهز به ژنراتور القایی دوسو تغذیه پرداخته شده است که از آن جمله می توان به مدلسازی توربین، مدلسازی آیرودینامیکی پره ها، جعبه دنده و DFIG اشاره کرد.

در فصل سوم، به طراحی کنترل کننده ژنراتور القایی دوسو تغذیه متصل به شبکه، پرداخته شده است، این فصل شامل بررسی روش های کنترل و معرفی ساختمان، بلوک دیاگرام ها و کلیه بخش های اصلی کنترل کننده نیز می باشد. هدف، طراحی کنترل کننده ای است که بتواند عمل کنترل پارامترهای DFIG را در تغییرات ورودی کنترل کننده، نظیر توان مکانیکی باد و نقاط تنظیم توان مورد نظر کاربر، و نیز در تغییرات متغیرهای خروجی کنترل کننده، نظیر افت ولتاژ، وقوع خطا و همچنین در تغییرات هر دو ای آنها، به نحو مطلوبی انجام دهد. از این رو به منظور توانمندسازی سیستم کنترلی، نحوه ای انتخاب مقدار مناسب مقاومت کربار، برای وارد کردن آن به مدار روتور در زمان لازم نیز، ارائه گردیده است. در این فصل پس از معرفی روش های کنترل برداری و کنترل مستقل، کنترل کننده های غیرخطی و بهینه، نظیر کنترل کننده فازی و عصبی نیز به عنوان کنترل کننده های بیرونی معرفی شده اند و با توجه به نیازمندی های سیستم کنترلی پیشنهادی، یکی از آنها در طراحی کنترل کننده انتخاب شده است.

در فصل چهارم، به شبیه سازی کنترل کننده پیشنهادی پرداخته شده است. در این فصل، ضمن بررسی نتایج شبیه سازی ها، عملکرد کنترل کننده، مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در این فصل، قابلیت های کنترل کننده پیشنهادی شبیه سازی شده در شرایط مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است.

^۱-Separated Control

فصل پنجم به نتیجه‌گیری اختصاص داده شده و در پایان، پیشنهادهایی نیز ارائه گردیده است.

۲-۱- مقدمه:

با توجه به کاربرد گسترده ژنراتورهای القایی دوسو تغذیه در انواع نیروگاههای بادی، بررسی ساختمان این دسته مولدها به همراه انواع توربین‌های مورد استفاده در این نیروگاهها، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار خواهد بود که در این بخش به این مهم

فصل دوم

بررسی انواع توربین‌های بادی و معرفی DFIG

پرداخته خواهد شد. در قدم اول می‌توان توربین‌های بادی را از نظر کاربردی، با دو هدف کاربرد نیروگاهی و غیر نیروگاهی دسته‌بندی کرد.

الف) کاربرد غیر نیروگاهی: در این کاربرد، از توربین بادی جهت پمپ‌های آبکش و شارژ باتری استفاده می‌شود. برای شارژ باتری می‌توان از اتصال ژنراتور جریان مستقیم به توربین استفاده کرد و یا از ژنراتورهای آسنکرون مجهز به یکسوکننده‌های قدرت بهره جست.

ب) کاربرد نیروگاهی: در این کاربرد از توربین‌های بادی بصورت توربین‌های منفرد یا مزارع بادی استفاده می‌شود. توربین‌های منفرد جهت تامین برق مناطق مسکونی تجاری صنفی یا کشاورزی که برق مصرفی، در مجاورت توربین قرار دارد و به شبکه سراسری نیز متصل است استفاده می‌شود. اندازه این توربین‌ها معمولاً در حدود چند ده کیلووات است. منظور از مزارع بادی، چند توربین متمرکز می‌باشد که اندازه معمولی آنها بین ۵۰ تا ۵۰۰ کیلووات است.

۲-۲- اجزای مختلف یک توربین بادی

اجزای مختلف یک توربین بادی را می‌توان بصورت زیر دسته‌بندی کرد:

۱- پره: بیشتر توربین‌ها دارای ۲ یا ۳ پره هستند.

۲- ترمز: سیستم ترمز دیسکی و هیدرولیکی جهت توقف توربین در مواقع اضطراری.

۳- کنترل‌کننده: جهت کنترل راه‌اندازی و توقف توربین در مواقع لازم بکار می‌رود، توربین‌های بادی در سرعت‌های بالای ۲۵ m/s قادر به کار کردن نمی‌باشند. و حتی در سرعت‌های بالای ۳۰ m/s امکان سقوط برج‌ها وجود دارد که این سرعت،