بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه مازندران

عنوان:

شبیه‌سازی پاسخ دینامیکی و کنترل ژنراتورهای القایی دوسو تغذیه *(DFIG)* در هنگام اتصال کوتاه شبکه

جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

مهندسی برق- قدرت

استاد راهنما:

دکتر سعید لسان

استاد مشاور:

دکترعبدالرضا شیخ‌الاسلامی

نگارش:

علیرضا عباس‌زاده

تابستان ۱۳۸۸

سپاس‌گذاری

تشکر فراوان از پدر و مادر عزیزم که ذره ذره‌ی وجودشان و لحظه لحظه‌ی عمرشان را در راه موفقیت من خرج کردند و می‌کنند.

و با تشکر از تمامی معلمان دوران تحصیلم و اساتید محترم در طول شش سال علم آموزی در دانشگاه نوشیروانی به خصوص استاد گران‌قدر جناب دکتر سعید لسان که در طول تهیه‌ی این پایان‌نامه همواره مشوّق من بوده و از کمک کردن به من هیچ‌گاه دریغ نکردند.

چکیده

هدف این پایان نامه به دست آوردن جریان اتصال کوتاه در ژنراتورهای القایی دوسو تغذیه می‌باشد. در سال-های اخیر با توجه به ویژگی‌های ممتاز ژنراتورهای القایی دوسو تغذیه شاهد رشد روز افزون استفاده از این نوع ژنراتورها در مزارع بادی بودیم. اما یکی از ایرادات اصلی این نوع ژنراتورها حساسیت زیاد آن‌ها نسبت به اغتشاشات شبکه خصوصاً اتصال کوتاه می‌باشد. لذا بررسی حالت گذرای این نوع ژنراتورها کاری بسیار مهم می-باشد.

در کل دو روش برای بررسی جریان اتصال کوتاه در این نوع ماشین‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در روش اوّل با استفاده از مدل‌سازی قسمت‌های مختلف توربین بادی جریان اتصال کوتاه شبیه‌سازی خواهد شد. در روش دوم جریان اتصال کوتاه با استفاده از روابط ریاضی محاسبه می‌شود. هر کدام از این روش‌ها مزایا و معایب خاص خود را دارد که در حین فصول پایان نامه به آن‌ها پرداخته خواهد شد.

در پایان نیز روشی برای جلوگیری از اضافه‌جریان و اضافه‌سرعت در حین اتصال کوتاه ارائه می‌شود و تأثیر این روش با شبیه‌سازی تأیید می‌گردد.

واژه‌های کلیدی:

ژنراتورهای القایی دوسو تغذیه، اغتشاشات شبکه، اتصال کوتاه، اضافه‌جریان، اضافه‌سرعت.

فهرست مطالب

عنوان		صفحه
مقدمه		۱
فصل اوّل-انرژی باد (گذشته، حال و آینده)		
۱-۱	مقدمه	۳
۱-۲	چگونگی ایجاد باد	۴
۱-۳	اندازه‌گیری سرعت و جهت باد	۵
۱-۴	محاسبه‌ی انرژی باد	۶
۱-۵	هزینه‌ی برپاسازی اوّلیه	۶
۱-۶	تاریخچه‌ی توربین بادی	۷
۱-۷	روند توسعه‌ی توربین‌های بادی	۹
۱-۸	وضعیت انرژی بادی در جهان	۱۰
۱-۹	محل استقرار توربین‌های بادی	۱۰
۱-۱۰	اندازه‌ی توربین‌های بادی	۱۰
۱-۱۱	زیرسیستم‌های توربین بادی	۱۲
۱-۱۱-۱	رتور	۱۲
۱-۱۱-۲	جعبه دنده	۱۳
۱-۱۱-۳	محور کم سرعت	۱۴
۱-۱۱-۴	محور سرعت بالا	۱۴
۱-۱۱-۵	ژنراتور	۱۴
۱-۱۱-۶	بدنه	۱۴
۱-۱۱-۷	سیستم ترمز	۱۵

