





دانشکده مهندسی برق و رباتیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی سیستم‌های قدرت

تحلیل عملکرد یک ریزشبه DC به عنوان یک ماشین سنکرون مجازی در هنگام کار با شبکه AC

نگارنده: فرزانه شورکشتی

استاد راهنما:

دکتر مهدی بانژاد

اساتید مشاور:

دکتر علی اکبرزاده کلات

دکتر محمد حسین تبار مرزبالی

تیر ۱۳۹۹



دانشگاه صنعتی شاهرود

مدیریت تحصیلات تکمیلی

باسمه تعالی

شماره:

تاریخ:

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم فرزانه شورکشتی با شماره دانشجویی ۹۵۰۸۷۶۴ رشته برق قدرت گرایش سیستم‌های قدرت تحت عنوان: تحلیل عملکرد یک ریزشبه DC به عنوان یک ماشین سنکرون مجازی در هنگام کار با شبکه AC که در تاریخ ۹۹/۴/۱۶ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

- الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰ ☐ (ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸/۹۹ - ۱۸ ☐
- ج) درجه خوب: نمره ۱۷/۹۹ - ۱۶ ☐ (د) درجه متوسط: نمره ۱۵/۹۹ - ۱۴ ☐
- ه) کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد ☐
- نوع تحقیق: نظری ☐ عملی ☐

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول			
۲- استاد راهنمای دوم			
۳- استاد مشاور			
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی			
۵- استاد ممتحن اول			
۶- استاد ممتحن دوم			

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تقدیم

خدای رابی شاکرم که از روی کرم، پدر و مادری فداکار نسیم ساخته تا در سایه درخت پربار وجودشان
بیاییم و از ریشه آن ها شاخ و برگ گیریم و از سایه وجودشان در راه کسب علم و دانش تلاش نمایم.
والدینی که بودنشان تاج افتخاری است بر سرم و نامشان دلیلی است بر بودنم، چرا که این دو وجود، پس
از پروردگار، مایه هستی ام بوده اند و دستم را گرفتند و راه رفتن را در این وادی زندگی پر از فراز و نشیب
آموختند. آموزگارانی که برایم زندگی، بودن و انسان بودن را معنا کردند.
تقدیم به وجود باارزشان...

شکر و قدردانی

سپاس ایزدمنان که توفیق گام نهادن در مسیر دانش را به من عنایت نمود و فرصتی معتنم داد تا به اقتضای توان و وسع خود مسیر تکامل و تعالی گامی دیگر بردارم. اکنون که به خواست خداوند و به یاری بسیاری از عزیزان مراحل انجام این پایان نامه به اتمام رسیده است بر خود لازم می دانم از کلیه افرادی که به نحوی مراد انجام این پایان نامه یاری رسانند تقدیر و تشکر نمایم.

از استاد گرامی جناب آقای دکتر مهدی باشراد که افتخار نگاردی ایشان را داشته‌ام و راه‌ها و راهگشای اینجانب در اتمام این پایان نامه بودند و استاد کرانه‌دو دکتر محمد حسین تبار مرزبالی که زحمت مشاوره و این پایان نامه را بر عهده گرفتند و در کمال سه صدر، با حسن خلق و فروتنی از هیچ‌کمی در این عرصه دریغ ننمودند و وقت گران بهای خود را در اختیارم نهادند و استاد گرامی آقای دکتر علی اکبر زاده کلات که زحمت مشاوره بنده را کشیدند کمال تشکر و قدردانی را دارم.

از خانواده و دوستان عزیزم که لمس حضورشان گذر از این راه را بر ایم هموار نمود و محطه محطه همرایشان و هدایشان با من بود بسیار سپاسگذارم.

اینجانب **فرزانه شورکشتی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته برق - قدرت دانشکده برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه تحلیل عملکرد یک ریزشبکه DC به عنوان یک ماشین سنکرون مجازی در هنگام کار با شبکه AC تحت راهنمایی جناب آقای دکتر مهدی بانزاد متعهد می‌شوم که:

✓ 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 بودند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت میگردد.

✓ استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

تاریخ

امضای دانشجو

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) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر می‌شود.

چکیده:

در سال‌های اخیر با توجه به بحران‌های زیست‌محیطی و کمبود منابع فسیلی استفاده از منابع تجدیدپذیر مورد توجه است. استفاده از منابع تجدیدپذیر در سیستم قدرت تولید را غیرمتمرکز کرده و با توجه به طبیعت متغیر این منابع، نوسانات زیادی در شبکه اضافه شده است. ریزشبه‌های DC به‌عنوان یک شبکه قدرت کوچک، امکان استفاده و کنترل این منابع در سمت توزیع را آسان کرده‌اند. نفوذ زیاد منابع تجدیدپذیر مبتنی بر مبدل‌های الکترونیک قدرت، اینرسی و میرایی را کاهش داده‌اند؛ بنابراین، سیستم‌های جدید به اغتشاشات حساس‌تر شده و حاشیه پایداری سیستم کاهش یافته است. در این پایان‌نامه از یک ریزشبه DC متصل به شبکه AC که به ماشین سنکرون مجازی مجهز است، به‌منظور مدیریت توان خودکار ریزشبه DC و شبکه AC و تحلیل نقش اینرسی مجازی در پایداری سیگنال کوچک استفاده شده است. برای تایید روش مذکور شبکه تحت حالت‌ها و اینرسی‌های مختلف مورد بررسی و تایید قرار گرفته است. در این روش با استفاده از پاسخ مبدل منبع ولتاژ و با طراحی مناسب کنترل افقی دوگانه و همچنین به کمک کنترل‌کننده‌های ولتاژ و فرکانس، پشتیبانی لازم جهت تنظیم فرکانس و توان اکتیو در هنگام مواجهه با اغتشاشات فراهم می‌شود و پایداری شبکه در شرایط مختلف کاری بهبود می‌یابد.

کلمات کلیدی: ماشین سنکرون مجازی، ریزشبه DC، اینرسی مجازی، مبدل منبع ولتاژ، ذخیره‌ساز انرژی

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه

- ۱-۱ پیش گفتار ۲
- ۲-۱ ضرورت انجام کار ۳
- ۳-۱ اهداف پایان نامه ۴
- ۴-۱ ساختار پایان نامه ۴

فصل دوم: مفاهیم اساسی در ریز شبکه ها

- ۱-۲ مقدمه ۶
- ۲-۲ تولیدات پراکنده ۶
- ۱-۲-۲ انواع منابع تولیدات پراکنده ۷
- ۱-۲-۲-۱ منابع انرژی تجدیدپذیر ۸
- ۲-۲-۲ مزایای تولیدات پراکنده ۱۰
- ۱-۲-۲-۲ مزایای فنی تولیدات پراکنده ۱۰
- ۲-۲-۲-۲ مزایای اقتصادی تولیدات پراکنده ۱۰
- ۳-۲ ریز شبکه ۱۱
- ۱-۳-۲ انواع ریز شبکه ۱۴

۱۴	 ریز شبکه AC ۱-۱-۳-۲
۱۴	 ریز شبکه DC ۲-۱-۳-۲
۱۶	 ریز شبکه های هیبرید AC-DC ۳-۱-۳-۲
۱۶	 کنترل ریز شبکه ۲-۳-۲
۱۷	 انواع مبدل های ریز شبکه ۳-۳-۲
۱۷	 مبدل تشکیل دهنده شبکه ۱-۳-۳-۲
۱۸	 مبدل تغذیه کننده شبکه ۲-۳-۳-۲
۱۹	 مبدل پشتیبان کننده شبکه ۳-۳-۳-۲
۲۰	 جمع بندی ۴-۲

فصل سوم: استاده از ماشین سنکرون مجازی در کنترل فرکانس و ولتاژ شبکه

۲۲	 مقدمه ۱-۳
۲۲	 معرفی ماشین سنکرون مجازی و مروری بر کارهای گذشته ۲-۳
۲۶	 ساختار ماشین سنکرون مجازی ۳-۳
۲۷	 معادلات دینامیکی ماشین سنکرون ۴-۳
۲۸	 کنترل فرکانس در سیستم های قدرت متداول ۵-۳
۲۹	 پاسخ اینرسی ۱-۵-۳
۲۹	 کنترل اولیه فرکانس ۲-۵-۳
۳۰	 کنترل ثانویه فرکانس (AGC) ۳-۵-۳

- ۳-۵-۴ کنترل ثالثیه یا اضطراری فرکانس ۳۰
- ۳-۶ کنترل فرکانس و ولتاژ با استفاده از کنترل کننده افتی ۳۱
- ۳-۷ ماشین سنکرون مجازی مورد مطالعه ۳۴
- ۳-۸ کنترل فرکانس در ماشین سنکرون مجازی ۳۵
- ۳-۸-۱ پشتیبانی اینرسی ۳۷
- ۳-۸-۲ ضریب میرایی ۳۹
- ۳-۹ کنترل ولتاژ ۳۹
- ۳-۱۰ کنترل افتی دوگانه ۴۰
- ۳-۱۰-۱-۱ کنترل افتی اولیه ۴۰
- ۳-۱۰-۱-۲ کنترل افتی ثانویه ۴۲
- ۳-۱۱ سیستم فتوولتائیک ۴۳
- ۳-۱۲ توربین بادی ۴۴
- ۳-۱۳ سیگنال کوچک ۴۵
- ۳-۱۴ جمع بندی ۴۹

فصل چهارم: تحلیل و بررسی اثر ماشین سنکرون مجازی بر روی شبکه مورد مطالعه

- ۴-۱ مقدمه ۵۲
- ۴-۲ سیستم مورد مطالعه ۵۲
- ۴-۲-۱ تحلیل پایداری شبکه با استفاده از مکان هندسی ریشه ها ۵۷

۴-۲-۲	کنترل ریزش شبکه DC شامل باتری و سلول فتوولتائیک و بار	۵۹
۴-۲-۲-۱	حالت اول: قطع و وصل سلول فتوولتائیک	۵۹
۴-۲-۲-۲	حالت دوم: قطع و وصل بار	۶۳
۴-۲-۲-۳	حالت سوم: کاهش و افزایش بار	۶۵
۴-۳	کنترل ریزش شبکه DC شامل باتری، سلول فتوولتائیک، توربین بادی و بار	۶۸
۴-۳-۱	حالت اول: قطع و وصل سلول فتوولتائیک	۷۲
۴-۳-۲	حالت دوم: قطع و وصل توربین بادی	۷۶
۴-۳-۳	حالت سوم: قطع و وصل بار	۷۸
۴-۳-۴	حالت چهارم: کاهش و افزایش بار	۸۱
۴-۳-۵	حالت پنجم: سلول فتوولتائیک قطع و توان توربین بادی متفاوت	۸۴
۴-۴	جمع بندی	۸۷

فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات

۵-۱	نتیجه گیری	۹۲
۵-۲	پیشنهادات	۹۲
	مراجع	۹۵

فهرست شکل؛

- شکل (۱-۲): سهم تولید برق از انرژی تجدید پذیر در ۱۰ کشور برتر در سال ۲۰۱۸ [۱۵] ۱۰
- شکل (۲-۲): نمای کلی یک ریزشبكة [۲۹] ۱۳
- شکل (۳-۲): ساختار ریزشبكة AC [۳۰] ۱۴
- شکل (۴-۲): ساختار ریزشبكة DC [۳۰] ۱۶
- شکل (۵-۲): مبدل تشکیل دهنده شبکه [۳۸] ۱۸
- شکل (۶-۲): مبدل تغذیه کننده شبکه [۳۸] ۱۸
- شکل (۷-۲): مبدل پشتیبان کننده شبکه بر اساس منبع جریان [۳۸] ۲۰
- شکل (۸-۲): مبدل پشتیبان کننده شبکه بر اساس منبع ولتاژ [۳۸] ۲۰
- شکل (۱-۳): ساختار یک VSM [۷۶] ۲۶
- شکل (۲-۳): یک ماشین سنکرون متداول [۴۵] ۲۷
- شکل (۳-۳): مراحل کنترل فرکانس در شبکه قدرت [۷۹] ۳۰
- شکل (۴-۳): در نظر گرفتن مبدل به عنوان یک منبع وابسته متصل به شبکه AC ۳۱
- شکل (۵-۳): مشخصه افتی در شبکه عمدتاً سلفی ۳۳
- شکل (۶-۳): ساختار کلی VSM و ریزشبكة DC با استراتژی کنترل ۳۴
- شکل (۷-۳): مدار قدرت ماشین سنکرون مجازی ۳۶
- شکل (۸-۳): استراتژی دقیق کنترل VSM ۳۶
- شکل (۹-۳): کنترل افتی دوگانه [۸۳] ۴۰
- شکل (۱۰-۳): کنترل کننده باتری [۸۳، ۸۵] ۴۲
- شکل (۱۱-۳): مبدل باک-بوست دوطرفه باتری [۱۰۳] ۴۲
- شکل (۱۲-۳): مدار کنترلی سلول فتوولتائیک ۴۳

- شکل (۳-۱۳): مبدل DC/DC افزاینده سلول فتوولتائیک [۱۰۳] ۴۳
- شکل (۳-۱۴): مدار کنترلی توربین بادی ۴۵
- شکل (۳-۱۵): بلوک دیاگرام کلی شبکه ۴۸
- شکل (۴-۱): شبکه مورد مطالعه ۵۳
- شکل (۴-۲): ساختار گسترده شبکه مورد مطالعه ۵۴
- شکل (۴-۳): مکان هندسی ریشه های شبکه به ازای تغییرات Jv ۵۷
- شکل (۴-۴): مکان هندسی ریشه های شبکه به ازای تغییرات $R\omega$ ۵۷
- شکل (۴-۵): نتایج شبیه سازی شبکه با روش مرجع [۸۳] و روش پیشنهادی در حالت قطع و وصل سلول فتوولتائیک ۶۰
- شکل (۴-۶): تغییرات توان شبکه AC با قطع و وصل سلول فتوولتائیک الف: $Jv = 4.24$ ۶۰
- ب: $Jv = 1.06$ ۶۰
- شکل (۴-۷): تغییرات توان سلول فتوولتائیک با قطع و وصل سلول فتوولتائیک الف: $Jv = 4.24$ ۶۰
- ب: $Jv = 1.06$ ۶۱
- شکل (۴-۸): تغییرات فرکانس زاویه ای با قطع و وصل سلول فتوولتائیک الف: $Jv = 4.24$ ۶۱
- ب: $Jv = 1.06$ ۶۱
- شکل (۴-۹): تغییرات ولتاژ DC با قطع و وصل سلول فتوولتائیک الف: $Jv = 4.24$ ب: $Jv = 1.06$ ۶۱
- ۶۱
- شکل (۴-۱۰): تغییرات توان باتری با قطع و وصل سلول فتوولتائیک الف: $Jv = 4.24$ ب: $Jv = 1.06$ ۶۲
- ۶۲
- شکل (۴-۱۱): تغییرات توان شبکه AC با قطع و وصل بار الف: $Jv = 4.24$ ب: $Jv = 1.06$ ۶۳
- شکل (۴-۱۲): تغییرات توان بار با قطع و وصل بار الف: $Jv = 4.24$ ب: $Jv = 1.06$ ۶۳
- شکل (۴-۱۳): تغییرات فرکانس زاویه ای با قطع و وصل بار الف: $Jv = 4.24$ ب: $Jv = 1.06$ ۶۴

شکل (۴-۱۴): تغییرات ولتاژ DC با قطع و وصل بار الف: $Jv = 4.24$ ب: $Jv = 1.06$ ۶۴

شکل (۴-۱۵): تغییرات توان باتری با قطع و وصل بار الف: $Jv = 4.24$ ب: $Jv = 1.06$ ۶۴

شکل (۴-۱۶): تغییرات توان شبکه AC با کاهش و افزایش بار الف: $Jv = 4.24$ ب: $Jv = 1.06$.. ۶۶

شکل (۴-۱۷): تغییرات توان بار با کاهش و افزایش بار الف: $Jv = 4.24$ ب: $Jv = 1.06$ ۶۶

شکل (۴-۱۸): تغییرات فرکانس زاویه ای با کاهش و افزایش بار الف: $Jv = 4.24$ ب: $Jv = 1.06$ ۶۶

شکل (۴-۱۹): تغییرات ولتاژ DC با کاهش و افزایش بار الف: $Jv = 4.24$ ب: $Jv = 1.06$ ۶۷

شکل (۴-۲۰): تغییرات توان باتری با کاهش و افزایش بار الف: $Jv = 4.24$ ب: $Jv = 1.06$ ۶۷

شکل (۴-۲۱): شبکه مورد مطالعه با اضافه شدن توربین بادی ۶۹

شکل (۴-۲۲): ساختار گسترده شبکه مورد مطالعه با اضافه شدن توربین بادی ۷۰

شکل (۴-۲۳): مقایسه نتایج شبکه با اینرسی توربین بادی و بدون آن ۷۲

شکل (۴-۲۴): تغییرات توان شبکه AC با قطع و وصل سلول فتوولتائیک با حضور توربین بادی
الف: $Jv = 4.24$ ب: $Jv = 1.06$ ۷۳

شکل (۴-۲۵): تغییرات سلول فتوولتائیک با قطع و وصل سلول فتوولتائیک با حضور توربین بادی
الف: $Jv = 4.24$ ب: $Jv = 1.06$ ۷۳

شکل (۴-۲۶): تغییرات فرکانس زاویه ای با قطع و وصل سلول فتوولتائیک حضور توربین بادی
الف: $Jv = 4.24$ ب: $Jv = 1.06$ ۷۴

شکل (۴-۲۷): تغییرات ولتاژ DC با قطع و وصل سلول فتوولتائیک با حضور توربین بادی
الف: $Jv = 4.24$ ب: $Jv = 1.06$ ۷۴

شکل (۴-۲۸): تغییرات توان باتری با قطع و وصل سلول فتوولتائیک با حضور توربین بادی
الف: $Jv = 4.24$ ب: $Jv = 1.06$ ۷۴

شکل (۴-۲۹): تغییرات توان شبکه AC با قطع و وصل توربین بادی الف: $Jv = 4.24$ ب: $Jv = 1.06$ ۷۶

شکل (۴-۳۰): تغییرات توان توربین بادی با قطع و وصل توربین بادی الف: $Jv = 4.24$

ب: $Jv = 1.06$ ۷۶

شکل (۴-۳۱): تغییرات فرکانس زاویه‌ای با قطع و وصل توربین بادی الف: $Jv = 4.24$

ب: $Jv = 1.06$ ۷۶

شکل (۴-۳۲): تغییرات ولتاژ DC با قطع و وصل توربین بادی الف: $Jv = 4.24$ ب: $Jv = 1.06$. ۷۷

شکل (۴-۳۳): تغییرات توان باتری با قطع و وصل توربین بادی الف: $Jv = 4.24$ ب: $Jv = 1.06$ ۷۷

شکل (۴-۳۴): تغییرات توان شبکه AC با قطع و وصل بار با حضور توربین بادی الف: $Jv = 4.24$

ب: $Jv = 1.06$ ۷۸

شکل (۴-۳۵): تغییرات توان بار با قطع و وصل بار با حضور توربین بادی الف: $Jv = 4.24$

ب: $Jv = 1.06$ ۷۹

شکل (۴-۳۶): تغییرات فرکانس زاویه‌ای با قطع و وصل بار با حضور توربین بادی الف: $Jv = 4.24$

ب: $Jv = 1.06$ ۷۹

شکل (۴-۳۷): تغییرات ولتاژ DC با قطع و وصل بار با حضور توربین بادی الف: $Jv = 4.24$

ب: $Jv = 1.06$ ۷۹

شکل (۴-۳۸): تغییرات توان باتری با قطع و وصل بار با حضور توربین بادی الف: $Jv = 4.24$

ب: $Jv = 1.06$ ۸۰

شکل (۴-۳۹): تغییرات توان شبکه AC با کاهش و افزایش بار با حضور توربین بادی الف: $Jv = 4.24$

ب: $Jv = 1.06$ ۸۰

شکل (۴-۴۰): تغییرات توان بار با کاهش و افزایش بار با حضور توربین بادی الف: $Jv = 4.24$

ب: $Jv = 1.06$ ۸۲

شکل (۴-۴۱): تغییرات فرکانس زاویه‌ای با کاهش و افزایش بار با حضور توربین بادی الف: $Jv = 4.24$

ب: $Jv = 1.06$ ۸۲

- شکل (۴-۴۲): تغییرات ولتاژ DC با کاهش و افزایش بار با حضور توربین بادی الف: $Jv = 4.24$
- ب: $Jv = 1.06$ ۸۲
- شکل (۴-۴۳): تغییرات توان باتری با حضور توربین بادی الف: $Jv = 4.24$ ب: $Jv = 1.06$ ۸۳
- شکل (۴-۴۴): تغییرات توان شبکه AC با تغییرات سرعت توربین بادی ۸۴
- شکل (۴-۴۵): تغییرات توان توربین بادی با تغییرات سرعت توربین بادی ۸۵
- شکل (۴-۴۶): تغییرات ولتاژ DC با تغییرات سرعت توربین بادی ۸۵
- شکل (۴-۴۷): تغییرات فرکانس زاویه ای با تغییرات سرعت توربین بادی ۸۵
- شکل (۴-۴۸): تغییرات توان باتری با تغییرات سرعت توربین بادی ۸۶

فهرست جدول؛

- جدول (۱-۴): مشخصات شبکه مورد مطالعه [۸۳] ۵۵
- جدول (۲-۴): مشخصات باتری [۸۳] ۵۶
- جدول (۳-۴): مشخصات سلول فتوولتائیک ۵۶
- جدول (۴-۴): نتایج قطع و وصل سلول فتوولتائیک ۶۳
- جدول (۵-۴): نتایج قطع و وصل بار ۶۵
- جدول (۶-۴): نتایج کاهش و افزایش بار ۶۸
- جدول (۷-۴): مشخصات توربین بادی ۷۱
- جدول (۸-۴): نتایج قطع و وصل سلول فتوولتائیک در حضور توربین بادی ۷۵
- جدول (۹-۴): نتایج قطع و وصل توربین بادی ۷۸
- جدول (۱۰-۴): نتایج قطع و وصل بار در حضور توربین بادی ۸۱
- جدول (۱۱-۴): نتایج کاهش و افزایش بار در حضور توربین بادی ۸۴
- جدول (۱۲-۴): نتایج کاهش و افزایش سرعت باد ۸۷

فصل اول

مقدمه

۱-۱ پیش‌گفتار

در اواخر دهه ۱۸۷۰ میلادی استفاده تجاری از برق آغاز شد و توماس ادیسون نخستین سیستم تولید و توزیع در سپتامبر سال ۱۸۸۲ میلادی در شهر نیویورک پایه‌ریزی کرد. اساس کار این سیستم ولتاژ و جریان مستقیم بود که توان مورد نیاز ۵۹ مشتری را در منطقه‌ای به شعاع ۱/۵ کیلومتر فراهم می‌کرد. در سال ۱۸۸۶ میلادی محدودیت‌های سیستم‌های جریان مستقیم پیدا گردید و سیستم‌های جریان متناوب جایگزین این دستگاه‌ها گردیدند [۱]. سال‌ها بعد این سیستم‌ها به یکدیگر متصل شدند تا بتوانند بازده تولید برق با استفاده از نیروگاه‌های بزرگ بالا ببرند و توان را در مسافت طولانی منتقل نمایند. این سیستم‌ها به مرور پیشرفت کردند تا جایی که در حال حاضر سیستم‌های قدرت پیچیده‌ترین و بزرگ‌ترین ساخته‌های دست بشر تبدیل گردیده است [۲].

توان الکتریکی در نیروگاه‌ها تولید می‌شود و از طریق شبکه پیچیده که شامل خطوط انتقال، ترانسفورماتورها و ابزار کلیدزنی به مصرف‌کننده‌ها منتقل می‌شود. شبکه انتقال به زیرسیستم‌ها زیر تقسیم می‌شود [۱]:

۱. سیستم انتقال

۲. سیستم انتقال ثانویه (زیر انتقال)

۳. سیستم توزیع

در سراسر جهان، سیستم‌های قدرت متداول با مشکلاتی از قبیل اتمام تدریجی سوخت‌های فسیلی، بازده پایین انرژی و آلودگی زیست محیطی مواجه می‌باشند. این مشکلات سبب گرایش به تولید توان در سطح ولتاژ توزیع با استفاده از منابع انرژی غیرمتداول و تجدیدپذیر^۱ مانند انرژی باد، سلول‌های

^۱ Renewable

فتوولتائیک (PV)^۱، پیل‌های سوختی (FC)^۲، سیستم‌های ترکیب گرما و توان (CHP)^۳ و میکروتوربین‌ها^۴ (MT) در سیستم قدرت گردیده است. این نوع از تولید توان، تولیدات پراکنده (DGs)^۵ نامیده می‌شود. واژه تولیدات پراکنده به منظور تشخیص این مفهوم تولید توان از نوع متداول مرکزی ابداع شده است. با استفاده از تولید پراکنده، شبکه‌های توزیع دیگر صرفاً مصرف‌کننده توان نبوده و می‌توانند در تولید توان نیز مشارکت نمایند، از این رو مفهومی تحت عنوان شبکه توزیع فعال^۶ مطرح می‌شود [۳-۵]. منابع تولیدات پراکنده می‌توانند در قالب یک ریزشبکه^۷ جمع شوند و به‌طور محلی به تغذیه بارها بپردازند. ریزشبکه‌ها می‌توانند به دو حالت عملکردی متصل به شبکه اصلی^۸ یا جزیره‌ای^۹ از آن عمل کنند و زمان خاموشی شبکه برق به‌صورت جزیره‌ای بارهای محلی و بحرانی را به‌طور پیوسته تغذیه کنند [۶-۷].

در سال‌های اخیر، استفاده از ریزشبکه‌های AC متداول شده است و همراه آن تحقیقات زیادی در زمینه استفاده از ریزشبکه‌های DC صورت گرفته است. یکی از نکات مهم در سال‌های اخیر، به‌کارگیری هم‌زمان شبکه‌های DC با شبکه‌های AC است. به عبارت دیگر مطلوب است که در هنگام استفاده از شبکه‌های DC در شبکه‌های AC هماهنگی بهتری صورت گیرد.

۱-۲ ضرورت انجام کار

در این پایان‌نامه موضوع تجمیع یک ریزشبکه DC با شبکه AC مطرح می‌شود تا بتوان با انتخاب یک استراتژی کنترل مناسب بهره‌برداری مطلوب‌تر از ریزشبکه DC را انجام داد و ریزشبکه در تنظیم پارامترهای مهم شبکه مانند ولتاژ و فرکانس با توجه به تغییرات نقطه کار، بتواند نقش بهتری را ایفا

^۱ Photovoltaic (PV)

^۲ Fuel Cell (FC)

^۳ Combined Heat and Power Systems

^۴ Microturbine (MT)

^۵ Distributed Generation's (DGs)

^۶ Active Distribution Network Cell (ADNC)

^۷ Microgrid (MG)

^۸ Grid-connected (GC)

^۹ Island

کند.

۳-۱ اهداف پایان نامه

- الف- ادغام ریزشبكة DC با شبکه AC با استفاده از ماشین سنکرون مجازی
- ب- تحلیل میزان مشارکت شبکه DC در کنترل ولتاژ و فرکانس
- ج - استفاده از کنترل افقی^۱ در کنترل کننده های شبکه DC متشکل از DG های مختلف

۴-۱ ساختار پایان نامه

فصل دوم این پایان نامه به معرفی ساختار و اجزا ریزشبكة DC و AC و مروری بر مفاهیم اصلی آن می پردازد.

در فصل سوم مفهوم ماشین سنکرون مجازی شامل نحوه عملکرد، مدل سازی و پیاده سازی آن و همچنین در مورد نحوه اتصال ریزشبكة DC به شبکه AC توضیح داده می شود. علاوه بر این کنترل افقی دوگانه در کنترل فرکانس و باتری در این فصل تشریح می شود.

در فصل چهارم عملکرد ماشین سنکرون مجازی در هنگام اتصال به شبکه AC مورد نظر با نرم افزار MATLAB/ SIMULINK شبیه سازی و بررسی می شود.

در فصل پنجم نتیجه گیری و همچنین پیشنهادات جهت انجام کارهای بعدی بیان می شود.

^۱ Droop Control

فصل دوم:

مفاهیم اساسی در شبکه‌ها

۱-۲ مقدمه

سیستم‌های قدرت فعلی با چالش‌هایی از قبیل فرسودگی مواجه هستند. از سوی دیگر جوامع مدرن بشری نیازمند به یک منبع انرژی ایمن و باکیفیت است. مسائل زیست‌محیطی و نگرانی از اتمام منابع تجدیدناپذیر نیز موجب گردیده است که نیاز به منابع انرژی جدید پیش از پیش احساس شود. استفاده گسترده از منابع انرژی تجدیدپذیر^۱ با توجه به ساختار فعلی سیستم قدرت قابل پیاده‌سازی نیست چرا که این امر نیاز به استراتژی‌های کنترلی پیچیده و انتقال داده‌ها در سطح وسیع را دارد. هزینه‌های هنگفت توسعه و بازسازی شبکه‌های قدرت و نیازهایی که پیش‌تر بدان اشاره شده سبب گردیده است که راه‌حل‌های نوآورانه و جدید مطرح گردند [۸-۹]. یکی از مفاهیمی که در شبکه‌های قدرت آینده فراوان مورد استفاده قرار خواهد گرفت ریزشبکه است که در این فصل به معرفی آن و برخی از ساختارهای مهم آن پرداخته شده است.

۲-۲ تولیدات پراکنده

در سراسر جهان کشورهای مختلف با توجه به نرخ تولید توان و سطح ولتاژ تولیدی، تعاریف مختلفی برای تولید پراکنده ارائه داده‌اند. موسسه مهندسان برق و الکترونیک^۲ (IEEE)، تولید برق توسط منابعی که بسیار کوچک‌تر از نیروگاه مرکزی می‌باشند و در محل مصرف می‌توانند نصب شوند، را عنوان تولید پراکنده معرفی کرده‌اند. آژانس بین‌المللی انرژی^۳ (IEA)، منابع تولیدکننده توان در محل مصرف یا در داخل شبکه توزیع که توان را مستقیماً به شبکه توزیع محلی تزریق می‌کند را به‌عنوان DG معرفی کرده‌اند و انجمن بین‌المللی شبکه‌های بزرگ الکتریکی^۴ (CIRED) شرط قابل کنترل نبودن از راه دور برای این منابع را اشاره کرده‌اند [۱۰-۱۱]. صرف نظر از تفاوت‌هایی که میان این تعاریف وجود دارد، اثر

^۱ Renewable Energy Sources(RES)

^۲ Institute of Electrical and Electronics Engineers(IEEE)

^۳ International Energy Agency(IEA)

^۴ International Council on Large Electric Systems

DG ها به طور معمول بر روی سیستم قدرت یکسان است. با توجه به مطالعاتی که صورت پذیرفته است برخی از ویژگی های DG ها به شرح زیر است [۳]:

- ظرفیت تولید آن ها به طور معمول کمتر از ۵۰ MW است.
- با توجه به ماهیت متغیر منابع انرژی تجدیدپذیر امکان برنامه ریزی قطعی برای این واحدها وجود ندارد.
- منابع تولید پراکنده عموماً به سیستم های توزیع متصل می گردند، از این رو ولتاژ بهره برداری آن ها در سطح ولتاژ سیستم های توزیع (با توجه به محل بهره برداری) است.

۱-۲-۲ انواع منابع تولیدات پراکنده

منابع تولیدات پراکنده بر اساس فناوری آن ها به دو گروه زیر تقسیم بندی می شود:

- منابع پایه فسیلی شامل:
 - موتورهای رفت و برگشتی^۱
 - توربین های گازی^۲
 - میکرو توربین ها
- منابع تجدیدپذیر شامل:
 - سلول های فتوولتائیک
 - نیروگاه های بادی
 - نیروگاه های زمین گرمایی^۳
 - نیروگاه های انرژی جزر و مد^۴

^۱ Reciprocating Engine

^۲ Gas Turbine

^۳ Geothermal

^۴ Tidal

۱-۱-۲-۲ منابع انرژی تجدیدپذیر

با پیشرفت روز افزون دانش و فناوری و نیاز مراکز صنعتی به انرژی و همچنین کاهش و محدودیت استفاده از سوخت فسیلی محققان را بر آن داشته است که منابع ارزان و عاری از آلودگی را جایگزین سوخت فسیلی کنند. در این میان انرژی خورشیدی و باد توجه بسیاری را به خود در این زمینه جلب کرده است.

-انرژی خورشیدی:

تاریخچه انرژی خورشیدی به سال ۱۸۳۹ با مشاهده اولین اثر فتوولتائیک بازمی‌گردد. الکساندر ادموند بکرل^۱، فیزیک‌دان فرانسوی در زمان کار بر روی الکترودهای فلزی در داخل محلول الکترولیت متوجه ایجاد جریان الکتریکی کوچکی هنگام تابش نور به فلزات شد، اما این اثر را نتوانست توضیح دهد [۱۲]. در سال ۱۸۸۳، چارلز فریتز^۲ مخترع آمریکایی اولین سلول فتوولتائیک را ساخت و پس از آن دانشمندان زیادی تلاش برای گسترش و افزایش بازده تبدیل انرژی خورشیدی به برق را انجام دادند، به صورتی که بسیاری از کشورهای صنعتی بخش مهمی از سرمایه‌گذاری‌های خود را به این موضوع اختصاص داده‌اند. به‌طور مثال پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۵۰ نزدیک به ۶۹٪ انرژی الکتریکی ایالات‌متحده آمریکا، توسط انرژی خورشیدی تأمین شود [۱۳].

تأمین انرژی از طریق خورشید به دو روش خورشید گرمایی^۳ و فتوولتائیک صورت می‌گیرد. در روش اول انرژی خورشیدی متمرکز برای جوشاندن آب می‌شود و بخار حاصل برای چرخاندن توربین و تولید برق استفاده می‌شود. در روش دوم به‌طور مستقیم نور خورشید با استفاده از پنل‌های خورشیدی

^۱ Alexander Edmond Becquerel

^۲ Charles Fritts

^۳ Photo Thermal

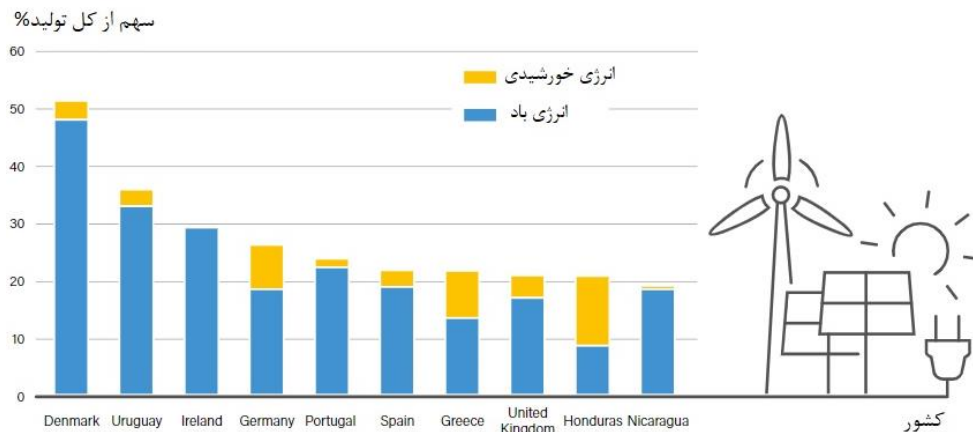
تبدیل به برق می‌شوند [۸].

-انرژی باد:

انرژی باد به‌عنوان یکی از فناوری‌های امیدوارکننده برای تولید برق و هزینه‌های آن است که قابل‌مقایسه با انرژی‌های فسیلی است، به‌ویژه هنگامی که مزایای زیست‌محیطی در نظر گرفته می‌شود. وزش باد می‌تواند توربین‌های بادی را برای تولید برق به حرکت درآورد. توان نامی توربین بادی در حال حاضر بین ۵/۰ تا ۱۰ مگاوات است. توان خروجی توربین باد بستگی به سرعت باد دارد و به همین دلیل با افزایش سرعت باد توان خروجی نیز افزایش می‌یابد. محل نصب توربین‌های بادی معمولاً در مناطقی با باد شدید و دائم مانند مناطق ساحلی و ارتفاع بالا است.

