

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی برق و رباتیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی سیستم‌های قدرت

عنوان:

تأثیر نیروگاه‌های بادی بر روی نوسانات فرکانس پائین در سیستم‌های قدرت

نگارنده:

آرزو رسولی

استاد راهنما:

دکتر مهدی بانژاد

استاد مشاور:

دکتر علی حسامی نقشبندی

بهمن ۱۳۹۵

شماره: ۰۶/۸۵۹

تاریخ: ۱۳۹۵/۱۱/۱۹

ویرایش: - - - -

بسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره ۷: صورتجلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای آرزو رسولی به شماره دانشجویی ۹۳۰۸۲۴۴ رشته مهندسی برق گرایش قدرت (سیستم) که در تاریخ ۹۵/۱۱/۱۹ تحت عنوان:

تاثیر نیروگاه های بادی بر روی نوسانات فرکانس پائین در سیستم های قدرت

با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

☐ مردود	☐ دفاع مجدد	☒ خوب امتیاز ۹۷/۵۵
		نوع تحقیق: نظری ☒ عملی ☐

۱- عالی (۲۰ - ۱۹)

۲- بسیار خوب (۱۸/۹۹ - ۱۸)

۳- خوب (۱۶ - ۱۷/۹۹)

۴- قابل قبول (۱۵/۹۹ - ۱۴)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استادارهنمای اول	دکتر محمدرضا شاد	دانشیار	
۲- استادارهنمای دوم	—	—	—
۳- استاد مشاور	—	—	—
۴- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	دکتر سید سواد حسینی	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر امید حسن بنیاحضری	استادیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر امیررضا خورشیدی	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:



تقدیم بہ

پدر و مادر فداکار و عزیزم،

کہ صبورانہ عشق، ایمان و مہربانی را بہ من آموختند و تمام لحظہ ہای عمرم بدرقہ نفس کشیدن آن ہاست

و

خواہر مہربانم،

کہ وجودش شادی بخش و صفایش مایہی آرامش من است.

تشکر و قدردانی:

در اینجا لازم می‌دانم از تمام اساتید بزرگوار دوره کارشناسی و کارشناسی ارشد که در طول این سال‌ها مرا یاری نموده‌اند تشکر نمایم.

از استاد گرامی جناب آقای دکتر مهدی بانژاد که راهنمایی اینجانب را در انجام تحقیق و نگارش این پایان‌نامه تقبل نموده‌اند نهایت تشکر و سپاسگزاری را دارم. همچنین از استاد بزرگوار جناب آقای دکتر علی حسامی نقشبندی که به عنوان مشاور با انجام راهنمایی‌های خود مرا یاری رسانیده‌اند کمال تشکر را دارم.

تعهد نامه

اینجانب **آرزو رسولی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق قدرت دانشکده برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **تأثیر نیروگاه‌های بادی بر روی نوسانات فرکانس پائین در سیستم‌های قدرت تحت راهنمایی دکتر مهدی بانژاد** 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 صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » 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 می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.

چکیده

در چند دهه اخیر بعلت بحران جهانی انرژی و حفاظت‌های زیست محیطی، مزارع بادی بطور گسترده در سیستم قدرت نفوذ و رشد کرده‌اند. امروزه نصب منابع انرژی بادی از مزارع بادی کوچک با چند توربین به سمت مزارع بادی بزرگ با ظرفیت چند صد مگاوات رسیده است. همچنین سطح ولتاژ اتصال مزارع بادی به شبکه از سطح ولتاژ پائین به سطوح ولتاژ بالا رسیده است. به همراه افزایش سطح نفوذ مزارع بادی، تأثیر آن‌ها بر دینامیک‌های سیستم قدرت و پایداری بطور فزاینده پیچیده شده است. با توجه به این پیش‌زمینه، در این پایان‌نامه مطالعه جامعی از اثرات مزارع بادی بر پایداری سیستم قدرت، برای نفوذ پایدار مزارع بادی به آن، انجام شده است. در این پایان‌نامه ابتدا به مدلسازی سیستم قدرت، توربین بادی از نوع DFIG و استراتژی کنترلی بکار رفته شده در آن پرداخته می‌شود. سپس یک کنترل کننده میرایی نوسانات توان (POD) که هدف آن افزایش میرایی نوسانات بین ناحیه‌ای است برای DFIG طراحی می‌شود. در بخش شبیه‌سازی، یک سیستم دو ناحیه‌ای و چهار ماشین با و بدون مزرعه بادی تجزیه و تحلیل می‌شود و تأثیر فاکتورهای مهمی از قبیل فاصله انتقال DFIG و ظرفیت DFIG، بر روی مودهای فرکانس پائین سیستم بهم پیوسته دو ناحیه‌ای مطالعه می‌شود. سیستم تست ذکر شده در محیط نرم‌افزار DigSILENT Power Factory شبیه‌سازی شده و از لحاظ آنالیز مودال و شبیه‌سازی در حوزه زمان مورد بررسی قرار می‌گیرند. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش فاصله مزرعه بادی از سیستم قدرت میزان میرایی مودهای فرکانس پائین کاهش یافته و با افزایش ظرفیت مزارع میزان میرایی این مودها افزایش می‌یابد. همچنین POD طراحی شده موجب بهبود میرایی مودهای بین ناحیه‌ای می‌شود.

کلمات کلیدی: سیستم قدرت، نوسانات فرکانس پائین، مزرعه بادی، DFIG، آنالیز مودال، نوسان بین ناحیه‌ای.

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه.....	۱
۱-۱ تاریخچه.....	۲
۲-۱ بیان مسئله.....	۴
۳-۱ اهداف پایان نامه.....	۷
۴-۱ ساختار پایان نامه.....	۸
فصل دوم: تعاریف پایداری و مدل سازی سیستم قدرت.....	۹
۱-۲ مقدمه.....	۱۰
۲-۲ پایداری زاویه ای روتور.....	۱۲
۳-۲ نوسانات الکترومکانیکی.....	۱۳
۴-۲ مدل سازی سیستم قدرت.....	۱۵
۱-۴-۲ مدل سازی ژنراتور سنکرون.....	۱۵
۲-۴-۲ مدل سیستم تحریک.....	۱۹
۳-۴-۲ مدل پایدارساز سیستم قدرت.....	۲۰
۴-۴-۲ مدل بار.....	۲۳
۵-۲ جمع بندی.....	۲۳
فصل سوم: مدل سازی توربین بادی و مروری بر کارهای دیگران.....	۲۵
۱-۳ مقدمه.....	۲۵
۲-۳ مدل های DSL در دیگسایلنت.....	۲۷

۳-۳	مدل ژنراتور.....	۲۸
۴-۳	مدل جعبه‌دنده.....	۳۰
۵-۳	مدل مبدل.....	۳۳
۶-۳	کنترل توربین بادی با ژنراتور القائی دو سو تغذیه.....	۳۴
۱-۶-۳	کنترل مبدل سمت شبکه.....	۳۵
۲-۶-۳	کنترل مبدل سمت روتور.....	۳۶
۳-۶-۳	کنترل زاویه پره.....	۳۸
۷-۳	طراحی کنترلر میرایی برای DFIG.....	۴۰
۸-۳	مروری بر کارهای دیگران در زمینه‌ی کاربرد مزارع بادی در مطالعات پایداری.....	۴۳
۹-۳	جمع‌بندی.....	۴۴
فصل چهارم: تحلیل اثر نیروگاه‌های بادی بر پایداری سیستم‌های قدرت.....		
۱-۴	مقدمه.....	۴۶
۲-۴	خطی سازی مدل فضای حالت سیستم قدرت.....	۴۶
۱-۲-۴	مدل فضای حالت.....	۴۶
۲-۲-۴	خطی سازی معادلات.....	۴۸
۳-۴	تحلیل مودال و پایداری سیگنال کوچک.....	۴۹
۴-۴	پایداری سیستم قدرت در حضور مزرعه بادی.....	۵۳
۱-۴-۴	نوسانات فرکانس پائین یک سیستم قدرت بهم پیوسته ساده.....	۵۴
۲-۴-۴	مشخصه میرایی یک سیستم قدرت بهم پیوسته ساده در حضور مزرعه بادی.....	۵۷

۵-۴	شبیه سازی و تحلیل نتایج.....	۵۹
۴-۵-۱	معرفی سیستم تست.....	۶۰
۴-۵-۲	تجزیه و تحلیل پخش بار.....	۶۱
۴-۵-۳	آنالیز مودال.....	۶۳
۴-۵-۳-۱	مطالعه موردی ۱: کلیه ژنراتورهای سنکرون فاقد PSS.....	۶۳
۴-۵-۳-۲	کلیه ژنراتورهای سنکرون مجهز به PSS.....	۶۶
۴-۵-۴	شبیه سازی در حوزه زمان.....	۶۷
۴-۵-۴-۱	شبیه سازی با اغتشاش کوچک.....	۶۷
۴-۵-۴-۲	شبیه سازی با اغتشاش بزرگ.....	۶۹
۴-۶	شبیه سازی سیستم تست در حضور مزرعه بادی.....	۷۱
۴-۶-۱	آنالیز مودال.....	۷۲
۴-۶-۱-۱	مطالعه موردی ۱: تغییر در ظرفیت مزرعه بادی.....	۷۲
۴-۶-۱-۲	مطالعه موردی ۲: تغییر در فاصله اتصال مزرعه بادی از شبکه قدرت.....	۷۴
۴-۶-۱-۳	مطالعه موردی ۳: بررسی میرایی مودهای بین ناحیه‌های با وجود POD.....	۷۷
۴-۶-۱-۴	مطالعه موردی ۴: نصب مزرعه بادی در باس‌های مختلف سیستم.....	۷۸
۴-۶-۲	شبیه سازی در حوزه زمان.....	۸۰
۴-۷	جمع بندی.....	۸۱

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات..... ۸۳

۵-۱	نتیجه‌گیری.....	۸۴
۵-۲	پیشنهادات.....	۸۵

مراجع..... ۸۶

- پیوست الف: اطلاعات سیستم دو ناحیه‌ای و چهار ماشین..... ۸۹
- پیوست ب: اطلاعات توربین بادی و DFIG..... ۹۱
- پیوست ج: معرفی نرم افزار دیگسایلنت..... ۹۱

فهرست شکل‌ها

- شکل (۱-۱) ظرفیت توان بادی نصب شده در جهان..... ۳
- شکل (۲-۱) ۱۰ کشور پیش‌تاز در زمینه نصب توربین‌های بادی..... ۴
- شکل (۳-۱) نمای شماتیک توربین نوع دو سو تغذیه..... ۷
- شکل (۱-۲) پاسخ زاویه روتور به یک اغتشاش گذرا..... ۱۴
- شکل (۲-۲) نمودار نمادین ماشین سنکرون سه فاز..... ۱۶
- شکل (۳-۲) بلوک دیاگرام سیستم تحریک IEEE DC1A..... ۲۰
- شکل (۴-۲) بلوک دیاگرام سیستم تحریک در محیط نرم افزار دیگسایلنت..... ۲۱
- شکل (۵-۲) بلوک دیاگرام پایدارساز سیستم قدرت..... ۲۲
- شکل (۶-۲) بلوک دیاگرام پایدارساز سیستم قدرت در محیط نرم افزار دیگسایلنت..... ۲۲
- شکل (۱-۳) نمودار اصول شارش توان در یک DFIG..... ۲۶
- شکل (۲-۳) بلوک دیاگرام توربین بادی DFIG..... ۲۷
- شکل (۳-۳) دیاگرام ساده مدل دو جرمه ژنراتور القایی..... ۳۱
- شکل (۴-۳) کنترل مبدل سمت شبکه در دیگسایلنت..... ۳۶
- شکل (۵-۳) کنترل مبدل سمت روتور در دیگسایلنت..... ۳۷

- شکل (۳-۶) بلوک دیاگرام کنترل زاویه پره ۳۹
- شکل (۳-۷) بلوک دیاگرام کنترل زاویه پره در دیگسایلنت ۳۹
- شکل (۳-۸) منحنی مشخصه توان مکانیکی توربین بادی بر حسب سرعت چرخشی روتور .. ۴۰
- شکل (۳-۹) اعمال POD به مبدل سمت روتور ۴۳
- شکل (۴-۱) یک سیستم قدرت بهم پیوسته دو ماشینه ۵۵
- شکل (۴-۲) یک سیستم قدرت بهم پیوسته ساده در حضور مزرعه بادی ۵۸
- شکل (۴-۳) فلوچارت شبیه سازی‌های انجام شده در فصل ۴ ۶۰
- شکل (۴-۴) دیاگرام تک خطی سیستم بهم پیوسته دو ناحیه‌ای و چهار ماشینه ۶۱
- شکل (۴-۵) ضریب مشارکت ژنراتورها در مود محلی ناحیه ۱ (مطالعه موردی ۱) ۶۶
- شکل (۴-۶) ضریب مشارکت ژنراتورها در مود محلی ناحیه ۲ (مطالعه موردی ۱) ۶۷
- شکل (۴-۷) ضریب مشارکت ژنراتورها در مود بین ناحیه‌ای (مطالعه موردی ۱) ۶۷
- شکل (۴-۸) پاسخ سرعت روتور ژنراتورها به اغتشاش‌های اعمال شده در ناحیه ۱ ۶۷
- شکل (۴-۹) پاسخ سرعت روتور ژنراتورها به اغتشاش‌های اعمال شده در ناحیه ۲ ۶۹
- شکل (۴-۱۰) پاسخ سرعت روتور ژنراتورها به اتصال کوتاه سه فاز در باس ۸ ۷۰
- شکل (۴-۱۱) تأثیر PSS بر روی پایداری دینامیکی سیستم ۷۰
- شکل (۴-۱۲) دیاگرام تک خطی سیستم دو ناحیه‌ای در حضور مزرعه بادی ۷۱
- شکل (۴-۱۳) نمودار مستطیلی مودهای سیستم تحت فواصل مختلف مزرعه بادی از شبکه. ۷۴
- شکل (۴-۱۴) نمودار مستطیلی مودهای سیستم تحت ظرفیت‌های مختلف مزرعه بادی ۷۷
- شکل (۴-۱۵) نمودار مستطیلی مود بین ناحیه‌ای تحت فواصل مختلف مزرعه بادی از شبکه ۷۹
- شکل (۴-۱۶) تأثیر POD بر روی پایداری دینامیکی سیستم ۸۱

فهرست جداول

جدول (۱-۴) مشخصات شبکه	۶۱
جدول (۲-۴) نتایج پخش بار در باسها	۶۲
جدول (۳-۴) نتایج پخش بار در خطوط	۶۲
جدول (۴-۴) مودهای نوسانی فرکانس پائین سیستم	۶۴
جدول (۵-۴) مودهای نوسانی فرکانس پائین سیستم تحت ظرفیت‌های (MW) مختلف	۷۳
جدول (۶-۴) مودهای نوسانی فرکانس پائین سیستم تحت ظرفیت‌های (MW) مختلف	۷۳
جدول (۷-۴) مودهای نوسانی فرکانس پائین سیستم تحت فاصله‌های (km) مختلف	۷۵
جدول (۸-۴) مودهای نوسانی فرکانس پائین سیستم تحت فاصله‌های (km) مختلف	۷۶
جدول (۹-۴) مود بین ناحیه‌های شبکه دو ناحیه‌ای و چهار ماشین در حضور مزرعه بادی	۷۸
جدول (۱۰-۴) مودهای بین‌ناحیه‌ای سیستم (نصب مزرعه بادی در ناحیه اول)	۷۹
جدول (۱۱-۴) مودهای بین‌ناحیه‌ای سیستم (نصب مزرعه بادی بر روی باس میانی)	۸۰
جدول (۱۲-۴) مودهای بین‌ناحیه‌ای سیستم (نصب مزرعه بادی در ناحیه دوم)	۸۰
جدول (الف-۱) اطلاعات خطوط شبکه	۸۹
جدول (الف-۲) اطلاعات ژنراتورهای شبکه	۸۹
جدول (الف-۳) اطلاعات بارها	۸۹
جدول (الف-۴) اطلاعات سیستم تحریک ژنراتورها	۹۰
جدول (الف-۵) اطلاعات PSS ژنراتورها	۹۰
جدول (الف-۶) اطلاعات پخش بار شبکه	۹۰
جدول (ب-۷) اطلاعات توربین بادی و DFIG	۹۱

فصل اول

مقدمه

۱-۱ تاریخچه

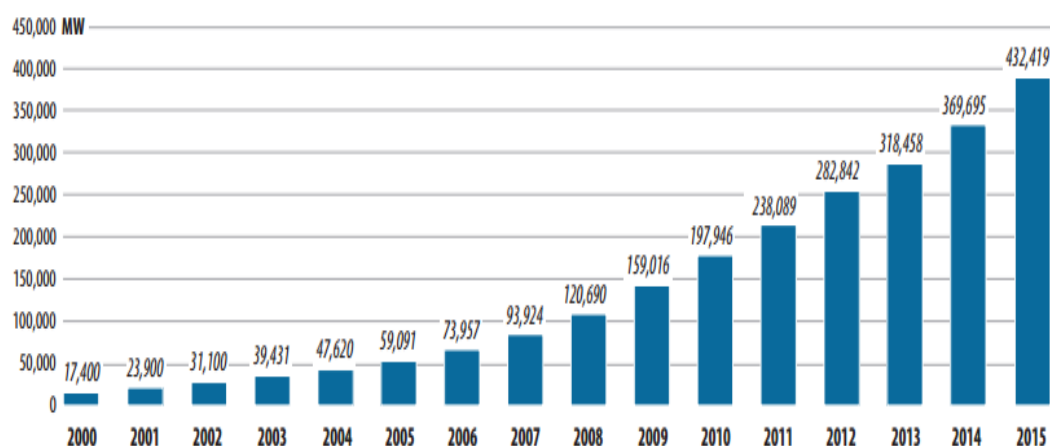
سیستم‌های قدرت عملی از آغاز قرن ۱۹ آغاز به کار کرده‌اند. در ابتدا آن‌ها برای تامین انرژی مورد نیاز برای روشنایی خیابان‌ها استفاده می‌شدند، اما به‌زودی توسعه یافته و بارهای مکانیکی را نیز تغذیه کردند. در ابتدا از سیستم‌های جریان مستقیم برای تحویل توان استفاده می‌شد، اما یکی از محدودیت‌هایی که برای استفاده از این سیستم‌ها وجود داشت، فاصله زیاد بارها از محل تولید بود که باعث می‌شد تلفات و افت ولتاژها بسیار افزایش یابند. توسعه ترانسفورماتورها منجر به معرفی جریان متناوب شد، که به استاندارد برای سیستم‌های قدرت تبدیل شد. به این ترتیب مسافت‌های انتقال طولانی امکان‌پذیر شدند، و سپس فرکانس‌های جریان استانداردسازی شدند، و اتصال سیستم‌های قدرت نزدیک به هم ممکن شد. اتصال سیستم‌های قدرت منجر به افزایش امنیت آن‌ها می‌شود، همچنین باعث می‌شود که بارها بتوانند به‌وسیله ژنراتورهای مختلف تامین شوند، و بازدهی سیستم افزایش یابد [۱].

سیستم‌های قدرت الکتریکی شامل سه بخش تولید، انتقال و توزیع هستند. قسمت تولید شامل ژنراتورهای سنکرون است که الکتریسیته را تولید می‌کنند. محرک‌های اصلی انرژی حرارتی یا فشار را به انرژی مکانیکی چرخان تبدیل می‌کنند. سیستم انتقال ژنراتورهای اصلی و سیستم‌های توزیع را به‌وسیله خطوط انتقال به هم وصل می‌کند. ولتاژها از سطح ولتاژ ژنراتور به سطح ولتاژ انتقال بالا برده می‌شوند، و سپس دوباره سطح آن‌ها برای بارها پایین آورده می‌شوند [۱].

با توجه به مشکلات زیست محیطی استفاده از سوخت‌های فسیلی در نیروگاه‌های حرارتی، محدودیت منابع این سوخت‌ها و افزایش قیمت آن‌ها در دهه‌ی اخیر، استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر به‌منظور تولید انرژی الکتریکی موردتوجه کشورهای بسیار قرار گرفته است. در این

میان استفاده از انرژی باد به علت توسعه فناوری ساخت توربین‌های بادی با ظرفیت‌های بالا و لذا کاهش هزینه تولید برق از این انرژی، مقبولیت بیشتری یافته است، بطوریکه در ایالات متحده-ی آمریکا، ظرفیت نصب شده‌ی توان بادی از ۱۷۴۰۰ مگاوات در سال ۲۰۰۰ به ۴۳۲۴۱۹ مگاوات در سال ۲۰۱۵ رسیده است. ظرفیت توان بادی نصب شده در جهان در طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۵ در شکل (۱-۱) نشان داده شده است [۲].

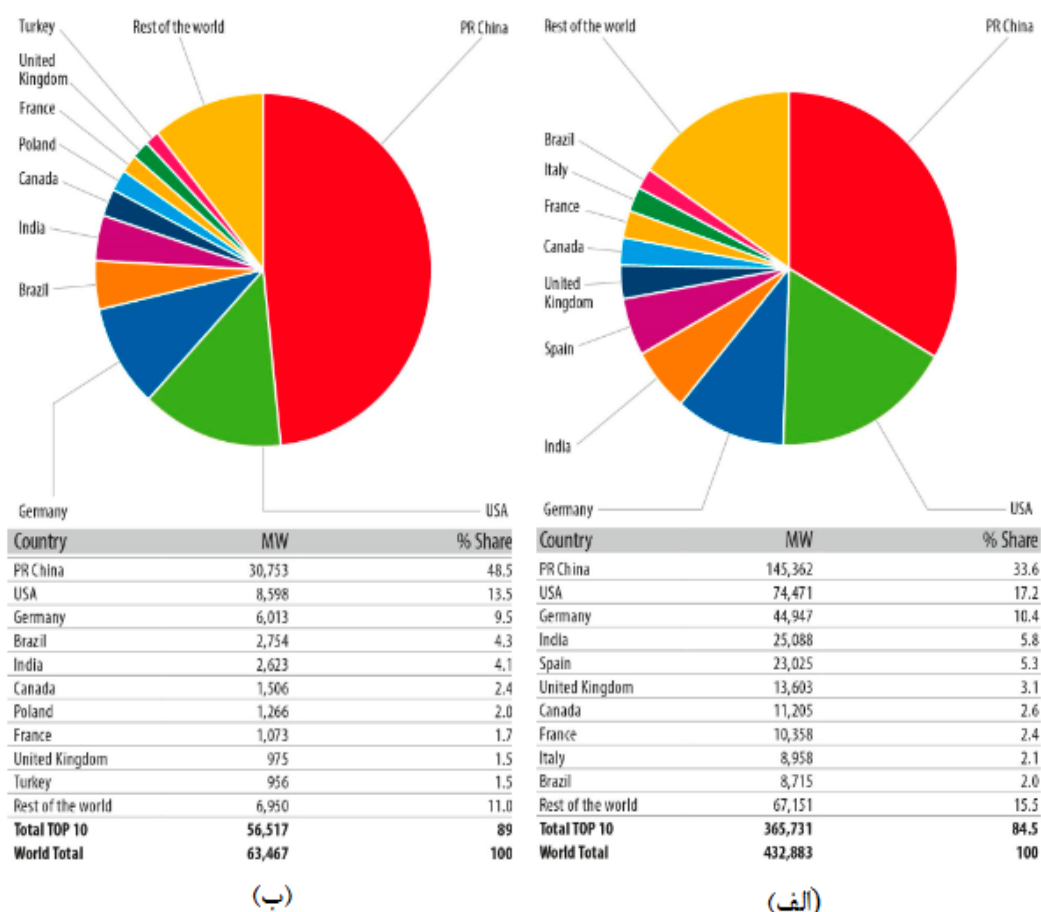
در پایان سال ۲۰۱۱ کل ظرفیت توان بادی نصب شده در اروپا تقریباً در حدود ۱۰ درصد از کل توان نصب شده در آن است، که این مقدار برای تامین ۶/۳ درصد از تقاضای الکتریسیته کافی است. طی توافقی که در اتحادیه اروپا به تصویب رسیده است، مشخص شده است که تا پایان سال ۲۰۲۰ باید ۲۰ درصد از انرژی کل اروپا از طریق منابع انرژی تجدید پذیر تامین شوند، که انتظار می‌رود که این ظرفیت رو به رشد باشد [۱].



شکل (۱-۱) ظرفیت توان بادی نصب شده در جهان [۲]

شکل (۲-۱) الف مجموع ظرفیت بهره‌برداری شده از انرژی باد را در کشورهای پیش‌تاز در این زمینه تا پایان سال ۲۰۱۵ نشان می‌دهد. کشورهای چین، ایالات متحده آمریکا و آلمان به ترتیب با ظرفیت نصب شده ۱۴۵۳۶۲، ۷۴۴۷۱ و ۴۴۹۴۷ مگاوات به ترتیب رتبه‌های اول تا سوم را دارا

هستند. شکل (۲-۱) ب ظرفیت بهره‌برداری شده از انرژی باد را در کشورهای پیشتاز در این زمینه در سال ۲۰۱۵ نشان می‌دهد. چین، آمریکا و آلمان با نصب به ترتیب ۳۰۷۵۳، ۸۵۹۸ و ۶۰۱۳ مگاواتی مزارع بادی در سال ۲۰۱۵ رتبه‌های اول تا سوم را دارند.



شکل (۲-۱) الف) ۱۰ کشور پیشتاز در زمینه نصب توربین‌های بادی با ظرفیت کل نصب شده تا سال ۲۰۱۵ ب) ۱۰ کشور پیشتاز در زمینه نصب توربین‌های بادی در سال ۲۰۱۵ [۲]

۲-۱ بیان مسئله

تا زمانی که نفوذ توان بادی در شبکه‌های قدرت پائین باشد، رفتار دینامیکی کل سیستم به‌طور عمده توسط ژنراتورهای سنکرون تعیین می‌شود، ولی با بالا رفتن ضریب نفوذ توان بادی، در

عملکرد و پایداری سیستم‌های قدرت تغییراتی حاصل می‌شود، بررسی این تغییرات در حوزه پایداری فرکانس [۳، ۴]، پایداری گذرا [۵]، پایداری ولتاژ [۶] و پایداری سیگنال کوچک [۷، ۸، ۹]، موضوعی است که اخیراً مورد توجه پژوهشگران صنعت برق قرار گرفته است. در این میان تاثیر مزاح باد بر پایداری سیگنال کوچک شبکه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

پایداری سیگنال کوچک به معنی توانایی سیستم در حفظ سنکرونیزم در مواجهه با اغتشاشات کوچک است. اغتشاشی کوچک شمرده می‌شود که برای بررسی پاسخ سیستم به آن، بتوان سیستم را خطی فرض کرد [۱۰]. در ژنراتورهای سنکرون گشتاور الکتریکی به طور عمده به زاویه بین شار روتور و شار استاتور ژنراتور وابسته است. از طرفی، مطابق معادله‌ی حرکت ژنراتور، شتاب تغییر زاویه بین شار روتور و شار استاتور متناسب با اختلاف گشتاور مکانیکی و الکتریکی وارد بر روتور است. این امر سبب می‌شود که بتوان قسمت مکانیکی ژنراتور سنکرون را یک سیستم دینامیکی درجه دو در نظر گرفت که از خود رفتارهای نوسانی بروز می‌دهد. به این نوسانات، نوسانات الکترومکانیکی ژنراتور سنکرون می‌گویند.

به طور معمول نوسانات سیستم قدرت به دو نوع تقسیم می‌شوند:

- نوسان یک ژنراتور (یا گروهی از ژنراتورها) در یک ناحیه‌ی مشخص شبکه در برابر یک ژنراتور (یا گروهی از ژنراتورها) در همان ناحیه‌ی شبکه، که اصطلاحاً به آن نوسانات محلی گفته می‌شود.
- نوسان یک ژنراتور (یا گروهی از ژنراتورها) در یک ناحیه‌ی مشخص شبکه در برابر یک ژنراتور (یا گروهی از ژنراتورها) در ناحیه‌ی دیگر شبکه، که اصطلاحاً به آن نوسانات بین ناحیه‌ای گفته می‌شود.

