بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه شهید چمران اهواز

دانشکده مهندسی

۹۲٤۰۲۰۲۰۷

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق

گرایش قدرت

عنوان :

بررسی پایداری ولتاژ شبکه قدرت با حضور نیروگاه های بادی (ژنراتور های القایی دو سو تغذیه).

استاد راهنما:

دکتر محسن صنیعی

استاد مشاور:

دکتر رضا کیانی نژاد

نگارنده :

سبحان سپهوند

شهریور ماه سال ۱۳۹۲

سپاسگذاری:

از همسرم بخاطر حمایت بی‌دریغشان از من

و

از اساتید گرامیم جناب آقای دکتر **محسن صنیعی** و جناب آقای دکتر رضا کیانی نژاد بخاطر راهنمایی‌های بسیار راه‌گشایشان، سپاسگذارم

چرا که بدون راهنمایی‌های ایشان انجام این پایان نامه بسیار مشکل می‌نمود.

فهرست مطالب

فصل اول

مقدمه و پیشینه موضوع

مقدمه..... ۱

پیشینه موضوع..... ۴

شرح اجرای پایان نامه..... ۷

ساختار پایان نامه..... ۷

فصل دوم

آشنایی با نیروگاههای بادی و ژنراتورهای القایی دو سو تغذیه

باد ۸

توربین بادی و استخراج انرژی باد..... ۸

تولید برق..... ۱۰

نیروگاه بادی با ژنراتور القایی دو سو تغذیه..... ۱۱

شبیه سازی نیروگاه بادی با ژنراتور القایی دو سو تغذیه..... ۱۴

توربین بادی..... ۱۴

ژنراتور القایی..... ۱۶

سیستم کنترل C_{rotor}..... ۲۱

کنترل توان اکتیو..... ۲۱

کنترل ولتاژ و توان راکتیو..... ۲۴

سیستم کنترل C_{grid} ۲۶
مدل لینک DC ۲۷
سیستم کنترل زاویه پره ها ۲۸
مدل ژنراتور سنکرون ۲۹

فصل سوم

آنالیز پایداری ولتاژ

پایداری ولتاژ ۳۴
مفاهیم اساسی مربوط به پایداری ولتاژ ۳۵
مشخصه سیستم انتقال ۳۵
مشخصه های ژنراتور ۳۹
مشخصه های بار ۴۱
مشخصه های وسایل جبرانساز راکتیو ۴۲
فروپاشی ولتاژ ۴۵
طرح نوعی از فروپاشی ولتاژ ۴۵
مشخص سازی کلی بر اساس رویدادهای واقعی ۴۷
دسته بندی پایداری ولتاژ ۴۸
تحلیل پایداری ولتاژ ۴۹
ملاحظات مدلسازی ۵۰
تحلیل دینامیکی ۵۲
تحلیل استاتیکی ۵۴
شیوه تحلیل پخش بار تداومی ۵۶
راه های پیشگیری از فروپاشی ولتاژ ۶۰

معیارهای بهره برداری سیستم برای بهبود پایداری ولتاژ..... ۶۲

فصل چهارم

نتایج شبیه سازی

معرفی شبکه آزمون..... ۶۵
مدل های بار..... ۶۸
شبیه سازی..... ۷۰
روش اجرای کار..... ۷۱
پایداری دینامیکی..... ۷۱
نتایج شبیه سازی..... ۷۱
پایداری استاتیکی..... ۷۸
نتایج شبیه سازی..... ۷۹
بررسی اثر جبران ساز..... ۸۰
خازن سری و شنت..... ۸۰

فصل پنجم

نتیجه گیری و پیشنهادات

پیشنهادات..... ۸۵
مراجع..... ۸۸

چکیده

نام خانوادگی : سپهوند	نام: سبحان	شماره دانشجویی :۸۹۳۱۸۰۲

عنوان پایان نامه : بررسی پایداری ولتاژ شبکه قدرت با حضور نیروگاه های بادی (ژنراتور های القایی دو سوتغذیه)

استاد/ اساتیدراهنما: دکتر محسن صنیعی

استاد/ اساتید مشاور: دکتر رضا کیانی نژاد

درجه تحصیلی: کارشناسی ارشد	رشته: مهندسی برق	گرایش: قدرت
دانشگاه : شهید چمران اهواز	دانشکده: مهندسی	گروه : برق

