



پایان نامه دوره کارشناسی ارشد در رشته مهندسی برق
گرایش قدرت

کنترل مستقیم توان اکتیو و راکتیو ژنراتور القایی از دو سو تغذیه در شرایط
ولتاژ نامتعادل شبکه با کنترل همزمان سمت روتور و شبکه

استاد راهنما:

جناب آقای دکتر غلامرضا عرب مارکده

استاد مشاور:

جناب آقای دکتر جعفر سلطانی

پژوهشگر:

امیر موید

اسفند ماه ۱۳۹۲



پایان نامه آقای امیر موید جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی برق با عنوان: کنترل مستقیم توان اکتیو و راکتیو ژنراتور القایی از دو سو تغذیه در شرایط ولتاژ نامتعادل شبکه با کنترل همزمان سمت روتور و شبکه در تاریخ ۱۳۹۲/۱۲/۱۶ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

- استاد راهنمای پایان نامه: دکتر غلامرضا عرب تاریخ: امضاء:
- استاد مشاور: دکتر جعفر سلطانی تاریخ: امضاء:
- استاد داور: دکتر نوید رضا ابجدی تاریخ: امضاء:
- استاد داور: دکتر درخشنده تاریخ: امضاء:

کلیه حقوق مادی و معنوی مرتبط با نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری های ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه متعلق به دانشگاه شهرکرد است.

چکیده

تولید روز افزون نیروی برق از انرژی باد در سال های اخیر موجب گردیده تا اکثر کشورها قوانین و استانداردهای جدیدی در خصوص مزارع بادی وضع کنند. هدف از ایجاد این قوانین و استانداردها ارتقاء امنیت اتصال مزارع بادی به شبکه است. بر اساس این استانداردها، ولتاژ شبکه می تواند دارای هارمونیک و مقداری نامتعادلی باشد، که در این شرایط باید توربین بادی به صورت کاملاً موفقیت آمیزی عمل کند. امروزه پرکاربردترین ساختار توربین های بادی سرعت متغیر، ژنراتور القایی از دو سو تغذیه (DFIG) می باشد. اما از آنجایی که استاتور مستقیماً به شبکه متصل می شود، این ساختار نسبت به تغییرات ولتاژ به گونه ای حساس می باشد که یک تغییر کوچک در ولتاژ شبکه می تواند باعث بروز صدمات جدی به ژنراتور شود. در حالت ولتاژ نامتعادل و هارمونیکی شبکه، مشکلات عدیدی همچون نوسانات گشتاور الکترومغناطیسی، نوسانات توان های اکتیو و راکتیو خروجی از سیستم DFIG، ریپل ولتاژ لینک DC و همچنین هارمونیکی شدن جریان خروجی از کل سیستم ژنراتور القایی دو سو تغذیه را خواهیم داشت.

در این پایان نامه هدف اصلی، فائق آمدن به تمامی مشکلات ذکر شده به صورت همزمان می باشد. از این رو ساختار جدیدی برای ژنراتورهای القایی از دو سو تغذیه ارائه شده است. همچنین نتایج بدست آمده ساختار جدید با استفاده از نرم افزار MATLAB ارائه گردیده و با نتایج ساختار های مرسوم مقایسه شده است.

فهرست مطالب

عنوان

فصل اول مقدمه	۱
۱-۱ مکانیزم پیدایش باد و مزایای استفاده از آن	۲
۲-۱ تاریخچه استفاده از انرژی باد	۳
۳-۱ تولید الکتریسیته از انرژی باد	۴
۴-۱ مطالعات انجام شده در زمینه مورد بحث	۶
۵-۱ هدف تحقیق	۸
۶-۱ روند ارائه مطالب	۸
فصل دوم توربین های بادی و مفاهیم کنترل غیر خطی و حالت لغزش	۹
۱-۲ مقدمه	۹
۲-۲ انواع توربین های بادی	۹
۱-۲-۲ طبقه بندی توربین های بادی	۱۰
۲-۲-۲ اجزاء اصلی توربین های بادی	۱۲
۳-۲-۲ مشخصه های آیرودینامیک توربین های بادی	۱۴
۳-۲ ژنراتورهای مورد استفاده در توربین های بادی	۱۷
۱-۳-۲ ژنراتور سنکرون	۱۷
۲-۳-۲ ژنراتورهای القایی	۱۷
۴-۲ ساختار توربین های بادی	۱۹
۱-۴-۲ انواع توربین های بادی از نقطه نظر سرعت	۲۰
۵-۲ روش کنترل حالت لغزشی	۲۳
۱-۵-۲ روش های کنترل ژنراتور القایی دو سو تغذیه در توربین های بادی در حالت اتصال به شبکه	۲۳
۲-۵-۲ کنترل غیر خطی	۲۴
۳-۵-۲ طراحی کنترل کننده های غیر خطی	۲۵
۴-۵-۲ کنترل حالت لغزشی	۲۶
۱-۴-۵-۲ سطوح لغزش	۲۷