به طور معمول نوسانات نوع اول فرکانسی در محدوده‌ی ۱ تا ۳ هرتز و نوسانات نوع دوم فرکانسی در محدوده‌ی ۰٫۱ تا ۱ هرتز دارند، لذا برای بررسی پایداری سیگنال کوچک شبکه تنها

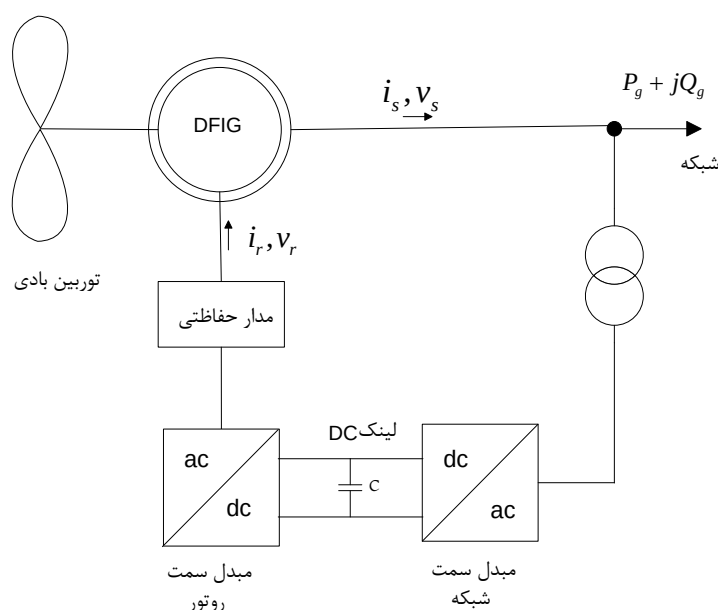
موده‌هایی در نظر گرفته می‌شوند که تغییرات آن‌ها فرکانسی در محدوده‌ی این بازه‌ی فرکانسی داشته باشند [۱۱].

توربین‌های بادی موجود در صنعت برق را می‌توان به دو گروه توربین‌های بادی سرعت ثابت و توربین‌های بادی سرعت متغیر تقسیم‌بندی کرد. سرعت روتور توربین‌های نوع اول، مستقل از سرعت باد، تقریباً ثابت بوده، و با توجه به فرکانس شبکه، نسبت دور جعبه‌دنده و طراحی ژنراتور تعیین می‌شود. به علت بهره‌وری پائین، عدم توانایی کنترل توان راکتیو و استرس مکانیکی بالا، امروزه این نوع توربین‌ها (مخصوصاً در ظرفیت‌های بالا) کمتر تولید و نصب می‌شوند و جای خود را به توربین نوع سرعت متغیر داده‌اند. به علت استفاده از ژنراتورهای القایی نوع قفس سنجابی، به این نوع توربین‌ها اصطلاحاً توربین‌های با ژنراتور القایی قفسه سنجابی یا SCIG^۱ گفته می‌شود [۸]. در توربین‌های سرعت متغیر به طور متداول از ژنراتورهای دو سو تغذیه و یا ژنراتورهای سنکرون که توسط یک مبدل فرکانس به شبکه متصل می‌شوند استفاده می‌شود. در حالت اول به این نوع توربین‌ها اصطلاحاً توربین‌های با ژنراتور القایی دو سو تغذیه^۲ یا DFIG، و در حالت دوم به آن‌ها توربین‌های با مبدل کامل^۳ یا FCWT گفته می‌شود. شکل (۱-۳) نمای شماتیک توربین‌های دو سو تغذیه را نشان می‌دهد. همانگونه که اشاره شد، توربین‌های با مبدل کامل توسط یک مبدل فرکانس به شبکه متصل می‌شوند. در صورتیکه فرکانس کلیدزنی در مبدل به حد کافی بالا باشد (که معمولاً نیز چنین است)، دینامیک‌هایی از مجموعه‌ی توربین-ژنراتور که فرکانسی در محدوده-ی فرکانس‌های الکترومکانیکی شبکه دارند از طرف شبکه مشاهده نمی‌شوند. بنابراین تأثیر این نوع توربین‌ها بر نوسانات الکترومکانیکی شبکه ارتباطی به نحوه کار توربین بادی ندارد و تنها وابسته به استراتژی کنترلی بکار رفته در مبدل سمت شبکه این توربین‌هاست. از سوی دیگر به علت اینکه توربین‌های نوع SCIG امروزه به ندرت مورد استفاده قرار می‌گیرند، افزایش ضریب نفوذ این

^۱ Squirrel Cage Induction Generator (SCIG)

^۲ Doubly Fed Induction Generator (DFIG)

^۳ Full Converter Wind Turbine (FCWT)



شکل (۳-۱) نمای شماتیک توربین نوع دو سو تغذیه [۸]

توربین‌ها نیز فاقد موضوعیت است. بنابراین در این پایان‌نامه تنها تاثیر توربین‌های نوع دو سو تغذیه بر پایداری سیگنال کوچک شبکه مورد توجه قرار می‌گیرد.

۳-۱ اهداف پایان‌نامه

در این پایان‌نامه از دو روش آنالیز مودال و شبیه‌سازی حوزه‌ی زمان، برای بررسی تاثیر مزارع بادی بر پایداری سیگنال کوچک سیستم قدرت بهره‌برده شده است. این دو روش ابتدا بر روی یک سیستم دو ناحیه‌ای و چهار ماشین و سپس بر روی یک سیستم نه باسه و سه ماشین، در محیط نرم افزار DigSILENT Power Factory پیاده‌سازی شده‌اند. اهداف کلی این پایان‌نامه به شرح زیر است:

- ۱- بررسی نقش نیروگاه‌های بادی در میرایی نوسانات فرکانس پائین.
- ۲- بررسی تاثیر عوامل مختلف مانند فاصله نیروگاه بادی از سیستم قدرت و ظرفیت نیروگاه بادی در میرایی نوسانات فرکانس پائین و بخصوص نوسانات بین ناحیه‌ای.

- ۳- بررسی تأثیر PSSهای ژنراتورهای در میرایی مودهای محلی و بین ناحیه‌ای.
- ۴- بررسی تأثیر کنترلر میرایی نوسان (POD) DFIG در میرایی مودهای بین ناحیه‌ای.
- ۵- بررسی تأثیر نصب مزارع بادی در باس‌های مختلف بر روی نوسانات بین ناحیه‌ای.

۴-۱ ساختار پایان نامه

ساختار این مطالعه بدین شرح است: تعاریف کلی پایداری و مدل استفاده شده برای سیستم قدرت (شامل ژنراتور سنکرون، سیستم تحریک، PSS و بار)، در فصل ۲ تشریح می‌گردد. در فصل ۳ ابتدا به مدل‌سازی توربین بادی نوع دو سو تغذیه و همچنین روش کنترلی استفاده شده در آن پرداخته شده و سپس در ادامه به مروری بر کارهای گذشته در زمینه تأثیر مزارع بادی بر پایداری سیستم‌های قدرت پرداخته می‌شود. در فصل ۴ نیز به مطالعه نوسانات فرکانس پائین با در نظر گرفتن مزارع بادی پرداخته شده و نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های مختلف بحث و بررسی می‌شوند. و در پایان نیز نتایج و اهداف حاصل از این مطالعه در فصل ۵ ارائه می‌شود.

فصل دوم

تعاریف پایداری و مدل سازی سیستم قدرت

۱-۲ مقدمه

پایداری سیستم قدرت را می توان یک ویژگی از سیستم دانست که آن را قادر به حفظ یک نقطه ی کار متعادل و یا بدست آوردن حالت تعادل قابل قبول دیگری در صورت بروز اغتشاش می کند.

یک سیستم قدرت الکتریکی قادر است تا انرژی الکتریکی را از یکی از صورت های طبیعی به نوع الکتریکی آن تبدیل کند و آن را به نقاط مصرف انتقال دهد. یکی از خصوصیات انرژی الکتریکی این است که می توان آن را انتقال داد و به آسانی و با درجه بالایی از راندمان و قابلیت اطمینان کنترل نمود. از این رو یک سیستم قدرت باید بتواند در حالت بهره برداری، چند نیاز اساسی را تامین کند:

- سیستم قدرت باید قادر به دنبال کردن تغییرات مداوم بار از لحاظ توان اکتیو و راکتیو باشد و چون برخلاف انرژی های دیگر، قابل ذخیره سازی نیست، بنابراین باید "ذخیره چرخان" کافی در هر لحظه نگهداری و کنترل شود.
- سیستم قدرت باید با حداقل هزینه و حداقل تاثیر روی طبیعت تولید شود.
- کیفیت انرژی الکتریکی باید حداقل استانداردها را داشته باشد از آن جمله: فرکانس ثابت، ولتاژ ثابت و قابلیت اطمینان بالا.

کنترل سیستم قدرت باید به گونه ای باشد تا بتوان یک بهره برداری مطمئن از سیستم داشت، بطوریکه ولتاژ، فرکانس و دیگر متغیرها در محدوده های قابل قبول خود باقی بمانند. عملیات کنترلی، بدون شک روی عملکرد دینامیکی سیستم قدرت و توانایی آن در برابر اغتشاشات نیز تاثیر بسزایی دارد. برای یک سرویس دهی با قابلیت اطمینان بالا، سیستم به هم پیوسته قدرت باید توانایی مقابله با اغتشاشات مختلف را داشته باشد و به گونه ای طراحی و بهره برداری شود که در مقابل

رخدادهای احتمالی، به جز عناصر در معرض خطا، هیچ گونه تلفات بار نداشته باشد. در این صورت خطاها کنترل شده و به بقیه سیستم سرایت پیدا نخواهد کرد.

طراحی این چنین سیستمی که کمترین هزینه را در برداشته و همیشه پایدار بماند، مسئله‌ی بسیار پیچیده‌ای است. از نقطه نظر کنترلی، سیستم قدرت یک سیستم مرتبه بالا با فرآیندهای چندمتغیره است که در یک محیط کاملاً متغیر قرار دارد. به دلیل ابعاد زیاد و پیچیدگی سیستم، لازم است تا فرضیاتی را برای ساده سازی آن در تحلیل مسائل مربوطه، در نظر گرفت.

سیستم قدرت یک سیستم کاملاً غیرخطی است که عملکرد دینامیکی آن تحت تاثیر تجهیزات گوناگون با ویژگی‌های مختلف است. پایداری سیستم را با اینکه نباید یک مسئله تنها در نظر گرفت ولی می توان از جنبه های مختلف بررسی کرد [۱۰].

از سال ۱۹۲۰ پایداری سیستم قدرت به عنوان یک مسئله‌ی مهم در یک سیستم امن در حال بهره برداری شناخته شده است. خاموشی های مهم زیادی که در اثر ناپایداری سیستم رخ داده اند، اهمیت این موضوع را نشان می دهند [۱۱].

از لحاظ تاریخی ناپایداری گذرا بعنوان اصلی ترین مسئله‌ی پایداری در سیستم ها مورد توجه بوده است. به دلیل استفاده از فناوری ها و کنترل های جدید و در نتیجه شرایط بهره برداری تحت استرس، انواع ناپایداری ها در سیستم قدرت رخ می دهد؛ بعنوان مثال، ناپایداری ولتاژ یا ناپایداری فرکانس و یا نوسانات بین ناحیه ای بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته اند. بنابراین برای یک طراحی و بهره برداری مطمئن از سیستم، درک روشنی از انواع پایداری ها و روابط بین آنها ضروری به نظر می رسد. در این فصل سعی شده است تا از روی مراجع معتبر یک تعریف و طبقه بندی درستی از پایداری سیستم قدرت ارائه شود.

۲-۲ پایداری زاویه ای روتور

تغییرات گشتاور الکتریکی یک ماشین سنکرون را در حالت بروز اغتشاش می توان به دو مؤلفه تجزیه کرد:

$$\Delta T_e = K_s \Delta \delta + K_D \Delta \omega \quad (۱-۲)$$

که $K_s \Delta \delta$ مؤلفه ای از تغییرات گشتاور است که با تغییرات زاویه روتور، یعنی $\Delta \delta$ همفاز است و مؤلفه گشتاور سنکرون کننده نامیده می شود و K_s ضریب گشتاور سنکرون کننده است. و $K_D \Delta \omega$ با تغییرات سرعت، یعنی $\Delta \omega$ همفاز است و مؤلفه گشتاور میرا کننده نامیده می شود. K_D نیز ضریب گشتاور میرا کننده است [۱۱].

پایداری سیستم به وجود هر دو مؤلفه گشتاور برای هر ماشین سنکرون بستگی دارد. کمبود گشتاور سنکرون کننده منجر به ناپایداری غیر نوسانی زاویه روتور می شود. از طرف دیگر کمبود گشتاور میرا کننده هم منجر به ناپایداری نوسانی می شود.

پایداری زاویه ای روتور را به منظور سهولت بررسی، به دو نوع زیر تقسیم می کنند:

- ۱- پایداری اغتشاش کوچک یا سیگنال کوچک^۱ که توانایی سیستم را برای حفظ حالت سنکرون در برابر اغتشاشات کوچک بار، تولید یا شبکه نشان می دهد. واکنش سیستم در مقابل اغتشاش های کوچک، به عوامل چندی از جمله ساختار و مشخصات شبکه، مشخصات ژنراتور، نقطه کار ماندگار و نوع سیستم تحریک بستگی دارد. در غیاب تنظیم کننده ی خودکار ولتاژ (AVR)، ناپایداری معمولاً به علت کمبود گشتاور سنکرون کننده اتفاق می افتد که منجر به ناپایداری غیر نوسانی می شود. با وجود تنظیم کننده ی خودکار ولتاژ، پایداری اغتشاش کوچک، عمدتاً به علت کمبود میرایی

¹ Small Signal Stability

نوسان ها اتفاق می افتد. اصولاً پایداری انواع نوسان های زیر مورد توجه است:

- ✓ مودهای محلی یک ماشین یا نیروگاه
- ✓ مودهای بین ناحیه ای سیستم قدرت
- ✓ مودهای کنترلی
- ✓ مودهای پیچشی محورتوربین- ژنراتور

۲- پایداری گذرا که توانائی سیستم در حفظ حالت سنکرون در برابر یک اغتشاش شدید را نشان می دهد و توأم با تغییرات بزرگ زاویه روتور ژنراتور است و از رابطه غیرخطی توان- زاویه ماشین ها تأثیر می پذیرد. این نوع پایداری هم به نقطه کار اولیه سیستم و هم به شدت اغتشاش بستگی دارد. عکس العمل زاویه روتور در این شرایط ممکن است مطابق شکل (۲-۱) به سه صورت بروز کند؛ در حالت اول، زاویه روتور ابتدا افزایش یافته، به حداکثر مقدار خود می رسد و سپس کاهش یافته و با دامنه در حال کاهش، بصورت نوسانی در می آید تا اینکه به حالت ماندگار می رسد. در حالت دوم، زاویه روتور بطور پیوسته و یکنوا افزایش می یابد تا اینکه حالت سنکرون از دست برود. این شکل ناپایداری موسوم به ناپایداری اولین نوسان است و به علت کمبود گشتاور سنکرون کننده ایجاد می شود. در حالت سوم، سیستم ابتدا در اولین نوسان پایدار است اما با افزایش دامنه نوسان ها، تدریجاً ناپایدار می شود. این شکل ناپایداری عموماً زمانی اتفاق می افتد که شرایط حالت ماندگار سیستم بعد از خطا، خود از دیدگاه سیگنال کوچک ناپایدار است و عموماً به علت اغتشاش گذرا اتفاق نمی افتد [۱۱].

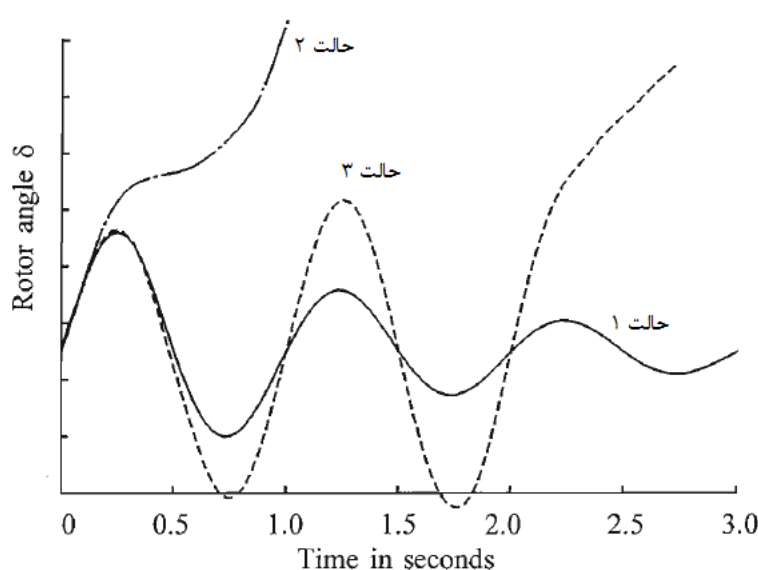
۳-۲ نوسانات الکترومکانیکی

نوسان های الکترومکانیکی ژنراتورها در بازه فرکانسی ۰٫۱ تا ۳ هرتز اتفاق می افتند. در چنین

نوساناتی مودهای مختلف و اغلب بطور همزمان ممکن است پدید آیند. این نوسانات به دو نوع

مجزا تقسیم می شوند:

- مودهای محلی سیستم که مربوط به نوسان های واحدهای یک نیروگاه نسبت به بقیه سیستم قدرت است. واژه محلی به این دلیل استفاده می شود که نوسان ها به یک نیروگاه یا بخش کوچکی از سیستم قدرت محدود می گردد. فرکانس این نوسانات معمولا بین ۰٫۸ تا ۲ هرتز است.



شکل (۱-۲) پاسخ زاویه روتور به یک اغتشاش گذرا [۱۱]

- مودهای بین ناحیه ای که مربوط به نوسان های تعدادی ماشین سنکرون در یک بخش سیستم نسبت به ماشین های سنکرون سایر بخش هاست. این مودها زمانی اتفاق می افتد که دو یا چند بخش که هر بخش از تعدادی ماشین سنکرون با اتصال الکتریکی نزدیک به هم تشکیل شده است، به وسیله ی خطوطی با ارتباط ضعیف، به هم وصل شده باشند. این نوسانات معمولا بین ۰٫۱ تا ۰٫۷ هرتز هستند. در بعضی از موارد این نوسانات ممکن است به ۰٫۸ تا ۱ هرتز نیز برسند.

اغلب ممکن است در یک نیروگاه، واحدهای مختلف آن نیز نسبت به هم نوسان نمایند. به

نوسانات فوق نوسانات درون نیروگاهی گفته می شود و فرکانس آنها بین ۱,۵ تا ۲,۵ هرتز می باشد. فرکانس نوسانات فوق در محدوده ی بالای بازه نوسانات محلی است. قابل ذکر است که بروز نوسانات میان واحدهای نیروگاهی، بیشتر ناشی از تأثیر متقابل سیستم های کنترلی موجود در نیروگاه می باشد و تأثیر چندانی بر حدود پایداری انتقال توان سیستم ندارد [۱۲].

۴-۲ مدل سازی سیستم قدرت

در این بخش بطور خلاصه به مدل سازی اجزای سیستم قدرت که در این پروژه از آنها استفاده شده است، پرداخته می شود. در این فصل پس از معرفی اجزای سیستم قدرت، به مدل فضای حالت خطی شده ی سیستم که برای تحلیل سیگنال کوچک سیستم لازم است پرداخته می شود.

۴-۲-۱ مدل سازی ژنراتور سنکرون

مدل سازی صحیح ژنراتورهای سنکرون یک موضوع بسیار مهم در انواع مطالعات سیستم های قدرت است. نرم افزار دیگسایلنت مدل بسیار دقیقی را برای طیف وسیعی از تجزیه و تحلیل های مختلف فراهم می کند.

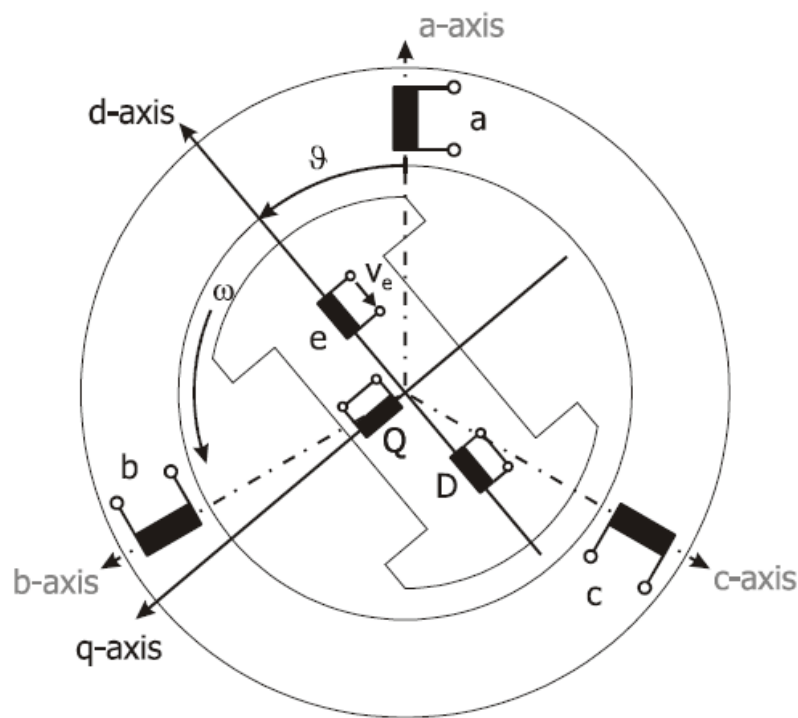
در حالت کلی ژنراتورهای سنکرون به دو دسته تقسیم می شوند:

- ژنراتورهای روتور استوانه ای یا توربو ژنراتور
- ژنراتورهای روتور برجسته

ژنراتورهای با روتور استوانه ای زمانی استفاده می شوند که محور با سرعت نزدیک به سرعت سنکرون بچرخد. این نوع ژنراتورها معمولاً در نیروگاه های حرارتی استفاده می شوند. ژنراتورهای

قطب برجسته بصورت آهسته می چرخند و معمولا در دیزل ژنراتورها و نیروگاه های آبی استفاده می شوند. در این پایان نامه از ژنراتورهای نوع روتور استوانه ای استفاده شده است که شماتیک آن در قاب مرجع $d-q$ ، در شکل (۲-۲) مشاهده می شود.

همانطور که در شکل نیز دیده می شود استاتور دارای سه سیم پیچ a و b و c می باشد. سیم پیچ e سیم پیچ تحریک می باشد که توسط ولتاژ V_e که خروجی سیستم تحریک می باشد، تغذیه می شود. سپس دو سیم پیچ دمپر تعریف شده است که یکی در راستای محور d و دیگری در راستای محور q می باشد.



شکل (۲-۲) نمودار نمادین ماشین سنکرون سه فاز [۱۳]

$$H\Delta\dot{\omega} = P_m - P_e - K_D\Delta\omega \quad (۲-۲)$$

$$\Delta\dot{\delta} = \Delta\omega \quad (۳-۲)$$

$$T'_{do}\dot{E}'_q = -E'_q - (x_d - x'_d) \left\{ I_d - \frac{x'_d - x''_d}{x'^2_d} (\psi_d + x'_d I_d - E'_q) \right\} + E_{fd} \quad (۴-۲)$$

$$T'_{qo}\dot{E}'_d = -E'_d + (X_q - X'_q) \left\{ I_q - \frac{x'_q - x''_q}{x'^2_q} (\psi_q + x'_q I_q + E'_d) \right\} \quad (۵-۲)$$

$$T''_{d0}\dot{\psi}_d = -\psi_d + E'_q - x'_d I_d \quad (۶-۲)$$

$$T''_{qo}\dot{\psi}_q = -\psi_q - E'_d - x'_q I_q \quad (۷-۲)$$

که در این روابط،

δ : زاویه روتور ژنراتور،

ω : فرکانس روتور ژنراتور (پریونیت)،

$\dot{E}'_q$: نیرو محرکه القایی پشت راکتانس گذرای محور عمودی،

$\dot{E}'_d$: نیرو محرکه القایی پشت راکتانس گذرای محور مستقیم،

E_{fd} : خروجی سیستم تحریک،

H : ثابت اینرسی ژنراتور،

P_m : توان مکانیکی ورودی ژنراتور،

P_e : توان الکتریکی خروجی ژنراتور،

K_D : ضریب میرایی،

T'_{do}, T'_{qo} : ثابت های زمانی سیم پیچی میدان گذرای محورهای مستقیم و عمودی،

T''_{do}, T''_{qo} : ثابت های زمانی سیم پیچی میدان زیرگذرای محورهای مستقیم و عمودی،

X_d, X'_d, X''_d : راکتانس های سنکرون، گذرا و زیرگذرای محور مستقیم،

X_q, X'_q, X''_q : راکتانس های سنکرون، گذرا و زیرگذرای محور عمودی،

ψ_d : شار در امتداد محور d،

ψ_q : شار در امتداد محور q،

با استفاده از تبدیل پارک معادلات مربوط به ولتاژ، جریان و توان باس خارجی محاسبه میشوند.

$$V_d = V_t \sin(\delta - \theta) \quad (۸-۲)$$

$$V_q = V_t \cos(\delta - \theta) \quad (۹-۲)$$

$$P_e = V_d I_d + V_q I_q \quad (۱۰-۲)$$

$$Q_e = V_q I_d - V_d I_q \quad (۱۱-۲)$$

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & -X''_q \\ X''_d & R_a \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} E''_d - V \sin(\delta - \theta) \\ E''_q - V \cos(\delta - \theta) \end{bmatrix} \quad (۱۲-۲)$$

$$I^2 = I_d^2 + I_q^2 \quad (۱۳-۲)$$

$$V_t^2 = V_d^2 + V_q^2 \quad (۱۴-۲)$$

که در این روابط،

θ و V : دامنه و فاز ولتاژ ترمینال خارجی ماشین،

R_a : مقاومت آرمیچر،

V_d, V_q : اجزا تبدیل پارک ولتاژ ترمینال

I_d, I_q : اجزا تبدیل پارک جریان ترمینال I هستند.

قاب مختصات تبدیل پارک بطور همزمان با روتور می چرخد. اثر تبدیل پارک^۱ به این صورت است که مقادیر ولتاژ و جریان استاتور را از فازهای a, b و c به متغیرهای جدید تبدیل می کند، قاب مرجعی که با روتور حرکت می کند. این امر منجر به یک ساده سازی بزرگ در توصیف ریاضی ماشین سنکرون می شود. این تبدیل بستگی به اختلاف در فاز $\theta - \delta$ ، یعنی اختلاف فاز بین ولتاژ ترمینال و زاویه روتور دارد.

$$\begin{bmatrix} f_q \\ f_d \\ f_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (2-15)$$

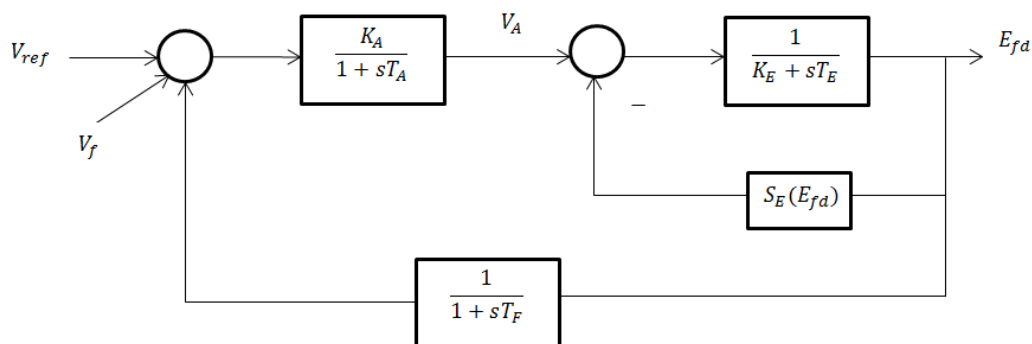
۲-۴-۲ مدل سیستم تحریک

وظیفه اصلی سیستم تحریک، تامین جریان مستقیم سیم پیچ تحریک ماشین سنکرون است. به علاوه، سیستم تحریک، با کنترل ولتاژ تحریک (و در نتیجه جریان تحریک)، وظایف کنترل و حفاظت را که در عملکرد مناسب یک سیستم قدرت مهم است، اجرا می کند. وظایف کنترل، شامل کنترل ولتاژ و توان انتقالی راکتیو و تقویت پایداری سیستم است. توابع حفاظتی این اطمینان را فراهم می آورد که از حدود توانایی ماشین سنکرون، سیستم تحریک و دیگر تجهیزات تجاوز نشده باشد.

