بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده برق و کامپیوتر

طراحی سیستم قدرت یکپارچه DC برای کلکتورِ نیروگاه‌های بادی فراساحل متصل به شبکه

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق – قدرت

شادی چوانگ پیشت

استاد راهنما

دکتر احمدرضا تابش

۱۳۹۰

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده برق و کامپیوتر

پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق - قدرت خانم شادی چوانگ پیشت

تحت عنوان

طراحی سیستم قدرت یکپارچه‌ی DC برای کلکتورِ نیروگاه‌های بادی فراساحل متصل به شبکه

در تاریخ ۱۳۹۰/۵/۲۳ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان‌نامه	دکتر احمدرضا تابش	امضاء
۲- استاد مشاور	دکتر مریم سعیدی فرد	امضاء
۳- استاد داور	دکتر اکبر ابراهیمی	امضاء
۴- استاد داور	دکتر محمد ابراهیمی	امضاء
سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر امیر برجی	امضاء

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان و تحت حمایت مالی شرکت برق منطقه‌ای اصفهان است.

به مادرم،

به پاس عشق بی پایانش...

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب ..... هفت

چکیده.. ..... ۱

فصل اول: مقدمه

۱-۱- پیش‌زمینه و صورت مساله تحقیق ۲

۱-۲- انگیزه و اهداف ۴

۱-۳- راهبرد دستیابی به اهداف و مرور پژوهش‌های انجام‌شده‌ی مرتبط ۵

۱-۴- ساختار پایان نامه ۶

فصل دوم: ساختار توربین- ژنراتورهای بادی

۲-۱- مقدمه ۸

۲-۲- مدل آئرودینامیک توربین‌های بادی ۹

۲-۳- اجزای توربین- ژنراتور بادی ۱۳

۲-۴- ساختارهای مختلف توربین- ژنراتورهای بادی ۱۶

۲-۴-۱- روش‌های کنترل توان مکانیکی ورودی ۱۶

۲-۴-۲- ساختارهای کنترل سرعت روتور ۱۷

۲-۴-۳- بررسی ساختارهای توربین- ژنراتور موجود در صنعت ۲۱

۲-۵- ماشین‌های مورد استفاده در ساختارتوربین- ژنراتورهای بادی ۲۲

۲-۵-۱- ژنراتور آسنکرون (القایی) ۲۳

۲-۵-۲- ژنراتور سنکرون ۲۴

۲-۶- مدارهای واسطه الکترونیک‌قدرت مورد استفاده در توربین- ژنراتورهای بادی ۲۵

۲-۶-۱- راه‌انداز نرم ۲۵

۲-۶-۲- مبدل‌های الکترونیک‌قدرت ۲۶

۲-۷- خلاصه و نتیجه‌گیری فصل ۲۸

فصل سوم: سیستم‌های کلکتور و انتقال انرژی نیروگاه بادی

۳-۱- مقدمه ۲۹

۳-۲- تعریف مزرعه یا نیروگاه بادی ۳۰

۳-۲-۱- سرعت باد و تقسیم بندی نیروگاه های بادی ۳۱

۳-۲-۲- نیروگاه‌های فراساحل ۳۲

۳-۳- سیستم‌های کلکتور نیروگاه‌های بادی ۳۴

۳-۳-۱- سیستم‌های کلکتور ac ۳۴

۳-۳-۲- سیستم‌های کلکتور dc ۳۷

۳-۴- سیستم‌های انتقال توان ۴۲

۳-۴-۱- سیستم انتقال HVAC ۴۳

۳-۴-۲- سیستم انتقال HVDC ۴۵

۳-۵- خلاصه و نتیجه‌گیری فصل ۵۰

فصل چهارم: سیستم کنترل پیشنهادی برای توربین ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم

۴-۱- مقدمه ۵۲
۴-۲- ساختار واحد توربین-ژنراتور بادی ۵۳
۴-۳- مدل سازی اجزای سیستم ۵۴
۴-۳-۱- فرضیات و راهکار مدل‌سازی ۵۴
۴-۳-۲- مدل آئرودینامیک توربین بادی ۵۵
۴-۳-۳- ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم ۵۷
۴-۳-۴- سیستم قدرت dc و مدار واسط الکترونیک قدرت ۵۸
۴-۴- سیستم کنترل پیشنهادی ۶۱
۴-۴-۱- بیان مفهومی ایده و روش طراحی ۶۱
۴-۴-۲- مدل جبری غیرخطی بخش‌های الکتریکی ۶۳
۴-۴-۳- مدل دینامیک خطی‌سازی شده‌ی بخش‌های مکانیکی ۶۴
۴-۴-۴- طراحی کنترل کننده ۶۶
۴-۵- شبیه‌سازی و بررسی عملکرد سیستم کنترل ۶۶
۴-۵-۱- سیستم مطالعاتی ۶۶
۴-۵-۲- بررسی عملکرد سیستم کنترل در تعقیب نقطه‌ی بیشینه‌ی توان ۶۹
۴-۵-۳- بررسی عملکرد سیستم کنترل در پس‌زنی اعوجاج ۷۲
۴-۵-۴- بررسی مقاوم بودن پارامتری سیستم کنترل ۷۳
۴-۶- خلاصه و نتیجه‌گیری فصل ۷۵

