

سلام افلاک

۱۳۰۶



دانشگاه بیرجند

دانشکده مهندسی

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

رشته مهندسی برق گرایش قدرت

عنوان

مدل سازی دینامیکی توربین بادی سرعت متغیر مجهز به
ژنراتور القایی روتور سیم پیچی شده دو تغذیه ای

نگارش

علی اصغر صمدی

استاد راهنما

دکتر حمیدرضا نجفی

استاد مشاور

دکتر محمدعلی شمسی نژاد

سازمان اطلاعات مدرک علمی ایران

تسبیح مدرک

۱۳۸۸/۱۰/۲۷

خرداد ۱۳۸۸

۱۳۰۰۷۹

صورتجلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد

فرم شماره ۱۰

با تاییدات خداوند متعال جلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی کارشناسی ارشد آقای علی اصغر صمدی به شماره دانشجویی: ۸۵۱۳۳۰۲۰۴۲ رشته: مهندسی برق گرایش: قدرت دانشکده: مهندسی تحت عنوان: مدل سازی دینامیکی توربین بادی سرعت متغیر با ژنراتور القایی روتور سیم پیچی شده دو تغذیه ای به ارزش: ۶ واحد در ساعت: ۱۰ روز: یکشنبه مورخ: ۱۳۸۸/۳/۱۷ با حضور اعضای محترم جلسه دفاع و نماینده تحصیلات تکمیلی به شرح ذیل تشکیل گردید:

امضاء	رتبه علمی	نام و نام خانوادگی	سمت
	استادیار	دکتر حمیدرضا نجفی	استاد راهنمای اول
-	-	-	استاد راهنمای دوم
	استادیار	دکتر محمدعلی شمسی نژاد	استاد مشاور اول
-	-	-	استاد مشاور دوم
	استادیار	دکتر حمید فلقی	داور اول
	استادیار	دکتر مریم رمضانی	داور دوم
	استادیار	دکتر محمود عبادیان	نماینده تحصیلات تکمیلی

نتیجه ارزیابی دفاع که منوط به ارائه اصلاحات پیشنهادی توسط هیئت داوران حداکثر ظرف مدت یکماه پس از تاریخ دفاع می باشد، به شرح زیر مورد تایید قرار گرفت:

قبول (با درجه: عالی و امتیاز: ۱۹,۵) دفاع مجدد غیر قابل قبول

۱- عالی (۱۹-۴۰) ۲- بسیار خوب (۱۸-۱۸/۹۹) ۳- خوب (۱۷-۱۷/۹۹) ۴- قابل قبول (۱۵/۹۹-۱۴)

(بدیهی است عواقب آموزشی ناشی از عدم ارائه به موقع اصلاحات مزبور به عهده دانشجو می باشد)

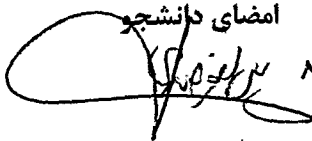
تعهد نامه حق مالکیت مادی و معنوی پایان نامه

اینجانب علی اصغر صمدی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته برق-قدرت دانشکده مهندسی دانشگاه بیرجند نویسنده پایان نامه «مدل سازی دینامیکی توربین بادی سرعت متغیر مجهز به ژنراتور القایی روتور سیم پیچی شده دو تغذیه ای» تحت راهنمایی دکتر حمیدرضا نجفی متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه بیرجند می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه بیرجند » و یا « University of Birjand » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت شده است.

تاریخ امضای دانشجو

۸۸/۳/۲۷



تقدیم:

به پاس تعبیر عظیم و انسانی شان از کلمه ایثار و از خودگذشتگی.
به پاس عاطفه سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان که در این سردترین
روزگاران بهترین پشتیبان است.
به پاس قلب های بزرگشان که فریاد رس است و سرگردانی و ترس در پناهمان
به شجاعت می گراید.
و به پاس محبت های بی دریغشان که هرگز فروکش نمی کند.

این رساله را به پدر و مادر عزیزم تقدیم می کنم.

تقدیر و تشکر:

اعتراف می‌کنم که نه زبان شکر تو را دارم و نه توان تشکر از بندگان تو، بر حسب وظیفه از کلیه اساتید ارجمندم در طول سالهای به یاد ماندنی شاگردیشان تشکر می‌نمایم. از اساتید ارجمند آقایان **دکتر حمید رضا نجفی**، **دکتر محمدعلی شمسی نژاد** برای راهنمایی، مشاوره و هدایت این پایان‌نامه و همچنین از اساتید عزیز آقای **دکتر حمید فلقی** و خانم **دکتر مریم رمضانی** جهت داوری این رساله، خاضعانه سپاسگزارم.