۳۰	۲-۴-۵-۲ طراحی کنترل کننده
۳۳	فصل سوم کنترل مد لغزشی ژنراتور القایی دو سو تغذیه
۳۳	۱-۳ مقدمه
۳۳	۲-۳ نظریه دستگاه مرجع
۳۴	۳-۳ انتقال از دستگاه سه فاز به دستگاه دو فاز
۳۶	۴-۳ رفتار دینامیکی DFIG در قاب مرجع استاتور
۳۸	۵-۳ کنترل مد لغزشی ژنراتور القایی دو سو تغذیه در شرایط ولتاژ نامتعادل و هارمونیکی شبکه
۴۱	۶-۳ نتایج حاصل از اعمال ولتاژ نامتعادل به ژنراتور القایی دو سو تغذیه
۴۵	۷-۳ نتایج حاصل از اعمال ولتاژ هارمونیکی (غیر ایده آل) به ژنراتور القایی دو سو تغذیه
۴۸	۸-۳ نتیجه گیری
۴۹	فصل چهارم ارائه یک ساختار جدید برای ژنراتور القایی از دو سو تغذیه
۴۹	۱-۴ مقدمه
۵۱	۲-۴ روش کنترل مد لغزشی برای مبدل سمت روتور (RSC)
۵۴	۳-۴ روش کنترل مد لغزشی برای مبدل ۱ سمت شبکه (PGSC _۱)
۵۶	۴-۴ روش کنترل مد لغزشی برای مبدل ۲ سمت شبکه (PGSC _۲)
۵۸	۵-۴ نتایج حاصل از شبیه سازی ساختار پیشنهادی
۵۹	۱-۵-۴ اعمال ولتاژ نامتعادل به سیستم پیشنهادی
۶۳	۲-۵-۴ اعمال ولتاژ نامتعادل و هارمونیکی بطور همزمان به سیستم پیشنهادی
۶۶	۶-۴ نتیجه گیری
۶۸	فصل پنجم نتیجه گیری و پیشنهادات
۶۸	۱-۵ نتیجه گیری
۶۸	۲-۵ پیشنهادات
۶۹	مراجع

فهرست اشکال

- شکل (۱-۱) ظرفیت انرژی بادی نصب شده در دنیا بین سال های ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۱ میلادی ۶
- شکل (۱-۲) توربین های بادی محور افقی و محور عمودی ۱۰
- شکل (۲-۲) انواع توربین های بادی با محور چرخش عمودی ۱۱
- شکل (۳-۲) توربین های خلاف جهت باد و در جهت باد ۱۱
- شکل (۴-۲) اجزاء یک توربین بادی ۱۲
- شکل (۵-۲) ضریب بازده روتور (C_p) در مقابل سرعت نسبی نوک پره (λ) برای زوایای گام (β) مختلف ۱۵
- شکل (۶-۲) الف) توان مکانیکی تابعی از سرعت باد ب) سرعت روتور تابعی از سرعت باد ۱۶
- شکل (۷-۲) ساختار توربین- ژنراتور سزعت ثابت ۲۰
- شکل (۸-۲) سیستم ژنراتور سرعت متغیر ۲۱
- شکل (۹-۲) سیستم ژنراتور چندین قطبه سرعت متغیر ۲۲
- شکل (۱۰-۲) بلوک دیاگرام سیستم تولید بادی مجهز به ژنراتور القایی از دو سو تغذیه ۲۲
- شکل (۱۱-۲) شرط لغزشی ۲۹
- شکل (۱۲-۲) تعبیر ترسیمی معادلات (۸-۲) و (۱۰-۲) ۳۱
- شکل (۱۳-۲) لرزش ناشی از سوئیچینگ کنترل ناقص ۳۱
- شکل (۱-۳) رابطه بین دستگاه مرجع سه فاز و دستگاه مرجع دو فاز ۳۵
- شکل (۲-۳) دستگاه مرجع ساکن استاتور ۳۵
- شکل (۳-۳) بلوک دیاگرام سیستم تولید بادی مجهز به ژنراتور القایی از دو سو تغذیه ۳۶
- شکل (۴-۳) مدار معادل DFIG در قاب مرجع استاتور ۳۶
- شکل (۵-۳) محاسبه توان های اکتیو و راکتیو مرجع برای PGSC ۴۰
- شکل (۳-۶-a) ولتاژ استاتور ۴۲

- شکل (b-۶-۳) جریان استاتور ۴۲
- شکل (c-۶-۳) توان راکتیو استاتور ۴۲
- شکل (d-۶-۳) توان اکتیو استاتور ۴۲
- شکل (e-۶-۳) توان راکتیو خروجی از کل سیستم ۴۳
- شکل (f-۶-۳) توان اکتیو خروجی از کل سیستم ۴۳
- شکل (g-۶-۳) جریان خروجی از کل سیستم ۴۳
- شکل (h-۶-۳) ولتاژ لینک dc ۴۳
- شکل (۷-۳) محاسبه توان های اکتیو و راکتیو مرجع برای PGSC ۴۵
- شکل (a-۸-۳) ولتاژ استاتور ۴۵
- شکل (b-۸-۳) جریان استاتور ۴۶
- شکل (c-۸-۳) توان راکتیو استاتور ۴۶
- شکل (d-۸-۳) توان اکتیو استاتور ۴۶
- شکل (e-۸-۳) توان راکتیو خروجی از کل سیستم ۴۶
- شکل (f-۸-۳) توان اکتیو خروجی از کل سیستم ۴۷
- شکل (g-۸-۳) جریان خروجی از کل سیستم ۴۷
- شکل (h-۸-۳) ولتاژ لینک dc ۴۷
- شکل (۱-۴) نمایش ساختار پیشنهاد شده برای ژنراتور القایی دو سو تغذیه ۵۰
- شکل (۲-۴) رابطه بین دستگاه های مرجع $(dq)^+$, $(dq)^-$, $(\alpha\beta)^+$, $(\alpha\beta)^-$ ۵۱
- شکل (۳-۴) نمایش مبدل ۱ سمت شبکه $(PGSC_1)$ ۵۳
- شکل (۴-۴) محاسبه توان های اکتیو و راکتیو مرجع برای $PGSC_1$ ۵۵