فصل پنجم: سیستم کلکتور پیشنهادی ماتریسی برای نیروگاه فراساحل با سیستم انتقال dc

۵-۱- مقدمه ۷۷
۵-۲- معرفی روش اتصال ماتریسی ۷۸
۵-۲-۱- عملکرد روش اتصال‌کوتاه هنگام وقوع شکست ۷۹
۵-۲-۲- روش پیشنهادی اتصال ماتریسی و عملکرد آن هنگام وقوع شکست ۸۲
۵-۳- نواحی عملکرد روش اتصال کوتاه و اتصال ماتریسی ۸۸
۵-۳-۱- ناحیه‌ی عملکرد روش اتصال کوتاه ۸۸
۵-۳-۲- ناحیه‌ی عملکرد روش اتصال ماتریسی ۸۹
۵-۴- شبیه‌سازی رفتار یک نیروگاه بادی به هنگام وقوع شکست در یک یا چند واحد ۹۴
۵-۴-۱- شکست محدود ۹۶
۵-۴-۲- شکست گسترده ۹۷
۵-۵- خلاصه و نتیجه‌گیری فصل ۱۰۰

فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۶-۱- خلاصه و جمع‌بندی پژوهش‌های انجام‌شده ۱۰۲
۶-۲- پیشنهادات برای ادامه‌ی کار ۱۰۴
مراجع ۱۰۵

چکیده

در دو دهه‌ی اخیر گسترش تولید توان با استفاده از نیروگاه‌های بادی به عنوان یکی از منابع اصلی انرژی تجدیدپذیر، در زمره‌ی سیاست‌های توسعه‌ی پایدار اکثر کشورها قرار گرفته است. در این راستا نیروگاه‌های بادی فراساحل، به دلیل قابلیت تولید توان بالاتر سهم عمده‌ای از تولید نیروگاه‌های بادی را به خود اختصاص داده‌اند. هم‌زمان با افزایش توان تولیدی، فاصله‌ی نیروگاه‌های فراساحل از شبکه‌ی ساحلی و ابعاد سیستم الکتریکی داخلی آن‌ها افزایش می‌یابد. به دلیل خاصیت خازنی بالای کابل‌های زیر دریایی، سیستم انتقال ac مرسوم، سیستم کارآمدی برای این نیروگاه‌ها نخواهد بود و در نتیجه انتقال توان در نیروگاه‌های فراساحل به عنوان یک چالش مهم در توسعه‌ی این نیروگاه‌ها مطرح می‌گردد. پژوهش‌های اخیر، سیستم یکپارچه‌ی dc شامل سیستم انتقال dc ولتاژ بالا به همراه سیستم کلکتور dc با ولتاژ پایین یا متوسط را به عنوان یک راه حل مناسب برای انتقال توان نیروگاه‌های بادی به شبکه پیشنهاد می‌کند. سیستم کلکتور در یک نیروگاه بادی، شامل کابل‌های اتصال واحدهای توربین- ژنراتور، ترانسفورمرها و واحدهای الکترونیک‌قدرت از ترمینال ژنراتور تا نقطه‌ی اتصال به سیستم انتقال است.

این پایان‌نامه، ابتدا به بررسی سیستم یکپارچه‌ی dc در کاربرد خاص نیروگاه‌های بادی فراساحل می‌پردازد و توپولوژی مناسبی برای سیستم کلکتور dc در این نیروگاه‌ها ارائه می‌دهد. در این راستا، ساختارهای مورد استفاده در یک سیستم یکپارچه‌ی قدرت dc بررسی گردیده‌اند و ساختار مناسبی شامل ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم با واسطه دیودی و مبدل dc/dc برای اتصال به سیستم کلکتور dc یک نیروگاه فراساحل ارائه گردیده است. برای تحلیل و طراحی سیستم پیشنهادی، مدل دینامیکی ساده شده‌ای بر مبنای ایده‌ی جداسازی دینامیک‌های تُند و کُند ارائه و با استفاده از مدل پیشنهادی سیستم کنترل مناسب برای ساختار توربین- ژنراتور طراحی گردیده است. راست‌آزمایی مدل و راهکار کنترل پیشنهادی از طریق آنالیز حساسیت و شبیه‌سازی یک سیستم مطالعاتی دو ماشینه با اتصالات سری انجام شده است. نتایج این بررسی، توانایی کنترل کننده‌ها در تعقیب سرعت مرجع و پس‌زنی اعوجاج را با درصد خطای کم‌تر از ۱٪ نشان می‌دهد. هم‌چنین براساس آنالیز حساسیت انجام شده، مقاوم بودن سیستم کنترل نسبت به تغییر پارامترهای مدل ارائه شده بررسی و ارزیابی گردیده است.