تاریخ فارغ التحصیلی : ۱۳۹۲/۷/۱۵ **تعداد صفحه: ۱۱۰**

کلید واژه ها : نیروگاه بادی، پایداری ولتاژ، ژنراتور القایی، DFIG

تغییرات انرژی باد قابل پیش بینی نیست و وقتی که به سیستم ولتاژ شبکه متصل می‌شود بر رفتار دینامیکی شبکه تاثیر می‌گذارد. از این رو باید به راهکارهایی اندیشید تا استفاده از انرژی باد را تحت کنترل در آورد. این پروژه به بررسی تاثیر حضور ژنراتورهای القایی دو سو تغذیه بر پایداری ولتاژ در یک سیستم قدرت می‌پردازد. ژنراتور القایی مورد بررسی در این پایان نامه که از نوع DFIG می‌باشد به علت مزایای فراوان آن در مقایسه با انواع دیگر ژنراتور القایی امروزه در تمامی نقاط جهان به صورت وسیعی مورد استفاده قرار می‌گیرد. DFIG ها قطعات الکترونیک قدرت حساسی دارند که نسبت به ولتاژ و جریان بالا حساسند. توسعه کنترل باعث استفاده کامل از قابلیت توان راکتیو ماشین و مبدل الکترونیک قدرت می‌شود. با اتصال مستقیم استاتور ژنراتور های القایی دو سو تغذیه(DFIG) به شبکه و محافظت از مبدل قدرت و لینک dc می‌توانند در طول خطا به شبکه متصل بمانند و این به پایداری دینامیکی شبکه کمک خواهد کرد. افزون بر این اینرسی این ژنراتورها در مقایسه با ژنراتور های سنکرون کمتر می‌باشد و می‌توان این کم شدن اینرسی را بر روی پایداری ولتاژ بررسی کرد.در این پروژه دینامیک سیستم ،عملکرد و پایداری ولتاژی با در نظر گرفتن حضور ژنراتور های القایی دو سو تغذیه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. به این صورت از یک مدل شبکه برای شبیه سازی استفاده خواهد شد. در اینجا از مدل تست استاندارد ۱۴ باسه IEEE برای شبیه سازی با استفاده از tools psat در نرم افزار matlab استفاده خواهد شد و بررسی فاکتور های ولتاژی بدون حضور ژنراتورهای القایی و همچنین با حضور ژنراتورها با درصدهای نفوذ مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد.

فصل اول

مقدمه و پیشینه موضوع

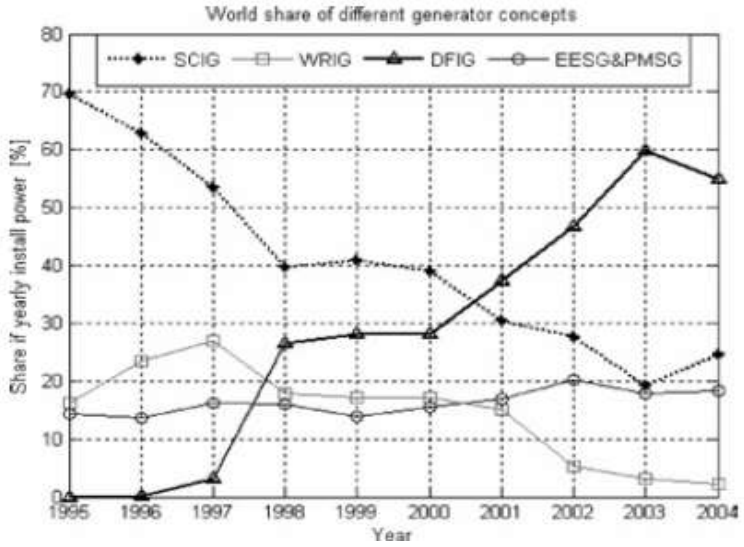
۱-۱ مقدمه

تغییرات قیمت جهانی سوخت، تهی شدن ذخایر سوخت فسیلی و نگرانی از تغییرات اقلیمی باعث شده که توجه به منابع تجدیدپذیر انرژی برای جبران کردن افزایش نیاز انرژی جهانی، افزایش یابد. در میان منابع تجدیدپذیر انرژی باد و آب، امکان‌پذیرترین موارد برای تولید نیرو به صورت کاربردی می‌باشند. با توجه به ذخایر آبی موجود در جهان و استفاده حد اکثر از این منابع برای تولید توان، جابجایی رو به افزایشی به سمت تولید توان بادی برای جبران کردن نیاز به یک منبع تجدید پذیر پاک اتفاق افتاده است. افزایش استفاده از انرژی باد در نقاط مختلف جهان، باعث شده که این پدیده به یکی از مهم ترین منابع تولید انرژی تبدیل شود.

در سال ۱۸۹۱ میلادی، دان‌پول لاکور اولین کسی بود که توانست برای تولید الکتریسیته توربین بادی بسازد. اولین مزارع بادی شامل توربین‌های بادی ۵۰ مگاوات بود و بعد از چند سال، در اواخر سال ۱۹۸۰ میلادی توربین‌های بادی ۲۰۰ مگاوات مورد استفاده قرار گرفت. از سال ۱۹۹۰ میلادی به بعد به علت بهره‌گیری از منابع تکنولوژی‌های مدرن، انرژی بادی رشد سریعی داشته است. به هرحال این رشد در همه جهان یکسان نبوده است. در پایان سال ۱۹۹۹ میلادی در حدود ٦۹ درصد ظرفیت انرژی جهان، در اروپا حدود ۱۹ درصد در آمریکای شمالی و ۱۰ درصد در آسیا و اقیانوسیه استفاده شده است. سال ۲۰۰۸ یک رکورد تولید بادی در آمریکا با افزایش ۸۳٦۰ مگا وات بود. در ایران نیز مطالعات و محاسبات انجام شده در زمینه تخمین پتانسیل انرژی باد نشان می‌دهد که تنها در ۲٦ منطقه از کشور (شامل بیش از ٤۵ سایت مناسب) میزان ظرفیت اسمی سایت‌ها، با در نظر گرفتن یک راندمان کلی ۳۳٪، در حدود ٦۵۰۰ مگاوات می‌باشد. و این در