- شکل (۵-۴) محاسبه توان های اکتیو و راکتیو مرجع برای PGSC_۲ ۵۷
- شکل (a-۶-۴) ولتاژ استاتور ۶۰
- شکل (b-۶-۴) جریان استاتور ۶۰
- شکل (c-۶-۴) توان اکتیو استاتور ۶۰
- شکل (d-۶-۴) توان راکتیو استاتور ۶۰
- شکل (e-۶-۴) جریان خروجی از کل سیستم ۶۱
- شکل (f-۶-۴) ولتاژ لینک dc ۶۱
- شکل (g-۶-۴) توان راکتیو مبدل موازی اول ۶۱
- شکل (h-۶-۴) توان اکتیو مبدل موازی اول ۶۱
- شکل (i-۶-۴) توان راکتیو مبدل موازی دوم ۶۲
- شکل (j-۶-۴) توان اکتیو مبدل موازی دوم ۶۲
- شکل (k-۶-۴) توان راکتیو خروجی از کل سیستم ۶۲
- شکل (l-۶-۴) توان اکتیو خروجی از کل سیستم ۶۲
- شکل (a-۶-۴) ولتاژ استاتور ۶۳
- شکل (b-۶-۴) جریان استاتور ۶۳
- شکل (c-۶-۴) توان اکتیو استاتور ۶۴
- شکل (d-۶-۴) توان راکتیو استاتور ۶۴
- شکل (e-۶-۴) جریان خروجی از کل سیستم ۶۴
- شکل (f-۶-۴) ولتاژ لینک dc ۶۴
- شکل (g-۶-۴) توان راکتیو مبدل موازی اول ۶۵

۶۵ شکل (h-۶-۴) توان اکتیو مبدل موازی اول
۶۵ شکل (i-۶-۴) توان راکتیو مبدل موازی دوم
۶۵ شکل (j-۶-۴) توان اکتیو مبدل موازی دوم
۶۶ شکل (k-۶-۴) توان راکتیو خروجی از کل سیستم
۶۶ شکل (l-۶-۴) توان اکتیو خروجی از کل سیستم

فهرست جداول

۵۹ جدول (۱-۴): پارامترهای DFIG
۵۹ جدول (۲-۴): پارامترهای کنترلر SMC

فصل اول

مقدمه

انتشار گازهای گلخانه ای^۱، اکسید نیتروژن و اکسید سولفور، موجب خسارت هنگفتی به محیط زیست می شود. از سویی دیگر منابع فسیلی در جهان رو به اتمام هستند. این منابع از نظر اندازه و مقدار محدود بوده و در ضمن آلاینده محیط زیست نیز محسوب می شوند. از این رو در سال های گذشته، گرایش به استفاده از منابع نوین و تجدید پذیر انرژی، رو به فزونی است. انرژی های تجدید پذیر^۲ به آن دسته از منابع انرژی اطلاق می شود که طبیعت همواره در حال بازسازی آنهاست و لذا هیچ گونه محدودیتی در استفاده از آنها وجود ندارد. اما انرژی های تجدید پذیر ساختار انرژی متفاوتی نسبت به تکنولوژی های متعارف تولید انرژی برق دارند، چرا که فرآیند توسعه در انرژی های تجدید پذیر دارای هزینه سرمایه گذاری اولیه بالایی بوده و در مقابل هزینه تعمیر و نگه داری در آنها پایین است ولی در روش های تولید برق سنتی هزینه سرمایه گذاری اولیه پایین است. اخیراً کاهش هزینه در سلولهای خورشیدی،

۱- Greenhouse gas (GHG)

۲- Renewable Energy

توربین های بادی و سوخت های بیوماس و هزینه فزاینده سوخت های فسیلی و کمکهای مالی دولتها، موجب رشد و ترقی نیروگاه های برق تجدید پذیر شده اند.

امروزه انرژی باد یک انرژی منحصر به فرد در میان انرژی های تجدید پذیر است و این امر به سبب توانایی آن در جذب سرمایه گذاری های تجاری می باشد. عدم انتشار گازهای گلخانه ای، تنها نیاز به سرمایه اولیه، سود آوری و هزینه نگهداری کم از مزایای آن به شمار می رود. از آنجایی که مجموع ظرفیت انرژی باد با رشدی سریعتر از مصرف توان ادامه می یابد، نفوذ انرژی باد به سطح با اهمیتی ارتقا پیدا کرده و بر عملکرد شبکه قدرت اثر می گذارد [۱].

منابع انرژی باد علیرغم واحد های تولید متمرکز، توان را وابسته به منبع بی قاعده خارجی تولید می کنند که تابع سرعت باد است و باد نیز همیشه هنگامیکه به الکتریسیته نیاز می باشد، نمی وزد. این ویژگی از متغیر بودن، غیر قابل پیش بینی بودن و نامعینی منابع باد نتیجه می شود. بنابراین اتصال نیروگاه های بادی به شبکه قدرت چالش بزرگی را برای متصدیان سیستم قدرت مطرح می کند. چنین اتصالی اثر مهمی بر بهینه کردن انتقال توان، پایداری سیستم، توزیع بار و تحلیل های اقتصادی به همراه دارد و روی هم رفته عوامل سیستم قدرت به انرژی باد به سبب مصرف زیاد توان راکتیو بویژه توسط نوع ژنراتور القایی آن به عنوان یک ناپایدار کننده شبکه قدرت می نگرند. با رشد مدل های هواسنجی پیش بینی سرعت باد بر اساس الگوی ساعت به ساعت بطور دقیق میسر می شود [۲]. از مشکلات توربین های بادی می توان به نویز و اثر بصری آن اشاره کرد که از این میان اثر نویز می تواند از طریق روش های فنی (برای مثال استفاده از سرعت متغیر و یا تنزل سرعت دوران) کاهش داده شود [۳].

