

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی برق و رباتیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی سیستم‌های قدرت

اثر امپدانس مجازی بر تقسیم توان در ریزشبکه‌ها

نگارنده: منیر اشرفی

استاد راهنما:

دکتر مهدی بانژاد

اساتید مشاور:

دکتر علی دستفان

دکتر علی اکبر زاده کلات

بهمن ۱۳۹۵



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

با تأییدات خدایتعالی و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) آریایی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خاتم / آقای
عنبر اشرفی به شماره دانشجویی ۹۲۰۲۵۹۴ رشته مهندسی برق گزارش قیودت (سیستم) که در تاریخ
۹۵/۱۱/۱۸ تحت عنوان:

اثر امپدانس مجازی بر تقسیم توان در ریزشیکه ها

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

قبول (با درجه عالی)	استاد ۸۹۵۵۵	دفاع مجدد	مردود
نوع تحقیق:	نظری	عملی	

۱- عالی (۲۰-۱۹)

۲- بسیار خوب (۱۸-۱۷)

۳- خوب (۱۶-۱۵)

۴- قابل قبول (۱۴-۱۳)

۵- نمره کمتر از ۱۲ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر مهدی بازرگان	دانشیار	با درجه عالی
۲- استاد راهنمای دوم			
۳- استاد مشاور	دکتر علی دشتیان دکتر علی اکبر زاده کاشانی	دانشیار استاد	
۴- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	دکتر سواد احمدی	استادیار	
۵- استاد منتحن اول	دکتر احمد دلاری	استاد	
۶- استاد منتحن دوم	دکتر حسن قنبرزاده	دانشیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:
نام و نام خانوادگی مدیر دانشکده:
تاریخ: ۱۳۹۵/۱۱/۱۸

تقدیم به:

ساحت مقدس حضرت ولی عصر عجل الله تعالی فرجه الشریف، وسیله هدایت الهی در سراسر زمین که

هیچ هدایت خواهی را تنها نمی گذارد.

سپاسگزاری:

سپاس خداوند مهربان را که به انسان توانایی و دانایی بخشید تا به بندگانش مهربانی کند و در حل مشکلاتشان یاری‌شان نماید، از راحت خویش بگذرد و آسایش هم نوعان را مقدم دارد.

خداوند را بسی شاکرم که از روی کرم خانواده‌ای فداکار نصیبم ساخته تا در سایه درخت پربار وجودشان بیاسایم و از ریشه آن‌ها شاخ و برگ گیرم و از سایه وجودشان در راه کسب علم و دانش تلاش نمایم. پدر و مادری که بودنشان تاج افتخاری است بر سرم و نامشان دلیلی است بر بودنم. چرا که این دو وجود مقدس پس از پروردگار مایه هستی‌ام بوده‌اند، دستم را گرفتند و با مهربانی چگونه زیستن را به من آموخته‌اند و برایم زندگی و انسان بودن را معنا کردند.

بسی شایسته است از استاد فرهیخته و فرزانه‌ام جناب آقای دکتر مهدی بانژاد سپاسگزاری نمایم چرا که بدون راهنمایی‌های ایشان تأمین این پایان‌نامه بسیار مشکل می‌نمود. از اساتید بزرگوارم جناب آقای دکتر علی دستفان و جناب آقای دکتر علی اکبر زاده کلات و همچنین از جناب آقای مهندس خان عبدال به دلیل مساعدت‌های بی‌دریغ و راهنمایی‌های بی‌چشمداشت ایشان تقدیر و تشکر می‌نمایم.

پروردگارا مرا یاری کن تا بتوانم ادای دین کنم و توفیق خدمتی سرشار از شور و نشاط و همراه و همسوی با علم و دانش و پژوهش جهت رشد و شکوفایی این مرزوبوم عنایت بفرما.

تعهدنامه

اینجانب منیر اشرفی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته برق دانشکده برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **اثر امپدانس مجازی بر تقسیم توان در ریزشبکه ها** تحت راهنمایی جناب آقای دکتر مهدی بانژاد متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
 - در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
 - مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
 - کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
 - حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
 - در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو



مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

اخیراً کاربرد تولید پراکنده مبتنی بر استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر در شبکه قدرت گسترش یافته است و ریزشبکه به عنوان یک آرایش منظم به منظور جمع منابع تولید پراکنده ارائه شده است. جمع منابع تولید پراکنده با مسائل متعددی از جمله کنترل تقسیم توان در حالت عملکرد جزیره‌ای ریزشبکه روبه‌رو است. یکی از روش‌های کنترل تقسیم توان در میان منابع تولید پراکنده در یک ریزشبکه، کنترل مشخصه‌های اکتیو هر یک از منابع است. از این رو، این پایان‌نامه به بررسی تقسیم توان در ریزشبکه جزیره‌ای با منابع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر پرداخته است که هر یک از منابع توسط روش اکتیو متداول کنترل شده‌اند. روش اکتیو متداول قادر است تقسیم توان حقیقی صحیحی را محقق سازد، در حالی که تقسیم توان راکتیو با استفاده از این روش به صورت نادرست انجام شده است. تقسیم نادرست توان راکتیو ناشی از عدم تطبیق امپدانس خطوط تغذیه منابع تولید پراکنده است و همچنین می‌تواند منجر به جاری شدن جریان چرخشی در میان منابع تولید پراکنده در ریزشبکه شود. بنابراین در این پژوهش، اثر امپدانس مجازی در تقسیم توان مطالعه شده است. به منظور جبران عدم تطبیق امپدانس خطوط تغذیه، روش مبتنی بر امپدانس مجازی به دو صورت امپدانس ثابت و قابل تنظیم ارائه شده است. بنابراین در این مطالعه اثر نسبت مقاومت به راکتانس خطوط تغذیه و مدل بار بر روش پیشنهاد شده در جبران عدم تطبیق امپدانس فیدرها بررسی شده است. روش پیشنهادی روی یک سیستم آزمایش نمونه در نرم‌افزار PSCAD/EMTDC شبیه‌سازی شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که روش پیشنهادی به طور کامل قادر است توان راکتیو را با جبران عدم تطبیق امپدانس فیدرها به صورت صحیح تقسیم کند. نتایج شبیه‌سازی همچنین نشان داد که جریان‌های چرخشی در میان منابع با استفاده از روش پیشنهادی کاهش یافته است.

کلمات کلیدی: ریزشبکه جزیره‌ای، تقسیم توان، کنترل محلی ریزشبکه جزیره‌ای، روش کنترل اکتیو، امپدانس مجازی.

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

۱- "بهبود تقسیم توان راکتیو در ریزشبکه‌های جزیره‌ای با استفاده از امیدانس القایی مجازی"

چاپ شده در سی و یکمین کنفرانس بین المللی برق، تهران، آبان ۱۳۹۵.

۲- "بهبود تقسیم توان راکتیو و کاهش جریان چرخشی در ریزشبکه‌های جزیره‌ای اندوکتیو با

استفاده از اندوکتانس مجازی منفی" چاپ شده در پنجمین کنفرانس منطقه‌ای سیرد، تهران،

دی ۱۳۹۵.

فهرست مطالب

فصل اول.....	۱
مقدمه.....	۱
۱-۱- تعریف موضوع.....	۲
۱-۲- راه حل های موجود.....	۵
۱-۳- اهداف و روند اجرای پایان نامه.....	۵
۱-۴- مروری بر فصول پایان نامه.....	۷
فصل دوم.....	۹
مفاهیم اصلی در ریز شبکه ها.....	۹
۲-۱- مقدمه.....	۱۰
۲-۲- مفهوم ریز شبکه.....	۱۰
۲-۳- تاریخچه مفهوم ریز شبکه.....	۱۱
۲-۴- ساختار و اجزاء ریز شبکه.....	۱۲
۲-۵- عملکرد جزیره ای ریز شبکه.....	۱۴
۲-۶- کنترل ریز شبکه.....	۱۷
۲-۶-۱- روش کنترل سراسری.....	۱۷
۲-۶-۲- روش کنترل محلی.....	۱۷
۲-۷- نقش مبدل های الکترونیک قدرت در ریز شبکه ها.....	۱۹
۲-۸- جمع بندی.....	۲۱
فصل سوم.....	۲۳
تئوری تقسیم توان بین منابع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر کنترل شده با روش کنترل افتی.....	۲۳
۳-۱- مقدمه.....	۲۴
۳-۲- معادلات پخش توان و مشخصه های افتی.....	۲۴
۳-۲-۱- تئوری تقسیم توان حقیقی و راکتیو.....	۲۵
۳-۲-۲- مشخصه افتی متناسب با نوع امپدانس خط تغذیه.....	۲۸
۳-۲-۳- افت ولتاژ روی امپدانس خط تغذیه.....	۳۱
۳-۲-۴- اثر امپدانس خط تغذیه بر تقسیم توان.....	۳۳

۳-۳- اثر بارهای وابسته به ولتاژ بر تقسیم توان.....	۳۴
۳-۳-۱- بار توان ثابت.....	۳۵
۳-۳-۲- بار جریان ثابت.....	۳۶
۳-۳-۳- بار امپدانس ثابت.....	۳۶
۳-۴- روش افی متداول.....	۳۷
۳-۵- روش افی مخالف.....	۴۱
۳-۶- تحلیل تقسیم جریان و جریان چرخشی.....	۴۳
۳-۷- تقسیم توان در ریزشکه جزیره‌ای مبتنی بر اینورتر کنترل‌شده با روش افی.....	۴۶
۳-۷-۱- الگوریتم تقسیم توان به روش کنترل افی متداول.....	۴۷
۳-۷-۲- اثر عدم تطبیق امپدانس بر تقسیم توان.....	۴۸
۳-۷-۳- عوامل مؤثر بر تقسیم توان راکتیو.....	۵۳
۳-۸- جمع بندی.....	۵۷
فصل چهارم.....	۵۹
اثر امپدانس مجازی در ریزشکه‌های جزیره‌ای مبتنی بر اینورتر کنترل‌شده با روش افی.....	۵۹
۴-۱- مقدمه.....	۶۰
۴-۲- تشریح امپدانس مجازی در ریزشکه‌ها.....	۶۰
۴-۲-۱- مروری بر روش افی متداول.....	۶۲
۴-۲-۲- مفهوم امپدانس مجازی.....	۶۳
۴-۳- پیاده‌سازی روش امپدانس مجازی.....	۶۵
۴-۴- طراحی کنترل‌کننده امپدانس مجازی.....	۷۲
۴-۴-۱- ریزشکه کاملاً اندوکتیو.....	۷۳
۴-۴-۲- ریزشکه مقاومتی.....	۷۵
۴-۵- تأثیر مدل بار بر مقدار امپدانس مجازی.....	۷۷
۴-۵-۱- بار توان ثابت.....	۷۹
۴-۵-۲- بار جریان ثابت.....	۷۹
۴-۵-۳- بار امپدانس ثابت.....	۸۰
۴-۶- جمع بندی.....	۸۱

فصل پنجم.....	۸۳
شبیه سازی و تحلیل نتایج.....	۸۳
۵-۱- مقدمه.....	۸۴
۵-۲- ساختار و مشخصات ریز شبکه مورد مطالعه.....	۸۵
۵-۳- شبیه سازی در نرم افزار PSCAD/ EMTDC.....	۸۷
۵-۳-۱- عملکرد تقسیم توان توسط روش ایتی متداول.....	۸۸
۵-۳-۲- عملکرد تقسیم توان توسط روش امیدانس مجازی ثابت.....	۹۳
۵-۳-۳- عملکرد تقسیم توان توسط روش امیدانس مجازی قابل تنظیم.....	۹۸
۵-۴- کاهش جریان چرخشی توسط روش امیدانس مجازی.....	۱۲۵
فصل ششم.....	۱۲۹
نتیجه گیری و پیشنهادات.....	۱۲۹
۶-۱- نتیجه گیری.....	۱۳۰
۶-۲- پیشنهادات.....	۱۳۲

فهرست شکل‌ها

- شکل (۱-۱): ساختار ریزشبكة [۳]..... ۳
- شکل (۲-۱): روند انجام پایان نامه ۶
- شکل (۱-۲): ساختار ریزشبكة [۲۱]..... ۱۱
- شکل (۲-۲): ساختار گسترده ریزشبكة [۳]..... ۱۳
- شکل (۳-۲): کنترل متمرکز [۲۱]..... ۱۸
- شکل (۴-۲): کنترل غیرمتمرکز [۲۱]..... ۱۹
- شکل (۵-۲): منبع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر منبع ولتاژ..... ۲۱
- شکل (۱-۳): مدار معادل یک منبع تولید پراکنده..... ۲۵
- شکل (۲-۳): دیاگرام تک خطی سیستم قدرت..... ۳۲
- شکل (۳-۳): مشخصه افتی فرکانس متداول [۹]..... ۳۸
- شکل (۴-۳): مشخصه افتی ولتاژ متداول [۹]..... ۳۸
- شکل (۵-۳): بلوک دیاگرام ولتاژ مرجع به دست آمده از روش افتی متداول [۳۹]..... ۴۱
- شکل (۶-۳): مشخصه افتی فرکانس مخالف..... ۴۱
- شکل (۷-۳): مشخصه افتی ولتاژ مخالف..... ۴۲
- شکل (۸-۳): بلوک دیاگرام ولتاژ مرجع به دست آمده از روش افتی مخالف [۳۹]..... ۴۲
- شکل (۹-۳): مدار معادل ریزشبكة جزیره‌ای مبتنی بر اینورتر..... ۴۴
- شکل (۱۰-۳): مراحل پیاده‌سازی روش کنترل افتی [۹]..... ۴۷
- شکل (۱۱-۳): مدار معادل منبع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر کنترل شده با روش کنترل افتی (DVS) [۴۴]..... ۴۷
- شکل (۱۲-۳): مدار معادل ریزشبكة جزیره‌ای با دو منبع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر کنترل شده با روش افتی..... ۴۸
- شکل (۱۳-۳): مدار معادل ریزشبكة جزیره‌ای با دو منبع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر کنترل شده با روش افتی با در نظر گرفتن عدم تطبیق امپدانس خطوط تغذیه [۱۰]..... ۴۹
- شکل (۱۴-۳): عملکرد تقسیم توان راکتیو در ریزشبكة جزیره‌ای شامل دو اینورتر با مشخصه‌های خط تغذیه متفاوت..... ۵۶
- شکل (۱-۴): مدار معادل منبع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر کنترل شده با روش کنترل افتی با در نظر گرفتن امپدانس مجازی..... ۶۴
- شکل (۲-۴): پیاده‌سازی امپدانس مجازی در خروجی منبع تولید پراکنده به صورت فرضی [۵۸]..... ۶۶

- شکل (۳-۴): بلوک دیاگرام کنترل کننده منبع تولید پراکنده..... ۶۶
- شکل (۴-۴): مراحل پیاده سازی روش کنترل افی با در نظر گرفتن روش امیدانس مجازی [۹]..... ۶۷
- شکل (۵-۴): پیاده سازی روش کنترل افی با در نظر گرفتن روش امیدانس مجازی در کنترل کننده محلی..... ۶۸
- شکل (۶-۴): مدل امیدانس مجازی [۶۰]..... ۶۹
- شکل (۷-۴): مدلسازی امیدانس مجازی [۷]..... ۷۰
- شکل (۸-۴): کنترل کننده واحد تولید پراکنده..... ۶۸
- شکل (۹-۴): حلقه کنترل انتگرال برای تنظیم مقاومت و راکتانس مجازی..... ۶۹
- شکل (۱۰-۴): کنترل کننده تنظیم امیدانس مجازی [۱۰]..... ۷۳
- شکل (۱۱-۴): ریزشبهه با خطوط تغذیه کاملاً آندوکتیو با لحاظ راکتانس مجازی..... ۷۴
- شکل (۱۲-۴): کنترل کننده تنظیم راکتانس مجازی..... ۷۵
- شکل (۱۳-۴): ریزشبهه با خط تغذیه کاملاً مقاومتی با لحاظ مقاومت مجازی..... ۷۶
- شکل (۱۴-۴): کنترل کننده تنظیم مقاومت مجازی..... ۷۷
- شکل (۱۵-۴): مدل ریزشبهه جزیره ای به منظور در نظر گرفتن اثر بار..... ۷۸
- شکل (۱-۵): ریزشبهه جزیره ای نمونه..... ۸۴
- شکل (۲-۵): مدل گسترده ریزشبهه جزیره ای مورد مطالعه..... ۸۵
- شکل (۳-۵): موارد مورد شبیه سازی در این فصل..... ۸۸
- شکل (۴-۵): عملکرد تقسیم توان حقیقی توسط واحدهای DG با روش افی متداول..... ۸۹
- شکل (۵-۵): عملکرد تقسیم توان راکتیو توسط واحدهای DG با روش افی متداول..... ۸۹
- شکل (۶-۵): عملکرد تقسیم توان حقیقی توسط واحدهای DG با روش افی متداول با در نظر گرفتن تغییر در امیدانس خط تغذیه DG1..... ۹۰
- شکل (۷-۵): عملکرد تقسیم توان راکتیو توسط واحدهای DG با روش افی متداول با در نظر گرفتن تغییر در امیدانس خط تغذیه DG1..... ۹۱
- شکل (۸-۵): عملکرد تقسیم توان حقیقی توسط واحدهای DG با روش افی متداول با در نظر گرفتن تغییر در بار ریزشبهه..... ۸۸
- شکل (۹-۵): عملکرد تقسیم توان راکتیو توسط واحدهای DG با روش افی متداول با در نظر گرفتن تغییر در بار ریزشبهه..... ۹۲
- شکل (۱۰-۵): ریزشبهه جزیره ای مورد آزمایش با در نظر گرفتن امیدانس مجازی..... ۸۹