¹ Park Transformation

مدل سیستم تحریکی که در این مطالعه استفاده می شود، سیستم استاندارد IEEE نوع DC1A است. بلوک دیاگرام مربوط به این سیستم تحریک در شکل (۳-۲) نشان داده شده است.

سیستم های تحریک از این نوع، از ژنراتورهای جریان مستقیم به عنوان منبع توان تحریک استفاده می کنند که از طریق جاروبک ها، جریان مورد نیاز تحریک ژنراتورها را فراهم می کنند. تحریک کننده، ممکن است به وسیله یک موتور و یا محور ژنراتور چرخانده شود و ممکن است خود تحریک یا تحریک مستقل باشد. در حالت تحریک مستقل، تحریک آن از طریق یک تحریک کننده کمکی، که دارای مغناطیس دائم است، تامین می شود [۱۱].



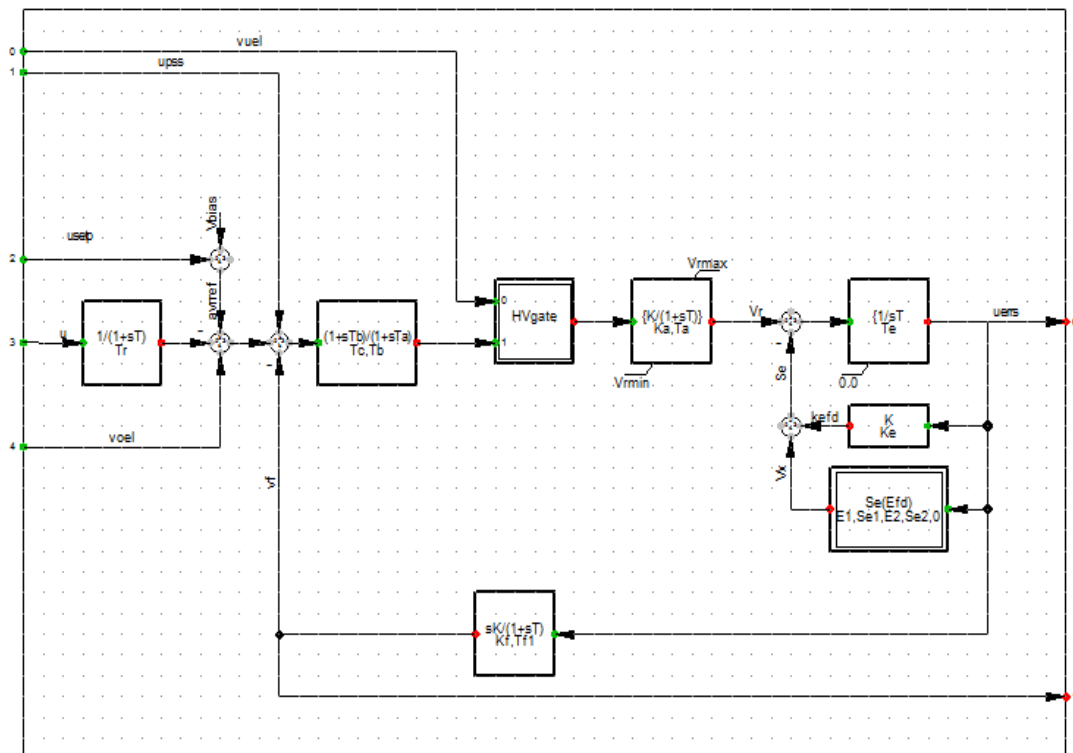
شکل (۳-۲) بلوک دیاگرام سیستم تحریک IEEE DC1A [۱۱]

بلوک دیاگرام مدل فوق در محیط نرم افزار دیگسایلنت بصورت شکل (۴-۲) می باشد.

۲-۴-۳ مدل پایدارساز سیستم قدرت

پایدارساز سیستم قدرت یک کنترلر سنتی، اقتصادی و موثر در راستای بالا بردن پایداری دینامیکی سیستم قدرت است. این تجهیز بعنوان یک کنترلر مکمل بر روی سیستم تحریک ژنراتورها نصب می شود. کار PSS ایجاد میراکنندگی در فرکانس های پائین ژنراتور است. PSS با ایجاد گشتاورهای الکتریکی میراکننده و سنکرون کننده سبب بهبود انحرافات گردش روتور

می شود. در واقع PSS با ایجاد ولتاژ مثبت یا منفی در مواقع نیاز، ولتاژ تحریک را تنظیم و بهینه می کند.

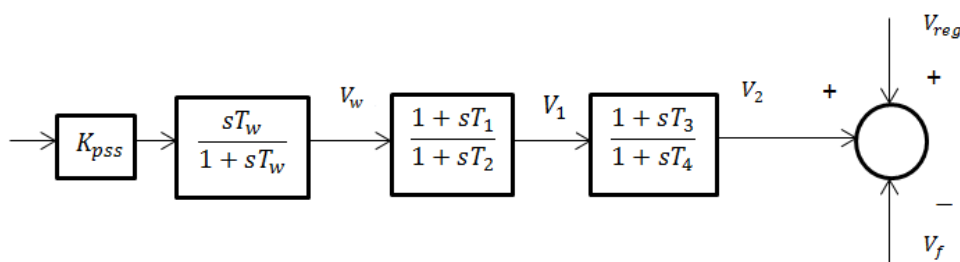


شکل (۴-۲) بلوک دیاگرام سیستم تحریک در محیط نرم افزار دیگسایلنت

PSS^۱ معمولاً از سیگنال‌هایی از قبیل سرعت محور، فرکانس و توان پایانه‌ی ژنراتور تغذیه می شود و بر عملکرد دینامیکی سیستم قدرت با میرا کردن نوسان‌های آن، تاثیر مطلوب می گذارد. این روش، روش بسیار موثری در تقویت عملکرد پایداری سیگنال کوچک سیستم است.

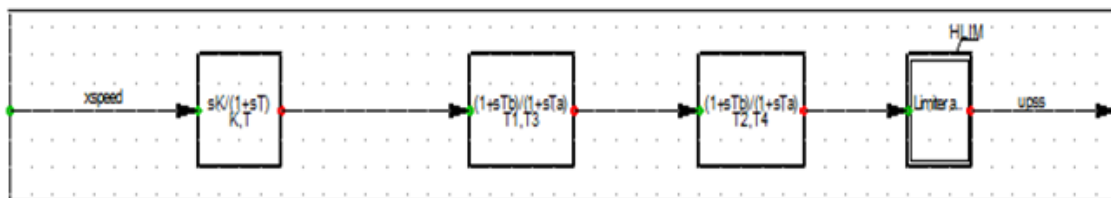
بلوک‌های اصلی یک PSS مرسوم با دو جبران ساز فاز در شکل (۵-۲) نشان داده شده است. بلوک اول بلوک بهره است. بهره پایدارساز K_{pss} ، میزان میرایی ایجاد شده بوسیله PSS را تعیین می کند. در حالت ایده آل، این بهره باید با مقدار بیشترین میرایی متناظر تنظیم شود؛ اگرچه، مقدار آن

^۱ Power System Stabilizer



شکل (۵-۲) بلوک دیاگرام پایداری سیستم قدرت [۱۱]

اغلب توسط دیگر ملاحظات محدود می شود. بلوک دوم بلوک washout است. این بلوک بعنوان یک فیلتر بالاگذر با ثابت زمانی T_w ، نوسانات مربوط به سرعت روتور را بدون تغییر عبور می دهد، اما اجازه نمی دهد که تغییرات حالت ماندگار در ولتاژ ترمینال تغییر ایجاد کند. این بلوک به PSS اجازه می دهد که تنها به تغییرات سرعت پاسخ دهد. بلوک های جبران ساز پیشفاز - پسفاز^۱ مشخصه تاخیر فاز را برای جبران سازی تقدم فاز بین ورودی تحریک و گشتاور الکتریکی ژنراتور فراهم می کند. به طور معمول، بازه فرکانسی قابل قبول ۰/۱ تا ۲ هرتز است، و بلوک پیشفاز باید کل این محدوده ی فرکانسی را جبران کند. PSS علاوه بر افزایش قابل ملاحظه گشتاور میرا کننده^۲، گشتاور سنکرون کننده را نیز افزایش می دهد. بلوک دیاگرام مربوط به مدل فوق در محیط نرم افزار دیگسایلنت به شکل زیر می باشد:



شکل (۶-۲) بلوک دیاگرام پایداری سیستم قدرت در محیط نرم افزار دیگسایلنت

^۱ Lead- Lag Compensation

^۲ Damping Torque

۲-۴-۴ مدل بار

مدل نمودن بار در مطالعات پایداری به دلیل طبیعت نامعلوم بارهای مجتمع (مثل موتورهای لامپ‌های فلورسنت و ...) امری پیچیده است. مدل‌های بار را می‌توان بطور کلی به دو دسته بزرگ تقسیم نمود: بارهای استاتیک و بارهای دینامیک. بارها را می‌توان بصورت امپدانس ثابت، جریان ثابت و یا توان ثابت بصورت استاتیک مدل نمود. مدل بار امپدانس ثابت، یک مدل استاتیک است که در آن توان اکتیو و راکتیو متناسب با مربع دامنه‌ی ولتاژ است. این نوع مدل به مدل ادمیتانس ثابت نیز معروف است، مدل بار جریان ثابت یک مدل بار استاتیک است که در آن توان اکتیو و راکتیو هیچگونه رابطه‌ای با دامنه ولتاژ ندارد. مدل‌های بار بصورت معادلات چند جمله‌ای (۲-۱۶) و (۲-۱۷) قابل توصیف است [۱۴].

$$P_L = kP_0 \left[A_1 + A_2 \frac{V}{V_0} + A_3 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \right] \quad (۲-۱۶)$$

$$Q_L = kQ_0 \left[B_1 + B_2 \frac{V}{V_0} + B_3 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \right] \quad (۲-۱۷)$$

که در آن $A_1 + A_2 + A_3 = B_1 + B_2 + B_3 = 1$ و P_0 و Q_0 که توان‌های نامی نام دارند، توان‌های اکتیو و راکتیو مصرفی بار در شرایط نامی یعنی ولتاژ مرجع V_0 و فرکانس نامی f_0 می‌باشند. توان واقعی یا مصرف شده‌ی بار P_L و Q_L ، توان مصرفی بار در شرایط جاری با ولتاژ V و فرکانس f می‌باشد. ضریب k یک متغیر مستقل است که به تقاضای بار بستگی داشته و ضریب بار نامیده می‌شود. به چنین مدلی، مدل بار ZIP گفته می‌شود.

۲-۵ جمع‌بندی

در این فصل مطالعه جامعی در مورد انواع پایداری و بخصوص پایداری سیگنال کوچک انجام شد.

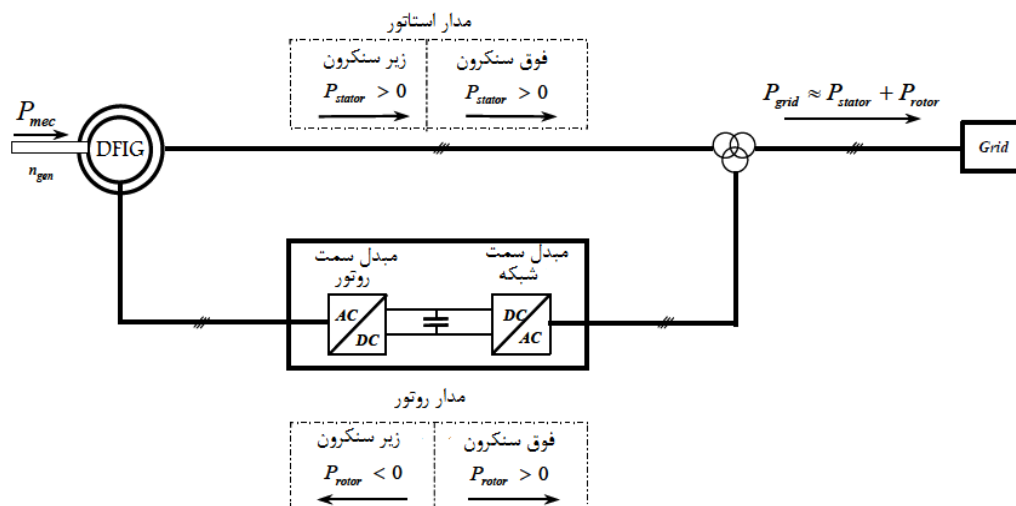
سپس به مدل سازی سیستم قدرت پرداخته شد و مدل فضای حالت المان های مهم سیستم قدرت از جمله ژنراتور سنکرون، سیستم تحریک، پایدارساز سیستم قدرت، و بار که در این پایان نامه نیز از آنها استفاده شده است، بدست آورده شد.

فصل سوم

مدل سازی توربین بادی و مروری بر کارهای دیگران

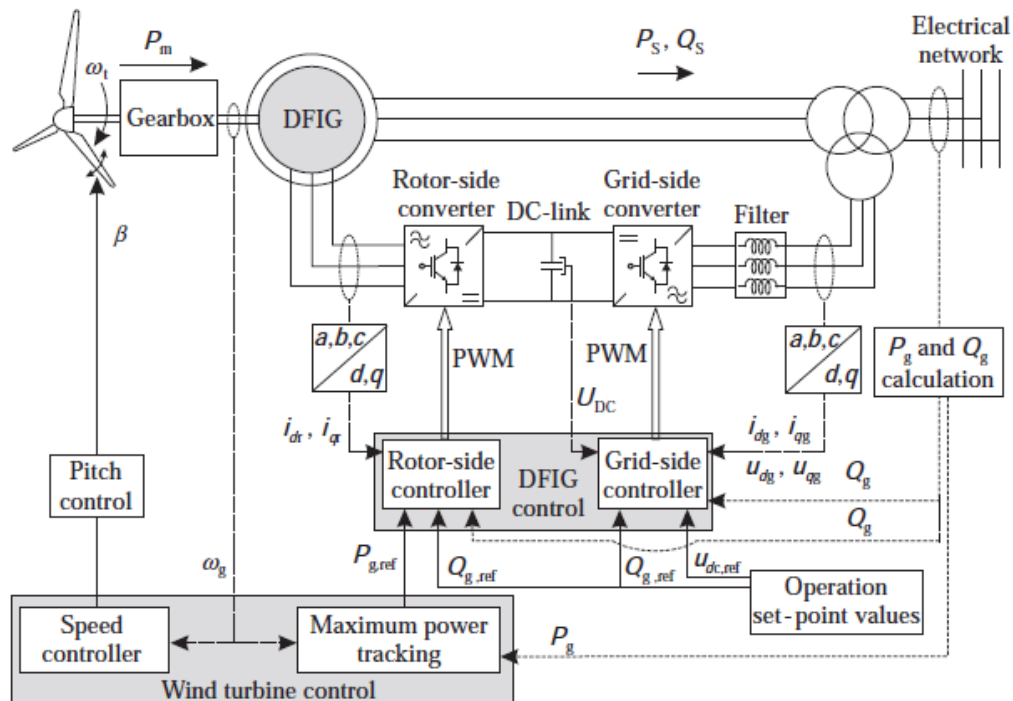
۱-۳ مقدمه

یک ژنراتور القایی دو سو تغذیه یک طرح بخصوص از یک ماشین القایی است، که در آن هم روتور و هم استاتور به شبکه قدرت متصل هستند. استاتور شامل یک سیم پیچ سه فاز است که از طریق یک ترانسفورماتور به شبکه متصل شده است. روتور نیز با سیم پیچ های سه فاز طراحی می شود، که بوسیله ی جاروبک ها به یک مدار ساکن خارجی متصل هستند. این نوع ساختار این اجازه را می دهد که روتور در هر دو جهت با شبکه قدرت توان مبادله کند. در واقع جهت شارش توان در استاتور همواره یک طرفه است، به این معنی که استاتور همواره توان را از توربین بادی تحویل می گیرد و به شبکه تحویل می دهد. اما جهت شارش توان در روتور دو طرفه است و به مود عملکردی آن بستگی دارد. یعنی اگر روتور در مود فوق سنکرون کار کند توان را از توربین گرفته و به شبکه تحویل می دهد، اما اگر روتور در مود زیر سنکرون کار کند توان را از شبکه گرفته و به توربین تحویل می دهد [۱۵] (شکل (۱-۳)).



شکل (۱-۳) نمودار اصول شارش توان در یک DFIG [۱۵]

اجزای اصلی مدل توربین عبارتند از: روتور توربین، جعبه دنده، ژنراتور، مبدل سمت روتور، مبدل سمت شبکه با لینک dc، و همچنین شامل مدل های اضافی کنترل های مختلف از قبیل کنترلر زاویه پره، کنترلر سرعت/توان، کنترلر توان راکتیو و یک مدل سرعت باد می باشد. بلوک دیاگرام کامل مربوط به مدل توربین و ژنراتور و اجزای مربوط به آن ها و همچنین کنترلرهای مربوطه در شکل (۲-۳) نشان داده شده است.



شکل (۲-۳) بلوک دیاگرام توربین بادی DFIG [۱۶]

۲-۳ مدل های DSL در دیگسایلنت

زبان شبیه سازی دیگسایلنت (DSL) یک ابزار بسیار قوی در نرم افزار دیگسایلنت است. یا استفاده از DSL می توان سیستم های خطی و غیر خطی را شبیه سازی کرد. بنابراین می توان اجزای غیرالکتریکی توربین بادی (از قبیل سرعت باد، سیستم آئرو دینامیکی و سیستم مکانیکی)

را مدل سازی کرد، DSL همچنین برای طراحی و پیاده سازی انواع مختلف کنترلرها استفاده می-شود.

۳-۳ مدل ژنراتور

برای مدل سازی آسان ژنراتور القایی دو سو تغذیه، قاب مرجع d-q انتخاب میشود. بنابراین، قراردادهایی برای ژنراتور در نظر گرفته می شود، به این معنی که جریان ها به جای ورودی، خروجی در نظر گرفته می شوند، و توان های اکتیو و راکتیو وقتی که به شبکه وارد می شوند دارای علامت مثبت هستند [۱۶].

با استفاده از این قراردادهای معادلات روتور و استاتور بصورت زیر خواهند بود:

$$u_{ds} = -R_s i_{ds} - \omega_s \psi_{qs} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} \quad (۱-۳)$$

$$u_{qs} = -R_s i_{qs} + \omega_s \psi_{ds} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} \quad (۲-۳)$$

$$u_{dr} = -R_r i_{dr} - s\omega_s \psi_{qr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} \quad (۳-۳)$$

$$u_{qr} = -R_r i_{qr} + s\omega_s \psi_{dr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} \quad (۴-۳)$$

که در روابط فوق،

u_{ds} و u_{qs} : ولتاژ استاتور بر روی محورهای d و q،

u_{dr} و u_{qr} : ولتاژ روتور بر روی محورهای d و q،

i_{ds} و i_{qs} : جریان استاتور بر روی محورهای d و q،

i_{dr} و i_{qr} : جریان روتور بر روی محورهای d و q،

ψ_{qs} و ψ_{ds} : شار پیوندی استاتور بر روی محورهای d و q،

ψ_{qr} و ψ_{dr} : شار پیوندی روتور بر روی محورهای d و q،

و شارهای پیوندی:

$$\psi_{ds} = -L_{ss}i_{ds} - L_m i_{dr} \quad (۵-۳)$$

$$\psi_{qs} = -L_{ss}i_{qs} - L_m i_{qr} \quad (۶-۳)$$

$$\psi_{dr} = -L_{rr}i_{dr} - L_m i_{ds} \quad (۷-۳)$$

$$\psi_{qr} = -L_{rr}i_{qr} - L_m i_{qs} \quad (۸-۳)$$

جملات گذرا در شارهای روتور گاهی اوقات بدلیل ساده سازی در مدل کردن مبدل صرف نظر می-شوند. با صرف نظر کردن از جملات گذرا معادلات زیر بدست می آیند:

$$u_{ds} = -R_s i_{ds} + \omega_s (L_{ss}i_{qs} + L_m i_{qr}) \quad (۹-۳)$$

$$u_{qs} = -R_s i_{qs} - \omega_s (L_{ss}i_{ds} + L_m i_{dr}) \quad (۱۰-۳)$$

$$u_{qr} = -R_r i_{qr} - s\omega_s (L_{rr}i_{dr} + L_m i_{ds}) \quad (۱۱-۳)$$

$$u_{dr} = -R_r i_{dr} - s\omega_s (L_{rr}i_{qr} + L_m i_{qs}) \quad (۱۲-۳)$$

سرعت زاویه ای الکتریکی روتور ω_r برابر است با:

$$\omega_r = \frac{p}{2} \omega_m \quad (۱۳-۳)$$

که p تعداد قطبها و ω_m سرعت زاویه ای مکانیکی است (رادیان بر ثانیه).

گشتاور الکتریکی ژنراتور به شکل زیر است:

$$C_e = \psi_{ds} i_{qr} - \psi_{qs} i_{dr} \quad (۱۴-۳)$$

توان های اکتیو و راکتیو مبادله شده بوسیله DFİG با شبکه الکتریکی، برابر است با مجموع توان های استاتور و روتور:

$$P = P_s + P_r \quad (۱۵-۳)$$

$$Q = Q_s + Q_r \quad (۱۶-۳)$$

توان های اکتیو و راکتیو استاتور بصورت زیر خواهند بود:

$$P_s = u_{ds} i_{ds} + u_{qs} i_{qs} \quad (۱۷-۳)$$

$$Q_s = u_{qs} i_{ds} - u_{ds} i_{qs} \quad (۱۸-۳)$$

و توان های اکتیو و راکتیو روتور بصورت زیر خواهند بود:

$$P_r = u_{dr} i_{dr} + u_{qr} i_{qr} \quad (۱۹-۳)$$

$$Q_r = u_{qr} i_{dr} - u_{dr} i_{qr} \quad (۲۰-۳)$$

توان راکتیو بیان شده در معادله (۲۰-۳) لزوماً با توان راکتیو مبادله شده بوسیله ماشین با شبکه الکتریکی برابر نیست، و مقدار آن به استراتژی کنترلی که برای مبدل سمت شبکه به کار رفته است بستگی دارد.

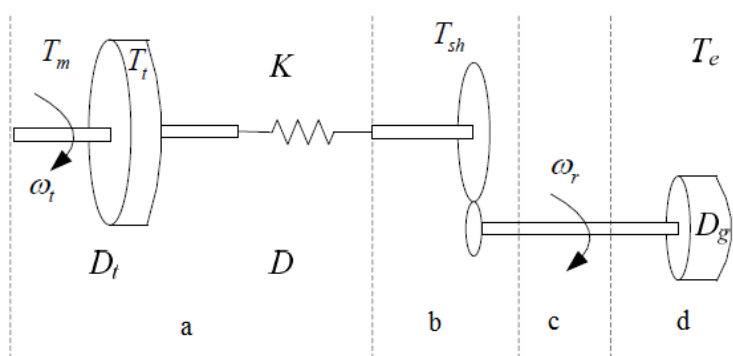
۳-۱ مدل جعبه دنده

جعبه دنده توربین بادی در نرم افزار دیگسایلنت بوسیله یک مدل دو جرمه نمایش داده

می شود [۱۷]. مدل مربوطه در شکل (۳-۳) نمایش داده شده است.

معادلات مربوط به این مدل در ادامه آمده است:

$$\begin{cases} d\omega_r/dt = (T_{sh} - T_e - D_t\omega_r)/2H_g \\ d\theta_t/dt = \omega_b(\omega_t - \omega_r) \\ d\omega_t/dt = (T_m - T_{sh})/2H_t \end{cases} \quad (۲۱-۳)$$



شکل (۳-۳) دیاگرام ساده مدل دو جرمه ژنراتور القایی (a) شفت^۱ سرعت پائین؛ (b) جعبه دنده؛

(c) شفت سرعت بالا؛ (d) ژنراتور [۲۰]

که،

H_g و H_t : به ترتیب ثابت های اینرسی توربین و ژنراتور؛

ω_t و ω_r : به ترتیب سرعت های ژنراتور و توربین؛

ω_b : سرعت مرجع؛

θ_t : زاویه پیچشی شفت؛

D_t : ضریب میرایی توربین بادی؛ هستند.

گشتاور الکترومغناطیسی T_e ، گشتاور شفت T_{sh} و گشتاور مکانیکی T_m را می توان بوسیله

¹ Shaft

معادلات زیر محاسبه کرد:

$$\begin{cases} T_m = P_m / \omega_t = 0.5 \rho \pi R^2 C_p V_m^3 / \omega_t \\ T_{sh} = K_{sh} \theta_t + D_{sh} \omega_b (\omega_t - \omega_r) \\ T_e = L_m (i_{ds} i_{qr} - i_{qs} i_{dr}) \end{cases} \quad (22-3)$$

که،

P_m : توان الکترومغناطیسی توربین بادی؛

C_p : ضریب توان و یک تابع غیر خطی از زاویه پره β و نسبت سرعت نوک پره λ' ؛

P : غلظت هوا؛

R : شعاع پره توربین بادی؛

V_m : سرعت باد؛

K_{sh} و D_{sh} : به ترتیب ضریب سختی و ضریب میرایی شفت؛

L_m : اندوکتانس مزدوج؛

i_{qs} و i_{ds} : به ترتیب جریان های استاتور محور d و محور q ؛

i_{qr} و i_{dr} : به ترتیب جریان های روتور محور d و محور q هستند.

ضریب توان C_p [۱۹] را می توان بصورت معادله زیر بیان کرد:

$$\begin{cases} C_p = 0.22(116/\lambda' - 0.4\beta - 5)e^{-12.5/\lambda'_i} \\ \frac{1}{\lambda'_i} = \frac{1}{\lambda' + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \end{cases} \quad (23-3)$$

که $\lambda'_i = 1/(1/\lambda' + 0.002)$ ، $\lambda' = \omega_t R / V_m$ است. بر اساس تئوری بتز، بیشترین مقدار C_p

۰/۵۹۳ است [۲۰].

۲-۳ مدل مبدل

مدل مبدل در سیستم DFIG شامل دو اینورتر مدولاسیون پهنای پالس است که بصورت پشت به پشت^۱ از طریق یک لینک dc بهم متصل شده اند. مبدل سمت روتور RSC و مبدل سمت شبکه GSC بعنوان منابع ولتاژ کنترل شونده عمل می کنند. مبدل پشت به پشت باعث می شود که توان در روتور در هر دو جهت انتقال یابد. لینک dc دو مبدل را از هم مجزا می کند بنابراین می توانند بصورت کاملاً مستقل از هم کنترل شوند [۱۷].

معادلات مربوط به توان مبدل را می توان بصورت زیر بیان کرد [۱۷]:

$$\begin{cases} P_r = P_g + P_{DC} \\ P_r = u_{dr}i_{dr} + u_{qr}i_{qr}, & P_g = u_{dg}i_{dg} + u_{qg}i_{qg} \\ P_{DC} = i_{DC}u_{DC} = -C u_{DC} \frac{du_{DC}}{dt} \end{cases} \quad (24-3)$$

که: P_r توان اکتیو در ترمینال AC مربوط به RSC،

P_g توان اکتیو در ترمینال AC مربوط به GSC،

P_{DC} توان اکتیو لینک DC،

i_{dr} و i_{qr} جریان روتور بر روی محورهای d و q،

i_{dg} و i_{qg} جریان مبدل سمت شبکه بر روی محورهای d و q،

u_{dg} و u_{qg} ولتاژ مبدل سمت شبکه بر روی محورهای d و q،

v_{DC} ولتاژ DC خازن،

¹ Back to Back

i_{DC} جریان خازن، و C ظرفیت خازن است.

از معادله (۳-۲۴) مدل مبدل به همراه لینک DC بصورت زیر خواهد بود:

$$C v_{DC} \frac{dv_{DC}}{dt} = u_{dg} i_{dg} + u_{qg} i_{qg} - (v_{dr} i_{dr} + u_{qr} i_{qr}) \quad (۳-۲۵)$$

۳-۳ کنترل توربین بادی با ژنراتور القایی دو سو تغذیه

از آنجایی که استاتور DFIG مستقیماً به شبکه الکتریکی وصل می شود و روتور نیز از طریق یک مبدل الکترونیک قدرت به شبکه وصل می شود، تنها راه کنترل DFIG از طریق کنترل بر روی عملکرد روتور است.