از کلیه دانشجویان هم دوره خود و دیگر اعضای گروه مهندسی برق دانشکده متشکرم و در پایان از پدر، مادر و همه فرشتگانی که بالهای محبت خود را گسترانیدند و با تحمل دشواری‌ها، سبب شدند تا در کمال آسودگی خیال و فراغت بال، شوق آموختن در من زنده بماند صمیمانه سپاسگزارم و این نیست جز جلوه‌ای از لطف و رحمت پرودگاری که از ادای شکر حتی یک نعمت او ناتوانم.

علی اصغر صمدی

خرداد ۱۳۸۸

چکیده

در سال های اخیر، تمرکز و افزایش نفوذ انرژی بادی در سیستم های قدرت، منجر به وابستگی بیش از حد عملکرد سیستم قدرت به تولید انرژی باد شده و در این میان توربین بادی سرعت متغیر مجهز به ژنراتور القایی دوتغذیه ای، با توجه به قدرت بالاتر این واحدها جایگاه ویژه ای به خود اختصاص داده است. با توجه به این سطح نفوذ، برهم کنش رفتار این نوع از توربین های بادی با سیستم های قدرت اهمیت بیشتری یافته و باید در مطالعات پایداری و دینامیکی، به طور مناسب مدل شود. شبیه سازی دینامیکی رفتار سیستم قدرت، ابزار بسیار مفیدی جهت برنامه ریزی، تجزیه و تحلیل پایداری و آموزش اپراتور سیستم می باشد.

رساله حاضر ضمن معرفی انواع توربین های بادی مورد استفاده در سیستم قدرت، ساختار توربین بادی سرعت متغیر با ژنراتور القایی دوتغذیه ای را به دلیل کاربرد روز افزون آن از یک طرف و ظرفیت بالای تولید آن از طرف دیگر، مورد توجه قرار داده است. در این راستا نحوه عملکرد این ژنراتور و ساختارهای مختلف آن با جزئیات کافی مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور مطالعه عملکرد این مجموعه در شرایط مختلف و تاثیر آن بر سیستم قدرت، سیستم نمونه ای در نرم افزار Matlab شبیه سازی شده و عملکرد سیستم در دو حالت اتصال و عدم اتصال توربین به شبکه قدرت بررسی شده است. پروفیل ولتاژ شین های سیستم نمونه در سرعت های باد متفاوت، پایداری ولتاژ تلفات انتقال توان، پایداری گذرا، حالت گذرای سیستم در قطع بار و... از جمله مطالعاتی هستند که در این شبیه سازی ها بررسی شده اند. نتایج این مطالعه و شبیه سازی نشان دادند که اتصال توربین به شبکه در هر یک از مطالعات انجام شده تاثیر مثبتی بر رفتار شبکه قدرت دارد. مطالعات شبیه سازی حوزه زمان درک رفتار دینامیکی سیستم را به صورت گرافیکی فراهم می آورند، لیکن این مطالعات قادر نیستند به طور کمی و کیفی، علت و طبیعت اثرات متقابل بین توربین بادی و شبکه را معین کنند. در فرآیند این شبیه سازی-ها و بررسی مطالعات مشابه در این حیطه که در مقالات مختلف ارائه شده است، فقدان یک مطالعه تحلیلی احساس می شود، در این راستا ابتدا مطالعه ای تحلیلی بر روی پایداری گذرا بر اساس زمان بحرانی رفع خطا صورت گرفته است. این مطالعه با استفاده از مدار معادل حالت مانایی ژنراتور و بدون در نظر گرفتن سیستم انتقال قدرت صورت گرفته و تلاش شده تا تاثیر رفتار توربین بادی سرعت متغیر با ژنراتور القایی دوتغذیه ای بر پایداری سیستم قدرت با مدل سازی دینامیکی تک تک عناصر یک سیستم نمونه بررسی شود. در این راستا پس از ارائه یک مدل دینامیکی کامل برای سیستم پایداری دینامیکی سیستم نمونه یا استفاده از آنالیز مقدار ویژه انجام شده است. آنالیز مقدار ویژه، مشخصه ها و ویژگی های مورد علاقه در مطالعات پایداری دینامیکی سیستم را نمایان می کند.