- شکل (۵-۱۱): عملکرد تقسیم توان حقیقی توسط واحدهای DG با اصلاح روش ایتی متداول توسط روش امیدانس مجازی ثابت. ۹۴.....
- شکل (۵-۱۲): عملکرد تقسیم توان راکتیو توسط واحدهای DG با اصلاح روش ایتی متداول توسط روش امیدانس مجازی ثابت. ۹۰.....
- شکل (۵-۱۳): عملکرد تقسیم توان حقیقی توسط واحدهای DG با اصلاح روش ایتی متداول توسط روش امیدانس مجازی ثابت با در نظر گرفتن تغییر در امیدانس خط تغذیه DG1. ۹۵.....
- شکل (۵-۱۴): عملکرد تقسیم توان راکتیو توسط واحدهای DG با اصلاح روش ایتی متداول توسط روش امیدانس مجازی ثابت با در نظر گرفتن تغییر در امیدانس خط تغذیه DG1. ۹۶.....
- شکل (۵-۱۵): عملکرد تقسیم توان حقیقی توسط واحدهای DG با اصلاح روش ایتی متداول توسط روش امیدانس مجازی ثابت با در نظر گرفتن تغییر در بار ریزشبه. ۹۷.....
- شکل (۵-۱۶): عملکرد تقسیم توان راکتیو توسط واحدهای DG با اصلاح روش ایتی متداول توسط روش امیدانس مجازی ثابت با در نظر گرفتن تغییر در بار ریزشبه. ۹۷.....
- شکل (۵-۱۷): عملکرد تقسیم توان حقیقی توسط واحدهای DG با اصلاح روش ایتی متداول توسط روش امیدانس مجازی قابل تنظیم مثبت. ۹۸.....
- شکل (۵-۱۸): عملکرد تقسیم توان راکتیو توسط واحدهای DG با اصلاح روش ایتی متداول توسط روش امیدانس مجازی قابل تنظیم مثبت. ۹۹.....
- شکل (۵-۱۹): سیگنال کنترلی K_{vir} بیانگر مقاومت و راکتانس مجازی. ۹۹.....
- شکل (۵-۲۰): عملکرد تقسیم توان حقیقی توسط واحدهای DG با اصلاح روش ایتی متداول توسط روش امیدانس مجازی قابل تنظیم مثبت با در نظر گرفتن تغییر در امیدانس خط تغذیه. ۱۰۰.....
- شکل (۵-۲۱): عملکرد تقسیم توان راکتیو توسط واحدهای DG با اصلاح روش ایتی متداول توسط روش امیدانس مجازی قابل تنظیم مثبت با در نظر گرفتن تغییر در امیدانس خط تغذیه DG1. ۱۰۰.....
- شکل (۵-۲۲): سیگنال کنترلی K_{vir} بیانگر مقاومت و راکتانس مجازی با در نظر گرفتن تغییر در امیدانس خط تغذیه DG1. ۱۰۱.....
- شکل (۵-۲۳): عملکرد تقسیم توان حقیقی توسط واحدهای DG با اصلاح روش ایتی متداول توسط روش امیدانس مجازی قابل تنظیم مثبت با در نظر گرفتن تغییر بار ریزشبه. ۹۸.....
- شکل (۵-۲۴): عملکرد تقسیم توان راکتیو توسط واحدهای DG با اصلاح روش ایتی متداول توسط روش امیدانس مجازی قابل تنظیم مثبت با در نظر گرفتن تغییر بار ریزشبه. ۹۸.....
- شکل (۵-۲۵): سیگنال کنترلی K_{vir} بیانگر مقاومت و راکتانس مجازی با در نظر گرفتن تغییر بار ریزشبه. ۱۰۳.....

- شکل (۵-۲۶): عملکرد تقسیم توان حقیقی توسط واحدهای DG با اصلاح روش ایتی متداول توسط روش امپدانس مجازی قابل تنظیم مثبت با در نظر گرفتن خط تغذیه با نسبت R/X پایین..... ۱۰۴
- شکل (۵-۲۷): عملکرد تقسیم توان راکتیو توسط واحدهای DG با اصلاح روش ایتی متداول توسط روش امپدانس مجازی قابل تنظیم مثبت با در نظر گرفتن خط تغذیه با نسبت R/X پایین..... ۱۰۵
- شکل (۵-۲۸): خطای تقسیم توان راکتیو با اصلاح روش ایتی متداول توسط روش امپدانس مجازی قابل تنظیم مثبت با در نظر گرفتن خط تغذیه با نسبت R/X پایین..... ۱۰۵
- شکل (۵-۲۹): عملکرد تقسیم توان حقیقی توسط واحدهای DG با اصلاح روش ایتی متداول توسط روش امپدانس مجازی قابل تنظیم مثبت با در نظر گرفتن خط تغذیه با نسبت $\frac{R}{X} \approx 1$ ۱۰۶
- شکل (۵-۳۰): عملکرد تقسیم توان راکتیو توسط واحدهای DG با اصلاح روش ایتی متداول توسط روش امپدانس مجازی قابل تنظیم مثبت با در نظر گرفتن خط تغذیه با نسبت $\frac{R}{X} \approx 1$ ۱۰۶
- شکل (۵-۳۱): خطای تقسیم توان راکتیو با اصلاح روش ایتی متداول توسط روش امپدانس مجازی قابل تنظیم مثبت با در نظر گرفتن خط تغذیه با نسبت $\frac{R}{X} \approx 1$ ۱۰۷
- شکل (۵-۳۲): عملکرد تقسیم توان حقیقی توسط واحدهای DG با اصلاح روش ایتی متداول توسط روش امپدانس مجازی قابل تنظیم مثبت با در نظر گرفتن خط تغذیه با نسبت R/X بالا..... ۱۰۸
- شکل (۵-۳۳): عملکرد تقسیم توان راکتیو توسط واحدهای DG با اصلاح روش ایتی متداول توسط روش امپدانس مجازی قابل تنظیم مثبت با در نظر گرفتن خط تغذیه با نسبت R/X بالا..... ۱۰۸
- شکل (۵-۳۴): خطای تقسیم توان راکتیو با اصلاح روش ایتی متداول توسط روش امپدانس مجازی قابل تنظیم مثبت با در نظر گرفتن خط تغذیه با نسبت R/X بالا..... ۱۰۹
- شکل (۵-۳۵): عملکرد تقسیم توان حقیقی توسط واحدهای DG با اصلاح روش ایتی متداول توسط روش امپدانس مجازی قابل تنظیم مثبت با در نظر گرفتن بار توان ثابت..... ۱۱۱
- شکل (۵-۳۶): عملکرد تقسیم توان راکتیو توسط واحدهای DG با اصلاح روش ایتی متداول توسط روش امپدانس مجازی قابل تنظیم مثبت با در نظر گرفتن بار توان ثابت..... ۱۱۱
- شکل (۵-۳۷): سیگنال کنترلی K_{vir} بیانگر مقاومت و راکتانس مجازی با در نظر گرفتن بار توان ثابت..... ۱۱۱
- شکل (۵-۳۸): خطای تقسیم توان راکتیو با اصلاح روش ایتی متداول توسط روش امپدانس مجازی قابل تنظیم مثبت با در نظر گرفتن بار توان ثابت..... ۱۱۲
- شکل (۵-۳۹): عملکرد تقسیم توان حقیقی توسط واحدهای DG با اصلاح روش ایتی متداول توسط روش امپدانس مجازی قابل تنظیم مثبت با در نظر گرفتن بار جریان ثابت..... ۱۱۳
- شکل (۵-۴۰): عملکرد تقسیم توان راکتیو توسط واحدهای DG با اصلاح روش ایتی متداول توسط روش امپدانس مجازی قابل تنظیم مثبت با در نظر گرفتن بار جریان ثابت..... ۱۱۳

- شکل (۵-۴۱): سیگنال کنترلی K_{vir} بیانگر مقاومت و راکتانس مجازی با در نظر گرفتن بار جریان ثابت.....۱۱۳
- شکل (۵-۴۲): خطای تقسیم توان راکتیو با اصلاح روش افی متداول توسط روش امپدانس مجازی قابل تنظیم مثبت با در نظر گرفتن بار جریان ثابت.....۱۱۴
- شکل (۵-۴۳): عملکرد تقسیم توان حقیقی توسط واحدهای DG با اصلاح روش افی متداول توسط روش امپدانس مجازی قابل تنظیم مثبت با در نظر گرفتن بار امپدانس ثابت.....۱۱۵
- شکل (۵-۴۴): عملکرد تقسیم توان راکتیو توسط واحدهای DG با اصلاح روش افی متداول توسط روش امپدانس مجازی قابل تنظیم مثبت با در نظر گرفتن بار امپدانس ثابت.....۱۱۵
- شکل (۵-۴۵): سیگنال کنترلی K_{vir} بیانگر مقاومت و راکتانس مجازی با در نظر گرفتن بار امپدانس ثابت.....۱۱۵
- شکل (۵-۴۶): خطای تقسیم توان راکتیو با اصلاح روش افی متداول توسط روش امپدانس مجازی قابل تنظیم مثبت با در نظر گرفتن بار امپدانس ثابت.....۱۱۶
- شکل (۵-۴۷): عملکرد تقسیم توان حقیقی توسط واحدهای DG با اصلاح روش افی متداول توسط روش امپدانس مجازی قابل تنظیم منفی.....۱۱۷
- شکل (۵-۴۸): عملکرد تقسیم توان راکتیو توسط واحدهای DG با اصلاح روش افی متداول توسط روش امپدانس مجازی قابل تنظیم منفی.....۱۱۸
- شکل (۵-۴۹): سیگنال کنترلی K_{vir} بیانگر مقاومت و راکتانس مجازی منفی.....۱۱۸
- شکل (۵-۵۰): خطای تقسیم توان راکتیو با اصلاح روش افی متداول توسط روش امپدانس مجازی قابل تنظیم منفی.....۱۱۹
- شکل (۵-۵۱): عملکرد تقسیم توان حقیقی توسط واحدهای DG با اصلاح روش افی متداول توسط روش امپدانس مجازی قابل تنظیم منفی با در نظر گرفتن تغییر در امپدانس خط تغذیه DG1.....۱۱۹
- شکل (۵-۵۲): عملکرد تقسیم توان راکتیو توسط واحدهای DG با اصلاح روش افی متداول توسط روش امپدانس مجازی قابل تنظیم منفی با در نظر گرفتن تغییر در امپدانس خط تغذیه DG1.....۱۲۰
- شکل (۵-۵۳): خطای تقسیم توان راکتیو با اصلاح روش افی متداول توسط روش امپدانس مجازی قابل تنظیم منفی با در نظر گرفتن تغییر در امپدانس خط تغذیه DG1.....۱۲۰
- شکل (۵-۵۴): سیگنال کنترلی K_{vir} بیانگر مقاومت و راکتانس مجازی منفی با در نظر گرفتن تغییر در امپدانس خط تغذیه DG1.....۱۲۱
- شکل (۵-۵۵): عملکرد تقسیم توان حقیقی توسط واحدهای DG با اصلاح روش افی متداول توسط روش امپدانس مجازی قابل تنظیم منفی با در نظر گرفتن تغییر در بار ریزشکه.....۱۲۱
- شکل (۵-۵۶): عملکرد تقسیم توان راکتیو توسط واحدهای DG با اصلاح روش افی متداول توسط روش امپدانس مجازی قابل تنظیم منفی با در نظر گرفتن تغییر در بار ریزشکه.....۱۲۲

- شکل (۵-۵۷): خطای تقسیم توان راکتیو با اصلاح روش افتی متداول توسط روش امپدانس مجازی قابل تنظیم منفی با در نظر گرفتن تغییر در بار ریزشبهه. ۱۲۲
- شکل (۵-۵۸): عملکرد تقسیم توان حقیقی توسط واحدهای DG با اصلاح روش افتی متداول توسط دو روش امپدانس مجازی قابل تنظیم مثبت و منفی. ۱۲۳
- شکل (۵-۵۹): عملکرد تقسیم توان راکتیو توسط واحدهای DG با اصلاح روش افتی متداول توسط دو روش امپدانس مجازی قابل تنظیم مثبت و منفی. ۱۲۳
- شکل (۵-۶۰): خطای تقسیم توان راکتیو با اصلاح روش افتی متداول توسط دو روش امپدانس مجازی قابل تنظیم مثبت و منفی. ۱۲۴
- شکل (۵-۶۱): عملکرد تقسیم توان راکتیو توسط واحدهای DG با استفاده از روش امپدانس مجازی. ۱۲۶
- شکل (۵-۶۲): الف: عملکرد تقسیم جریان توسط واحدهای DG قبل از فعال شدن روش امپدانس مجازی، ب: بعد از فعال شدن روش امپدانس مجازی. ۱۲۷
- شکل (۵-۶۳): عملکرد جریان چرخشی در بین واحدهای DG با استفاده از روش امپدانس مجازی. ۱۲۷

فهرست جداول

جدول (۱-۲): مقایسه روش‌های کنترل اینورترها [۹].....	۲۰
جدول (۱-۳): مشخصات خط نمونه [۹].....	۲۸
جدول (۲-۳): معادلات افقی و معادلات پخش توان [۳۲].....	۳۱
جدول (۳-۳): انواع بار و مقادیر نماها [۲۰].....	۳۵
جدول (۴-۳): مقایسه کاربرد روش‌های افقی متداول و مخالف در ریزشبه‌های ولتاژ پایین [۹].....	۴۳
جدول (۵-۳): تقسیم جریان و جریان چرخشی [۴۰].....	۴۴
جدول (۱-۵): مشخصات ریزشبه مورد آزمایش.....	۸۶
جدول (۲-۵): مشخصات خط تغذیه نمونه با نسبت R/X پایین.....	۱۰۴
جدول (۳-۵): مشخصات خط تغذیه نمونه با نسبت $\frac{R}{X} \approx 1$	۱۰۶
جدول (۴-۵): مشخصات خط تغذیه نمونه با نسبت R/X بالا.....	۱۰۷
جدول (۵-۵): مشخصات سیستم برای محاسبه جریان چرخشی.....	۱۲۴

فصل اول

مقدمه

۱-۱- تعریف موضوع

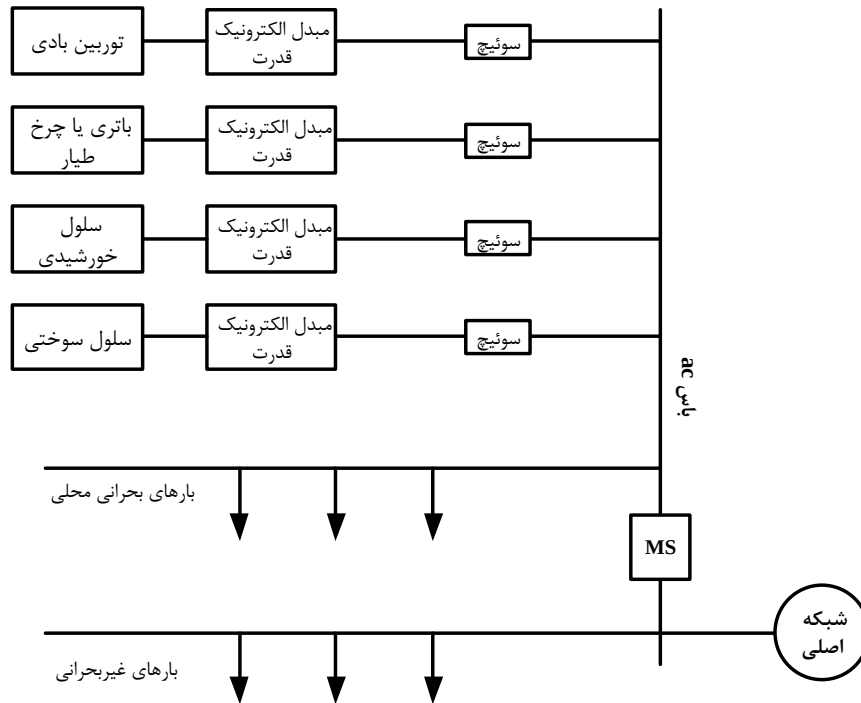
هم‌زمان با پیشرفت صنعت انرژی و افزایش تقاضا برای انرژی پاک، قابل اعتماد و با کیفیت توان بالا توسط مصرف کننده‌های شبکه توزیع برق، استفاده از تولیدات پراکنده^۱ به‌منظور تغذیه بارها رشد چشم گیری یافته است. منابع تولید پراکنده^۲ می‌توانند در قالب یک ریزشبکه^۳ جمع شوند و به‌طور محلی به تغذیه بارها بپردازند. همچنین ریزشبکه‌ها قادر هستند به دو حالت عملکردی متصل به شبکه اصلی برق^۴ و یا منفک^۵ از آن عمل کنند و در زمان خاموشی شبکه برق و یا ملاحظات دیگر به‌صورت جزیره‌ای^۶ بارهای محلی و بحرانی را به‌طور پیوسته تغذیه کنند [۱، ۲].

ریزشبکه را می‌توان به‌صورت یک مجموعه‌ای از منابع تولید پراکنده مختلف و ذخیره‌سازهای انرژی و بارها تعریف کرد، که در شکل (۱-۱) ساختار یک ریزشبکه نشان داده شده است. در این ساختار انرژی‌های تجدید پذیر از جمله انرژی بادی، انرژی خورشیدی و غیره به‌دلیل تولید انرژی پاک و ارزان بسیار موردتوجه هستند [۳، ۴]، و همچنین مبدل‌های الکترونیک قدرت^۷ با در نظر گرفتن نوع منبع انرژی پراکنده به‌منظور تبدیل مناسب توان از اجزاء مهم و اصلی ریزشبکه‌ها به‌شمار می‌آیند [۴].

یکی از مسائل مهم و چالش‌برانگیز که در کنترل ریزشبکه‌های جزیره‌ای مطرح است، کنترل تقسیم توان^۸ در بین منابع تولید پراکنده متعدد است، به این صورت که هر واحد باید متناسب با مقدار نامی^۹ توان خود به تغذیه بار بپردازند [۵]. روش‌های مختلفی جهت کنترل تقسیم توان در

-
- 1- Distributed Generation (DG)
 - 2- Distributed Energy Resources (DERs)
 - 3- Microgrid
 - 4- Grid Connected Mode
 - 5- Autonomous Mode
 - 6- Islanded Mode
 - 7- Power Electronic Converters
 - 8- Power Sharing
 - 9- Rating Value

ریزشبکه‌های جزیره‌ای پیشنهاد شده است، که یکی از معروف‌ترین و پرکاربردترین آن‌ها روش کنترل مشخصه افتی^{۱۰} است [۶].



