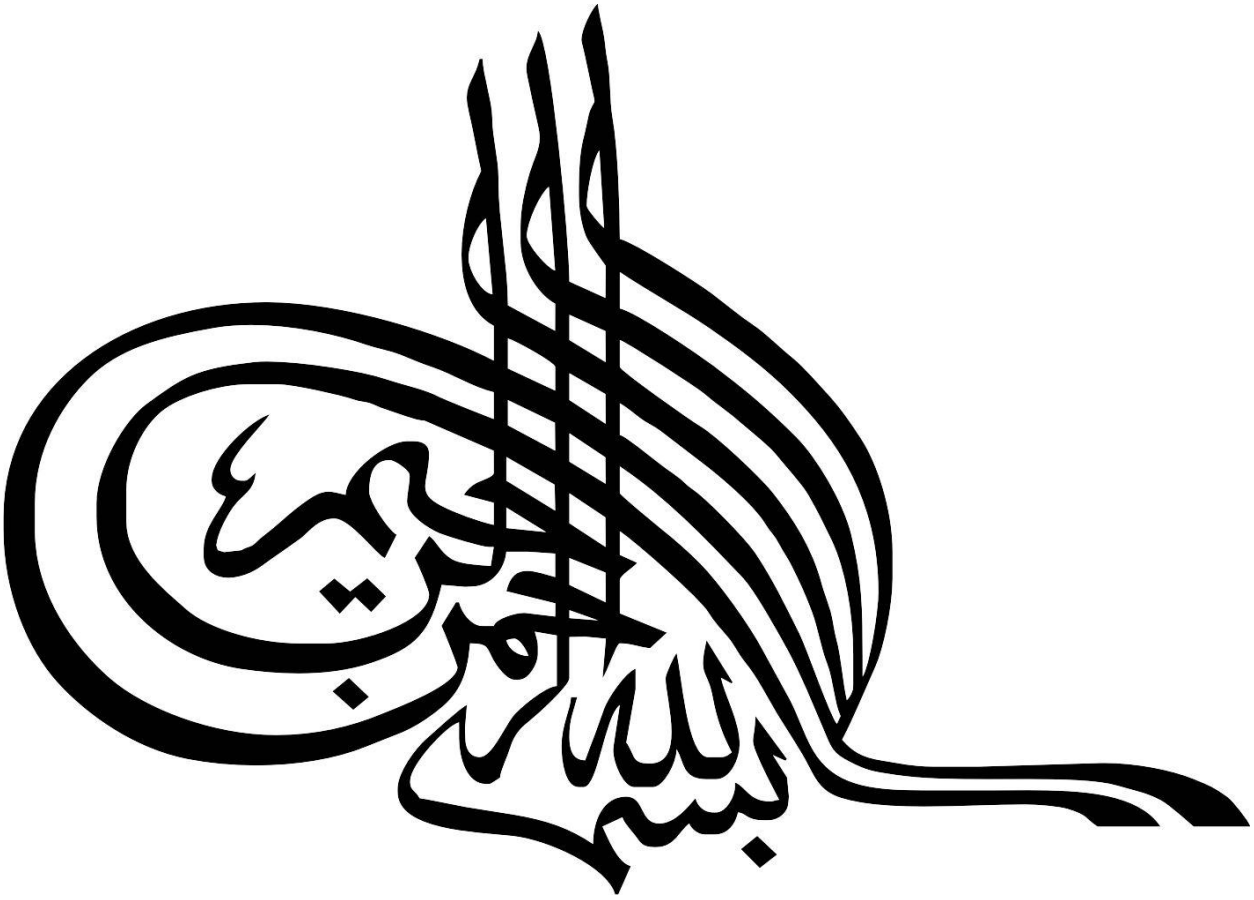
بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه آزاد اسلامی

واحد تهران مرکزی

دانشکده فنی نیایش، گروه برق

پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد "M.Sc."

گرایش: الکترونیک

عنوان:

کنترل ولتاژ ژنراتور از دو سو تغذیه دریک نیروگاه بادی، به روش کنترل برداری

استاد راهنما:

دکتر شهرام جوادی

استاد مشاور:

دکتر حیدر علی شایان فر

پژوهشگر:

بهناز سوهانی

بهار ۱۳۹۳

تقدیم به:

پدر

مادر

و همسر

مهربانم.

آنان که وجودشان گرمابخش زندگی ام است.

تشکر و قدردانی

سپاس خدای را که سخنوران، در ستودن او بمانند و شمارندگان، شمردن نعمت‌های او ندانند و کوشندگان، حق او را گزاردن نتوانند. و سلام و درود بر محمد و خاندان پاک او، هم آنان که وجودمان وامدار وجودشان است. بدون شک جایگاه و منزلت معلم، والاتر از آن است که در مقام قدردانی از زحمات بی‌شائبه‌ی او چیزی بنگاریم. ازاین‌رو بر خود لازم میدانم که از اساتید عزیز و بزرگوارم **جناب آقای دکتر شهرام جوادی** و **جناب آقای دکتر حیدر علی شایان فر** به پاس همه‌ی راهنمایی‌های راهگشا و ارزنده‌شان کمال تقدیر و تشکر را داشته باشم. همچنین از استاد بزرگوار؛ **جناب آقای دکتر ارسلان حکمتی** که زحمت داوری این رساله را متقبل شدند نهایت تشکر را دارم.

از پدر و مادر عزیزم که با زحمات بی‌شائبه خود زمینه‌های پیشرفت من را فراهم نمودند نهایت تشکر و قدردانی را دارم.