شرایطی است که ظرفیت اسمی کل نیروگاه‌های برق کشور در حال حاضر حدود ۵۰۰۰۰ مگاوات می‌باشد که با کمی دقت رقم ٦۵۰۰ مگاوات رقم قابل توجهی است. [۲]

در میان انواع مختلف نیروگاه‌های بادی، نیروگاه بادی با ژنراتور القایی دو سو تغذیه به سبب مزایای فراوان آن به ویژه راندمان بالا و قابلیت بهره برداری در محدوده‌ی وسیعی از سرعت و در دو مد زیر سنکرون و فوق سنکرون به واسطه‌ی وجود مبدل های الکترونیک قدرت در آن، کاربرد فراوانی یافته است. به گونه ای که از آغاز تولید آن تا کنون مرتباً سهم حضور آن در بازار برق بادی در حال افزایش است. و شرکت های بزرگی مثل وستاس، گامسما، جی ای وایند، ری پاور و نوردکس سهم عمده‌ای از تولیدات خود را به این محصول اختصاص داده اند. شکل ۱-۱ سهم حضور نیروگاه‌های بادی در بازار با چهار نوع ژنراتور القایی قفس سنجابی، ژنراتور القایی روتور سیم پیچی شده، ژنراتور القایی دو سو تغذیه و مجموع ژنراتورهای سنکرون با تحریک DC و مغناطیس دائم را نشان می‌دهد.[۱]



شکل ۱-۱: سهم حضور نیروگاه بادی در بازار با چهار نوع ژنراتور مختلف[۱]

همان‌گونه که از شکل ۱-۱ نیز مشخص است نرخ رشد ژنراتور القایی دو سو تغذیه در قالب نیروگاه بادی به سبب مزایای فراوان آن نسبت به انواع دیگر ژنراتورها بیشتر است.

در یک مزرعه‌ی بادی توربین‌ها در کل مزرعه پراکنده اند اما خروجی کل مزرعه از طریق یک باس به سیستم قدرت متصل می‌شود. افزایش هر مزرعه‌ی بادی ژنراتورهای القایی زیادی را به سیستم قدرت اضافه می‌کند. با افزایش روز افزون ژنراتورهای القایی دو سو تغذیه در قالب نیروگاه‌ها و مزارع بادی و اتصال آنها به سیتم‌های قدرت، به دلیل تفاوت در دینامیک ژنراتورهای سنکرون و القایی، سیستم های قدرت که اکنون توسط ژنراتورهای سنکرون احاطه شده‌اند، تغییراتی را در مشخصات دینامیکی خود تجربه می‌کنند. نیروگاه‌های بادی به خطوط ولتاژ بالا متصل شده و بنابراین مستقیما روی رفتار دینامیکی و پایداری گذرای سیستم قدرت تاثیر گذاشته و در کنترل پارامترهای سیستم قدرت سهیم خواهند شد. این تاثیر گذاری به حدی است که کشورهایی که انرژی باد در آنها نفوذ زیادی یافته است، الزاماتی را برای نیروگاه‌های بادی در مسایل مربوط به شبکه در نظر گرفته اند که برای مثال می توان به قابلیت عملکرد ژنراتور در طول خطا وتاثیر آن بر بقیه سیستم قدرت اشاره کرد. در یک ژنراتور القایی دو سو تغذیه در هر لحظه ولتاژ تغذیه روتور به گونه‌ای توسط سیستم کنترل انتخاب می‌شود که اولا ماکزیمم توان اکتیو را در خروجی به ازای یک سرعت باد مشخص داشته باشیم و ثانیا کنترل ولتاژ و یا توان راکتیو نیروگاه نیز به درستی انجام شود. [۳]

با وجود سیستم کنترلی که در ژنراتورهای جدید وجود دارد باز هم این ژنراتورها مصرف کننده توان راکتیو هستند و در طول خطا این اثر آن ها تقویت خواهد شد، از طرفی یکی از مهم‌ترین عواملی که بر پایداری ولتاژ یک سیستم قدرت تاثیر می‌گذارد، کمبود توان راکتیو در شبکه است، که در فصل معرفی پایداری ولتاژ به صورت کامل شرح داده می‌شود. پس باید انتظار تضعیف پایداری ولتاژ را در حضور این ژنراتورها داشت. ازطرفی مزارع بادی معمولا از مراکز بار دور هستند و این باعث انتقال توان به فواصل دوردست و احتمالا عبور توان از خطوط متراکم می شود. که ممکن است پخش بار سیستم را به صورت جدی تغییر دهد و روی پایداری ولتاژ سیستم تاثیر گذار باشد. با توجه به نفوذ رو به رشد ژنراتورهای القایی در شبکه، بررسی تاثیر افزایش نفوذ توربین‌های بادی با ژنراتورهای القایی دو سو تغذیه روی پایداری ولتاژ سیستم‌های قدرت، بسیار ضروری می‌نماید.