۱-۱ مکانیزم پیدایش باد و مزایا استفاده از آن

تشعشعات دریافتی خورشید توسط زمین، موجب گرم شدن هوای اتمسفر شده و به همین دلیل هوا به سمت بالا حرکت می کند. شدت این گرمایش در استوا؛ جایی که خورشید عمود می تابد؛ بیشتر از هوای اطراف قطبین؛ جایی که زاویه تابش خورشید تند می باشد؛ خواهد بود و هوای اطراف قطبین نسبت به هوای استوا کمتر گرم می گردد. چگالی هوا با افزایش دما کاهش پیدا کرده و بنابراین هوای سبک تر استوا به سمت بالا حرکت کرده و در اطراف پنخس می گردد. این عمل موجب افت فشار در این ناحیه گردیده و موجب می گردد هوای سرد از قطبین به سمت استوا جذب گردند. همچنین وقتی خورشید در طول روز می تابد، هوای روی سرزمین های خشک سریعتر از هوای روی دریاها و آب ها گرم می شود. هوای گرم روی خشکی بالا رفته و هوای خنک تر و سنگین تر روی آب جای آنرا می گیرد که این فرآیند بادهای محلی را می سازد این به آن معناست که روز از سمت دریا به سمت ساحل باد می وزد. در شب، از آنجا که هوا روی خشکی سریعتر از هوای روی آب خنک می شود، جهت باد برعکس می شود. بنابراین باد به علت گرادیان فشار به وجود آمده از تابش غیر یکنواخت خورشید به سطح زمین به وجود می آید.

انرژی باد مانند سایر منابع انرژی تجدید پذیر داری مزایا و ویژگی هایی می باشد که از آن جمله می توان به [۴]:

- عدم نیاز توربین بادی به سوخت
- تامین بخشی از تقاضای انرژی برق
- کمتر بودن نسبی قیمت انرژی باد نسبت به انرژی فسیلی در بلند مدت
- تنوع بخشیدن به منابع انرژی و ایجاد سیستم پایدار انرژی
- قدرت مانور زیاد در بهره برداری (از چند کیلو وات تا چندین مگاوات)
- عدم نیاز به آب
- عدم نیاز به فضای زیاد
- عدم داشتن آلودگی محیط زیست

اشاره کرد.

۱-۲ تاریخچه استفاده از انرژی باد

اولین استفاده شناخته شده از انرژی باد مربوط به کاربرد در قایقهای بادی است و این تکنولوژی نقش بسیار مهمی در توسعه آسیابهای بادی دارد. ملوانان باستانی نیروی لیفت را می شناختند و روزانه از آن استفاده می کردند ولو اینکه هیچ توضیحی علمی برای آن نداشتند. اولین آسیابهای بادی برای آسیاب کردن غلات و پمپاژ آب به کار گرفته شده بودند و قدیمیترین مدل طراحی شده آن از نوع محور عمودی بوده که در طی سالهای ۵۰۰-۹۰۰ میلادی در ایران توسعه یافته است. ظاهراً اولین استفاده از این آسیابها برای پمپاژ آب بوده است ولی نحوه دقیق کار آن معلوم نیست زیرا هیچ گونه طراحی و یا نقاشی از این آسیابها موجود نیست. نخستین مستندات مربوط به طراحی این آسیابهای بادی نیز مربوط به ایرانیان می باشد. که پره های آن یا اصطلاحاً بادبانهای آنها از جنس چوب و یا نی بوده که با تیرهای افقی به یک محور عمودی متصل می شدند. آسیاب نمودن غلات اولین استفاده مستند شده و بسیار ساده آسیابهای بادی می باشد. به طوری که سنگ آسیاب به همان محور عمودی متصل می شده است. کلیه قسمت‌های آسیاب بادی معمولاً در داخل یک ساختمان محصور می شده اند و ورودی ساختمان در جهت وزش باد فضای بازی داشته تا باد بتواند به سمت داخل هدایت شود. آسیابهای بادی محور عمودی در چین هم مورد استفاده قرار می گرفتند و چینیان ادعای تخصیص این نوع آسیابها را به زادگاه خود دارند. این در حالی است که به طور دقیق می توان گفت اولین مستندات آنها مربوط به سال ۱۲۱۹ میلادی می باشد.