جهت محاسبه ماتریس سیستم و انجام آنالیز مقدار ویژه، مدل غیرخطی دیفرانسیلی-جبری سیستم نمونه از معادلات ریاضی مربوط به مدل تک تک عناصر سیستم نمونه استخراج شده و سپس مدل به ازای یک نقطه تعادل پایدار خطی سازی شده است. براساس قضایای موجود جهت بررسی پایداری دینامیکی، نشان داده شده است که سیستم به ازای یک نقطه تعادل، در ناحیه پایدار می ماند. تاثیر

پارامترهای مختلف توربین و شبکه قدرت بر مسیر حرکت مقادیر ویژه سیستم نیز بررسی شده است. سرانجام مدل دینامیکی پیشنهادی و نتایج بدست آمده از مطالعه تحلیلی و آنالیز مقدار ویژه، بوسیله شبیه سازی تایید شده و نتایج حاصله ارائه گردیده اند.

کلمات کلیدی

توربین بادی سرعت متغیر- مدل سازی دینامیکی- ژنراتور القایی دو تغذیه ای - کنورتور - پایداری گذرا- شبیه سازی دینامیکی- آنالیز مقدار ویژه

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فهرست جدول ها.....	ج
فهرست شکل ها.....	ح

فصل اول: انرژی باد

۱-۱- مقدمه	۱
۱-۲- انرژی باد	۱
۱-۳- کنترل توان	۴
۱-۴- توربین های بادی	۴
۱-۴-۱- توربین بادی سرعت ثابت	۶
۱-۴-۲- توربین بادی سرعت متغیر محدود	۶
۱-۴-۳- توربین های سرعت متغیر بامبدل های توان کامل	۷
۱-۴-۴-۱- توربین بادی سرعت متغیر با <i>DFIG</i> و مبدل های توان جزئی	۷
۱-۴-۴-۱-۱- انواع دیگر ماشین های دو تغذیه ای	۸
۱-۴-۴-۱-۲- ماشین دو تغذیه ای کاسکاد	۸
۱-۴-۴-۱-۳- ماشین کاسکاد با قاب واحد	۹
۱-۴-۴-۱-۴- ماشین دو تغذیه ای بدون جاروبک	۹
۱-۴-۴-۱-۵- ماشین دو تغذیه ای با روتور رلوکتانسی	۱۰
۱-۵- عملکرد توربین های بادی سرعت متغیر	۱۰

فصل دوم: توربین بادی سرعت متغیر با ژنراتور القایی دو تغذیه ای

۱-۲- توربین بادی سرعت متغیر با ژنراتورهای القایی دو تغذیه ای	۱۴
--	----

- ۲-۲-۲- مقدمه..... ۱۴
- ۲-۳-۲- نحوه عملکرد *DFIG* در توربین بادی سرعت متغیر..... ۱۶
- ۲-۴-۲- مدار معادل الکتریکی حوزه فازور *DFIG*..... ۱۷
- ۲-۵-۲- توزیع توان حقیقی و راکتیو در *DFIG*..... ۱۸
- ۲-۶-۲- *DFIG* به عنوان ماشین سنکرون..... ۲۰
- ۲-۷-۲- *DFIG* به عنوان ماشین القایی..... ۲۱
- ۲-۸-۲- بدست آوردن معادلات با استفاده از اصل جمع آثار..... ۲۱
- ۲-۸-۱-۲- تحریک سمت استاتور..... ۲۲
- ۲-۸-۲-۲- تحریک سمت روتور..... ۲۲
- ۲-۸-۳-۲- تحریک روتور و استاتور به صورت همزمان..... ۲۲
- ۲-۹-۲- معادلات گشتاور *DFIG*..... ۲۲
- ۲-۱۰-۲- مشخصه های حالت مرکب (هایبرید)..... ۲۳
- ۲-۱۱-۲- منحنی های توان بر حسب δ ۲۴
- ۲-۱۲-۲- قابلیت کنترل توان اکتیو و راکتیو در توربین بادی مجهز به *DFIG*..... ۲۵
- ۲-۱۳-۲- کنترل برداری توربین بادی مجهز به *DFIG* در شبکه..... ۲۶
- ۲-۱۳-۲-۱- اصول کنترل برداری کنورتور سمت روتور..... ۲۶
- ۲-۱۳-۲-۲- کنترل برداری مبدل سمت شبکه..... ۲۸
- ۲-۱۴-۲- شبیه سازی عملکرد توربین بادی مجهز به ژنراتور دوتغذیه ای بر شبکه قدرت..... ۳۰
- ۲-۱۴-۲-۱- بررسی پروفیل ولتاژ در شین بار..... ۳۱
- ۲-۱۴-۲-۲- تلفات توان..... ۳۲
- ۲-۱۴-۲-۳- پایداری ولتاژ..... ۳۳
- ۲-۱۴-۲-۴- پایداری گذرا..... ۳۴