استراتژی کنترلی که معمولاً برای DFIG بکار برده می شود بر اساس کنترل برداری جریان روتور در قاب d-q می باشد. در این روش محور d همراستا با بردار شار استاتور یا بردار ولتاژ استاتور در نظر گرفته می شود. این اقدام باعث می شود که کنترل توان های اکتیو و راکتیو از هم مجزا باشد. شکل (۳-۲) سیستم کنترل کلی توربین بادی با DFIG را نشان می دهد، که شامل کنترل ژنراتور و کنترل توربین بادی است. این سیستم بر پایه استراتژی کنترل برداری جریان روتور می باشد.

همانطور که در شکل (۳-۲) مشاهده می شود، کنترلر DFIG مقادیر اندازه گیری شده جریان ها و ولتاژها را در مختصات (a, b, c) از طرف هر دو مبدل توان دریافت می کند. از آنجائی که کنترل DFIG در قاب d-q انجام خواهد شد، تبدیل $(a, b, c) \rightarrow (\alpha, \beta) \rightarrow (d, q)$ مورد نیاز خواهد بود [۱۶].

۳-۳-۱ کنترل مبدل سمت شبکه

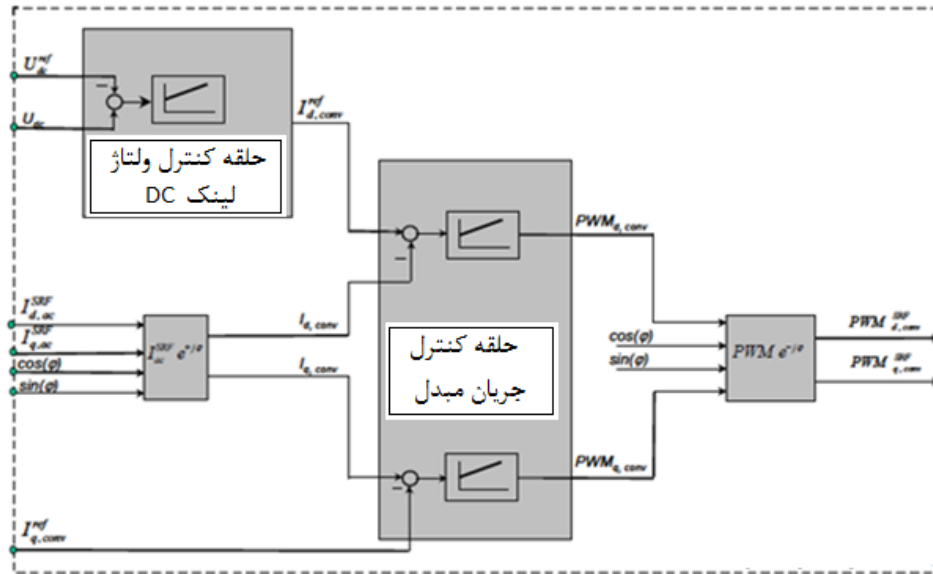
هدف اصلی کنترل مبدل سمت شبکه حفظ ولتاژ لینک DC در یک مقدار ثابت، با صرف نظر از مقدار و جهت توان روتور و تضمین عملکرد مبدل در ضریب توان واحد (توان راکتیو صفر) است. این عبارت به این مفهوم است که مبدل سمت شبکه تنها توان اکتیو با شبکه مبادله می کند، بنابراین انتقال توان راکتیو از DFIG به شبکه تنها از طریق استاتور صورت می گیرد [۱۶].

کنترل مبدل سمت شبکه شامل دو حلقه کنترلی PI بصورت آبشاری است (شکل (۳-۴)):

- حلقه کنترل ولتاژ لینک DC (خارجی)
- حلقه کنترل جریان مبدل (داخلی)

حلقه کنترل ولتاژ لینک DC، مقدار آن را در مقدار از پیش تعیین شده U_{dc}^{ref} تنظیم می کند، در حالیکه حلقه کنترل جریان با سرعت بالا جریان مبدل را در مقدار مرجع تنظیم می کند.

خروجی های کنترلر مبدل سمت شبکه دامنه و فاز ولتاژ AC ترمینال مبدل است. کنترل جریان مبدل هم جهت با قاب مرجع ولتاژ مبدل سمت شبکه (GCVRF) صورت می گیرد. جریان مبدل از دو جزء موازی و عمود با ولتاژ مبدل سمت شبکه تشکیل می شود. در قاب مرجع محور d معادل با جزء اکتیو می باشد، در حالیکه محور q معادل با جزء راکتیو می باشد. آن جزء از جریان مبدل ($I_{d,conv}$) که موازی با ولتاژ مبدل (همفاز) است، برای کنترل ولتاژ DC (توان اکتیو) استفاده می شود، در حالیکه آن جزء از جریان که عمود بر ولتاژ مبدل است ($I_{q,conv}$) برای کنترل توان راکتیو استفاده می شود [۳۳]. ولتاژ لینک DC در حلقه کنترلی خارجی کنترل می شود و در مقدار U_{dc}^{ref} تنظیم می شود. این ولتاژ مقدار مرجع را برای جزء همفاز جریان مبدل یعنی $I_{d,conv}^{ref}$ تولید می کند. مقدار مرجع جزء عمودی یعنی $I_{q,conv}^{ref}$ تقریباً ثابت است و از آنجایی که توان راکتیو مبدل است این مقدار نیز صفر می باشد.



شکل (۳-۴) کنترل مبدل سمت شبکه در دیگسایلنت [۳۳]

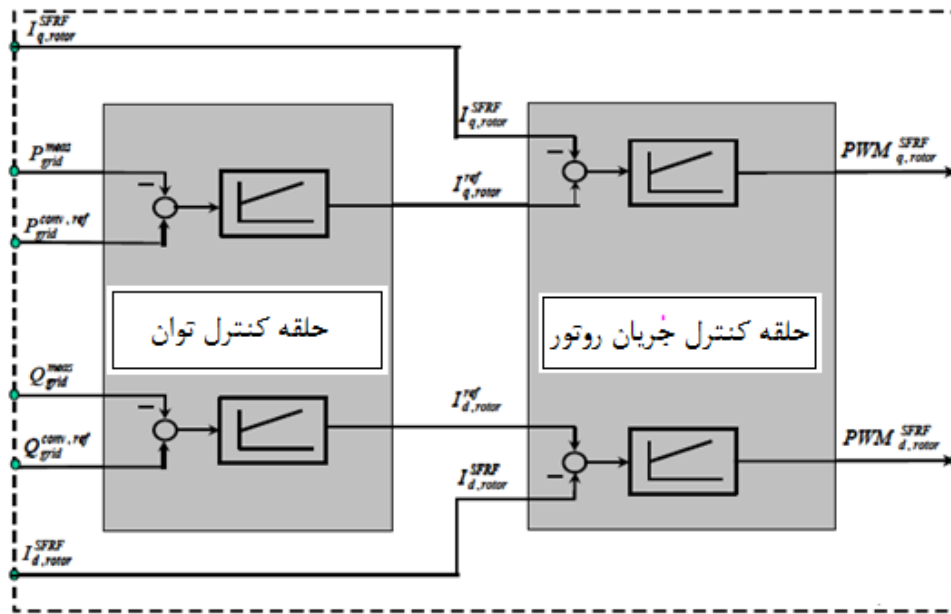
۳-۳-۲ کنترل مبدل سمت روتور

در کنترل برداری مبدل سمت روتور فرض می‌کنیم که محور d با موقعیت بردار شار استاتور همراه باشد. از دید شبکه قدرت شار استاتور تقریباً مقدار ثابتی است زیرا ولتاژهای استاتور تقریباً ثابت هستند [۱۶]. کنترل مبدل سمت روتور شامل دو حلقه کنترلی PI بصورت آبشاری است (شکل (۳-۵)):

- حلقه کنترل جریان

- حلقه کنترل توان

حلقه کنترل توان، توان اکتیو و راکتیو را کنترل می‌کند، درحالی‌که حلقه کنترل جریان، جریان-های روتور ماشین را با توجه به مقادیر مرجعی که توسط حلقه کنترل توان تولید می‌شود، کنترل می‌کند. یکی از مزایای ساختار کنترلی آبشاری این است که دینامیک‌های الکتریکی و مکانیکی مقیاس‌های زمانی متفاوت دارند، به این ترتیب که دینامیک‌های الکتریکی از دینامیک‌های



شکل (۵-۳) کنترل مبدل سمت روتور در دیگسایلنت [۳۳]

مکانیکی سریع تر هستند. از آنجایی که دینامیک های الکتریکی سریع تر هستند، حلقه کنترل جریان روتور حلقه داخلی می باشد. جریان روتور به دو جزء تقسیم می شود، یک جزء موازی با شار استاتور و یک جزء عمود بر شار استاتور. در قاب مرجع شار استاتور SFRF، محور d معادل با جزء راکتیو و محور q معادل با جزء اکتیو توان می باشد. در این قاب مرجع، توان اکتیو تابعی از جریان محور q روتور است، در حالیکه توان راکتیو تابعی از جریان محور d روتور است [۳۳].

$$P = func(I_{q,rotor}^{SFRF}) \quad (۲۶-۳)$$

$$Q = func(I_{d,rotor}^{SFRF}) \quad (۲۷-۳)$$

معادله (۲۶-۳) به این معنی است که توان اکتیو را می توان از طریق کنترل جریان محور q روتور، و توان راکتیو را از طریق کنترل جریان محور d روتور کنترل کرد. معادله (۲۷-۳) نشان می دهد که در SFRF کنترل توان های اکتیو و راکتیو از هم مستقل هستند.

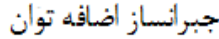
حلقه کنترل توان مقادیر جریان مرجع یعنی $I_{q,rotor}^{ref}$ و $I_{d,rotor}^{ref}$ را برای حلقه کنترل جریان

تولید می کند. حلقه کنترل جریان روتور اجزاء مقادیر مرجع ولتاژ روتور را تولید می کند. همانطور که ضریب مدولاسیون پهنای پالس PWM، متغیر کنترلی مبدل است، خروجی کنترلر مبدل سمت روتور بصورت اجزای ضریب مدولاسیون پهنای پالس یعنی $PWM_{d,rotor}^{SFRF}$ و $PWM_{q,rotor}^{SFRF}$ بیان می شود [۳۳].

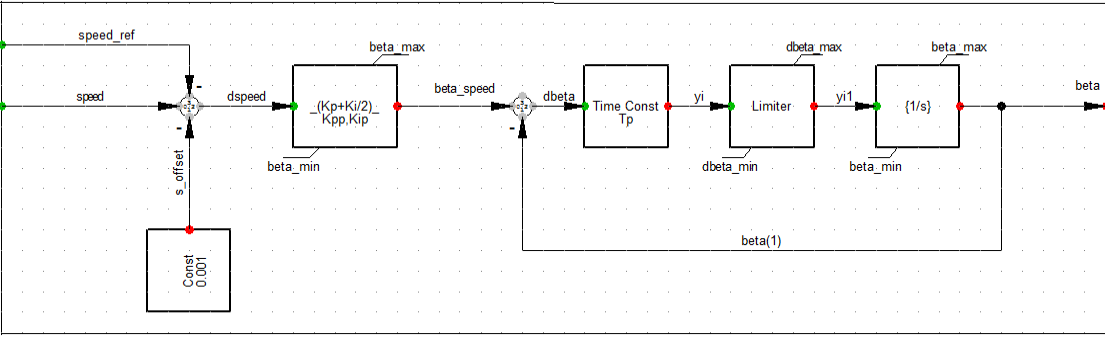
۳-۳-۳ کنترل زاویه پره

در توربین های سرعت متغیر به طور متداول از استراتژی کنترل زاویه پره جهت بیشینه سازی توان تولیدی توربین در سرعت های پایین و متوسط باد، و حفاظت توربین در سرعت های بالای باد استفاده می شود. در حالتی که زاویه پره برابر با صفر است بیش ترین جذب انرژی از باد صورت می گیرد. با افزایش زاویه پره توان جذب شده از باد کاهش می یابد [۲۱]. در شکل (۳-۶) بلوک دیاگرام کنترل زاویه پره و نحوه تعامل آن با سیستم توربین- ژنراتور نشان داده شده است. در این شکل P_m نشان دهنده ی توان مکانیکی تولیدی توربین، P_e توان الکتریکی تولیدی ژنراتور، ω_g سرعت چرخش ژنراتور، و ω_{ref} سرعت مرجع ژنراتور است.

سه مود عملکردی برای توربین های بادی از نوع دو سو تغذیه قابل تعریف است: زیر سنکرون، سنکرون و فوق سنکرون. در مود زیر سنکرون تلاش بر این است که بیشینه ی توان ممکن از باد استحصال شود. بدین منظور زاویه ی پره برابر با صفر انتخاب شده و سرعت ژنراتور در محدوده ی مجاز آن به گونه ای تعیین می شود که ضریب توان بیشینه شود. در مود سنکرون بیشینه ی توان قابل استحصال از باد برابر با توان نامی توربین است. در مود فوق سنکرون بیشینه ی توان قابل استحصال از باد بیش تر از توان نامی توربین است؛ لذا در این حالت زاویه ی پره را به گونه ای تنظیم می کنند که توان تولیدی توربین برابر با توان نامی آن شود. محدوده ی مجاز سرعت گردش این ژنراتور در این توربین ۰/۷ پریونیت تا ۱/۳ پریونیت است [۱۶].

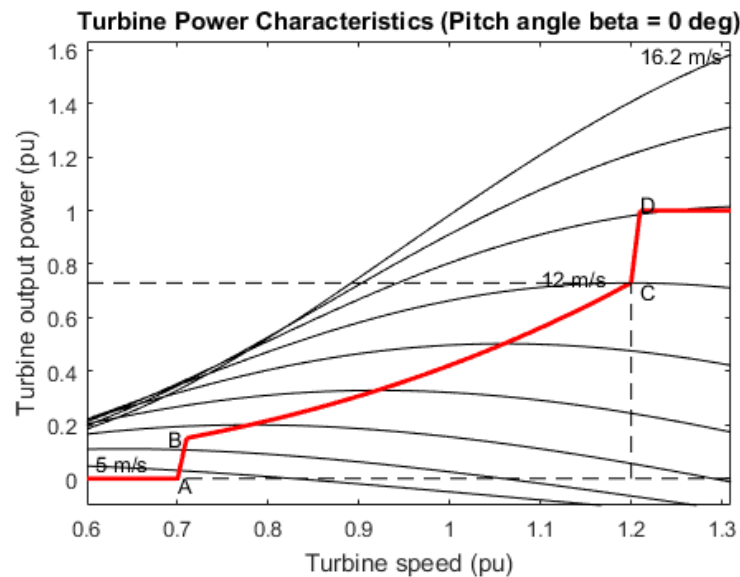


شکل (۳-۶) بلوک دیاگرام کنترل زاویه پره [۱۶]



شکل (۷-۳) بلوک دیاگرام کنترل زاویه پره در دیگسایلنت

شکل (۳-۸) رابطه‌ی توان تولیدی توربین بر حسب سرعت چرخشی روتور را برای سرعت‌های



شکل (۳-۸) منحنی مشخصه توان مکانیکی توربین بادی بر حسب سرعت چرخشی روتور

۴-۳ طراحی کنترلر میرایی برای DFIG

در چند دهه اخیر تولید توان بادی و نفوذ آن در سیستم‌های قدرت افزایش یافته است. این رشد جهانی چالش‌های جدیدی را برای اپراتورهای سیستم‌های قدرت جهت تأمین مصرف کنندگان، حصول اطمینان از کیفیت مورد نیاز خدمات و امنیت کافی در بهره‌برداری، مطرح کرده است، که نشان دهنده حفظ ثبات سیستم و سطوح میرایی رضایت‌بخش است. بنابراین هنگامیکه یک منبع توان بادی به یک سیستم قدرت متصل می‌شود، باید از حفظ پایداری گذرا و پایداری سیگنال کوچک سیستم اطمینان حاصل کرد. عامل اصلی این نوع ناپایداری فقدان میرایی کافی مودهای الکترومکانیکی است که به نوسانات فرکانس پائین (۱/۰ تا ۲ هرتز) سیستم قدرت مربوط می‌شوند، این نوسانات اساساً به دلیل برخی تنظیمات کنترلی و یا عبور توان زیاد از خطوط انتقال ضعیف رخ می‌دهد. در مراجع مختلف تأثیر توان بادی بر روی سطوح میرایی سیستم‌های قدرت بیان شده است، که ذات این اثرات به فاکتورهای مختلفی از قبیل تکنولوژی تولید بادی یا ساختار

شبکه بستگی دارد. بر اساس شرایط بهره‌برداری، جمعیت تولید توان بادی با شبکه قدرت ممکن است موجب بهبود و یا کاهش سطوح میرایی گردد.

نوسانات بین ناحیه‌ای معمولاً به دلیل اتصال نواحی مختلف سیستم قدرت توسط خطوط انتقال ضعیف رخ می‌دهد. هنگامیکه یک مزرعه بادی در یکی از نواحی سیستم نصب شود اگر باعث شود که توان زیادی از خط ارتباطی عبور کند موجب کاهش میرایی نوسان بین ناحیه‌ای می‌شود.

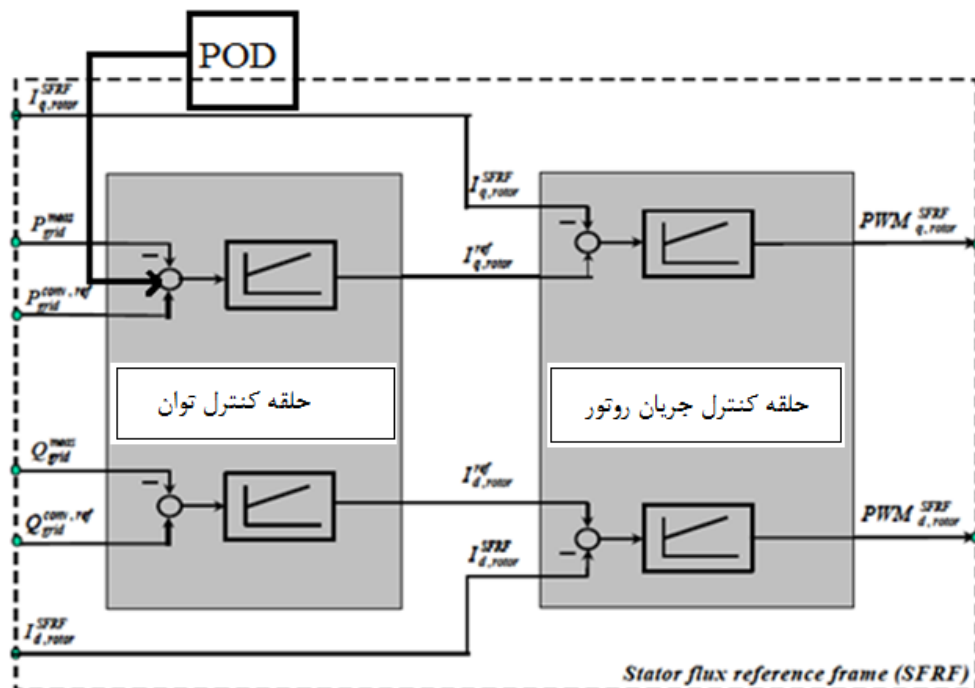
نصب PSS در سیستم تحریک ژنراتورهای سنکرون هنوز هم یکی از روش‌های مؤثر جهت بهبود میرایی سیستم‌های قدرت است. اما در یک سیستم قدرت با سهم بزرگی از تولید توان بادی، PSS دیگر قادر نخواهد بود تا میرایی کافی را در شرایط مختلف بهره‌برداری فراهم کند. اگر ژنراتورهای سنکرونی که مجهز به PSS هستند از سرویس خارج شده و به جای آن‌ها واحدهای تولید توان بادی جایگزین شود واضح است که سهم میرایی خود را از دست می‌دهند.

اگرچه یک DFIG در مود نوسانی الکترومکانیکی شرکت نمی‌کند، اما آن‌ها همانند ادوات FACTS توانایی افزایش میرایی چنین مودهایی را دارند، زیرا ادوات الکترونیکی می‌توانند به عنوان تقویت‌کننده‌های قدرت کنترلرهای کمکی برای اضافه کردن میرایی، عمل کنند. PSS نصب شده در DFIG تنها قادر به اصلاح یک مود نوسانی است، مودی که از طریق سیگنال ورودی PSS مشاهده‌پذیر باشد. اثر بخشی PSS در بهبود میرایی به انتخاب سیگنال‌های کنترلی مناسب بستگی دارد.

در این پایان نامه، PSS نصب شده در DFIG را POD^1 یا کنترلر میرایی نوسان توان می‌نامیم. ساختار این POD همانند ساختار PSSهای مرسوم است که در ژنراتورهای سنکرون استفاده

¹ Power Oscillation Damper

می شود (شکل (۵-۲)). هدف ما از طراحی POD بهبود میرایی نوسان بین ناحیه ای است، بنابراین ورودی این کنترلر سیگنالی خواهد بود که اطلاعات کافی در مورد این نوسان را به ما بدهد. اختلاف زاویه ($\Delta\delta$) بین دو ناحیه، مشاهده پذیری خوبی از مود نوسان بین ناحیه ای در اختیار می-گذارد. بنابراین ما در این پایان نامه اختلاف زاویه ژنراتورهای ۱ و ۳ ($\Delta\delta_{13}$) را بعنوان ورودی کنترلی در نظر می گیریم. به منظور نشان دادن مکانیسم میرایی مود بین ناحیه ای بر اساس کنترل توان اکتیو و راکتیو، خروجی POD به حلقه کنترلی توان اکتیو در مبدل سمت رتور اضافه می شود. در واقع خروجی POD باعث می شود تا توان مرجع از طریق مبدل سمت رتور مدوله شود. ردیابی توان اکتیو و راکتیو از طریق دو کنترلر PI که در شکل (۹-۳) نشان داده شده است، صورت می گیرد. از آنجایی که نوسان بین ناحیه ای یک پدیده مربوط به زاویه رتور و توان اکتیو می باشد، مدولاسیون توان اکتیو یک روش مؤثر برای میرایی نوسانات در سیستم های قدرت است.



شکل (۹-۳) اعمال POD به مبدل سمت رتور

۵-۳ مروری بر کارهای دیگران در زمینه ی کاربرد مزارع بادی در

مطالعات پایداری

تاثیر مزارع بادی نوع دو سو تغذیه بر نوسانات الکترومکانیکی شبکه در مقالات متعددی مورد بررسی قرار گرفته است. تاثیر ورود مزرعه بادی DFIG بر نوسانات الکترومکانیکی یک شبکه چهار ماشینه در [۸] مورد بررسی قرار گرفته است. در [۲۲] برای پیش بینی تاثیر ورود مزارع بادی به شبکه، با فرض اینکه مزارع بادی جایگزین ژنراتورهای سنکرون شبکه می شوند و لذا اینرسی موثر سیستم را کاهش می دهند، روشی بر پایه ی حساست مقادیر ویژه الکترومکانیکی شبکه نسبت به تغییر اینرسی پیشنهاد شده است. در [۲۳]، [۲۴] و [۲۵] با استفاده از آنالیز مودال تاثیر دینامیک مزرعه بادی نوع DFIG بر نوسانات الکترومکانیکی یک سیستم قدرت بررسی شده و نشان داده شده است که این نوع مزارع بادی غالبا سبب افزایش میرایی نوسانات بین ناحیه ای سیستم می شوند، ولی شرایطی وجود دارد که کنترل ژنراتور القایی دو سو تغذیه با مود الکترومکانیکی سیستم تداخل کرده و میرایی نوسان سیستم را کاهش می دهد. تاثیر ورود مزارع بادی نوع دو تغذیه ای بر نوسانات الکترومکانیکی یک سیستم چهار و هشت ماشینه در [۱۷] و [۲۶] با استفاده از آنالیز مودال و شبیه سازی در حوزه زمان بررسی شده است. در [۲۷] روشی پیشنهاد شده است که در آن تاثیر دو عامل مهم را بطور مجزا بر روی نوسانات الکترومکانیکی سیستم بررسی می کند: تغییر پخش بار و تعامل دینامیکی از طریق DFIG. این روش بر پایه سیستم کنترل حلقه بسته از نوع مدل فضای حالت سیستم قدرت توسعه می یابد، که در آن DFIG بعنوان کنترلر فیدبک عمل می کند. در این مدل می توان تاثیر DFIG را بطور جداگانه بررسی کرد: (۱) DFIG بعنوان یک منبع که توان ثابت به سیستم تزریق می کند مدل می شود، که تاثیر تغییر پخش بار بوسیله DFIG بر روی مودهای نوسانی فرکانس پائین بررسی می شود. (۲) تاثیر تعامل دینامیکی معرفی شده بوسیله DFIG بر شبکه بررسی می شود. در [۲۸] پتانسیل مزارع بادی بر میرایی نوسانات بین ناحیه ای

بررسی شده است. نوسانات بین ناحیه‌ای در نتیجه نوسان گروهی از ژنراتورها در یک ناحیه در مقابل ژنراتورهای دیگر نواحی رخ می‌دهد، که این نواحی از طریق خطوط ارتباطی ضعیف بهم متصل شده‌اند. اگر این نوسانات بطور ضعیف میرا شوند منجر به ناپایداری سیستم و خاموشی‌های سراسری می‌شوند. در این مقاله یک کنترلر به منظور بهبود میرایی نوسانات بین ناحیه‌ای برای DFIG طراحی شده است. در [۲۹]، DFIG از طریق FFTS به شبکه اصلی وصل می‌شود. FFTS یا سیستم انتقال فرکانس کسری یک تکنولوژی انتقال نسبتاً جدید است که به منظور تحویل انرژی از مزارع بادی استفاده می‌شوند، در این حالت ظرفیت انتقال بوسیله کاهش فرکانس افزایش می‌یابد. در این مقاله نیز از روش تجزیه و تحلیل مودال به منظور بررسی پایداری سیگنال کوچک سیستم استفاده می‌شود.

۶-۳ جمع بندی

در این فصل ابتدا به مدل سازی توربین بادی پرداخته شد و سپس در ادامه استراتژی کنترلی بکار برده شده برای توربین و DFIG معرفی شده است و همچنین یک کنترلر میرایی نوسان برای DFIG طراحی شده است. در آخر نیز با مروری بر مقالات معتبر به این نتیجه رسیدیم که روش آنالیز مودال و شبیه سازی در حوزه زمان بهترین روش برای بررسی پایداری سیگنال کوچک سیستم قدرت است.

فصل چهارم

تحلیل اثر نیروگاه‌های بادی بر پایداری سیستم‌های قدرت

۱-۴ مقدمه

پایداری سیستم قدرت یکی از مشخصه‌های سیستم است که تضمین می‌کند تعادل سیستم تحت شرایط بهره برداری عادی و همچنین زمانیکه یک اغتشاش در سیستم رخ می‌دهد، حفظ می‌شود. توانایی شبکه برای مقابله با این اختلالات و بازگرداندن شرایط بهره برداری به حالت نرمال، مطالعات پایداری نامیده می‌شود. در این فصل مطالعات جامعی بر روی پایداری سیگنال کوچک سیستم قدرت با و بدون حضور مزارع بادی در آن‌ها، با استفاده از دو روش تجزیه و تحلیل مودال و شبیه‌سازی حوزه زمان صورت می‌پذیرد. ابتدا از لحاظ تئوری به مطالعه نوسانات فرکانس پائین پرداخته شده و سپس با شبیه‌سازی در نرم افزار DigSILENT Power Factory صحت این مطالعات مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲-۴ خطی سازی مدل فضای حالت سیستم قدرت

۱-۲-۴ مدل فضای حالت

رفتار یک سیستم دینامیکی، از قبیل یک سیستم قدرت را می‌توان با مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیلی غیر خطی از مرتبه n به شکل زیر نمایش داد [۱۱].

$$\dot{x}_i = f_i(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r; t) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (۱-۴)$$

که n مرتبه سیستم و r تعداد ورودی‌هاست. مدل فوق را می‌توان با استفاده از فرم ماتریسی بصورت زیر بازنویسی کرد:

$$\dot{x} = f(x, u, t) \quad (2-4)$$

که در این رابطه:

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \quad u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_r \end{bmatrix} \quad f = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix}$$

بردار ستونی x بردار حالت نامیده می‌شود، و x_i ها متغیرهای حالت سیستم هستند. بردار ستونی u بردار ورودی‌های سیستم است. این سیگنال‌های خارجی هستند که بر روی عملکرد سیستم تاثیر می‌گذارند. t بیانگر زمان است، و مشتق متغیرهای حالت نسبت به زمان بوسیله $\dot{x}$ نمایش داده می‌شود. در صورتیکه مشتق متغیرهای حالت توابع صریحی از زمان نباشند، سیستم خودمختار^۱ نامیده می‌شود. در این مورد معادله (۲-۴) بصورت زیر ساده می‌شود:

$$\dot{x} = f(x, u) \quad (3-4)$$

اغلب متغیرهایی بعنوان خروجی در نظر گرفته می‌شود که بر روی سیستم قابل مشاهده باشد. بنابراین خروجی را می‌توان بر حسب متغیرهای حالت و متغیرهای ورودی به فرم زیر نمایش داد:

$$y = g(x, u) \quad (4-4)$$

که:

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad g = \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ \vdots \\ g_m \end{bmatrix}$$

بردار ستونی y بردار خروجی‌هاست، و g یک بردار از توابع غیر خطی مربوط به متغیرهای حالت و متغیرهای ورودی است.