اما اولین آسیابهای بادی در غرب اروپا از نوع محور افقی بوده اند. دلیل تکامل طراحی آسیابهای بادی محور عمودی ایرانیان به محور افقی در دست نیست. اما این واقعیت هم وجود دارد که چرخ‌آب اروپائیان پیکربندی با محور افقی

داشته است و ظاهراً آنها این تکنولوژی را برای آسیابهای بادی اولیه خود نیز به خدمت گرفته اند. و یکی دیگر از دلایل شاید این باشد که راندمان نیروی درگ در سیستمهای با محور افقی بسیار بالاتر از سیستمهای با محور عمودی است. برجهای آسیابهای بادی در قرن ۱۳ طراحی جدیدی به خود گرفت. آسیابهای بادی بر بالای برجهای بزرگ سنگی که به صورت کلاهی دوار بوده نصب می شدند، بادنا نیز در پشت پره ها نصب می گردید. در اوایل سال ۱۳۹۰ میلادی هلندی ها برج های جدیدی را طراحی کردند که پیش از آن در سواحل دریا مدیترانه روئیت شده بودند. برجی که هلندی ها ساختند از چند طبقه مختلف تشکیل شده بود که شامل طبقاتی از جمله طبقه ذخیره غلات، طبقه مخصوص از بین بردن کاه، طبقه سنگ آسیاب و طبقه پائین که محلی برای زندگی آسیابان بوده است. این آسیابهای بادی طوری طراحی شده بودند که می بایست به صورت دستی و با فشار دادن اهرمی که در پشت پره های آنها بوده به سمت باد می چرخیدند. برای صدها سال مهمترین کاربرد آسیابهای بادی برای پمپاژ آب بوده است که برای این کار از سیستمهای کوچک با روتورهایی به طول یک تا چند متر استفاده می کردند. این سیستمها در طول قرن ۱۹ تکمیل شدند و کار خود را با آسیاب بادی هالادی^۳ در سال ۱۸۵۴ آغاز کردند و به کار خود با طرحهای موتور بادی و دمپستر^۴ که هنوز هم مورد استفاده قرار می گیرند، ادامه دادند. اولین آسیابها ۴ پره چوبی داشتند که بیشتر آنها اهرمی در پشت خود داشتند تا پره ها را به سمت جهت باد بچرخانند ولی برخی از آنها برجهایشان را در مسیر باد برپا می کردند. مهمترین رویداد در آسیابهای بادی استفاده از پره های فولادی در سال ۱۸۷۰ در آمریکا بوده است، چراکه پره های فولادی سبکتر و به شکل کارآمدتری ساخته می شدند. بین سالهای ۱۸۵۰ تا ۱۹۷۰ در حدود ۶ میلیون سیستم بادی کوچک (در حدود ۱ اسب بخار و یا کمتر) تنها در آمریکا نصب گردید. استفاده اولیه آنها برای پمپاژ آب برای تهیه آب مورد نیاز آبیاری مزارع و خانه ها بوده است [۵-۶].

۱-۳ تولید الکتریسیته از انرژی باد:

از اواخر قرن ۱۹ میلادی اولین آسیاب بادی برای تولید برق طراحی گردید. این آسیاب بادی در سال ۱۸۸۸ میلادی در کلیولند اوهایو توسط چارلز براش^۵ ساخته شد. روتورهای این آسیاب بادی به قطر ۱۷ متر بوده که یک اهرم جانبی برای چرخاندن آن به سمت باد داشته است. و اولین آسیاب بادی بوده که گیربکسی با نسبت ۵۰:۱ و ژنراتور جریان مستقیم با ۵۰۰ RPM داشته است. با وجود موفقیت نسبی این آسیاب بادی در مدت ۲۰ سال ولی محدودیتهایی در سرعت کم و استحکام بالای روتور برای تولید برق وجود داشت. میزان برق تولیدی این آسیاب بادی ۱۲ کیلوواتی با

^۳ - Halladay

^۴ - Dempster

^۵ - Charles F. Brush

روتور ۱۷ متری در مقابل توربینهای بادی مدرن با این قطر روتور و ظرفیت ۷۰ تا ۱۰۰ کیلوواتی بسیار ناچیز می باشد. از این زمان بود که نام توربینهای بادی جایگزین آسیاب های بادی شدند.