در ادامه توپولوژی اتصال ماتریسی بر مبنای سیستم کلکتور dc سری- موازی پیشنهاد گردیده است که در آن با ایجاد مسیرهای مناسب بین شاخه‌ها هنگام وقوع شکست گسترده در واحدها، مشکل اضافه ولتاژ که درتوپولوژی سری- موازی مرسوم وجود دارد، برطرف می‌گردد. این توپولوژی امکان جذب حداکثر توان قابل دسترس از نیروگاه را در شرایط شکست یک یا چند واحد فراهم می‌آورد و به این ترتیب بازده و قابلیت اطمینان سیستم را بهبود می‌بخشد. مقایسه‌ی کارایی توپولوژی ماتریسی با روش اتصال سری-موازی براساس تحلیل ریاضی ارائه شده و بر روی یک سیستم مطالعاتی شامل ۱۲ واحد توربین-ژنراتور بادی پیاده سازی شده است. براساس این تحلیل نشان داده شده است که ناحیه‌ی عملکرد و کارایی روش اتصال ماتریسی با افزودن تعداد شاخه‌های موازی به سیستم کلکتور گسترش می‌یابد. تحلیل ارائه شده همچنین معیاری برای تعیین تعداد شاخه های موازی و تعیین تعداد واحدهای مناسب در شاخه‌های سری ارائه می نماید که می‌تواند در طراحی سیستم کلکتور مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: نیروگاه‌های بادی فراساحل؛ توربین-ژنراتور بادی؛ مدل سازی دینامیکی؛ مزارع باد؛ کنترل نیروگاه-های بادی؛ سیستم قدرت dc؛ سیستم یکپارچه dc؛ سیستم کلکتور.

فصل اول

مقدمه

۱-۱-پیش‌زمینه و صورت مساله تحقیق

پایان‌پذیر بودن منابع انرژی فسیلی و آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از آن‌ها، گرایش روزافزونی برای بهره‌برداری از منابع انرژی تجدیدپذیر هم‌چون باد، خورشید و امواج دریا پدید آورده است. در میان گونه‌های مختلف انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی باد با فناوری تثبیت‌شده‌ی توربین- ژنراتورهای بادی، از مطرح‌ترین منابع انرژی تجدیدپذیر کنونی به شمار می‌رود. نیروگاه‌های بادی هم در مناطق باد خیز در خشکی (معمولا در نقاط کوهستانی) و هم درسطح دریا ودر نزدیکی سواحل دریا (فراساحل) قابل نصب هستند. اصلی‌ترین مزیت نیروگاه‌های بادی فراساحل نسبت به نیروگاه‌های بادی در خشکی، چگالی تولید توان و انرژی بالاتر به دلیل سرعت باد بیشتر و مدت زمان طولانی‌تر وزش باد در سطح دریا می‌باشد. به دلیل بهره‌وری بالا، نیروگاه‌های بادی فراساحل علیرغم هزینه زیاد نصب و راه اندازی، امروزه اهمیت بیشتری در بحث تولید انرژی یافته و سرمایه‌گذاری‌های زیادی را در بخش-های تحقیقاتی و صنعتی به خود اختصاص داده‌اند.

انتقال توان تولیدی نیروگاه‌های فراساحل به شبکه‌ی برق درساحل، از طریق کابل‌های زیردریا که خاصیت خازنی بیشتری نسبت به خطوط هوایی دارند انجام می‌گیرد. درنتیجه سیستم‌های مرسوم انتقال HVAC در مسافت-های طولانی به دلیل جریان‌های شارژ خازنی زیاد و در نتیجه تلفات زیاد سیستم انتقال برای نیروگاه‌های فراساحل کارآمد نمی‌باشند. مطالعات و پژوهش‌های انجام‌گرفته نشان می‌دهد سیستم انتقال HVDC تنها گزینه‌ی کارآمد برای

انتقال توان نیروگاه‌های فراساحل نصب شده در نقاط دور از ساحل می‌باشد [۱-۳]. مزیت اصلی سیستم انتقال HVDC، رفع نیازمندی‌های توان راکتیو، رفع محدودیت توان قابل انتقال و کاهش تلفات انتقال است.

سیستم کلکتور[1] در یک نیروگاه بادی، وظیفه جمع‌آوری توان واحدهای توربین- ژنراتور و رساندن مجموع توان به خط انتقال را بر عهده دارد. نیروگاه‌های فراساحل نصب‌شده در حال حاضر، همگی از سیستم‌های کلکتور ac بهره می‌گیرند. در نیروگاه‌های فراساحل با توان بالا و دور از ساحل که درآن ابعاد سیستم کلکتور بزرگ است، کارایی کلکتور ac به دلیل مشکلات توان راکتیو کابل‌های زیر دریا و تلفات زیاد آن کاهش می یابد. برای حل این مساله پژوهش‌های فراوانی در زمینه بهره‌گیری از سیستم‌های یکپارچه‌ی dc شامل کلکتور dc با ولتاژ پایین یا متوسط به همراه سیستم انتقال HVDC برای نیروگاه‌های فراساحل دور انجام گرفته است [۴-۷]. توپولوژی‌های پیشنهادی برای کلکتورهای dc را در یک نگاه کلی می‌توان به سه گروه سری؛ موازی؛ و سری- موازی تقسیم بندی نمود. توپولوژی سری با اتصال سری واحدها، ساختاری با بازده بالا ولی قابلیت‌اطمینان پایین ایجاد می‌کند. اتصال موازی واحدها، موجب افزایش قابلیت اطمینان می‌شود بازده را به دلیل افزایش جریان و تلفات کاهش می‌دهد. از ترکیب این دو توپولوژی، ساختار سری- موازی ایجاد می‌گردد که مطالعات نشان می‌دهد این ساختار با کاهش هزینه‌ی تولید انرژی در کنار قابلیت اطمینان و بازده بالا گزینه‌ای مناسب برای کلکتورهای dc می‌باشد[۵].