¹ Autonomous

۴-۲-۲ خطی سازی معادلات

هدف ما در این قسمت خطی سازی معادله (۳-۴) می‌باشد. به این ترتیب که ابتدا بردار حالت اولیه x_0 و بردار ورودی u_0 مربوط به نقطه تعادل سیستم را محاسبه می‌کنیم [۱۱]. بنابراین از معادله (۳-۴) خواهیم داشت:

$$\dot{x}_0 = f(x_0, u_0) = 0 \quad (۵-۴)$$

با اعمال یک اغتشاش کوچک (Δx و Δu) به سیستم فوق برای متغیرهای حالت و ورودی خواهیم داشت:

$$x = x_0 + \Delta x \quad u = u_0 + \Delta u$$

که پیشوند Δ نشان دهنده‌ی یک تغییرات کوچک است.

حالت جدید باید معادله (۳-۴) را برآورده کند. از این رو:

$$\dot{x} = \dot{x}_0 + \Delta \dot{x} = f[(x_0 + \Delta x), (u_0 + \Delta u)] \quad (۶-۴)$$

اگر اغتشاشات فرض شده کوچک باشند، توابع غیر خطی $f(x, u)$ را می‌توان با استفاده از بسط تیلور نمایش داد. با صرف نظر کردن از جملات توان دوم و بالاتر، خواهیم داشت:

$$\dot{x}_i = \dot{x}_{i0} + \Delta \dot{x}_i = f_i[(x_0 + \Delta x), (u_0 + \Delta u)]$$

$$= f_i(x_0, u_0) + \frac{\partial f_i}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial x_n} \Delta x_n + \frac{\partial f_i}{\partial u_1} \Delta u_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial u_r} \Delta u_r$$

از آنجایی که $\dot{x}_{i0} = f_i(x_0, u_0)$ خواهیم داشت:

$$\Delta \dot{x}_i = \frac{\partial f_i}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial x_n} \Delta x_n + \frac{\partial f_i}{\partial u_1} \Delta u_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial u_r} \Delta u_r$$

با $i = 1, 2, \dots, n$ به شیوه مشابه از معادله ((۴-۴) خواهیم داشت:

$$\Delta y_j = \frac{\partial g_j}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial g_j}{\partial x_n} \Delta x_n + \frac{\partial g_j}{\partial u_1} \Delta u_1 + \dots + \frac{\partial g_j}{\partial u_r} \Delta u_r$$

با $j = 1, 2, \dots, m$ بنابراین، فرم خطی شده معادلات ((۴-۳) و ((۴-۴) به شکل زیر هستند:

$$\Delta \dot{x} = A \Delta x + B \Delta u \quad (۷-۴)$$

$$\Delta y = C \Delta x + D \Delta u \quad (۸-۴)$$

که پارامترهای معادلات فوق بصورت زیر تعریف می‌شوند:

Δx : بردار متغیرهای حالت

Δy : بردار خروجی

Δu : بردار ورودی

A: ماتریس حالت

B: ماتریس ورودی یا ماتریس کنترل

C: ماتریس خروجی

D: ماتریس پیشخور.

۳-۴ تحلیل مودال و پایداری سیگنال کوچک

هنگامیکه یک اغتشاش به سیستم قدرت وارد می‌شود، باعث ایجاد نوساناتی در سیستم می‌-

گردد. این نوسانات لزوماً خطی هستند، زیرا در حالیکه بسته به مکان خطا و متغیری که مشاهده

می‌شود، دامنه نوسانات تغییر می‌کند، اما میرایی و فرکانس نوسانات ثابت است. حتی در خطای سه فاز نیز نوسانات نهایی به شرطی که ژنراتورها مجهز به تجهیزات کنترلی باشند، دارای دامنه بسیار کوچک حول نقطه کار پس از خطا می‌باشند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که نوسانات پس از خطا لزوماً خطی هستند. این رفتار خطی، ابزار بسیار قدرتمندی برای تحلیل نوسانات سیستم در اختیار می‌گذارد و خطی سازی مدل سیستم حول نقطه کار را که در بخش قبل انجام شد توجیه می‌کند. روش‌های تحلیل مودال این امکان را فراهم می‌سازد تا نوسانات به سرعت و دقت طبقه بندی شده و نیز استفاده از روش‌های طراحی کنترل خطی را برای کنترل میرایی سیستم مجاز می‌سازد. اما با این حال نباید فراموش نمود که سیستم قدرت یک سیستم غیر خطی است. این بدین معنی است که حداقل روش‌های طراحی از روی مدل خطی، می‌بایست توسط شبیه سازی غیرخطی مورد تست و آزمایش قرار گیرد [۳۰].

به منظور بکارگیری تحلیل مودال، پس از بدست آوردن شکل عمومی فضای حالت سیستم توسط روابط (۷-۴) و (۸-۴) می‌توان سیستم را از لحاظ پایداری سیگنال کوچک تحلیل نمود، ابتدا مقادیر ویژه‌ی سیستم از روی ماتریس A بدست می‌آید:

$$\det(\lambda I - A) = 0 \quad (9-4)$$

حل معادله‌ی فوق مقادیر ویژه‌ی ماتریس A را بدست می‌دهد. این مقادیر ویژه به شکل $\sigma \pm j\omega$ هستند، پایداری نقطه کار را می‌توان از روی مقادیر ویژه مطالعه نمود. اگر تمامی مقادیر ویژه سمت چپ محور موهومی باشند، نقطه کار پایدار است. اگر هر کدام از مقادیر ویژه در سمت راست محور موهومی و یا روی آن باشند، گفته می‌شود که مودهای مربوط به آن ناپایدار است. این نوع پایداری با استفاده از مشخصه زمانی مودهای نوسانی مربوط به مقادیر ویژه λ_i یعنی $e^{\lambda_i t}$ تایید می‌شود. بنابراین اگر یک مقدار ویژه حقیقی باشد، مود مربوط به آن غیر نوسانی است، اگر این مقدار ویژه حقیقی منفی باشد در طول زمان رو به صفر می‌گراید. هر چه دامنه بزرگتر باشد

سریعتر میرا می‌شود و اگر مقدار ویژه حقیقی مثبت باشد، گفته می‌شود مود ناپایدار آ‌پریودیک^۱ است. به عبارت دیگر مقدار ویژه مزدوج مختلط به شکل $\sigma \pm j\omega$ ، مربوط به مدهای نوسانی هستند. یک جفت با σ مثبت مربوط به یک مود با ناپایداری نوسانی است زیرا این مقدار ویژه باعث پاسخ زمانی ناپایدار از سیستم می‌گردد. در مقابل یک جفت با σ منفی مربوط به مدهای نوسانی پایدار است. پر واضح است که حالت دلخواه سیستم، حالتی است که در آن، تمامی مقادیر ویژه در سمت چپ صفحه مختلط قرار گیرند [۱۱].

فرکانس میرایی نوسانات به هرتز (Hz)، و نیز نسبت میرایی از روابط زیر بدست می‌آیند:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (۱۰-۴)$$

$$\xi = \frac{-\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}} \quad (۱۱-۴)$$

ماتریس A را می‌توان با استفاده از مربع ماتریس مودال راست، Φ ، قطری نمود.

$$\Phi^{-1}A\Phi = \Lambda \quad (۱۲-۴)$$

ستون‌های ماتریس Φ بردارهای ویژه راست (Φ_i) مربوط به مود i -ام هستند و عناصر قطری ماتریس Λ برابر مقادیر ویژه λ_i ماتریس A خواهد بود. به طور مشابه ماتریس مودال چپ (Ψ) است که سطرهای آن بردارهای ویژه چپ (ψ_i) بوده و ماتریس A را می‌تواند قطری نماید، بنابراین می‌توان نوشت:

$$\Psi A \Psi^{-1} = \Lambda \quad (۱۳-۴)$$

برای سهولت در محاسبات، ماتریس‌های مودال راست و چپ، نرمالیزه می‌شوند. بدین منظور رابطه زیر برقرار است:

^۱ Aperiodic

$$\psi\Phi = 1 \quad (۱۴-۴)$$

رابطه (۱۴-۴) نشان می‌دهد که محاسبه ψ از روی معکوس ماتریس Φ به آسانی امکان پذیر است. اما اگر سیستم مقدار ویژه‌ای در مبدا داشته باشد، Φ معکوس پذیر نخواهد بود. در عمل به ندرت پیش می‌آید که مقادیر ویژه دقیقاً صفر شوند و مقدار بسیار کوچکی به خود خواهند گرفت. این امر باعث می‌شود معکوس ψ قابل محاسبه باشد، اما دقت آن بستگی به دقت روش عددی استفاده شده دارد. با در دست داشتن ψ و Φ ، می‌توان سیستم ODE^1 را تبدیل خطی $x = \Phi z$ به دستگاه جدید مودال z انتقال داد:

$$\dot{z} = \Lambda z + \psi B u \quad (۱۵-۴)$$

$$z + D u y = C \Phi \quad (۱۶-۴)$$

پس از چنین تبدیلی معادلات دینامیکی سیستم بصورت معادلات دیفرانسیلی مرتبه اول جدا از هم در خواهد آمد. هنگامیکه معادلات حالت، مستقل از همدیگر شدند، می‌توان پاسخ یک متغیر حالت بخصوصی مثل Δx_k را روی i -امین مود در بردار ویژه راست Φ مورد بررسی قرار داد. این پاسخ شکل مود^۲ یک مود نوسانی بخصوص نامیده می‌شود.

برخی مواقع هدف این است که میزان تأثیر یک حالت دینامیکی بر روی یک مود بررسی شود. ضرایب مشارکت به آسانی این مقدار را تعیین می‌کنند. ماتریس مشارکت که با P نشان داده می‌شود، رابطه بین متغیرهای حالت و مودهای نوسانی را تعیین می‌نماید و بصورت زیر تعریف میشود:

$$P = [p_1 \ p_2 \ \dots \ p_n] \quad (۱۷-۴)$$

که در آن:

¹ Ordinary Differential Equation

² Mode Shape

$$p_i = \begin{bmatrix} p_{1i} \\ \vdots \\ p_{ni} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_{1i} \psi_{i1} \\ \vdots \\ \Phi_{ni} \psi_{in} \end{bmatrix} \quad (۱۸-۴)$$

عنصر $p_{ki} = \Phi_{ki} \psi_{ki}$ ضریب مشارکت نامیده می‌شود و اندازه‌ای از مقدار مشارکت k -امین متغیر حالت را در i -امین مود در اختیار قرار می‌دهد.

۴-۴ پایداری سیستم قدرت در حضور مزرعه بادی

در یک سیستم بهم پیوسته، توانائی بازگرداندن تعادل بین گشتاور الکترومغناطیسی و گشتاور مکانیکی بوسیله پایداری زاویه‌ای روتور هر ماشین سنکرون بدست می‌آید. با افزایش تعداد مزارع بادی، که ذاتاً از نوع ماشین‌های القائی هستند، در مشخصه‌های دینامیکی سیستم قدرت تغییر ایجاد می‌شود. علاوه بر این، برای تولید توان بادی، انرژی جنبشی در باد به گشتاور مکانیکی تبدیل می‌شود. مشخصه‌های مرتبط با بهره برداری از انرژی باد و اجزای مورد استفاده برای تبدیل قدرت به تغییر در دینامیک‌های سیستم کمک می‌کنند [۳۱].

در یک ماشین سنکرون، اگر در طول یک اغتشاش شبکه، گشتاور الکتریکی کمتر از گشتاور مکانیکی شود، روتور شتاب خواهد گرفت و باعث افزایش سرعت روتور و موقعیت زاویه‌ای بردار شار روتور می‌شود. از آنجا که افزایش زاویه روتور به علت افزایش در گشتاور بار ژنراتور رخ می‌دهد، مکانیسمی که وجود دارد این است که گشتاور الکتریکی باید افزایش یابد تا جایی که مطابق با گشتاور مکانیکی باشد. در مورد DFIGها، اختلالات بار ژنراتور موجب افزایش تغییر در سرعت و موقعیت روتور می‌شود. با این حال، با توجه به عملکرد آسنکرون آن، موقعیت بردار شار روتور به موقعیت فیزیکی روتور بستگی ندارد و مشخصه زاویه‌ای گشتاور سنکرون کننده وجود ندارد.

پایداری گذرای سیستم با توربین‌های بادی همچنین به عواملی از قبیل شرایط خطا و پارامترهای شبکه بستگی دارد. توان مکانیکی ثابت نیست و به سرعت باد بستگی دارد.

ژنراتورهای القایی دو سو تغذیه که دارای مبدل الکترونیک قدرت هستند تاثیر قابل توجهی بر روی عملکرد دینامیکی سیستم دارند. نکته مهمی که باید به آن توجه کرد این است که DFIGها ماشین‌های آسنکرون هستند اما به شبکه قدرت توان تزریق می‌کنند و در نتیجه بر روی موقعیت زاویه‌ای همه ژنراتورهای سنکرون دیگر تاثیر می‌گذارند. از این رو قابلیت سنکرونیزم ژنراتورهای سنکرون تحت تاثیر قرار می‌گیرد. این امر تاثیر قابل توجهی بر روی مدهای الکترومکانیکی سیستم خواهد داشت. بنابراین در بخش‌های بعدی در مورد چگونگی تغییر در پارامترهای سیستم که می‌توانند بر روی مدهای الکترومکانیکی سیستم اثر بگذارند بحث می‌شود [۳۱].

۴-۴-۱ نوسانات فرکانس پائین یک سیستم قدرت بهم پیوسته ساده

یک سیستم قدرت بهم پیوسته را می‌توان بصورت دو ماشین معادل ساده نشان داد، که انحراف سرعت $(\Delta\omega_1, \Delta\omega_2)$ و انحراف زاویه توان $(\Delta\delta_1, \Delta\delta_2)$ در آن‌ها، دارای مشخصه نوسانی سینوسی با فاز معکوس و فرکانس یکسان می‌باشد (شکل (۴-۱)). توان خط ارتباطی توانی است که از ناحیه ۱ به ناحیه ۲ ارسال می‌شود، ناحیه‌های ۱ و ۲ به ترتیب پایانه ارسال و پایانه دریافت هستند. به منظور ساده سازی در تجزیه و تحلیل، مدل کلاسیک مرتبه ۲ برای ژنراتورها و مدل امپدانس ثابت برای بارها در نظر گرفته شده است. معادلات حرکت مربوط به دو ژنراتور سیستم قدرت بصورت زیر خواهند بود [۱۷]:

$$\begin{cases} \Delta\dot{\delta}_1 = \Delta\omega_1 \\ \Delta\dot{\delta}_2 = \Delta\omega_2 \\ \Delta\dot{\omega}_1 = (\Delta P_{1m} - \Delta P_{1e} - D_1\Delta\omega_1)/M_1 \\ \Delta\dot{\omega}_2 = (\Delta P_{2m} - \Delta P_{2e} - D_2\Delta\omega_2)/M_2 \end{cases} \quad (۴-۱۹)$$

که در رابطه فوق:

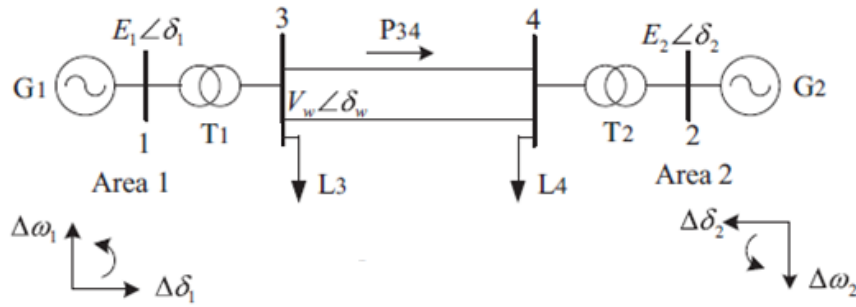
$\Delta\omega_1$ و $\Delta\omega_2$: به ترتیب انحراف فرکانس ژنراتورهای G_1 و G_2 ,

$\Delta\delta_1$ و $\Delta\delta_2$: به ترتیب انحراف زاویه توان G_1 و G_2 ,

M_1 و M_2 : به ترتیب ثابت اینرسی G_1 و G_2 ,

D_1 و D_2 : به ترتیب ضرایب میرایی G_1 و G_2 ,

ΔP_{1m} و ΔP_{2m} : انحراف توان‌های مکانیکی G_1 و G_2 و



شکل (۴-۱) یک سیستم قدرت بهم پیوسته دو ماشین [۱۷]

ΔP_{1e} و ΔP_{2e} : انحراف توان‌های الکتریکی G_1 و G_2 هستند.

با فرض اینکه $\Delta P_{1m} = \Delta P_{2m} = 0$ ، از معادله (۴-۱۹) ماتریس حالت را می‌توان بصورت زیر

تشکیل داد:

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{\delta}_1 \\ \Delta\dot{\delta}_2 \\ \Delta\dot{\omega}_1 \\ \Delta\dot{\omega}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{-K_{11}}{M_1} & \frac{-K_{12}}{M_1} & \frac{-D_1}{M_1} & 0 \\ \frac{-K_{21}}{M_2} & \frac{-K_{22}}{M_2} & 0 & \frac{-D_2}{M_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta_1 \\ \Delta\delta_2 \\ \Delta\omega_1 \\ \Delta\omega_2 \end{bmatrix} = A_s \begin{bmatrix} \Delta\delta_1 \\ \Delta\delta_2 \\ \Delta\omega_1 \\ \Delta\omega_2 \end{bmatrix} \quad (۴-۲۰)$$

که $K_{ij} = \partial P_{ei} / \partial \delta_j$ ضرایب گشتاور سنکرون کننده در نقطه کار سیستم است و A_s ماتریس حالت است.

توان الکتریکی G_1 و G_2 را می‌توان با رابطه (۲۱-۴) محاسبه کرد:

$$\begin{cases} P_{1e} = E_1^2/|Z_{11}| \sin\alpha_{11} + E_1E_2/|Z_{12}| \sin(\delta_{12} - \alpha_{12}) \\ P_{1e} = E_2^2/|Z_{22}| \sin\alpha_{22} + E_1E_2/|Z_{12}| \sin(\delta_{12} - \alpha_{12}) \end{cases} \quad (۲۱-۴)$$

که Z_{ii} امپدانس ورودی است؛ Z_{ij} امپدانس انتقال است؛ و $Z_{ii} = |Z_{ii}| \angle \varphi_{ii}$ و $Z_{ij} = |Z_{ij}| \angle \varphi_{ij}$ زاوای امپدانس‌ها را می‌توان بصورت $\varphi_{ii} = 90 - \alpha_{ii}$ و $\varphi_{ij} = 90 - \alpha_{ij}$ معرفی کرد. δ_{120} اختلاف زاویه نسبی بین G_1 و G_2 در نقطه کار داده شده است. ضرایب گشتاور سنکرون کننده را می‌توان با استفاده از معادله (۲۱-۴) بصورت زیر محاسبه کرد:

$$\begin{cases} K_{11} = -K_{12} = E_1E_2/|Z_{12}| \cos(\delta_{120} - \alpha_{12}) \\ K_{22} = -K_{21} = E_1E_2/|Z_{12}| \cos(\delta_{120} - \alpha_{12}) \end{cases} \quad (۲۲-۴)$$

بر اساس تبدیلات ماتریس و تئوری schur معادله مشخصه ماتریس حالت را می‌توان با استفاده از رابطه $|A_s - \lambda I| = 0$ بصورت زیر محاسبه کرد:

$$\begin{aligned} \lambda^4 + \left(\frac{D_1}{M_1} + \frac{D_2}{M_2}\right)\lambda^3 + \left(\frac{K_{11}}{M_1} + \frac{K_{22}}{M_2} + \frac{D_1}{M_1} \frac{D_2}{M_2}\right)\lambda^2 \\ + \frac{1}{M_1M_2}(D_1K_{22} + D_2K_{11})\lambda = 0 \end{aligned} \quad (۲۳-۴)$$

اگر $D_1/M_1 = D_2/M_2 = \gamma$ ، ضرایب میرایی مکانیکی مشابه خواهند بود، بنابراین معادله (۲۳-۴) را می‌توان بصورت زیر ساده کرد:

$$\lambda(\lambda + \gamma) \left(\lambda^2 + \gamma\lambda + \frac{K_{11}}{M_1} + \frac{K_{22}}{M_2} \right) = 0 \quad (۲۴-۴)$$

مقادیر ویژه معادله (۲۴-۴) برابر خواهند بود با:

$$\lambda_1 = 0, \quad \lambda_2 = -\gamma = -D_1/M_1,$$

$$\lambda_3 = \sigma \pm j\omega = -D_1/2M_1 \pm j\sqrt{-(D_1/M_1)^2 + 4(K_{11}/M_1 + K_{22}/M_2)/2}$$

D_1 و D_2 تحت شرایط بهره برداری یکسان همگی مثبت هستند. می‌توان ثابت کرد که معادله (۴-۲۴) معیار پایداری روث را برآورده می‌کند، و قسمت‌های حقیقی سه مقدار ویژه غیر صفر منفی هستند. λ_3 مودهای الکترومکانیکی سیستم قدرت دو ژنراتور را نشان می‌دهد. اگر سیستم دارای میرایی منفی یا میرایی صفر باشد، بعنوان مثال $D \leq 0$ و $-D/M \geq 0$ ، به این ترتیب قسمت‌های حقیقی مقادیر ویژه در سمت راست محور موهومی خواهند بود، و این امر نشان می‌دهد که سیستم ناپایدار سیگنال کوچک است.

۴-۲-۴ مشخصه میرایی یک سیستم قدرت بهم پیوسته ساده در حضور مزرعه بادی

سیستم مورد مطالعه در این قسمت همان سیستم شکل (۴-۱) است که یک مزرعه بادی در باس ۳ به آن اضافه شده است (شکل (۴-۲)). با صرف نظر از مقاومت خط و تلفات خط، انحراف توان الکتریکی ژنراتورها در معادله (۴-۲۱) را می‌توان در این حالت با معادلات زیر محاسبه کرد [۱۷]:

$$\begin{cases} \Delta P_{1e} = E_1 V_{w0} / X_{13} \times \cos(\delta_{10} - \delta_{w0}) (\Delta \delta_1 - \Delta \delta_w) = k_1 (\Delta \delta_1 - \Delta \delta_w) \\ \Delta P_{2e} = -E_2 V_{w0} / X_{23} \times \cos(\delta_{w0} - \delta_{20}) (\Delta \delta_w - \Delta \delta_2) = k_2 (\Delta \delta_w - \Delta \delta_2) \end{cases} \quad (۴-۲۵)$$

که V_w و δ_w به ترتیب دامنه ولتاژ و زاویه فاز در نقطه اتصال توربین بادی به سیستم است؛ X_{13} و X_{23} راکتانس از باس مربوط به ژنراتورهای G_1 و G_2 نسبت به نقطه اتصال هستند؛ زیر نویس ۰ مقدار اولیه را نشان می‌دهد. با صرف نظر از تغییرات بار و تلفات سیستم خواهیم داشت:

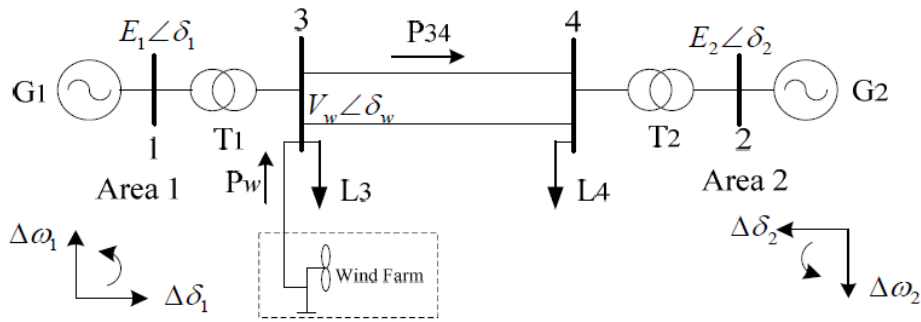
$$\Delta P_{1e} + \Delta P_w = \Delta P_{2e} \quad (۴-۲۶)$$

که ΔP_w توان اکتیو مزرعه بادی است. با تشکیل معادله حالت، ΔP_w باید بر حسب متغیرهای حالت محاسبه شود. از [25]، $\Delta P_w = g_1 \Delta \omega_B$ ، در اینجا، g_1 قدرمطلق مشخصه فرکانسی مزرعه بادی

است؛ $\Delta\omega_B$ تغییرات فرکانس مزرعه بادی در نقطه اتصال است. $\Delta\omega_B = g_2\Delta\omega_1$ (وقتیکه مزرعه بادی در پایانه ارسال باشد)، $\Delta\omega_B = g_2\Delta\omega_2$ (وقتیکه مزرعه بادی در پایانه دریافت باشد). بنابراین، ΔP_w را می‌توان با استفاده از معادلات زیر بدست آورد:

$$\begin{cases} \Delta P_w = k_3\Delta\omega_1 \\ \Delta P_w = k_4\Delta\omega_2 \end{cases} \quad (۲۷-۴)$$

با بکارگیری معادلات (۲۰-۴) و (۲۵-۴) تا (۲۷-۴)، ΔP_w و $\Delta\omega_B$ را می‌توان حذف کرد، و مجموعه معادلات حالت سیستم بهم پیوسته با در نظر گرفتن مزرعه بادی در پایانه ارسال و دریافت را می‌توان با معادلات (۲۸-۴) و (۲۹-۴) بدست آورد:



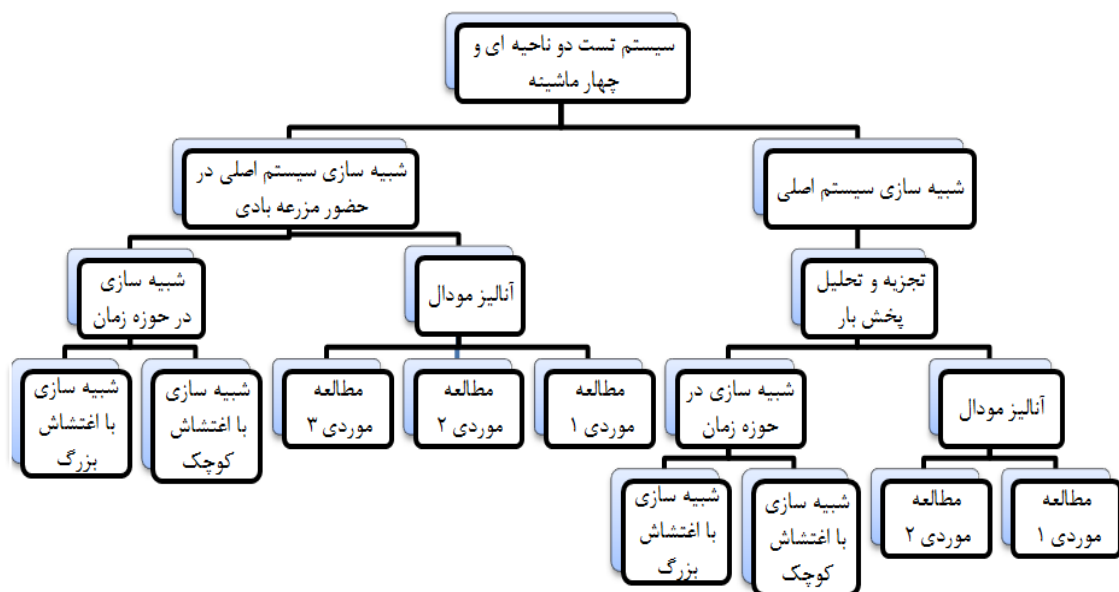
شکل (۲-۴) یک سیستم قدرت بهم پیوسته ساده در حضور مزرعه بادی [۱۷]

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{\delta}_1 \\ \Delta\dot{\delta}_2 \\ \Delta\dot{\omega}_1 \\ \Delta\dot{\omega}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{k_1k_2}{M_1(k_1+k_2)} & \frac{k_1k_2}{M_1(k_1+k_2)} & \frac{-D_1}{M_1} + \frac{k_1k_3}{M_1(k_1+k_2)} & 0 \\ -\frac{k_1k_2}{M_2(k_1+k_2)} & \frac{k_1k_2}{M_2(k_1+k_2)} & \frac{k_1k_3}{M_2(k_1+k_2)} & \frac{-D_2}{M_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta_1 \\ \Delta\delta_2 \\ \Delta\omega_1 \\ \Delta\omega_2 \end{bmatrix} \quad (۲۸-۴)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\delta}_1 \\ \Delta \dot{\delta}_2 \\ \Delta \dot{\omega}_1 \\ \Delta \dot{\omega}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{k_1 k_2}{M_1(k_1 + k_2)} & \frac{k_1 k_2}{M_1(k_1 + k_2)} & \frac{-D_1}{M_1} & \frac{k_2 k_4}{M_1(k_1 + k_2)} \\ -\frac{k_1 k_2}{M_2(k_1 + k_2)} & \frac{k_1 k_2}{M_2(k_1 + k_2)} & 0 & \frac{-D_2}{M_2} + \frac{k_2 k_4}{M_2(k_1 + k_2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_1 \\ \Delta \delta_2 \\ \Delta \omega_1 \\ \Delta \omega_2 \end{bmatrix} \quad (۲۹-۴)$$

۵-۴ شبیه سازی و تحلیل نتایج

ساختار شبیه‌سازی در نرم افزار دیگسایلنت به این صورت است که ابتدا نتایج حاصل از پخش بار سیستم محاسبه می‌شود، سپس نقطه کار سیستم محاسبه شده، و در نهایت بر روی سیستم آنالیز مودال و یا شبیه‌سازی حوزه زمان صورت می‌گیرد. در این بخش با توجه به مطالب تئوری بیان شده در قسمت‌های قبلی، شبیه‌سازی برای سیستم تست مورد نظر انجام می‌شود. فلوچارت زیر خلاصه‌ای از شبیه‌سازی‌های انجام شده در این فصل را نشان می‌دهد:



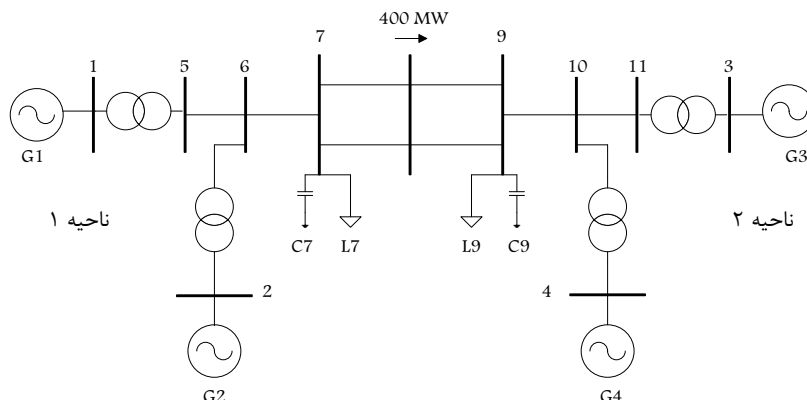
شکل (۳-۴) فلوچارت شبیه‌سازی‌های انجام شده در فصل ۴

۴-۵-۱ معرفی سیستم تست

سیستم قدرت مورد مطالعه در این بخش در شکل (۴-۴) نشان داده شده است، این سیستم

یک سیستم دو ناحیه‌ای شناخته شده است که برای مطالعات پایداری استفاده می‌شود [۱۱].