تولید برق به وسیله توربین بادی برای اولین بار در سال ۱۸۹۱ توسط پل واکر^۱ به‌منظور برق‌رسانی به مناطق روستایی در دانمارک به کار گرفته شد [۱۴]. پس از آن کشورهای زیادی مانند آمریکا و چین برای تولید انرژی از نیروی باد تلاش فراوان کردند. به عنوان مثال چین بیش از ۳۳ درصد از ظرفیت بادی تولیدشده در جهان را دارد. بر اساس پیش‌بینی آژانس بین‌المللی انرژی تا سال ۲۰۳۰ دومین منبع بزرگ انرژی تجدیدپذیر پس از برق‌آبی‌ها، برق بادی است. بر اساس تخمین شورای جهانی انرژی باد تا سال ۲۰۴۰ صنعت انرژی بادی گردش مالی ۶۷ میلیارد دلار در سال را دارا است. همچنین ظرفیت بادی نصب‌شده در جهان در سال ۲۰۲۰ به ۱۰۰۰ گیگاوات افزایش خواهد یافت و پیش‌بینی می‌شود ۱۲ درصد عرضه برق انرژی به انرژی بادی تعلق خواهد گرفت [۱۴-۱۵]. شکل (۲-۱)، سهم تولید برق از دو انرژی خورشیدی و بادی در ۱۰ کشور برتر در سال ۲۰۱۸ نشان می‌دهد [۱۵].

^۱ Poul Lacour



شکل (۱-۲): سهم تولید برق از انرژی تجدید پذیر در ۱۰ کشور برتر در سال ۲۰۱۸ [۱۵]

۲-۲-۲ مزایای تولیدات پراکنده

منابع تولید پراکنده دارای مزایایی از قبیل بهبود قابلیت اطمینان، کاهش تلفات توان، بهبود کیفیت توان، هزینه سرمایه‌گذاری پایین‌تر و آلودگی کمتر است از جمله مزایای دیگر تولید پراکنده می‌توان به دو بخش مزایای فنی و اقتصادی که در زیر آمده است بیان کرد [۱۶]:

۱-۲-۲-۲ مزایای فنی تولیدات پراکنده

- تلفات خطی کم
- بهبود توان
- حداقل کردن مواد آلاینده محیط‌زیست
- افزایش قابلیت اطمینان ساختار امنیتی
- کم کردن تراکم توزیع و انتقال

۲-۲-۲-۲ مزایای اقتصادی تولیدات پراکنده

- کاهش سرمایه‌گذاری برای ارتقاء خدمات
- به حداقل رسیدن هزینه تعمیر و نگهداری
- افزایش راندمان

- حداقل شدن رزرو مورد نیاز وابسته به قیمت

- بهبود امنیت بارهای مهم

۲-۳ ریز شبکه

ساختار سیستم قدرت متداول که تحت تأثیر تولید متمرکز و تقسیم توان یک طرفه قرار دارد امروزه با توجه به شایستگی‌های فنی و زیست‌محیطی منابع تولید پراکنده و گسترش آن‌ها به چالش کشیده شده است [۱۷]. این تغییر الگو از نسل متمرکز به تولید توزیع شده باعث به وجود آمدن ریز شبکه‌ها گردیده است. ریز شبکه‌ها سیستم‌های توزیع محلی هستند که شامل گروهی از منابع تولید پراکنده (DG)، سلول‌های ذخیره انرژی (ESC)^۱ و بارهای کنترل شده و غیرقابل کنترل محلی می‌باشند [۸، ۱۸]. به دلیل رفتار غیرقابل پیش‌بینی DG ها، سلول‌های ذخیره انرژی می‌توانند نقش مهمی در سیستم قدرت ایفا کنند. سلول‌های ذخیره انرژی و انرژی‌های تجدیدپذیر، انعطاف‌پذیری استفاده از ریز شبکه را بهبود می‌دهند [۱۹]. با بهره‌گیری از واحدهای تولید و ذخیره در ریز شبکه‌ها، می‌توان سیستم‌های توزیع را از حالت غیرفعال^۲ و مصرف‌کننده توان به حالت فعال^۳ و مولد توان تبدیل نمود. مدهای بهره‌برداری گوناگون، عدم قطعیت بار و تولید و غیرقابل پیش‌بینی بودن اغتشاش، سبب پیچیدگی کنترل و مدیریت ریز شبکه‌ها می‌شود. از این‌رو در مقایسه با نیروگاه‌های متداول، نیاز به استراتژی‌های متفاوتی برای کنترل ریز شبکه‌ها است [۲۰-۲۱]. بدون حضور منابع تولید پراکنده، شبکه‌های توزیع غیرفعال خواهند بود، چراکه در این حالت انرژی از سوی شبکه کلی و بالادست به مصرف‌کنندگان انتقال می‌یابد. در صورت استفاده از منابع تولید پراکنده و انتقال دوجبهته‌ی توان، سیستم‌های توزیع فعال خواهند شد [۳]. شبکه‌های توزیع فعال برخلاف سیستم‌های متداول تولید انرژی، توسط مبدل‌های الکترونیک قدرت به شبکه متصل می‌باشند [۲۲]. این منابع عموماً فاقد عضو دوار می‌باشند و از این‌رو

^۱ Energy Storage cells (ESC)

^۲ Passive

^۳ Active

نسبت به واحدهای تولید توان متداول دارای دینامیک متفاوتی می‌باشند [۲۳]. شبکه‌های توزیع فعال نیاز به سیستم‌های کنترل هوشمند و تطبیقی دارند تا بتوانند به‌طور هماهنگ در کنار سایر واحدهای تولید توان فعالیت نمایند زیرا اینرسی آن‌ها غالباً پایین است [۲۴].

ریزشبکه‌ها سبب تسهیل افزایش نفوذ DG ها گردیده‌اند و راه‌حل مناسبی برای ادغام بیشتر منابع انرژی تجدیدپذیر (RES)^۱ در شبکه‌های توزیع می‌باشند [۲۵]. در عین حال ریزشبکه‌ها می‌توانند بارهای حساس و محلی را تأمین کنند و این ویژگی‌ها همراه با توان عملیاتی در دو حالت متصل به شبکه و جزیره‌ای قابلیت اطمینان شبکه برق را از نقطه نظر بار/مشارکتی افزایش می‌دهند. در حالت متصل به شبکه که در پایان‌نامه به بررسی آن پرداخته می‌شود سیستم می‌تواند توان از شبکه DC جذب یا تزریق کند [۸, ۲۶].

افزایش نفوذ DG ها اساساً سبب تغییر رفتار دینامیکی سیستم قدرت می‌شود. برخی از آن‌ها توسط مبدل که هیچ عضو دواری ندارد به شبکه متصل گردیده‌اند. ثابت زمانی آن‌ها در مقایسه با ثابت زمانی مکانیکی نیروگاه‌های متداول بسیار کمتر است، از این‌رو با یک استراتژی کنترلی مناسب، می‌توان DG ها را در کنترل فرکانس مشارکت داد [۲۲].

سلول‌های ذخیره می‌توانند با بهره‌گیری از یک سیستم کنترل مناسب و تزریق توان اکتیو، سبب بهبود عملکرد سیستم گردند. بدین معنا که DG ها در حالت متصل به شبکه می‌توانند وظیفه کنترل فرکانس شبکه را بر عهده بگیرند. سیستم کنترل باید آن‌ها را توسط کنترل بار-فرکانس (LFC)^۲ هماهنگ سازد [۲۲].

مبدل‌های منبع ولتاژ (VSC)^۳ که به منظور اتصال منابع تولید پراکنده به شبکه‌های توزیع مورد

^۱ Renewable Energy Systems (RES)

^۲ Load Frequency Control

^۳ Voltage Source Converter

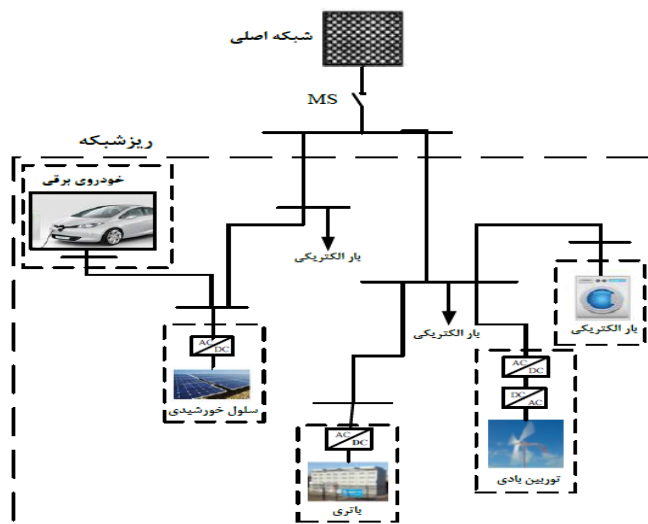
استفاده قرار می‌گیرند دارای مزایایی از جمله پاسخ دینامیکی سریع، عملکرد دقیق، سهولت اجرا و کنترل حلقه بسته برای تولید نقطه عملکرد مورد نیاز است [۲۷].

متغیرهای کنترل اصلی در ریزشبکه عبارت‌اند از ولتاژ، فرکانس، توان اکتیو و توان راکتیو؛ بنابراین، کنترل‌کننده‌های ریزشبکه وظایف زیر را بر عهده دارند [۲۸]:

- تنظیم ولتاژ و فرکانس تحت شرایط مختلف
- کنترل توان اکتیو و راکتیو برای دستیابی به تقسیم توان مناسب در حالت متصل به شبکه و جزیره‌ای
- انتقال از حالت متصل به شبکه به جزیره‌ای و برعکس
- مشارکت در بازار انرژی با تولید بهینه از منابع ریزشبکه
- عرضه بدون وقفه بارهای بحرانی مانند مدارس، بیمارستان‌ها و سایر خدمات ضروری
- بهینه‌سازی هزینه عملیات تولید و مبادلات برق با شبکه برق

شکل (۲-۲) نمای کلی از یک ریزشبکه را که شامل منابع تولید پراکنده، ذخیره‌سازها و بارهای

مختلف را نشان می‌دهد [۲۹].



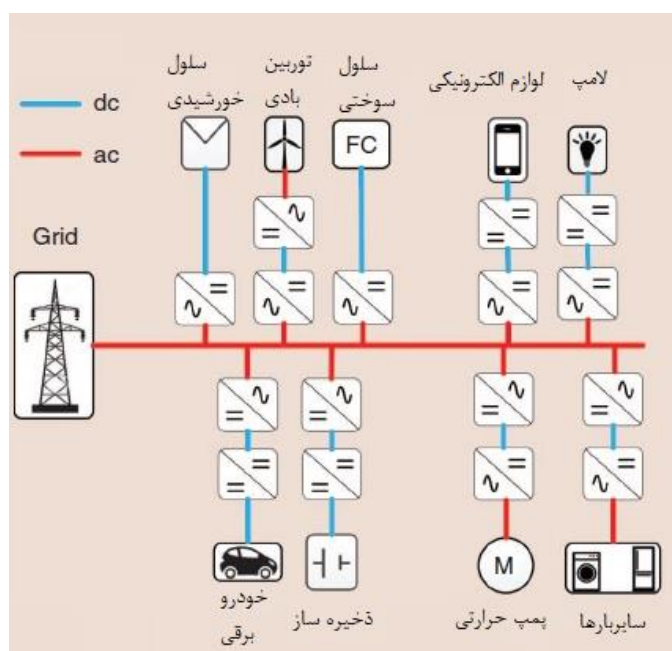
شکل (۲-۲): نمای کلی یک ریزشبکه [۲۹]

۱-۳-۲ انواع ریزشبكة

ریزشبكه‌ها به سه دسته کلی بر اساس نوع باری که تغذیه می‌کنند دسته‌بندی می‌شوند. این تقسیم‌بندی شامل: ریزشبكة AC، ریزشبكة DC، ریزشبكة هیبرید AC-DC است.

۱-۱-۳-۲ ریزشبكة AC

ریزشبكة AC متداول‌ترین نوع ریزشبكة است. در این نوع از ریزشبكة، بارها متصل به باس AC می‌باشند و یا از طریق مبدل‌های واسطه الکترونیک قدرت DC/AC به باس متصل می‌شوند. شکل (۲-۳) ساختار یک ریزشبكة AC را نشان می‌دهد [۳۰].



شکل (۲-۳): ساختار ریزشبكة AC [۳۰]

۲-۱-۳-۲ ریزشبكة DC

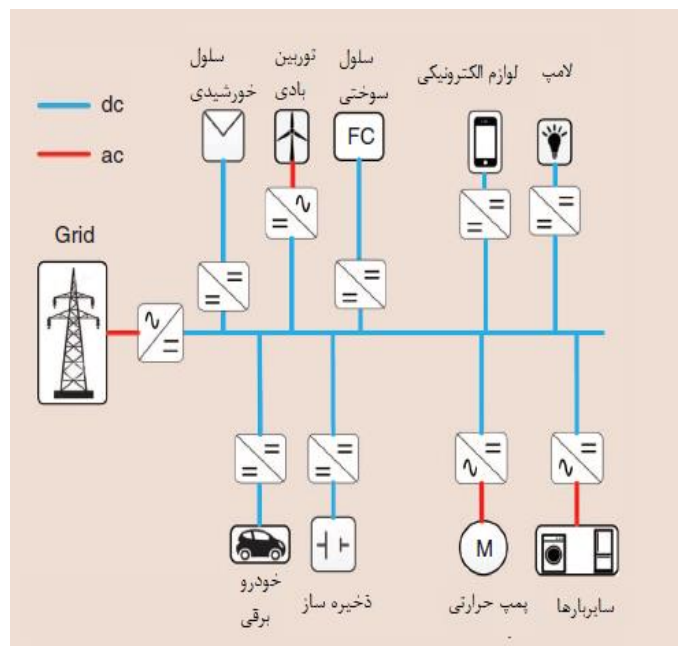
در سال‌های اخیر ریزشبكة DC با توجه به توسعه بارهای DC و راندمان بالاتر سیستم‌های DC و سادگی رابط DC^۱ برای DGهای مختلف و ذخیره‌سازهای انرژی تبدیل به یک سیستم قدرت جذاب

^۱ DC Interface

و برتر شده است [۳۱-۳۲]. ریزشبه DC توسط یک مبدل DC/AC به شبکه AC متصل شده است این ریزشبه شامل یک باس DC به همراه یک ولتاژ تنظیم شده را شامل می شود. اکثر منابع تولید پراکنده توسط مبدل های AC/DC و DC/DC به باس اصلی متصل می شوند، بارهای DC مستقیماً یا به وسیله مبدل DC/DC به شبکه متصل و بارهای AC توسط یک مبدل AC/DC به شبکه متصل می شوند. شکل (۲-۴) ساختار یک ریزشبه DC نشان می دهد [۳۰]. ریزشبه DC برای برنامه های کاربردی مختلف توان، مانند تولیدات مقیاس کوچک، تهیه پشتیبان از ذخیره انرژی، مرکز داده ها، کشتی ها نظامی، شبکه های مخابراتی، خودروهای برقی و... مورد استفاده قرار می گیرد [۳۱]. از آنجا که بارها، DG ها و تجهیزات ذخیره سازی می توانند به باس DC متداول با مراحل تبدیل توان کمتر متصل شوند، اتلاف گرما کمتری خواهند داشت و به طور بالقوه ارزان تر از سیستم AC خواهند شد. همچنین خطوط DC توانایی شارش توان بیشتری را نسبت به AC دارند [۳۳]. علاوه بر این سیستم DC دارای مزایای زیر است:

- بیشتر بارهای مسکونی DC می توانند با ولتاژ DC کار کنند [۳۱].
- هیچ کنترلی برای تنظیم توان راکتیو و تنظیم فرکانس لازم نیست [۲۸].
- اثر پوستی نمی تواند در کابل های DC رخ دهد، در نتیجه تلفات کابل کاهش می یابد [۳۴].
- منابع متعدد می توانند به یک باس متصل شوند، بنابراین پخش بار قوی تر است.
- اکثر دستگاه های ذخیره مانند باتری و ابر خازن ها^۱ DC می باشند [۳۵].
- مشکلات سنکرون سازی در ریزشبه DC حذف می شود [۳۶].

^۱ Ultracapacitor



شکل (۲-۴): ساختار ریز شبکه DC [۳۰]

ریز شبکه های هیبرید^۱ AC-DC ۳-۱-۳-۲

در این ریز شبکه ها تولید و مصرف توان به صورت AC و DC است. در یک فیدر منابع تولید پراکنده DC مانند سلول های فتوولتائیک و سلول سوختی به همراه بارهای DC قرار دارند و در فیدر دیگر منابع تولید پراکنده AC به همراه بارهای آن قرار دارد. این ساختار مزیت ریز شبکه AC و DC را باهم دارد. اتصال کمتر از مبدل های در فیدر DC و قابلیت اتصال مستقیم به شبکه در نتیجه قابلیت اطمینان بالاتر در فیدر AC از سری مزایای این ریز شبکه است.

کنترل ریز شبکه ۲-۳-۲

کنترل ریز شبکه ها به دو روش کنترل مرکزی^۲ و محلی^۳ صورت می پذیرد. در روش کنترل مرکزی با توجه به آنکه کنترل به صورت متمرکز^۴ انجام می شود نیاز به ارتباطات قوی جهت انجام فرآیندهای

^۱ Hybrid

^۲ Central

^۳ Local

^۴ Centralized Control

کنترلی است. درحالی که کنترل محلی نیاز به ارتباطات نداشته و به صورت محلی و غیرمتمرکز^۱ با استفاده از اندازه گیری های محلی، کنترل ریزشبکه را انجام می دهد [۶, ۳۷].

کنترل افقی یک روش کنترل غیرمتمرکز است که کنترل تقسیم توان در ریزشبکه با کمک سیگنال های کنترل محلی مانند اندازه ولتاژ، فرکانس، توان اکتیو و توان راکتیو انجام می دهد [۶, ۳۷]. در فصل بعدی این روش کنترل به صورت کامل تری بیان شده است.

۳-۳-۲ انواع مبدل های ریزشبکه

مبدل های مورد استفاده برای عملیات ریزشبکه می توانند به عنوان تغذیه کننده شبکه^۲، تشکیل دهنده شبکه^۳ و مبدل های پشتیبانی کننده شبکه^۴ طبقه بندی شوند [۲۶].

۱-۳-۳-۲ مبدل تشکیل دهنده شبکه

مبدل تشکیل دهنده شبکه به صورت یک منبع ولتاژ AC با امپدانس سری کوچک عمل می کند که در حالت جزیره ای از عملکرد ریزشبکه که در صورت عدم وجود شبکه اصلی است ولتاژ و فرکانس شبکه محلی را در مقدار مرجع تنظیم می کند. در شکل (۲-۵)، طرح کلی مبدل با دامنه ولتاژ مرجع E^* و فرکانس مرجع ω^* و کنترل کننده حلقه پشت سرهم^۵ ولتاژ و جریان G_V نشان داده شده است. یک مثال کاربردی از مبدل ها تشکیل دهنده شبکه می توان به UPS های رزرو اشاره کرد. این سیستم ها در عملکرد عادی شبکه، از شبکه اصلی قطع است و در زمان رخداد خطا، ولتاژ شبکه را تأمین می کند [۲۸, ۳۸].

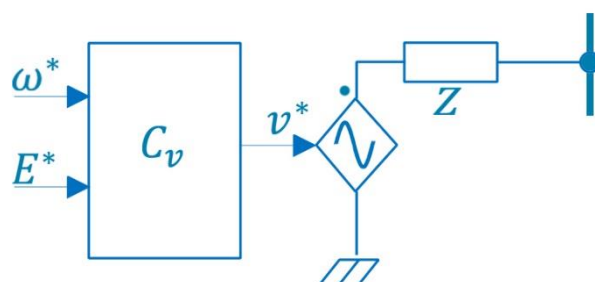
^۱ Decentralized Control

^۲ Grid Feeding

^۳ Grid Forming

^۴ Grid Supporting

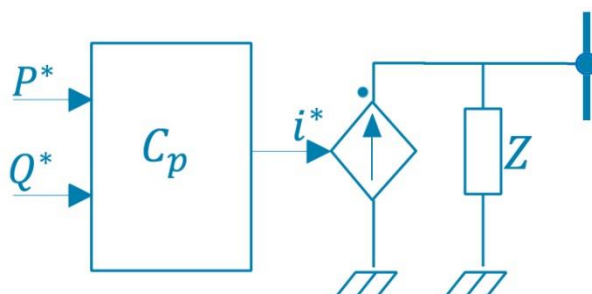
^۵ Cascaded



شکل (۵-۲): مبدل تشکیل دهنده شبکه [۳۸]

مبدل تغذیه کننده شبکه ۲-۳-۳-۲

مبدل تغذیه کننده شبکه به صورت یک منبع جریان با امپدانس بزرگ موازی است که به منظور تزریق توان اکتیو و راکتیو به شبکه برق مورد استفاده قرار می گیرند. این مبدل ها برای عملکرد موازی با سایر مبدل های تغذیه کننده شبکه در حالت متصل به شبکه مناسب است. در حقیقت اکثر مبدل های توان در ریزشبهه های تولید پراکنده مانند توربین بادی و سلول های فتوولتائیک از این نوع می باشند [۳۹]. اگر دامنه ولتاژ و فرکانس ریزشبهه به وسیله مبدل تشکیل دهنده شبکه و یا مبدل پشتیبان کننده شبکه و یا ژنراتور سنکرون تنظیم نشوند، مبدل تغذیه کننده شبکه نمی تواند در حالت جزیره ای عمل کند. عملکرد مبدل تغذیه کننده شبکه معمولاً به وسیله یک کنترل کننده سطح بالا مانند کنترل کننده نیروگاه برق یا دنبال کننده نقطه کار حداکثر توان (MPPT)^۱ که مقادیر مرجع برای P^* و Q^* را تنظیم می کند انجام می شود. در شکل (۶-۲) طرح کلی مبدل نشان داده شده است، در این شکل P^* و Q^* توان اکتیو و راکتیو تزریقی به شبکه و C_p کنترل کننده حلقه پشت سرهم توان و جریان است [۲۸، ۳۸].



شکل (۶-۲): مبدل تغذیه کننده شبکه [۳۸]

^۱ Maximum Power Point Tracking (MPPT)

۲-۳-۳-۳ مبدل پشتیبان کننده شبکه

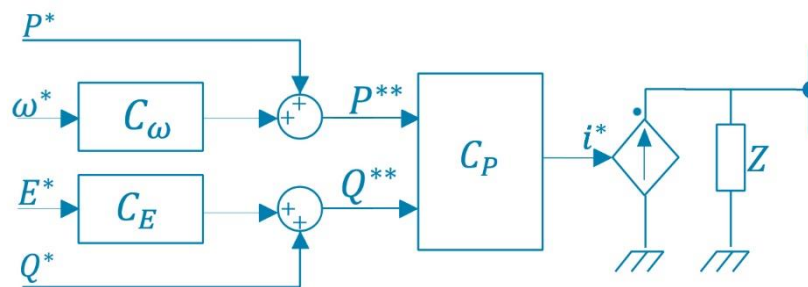
مبدل پشتیبانی کننده شبکه می تواند در حالت اتصال به شبکه به عنوان یک منبع جریان با امپدانس بزرگ موازی و در حالت جزیره ای به عنوان یک منبع ولتاژ AC با امپدانس سری کوچک عمل کند و شامل ویژگی های مبدل تغذیه کننده شبکه و مبدل تشکیل دهنده شبکه است. در هر دو حالت، هدف اصلی تنظیم دامنه ولتاژ شبکه E^* و فرکانس ω^* با کنترل کردن توان اکتیو و راکتیو تحویل داده شده به شبکه است. طرح کلی این مبدل در شکل ها (۷-۲) و (۸-۲) نشان داده شده است در اینجا P^{**} ، Q^{**} ، E^{**} و ω^{**} به ترتیب توان های اکتیو و راکتیو و دامنه ولتاژ و فرکانس ورودی به کنترل کننده حلقه های پشت سرهم و G_p و G_v است [۲۸، ۳۸].

دو نوع اصلی مبدل که در گروه پشتیبان کننده شبکه طبقه بندی شده اند عبارت اند از [۴۰]:

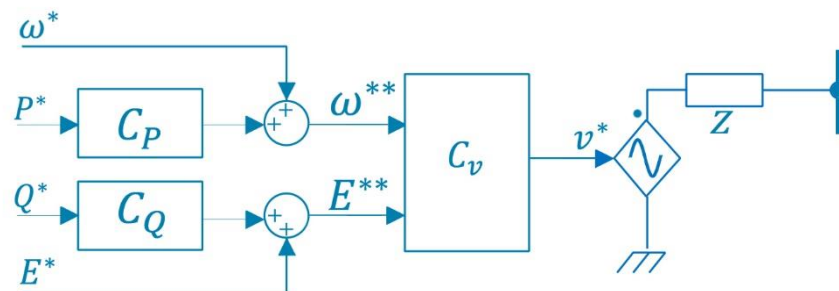
۱- مبدل توان کنترل شده به صورت منبع جریان: در این نوع مبدل، هدف اصلی تنها تأمین بار متصل به ریزشبه نیست بلکه مشارکت در تنظیم دامنه ولتاژ و فرکانس در هر دو شبکه AC و ریزشبه مورد نظر است. در شکل (۷-۲) این نوع مبدل نشان داده شده است.

۲- مبدل توان کنترل شده به صورت منبع ولتاژ: مبدل توان به صورتی کنترل شده است که شبیه به یک منبع ولتاژ AC عمل می کند که مشابه با طرح ساده یک ژنراتور سنکرون به وسیله یک امپدانس به شبکه متصل شده است. در این روش کنترلی، توان اکتیو و راکتیو تزریقی به وسیله مبدل، تابعی از ولتاژ شبکه، امپدانس لینک ارتباطی و ولتاژ AC شبیه سازی شده (مبدل) است این نوع مبدل ها می توانند در تنظیم دامنه و فرکانس ولتاژ شبکه در حالت متصل به شبکه و جزیره ای مشارکت کنند و نیازی به اتصال آن ها به مبدل تشکیل دهنده شبکه نیست. این مبدل ها می توانند به صورت موازی در ریزشبه ها

عمل کنند و تقسیم توان را بدون نیاز به خطوط ارتباط با کمک کنترل اکتیو و کنترل کننده امپدانس مجازی انجام دهند. در شکل (۲-۸) این نوع مبدل نشان داده شده است.



شکل (۲-۷): مبدل پشتیبان کننده شبکه بر اساس منبع جریان [۳۸]



شکل (۲-۸): مبدل پشتیبان کننده شبکه بر اساس منبع ولتاژ [۳۸]

۴-۲ جمع بندی

همان طور که در این فصل بیان شد سیستم های قدرت فعلی با معایبی همراه می باشند. از سوی دیگر مسائل زیست محیطی و کمبود منابع فسیلی بشر را به سوی استفاده از منابع انرژی جایگزین سوق داده است. ریز شبکه یک مفهوم جهت تجمیع منابع انرژی تجدید پذیر است که نقش غیر قابل انکاری در ساختار شبکه های آینده دارد که در این فصل دو نوع ریز شبکه AC و DC معرفی و بررسی گردید. در فصل آینده به مفهوم ماشین سنکرون مجازی و نحوه به کارگیری آن در ریز شبکه ها پرداخته خواهد شد.

فصل سوم

استفاده از ماشین سکرون مجازی در کنترل فرکانس و

ولتاژ شبکه

۳-۱ مقدمه

با رشد روزافزون منابع تولید پراکنده، با توجه به اینکه این منابع فاقد جرم دوار می‌باشند نگرانی‌هایی در مورد اینرسی و میرایی شبکه به وجود آمده است چراکه هم‌زمان با افزایش تزریق توان اکتیو باید میرایی و اینرسی لازم را نیز فراهم نمود. یک راه‌حل افزایش پایداری شبکه در این حالت افزودن اینرسی به‌صورت مجازی است. یک اینرسی مجازی برای هر واحد تولید پراکنده با استفاده از مبدل‌های الکترونیک قدرت، منابع ذخیره انرژی کوتاه‌مدت و مکانیسم کنترلی قابل ایجاد خواهد بود. این مفهوم تحت عنوان ژنراتور سنکرون مجازی (VSG)^۱ و ماشین سنکرون مجازی (VISMA)^۲ شناخته می‌شود [۴۱، ۴۲]. در این روش واحد مانند یک ژنراتور سنکرون عمل خواهد کرد و مشخصات اینرسی و میرایی مانند ماشین‌های سنکرون^۳ (SM) برای یک فاصله زمانی کوچک ارائه می‌دهد. در نتیجه مفهوم اینرسی مجازی به‌منظور مشارکت واحدهای تولید پراکنده در شبکه‌های نسل آینده بدون به خطر افتادن پایداری شبکه بسیار مهم خواهد بود [۴۳، ۴۴]. در این فصل معادلات حاکم بر ریزشبکه DC و ماشین سنکرون مجازی استخراج و مدل‌سازی شده و بلوک دیاگرام کل شبکه به منظور مطالعه بر پایداری شبکه، کنترل ولتاژ و فرکانس به دست آمده است.

۳-۲ معرفی ماشین سنکرون مجازی و مروری بر کارهای گذشته

در شبکه‌های سنتی توان با استفاده از ماشین‌های سنکرون بزرگ که روتور با جرم بسیار سنگین در حال گردش است، تأمین می‌شود. چرخش این جرم بسیار سنگین، باعث ایجاد اینرسی زیاد در شبکه است. این اینرسی زیاد عامل اصلی و ذاتی برای جلوگیری از اغتشاشات و عدم تعادل در سیستم است و در پایداری آن نقش مهمی را ایفا می‌کند. علاوه بر اینرسی حاصل از چرخش روتور به دلیل اصطکاک مکانیکی و تلفات الکتریکی در سیم‌پیچ‌های استاتور و میراکننده ماشین سنکرون خاصیت میرایی در

^۱ Virtual Synchronous Generator

^۲ Virtual Synchronous Machine

^۳ Synchronous Machine(SM)

شبکه به همراه دارد [۸]. ماشین سنکرون نوع اصلی ژنراتور در سیستم برق AC است. از مزایای ماشین سنکرون می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۴۵]:

- ۱- ایجاد پاسخ اینرسی ناشی از انرژی جنبشی ذخیره‌شده در جرم دوار
 - ۲- عملکرد به صورت موازی با یک شبکه AC
 - ۳- توانایی تولید و جذب توان راکتیو
 - ۴- دارا بودن ساختار کنترل ساده همراه با پاسخ‌های پایدار تضمین‌شده شبکه
 - ۵- کار کردن ماشین سنکرون به صورت یکپارچه در هر دو حالت متصل به شبکه و مستقل^۱
- با رشد روزافزون منابع تولید پراکنده که اکثراً بر پایه مبدل‌های الکترونیک قدرت و فاقد اینرسی و جرم دوار می‌باشند و به‌طور معمول با استراتژی کنترل افی که یک روش مرسوم برای کنترل DGها متصل به مبدل الکترونیک قدرت کنترل می‌شوند اینرسی کل شبکه کاهش پیدا می‌کند؛ و نگرانی‌هایی در مورد اینرسی و میرایی شبکه به وجود می‌آید چراکه هم‌زمان با افزایش تزریق توان اکتیو باید میرایی و اینرسی لازم را نیز فراهم نمود به‌طور مثال با افزایش نفوذ منابع تجدیدپذیر در شبکه بین سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۳۴ در انگلیس و ایرلند شمالی، ۷۰ درصد کاهش در اینرسی به وجود خواهد آمد [۴۶].

با کاهش اینرسی، شبکه به عدم تعادل و اغتشاشات حساس‌تر شده و به آن سریع‌تر پاسخ می‌دهد، در نتیجه پایداری سیستم دچار مشکل می‌شود، همچنین سرعت تغییرات فرکانس افزایش می‌یابد و ممکن است سیستم برای دامنه عدم تعادل کوچک نیز وارد فرایند بارزدایی^۲ شود؛ بنابراین برای شبکه‌های سریع و حساس جدید با وجود نوسانات و اغتشاشات زیاد منابع تجدیدپذیر، روش کنترلی شبکه‌های سنتی کارایی نخواهد داشت از این‌رو محققان به دنبال روش‌های جدید برای استراتژی کنترل مبدل می‌باشند یک راه‌حل برای پایداری چنین شبکه‌های بخصوص در تنظیم فرکانس ایجاد اینرسی

^۱ Standalone (SA)

^۲ Load Shedding

اضافی از منابع فاقد اینرسی به صورت مجازی است [۱۶,۴۷].

در نتیجه، برخی از تحقیقات تقلید از اصول ماشین سنکرون را در کنترل مبدل‌های الکترونیک قدرت به منظور بهره‌مندی از این مزایا و همچنین دستیابی به یکپارچه‌سازی واحدهای منبع انرژی توزیع شده مبتنی بر مبدل پیشنهاد داده‌اند. چنین کنترل‌کننده‌هایی تحت نام‌های مختلفی از جمله ماشین سنکرون مجازی (VSM) [۴۸]، ژنراتور سنکرون مجازی (VSG) [۴۹]، VISMA [۵۰]، سنکرونورتر^۱ (SV) [۱۶,۵۱]، ماشین سنکرون مجازی پیشرفته^۲ (EVSM) [۳۲] و غیره می‌باشند.

VSM با تقلید از خصوصیات ماشین سنکرون متداول، کنترل افتی و اینرسی مجازی را فراهم می‌آورد و از نقطه نظر شبکه هیچ تفاوتی میان ماشین سنکرون حقیقی و مجازی وجود ندارد. اینرسی مجازی برای هر واحد تولید پراکنده با استفاده از منابع ذخیره‌ساز انرژی و استراتژی کنترلی مناسب فراهم می‌شود. ماشین سنکرون حقیقی صرف‌نظر از فیزیک آن‌ها با معادلات دیفرانسیل توصیف می‌شوند این معادلات در واقع اساس کنترل‌کننده‌های VSM می‌باشند [۱۶,۵۲-۵۴].

اولین پیشنهاد یک ماشین سنکرون مجازی، توسط دو محقق انگلیسی به نام‌های بیک^۳ و هیس^۴ در سال ۲۰۰۷ منتشر و به عنوان "VISMA" نام‌گذاری شده است [۵۰]. پس از آن، چندین روش دیگر برای افزودن اینرسی مجازی به توان مبدل‌های الکترونیکی با تقلید از ویژگی‌های ماشین سنکرون، اما با تفاوت‌های قابل توجهی در اصطلاحات، برنامه‌های کاربردی هدفمند و پیاده‌سازی‌های پیشنهادی ارائه شده است [۲۰]. در مراجع [۴۴,۵۵]، به منظور سادگی در شبیه‌سازی و تحلیل عملکرد ماشین سنکرون مجازی یک منبع ایده آل در طرف DC در نظر گرفته شده است. در [۵۶] ماشین سنکرون مجازی، در حالت متصل به شبکه و جزیره‌ای با سلول فتوولتائیک و ذخیره‌کننده انرژی در سمت

^۱ Synchronverter

^۲ Enhanced Virtual Synchronous Machine

^۳ Beck

^۴ Hesse

ریزشبکه DC به منظور حفظ عملکرد پایدار شبکه در این دو حالت مورد مطالعه قرار گرفته است. تنظیم فرکانس و زاویه در [۵۷] برای کنترل فرکانس AC و ولتاژ DC به منظور افزایش قابلیت اطمینان کلی شبکه استفاده شده است. در [۵۸] کنترل افقی و ماشین سنکرون مجازی در حالت جزیره‌ای باهم مقایسه و برتری کنترل ماشین سنکرون مجازی نشان داده شده است. در [۵۹] به مقایسه کنترل افقی و ماشین سنکرون مجازی در هر دو حالت متصل به شبکه و جزیره‌ای پرداخته شده و برتری کنترل ماشین سنکرون مجازی به علت تقلید رفتار کنترل افقی و ایجاد اینرسی مجازی را نشان داده است در این مرجع مدل سیگنال کوچک دو کنترل کننده نیز با یکدیگر مقایسه شده است. در [۶۰، ۶۱]، مقایسه و ارزیابی پایداری سیگنال کوچک بر اساس تحلیل مقادیر ویژه بین چهار روش کنترل ماشین سنکرون مجازی با معیار گرفتن ماشین سنکرون انجام و نشان داده شده که هر چهار روش به خوبی توانسته‌اند پایداری شبکه را فراهم کنند. در مراجع [۶۲-۶۴]، مبدل منبع ولتاژ به عنوان ماشین سنکرون مجازی در حالت متصل به شبکه AC، به منظور افزایش اینرسی مجازی و مهار نوسان ولتاژ باس DC پیشنهاد شده است. در [۶۳]، یک استراتژی میرایی بهبودیافته بدون تأثیر منفی بر روی پاسخ اینرسی بررسی شده است. در [۶۴]، ویژگی‌های مکانیکی و الکتریکی یک SM برای ارائه مفهوم سنکرونورتر تقلید شده است. در [۶۵]، یک سنکرونورتر در حالت‌های عملیاتی متصل به شبکه و جزیره‌ای با ارائه روش تجمیع گشتاور مجازی و شار مجازی در کنترل کننده بر پایه سنکرونیزه^۱ برای انتقال صاف و یکپارچه با قابلیت اتصال و اجرا^۲ بین این دو حالت عملیاتی ارائه شده است. در [۱۸]، روش جدیدی به منظور بهبود پاسخ اینرسی ریزشبکه‌های DC به وسیله توان رزرو آرایه‌های فتوولتائیک پیشنهاد شده است. در [۶۶] به نقش خودروهای الکتریکی^۳ (EV) ایستگاههای شارژ^۴ (CS) برای پشتیبانی از فرکانس در حالت ریزشبکه جزیره‌ای متمرکز شده است. در این حالت EVهایی که در CS پارک شده‌اند، به عنوان

^۱ Synchronizing

^۲ Plug and Play

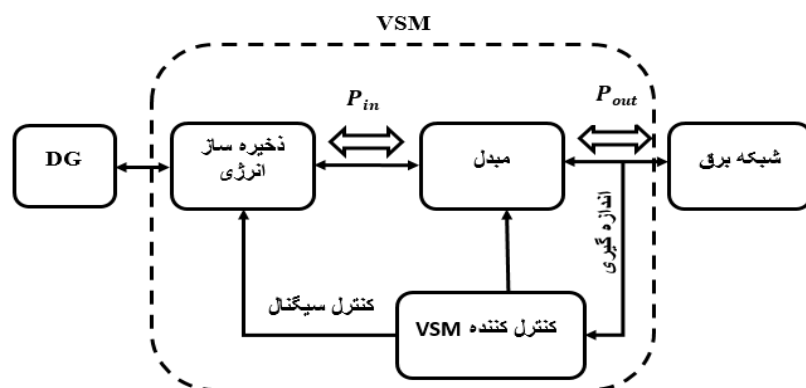
^۳ Electric Vehicle

^۴ Charging Station

سلول ذخیره انرژی برای MG ها عمل می‌کنند و از طریق کنترل کننده VSG در پشتیبانی از فرکانس شبکه شرکت می‌کنند. در [۶۷] پاسخ اینرسی توربین بادی با کنترل ژنراتور سنکرون مجازی و اختلاف آن با ژنراتور سنکرون مورد تحلیل قرار گرفته است. در [۶۸]، پاسخ اینرسی توربین بادی با انواع کنترل ژنراتور سنکرون مجازی به منظور بهبود پشتیبانی فرکانس مورد تحلیل قرار گرفته است. در [۶۹]، به بررسی استفاده از یک ژنراتور سنکرون مجازی به منظور بهبود پایداری فرکانس در یک ریزشبکه فتوولتائیک دیزلی با ذخیره کننده انرژی پرداخته شده است. در [۷۰-۷۲]، تقلید اینرسی (IE) بر اساس مشتق فرکانس شبکه، در [۷۳] ماشین سنکرون مجازی با کنترل کننده جریان (CCVSM)^۱ و در [۷۴-۷۵] ماشین سنکرون مجازی با کنترل کننده ولتاژ^۲ (VCVSM) به منظور افزایش پایداری و اینرسی شبکه مورد مطالعه قرار گرفته است.