موضوع پژوهش این پایان‌نامه بررسی سیستم‌های یکپارچه‌ی dc[2] برای نیروگاه‌های فراساحل می‌باشد در این راستا ساختارهای مختلف توربین- ژنراتور بادی بررسی و ساختار مناسب برای اتصال به سیستم یکپارچه‌ی dc انتخاب می‌شود. براساس این ساختار راهکاری برای مدل سازی دینامیکی توربین- ژنراتور و طراحی سیستم کنترل آن ارائه می‌گردد. در ادامه مزایا و محدودیت‌های ساختارهای کلکتورdc که تاکنون پیشنهاد شده مورد بررسی قرار می‌گیرند و با در نظر گرفتن محدودیت‌های این ساختارها، روش‌هایی برای بهبود کارایی این سیستم‌ها ارائه خواهد گردید. محدودیت اصلی ساختارهای ارائه شده، عملکرد آن‌ها هنگام وقوع شکست در یک یا چند واحد نیروگاهی است هنگامی که در یک یا چند واحد شکستی اتفاق می‌افتد، این واحد(ها) برای جداسازی از سیستم اتصال کوتاه می-شود. در این روش، وقوع شکست در ناحیه‌ی وسیعی از توربین‌های سری‌شده می‌تواند مشکل اضافه‌ولتاژ در واحدهای سالم باقی‌مانده را ایجاد کند. این روند منجر به حذف کل شاخه سری -که شامل نیروگاه‌های سالم نیز می-باشد- از مدار و در نتیجه از دست رفتن توان قابل‌توجه و کاهش بازده نیروگاه می‌شود. برای رفع این مشکل می-بایست راه دیگری برای جداسازی واحدهای دچار شکست پیدا کرد به گونه‌ای که نیروگاه در شرایط پس از وقوع

1- Collector System
2- Pure DC Systems

شکست در وضعیت قابل قبول قرار بگیرد و با کل ظرفیت در دسترس خود کار کند. در صورت تحقق این امر، نیروگاه مبتنی بر توپولوژی سری- موازی می‌تواند در هر شرایطی بیشینه‌ی توان را از واحدها دریافت کند.

۱-۲- انگیزه و اهداف

در نیروگاه‌های فراساحل علاوه بر هزینه‌ی بسیار زیاد، زمان موردنیاز تعمیر یک واحد آسیب دیده طولانی است. در نتیجه، انرژی واحدهای سالمی که در اثر شکست در یک واحد به اجبار از مدار حذف می‌شوند، در مدت طولانی تعمیر واحد آسیب دیده از دست می‌رود که این مساله نیروگاه را متحمل خسارت اقتصادی زیادی می‌کند. از این رو یافتن ساختارهایی با بهره‌وری بالا برای این نیروگاه‌ها از اهمیت فراوانی برخوردار است. تحقق سیستم‌های کلکتور dc مبتنی بر یافتن ساختاری است که متناسب با کاربردهای فراساحل و نیازهای آن باشد و بتواند تامین توان را با قابلیت اطمینان و بازده بالا تضمین کند.

هدف کلی این پایان‌نامه، طراحی سیستم یکپارچه‌ی dc برای یک نیروگاه فراساحل، شامل ارائه‌ی ساختار تبدیل انرژی مناسب، مدل سازی دینامیکی و کنترل واحدها و هم‌چنین ارائه‌ی توپولوژی بهبودیافته برای اتصالات واحدها هنگام وقوع شکست در نیروگاه است، به گونه‌ای که ضریب بهره‌وری نیروگاه در شرایط شکست یک یا چند واحد افزایش یابد. اهداف مشخص این پایان‌نامه عبارتند از:

۱- بررسی انواع ساختارهای توربین- ژنراتور بادی و سیستم‌های کلکتور و انتقال آن‌ها؛

۲- انتخاب یک ساختار توربین- ژنراتور مناسب و مدل‌سازی دینامیکی آن؛

۳- ارائه‌ی روش کنترل مناسب برای مبدل‌های الکترونیک قدرت به منظور جذب حداکثر توان از هر واحد؛

۴- بررسی و ارائه‌ی یک توپولوژی مناسب برای سیستم کلکتور dc جهت کاهش اثر واحدهای حذف شده در هنگام خطا؛

۵- اعتبارسنجی روش پیشنهادی برای کنترل توربین- ژنراتور و ارزیابی عملکرد ساختارهای پیشنهادی.

۱-۳- راهبرد دستیابی به اهداف و مرور پژوهش‌های انجام‌شده‌ی مرتبط

به منظور دست‌یابی به اهداف تعیین‌شده، در ابتدا ساختارهای مختلف توربین- ژنراتور بادی که تا کنون به صورت صنعتی در نیروگاه‌های بادی مختلف به کار گرفته شده‌اند مورد بررسی قرار گرفته، مشخصه‌های اصلی آنها

بر مبنای نوع کاربرد دسته بندی می‌گردند. سپس با توجه به این مشخصه‌ها، مناسب ترین ساختار برای یک واحد توربین-ژنراتور در نیروگاه فراساحل انتخاب و مدل دینامیکی آن استخراج می‌شود و سپس روشی برای طراحی سیستم کنترل آن ارائه می‌گردد. در ادامه به بررسی سیستم‌های انتقال و کلکتور برای نیروگاه‌های بادی فراساحل پرداخته می‌شود، مزایا و محدودیت‌های آن‌ها به صورت کیفی و کمی بررسی می‌گردد و بر این اساس ساختاری بهبود یافته برای حل مساله‌ی اضافه‌ولتاژ واحدها هنگام وقوع شکست یک واحد ارائه می‌گردد. سرانجام، عملکرد سیستم کنترل و کارایی ساختار پیشنهادی از طریق سیستم‌های مطالعاتی چند ماشینه مورد بررسی و ارزیابی قرار خواهند گرفت.