شکل (۱-۱): ساختار ریزشبکه نمونه [۳].

به‌طور کلی کنترل ریزشبکه به دو صورت مرکزی^{۱۱} و محلی^{۱۲} صورت می‌گیرد. با توجه به اینکه کنترل مرکزی ریزشبکه به‌صورت متمرکز^{۱۳} انجام می‌شود، جهت انجام فرایندهای کنترلی نیاز به ارتباطات قوی دارد. از این رو کنترل مرکزی در مقایسه با کنترل محلی که نیازی به ارتباطات نداشته و به‌طور محلی و غیرمتمرکز^{۱۴} و با استفاده از اندازه‌گیری‌های محلی وظایف کنترلی خود را انجام می‌دهد، کمتر مورد توجه است [۷-۹].

روش کنترل افتی یک روش کنترل غیرمتمرکز است [۱۰، ۱۱] که با استفاده از سیگنال‌های کنترلی محلی نظیر فرکانس و ولتاژ به کنترل تقسیم توان در ریزشبکه می‌پردازد [۷، ۹]. در روش‌های

10- Droop Characteristic Control
11- Central
12- Local
13- Centralized Control
14- Decentralized Control

افتی توان حقیقی، توان راکتیو، فرکانس و دامنه ولتاژ منابع تولید پراکنده از جمله متغیرهای کنترلی هستند که به منظور کنترل تقسیم توان مورد استفاده قرار می گیرند. در ریزشبکه های با خطوط تغذیه^{۱۵} دارای مقدار بزرگ نسبت راکتانس به مقاومت (X/R) به دلیل ارتباط بین توان حقیقی و فرکانس و همچنین ارتباط بین توان راکتیو و دامنه ولتاژ، از روش کنترل افتی متداول^{۱۶} استفاده می شود. اما در ریزشبکه های ولتاژ پایین^{۱۷} با توجه به مقدار کم نسبت راکتانس به مقاومت خطوط تغذیه، در میان اینورترها اتصال مقاومتی وجود دارد و از این رو توان حقیقی به ولتاژ و توان راکتیو به فرکانس وابسته است [۹، ۱۲-۱۴]، بنابراین در این نوع ریزشبکه ها به جای روش افتی متداول از روش افتی مخالف^{۱۸} استفاده می شود. با این وجود در صورت استفاده از روش های افتی، تقسیم توان در ریزشبکه های جزیره ای تحت تأثیر امپدانس خطوط تغذیه منابع تولید پراکنده است و به دلیل عدم تطبیق امپدانس خطوط تغذیه، تقسیم توان به صورت نادرست انجام می شود [۵، ۱۰، ۱۴-۱۶].

در ریزشبکه های جزیره ای دارای منابع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر، عدم تطبیق امپدانس خطوط تغذیه منابع تولید پراکنده منجر به تفاوت ولتاژ پایانه های اینورترها می شود که می تواند باعث جاری شدن جریان های چرخشی در بین اینورترها شود و منابع تولید پراکنده دچار اضافه جریان شوند [۱۱، ۱۲]. این مسئله نیز به عنوان یکی از چالش های موجود در مطالعات و کنترل ریزشبکه های جزیره ای مطرح است که برای رفع آن راه حل های مختلفی ارائه شده است. در این پایان نامه نیز به دلیل اهمیت، مسئله جریان چرخشی^{۱۹} بررسی شده است. مسئله دیگری که در ریزشبکه های ولتاژ پایین با خطوط تغذیه مختلط و مقاومتی مطرح است وابستگی کنترل توان حقیقی و راکتیو است [۹]. بنابراین توان حقیقی و راکتیو نمی توانند به صورت مستقل با فرکانس و یا ولتاژ کنترل شوند از این رو باید با اصلاح روش کنترلی کنترل صحیح تقسیم توان حقیقی و راکتیو را محقق ساخت [۱۷، ۱۸].

15- Feeders

16- Conventional Droop

17- Low-Voltage (LV)

18- Opposite Droop

19- Circulating Current

از جمله مسائل مهم دیگر در شبکه‌های توزیع برق به‌خصوص سطوح ولتاژ پایین شناسایی مدل بارهای موجود است. بار به عنوان یک عنصر ناشناخته و پیچیده در شبکه برق مطرح است، بنابراین طراحی کنترل‌کننده‌های مناسب جهت پاسخ مناسب به آن‌ها امری مهم تلقی می‌شود [۱۹، ۲۰]. در این پژوهش نیز به مدل بار پرداخته شده است.

۲-۱- راه‌حل‌های موجود

به منظور حل چالش‌های موجود در ریزشبکه‌ها از جمله وابستگی توان حقیقی و راکتیو در ریزشبکه‌های ولتاژ پایین، تقسیم توان توسط منابع تولید پراکنده موجود در ریزشبکه و همچنین جریان چرخشی در بین منابع تولید پراکنده، روش‌های مختلفی نظیر روش توان مجازی^{۲۰}، روش ولتاژ و فرکانس مجازی^{۲۱} و روش امپدانس مجازی^{۲۲} پیشنهاد شده است [۳]. لازم به ذکر است که با توجه به هدف این پایان‌نامه، از روش امپدانس مجازی جهت بهبود تقسیم توان استفاده شده است که در فصل چهارم به صورت کامل به این موضوع پرداخته شده است.

۳-۱- اهداف و روند اجرای پایان‌نامه

هدف از این پژوهش بررسی اثر امپدانس مجازی بر بهبود تقسیم توان در ریزشبکه‌های جزیره‌ای است که در آن‌ها منابع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر با استفاده از روش افتی کنترل می‌شوند. این پژوهش قصد دارد با بررسی ریزشبکه‌هایی که دارای خطوط تغذیه با مقادیر مختلفی از نسبت مقاومت به راکتانس هستند و با استفاده از مفهوم امپدانس مجازی، عدم تطبیق امپدانس خطوط تغذیه منابع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر را در یک ریزشبکه جزیره‌ای برطرف و سپس تقسیم صحیح توان را محقق سازد. به‌طور خلاصه روند انجام پژوهش در شکل (۲-۱) بیان شده است.

20- Virtual Power Frame

21- Virtual Voltage-Frequency Frame

22- Virtual Impedance



شکل (۱-۲): روند انجام پایان نامه

۱-۴- مروری بر فصل‌های پایان‌نامه

فصل دوم این پایان‌نامه به معرفی ساختار و اجزاء ریزشبکه و مروری بر مفاهیم مهم آن پرداخته است. همچنین انواع روش‌های کنترلی برای کنترل ریزشبکه و اهمیت آن‌ها نیز در این فصل مورد بحث قرار گرفته است.

با توجه به اینکه هدف از این پژوهش محقق ساختن تقسیم صحیح توان در ریزشبکه‌های جزیره‌ای مبتنی بر اینورتر کنترل‌شده با روش‌های افی است، در فصل سوم به تئوری تقسیم توان حقیقی و راکتیو و همچنین مشخصه‌های افی با در نظر گرفتن نسبت مقاومت به راکتانس امپدانس خط تغذیه پرداخته شده است.

در فصل چهارم این پژوهش به بررسی مفهوم روش امپدانس مجازی، نحوه عملکرد، مدلسازی و پیاده‌سازی آن در سیستم کنترلی و اثر آن بر بهبود تقسیم توان پرداخته شده است. در این فصل همچنین به بررسی و کنترل امپدانس مجازی و عوامل مؤثر بر تعیین مقدار امپدانس مجازی پرداخته شده است.

در فصل پنجم ابتدا یک ریزشبکه جزیره‌ای مدلسازی شده و هدف از شبیه‌سازی بیان می‌شود. سپس به منظور ارزیابی تئوری‌های ارائه‌شده و همچنین ارزیابی عملکرد روش مبتنی بر امپدانس مجازی ارائه‌شده در فصل چهارم، یک ریزشبکه جزیره‌ای شامل دو منبع تولید پراکنده مبتنی بر اینورترهای با عملکرد موازی در نرم‌افزار PSCAD/EMTDC شبیه‌سازی شده است.

در نهایت در فصل ششم نتیجه‌گیری حاصل از تحقیقات انجام گرفته در این پایان‌نامه بیان می‌گردد. همچنین پیشنهاداتی جهت انجام کارهای بعدی در این فصل ارائه می‌شود.

فصل دوم

مفاهیم اصلی در ریز شبکه‌ها

در سال‌های اخیر با افزایش تقاضا برای توان الکتریکی با قابلیت اعتماد بالا و همچنین با کیفیت بالا، مفهوم و ایده استفاده از منابع تولید پراکنده مبتنی بر مبدل‌های الکترونیک قدرت در قالب ریزشبکه توجه ویژه‌ای را در صنعت انرژی به خود جلب کرده است. این منابع قادر هستند با تولید توان نسبتاً کوچک علاوه بر تأمین بار محلی، در صورت تولید مازاد بر تقاضای محلی، به شبکه اصلی^۱ نیز توان تزریق کنند [۲۱]، که به منظور میسر شدن این عمل به روش‌های کنترلی خاصی برای کنترل منابع نیاز است. در این فصل به بیان مفهوم ریزشبکه و همچنین مسائل و چالش‌های پیش روی کنترل منابع تولید پراکنده پرداخته شده است.

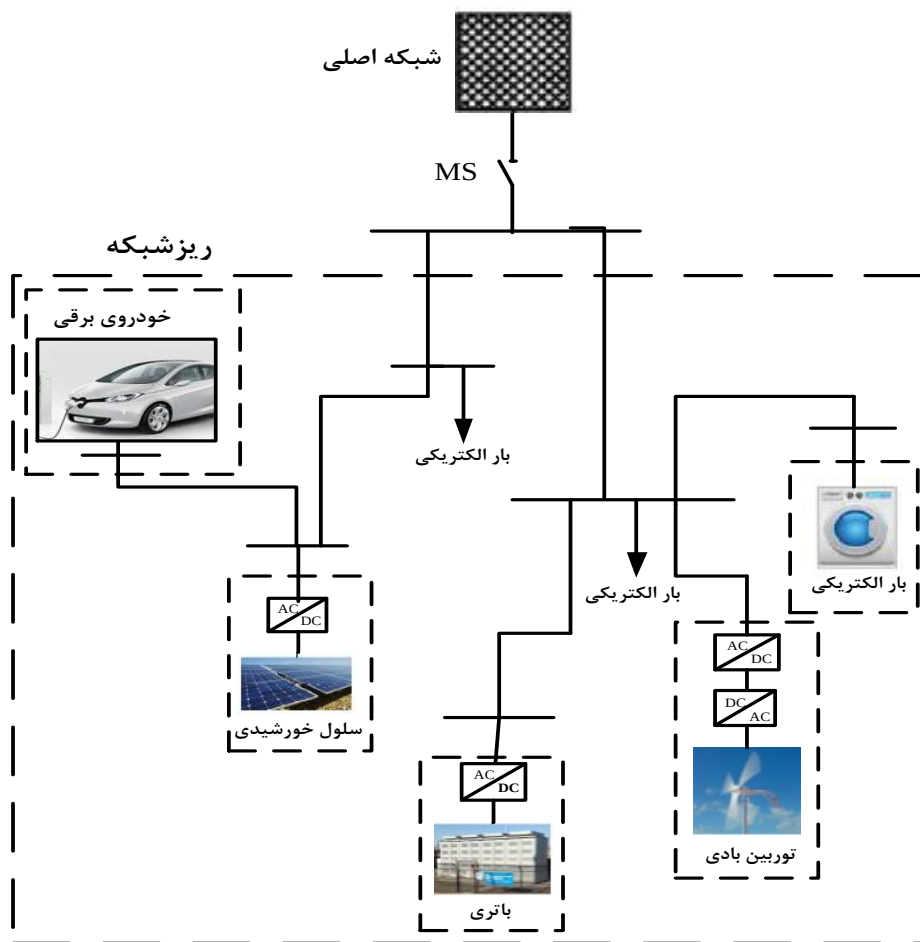
۲-۲- مفهوم ریزشبکه

ریزشبکه یک سیستم توان مقیاس کوچک است که می‌تواند شامل مجموعه‌ای از منابع تولید پراکنده، ذخیره‌سازهای انرژی و بارها باشد. ریزشبکه به‌عنوان یک راه‌حل مناسب و مطمئن به منظور جمع‌آوری اجزاء ریزشبکه تلقی شده است و به منظور تأمین بار در مراکزی مانند بیمارستان‌ها، دانشگاه‌ها، ساختمان‌های مسکونی و تجاری و غیره و در نزدیکی مصرف‌کننده‌ها نصب می‌شوند. آن‌ها معمولاً در سطوح ولتاژ پایین با ظرفیت توان زیر مگاوات طراحی می‌شوند [۱، ۲۲].

در تعریف ریزشبکه بر تغذیه محلی بارهای نزدیک تأکید شده است، لذا مدل‌های جمع‌آوری شده‌ای که مکان فیزیکی منابع تولید پراکنده و بارها را نادیده می‌گیرند ریزشبکه نیستند [۱]. شکل (۱-۲) ساختار ریزشبکه‌ای متشکل از منابع تولید پراکنده، ذخیره‌سازها و بارهای گوناگون را نشان می‌دهد.

۳-۲- تاریخچه مفهوم ریزشبکه

مفهوم ریزشبکه به سال ۱۸۸۲ میلادی برمی گردد که توماس ادیسون اولین نیروگاه توان خود را در ایالات متحده تأسیس کرد. با توجه به اینکه آن زمان سیستم توان متمرکز وجود نداشت آن نیروگاه به عنوان یک ریزشبکه تلقی می شد. در سال ۱۸۸۶، شرکتی در ایالات متحده ریزشبکه های DC ایزوله شده ای را به منظور تغذیه توان مناطقی خاص تأسیس کرد. اما این ساختار در سال ۱۸۹۶ با اولین سیستم متمرکز به هم پیوسته جایگزین شد [۲۳].



شکل (۱-۲): ساختار ریزشبکه نمونه [۲۱].

همزمان با کاهش سوخت های فسیلی و افزایش تقاضا برای برق باکیفیت و پیوسته، نیاز به سیستم توان دو جهته و قابل پشتیبانی توجه ویژه ای را به خود جلب می کرد، تا اینکه در سال ۱۹۶۵

شمال شرق دچار خاموشی کامل برق شد و در پی آن صنعت انرژی و دولت‌ها موظف شدند سرمایه‌های خود را در راستای تحقیقات در زمینه توسعه ایده ریزشبه‌های اصلاح‌شده‌ای که قادر به عملکرد جزیره‌ای در زمان خاموشی شبکه اصلی بودند بکار گیرند که در این صورت می‌توانستند بدون قطعی به تأمین برق بپردازند [۲۳].

۲-۴- ساختار و اجزاء ریزشبه

در حالت کلی ریزشبه‌ها قادر هستند در دو حالت متصل و یا مستقل از شبکه اصلی عملکرد داشته باشند. حالت عملکردی مستقل از شبکه اصلی عملکرد جزیره‌ای نامیده می‌شود، که این حالت عملکردی بنا بر ضرورت و با توجه به مسائل فیزیکی، اقتصادی و یا بروز خطا ممکن است رخ دهد [۲].

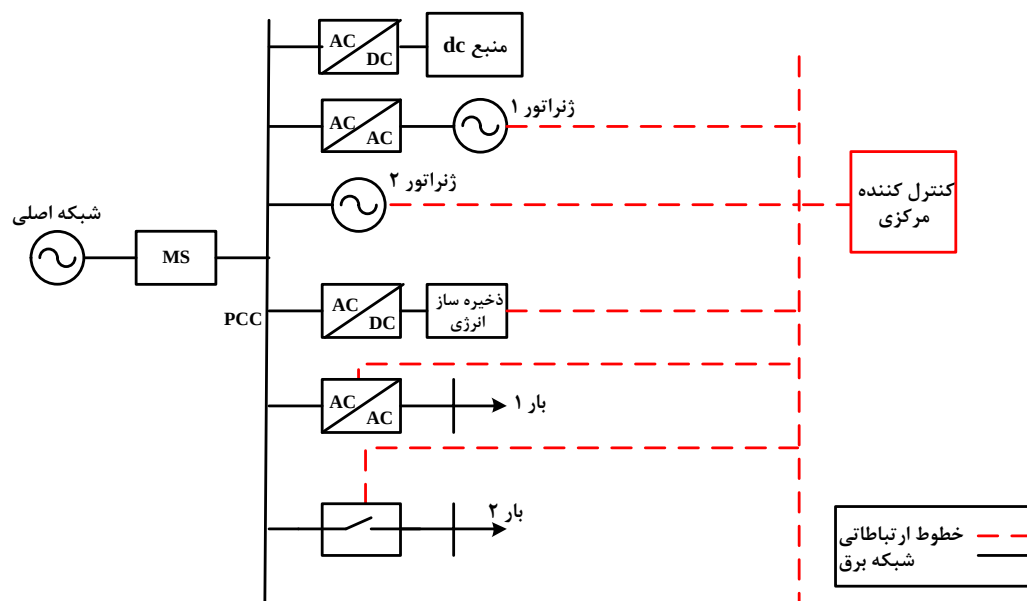
ریزشبه توسط یک نقطه اتصال مشترک^۲ به شبکه اصلی مشخص می‌شود و می‌تواند توسط بریکرهای الکترومکانیکی مدار، سوئیچ‌های حالت جامد یا حتی مبدل‌های پشت‌به‌پشت^۳ از شبکه اصلی مجزا شود [۳]. در ریزشبه نشان داده شده در شکل (۲-۱)، ریزشبه می‌تواند توسط کلید^۴ MS به شبکه اصلی متصل و یا از آن مستقل شود. با بسته بودن کلید MS، ریزشبه در حالت عملکردی متصل به شبکه اصلی است و با آن انرژی مبادله می‌کند. در حالت متصل به شبکه، شبکه اصلی مسئول برقراری تقسیم و تعادل توان تولید شده توسط منابع تولید پراکنده است و کمبود توان در ریزشبه را جبران می‌کند [۳، ۲۱]. درحالی‌که با باز شدن کلید MS، ریزشبه به صورت مستقل از شبکه اصلی خواهد شد. در این حالت، واحدهای تولید پراکنده خود موظف به کنترل تقسیم توان در ریزشبه هستند. لازم به ذکر است که در برخی موارد ریزشبه تنها دارای عملکرد جزیره‌ای است، به طور مثال در نواحی دوردست و دور از شبکه برق اصلی [۲۱].