۲-۱ پیشینه موضوع

مطالعه و تحقیق در رابطه با تاثیر تولید بادی بر روی پایداری ولتاژ قدمت چندانی ندارد و به سال های اخیر مربوط می‌شود. و در اکثر آنها با شبیه سازی شبکه نمونه در حضور ژنراتورهای القایی به بررسی ویژگی‌های دینامیکی و استاتیکی شبکه پرداخته شده است.در زیر به چند نمونه از این بررسی ها اشاره شده:

آقای A.H.M.A. Rahim [٤] در سال ۲۰۱۰ با اشاره به این مطلب که ناپایداری ولتاژ اصلی‌ترین نگرانی ناشی از گسترش نفوذ انرژی بادی به شبکه قدرت می‌باشد، به شبیه سازی یک سیستم نمونه پرداخته و برای بررسی شبکه از تحلیل پایداری دینامیکی استفاده کرده است به این نتیجه رسیده است عملکرد سیستم در حضور نیروگاه‌های بادی تضعیف می‌شود و برای جبران آن استفاده از جبران کننده‌های استاتیکی و توان راکتیو را پیشنهاد داده است.

آقای S. Abdelkader [٥] در سال ۲۰۰۹ با شیوه‌ای جدید سعی در بررسی پایداری ولتاژ سیستم قدرت در حضور نیروگاه‌های بادی دارد. او برای این کار از نرم افزار Digsilent و مدل ۳۰ شینه IEEE استفاده کرده واز شیوه ای به اسم ارزیابی گرافیکی برای بررسی پایداری استفاده کرده است و به این نتیجه رسیده تولید بادی باعث ضعف ولتاژی سیستم می‌شود و پیشنهاد داده که کنترل توان راکتیو باعث بهبود پایداری ولتاژ خواهد شد.

آقای Ce Zheng [٦] در سال ۲۰۱۰ با توجه به افزایش روز به روز از انرژی بادی مطالعه تاثیر این افزایش را بر پایداری ولتاژ سیستم امری ضروری می‌داند، به همین علت نیاز به یک شاخص دقیق برای پایداری ولتاژ را ضروری می‌داند. به همین دلیل یک شاخص را معرفی می‌کند. برای این کار با استفاده از مدل تک خط یک خط انتقال و توان اکتیو و راکتیو مبادله شده بین باس مبدا و مقصد یک شاخص بر حسب توان اکتیو و راکتیو دریافتی ولتاژ شین و امپدانس خط انتقال تعریف می‌کند که اگر مقدار این شاخص کمتر از یک شد نشان دهنده ناپایداری ولتاژ است و با شبیه سازی یک شبکه نمونه و ایجاد یک خطا این شاخص را برای زمان‌های مختلف بدست

آورده است. در نهایت به این نتیجه رسیده که ژنراتورهای سرعت ثابت تحت شرایط خطا ولتاژ راکتیو مصرف کرده و برای جلوگیری از فروپاشی ولتاژ باید یک جبران کننده توان راکتیو داشته باشند اما برای ژنراتورهای سرعت متغیر به جبران کمتری نیاز است.

آقای P. N. Boonchiam [۷] در سال ۲۰۰۹ به بررسی پایداری ولتاژ در حضور نیروگاه‌های بادی پرداخته برای این کار از دو مدل ژنراتور بادی، ژنراتور القایی دو سو تغذیه(DFIG) و ژنراتورهای القایی قفس سنجابی (SCIG) استفاده کرده و برای شبیه سازی از مدل ۱۴ شینه IEEE استفاده کرده وبا بررسی استاتیکی پایداری ولتاژ به وسیله منحنی P-V در نهایت به این نتیجه رسیده که پایداری ولتاژ کاهش می‌یابد و برای جبران آن باید از SVC یا STATCOM استفاده شود.

آقای Gabriele Michalke [۸] در سال ۲۰۰۸ با توجه به استفاده بیشتر از ژنراتورهای سرعت متغیر به مسائل کنترل و مدل سازی این ژنراتورها و همچنین تاثیر آنها بر پایداری ولتاژ سیستم قدرت پرداخته است. برای این کار از نرم افزار Digsilent Power Factory استفاده کرده است. و به این نتیجه رسیده که برای قابلیت رد کردن خطا در DFIG تجهیزات کنترلی و حفاظتی خاص مورد نیاز است. و با این تجهیزات پایداری ولتاژ بهبود می‌یابد.