مطالعات بسیاری در زمینه‌ی مقایسه‌ی سیستم‌های انتقال HVDC و HVAC برای نیروگاه‌های فراساحل صورت پذیرفته است. در مرجع [۱] تحلیل فنی- اقتصادی دقیقی برای بررسی گزینه‌های مختلف انتقال برای نیروگاه-های فراساحل انجام گرفته است. این تحلیل، تلفات بیش‌تر و هزینه‌های بالاتر سیستم‌های انتقال HVDC را برای نیروگاه‌های نصب شده فعلی که در فاصله کمی از ساحل قرار دارند، نشان می‌دهد. با وجود این، تحلیل حساسیت هزینه نسبت به پارامتر طول انتقال نشان می‌دهد با افزایش فاصله در یک نقطه‌ی خاص که تابعی از توان نیروگاه است، این معادله به نفع استفاده از سیستم‌های انتقال HVDC تغییر خواهد کرد. از میان ساختارهای موجود، ساختار چندترمینالهی VSC-HVDC که شامل سیستم HVDC مبتنی بر مبدل‌های الکترونیک قدرت با کلیدهای کاملاً کنترل پذیر می باشند، در تحقیقات بسیاری مورد توجه قرار گرفته‌اند [۸-۱۰]. مرجع [۱۱] سیستم‌های انتقال چندترمینالهی HVDC و تحقق عملکرد بهینه‌ی مبدل‌ها برای جذب توان بیشینه از آن‌ها را بررسی کرده است.

نیروگاه بادی بر اساس ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم با محرکه‌ی مستقیم (بدون جعبه دنده) ساختاری است که مورد توجه فراوانی به‌خصوص برای کاربرد نیروگاه‌های فراساحل قرار گرفته است و مراجع بسیاری توپولوژی-های مختلف را برای واحد الکترونیک‌قدرت این ساختار مورد بررسی قرار داده‌اند [۱۲-۱۷]. در اکثر این مطالعات سیستم کلکتور از نوع ac در نظر گرفته شده است. درمرجع [۱۶] با در نظر گرفتن کلکتور dc برای مبدل سمت ماشین از یک یکسوکننده‌ی دیودی در اتصال سری با یک برشگر dc/dc استفاده شده است. از مزایای این مبدل می-توان به ساختار ساده و مقاوم یکسوساز دیودی اشاره کرد. اشکال این مبدل برای سیستم کلکتور ac، عدم کنترل پذیری توان راکتیو و در نتیجه ضریب توان پایین ژنراتور عنوان شده است. اشکالی که در سیستم‌های کلکتور dc با توجه ویژگی عدم نیاز به توان راکتیو برطرف گردیده است. به این ترتیب واسط دیودی در اتصال سری با یک مبدل dc/dc می‌تواند ترکیب مطلوبی برای توربین- ژنراتورهای متصل به سیستم کلکتور dc به شمار رود. مطالعات گوناگونی توپولوژی‌های ممکن برای مبدل‌های dc/dc توان بالا را بررسی کرده‌اند [۶, ۱۸-۲۱]. مرجع [۶] مطالعات

جامعی را در زمینه‌ی مبدل‌های dc/dc، بررسی توپولوژی‌های مختلف و مقایسه‌ی آن‌ها از دید تلفات انجام داده است. مرجع [۲۲] به طور کلی به مبحث سیستم‌های قدرت dc پرداخته است و مزایای این سیستم‌ها به همراه چالش-های موجود بر سر راه توسعه‌ی آن‌ها را بررسی کرده است. مرجع [۲۳] طراحی یک شبکه‌ی dc ولتاژ متوسط برای سیستم کلکتور dc و براساس مبدل‌های dc/dc رزونانسی را ارائه نموده و مرجع [۲۴] به بررسی و طراحی سیستم کنترل برای یک سیستم کلکتور dc با توپولوژی سری پرداخته است. در این مطالعه از ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم در اتصال با مدار واسط دیودی و مبدل کاهنده ولتاژ بهره گرفته شده است. مرجع [۲۵] نیز نوع دیگری از مبدل منبع ولتاژی را به همراه یک الگوی کلیدزنی برای کاهش تلفات در سیستم کلکتور dc سری ارائه کرده است. در مرجع [۴] مبدل مبتنی بر منبع جریان برای سیستم کلکتور dc با توپولوژی سری پیشنهاد گردیده است. مرجع [۷] طرح‌های مختلف برای توپولوژی موازی را در سیستم کلکتور dc از دید تلفات بررسی کرده است و در مرجع [۵] توپولوژی‌های مختلف سیستم کلکتور ac و dc براساس معیار قیمت تولید و انتقال یک واحد انرژی مقایسه گردیده-اند. نتایج این بررسی برتری توپولوژی‌های dc نسبت به ac را نشان می‌دهد. علاوه بر آن در میان توپولوژی‌های مختلف برای کلکتورهای dc، توپولوژی‌های سری- موازی با اختلاف قابل‌توجهی برتراز سایر توپولوژی‌ها معرفی گردیده و نشان داده شده که این ساختار قیمت تولید انرژی کم‌تری دارد. درمرجع [۲۶] راه حلی برای حفاظت سیستم‌های dc ارائه شده است و به نظر می‌رسد با پیشرفت روزافزون تکنولوژی الکترونیک‌قدرت مسئله‌ی حفاظت سیستم‌های dc با طرح‌های کم هزینه امکان پذیرگردد.