۱-۱۱-۸ سیستم انحراف توربین به چپ و راست ۱۵

۱-۱۱-۹ بادسنج و بادنما ۱۵

۱-۱۲ تولید برق در اتصال به شبکه برق ۱۵

۱-۱۳ کاربردهای توربین بادی ۱۶

۱-۱۴ تولید برق در کاربردهای خارج از شبکه‌ی برق ۱۶

۱-۱۵ فوائد استفاده از انرژی باد ۱۷

۱-۱۶ آینده تکنولوژی توربین‌های بادی متصل به شبکه ۱۸

فصل دوم-روابط حاکم بر توربین‌های بادی

۲-۱ مقدمه ۱۹

۲-۲ مدل‌سازی بخش ایرودینامیکی ۲۰

۲-۲-۱ سرعت و رابطه‌ی توان ۲۱

۲-۲-۲ توان استخراجی از باد ۲۱

۲-۲-۳ محاسبه‌ی ضریب توان رتور C_p ۲۳

۲-۳ مدل جعبه دنده ۲۴

۲-۴ معرفی ژنراتورهای به کار رفته در نیروگاه‌های بادی ۲۷

۲-۴-۱ ژنراتور القایی ۲۸

۲-۴-۱-۱ ژنراتور القایی قفس سنجابی ۲۸

۲-۴-۱-۲ ژنراتور القایی رتور سیم‌پیچی شده ۳۱

۲-۴-۱-۳ ژنراتور القایی با تغذیه‌ی دوبل ۳۱

۲-۴-۲ ژنراتور سنکرون ۳۳

۲-۴-۲-۱ ژنراتور سنکرون با تحریک کلاسیک ۳۴

۲-۴-۲-۲ ژنراتور سنکرون با تحریک آهنربای دائم ۳۵

۲-۴-۳ سهم سالیانه ژنراتورهای نصب شده در نیروگاه‌های بادی ۳۵

۲-۵	مدل‌سازی ژنراتورهای القایی	۳۷
۲-۵-۱	ژنراتور القایی قفس سنجابی معمولی	۳۸
۲-۵-۲	ژنراتور القایی با تغذیه‌ی دوبل	۴۰
۲-۵-۳	مدل‌سازی اثر اشباع در ژنراتورهای القایی	۴۳
۲-۶	بررسی حالت گذرا	۴۴
۲-۷	شبیه‌سازی	۴۵
۲-۷-۱	تغییر پله‌ای در توان ورودی	۴۵
۲-۷-۲	کمبود ولتاژ	۴۶
۲-۸	اضافه‌جریان رتور به سبب کمبود ولتاژ	۴۹
۲-۸-۱	مقاومت رتور	۴۹
۲-۸-۲	عمق کمبود ولتاژ	۵۰
۲-۹	کنترل توان اکتیو و راکتیو	۵۲

فصل سوم-جریان اتصال کوتاه در ژنراتورهای القایی دوسو تغذیه

۳-۱	مقدمه	۵۴
۳-۲	شبیه‌سازی	۵۵
۳-۲-۱	اثر اشباع و مدل‌سازی با مراتب مختلف روی جریان اتصال کوتاه	۵۵
۳-۲-۲	اثر اشباع و مدل دوجرمه روی جریان اتصال کوتاه	۵۶
۳-۲-۳	اثر ارتفاع از سطح دریای سایت و ارتفاع برج روی جریان اتصال کوتاه	۵۹
۳-۲-۳-۱	اثر ارتفاع از سطح دریا	۶۰
۳-۲-۳-۲	اثر ارتفاع برج	۶۱
۳-۲-۴	اتصال کوتاه نامتعادل	۶۳
۳-۲-۴-۱	مدل‌سازی ژنراتورهای القایی دوسو تغذیه در حالت نامتعادلی	۶۵
۳-۲-۴-۲	بررسی اتصال کوتاه‌های مختلف	۶۵

۳-۳ محاسبه جریان اتصال کوتاه ۶۹
۳-۳-۱ جریان حالت دائمی (قبل از وقوع خطا) ۷۰
۳-۳-۲ جریان گذرا (بعد از وقوع خطا) ۷۱

فصل چهارم- کنترل ژنراتورالقایی دوسو تغذیه در هنگام اتصال کوتاه

۴-۱ مقدمه ۷۴
۴-۲ کنترل اضافه‌جریان ژنراتور در حین اتصال کوتاه ۷۵
۴-۲-۱ سیستم حفاظت ۷۷
۴-۲-۲ شبیه‌سازی اثر مقاومت کروبار در منحنی‌های استاتیکی و دینامیکی ماشین ۷۸
۴-۳ کنترل سرعت ژنراتور در حین اتصال کوتاه ۸۱
۴-۳-۱ گشتاور الکتریکی در حالت پایدار ۸۱
۴-۳-۲ گشتاور بعد از خطا ۸۶
۴-۳-۳ سرعت بحرانی و زمان بحرانی رفع خطا ۸۷