در پایان از همسر عزیزم که در طول نگارش این پایان نامه من را یاری فراوانی رساندند کمال تشکر را دارم.

بهناز سوهانی

خرداد ۱۳۹۳

عهدنامه اصالت پایان‌نامه کارشناسی ارشد

اینجانب **بهناز سوهانی** دانش‌آموخته مقطع کارشناسی ارشد ناپیوسته به شماره دانشجویی **۹۰۲۵۲۱۰۰۲۲۴** در رشته **مهندسی برق- الکترونیک** که در تاریخ ۱۳۹۳/۰۳/۳۱ از پایان‌نامه خود تحت عنوان: **کنترل ولتاژ ژنراتور از دو سو تغذیه دریک نیروگاه بادی، به روش کنترل برداری** با کسب نمره ..... و درجه..... دفاع نموده‌ام، بدین‌وسیله متعهد می‌شوم:

۱- این پایان‌نامه حاصل تحقیق و پژوهش انجام‌شده توسط اینجانب بوده و در مواردی که از دستاوردهای علمی و پژوهشی دیگران (اعم از پایان‌نامه، کتاب، مقاله و.....) استفاده نموده‌ام، مطابق ضوابط و رویه موجود، نام منبع مورداستفاده و سایر مشخصات آن را در فهرست مربوطه ذکر و درج کرده‌ام.

۲- این پایان‌نامه قبلاً برای دریافت هیچ مدرک تحصیلی (هم‌سطح، پایین‌تر یا بالاتر) در سایر دانشگاهها و مؤسسات آموزش عالی ارائه نشده است.

۳- چنانچه بعد از فراغت از تحصیل، قصد استفاده و هرگونه بهره‌برداری اعم از چاپ کتاب، ثبت اختراع و ... از این پایان‌نامه داشته باشم، از حوزه معاونت پژوهشی واحد مجوزهای مربوطه را اخذ نمایم.

۴- چنانچه در هر مقطعی زمانی خلاف موارد فوق ثابت شود، عواقب ناشی از آن را بپذیرم و واحد دانشگاهی مجاز است با اینجانب مطابق ضوابط و مقررات رفتار نموده و در صورت ابطال مدرک تحصیلی‌ام هیچ‌گونه ادعایی نخواهم داشت.

نام و نام خانوادگی:

تاریخ و امضاء:

بسمه تعالی

در تاریخ: ۱۳۹۳/۰۳/۳۱

دانشجو کارشناسی ارشد خانم بهناز سوهانی از پایان نامه خود دفاع نموده و با نمره بحروف و با درجه مورد تصویب قرار گرفت.

امضاء استاد راهنما

چکیده:

امروزه یکی از بزرگ‌ترین معضلات بشر کمبود سوخت‌های فسیلی و آلودگی‌های محیط زیستی آن است. با پیشرفت روزافزون فنّاوری، استفاده از انرژی بادی به‌عنوان سرآمد انرژی‌های موجود، در اختیار بشر قرارگرفته است. چراکه دسترسی به آن آسان و مقدار آن نامحدود است، همچنین استفاده از انرژی باد هیچ‌گونه آلودگی برای محیط‌زیست ندارد و به همین دلیل به نام انرژی سبز برای آیندگان نام‌گذاری شده است. ژنراتورهای القایی از دو سو تغذیه به‌طور گسترده‌ای در سیستم‌های تولید انرژی بادی استفاده می‌شوند. امروزه ژنراتورهای القائی از دو سو تغذیه[۱]، می‌توانند کاربرد بیشتری در نیروگاه‌های بادی داشته باشند .این امر به دلیل بهره بردن از مزایای بسیاری همانند کنترل سرعت نسبت به دیگر ژنراتورها- ازجمله ژنراتورهای القائی قفسه‌ای- می‌باشد. همچنین با به‌کارگیری سیستم‌های کنترلی برای چنین آرایشی کنترل سرعت و کنترل توان صورت می‌گیرد. این پایان‌نامه به تحلیل، کنترل و مدل‌سازی ژنراتور القایی از دو سو تغذیه برای توربین‌های بادی می‌پردازد. متدهای متفاوت کنترل جریان روتور جهت دستیابی به هدف حذف اثر نیرومحرکه بازگشتی[۱] بررسی می‌شود. بر اساس بررسی‌های انجام‌گرفته، بهترین متد، متدی است که در آن‌هم پس‌خور نیرومحرکه بازگشتی و هم "مقاومت فعال" به کار گرفته شود، تا بهترین نتیجه در کاهش نیرومحرکه بازگشتی بر روی جریان روتور، علی‌الخصوص درزمانی که افت ولتاژ رخ می‌دهد، به دست آوریم. از مزایای مهم این روش این است که دارای بهترین مشخصات پایداری می‌باشد. در این پایان‌نامه پاسخ سیستم توربین بادی از دو سو تغذیه[۲] شبیه‌سازی‌شده است. ولتاژ باقی‌مانده برابر ۸۰٪ می باشد. همان‌طور که می‌دانیم، توربین بادی دارای چندین قسمت است. لذا تمامی قسمت‌های مربوطه به توربین بادی از دو سو تغذیه شرح داده‌شده است. درنهایت در این پایان‌نامه جهت کنترل ولتاژ ژنراتور از دو سو تغذیه به بررسی دو استراتژی کنترلی پرداخته و سرانجام بهترین استراتژی کنترلی را پیشنهاد نموده‌ایم. شبیه‌سازی‌ها، دلایل ما را در انتخاب این استراتژی به اثبات می‌رسانند. در این پایان‌نامه کلیه‌ی شبیه‌سازی‌ها توسط نرم‌افزار متلب انجام‌شده است. همچنین به‌طور اجمالی روابط مربوط به توان اکتیو و راکتیو تولیدی توسط توربین بادی با مولد القایی از دو سو تغذیه بیان شده و نمودارهای مربوط به توان‌های مذکور به ازای تغییر سرعت باد در زمان‌های مختلف نشان داده‌شده است.