۱-٤- ساختار پایان نامه

فصل دوم به مرور و بررسی ساختارهای توربین- ژنراتور بادی اختصاص یافته است و در آن پس از بیان روابط آئرودینامیکی توربین بادی به بررسی اجزای توربین- ژنراتور بادی پرداخته شده است. دسته‌بندی ساختارهای توربین- ژنراتور براساس کنترل توان مکانیکی ورودی و کنترل سرعت به همراه نمونه‌های تجاری موجود از این ساختارها نیز در این فصل ارائه گردیده است و در ادامه ژنراتورها و مدارهای واسط الکترونیک‌قدرت مناسب در ساختارهای توربین- ژنراتور بادی معرفی گردیده‌اند. نتیجه‌ی این فصل ساختارهای مناسب برای نیروگاه‌های بادی فراساحل را معرفی می نماید .

فصل سوم به بررسی سیستم‌های انتقال و کلکتور نیروگاه‌های بادی می‌پردازد. در این فصل، ابتدا سیستم‌های کلکتور به صورت کلی تعریف و دسته‌بندی آن‌ها در قالب سیستم‌های ac و dc ارائه گردیده است. سپس به بررسی انواع توپولوژی‌های ارائه‌شده برای اتصال واحدها در سیستم کلکتور ac و dc پرداخته شده است و هر توپولوژی به

طور مختصر شرح داده شده است. پس از آن سیستم‌های انتقال موجود برای انتقال توان نیروگاه‌های بادی مورد بررسی قرار گرفته‌اند و اجزای آن‌ها به همراه مزایا و معایب استفاده از این سیستم‌ها بیان شده است. در پایان این فصل، سیستم‌های کلکتور و انتقال متناسب با کاربرد فراساحل معرفی گردیده‌اند.

در فصل چهارم، سیستم انرژی مناسب برای اتصال یک ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم به شبکه‌ی کلکتور dc معرفی گردیده و راهکار مناسب برای کنترل توان ارائه گردیده است. این سیستم انرژی شامل یک یکسوکننده‌ی دیودی در اتصال با مبدل dc/dc است. در این فصل، ابتدا بر اساس روش پیشنهادی جداسازی دینامیک‌های کُند و تُند و خطی‌سازی بخش‌هایی از سیستم، یک مدل دینامیکی ساده برای سیستم بدست می‌آید. سپس بر مبنای مدل بدست‌آمده روش طراحی کنترل‌کننده ارائه گردیده است و در پایان به منظور راست‌آزمایی مدل و راهکار کنترل پیشنهادی، روش مدل سازی و طراحی کنترل کننده بر روی یک سیستم مطالعاتی پیاده سازی و نتایج آن با نتایج شبیه سازی مدل دقیق و غیرخطی سیستم در حوزه‌ی زمان مقایسه و ارزیابی می‌گردند.

در فصل پنجم، یک سیستم کلکتور dc با روش اتصال پیشنهادی ماتریسی ارائه و نحوه‌ی عملکرد آن هنگام وقوع شکست در نیروگاه، در ابتدا با استفاده از یک سیستم مطالعاتی ساده بیان می‌گردد. سپس بر اساس روابط ریاضی، ناحیه‌ی عملکرد روش اتصال کوتاه و روش اتصال ماتریسی بدست آمده و مقایسه گردیده‌اند. در پایان به منظور بررسی دقیق‌تر، روش ارائه شده و روابط آن برای یک سیستم مطالعاتی نیروگاه بادی فراساحل اجرا گردیده و نتایج آن از طریق شبیه سازی در حوزه‌ی زمان مورد بررسی قرار می‌گیرد.

سرانجام در فصل آخر پایان نامه خلاصه‌ای از پژوهش انجام شده در این پایان نامه و نتایج آن به همراه پیشنهاداتی برای ادامه‌ی کار در این زمینه‌ی تحقیقی ارائه گردیده است.

فصل دوم
ساختار توربین- ژنراتورهای بادی

۲-۱- مقدمه

سیستم‌های تبدیل انرژی جنبشی باد به انرژی الکتریکی، شامل توربین-ژنراتورهای بادی و مدارهای واسطه الکترونیک قدرت، اساسی‌ترین بخش‌های یک نیروگاه بادی محسوب می‌شوند. یک سیستم تبدیل انرژی کارآمد با ایجاد تعادل میان پارامترهای هزینه، تلفات و بازده، عملکرد مطلوب سیستم را تحقق می‌بخشد و نیازهای سیستم را برآورده می‌سازد. با افزایش توان نیروگاه‌های بادی، به خصوص در نیروگاه‌های فراساحل با هزینه‌های نصب و بهره-برداری بالا، اهمیت بهره‌وری سیستم‌های انرژی دوچندان گردیده است. در این راستا لازم است ساختارهای گوناگون تبدیل انرژی مورد بررسی قرار بگیرند و با توجه به مشخصه های فنی این ساختارها، هریک در کاربردهای مناسب خود مورد استفاده قرار بگیرند. در این فصل ابتدا مدل آئرودینامیک توربین‌های بادی به اختصار مورد بررسی قرار می گیرد. سپس اجزای الکترومکانیکی توربین- ژنراتور بادی و ساختارهای گوناگون آن‌ها به همراه مدارهای واسطه الکترونیک‌قدرت معرفی و مقایسه می گردند. در پایان فصل با توجه به ویژگی‌ها و مشخصات فنی طرح‌های مختلف، ساختارهای مناسب توربین- ژنراتور بادی برای کاربرد در نیروگاه‌های فراساحل، که موضوع مورد بررسی این پژوهش است، معرفی خواهند شد.