این سیستم دارای ۱۱ باس و دو ناحیه کاملاً مشابه است که توسط یک خط ارتباطی ضعیف بین باس‌های ۷ و ۹ بهم متصل شده‌اند. هر ناحیه شامل دو ژنراتور است، که هر ژنراتور دارای توان نامی ۹۰۰ مگاوات آمپر و ولتاژ پایه ۲۰ کیلو ولت است. کل ظرفیت تولیدی نصب شده در این سیستم ۲۸۰۰ مگاوات است در حالیکه تقریباً ۴۰۰ مگاوات از ناحیه ۱ به سمت ناحیه ۲ جاری می‌شود. در کل دو بار در سیستم وجود دارد که به باس‌های ۷ و ۹ اعمال شده‌اند. همچنین همانطور که در شکل مشخص است دو خازن به باس‌های ۷ و ۹ متصل شده‌اند. اطلاعات کامل مربوط به سیستم در ضمیمه ۱ آمده است. در این سیستم ژنراتورها توسط مدل مرتبه ۶ و بارها بصورت امپدانس ثابت مدل شده‌اند، که مدلسازی این اجزا در فصل دوم بطور مفصل بحث شد.



شکل (۴-۴) دیاگرام تک خطی سیستم بهم پیوسته دو ناحیه‌ای و چهار ماشینه

۴-۵-۶ تجزیه و تحلیل پخش بار

تجزیه و تحلیل پخش بار اطلاعاتی را در مورد توان اکتیو و راکتیو و همچنین مقدار اندازه و فاز ولتاژ باس‌های سیستم را در اختیار می‌گذارد. پایداری سیستم قدرت به کمبود یا افزایش تولید در مقابل تقاضای بار، پخش توان از طریق خطوط انتقال و قیود بهره برداری بستگی دارد. قبل از اجرای تجزیه و تحلیل مقادیر ویژه، با دانستن وضعیت سیستم، به این منظور که آیا سیستم نزدیک به قیود بهره برداری کار می‌کند یا نه، تجزیه و تحلیل پخش بار در سیستم فوق انجام می‌شود. نتایج پخش بار حاصل از شبیه سازی در نرم افزار دیگسایلنت در ادامه آمده است:

جدول (۴-۱) مشخصات شبکه

تعداد	اجزاء
۱۱	باس‌ها
۸	خطوط
۴	ژنراتورها
۴	ترانسفورماتورها
۲	بارها

جدول (۲-۴) نتایج پخش بار در باس‌ها

شماره باس	ولتاژ (pu)	فاز (rad)	فاز (deg)	توان اکتیو ژنراتور (pu)	توان راکتیو ژنراتور (pu)	توان اکتیو بار (pu)	توان راکتیو بار (pu)
۱	۱/۰۳	۰	۰	۷	۱/۷۹۱۷	۰	۰
۲	۱/۰۱	۰/۱۸۲۳۷	۱۰/۴۴	۷	۲/۲۰۵۳	۰	۰
۳	۱/۰۳	-۰/۱۱۸۶۸	-۶/۷۹	۷/۱۸۷۱	۱/۶۹۱۱	۰	۰
۴	۱/۰۱	-۰/۲۹۶۰۷	-۱۶/۹۶	۷	۱/۸۵۷۱	۰	۰
۵	۱/۰۰۷۴	۰/۲۳۹۸۴	۱۳/۷۴	۰	۰	۰	۰
۶	۰/۹۸۰۴۴	۰/۰۶۴۲۸	۳/۶۸	۰	۰	۰	۰
۷	۰/۹۶۵۱۶	-۰/۰۸۱۷۱	-۴/۶۸	۰	۰	۹/۶۷	-۱
۸	۰/۹۵۳۲	-۰/۳۲۳۰۱	-۱۸/۵	۰	۰	۰	۰
۹	۰/۹۷۶۱۶	-۰/۵۵۹۴۱	-۳۲/۰۵	۰	۰	۱۷/۶۷	-۲۵
۱۰	۰/۹۸۶۱۴	-۰/۴۱۳۴۸	-۲۳/۶۹	۰	۰	۰	۰
۱۱	۱/۰۰۹۴	-۰/۲۳۴۱۶	-۱۳/۴۱	۰	۰	۰	۰

جدول (۳-۴) نتایج پخش بار در خطوط

از باس	به باس	شماره خط	توان اکتیو (pu)	توان راکتیو (pu)
۵	۶	۱	۷	۰/۹۷۱۴۷
۶	۷	۲	۱۳/۸۹۶۷	۱/۱۰۸۶
۷	۸	۳	۲/۰۱۳۲	۰/۰۵۶۲۸
۷	۸	۴	۱/۹۶۵۱	-۰/۲۴۷۷۲
۸	۹	۵	۷/۱۸۷۱	۰/۸۳۴۷۱
۸	۹	۶	-۱۳/۸۵۴۹	۱/۴۲۶۳
۹	۱۰	۷	۱/۹۹۲	۰/۰۵۲۶
۱۰	۱۱	۸	۷	۱/۷۹۱۷

۴-۵-۳ آنالیز مودال

یکی از روش‌هایی که معمولاً برای مطالعه نوسانات فرکانس پائین سیستم استفاده می‌شود، تجزیه و تحلیل مودال است. همانطور که در بخش ۴-۳ از همین فصل بطور کامل توضیح داده شد در این روش، ابتدا معادلات دیفرانسیل غیر خطی سیستم حول یک نقطه کار خطی می‌شوند و سپس مدل فضای حالت سیستم تشکیل داده می‌شود. در نهایت مقادیر ویژه ماتریس حالت محاسبه می‌شود.

۴-۵-۳-۱ مطالعه موردی ۱: کلیه ژنراتورهای سنکرون فاقد PSS

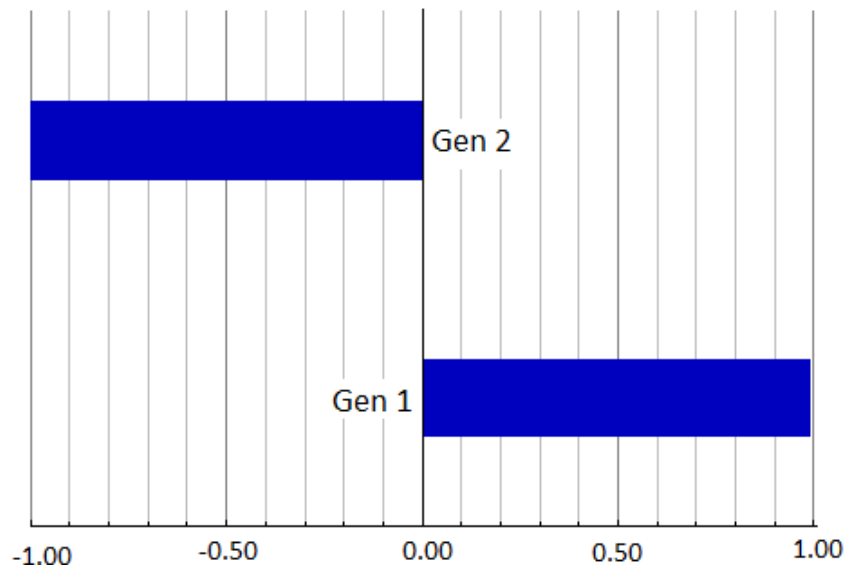
از آنجایی که سیستم مورد مطالعه در این بخش یک سیستم دو ناحیه‌ای است و هر ناحیه آن نیز شامل دو ماشین است بنابراین این سیستم در کل دارای سه مود الکترومکانیکی مختلف (دو مود محلی و یک مود بین ناحیه‌ای) می‌باشد. از دو مود محلی یکی مربوط به نوسان ژنراتور ۱ نسبت به ژنراتور ۲ در ناحیه اول و دیگری مربوط به نوسان ژنراتور ۳ نسبت به ژنراتور ۴ در ناحیه دوم می‌باشد. مود بین ناحیه‌ای نیز مبین نوسان ژنراتورهای ناحیه اول (ژنراتور ۱ و ۲) در برابر ژنراتورهای ناحیه دوم (ژنراتور ۳ و ۴) است. در این بخش به منظور مطالعه سیستم همه ژنراتورهای آن فاقد PSS می‌باشند در جدول (۴-۴) مقدار مقادیر ویژه، میرایی و فرکانس مدهای نوسانی مشاهده می‌شود. و در ستون آخر نوع مود ذکر شده است.

با دقت در جدول (۴-۴) مشاهده می‌شود که بخش اول جدول مربوط به مطالعه موردی ۱ می‌باشد، قسمت حقیقی مقادیر ویژه مربوط به این قسمت همگی منفی می‌باشند بنابراین می‌توان گفت که سیستم پایدار سیگنال کوچک است.

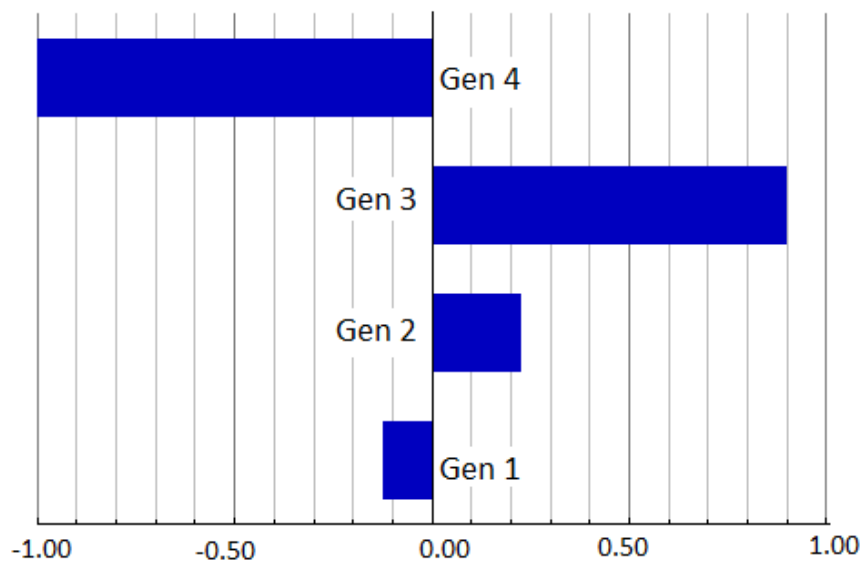
جدول (۴-۴) مودهای نوسانی فرکانس پائین سیستم

شماره مود	مقدار ویژه	میرایی	فرکانس (Hz)	نوع مود
مطالعه موردی ۱: بدون PSS	۱	$6/199 \pm j 0/373$	۰/۹۸۶۷	مود محلی ناحیه ۱
	۲	$6/408 \pm j 0/377$	۱/۰۱۹۹	مود محلی ناحیه ۲
	۳	$2/898 \pm j 0/007$	۰/۴۶۱۲	مود بین ناحیه‌ای
مطالعه موردی ۲: با PSS	۱	$6/23 \pm j 0/511$	۰/۹۹۱۵	مود محلی ناحیه ۱
	۲	$6/444 \pm j 0/535$	۱/۰۲۵۶	مود محلی ناحیه ۲
	۳	$6/936 \pm j 0/097$	۰/۴۶۷۳	مود بین ناحیه‌ای

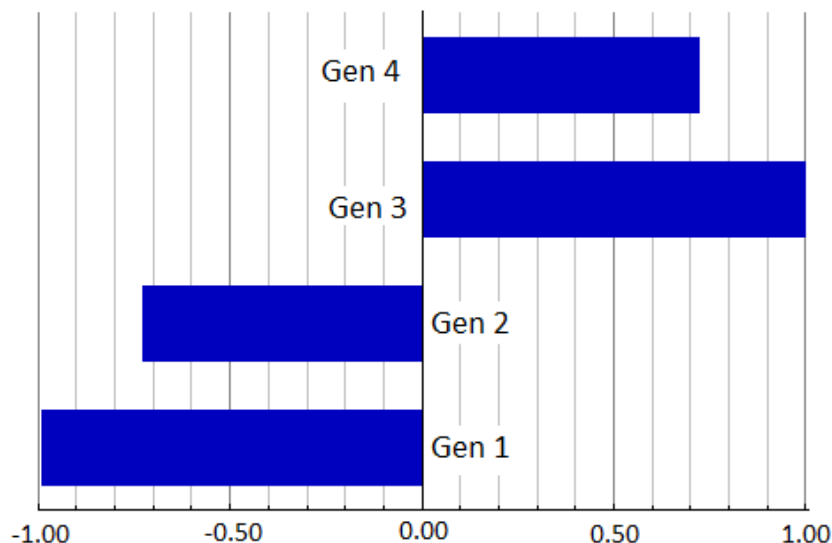
همانطور که در ابتدای این فصل در بخش ۴-۳ توضیح داده شد، سهم هر ژنراتور در یک مود نوسانی را می‌توان بوسیله ضریب مشارکت بررسی نمود. در واقع ضریب مشارکت یک ابزار برای شناسایی متغیرهای حالتی است که مشارکت قابل توجهی در یک مود انتخاب شده از میان تعداد زیادی از مودهای یک سیستم چند ژنراتوره دارند. شکل (۴-۵) سهم ژنراتورها را در مود محلی ناحیه اول نشان می‌دهد، در این مود ژنراتورهای شماره ۱ و ۲ در مقابل هم نوسان کرده و بیشترین مشارکت را در میرایی این مود دارند و سهم مشارکت ژنراتورهای ناحیه دوم بسیار ناچیز است. شکل (۴-۶) سهم ژنراتورها را در مود نوسانی ناحیه دوم نشان می‌دهد، در این مود ژنراتورهای شماره ۱ و ۲ در مقابل هم و ژنراتورهای شماره ۳ و ۴ نیز در مقابل هم نوسان می‌کنند، و سهم ژنراتورهای ۳ و ۴ در میرایی این مود بسیار بیشتر می‌باشد. شکل (۴-۷) نیز میزان مشارکت ژنراتورها را در مود بین ناحیه‌ای نشان می‌دهد، همانطور که در شکل هم دیده می‌شود در این مود ژنراتورهای ناحیه اول با هم و ژنراتورهای ناحیه دوم نیز با هم نوسان می‌کنند، اما ژنراتورهای این دو ناحیه در مقابل هم نوسان می‌کنند که تعریف مود بین ناحیه‌ای را کاملاً تصدیق می‌کند. ضریب مشارکت یک ابزار مفید برای شناسایی بهترین ژنراتورها برای نصب PSS است. در واقع ژنراتورهایی که میزان ضریب مشارکت آن‌ها بیشتر است محل مناسب‌تری برای نصب PSS هستند. برای مثال اگر در اینجا هدف ما بهبود میرایی مود بین ناحیه‌ای باشد، با توجه به شکل (۴-۷) ژنراتور ۱ از ناحیه اول و ژنراتور ۳ از ناحیه دوم محل‌های مناسبی برای نصب PSS هستند.



شکل (۴-۵) ضریب مشارکت ژنراتورها در مود محلی ناحیه ۱ (مطالعه موردی ۱)



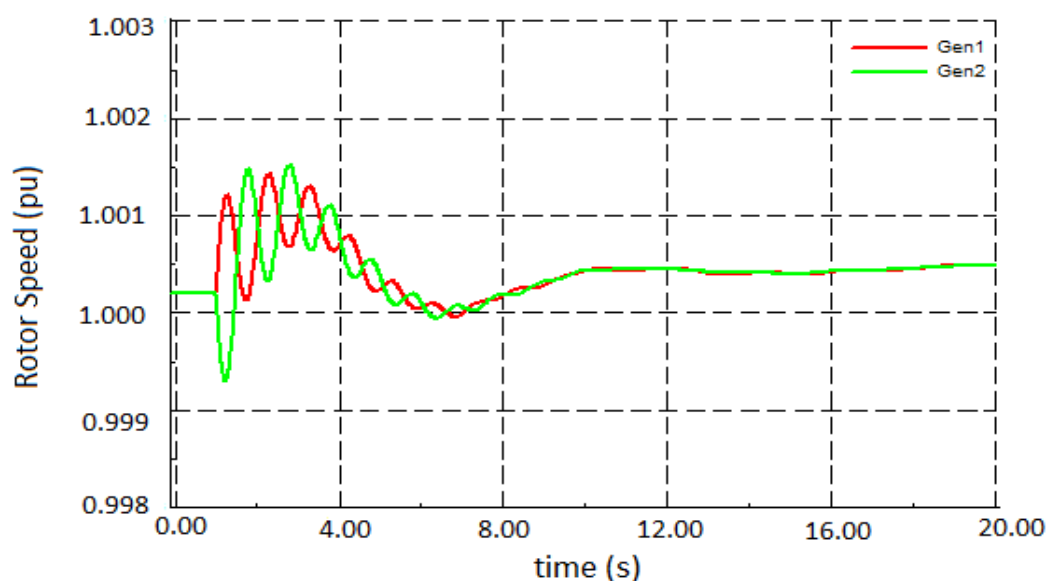
شکل (۴-۶) ضریب مشارکت ژنراتورها در مود محلی ناحیه ۲ (مطالعه موردی ۱)



شکل (۷-۴) ضریب مشارکت ژنراتورها در مود بین ناحیه‌ای (مطالعه موردی ۱)

۲-۳-۵-۴ کلیه ژنراتورهای سنکرون مجهز به PSS

در این بخش کلیه ژنراتورهای سنکرون شبکه با PSS نوع کلاسیک تجهیز می‌شوند. ساختار و مدلسازی PSS در فصل دوم بطور کامل توضیح داده شد. اکنون آنالیز مودال بر روی سیستم انجام شده و نتایج مربوط به این حالت در قسمت دوم جدول (۴-۴) آمده است. همانطور که با دقت در جدول مشاهده می‌شود قسمت حقیقی تمام مقادیر ویژه منفی هستند بنابراین می‌توان گفت که سیستم مورد نظر در این حالت نیز پایدار سیگنال کوچک است، و همچنین میزان میرایی مدهای فرکانس پائین، همانطور که انتظار داشتیم، با افزودن PSS به میزان قابل توجهی بهبود یافته است. همانطور که در بخش ۲-۳-۴ از فصل دوم توضیح داده شد PSS موجب بهبود میرایی در نوسان‌های فرکانس پائین سیستم می‌شود که نتایج بدست آمده در جدول (۴-۴) این بیان را کاملاً تصدیق می‌کند. با دقت در جدول می‌توان دید که تأثیر PSS در بهبود میرایی مود بین ناحیه‌ای بسیار بیشتر بوده است به طوریکه میزان میرایی از ۰/۰۲۶ به ۰/۰۳۱ رسیده است.



شکل (۴-۸) پاسخ سرعت روتور ژنراتورها به اغتشاش‌های اعمال شده در ناحیه ۱

۴-۵-۴ شبیه سازی در حوزه زمان

در این بخش به منظور بررسی ماهیت فیزیکی نوسانات الکترومکانیکی فرکانس پائین سیستم قدرت در حوزه‌ی زمان، با اعمال اغتشاش‌های مختلف به سیستم، مودهای نوسانی گوناگون، تحریک و نشان داده می‌شود. سیستم دو ناحیه‌ای شکل (۴-۴) یک سیستم مناسب به منظور نشان دادن انواع نوسانات سیستم قدرت می‌باشد. با استفاده از این مدل ساده می‌توان نوسانات الکترومکانیکی را که بصورت ذاتی در سیستم دو ناحیه‌ای نهفته‌اند نمایش داد. در این حالت کلیه ژنراتورهای سنکرون شبکه مجهز به PSS هستند.

۴-۵-۴-۱ شبیه سازی با اغتشاش کوچک

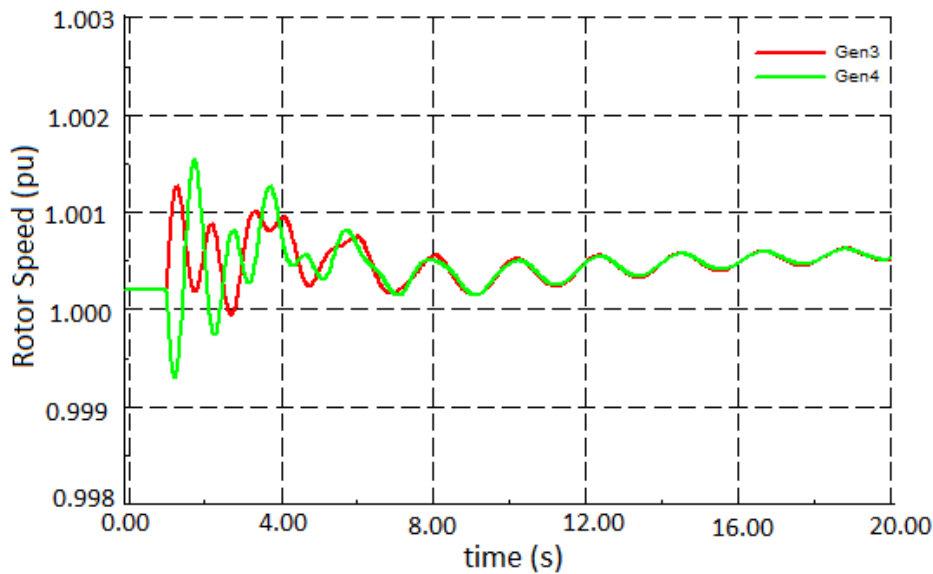
۱- مود نوسانی محلی در ناحیه اول:

به منظور تحریک مود محلی در ناحیه اول، یک تغییر پله کوچک در گشتاور مکانیکی

ژنراتورهای این ناحیه اعمال شده است. برای رسیدن به این مطلوب می‌توان گشتاور مکانیکی هر یک از ژنراتورهای ناحیه اول را به یک اندازه، مخالف هم و به طور همزمان تغییر داد. به همین منظور تغییر 0.01 pu در گشتاور مکانیکی ژنراتور ۱ و تغییر -0.01 pu در گشتاور مکانیکی ژنراتور ۲ اعمال گردیده است. در شکل (۴-۸) پاسخ سرعت روتور ژنراتورها به این دو اغتشاش کوچک نشان داده شده است. با توجه به این شکل، سرعت روتور ژنراتورهای ۱ و ۲ در فاز مخالف هم تغییر و نوسان می‌کنند. مود محلی غالب تقریباً به مدت ۸ ثانیه نوسان نموده و پس از آن ژنراتورها در مود بین ناحیه‌ای با هم شروع به نوسان می‌کنند. فرکانس یستم در این مود تقریباً ۱ هرتز می‌باشد.

۲- مود نوسانی محلی در ناحیه دوم:

در این بخش مشابه همان روش استفاده شده در بخش قبل، این بار مود نوسانی محلی در ناحیه دوم تحریک می‌گردد. مشابه قبل می‌توان گشتاور مکانیکی هر یک از ژنراتورهای این ناحیه را به یک اندازه، مخالف هم و بطور همزمان تغییر داد. با تغییر 0.01 pu در گشتاور مکانیکی ژنراتور ۳ و تغییر -0.01 pu در گشتاور مکانیکی ژنراتور ۴، پاسخ سرعت روتور ژنراتورها به این اغتشاش‌ها مطابق با شکل (۴-۹) بدست آمده است. با اعمال اغتشاش کوچک در ناحیه ۲، بلافاصله ژنراتور ۳ نسبت به ژنراتور ۴ در فاز مخالف شروع به نوسان کرده است. مود محلی تقریباً به مدت ۱۲ ثانیه غالب بوده و پس از آن مود نوسانی بین ناحیه‌ای غالب گردیده است.