کلمات کلیدی:

ژنراتور (مولد) القایی از دو سو تغذیه،نیروگاه بادی، افت ولتاژ، کنترل ولتاژ، انرژی تجدید پذیر(باد)، مزرعه بادی.

۱- Electromotive Force (EMF)

۲- Doubly-fed induction generator (DFIG)

فهرست عناوین

عنوان صفحه

فصل اول: مقدمه

۱-۱- شرحی بر موضوع ۲

۱-۲- مروری مختصر بر تحقیقات پیشین ۴

۱-۳- اهداف پایان‌نامه ۸

۱-۴- ساختار گزارش ۹

فصل دوم: ادبیات موضوع

۲-۱- مقدمه ۱۰

۲-۲- بررسی سیستم‌های انرژی باد ۱۰

۲-۲-۱- معادلات پایه مربوط به انرژی باد ۱۰

۲-۲-۲- بررسی سرعت باد ۱۴

۲-۲-۳- توان آئرودینامیکی توربین بادی ۱۵

۲-۲-۴- چگونگی کنترل توان آئرودینامیک ۱۶

۲-۲-۵- کنترل زاویه پره ۱۷

۲-۲-۶- تبدیل آئرودینامیک ۱۷

۲-۳- سیستم‌های توربین‌های بادی ۱۹

۲-۳-۱- ساختار توربین بادی سرعت ثابت (FSWT) ۲۱

۲-۳-۲- ساختار توربین بادی سرعت متغیر(VSWT) ۲۳

۲-۳-۳- توربین بادی با سرعت متغیر همراه با یک ژنراتور القایی/ سنکرون ۲۴

۲-۴- سیستم‌های ژنراتور از دو سو تغذیه برای توربین‌های بادی ۲۵

۲-۴-۱- مدار معادل ژنراتور از دو سو تغذیه ۲۸

۲-۴-۲- نسبت دورهای استاتور به روتور ۳۰

۲-۴-۳- نحوه کاهش تلفات مغناطیس کنندگی ۳۱

۲-۴-۴- انواع دیگر ماشین‌های از دو سو تغذیه ۳۳

فصل سوم: بازده انرژی توربین‌های بادی و کنترل سیستم ژنراتور القایی از دو سو تغذیه

۳-۱- مقدمه ۳۵

۳-۲- تلفات توان ۳۵
۳-۲-۱- تعریف تلفات آئرودینامیک ۳۶
۳-۲-۲- تلفات جعبه‌دنده ۳۷
۳-۲-۳- تلفات ژنراتور القایی ۳۷
۳-۲-۴- تلفات مبدل ۳۹
۳-۲-۵- تلفات کل ۴۲

۳-۳- تولید انرژی سیستم ژنراتور از دو سو تغذیه ۴۳
۳-۳-۱- مطالعه تأثیر اندازه‌ی مبدل روی تولید انرژی ۴۴
۳-۳-۲- کاهش تلفات مغناطیس کنندگی ۴۶

۳-۴- بررسی جامع تفاوت‌های سیستم‌های توربین بادی ۴۷

۳-۵- نتیجه‌گیری (بخش اول) ۴۸

۳-۶- مقدمه (بخش دوم) ۵۰
۳-۶-۱- بررسی بردارهای فضایی ۵۰
۳-۶-۲- تعریف توان اکتیو و راکتیو در بردارهای فضایی ۵۱
۳-۶-۳- استفاده از تخمین گر حلقه فاز بسته (PLL) ۵۱
۳-۶-۴- تخمین گر PLL اصلاح‌شده ۵۲
۳-۶-۵- میرایی فعال ۵۴
۳-۶-۶- اشباع و ادغام ضد باد ۵۵
۳-۶-۷- روابط گسسته سازی ۵۶

۳-۷- مدل‌های ریاضی برای سیستم از دو سو تغذیه ۵۷
۳-۷-۱- جمع‌بندی روابط ۶۲

۳-۸- بررسی مختصات میدان ۶۲
۳-۸-۱- بررسی مختصات شار استاتور ۶۳

۳-۸-۲- بررسی مختصات شار شبکه ۶۳
۳-۹- کنترل مبدل سمت ماشین ۶۴
۳-۹-۱- کنترل جریان ۶۴
۳-۹-۲- کنترل گشتاور ۶۸
۳-۹-۳- کنترل سرعت ۶۸
۳-۹-۴- کنترل توان راکتیو ۷۱
۳-۹-۵- عملکرد بدون سنسور ۷۲
۳-۱۰- کنترل مبدل سمت شبکه ۷۴
۳-۱۰-۱- کنترل جریان فیلتر شبکه ۷۴
۳-۱۰-۲- کنترل ولتاژ رابط DC ۷۵

فصل چهارم: بررسی کنترل جریان ژنراتورهای از دو سو تغذیه، شبیه سازی مطالعات انجام شده و تحلیل نتایج

۴-۱- مقدمه ۷۷

۴-۲- بررسی پایداری ۷۷
۴-۲-۱- مختصات شار استاتور ۷۷
۴-۲-۲- مختصات شار شبکه ۸۲
۴-۲-۳- نتیجه گیری ۸۵