2- Point of Common Coupling (PCC)

3- Back-to-Back Converter

4- Main Switch (MS)

اجزاء اصلی ریزشبه شامل منابع تولید پراکنده از قبیل: آرایه‌های فتوولتائیک^۵، توربین‌های بادی^۶ کوچک، سلول‌های سوختی^۷ و غیره، بارها و ابزارهای ذخیره‌ساز انرژی از قبیل: چرخ طیارها^۸، ابرخازن‌ها^۹، باتری‌ها^{۱۰} و غیره هستند [۲۱، ۲۴]. به طور کلی ساختار و اجزاء یک ریزشبه در شکل (۲-۲) نشان داده شده است.



شکل (۲-۲): ساختار گسترده ریزشبه [۳].

با توجه به ساختار ریزشبه نشان داده شده در شکل (۲-۲)، کاربرد مبدل‌های الکترونیک قدرت در ریزشبه‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است، به طور مثال منابع تولید پراکنده DC و ذخیره‌سازهای انرژی از طریق مبدل‌های الکترونیک قدرت AC/DC و ژنراتورهای سرعت متغیر توسط مبدل‌های الکترونیک قدرت AC/AC به ریزشبه متصل می‌شوند، این در حالی است که برخی از ژنراتورهای سنتی به‌طور مستقیم به ریزشبه متصل می‌شوند [۳].

-
- 5- Photovoltaic (PV)
 - 6- Wind Turbine (WT)
 - 7- Fuel Cells (FC)
 - 8- Flywheels
 - 9- Supercapacitors
 - 10- Batteries

به‌طور کلی منابع انرژی که در ریزشک‌ها وجود دارند به شرح زیر هستند:

(۱) منابع تولید پراکنده که بر اساس ژنراتورهایشان به‌صورت زیر تقسیم‌بندی می‌شوند:

– منابع تولید پراکنده شامل ماشین‌های دوار سنتی با اتصال مستقیم

– منابع تولید پراکنده مبتنی بر موتورهای القایی

– منابع تولید پراکنده مبتنی بر ژنراتورهای سنکرون

– منابع تولید پراکنده مبتنی بر مبدل‌های الکترونیک قدرت [۲۴، ۲۱].

(۲) منابع انرژی تجدید پذیر برای تولید توان [۲۴].

علاوه بر کاهش سوخت‌های فسیلی و افزایش هزینه‌های ناشی از استفاده آن‌ها، آلودگی‌های زیست‌محیطی نیز ایده استفاده هر چه بیشتر منابع انرژی تجدید پذیر در شبکه قدرت را افزایش داده است. توانایی جزیره شدن ریزشک‌ها، مبنایی برای استفاده از منابع انرژی تجدید پذیر به‌عنوان منابع تولید پراکنده است [۲۳].

(۳) ذخیره‌سازهای انرژی [۲۴، ۲۱].

ذخیره‌سازهای انرژی در حالت عملکردی جزیره‌ای جهت جبران کمبود توان، در زمانی که منابع تولید پراکنده قادر به تغذیه بار به‌طور کامل نیستند، بکار گرفته می‌شوند [۲۱]. ریزشک‌ها و تولید پراکنده شامل منابع انرژی تجدید پذیر و ذخیره‌سازهای انرژی می‌توانند به برطرف کردن محدودیت‌های ظرفیت سیستم قدرت، بهبود راندمان و کاهش خروج گازهای گلخانه‌ای کمک کنند [۴].

۲-۵- عملکرد جزیره‌ای ریزشک

جزیره یعنی قطع شدن ریزشک از شبکه اصلی، که ممکن است به‌صورت عمدی^{۱۱} و برنامه‌ریزی‌شده^{۱۲} به منظور تعمیرات و یا حتی افزایش کیفیت توان انجام شود، و یا به صورت

غیر عمدی^{۱۳} در مواقع بروز خطا یا حوادث ناشناخته دیگر برای ریز شبکه رخ دهد. از این رو ریز شبکه جزیره شده قادر است به صورت دائم با عملکردی مستقل از شبکه اصلی به تغذیه بارهای محلی و بحرانی بپردازد [۲، ۳].

ریز شبکه به عنوان بخشی از شبکه اصلی است، اما در حالت جزیره ای رفتاری بسیار متفاوت از خود نشان می دهد [۲۵] که نیاز به سیستم های کنترلی انعطاف پذیری برای کنترل آن است. رفتار و مشخصه یک ریز شبکه تا اندازه زیادی وابسته به اجزاء آن و به خصوص منابع تولید پراکنده محاط شده در آن است. از این رو شناخت رفتار ریز شبکه جهت طراحی و پیاده سازی کنترل کننده ها به منظور تحقق عملکرد مناسب آن بسیار مهم است [۲۳]. برخی از ویژگی های ریز شبکه جزیره ای را می توان به صورت زیر عنوان کرد:

- منابع تولید پراکنده در ریز شبکه جزیره ای به عنوان منبع ولتاژ هستند.
- جهت برخورداری از مشخصه وصل و اجرا^{۱۴} نیازمند طراحی کنترل کننده های انعطاف پذیر است.
- در حالت جزیره ای واحدهای تولید پراکنده منحصراً مسئول تأمین فرکانس مورد نیاز برای عملکرد خود هستند. در حالی که در حالت متصل به شبکه اصلی، فرکانس ریز شبکه توسط ژنراتور سنکرون شبکه تعیین می شود. بنابراین کنترل فرکانس در ریز شبکه جزیره ای یک مسئله چالش برانگیز است.
- تقسیم توان بار در ریز شبکه جزیره ای توسط یک واحد تولید پراکنده به تنهایی امکان پذیر نیست، بنابراین باید به واسطه روش های کنترلی مناسب تقسیم توان توسط منابع تولید پراکنده متعدد صورت گیرد. این در حالی است که در ریز شبکه متصل به شبکه اصلی تعادل توان توسط شبکه اصلی انجام می پذیرد.

12- Scheduled

13- Unintentional

14- Plug and Play

- تقسیم توان در ریزشبکه جزیره‌ای نیاز به خطوط ارتباطی دارد، که این امر منجر به ایجاد محدودیت در جاییابی منابع تولید پراکنده می‌شود.
- وجود اختلاف در امپدانس خطوط تغذیه منابع تولید پراکنده باعث تقسیم نادرست توان توسط منابع تولید پراکنده متعدد می‌شود.
- به دلیل حضور ذخیره‌سازهای انرژی، بارهای غیرخطی، منبع انرژی متناوب و همچنین عدم حضور ژنراتور پایدار با اینرسی بالا، حفاظت و پایداری ریزشبکه جزیره‌ای با چالش‌های متعددی روبه‌رو است.
- منابع تولید پراکنده مختلف دارای مشخصه‌های رفتاری و عملکردی متفاوت هستند که ادغام آن‌ها در یک ریزشبکه جزیره‌ای منجر به بروز مشکلات می‌شود [۲۳].

لازم به ذکر است که فناوری اطلاعات و ارتباطات^{۱۵} یک بخش مهم و بحرانی در شبکه‌های توان شامل ریزشبکه‌ها در آینده است. بدون تردید، کنترل و عملکرد شبکه‌های توان آینده نیاز به حمایت توسط سیستم‌های اطلاعات و شبکه‌های ارتباط پیشرفته دارد [۲۶]. اگرچه روش‌های مبتنی بر ارتباطات می‌توانند عملکرد سیستم را بهبود دهند اما به دلیل اینکه خطوط ارتباطی به‌ویژه برای فواصل طولانی و اهداف کنترلی مختلف، گران و آسیب‌پذیرند و قابلیت اعتماد سیستم را کاهش می‌دهند، باید تا حد ممکن از ارتباطات خودداری شود. که این امر می‌تواند توسط کنترل‌کننده‌های محلی منابع تولید پراکنده محقق شود [۱۴، ۲۶].

عملکرد و کنترل ریزشبکه به‌خصوص زمانی که در حالت عملکردی جزیره‌ای است از مسائل بحرانی در مطالعات ریزشبکه‌ها است [۲۱]. به همین منظور در قسمت بعد به مفاهیم کنترل ریزشبکه پرداخته شده است.

۲-۶- کنترل ریزش شبکه

به طور کلی کنترل ریزش شبکه به دو صورت سراسری^{۱۶} (نظارتی^{۱۷}) و محلی امکان پذیر است [۲۱].
که در ادامه به نقش هر یک پرداخته شده است.

۲-۶-۱- روش کنترل سراسری

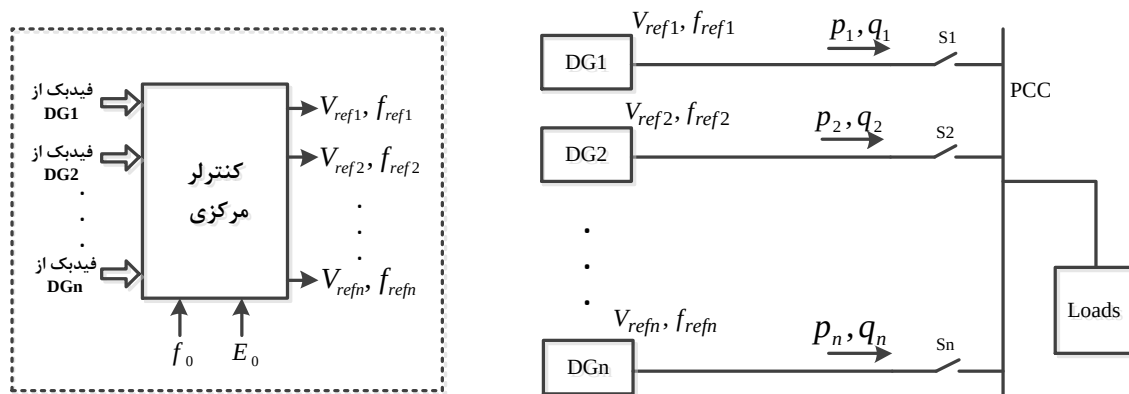
کنترل منابع تولید پراکنده در ریزش شبکه جزیره‌ای به منظور کنترل دامنه ولتاژ و فرکانس انجام می‌شود که این فرایند کنترل باید به طور سریع و مطمئن توسط کنترل کننده محلی هر یک از منابع صورت گیرد. کنترل سراسری قادر است به منظور تأمین امنیت بارها یا وصل مجدد ایمن ریزش شبکه به شبکه اصلی، فرمان‌هایی برای کنترل دامنه و فرکانس ولتاژهای حالت دائم منابع صادر کند. در حالت عملکرد جزیره‌ای منابع تولید پراکنده مسئول تقسیم توان صحیح هستند، اگرچه این امر می‌تواند توسط کنترل کننده‌های محلی منابع انجام شود اما کنترل کننده سراسری می‌تواند میزان سهم حالت دائم هر یک از منابع را در تغذیه توان بار مشخص کند. همچنین قادر است با توجه به بارهای بحرانی و ملاحظات دیگر، بارها را در حالت جزیره‌ای حذف کند. کنترل سراسری به صورت مرکزی توسط کنترل کننده مرکزی ریزش شبکه اعمال می‌شود [۲۱].

۲-۶-۲- روش کنترل محلی

کنترل محلی در ریزش شبکه جزیره‌ای کنترل تقسیم توان توسط واحدهای تولید پراکنده متعدد را انجام می‌دهد. در حقیقت از جمله وظایف اصلی کنترل کننده‌های محلی منابع تولید پراکنده اجازه تقسیم توان بین منابع مختلف در موقعیت‌های مختلف و عمل روی مبدل‌های الکترونیک قدرتی است که منابع را به ریزش شبکه متصل می‌کنند [۲۱، ۲۶].

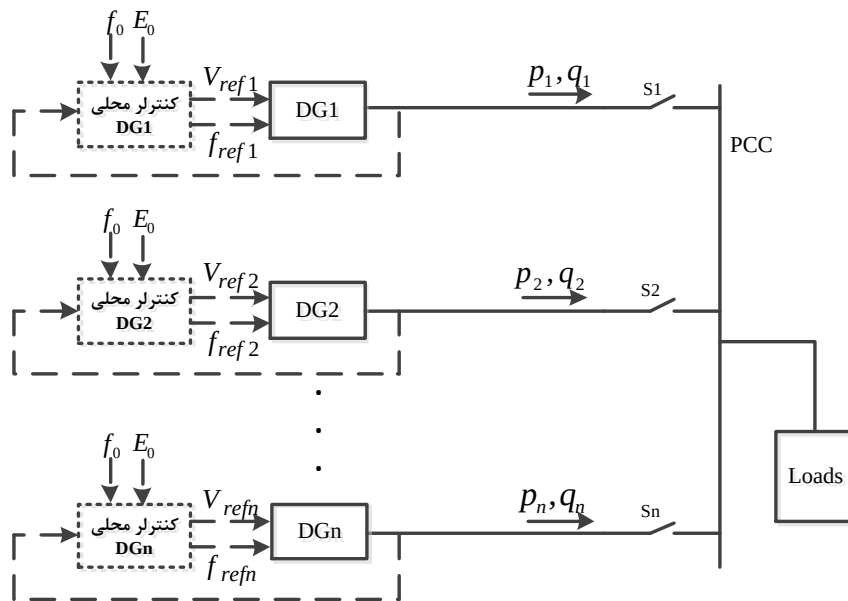
16- Overall
17- Supervisory

روش کنترل ریزشکه جزیره‌ای باملاحظه معماری سیستم کنترل به دو روش کنترل متمرکز و کنترل غیرمتمرکز صورت می‌گیرد. کنترل کاملاً متمرکز وابسته به داده‌های جمع‌آوری شده در کنترل‌کننده مرکزی است که به واسطه آن‌ها عملیات کنترلی واحدهای مختلف را تعیین می‌کند و نیازمند ارتباطات بین کنترل‌کننده مرکزی و کنترل‌کننده محلی واحدهای تولید پراکنده است [۳]. در روش کاملاً غیرمتمرکز هر واحد بدون نیاز به ارتباطات بحرانی و ارتباط با کنترل‌کننده مرکزی و یا واحدهای دیگر، عمل کنترل صرفاً توسط کنترل‌کننده محلی خود و بر اساس اندازه‌گیری‌های محلی نظیر ولتاژ و فرکانس صورت می‌گیرد [۳].



شکل (۳-۲): کنترل متمرکز [۲۱].

کنترل محلی اولین سطح از کنترل است و از آن به عنوان کنترل اولیه^{۱۸} [۲۵, ۲۷] یا داخلی نیز یاد می‌شود. از جمله وظایف کنترل محلی تشخیص جزیره، کنترل خروجی و کنترل تقسیم توان است. از برجسته‌ترین روش‌های غیرمتمرکز کنترل محلی، روش‌های غیرمتمرکز مبتنی بر کنترل مشخصه‌های افتی است [۲۱]. در این پژوهش بر روی کنترل تقسیم توان که یکی از وظایف کنترل‌کننده محلی منبع تولید پراکنده است تمرکز شده است و مشخصه‌های افتی واحدها به منظور کنترل منابع تولید پراکنده کنترل می‌شوند. شمایی از روش‌های کنترل متمرکز و غیرمتمرکز به ترتیب در شکل‌های (۳-۲) و (۴-۲) نشان داده شده است.



شکل (۲-۴): کنترل غیرمتمرکز [۲۱].

۷-۲- نقش مبدل‌های الکترونیک قدرت در ریزشبه‌ها

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، مبدل‌های الکترونیک قدرت از مولفه‌های مهم ریزشبه‌ها هستند و از آن‌ها برای کنترل تقسیم توان و تبدیل توان به فرم مناسب AC یا DC استفاده می‌شود. آن‌ها همچنین به‌عنوان یک رابط، سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی، ژنراتورهای سرعت متغیر و منابع تولید پراکنده DC را به ریزشبه متصل می‌کنند [۴].

مبدل‌ها معمولاً برای عملکرد موازی منبع تولید پراکنده با شبکه و یا منابع تولید پراکنده دیگر کاربرد دارند [۴]. در ریزشبه‌های جزیره‌ای، مبدل‌های الکترونیک قدرت به‌منظور تغذیه پیوسته بارهای محلی و بحرانی نقش عمده‌ای دارند، به این منظور روش‌های کنترل متعددی از جمله روش کنترل افتی و روش کنترلی رئیس-مرئوس^{۱۹} برای کنترل عملکرد موازی منابع تولید پراکنده مبتنی بر مبدل‌های الکترونیک قدرت ارائه شده است [۹].

جدول (۱-۲): مقایسه روش‌های کنترل اینورترها [۹].