فصل پنجم- نتایج و پیشنهادات

پی‌وست‌ها ۹۵
مراجع ۹۸

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل (۱-۱) روند تغییر قیمت انرژی بادی ۷

شکل (۱-۲) مقایسه‌ی قیمت تمام شده‌ی تولید انرژی توسط تکنولوژی‌های مختلف ۷

شکل (۱-۳) نمونه ای از یک مزرعه ی بادی در آمریکا ۱۱

شکل (۱-٤) نمایی از دو توربین بادی در اندازه‌های کوچک و بزرگ ۱۱

شکل (۱-٥) اجزای یک توربین بادی ۱۲

شکل (۱-٦) افزایش شعاع رتور و توان دریافتی از یک توربین بادی طی سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۳ ۱۳

شکل (۲-۱) نمونه‌ای از توربین بادی با ساختار محور افقی ۲۰

شکل (۲-۲) نمونه‌ای از توربین بادی با ساختار محور عمودی ۲۱

شکل (۲-۳) نمودار راندمان رتور بر حسب $(\frac{v_0}{v})$ ۲۳

شکل (۲-٤) نمودار C_p بر حسب λ برای مقادیر مختلف زاویه‌ی پره ۲٤

شکل (۲-٥) نمایش واقعی جاگیری جعبه دنده، شفت کم سرعت و شفت پرسرعت در داخل یک توربین بادی ۲٥

شکل (۲-٦) مدل نظری جعبه دنده شامل سرعت، گشتاور و میرایی‌های رتور و ژنراتور ۲٦

شکل (۲-۷) شکل روتور در موتورهای القایی قفس سنجابی ۲۸

شکل (۲-۸) منحنی توان سرعت با دو سرعت سنکرون ۲۹

شکل (۲-۹) نحوه اتصال ژنراتورهای القایی قفس سنجابی به شبکه ۲۹

شکل (۲-۱۰) نحوه اتصال ژنراتور القایی دوسو تغذیه به شبکه ۳۲

شکل (۲-۱۱) عملکرد یک ژنراتور القایی دوسو تغذیه الف-حالت زیر سنکرون ب-حالت فوق سنکرون ۳۳

شکل (۲-۱۲) نحوه اتصال ژنراتورهای SG ۳٤

شکل (۲-۱۳) سهم سالیانه ژنراتورهای نصب شده در نیروگاه‌های بادی ۳۷

شکل (۲-۱٤) نمایش سیم‌پیچی‌های فرضی در یک ماشین القایی ۳۸

شکل (۲-۱۵) منحنی گشتاور و جریان محور q استاتور، ٤١

(الف) و (ب)- مرتبه ٥ ،(ج) و (د)-مرتبه‌ی ٣ (و) و (ه)- مرتبه‌ی ١

شکل (۲-١٦) منحنی سرعت و جریان محور d استاتور. ٤٢

(الف) و (ب)- مرتبه ٥ ، (ج) و (د)-مرتبه‌ی ٣ (و) و (ه)- مرتبه‌ی ١

شکل (۲-١٧) مشخصه فاکتور اشباع در مقابل جریان ٤٤

شکل (۲-١٨) حالت گذرای تغییر پله‌ای توان ورودی. (الف)-گشتاور، (ب)- ids، (ج)- iqs ، (د)- سرعت ٤٧

شکل (۲-١٩) حالت گذرا در کمبود ولتاژ و بازسازی آن. (الف)-گشتاور، (ب)- ids، (ج)- iqs ، (د)- سرعت ٤٩

شکل (۲-٢٠) اضافه‌جریان رتور به سبب کمبود ولتاژ به ازای تغییر مقاومت‌های کروبار ٥٠

شکل (۲-٢١) مدل تقسیم کننده ولتاژ برای بررسی کمبود ولتاژ در پایانه‌ی ژنراتور ٥١

شکل (۲-٢٢) دامنه کمبود ولتاژ به عنوان تابعی از فاصله تا محل خطا ٥١

شکل (۲-٢٣) اضافه‌جریان رتور به سبب رخ دادن خطا در فواصل مختلف از پایانه ژنراتور ٥٢