۴-۳- بررسی میرایی شار ۸۶
۴-۳-۱- بررسی مختصات شار استاتور ۸۷
۴-۳-۲- بررسی مختصات شار شبکه ۸۷
۴-۳-۳- ارزیابی ۸۷
۴-۳-۴- بررسی پاسخ میرا ساز شار حین افت ولتاژهای متقارن ۸۸

۴-۴- نتیجه گیری ۸۹

۴-۵- مدل درجه کاهش‌یافته ۹۰

۴-۶- نحوه گسسته سازی ژنراتور القایی از دو سو تغذیه ۹۰
۴-۶-۱- بررسی مختصات شار استاتور ۹۰

۴-۶-۲- بررسی مختصات شار شبکه ۹۱

۴-۷- پاسخ توربین بادی ژنراتور از دو سو تغذیه به افت ولتاژها و اغتشاشات شبکه ۹۲

۴-۸- نتیجه گیری ۹۷

۴-۹- استراتژی های کنترلی سیستم های ژنراتور از دوسو تغذیه ۹۸
۴-۹-۱- استراتژی کنترلی A ۹۹
۴-۹-۲- استراتژی کنترلی B ۱۰۱
۴-۹-۳- استراتژی کنترلی پیشنهادی ۱۰۲

۴-۱۰- شبیه سازی های استراتژی های کنترلی A، B و پیشنهادی ۱۰۴

۴-۱۱- جمع بندی- مقایسه استراتژی‌های کنترلی A، B و پیشنهادی ۱۰۸

فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادها

۵-۱- مقدمه ۱۱۰

۵-۲- نتیجه گیری ۱۱۰

۵-۳- جمع‌بندی ۱۱۱

۵-۴- پیشنهادها ۱۱۲

مراجع ۱۱۳

فهرست جداول

جدول (۲-۱) پارامترهای عمومی ماشین القایی در P.U. ۳۰
جدول (۳-۱) مشخصه مبدل (IGBT و دیود هرز گرد) ۴۰
جدول (۴-۱) روش‌های بررسی‌شده کنترل جریان ۷۹
جدول (۴-۲) جدول ریشه‌ها ۸۱

فهرست شکل‌ها

عنوان صفحه

شکل(۲-۱) نحوه وابستگی ضریب عملکرد به λ وθ ۱۲
شکل(۲-۲) منحنی توان – سرعت ۱۳
شکل(۲-۳) سرعت باد (متر بر ثانیه)، چگالی احتمال بادبر اساس توزیع رایلی ۱۴
شکل(۲-۴) الف) ضریب توان،C-P، ب) توان مکانیکی ۱۸
شکل(۲-۵) مشخصات عمومی برای یک توربین بادی سرعت متغیر ۱۸
شکل(۲-۶) ساختار کلی سیستم توربین بادی ۲۰
شکل(۲-۷) توربین بادی سرعت ثابت همراه با یک ژنراتور القایی ۲۲
شکل(۲-۸) توربین بادی با سرعت متغیر همراه با یک ژنراتور القایی / سنکرون ۲۴
شکل(۲-۹) توربین بادی درایو مستقیم سرعت متغیر (بدون دنده) با ژنراتور سنکرون ۲۴
شکل(۲-۱۰) توربین بادی سرعت متغیر با یک ژنراتور از دو سو تغذیه ۲۵
شکل(۲-۱۱) اساس ژنراتور از دو سو تغذیه ۲۶
شکل(۲-۱۲) سیستم ژنراتور از دو سو تغذیه با مبدل پشت‌به‌پشت ۲۷
شکل(۲-۱۳) مشخصه‌های سرعت ـ گشتاور یک ژنراتور از دو سو تغذیه ۲۷
شکل(۲-۱۴) مدار معادل ژنراتور از دو سو تغذیه ۲۸
شکل(۲-۱۵) نسبت دورهای استاتور به روتور نشان داده‌شده با یک ترانسفرمر مجازی ۳۰
شکل(۲-۱۶) اساس «ژنراتور از دو سو تغذیه اتصال کوتاه شده». ۳۲
شکل(۲-۱۷) اساس اتصال ستاره ـ مثلث ژنراتور از دو سو تغذیه. ۳۲
شکل(۲-۱۸) اساس ماشین القایی از دو سو تغذیه پشت سر هم ۳۳
شکل(۲-۱۹) اساس ماشین القایی از دو سو تغذیه بدون جاروبک ۳۴
شکل(۳-۱) منحنی سرعت باد - توان توربین بادی ۳۶
شکل(۳-۲) منحنی سرعت باد - تلفات جعبه دنده ۳۸
شکل(۳-۳) منحنی سرعت باد - تلفات ژنراتور القایی ۳۸
شکل(۳-۴) نقشه مبدل ۳۹
شکل(۳-۵) منحنی سرعت باد - تلفات مبدل ۴۲
شکل(۳-۶) منحنی سرعت باد - تلفات کل ۴۳