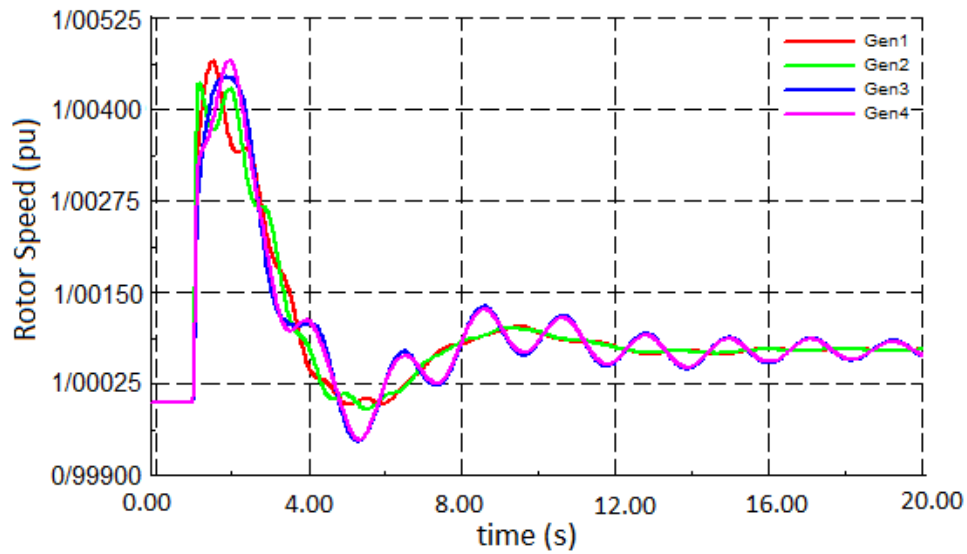


شکل (۴-۹) پاسخ سرعت روتور ژنراتورها به اغتشاش‌های اعمال شده در ناحیه ۲

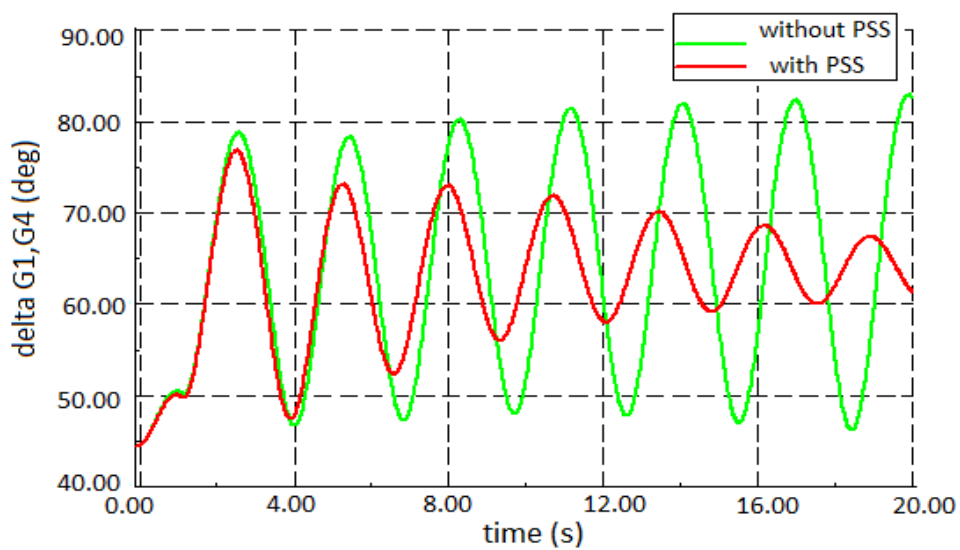
۲-۴-۵-۴ شبیه سازی با اغتشاش بزرگ

به منظور بررسی بیشتر ویژگی‌های نوسانات بین ناحیه‌ای و همچنین مشاهده تأثیر PSS بر روی پایداری دینامیکی سیستم، یک خطای اتصال کوتاه سه فاز در باس ۸ شبیه سازی شده است. اتصال کوتاه نسبت به تغییر جزئی گشتاور مکانیکی که در بخش‌های قبل به سیستم اعمال شد، اغتشاشی به مراتب بزرگتر است. خطا در $t=1s$ رخ داده و پس از 100 میلی ثانیه در $t=1.1s$ برطرف می‌شود. پاسخ سرعت روتور ژنراتورها در شکل (۴-۱۰) آمده است. همانطور که این شکل به وضوح نشان می‌دهد، در پاسخ سرعت روتور ژنراتورها به این اغتشاش، مود بین ناحیه‌ای غالب است. بلافاصله بعد از اعمال اغتشاش ژنراتورهای ناحیه اول در برابر ژنراتورهای ناحیه دوم شروع به نوسان می‌کنند. دامنه تغییر ژنراتورهای ناحیه دوم بزرگتر از مقادیر تغییر سرعت ژنراتورهای ناحیه اول است. در ابتدا ژنراتورهای ناحیه دوم تحت تأثیر مود محلی به مدت کمی بر خلاف هم نوسان کرده‌اند. پس از اینکه سیستم از خطای گذرا بازیابی شد، ژنراتورهای ناحیه اول در برابر ژنراتورهای ناحیه دوم در مود بین ناحیه‌ای حول نقطه تعادل جدید سیستم شروع به نوسان می‌کنند. از روی

پاسخ سرعت روتور ژنراتورها، مود بین ناحیه‌ای به وضوح قابل مشاهده است. فرکانس سیستم در این مود تقریباً ۰/۴۷ هرتز است. در شکل (۱۱-۴) نیز تأثیر PSS ژنراتورهای سنکرون را بر روی پایداری دینامیکی سیستم مشاهده می‌کنیم.



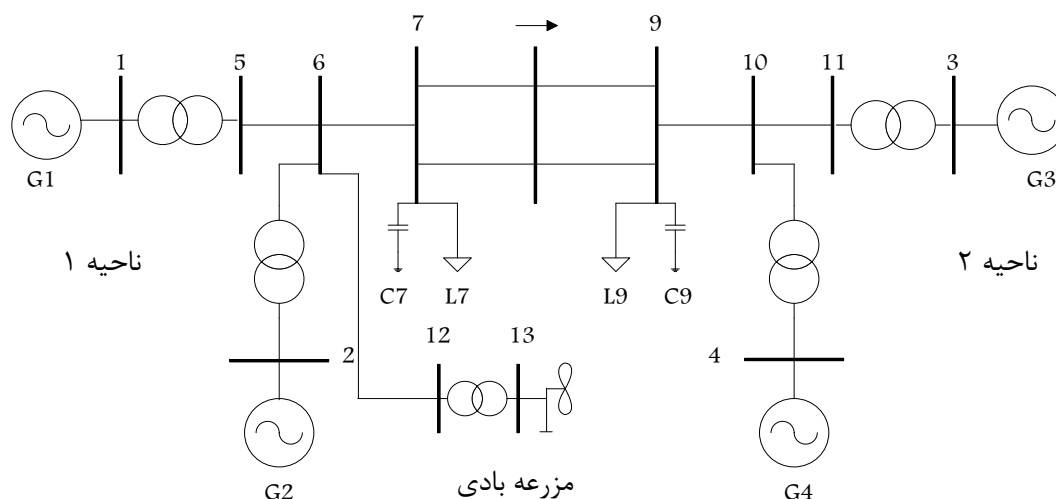
شکل (۱۰-۴) پاسخ سرعت روتور ژنراتورها به اتصال کوتاه سه فاز در باس ۸



شکل (۱۱-۴) تأثیر PSS بر روی پایداری دینامیکی سیستم

۶-۴ شبیه سازی سیستم تست در حضور مزرعه بادی

هدف از این بخش بررسی اثر حضور یک مزرعه بادی بر روی رفتار سیستم قدرت از دید پایداری سیگنال کوچک و پایداری گذرا است، به همین دلیل از یک سیستم تست ساده و استاندارد برای این مطالعه استفاده می‌کنیم به این ترتیب که به سیستم معرفی شده در بخش ۴-۵ یک مزرعه بادی در باس ۶ اضافه می‌شود (شکل (۴-۱۲)). با نفوذ DFIG در سیستم، اینرسی کل سیستم کاهش می‌یابد. به همین دلیل گام اول در بررسی رفتار سیستم هنگامیکه DFIG اضافه می‌شود، شناسایی تغییر رفتار سیستم از دیدگاه پایداری سیگنال کوچک است. نکته قابل توجه در این مورد این است که با نفوذ DFIG در سیستم قابلیت سنکرونیزم ژنراتورهای سنکرون تحت تاثیر قرار می‌گیرد. که این امر منجر به تاثیر قابل توجه بر روی مدهای الکترومکانیکی می‌شود.



شکل (۴-۱۲) دیاگرام تک خطی سیستم دو ناحیه‌ای در حضور مزرعه بادی

۴-۶-۱ آنالیز مودال

مدل دینامیکی سیستم قدرت و DFIG به ترتیب در فصل ۲ و ۳ به طور مفصل توضیح داده شد. به منظور تجزیه و تحلیل سیگنال کوچک سیستم باید ابتدا نقطه تعادل سیستم را بیابیم. برای یک سیستم قدرت معمولی می‌توان با انجام تجزیه و تحلیل پخش بار نقطه تعادل سیستم را بدست آورد. اما برای یک سیستم یکپارچه با DFIG، پیدا کردن شرایط بهره‌برداری نیازمند محاسبه پخش بار و همچنین مقداردهی اولیه DFIG می‌باشد. مقدار دهی اولیه DFIG از طریق تجزیه و تحلیل مدار معادل DFIG انجام می‌شود.

۴-۶-۱-۱ مطالعه موردی ۱: تغییر در ظرفیت مزرعه بادی

در گام اول ظرفیت مزرعه بادی ۱۸ مگاوات می‌باشد، و به این ترتیب تقریباً ۴۱۸ مگاوات از ناحیه ۱ به سمت ناحیه ۲ جاری می‌شود. سپس با افزایش ظرفیت تا مقدار ۱۰۰ مگاوات تغییرات را در میزان فرکانس و میرایی مودهای فرکانس پائین سیستم مشاهده می‌کنیم که نتایج در جدول (۴-۵) و جدول (۴-۶) به ترتیب برای حالتی که ژنراتورهای سنکرون فاقد PSS و حالتیکه همه آن‌ها مجهز به PSS باشند، مشاهده می‌شود.

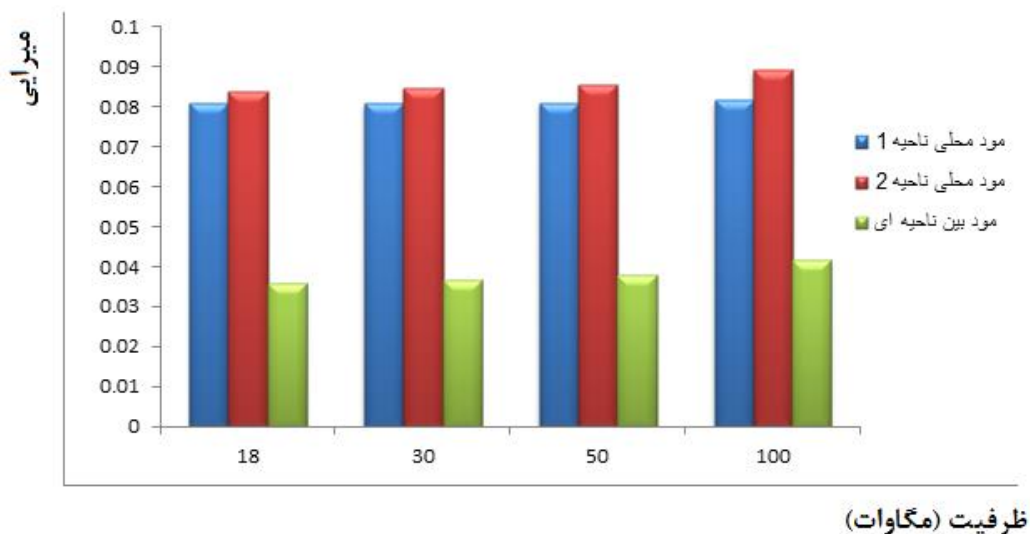
فصل چهارم: تحلیل اثر نیروگاه‌های بادی بر پایداری سیستم‌های قدرت

جدول (۴-۵) مدهای نوسانی فرکانس پائین سیستم تحت ظرفیت‌های (MW) مختلف مزرعه بادی و با فاصله ۲۵ کیلومتر از شبکه (تمام ژنراتورهای سنکرون بدون PSS)

ظرفیت DFIG	شماره مود	مقدار ویژه	میرایی	فرکانس	ماشین‌های مربوطه	نوع مود
۱۸	۱	$-0.3638 \pm j 6/1983$	۰/۰۵۸۶	۰/۹۸۶۵	G_2, G_1	مود محلی ناحیه ۱
	۲	$-0.3898 \pm j 6/3941$	۰/۰۶۰۹	۱/۰۱۷۶	G_4, G_3	مود محلی ناحیه ۲
	۳	$-0.183 \pm j 2/8949$	۰/۰۰۶۳	۰/۴۶۰۷	G_4, G_3, G_2, G_1	مود بین ناحیه‌ای
۳۰	۱	$-0.3648 \pm j 6/1973$	۰/۰۵۸۸	۰/۹۸۶۳	G_2, G_1	مود محلی ناحیه ۱
	۲	$-0.3952 \pm j 6/3898$	۰/۰۶۱۷	۱/۰۱۷	G_4, G_3	مود محلی ناحیه ۲
	۳	$-0.203 \pm j 2/8754$	۰/۰۰۷۱	۰/۴۵۷۶	G_4, G_3, G_2, G_1	مود بین ناحیه‌ای
۵۰	۱	$-0.3666 \pm j 6/1956$	۰/۰۵۹۱	۰/۹۸۶۱	G_2, G_1	مود محلی ناحیه ۱
	۲	$-0.4035 \pm j 6/3832$	۰/۰۶۳۱	۱/۰۱۵۹	G_4, G_3	مود محلی ناحیه ۲
	۳	$-0.229 \pm j 2/8436$	۰/۰۰۸۱	۰/۴۵۲۶	G_4, G_3, G_2, G_1	مود بین ناحیه‌ای
۱۰۰	۱	$-0.3720 \pm j 6/1892$	۰/۰۰۶	۰/۹۸۵	G_2, G_1	مود محلی ناحیه ۱
	۲	$-0.4291 \pm j 6/3616$	۰/۰۶۷۳	۱/۰۱۲۵	G_4, G_3	مود محلی ناحیه ۲
	۳	$-0.297 \pm j 2/7198$	۰/۰۱۰۹	۰/۴۳۲۸	G_4, G_3, G_2, G_1	مود بین ناحیه‌ای

جدول (۴-۶) مدهای نوسانی فرکانس پائین سیستم تحت ظرفیت‌های (MW) مختلف مزرعه بادی و با فاصله ۲۵ کیلومتر از شبکه (تمام ژنراتورهای سنکرون با PSS)

ظرفیت DFIG	شماره مود	مقدار ویژه	میرایی	فرکانس	ماشین‌های مربوطه	نوع مود
۱۸	۱	$-0.504 \pm j 6/2295$	۰/۰۸۰۶	۰/۹۹۱۵	G_2, G_1	مود محلی ناحیه ۱
	۲	$-0.540 \pm j 6/4278$	۰/۰۸۳۷	۱/۰۲۳	G_4, G_3	مود محلی ناحیه ۲
	۳	$-0.1053 \pm j 2/932$	۰/۰۳۵۹	۰/۴۶۶۶	G_4, G_3, G_2, G_1	مود بین ناحیه‌ای
۳۰	۱	$-0.5047 \pm j 6/228$	۰/۰۸۰۸	۰/۹۹۱۳	G_2, G_1	مود محلی ناحیه ۱
	۲	$-0.5445 \pm j 6/423$	۰/۰۸۴۵	۱/۰۲۲۳	G_4, G_3	مود محلی ناحیه ۲
	۳	$-0.1071 \pm j 2/913$	۰/۰۳۶۸	۰/۴۶۳۶	G_4, G_3, G_2, G_1	مود بین ناحیه‌ای
۵۰	۱	$-0.5058 \pm j 6/227$	۰/۰۸۱	۰/۹۹۱	G_2, G_1	مود محلی ناحیه ۱
	۲	$-0.5511 \pm j 6/416$	۰/۰۸۵۶	۱/۰۲۱۱	G_4, G_3	مود محلی ناحیه ۲
	۳	$-0.1093 \pm j 2/881$	۰/۰۳۷۹	۰/۴۵۸۵	G_4, G_3, G_2, G_1	مود بین ناحیه‌ای
۱۰۰	۱	$-0.509 \pm j 6/2196$	۰/۰۸۱۶	۱	G_2, G_1	مود محلی ناحیه ۱
	۲	$-0.5712 \pm j 6/392$	۰/۰۸۹	۱/۰۱۷۴	G_4, G_3	مود محلی ناحیه ۲
	۳	$-0.1149 \pm j 2/758$	۰/۰۴۱۶	۰/۴۳۸۹	G_4, G_3, G_2, G_1	مود بین ناحیه‌ای



شکل (۴-۱۳) نمودار مستطیلی مودهای سیستم تحت فواصل مختلف مزرعه بادی از شبکه قدرت (با PSS)

با دقت در جدول (۴-۵) و جدول (۴-۶) و همچنین شکل (۴-۱۳) می‌توان دید که با افزایش ظرفیت DFIG در یک فاصله مشخص، میزان میرایی مودها افزایش یافته است. اما با دقت بیشتر می‌توان یافت که تأثیر DFIG بر روی میرایی مود بین ناحیه‌ای بسیار بیشتر بوده است. همانطور که قبلاً نیز اشاره شد میرایی مودهای بین ناحیه‌ای یک امر بسیار مهم در سیستم‌های قدرت یکپارچه است. در حقیقت مودهای بین ناحیه‌ای بخشی از ماهیت سیستم‌های قدرت بهم پیوسته هستند. میرایی ضعیف این مودها می‌تواند منجر به عوامل مختلفی از قبیل خاموشی‌های سراسری شود. بنابراین بهبود میرایی این مودها در موارد مختلف حائز اهمیت می‌باشد.

۴-۱-۶-۲ مطالعه موردی ۲: تغییر در فاصله اتصال مزرعه بادی از شبکه قدرت

در این بخش مودهای نوسانی فرکانس پائین سیستم را تحت فواصل مختلف مزرعه بادی (با ظرفیت ۱۸ مگاوات) از شبکه قدرت، بررسی می‌کنیم. تغییر در فاصله مزرعه بادی برای دو حالت مختلف از سیستم بررسی می‌شود، یک بار برای حالتیکه همه ژنراتورهای سنکرون شبکه فاقد PSS

باشند و بار دیگر برای حالتیکه کلیه ژنراتورهای سنکرون مجهز به PSS باشند، که این تایج به ترتیب در جدول (۷-۴) و جدول (۸-۴) آمده است.

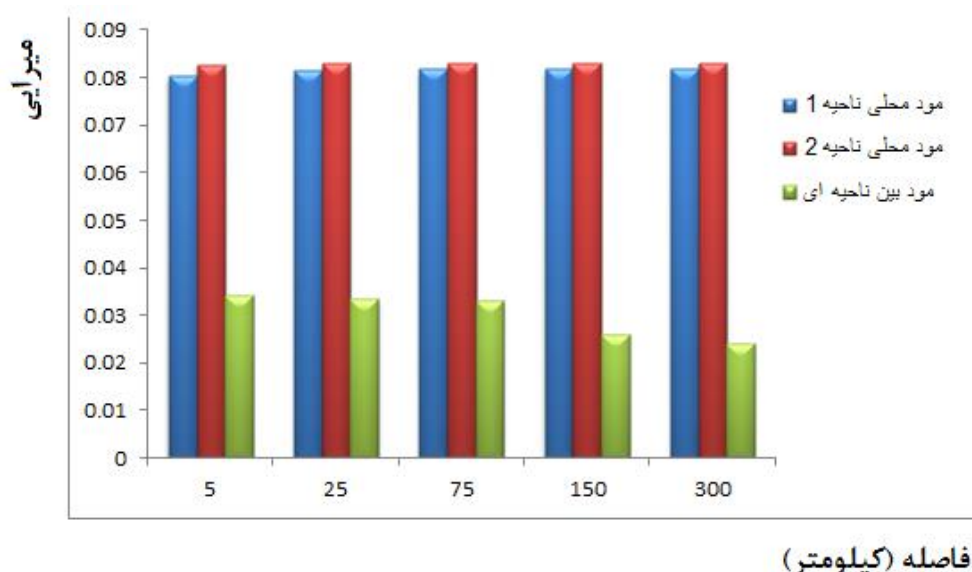
جدول (۷-۴) مودهای نوسانی فرکانس پائین سیستم تحت فاصله‌های (km) مختلف مزرعه بادی و با ظرفیت ۱۸ مگاوات از شبکه (تمام ژنراتورهای سنکرون بدون PSS)

فاصله DFIG	شماره مود	مقدار ویژه	میرایی	فرکانس	ماشین‌های مربوطه	نوع مود
۵	۱	$-0.359 \pm j 6/201$	۰/۰۵۷۹	۰/۹۸۶۹	G_2, G_1	مود محلی ناحیه ۱
	۲	$-0.382 \pm j 6/399$	۰/۰۵۹۶	۱/۰۱۸۴	G_4, G_3	مود محلی ناحیه ۲
	۳	$-0.015 \pm j 2/939$	۰/۰۰۵۱	۰/۴۶۷۸	G_4, G_3, G_2, G_1	مود بین ناحیه‌ای
۲۵	۱	$-0.37 \pm j 6/201$	۰/۰۵۹۵	۰/۹۸۷	G_2, G_1	مود محلی ناحیه ۱
	۲	$-0.384 \pm j 6/399$	۰/۰۵۹۹	۱/۰۱۸۴	G_4, G_3	مود محلی ناحیه ۲
	۳	$-0.011 \pm j 2/914$	۰/۰۰۳۸	۰/۴۶۳۷	G_4, G_3, G_2, G_1	مود بین ناحیه‌ای
۷۵	۱	$-0.372 \pm j 6/202$	۰/۰۵۹۹	۰/۹۸۶۴	G_2, G_1	مود محلی ناحیه ۱
	۲	$-0.385 \pm j 6/399$	۰/۰۶۰	۱/۰۱۸۴	G_4, G_3	مود محلی ناحیه ۲
	۳	$-0.10 \pm j 2/906$	۰/۰۳۶	۰/۴۶۳۳	G_4, G_3, G_2, G_1	مود بین ناحیه‌ای
۱۵۰	۱	$-0.378 \pm j 6/198$	۰/۰۶۰۹	۰/۹۸۶۴	G_2, G_1	مود محلی ناحیه ۱
	۲	$-0.385 \pm j 6/399$	۰/۰۶۰۰	۱/۰۱۸۴	G_4, G_3	مود محلی ناحیه ۲
	۳	$-0.011 \pm j 2/911$	۰/۰۰۳۸	۰/۴۶۳۳	G_4, G_3, G_2, G_1	مود بین ناحیه‌ای
۳۰۰	۱	$-0.373 \pm j 6/205$	۰/۰۶۰	۰/۹۸۷۵	G_2, G_1	مود محلی ناحیه ۱
	۲	$-0.385 \pm j 6/399$	۰/۰۶۰۰	۱/۰۱۸۴	G_4, G_3	مود محلی ناحیه ۲
	۳	$-0.011 \pm j 2/900$	۰/۰۰۳۷	۰/۴۶۱۶	G_4, G_3, G_2, G_1	مود بین ناحیه‌ای

جدول (۸-۴) مودهای نوسانی فرکانس پائین سیستم تحت فاصله‌های (km) مختلف مزرعه بادی و با ظرفیت ۱۸ مگاوات از شبکه (تمام ژنراتورهای سنکرون با PSS)

فاصله DFIG	شماره مود	مقدار ویژه	میرایی	فرکانس	ماشین‌های مربوطه	نوع مود
۵	۱	$-0.502 \pm j 6/233$	۰/۰۸۰۳	۰/۹۹۱۹	G_2, G_1	مود محلی ناحیه ۱
	۲	$-0.534 \pm j 6/433$	۰/۰۸۲۷	۱/۰۲۳۸	G_4, G_3	مود محلی ناحیه ۲
	۳	$-0.102 \pm j 2/976$	۰/۰۳۴۳	۰/۴۶۹۷	G_4, G_3, G_2, G_1	مود بین ناحیه‌ای
۲۵	۱	$-0.510 \pm j 6/232$	۰/۰۸۱۵	۰/۹۹۱۹	G_2, G_1	مود محلی ناحیه ۱
	۲	$-0.535 \pm j 6/433$	۰/۰۸۲۹	۱/۰۲۳۸	G_4, G_3	مود محلی ناحیه ۲
	۳	$-0.098 \pm j 2/951$	۰/۰۳۳۳	۰/۴۶۹۶	G_4, G_3, G_2, G_1	مود بین ناحیه‌ای
۷۵	۱	$-0.511 \pm j 6/233$	۰/۰۸۱۸	۰/۹۹۲۰	G_2, G_1	مود محلی ناحیه ۱
	۲	$-0.536 \pm j 6/433$	۰/۰۸۳۰	۱/۰۲۳۸	G_4, G_3	مود محلی ناحیه ۲
	۳	$-0.098 \pm j 2/944$	۰/۰۳۳۲	۰/۴۶۸۵	G_4, G_3, G_2, G_1	مود بین ناحیه‌ای
۱۵۰	۱	$-0.517 \pm j 6/229$	۰/۰۸۲۷	۰/۹۹۱۴	G_2, G_1	مود محلی ناحیه ۱
	۲	$-0.536 \pm j 6/433$	۰/۰۸۳۰	۱/۰۲۳۸	G_4, G_3	مود محلی ناحیه ۲
	۳	$-0.077 \pm j 2/946$	۰/۰۲۶۱	۰/۴۶۸۹	G_4, G_3, G_2, G_1	مود بین ناحیه‌ای
۳۰۰	۱	$-0.512 \pm j 6/236$	۰/۰۸۱۸	۰/۹۹۲۴	G_2, G_1	مود محلی ناحیه ۱
	۲	$-0.536 \pm j 6/433$	۰/۰۸۳۰	۱/۰۲۳۹	G_4, G_3	مود محلی ناحیه ۲
	۳	$-0.068 \pm j 2/938$	۰/۰۲۴	۰/۴۶۷۶	G_4, G_3, G_2, G_1	مود بین ناحیه‌ای

با دقت در جدول (۷-۴) و جدول (۸-۴) و همچنین شکل (۴-۱۴) می‌توان دید که با افزایش فاصله مزرعه بادی از سیستم قدرت میزان میرایی مودهای فرکانس پائین کاهش یافته‌اند. علت این امر را می‌توان اینگونه توجیه کرد که با افزایش طول خط انتقال امپدانس خط افزایش یافته و بنابراین طبق روابط (۴-۲۵) و (۴-۲۶) توانی که از مزرعه بادی به شبکه تزریق می‌شود کاهش یافته و در نتیجه مقدار درایه‌های ماتریس‌های (۴-۲۸) و (۴-۲۹) کمتر شده و طبق رابطه (۴-۲۴) میزان میرایی مودها کاهش می‌یابد. همچنین همانطور که در بخش ۴-۵-۳ نیز مشاهده شد تجهیز ژنراتورهای سنکرون با PSS منجر به افزایش میرایی مودهای فرکانس پائین شده است.



شکل (۴-۱۴) نمودار مستطیلی مودهای سیستم تحت ظرفیت‌های مختلف مزرعه بادی (با PSS)

۳-۱-۶-۴ مطالعه موردی ۳: بررسی میرایی مودهای بین ناحیه‌ای با وجود POD

نوسان بین ناحیه‌ای یک پدیده ذاتی در سیستم‌های قدرت چند ناحیه‌ای است. به منظور بهبود میرایی این نوسانات در بخش ۳-۴ از فصل سوم روش طراحی POD برای DFIG بطور کامل توضیح داده شد. در این بخش صحت عملکرد POD طراحی شده در بهبود میرایی نوسانات بین ناحیه‌ای تحت تغییر فاصله مزرعه بادی از شبکه قدرت، بررسی می‌شود. بنابراین مودهای بین ناحیه‌ای مربوط به آن تحت یک ظرفیت مشخص از مزرعه بادی در جدول (۴-۹) و شکل (۴-۱۵) مشاهده می‌شود. همانطور که در بخش ۳-۴ توضیح داده شد POD تنها قادر به بهبود یک نوع مود می‌باشد. به این منظور که اگر هدف ما بهبود میرایی مود x باشد باید سیگنال کنترلی به گونه‌ای باشد که اطلاعات کافی در مورد آن مود را در اختیار POD بگذارد. از آنجایی که در این پایان نامه سیگنال ورودی POD اختلاف زاویه بین دو ناحیه می‌باشد بنابراین هدف این است که POD موجب بهبود میرایی مود بین ناحیه‌ای شود. که این امر به وضوح در جدول (۴-۹) و همچنین

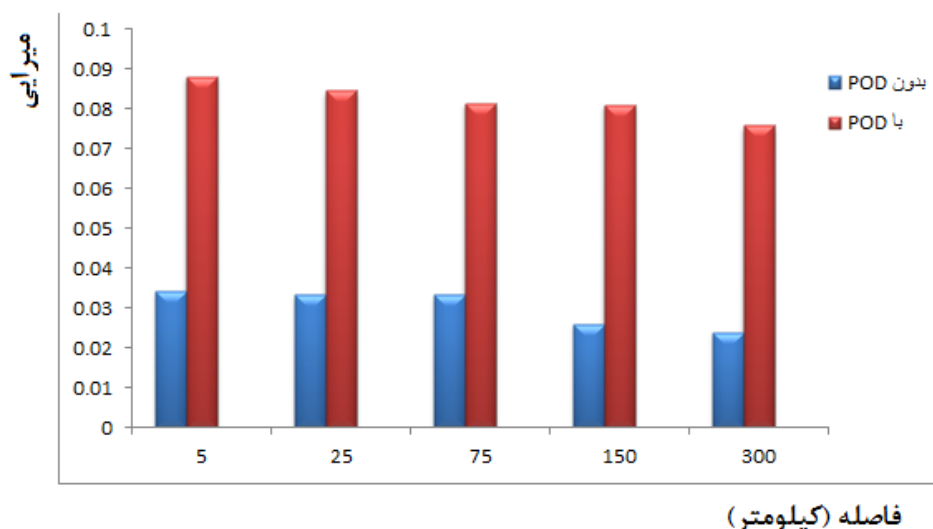
شکل (۴-۱۵) می‌توان مشاهده کرد.