شکل (۲-٢٤) دو روش کنترل توان اکتیو و راکتیو با استفاده از(الف) چهار کنترل‌کننده PI و (ب) دو کنترل‌کننده‌ی PI ٥٣

شکل (۳-١) حالت گذرای اتصال کوتاه و رفع آن. (الف)-گشتاور، (ب)- ids، (ج)- iqs ، (د)- سرعت ٥٨

شکل (۳-٢) جریان گذرای استاتور به سبب اتصال کوتاه در پایانه‌های ژنراتور- مقایسه‌ی بین مدل‌های مختلف ٥٩

شکل (۳-٣) جریان اتصال کوتاه ژنراتور القایی دوسو تغذیه با در نظر گرفتن مدل دوجرمه (الف) بعد از وقوع خطا (ب) بعد از رفع خطا ($\rho = \rho_o$ و $v = 12m/s$) ٦٠

شکل (۳-٤) ماکزیمم جریان اتصال کوتاه برای مقادیر متفاوت اختلاف از سطح دریا ٦١

(الف) بعد وقوع خطا (ب) بعد از رفع خطا

شکل (۳-٥) تغییر سرعت باد در ارتفاعات با توجه به عوارض زمین ٦٣

شکل (۳-٦) ماکزیمم جریان اتصال کوتاه برای مقادیر مختلف ارتفاع برج $(\rho = \rho_o)$ ٦٤

(الف) بعد از وقوع خطا (ب) بعد از رفع خطا

شکل (۳-٧) پاسخ گذرای ژنراتور القایی دوسو تغذیه درقبال خطای تک فاز به زمین (الف) ولتاژشبکه (ب) جریان ٦٦

فاز a (ج) جریان فاز b (د) جریان فاز c (ه) سرعت ژنراتور

شکل (۳-۸) پاسخ گذرای ژنراتور القایی دوسو تغذیه درقبال خطای فاز به فاز (الف) ولتاژشبکه (ب) جریان فاز a (ج) ۶۷
جریان فاز b (د) جریان فاز c (ه) سرعت ژنراتور

شکل (۳-۹) پاسخ گذرای ژنراتور القایی دوسو تغذیه درقبال خطای دو فاز به زمین (الف) ولتاژشبکه (ب) جریان فاز ۶۸
a (ج) جریان فاز b (د) جریان فاز c (ه) سرعت ژنراتور

شکل (۳-۱۰) نمای کلی یک ژنراتور القایی دوسو تغذیه ۶۹

شکل (۳-۱۱) روند تغییرات شار ذاتی و اجباری برای سه حالت مختلف (الف) حالت دائمی (ب) کمبود ولتاژ ۵۰ ۷۰
درصدی (ج) اتصال کوتاه

شکل (۳-۱۲) جریان اتصال کوتاه در ژنراتور القایی دوسو تغذیه ۷۳

شکل (٤-۱) شمای کلی یک توربین بادی به همراه کنترل‌کننده‌ها و سیستم حفاظتی ۷۶

شکل (٤-۲) گشتاور الکترومغناطیسی ژنراتور به ازای مقادیر مختلف مقاومت کروبار ۷۹

شکل (٤-۳) منحنی توان راکتیو- سرعت با تغییر مقاومت روتور ۷۹

شکل (٤-٤) تغییر جریان رتور به ازای مقاومت‌های کروبار مختلف در هنگام وقوع خطا و پس از رفع آن ۸۰

شکل (٤-۵) تغییر جریان رتور به ازای توان‌های مرجع مختلف در هنگام وقوع خطا و پس از رفع آن ۸۱

شکل (٤-٦) مدار معادل الکتریکی ژنراتور القایی با تغذیه دوگانه ۸۱

شکل (٤-۷) مدار معادل الکتریکی ساده شده‌ی ژنراتور القایی با تغذیه دوگانه ۸۲

شکل (٤-۸) تغییر مولفه‌های گشتاور به ازای تغییرات سرعت روتور ۸۵

شکل (٤-۹) تغییر مولفه‌های گشتاور به ازای تغییرات زاویه گشتاور ۸۵

شکل (٤-۱۰) منحنی گشتاور بر حسب سرعت در ژنراتورهای القایی با تغذیه دوگانه و ژنراتورهای القایی معمولی ۸۵