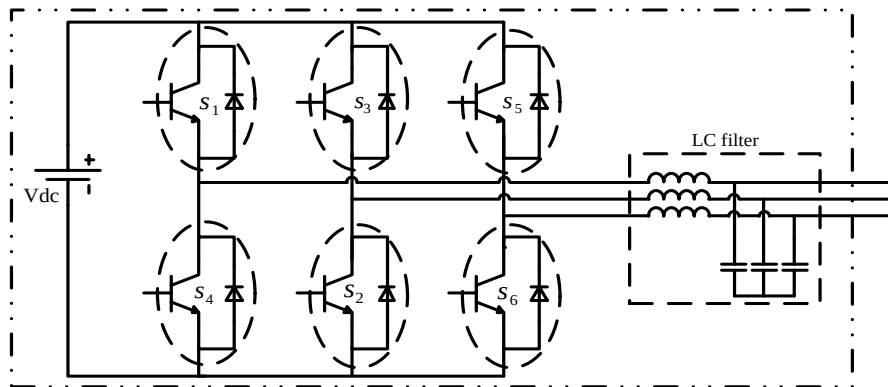
ویژگی روش کنترلی	کنترل نظارتی	ارتباطات	توسعه سیستم
روش کنترل افقی	ضروری نیست	نیاز ندارد	آسان است
رئیس- مرئوس	ضروری است	نیاز دارد	مشکل است

در کنترل رئیس- مرئوس، یک اینورتر به‌عنوان رئیس ولتاژ را تنظیم می‌کند و جریان منتهی این واحد جریان مرجع واحدهای دیگر را تعیین می‌کند. اما این روش برخلاف روش کنترل افقی به خاطر نیازمندی به ارتباطات، کنترل نظارتی و کابل‌کشی اضافی برای عملکرد سیستم‌های مبتنی بر تولید پراکنده، حتی برای سیستم‌های کوچک مناسب نمی‌باشند [۹]. در جدول (۱-۲) به‌طور مختصر برخی از ویژگی‌های این دو روش مقایسه شده‌اند.

عملکرد منابع تولید پراکنده مبتنی بر اینورترهای با ولتاژ و فرکانس تثبیت شده در یک ریزشبه ممکن نیست و نیازمند یک روش کنترلی برای فراهم کردن افت در ولتاژ و فرکانس است [۹]. کنترل اختصاصی ولتاژ و فرکانس در هر اینورتر باعث سهولت تقسیم توان در ریزشبه می‌شود [۴]. مرجع [۲۸] به بررسی نوعی از مبدل‌های منبع ولتاژ پرداخته است که فرکانس عملکردی آنها توسط شبکه اصلی تعیین نمی‌شود بلکه توسط خود مبدل کنترل می‌شود و از آنها به‌عنوان مبدل‌های منبع ولتاژ فرکانس کنترل شده نام‌برده است. که در آنها ولتاژ و فرکانس نقطه اتصال مشترک کنترل می‌شود. دو مورد از کاربردهای این نوع از مبدل‌های منبع ولتاژ در زیر آورده شده است:

۱- در منابع تغذیه بدون وقفه

۲- به‌عنوان رابط اتصال منابع تولید پراکنده یا ذخیره‌سازهای انرژی جزیره‌ای شده [۲۸].



شکل (۵-۲): منبع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر منبع ولتاژ.

لازم به ذکر است که منبع توان منابع تولید پراکنده مفروض در این پژوهش به صورت یک منبع ولتاژ dc ایده‌آل مدل شده‌اند. شکل (۵-۲) یک اینورتر منبع ولتاژ سه فاز را نشان می‌دهد که شامل ساختار پل IGBT^{۲۰} و یک فیلتر LC است. منبع ولتاژ یک ولتاژ V_{dc} را به اینورتر منبع ولتاژ تغذیه می‌کند. اینورتر منبع ولتاژ سه پل H^{۲۱} را شامل می‌شود که از منبع ولتاژ dc تغذیه می‌کنند [۱۷].

۸-۲- جمع بندی

در این فصل مروری کلی بر تعریف ریزشبه و ساختار و مولفه‌های تشکیل‌دهنده آن صورت گرفت و همچنین به مسائل موجود در کنترل ریزشبه‌ها پرداخته شد. با توجه به مطالب ارائه شده در این فصل روش کنترل افقی به عنوان یک روش کنترلی غیرمتمرکز جهت کنترل تقسیم توان در ریزشبه‌های جزیره‌ای مبتنی بر اینورتر معرفی شد. به همین منظور در فصل بعد به بیان و توصیف بیشتر روش افقی و همچنین تقسیم توان با استفاده از این روش پرداخته خواهد شد.

20- Insulated Gate Bipolar Transistor
21- H-Bridge

فصل سوم

**تئوری تقسیم توان بین منابع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر
کنترل شده با روش کنترل افقی**

همان‌طور که در فصل‌های اول و دوم عنوان شد، مسئله تقسیم توان در ریزشبکه‌های جزیره‌ای یک چالش است که حل آن نظر بسیاری از محققان را به خود معطوف کرده است. مسئولیت تقسیم توان از جمله وظایف کنترل‌کننده‌های واحد تولید پراکنده است که با بکارگیری روش کنترل اکتیو به عنوان یک کنترل غیرمتمرکز و محلی میسر می‌شود [۲۹]. با پیاده‌سازی روش کنترل اکتیو در کنترل‌کننده محلی، تقسیم توان بدون نیاز به وجود ارتباطات توسط فرکانس و ولتاژ منابع تولید پراکنده قابل کنترل است. روش اکتیو با توانمندسازی مشخصه نصب و اجرا منابع تولید پراکنده قابلیت اطمینان سیستم را افزایش می‌دهد و توسعه ریزشبکه را نیز ممکن می‌سازد [۱۶، ۱۸]. با توجه به نوع امپدانس خط تغذیه، تقسیم توان حقیقی و راکتیو می‌تواند توسط افت فرکانس و یا افت دامنه ولتاژ کنترل شود [۳، ۱۲]، که در ادامه فصل به طور کامل به این موضوع پرداخته شده است.

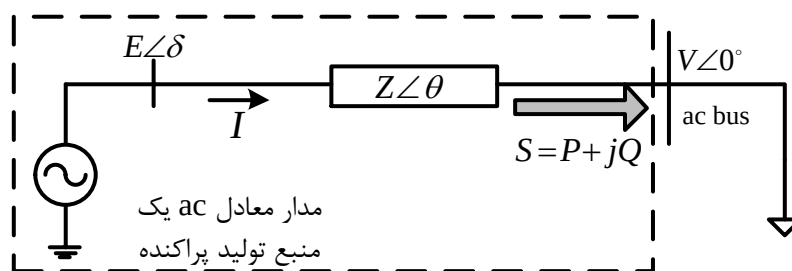
۳-۲- معادلات پخش توان و مشخصه‌های اکتیو

روش کنترل اکتیو از طریق کنترل فرکانس و ولتاژ به کنترل تقسیم توان در ریزشبکه می‌پردازد [۷، ۳۰]. روش کنترل اکتیو شامل دو روش متداول و مخالف است [۳۰]، که بنا بر نوع امپدانس خط تغذیه منابع تولید پراکنده در ریزشبکه مورد استفاده قرار می‌گیرند. روش اکتیو متداول و مخالف به ترتیب در ریزشبکه‌های با خطوط تغذیه کاملاً اندوکتیو و کاملاً مقاومتی کاربرد دارند [۱۳، ۱۴]. معمولاً روش اکتیو متداول جهت کنترل تقسیم صحیح توان در ریزشبکه‌ها استفاده می‌شود که با کنترل فرکانس و دامنه ولتاژ به ترتیب تقسیم توان‌های حقیقی و راکتیو را بهبود می‌بخشد [۶]. روش اکتیو متداول در حقیقت با تبعیت از رابطه مکانیکی و الکتریکی بین توان، فرکانس و ولتاژ در ژنراتورهای سنکرون برای کنترل اینورترهای با عملکرد موازی در ریزشبکه‌های جزیره‌ای بکار می‌رود [۳۰]. درحالی‌که در روش اکتیو مخالف تقسیم توان حقیقی و راکتیو به ترتیب توسط دامنه ولتاژ و فرکانس کنترل می‌شوند [۱۳، ۱۴]. در این فصل به بررسی تقسیم توان حقیقی و راکتیو بین

اینورترهای موازی در ریزشبه‌های جزیره‌ای با در نظر گرفتن نوع امپدانس خط تغذیه و به عبارت دیگر مقدار نسبت راکتانس به مقاومت آن پرداخته شده است. همچنین مشخصه‌های افتی متناسب با نوع امپدانس خطوط تغذیه تشریح می‌شوند.

۳-۲-۱- تئوری تقسیم توان حقیقی و راکتیو

به منظور بررسی تقسیم توان حقیقی و راکتیو توسط منابع تولید پراکنده اینورتری و معادلات پخش توان، مدار معادل یک منبع تولید پراکنده مطابق شکل (۳-۱) در نظر گرفته شده است. در این مدار معادل منبع تولید پراکنده با یک منبع ولتاژ متناوب مدل شده است که از طریق یک خط تغذیه با امپدانس Z به باس ac متصل شده و باری را تغذیه می‌کند.



شکل (۳-۱): مدار معادل یک منبع تولید پراکنده.

توان مختلط منتقل شده از منبع تولید پراکنده به باس ac به صورت زیر است:

$$S = P + jQ \quad (۳-۱)$$

$$S = \bar{E}I^* = E\angle\delta \left[\frac{E}{Z} \angle(\theta - \delta) - \frac{V}{Z} \angle\theta \right] = \frac{E^2}{Z} \angle\theta - \frac{EV}{Z} \angle(\theta + \delta) \quad (۳-۲)$$

$$P = \frac{E^2}{Z} \cos\theta - \frac{EV}{Z} \cos(\theta + \delta) = \frac{(E^2 - EV \cos\delta) \cos\theta}{Z} + \frac{EV \sin\theta \sin\delta}{Z} \quad (۳-۳)$$

$$Q = \frac{E^2}{Z} \sin\theta - \frac{EV}{Z} \sin(\theta + \delta) = \frac{(E^2 - EV \cos\delta) \sin\theta}{Z} - \frac{EV \cos\theta \sin\delta}{Z} \quad (۳-۴)$$

که در معادلات فوق S ، P و Q به ترتیب توان‌های مختلط، حقیقی و راکتیو منتقل شده به بار هستند. E و V به ترتیب دامنه ولتاژ خروجی اینورتر و باس δ زاویه توان (زاویه بار)، Z و θ به ترتیب دامنه و فاز امپدانس خط تغذیه می‌باشند. امپدانس خط تغذیه شامل مقاومت R و راکتانس X است [۳۱، ۲۱].

زاویه فاز امپدانس خط تغذیه می‌تواند دارای مقادیر مختلفی باشد که در ادامه به آن‌ها پرداخته شده است. با استفاده از روابط مثلثاتی و با توجه معادلات (۳-۳) و (۴-۳)، روابط پخش توان حقیقی و راکتیو با در نظر گرفتن نوع امپدانس خط تغذیه به دست خواهند آمد.

$$1- \text{ زاویه امپدانس خط } (Z) \theta = 90^\circ$$

در این حالت با در نظر داشتن این حقیقت که ممکن است امپدانس خط تغذیه القایی خالص باشد و یا به عبارت دیگر $Z = jX \rightarrow \theta = 90^\circ$ باشد، طبق معادلات (۳-۳) و (۴-۳) پخش توان حقیقی و راکتیو توسط منبع به صورت روابط (۵-۳) و (۶-۳) است [۳۲]:

$$P = \frac{EV \sin \delta}{X} \quad (5-3)$$

$$Q = \frac{E^2 - EV \cos \delta}{X} \quad (6-3)$$

$$2- \text{ زاویه امپدانس خط } (Z) 0^\circ < \theta < 90^\circ$$

در این زاویه امپدانس، امپدانس خط تغذیه دارای خاصیت القایی است. این حالت از امپدانس در ریز شبکه‌های ولتاژ متوسط صادق است و به عبارت دیگر $Z = R + jX \rightarrow 0^\circ < \theta < 90^\circ$ است. بنابراین معادلات پخش توان حقیقی و راکتیو به صورت روابط (۷-۳) و (۸-۳) هستند [۳۲]:

$$P = \frac{E^2}{Z} \cos \theta - \frac{EV}{Z} \cos(\theta + \delta) \quad (7-3)$$

$$Q = \frac{E^2}{Z} \sin \theta - \frac{EV}{Z} \sin(\theta + \delta) \quad (8-3)$$

$$3- \text{ زاویه امپدانس خط } (Z) \theta = 0^\circ$$

در این حالت امپدانس خط تغذیه به صورت کاملاً مقاومتی است. این حالت از امپدانس در ریزشکته‌های ولتاژ پایین صادق است یعنی: $\theta = 0^\circ \rightarrow Z = R$. با توجه به اینکه در این حالت امپدانس خط تغذیه تنها دارای خاصیت مقاومتی است معادله پخش توان حقیقی و راکتیو به ترتیب به صورت روابط (۹-۳) و (۱۰-۳) هستند [۳۲]:

$$P = \frac{E^2 - EV \cos \delta}{R} \quad (۹-۳)$$

$$Q = -\frac{EV \sin \delta}{R} \quad (۱۰-۳)$$

۴- زاویه امپدانس خط (Z) $-90^\circ < \theta < 0^\circ$

در این حالت، امپدانس خط تغذیه دارای خاصیت خازنی است و به عبارت دیگر $-90^\circ < \theta < 0^\circ \rightarrow Z = R + jX$ است. لذا معادلات پخش توان حقیقی و راکتیو به صورت زیر هستند [۳۲]:

$$P = \frac{E^2}{Z} \cos \theta - \frac{EV}{Z} \cos(\theta + \delta) \quad (۱۱-۳)$$

$$Q = \frac{E^2}{Z} \sin \theta - \frac{EV}{Z} \sin(\theta + \delta) \quad (۱۲-۳)$$

۵- زاویه امپدانس خط (Z) $\theta = -90^\circ$

در این زاویه امپدانس، امپدانس خروجی تنها دارای خاصیت خازنی خالص است یعنی: $\theta = -90^\circ \rightarrow Z = -jX$ است. معادلات انتقال توان حقیقی و راکتیو به صورت روابط (۱۳-۳) و (۱۴-۳) قابل بیان هستند [۳۲]:

$$P = -\frac{EV \sin \delta}{X} \quad (۱۳-۳)$$

$$Q = -\frac{E^2 - EV \cos \delta}{X} \quad (۱۴-۳)$$

در یک ریزشبه با توجه به موقعیت و فاصله منابع تولید پراکنده از بار و همچنین ظرفیت توان منابع، ریزشبه می‌تواند در سطوح ولتاژ مختلف عمل کند. اما واحدهای تولید پراکنده اغلب دارای ظرفیت توان‌های نسبتاً پایین و حدود چند صد کیلو وات هستند و در سطوح ولتاژ پایین طراحی می‌شوند [۱۸]. در جدول (۱-۳) نسبت مقاومت به راکتانس یک خط نمونه آورده شده است. از این جدول می‌توان دریافت که خطوط در سیستم‌های توان ولتاژ پایین دارای خاصیت مقاومتی و در سیستم‌های توان ولتاژ متوسط دارای نسبت مقاومت به راکتانس تقریباً یک هستند و به این معنی است که نمی‌توان از مقدار مقاومت و راکتانس در مقابل یکدیگر چشم‌پوشی کرد. و در شبکه‌های ولتاژ بالا خط تغذیه غالباً دارای خاصیت سلفی است.

جدول (۱-۳): مشخصات خط نمونه [۹].

نوع خط	مقاومت (R)	راکتانس (X)	مقاومت/راکتانس (R/X)
ولتاژ پایین	۰/۶۴۲	۰/۰۸۳	۷/۷
ولتاژ متوسط	۰/۱۶۱	۰/۱۹	۰/۸۵
ولتاژ بالا	۰/۰۶	۰/۱۹۱	۰/۳۱

۳-۲-۲- مشخصه افتی متناسب با نوع امپدانس خط تغذیه

لازم به ذکر است که در سیستم قدرت برای حفظ پایداری معمولاً سیستم در زاویه بار (δ) کوچک عمل می‌کند. بنابراین با توجه به اینکه δ مقدار کوچکی دارد، می‌توان در معادلات توان در هر یک از پنج حالت ذکر شده در زیر بخش ۳-۲-۱ از تقریب‌های زیر استفاده کرد [۳۱]:

$$\sin \delta \approx \delta \quad (۱۵-۳)$$

$$\cos \delta \approx 1 \quad (۱۶-۳)$$

از این رو معادلات افتی در پنج حالت مذکور متفاوت هستند. در ادامه به معادلات افتی متناسب با امپدانس خط تغذیه پرداخته شده است.

۱- زاویه امپدانس خط (Z) $\theta = 90^\circ$

همان طور که از معادلات (۳-۵) و (۳-۶) مشاهده می شود، توان حقیقی وابسته به زاویه توان و از این رو وابسته به فرکانس است و توان راکتیو به اختلاف دامنه ولتاژ وابسته است. بنابراین مشخصه افتی متناسب با این نوع امپدانس خط تغذیه را می توان به صورت زیر در نظر گرفت [۳۲]:

$$f^* = f_0 - k_p P \quad (۳-۱۷)$$

$$E^* = E_0 - k_q Q \quad (۳-۱۸)$$

که در معادله (۳-۱۷)، f_0 فرکانس نامی، f^* فرکانس مرجع و k_p ضریب افتی فرکانس هستند و P توان حقیقی متوسط^۱ منبع تولید پراکنده است که با عبور دادن مقدار لحظه ای^۲ توان حقیقی از فیلتر پایین گذر^۳ به دست می آید. در معادله (۳-۱۸)، E_0 ولتاژ نامی، E^* دامنه ولتاژ مرجع و k_q ضریب مشخصه افتی ولتاژ هستند. و Q توان راکتیو متوسط منبع تولید پراکنده است که با عبور دادن مقدار لحظه ای توان راکتیو از فیلتر پایین گذر به دست می آید. این مشخصه افتی با نام افتی متداول شناخته می شود و همان طور که قبلاً بیان شد برای سیستم هایی با امپدانس خط تغذیه غالباً اندوکتیو کاربرد دارد. که در بخش ۳-۴ به معرفی کامل آن پرداخته شده است.