- ۳۷ آنالیز هارمونیکی ۵-۱۴-۲
- ۳۸ بررسی پایداری گذرای توربین بادی مجهز به *DFIG* ۱۵-۲
- ۳۸ مفهوم سرعت بحرانی در *DFIG* ۱-۱۵-۲
- ۴۰ زمان بحرانی رفع خطا در *DFIG* ۲-۱۵-۲
- ۴۱ پارامترهای موثر بر زمان بحرانی رفع خطا ۳-۱۵-۲

فصل سوم: مدل سازی دینامیکی و آنالیز مقدار ویژه

- ۴۶ مقدمه ۱-۳
- ۴۸ سیستم نمونه ۲-۳
- ۴۹ مدل ژنراتور ۳-۳
- ۴۹ مدل ژنراتور القایی دو تغذیه ای با روتور سیم پیچی شده ۱-۳-۳
- ۵۳ مدل کنورتور ۲-۳-۳
- ۵۴ دینامیک خازن لینک *DC* ۳-۳-۳
- ۵۵ دینامیک کنترل کننده مبدل های الکترونیک قدرت ۴-۳-۳
- ۵۵ دینامیک کنترل کننده مبدل سمت روتور ۵-۳-۳
- ۵۶ دینامیک کنترل کننده مبدل سمت شبکه ۶-۳-۳
- ۵۷ مدل ترانسفورماتور ۷-۳-۳
- ۵۹ مدل توربین ۴-۳
- ۵۹ مدل سیستم انتقال قدرت ۱-۴-۳
- ۶۰ مدل کنترل کننده زاویه پره ها ۲-۴-۳
- ۶۰ مدل بار در مطالعات دینامیکی ۵-۳
- ۶۱ مدل خط انتقال ۶-۳

- ۶۲..... ۷-۳ مدل شبکه
- ۶۳..... ۸-۳ شبیه سازی دینامیکی سیستم قدرت
- ۶۵..... ۹-۳ مدل دیفرانسیلی - جبری سیستم نمونه
- ۶۵..... ۱-۹-۳ معادلات جبری استاتور
- ۶۶..... ۲-۹-۳ معادلات جبری شبکه
- ۶۷..... ۱۰-۳ تبدیل معادلات از قاب گردان *DFIG* به قاب گردان شبکه
- ۶۷..... ۱۱-۳ اعمال تبدیل به معادلات *DFIG*
- ۶۸..... ۱۲-۳ اعمال تبدیل به معادلات جبری استاتور *DFIG*
- ۶۹..... ۱۳-۳ تبدیل معادلات کنترلرهای مبدل الکترونیک قدرت به قاب شبکه
- ۶۹..... ۱-۱۳-۳ کنترل کننده مبدل سمت روتور
- ۶۹..... ۲-۱۳-۳ کنترل کننده مبدل سمت شبکه
- ۷۰..... ۳-۱۳-۳ دینامیک خازن لینک *dc*
- ۷۱..... ۱۴-۳ بررسی پایداری سیستم نمونه
- ۷۸..... ۱۵-۳ تاثیر پارامترهای مختلف بر پایداری سیستم نمونه
- ۸۷..... ۱۶-۳ تایید نتایج بدست آمده از آنالیز مقادیر ویژه در شبیه ساز *Matlab*
- ۹۵..... نتیجه گیری و پیشنهادات
- ۹۹..... منابع و مراجع

فهرست شکل ها

صفحه

عنوان

- شکل (۱-۱): توزیع ویبول به ازاء $k = 2$ و سرعت های متوسط باد $w_m = 4.5, 6.5, 8.5, 10.5 m/s$ ۲
- شکل (۲-۱): الف- تغییرات C_p بر حسب λ به ازاء β های مختلف ب - تغییرات توان خروجی بر حسب w_m ۳
- شکل (۳-۱): توربین بادی سرعت ثابت ۶
- شکل (۴-۱): توربین باد سرعت متغیر محدود ۷
- شکل (۵-۱): توربین سرعت متغیر بامبدل های توان کامل ۷
- شکل (۶-۱): توربین بادی سرعت متغیر با $DFIG$ و با مبدل های توان جزئی ۸
- شکل (۷-۱): ماشین دو تغذیه ای کاسکاد ۹
- شکل (۸-۱): ماشین دو تغذیه ای بدون جاروبک ۹
- شکل (۹-۱): تغییرات توان خروجی بر حسب سرعت روتور توربین در سرعت های متفاوت به ازاء توربین ۳MW ۱۱
- شکل (۱۰-۱): الف- C_p بر حسب سرعت نوک پره ب - C_p بر حسب سرعت توربین در سرعت های باد متفاوت ۱۲
- شکل (۱۱-۱): تنش مکانیکی توربین بر حسب سرعت توربین ۱۳
- شکل (۱-۲): انواع توپولوژی مبدل های الکترونیک قدرت در توربین $DFIG$ ۱۵
- شکل (۲-۲): مدهای عملکردی $DFIG$ ۱۶
- شکل (۳-۲): مدار معادل حوزه فیزور $DFIG$ ۱۷
- شکل (۴-۲): حالت های عملکرد $DFIG$ بر اساس جدول (۱-۲) ۱۹
- شکل (۵-۲): منحنی توان بر حسب زاویه بار $DFIG$ ۲۰
- شکل (۶-۲): مدار معادل تقریبی $DFIG$ ۲۱
- شکل (۷-۲): منحنی های توان بر حسب سرعت ۲۲
- شکل (۸-۲): مولفه های گشتاور $T_{R+S}, T_{sr \cos}, T_{sr \sin}$ ۲۴
- شکل (۹-۲): تجزیه توان بر حسب δ ۲۴
- شکل (۱۰-۲): مشخصه توان اکتیو بر حسب توان راکتیو $DFIG$ ۲۵
- شکل (۱۱-۲): طرح کنترل مبدل سمت ماشین ۲۸
- شکل (۱۲-۲): مبدل سمت شبکه ۲۸
- شکل (۱۳-۲): طرح کنترل برداری مبدل سمت شبکه ۳۰