شکل (٤-۱۱) منحنی تغییرات زمان رفع خطای بحرانی بر حسب ثابت اینرسی ۸۸

شکل (٤-۱۲) منحنی تغییرات زمان رفع خطای بحرانی برحسب تغییر راکتانس مغناطیس‌کنندگی ۸۹

شکل (٤-۱۳) منحنی تغییرات زمان رفع خطای بحرانی برحسب تغییر مقاومت روتور ۹۰

شکل (٤-۱٤) منحنی تغییرات زمان رفع خطای بحرانی برحسب تغییر مقاومت استاتور نتیجه گیری ۹۰

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول (۱-۱) نیروگاه‌های بادی نصب شده تا پایان سال‌های ۲۰۰۲ و ۲۰۰۳ ۹

جدول (۲-۱) مزایا و معایب انواع ژنراتورها ۳۶

جدول (۲-۲) ساده‌سازی‌های به کاررفته برای مدل با مراتب مختلف ژنراتورهای القایی ۳۹

جدول (۲-۳) مقدار ماکزیم جریان روتور به ازای استفاده از مقاومت‌های کروبار مختلف ۵۰

جدول (۳-۱) چهار حالت مختلف شبیه‌سازی شده ۵۸

جدول (۳-۲) ضریب اصطکاک برای انواع عوارض زمین ۶۲

لیست علائم و اختصارات

مساحتی که به وسیله‌ی پره‌های رتور جاروب می‌شود. (m^2)	A
نسبت انتقال جعبه دنده	a
راندمان رتور	C_p
میرایی متقابل (Nms/rad)	D_m
میرایی خودی توربین (Nms/rad)	D_T
میرایی خودی ژنراتور (Nms/rad)	D_G
فرکانس (Hz)	f
ثابت زمانی اینرسی ژنراتور (s)	H_G
ثابت زمانی اینرسی توربین (s)	H_T
جریان رتور (pu)	i_r
جریان شروع اشباع (pu)	I_{sat}
جریان استاتور (pu)	i_s
جریان محور d رتور (pu)	i_{dr}
جریان محور d استاتور (pu)	i_{ds}
جریان محور q رتور (pu)	i_{qr}
جریان محور q استاتور (pu)	i_{qs}
اینرسی ژنراتور $(Nm\,s^2/rad)$	J_G
اینرسی توربین $(Nm\,s^2/rad)$	J_T
اینرسی مجموع $(Nm\,s^2/rad)$	j
سختی شفت (Nm/rad)	K_{sh}
سختی شفت در سمت ژنراتور (Nm/rad)	$K_{sh}^{(g)}$
سختی شفت در سمت توربین (Nm/rad)	$K_{sh}^{(t)}$
فاکتور اشباع	K_s
اندوکتانس مغناطیس کنندگی (pu)	l_m
اندوکتانس خودی رتور (pu)	l_r
اندوکتانس خودی استاتور (pu)	l_s
اندوکتانس گذرای استاتور (pu)	l'_s
اندوکتانس گذرای رتور (pu)	l'_r
اندوکتانس نشتی (pu)	l_σ
فاصله‌ی بین محل خطا و pcc (m)	l
جرم توده‌ی هوا (kg)	m

سرعت سنکرون (rpm)	n_{sync}
توان فاصله هوایی (pu)	p_{ag}
توان تحویلی به شبکه (pu)	p_g
توان مکانیکی اعمالی به شفت (pu)	p_m
ماکزیمم توان دریافتی از باد (pu)	$p_{\max}$
توان مصرفی در سیم‌پیچی‌های رتور (pu)	p_r
توان تولیدی در سیم‌پیچی‌های استاتور (pu)	p_s
توان استخراجی از باد (pu)	p_o
توان (pu)	p
تعداد قطب‌ها	P
مقاومت کروبار (pu)	R_{cb}
مقاومت سیم‌پیچی رتور (pu)	R_r
مقاومت سیم‌پیچی استاتور (pu)	R_s
مقاومت تونن مدار معادل ژنراتور القایی (pu)	R_{th}
لغزش در توالی مثبت	s_+
لغزش در توالی منفی	s_-
لغزش	s
زمان بحرانی (s)	t_{crit}
گشتاور الکتریکی (pu)	T_e
گشتاور ژنراتور (pu)	T_G
گشتاور مکانیکی (pu)	T_m
گشتاور توربین (pu)	T_T
ثابت زمانی گذرای رتور (s)	T_r'
ثابت زمانی گذرای استاتور (s)	T_s'
ولتاژمحور d رتور (pu)	u_{dr}
ولتاژمحور d استاتور (pu)	u_{ds}
ولتاژمحور q رتور (pu)	u_{qr}
ولتاژمحور q استاتور (pu)	u_{qs}
سرعت باد در ارتفاع $h1$ (m/s)	v_{h1}
سرعت باد در ارتفاع $h2$ (m/s)	v_{h2}
ولتاژ در pcc	v_{sag}
ولتاژ تونن مدار معادل ژنراتور القایی (pu)	v_{th}