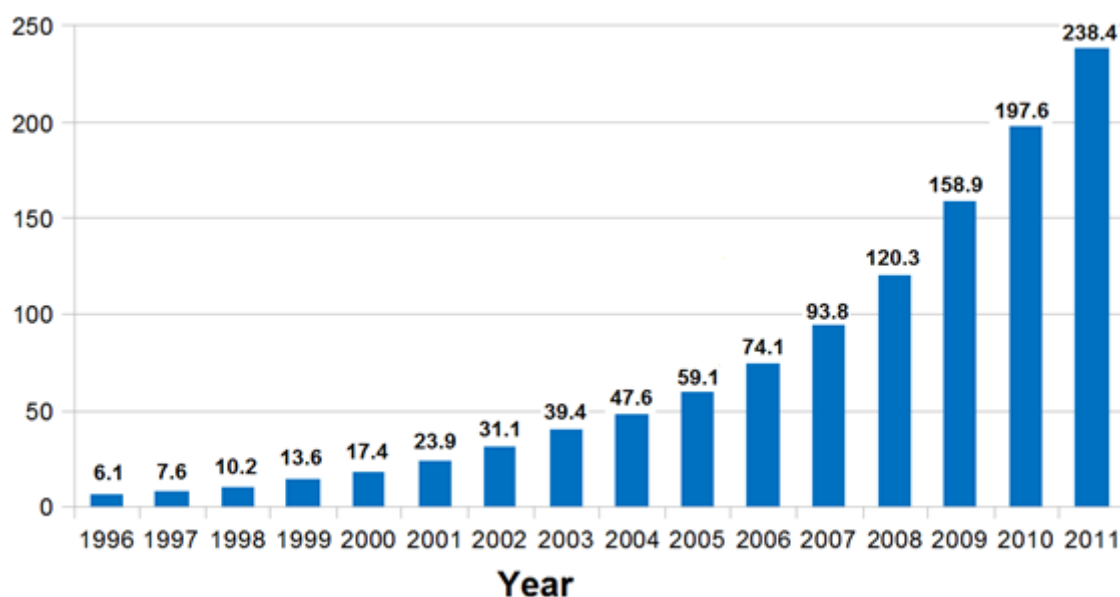
در سال ۱۸۹۱ میلادی فردی دانمارکی اولین سیستم بادی با پره های آیرودینامیکی را طراحی نمود و در بهترین برج آسیاب بادی به کار گرفت. سرعت بالاتر حرکت پره ها باعث تولید برق بیشتری گردید. با پایان جنگ جهانی دوم استفاده از سیستمهای بادی ۲۵ کیلوواتی در سرتاسر دانمارک رواج پیدا کرد ولی قیمت ارزان تر سوخته های فسیلی در نیروگاههای بخاری باعث شد تا استفاده از این آسیابهای بادی از رونق بیفتد. اولین توربینهای بادی کوچک برای تولید برق جریان مستقیم مورد استفاده قرار می گرفتند. کاربرد اولیه این سیستمها برای روشنایی مزارع و شارژ باتری ها برای استفاده در رادیو به کار می رفته است. در سال ۱۹۲۲ توربینهای محور عمودی ساونیوس^۶ توسط مهندس فنلاندی اختراع گردید. این توربینها با نیروی درگ کار می کردند و راندمانهای آنها پایین بوده است. در سال ۱۹۲۷ میلادی توربینهای محور عمودی داریوس^۷ طراحی گردید. در این توربینها از نیروی لیفت به جای درگ استفاده می گردید و دو یا سه پره آیرودینامیکی به محور مرکزی متصل می شده است. راندمان این توربینها نیز پایین است چرا که نیاز به سرعت بالای باد برای شروع به چرخش دارد. توربینهای بادی با ظرفیت بیشتر برای اولین بار در سال ۱۹۳۱ در روسیه توسعه یافتند. به طوری که توربینی ۱۰۰ کیلوواتی در سواحل دریای خزر در طول ۲ سال در حدود ۲۰۰ هزار کیلووات ساعت برق تولید نمود. پس از آن نیروگاههای بادی در آمریکا، دانمارک، فرانسه، آلمان و انگلستان در طول سالهای ۱۹۳۵ تا ۱۹۷۰ با توربینهای بادی در مقیاس بزرگ راه اندازی شدند.

بزرگترین توربین بادی به ظرفیت ۱.۲۵ مگاوات در سال ۱۹۴۱ در ورمونت نصب گردید. این توربین از نوع محور افقی و با ۲ پره با قطر ۱۷۵ فوت رو به باد ساخته شده بود. روتور آن از جنس فولاد ضد زنگ و به وزن ۱۶ تن بوده و سیستم کنترل آن روی ۲۸ دور در دقیقه تنظیم شده بود. در سال ۱۹۴۵ تنها بعد از چند صد ساعت کار مداوم یکی از پره ها شکست و علت آن فقط به خاطر فرسودگی و خوردگی فلز آن بوده است. و اما توربینهای مدرن امروزی بیشتر از نوع محور افقی و با سه پره می باشند. پره های این توربینها بسیار شبیه به بال هواپیما طراحی گردیده و از نیروی لیفت استفاده می کنند. میزان برق تولیدی آنها به ظرفیت توربین و محل قرار گیری آن مربوط می باشد. اکثر توربینهای تجاری بین ۱ تا ۲.۵ مگاوات می باشند. با توجه به شرایط وزش باد و میزان برق مصرفی خانوارها توربینهای ۱ مگاواتی برق مورد نیاز تقریباً ۵۰۰ خانه را تامین می کنند [۷-۸].

^۶- Savonius

^۷- Darrieus

شکل (۱-۱) رشد استفاده از انرژی باد را تا سال ۲۰۱۱ میلادی بر اساس آخرین تحقیق های انجمن جهانی انرژی باد نشان می دهد.



شکل(۱-۱): ظرفیت انرژی بادی نصب شده در دنیا بین سال های ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۱ میلادی

همانطور که در شکل مشاهده می شود، ظرفیت انرژی بادی نصب شده در دنیا از ۶.۱ گیگا وات در سال ۱۹۹۶ به حدود ۲۳۸ گیگا وات در سال ۲۰۱۱ رسیده است [۹].

در ایران با توجه به وجود مناطق بادخیز، بستر مناسبی جهت گسترش بهره برداری از توربین های بادی فراهم می باشد. یکی از مهمترین پروژه های انجام شده در زمینه انرژی بادی تهیه اطلس بادی کشور بوده است که پروژه مذکور در سازمان انرژیهای نو ایران صورت گرفته و به عنوان یکی از پروژه های ملی در صنعت انرژی باد محسوب می گردد. طبق اطلس بادی تهیه شده و بر اساس اطلاعات دریافتی از ۶۰ ایستگاه و در مناطق مختلف کشور، میزان ظرفیت اسمی سایتها در حدود ۶۰۰۰۰ مگاوات می باشد. بر پایه پیش بینی های صورت گرفته، میزان انرژی قابل استحصال بادی کشور از لحاظ اقتصادی بالغ بر ۱۸۰۰۰ مگاوات تخمین زده می شود که مؤید پتانسیل قابل توجه کشور در زمینه احداث نیروگاههای بادی و همچنین اقتصادی بودن سرمایه گذاری در صنعت انرژی بادی می باشد. در انجام پروژه پتانسیل سنجی بادی در ایران شرکت لامایر آلمان نیز به عنوان مشاور همکاری داشته است و بر اساس مطالعات شرکت مذکور پتانسیل بادی قابل استحصال در کشور در حدود ۱۰۰ هزار مگاوات برآورد گردیده است [۱۰].