- شکل (۲-۱۴): سیستم تست در محیط *Matlab/simulink* ۳۱
- شکل (۲-۱۵): پروفیل ولتاژ شین بار در دو حالت، به ازای سرعت های باد مختلف ۳۲
- شکل (۲-۱۶): تغییرات تلفات سیستم در دو حالت به ازای سرعت های 4 m/s , 8 m/s , 12 m/s , 20 m/s ۳۳
- شکل (۲-۱۷): منحنی p_v برای سرعت 12 m/s ۳۴
- شکل (۲-۱۸): اتصال کوتاه سه فاز در شین بار ۳۵
- شکل (۲-۱۹): عملکرد توربین ها در اتصال کوتاه سه فاز ۳۵
- شکل (۲-۲۰): عملکرد توربین ها در وصل بار ۳۶
- شکل (۲-۲۱): جدا شدن توربین ها ۳۷
- شکل (۲-۲۲): آنالیز هارمونیک جریان *DFIG*، الف - بدون فیلتر، ب- با فیلتر ۳۸
- شکل (۲-۲۳): سیستم مورد مطالعه ۳۹
- شکل (۲-۲۴): سرعت روتور *DFIG* در زمان های مختلف حذف خطا ۳۹
- شکل (۲-۲۵): گشتاور الکتریکی *DFIG* بر حسب سرعت در حالت ژنراتوری ۴۰
- شکل (۲-۲۶): اثر تغییر مقاومت روتور و استاتور بر t_{crit} ۴۲
- شکل (۲-۲۷): تاثیر تغییرات راکتانس استاتور و روتور بر t_{crit} ۴۳
- شکل (۲-۲۸): تاثیر تغییرات اندازه ولتاژ استاتور و روتور بر t_{crit} ۴۳
- شکل (۲-۲۹): تاثیر ولتاژ روتور بر مشخصه گشتاور سرعت t_{crit} ۴۴
- شکل (۲-۳۰): تاثیر زاویه ولتاژ روتور بر t_{crit} ۴۵
- شکل (۲-۳۱): منحنی گشتاور بر حسب سرعت *DFIG* به ازای $\delta=30^\circ, 0^\circ, -40^\circ$ ۴۵
- شکل (۳-۱): دوره زمانی پدیده های دینامیکی مختلف ۴۶
- شکل (۳-۲): سیستم نمونه مورد مطالعه در مدل سازی دینامیکی ۴۸
- شکل (۳-۳): دیاگرام ماشین القایی روتور سیم پیچی شده ۴۹
- شکل (۳-۴): قاب dq نسبت به abc ۵۰
- شکل (۳-۵): مدل مطالعات پایداری *DFIG* ۵۱
- شکل (۳-۶): مبدل های الکترونیک قدرت ۵۳
- شکل (۳-۷): دیاگرام بلوکی کنترل کننده مبدل سمت روتور ۵۵
- شکل (۳-۸): دیاگرام بلوکی سیستم کنترل مبدل سمت شبکه ۵۶