سرعت باد (m/s)	v
سرعت باد در حین ورود به پره‌های توربین (m/s)	V_o
سرعت باد در حین ورود به پره‌های توربین (m/s)	V
راکتانس نشتی رتور (pu)	X_{lr}
راکتانس نشتی استاتور (pu)	X_{ls}
راکتانس مغناطیس‌کنندگی (pu)	X_m
راکتانس رتور (pu)	X_r
راکتانس استاتور (pu)	X_s
امپدانس خطا (pu)	Z_F
امپدانس تغذیه (pu)	Z_S
امپدانس تونن مدار معادل ژنراتور القایی (pu)	Z_{th}
امپدانس فیدر در واحد طول (pu)	z
زاویه‌ی ولتاژ استاتور	α
زاویه‌ی پره $(\deg ree)$	β
نسبت جریان	γ
چگالی هوا (kg/m^3)	ρ
زاویه فاز ولتاژ رتور $(\deg ree)$	δ
زاویه‌ی مکانی ژنراتور $(\deg ree)$	θ_G
زاویه‌ی مکانی توربین $(\deg ree)$	θ_T
زاویه‌ی مکانی توربین در سمت ژنراتور $(\deg ree)$	$\theta_t^{(g)}$
زاویه‌ی مکانی توربین در سمت توربین $(\deg ree)$	$\theta_t^{(t)}$
نسبت سرعت نوک پره	λ
شار محور d رتور (pu)	ψ_{dr}
شار محور d استاتور (pu)	ψ_{ds}
شار محور q رتور (pu)	ψ_{qr}
شار محور q استاتور (pu)	ψ_{qs}
شار رتور (pu)	ψ_r
شار استاتور (pu)	ψ_s
سرعت بحرانی (pu)	ω_{crit}
سرعت زاویه‌ای ژنراتور (pu)	ω_G
فرکانس زاویه‌ایی شفت (pu)	ω_m
سرعت زاویه‌ای توربین $(\deg ree)$	ω_T

سرعت زاویه‌ای توربین در سمت ژنراتور $(\deg ree)$	$\omega_t^{(g)}$
سرعت زاویه‌ای توربین در سمت توربین $(\deg ree)$	$\omega_t^{(t)}$
فرکانس زاویه‌ایی ولتاژ استاتور (pu)	ω_1
فرکانس زاویه‌ایی ولتاژ اعمالی بر روتور (pu)	ω_2
ضریب اصطکاک	μ

مقدمه

امروزه با پیشرفت تکنولوژی توربین‌های بادی با قدرت چندین مگاوات تولید می‌شوند و به صورت مجتمع در مزارع بادی به کار می‌روند. کشورهای آمریکا، آلمان، دانمارک و اسپانیا از جمله کشورهایی هستند که بیشترین برق را از انرژی باد دریافت می‌کنند.استفاده از انرژی باد برای تولید برق درکشور ما، در سال ۱۳۷۲ با خرید ۲ توربین ۵۰۰ کیلوواتی سه پره ساخت کمپانی نردتانک[1] دانمارک توسط سازمان انرژی اتمی و نصب آن‌ها در منجیل آغاز گردید. نیروگاه منجیل اکنون دارای بیش از ۲۰ توربین بادی ۵۰۰ کیلوواتی می باشد و توسعه‌ی آن هنوز ادامه دارد.