۳-۳ ساختار ماشین سنکرون مجازی

ماشین سنکرون مجازی همان طور که در شکل (۳-۱) نشان داده شده است شامل سه جزء اساسی: ذخیره ساز انرژی، مبدل و یک مکانیسم کنترل است که به عنوان یک رابط بین منبع اصلی (معمولاً DC) و شبکه استفاده می‌شود. در بلوک کنترل ماشین سنکرون مجازی عموماً یک تابع دینامیکی مشابه با معادله نوسان ماشین سنکرون قرار داده شده است که توان خروجی را بر اساس اندازه گیری های شبکه و میزان تغییرات آن ها تعیین می کند [۷۶].



شکل (۳-۱): ساختار یک VSM [۷۶]

^۱ Current-Controlled Virtual Synchronous Machine

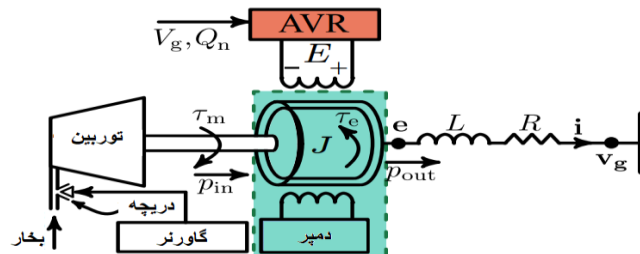
^۲ Voltage-Controlled Virtual Synchronous Machine

۳-۴ معادلات دینامیکی ماشین سنکرون

ماشین سنکرون شامل سیم‌پیچ‌های تحریک‌کننده و میرایی بر روی روتور و سیم‌پیچ‌های سه فاز در استاتور می‌باشد. سیم‌پیچ‌های میراکننده در ماشین سنکرون عملکرد راه‌اندازی و میرا کردن نوسانات در هنگام خطا شبکه را به عهده دارند و برای تثبیت ولتاژ ماشین در هنگام تغییر بار از تنظیم‌کننده‌های ولتاژ خودکار (AVR)^۱ استفاده می‌شود، در پایان‌نامه مدل یک ماشین سنکرون موتور روتور چرخشی بدون سیم‌پیچ‌های میرایی در نظر گرفته شده است. در حقیقت، اثر میرایی کردن و سنکرون کردن توان توسط عملکردهای کنترل در ماشین سنکرون مجازی بدون اجزای فیزیکی میرایی مانند ماشین‌های سنکرون مرسوم شبیه‌سازی می‌شود [۵۷]. ویژگی‌های مکانیکی روتور ماشین سنکرون متداول معادله نوسان نامیده می‌شود [۱، ۷۷] و به صورت رابطه (۳-۱) بیان می‌شود:

$$J\omega'_m + D(\omega_m - \omega_g) = \tau_m - \tau_e \quad (۳-۱)$$

در رابطه (۳-۱) ω_m فرکانس زاویه‌ای روتور، ω_g فرکانس شبکه، ω'_m نرخ تغییرات فرکانس زاویه‌ای روتور، J اینرسی حرکت روتور موتور، D ضریب میرایی ایجادشده توسط سیم‌پیچ میرایی و τ_e ، τ_m به ترتیب گشتاور مکانیکی ورودی و گشتاور مغناطیسی است که به ترتیب توان P_{in} و P_{out} را تولید می‌کنند. دینامیک روتور ماشین سنکرون توسط J تعیین می‌شود و بسیار کند است. در تجزیه و تحلیل سیستم قدرت، ثبات فرکانس و زاویه نیز عمدتاً بر اساس رابطه (۳-۱) است [۷۷]. شکل (۳-۲) مدل یک ماشین سنکرون متداول را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۲): یک ماشین سنکرون متداول [۴۵]

^۱ Automatic Voltage Regulator

۳-۵ کنترل فرکانس در سیستم‌های قدرت متداول

کنترل فرکانس مسئله مهمی در طراحی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت به هم پیوسته است. امروزه این مسئله به دلیل افزایش استفاده از منابع تجدیدپذیر و عدم قطعیت آن‌ها و پیچیدگی سیستم‌های قدرت بیشتر مورد توجه است. توجه به مسائل اقتصادی برای بهره‌برداری و قابلیت اطمینان سیستم قدرت باعث لزوم حفظ فرکانس سیستم و جریان خطوط ارتباطی در بازه برنامه‌ریزی شده است. به همین دلیل در سیستم‌های قدرت جدید کنترل بار-فرکانس^۱ نقش اساسی دارد [۱, ۷۸].

عدم تعادل بین توان مصرفی و تولیدی در سیستم قدرت باعث انحراف فرکانس می‌شود. کنترل خودکار تولید (AGC)^۲، یک ساختار متداول برای تطبیق تولید و مصرف و کنترل فرکانس سیستم قدرت است. انحراف فرکانس بر روی عملکرد، امنیت، قابلیت اطمینان و بازدهی سیستم قدرت اثر منفی می‌گذارد و انحراف زیاد باعث اضافه بار در خطوط انتقال و خرابی تجهیزات شده و در نهایت باعث ایجاد ناپایداری در سیستم می‌شود [۱, ۷۸].

همان‌گونه که بیان شد فرکانس سیستم قدرت وابسته به توازن توان حقیقی است. از آنجا که فرکانس، عامل مشترکی در سراسر سیستم است، تغییری در تقاضای توان حقیقی یک نقطه، به صورت تغییری در فرکانس در کل سیستم منعکس می‌شود؛ بنابراین فرکانس پارامتر مناسبی برای نشان دادن تعادل تولید و بار است. هر عدم تعادل توان در زمان کوتاه باعث تغییر لحظه‌ای در فرکانس سیستم می‌شود. از دست رفتن توان زیاد تولید بدون پاسخ مناسب از طرف سیستم، باعث افت شدید فرکانس می‌شود. کنترل تولید و فرکانس معمولاً به کنترل بار-فرکانس شناخته می‌شود که هدف اصلی سیستم‌های کنترل خودکار تولید است [۱, ۷۸].

توان حقیقی تولیدی ژنراتور، با توجه به نوع تولید، توسط خروجی توان مکانیکی یک محرک

^۱ Load Frequency Control (LFC)

^۲ Automatic Generation Control (AGC)

اولیه مانند یک توربین دیزلی، آب یا بخار گاز، کنترل می‌شود. برای عملکرد خوب یک سیستم قدرت، فرکانس باید تقریباً ثابت حفظ شود. کنترل خودکار تولید یک فرایند کنترل اساسی است که تلاش در تعادل تولید و تقاضا در سیستم قدرت با کمترین هزینه را دارد. سیستم AGC مسئول کنترل فرکانس و توان تبادلی بین سیستم‌ها است [۱,۷۸].

به علت آنکه فرکانس تولیدی در شبکه متناسب با سرعت چرخش ژنراتور است، مسئله کنترل فرکانس به‌عنوان مسئله کنترل سرعت واحدهای توربین ژنراتور در نظر گرفته می‌شود. با توجه به تغییرات لحظه‌ای بار، فرکانس به‌طور لحظه‌ای تغییر می‌کند و وجود کنترل‌کننده برای تعیین میزان تولید با توجه به میزان مصرف یا به‌طور معادل انحراف فرکانس، لازم است. با توجه به میزان انحراف فرکانس و برای تنظیم و کنترل فرکانس از پاسخ اینرسی و حلقه‌های کنترل اولیه، ثانویه، ثالثیه یا اضطراری استفاده می‌شود [۱,۷۸].

۳-۵-۱ پاسخ اینرسی

پاسخ اینرسی، پاسخ سریع به یک اغتشاش توان بر اساس عدم تعادل بین توان تولیدی و مصرفی است. این پاسخ به وسیله ماشین سنکرون ایجاد می‌شود. این ماشین‌ها با جذب (آزادسازی) انرژی جنبشی موجود در روتورهای چرخانسان و در نتیجه افزایش (کاهش) سرعت چرخش، به از دست رفتن بار (تولید) واکنش نشان می‌دهند. مطابق با شکل (۳-۳) پاسخ اینرسی ماشین‌های سنکرون در شبکه، شیب افت فرکانس (شیب اولیه فرکانس) را کاهش می‌دهد [۷۹].

۳-۵-۲ کنترل اولیه فرکانس

کنترل اولیه فرکانس پس از پاسخ اینرسی فعال می‌شود این کنترل توسط ژنراتورهای مجهز به گاورنر انجام می‌شود. گاورنر تغییرات سرعت چرخش (فرکانس) ژنراتور را دریافت و متناسب با شیب افقی، شیر کنترل را برای تولید توان مکانیکی در خلاف جهت انحراف فرکانس تنظیم می‌کند وسیعی

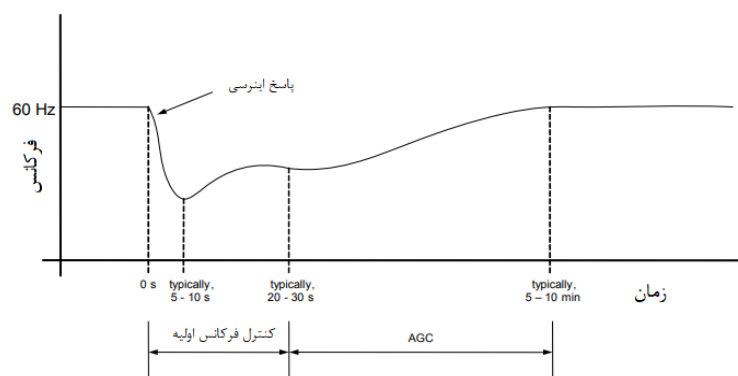
می‌کند فرکانس را به مقدار طبیعی خود برساند. انحراف فرکانس در سیستم توسط کنترل‌کننده اولیه یا همان پاسخ طبیعی گاورنر در حدود چند ثانیه بازیابی می‌شود اما این مقدار ممکن است از مقدار نامی متفاوت باشد [۱,۷۸].

۳-۵-۳ کنترل ثانویه فرکانس (AGC)

با توجه به بازه انحراف از کنترل ثانویه یا کنترل اضطراری ممکن است استفاده شود تا فرکانس سیستم حفظ شود. در شرایط عادی، انحراف کوچک فرکانس می‌تواند توسط کنترل اولیه بازیابی شود. برای انحرافات بزرگ‌تر کنترل ثانویه با توجه به میزان انرژی ذخیره‌ای که در دسترس دارد می‌تواند انحراف فرکانس باقیمانده را در حدود ده‌ها ثانیه تا چند دقیقه بازیابی کند و به مقدار نامی برساند [۱,۷۸].

۴-۵-۳ کنترل ثالثیه یا اضطراری فرکانس

در صورتی‌که در اثر یک خطای شدید، شرایط بحرانی تغییرات فرکانس سریع رخ دهد کنترل ثانویه قادر به بازیابی فرکانس نیست و در این حالت نیاز به استفاده از کنترل اضطراری و طرح‌های حفاظتی مانند بارزدایی برای جلوگیری از فروپاشی سیستم انجام می‌شود [۱,۷۸].



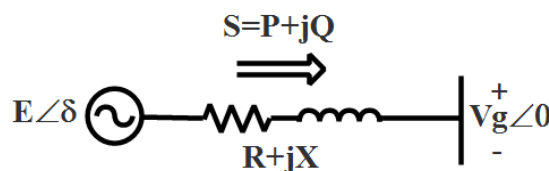
شکل (۳-۳): مراحل کنترل فرکانس در شبکه قدرت [۷۹]

در قسمت بعد نیز ایده‌ای مشابه در مورد DGهایی که از طریق VSC به سیستم قدرت متصل

گردیده‌اند، مورد استفاده قرار می‌گیرد. اگرچه تفاوت‌های گوناگونی میان نیروگاه‌های متداول و DG ها وجود دارد، اما باید توجه داشت که توان اکتیو تزریقی نقشی اصلی در کنترل فرکانس ایفا می‌کند [۸۰]. در مد متصل به شبکه، توان راکتیو و به تبع آن ولتاژ توسط کنترل کننده ولتاژ تنظیم شده است و کل توان اکتیو تزریقی توسط DG می‌تواند به منظور افزایش پایداری فرکانس کنترل شود. از این رو یک کنترل هماهنگ برای تغییر توان اکتیو تزریقی مطابق با انحراف فرکانس لازم است.

۳-۶ کنترل فرکانس و ولتاژ با استفاده از کنترل کننده افتی

با در نظر گرفتن مبدل VSC موجود در ریزشبه به عنوان یک منبع ولتاژ ایده آل قابل کنترل که به وسیله امپدانس مشخص به شبکه AC متصل است همان طور که در شکل (۳-۴) نشان داده شده است توان انتقالی از مبدل VSC به سمت شبکه AC مطابق با روابط (۳-۲) و (۳-۳) خواهد بود که در آن P و Q توان اکتیو و راکتیو انتقالی از منبع E (مبدل توان) به سمت V_g (شبکه AC) است و V_g مقادیر ولتاژ منابع است و δ زاویه اختلاف فاز بین منابع E و V_g است و $Z=R+jX$ امپدانس خط بین دو منبع است [۸۱، ۸۲].



شکل (۳-۴): در نظر گرفتن مبدل به عنوان یک منبع وابسته متصل به شبکه AC

$$P = \frac{E}{R^2 + X^2} \left(X V_g \sin(\delta) + R(E - V_g \cos(\delta)) \right) \quad (۳-۲)$$

$$Q = \frac{E}{R^2 + X^2} \left(R V_g \sin(\delta) + X(E - V_g \cos(\delta)) \right) \quad (۳-۳)$$

هنگامی که قسمت سلفی امپدانس خط از مقدار مقاومت خط بسیار بزرگتر باشد ($jX \gg R$) می‌توان از مقاومت خط در روابط (۳-۲) و (۳-۳) صرف نظر کرد [۸۲]. در شبکه مورد مطالعه مقدار δ کوچک

فرض شده است بر این اساس می توان $\sin(\delta) = \delta$ و $\cos(\delta) = 1$ فرض و توان انتقالی به صورت روابط (۴-۳) و (۵-۳) ساده کرد [۸۳].

$$P = \frac{E V_g \delta}{X} \quad (۴-۳)$$

$$Q = \frac{E}{X}(E - V_g) \quad (۵-۳)$$

روابط (۴-۳) و (۵-۳) رابطه مستقیم زاویه توان (δ) با توان اکتیو P و رابطه اختلاف ولتاژ $E - V_g$ با توان راکتیو (Q) نشان می دهد.

$$\delta = \frac{XP}{E V_g} \quad (۶-۳)$$

$$E - V_g = \frac{XQ}{E} \quad (۷-۳)$$

مطابق با روابط (۶-۳) و (۷-۳) توان راکتیو، ولتاژ خروجی مبدل و توان اکتیو، فرکانس سیستم را کنترل می کند. این روش کنترل به نام کنترل افتی Q/E و P/f شناخته می شود [۸۴]. همان گونه که در روابط (۶-۳) و (۷-۳) مشاهده می شود، زاویه توان مستقیماً به توان اکتیو وابسته است و همچنین اختلاف ولتاژ وابسته به توان راکتیو است. به عبارت دیگر با کنترل توان راکتیو می توان ولتاژ را نیز کنترل نمود [۲۲].

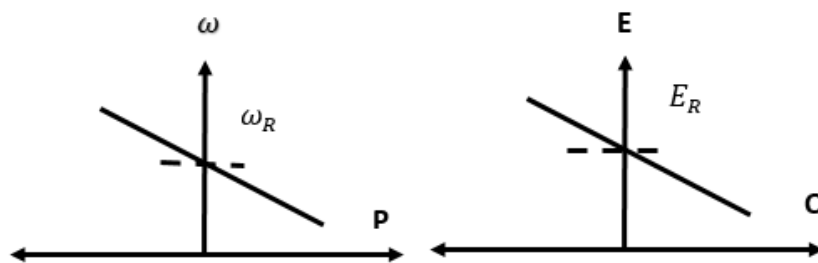
کنترل افتی یکی از محبوب ترین و مفیدترین کنترل ها برای دستیابی سریع به تنظیم ولتاژ و فرکانس و تقسیم توان بین منابع است این کنترل همچنین به طور گسترده در کنترل سیستم های قدرت سنتی برای تنظیم فرکانس سیستم استفاده می شود [۸۵].

$$f - f_R = -R_p(P - P_0) \quad (۸-۳)$$

$$E - E_R = -R_q(Q - Q_0) \quad (۹-۳)$$

روابط کنترل افتی در معادلات (۸-۳) و (۹-۳) نشان داده شده است که در آن f_R و E_R به ترتیب

فرکانس و ولتاژ نامی ریزشبهه، R_q و R_p به ترتیب ضرایب افتی توان راکتیو و اکتیو ریزشبهه DC و P_0 و Q_0 نقاط تنظیم از پیش تعیین شده برای توان اکتیو و توان راکتیو مولد است. رابطه (۳-۸)، نشان می دهد که هر زمان توان اکتیو تزریقی از طریق مولد به سیستم توزیع از مقدار از پیش تعیین شده P_0 انحراف پیدا کند. کنترل کننده فرکانس، زاویه توان مولد را کاهش و یا افزایش داده و از انحراف جلوگیری می نماید. در رابطه (۳-۹) نیز، به طور مشابه، هر زمان توان راکتیو تزریقی به سیستم از مقدار تعیین شده Q_0 منحرف شود، با افزایش یا کاهش ولتاژ، مولد به وسیله کنترل افتی از این انحراف جلوگیری می شود. مقادیر f_R و E_R باید به صورت انتخاب شوند که در مد متصل به شبکه، توان های اکتیو و راکتیو خروجی مبدل ها در حدود مقادیری از پیش تعیین شده (P_0 و Q_0) قرار گیرند. با تعیین مقدار E و f می توان میزان توان اکتیو و راکتیو خروجی را کنترل کرد در رابطه (۳-۸) می توان به جای فرکانس ω و δ قرارداد. نتایج حاصل از روش افتی، نشان دهنده ولتاژ و فرکانسی است که باید به وسیله مبدل تولید شود. مقدار مناسب افت ولتاژ و فرکانس بر اساس مشخصه افتی در شکل (۳-۵) تعیین می شود.

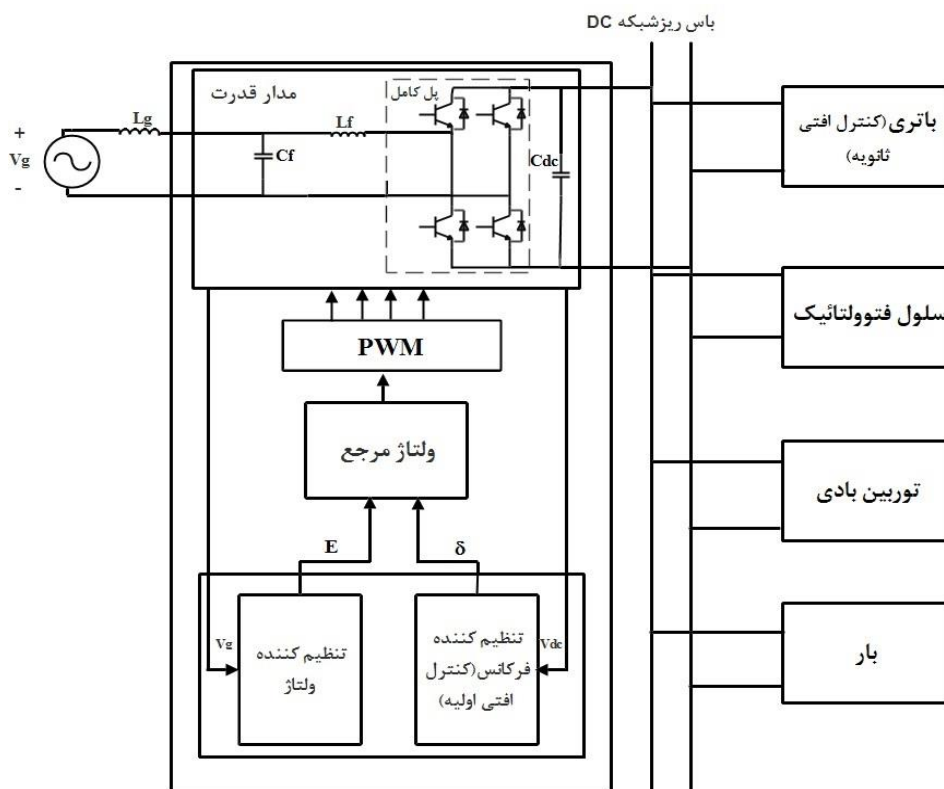


شکل (۳-۵): مشخصه افتی در شبکه عمدتاً سلفی

همان طور که در بخش ۳-۲ بیان شد استفاده از روش کنترل افتی به دلیل فقدان اینرسی در کنترل VSC هایی که به DG متصل اند، باعث کاهش اینرسی کل شبکه می شود در نتیجه شبکه به اغتشاشات حساس تر شده و سریع تر پاسخ می دهد و پایداری سیستم دچار مشکل می شود یک راه حل برای رفع این مشکل استفاده از ماشین سنکرون مجازی در ریزشبهه DC است که با استفاده از اینرسی مجازی و کنترل افتی موجود در معادله نوسان به کنترل فرکانس شبکه می پردازد در بخش بعد مدل ماشین سنکرون مجازی به همراه اجزا آن بیان شده است.

۷-۳ ماشین سنکرون مجازی مورد مطالعه

شکل (۶-۳) ساختار ماشین سنکرون مجازی و ریزشبكة DC با استراتژی کنترلی آن (که در این پایان‌نامه با روش پیشنهادی به کار گرفته شده است) را نشان می‌دهد. سلول‌های ذخیره انرژی بر پایه باتری و سلول‌های DG مبتنی بر فتوولتائیک و توربین بادی، در ریزشبكة DC می‌باشند که هر سلول شامل یک مبدل DC-DC متناظر در آن است. VSM در اینجا به عنوان رابط برای تجمیع ریزشبكة DC با شبکه AC با تنظیم ولتاژ و تنظیم مقادیر فرکانس کار می‌کند. در این شبکه سیستم ذخیره‌ساز انرژی نسبت به ولتاژ باس DC عکس‌العمل نشان می‌دهد تا فرمان لازم برای شارش دوطرفه توان و شارژ و دشارژ صادر شود. برای سلول‌های فتوولتائیک، توان حداکثر در نظر گرفته می‌شود، توان توربین بادی بر اساس سرعت باد تغییر می‌کند و معمولاً برای بار الکتریکی، کنترل فرکانسی در نظر گرفته نمی‌شود.

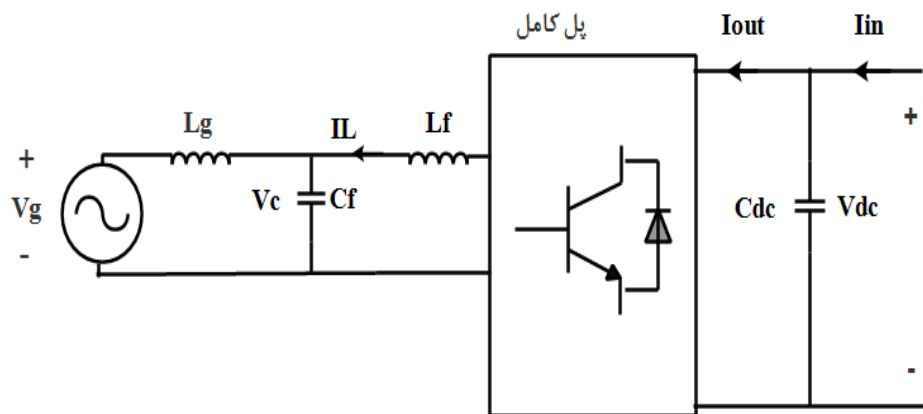


شکل (۶-۳): ساختار کلی VSM و ریزشبكة DC با استراتژی کنترل

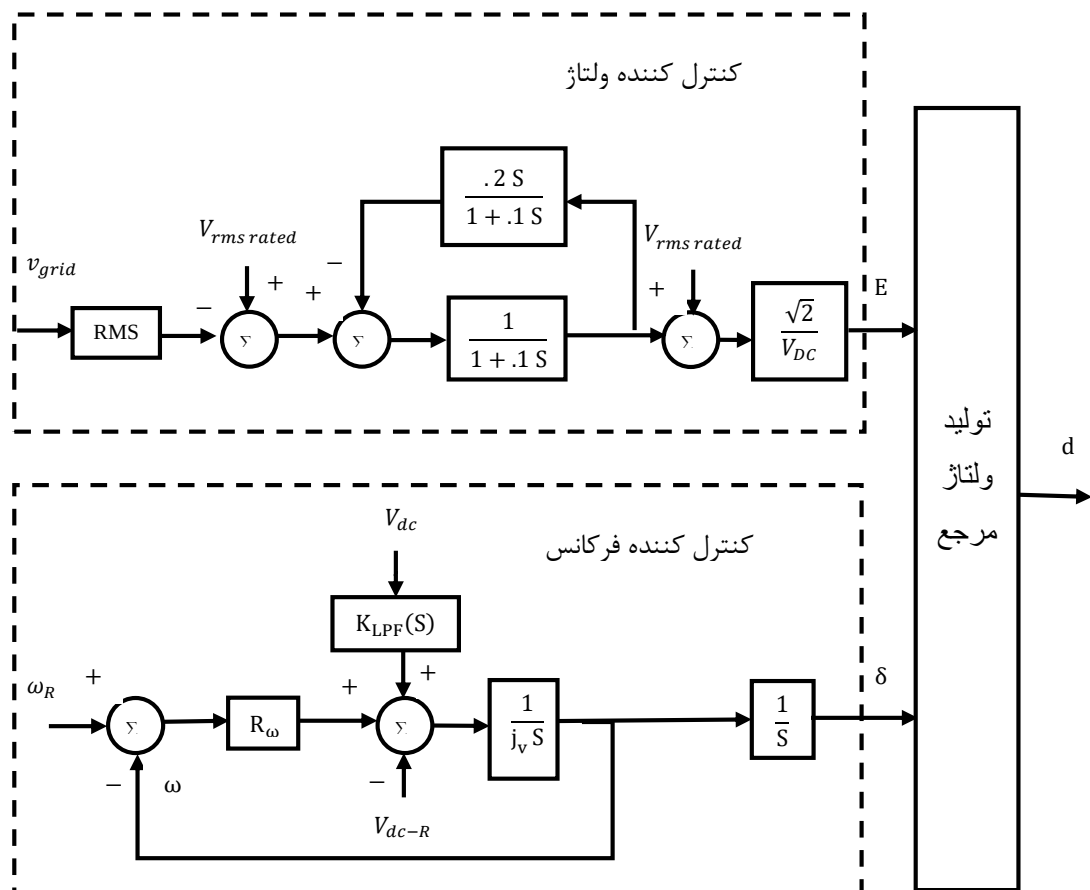
۳-۸ کنترل فرکانس در ماشین سنکرون مجازی

همان‌طور که در قسمت‌های قبل بیان شد فرکانس سیستم قدرت به تعادل توان اکتیو وابسته است و باید در شرایط مختلف بهره‌برداری تقریباً ثابت باقی بماند. فرکانس برخلاف ولتاژ، یک پارامتر سراسری در سیستم است و تغییر در توان اکتیو تولیدی و یا مصرفی در یک باس بر روی فرکانس کل سیستم تأثیر می‌گذارد [۸۶]. با افزایش نفوذ DGها در نتیجه کاهش اینرسی کل شبکه با استفاده از ماشین سنکرون مجازی، اینرسی و میرایی که در معادله نوسان ماشین سنکرون واقعی وجود دارد را شبیه‌سازی و به کنترل فرکانس شبکه پرداخته می‌شود. در این روش DGها با کمک VSC قابلیت تغییر سریع توان در اغتشاشات شبکه دارند. در عمل برخی از محدودیت‌ها در تزریق توان اکتیو توسط DGها به دلیل محدودیت‌ها واحد تولید توان وجود دارد. برای رفع این مشکل با استفاده از سلول‌های ذخیره انرژی یک تغییر سریع توان برای کنترل فرکانس امکان‌پذیر می‌باشد. از آنجایی که مقدار تغییر توان پس از یک اختلال مشخص نمی‌باشد، کنترل افتی بر اساس انحراف فرکانس سیستم قدرت تنظیم می‌شود [۸۷]. DGهای مبتنی بر VSC این انحراف را با یک دینامیک سریع دنبال می‌کنند و توان اکتیو تزریقی خود را با استفاده از مشخصه افتی تغییر می‌دهند [۸۰].

برای شبیه‌سازی رفتار SM، اولین پیش‌نیاز برای VSM تولید یک منبع ولتاژ سینوسی مبتنی بر مرجع زاویه فاز، دامنه و فرکانس خود است. شکل (۳-۷) مدار قدرت VSM را که شامل یک پل کامل، فیلتر LCL و یک خازن DC است که تشکیل مبدل منبع ولتاژ می‌دهند را نشان می‌دهد و شکل (۳-۸) جزئیات کنترل ماشین سنکرون مجازی را با استفاده از مفاهیم VSM و کنترل‌های افتی بهبود یافته در مراجع [۵۱، ۵۹، ۶۴، ۷۷، ۸۴، ۸۸-۹۰] که شامل یک کنترل‌کننده ولتاژ و یک کنترل‌کننده فرکانس برای تولید ولتاژ مرجع برای کلید زنی مبدل منبع ولتاژ نشان می‌دهد.



شکل (۷-۳): مدار قدرت ماشین سنکرون مجازی



شکل (۸-۳): استراتژی دقیق کنترل VSM

۱-۸-۳ پشتیبانی اینرسی

در ماشین‌های سنکرون متداول، روتور به عنوان ذخیره‌ساز انرژی^۱ عمل می‌کند که انرژی جنبشی را در مواقع عدم تعادل توان میان تولید و بار، جبران می‌کند، در حالی که در ماشین سنکرون مجازی ویژگی‌های اینرسی با استفاده از انرژی ذخیره‌شده در خازن باس DC شبیه‌سازی می‌شوند؛ بنابراین، انرژی الکتریکی ذخیره‌شده خازن (ω_e) مشابه با انرژی جنبشی ذخیره‌شده روتور (ω_r) است [۹۱].

مطابق با شکل (۷-۳) خازن در سمت DC (C_{dc}) دارای ویژگی مشابه معادله نوسان است، معادله دینامیک ولتاژ خازن DC در رابطه (۱۰-۳) بیان شده است [۳۲، ۵۷]:

$$C_{dc} V_{dc}' = i_{in} - i_{out} \quad (10-3)$$

با ضرب رابطه (۱۰-۳) در V_{dc} رابطه به صورت (۱۱-۳) اصلاح می‌شود.

$$C_{dc} V_{dc} V_{dc}' = i_{in} V_{dc} - i_{out} V_{dc} = P_{in} - P_{out} \quad (11-3)$$

رابطه (۱۱-۳) مشابه رابطه (۱-۳) است؛ که در آن C_{dc} خازن DC، V_{dc} ولتاژ خازن DC، V_{dc}' نرخ تغییرات ولتاژ DC، P_{in} توان اکتیو ورودی از ریزشبه DC، P_{out} توان اکتیو تزریق شده به شبکه AC، i_{in} جریان تزریقی از ریزشبه DC به C_{dc} و i_{out} جریان از C_{dc} به مبدل است، V_{dc} ، P_{in} و P_{out} از VSM به ترتیب مشابه با J ، ω_m ، τ_m و τ_e می‌باشند [۳۲]. رابطه (۱۱-۳) نشان می‌دهد که خازن DC دارای عملکرد مشابه با روتور SM دارد و می‌تواند به جای روتور برای کنترل شبیه‌سازی اینرسی در VSM استفاده شود با این حال برای همان مقدار انرژی مشابه در روتور SM، خازن DC بسیار بزرگ خواهد بود که این کار غیرمنطقی است برای رفع این مشکل استفاده از ذخیره‌ساز انرژی شده است [۳۴، ۵۷، ۹۲]. یکی از اهداف اصلی در کنترل VSC، حفظ ولتاژ ثابت در لینک DC است. با فرض مقدار تلفات کم VSC، توان AC ورودی برابر با توان DC است که توان DC در رابطه (۱۲-۳)

^۱ Energy Buffer

نشان داده شده است [۵۷].

$$P_{DC} = V_{DC} I_{DC} \quad (۱۲-۳)$$

$$J_v \omega' + R_\omega(\omega - \omega_R) = V_{DCF} - V_{DC-R} \quad (۱۳-۳)$$

$$V_{DCF} = K_{LPF} V_{DC} \quad (۱۴-۳)$$

رابطه (۱۳-۳)، معادله نوسان ماشین سنکرون مجازی است که مشابه با رابطه (۱-۳) است. در رابطه (۱۳-۳) ولتاژ نامی خازن DC، V_{DCF} ولتاژ میانگین حاصل از خازن DC، J_v پارامتر اینرسی مجازی و R_ω ضریب میرایی است که با J و D در رابطه (۱-۳) متناظر می‌باشند و تنها تفاوت آن جایگزین شدن V_{DC} به جای گشتاور است؛ بنابراین این قسمت کنترل می‌تواند رفتارهای مکانیکی روتور SM را بدون اجزای فیزیکی مشابه‌سازی کند. رابطه (۱۴-۳)، ولتاژ خازن پس از عبور فیلتر و رابطه (۳-۱۵) تابع انتقال فیلتر پایین گذر مرتبه اول $K_{LPF}(S)$ با فرکانس زاویه‌ای قطع ω_f بیان می‌کند. $K_{LPF}(S)$ برای حذف فرکانس‌های پایین و کلید زنی برای V_{DC} مورد استفاده قرار می‌گیرد [۵۷].

$$K_{LPF}(S) = \frac{\omega_f}{s + \omega_f} \quad (۱۵-۳)$$

با ادغام رابطه‌های ((۱۳-۳)-(۱۵-۳)) و ((۱۱-۳)) مدل روتور مجازی از نظر سخت‌افزاری و کنترلی ترکیب شده و معادله نوسان را تبعیت می‌کنند [۳۲، ۸۳] معادله روتور مجازی در رابطه (۱۶-۳) بیان شده است.

$$\omega = \left(\frac{P_{in} - P_{out}}{C_{dc} V_{dc} S} K_{LPF} - V_{dcR} + R_\omega \omega_R \right) \frac{1}{J_v S + R_\omega} \quad (۱۶-۳)$$

پس از به دست آوردن سرعت زاویه‌ای مطلوب مطابق با رابطه (۱۳-۳)، با گذر از یک انتگرال گیر، مطابق با رابطه (۱۷-۳) سرعت زاویه‌ای به زاویه توان δ تبدیل می‌شود، این زاویه توان برای ایجاد ولتاژ مرجع استفاده می‌شود [۱].

$$\delta = \frac{1}{s} \omega \quad (۱۷-۳)$$

۲-۸-۳ ضریب میرایی

سیم‌پیچ‌های میرایی^۱ در ماشین‌های سنکرون نقش مهمی در پایداری نوسانات روتور دارند. در رابطه (۱-۳)، گشتاور میرایی معرفی شده، متناسب با انحراف سرعت موتور است و این گشتاور برای جلوگیری از هرگونه حرکت نوسان روتور، تولید شده توسط سیم‌پیچ میرایی فیزیکی ماشین است. گشتاور میرایی مشابه با معادله نوسان مکانیکی ماشین سنکرون در رابطه (۱۳-۳) و شکل (۸-۳) شبیه‌سازی شده است. در رابطه (۱۳-۳)، R_ω ضریب میرایی شبیه‌سازی شده و شیب افقی ولتاژ DC به فرکانس AC است. این شیب افقی متفاوت از گاورنرهای افقی مرسوم $\omega - P$ است [۸، ۱].