- شکل (۳-۹): مدار معادل بر فاز ترانسفورماتور ۵۷
- شکل (۳-۱۰): مدل π ترانسفورماتور ۵۷
- شکل (۳-۱۱): مدل ساده شده ترانسفورماتور ۵۸
- شکل (۳-۱۲): دیاگرام ترانسفورماتور سه سیم پیچه بر فاز و مدار معادل ۵۸
- شکل (۳-۱۳): مدار معادل ساده شده ترانسفورماتور سه سیم پیچه ۵۸
- شکل (۳-۱۴): مدل دو جرمه سیستم انتقال قدرت توربین بادی ۵۹
- شکل (۳-۱۵): کنترل زاویه گام ۶۰
- شکل (۳-۱۶): مدل π خط انتقال ۶۲
- شکل (۳-۱۷): مدل π ساده شده در خطوط کوتاه ۶۲
- شکل (۳-۱۸): مدل شبکه در مطالعات دینامیکی ۶۳
- شکل (۳-۲۰): ساختار کلی مدل کامل سیستم قدرت جهت مطالعات دینامیکی ۶۴
- شکل (۳-۲۱): تبدیل قاب گردان ۶۵
- شکل (۳-۲۲): مدل ساده شده سیستم نمونه ۶۶
- شکل (۳-۲۲): الف- مدار معادل DFIG در قاب گردان DFIG، ب- مدار معادل DFIG در قاب گردان شبکه ۶۸
- شکل (۳-۲۴): مقادیر ویژه سیستم و مسیر رفتار این مقادیر ۷۷
- شکل (۳-۲۵): تاثیر تغییرات بار بر پایداری سیستم ۷۸
- شکل (۳-۲۶): تاثیر تغییرات ضریب توان بر پایداری سیستم ۷۹
- شکل (۳-۲۷): تاثیر تغییرات X_{line} بر پایداری سیستم ۸۰
- شکل (۳-۲۸): تاثیر تغییرات R_{line} بر پایداری سیستم ۸۰
- شکل (۳-۲۹): تاثیر تغییرات L_m بر پایداری سیستم ۸۱
- شکل (۳-۳۰): تاثیر تغییرات L_r بر پایداری سیستم ۸۲
- شکل (۳-۳۱): تاثیر تغییرات R_r بر پایداری سیستم ۸۳
- شکل (۳-۳۲): تاثیر تغییرات R_s بر پایداری سیستم ۸۳
- شکل (۳-۳۳): تاثیر تغییرات L_s بر پایداری سیستم ۸۴
- شکل (۳-۳۴): تاثیر تغییرات H_f بر پایداری سیستم ۸۵
- شکل (۳-۳۵): تاثیر تغییرات H_g بر پایداری سیستم ۸۵

- شکل (۳-۳۶): تاثیر تغییرات K بر پایداری سیستم..... ۸۶
- شکل (۳-۳۷): تاثیر تغییرات D بر پایداری سیستم..... ۸۷
- شکل (۳-۳۸): سیستم شبیه سازی شده در محیط *Matlab /simulink*..... ۸۷
- شکل (۳-۳۹): الف -تاثیر تغییر توان بر ولتاژشین های سیستم، ب -تاثیر تغییر ضریب توان بر ولتاژ شین ها..... ۸۸
- شکل (۳-۴۰): الف -تاثیر تغییر راکتانس خط بر ولتاژ ، ب -تاثیر تغییر راکتانس خط بر توان ۸۹
- شکل (۳-۴۱): الف -تاثیر تغییر مقاومت خط بر ولتاژ ، ب -تاثیر تغییر مقاومت خط بر توان..... ۸۹
- شکل (۳-۴۲): الف-تاثیر اندوکتانس متقابل DFIG بر ولتاژ ب -تاثیر اندوکتانس متقابل DFIG بر توان اکتیو ۹۰
- شکل (۳-۴۳): الف -تاثیر اندوکتانس روتور DFIG بر ولتاژ، ب -تاثیر اندوکتانس روتور DFIG بر توان حقیقی..... ۹۱
- شکل (۳-۴۴): الف-تاثیر اندوکتانس استاتور DFIG بر ولتاژ، ب -تاثیر اندوکتانس استاتور DFIG بر توان حقیقی..... ۹۱
- شکل (۳-۴۵): الف -تاثیر مقاومت استاتور DFIG بر ولتاژ، ب -تاثیر مقاومت استاتور DFIG بر توان حقیقی..... ۹۲
- شکل (۳-۴۶): الف -تاثیر مقاومت روتور DFIG بر توان حقیقی، ب -تاثیر مقاومت روتور DFIG بر توان راکتیو..... ۹۳
- شکل (۳-۴۷): الف -تاثیر تغییر اینرسی توربین بر توان حقیقی، ب -تاثیر تغییر اینرسی توربین بر توان راکتیو..... ۹۴
- شکل (۳-۴۸): الف -تاثیر ضریب اصطکاک توربین بر توان حقیقی، ب - تاثیر ضریب اصطکاک توربین بر توان راکتیو..... ۹۴

فهرست جدولها

صفحه	عنوان
۵.....	جدول (۱-۱): کارخانجات سازنده توربین بادی و انواع ژنراتورهای تولیدی.....
۱۹.....	جدول (۱-۲): مدهای عملکردی <i>DFIG</i>
۷۶.....	جدول (۱-۳): مقادیر ویژه سیستم.....
۷۶.....	جدول (۲-۳): پارامترهای سیستم.....