شکل(۳-۷) سرعت روتور و توان توربین متناظر ۴۴
شکل(۳-۸) تلفات مبدل برای گستره‌های متفاوت سرعت روتور ۴۵
شکل(۳-۹) منحنی گستره سرعت روتور - بازده ۴۵
شکل(۳-۱۰) بهره انرژی تولیدی با کاهش تلفات مغناطیس کنندگی سیستم DFIG ۴۶
شکل(۳-۱۱)بررسی توان متوسط ۴۷
شکل(۳-۱۲) بازده انرژی DFIG1، DFIG2 ، VSIG، PMSC و سیستم DFIG. ۴۸
شکل(۳-۱۳) اصول بردارهای فضایی ۵۰
شکل(۳-۱۴) اصول IMC ۵۳
شکل(۳-۱۵) اصول «میرایی فعال» ۵۴
شکل(۳-۱۶) بررسی ناحیه پایداری ۵۷
شکل(۳-۱۷) مدار معادل سیستم ژنراتور از دو سو تغذیه ۵۸
شکل(۳-۱۸) نمایش r ژنراتور القایی در مختصات استاتور. ۵۹
شکل(۳-۱۹) مدل فیلتر شبکه در مختصات استاتور ۶۰
شکل(۳-۲۰) مدل رابط DC ۶۱
شکل(۳-۲۱) نمایش بردار فضایی ولتاژ شبکه و شار استاتور. ۶۳
شکل(۳-۲۲) بلوک دیاگرام سیستم کنترل جریان ۶۵
شکل(۳-۲۳) - نسبت بهبود میرایی با استفاده از "مقاومت فعال" ۶۷
شکل(۳-۲۴) بلوک دیاگرام کنترل حلقه باز گشتاور ۶۸
شکل(۳-۲۵) حلقه کنترل سرعت ۶۹
شکل(۳-۲۶) شبیه‌سازی حلقه کنترل سرعت مدل‌سازی شده در نرم‌افزار متلب ۷۰
شکل(۳-۲۷) حلقه کنترل ولتاژ رابط DC ۷۶
شکل(۴-۱) مکان هندسی یکی از قطب‌های ژنراتور القایی از دو سو تغذیه. ۸۰
شکل(۴-۲) : مکان هندسی یکی از ریشه‌ها با میرایی ضعیف ژنراتور از دو سو تغذیه ۸۴
شکل(۴-۳) شبیه‌سازی کنترل جریان با استفاده از قاب مرجع استاتور ۸۸
شکل(۴-۴) شبیه‌سازی پاسخ به افت ولتاژ با مدل درجه کامل ۹۳
شکل(۴-۵) شبیه‌سازی پاسخ به افت ولتاژ با مدل کاهش‌یافته. ۹۴
شکل(۴-۶) شبیه‌سازی پاسخ به افت ولتاژ نامتقارن. شبیه‌سازی با مدل درجه کامل ۹۵

شکل(۴-۷) شبیه‌سازی پاسخ به افت ولتاژ نامتقارن. شبیه‌سازی با مدل کاهش‌یافته ۹۶
شکل(۴-۸) اغتشاش ولتاژ ۹۷
شکل(۴-۹) دیاگرام خط برای سیستم مورد مطالعه ۹۸
شکل(۴-۱۰) توربین بادی ژنراتور از دو سو تغذیه با اهرم و چاپر در حضور استراتژی A ۹۹
شکل(۴-۱۱) بلوک دیاگرام کنترل ولتاژ با استفاده از استراتژی A. ۱۰۰
شکل(۴-۱۲) توربین بادی ژنراتور از دو سو تغذیه برای استراتژی B ۱۰۱
شکل(۴-۱۳) بلوک دیاگرام کنترل ولتاژ با استفاده از استراتژی B ۱۰۲
شکل(۴-۱۴) ژنراتور از دو سو تغذیه با توربین بادی برای استراتژی پیشنهادی ۱۰۳
شکل(۴-۱۵) بلوک دیاگرام کنترل ولتاژ با استفاده از استراتژی پیشنهادی ۱۰۴
شکل(۴-۱۶) بلوک دیاگرام کنترل ولتاژ شبیه‌سازی‌شده با استفاده از نرم‌افزار متلب ۱۰۵
شکل(۴-۱۷) ولتاژ شبکه، ولتاژ لینک DC، توان اکتیو و راکتیو بدون حضور استراتژی..... ۱۰۶
شکل(۴-۱۸) ولتاژ شبکه، ولتاژ لینک DC، توان اکتیو و راکتیو در حضور استراتژی A ۱۰۶
شکل(۴-۱۹) ولتاژ شبکه، ولتاژ لینک DC، توان اکتیو و راکتیو در حضور استراتژی B ۱۰۷
شکل(۴-۲۰) ولتاژ شبکه، ولتاژ لینک DC، توان اکتیو و راکتیو در حضور استراتژی پیشنهادی..... ۱۰۷
شکل(۴-۲۱) ولتاژ شبکه، ولتاژ لینک DC، توان اکتیو و راکتیو- شکل مقایسه ای..... ۱۰۹

فصل اول: مقدمه

۱-۱- شرحی بر موضوع

الکتریسیته بهترین حامل انرژی است. حامل انرژی، انرژی قابل‌استفاده را از محلی به محل دیگر منتقل می‌کند. پرمصرف‌ترین منابع انرژی اولیه سوخت فسیلی، آب و شکاف هسته‌ای است. مهم‌ترین مشکل در تولید برق از سوخت‌های فسیلی و شکاف هسته‌ای، که در حال حاضر مهم‌ترین منابع اولیه برای تولید برق در جهان به شمار می‌آیند، تأثیرات منفی آنان بر روی محیط‌زیست است. علاوه بر آن منابع فسیلی و اورانیوم محدود هستند. عیب دیگر استفاده از سوخت‌های فسیلی و اورانیوم برای تولید انرژی الکتریکی، مخصوصاً برای کشورهایی که قادر به تأمین این منابع اولیه نیستند، وابستگی آن‌ها به کشورهای دیگر به‌منظور تأمین این منابع است.