۲-۲- مدل آئرودینامیک توربین‌های بادی

توربین بادی انرژی جنبشی باد را از طریق پره‌های یک روتور که محور آن با محور چرخان یک ژنراتور الکتریکی کوپل گردیده است، به انرژی و گشتاور مکانیکی دورانی تبدیل می نماید. از دید آئرودینامیکی، در بهترین حالت، حداکثر ۵۹٪ از انرژی جنبشی حرکت باد توسط توربین قابل جذب است و در شرایط واقعی، میزان توان و انرژی جذب شده توسط توربین به پارامترهای متعددی از جمله نسبت سرعت دوران توربین به سرعت خطی باد بستگی دارد. مدل آئرودینامیکی توربین بادی رابطه‌ی توان مکانیکی جذب شده توسط توربین را در سرعت‌های مختلف باد تعیین می نماید. از دید ساختاری، توربین‌های بادی به دو گروه توربین با محور افقی[1] (شکل۲-۱) و توربین با محور عمودی[2] (شکل۲-۲)تقسیم‌بندی می گردند.

شکل۲-۱- نمایی از یک توربین محور افقی [۲۷]

1- Horizontal Axes Wind Turbine (HAWT)

2- Vertical Axes Wind Turbine (VAWT)

در طرح افقی راستای محور دوران توربین در سرعت‌های بالای باد توسط سیستم تنظیم جهت (*یاو*[1]) تغییر می‌کند، به گونه‌ای که در شرایط عادی برای دریافت حداکثر انرژی، محور دوران همراستا با جهت وزش باد و در شرایط خاص نظیر تند بادها، این محور عمود بر راستای وزش باد قرار می‌گیرد تا از آسیب‌های احتمالی به توربین جلوگیری شود. کنترل‌پذیری ساختار افقی مجهز به سیستم تنظیم جهت که منجر به ایجاد حفاظت و هم‌چنین بهره‌وری بالا می‌شود، از مزایای اصلی ساختارهای افقی است.

شکل۲-۲- نمایی از یک توربین محور عمودی [۲۸]

توربین‌های با محور عمودی (شکل۲-۲) فاقد سیستم تنظیم جهت هستند و در نتیجه در این توربین‌ها کنترلی بر توان ورودی باد وجود ندارد. این امر منجر به ایجاد نوسانات شدید در گشتاور می‌شودکه تاثیرات نامطلوبی بر کیفیت توان و پایداری مکانیکی توربین ایجاد می‌کند. مزیت توربین‌های محور عمودی مستقل بودن آن‌ها از جهت وزش باد و نصب تجهیزات آن‌ها (شامل جعبه‌دنده و ژنراتور) روی زمین است که لزوم احداث برج با محفظه‌ی سنگین را منتفی می‌کند.

1- Yaw System

برای به دست آوردن مدل آئرودینامیکی توربین، انرژی باد معادل انرژی جنبشی توده‌ی هوای متحرکی به جرم m و سرعت متوسط V_w که به پره‌های توربین برخورد می‌کند در نظر گرفته می‌شود[۲۸]. انرژی جنبشی این توده از رابطه‌ی زیر قابل محاسبه است:

$$W = \frac{1}{2} m V_w^2 \qquad (۱-۲)$$

که در آن، W بیان‌گر انرژی جنبشی توده‌ی هوای متحرک است. در نتیجه توان باد، ازمشتق انرژی برحسب زمان و از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود،

$$P_w = \frac{1}{2} V_w^2 \frac{dm}{dt} \qquad (۲-۲)$$

در این رابطه P_w توان جنبشی باد است. جرم توده‌ی هوا با داشتن جرم حجمی هوا از رابطه‌ی زیر قابل محاسبه است،

$$m = \rho A x \qquad (۳-۲)$$

که x، ρ و A به ترتیب طول توده‌ی هوای متحرک ، جرم حجمی هوا و سطح جاروب‌شده توسط تیغه‌های روتور را نشان می‌دهند. با مشتق‌گیری از رابطه‌ی (۲-۳) داریم،

$$\frac{dm}{dt} = \rho A \frac{dx}{dt} \qquad (۴-۲)$$

از جایگذاری (۲-۴) در (۲-۲) رابطه‌ی توان باد به صورت زیر اثبات می‌گردد،

$$P_w = \frac{1}{2} V_w^2 \rho A \frac{dx}{dt} = \frac{1}{2} \rho A V_w^3 \qquad (۵-۲)$$

برای به دست آوردن توان استخراج شده از توده‌ی هوای متحرک توسط توربین بادی، توده‌ی هوای متحرک را در نظر می‌گیریم که در بالادست با سرعت V به پره‌های توربین برخورد می‌کند و پس از برخورد به پره‌ها، سرعت آن در پایین‌دست به V_0 می‌رسد. در این حالت از رابطه‌ی (۲-۲) توان مکانیکی جذب شده توسط توربین برابر اختلاف انرژی باد در بالادست و پایین‌دست می‌باشد:

$$P_m = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} (V^2 - V_0^2) \qquad (۶-۲)$$