انواع مختلفی از ژنراتورهای الکتریکی در مزارع بادی به کار می‌رود. در گذشته تمایل به سمت استفاده از ژنراتورهای القایی قفس سنجابی و سنکرون بود. اما امروزه ژنراتورهای القایی دوسو تغذیه بیشترین کاربرد را در مزارع بادی سرتاسر دنیا دارند. علت استفاده از این نوع ژنراتورها وجود برخی ویژگی‌های منحصر به فرد در آن‌ها می‌باشد. بعضی از این ویژگی‌ها عبارتند از: کنترل مستقل توان اکتیو و راکتیو، امکان تنظیم سرعت برای استفاده‌ی بهینه از انرژی باد، امکان عملکرد زیر سنکرون و فوق سنکرون، قابلیت عملکرد در حین خطا و ... . علی‌رغم ویژگی‌های مثبت بالا، یکی از عیوب اصلی ژنراتورهای القایی دوسو تغذیه حسّاسیت بالای آن‌ها به اغتشاشات شبکه به خصوص اتصال کوتاه می‌باشد.

با توجّه به موارد اشاره شده بررسی رفتار حالت گذرای این نوع ژنراتورها و نیزشبیه‌سازی ماکزیمم اضافه‌جریان ماشین در تعیین تنظیمات وسیله‌ی حفاظتی به کار رفته نقش مهمی را ایفا می‌کند. لذا در این پایان‌نامه رفتار دینامیکی ژنراتور القایی دوسو تغذیه در حالت خطای شبکه شبیه‌سازی می‌شود و با استفاده از یک روش حفاظتی اثرات مخرب این اغتشاش را روی کانورتر و ژنراتور کاهش می‌دهد.

فصول این پایان‌نامه به صورت زیر سازمان‌دهی شده‌اند:

در فصل اوّل کلیاتی در مورد انرژی باد ارائه می‌شود. همچنین به اختصار در مورد تاریخچه‌ی توربین‌های بادی و اجزای تشکیل‌دهنده‌ی آن بحث می‌شود. مهم‌ترین موضوعات مورد بحث در این فصل به قرار زیر هستند:

- تاریخچه‌ی توربین‌های بادی
- اجزای تشکیل دهنده‌ی توربین‌های بادی

[1] Nordtank

- آینده‌ی توربین‌های بادی

با توجّه به این که هر چه مدل ارائه شده برای بررسی ژنراتور القایی دقیق‌تر باشد، نتایج حاصله از شبیه‌سازی به نتایج واقعی نزدیک‌تر خواهد بود، در فصل دوم روابط حاکم بر این ژنراتورها و به طور کلی روابط حاکم بر توربین بادی ارائه خواهند شد. فصل دوم نیز به بخش‌های اصلی زیر تقسیم می‌شود:

- چرایی و چگونگی افزایش استفاده از انرژی باد از گذشته تاکنون
- روابط مربوط به انرژی استحصالی از باد
- روابط حاکم بر جعبه دنده
- روابط حاکم بر ژنراتور القایی دوسو تغذیه‌ی به کار رفته در توربین بادی

در فصل سوم با توجّه به روابط به دست آمده از فصل دوم، پاسخ گذرای ژنراتورهای القایی در هنگام اتصال کوتاه شبکه بررسی می‌گردد و اثر عوامل مختلف روی این جریان شبیه‌سازی می‌گردد. در انتهای این فصل نیز از روابط ریاضی برای محاسبه‌ی جریان اتصال کوتاه استفاده می‌شود. مهم‌ترین مسائلی که در فصل سوم به آن‌ها پرداخته می‌شود عبارتند از:

- شبیه‌سازی جریان اتصال کوتاه با استفاده از دقیق‌ترین مدل
- اثر عوامل محیطی بر روی جریان اتصال کوتاه
- بررسی فیزیکی رفتار ماشین در حین اتصال کوتاه
- محاسبه جریان اتصال کوتاه

در فصل چهارم، قابلیت عملکرد در حالت خطای این نوع ژنراتورها تشریح می‌شود و از روش مقاومت کروبار[1] برای کاهش اثرات مخرب اضافه‌جریان و اضافه‌سرعت در هنگام وقوع اتصال کوتاه شبکه استفاده می‌گردد. زیربخش‌های اصلی فصل چهار م نیز عبارتند از:

- لزوم قابلیت عملکرد در حالت خطا در ژنراتورهای القایی دوسو تغذیه
- کنترل اضافه‌جریان ژنراتور در حین اتصال کوتاه
- کنترل اضافه‌سرعت ژنراتور در حین اتصال کوتاه

بالاخره در فصل پنجم نتایج حاصل از چهار فصل پیشین فهرست می‌شوند و برخی پیشنهادات نیز ارائه خواهند شد.