آقای C. Felte [۹] در سال ۲۰۰۸ با توجه به رشد سریع تولید بادی به مشکلات ناشی از آن مانند اضافه ولتاژ ژنراتورها اشاره می‌کند. اکثر توربین‌ها از یک مبدل منبع ولتاژ با لینک DC استفاده می‌کنند، وقتی که ولتاژ شبکه از حد مشخصی تجاوز کند مبدل سمت شبکه ممکن است معکوس عمل کند که نتیجه آن افزایش سریع ولتاژ DC است. وی در این مقاله به این مشکلات اشاره می‌کند و راه حلی را برای رفع اضافه ولتاژ پیشنهاد می‌کند. به این صورت که اگر یک محدود کننده ولتاژ خروجی کانورتر قرار دهند با این کار ولتاژ لینک DC بالا نمی‌رود.

آقای Rajveer Mittal [۱۰] در سال ۲۰۰۹ تولید بادی را با ژنراتورهای القایی مغناطیس دائم (PMSG) مورد ارزیابی قرار داده و به متغیر بودن ولتاژ در این ژنراتورها اشاره کرده است. و با استفاده از نرم افزار MATLAB به شبیه سازی یک شبکه نمونه پرداخته و اثر این ژنراتورها را بر

پایداری ولتاژ بررسی کرده و به این نتیجه رسیده که استفاده از ژنراتورهای بادی نیازمند استفاده از یک استراتژی کنترلی می‌باشد.

آقای V. Salehi [۱۱]در سال ۲۰۰۶ با توجه به ازدیاد تولید بادی در سال های اخیر به مزایا و معایب آن اشاره کرده و با توجه به اینکه در این نیروگاه‌ها بیشتر از ژنراتورهای القایی استفاده می-شود و ژنراتورهای القایی تمایل به جذب توان راکتیو دارند معمولا مشکلاتی از قبیل پایین بودن ولتاژ و ناپایداری ولتاژ را به وجود می‌آورند مخصوصا اگر بار ها بزرگ باشند. او برای بررسی پایداری ولتاژ سیستم قدرت در حضور نیروگاه‌های بادی از نرم افزار Digsilent Power Factory استفاده کرده و با شبیه سازی یکی از نیروگاه‌های بادی ایران به اسم "والفجر" اثر حضور SVC و STATCOM را بررسی کرده است. او برای این کار از پروفیل ولتاژ شین‌ها ومنحنی های P-V استفاده کرده و به این نتیجه رسیده که اثر حضور SVC و STATCOM پایداری ولتاژ را بهبود می‌بخشند.

آقای Gabriele Michalke [۱۲]در سال ۲۰۰۷ با توجه به توسعه نیروگاه‌های بادی و روند رو به رشد استفاده از ژنراتورهای القایی دو سو تغذیه (DFIG) در این نیروگاه‌ها، یک استراتژی کنترل برای این ژنراتورها ارائه کرده تا به پایداری ولتاژ سیستم کمک کند. این استراتژی شامل همکاری مطلوب بین سه کنترل کننده است:۱- کنترل کننده میرا ساز ۲- کنترل کننده ولتاژ مبدل سمت روتور ۳- تقویت کننده توان راکتیو مبدل سمت شبکه، که در نهایت مدل شبکه را با استفاده از نرم افزار Digsilent Power Factory شبیه سازی کرده و نشان داده که استراتژی او چگونه طی یک خطای سه فاز دوباره ولتاژ را برقرار می‌کند. وی همچنین در یک شبکه که ژنراتور های بادی قدیمی‌تر هستند نیز این آزمایش را تکرار کرده و به این نتیجه رسیده که برای جلوگیری از تضعیف پایداری ولتاژ سیستم این شیوه کنترل حتی عملکرد ژنراتورهای قدیمی را بهبود می-بخشد.

۱-۳ شرح اجرای پایان نامه

با دقت در مقالات بالا به نظر می‌رسد عواملی مانند موقعیت و درصد حضور توان بادی در سیستم، میزان بار سیستم قدرت و استراتژی کنترل توربین بادی و استفاده از جبران ساز در تاثیر بر روی پایداری ولتاژ با یکدیگر متفاوتند.

در این پایان‌نامه بناست تاثیر افزایش نفوذ نیروگاه‌های بادی با ژنراتورهای القایی دو سو تغذیه در سیستم قدرت بر پایداری ولتاژ سیستم مورد بررسی قرار گیرد. سیستم تست استاندارد ۱٤ باسه IEEE به عنوان سیستم آزمون در این پایان نامه برگزیده شده است. و قصد بر این است که به بررسی پایداری ولتاژ سیستم به صورت دینامیکی پرداخته شود. برای تکمیل بررسی و اطمینان از نتایج کار تحلیل استاتیکی نیز به صورت مختصر انجام خواهد شد. برای شبیه سازی نیروگاه‌های بادی ژنراتورهای سنکرون با ژنراتورهای القایی دو سو تغذیه با توان برابر جایگزین خواهند شد.