فصل اول

انرژی باد

۱-۱- مقدمه

تولید پراکنده^۱ مفهوم جدیدی در سیستم های تولید انرژی الکتریکی است و بر اساس تعاریف موجود در مراجع، به تکنولوژی تولید توان بین $10kW$ تا $500MW$ در نزدیکی بار یا شبکه توزیع گفته می شود [۱]. توان بادی، توان ناشی از خورشید، پیل سوختی، میکرو توربین ها و.. از انواع منابع تولید پراکنده هستند. انعطاف پذیری در اندازه، کمک به اصلاح پیک بار، سازگاری با محیط، امکان کنترل از راه دور نسبت به مکان نصب تجهیزات تولید انرژی و سهولت در فروش توان تولیدی از جمله مزایای منابع تولید پراکنده می باشند. در حال حاضر انرژی بادی به عنوان یکی از تکنولوژی های تولید پراکنده در جهان توسعه فراوان یافته و مورد توجه است. [۱،۲]

اولین توربین های بادی جهت تولید توان الکتریکی پیش از این در پایان قرن ۱۹ میلادی توسعه یافتند. در طول زمستان ۸۸-۱۸۸۷ براش (*Brush*) نحوه عملکرد اتوماتیک توربین بادی جهت تولید الکتریسیته را توسعه داد که این توربین بادی، توانی در حدود $12kW$ را تولید می کرد. در آغاز قرن ۲۰، موسسات مطالعاتی در مورد تکنولوژی انرژی بادی شروع به تحقیق کردند و اولین توربین بادی در مقیاس صنعتی توسط *Poul la Cour* ارائه شد. در طول دوره ۱۹۴۰-۱۹۵۰ دو راهکار بهبود دهنده عملکرد توربین های بادی: ۱- ساختار سه پره توربین های بادی و ۲- جایگزینی ژنراتور های *AC* با ژنراتورهای *DC* ارائه شد [۳].

در ۱۹۷۰ در پی بحران جهانی نفت، علاقه به انرژی بادی افزایش یافت و ظرفیت تولید انرژی بادی توربین ها به چند صد کیلووات افزایش پیدا کرد. از ۱۹۸۰ توربین های چند مگاواتی در سیستم قدرت به کار رفتند و جهت گیری تکنولوژی توربین های بادی به سمت کاهش هزینه های تولید برق سوق پیدا کرد، به طوری که در پایان سال های ۱۹۹۰ انرژی بادی به عنوان یک منبع انرژی با اهمیت بالا و مناسب در میان سایر منابع تامین کننده انرژی ظاهر شد [۴]. توسعه تکنولوژی تولید این انرژی نسبت به سایر انرژی ها در جهان دارای رشد بیشتری بوده است. بر طبق مرجع [۵] ظرفیت نصب شده انرژی بادی در سطح جهان در سال های $2005-9/084 GW$ ، $2006-74/223 GW$ ، $2007-95 GW$ و در سال $2008-121 GW$ بوده است، که این مقدار انرژی در بیش از ۵۰ کشور جهان تولید شده و حدود ۷۰٪ آن، سهم کشور های اروپای شرقی *EU* می باشد. بر اساس معاهده های بین المللی، پیش بینی شده که رشد تولید توان بادی سریعتر شود و تا سال ۲۰۱۶ به ۱۰٪ سطح اشباع که حدود $190 GW$ برسد، البته پیش بینی شده که در بازه سال های $2030-2035$ تولید جهانی به حد اشباع $190 GW$ خواهد رسید. آنچنان که انتظار می رود انرژی بادی در آینده نقش بسیار مهمی در تامین انرژی بشر ایفا می کند [۶].