۳-۹ کنترل ولتاژ

مشابه با ماشین سنکرون، در ماشین سنکرون مجازی از تنظیم‌کننده ولتاژ خودکار (AVR) برای تنظیم ولتاژ مبدل (V_{grid}) تا به مقدار نامی خود ($V_{rms \text{ rated}}$) برسد استفاده می‌شود. خروجی AVR اندازه ولتاژ مرجع E برای ولتاژ خروجی مبدل است. بلوک دیاگرام آن در شکل (۸-۳) نشان داده شده است [۹۳، ۹۴].

با استفاده از زاویه توان δ که از کنترل فرکانس و اندازه ولتاژ E که از کنترل ولتاژ به دست می‌آید، یک ولتاژ AC به‌عنوان ولتاژ مرجع تولید می‌شود که این ولتاژ به مدولاسیون پهنای باند سینوسی^۲ (SPWM) ارسال می‌شود تا فرمان مطلوب جهت کلید زنی به مبدل منبع ولتاژ صادر شود [۹۵].

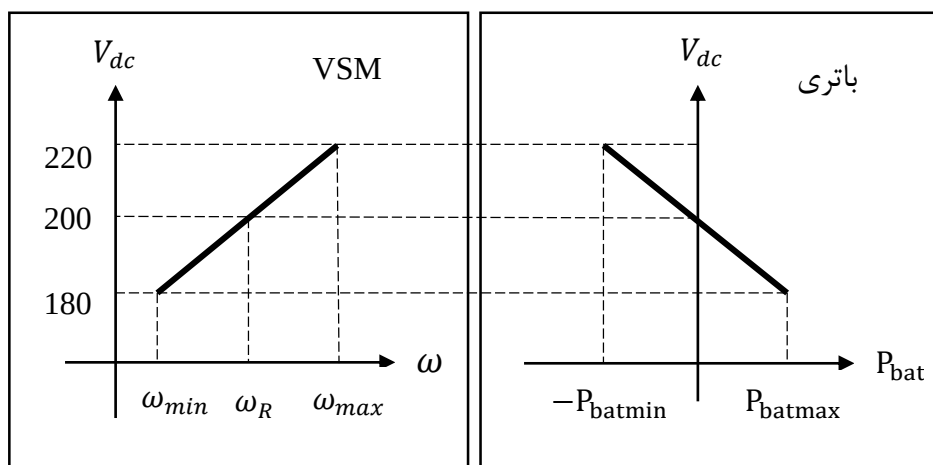
^۱ Damping Winding

^۲ Sine Pulse Width Modulation

۱۰-۳ کنترل افی دوگانه

انرژی ذخیره شده در VSM عمدتاً در خازن DC است که بسیار کوچک تر از روتور SM است. به همین علت از باتری برای پشتیبانی از اینرسی و بهبود پایداری سیستم در مقایسه با یک بانک خازن بزرگ DC کمک گرفته شده است.

برای دستیابی به مدیریت توان در همه شرایط شبکه، کنترل افی یک روش پرکاربرد و شناخته شده است که در کنترل VSM پذیرفته شده است. با این حال، اگر $\omega - P$ و $V-P$ مرسوم (ولتاژ DC به توان اکتیو) کنترل های افی مستقل و جداگانه در شبکه AC و ریزشبه DC اتخاذ شوند، توان از شبکه AC به ریزشبه DC و بالعکس ممکن است نامتعادل یا ناهماهنگ باشد و امکان حفظ مناسب پایداری و کنترل خودکار میسر نشود. برای غلبه بر این مشکل، یک کنترل افی دوگانه برای VSM و کنترل مدیریت توان باتری استفاده شده است، در شکل (۳-۶) نمای کلی این کنترل نشان داده شده است و در شکل (۳-۹) جزئیات آن آمده است [۹۶-۹۹].



شکل (۳-۹): کنترل افی دوگانه [۸۳]

۱۰-۱-۳ کنترل افی اولیه

از آنجایی که سلول های ذخیره انرژی در ریزشبه DC تنها می توانند به ولتاژ DC واکنش نشان دهند، فرکانس زاویه ای ω در VSM باید از طریق توان اکتیو به V_{DC} وصل شود. کنترل افی مرسوم

برای توان اکتیو در سیستم AC و DC به ترتیب در روابط (۱۸-۳) و (۱۹-۳) نشان داده شده است [۱۰۰].

$$\omega - \omega_R = -D_\omega(P - P_0) \quad (۱۸-۳)$$

$$V_{DC} - V_{DC-R} = -D_{VDC}(P - P_0) \quad (۱۹-۳)$$

در روابط (۱۸-۳) و (۱۹-۳)، P_0 ، توان نامی مبدل، D_ω و D_{VDC} به ترتیب شیب افقی برای سیستم AC و DC و ولتاژ V_{DC-R} نامی است. این دو رابطه با یکدیگر ترکیب می‌شوند و کنترل افقی اولیه برای VSM به صورت رابطه (۲۰-۳) بازنویسی می‌شود:

$$V_{dc} - V_{dc-R} = \frac{D_{vdc}}{D_\omega}(\omega - \omega_R) = R_\omega(\omega - \omega_R) \quad (۲۰-۳)$$

با توجه به شکل (۹-۳) محدوده تغییرات فرکانس در بازه ۵۹/۹ تا ۶۰/۱ می باشد و بازه تغییرات ولتاژ DC بین ۱۸۰ تا ۲۲۰ می‌باشد. براساس رابطه (۲۰-۳)، R_ω در رابطه (۲۱-۳) محاسبه می‌شود.

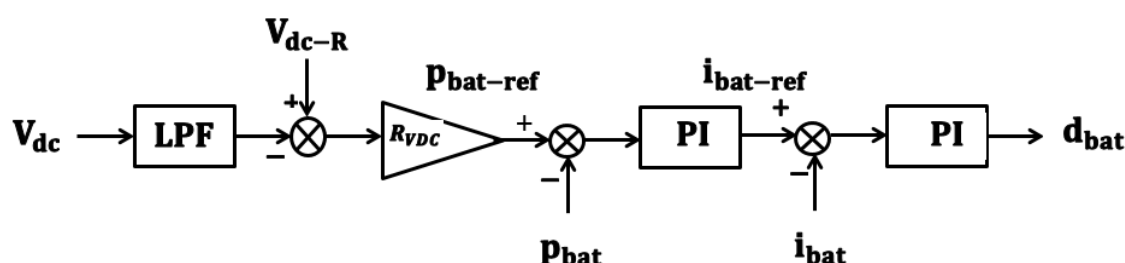
$$R_\omega = \frac{20}{0.1 * 2\pi} = 31.83 \quad (۲۱-۳)$$

در ماشین سنکرون سنتی، ثابت اینرسی H از ۱ تا ۱۰ ثانیه است. در شبیه سازی ماشین سنکرون مجازی اینرسی مجازی براساس رابطه (۲۲-۳) که H ثابت اینرسی، S توان شبکه، ω_0 سرعت زاویه اولیه است محاسبه می‌شود. ثابت اینرسی ۱ ثانیه و ۴ ثانیه انتخاب شده است که برابر اینرسی مجازی J_v ۱/۰۶ و ۴/۲۴ است [۱۰۱].

$$J_v = \frac{2 H S \omega_0 V_{dc}}{\omega^2 S} \quad (۲۲-۳)$$

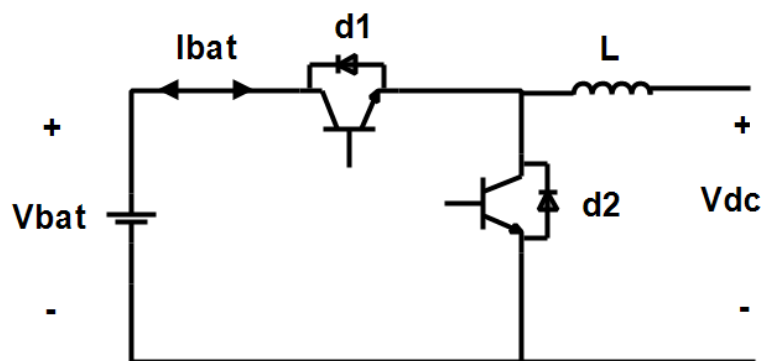
۲-۱-۱۰-۳ کنترل افنی ثانویه

کنترل افنی ثانویه در سلول‌های ذخیره انرژی یک کنترل افنی مرسوم $V-P$ است و R_{vdc} شیب افنی آن است. با توجه به کنترل افنی اولیه در VSM، توان خروجی باتری P_{bat} باید بر اساس ولتاژ DC کنترل شود. این کنترل در ستون سمت راست شکل (۳-۹) نشان داده شده است و شکل (۳-۱۰) کنترل دقیق این کنترل افنی را نشان داده است که در آن $P_{bat-ref}$ توان مرجع باتری i_{bat} جریان باتری $i_{bat-ref}$ جریان مرجع باتری است [۸۳، ۸۵، ۱۰۲].



شکل (۳-۱۰): کنترل کننده باتری [۸۳، ۸۵]

سلول ذخیره انرژی (ESC) شامل باتری و مبدل باک-بوست^۱ DC-DC دوطرفه است که در سمت ریزشبهه DC متصل است. وظیفه این مبدل ثابت نگه داشتن ولتاژ خازن DC در صورت تغییرات توان در شبکه AC و بار است. ولتاژ اتصال DC در ESC با استفاده از استراتژی حلقه‌های پشت‌سرهم کنترل شده است که در شکل (۳-۱۰) قابل مشاهده است و مدار قدرت باک-بوست دوطرفه در شکل (۳-۱۱) نشان داده شده است [۱۰۳، ۱۸].

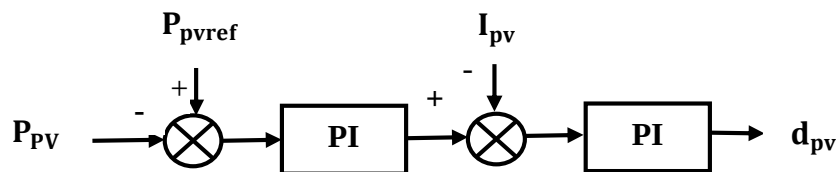


شکل (۳-۱۱): مبدل باک-بوست دوطرفه باتری [۱۰۳]

^۱ Buck-boost Converter

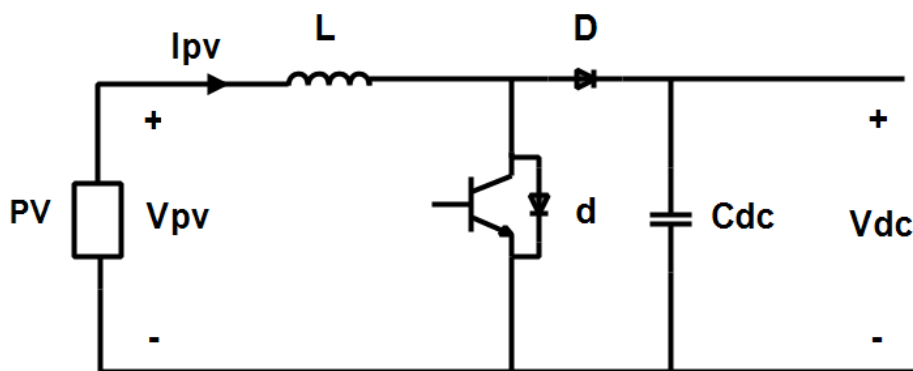
۱۱-۳ سیستم فتوولتائیک

مدار کنترلی سلول فتوولتائیک در شکل (۱۲-۳) نشان داده شده است. در این قسمت کنترلی توان فتوولتائیک (p_{pv}) جهت رسیدن به ماکزیمم توان با توان نامی خود (p_{pvref}) مقایسه شده است و پس از عبور از حلقه‌های پشت سر هم و مقایسه با جریان فتوولتائیک (I_{pv})، فرمان کلیدزنی به کلید مدار قدرت فتوولتائیک ارسال شده است.



شکل (۱۲-۳): مدار کنترلی سلول فتوولتائیک

سیستم فتوولتائیک از طریق مبدل DC/DC افزایشده به لینک DC متصل شده است. مبدل افزایشده در شکل (۱۳-۳) نشان داده شده است. اساس کار این مبدل بر اساس کلیدزنی است که با باز و بسته کردن متناوب کلید الکترونیکی کار می‌کند. ولتاژ خروجی این مبدل همواره بزرگ‌تر از ورودی است [۱۰۴].



شکل (۱۳-۳): مبدل DC/DC افزایشده سلول فتوولتائیک [۱۰۳]

۱۲-۳ توربین بادی

توانی که از انرژی جنبشی باد در یک توربین بادی با سطح مقطع $A(m^2)$ سرعت $V(\frac{m}{s})$ ، چگالی هوا $\rho(\frac{kg}{m^3})$ و ضریب توان توربین C_P که بازدهی دریافت انرژی از باد مشخص می کند از رابطه (۲۳-۳) محاسبه شده است [۱۰۵، ۱۰۶].

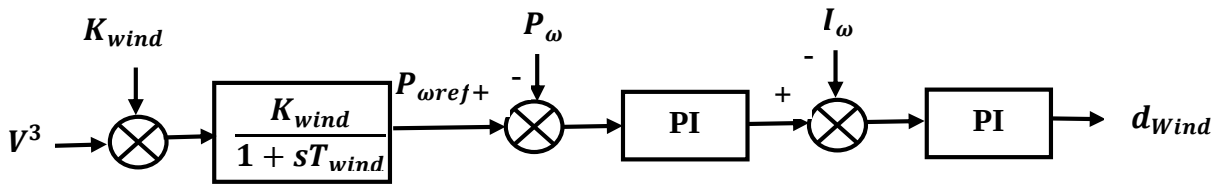
$$P_{wind} = \frac{1}{2} \rho A C_P V^3 \quad (23-3)$$

در رابطه (۲۳-۳) با فرض ثابت بودن سطح مقطع، سرعت، چگالی هوا و ضریب توان توربین، آن ها با یک ضریب ثابت K_{wind} نمایش داده شده است. در این حالت توانی که از انرژی جنبشی باد به دست آمده است مطابق با رابطه (۲۴-۳) است.

$$P_{wind} = K_{wind} V^3 \quad (24-3)$$

مدار کنترلی توربین بادی در شکل (۱۴-۳) نشان داده شده است. در این قسمت کنترلی توان توربین بادی جهت رسیدن به ماکزیمم توان با توان نامی خود که متناسب با سرعت به توان ۳ است مقایسه شده است و پس از عبور از حلقه های پشت سرهم فرمان کلیدزنی به کلید مدار توربین بادی ارسال کرده است در این شکل P_ω توان توربین بادی $P_{\omega ref}$ توان مرجع توربین بادی I_ω جریان توربین بادی است. به منظور مشاهده تاثیر اینرسی توربین بادی بر شبکه به $P_{\omega ref}$ تابع انتقال مرتبه اول رابطه (۲۵-۳) اضافه شده است [۱۰۷]. توربین بادی از طریق مبدل DC/DC افزاینده مانند شکل (۱۳-۳) به لینک DC متصل شده است.

$$G_{wind} = \frac{K_{wind}}{1 + sT_{wind}} \quad (25-3)$$



شکل (۱۴-۳): مدار کنترلی توربین بادی

۱۳-۳ سیگنال کوچک

مدل سیگنال کوچک یک سیستم تک فاز متصل به شبکه AC با یک ماشین سنکرون مجازی، یک توربین بادی، یک سلول فتوولتائیک و یک بار مطابق با شکل (۶-۳) در شکل (۱۵-۳) به منظور تجزیه و تحلیل اثر اینرسی مجازی بر روی شبکه نشان داده شده است.

با در نظر گرفتن مبدل منبع ولتاژ متصل به شبکه AC تغییرات توان به صورت رابطه (۲۶-۳) بیان می شود. در این رابطه V_g, δ_0, E_0 مقادیر حالت پایدار v_g, δ, E است. ولتاژ شبکه R مقاومت خط و X اندوکتانس خط است.

$$\Delta P_{out} = \frac{2RE_0 + R V_g \cos(\delta_0) + X V_g \sin(\delta_0)}{R^2 + X^2} \Delta E + \frac{RE_0 V_g \sin(\delta_0) + X E_0 V_g \cos(\delta_0)}{R^2 + X^2} \Delta \delta = K_{PE} \Delta E + K_{P\delta} \Delta \delta \quad (۲۶-۳)$$

توان های قسمت ریزشبه DC و نحوه محاسبه آنها در روابط (۲۴-۳) تا (۲۶-۳) بیان شده است. P_{PV} توان سلول فتوولتائیک، P_{wind} توان توربین بادی، K_{wind} ضریب ثابت توربین بادی، V سرعت باد، P_{Load} توان مصرفی بار، R_{Load} اندازه بار P_{bat} توان باتری، R_{Vdc} ضریب افتی باتری، V_{dc} و V_{dcR} نیز به ترتیب ولتاژ DC و ولتاژ DC نامی است. رابطه (۳۰-۳) تغییرات توان ریزشبه DC نسبت به ولتاژ در حوزه لاپلاس با نماد $G_P(s)$ نشان داده شده است.

$$P_{PV} = \text{ثابت}, P_{wind} = K_{wind} V^3 \quad (۲۷-۳)$$

$$P_{Load} = -\frac{V_{dc}^2}{R_{Load}} \quad (28-3)$$

$$P_{bat} = R_{Vdc}(V_{dcR} - V_{dc}) \quad (29-3)$$

$$G_P(s) = \frac{\Delta P_{in}}{\Delta V_{dc}} = \frac{\Delta P_{PV} + \Delta P_{Wind} + \Delta P_{Load} + \Delta P_{bat}}{\Delta V_{dc}} = -\frac{2V_{dc}}{R_{Load}} - R_{Vdc} \quad (30-3)$$

با ادغام رابطه (۱۶-۳)، (۲۶-۳) و (۳۰-۳) تابع انتقال تغییرات سرعت زاویه‌ای به تغییرات ولتاژ DC به‌صورت رابطه (۳۱-۳) نشان داده شده است.

$$\frac{\Delta \omega}{\Delta V_{dcR}} = \frac{-(C_{dc} V_{dc} s - G_P(s))s}{(J_v s + R_\omega)(C_{dc} V_{dc} s - G_P(s))s + K_{P\delta} K_{LPF}(s)} \quad (31-3)$$

در سیستم کنترل، یک شرط لازم و کافی برای پایداری سیستم تغییرناپذیر با زمان پیوسته خطی (LTI) می‌تواند توسط معادله مشخصه آن ارزیابی شود. برای معادله مشخصه رابطه (۳۲-۳) که یک چند جمله‌ای درجه سوم $P(s) = a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0 = 0$ است و با استفاده از معیار روت-هورویتز، که یک تست ریاضی است، شرط لازم و کافی برای پایداری سیستم کنترل LTI، مستلزم آن است که همه ضرایب باید هم علامت ($a_n > 0$ و $a_2 a_1 > a_3 a_0$) باشند [۱۰۱].

$$(C_{dc} V_{dc} J_v) s^3 + (R_\omega C_{dc} V_{dc} - G_P(s) J_v) s^2 - (G_P(s) m_\omega) s + K_{P\delta} K_{LPF}(s) = 0 \quad (32-3)$$

$$a_n > 0 \quad (33-3)$$

$$-G_P(s) R_\omega > 0 \quad (34-3)$$

$$a_2 a_1 > a_3 a_0 \quad (35-3)$$

$$(C_{dc} V_{dc} R_\omega - G_P(s) J_v)(-G_P(s) R_\omega) > (C_{dc} V_{dc} J_v)(K_{LPF}(s) K_{P\delta}) \quad (36-3)$$

$$(G_P(s)^2 R_\omega - C_{dc} V_{dc} K_{LPF}(s) K_{P\delta}) J_v > C_{dc} V_{dc} R_\omega^2 G_P(s) \quad (37-3)$$

$$\Delta_{VSM} = G_P(s)^2 - C_{dc} V_{dc} K_{LPF}(s) K_{P\delta} \quad (38-3)$$

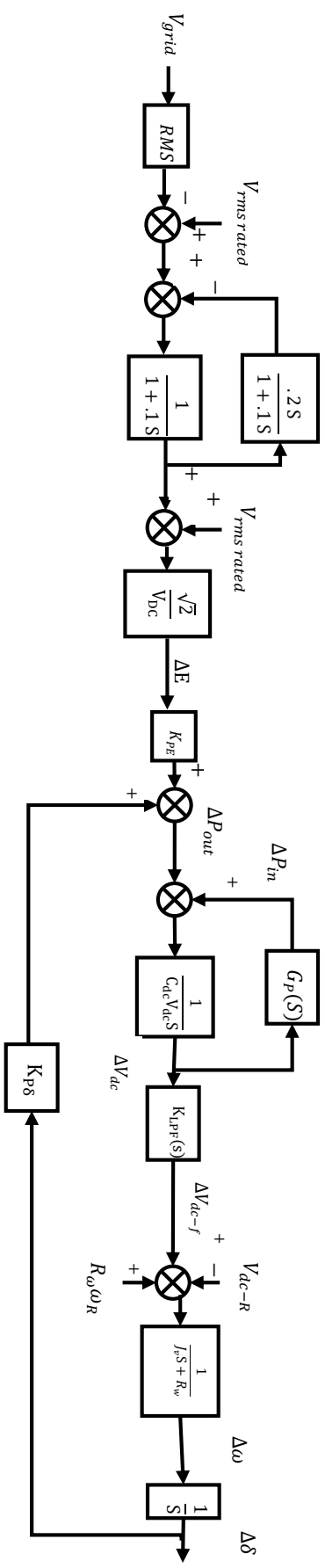
$$\Delta_{VSM} > 0 \quad (39-3)$$

$$J_v > \frac{C_{dc} V_{dc} R_{\omega}^2 G_P(s)}{\Delta_{VSM}} \quad (40-3)$$

$$\Delta_{VSM} < 0 \quad (41-3)$$

$$J_v < \frac{C_{dc} V_{dc} R_{\omega}^2 G_P(s)}{\Delta_{VSM}} \quad (42-3)$$

براساس روابط (40-3) و (42-3) محدوده اینرسی مجازی مشخص می‌شود.



شکل (۳-۱۵): بلوک دیاگرام کلی شبکه

۱۴-۳ جمع‌بندی

اکثر منابع تولید پراکنده شامل منابع AC فرکانس متغیر و یا منابع DC است. از این رو برای اتصال به شبکه نیاز به مبدل‌های منبع ولتاژ دارند. الگوی متداول در کنترل این منابع استخراج توان بیشینه و تزریق آن به شبکه است. این استراتژی تا زمانی موردپذیرش است که منابع انرژی تجدیدپذیر تنها بخش کوچکی از شبکه را در برگیرند چرا که عدم قطعیت‌های تولید این منابع توسط شبکه اصلی جبران می‌شود. با افزایش سطح نفوذ منابع تولید پراکنده و با توجه به اینرسی کم این منابع و به دلیل کنترل افتی مورد استفاده در VSC نیاز به روش‌هایی است که با این منابع مشابه با ژنراتورهای سنکرون متداول رفتار شود تا اینرسی مورد نیاز شبکه فراهم شود.

یکی از این روش‌های کنترل پیشرفته، ماشین سنکرون مجازی است که همان‌طور که در این فصل بیان شده ایده اولیه آن تولید دوباره مشخصات دینامیکی ماشین‌های مرسوم است حال پس از معرفی این مفهوم در فصل بعد به بررسی نحوه تعامل یک ریزشبکه DC که با ژنراتور سنکرون مجازی مجهز گردیده است با شبکه AC پرداخته خواهد شد.

فصل چهارم

تحلیل و بررسی اثر ماشین سکرون مجازی بر روی شبکه

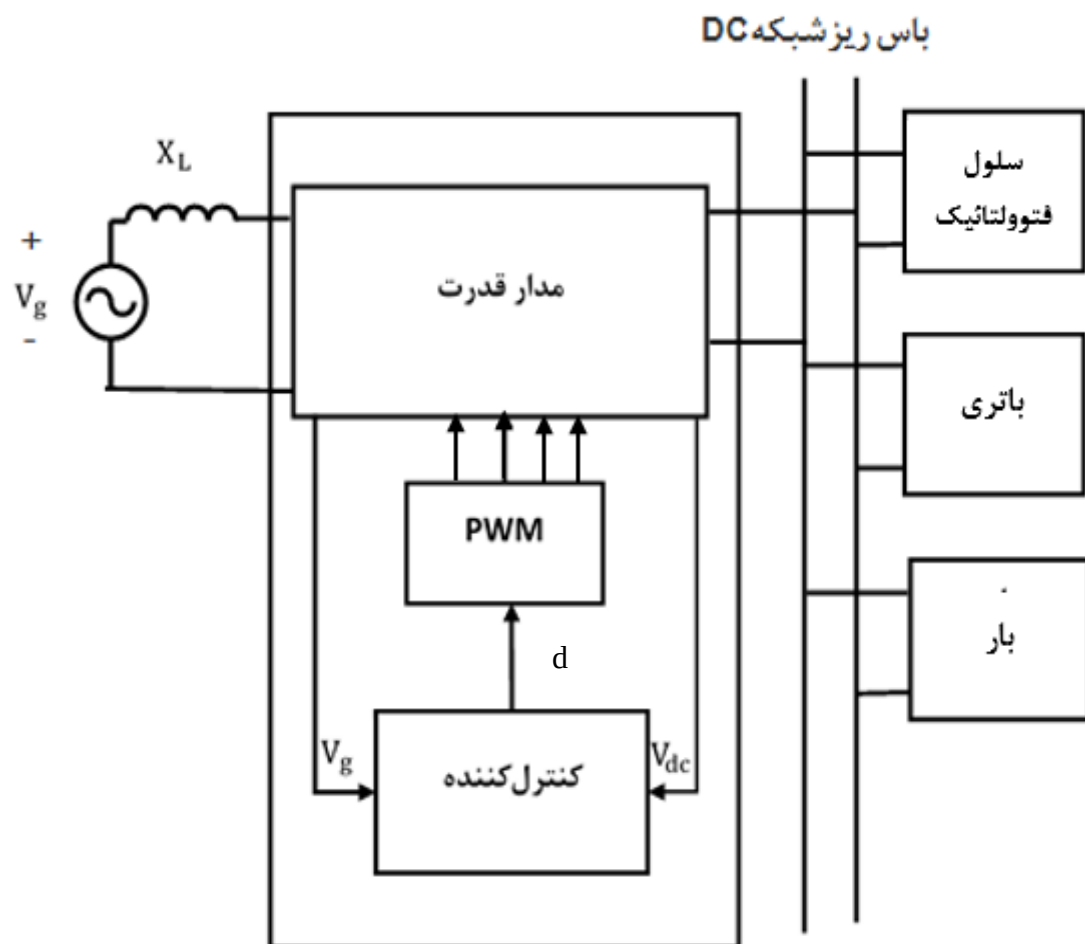
مورد مطالعه

۴-۱ مقدمه

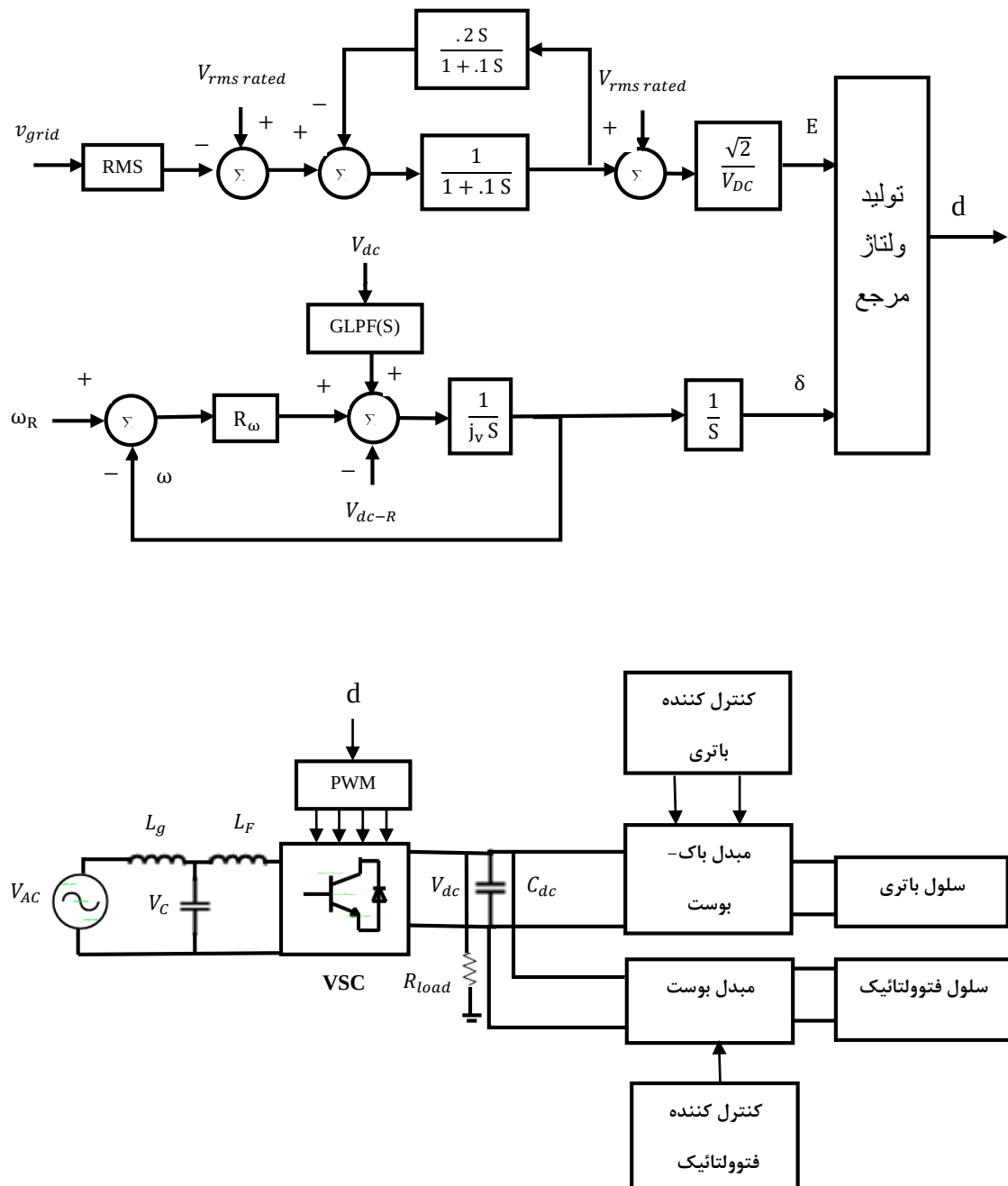
در این فصل با استفاده از معادلات دینامیکی که در فصل سوم برای ماشین سنکرون مجازی و ریزشبكة DC معرفی شده است و با استفاده از نرم افزار MATLAB/SIMULINK به بررسی اثر ماشین سنکرون مجازی در اتصال ریزشبكة DC به شبکه AC پرداخته شده است تا استراتژی کنترل پیشنهادی ماشین سنکرون مجازی یعنی قابلیت تنظیم ولتاژ، قابلیت تنظیم فرکانس و کنترل افقی مستقل دوگانه بین فرکانس شبکه AC و سلول ذخیره انرژی ریزشبكة DC انجام گیرد.

۴-۲ سیستم مورد مطالعه

مدل شماتیک شبکه پیاده سازی شده در نرم افزار متلب در شکل (۴-۱) و ساختار گسترده آن در شکل (۴-۲) نشان داده شده است. شبکه با توجه به شکل (۴-۲) شامل یک مبدل منبع ولتاژ است که با کمک معادله نوسان و معادله کنترل ولتاژ، فرکانس و اندازه ولتاژ مورد نیاز برای ایجاد ولتاژ مرجع جهت انجام عملیات کلیدزنی در مبدل منبع ولتاژ را فراهم کرده است. VSC همراه با باتری و کنترل کننده آن ها که یک کنترل افقی دوگانه است که تشکیل یک VSM را داده است. کنترل کننده افقی اولیه در این شبکه معادله نوسان است که با اندازه گیری ولتاژ DC خازن و کنترل افقی ($V_{dc}-\omega$) و کنترل افقی ثانویه که در باتری است با کنترل افقی ($V_{dc}-P_{bat}$) به کنترل توان در مبدل پرداخته است. در شبکه یک سیستم DG مبتنی بر PV که توان حداکثر به شبکه داده است همراه با کنترل کننده آن و یک بار ثابت نیز استفاده شده است. مشخصات کامل شبکه مورد مطالعه در جدول (۴-۱) و مشخصات باتری و سلول فتوولتائیک در جداول (۴-۲) و (۴-۳) بر طبق مدل ارائه شده در فصل سوم بخش ۳-۱۰ و ۳-۱۱ است.