۱-٤ ساختار پایان نامه

این پایان نامه در پنج فصل تنظیم گردیده است. در فصل دوم آشنایی مختصری با نیروگاه‌های بادی ارائه می شود و همچنین به معرفی ژنراتورهای القایی دو سو تغذیه و مدل دینامیکی آن ها با توجه به تاثیر رفتار دینامیکی آن‌ها، بر دینامیک سیستم، و به دنبال آن تاثیر بر پایداری ولتاژ، پرداخته می‌شود. در فصل سوم یک تئوری از بحث پایداری ولتاژ مطرح می‌شود، تعریف مساله، شناخت آن و شیوه های مقابله با ناپایداری ولتاژّ مطرح می‌شود. در فصل چهارم به معرفی مدل شبیه سازی پرداخته می‌شود، و در ادامه با اعمال استراتژی‌های شبیه سازی نتایج شیه سازی بدست می‌آید. برای انجام پایداری ولتاژ دو تحلیل دینامیکی و استاتیکی انجام می‌شود، و تاکید بر تحلیل دینامیکی می‌باشد. در فصل پنجم نتیجه گیری از انجام تحقیق و پیشنهادات برای بهبود عملکرد سیستم ارائه می‌شود.

فصل دوم

آشنایی با نیروگاه‌های بادی و ژنراتورهای القایی دو سو تغذیه

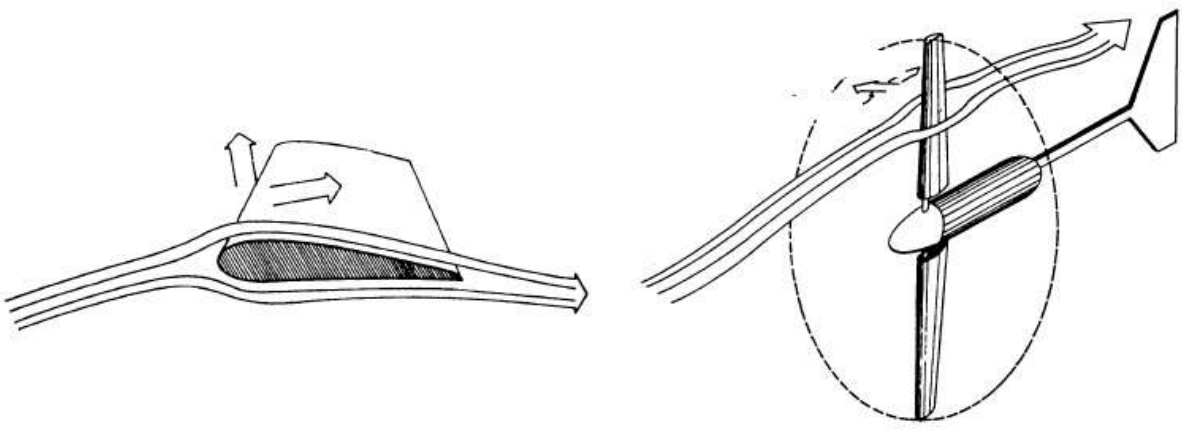
۲-۱ باد

هنگامی که تابش خورشید به‌طور نامساوی به سطوح ناهموار زمین می‌رسد، سبب ایجاد تغییرات در دما و فشار می‌گردد و در اثر این تغییرات باد به وجود می اید. هم چنین اتمسفر کره زمین به دلیل حرکت وضعی زمین گرما را از مناطق گرمسیری به مناطق قطبی انتقال می‌دهد که این امر باعث بوجود آمدن باد می‌گردد. جریانات اقیانوسی و دوران کره زمین نیز می‌تواند با ایجاد پدیده-هائی باد تولید نمایند. پس همان طور که گفته شد باد یکی از صورت‌های مختلف انرژی حرارتی خورشیدی است که دارای یک الگو جهانی نیمه پیوسته می‌باشد. [۱۳]

۲-۲ توربین بادی و استخراج انرژی باد

باد به واسطه عمل آیرودینامیکی که نیروی بالا بر نامیده می‌شود، نیروی خود را به مبدل‌های بادی می‌دهد. نیروی بالا بر همان نیرویی است که در بال‌های هواپیما هنگام پرواز به وجود آمده و سبب صعود هواپیما می‌شود. رشته‌های هوا هنگام برخورد با لبه پره توربین بادی که به فرم خاصی ساخته شده است، هنگام خروج در قسمت بالا و در قسمت پایین اندکی تغییر مسیر داده سپس به هم می‌پیوند. به سبب فرم پره توربین، جریان هوایی که از بالای آن می‌گذرد، مسیر طولانی تری را