در دهه ۱۹۷۰ بحث در مورد محدودیت سوخت‌های فسیلی و تأثیر آن بر روی محیط‌زیست جدی‌تر شد. با افزایش این مباحث علاقه‌مندی به استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر برای تأمین تقاضای الکتریکی کشورهای رو به رشد جهان افزایش یافت. یک‌راه حل برای تولید انرژی از منابع تجدید پذیر استفاده از توربین‌های بادی است. توربین بادی انرژی باد را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. باد گسترده‌ترین انرژی تجدید پذیر در جهان است. باد به‌عنوان منبع نیرو برای چند هزار سال مورداستفاده قرارگرفته است از قبیل استفاده در کشتیرانی، پمپ کردن آب و آسیاب‌های بادی.

فاکتورهای مهمی که باعث پیشرفت نیروگاه‌های بادی شدند عبارت‌اند از:

۱- ساخت پره‌های بزرگ ارزان‌قیمت.
۲- پایین آمدن قیمت تجهیزات الکترونیک قدرت.
۳- عملکرد سرعت متغیر ژنراتورهای القایی به‌منظور جذب حداکثر انرژی باد.
۴- رفتار مناسب نیروگاه بادی از دید شبکه قدرت.

در مقایسه با انواع انرژی‌های تجدید پذیر، انرژی باد ارزان‌ترین انرژی تجدید پذیر است. حمایت دولت‌ها از انرژی‌های تجدید پذیر باعث یک رشد سریع در استفاده از انرژی باد در بسیاری از کشورها شده است.

امروزه عملکرد سیستم‌های تولید انرژی بادی که بر اساس الکترونیک قدرت کار می‌کنند، باعث ترقی و پیشرفت درزمینه ی برای توربین‌های بادی ، مانند تنظیم ولتاژ و فرکانس، عملکرد جزیره‌ای و عملکرد بدون نقص تحت شرایط ولتاژی غیر ایده آل همانند عدم تعادل شبکه شده‌اند.

پیشرفت شگرف در زمینه ی توسعه توربین‌های بادی جهت تولید برق از سال ۱۹۷۵ شروع شد و حدود سال ۱۹۸۰ اولین توربین مدرن به شبکه متصل گردید. با گسترش استفاده از انرژی باد و تولید برق بادی، توربین‌های بادی متصل به ژنراتور القایی با تغذیه دوگانه (DFIG) به‌طور گسترده‌ای به کار گرفته می‌شوند.این ژنراتورها به دلیل ویژگی که در کارکرد با سرعت‌های متغیر باد دارند، موردتوجه ویژه قرار می‌گیرند. استفاده از نیروگاه‌های بادی با سرعت متغیر مزایایی نسبت به نیروگاه‌های بادی با سرعت ثابت دارد. اگرچه نیروگاه‌های بادی با سرعت ثابت، می‌توانند مستقیماً به شبکه متصل شوند، اما دامنه‌ی وسیع‌تری از انرژی، توسط نیروگاه‌های بادی سرعت متغیر، پوشش داده می‌شود و استرس‌های مکانیکی کمتری دارد. همچنین نویز صوتی هم در آن‌ها کم‌تر است. امروزه با پیشرفت‌های الکترونیک قدرت، دیگر کنترل همه سرعت‌ها ممکن و به‌صرفه شده است.

در بین انواع مختلف توربین‌های بادی، توربین‌های سرعت متغیر هستند که بر اساس ژنراتور القایی از دو سو تغذیه (DFIG) عمل می‌کنند و دارای مزیت‌های زیادی نسبت به ژنراتورهای القایی سرعت ثابت و یا ژنراتورهای سنکرون تغذیه کامل می‌باشند. این مزیت‌ها شامل ظرفیت بالاتر انتقال انرژی، سرعت‌های متغیر در فرکانس ثابت (VSCF)، کاهش لرزش، قابلیت کنترل مستقل برای توان‌های اکتیو و راکتیو، مبدل‌های نسبتاً ارزان‌تر و بهتر، محققان و سازندگان را در سراسر جهان به سمت خود سوق داده است. این مزیت‌های عالی، به‌سادگی و از طریق کنترل مبدل منبع ولتاژ پشت‌به‌پشت متصل به روتور که عمدتاً در حدود ۰/۷۵ تا ۱/۲۵ پر یونیت می‌باشد، قابل‌دسترسی است. مبدل‌های فیدبک شامل مبدل سمت روتور[۱] (RSC) مبدل سمت شبکه[۲] (GSC) می‌باشد. ظرفیت کنترل این مبدل‌ها، به ژنراتور القایی از دو سو تغذیه یک مزیت دیگر می‌دهد و آن قابلیت کنترل منعطف و پایداری آن نسبت به سایر ژنراتورهای القایی است. به‌هرحال، ازآنجایی‌که استاتور ژنراتور القایی از دو سو تغذیه به‌طور مستقیم و از طریق ترانس افزایشی به شبکه متصل است و توان نامی GSC و RSC محدود است، لذا سیستم تولیدی ژنراتور القایی از دو سو تغذیه به اغتشاشات شبکه کاملاً حساس است[۱]. در مقالات مختلف پاسخ گذرا و حالت دائم سیستم تولید توان ژنراتور القایی از دو سو تغذیه تحت شرایط متعادل و غیر متعادل مورد بحث و بررسی قرار داده‌شده و به‌طور کامل شناخته‌شده است[۲].

در عمل، هر دو شبکه انتقال و توزیع می‌توانند دارای اغتشاشات هارمونیکی ولتاژ باشند.