شکل (۴-۱): شبکه مورد مطالعه



شکل (۴-۲): ساختار گسترده شبکه مورد مطالعه

جدول (۴-۱): مشخصات شبکه مورد مطالعه [۸۳]

مقدار	پارامتر	متغیر
۲۰۰	ولتاژ نامی DC	V_{DC-R} (V)
۴	خازن DC	C_{dc} (mF)
120π	فرکانس زاویه‌ای ولتاژ AC نامی	ω_R (Rad/S)
۱/۰۶	اینرسی مجازی	J_v
۳۱/۸۳	ضریب میرایی کنترل افقی فرکانس زاویه‌ای AC به ولتاژ DC	R_ω
۰/۰۰۰۱	اندوکتانس خط	L (H)
۱۲۰	ولتاژ نامی مرجع	$V_{rms-rated}$ (V)
۸۰	امپدانس بار	R_{Load} (Ω)

جدول (۴-۲): مشخصات باتری [۸۳]

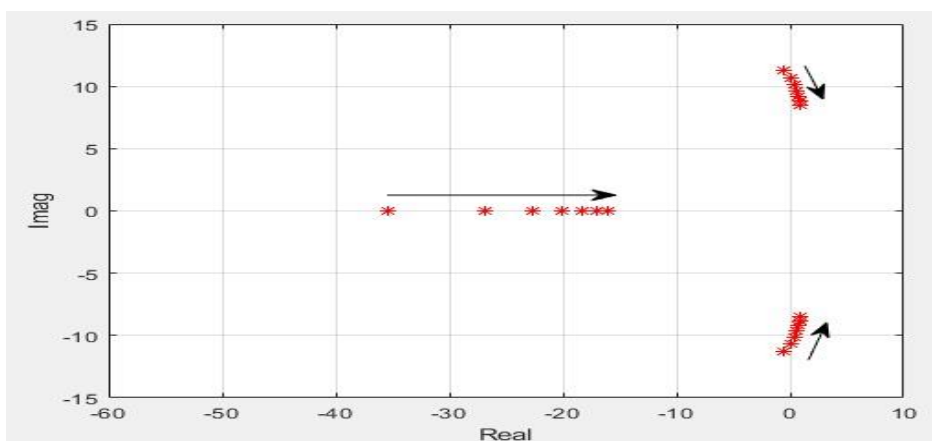
مقدار	پارامتر	متغیر
۲۵	شیب افقی توان اکتیو به ولتاژ DC	R_{vdc}
۰/۲	ضریب تناسبی کنترل کننده توان اکتیو باتری	K_{Pp}
۰/۰۰۸	ضریب انتگرالی کنترل کننده توان اکتیو باتری	K_{Pc}
۰/۱	ضریب تناسبی کنترل کننده جریان باتری	K_{Ip}
۰/۵	ضریب انتگرالی کنترل کننده جریان باتری	K_{Ic}

جدول (۴-۳): مشخصات سلول فتوولتائیک

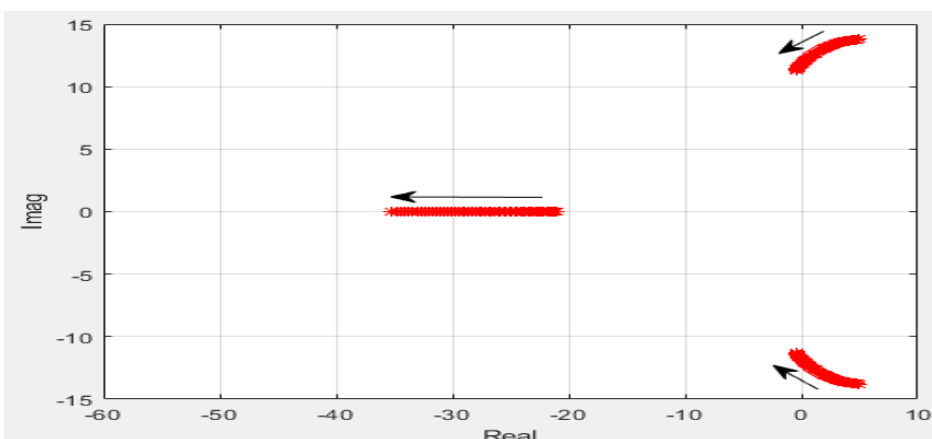
مقدار	پارامتر	متغیر
۵۰۰	توان نامی سلول فتوولتائیک	$P_{pv-ref} (W)$
۰/۰۰۲	ضریب تناسبی کنترل کننده توان اکتیو سلول فتوولتائیک	K_{Ppv}
۰/۹۶	ضریب انتگرالی کنترل کننده توان اکتیو سلول فتوولتائیک	K_{Pvc}
۳	ضریب تناسبی کنترل کننده جریان سلول فتوولتائیک	K_{Pvp}
۶۴۸۰۰	ضریب انتگرالی کنترل کننده جریان سلول فتوولتائیک	K_{Pvc}

۴-۲-۱ تحلیل پایداری شبکه با استفاده از مکان هندسی ریشه‌ها

با استفاده از تابع تبدیل مطرح‌شده رابطه (۳-۳۱) موجود در بخش ۳-۱۳، شکل (۴-۳) تغییرات مقادیر ویژه به ازای تغییرات اینرسی مجازی J_v از $1/0.6$ به $4/24$ با گام‌های 0.5 در نرم‌افزار MATLAB ترسیم‌شده است. به همین ترتیب با استفاده از این رابطه تغییرات مقادیر ویژه به ازای تغییرات میرایی R_ω از 5 به $31/83$ با گام‌های 0.5 در شکل (۴-۴) ترسیم‌شده است.



شکل (۴-۳): مکان هندسی ریشه‌های شبکه به ازای تغییرات J_v



شکل (۴-۴): مکان هندسی ریشه‌های شبکه به ازای تغییرات R_ω

همان‌طور که از شکل (۴-۳) مشاهده می‌شود با افزایش اینرسی مجازی مکان هندسی ریشه‌ها به سمت راست محور حرکت می‌کند و تمایل سیستم به ناپایداری افزایش می‌یابد. در شکل (۴-۴)

مشاهده می‌شود با افزایش مقدار میرایی شبکه به سمت چپ محور حرکت کرده و در اندازه R_ω ، $31/83$ در حالت پایدار خود است. در مطالعه ماشین‌های سنکرون، مشاهده می‌شود که با افزایش اینرسی در یک محدوده خاص، سیستم از پایداری بیشتری برخوردار است همچنین کاملاً مشهود است که با افزایش بیش از اندازه آن، سیستم با مشکل ناپایداری مواجه می‌شود [۱۰۸]. با شبیه سازی سیگنال کوچک ماشین سنکرون و انجام مطالعات پایداری می‌توان محدوده معین برای تغییرات اینرسی چرخشی را پیدا کرد و مشاهده نمود که با افزایش اینرسی از یک مقدار مشخصی، ناپایداری رخ می‌دهد. در پایان نامه حاضر که عملکرد ماشین سنکرون به نمایش می‌گذارد نیز مشاهده می‌شود که وجود اینرسی مجازی لازم است که بتواند تحمل سیستم را در مقابل اغتشاشات و میرا کردن آن‌ها افزایش دهد. اما هنگامی که اینرسی از یک مقدار معینی بیشتر شود ناپایداری شبکه و VSM را در پی خواهد داشت. همچنین با مطالعه مقالات مرجع [۸۳ و ۱۰۹] شاهد تأثیر اینرسی و ضریب میرایی بر نوسانات فرکانس و توان خروجی در ماشین سنکرون مجازی می‌باشیم که نشان می‌دهند افزایش ضریب میرایی نوسانات را مهار می‌کند و افزایش اینرسی باعث افزایش نوسان توان می‌شود در نتیجه افزایش اینرسی مجازی J_v برای عملکرد توان ماشین سنکرون مجازی مفید واقع نمی‌شود اما برای مهار اضافه جهش فرکانس مناسب و لازم است. در حالی که افزایش میرایی برای هر دو عملکرد فرکانس و توان مناسب است.

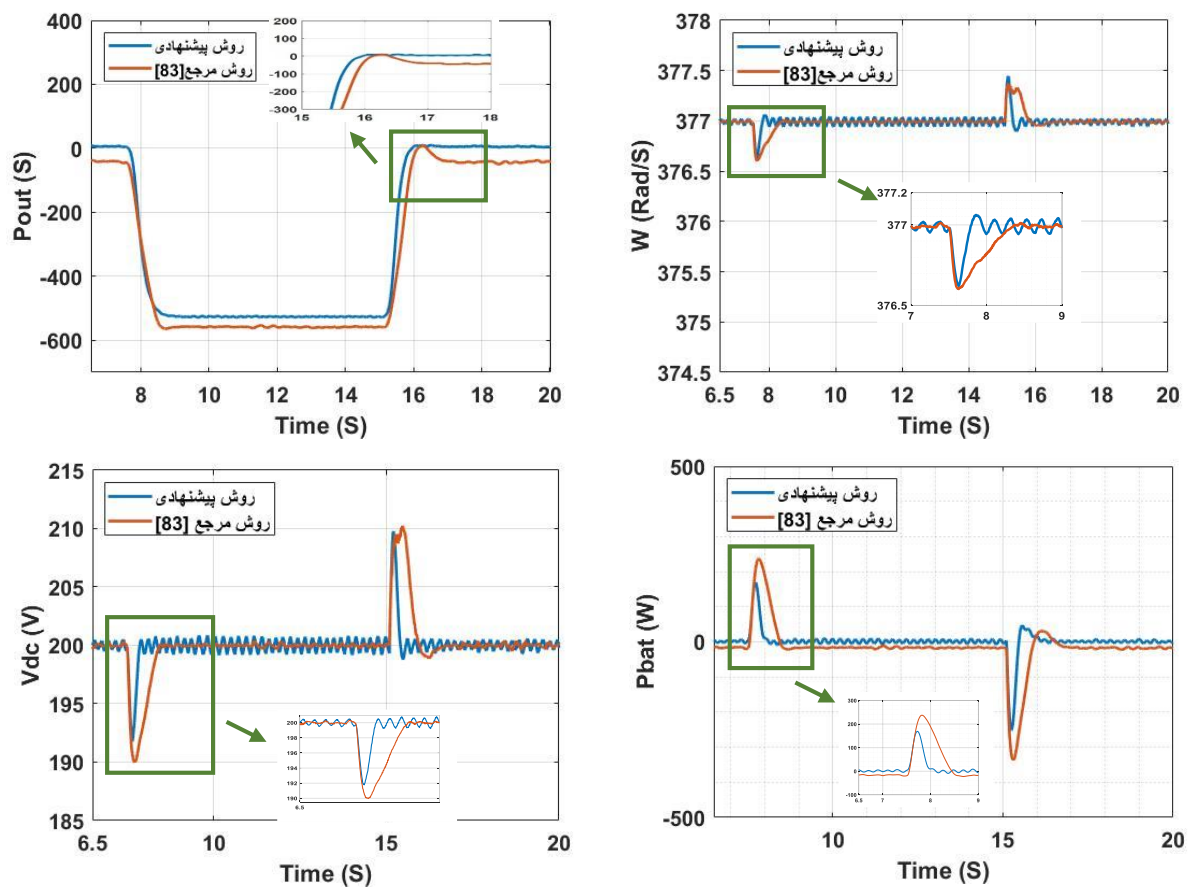
۴-۲-۲ کنترل ریزش شبکه DC شامل باتری و سلول فتوولتائیک و بار

در این قسمت، شبکه برق AC در ولتاژ $120V$ و فرکانس $60Hz$ است. ریزش شبکه DC شامل یک سلول فتوولتائیک به توان 500 وات یک بار DC به اندازه 80 اهم معادل توان مصرفی 500 وات و یک باتری است که به کمک ماشین سنکرون مجازی به شبکه برق متصل شده است. در بازه زمانی 0 تا 3 ثانیه شرایط اولیه شبیه سازی شبکه است و پس از 3 ثانیه شبکه با اینرسی مجازی $1/06$ به حالت پایدار خود رسیده است و شبکه با اینرسی مجازی $4/24$ ، زمان بیشتری از 3 ثانیه طول می کشد تا به پایداری برسد. در این پایان نامه از شرایط اولیه شبیه سازی صرف نظر شده است. در جداول داده شده در این قسمت توان بار مصرفی مثبت و توان تزریقی از سمت ریزش شبکه به شبکه مثبت و توان تزریقی از شبکه به ریزش شبکه منفی است و توان دریافتی از ریزش شبکه به شبکه مثبت فرض شده است.

۴-۲-۲-۱ حالت اول: قطع و وصل سلول فتوولتائیک

الف-مقایسه نتایج قطع و وصل سلول فتوولتائیک

شکل (۴-۵) توان های شبکه، ولتاژ DC، فرکانس زاویه ای شبکه با استفاده از روش مرجع [۸۳] و روش پیشنهادی نمایش داده است. به منظور واضح نشان دادن مقایسه، نتایج از ثانیه $6/5$ به بعد نشان داده شده است. هدف مشترک هر دو روش کنترل ولتاژ و فرکانس شبکه می باشد و تفاوت روش پیشنهادی با روش مرجع [۸۳] تغییر در روش کنترل کننده ولتاژ و اضافه کردن توربین بادی به شبکه می باشد. در بازه زمانی $7/5$ تا 15 ثانیه سلول فتوولتائیک از مدار خارج می شود همان طور که مشاهده می شود در روش پیشنهادی پارامترهای شبکه با سرعت بیشتری نسبت به روش مرجع [۸۳] پایدار شده است.



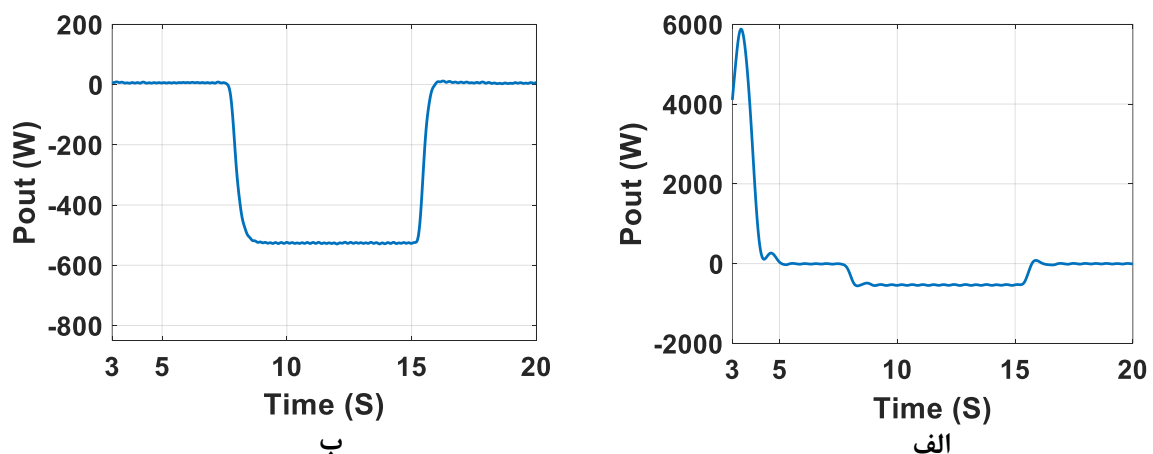
شکل (۴-۵): نتایج شبیه سازی شبکه با روش مرجع [۸۳] و روش پیشنهادی در حالت قطع و وصل سلول فتوولتائیک

ب- قطع و وصل سلول فتوولتائیک با روش پیشنهادی

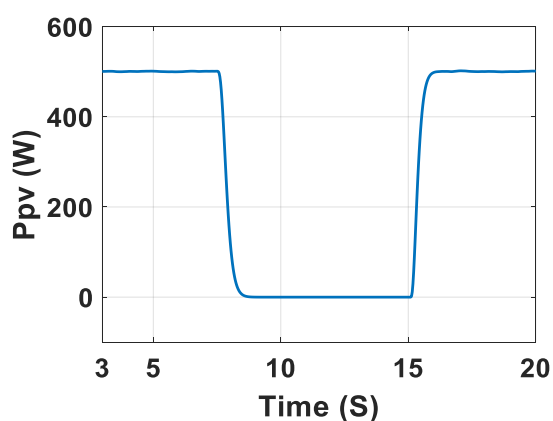
در این حالت، هدف مشاهده اثر تغییرات توان سلول فتوولتائیک بر شبکه در بازه زمانی ۳ تا ۲۰

ثانیه با میرایی R_w برابر $31/83$ و اینرسی‌های مجازی J_v برابر $1/06$ و $4/24$ است. در بازه زمانی

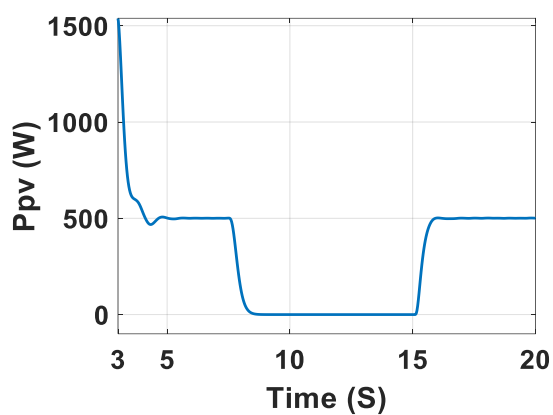
۷/۵-۱۵ ثانیه سلول فتوولتائیک از شبکه قطع شده است.



شکل (۴-۶): تغییرات توان شبکه AC با قطع و وصل سلول فتوولتائیک الف: $J_v = 4.24$ ب: $J_v = 1.06$

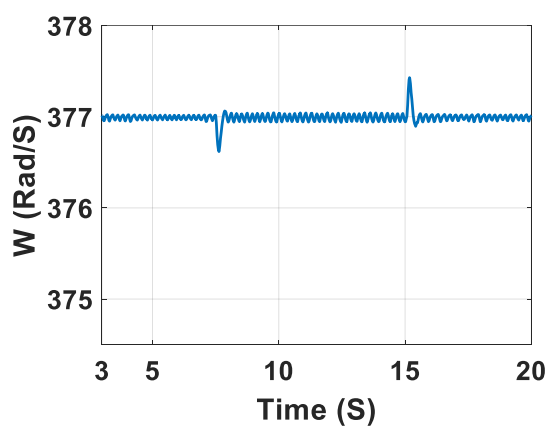


ب

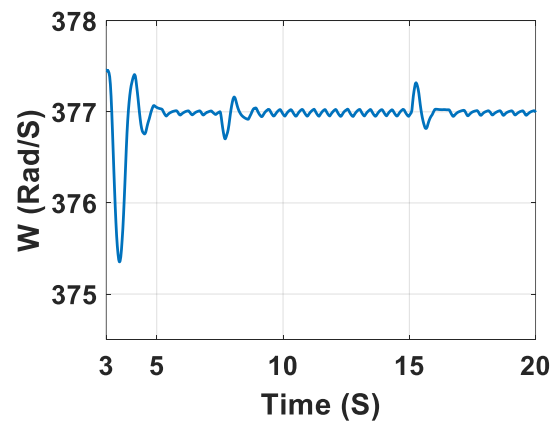


الف

شکل (۷-۴): تغییرات توان سلول فتوولتائیک با قطع و وصل سلول فتوولتائیک الف: $J_v = 4.24$ ب: $J_v = 1.06$

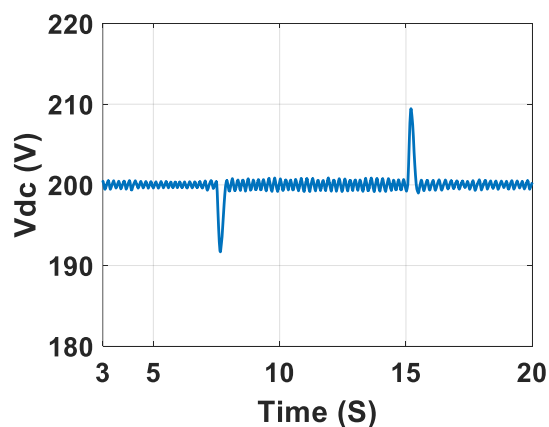


ب

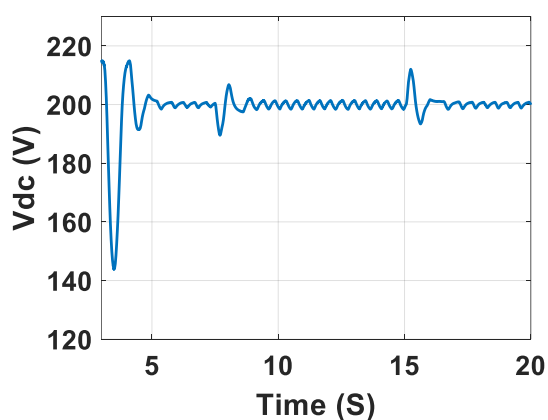


الف

شکل (۸-۴): تغییرات فرکانس زاویه ای با قطع و وصل سلول فتوولتائیک الف: $J_v = 4.24$ ب: $J_v = 1.06$

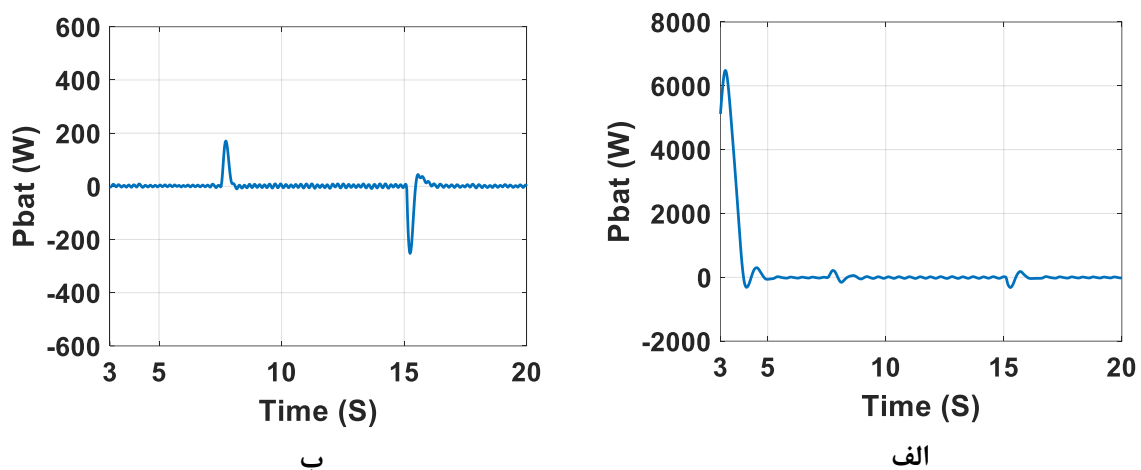


ب



الف

شکل (۹-۴): تغییرات ولتاژ DC با قطع و وصل سلول فتوولتائیک الف: $J_{vir} = 4.24$ ب: $J_{vir} = 1.06$



شکل (۴-۱۰): تغییرات توان باتری با قطع و وصل سلول فتوولتائیک الف: $J_v = 4.24$ ب: $J_v = 1.06$

شکل‌های (۴-۶) تا (۴-۱۰) توان‌های شبکه، ولتاژ DC، فرکانس زاویه‌ای و تأثیر اینرسی مجازی بر سرعت پایداری شبکه در حالت‌های الف و ب نمایش داده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود شبکه در بازه زمانی ۳ تا ۷/۵ ثانیه در حالت پایدار خود می‌باشد و تمام توان تولیدی توسط سلول فتوولتائیک به میزان ۵۰۰ وات به بار سمت ریزش‌بکه DC که توان مصرفی معادل ۵۰۰ وات تزریق می‌کند و هیچ توانی با سمت شبکه AC مبادله نمی‌شود. در بازه زمانی ۷/۵ تا ۱۵ ثانیه سلول فتوولتائیک از مدار خارج می‌شود و کل توان بار به اندازه ۵۰۰ وات توسط شبکه AC تأمین می‌شود. در بازه زمانی ۱۵ تا ۲۰ ثانیه شبکه به حالت اولیه خود بازمی‌گردد و سلول فتوولتائیک توان بار را تأمین می‌کند در لحظه‌های ۷/۵ و ۱۵ ثانیه که توان فتوولتائیک قطع و وصل می‌شود، باتری برای پشتیبانی از پاسخ اینرسی مورد استفاده قرار می‌گیرد و توان آن به ترتیب به اندازه ۱۷۰/۵۹ افزایش و ۲۵۲/۲- کاهش می‌یابد. در این لحظه‌ها فرکانس زاویه‌ای به ترتیب ۰/۰۹۹ درصد کاهش و ۰/۱۱۶ درصد افزایش، ولتاژ DC به ترتیب به اندازه ۴/۱۵ درصد کاهش و ۴/۷ درصد افزایش می‌یابد. همچنین در لحظه‌های مذکور فرکانس زاویه‌ای، ولتاژ DC، توان باتری و توان‌های شبکه به کمک ماشین سنکرون مجازی به سرعت به حالت ایده‌آل و پایدار خود می‌رسند و از فروپاشی شبکه جلوگیری می‌کنند. همان‌طور که از شکل‌های (۴-۶) تا (۴-۱۰) مشاهده می‌شود پارامترهای شبکه در اینرسی مجازی J_v برابر ۱/۰۶ در بازه زمانی کوتاه‌تری نسبت به اینرسی مجازی ۴/۲۴ به پایداری می‌رسند. جدول (۴-۴) نتایج حاصل از شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

جدول (۴-۴): نتایج قطع و وصل سلول فتوولتائیک

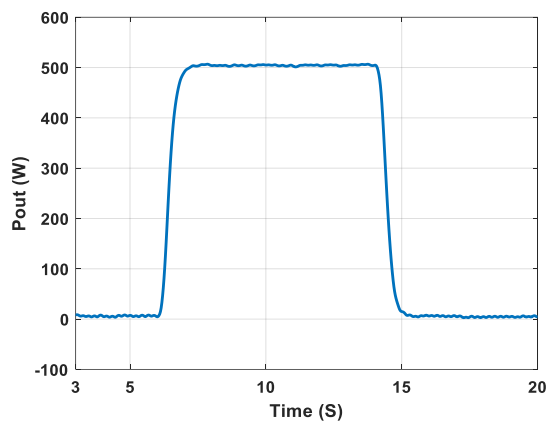
	۳-۷ S	۷/۵-۱۵ S	۱۵-۲۰ S
$P_{PV}(w)$	۵۰۰	۰	۵۰۰
$P_{Load}(w)$	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰
$P_{out}(w)$	۰	-۵۰۰	۰

۲-۲-۲-۴ حالت دوم: قطع و وصل بار

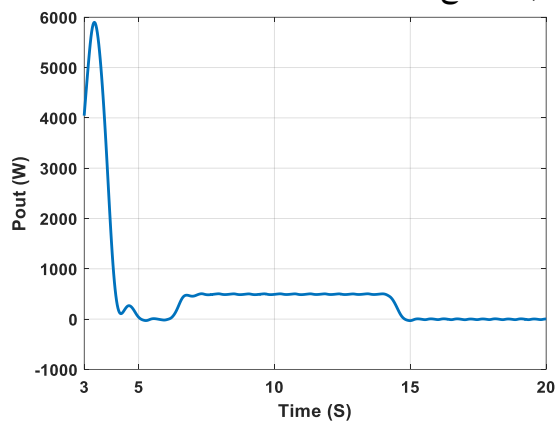
در این حالت هدف مشاهده اثر قطع و وصل بار در بازه زمانی ۳ تا ۲۰ ثانیه با میرایی R_w برابر

$31/83$ و اینرسی‌های مجازی J_v برابر $1/06$ و $4/24$ بر روی شبکه است. در بازه زمانی ۶ تا ۱۴ ثانیه بار

از شبکه قطع شده است.

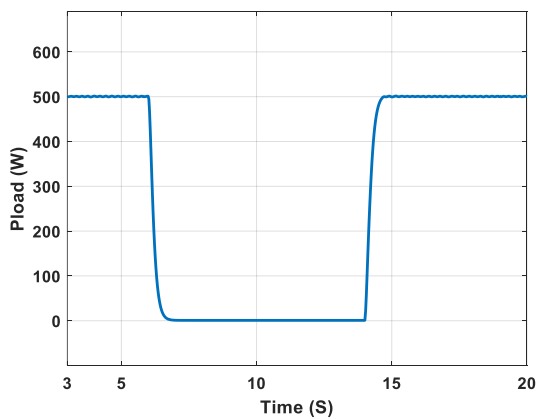


ب

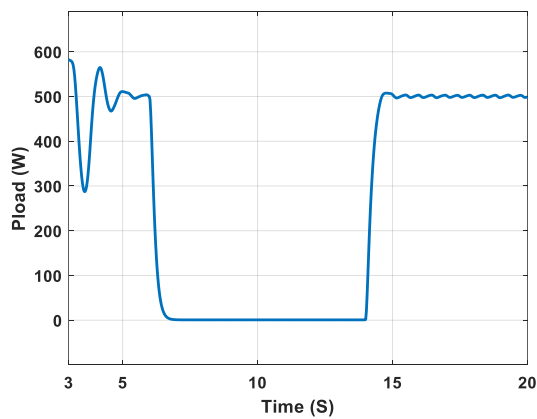


الف

شکل (۴-۱۱): تغییرات توان شبکه AC با قطع و وصل بار الف: $J_v = 4.24$ ب: $J_v = 1.06$

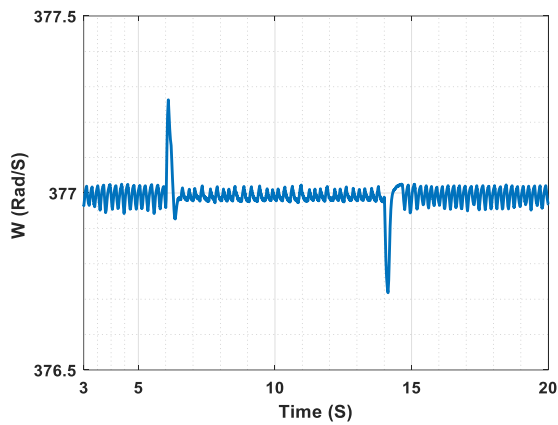


ب

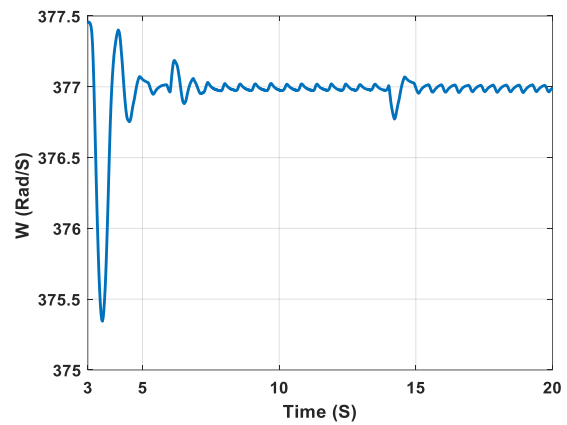


الف

شکل (۴-۱۲): تغییرات توان بار با قطع و وصل بار الف: $J_v = 4.24$ ب: $J_v = 1.06$

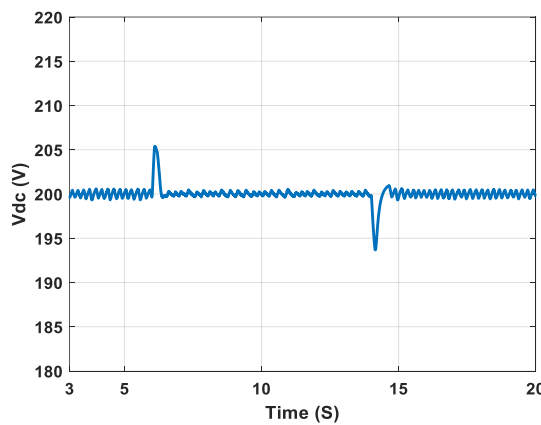


ب

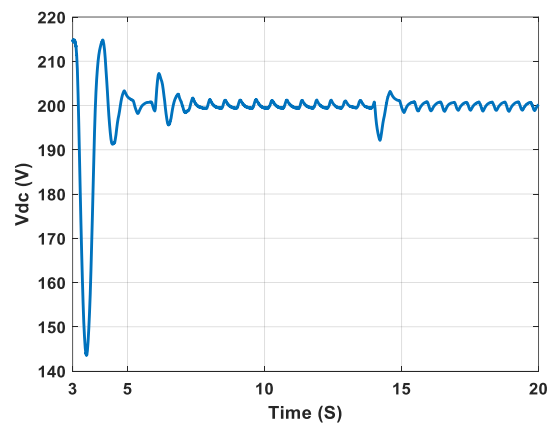


الف

شکل (۴-۱۳): تغییرات فرکانس زاویه‌ای با قطع و وصل بار الف: $J_v = 4.24$ ب: $J_v = 1.06$

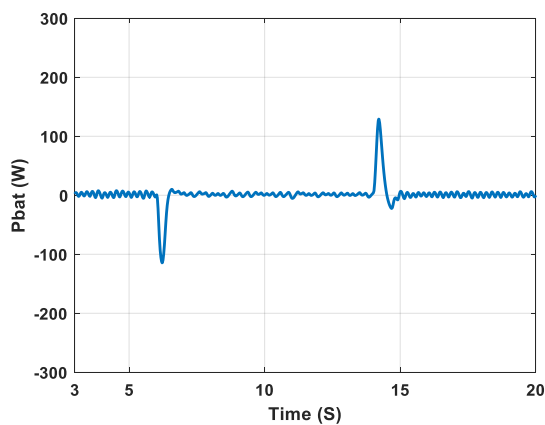


ب

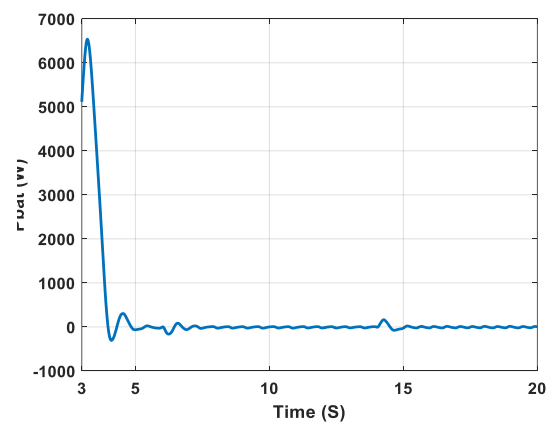


الف

شکل (۴-۱۴): تغییرات ولتاژ DC با قطع و وصل بار الف: $J_v = 4.24$ ب: $J_v = 1.06$



ب



الف

شکل (۴-۱۵): تغییرات توان باتری با قطع و وصل بار الف: $J_v = 4.24$ ب: $J_v = 1.06$

شکل‌های (۴-۱۱) تا (۴-۱۵) توان‌های شبکه، ولتاژ DC، فرکانس زاویه‌ای و تأثیر اینرسی مجازی بر سرعت پایداری شبکه در حالت‌های الف و ب نمایش داده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در بازه زمانی ۳ ثانیه تا ۶ ثانیه تمام توان بار توسط سلول فتوولتائیک تأمین می‌شود و شبکه در حالت پایدار خود می‌باشد. در بازه زمانی ۶ تا ۱۴ ثانیه بار قطع شده و به دلیل نبود هیچ مصرف‌کننده در سمت ریزشبکه DC تمام توان فتوولتائیک به‌اندازه ۵۰۰ وات به شبکه AC تزریق می‌شود. در بازه زمانی ۱۴ تا ۲۰ ثانیه بار به شبکه متصل می‌شود و تمام توان سلول فتوولتائیک به بار تزریق می‌شود. در لحظه‌های ۶ و ۱۴ ثانیه که بار قطع و وصل می‌شود، باتری برای پشتیبانی از پاسخ اینرسی مورد استفاده قرار می‌گیرد و توان آن به ترتیب به‌اندازه ۱۱۴/۶۵- کاهش و ۱۲۹/۲ افزایش می‌یابد. در این لحظه‌ها فرکانس زاویه‌ای به ترتیب ۰/۰۷۲ درصد افزایش و ۰/۰۷۲ درصد کاهش، ولتاژ DC به ترتیب به‌اندازه ۲/۷ درصد افزایش و ۳/۱۵ درصد کاهش می‌یابد. همچنین در لحظه‌ها مذکور فرکانس زاویه‌ای، ولتاژ DC، توان باتری و توان‌های شبکه به کمک ماشین سنکرون مجازی به سرعت به حالت ایده‌آل و پایدار خود می‌رسند و از فروپاشی شبکه جلوگیری می‌کنند. همان‌طور که از شکل‌های (۴-۱۱) تا (۴-۱۵) مشاهده می‌شود پارامترهای شبکه در اینرسی مجازی J_v برابر ۱/۰۶ در بازه زمانی کوتاه‌تری نسبت به اینرسی مجازی ۴/۲۴ به پایداری می‌رسند. جدول (۴-۵) نتایج حاصل از شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

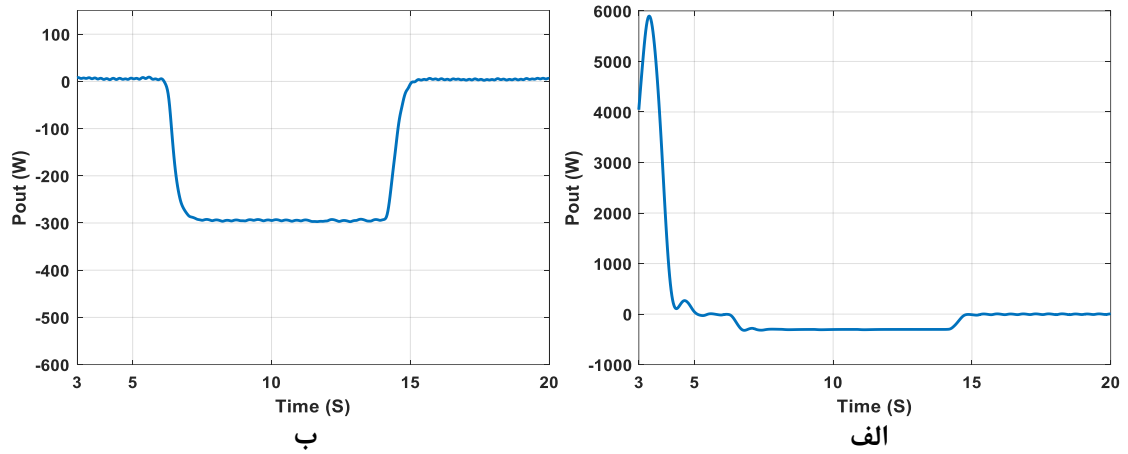
جدول (۴-۵): نتایج قطع و وصل بار

	۳-۶ S	۶-۱۴ S	۱۴-۲۰ S
$P_{PV}(W)$	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰
$P_{Load}(W)$	۵۰۰	.	۵۰۰
$P_{out}(w)$	.	۵۰۰	.