۴-۱ مطالعات انجام شده در زمینه مورد بحث

سیستم های کنترل سنتی DFIG به منظور کنترل مبدل سمت روتور (RSC) و مبدل سمت شبکه (GSC) بر پایه کنترل برداری (VC)، کنترل مستقیم توان (DPC) و کنترل مستقیم گشتاور (DTC) استوار هستند [۱۱]. این طرح ها هنگامی که شبکه در شرایط نرمال است، قادرند عملکرد خیلی خوبی ارائه دهند. اما هنگام اختلال در شبکه، عملکرد سیستم کنترلی خراب می شود. از آنجا که خطاهای نامتعادل در شبکه خیلی بیشتر از خطاهای متعادل رخ می دهند اصولاً روشهای کنترلی DFIG در شرایط ولتاژ نامتعادل شبکه انجام می شوند [۱۲]. عوامل عمده ایجاد عدم تعادل در شبکه عبارتند از: بارهای نامتقارن، سیم پیچ های نامتقارن ترانس (امپدانس نامتقارن) و خطاهای زودگذر (افت ولتاژ)، که بیشتر مطالعات بر روی تأثیر ولتاژهای نامتعادل متمرکز است [۱۳]. یک ولتاژ نامتعادل کوچک می تواند باعث تولید یک جریان نامتعادل بزرگ شود. ولتاژهای نامتعادل در GSC می توانند باعث ریپل بالای ولتاژ لینک dc شده و جریان های خروجی غیرسینوسی نامتعادل، گرمای نامتعادل، تلفات توان و کاهش طول عمر خازنهای dc را نتیجه دهند [۱۴]. این اثرات می توانند موجب نوسان گشتاور الکترومغناطیسی و توان های اکتیو و راکتیو خروجی استاتور شده که این هم نوسان سرعت، نویز صوتی، افزایش تلفات و کاهش عمر عایق ها را به دنبال دارد [۱۵-۱۶].

در سال های اخیر سهمی از توان که بوسیله DFIG ها در توربین های بادی تولید شده و به شبکه تزریق می شود، افزایش یافته است، بنابراین جدا کردن این ژنراتورها از سیستم قدرت هنگام رخداد ولتاژ نامتعادل شبکه، بهره برداری از توان سیستم بادی را کاهش می دهد. بنابراین مطلوبست که تا حد امکان ژنراتور را از شبکه جدا نکنیم و اثر ولتاژ نامتعادل شبکه را به طریقی کاهش دهیم و یا حذف کنیم [۱۷-۱۸].

به منظور مینیمم کردن نامتعادلی در جریان استاتور یا کاهش نوسانات گشتاور و توان اکتیو و راکتیو استاتور، تا کنون چندین طرح پیشنهاد شده است که به طور عمده می توان آنها را به دو گروه کلی طبقه بندی کرد: کنترل برداری جهت دار نامتعادل (VOC) و کنترل مستقیم توان (DPC). روشهای DPC چندین مزیت دارند مانند: پیاده سازی آسان تر، پاسخ دینامیکی سریع و پایداری نسبت به تغییرات پارامترها و اختلالات شبکه. اما روش DPC کلاسیک به علت اینکه الگوی کلیدزنی آن مستقیماً از جدول کلیدزنی بهینه انتخاب می شود، دارای فرکانس کلیدزنی متغیر است. بنابراین به منظور دستیابی به فرکانس کلیدزنی ثابت روش DPC با مدولاسیون بردار فضایی (DPC-SVM) و کنترل پیش بین (PDPC) پیشنهاد شده اند. به علاوه اخیراً کاربرد روش های DPC برای DFIG در شرایط ولتاژ نامتعادل شبکه هم گزارش شده است [۱۲]. همچنین در سال های اخیر مقالات متعددی در زمینه کنترل مد لغزشی DFIG منتشر شده است. در [۱۹-۲۲] کنترل مد لغزشی (SMC) بمنظور کنترل DFIG در شرایط ولتاژ نرمال بکار گرفته شده است، در همین حال مرجع [۲۳] SMC را در شرایط ولتاژ نامتعادل شبکه بررسی می کند، ولی استراتژی پیشنهادی باعث تجزیه مولفه های جریان روتور به مولفه های مثبت و منفی می شود که این امر کاهش دقت کنترل و دینامیک کند آن را به موجب می شود. از دیگر معایب کنترل مد لغزشی ایجاد پدیده آشفتگی بواسطه کلید زنی، در حالات سطوح لغزشی می باشد.

در مرجع [۲۴] موضوع کنترل همزمان توان اکتیو و راکتیو تولیدی و نیز سینوسی شدن جریان استاتور با کنترل کننده لغزشی مطرح شده است. در مرجع یاد شده از دو کنترل کننده مستقل برای کنترل توان های اکتیو و راکتیو

ناشی از ولتاژ و جریان های توالی معکوس و مستقیم استفاده شده است، ولی از مبدل سمت شبکه صحبتی انجام نشده و ولتاژ لینک DC در آن ثابت فرض شده است.