۲- زاویه امپدانس خط (Z) $0^\circ < \theta < 90^\circ$

همان طور که از معادلات (۳-۷) و (۳-۸) مشاهده می شود توان حقیقی و راکتیو هر دو هم وابسته به زاویه توان هستند و هم وابسته به دامنه ولتاژ. لذا مشخصه افتی متناسب با این نوع امپدانس را می توان به صورت روابط (۳-۱۹) و (۳-۲۰) در نظر گرفت [۳۲]:

$$f^* = f_0 - k_p P + k_q Q \quad (۳-۱۹)$$

$$E^* = E_0 - k_p P - k_q Q \quad (۳-۲۰)$$

1- Average
2- Instantaneous
3- Low Pass Filter

۳- زاویه امپدانس خط (Z) $\theta = 0^\circ$

با توجه به معادلات (۹-۳) و (۱۰-۳) می‌توان نتیجه گرفت در حالتی که امپدانس خط تغذیه مقاومتی است توان‌های حقیقی و راکتیو به ترتیب وابسته به دامنه ولتاژ و زاویه توان هستند. بنابراین معادلات افتی در نظر گرفته‌شده برای این حالت به صورت روابط (۲۱-۳) و (۲۲-۳) هستند [۳۲]:

$$f^* = f_0 + k_q Q \quad (21-3)$$

$$E^* = E_0 - k_p P \quad (22-3)$$

این مشخصه افتی با نام افتی مخالف نام‌گذاری شده و در مقابل مشخصه افتی متداول است. این مشخصه افتی در ریزشک‌های با خطوط تغذیه غالباً مقاومتی کاربرد دارد. در بخش ۳-۵ به توصیف این نوع مشخصه پرداخته شده است.

۴- زاویه امپدانس خط (Z) $-90^\circ < \theta < 0^\circ$

با توجه به معادلات (۱۱-۳) و (۱۲-۳) که در زیر بخش ۳-۲-۱ به آن‌ها پرداخته شد می‌توان نتیجه گرفت، در حالتی که امپدانس خط تغذیه خازنی-مقاومتی است، توان حقیقی هم وابسته به منفی زاویه توان و هم وابسته به دامنه ولتاژ است و توان راکتیو هم وابسته به زاویه توان و هم وابسته به دامنه ولتاژ است. بنابراین معادلات افتی در نظر گرفته‌شده برای این حالت به صورت زیر هستند [۳۲]:

$$f^* = f_0 + k_p P + k_q Q \quad (23-3)$$

$$E^* = E_0 - k_p P + k_q Q \quad (24-3)$$

۵- زاویه امپدانس خط (Z) $\theta = -90^\circ$

همان‌طور که از معادلات (۱۱-۳) و (۱۲-۳) مشاهده می‌شود، در این حالت توان حقیقی وابسته به منفی زاویه توان و توان راکتیو وابسته به منفی دامنه ولتاژ است. که در این صورت معادلات افتی متناسب با این نوع از امپدانس به صورت روابط (۲۵-۳) و (۲۶-۳) به دست می‌آیند [۳۲]:

$$f^* = f_0 + k_p P \quad (25-3)$$

$$E^* = E_0 + k_q Q \quad (26-3)$$

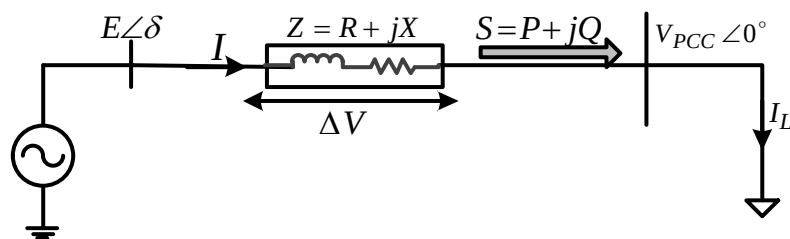
معادلات افی و پخش توان حقیقی و راکتیو در هر یک از انواع امپدانس خط تغذیه به‌طور مختصر در جدول (۲-۳) آورده شده است.

جدول (۲-۳): معادلات افی و معادلات پخش توان [۳۲].

معادلات افی	معادلات توان	زاویه امپدانس خط تغذیه	نوع امپدانس خط تغذیه
$f_i^* = f_0 - k_{pi}P_i$ $E_i^* = E_0 - k_{qi}Q_i$	$P_i = \frac{E_i V_{PCC} \sin \delta_i}{X_i}$ $Q_i = \frac{E_i^2 - E_i V_{PCC} \cos \delta_i}{X_i}$	$\theta_i = 90^\circ$	L
$f_i^* = f_0 - k_{pi}P_i + k_{qi}Q_i$ $E_i^* = E_0 - k_{pi}P_i - k_{qi}Q_i$	$P_i = \frac{E_i^2 \cos \theta_i - E_i V_{PCC} \cos(\theta_i + \delta_i)}{Z_i}$ $Q_i = \frac{E_i^2 \sin \theta_i - E_i V_{PCC} \sin(\theta_i + \delta_i)}{Z_i}$	$0^\circ < \theta_i < 90^\circ$	R-L
$f_i^* = f_0 + k_{qi}Q_i$ $E_i^* = E_0 - k_{pi}P_i$	$P_i = \frac{E_i^2 - E_i V_{PCC} \cos \delta_i}{R_i}$ $Q_i = -\frac{E_i V_{PCC} \sin \delta_i}{R_i}$	$\theta_i = 0^\circ$	R
$f_i^* = f_0 + k_{pi}P_i + k_{qi}Q_i$ $E_i^* = E_0 - k_{pi}P_i + k_{qi}Q_i$	$P_i = \frac{E_i^2 \cos \theta_i - E_i V_{PCC} \cos(\theta_i + \delta_i)}{Z_i}$ $Q_i = \frac{E_i^2 \sin \theta_i - E_i V_{PCC} \sin(\theta_i + \delta_i)}{Z_i}$	$-90^\circ < \theta_i < 0^\circ$	R-C
$f_i^* = f_0 + k_{pi}P_i$ $E_i^* = E_0 + k_{qi}Q_i$	$P_i = -\frac{E_i V_{PCC} \sin \delta_i}{X_i}$ $Q_i = -\frac{E_i^2 - E_i V_{PCC} \cos \delta_i}{X_i}$	$\theta_i = -90^\circ$	C

۳-۲-۳- افت ولتاژ روی امپدانس خط تغذیه

جهت محاسبه افت ولتاژ روی امپدانس خط تغذیه مجدداً دیاگرام تک‌خطی شبکه قدرت به‌صورت شکل (۲-۳) در نظر گرفته می‌شود. در این سیستم منبع تولید پراکنده با یک منبع ولتاژ متناوب مدل شده است که از طریق یک خط تغذیه $Z = R + jX$ به باس ac متصل شده و باری را تغذیه می‌کند.



شکل (۲-۳): دیاگرام تک خطی سیستم قدرت.

افت ولتاژ روی امپدانس خط تغذیه (ΔV) به صورت رابطه (۲۷-۳) است:

$$\Delta V = E - V_{PCC} \quad (27-3)$$

در سیستم نشان داده شده در شکل (۲-۳) جریان بار (I_L) به صورت رابطه (۲۸-۳) محاسبه می شود:

$$I_L = \frac{S^*}{V_{PCC}^*} = \frac{P - jQ}{V_{PCC}^*} \quad (28-3)$$

و اگر ولتاژ باس مشترک، $V_{PCC} = V_{PCC} + j0$ ، به عنوان فازور مرجع انتخاب شود افت ولتاژ به صورت رابطه (۲۹-۳) محاسبه می شود:

$$\begin{aligned} \Delta V &= ZI = (R + jX) \left(\frac{P - jQ}{V_{PCC}} \right) = \frac{RP + XQ}{V_{PCC}} + j \frac{XP - RQ}{V_{PCC}} \\ &= \Delta V_R + j\Delta V_X \end{aligned} \quad (29-3)$$

در رابطه مذکور افت ولتاژ ΔV یک مؤلفه هم فاز با V_{PCC} (ΔV_R) و یک مؤلفه عمود بر V_{PCC} (ΔV_X) دارد. دامنه و فاز V_{PCC} تابعی از دامنه و فاز جریان بار هستند. به عبارت دیگر ولتاژ V_{PCC} وابسته به توان حقیقی و همچنین وابسته به توان راکتیو بار تغییر می کند.

غالباً ΔV_X فقط منجر به یک تغییر فاز در ولتاژ نقطه تغذیه شده لذا از آن چشم پوشی می شود، و تغییر در دامنه به واسطه ΔV_R ارائه می شود [۳۳، ۳۴]. در این صورت می توان افت ولتاژ روی امپدانس

خط تغذیه را که از رابطه (۳-۲۹) محاسبه می‌شود، با تقریب خوبی به صورت رابطه (۳-۳۰) در نظر گرفت [۱۰]:

$$\Delta V \approx \Delta V_R = \frac{RP + XQ}{V_{PCC}} \quad (۳-۳۰)$$

با توجه به اینکه ولتاژ در نقطه اتصال مشترک (V_{PCC}) که درواقع ولتاژ بار است باید برابر با ولتاژ نامی سیستم (E_0) باشد رابطه (۳-۳۰) را می‌توان به صورت رابطه (۳-۳۱) اصلاح کرد. که این رابطه اساس تحلیل کنترل تقسیم توان در ریزشبکه‌های جزیره‌ای است.

$$\Delta V \approx \frac{RP + XQ}{E_0} \quad (۳-۳۱)$$

۳-۲-۴- اثر امپدانس خط تغذیه بر تقسیم توان

با توجه به معادلات پخش توان حقیقی و راکتیو (۳-۳) و (۳-۴) که مجدداً در زیر آورده شده‌اند، پخش توان متناسب با عکس امپدانس خط تغذیه است، یعنی: $P \propto \frac{1}{Z}$ و $Q \propto \frac{1}{Z}$ هستند. به این معنی که هر چه امپدانس خط تغذیه بزرگ‌تر باشد میزان توان منتقل شده به بار کمتر خواهد بود.

$$P = \frac{(E^2 - EV \cos \delta) \cos \theta}{Z} + \frac{EV \sin \theta \sin \delta}{Z}$$

$$Q = \frac{(E^2 - EV \cos \delta) \sin \theta}{Z} - \frac{EV \cos \theta \sin \delta}{Z}$$

بنابراین می‌توان میزان توان خروجی هر واحد را با کنترل امپدانس خط تغذیه آن‌ها کنترل کرد [۱۲]، که این امر را می‌توان با استفاده از امپدانس مجازی در خروجی منبع تولید پراکنده عملی ساخت [۳۵].

۳-۳- اثر بارهای وابسته به ولتاژ بر تقسیم توان

مشخصه‌های بار در سیستم قدرت پیچیده هستند زیرا در سیستم قدرت به‌طور نمونه ترکیبی از انواع مختلف بارها و تعداد زیادی ادوات از قبیل لامپ‌های فلورسنت، سیستم‌های سرمایشی و گرمایشی و غیره وجود دارند لذا تخمین ترکیب دقیق بار مشکل است. ترکیب بارها همچنین با توجه به عوامل متعددی از جمله زمان (ساعت، روز و فصل)، شرایط آب و هوایی و شرایط اقتصادی تغییر می‌کند. بنابراین به دلیل پیچیدگی بارها در سیستم قدرت واقعی، مطالعات مدل بار بر اساس میزان قابل‌ملاحظه‌ای ساده‌سازی انجام می‌شود [۳۶]. به‌طور معمول مدل‌های بار به دو گروه کلی شامل مدل بار استاتیکی^۴ و مدل بار دینامیکی^۵ دسته‌بندی می‌شوند [۳۶]، که در ادامه در مورد آن‌ها بحث شده است.

بار استاتیکی دارای مشخصه باری است که به‌صورت تابع جبری از دامنه و فرکانس ولتاژ باس است [۳۶، ۳۷]. در طی یک دوره گذرا دامنه ولتاژ و فرکانس تغییر خواهد کرد، که این تغییر دامنه ولتاژ به‌صورت تغییر در توان حقیقی و راکتیو بار ظاهر می‌شود و مؤلفه توان حقیقی و مؤلفه توان راکتیو به‌طور جداگانه در نظر گرفته می‌شوند، یعنی: $P_L \propto V$ و $Q_L \propto V$ [۳۷]. در سیستم‌های قدرت واقعی، توان بار به نماهای مختلفی از ولتاژ وابسته است یعنی: $P_L \propto V^n$ و $Q_L \propto V^m$. در برخی مراجع وابستگی مشخصه‌های بار به ولتاژ توسط مدل نمایی نمایش داده می‌شود [۳۶]:

$$P_L = P_0 \left(\frac{V_{PCC}}{E_0} \right)^n \quad (۳۲-۳)$$

$$Q_L = Q_0 \left(\frac{V_{PCC}}{E_0} \right)^m \quad (۳۳-۳)$$

4- Static Load

5- Dynamic Load

پارامترهای این مدل نماهای n و m هستند که به ترتیب تقریباً مساوی با شیب $\frac{dP}{dV}$ و $\frac{dQ}{dV}$ در $V_{PCC} = E_0$ هستند، و P_0 و Q_0 به ترتیب توان حقیقی و راکتیو بار هستند. در صورتی که این پارامترها برابر با ۰، ۱، ۲ باشند به ترتیب مدل بار توان ثابت، جریان ثابت و امپدانس ثابت را ارائه می کنند [۳۶]. با توجه به اینکه سیستم قدرت شامل بارهای مختلفی نظیر صنعتی، مسکونی، تجاری و غیره است n و m دارای مقادیر مختلفی هستند که برای نمونه در جدول (۳-۳) آورده شده است.

جدول (۳-۳): انواع بار و مقادیر نماها [۲۰].

بار	n	m
توان ثابت	۰	۰
صنعتی	۰/۱۸	۶
تجاری	۱/۵۱	۳/۴
مسکونی	۰/۹۲	۴/۰۴
جریان ثابت	۱	۱
امپدانس ثابت	۲	۲

با توجه به سیستم توان نشان داده شده در شکل (۲-۳)، اگر توان انتقالی به باس بار با لحاظ نوع بار به صورت بار توان ثابت، جریان ثابت و امپدانس ثابت در نظر گرفته شود اثر این نوع بارها را می توان در افت ولتاژ روی امپدانس خط تغذیه و مقدار توان خروجی واحد تولیدی مشاهده کرد. از این رو افت ولتاژ روی امپدانس خط تغذیه ناشی از هریک از بارهای ذکر شده در ادامه بیان شده است.

۳-۳-۱- بار توان ثابت^۶

در بار توان ثابت n و m برابر با صفر هستند از این رو با توجه به معادلات (۳۲-۳) و (۳۳-۳) و با در نظر گرفتن توان حقیقی و راکتیو بار به صورت $P_L = P_0$ و $Q_L = Q_0$ ، که P_0 و Q_0 به ترتیب توان حقیقی و راکتیو نامی بار هستند، افت ولتاژ روی خط تغذیه (ΔV) برابر است با:

$$\Delta V \approx \frac{RP_0 + XQ_0}{E_0} \quad (34-3)$$

۳-۳-۲- بار جریان ثابت^۷

در این نوع از بار با توجه به اینکه n و m هر دو برابر یک هستند، رابطه توان حقیقی و راکتیو به ترتیب به صورت معادلات (۳۵-۳) و (۳۶-۳) است.

$$P_L = P_0 \left(\frac{V_{PCC}}{E_0} \right)^1 \quad (۳۵-۳)$$

$$Q_L = Q_0 \left(\frac{V_{PCC}}{E_0} \right)^1 \quad (۳۶-۳)$$

که V_{PCC} ولتاژ باس مشترک و E_0 ولتاژ نامی است. بنابراین افت ولتاژ روی امپدانس به صورت رابطه (۳۷-۳) است:

$$\begin{aligned} \Delta V &= \frac{RP_0 \left(\frac{V_{PCC}}{E_0} \right) + XQ_0 \left(\frac{V_{PCC}}{E_0} \right)}{E_0} \\ &= \left(\frac{V_{PCC}}{E_0} \right) \times \frac{(RP_0 + XQ_0)}{E_0} \end{aligned} \quad (۳۷-۳)$$

۳-۳-۳- بار امپدانس ثابت^۸

در بارهای امپدانس ثابت n و m هر دو برابر با مقدار دو هستند و با توجه به روابط (۳۲-۳) و (۳۳-۳) به ترتیب رابطه بین توان حقیقی و راکتیو با ولتاژ باس بار برای بار امپدانس ثابت به صورت رابطه (۳۸-۳) و (۳۹-۳) است:

$$P_L = P_0 \left(\frac{V_{PCC}}{E_0} \right)^2 \quad (۳۸-۳)$$

7- Constant Current Load
8- Constant Impedance Load

$$Q_L = Q_0 \left(\frac{V_{PCC}}{E_0} \right)^2 \quad (39-3)$$

با جایگزینی توان حقیقی و راکتیو بیان شده در معادلات (38-3) و (39-3) در رابطه افت ولتاژ (3-3) (31)، افت ولتاژ روی امپدانس خط تغذیه در حالتی که بار امپدانس ثابت است به صورت (3-40) بیان می شود:

$$\begin{aligned} \Delta V &= \frac{RP_0 \left(\frac{V_{PCC}}{E_0} \right)^2 + XQ_0 \left(\frac{V_{PCC}}{E_0} \right)^2}{E_0} \\ &= \left(\frac{V_{PCC}}{E_0} \right)^2 \times \frac{(RP_0 + XQ_0)}{E_0} \end{aligned} \quad (40-3)$$

با توجه به روابط (34-3)، (37-3) و (40-3) و با توجه به اینکه $\left(\frac{V_{PCC}}{E_0} \right) \leq 1$ است پس هر چه نمای این کسر بیشتر شود مقدار کسر کوچک می شود، بنابراین با ضرب این کسر در افت ولتاژ روی امپدانس خط تغذیه مقدار افت ولتاژ کمتر می شود.