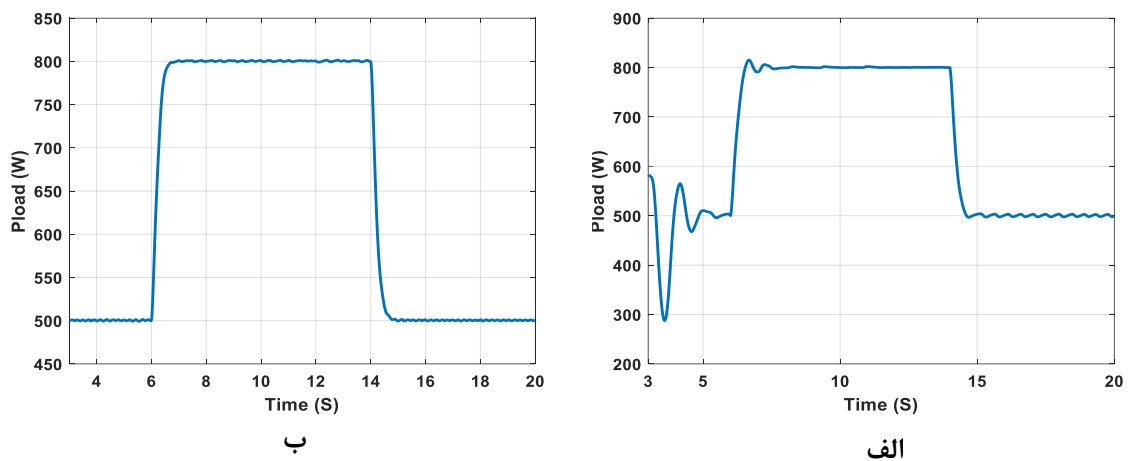
۴-۲-۲-۳ حالت سوم: کاهش و افزایش بار

در این حالت هدف مشاهده اثر تغییر بار در بازه زمانی ۳ تا ۲۰ ثانیه با میرایی R_ω برابر ۳۱/۸۳

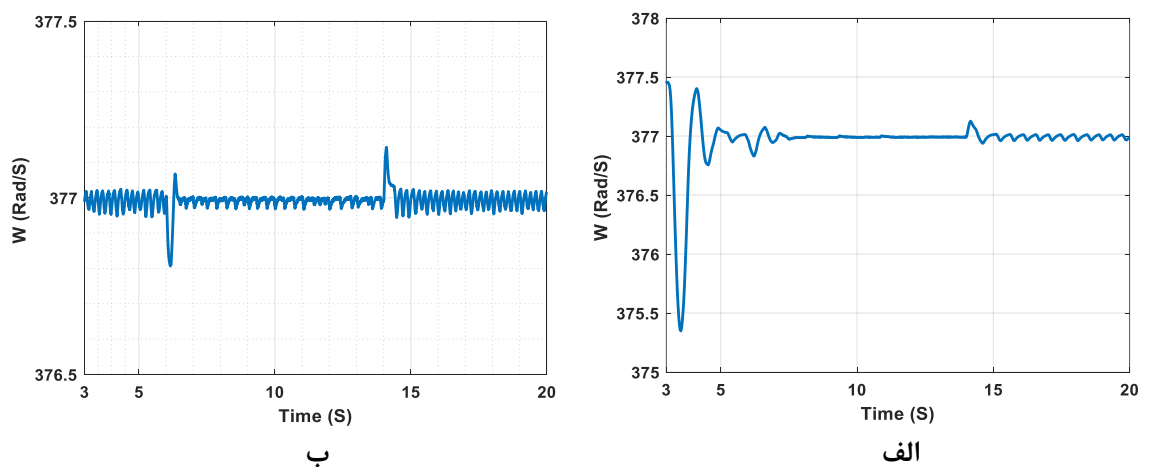
و اینرسی‌های مجازی J_v برابر ۱/۰۶ و ۴/۲۴ بر روی شبکه است. در بازه زمانی ۶ تا ۱۴ ثانیه اندازه توان بار در شبکه افزایش یافته است.



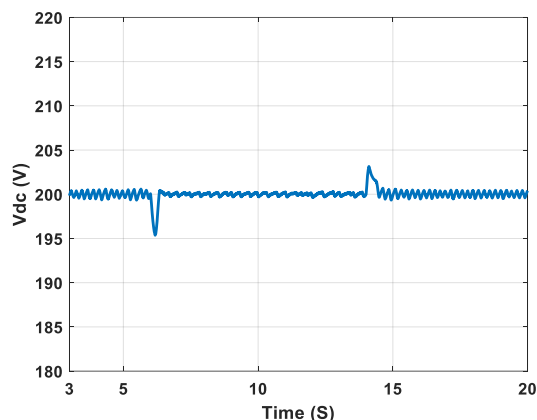
شکل (۴-۱۶): تغییرات توان شبکه AC با کاهش و افزایش بار الف: $J_v = 4.24$ ب: $J_v = 1.06$



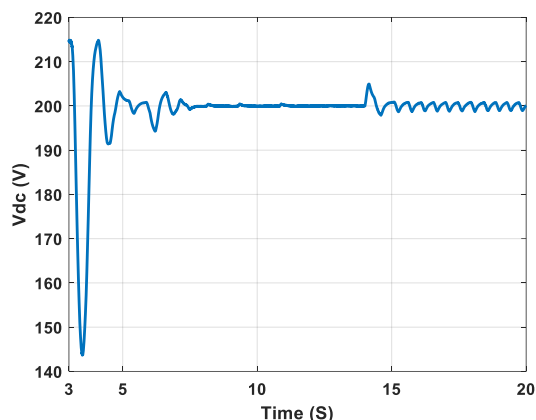
شکل (۴-۱۷): تغییرات توان بار با کاهش و افزایش بار الف: $J_v = 4.24$ ب: $J_v = 1.06$



شکل (۴-۱۸): تغییرات فرکانس زاویه ای با کاهش و افزایش بار الف: $J_v = 4.24$ ب: $J_v = 1.06$

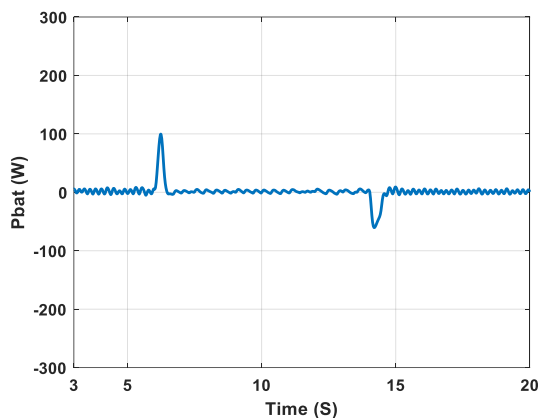


ب

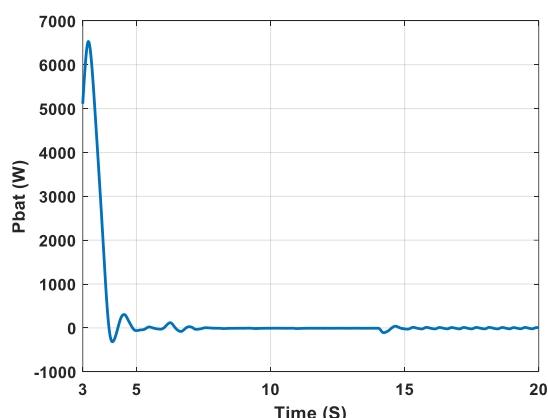


الف

شکل (۴-۱۹): تغییرات ولتاژ DC با کاهش و افزایش بار الف: $J_v = 4.24$ ب: $J_v = 1.06$



ب



الف

شکل (۴-۲۰): تغییرات توان باتری با کاهش و افزایش بار الف: $J_v = 4.24$ ب: $J_v = 1.06$

شکل های (۴-۱۶) تا (۴-۲۰) توان های شبکه، ولتاژ DC، فرکانس زاویه ای و تأثیر اینرسی مجازی بر سرعت پایداری شبکه در حالت های الف و ب نمایش داده است. در بازه زمانی ۳ تا ۶ ثانیه سلول فتوولتائیک توان ۵۰۰ وات تولید می کند و بار کل توان شبکه فتوولتائیک را مصرف می کند و شبکه در حالت پایدار خود می ماند. در بازه زمانی ۶ تا ۱۴ ثانیه اندازه مقاومت بار از ۸۰ اهم به اندازه ۵۰ اهم کاهش می یابد و مقدار توان مصرفی بار از ۵۰۰ وات به ۸۰۰ وات افزایش پیدا می کند. در این حالت به دلیل آنکه حداکثر توان سلول فتوولتائیک ۵۰۰ وات است شبکه AC ۳۰۰ وات توان به ریزش شبکه DC و بار تزریق می کند و توان بار را تأمین می کند. در بازه زمانی ۱۴ تا ۲۰ ثانیه بار به اندازه ۸۰ اهم بازمی گردد و شبکه در حالت پایدار خود کار می کند. در لحظه های ۶ و ۱۴ ثانیه که توان مصرفی بار افزایش و

کاهش می‌یابد، باتری برای پشتیبانی از پاسخ اینرسی مورد استفاده قرار می‌گیرد و توان آن به ترتیب به اندازه ۹۹/۷ افزایش و ۶۰/۵- کاهش می‌یابد. در این لحظه‌ها فرکانس زاویه‌ای به ترتیب ۰/۰۴۸ درصد کاهش و ۰/۰۳۹۴ درصد افزایش، ولتاژ DC به ترتیب به اندازه ۲/۳۲ درصد کاهش و ۱/۵۷۵ درصد افزایش می‌یابد. همچنین در لحظه‌ها مذکور فرکانس زاویه‌ای، ولتاژ DC، توان باتری و توان‌های شبکه به کمک ماشین سنکرون مجازی به سرعت به حالت ایده‌آل و پایدار خود می‌رسند و از فروپاشی شبکه جلوگیری می‌کنند. همان‌طور که از شکل‌های (۴-۱۶) تا (۴-۲۰) مشاهده می‌شود پارامترهای شبکه در اینرسی مجازی J_v برابر ۱/۰۶ در بازه زمانی کوتاه‌تری نسبت به اینرسی مجازی ۴/۲۴ به پایداری می‌رسند. جدول (۴-۶) نتایج حاصل از شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

جدول (۴-۶): نتایج کاهش و افزایش بار

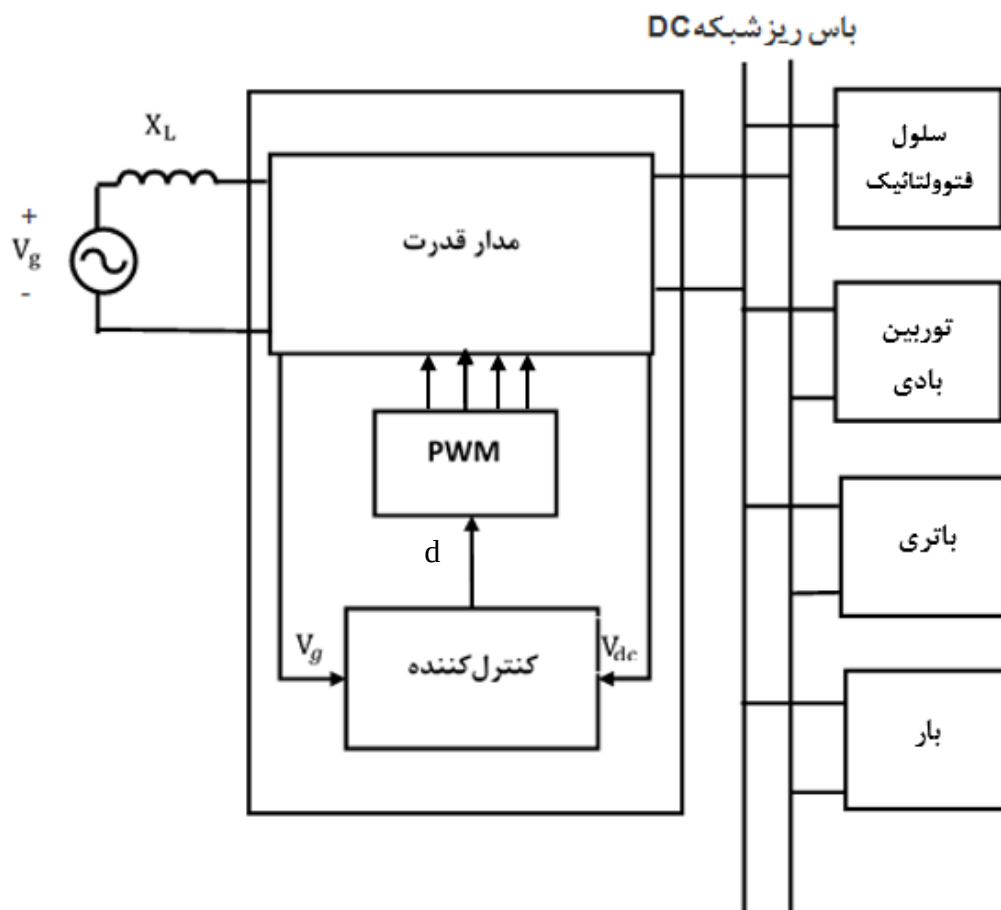
	۲-۶S	۶-۱۴ S	۱۴-۲۰ S
$P_{PV}(W)$	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰
$P_{Load}(w)$	۵۰۰	۸۰۰	۵۰۰
$P_{out}(W)$	۰	-۳۰۰	۰

۳-۴ کنترل ریزش‌بکه DC شامل باتری، سلول فتوولتائیک،

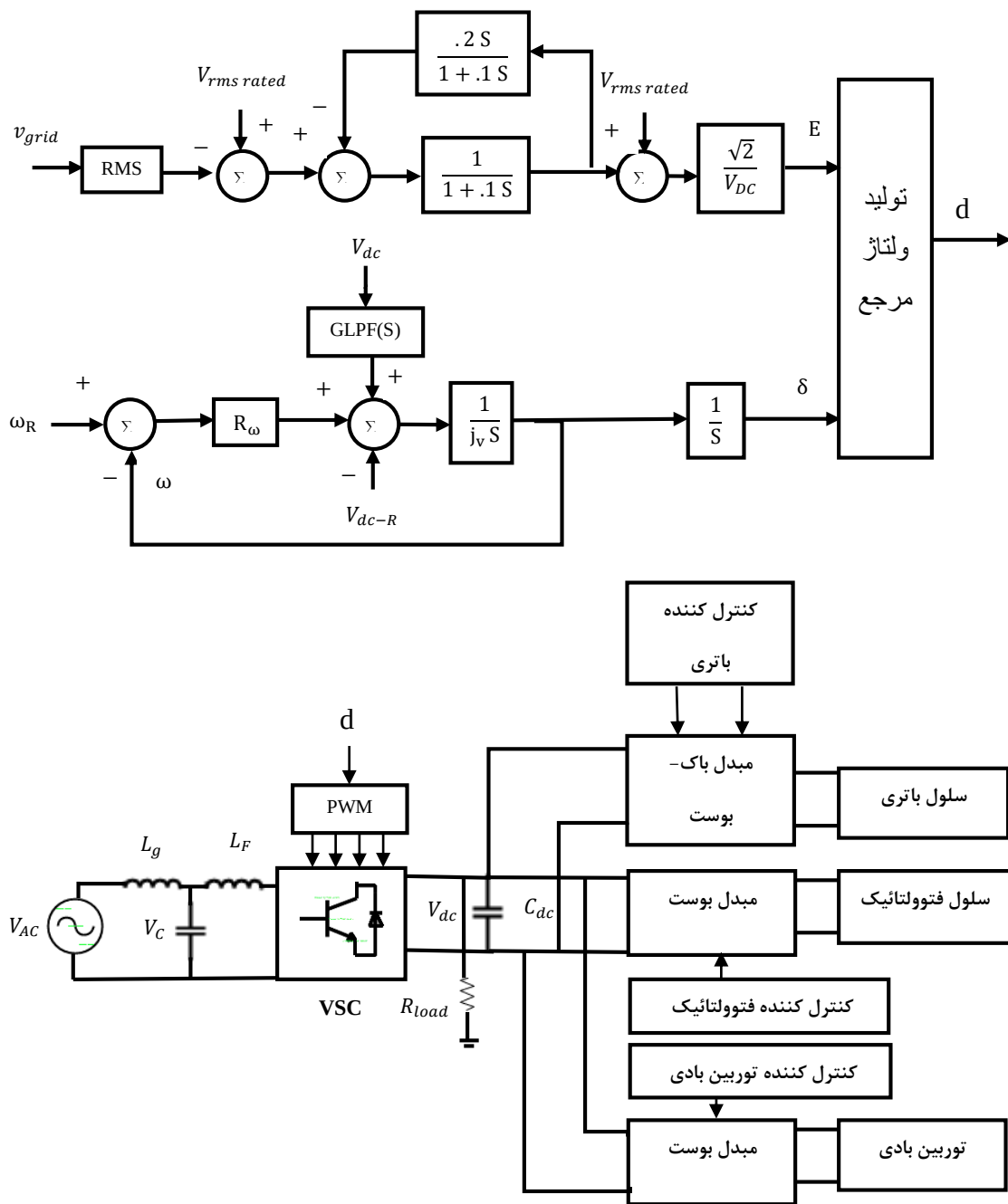
توربین بادی و بار

به منظور افزایش پایداری و فراهم نمودن توان رزرو برای ریزش‌بکه یک توربین بادی به ریزش‌بکه DC بخش ۲-۴ مطابق با معادلات مطرح شده در بخش ۳-۱۲ و شکل (۳-۱۴) فصل سوم اضافه شده است مدل شماتیک شبکه پیاده‌سازی شده در نرم‌افزار متلب در شکل (۴-۲۱) و ساختار گسترده آن در شکل (۴-۲۲) نشان داده شده است. توربین بادی طراحی شده متناسب با سرعت باد که در بخش ۳-۱۲ توضیح داده شده و در شکل (۳-۱۴) به نمایش گذاشته شده است توان تولید می‌کند. تمام فرضیات در

قسمت ۲-۲-۴ در این بخش نیز صادق است. در این قسمت شبکه برق AC در ولتاژ ۱۲۰ ولت و فرکانس ۶۰ هرتز است. ریزشبه DC شامل یک سلول فتوولتائیک به توان ۵۰۰ وات یک توربین بادی با سرعت ۳/۹۸ متر بر ثانیه معادل ۵۰۰ وات یک بار DC به اندازه ۸۰ اهم معادل توان مصرفی ۵۰۰ وات و یک باتری است که به کمک ماشین سنکرون مجازی به شبکه برق متصل شده است.



شکل (۴-۲۱): شبکه مورد مطالعه با اضافه شدن توربین بادی



شکل (۴-۲۲): ساختار گسترده شبکه مورد مطالعه با اضافه شدن توربین بادی

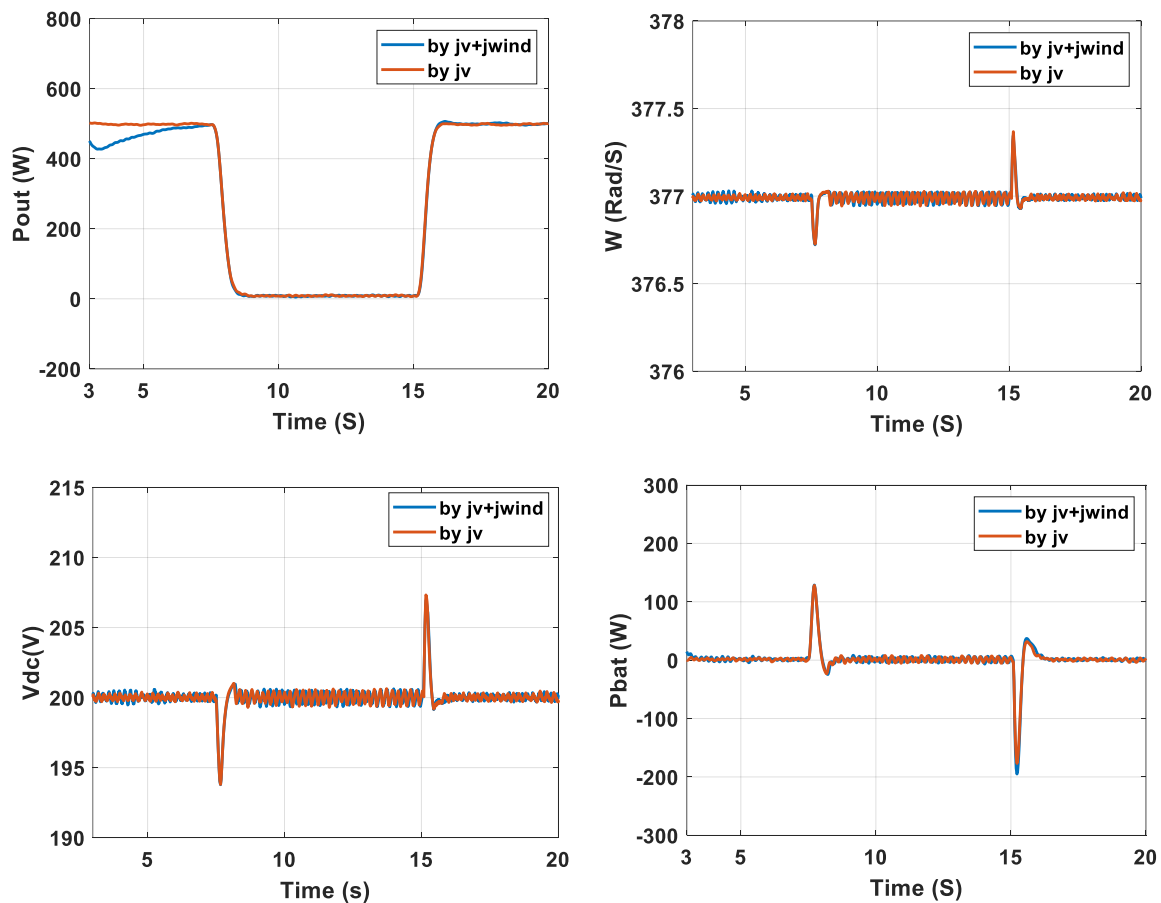
جدول (۷-۴): مشخصات توربین بادی

مقدار	پارامتر	متغیر
۰/۰۰۲	ضریب تناسبی کنترل کننده توان اکتیو توربین بادی	K_{Pwp}
۰/۹۶	ضریب انتگرالی کنترل کننده توان اکتیو توربین بادی	K_{Pwc}
۳	ضریب تناسبی کنترل کننده جریان توربین بادی	K_{Iwp}
۶۴۸۰۰	ضریب انتگرالی کنترل کننده جریان توربین بادی	K_{Iwc}

۱-۳-۴ حالت اول: قطع و وصل سلول فتوولتائیک

الف-مقایسه نتایج قطع و وصل سلول فتوولتائیک

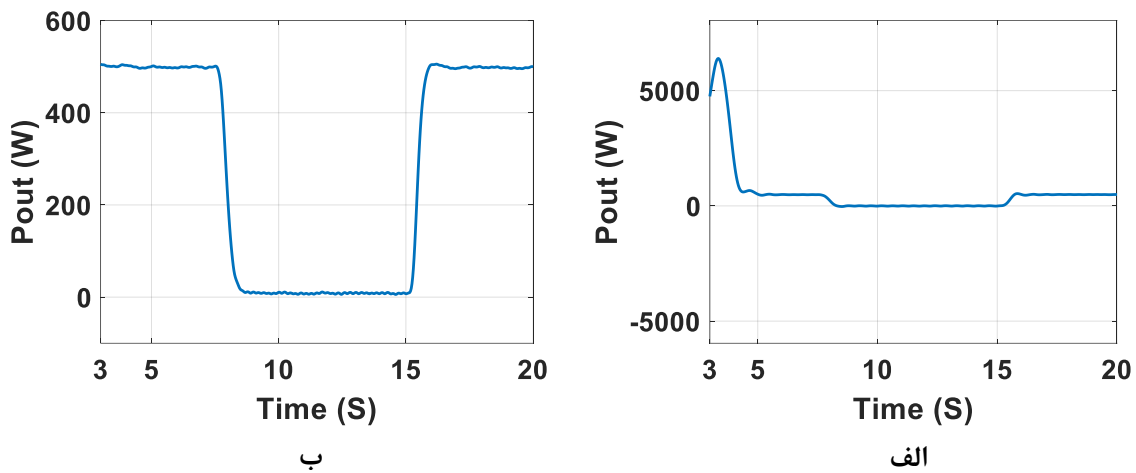
در این حالت به منظور مشاهده اثر اینرسی توربین بادی بر شبکه دو روش اضافه کردن اینرسی توربین بادی و بدون آن با یکدیگر در شکل (۴-۲۳) مقایسه شده است. در بازه زمانی ۷/۵ تا ۱۵ ثانیه سلول فتوولتائیک از مدار خارج شده است. همانطور که از نتایج شکل ها مشاهده می شود اینرسی توربین بادی چندان تاثیری بر روی شبکه نداشته است و فقط حالت ابتدایی توان خروجی دیرتر پایدار شده است. بنابراین می توان از اثر اینرسی توربین بادی در شبکه صرف نظر کرد.



شکل (۴-۲۳): مقایسه نتایج شبکه با اینرسی توربین بادی و بدون آن

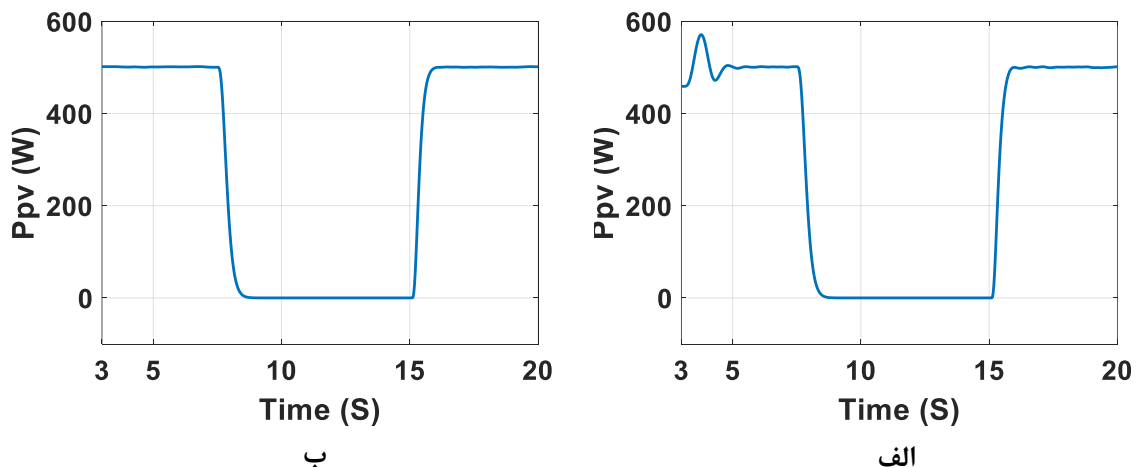
ب- قطع و وصل سلول فتوولتائیک با روش پیشنهادی

در این حالت هدف مشاهده اثر تغییر توان سلول فتوولتائیک در بازه زمانی ۳ تا ۲۰ ثانیه با میرایی R_{ω} برابر $31/83$ و اینرسی‌های مجازی J_v برابر $1/06$ و $4/24$ بر روی شبکه است. در بازه زمانی $7/5$ تا 15 ثانیه سلول فتوولتائیک از شبکه قطع شده است.



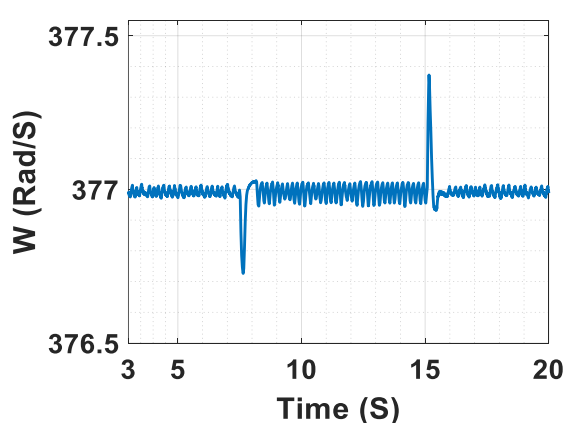
شکل (۴-۲۴): تغییرات توان شبکه AC با قطع و وصل سلول فتوولتائیک با حضور توربین بادی

$$\text{الف: } J_v = 4.24 \quad \text{ب: } J_v = 1.06$$

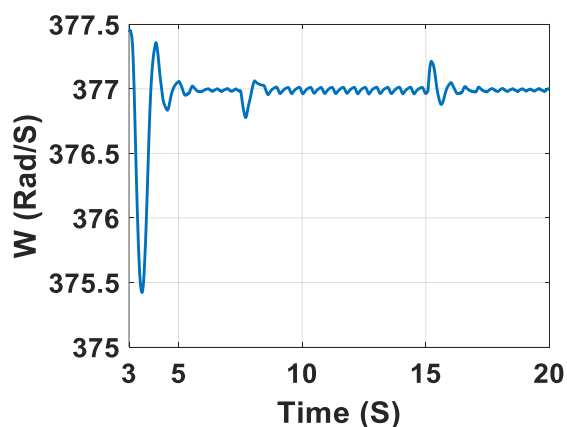


شکل (۴-۲۵): تغییرات سلول فتوولتائیک با حضور توربین بادی

$$\text{الف: } J_v = 4.24 \quad \text{ب: } J_v = 1.06$$



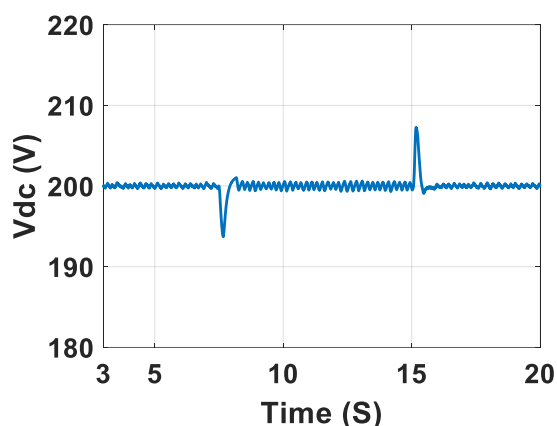
ب



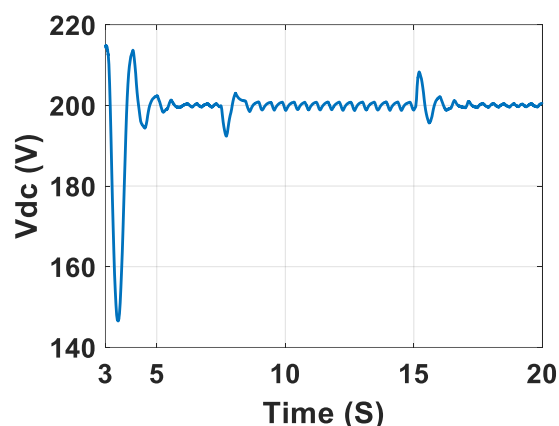
الف

شکل (۴-۲۶): تغییرات فرکانس زاویه‌ای با قطع و وصل سلول فتوولتائیک با حضور توربین بادی

الف: $J_v = 4.24$ ب: $J_v = 1.06$



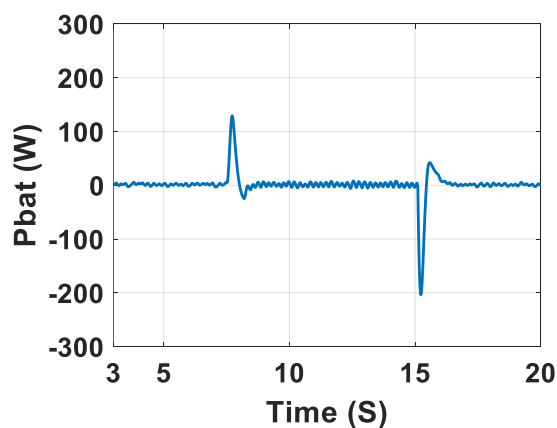
ب



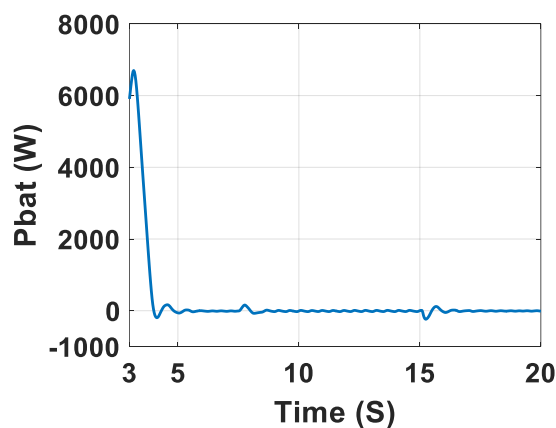
الف

شکل (۴-۲۷): تغییرات ولتاژ DC با قطع و وصل سلول فتوولتائیک با حضور توربین بادی

الف: $J_v = 4.24$ ب: $J_v = 1.06$



ب



الف

شکل (۴-۲۸): تغییرات توان باتری با قطع و وصل سلول فتوولتائیک با حضور توربین بادی

الف: $J_v = 4.24$ ب: $J_v = 1.06$

شکل‌های (۴-۲۴) تا (۴-۲۸) توان‌های شبکه، ولتاژ DC، فرکانس زاویه‌ای و تأثیر اینرسی مجازی بر سرعت پایداری شبکه در حالت‌های الف و ب نمایش داده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در بازه زمانی ۳ تا ۷/۵ ثانیه سلول فتوولتائیک و توربین بادی هر یک توان ۵۰۰ وات تولید می‌کنند و بار ۵۰۰ وات توان را مصرف می‌کند و ۵۰۰ وات توان رزرو به شبکه AC تزریق می‌شود. در بازه زمانی ۷/۵ تا ۱۵ ثانیه سلول فتوولتائیک از مدار خارج می‌شود و کل توان بار توسط توربین بادی تأمین می‌گردد و هیچ توانی به شبکه AC تزریق نمی‌شود. در بازه زمانی ۱۵ تا ۲۰ ثانیه سلول فتوولتائیک وارد مدار می‌شود و شبکه به حالت اولیه خود بازمی‌گردد. در لحظه‌های ۷/۵ و ۱۵ ثانیه که توان فتوولتائیک قطع و وصل می‌شود، باتری برای پشتیبانی از پاسخ اینرسی مورد استفاده قرار می‌گیرد و توان آن به ترتیب به اندازه ۱۲۹/۱۸ افزایش و ۲۰۳/۵- کاهش می‌یابد. در این لحظه‌ها فرکانس زاویه‌ای به ترتیب ۰/۰۷۰۲ درصد کاهش و ۰/۱۹ درصد افزایش، ولتاژ DC به ترتیب به اندازه ۳/۱۵۴ درصد کاهش و ۳/۶۳۵ درصد افزایش می‌یابد. همچنین در لحظه‌ها مذکور فرکانس زاویه‌ای، ولتاژ DC، توان باتری و توان‌های شبکه به کمک ماشین سنکرون مجازی به سرعت به حالت ایده‌آل و پایدار خود می‌رسند و از فروپاشی شبکه جلوگیری می‌کنند. همان‌طور که از شکل‌های (۴-۲۴) تا (۴-۲۸) مشاهده می‌شود پارامترهای شبکه در اینرسی مجازی J_v برابر ۱/۰۶ در بازه زمانی کوتاه‌تری نسبت به اینرسی مجازی ۴/۲۴ به پایداری می‌رسند. جدول (۴-۸) نتایج حاصل از شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

جدول (۴-۸): نتایج قطع و وصل سلول فتوولتائیک در حضور توربین بادی

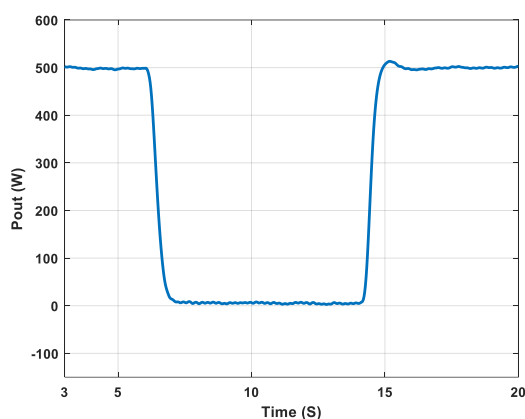
	۳-۷/۵ S	۷/۵-۱۵S	۱۵-۲۰S
$P_{PV}(w)$	۵۰۰	.	۵۰۰
$P_{Wind}(w)$	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰
$P_{Load}(w)$	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰
$P_{out}(w)$	۵۰۰	.	۵۰۰

۲-۳-۴ حالت دوم: قطع و وصل توربین بادی

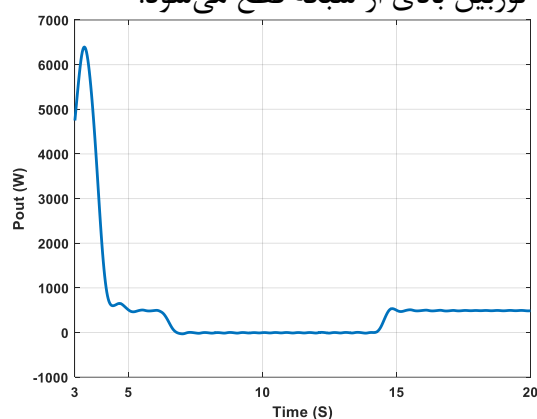
در این حالت هدف مشاهده اثر تغییر توان توربین بادی در بازه زمانی ۳ تا ۲۰ ثانیه با میرایی R_ω

برابر $31/83$ و اینرسی‌های مجازی J_v برابر $1/06$ و $4/24$ بر روی شبکه است. در بازه زمانی ۶ تا ۱۴

ثانیه توربین بادی از شبکه قطع می‌شود.