۱- Rotor Side Converter

۲- Grid Side Converters

۱-۲- مروری مختصر بر تحقیقات پیشین:

هدف از بهره‌برداری از انرژی‌های نو پایین آوردن هزینه‌ی تبدیل انرژی‌های موجود در محیط به انرژی الکتریکی و دیگر انرژی‌ها بدون آلودگی محیط‌زیست است. موضوع انرژی‌های نو آن‌چنان مهم است که رهنمودهای ارائه‌شده در سال ۱۹۸۰ و ۱۹۹۱ هنوز هم از اهمیت خاصی برخوردار است. یعنی اینکه در تولید نیروی برق سعی بر آن است که کمترین خطر برای آسایش بشر را در برداشته باشد. تولید نیروی هسته‌ای و فسیلی و دیگر انرژی‌هایی که برای محیط‌زیست و آسایش و رفاه بشر خطرآفرین است، بایستی با روش‌های بهتر جایگزین شوند. یعنی تبدیل به شکل انرژی‌های تجدید پذیر قابل‌دسترس در محیط شوند. در مرجع [۱] به بررسی جریان اتصال کوتاه در DFIG پرداخته و رابطه‌ی تقریبی برای ماکزیمم جریان اتصال کوتاه بیان‌شده است. هم‌چنین این مرجع روشی را برای حفاظت از مبدل قدرت ارائه کرده است. در مرجع [۱] توربین بادی با DFIG به‌طور کامل با تمام جزئیات مربوط به جنبه‌های الکتریکی، مکانیکی و ایرودینامیکی با استفاده از نرم‌افزارهای TurbSim ,FAST،Simulink شبیه‌سازی‌شده است. در مرجع [۲] مدل دینامیکی جزئی DFIG در قالب مرجع d-q آمده است و هم‌چنین با در نظر گرفتن محدودیت‌ها و حالت عملکرد، طرح جدیدی برای کنترل ولتاژ مطرح کرده است. در مرجع [۲] نتایج شبیه‌سازی رفتار حالت گذرای ژنراتور القایی از دو سو تغذیه (DFIG)، وقتی اتصال کوتاهی در باس ژنراتور رخ می‌دهد را نشان می‌دهد. هدف این بخش در حفاظت از مبدل روتور است. برای این کار طرحی کنترلی ارائه کرده و نتایج شبیه‌سازی را هم در حالت خطا و هم بعد از رفع نشان داده است. در مرجع [۳] مدل فضای حالت ساده‌شده ایی برای توصیف رفتار دینامیکی ژنراتور القایی از دو سو تغذیه (DFIG) در یک سیستم قدرت خیلی ساده بیان‌شده است. که در آن شبکه به‌صورت روابط عددی و ژنراتور القایی از دو سو تغذیه (DFIG) با مدل مرتبه سومی بیان‌شده است. در این قسمت با تحلیل مقادیر ویژه عملکرد سیستم در مقابل اغتشاشات کوچک بررسی‌شده است. بر طبق [۴] در سال ۱۹۹۱ قدرت باد را در تولید نیروی برق به جهت تجدید پذیر بودن و بدون آلودگی محیط‌زیست بودن، بهترین عنصر معرفی کردند. بر اساس مرجع فوق‌الذکر با استفاده از توربین‌های بادی سرعت متغیر (VSWT)[۱] در مقایسه با توربین‌های بادی سرعت ثابت(FSWT)[۲] می‌توان تولید انرژی را در حدود ۳٪ تا ۶٪ افزایش داد، درحالی‌که در [۴] این میزان افزایش تا ۴۰٪ بیان‌شده است. در [۴] آن‌طور که نشان داده‌شده است بهره تولید انرژی توربین بادی سرعت متغیر(VSWT) در مقایسه با اکثر توربین‌های بادی سرعت ثابت(FSWT)، با توجه به شرایط محل قرار گرفتن توربین و طراحی پارامترهای مربوطه، می‌تواند از ۴٪ تا ۲۹٪ تغییر کند. محاسبه بازده سیستم ژنراتور القایی از دو سو تغذیه (DFIG)[۳] در مقالات مختلفی بیان‌شده است، به‌عنوان نمونه [۵]، [۶].

۱- Variable Speed Wind Turbine

۲- Fixed Speed Wind Turbine

۳- Doubly Fed-Induction Generator

یک مورد استثنا در [۷] بیان‌شده است، که با مقایسه‌ای از انرژی به‌دست‌آمده برای سیستم‌های توربین‌های بادی انجام‌شده است. همچنین در [۸]، انرژی به‌دست‌آمده با استفاده از ژنراتور القایی از دو سو تغذیه می‌تواند به میزان غیرقابل‌انکاری افزایش بیابد.

در مقایسه با سیستم سرعت متغیر(VSWT)، افزایش ۲۰٪ تولید انرژی و در مقایسه با سیستم سرعت ثابت(FSWT)، افزایش ۶۰٪ بیان‌شده است. از دلایل اصلی نتایج متفاوت فوق‌الذکر،می‌تواند فرض‌های مختلفی باشد که در بررسی‌ها مفروض است. عواملی همانند طراحی پره‌ها، فرم انتخابی پره‌ها، کنترل سرعت توربین‌های بادی، ماکزیمم سرعت توربین بادی، و پارامترهای صرف‌نظر شده تماماً می‌توانند بر روی بررسی‌ها تأثیرگذار باشند. بنابراین این امر که کدام‌یک از انواع بهره تولید انرژی در بررسی‌ها به کار گرفته می‌شود، باید مشخص باشد. کنترل ژنراتور القایی از دو سو تغذیه بسیار پیچیده‌تر از ماشین‌های القایی استاندارد می‌باشد.