جدول (۴-۹) مود بین ناحیه‌ای شبکه دو ناحیه‌ای و چهار ماشین در حضور مزرعه بادی با ظرفیت ۱۸ مگاوات

فاصله DFIG	مود بین ناحیه‌ای (بدون POD)	میرایی	فرکانس	مود بین ناحیه‌ای (با POD)	میرایی	فرکانس
۵	$-0.102 \pm j 2/976$	۰/۰۳۴۳	۰/۴۶۹۷	$-0.273 \pm j 3/086$	۰/۰۸۸۲	۰/۴۹۱۱
۲۵	$-0.098 \pm j 2/951$	۰/۰۳۳۳	۰/۴۶۹۶	$-0.261 \pm j 3/075$	۰/۰۸۴۶	۰/۴۸۹
۷۵	$-0.098 \pm j 2/944$	۰/۰۳۳۲	۰/۴۶۸۵	$-0.251 \pm j 3/072$	۰/۰۸۱۴	۰/۴۸۸
۱۵۰	$-0.077 \pm j 2/946$	۰/۰۲۶۱	۰/۴۶۸۹	$-0.249 \pm j 3/069$	۰/۰۸۱	۰/۴۸۸
۳۰۰	$-0.068 \pm j 2/938$	۰/۰۲۴	۰/۴۶۷۶	$-0.233 \pm j 3/064$	۰/۰۷۵۸	۰/۴۸۷

۴-۱-۶-۴ مطالعه موردی ۴: نصب مزرعه بادی در باس‌های مختلف سیستم

در این بخش با گذاشتن مزرعه بادی در باس‌های مختلف میزان تأثیر افزایش ظرفیت آن را بر روی مود بین ناحیه‌ای سیستم بررسی می‌کنیم. در این حالت فرض می‌شود که همه ژنراتورهای سنکرون مجز به PSS و DFIG فاقد POD می‌باشد. ابتدا مزرعه بادی طبق همان حالت قبل بر روی باس ۶ یعنی در ناحیه اول قرار داده می‌شود. با افزایش ظرفیت مزرعه بادی تا ۱۰۰ مگاوات میزان میرایی مود بین ناحیه‌ای افزایش پیدا می‌کند. اما با افزایش آن از مقدار ۱۰۰ به بعد باعث ناپایداری مود بین ناحیه‌ای می‌شود (جدول (۴-۱۰)). در واقع افزایش ظرفیت مزرعه بادی باعث می‌شود که توان بیشتری از خط ارتباطی بین دو ناحیه بگذرد که این امر موجب ناپایداری مود بین ناحیه‌ای می‌شود. در حالت دوم مزرعه بادی بر روی باس میانی دو ناحیه یعنی باس ۸ قرار داده می‌شود. در این حالت با افزایش ظرفیت مودهای بین ناحیه‌ای پایدار می‌مانند اما میزان میرایی آن‌ها نسبت به حالتی که مزرعه در ناحیه اول قرار داشت کمتر می‌شود (جدول (۴-۱۱)). در حالت سوم مزرعه بادی بر روی باس ۱۰ یعنی در ناحیه دوم نصب می‌شود. در این حالت با افزایش



شکل (۴-۱۵) نمودار مستطیلی مود بین ناحیه‌ای تحت فواصل مختلف مزرعه بادی از شبکه

ظرفیت مودهای بین ناحیه‌ای پایدار می‌مانند و میزان میرایی آن‌ها نسبت به حالتی که مزرعه در ناحیه اول قرار داشت به میزان چشمگیری افزایش می‌یابد (جدول (۴-۱۲)). دلیل این امر را می‌توان این‌گونه بیان کرد که از آنجایی جهت شارش توان در خط ارتباطی دو ناحیه، از سمت ناحیه ۱ به سمت ناحیه ۲ است، قرار دادن مزرعه بادی در ناحیه دوم و افزایش ظرفیت آن تأثیری بر روی توان خط ارتباطی نخواهد داشت و بنابراین افزایش ظرفیت منجر به ناپایداری مود بین ناحیه‌ای نمی‌شود.

جدول (۴-۱۰) مودهای بین‌ناحیه‌ای سیستم (نصب مزرعه بادی در ناحیه اول)

ظرفیت DFIG	مود بین ناحیه‌ای	میرایی	فرکانس
۱۸	$-0.1053 \pm j 2/932$	۰/۰۳۵۹	۰/۴۶۶۶
۳۰	$-0.1071 \pm j 2/9126$	۰/۰۳۶۸	۰/۴۶۳۶
۵۰	$-0.1093 \pm j 2/881$	۰/۰۳۷۹	۰/۴۵۸۵
۱۰۰	$-0.1149 \pm j 2/7577$	۰/۰۴۱۶	۰/۴۳۸۹
۱۵۰	$-0.261 \pm j 2/731$	۰/۰۹۵	۰/۴۳۴۶
۲۰۰	$-0.1578 \pm j 2/78$	۰/۰۵۶۷	۰/۴۴۲۵

جدول (۴-۱۱) مودهای بین‌ناحیه‌ای سیستم (نصب مزرعه بادی بر روی باس میانی)

ظرفیت DFIG	مود بین ناحیه‌ای	میرایی	فرکانس
۱۸	$-0.0985 \pm j 3/0.462$	۰/۰۳۲۳۲	۰/۴۸۴۸
۳۰	$-0.0986 \pm j 3/0.69$	۰/۰۳۲۱	۰/۴۸۸۴
۵۰	$-0.0987 \pm j 3/1.12$	۰/۰۳۱۸	۰/۴۹۳۶
۱۰۰	$-0.12 \pm j 3/1122$	۰/۰۰۳۸۷	۰/۴۹۵۳
۱۵۰	$-0.06488 \pm j 3/2457$	۰/۰۲	۰/۵۱۶۶
۲۰۰	$-0.09176 \pm j 2/78$	۰/۰۲۷۲	۰/۵۳۶۶
۲۵۰	$-0.09718 \pm j 3/4634$	۰/۰۲۸۱	۰/۵۵۱۲

جدول (۴-۱۲) مودهای بین‌ناحیه‌ای سیستم (نصب مزرعه بادی در ناحیه دوم)

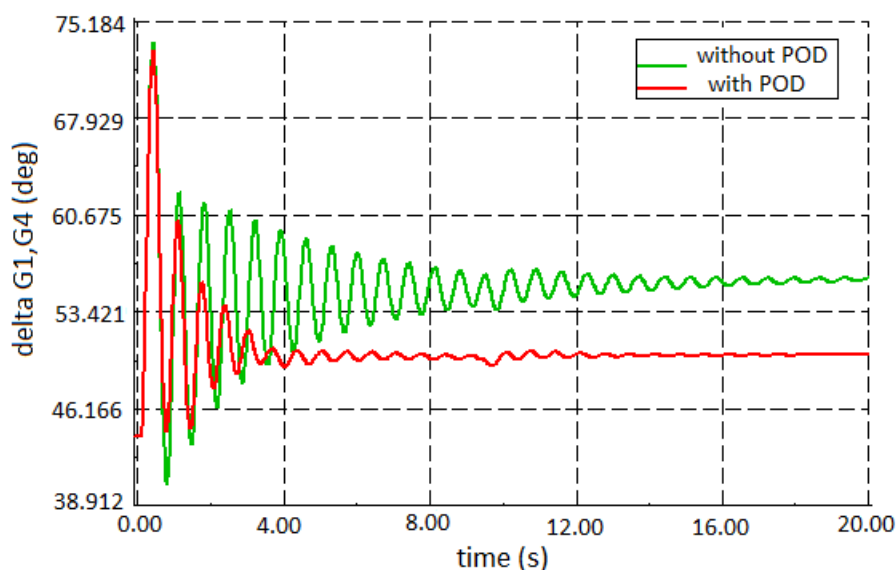
ظرفیت DFIG	مود بین ناحیه‌ای	میرایی	فرکانس
۱۸	$-0.73 \pm j 3/0.9$	۰/۲۳	۰/۴۹۲
۳۰	$-1/20.9 \pm j 3/521$	۰/۳۲۴۷	۰/۵۶۰۳
۵۰	$-1/6461 \pm j 4/220.3$	۰/۶۷۱۷	۰/۳۶۳۴
۱۰۰	$-0.7328 \pm j 5/938$	۰/۱۲۲	۰/۹۴۵۱
۱۵۰	$-0.6257 \pm j 5/80.59$	۰/۱۰۷۱	۰/۹۲۴
۲۰۰	$-0.578 \pm j 5/7784$	۰/۰۹۹۴	۰/۹۱۹۷

۴-۶-۲ شبیه سازی در حوزه زمان

در این بخش جهت مشاهده تأثیر POD نصب شده در DFIG بر روی پایداری دینامیکی

شبکه یک خطای اتصال کوتاه سه فاز بر روی یکی از خطوطی که بین باس ۸ و ۹ قرار دارد، ایجاد

می‌کنیم (خطا در $t=1$ رخ داده و پس از ۱۰۰ میلی ثانیه در $t=1.1s$ برطرف می‌شود).



شکل (۴-۱۶) تأثیر POD بر روی پایداری دینامیکی سیستم

شکل (۴-۱۶) اختلاف زاویه روتور ژنراتورهای ۱ و ۴ را نشان می‌دهد. با دقت در شکل همانطور که انتظار می‌رود می‌توان مشاهده کرد با نصب POD بر روی مبدل سمت روتور DFIG در توربین بادی، پایداری دینامیکی سیستم بهبود یافته و نوسانات بین ناحیه‌ای سیستم در مدت زمان کوتاه-تری میرا می‌شوند.

۷-۴ جمع‌بندی

در این فصل تأثیر نفوذ توان بادی بر روی نوسانات سیستم قدرت مورد بررسی قرار گرفت. این کار با مشاهده رفتار مقادیر ویژه در حالیکه نفوذ قدرت باد و فاصله مزرعه بادی از سیستم تست اول تغییر می‌کرد، انجام شد. با شبیه‌سازی سیستم تست در کل به این نتیجه رسیدیم که PSS در حالت‌های مختلف منجر به بهبود میرایی مدهای فرکانس پائین می‌شود، افزایش ظرفیت مزرعه بادی در یک فاصله مشخص از شبکه، موجب افزایش میرایی مدهای فرکانس پائین می‌شود، و افزایش فاصله مزرعه بادی از شبکه در یک ظرفیت مشخص منجر به کاهش میرایی این مدها

می‌شود، و POD نصب شده در DFIG منجر به بهبود میرایی مودهای بین ناحیه‌ای می‌شود.

فصل پنجم

نتیجه گیری و پیشنهادات

۱-۵ نتیجه گیری

در این پایان نامه، ابتدا مدل سازی سیستم قدرت، نحوه خطی سازی و آنالیز مودال آن از لحاظ تئوری بررسی شده است. سپس یک سیستم دو ناحیه ای و چهار ماشین در محیط نرم افزار دیگسایلنت شبیه سازی شده و تأثیر PSS را بر روی مودهای نوسانی فرکانس پائین بررسی کرده است. به این ترتیب که ابتدا در دو حالت بدون PSS و با PSS (برای تمام ژنراتورهای سنکرون شبکه) مقادیر ویژه و میرایی مودهای فرکانس پائین محاسبه شده است و مشاهده شد که PSS سبب بهبود پایداری و افزایش میرایی مودهای فرکانس پائین شده است. سپس با اعمال اغتشاش های مختلف، مودهای محلی و بین ناحیه ای سیستم تحریک شده، و سیستم در حوزه زمان شبیه سازی شده است. در ادامه به سیستم دو ناحیه ای و چهار ماشین ذکر شده یک مزرعه بادی در ناحیه اول اضافه شده و این بار پایداری سیستم در حضور نیروگاه بادی بررسی شد. به این ترتیب که به منظور تجزیه و تحلیل مودال سیستم تأثیر دو عامل مختلف، فاصله انتقال DFIG از شبکه و ظرفیت DFIG، بر روی سیستم بررسی شد و نتیجه ای که حاصل شد این بود که افزایش ظرفیت مزرعه بادی در یک فاصله مشخص از شبکه، موجب افزایش میرایی مودهای فرکانس پائین می شود، و افزایش فاصله مزرعه بادی از شبکه در یک ظرفیت مشخص منجر به کاهش میرایی این مودها می شود. در ادامه POD طراحی شده در فصل سوم مورد تست قرار گرفت و صحت عملکرد آن بر روی مودهای بین ناحیه ای از طریق تجزیه و تحلیل سیگنال کوچک و شبیه سازی حوزه زمان بررسی شد. در مطالعه بعدی با نصب مزرعه بادی یک بار بر روی باس میانی و بار دیگر بر روی یکی از باس های ناحیه دوم، میزان تأثیر آن بر روی مودهای بین ناحیه ای بررسی شد. و مشاهده شد که با نصب مزرعه بادی در ناحیه اول با افزایش ظرفیت آن تا مقدار ۱۰۰ مگاوات مودهای بین ناحیه ای پایدار می باشند اما با افزایش بیشتر ظرفیت مودها بین ناحیه ای ناپایدار می شوند زیرا در این

صورت توان زیادی از خط ارتباطی دو ناحیه عبود کرده که قابل تحمل نبوده و بنابراین منجر به ناپایداری موده‌های بین ناحیه‌ای می‌شود. با نصب مزرعه بادی در باس میانی دو ناحیه، با افزایش ظرفیت موده‌های بین ناحیه‌ای پایدار می‌مانند اما میزان میرایی آن‌ها نسبت به حالتی که مزرعه در ناحیه اول قرار داشت کمتر می‌شود. و در نهایت با نصب مزرعه بادی در ناحیه دوم مشاهده شد که با افزایش ظرفیت موده‌های بین ناحیه‌ای پایدار می‌مانند و میزان میرایی آن‌ها نسبت به حالتی که مزرعه در ناحیه اول قرار داشت به میزان چشمگیری افزایش می‌یابد. دلیل این امر را می‌توان اینگونه بیان کرد که از آنجایی جهت شارش توان در خط ارتباطی دو ناحیه، از سمت ناحیه اول به سمت ناحیه دوم است، قرار دادن مزرعه بادی در ناحیه دوم و افزایش ظرفیت آن تأثیری بر روی توان تای لاین نخواهد داشت و بنابراین افزایش ظرفیت منجر به ناپایداری مود بین ناحیه‌ای نمی‌شود.

۲-۵ پیشنهادات

برای انجام کار بیشتر در آینده موارد زیر پیشنهاد می‌گردد:

✓ محاسبه پارامترهای POD و PSS از طریق روش‌های هوشمند از قبیل الگوریتم ژنتیک، PSO

و غیره

✓ پیاده‌سازی انواع مختلف PSS برای ژنراتورهای سنکرون

مراجع:

1. Elkington K., (2012). PhD thesis, "The Dynamic Impact of Large Wind Farms on Power System Stability", KTH School of Electrical Engineering, Stockholm, Sweden.
2. <http://www.gwec.net>. [Online] 2016.
3. Doherty R, Mullane A, Nolan G, Burke DJ, Brison A, Omally M., (2010), "An assessment of the impact of wind generation on system frequency control", IEEE Transactions on Power System, 25, 1, pp. 452.
4. Fernandez RD, Mantz RJ, Battaioto PE., (2007), "Impact of wind farms on a power system: an eigenvalue analysis approach" Renewable Energy, 32, 4, pp. 1676.
5. Faried SO, Billinton R, Aboreshaid S., (2009) "Probabilistic evaluation of transient stability of a wind farm" IEEE Transaction on Energy Conversion, 24, 3, pp. 733.
6. Vittal E, Omally M, Keane A., (2010)," A steady-state voltage stability analysis of power systems with high penetrations of wind" IEEE Transaction on Energy Conversion, 26, 4, pp. 978.
7. Chattarejee Sh, Naithani A, Mukherjee V., (2016), "Small- signal stability analysis of DFIG based wind power system using teaching learning based optimization" Electrical Power and Energy Systems, 78, 5, pp. 672.
8. Miao Zh, Fan L, Osborn D, Yuvarajan S., (2009), "Control of DFIG-Based Wind Generation to Improve Interarea Oscillation Damping" IEEE Transactions on Energy Conversion, 24, 2, pp. 415.
9. Yang L, Yang GY, Xu Z, Dong Z Y, Wong K P, Ma X., (2009), "Optimal controller design of a doubly-fed induction generator wind turbine system for small signal stability enhancement" IET Generation, Transmission & Distribution, 4, 5 pp. 579.
10. Klein M, Rogers G J, Kundur P., (1991), "A Fundamental Study of Interarea Oscillations in Power Systems" Transactions on Power Systems, 6, 3, pp. 914.
11. Kundur P, (1994)., "Power Stability and Control" New York : McGraw-Hill.
12. Peter W, Suaer M A., (1998), "Power System Dynamics and Stability" New Jercey : Prentice Hall.
13. Mondal D, Chakrabarti A, Sengupta., (2014), "Power System Small Signal Stability Analysis and Control" Academic Press is an imprint of Elsevier.

14. Begovic M, Mirosevic B, Novosel D., (2002) "A Novel Method for Voltage Instability Protectio" Proceedings of the 35th Hawaii International Conference on System Sciences, 178.
15. Wu B, Lang Y, Zargari N, Kouro S., (2011), "Power Conversion and Control of Wind Energy Systems". New Jersey : John Wiley & sons.
16. Shahidehpour M, Eremia M., (2013), "Handbook of Electrical Power System Dynamics: Modelling, Stability, and Control" New Jersey : John Wiley & Sons.
17. He P, Wen F, Ledwich G, Xue Y., (2016), "An Investigation on Interarea Mode Oscillations of Interconnected Power Systems with Integrated Wind Farms" Electrical Power and Energy Systems, 78, pp. 148.
18. Bose, Bimal K., (2001), "Modern Power Electronics and AC Drives" Prentice Hall PTR.
19. Milano F., (2005), "An open source power system analysis toolbox" IEEE TRans Power Sys, pp. 1.
20. Slootweg J G, (2003). PhD thesis, "Wind Power:Modelling and Impact on Power System Dynamics" The Netherlands:Thecnical University of Delf.
21. Jing X., (2009). PhD thesis," Modeling and Control of a Doubly-Fed Induction Generator for Wind Turbines Generator Systems" Marquette University.
22. Gautam D, Vittal V, Harbout T., (2009), "Impact of increased penetration of DFIG-based wind turbine generators on transient and small signal stability of power systems" IEEE Trans on Power System, 24, 3, pp. 1426.
23. Tsourakis G, Nomikos B M, Vournas C D., (2009), " Contribution of Doubly Fed Wind Generators to Oscillation Damping" IEEE Trans Energy Conversion, 24, 3, pp. 783.
24. Tsourakis G, Nomikos B M, Vournas C D., (2009), "Effect of wind parks with doubly fed asynchronous generators on small signal stability" Electric Power Systems Research, 79, 1, pp.190.
25. Vowles DJ, Samarasinghe C, Gibbard MJ, Ancell G., (2008), "Effect of wind generation on small signal stability- A New Zealand Example" IEEE, pp.1.
26. Balarko Ch, Nilanjan R., (2014), "consideration toward coordinated control of dfig based wind farms"
27. Du W, Bo J, Cao J, and Wang HF., (2016), " A Methode to Examine the Impact of Grid Connection if the DFIGs on Power System Electromechanical Oscillation Modes" IEEE Trans on Power Sys, 32, 7, pp.145.

28. Singh M, Allen AJ, Muljadi E, Gevorgian V, Zhang Y, and Santoso S, (2014), " Interarea Oscillation Damping Controls for Wind Power Plants" IEEE Trans on Power Sys, 27, 4, pp. 642.
29. Li J, and Zhang XP, (2016), " Small Signal Stability of Fractional Frequency Transmisson System with Offshore Wind Farms" IEEE Trans on Sust Energy.
30. Rogerz, G., (2005), "Power System Oscillations" Kluwer Academic.
31. Durga G, (2010), PhD thesis, "Impact of Increased Penetration of DFIG Based Wind Turbine Generators on Rotor Angle Stability of Power Systems" ARIZONA STATE UNIVERSITY.
32. Anderson PM, Fouad AA., (2002), "Power System Control and Stability" New York : John Wiley & Sons.
33. Anca D, Sorensen P, Cutululis N, Blaabjerg, (2003), "Dynamic Wind Turbine Model in Power System Simulation Tool DigSILENT" Riso National Laboratory, Roskilde.

پیوست الف: اطلاعات سیستم دو ناحیه‌ای و چهار ماشینه

جدول (الف-۱) اطلاعات خطوط شبکه

شماره خط	از باس	به باس	R	X	B/2
۱	۵	۶	۰/۰۰۲۵	۰/۰۲۵	۰/۰۴۳۷۵
۲	۶	۷	۰/۰۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱۷۵
۳	۷	۸	۰/۰۱۱	۰/۱۱	۰/۱۹۲۵
۴	۸	۹	۰/۰۱۱	۰/۱۱	۰/۱۹۲۵
۵	۹	۱۰	۰/۰۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱۷۵
۶	۱۰	۱۱	۰/۰۰۲۵	۰/۰۲۵	۰/۰۴۳۷۵
۷	۱	۵	۰	۰/۱۵	۱
۸	۲	۶	۰	۰/۱۵	۱
۹	۳	۱۱	۰	۰/۱۵	۱
۱۰	۴	۱۰	۰	۰/۱۵	۱

جدول (الف-۲) اطلاعات ژنراتورهای شبکه

$H(s)$	T''_{q0} (s)	T'_{q0} (s)	T''_{d0} (s)	T'_{d0} (s)	x''_q	x'_q	x_q	x''_d	x'_d	x_d	R_a	x_l	
۶/۵	۰/۰۵	۴	۰/۰۳	۸	۰/۲۵	۰/۵۵	۱/۷	۰/۲۵	۰/۵۵	۱/۸	۰/۰۰۲۵	۰/۲	G_1, G_2
۶/۱۷۵	۰/۰۵	۴	۰/۰۳	۸	۰/۲۵	۰/۵۵	۱/۷	۰/۲۵	۰/۵۵	۱/۸	۰/۰۰۲۵	۰/۲	G_3, G_4

جدول (الف-۳) اطلاعات بارها

بار	P (MW)	Q (MVar)
L_7	۹۶۷	۱۰۰
L_9	۱۷۶۷	۱۰۰
C_7	۰	۲۰۰
C_9	۰	۳۵۰

جدول (الف-۴) اطلاعات سیستم تحریک ژنراتورها

K_F	T_E	K_E	T_A	K_A
۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۵	۰/۰۰۵	۲۰۰

جدول (الف-۵) اطلاعات PSS ژنراتورها

T_w	T_4	T_3	T_2	T_1	K_{pss}
۱۰	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۵	۰/۵	۵۰

جدول (الف-۶) اطلاعات پخش بار شبکه

$\delta(\text{deg})$	E_t (pu)	Q (MVAr)	P (MW)	
۲۰/۲	۱/۰۳	۱۸۵	۷۰۰	G_1
۱۰/۵	۱/۰۱	۲۳۵	۷۰۰	G_2
-۶/۸	۱/۰۳	۱۷۶	۷۱۹	G_3
-۱۷	۱/۰۱	۲۰۲	۷۰۰	G_4

پیوست ب: اطلاعات توربین بادی و DFIG

جدول (ب-۷) اطلاعات توربین بادی و DFIG

ω_s	1 pu	C	0.06 F
L_s	0.171 pu	R_{fg}	0.003 pu
r_s	0.00706 pu	L_{fg}	0.3 pu
L_m	3.5 pu	R_r	0.005 pu
L_r	0.156 pu	T_β	0.25 s
D_t	0.01 pu	K_{sh}	0.5
ω_r	1.1 pu	H_m	3.5 s
H_g	0.5 s	D_{sh}	0.01
ω_b	314 rad/s	T'_0	0.035 s
H_t	3 s	$V_{\omega rated}$	12 m/s

پیوست ج: معرفی نرم افزار دیگسایلنت

تهیه نرم افزار DigSILENT از سال ۱۹۷۶ در شرکت DigSILENT GmbH آلمان آغاز شده است. در حال حاضر بسیاری از شرکتها و دانشگاهها در داخل کشور این نرم افزار را دریافت نموده‌اند.

نرم افزار DigSILENT دارای یک محیط گرافیکی برای رسم دیاگرام تک خطی مدل‌های سیستم قدرت است و تمام توابع و عملگرهای حسابی آن از یک منوی اصلی قابل دسترس و اجرا هستند. توابع و عملگرهای نرم افزار بطور جامع بصورت زیر می‌باشند:

- وارد یا اصلاح کردن بخش‌هایی از سیستم قدرت بر اساس یک متن یا به روش

گرافیکی

- کار با دیاگرام‌های تک خطی
 - ویرایش مؤلفه‌های سیستم قدرت
 - مدیریت پایگاه داده
 - انتخاب گزینه‌های طراحی سیستم قدرت
 - اجرای محاسبات
 - گزارش‌گیری و چاپ نتایج
- محاسبات اصلی قابل اجرا توسط این نرم افزار عبارتند از:

- پخش بار
- پخش بار بهینه
- اتصال کوتاه
- تحلیل شبکه ولتاژ پائین
- بهینه‌سازی شبکه توزیع
- تحلیل هارمونیک
- تحلیل قابلیت اطمینان
- شبیه‌سازی دینامیکی سیستم قدرت و حالت گذرای الکترومغاطیسی

این نرم افزار دارای یک زبان برنامه نویسی به نام DPL (DigSILENT Programming Language) است که امکان ارتباط با المان‌ها در برنامه DigSILENT را به کاربر می‌دهد. در حقیقت زبان DPL بعد دیگری به نرم افزار DigSILENT اضافه می‌کند که آن امکان اضافه نمودن توابع جدید محاسباتی توسط کاربر می‌باشد.

Abstract

Wind farms have been increasingly integrated into power systems over the decades because of the global energy crisis and the pressure on environmental protection. Nowadays, the installation of wind power energy has moved from small wind farms with a few wind turbines to large wind farms with more than hundreds of MW of capacity. Accordingly, the installation voltage level has been increased from low voltage to high voltage. With increase in the penetration level of the wind farms, the effect of the wind farm on the dynamic of the power system has been extensively increased. Given these backgrounds, a comprehensive investigation on the impacts of wind farms on power system stability are undertaken in this thesis considering stable penetrations of wind farms into power systems. In this thesis firstly, the modeling of power system, doubly fed induction generator (DFIG) wind turbine, and control strategy for the DFIG are described. After that, a power oscillation damping (POD) is designed for DFIG which aims to increase the damping of inter area oscillations. In the simulation part, a two-area four-machine power system for two case of with and without wind farm are studied and the effects of several factors, including the DFIG transmission distance and DFIG capacity, on the low frequency oscillations characteristics of the interconnected two area power system are studied. The test system is simulated in DigSILENT Power Factory environment and modal analysis and dynamic time domain simulations have been carried out. The simulation results analysis show that with increasing DFIG transmission distance, the damping of low frequency oscillations is decreased. Also the results indicate that with increasing DFIG capacity, the damping of low frequency oscillations is increased. In addition, the results show that the POD improves the damping of inter area oscillations.

Key words: power system; low frequency oscillation; wind farm; DFIG; modal analysis; inter area oscillations.



Shahrood University of Technology

Faculty of Electrical Engineering and Robotics

M.Sc. Thesis in Power Systems Engineering

**Impacts of Wind Farms on Low Frequency Oscillations in
Power Systems**

By:

Arezoo Rasooli

Supervisor:

Dr. Mahdi Banejad

Advisor:

Dr. Ali Hesami Naghshbandi

February 2017