طی کرده و در نتیجه رقیق گشته، روی پره تولید مکش می‌کند. عکس آن جریان هوایی است که از زیر پره می‌گذرد و مسیر کمتری دارد. در نتیجه غلیظ بوده و به پره فشار وارد می‌کند. نیروی بالابر سبب چرخش پره های توربین می‌گردد و قدرت تولید می‌کند و نیروی رانش که عمود بر سطح دایره گردش پره هاست، به وسیله پره‌ها و برج نگه‌دارنده توربین خنثی می‌شود.پره های توربین بادی اصولا طوری طراحی می‌شوند که نیروی بالابر بزرگ و نیروی رانش کوچک می-باشد. این باعث می‌شود که از طرفی قدرت توربین بالا رود و از طرف دیگر به علت پایین بودن نیروی رانش، صدمه ای به برج نگه‌دارنده توربین وارد نشود. در توربین‌های بادی با محور افقی، باد عمود بر سطح چرخش پره‌ها وارد می‌گردد. از این رو نیروی باد بر تمام پره ها به طور یکسان اثر می‌کند. [۱٤].



شکل ۲-۱ : آیرودینامیک پره‌های توربین [۱٤]

شمای توربین بادی با محور افقی، نیروی بالابر تولید قدرت می‌کند و نیروهایی که روی پره توربین بادی اثر می‌گذارد.

۲-۳ تولید برق

دو دسته بندی عمده در تولید انرژی بادی وجود دارد تولید سرعت ثابت و تولید سرعت متغیر، در تولید سرعت ثابت در یک سرعت خاص ژنراتورها بیشترین بازده را دارند ولی در تولید سرعت متغیر ژنراتورها در سرعت‌های مختلف می‌توانند ماکزیمم راندمان را تحویل دهند. همچنین در سرعت متغیر ژنراتورها می‌توانند تنش های مکانیکی روی توربین نیز کاهش دهند، بنابراین عمر توربین بیشتر خواهد شد، همچنین کمک می‌کند تا نوسانات گشتاور را میرا کند. ژنراتورهای سرعت متغیر معمول تر هستند.

ژنراتورهای سرعت متغیر دو گروه عمده دارند:

۱- ژنراتورهای سنکرون با مبدل الکترونیک قدرت مستقیم

۲- ژنراتورهای القایی دو سو تغذیه با مبدل الکترونیک قدرت سمت روتور(DFIG)

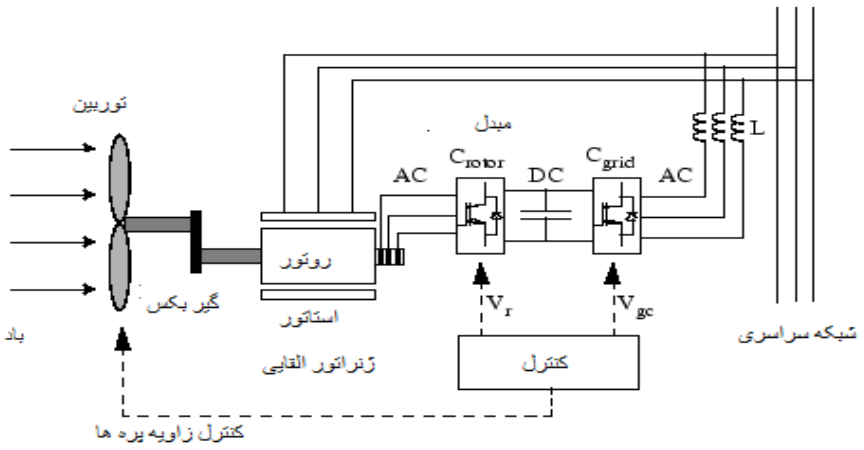
که هر دو مزایای ژنراتورهای سرعت متغیر را دارند اما توان الکترونیک قدرت دو ماشین متفاوت است.

در DFIG مبدل های الکترونیک قدرت توانی حدود ۳۰٪ توان ماشین را دارند در حالی که توان مبدل های الکترونیک قدرت در ژنراتورهای سنکرون با توان ماشین برابر است بنابراین هزینه بیشتری را شامل می‌شوند. ازاین رو DFIG ها برای استفاده ترجیح داده می‌شوند.