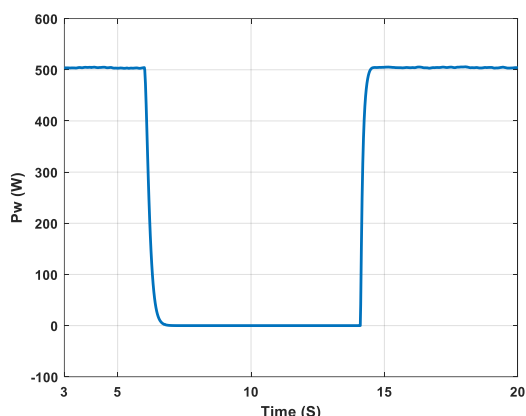


ب

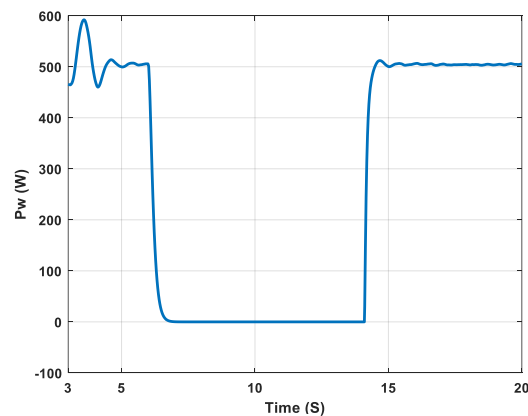


الف

شکل (۴-۲۹): تغییرات توان شبکه AC با قطع و وصل توربین بادی الف: $J_v = 4.24$ ب: $J_v = 1.06$

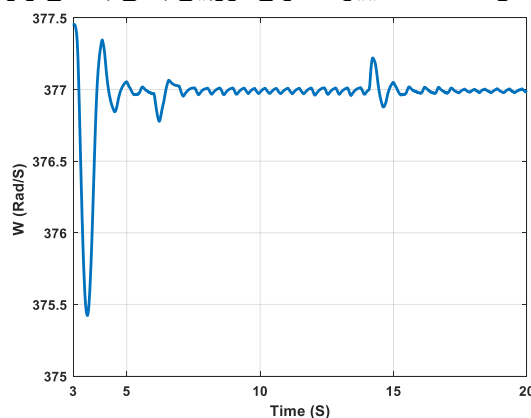
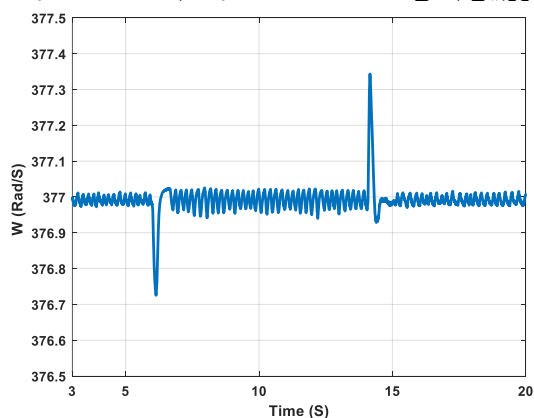


ب

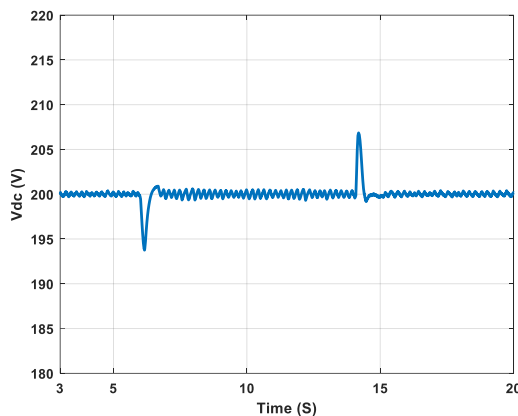


الف

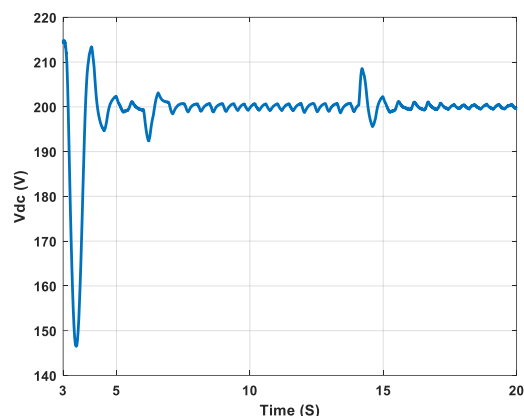
شکل (۴-۳۰): تغییرات توان توربین بادی با قطع و وصل توربین بادی الف: $J_v = 4.24$ ب: $J_v = 1.06$



شکل (۴-۳۱): تغییرات فرکانس زاویه‌ای با قطع و وصل توربین بادی الف: $J_v = 4.24$ ب: $J_v = 1.06$

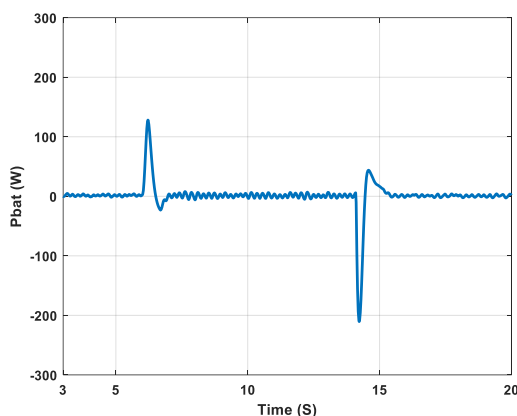


ب

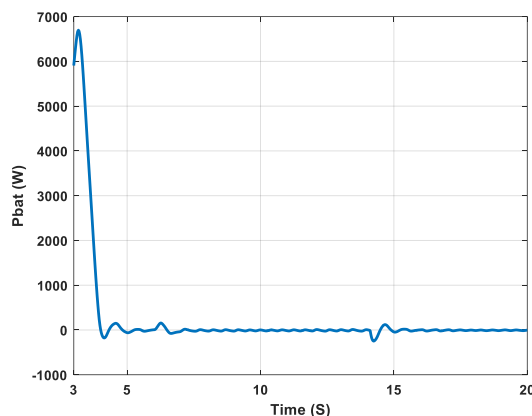


الف

شکل (۴-۳۲): تغییرات ولتاژ DC با قطع و وصل توربین بادی الف: $J_v = 4.24$ ب: $J_v = 1.06$



ب



الف

شکل (۴-۳۳): تغییرات توان باتری با قطع و وصل توربین بادی الف: $J_v = 4.24$ ب: $J_v = 1.06$

شکل های (۴-۲۹) تا (۴-۳۳) فرکانس زاویه‌ای، توان‌های شبکه، ولتاژ DC و تأثیر اینرسی مجازی بر سرعت پایداری شبکه در حالت‌های الف و ب نمایش داده است در بازه زمانی ۳ تا ۶ ثانیه سلول فتوولتائیک و توربین بادی هر یک توان ۵۰۰ وات تولید می‌کنند و بار ۵۰۰ وات توان را مصرف می‌کند و ۵۰۰ وات توان رزرو به شبکه AC تزریق می‌شود. در بازه زمانی ۶ تا ۱۴ ثانیه توربین بادی از مدار خارج می‌شود و کل توان بار توسط سلول فتوولتائیک تأمین می‌شود و هیچ توانی به شبکه AC تزریق نمی‌شود. در بازه زمانی ۱۴ تا ۲۰ ثانیه توربین بادی وارد مدار می‌شود و شبکه به حالت اولیه خود بازمی‌گردد. در لحظه‌های ۶ و ۱۴ ثانیه که توان توربین بادی قطع و وصل می‌شود، باتری برای پشتیبانی از پاسخ اینرسی مورد استفاده قرار می‌گیرد و توان آن به ترتیب به اندازه ۱۲۵/۹ افزایش و ۲۰۴/۶- کاهش می‌یابد. در این لحظه‌ها فرکانس زاویه‌ای به ترتیب ۰/۰۷۷ درصد کاهش و ۰/۰۸۱ درصد افزایش، ولتاژ DC به ترتیب به اندازه ۳/۰۵ درصد کاهش و ۳/۴۵ درصد افزایش می‌یابد. همچنین در لحظه‌ها مذکور

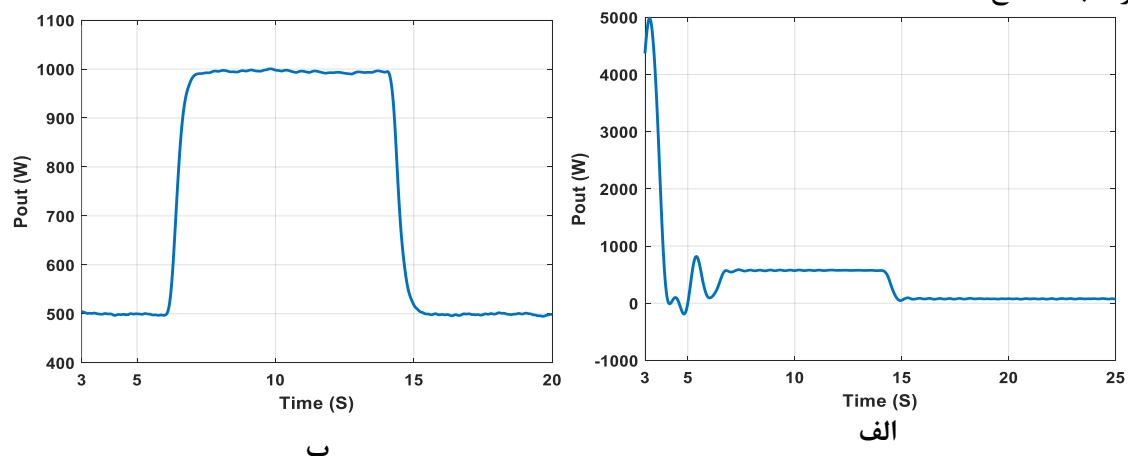
فرکانس زاویه‌ای، ولتاژ DC، توان باتری و توان‌های شبکه به کمک ماشین سنکرون مجازی به سرعت به حالت ایده‌آل و پایدار خود می‌رسند و از فروپاشی شبکه جلوگیری می‌کنند. همان‌طور که از شکل‌های (۲۹-۴) تا (۳۳-۴) مشاهده می‌شود پارامترهای شبکه در اینرسی مجازی J_v برابر ۱/۰۶ در بازه زمانی کوتاه‌تری نسبت به اینرسی مجازی ۴/۲۴ به پایداری می‌رسند. جدول (۹-۴) نتایج حاصل از شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

جدول (۹-۴): نتایج قطع و وصل توربین بادی

	۳-۶ S	۶-۱۴ S	۱۴-۲۰ S
$P_{PV}(w)$	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰
$P_{Wind}(w)$	۵۰۰	.	۵۰۰
$P_{Load}(w)$	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰
$P_{out}(w)$	۵۰۰	.	۵۰۰

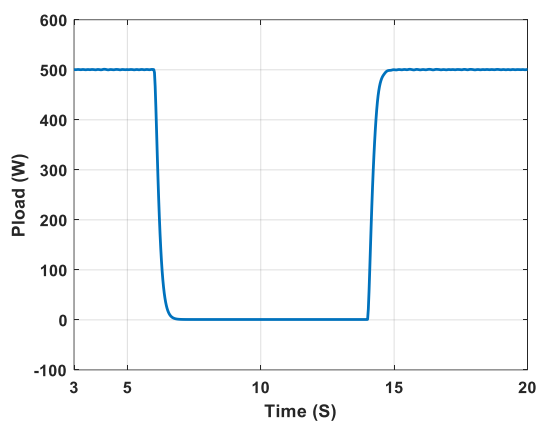
۳-۳-۴ حالت سوم: قطع و وصل بار

در این حالت هدف مشاهده اثر قطع و وصل بار در بازه زمانی ۳ تا ۲۰ ثانیه با میرایی R_w برابر ۳۱/۸۳ و اینرسی‌های مجازی J_v برابر ۱/۰۶ و ۴/۲۴ بر روی شبکه است. در بازه زمانی ۶ تا ۱۴ ثانیه بار از شبکه قطع شده است.

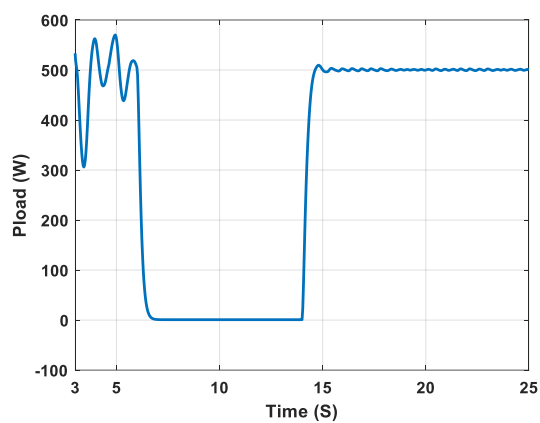


شکل (۳۴-۴): تغییرات توان شبکه AC با قطع و وصل بار با حضور توربین بادی

الف: $J_v = 4.24$ ب: $J_v = 1.06$



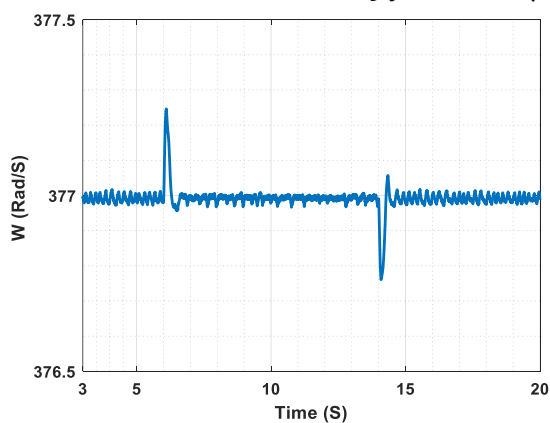
ب



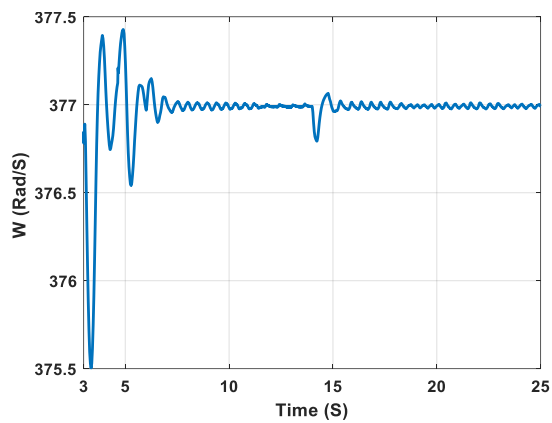
الف

شکل (۴-۳۵): تغییرات توان بار با قطع و وصل بار با حضور توربین بادی

الف: $J_v = 4.24$ ب: $J_v = 1.06$



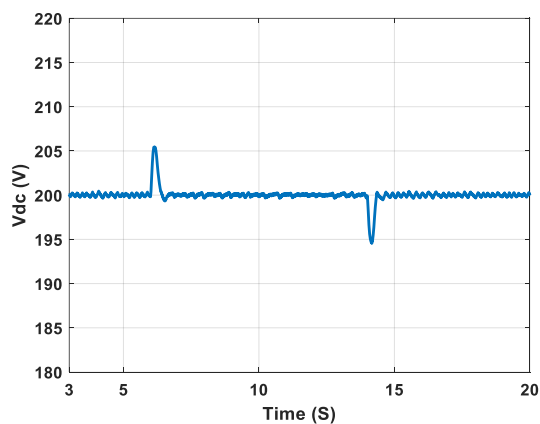
ب



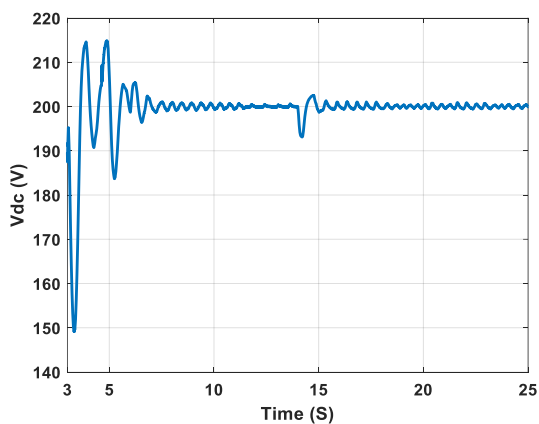
الف

شکل (۴-۳۶): تغییرات فرکانس زاویه‌ای با قطع و وصل بار با حضور توربین بادی

الف: $J_v = 4.24$ ب: $J_v = 1.06$



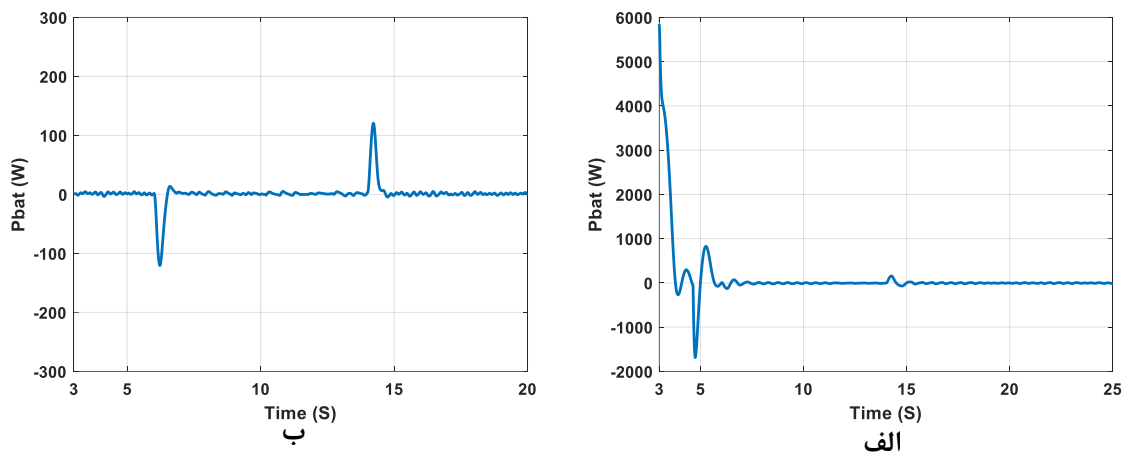
ب



الف

شکل (۴-۳۷): تغییرات ولتاژ DC با قطع و وصل بار با حضور توربین بادی

الف: $J_v = 4.24$ ب: $J_v = 1.06$



شکل (۴-۳۸): تغییرات توان باتری با قطع و وصل بار با حضور توربین بادی

$$\text{الف: } J_v = 4.24 \text{ ب: } J_v = 1.06$$

شکل‌های (۴-۳۴) تا (۴-۳۸) فرکانس زاویه‌ای، توان‌های شبکه، ولتاژ DC و تأثیر اینرسی مجازی بر سرعت پایداری شبکه در حالت‌های الف و ب نمایش داده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در بازه زمانی ۳ تا ۶ ثانیه سلول فتوولتائیک و توربین بادی هر یک توان ۵۰۰ وات تولید می‌کنند و بار ۵۰۰ وات توان را مصرف می‌کند و ۵۰۰ وات توان رزرو به شبکه AC تزریق می‌شود. در بازه زمانی ۶ تا ۱۴ ثانیه بار ریزش شبکه DC قطع شده و کل توان سلول فتوولتائیک و توربین بادی به علت نبود هیچ توان مصرف‌کننده‌ای در طرف ریزش شبکه DC به شبکه AC تزریق می‌شود. در بازه زمانی ۱۴ تا ۲۰ ثانیه بار ریزش شبکه DC وصل شده و شبکه به حالت اولیه خود باز می‌گردد. در لحظه‌های ۶ و ۱۴ ثانیه که بار قطع و وصل می‌شود، باتری برای پشتیبانی از پاسخ اینرسی مورد استفاده قرار می‌گیرد و توان آن به ترتیب به اندازه ۱۲۰/۷۸- کاهش و ۱۲۰/۷۳ افزایش می‌یابد. در این لحظه‌ها فرکانس زاویه‌ای به ترتیب ۰/۰۶۷۶ درصد افزایش و ۰/۰۶۱۱ درصد کاهش، ولتاژ DC به ترتیب به اندازه ۲/۷ درصد افزایش و ۲/۷ درصد کاهش می‌یابد. همچنین در لحظه‌ها مذکور فرکانس زاویه‌ای، ولتاژ DC، توان باتری و توان‌های شبکه به کمک ماشین سنکرون مجازی به سرعت به حالت ایده‌آل و پایدار خود می‌رسند و از فروپاشی شبکه جلوگیری می‌کنند. همان‌طور که از شکل‌های (۴-۳۴) تا (۴-۳۸) مشاهده می‌شود پارامترهای شبکه در اینرسی مجازی J_v برابر ۱/۰۶ در بازه زمانی کوتاه‌تری نسبت به اینرسی مجازی ۴/۲۴ به پایداری

می‌رسند. جدول (۱۰-۴) نتایج حاصل از شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

جدول (۱۰-۴): نتایج قطع و وصل بار در حضور توربین بادی توربین بادی

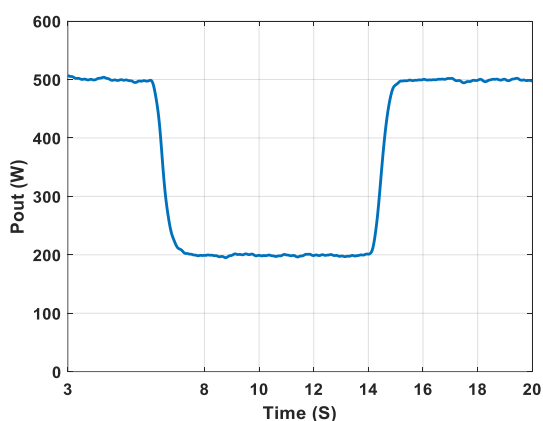
	۲-۶S	۶-۱۴S	۱۴-۲۰S
$P_{PV}(w)$	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰
$P_{Wind}(w)$	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰
$P_{Load}(w)$	۵۰۰	۰	۵۰۰
$P_{out}(w)$	۵۰۰	۱۰۰۰	۵۰۰

۴-۳-۴ حالت چهارم: کاهش و افزایش بار

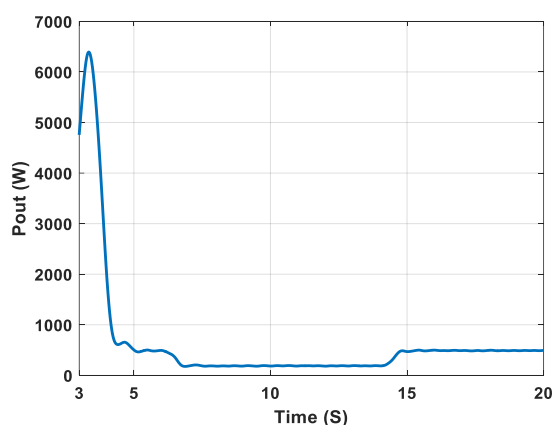
در این حالت هدف مشاهده اثر تغییر بار در بازه زمانی ۳ تا ۲۰ ثانیه با میرایی R_w برابر $31/83$

و اینرسی‌های مجازی J_v برابر $1/06$ و $4/24$ بر روی شبکه است. در بازه زمانی ۶ تا ۱۴ ثانیه اندازه

توان بار در شبکه افزایش یافته است.



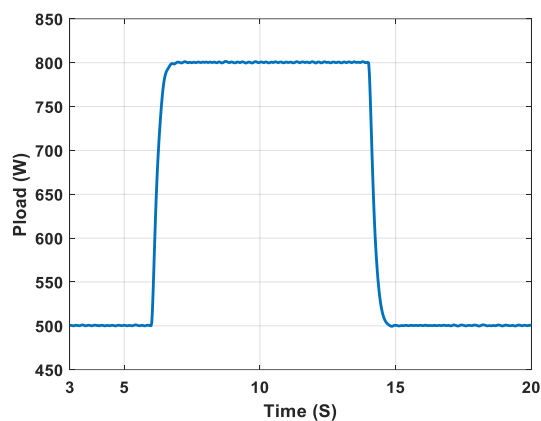
ب



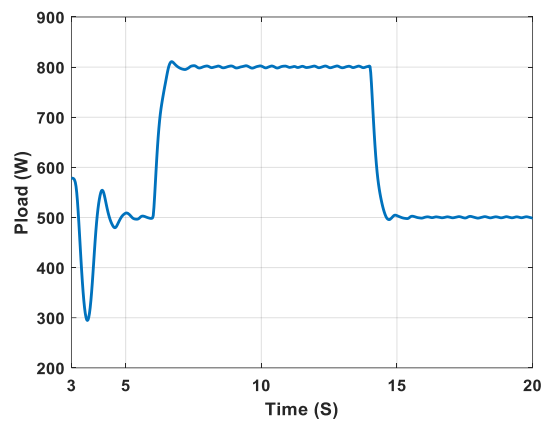
الف

شکل (۴-۳۹): تغییرات توان شبکه AC با کاهش و افزایش بار با حضور توربین بادی

الف: $J_v = 4.24$ ب: $J_v = 1.06$



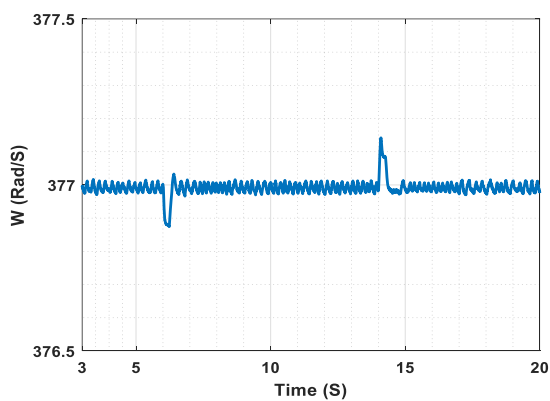
ب



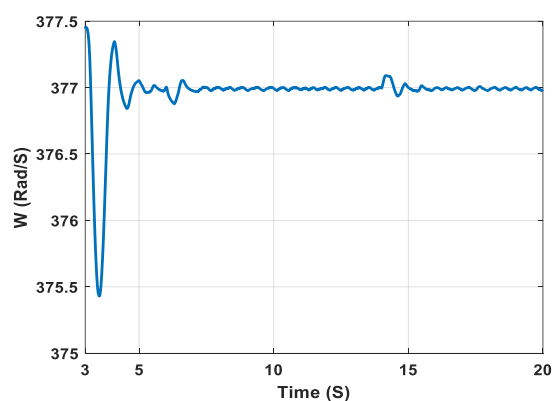
الف

شکل (۴-۴۰): تغییرات توان بار با کاهش و افزایش بار با حضور توربین بادی

الف: $J_v = 4.24$ ب: $J_v = 1.06$



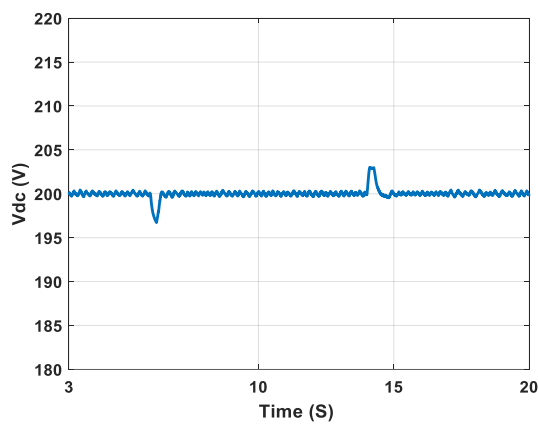
ب



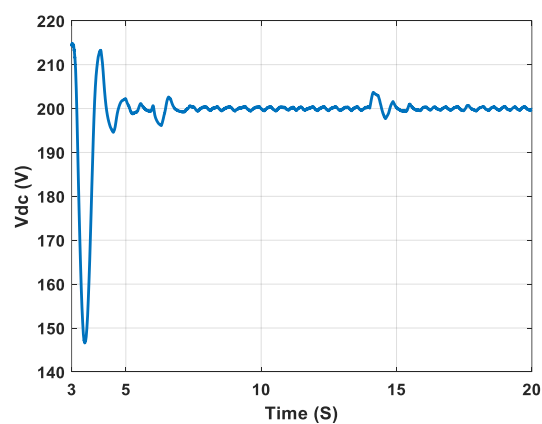
الف

شکل (۴-۴۱): تغییرات فرکانس زاویه‌ای با کاهش و افزایش بار با حضور توربین بادی

الف: $J_v = 4.24$ ب: $J_v = 1.06$



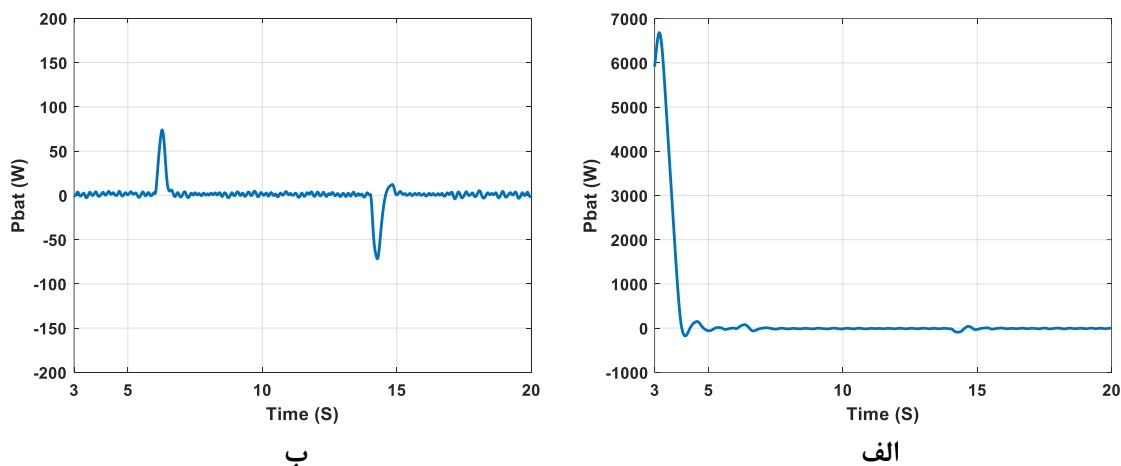
ب



الف

شکل (۴-۴۲): تغییرات ولتاژ DC با کاهش و افزایش بار با حضور توربین بادی

الف: $J_v = 4.24$ ب: $J_v = 1.06$



شکل (۴-۴۳): تغییرات توان باتری با کاهش و افزایش بار با حضور توربین بادی الف: $J_v = 4.24$ ب: $J_v = 1.06$

شکل‌های (۴-۳۹) تا (۴-۴۳) فرکانس زاویه‌ای، توان‌های شبکه، ولتاژ DC و تأثیر اینرسی مجازی بر سرعت پایداری شبکه در حالت‌های الف و ب نمایش داده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در بازه زمانی ۳ تا ۶ ثانیه سلول فتوولتائیک و توربین بادی هر یک توان ۵۰۰ وات تولید می‌کنند و بار ۵۰۰ وات توان را مصرف می‌کند و ۵۰۰ وات توان رزرو به شبکه AC تزریق می‌شود. در بازه زمانی ۶ تا ۱۴ ثانیه بار از ۸۰ اهم به اندازه ۵۰ اهم کاهش می‌یابد و مقدار توان مصرفی بار از ۵۰۰ وات به ۸۰۰ وات افزایش پیدا می‌کند. در این حالت ۸۰۰ وات توان از سلول فتوولتائیک و توربین بادی به بار تزریق می‌شود و ۲۰۰ وات توان رزروی باقیمانده از ریزشبه DC به شبکه AC تزریق می‌شود. در بازه زمانی ۱۴ تا ۲۰ ثانیه بار از ۵۰ اهم به اندازه ۸۰ اهم افزایش می‌یابد و شبکه به حالت اولیه خود بازمی‌گردد. در لحظه‌های ۶ و ۱۴ ثانیه که توان مصرفی بار افزایش و کاهش می‌یابد، باتری برای پشتیبانی از پاسخ اینرسی مورد استفاده قرار می‌گیرد و توان آن به ترتیب به اندازه ۷۴/۰۳۸ افزایش و ۷۱/۷۴۹- کاهش می‌یابد. در این لحظه‌ها فرکانس زاویه‌ای به ترتیب ۰/۰۳ درصد کاهش و ۰/۰۴ درصد افزایش، ولتاژ DC به ترتیب به اندازه ۱/۶۴ درصد کاهش و ۱/۴۷۵ درصد افزایش می‌یابد. همچنین در لحظه‌ها مذکور فرکانس زاویه‌ای، ولتاژ DC، توان باتری و توان‌های شبکه به کمک ماشین سنکرون مجازی به سرعت به حالت ایده‌آل و پایدار خود می‌رسند و از فروپاشی شبکه جلوگیری می‌کنند. همان‌طور که از شکل‌های (۴-۳۹) تا (۴-۴۳) مشاهده می‌شود پارامترهای شبکه در اینرسی مجازی J_v برابر ۱/۰۶ در بازه زمانی

کوتاه‌تری نسبت به اینرسی مجازی ۴/۲۴ به پایداری می‌رسند. جدول (۱۱-۴) نتایج حاصل از شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

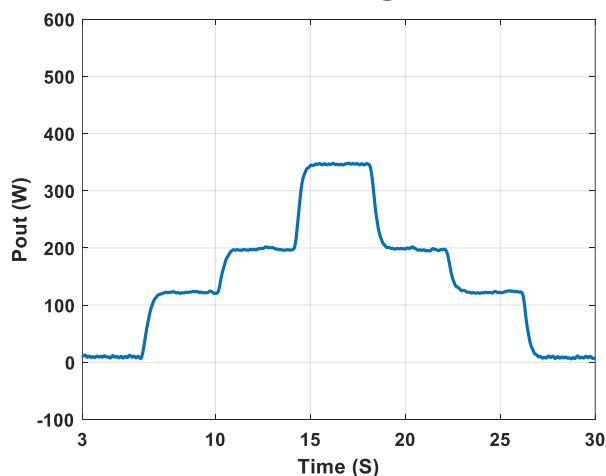
جدول (۱۱-۴): نتایج کاهش و افزایش بار در حضور توربین بادی

	۳-۶ S	۶-۱۴ S	۱۴-۲۰ S
$P_{PV}(W)$	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰
$P_{Wind}(w)$	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰
$P_{Load}(W)$	۵۰۰	۸۰۰	۵۰۰
$P_{out}(w)$	۵۰۰	۲۰۰	۵۰۰

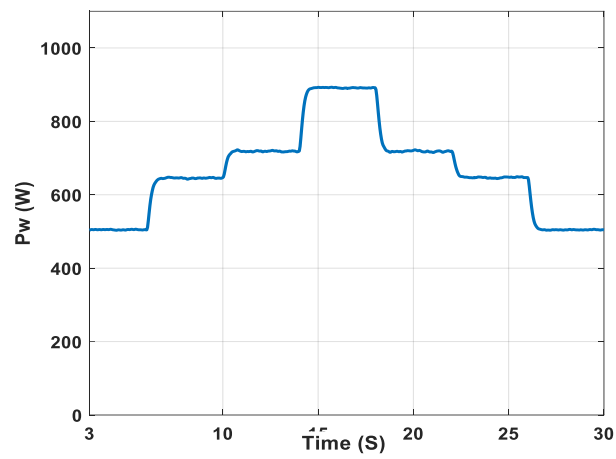
۵-۳-۴ حالت پنجم: سلول فتوولتائیک قطع و توان توربین بادی

متفاوت

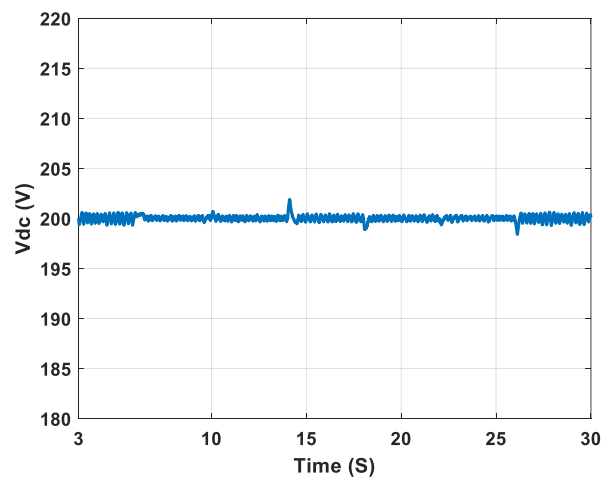
در این حالت ریزش‌بکه DC شامل یک توربین بادی با سرعت ۳/۹۸m/s با توان معادل ۵۰۰ وات، یک بار DC به‌اندازه ۸۰ اهم معادل توان مصرفی ۵۰۰ وات و یک باتری است که به کمک ماشین سنکرون مجازی به شبکه برق متصل شده است. در کل بازه شبیه‌سازی سلول فتوولتائیک از مدار قطع است. هدف در این قسمت مشاهده اثر تغییر سرعت باد در نتیجه تغییر توان توربین بادی در بازه زمانی ۳ تا ۳۰ ثانیه با میرایی R_{ω} برابر ۳۱/۸۳ و اینرسی مجازی J_v برابر ۱/۰۶ بر روی شبکه است.