۱-۲- انرژی باد

انرژی در باد از جرم هوایی که در حرکت است بدست می آید که انرژی جنبشی باد نامیده می شود. برای استفاده از انرژی باد باید آن را به نوع دیگری، به عنوان مثال انرژی مکانیکی، تبدیل کرد این انرژی جنبشی با کاهش سرعت باد کاهش می یابد. از اینرو یکی از پارامترهای مهم در استحصال انرژی بادی

^۱ Distributed Generation

سرعت باد می باشد. تغییرات سرعت باد به ارتفاع از سطح زمین بستگی دارد به طوری که در نزدیکی سطح زمین این تغییرات معادل با صفر و با افزایش ارتفاع از سطح زمین افزایش می یابد [۷]. عبارتی که می توان با استفاده از آن سرعت باد را با ارتفاع تخمین زد به صورت زیر است.

$$w(z) = w_r \left(\frac{z}{z_r} \right)^\alpha \quad (1-1)$$

که w_r سرعت متوسط باد در ارتفاع مرجع z_r ، $w(z)$ سرعت باد در ارتفاع z است، که α به ناهمواری زمین وابسته است و برای مناطق مختلف دریا و مناطق جنگلی و شهرها از حدود 0.1 تا 0.3 می باشد [۸]. تابع توزیع احتمالی که تقریباً در همه مکان ها جهت توصیف سرعت باد مناسب است تابع توزیع ویبول است این تابع در معادله (۲-۱) توصیف شده است.

$$f(w) = \frac{k}{c} \left(\frac{w}{c} \right)^{k-1} e^{-(w/c)^k} \quad (2-1)$$

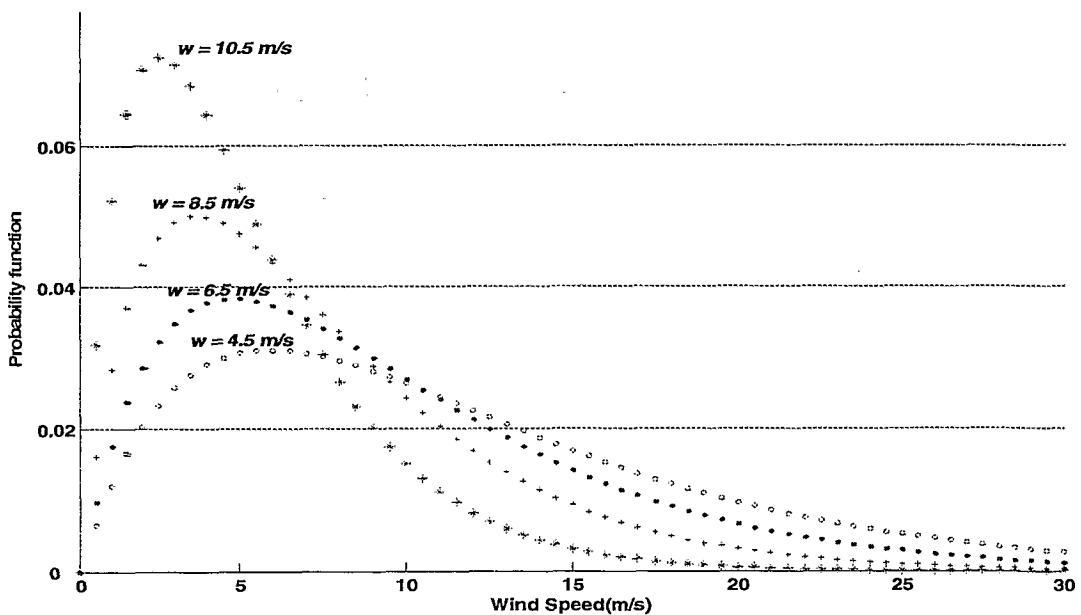
که $f(w)$ تابع چگالی احتمال برای سرعت باد w ، c پارامتر مقیاس و k پارامتر فرم است. به ازاء یک مقدار خاص $k=2$ توزیع ریلی^۱ بدست می آید. تابع توزیع ریلی، زمانی که هیچ اطلاعاتی از منطقه موجود نیست یک تقریب متعارف برای تخمین سرعت باد، می باشد. با استفاده از تابع توزیع ویبول^۲ می توان سرعت متوسط باد را بدست آورد [۹].

$$w_m = c \Gamma \left(\frac{1+k}{k} \right) \quad (3-1)$$

Γ ، تابع گاما می باشد. برای یک توزیع ریلی سرعت متوسط باد به صورت زیر محاسبه می شود.

$$w_m = c \Gamma(1.5) = c \sqrt{\pi} / 2 \quad (4-1)$$

شکل (۱-۱) توزیع ویبول را به ازاء $k=2$ و سرعت های متوسط باد $w_m = 4.5, 6.5, 8.5, 10.5 \text{ m/s}$ نشان داده است.



شکل (۱-۱): توزیع ویبول به ازاء $k=2$ و سرعت های متوسط باد $w_m = 4.5, 6.5, 8.5, 10.5 \text{ m/s}$

^۱ Rayleigh

^۲ Weibull