۲-٤ نیروگاه بادی با ژنراتور القایی دو سو تغذیه

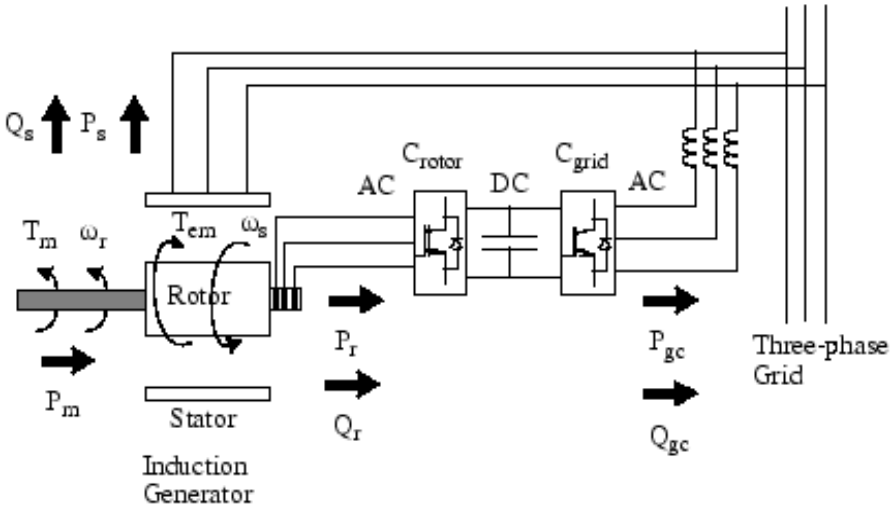
سیستم نیروگاه بادی با ژنراتور القایی دو سو تغذیه: توربین بادی و ژنراتور القایی دو سو تغذیه در شکل ۲-۲ نشان داده شده است. مبدل الکترونیک-قدرت AC/DC/AC به دو مولفه تقسیم می‌شود مبدل سمت روتور، C_{rotor} و مبدل سمت شبکه، C_{grid}.

C_{rotor} و C_{grid} مبدل های منبع ولتاژی هستند که از IGBT ها جهت تبدیل ولتاژ DC به AC استفاده می‌کنند. خازن متصل شده در سمت DC مبدل‌ها به عنوان منبع ولتاژ DC عمل می‌کند. سیم پیچی سه فاز روتور توسط حلقه های لغزان و جاروبک به C_{rotor} متصل می‌شود و سیم پیچی‌های سه فاز استاتور مستقیما به شبکه متصل می‌شود. توان گرفته شده از باد به وسیله توربین توسط ژنراتور القایی تبدیل به توان الکتریکی شده و از طریق روتور و استاتور به شبکه منتقل می‌شود. سیستم کنترل، فرمان زاویه پره‌ها و سیگنال‌های فرمان V_{gc} و V_r را جهت کنترل C_{grid} و C_{rotor} تولید می‌کند تا توان توربین بادی، ولتاژ باس DC، توان راکتیو و ولتاژ ترمینال ها را کنترل کند.[۳]



شکل۲-۲: توربین بادی و ژنراتور القایی دو سو تغذیه [۱٦]

پخش توان در یک ژنراتور القایی دو سو تغذیه مربوط به نیروگاه بادی در شکل شکل۲-۳ نمایش داده شده است.



شکل۲-۳: پخش توان در یک ژنراتور القایی دو سو تغذیه [۱۶]

پارامترها را به صورت زیر تعریف می کنیم

P_m : توان مکانیکی توربین بادی که به روتور منتقل می شود.

P_s : خروجی توان الکتریکی استاتور

P_r : خروجی توان الکتریکی روتور

P_{gc} : خروجی توان الکتریکی مبدل طرف شبکه

Q_r : خروجی توان راکتیو روتور

T_m: گشتاور مکانیکی اعمالی به روتور

Q_s : خروجی توان راکتیو استاتور

Q_{gc} : خروجی توان راکتیو مبدل طرف شبکه

T_{em} : گشتاور الکترومغناطیسی تولیدی توسط ژنراتور که به روتور اعمال می شود.

ω_r: سرعت روتور

ω_s: سرعت چرخش شارمغناطیسی درفاصله هوایی ژنراتور که سرعت سنکرون نامیده می شود و وابسته به فرکانس ولتاژ شبکه و تعداد قطب های ژنراتور است.

J : ضریب اینرسی ترکیب توربین بادی و روتور

توان مکانیکی و خروجی توان الکتریکی استاتور توسط روابط زیر بدست می آیند.

$$p_m = T_m \omega_r \qquad (۱-۲)$$

$$p_s = T_{em}.\omega_s \qquad (۲-۲)$$

معادله ی نوسان ماشین به صورت زیر است

$$\frac{Jd\omega_r}{dt} = T_m - T_{em} \qquad (۳-۲)$$

در شرایط ماندگار وسرعت ثابت داریم

$$T_m = T_{em} \qquad (٤-۲)$$

$$p_m = p_s + p_r \qquad (٥-۲)$$

$$p_r = p_m - p_s = T_m\omega_r - T_{em}\omega_s = -T_m(\frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s})\omega_s = -sp_s \qquad (٦-۲)$$

در کل قدر مطلق لغزش (s) بسیار کمتر از ۱ است، درنتیجه p_r بخش کوچکی از p_s است .

به دلیل اینکه T_m مثبت و w_s نیز برای فرکانس ثابت ولتاژ شبکه مثبت است، علامت p_r تابعی از علامت لغزش است. برای لغزش منفی (سرعت روتور بیشتر از سرعت سنکرون باشد) p_r مثبت است و برای لغزش مثبت (سرعت روتور کمتر از سرعت سنکرون باشد) p_r منفی است. برای سرعت‌های فوق سنکرون، p_r به خازن باس DC منتقل می‌شود و باعث افزایش ولتاژ باس DC