برای ساده‌سازی روابط، فرض می‌کنیم سرعت باد به طور خطی از V به V_0 کاهش می‌یابد و سرعت باد در محل توربین با مقدار متوسط آن تخمین زده می‌شود $(V=V_w)$. در نتیجه از رابطه‌ی (۲-۴) داریم

$$\frac{dm}{dt}=\rho A\left(\frac{V_w+V_0}{2}\right) \qquad (۲-۷)$$

از جای‌گذاری (۲-۷) در (۲-۶)((۲-۶) به دست می‌آید،

$$P_m=\frac{1}{2}(V_w{}^2-V_0^2)(\rho A\frac{V_w+V_0}{2}) \qquad (۲-۸)$$

با مرتب کردن رابطه‌ی (۲-۸) می‌توان به رابطه‌ی زیر رسید،

$$P_m=\frac{1}{2}\rho AV_w^3(1-\frac{V_0^2}{V_w{}^2})(\frac{1+V_0/V_w}{2}) \qquad (۲-۹)$$

در نتیجه،

$$P_m=\frac{1}{2}\rho AV_w^3C_p(\theta,\lambda) \qquad (۲-۱۰)$$

که در آن،

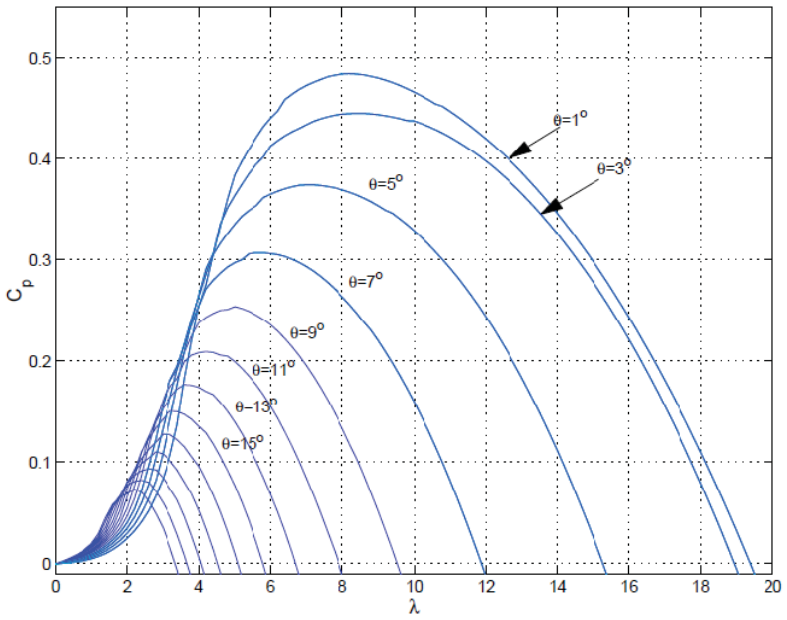
$$C_p=(1-\frac{V_0^2}{V_w{}^2})(\frac{1+V_0/V_w}{2}) \qquad (۲-۱۱)$$

C_p ضریب توان روتور و یا ضریب بازده مکانیکی توربین نامیده می‌شود. از لحاظ ریاضی حداکثر مقدار C_p برابر ۰/۵۹ است و در شرایطی به دست می‌آید که نسبت سرعت $V_w/V_0=3$ باشد. از نظر تجربی C_p تابعی از دو پارامتر θ و λ است که به ترتیب زاویه‌ی گام تیغه[1] و نسبت سرعت راس تیغه[2] می‌باشند. پارامتر λ به صورت نسبت سرعت خطی دورانی راس تیغه به سرعت وزش باد تعریف می‌شود:

$$\lambda=\frac{R\omega}{V_w} \qquad (۲-۱۲)$$

1- Pitch Angle
2 - Tip Speed Ratio (TSR)

که در این رابطه R نشان‌دهنده‌ی شعاع روتور و ω سرعت زاویه‌ای آن است. شکل۲-۳ نمودار C_p بر حسب λ را به صورت یک دسته‌منحنی برای مقادیر مختلف θ نشان می‌دهد.



شکل۲-۳- نمودار ضریب توان روتور بر حسب نسبت سرعت تیغه برای زوایای مختلف گام تیغه

۲-۳- اجزای توربین- ژنراتور بادی

یک نیروگاه بادی از چندین واحد توربین-ژنراتور تشکیل می‌شود. اجزای هر توربین- ژنراتور بادی افقی در سه دسته‌ی کلی قابل تقسیم هستند،

۱) بخش توربین بادی ، شامل دو یا سه تیغه که از طریق دماغه[1] به محور روتور متصل می‌شوند.

۲) بخش محور چرخان[2] و ژنراتور، شامل جعبه‌دنده[3]، ژنراتور الکتریکی، واحد الکترونیک‌قدرت و بخش‌های کنترلی که همگی در محفظه‌ی بالای برج[4] قرار گرفته‌اند.

۳) سازه مکانیکی برج[5] و مکانیزم هیدرولیکی یا سرومکانیزم الکتریکی تنظیم جهت.

1- Hub
2 - Rotor Component
3- Gear Box
4- Nacelle
5 - Tower