۵-۱ هدف تحقیق

در این رساله، به منظور افزایش درجات آزادی در کنترل توربین بادی مبتنی بر ژنراتور القایی دو سو تغذیه (DFIG) تحت شرایط ولتاژ نامتعادل و هارمونیکی، یک ساختار جدید برای توربین های بادی تغذیه دوگانه ارائه شده است. ساختار جدید شامل دو مبدل موازی در سمت شبکه و یک مبدل در سمت روتور می باشد. همچنین مزایای ساختار ارائه شده نسبت به ساختار یک مبدل اضافه به صورت سری در استاتور (SGSC) مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. اهداف شامل کنترل توان اکتیو و راکتیو استاتور، ولتاژ خازن لینک جریان مستقیم، و حذف نوسانات جریان خروجی از کل سیستم ژنراتور القایی دو سو تغذیه در حالت اتصال به باس بی نهایت و تحت ولتاژ نامتعادل و هارمونیکی شبکه با استفاده از روش کنترل حالت لغزشی می باشد. از این رو کنترل حالت لغزشی برای این مجموعه طراحی شده است. نتایج حاصل از اعمال کنترل کننده طراحی شده بر روی ساختار ارائه شده نشان می دهد که اهداف کنترلی انتخابی می توانند به صورت همزمان تحقق یابند.

۶-۱ روند ارائه مطالب:

در این پایان نامه روند ارائه مطالب به صورت زیر است:

- ابتدا در فصل اول مروری بر تاریخچه و هدف تحقیق بیان شده است.
- فصل دوم انواع توربین های بادی را معرفی می کند و همچنین مفاهیم حاکم بر کنترل غیر خطی کنترل مد لغزشی را ارائه می دهد.
- در فصل سوم علاوه بر ارائه یک ساختار جدید سیستم مدل سازی شده و همچنین کنترل کننده مد لغزشی طراحی شده است.
- فصل چهارم نتایج حاصل از مقایسه ساختار ارائه شده با ساختار SGSC را نشان داده شده است.
- فصل پنجم شامل نتیجه گیری و پیشنهادات برای ادامه روند پایان نامه می باشد.

فصل دوم

توربین های بادی و مفاهیم کنترل غیر خطی و حالت لغزش

۱-۲ مقدمه

در این فصل در ابتدا انواع توربین های بادی معرفی شده اند و سپس مفاهیم پایه لازم برای طراحی کنترل کننده حالت لغزش ارائه شده است.

۲-۲ انواع توربین های بادی

توربین های بادی انرژی جنبشی باد را به توان مکانیکی تبدیل می نمایند و این توان مکانیکی از طریق شفت به ژنراتور انتقال پیدا کرده و در نهایت انرژی الکتریکی تولید می شود. توربین های بادی بر اساس یک اصل ساده کار می کنند. انرژی باد دو یا سه پره ای را که به دور روتور توربین بادی قرار گرفته اند به چرخش در می آورد. روتور به یک شفت مرکزی متصل می باشد که با چرخش آن ژنراتور نیز به چرخش در آمده و الکتریسیته تولید می شود. توربین های بادی بر روی برج های بلندی نصب می شوند تا بیشترین انرژی ممکن را دریافت نمایند. بلندی این برج ها به ۳۰

تا ۴۰ متر بالاتر از سطح زمین می‌رسد. توربین‌های بادی در باد هایی با سرعت کم یا زیاد و حتی طوفان‌ها کاملاً مفید می‌باشند [۴].

اولین توربین بادی تجاری در سال ۱۹۵۷ میلادی توسط یک شرکت آمریکایی با ظرفیت ۲۲ کیلووات به بازار عرضه شد. از آن زمان تا کنون پیشرفت‌های زیادی در زمینه بهبود کارایی و ظرفیت این توربین‌ها به وجود آمده است. امروزه توربین‌های بادی با ظرفیت بالا به بازار عرضه می‌شوند [۲۵].

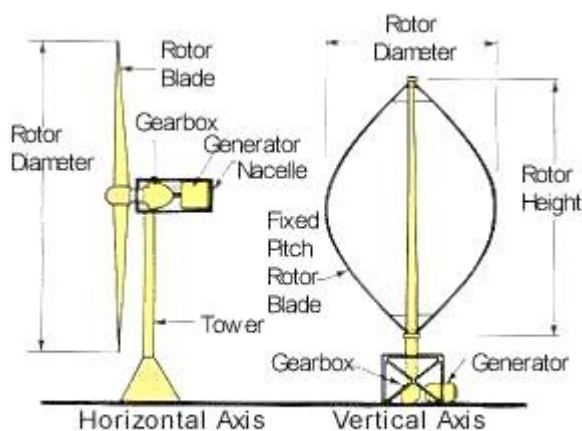
۱-۲-۲ طبقه بندی توربین‌های بادی

توربین‌های بادی مدرن بر اساس محور چرخششان به دو شاخه اصلی تقسیم می‌شوند:

۱- توربین‌های با محور افقی^۱ که محور چرخش آن‌ها موازی سطح زمین است.

۲- توربین‌های با محور عمودی^۲ که محور چرخش آن‌ها عمود بر سطح زمین می‌باشد.

شکل (۲-۲) توربین‌های بادی محور افقی و عمودی را نمایش می‌دهد. توربین‌های بادی محور افقی توان باد بیشتری را کسب می‌کنند بنابراین بیشتر توسعه یافته‌اند [۲۶]. در این توربین‌ها سرعت دوران روتور بسیار بالا بوده ولی گشتاور آن کم است و از آنها بیشتر برای تولید برق استفاده می‌شود.



شکل (۱-۲): توربین‌های بادی محور افقی و محور عمودی

-
- ۱- Horizontal Axis
 - ۲- Vertical Axis