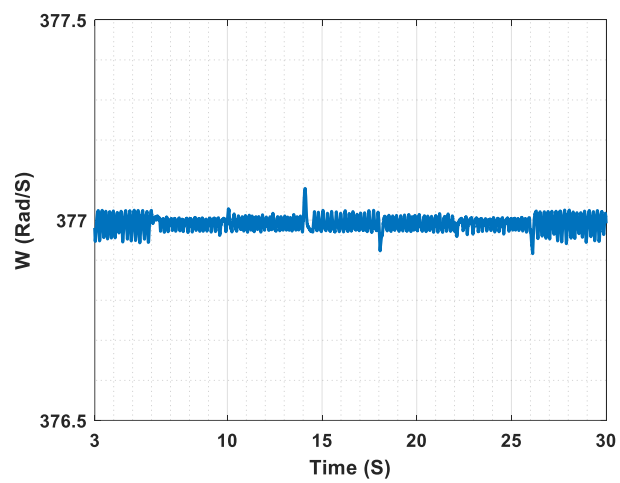
شکل (۴-۴۴): تغییرات توان شبکه AC با تغییرات سرعت توربین بادی



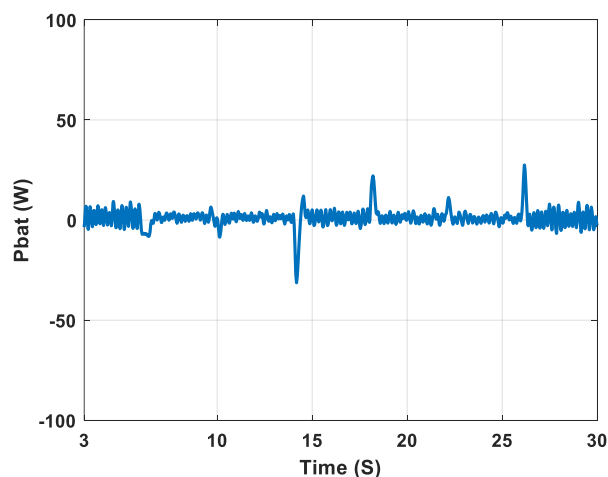
شکل (۴-۴۵): تغییرات توان توربین بادی با تغییرات سرعت توربین بادی



شکل (۴-۴۶): تغییرات ولتاژ DC با تغییرات سرعت توربین بادی



شکل (۴-۴۷): تغییرات فرکانس زاویه ای با تغییرات سرعت توربین بادی



شکل (۴-۴۸): تغییرات توان باتری با تغییرات سرعت توربین بادی

شکل‌های (۴-۴۴) تا (۴-۴۸) توان‌های شبکه، ولتاژ DC و فرکانس زاویه‌ای نمایش داده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود از بازه زمانی ۳ تا ۱۸ ثانیه سرعت باد به‌صورت پله‌ای هر ۴ ثانیه 0.2 افزایش می‌یابد و از بازه ۱۸ تا ۳۰ ثانیه سرعت باد به‌صورت پله‌ای هر ۴ ثانیه 0.2 کاهش می‌یابد. در بازه زمانی ۳ تا ۶ ثانیه توربین بادی با سرعت 3.98 m/s توان 500 وات تولید می‌کند و بار 500 وات توان را مصرف می‌کند و هیچ توانی به شبکه AC تزریق نمی‌شود. در بازه زمانی ۶ تا ۱۰ ثانیه سرعت توربین بادی به 4 m/s افزایش پیدا کرده و توان 630 وات تولید می‌کند در این حالت بار 500 وات توان را مصرف می‌کند و 130 وات توان به شبکه AC تزریق می‌شود به همین ترتیب در بازه‌های زمانی بعد سرعت باد کاهش و افزایش می‌یابد نتایج حاصل از این شبیه‌سازی در جدول (۴-۱۲) بیان شده است در لحظه‌ها افزایش و کاهش سرعت که منجر به افزایش و کاهش توان می‌شود، باتری برای پشتیبانی از پاسخ اینرسی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این لحظه‌ها فرکانس زاویه‌ای، توان شبکه و ولتاژ DC به کمک ماشین سنکرون مجازی به سرعت به حالت پایدار خود می‌رسند.

جدول (۴-۱۲): نتایج و افزایش و کاهش سرعت باد

	۳-۶ S	۶-۱۰ S	۱۰-۱۴ S	۱۴-۱۸ S	۱۸-۲۲ S	۲۲-۲۶ S	۲۶-۳۰ S
$v_{Wind}(m/s)$	۳/۹۸	۴	۴/۲	۴/۴	۴/۲	۴	۳/۹۸
$P_{Wind}(w)$	۵۰۰	۶۳۰	۷۱۰	۸۵۰	۷۱۰	۶۳۰	۵۰۰
$P_{Load}(w)$	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰
$P_{out}(w)$	۰	۱۳۰	۲۱۰	۳۵۰	۲۱۰	۱۳۰	۰

۴-۴ جمع بندی

نتایج حاصل از شبیه سازی در این فصل به دو بخش تقسیم می شود. در بخش اول، ابتدا به تحلیل پایداری سیگنال کوچک شبکه پرداخته می شود و نشان داده می شود که شبکه در اینرسی مجازی ۱/۰۶ و میرایی ۳۱/۸۳ پایدارترین حالت خود را دارا می باشد. سپس با استفاده از ماشین سنکرون مجازی ریزشبه DC را که شامل سلول فتوولتائیک، بار و باتری می باشد ادغام می شود و کنترل فرکانس، پایداری و تأثیر اینرسی مجازی در ۱/۰۶ و ۴/۲۴ بر روی شبکه بررسی می شود و مشاهده می شود که پارامترهای شبکه از جمله توان شبکه AC، توان بار، توان باتری، ولتاژ DC و فرکانس زاویه ای در اینرسی مجازی ۱/۰۶ سریع تر پایدار می شود.

در بخش دوم با اضافه کردن توربین بادی به ریزشبه و با توجه به تغییرات سرعت توربین، به اثر این انرژی تجدیدپذیر بر روی کنترل فرکانس، پایداری و تأثیر اینرسی مجازی در ۱/۰۶ و ۴/۲۴ بر روی شبکه پرداخته می شود و نشان داده می شود که پارامترهای شبکه از جمله توان شبکه AC، توان بار، توان باتری، ولتاژ DC و فرکانس زاویه ای در اینرسی مجازی ۱/۰۶ سریع تر پایدار می شود. همچنین مشاهده می شود که توربین بادی به عنوان یک توان رزرو برای زمان قطع سلول فتوولتائیک و افزایش توان بار مناسب است.

فصل پنجم

نتیجہ گیری و پیشہدات

۵-۱ نتیجه‌گیری

در این پایان‌نامه ابتدا به نقش مهم منابع تولید پراکنده در شبکه‌های برق آینده و توجه به اثر این منابع بر پایداری شبکه‌ها آینده پرداخته شده است. در فصل سوم به منظور پایداری این شبکه‌ها ابتدا به کنترل‌کننده‌های اف‌تی و تأثیر آن بر کنترل فرکانس و ولتاژ پرداخته شده است. این کنترل‌کننده‌ها به دلیل فقدان اینرسی توانایی کنترل فرکانس با افزایش DGها ندارند برای رفع این مشکل استفاده از ماشین سنکرون مجازی به منظور ایجاد اینرسی مجازی به همراه میرایی پیشنهاد شده است. روش کنترل‌کننده ماشین سنکرون مجازی به منظور ارتباط سازی بین ریزشبکه DC با شبکه AC برای فراهم آوردن اینرسی و میرایی موردنیاز VSC و کنترل فرکانس و ولتاژ معرفی و مورد استفاده قرار گرفته است. VSM معرفی شده شامل یک قسمت فیزیکی (مبدل الکترونیک قدرت) و نرم‌افزاری (کنترل‌کننده) است که رابط میان شبکه AC و ریزشبکه DC است که موجب تجمع DGهای گوناگون، ذخیره‌سازهای انرژی و بارها شده است. این ماشین سنکرون توانایی تنظیم ولتاژ به منظور پشتیبانی ولتاژ شبکه AC، توانایی تنظیم فرکانس برای شبیه‌سازی مشخصه نوسان زاویه یک ماشین سنکرون متداول را دارد در این VSM استفاده از کنترل اف‌تی دوگانه میان فرکانس شبکه AC در تنظیم فرکانس و ذخیره‌سازهای انرژی سمت DC انجام شده است.

در فصل چهارم با استفاده از معادلات ماشین سنکرون مجازی فصل سوم ابتدا به تحلیل پایداری سیگنال کوچک شبکه پرداخته و مشاهده شده که شبکه در اینرسی مجازی J_v و میرایی R_ω به ترتیب ۱/۰۶ و ۳۱/۸۳ در بهترین حال خود است و سپس ماشین سنکرون مجازی مورد نظر به همراه ریزشبکه DC متصل به شبکه AC با استفاده از نرم‌افزار MATLAB/SIMULINK شبیه‌سازی شده است. روش مورد نظر برای دو حالت با اتصال و عدم اتصال توربین بادی تحت حالت‌های مختلف مانند قطع و وصل سلول فتوولتائیک، تغییرات بار، سرعت توربین بادی و با اینرسی‌های مختلف مورد آزمایش و بررسی قرار گرفته است. در حالت ابتدا که ریزشبکه شامل سلول فتوولتائیک، باتری و بار است مشاهده شده که

در صورت اغتشاش شبکه به وسیله تغییر توان سلول فتوولتائیک، قطع و وصل بار، افزایش و کاهش بار تقسیم توان شبکه به درستی انجام و مدیریت توان به صورت خودکار برای شبکه AC و ریزشبكة DC انجام شده است و فرکانس و ولتاژ شبکه به خوبی کنترل شده است. در بخش بعدی فصل چهارم توربین بادی به ریزشبكة اضافه شده است و اثر آن بر پایداری شبکه با تغییر در توان سلول فتوولتائیک، تغییر توان توربین بادی، تغییر اندازه بار، قطع و وصل بار و افزایش و کاهش سرعت باد مشاهده شد که تقسیم و مدیریت توان شبکه به درستی انجام شده و فرکانس و ولتاژ شبکه به خوبی کنترل شده است.

نتایج حاصل از شبیه سازی در این پژوهش نشان می دهد که روش ماشین ستکرون مجازی به کمک کنترل افقی دوگانه به خوبی توانایی کنترل سیستم در شرایط مختلف را دارا است. در این روش VSM مبتنی بر سیستم DG باعث بهبود و کارایی به منظور رفع مسائل ناپایداری فرکانس و ولتاژ تحت نفوذ زیاد DG ها شده است. همچنین این روش کنترلی باعث پیاده سازی مدیریت خودکار توان برای ریزشبكة DC متصل به شبکه و همچنین کنترل فرکانس شبکه از طریق VSM شده است.

۵-۲ پیشنهادات

برای ادامه کار موارد زیر پیشنهاد می‌شود:

۱- تأثیر مدل بار:

می‌توان تأثیر انواع مدل بار در شبکه اصلی برای بررسی عملکرد یک ریزشبکه DC در

هنگام کار شبکه اصلی را بررسی کرد.

۲- افزایش میرایی در شبکه:

یکی از مشکلات شبکه‌های AC کمبود میرایی لازم برای نوسانات فرکانس پایین است. در

ادامه کار می‌توان چگونگی استفاده از ریزشبکه DC را برای افزایش میرایی در شبکه اصلی

به کار گرفت.

۳- استفاده از مدل کامل‌تری برای ریزشبکه DC:

می‌توان از مدل کامل‌تری برای ریزشبکه DC استفاده کرد مثلاً مشخصه حالت شارژی

باتری^۱ و نوع بار در ریزشبکه DC را در نظر گرفت.

^۱ state of charge



- [1] P. Kundur, N. J. Balu, and M. G. Lauby, *Power system stability and control*. McGraw-hill New York, 1994.
- [2] H. Saadat, "Power System Analysis, Alexandria, VA," ed: USA: PSA Publishing, 2010.
- [3] I. Series, "Microgrids and active distribution networks," *The institution of Engineering and Technology*, 2009.
- [4] J. Liu, Y. Miura, H. Bevrani, and T. Ise, "Enhanced virtual synchronous generator control for parallel inverters in microgrids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 8, no. 5, pp. 2268-2277, 2016.
- [5] J. M. Guerrero *et al.*, "Distributed generation: Toward a new energy paradigm," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 4, no. 1, pp. 52-64, 2010.
- [6] N. Hatziargyriou, *Microgrids: Architectures and Control*. Wiley, 2014.
- [7] S. y. Obara, *Optimum Design of Renewable Energy Systems: Microgrid and Nature Grid Methods: Microgrid and Nature Grid Methods*. IGI Global, 2014.
- [8] H. Bevrani, B. François, and T. Ise, *Microgrid dynamics and control*. John Wiley & Sons, 2017.
- [9] O. f. E. Co-Operation and Development, *World Energy Outlook 2015*. OECD, 2015.
- [10] W. El-Khattam and M. M. Salama, "Distributed generation technologies, definitions and benefits," *Electric power systems research*, vol. 71, no. 2, pp. 119-128, 2004.
- [11] G. Pepermans, J. Driesen, D. Haeseldonckx, R. Belmans, and W. D'haeseleer, "Distributed generation: definition, benefits and issues," *Energy policy*, vol. 33, no. 6, pp. 787-798, 2005.
- [12] L. M. Fraas, "History of solar cell development," in *Low-Cost Solar Electric Power*: Springer, 2014, pp. 1-12.
- [13] K. Zweibel, J. Mason, and V. Fthenakis, "By 2050 solar power could end US dependence on foreign oil and slash greenhouse gas emissions," *Sci. Am.*, vol. 1, 2009.
- [14] E. Hau, *Wind turbines: fundamentals, technologies, application, economics*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [15] H. E. Murdock *et al.*, "Renewables 2019 Global Status Report," 2019.
- [16] X. Hua, Z. Xiaochen, and L. Na, "A control strategy for inverter: Virtual synchronous generator," in *2018 13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, 2018: IEEE, pp. 193-197.
- [17] A. H. Etemadi, E. J. Davison, and R. Iravani, "A decentralized robust control strategy for multi-DER microgrids—Part I: Fundamental concepts," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, no. 4, pp. 1843-1853, 2012.
- [18] A. Hosseinipour and H. Hojabri, "Virtual inertia control of PV systems for dynamic performance and damping enhancement of DC microgrids with constant power loads," *IET Renewable Power Generation*, vol. 12, no. 4, pp. 430-438,

- 2017.
- [19] P. Borazjani, N. I. A. Wahab, H. B. Hizam, and A. B. C. Soh, "A review on microgrid control techniques," in *2014 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT ASIA)*, 2014: IEEE, pp. 749-753.
 - [20] S. D'Arco and J. A. Suul, "Virtual synchronous machines—Classification of implementations and analysis of equivalence to droop controllers for microgrids," in *2013 IEEE Grenoble Conference*, 2013: IEEE, pp. 1-7.
 - [21] M. A. Sofla and R. King, "Control method for multi-microgrid systems in smart grid environment—Stability, optimization and smart demand participation," in *2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)*, 2012: IEEE, pp. 1-5.
 - [22] M. F. Arani and Y. A.-R. I. Mohamed, "Analysis and impacts of implementing droop control in DFIG-based wind turbines on microgrid/weak-grid stability," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 30, no. 1, pp. 385-396, 2014.
 - [23] J. Liu, Y. Miura, and T. Ise, "Dynamic characteristics and stability comparisons between virtual synchronous generator and droop control in inverter-based distributed generators," in *2014 International Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014-ECCE ASIA)*, 2014: IEEE, pp. 1536-1543.
 - [24] S. F. Bush, *Smart grid: Communication-enabled intelligence for the electric power grid*. John Wiley & sons, 2014.
 - [25] S. S. Acevedo and M. Molinas, "Modeling of switching power interfaces for smart-grid stability studies," in *2011 2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies*, 2011: IEEE, pp. 1-6.
 - [26] B. Yu, J. Guo, C. Zhou, Z. Gan, J. Yu, and F. Lu, "A review on microgrid technology with distributed energy," in *2017 International Conference on Smart Grid and Electrical Automation (ICSGEA)*, 2017: IEEE, pp. 143-146.
 - [27] P. Arbolea *et al.*, "An improved control scheme based in droop characteristic for microgrid converters," *Electric Power Systems Research*, vol. 80, no. 10, pp. 1215-1221, 2010.
 - [28] S. K. Sahoo, A. K. Sinha, and N. Kishore, "Control techniques in AC, DC, and hybrid AC–DC microgrid: A review," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 6, no. 2, pp. 738-759, 2017.
 - [29] M. B. Delghavi, "Advanced islanded-mode control of microgrids," 2011.
 - [30] E. Rodriguez-Diaz, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero, "Intelligent DC homes in future sustainable energy systems: When efficiency and intelligence work together," *IEEE Consumer Electronics Magazine*, vol. 5, no. 1, pp. 74-80, 2015.
 - [31] N. Bayati, A. Hajizadeh, and M. Soltani, "Protection in DC microgrids: a comparative review," *IET Smart Grid*, vol. 1, no. 3, pp. 66-75, 2018.
 - [32] S. A. Khajehoddin, M. Karimi-Ghartemani, and M. Ebrahimi, "Grid-Supporting Inverters With Improved Dynamics," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 5, pp. 3655-3667, 2018.
 - [33] P. Cairolì, R. Rodrigues, and H. Zheng, "Fault current limiting power converters for protection of DC microgrids," in *SoutheastCon 2017*, 2017: IEEE, pp. 1-7.
 - [34] T. R. de Oliveira, A. S. Bolzon, and P. F. Donoso-Garcia, "Grounding and safety considerations for residential DC microgrids," in *IECON 2014-40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2014: IEEE, pp. 5526-5532.
 - [35] A. T. Elsayed, A. A. Mohamed, and O. A. Mohammed, "DC microgrids and

- distribution systems: An overview," *Electric Power Systems Research*, vol. 119, pp. 407-417, 2015.
- [36] Z. Jin, M. Savaghebi, J. C. Vasquez, L. Meng, and J. M. Guerrero, "Maritime DC microgrids-a combination of microgrid technologies and maritime onboard power system for future ships," in *2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia)*, 2016: IEEE, pp. 179-184.
 - [37] J. He and Y. W. Li, "Analysis, design, and implementation of virtual impedance for power electronics interfaced distributed generation," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 47, no. 6, pp. 2525-2538, 2011.
 - [38] J. Rocabert, A. Luna, F. Blaabjerg, and P. Rodriguez, "Control of power converters in AC microgrids," *IEEE transactions on power electronics*, vol. 27, no. 11, pp. 4734-4749, 2012.
 - [39] J. T. Bialasiewicz, "Renewable energy systems with photovoltaic power generators: Operation and modeling," *IEEE Transactions on industrial Electronics*, vol. 55, no. 7, pp. 2752-2758, 2008.
 - [40] M. M. Ansari, C. Guo, M. S. Shaikh, M. A. Jatoi, C. Yang, and J. Zhang, "A Review of Technical Methods for Distributed Systems with Distributed Generation (DG)," in *2019 2nd International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (iCoMET)*, 2019: IEEE, pp. 1-7.
 - [41] J. Alipoor, Y. Miura, and T. Ise, "Power system stabilization using virtual synchronous generator with alternating moment of inertia," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 3, no. 2, pp. 451-458, 2014.
 - [42] T. Kerdphol, F. S. Rahman, M. Watanabe, Y. Mitani, D. Turschner, and H.-P. Beck, "Enhanced Virtual Inertia Control Based on Derivative Technique to Emulate Simultaneous Inertia and Damping Properties for Microgrid Frequency Regulation," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 14422-14433, 2019.
 - [43] N. Soni, S. Doolla, and M. C. Chandorkar, "Improvement of transient response in microgrids using virtual inertia," *IEEE transactions on power delivery*, vol. 28, no. 3, pp. 1830-1838, 2013.
 - [44] B. Zhang, X. Zhang, Z. Song, and X. Yan, "Enhanced control and parameter analysis for virtual synchronous generators without PLL," *The Journal of Engineering*, vol. 2019, no. 16, pp. 3082-3087, 2019.
 - [45] M. Ebrahimi, S. A. Khajehoddin, and M. K. Ghartemani, "An Improved Damping Method for Virtual Synchronous Machines," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2019.
 - [46] M. Dreidy, H. Mokhlis, and S. Mekhilef, "Inertia response and frequency control techniques for renewable energy sources: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 69, pp. 144-155, 2017.
 - [47] H. Bevrani, T. Ise, and Y. Miura, "Virtual synchronous generators: A survey and new perspectives," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 54, pp. 244-254, 2014.
 - [48] Q.-C. Zhong, "Virtual Synchronous Machines: A unified interface for grid integration," *IEEE Power Electronics Magazine*, vol. 3, no. 4, pp. 18-27, 2016.
 - [49] Z. Peng, J. Wang, Y. Wen, D. Bi, Y. Dai, and Y. Ning, "Virtual synchronous generator control strategy incorporating improved governor control and coupling compensation for AC microgrid," *IET Power Electronics*, vol. 12, no. 6, pp. 1455-

- 1461, 2019.
- [50] H.-P. Beck and R. Hesse, "Virtual synchronous machine," in *2007 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation*, 2007: IEEE, pp. 1-6.
 - [51] Q.-C. Zhong, P.-L. Nguyen, Z. Ma, and W. Sheng, "Self-synchronized synchronverters: Inverters without a dedicated synchronization unit," *IEEE Transactions on power electronics*, vol. 29, no. 2, pp. 617-630, 2013.
 - [52] X.-D. Chen, S.-R. Yu, and X.-L. Ge, "Modelling and stability analysis of virtual synchronous machine using harmonic state-space modelling method," *The Journal of Engineering*, vol. 2019, no. 16, pp. 2597-2603, 2019.
 - [53] L. Zhang, L. Harnefors, and H.-P. Nee, "Interconnection of two very weak AC systems by VSC-HVDC links using power-synchronization control," *IEEE transactions on power systems*, vol. 26, no. 1, pp. 344-355, 2010.
 - [54] L. Huang, H. Xin, and Z. Wang, "Damping low-frequency oscillations through vsc-hvdc stations operated as virtual synchronous machines," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 34, no. 6, pp. 5803-5818, 2018.
 - [55] J. A. Suul, S. D'Arco, and G. Guidi, "Virtual synchronous machine-based control of a single-phase bi-directional battery charger for providing vehicle-to-grid services," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 52, no. 4, pp. 3234-3244, 2016.
 - [56] J. Liu, F. Rafi, J. Lu, and M. Hossain, "Neutral current compensation in a VSG-based three-phase four-wire microgrid system," in *2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe)*, 2018: IEEE, pp. 1-6.
 - [57] M. Ashabani and Y. A.-R. I. Mohamed, "Novel comprehensive control framework for incorporating VSCs to smart power grids using bidirectional synchronous-VSC," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 29, no. 2, pp. 943-957, 2013.
 - [58] D. Leng and S. Polmai, "Transient Respond Comparison Between Modified Droop Control and Virtual Synchronous Generator in Standalone Microgrid," in *2019 5th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology (ICEAST)*, 2019: IEEE, pp. 1-4.
 - [59] J. Liu, Y. Miura, and T. Ise, "Comparison of dynamic characteristics between virtual synchronous generator and droop control in inverter-based distributed generators," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 5, pp. 3600-3611, 2015.
 - [60] E. Unamuno, J. A. Suul, M. Molinas, and J. A. Barrena, "Comparative Eigenvalue Analysis of Synchronous Machine Emulations and Synchronous Machines," in *IECON 2019-45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2019, vol. 1: IEEE, pp. 3863-3870.
 - [61] U. Tamrakar, D. Shrestha, M. Maharjan, B. P. Bhattarai, T. M. Hansen, and R. Tonkoski, "Virtual inertia: Current trends and future directions," *Applied Sciences*, vol. 7, no. 7, p. 654, 2017.
 - [62] W. Wu *et al.*, "A virtual inertia control strategy for DC microgrids analogized

- with virtual synchronous machines," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 7, pp. 6005-6016, 2016.
- [63] M. Ebrahimi, S. A. Khajehoddin, and M. Karimi-Ghartemani, "An improved damping method for virtual synchronous machines," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 10, no. 3, pp. 1491-1500, 2019.
 - [64] Q.-C. Zhong and G. Weiss, "Synchronverters: Inverters that mimic synchronous generators," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 4, pp. 1259-1267, 2010.
 - [65] M. Ramezani, S. Li, F. Musavi, and S. Golestan, "Seamless transition of synchronous inverters using synchronizing virtual torque and flux linkage," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 67, no. 1, pp. 319-328, 2019.
 - [66] K. Dhingra and M. Singh, "Frequency support in a micro-grid using virtual synchronous generator based charging station," *IET Renewable Power Generation*, vol. 12, no. 9, pp. 1034-1044, 2018.
 - [67] J. Xi, H. Geng, G. Yang, and S. Ma, "Inertial response analysis of PMSG-based WECS with VSG control," *The Journal of Engineering*, vol. 2017, no. 13, pp. 897-901, 2017.
 - [68] J. Xi, H. Geng, S. Ma, Y. Chi, and G. Yang, "Inertial response characteristics analysis and optimisation of PMSG-based VSG-controlled WECS," *IET Renewable Power Generation*, vol. 12, no. 15, pp. 1741-1747, 2018.
 - [69] R. Shi, X. Zhang, C. Hu, H. Xu, J. Gu, and W. Cao, "Self-tuning virtual synchronous generator control for improving frequency stability in autonomous photovoltaic-diesel microgrids," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 6, no. 3, pp. 482-494, 2018.
 - [70] V. Karapanos, S. de Haan, and K. Zwetsloot, "Testing a virtual synchronous generator in a real time simulated power system," in *Proc. Int. Conf. on Power Systems Transients (IPST)*, 2011.
 - [71] M. Van Wesenbeeck, S. De Haan, P. Varela, and K. Visscher, "Grid tied converter with virtual kinetic storage," in *2009 IEEE Bucharest PowerTech*, 2009: IEEE, pp. 1-7.
 - [72] D. Duckwitz and B. Fischer, "Modeling and design of df/dt -based inertia control for power converters," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 5, no. 4, pp. 1553-1564, 2017.
 - [73] O. Mo, S. D'Arco, and J. A. Suul, "Evaluation of virtual synchronous machines with dynamic or quasi-stationary machine models," *IEEE Transactions on industrial Electronics*, vol. 64, no. 7, pp. 5952-5962, 2016.
 - [74] S. D'Arco, J. A. Suul, and O. B. Fosfo, "A Virtual Synchronous Machine implementation for distributed control of power converters in SmartGrids," *Electric Power Systems Research*, vol. 122, pp. 180-197, 2015.
 - [75] S. D'Arco, J. A. Suul, and O. B. Fosfo, "Control system tuning and stability

analysis of virtual synchronous machines," in *2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 2013: IEEE, pp. 2664-2671.

- [76] T. Ise and H. Bevrani, "Virtual synchronous generators and their applications in microgrids," in *Integration of Distributed Energy Resources in Power Systems*: Elsevier, 2016, pp. 282-294.
- [77] Y. Zhang, H. Li, L. Sun, and M. Wu, "Dynamic and Static Power Sharing Strategy for Paralleled Virtual Synchronous Generators in Microgrid," in *2018 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia)*, 2018: IEEE, pp. 946-951.
- [78] H. Bevrani, M. R. Feizi, and S. Ataee, "Robust Frequency Control in an Islanded Microgrid: H_{∞} and μ -Synthesis Approaches," *IEEE transactions on smart grid*, vol. 7, no. 2, pp. 706-717, 2015
- [79] E. Ela *et al.*, "Active power controls from wind power: Bridging the gaps," National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), 2014.
- [80] A. Ghafouri, J. Milimonfared, and G. B. Gharehpetian, "Coordinated control of distributed energy resources and conventional power plants for frequency control of power systems," *IEEE transactions on smart grid*, vol. 6, no. 1, pp. 104-114, 2014.
- [81] R. H. Lasseter, "Control and design of microgrid components," *PSERC Publication 06-03*, 2006.
- [82] M. Li *et al.*, "A power decoupling control strategy for droop controlled inverters and virtual synchronous generators," in *2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia)*, 2016: IEEE, pp. 1713-1719.
- [83] D. Chen, Y. Xu, and A. Q. Huang, "Integration of dc microgrids as virtual synchronous machines into the ac grid," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 9, pp. 7455-7466, 2017.
- [84] S. M. Ashabani and Y. A.-r. I. Mohamed, "New family of microgrid control and management strategies in smart distribution grids—analysis, comparison and testing," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 29, no. 5, pp. 2257-2269, 2014.
- [85] D. Chen, A. Q. Huang, Y. Xu, F. Wang, and W. Yu, "Distributed and autonomous control of the FREEDM system: A power electronics based distribution system," in *IECON 2014-40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2014: IEEE, pp. 4954-4960.
- [86] A. Keyhani and A. Chatterjee, "Automatic generation control structure for smart power grids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, no. 3, pp. 1310-1316, 2012.
- [87] S. Shao, M. Pipattanasomporn, and S. Rahman, "Demand response as a load shaping tool in an intelligent grid with electric vehicles," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 2, no. 4, pp. 624-631, 2011.
- [88] M. Ashabani and Y. A.-R. I. Mohamed, "Integrating VSCs to weak grids by nonlinear power damping controller with self-synchronization capability," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 29, no. 2, pp. 805-814, 2013.
- [89] M. F. M. Arani and E. F. El-Saadany, "Implementing virtual inertia in DFIG-based wind power generation," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 2, pp. 1373-1384, 2012.
- [90] J. Zhu, C. D. Booth, G. P. Adam, A. J. Roscoe, and C. G. Bright, "Inertia emulation control strategy for VSC-HVDC transmission systems," *IEEE*

- Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 2, pp. 1277-1287, 2012.
- [91] S. Samanta, J. P. Mishra, and B. K. Roy, "Virtual DC machine: an inertia emulation and control technique for a bidirectional DC–DC converter in a DC microgrid," *IET Electric Power Applications*, vol. 12, no. 6, pp. 874-884, 2018.
 - [92] S. Golestan, M. Monfared, and F. D. Freijedo, "Design-oriented study of advanced synchronous reference frame phase-locked loops," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 2, pp. 765-778, 2012.
 - [93] J. Alipoor, Y. Miura, and T. Ise, "Stability assessment and optimization methods for microgrid with multiple VSG units," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 2, pp. 1462-1471, 2016.
 - [94] H. S. Hlaing, J. Liu, Y. Miura, H. Bevrani, and T. Ise, "Enhanced Performance of a Stand-Alone Gas-Engine Generator Using Virtual Synchronous Generator and Energy Storage System," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 176960-176970, 2019.
 - [95] U. B. Krishnan, S. Mija, and E. P. Cheriyan, "State space modelling, analysis and optimization of microgrid droop controller," in 2017 6th International Conference on Computer Applications In Electrical Engineering-Recent Advances (CERA), 2017: IEEE, pp. 276-281.
 - [96] P. C. Loh, D. Li, Y. K. Chai, and F. Blaabjerg, "Autonomous control of interlinking converter with energy storage in hybrid AC–DC microgrid," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 49, no. 3, pp. 1374-1382, 2013.
 - [97] P. C. Loh, D. Li, Y. K. Chai, and F. Blaabjerg, "Autonomous operation of hybrid microgrid with AC and DC subgrids," *IEEE transactions on power electronics*, vol. 28, no. 5, pp. 2214-2223, 2012.
 - [98] J. C. Vasquez, J. M. Guerrero, M. Savaghebi, J. Eloy-Garcia, and R. Teodorescu, "Modeling, analysis, and design of stationary-reference-frame droop-controlled parallel three-phase voltage source inverters," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 4, pp. 1271-1280, 2012.
 - [99] F. Guo, C. Wen, J. Mao, and Y.-D. Song, "Distributed secondary voltage and frequency restoration control of droop-controlled inverter-based microgrids," *IEEE Transactions on industrial Electronics*, vol. 62, no. 7, pp. 4355-4364, 2014.
 - [100] C.-T. Lee, C.-C. Chu, and P.-T. Cheng, "A new droop control method for the autonomous operation of distributed energy resource interface converters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 4, pp. 1980-1993, 2012.
 - [101] Y. Xu, *Modeling and Control of Grid-Connected Microgrid as Solid State Synchronous Machine (SSSM)*. North Carolina State University, 2017.
 - [102] Q. Shafiee, J. M. Guerrero, and J. C. Vasquez, "Distributed secondary control for islanded microgrids—A novel approach," *IEEE Transactions on power electronics*, vol. 29, no. 2, pp. 1018-1031, 2013.
 - [103] A. Merabet, K. T. Ahmed, H. Ibrahim, R. Beguenane, and A. M. Ghias, "Energy management and control system for laboratory scale microgrid based wind-PV-battery," *IEEE transactions on sustainable energy*, vol. 8, no. 1, pp. 145-154, 2016.
 - [104] D. W. Hart, *Power electronics*. Tata McGraw-Hill Education, 2011.
 - [105] A. Koerber and R. King, "Combined feedback–feedforward control of wind turbines using state-constrained model predictive control," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 21, no. 4, pp. 1117-1128, 2013.

- [106] A. Uehara *et al.*, "A coordinated control method to smooth wind power fluctuations of a PMSG-based WECS," *IEEE Transactions on energy conversion*, vol. 26, no. 2, pp. 550-558, 2011.
- [107] D.-J. Lee and L. Wang, "Small-signal stability analysis of an autonomous hybrid renewable energy power generation/energy storage system part I: Time-domain simulations," *IEEE Transactions on energy conversion*, vol. 23, no. 1, pp. 311-320, 2008.
- [108] H. Saadat, Power system analysis. McGraw-Hill, 1999.
- [109] F. Wang, L. Zhang, X. Feng, and H. Guo, "An adaptive control strategy for virtual synchronous generator," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 54, no. 5, pp. 5124-5133, 2018.

Abstract

Recently, due to environmental issues and lack of fossil resources, the widespread use of renewable resources has been considered. The use of resources in the conventional leads to decentralized generation and due to the changing nature of these resources many, fluctuations have been added to the network. DC microgrids, as a small power grid, make it easy to use and control these resources in the distribution network. Excessive penetration of power electronic based renewable sources has reduced the inertia and damping making the system more sensitive the disturbances and reducing the system stability margin. This thesis uses a DC microgrid structure connected to an AC network equipped with a virtual synchronous machine to manage automatically the power of the DC microgrid and AC network and analyzing the role of virtual inertia in small signal stability. In order to verify the proposed method, the network has been studied for different operating conditions and inertias. In this method, with the use of the voltage source converter response and proper design dual droop control, and also with the aid of the voltage and frequency controllers and active output controllers, the necessary support for adjusting the system frequency and active power are provided to withstand disturbances and therefore, stability is enhanced for different operating conditions.

Keywords: Virtual Synchronous Machines, DC Microgrid, Virtual Inertia, DC-AC Converter, Energy Storage



Shahrood University of
Technology

Faculty of Electrical and Robotics Engineering

M.Sc. Thesis in Electrical Power Systems Engineering

Performance analysis of a DC microgrid as a virtual synchronous machine in operation with an AC microgrid

By: Farzaneh shourkeshti

Supervisor:

Dr. Mahdi Banejad

Assistant Supervisor:

Dr. Ali Akbar Zadeh Kalat

Dr.Mohammad.Hoseintabar Marzebali

July2020