علیرضا عباس‌زاده

[1] crowbar

فصل اوّل

انرژی باد

(گذشته، حال وآینده)

۱-۱ مقدمه

بشر از قرن‌ها پیش از باد به عنوان یک منبع انرژی طبیعی بهره برده است. مصری‌ها جزء اوّلین اقوامی بودند که از انرژی باد برای حرکت قایق‌های خود و رفت و آمد بر روی رودخانه نیل استفاده می‌کردند. حدود ۲۰۰ سال قبل از میلاد مسیح اوّلین آسیاب‌های بادی توسط ایرانیان برای آرد کردن دانه‌های غلات و نیز کشیدن آب از چاه ساخته شد. در حدود سال‌های ۱۲۷۰ میلادی یعنی زمان جنگ‌های صلیبی در اروپا هلندی‌ها جهت کشیدن آب از چاه‌ها و نیز آرد کردن غلات از آسیاب‌های بادی بهره می‌بردند و تدریجاً بر تعداد این آسیاب‌های بادی در اروپا افزوده شد واین آغاز راه صنعتی شدن اروپا بود.

در نیمه دوم قرن ۱۹ میلادی تحولات تازه‌ای در استفاده از انرژی باد بوجود آمد و آن استفاده از انرژی باد جهت تولید الکتریسیته بود، توربین‌های بادی ساخته شد که انرژی باد را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کرد.

اما تولید الکتریسیته از باد به دودلیل عمده چندان فراگیر نشد و مورد توجّه قرار نگرفت:

۱- پس از انقلاب صنعتی و مخصوصاً از اوایل قرن بیستم با بهره‌برداری از سوخت‌های فسیلی و استفاده از این منابع جهت تولید برق ارزان، استفاده از توربین‌های بادی جهت تولید برق از لحاظ اقتصادی و حتی فنی مقرون به صرفه نبود و در نتیجه سوخت‌های فسیلی بدلیل ارزانی و قابلیت اطمینان بالا بتدریج جایگزین انرژی باد شدند. توربین‌های بادی قدیمی دیگر از لحاظ اقتصادی قابل رقابت نبودند و به همین دلیل پژوهش بسیار کمی جهت توسعه توربین‌های بادی جدید و کارآمد و قابل رقابت انجام شد.

۲- همه نقاط زمین از پتانسیل باد کافی جهت بهره‌برداری از انرژی باد برخوردار نیستند.

تا اینکه در سال ۱۹۷۳ میلادی جهان با بحران نفتی مواجه شد و این امر ممالک غربی را تشویق به جایگزین کردن منابع انرژی غیر فسیلی به جای منابع انرژی فسیلی برای تولید برق کرد و در نتیجه مطالعات و تحقیقات بر روی روش‌های بهبود و به صرفه کردن بهره‌برداری از انرژی باد به عنوان یکی از منابع انرژی جدید آغاز گردید.

در دهه اخیر نیز بوجود آمدن مشکلات زیست محیطی و نیز تغییرات آب و هوای کره زمین به علت استفاده از منابع انرژی فسیلی این علایق را تشدید کرده است. از آغاز دهه ۹۰ میلادی با کاهش هزینه‌ی تولید انرژی الکتریکی از طریق توربین‌های بادی و افزایش بازدهی و قابلیت اطمینان آن‌ها، در نتیجه روند نصب و بهره‌برداری از توربین‌های بادی در جهان از رشد قابل ملاحظه‌ای برخوردار گردیده است.

هم اکنون نیز انرژی باد نقش غیرقابل‌انکاری را در صنعت بازی می کند، به نحوی که در حال حاضر از این طریق سالانه بیش از ۳۰ هزارفرصت شغلی در اروپا ایجاد می شود و ٤٥ هزار خانه در جزایر کانادا و ۱۹ هزار خانه در کالیفرنیای آمریکا برق خود را از طریق انرژی باد تامین می کنند [۱].

۱-۲ چگونگی ایجاد باد

به سبب تغییرات دائمی فشار هوا مدام شاهد حرکت هوا هستیم و این حرکت را باد می نامیم. باد با دو پارامتر سرعت و جهت شناخته می شود. از نظر تئوری باد همیشه از مناطق دارای فشار بالاتر بطرف مناطق با فشار پایین‌تر می وزد.