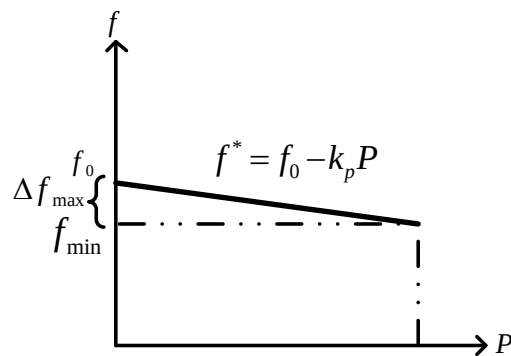
۳-۴- روش افتی متداول

با توجه به مطالب ارائه شده در زیر بخش ۳-۲-۲، روش افتی متداول (فرکانس-توان حقیقی، دامنه ولتاژ-توان راکتیو) برای ریزش شبکه هایی با خطوط تغذیه غالباً اندوکتیو کاربرد دارد و استفاده از آن برای کنترل تقسیم توان با فرض اندوکتیو بودن ریزش شبکه معتبر است چراکه در این نوع از ریزش شبکه ها توان راکتیو تابعی از دامنه ولتاژ و توان حقیقی تابعی از فرکانس است. بار دیگر معادلات مشخصه افتی متداول در زیر آورده شده است:

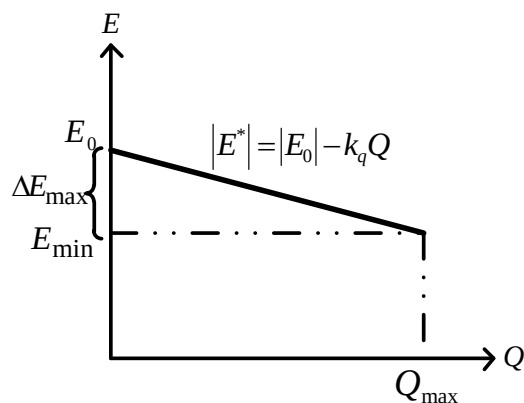
$$f^* = f_0 - k_p P$$

$$|E^*| = |E_0| - k_q Q$$

معادله اول به عنوان روش افی فرکانس متداول و معادله دوم به عنوان روش افی ولتاژ متداول شناخته می‌شوند. با توجه به معادلات فوق مشخصه‌های افی متداول به ترتیب در شکل‌های (۳-۳) و (۴-۳) نشان داده شده‌اند.



شکل (۳-۳): مشخصه افی فرکانس متداول [۹].



شکل (۴-۳): مشخصه افی ولتاژ متداول [۹].

در واقع در این دو مشخصه به ترتیب فرکانس اینورتر تابعی از توان حقیقی و دامنه ولتاژ اینورتر به صورت تابعی از توان راکتیو هستند که با شیب ثابت افت داده می‌شوند [۴, ۱۴]. از این رو این نوع روش افی در ریزشکه‌های ولتاژ پایین که خطوط تغذیه دارای خطوط تغذیه غالباً مقاومتی هستند، به دلیل رابطه بین توان حقیقی و ولتاژ و رابطه بین توان راکتیو و فرکانس معتبر نیستند. به طور خلاصه موانع استفاده از روش افی متداول در ریزشکه‌های ولتاژ پایین در زیر آورده شده است:

- روش افی متداول برای سیستم‌هایی با نسبت مقاومت به راکتانس پایین معتبر هستند، درحالی‌که سیستم‌های ولتاژ پایین دارای خطوط تغذیه غالباً مقاومتی هستند و در آن‌ها برخلاف سیستم‌های با راکتانس بالا توان حقیقی به ولتاژ و توان راکتیو به فرکانس وابسته است.

- به دلیل اینکه در شبکه‌های ولتاژ پایین کنترل توان حقیقی و راکتیو بین منابع تولید پراکنده به علت مقاومت بالای خطوط تغذیه به هم وابسته هستند لذا روش افی متداول می‌تواند دارای عملکرد نامناسبی باشد.

- تقسیم توان راکتیو توسط این روش وابسته به امپدانس خط تغذیه است لذا عدم تطبیق امپدانس خطوط تغذیه منابع تولید پراکنده، تقسیم نادرست توان راکتیو را سبب می‌شود [۱۸].

روش افی متداول به اندازه‌گیری توان حقیقی و راکتیو لحظه‌ای خروجی هر اینورتر نیاز دارند، که این توان‌ها توسط فیلترهای پایین گذر عبور داده می‌شوند تا مقدار متوسط آن‌ها در کنترل مشخصه افی استفاده شود. به عبارت دیگر P و Q در معادله مشخصه افی متداول به ترتیب مقادیر متوسط توان‌های حقیقی و راکتیو هستند [۴].

کنترل منابع تولید پراکنده در مرجع ساکن^۹ انجام می‌شود، بنابراین از تبدیل کلارک^{۱۰} برای تبدیل متغیرهای ولتاژ و جریان از قالب abc به $\alpha\beta$ استفاده می‌شود [۳۸]. برای محاسبه توان‌های حقیقی و راکتیو لحظه‌ای از تبدیل کلارک استفاده می‌شود، از این‌رو هر یک از متغیرهای سیستم از قبیل ولتاژ خازن فیلتر LC و جریان خروجی در مرجع ساکن محاسبه می‌شوند، لذا مؤلفه‌های $\alpha-\beta$ جریان و ولتاژ خروجی اینورتر به صورت روابط (۳-۴۱) و (۳-۴۲) است:

9- Stationary
10- Clark Transformation

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (41-3)$$

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (42-3)$$

توان حقیقی و راکتیو لحظه‌ای سه فاز با استفاده از معادلات فوق به ترتیب به صورت روابط (43-3) و (44-3) به دست می‌آیند:

$$p = \frac{3}{2} (v_{o\alpha} i_{o\alpha} + v_{o\beta} i_{o\beta}) \quad (43-3)$$

$$q = \frac{3}{2} (v_{o\alpha} i_{o\beta} - v_{o\beta} i_{o\alpha}) \quad (44-3)$$

اساس کار تعیین مشخصات ولتاژ مرجع در شکل (3-5) آمده است که در این شکل توان‌های لحظه‌ای p و q از فیلتر پایین گذر با ثابت زمانی τ و با تابع تبدیل (45-3) عبور داده می‌شوند:

$$\frac{1}{\tau s + 1} \quad (45-3)$$

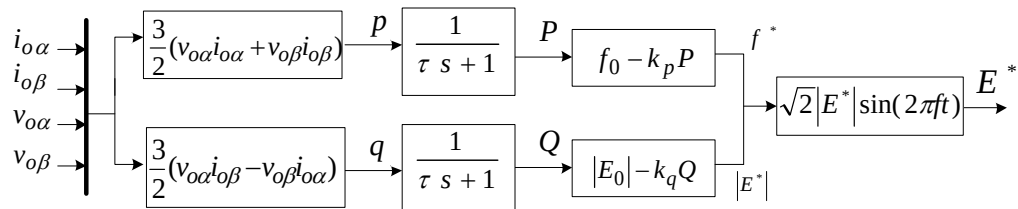
بنابراین توان‌های حقیقی و راکتیو متوسط به صورت روابط (46-3) و (47-3) به دست می‌آیند:

$$P = \frac{1}{\tau s + 1} p \quad (46-3)$$

$$Q = \frac{1}{\tau s + 1} q \quad (47-3)$$

بنابراین با عبور دادن توان‌های حقیقی و راکتیو لحظه‌ای از فیلتر پایین گذر تنها مؤلفه dc توان‌ها باقی می‌ماند و مؤلفه ac توان‌ها حذف می‌شود [39]. با توجه به روابط (41-3) الی (47-3) و

معادله مشخصه روش افقی متداول، بلوک دیاگرام کنترلی برای ایجاد ولتاژ مرجع جهت کنترل اینورترهای منابع تولید پراکنده در شکل (۵-۳) نشان داده شده است.



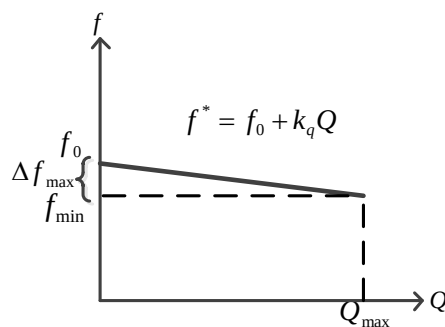
شکل (۵-۳): بلوک دیاگرام ولتاژ مرجع به دست آمده از روش افقی متداول [۳۹].

۵-۳- روش افقی مخالف

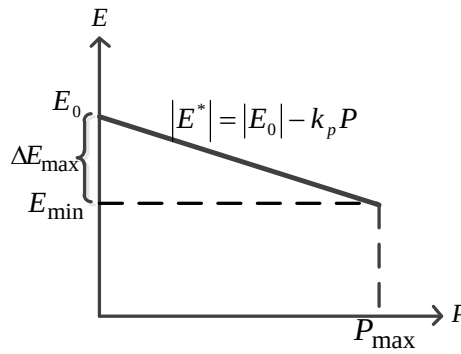
در شبکه‌های ولتاژ پایین با خطوط تغذیه غالباً مقاومتی که به عنوان نمونه در ردیف اول جدول (۱-۳) نسبت مقاومت به راکتانس ۷/۷ در نظر گرفته شده است و همچنین به دلیل اینرسی کم، توان راکتیو تابعی از فرکانس و توان حقیقی تابعی از دامنه ولتاژ است [۱۴]. مشخصه‌های آن‌ها به ترتیب در شکل‌های (۶-۳) و (۷-۳) نشان داده شده است:

$$f^* = f_0 + k_q Q$$

$$|E^*| = |E_0| - k_p P$$



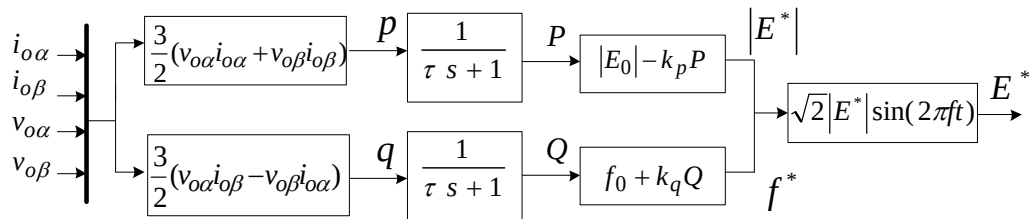
شکل (۶-۳): مشخصه افقی فرکانس مخالف.



شکل (۷-۳): مشخصه افقی ولتاژ مخالف.

در روش افقی مخالف (دامنه ولتاژ-توان حقیقی، فرکانس-توان راکتیو) با توجه به اینکه فرکانس پارامتری سراسری است تقسیم توان راکتیو به صورت صحیح انجام می شود. درحالی که با توجه به محلی بودن پارامتر ولتاژ تقسیم توان حقیقی تحت تأثیر امپدانس خطوط تغذیه است.

با در نظر گرفتن معادلات (۳-۴۱) الی (۳-۴۷) و معادلات مشخصه روش افقی مخالف نشان داده شده در شکل های (۳-۶) و (۳-۷)، دامنه و فرکانس ولتاژ مرجع اینورتر با استفاده از روش افقی مخالف به دست می آید که در شکل (۳-۸) نشان داده شده است.



شکل (۳-۸): بلوک دیاگرام ولتاژ مرجع به دست آمده از روش افقی مخالف [۳۹].

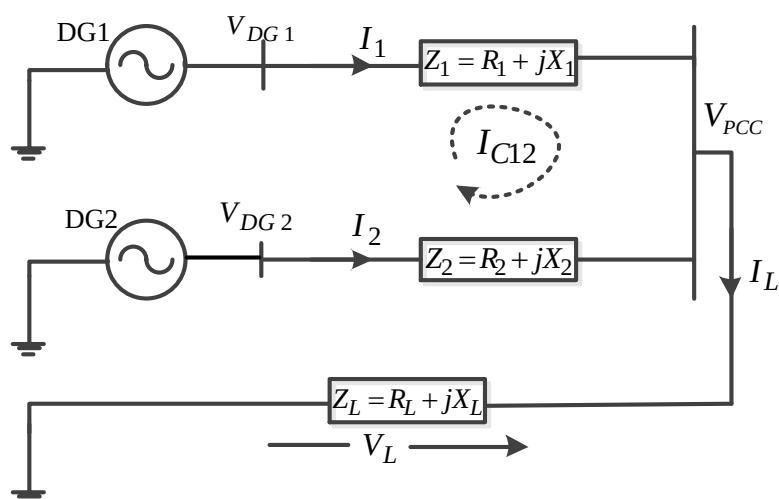
در جدول (۳-۴) کاربرد روش های افقی متداول و مخالف در ریزشبه های ولتاژ پایین به طور مختصر با یکدیگر مقایسه شده اند. با توجه به نتایج جدول زیر می توان دریافت که مزیت مهم روش افقی مخالف در مقایسه با روش افقی متداول در شبکه های ولتاژ پایین کنترل مستقیم ولتاژ است [۹].

جدول (۳-۴): مقایسه کاربرد روش‌های افتی متداول و مخالف در ریزشبه‌های ولتاژ پایین [۹].

روش افتی متداول ($P-f, Q-E$)	روش افتی مخالف ($P-E, Q-f$)	کاربرد
بله	خیر	سازگاری با سطح ولتاژ بالا
بله	خیر	سازگاری با ژنراتورهای دوار
خیر	بله	کنترل مستقیم ولتاژ
بله	خیر	پخش توان حقیقی

۳-۶- تحلیل تقسیم جریان و جریان چرخشی

در ریزشبه‌های جزیره‌ای شامل منابع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر در صورت وجود عدم تطبیق ولتاژ خروجی اینورترها جریان چرخشی بین منابع جاری می‌گردد [۴۰]. در شبکه‌های قدرت رایج وجود امپدانس بزرگ در بین ژنراتورها مانع از جاری شدن جریان چرخشی می‌شود اما در ریزشبه‌ها به دلیل وجود امپدانس کوچک در بین منابع و به‌خصوص در ریزشبه‌های مقاومتی با اندوکتانس خط کوچک مسئله جریان چرخشی برجسته است [۲۲]. بنابراین عدم تقسیم صحیح توان و ولتاژهای خروجی متفاوت می‌تواند موجب جریان چرخشی در میان اینورترها شود [۱۱] که این جریان چرخشی ممکن است از جریان چرخشی نامی منابع بزرگ‌تر شود و درنهایت موجب اضافه جریان منابع، آسیب رساندن به منبع، کاهش کیفیت عملکرد آن و افزایش تلفات شود. لذا لازم است جریان چرخشی به حداقل برسد. کنترل افتی می‌تواند ریزشبه را در مقابل جریان چرخشی محافظت کند [۱۱، ۳۸، ۴۱، ۴۲]. مدار معادل یک ریزشبه جزیره‌ای مطابق شکل (۳-۹) به‌منظور بررسی دقیق‌تر جریان چرخشی در میان منابع تولید پراکنده در نظر گرفته می‌شود.



شکل (۹-۳): مدار معادل ریزشکه جزیره‌ای مبتنی بر اینورتر.

در شکل (۹-۳)، اگر $V_{DG1} > V_{DG2}$ باشد، جریان چرخشی از منبع ۱ (DG1) به منبع ۲ (DG2) است، I_1 و I_2 به ترتیب جریان خروجی منابع ۱ و ۲ هستند. مطالعات تقسیم جریان و جریان چرخشی بر اساس ولتاژهای خروجی اینورترها و امپدانس خطوط تغذیه منابع در جدول (۵-۳) آورده شده است.

جدول (۵-۳): تقسیم جریان و جریان چرخشی [۴۰].

حالت	V_{DG1}, V_{DG2}	Z_1, Z_2	I_1, I_2	IC_{12}/IC_{21}
۱	مساوی	مساوی	مساوی	صفر
۲	مساوی	متفاوت	متفاوت	صفر
۳	متفاوت	مساوی	متفاوت	غیر صفر
۴	متفاوت	متفاوت	متفاوت	غیر صفر

با اعمال قانون ولتاژ کیرشهف (KVL) در شکل (۹-۳) معادلات (۴۸-۳) و (۴۹-۳) به دست می‌آید:

$$V_{DG1} - I_1 Z_1 - I_L Z_L = 0 \quad (۴۸-۳)$$

$$V_{DG2} - I_2 Z_2 - I_L Z_L = 0 \quad (۴۹-۳)$$

با استفاده از معادلات (۴۸-۳) و (۴۹-۳) جریان خروجی اینورترها می‌تواند به صورت رابطه (۵۰-۳) و (۵۱-۳) بیان شود:

$$I_1 = \frac{(Z_2 + Z_L)V_{DG1} - Z_L V_{DG2}}{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_L + Z_2 Z_L} \quad (۵۰-۳)$$

$$I_2 = \frac{(Z_1 + Z_L)V_{DG2} - Z_L V_{DG1}}{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_L + Z_2 Z_L} \quad (۵۱-۳)$$

بنابراین جریان چرخشی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$I_{C12} = -I_{C21} = \frac{V_{DG1} - V_{DG2}}{Z_1 + Z_2} \quad (۵۲-۳)$$

$$= \frac{I_1 - I_2}{2} \quad \text{if } (Z_1 = Z_2) \quad (۵۳-۳)$$

$$= \frac{I_1 Z_1 - I_2 Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad \text{if } (Z_1 \neq Z_2) \quad (۵۴-۳)$$

در صورتی که بتوان از $Z_1 Z_2$ صرف نظر کرد با استفاده از معادلات (۵۰-۳) الی (۵۴-۳) می‌توان جریان خروجی واحدها را به صورت زیر بیان کرد:

$$I_1 = \underbrace{\frac{Z_2 V_{DG1}}{Z_1 Z_L + Z_2 Z_L}}_{I_L(I_1)} + \underbrace{\frac{V_{DG1} - V_{DG2}}{Z_1 + Z_2}}_{I_{C12}} \quad (۵۵-۳)$$

$$I_2 = \underbrace{\frac{Z_1 V_{DG2}}{Z_1 Z_L + Z_2 Z_L}}_{I_L(I_2)} - \underbrace{\frac{V_{DG2} - V_{DG1}}{Z_1 + Z_2}}_{I_{C21}} \quad (۵۶-۳)$$

با توجه به دو معادله (۵۵-۳) و (۵۶-۳)، جریان خروجی هریک از واحدها شامل دو مؤلفه است: (۱) جریان چرخشی که از اختلاف ولتاژ بین واحدها سبب می‌شود و (۲) جریان بار که متناسب با مقدار

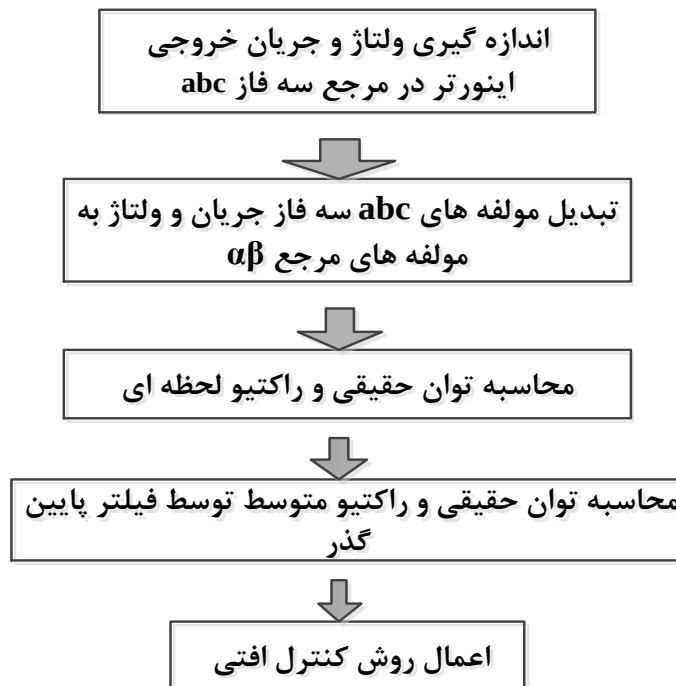
نامی توان واحدها تقسیم می‌شود [۴۰, ۴۳]. همچنین از معادله (۳-۵۲) می‌توان نتیجه گرفت که جریان چرخشی علاوه بر اختلاف ولتاژ خروجی به امپدانس نیز وابسته است [۱۲].