جهت کنترل ژنراتور القایی از دو سو تغذیه، جریان روتور توسط مبدل الکترونیکی کنترل می‌گردد که یکی از این روش‌ها کنترل جریان روتور با استفاده از کنترل برداری می‌باشد.

کنترل برداری برای ژنراتور القایی از دو سو تغذیه به شکل‌های متفاوتی پیشنهادشده است. یکی از متدهای معمول، کنترل کردن جریان روتور با استفاده از جهت‌گیری به سمت شار استاتور می‌باشد[۸]،[۹] و [۱۰] روش دیگر جهت‌گیری به سمت شار فاصله هوایی [۱۱]،[۱۲]، بوده که اگر مقاومت استاتور کوچک در نظر گرفته شود، جهت‌گیری به سمت شار استاتور، درواقع جهت‌گیری به سمت ولتاژ استاتور (جهت‌گیری به سمت شار شبکه) را نتیجه خواهد داد [۱۲]،[۱۳] و [۱۴].

برای سیستم جهت‌گیری شده به سمت شار استاتور، سیستم برای شرایط کاری خاصی ناپایدار می‌باشد. میرایی ضعیف قطب‌ها، دینامیک جریان روتور را از طریق نیروی محرکه الکتریکی برگشتی[۱] تحت تأثیر خود قرار خواهد داد.

همان‌طور که می دانیم، نوسانات شار از راه‌های مختلفی می‌تواند حذف شود. از این روش‌ها موجود می‌توان به کاهش پهنای باند کنترلر جریان اشاره کرد که به‌طور کامل در [۱۵] بیان‌شده است.

در [۱۵] جبران سازی شاری معرفی کرده‌اند که می‌تواند میرایی شار را بهتر کند و در [۱۵] از مبدل سومی جهت جابه‌جایی ستاره سیم‌پیچی استفاده‌شده است. بنابراین، با معرفی یک درجه آزادی اضافی که می‌تواند نوسانات شار را به‌صورت فعال[۲] میرا سازد روشی جدید را ارائه داده‌اند. مقایسه‌ای از روش‌های متفاوت میرا سازی

۱- Back Electromotive Force

۲- Active

نوسانات شار را در [۱۶] می‌توان مشاهده نمود.

بعد از بررسی‌های انجام‌گرفته می‌توان به این نکته اشاره کرد که دو روش قبلی، بهترین نتیجه را دربرداشته اند. به‌ویژه با در نظر گرفتن افزایش پیوسته توان نامی نیروگاه‌های توربین بادی، پاسخ توربین‌های بادی به اغتشاشات شبکه، یک مسئله بسیار حائز اهمیت خواهد بود.

بنابراین، جهت تأسیسات عمومی، مطالعه اثرات افت ولتاژها و علی‌الخصوص، پاسخ متناظر توربین‌های بادی، مسئله‌ای مهم می‌باشد. جهت محاسبات، بر مبنای شبیه‌سازی‌های صورت گرفته، داشتن مدل‌هایی ساده، به‌طوری‌که توانایی مدل کردن دینامیک شبکه را داشته باشد، ضروری است. با پیشنهاد مدل درجه سومی در [۱۷]،[۱۸]،[۱۹]،[۲۰]، که از دینامیک شار استاتور ژنراتور القایی از دو سو تغذیه صرف‌نظر می‌کند متد دیگری به بحث ما اضافه می‌گردد.

باوجوداینکه این مدل‌ها مقادیر درستی را در اختیار ما قرار می‌دهند [۲۰]، ولی از تعداد بسیاری از دینامیک‌های اصلی ژنراتور القایی از دو سو تغذیه صرف‌نظر می‌شود.

برای حفظ رفتار دینامیک سیستم ژنراتور القایی از دو سو تغذیه، باید تغییرات کوچکی انجام شود. فرکانس طبیعی دینامیک شار که نزدیک به فرکانس خط می‌باشد، یکی از مشخصات قابل‌ملاحظه‌ی سیستم ژنراتور القایی از دو سو تغذیه است.

برنامه‌های جدید شبکه نیازمند به این امر هستند که عملکرد توربین‌های مزارع بادی در برخورد با افت ولتاژها به مشکلی برخورد نکنند، به این منظور که تولید توان بعد از بهبود تغییرات ولتاژ باید مجدداً راه‌اندازی شود. این برنامه‌ها در برخی کشورهای توسعه‌یافته رو به بهبود می باشد [۲۱] و [۲۲].

برنامه‌های مذکور، انتخاب سیستم الکتریکی را در توربین‌های بادی در آینده‌ای نزدیک تحت تأثیر قرار خواهند داد، این مسئله اصل تحقیقات صنعتی برای ارتقا است [۲۱]،[۲۲]،[۲۳]،[۲۴].

توربین بادی ژنراتور القایی از دو سو تغذیه به هنگام برخورد با افت ولتاژهای بزرگ از شبکه جدا می‌شوند. سیستم‌های جدید ژنراتور القایی از دو سو تغذیه، دارای اهرمی[۱] در مدار روتور هستند، که وظیفه اتصال کوتاه کردن مدار روتور به‌منظور حفظ و نگهداری از مبدل در هنگام اغتشاشات شدید شبکه بر عهده دارد. یعنی بعد از افت ولتاژ شدید، توربین باید از شبکه جدا شود.

۱-Crowbar