تا زمانی که جریان چرخشی قابل ملاحظه‌ای بین واحدها وجود داشته باشد تقسیم توان نیز به‌طور صحیح انجام نمی‌شود. از این رو به‌منظور محقق شدن تقسیم صحیح توان باید جریان چرخشی حذف و یا کاهش یابد [۴۳]. با توجه به معادله (۳-۵۲) اگر ولتاژ خروجی دو اینورتر یکسان باشد جریان چرخشی صفر خواهد بود [۴۰, ۴۳]، به عبارت دیگر در صورتی که تقسیم جریان به‌صورت صحیح انجام شود جریان چرخشی صفر خواهد بود [۴۰].

با توجه به معادلات (۳-۳) و (۳-۴) و (۳-۵۲) اگر ولتاژهای خروجی دو واحد دقیقاً یکسان باشند و امپدانس خطوط تغذیه مساوی باشند (واحدها با مقدار نامی توان یکسان)، تقسیم توان به‌صورت صحیح انجام می‌شود. تحت چنین شرایطی بدون توجه به نوع امپدانس خط (که آیا مقاومتی، اندوکتیو و یا مختلط است یا خیر) جریان چرخشی صفر و تقسیم توان صحیح محقق می‌شود [۴۳]. در نتیجه اگر مشخصات و امپدانس‌های وابسته به اینورترها مساوی باشند جریان چرخشی کاهش می‌یابد [۳۸].

۳-۷- تقسیم توان در ریز شبکه جزیره‌ای مبتنی بر اینورتر کنترل شده با روش افتی

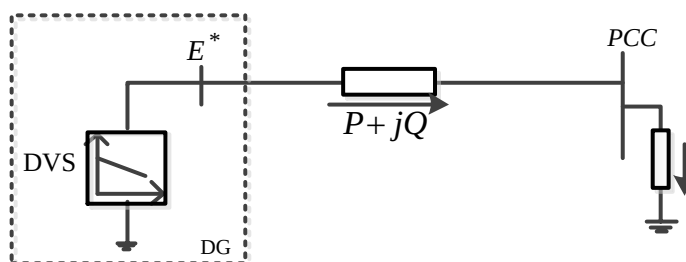
در این بخش با فرض اینکه برای کنترل منابع تولید پراکنده از روش کنترل افتی متداول استفاده می‌شود، در بخش ۳-۷-۱ به مراحل پیاده‌سازی این روش کنترلی پرداخته شده است. همچنین در بخش‌های ۳-۷-۲ و ۳-۷-۳ به ترتیب اثر عدم تطبیق امپدانس خطوط تغذیه و عوامل متعدد تاثیر گذار بر تقسیم توان راکتیو با در نظر گرفتن روش کنترل افتی متداول بررسی شده است.



شکل (۳-۱۰): مراحل پیاده سازی روش کنترل افی [۹].

۳-۷-۱- الگوریتم تقسیم توان به روش کنترل افی متداول

مراحل پیاده سازی روش کنترل افی در ریزشبه جزیره ای مبتنی بر اینورتر در شکل (۳-۱۰) نشان داده شده است. این مراحل از بلوک دیاگرام روش کنترل افی متداول نشان داده شده در شکل (۳-۵) گرفته شده است.



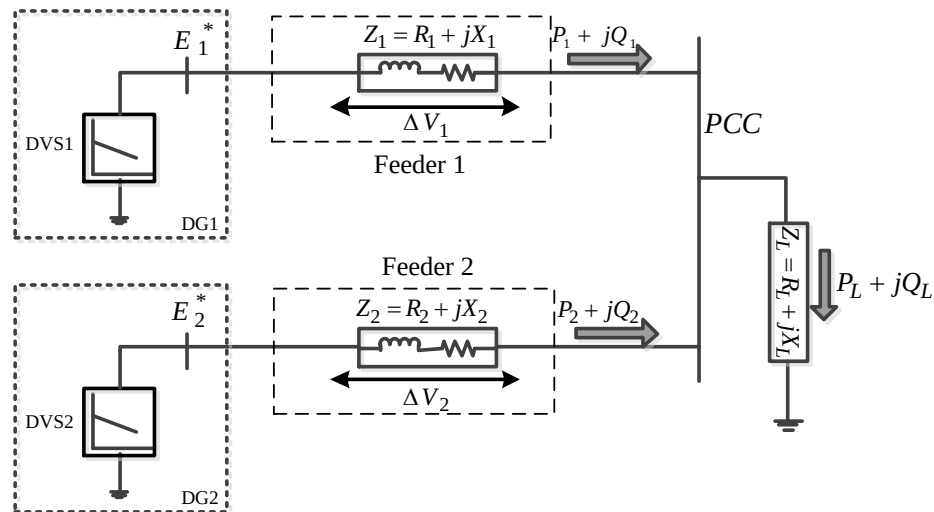
شکل (۳-۱۱): مدار معادل منبع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر کنترل شده با روش کنترل افی (DVS) [۴۴].

لازم به ذکر است که در تحلیل تئوری این پایان نامه به دلیل اینکه فرکانس سوئیچ زنی بسیار بزرگتر از فرکانس اصلی ریزشبه است منبع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر با منبع ولتاژ کنترل شده

مدل شده است [۴۲]. بنابراین مدار معادل منبع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر کنترل شده با روش کنترل افتی^{۱۱} (DVS) به صورت شکل (۳-۱۱) نمایش داده می شود.

۳-۷-۲- اثر عدم تطبیق امپدانس بر تقسیم توان

در این بخش فرض می شود اینورترها توسط روش افتی متداول کنترل می شوند، در این صورت تقسیم توان حقیقی با توجه به سراسری بودن فرکانس به صورت صحیح انجام می شود، درحالی که صحت تقسیم توان راکتیو تحت تأثیر امپدانس خط تغذیه است. بنابراین جهت تحلیل اثر عدم تطبیق امپدانس خطوط تغذیه بر صحت تقسیم توان راکتیو از مطالعات افت ولتاژ بهره گرفته شده است، که در ادامه به این موضوع پرداخته شده است.



شکل (۳-۱۲): مدار معادل ریزشبه جزیره ای با دو منبع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر کنترل شده با روش افتی.

جهت تحلیل اثر امپدانس خط تغذیه بر تقسیم توان یک ریزشبه ساده شامل دو منبع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر و دو خط تغذیه با امپدانس های متفاوت و یک بار متصل به PCC، مطابق آنچه در شکل (۳-۱۲) نشان داده شده در نظر گرفته می شود. طبق معادله (۳-۳۱) افت ولتاژ روی

11- Droop-Controlled Voltage Source

امپدانس خطوط تغذیه منبع تولید پراکنده ۱ (ΔV_1) و منبع تولید پراکنده ۲ (ΔV_2) به ترتیب به صورت روابط (۵۷-۳) و (۵۸-۳) به دست می آیند:

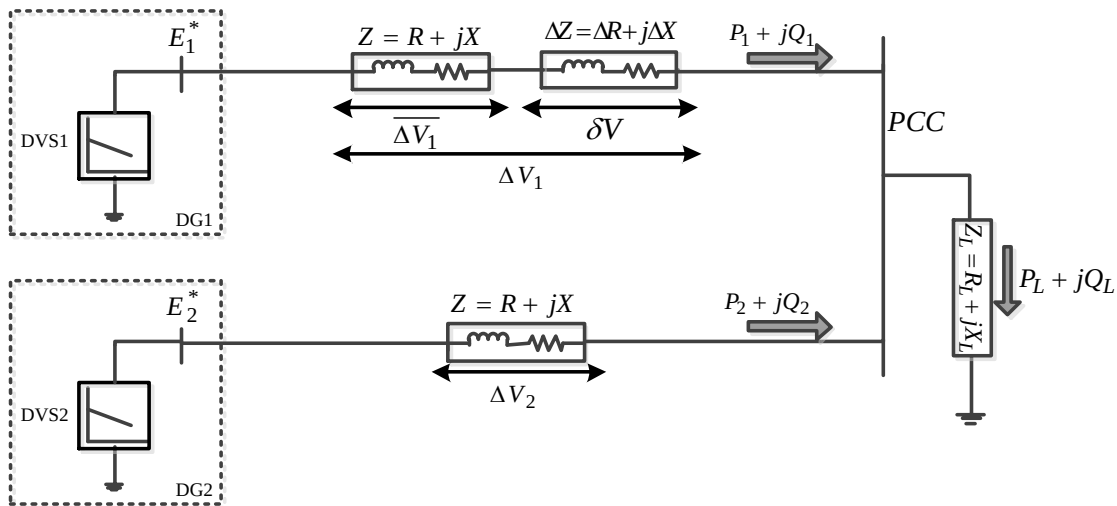
$$\Delta V_1 \approx \frac{R_1 P_1 + X_1 Q_1}{E_0} \quad (۵۷-۳)$$

$$\Delta V_2 \approx \frac{R_2 P_2 + X_2 Q_2}{E_0} \quad (۵۸-۳)$$

که R_1, X_1, R_2, X_2 به ترتیب مقاومت و راکتانس خطوط تغذیه منابع ۱ و ۲ هستند. عدم تطبیق راکتانس (ΔX) و مقاومت (ΔR) خطوط تغذیه به ترتیب به صورت (۵۹-۳) و (۶۰-۳) در نظر گرفته شده است:

$$\Delta X = X_1 - X_2 \quad (۵۹-۳)$$

$$\Delta R = R_1 - R_2 \quad (۶۰-۳)$$



شکل (۱۳-۳): مدار معادل ریزشکه جزیره‌ای با دو منبع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر کنترل شده با روش اف‌تی با در نظر گرفتن عدم تطبیق امپدانس خطوط تغذیه [۱۰].

با در نظر گرفتن امپدانس خط تغذیه منبع تولید پراکنده ۲ به عنوان خط تغذیه مرجع ($R = R_2, X = X_2$) اختلاف امپدانس دو خط تغذیه در شکل (۱۳-۳) به صورت امپدانس ΔZ در خروجی منبع ۱ نشان داده شده است. طبق شکل (۱۳-۳) و با در نظر گرفتن معادلات (۵۹-۳) و (۶۰-۳)

۶۰، افت ولتاژ در طول امپدانس خط تغذیه ۱ و ۲ با استفاده از روابط (۵۷-۳) و (۵۸-۳) به ترتیب به صورت (۶۱-۳) و (۶۲-۳) به دست می آید.

$$\begin{aligned}\Delta V_1 &\approx \frac{(X + \Delta X)Q_1 + (R + \Delta R)P_1}{E_0} \\ &= \frac{XQ_1 + RP_1}{E_0} + \frac{\Delta XQ_1 + \Delta RP_1}{E_0} \quad (۶۱-۳) \\ &= \overline{\Delta V_1} + \delta V\end{aligned}$$

$$\Delta V_2 \approx \frac{RP_2 + XQ_2}{E_0} \quad (۶۲-۳)$$

در روابط (۶۱-۳) و (۶۲-۳)، ΔV_1 افت ولتاژ کل در طول امپدانس خط تغذیه ۱ است که با $X + \Delta X$ و $R + \Delta R$ نمایش داده می شود و $\overline{\Delta V_1}$ افت ولتاژ در طول خط تغذیه ۱ به دلیل مقاومت و راکتانس مرجع R و X است. δV ، عدم تطبیق افت ولتاژ بین خط تغذیه ۱ و ۲ به دلیل وجود عدم تطبیق در امپدانس های خط تغذیه (ΔR و ΔX) را نشان می دهد که سبب تقسیم نامساوی توان راکتیو بین منابع تولید پراکنده متعدد می شود [۱۰].

در صورتی که واحدها دارای مقدار نامی توان نامساوی باشند، تقسیم توان باید متناسب با توان نامی واحدها صورت گیرد که در این صورت تقسیم توان تناسبی صحیح محقق می شود [۴۵، ۵]. از این رو همان گونه که در روابط (۶۳-۳) و (۶۴-۳) آورده شده است، به منظور تحقق تقسیم توان تناسبی باید راکتانس و مقاومت خط تغذیه به ترتیب متناسب با عکس مقادیر نامی P و Q اصلاح شوند [۵].

$$R_1 P_1^{rated} = R_2 P_2^{rated} \quad (۶۳-۳)$$

$$X_1 Q_1^{rated} = X_2 Q_2^{rated} \quad (۶۴-۳)$$

که P_1^{rated} ، Q_1^{rated} ، P_2^{rated} و Q_2^{rated} به ترتیب توان حقیقی و راکتیو نامی منابع تولید پراکنده ۱ و ۲ هستند. با توجه به روابط (۶۳-۳) و (۶۴-۳)، اختلاف افت ولتاژی که می‌تواند سبب عدم تقسیم صحیح توان راکتیو شود به‌طور مستقیم به‌واسطه عدم تطبیق در امپدانس خطوط تغذیه (روابط (۳-۵۹) و (۶۰-۳)) به دست نمی‌آیند. بنابراین با در نظر گرفتن امپدانس خط تغذیه منبع تولید پراکنده ۲ به‌عنوان مرجع ($R = R_2$, $X = X_2$) و R_1 و X_1 به‌صورت زیر محاسبه می‌شوند [۵]:

$$R_1 = \frac{P_2^{rated}}{P_1^{rated}} R + \Delta R \quad (۵۶-۳)$$

$$X_1 = \frac{Q_2^{rated}}{Q_1^{rated}} X + \Delta X \quad (۵۷-۳)$$

با توجه به روابط فوق و با استفاده از (۵۷-۳) و (۵۸-۳)، افت ولتاژ روی امپدانس خط تغذیه ۱ (ΔV_1) و خط تغذیه ۲ (ΔV_2) به ترتیب به‌صورت روابط (۶۷-۳) و (۶۸-۳) قابل‌بیان هستند:

$$\Delta V_1 \approx \frac{\left(\frac{Q_2^{rated}}{Q_1^{rated}} X + \Delta X\right) Q_1 + \left(\frac{P_2^{rated}}{P_1^{rated}} R + \Delta R\right) P_1}{E_0} \quad (۶۷-۳)$$

$$\Delta V_2 \approx \frac{R P_2 + X Q_2}{E_0} \quad (۶۸-۳)$$

در صورتی که بتوان به گونه‌ای عدم تطبیق امپدانس‌های خط تغذیه (ΔR و ΔX) را که در رابطه (۳-۶۷) لحاظ شده‌اند جبران کرد، رابطه (۶۷-۳) به رابطه (۶۹-۳) تبدیل می‌شود:

$$\Delta V_1 \approx \frac{\frac{Q_2^{rated}}{Q_1^{rated}} X Q_1 + \frac{P_2^{rated}}{P_1^{rated}} R P_1}{E_0} \quad (۶۹-۳)$$

با توجه به اینکه با استفاده از روش افتی فرکانس متداول تقسیم توان حقیقی به‌طور صحیح انجام

می‌شود و هر منبع متناسب با توان نامی خود در تغذیه بار سهیم است یعنی: $\frac{P_2^{rated}}{P_1^{rated}} = \frac{P_2}{P_1}$ ، رابطه

(۶۹-۳) به رابطه (۷۰-۳) تغییر می‌یابد:

$$\Delta V_1 \approx \frac{\frac{Q_2^{rated}}{Q_1^{rated}} XQ_1 + RP_2}{E_0} \quad (۷۰-۳)$$

از این رو با در نظر گرفتن رابطه (۶۰-۳) و (۶۲-۳)، می‌توان نتیجه گرفت که، در صورتی که افت

ولتاژ روی امپدانس خطوط تغذیه واحدها تطبیق داده شوند، تقسیم توان به‌صورت تناسبی و صحیح

توسط منابع انجام می‌شود. این واقعیت به‌طور ریاضی می‌تواند به‌صورت زیر بیان شود:

$$\Delta V_1 = \Delta V_2 \quad \Leftrightarrow \quad \frac{Q_2}{Q_1} = \frac{Q_2^{rated}}{Q_1^{rated}}$$

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با جبران عدم تطبیق افت ولتاژ روی خطوط تغذیه منابع، در هر دو

حالت منابع با ظرفیت نامی یکسان و متفاوت، تقسیم صحیح توان راکتیو حاصل می‌شود [۵].

در نتیجه، در صورتی که منابع دارای مقادیر نامی توان یکسان و متعاقباً ضرایب افتی یکسان

باشند، امپدانس خطوط تغذیه یکسان باعث تقسیم صحیح توان راکتیو می‌شود. اما زمانی که منابع

دارای ظرفیت توان متفاوت هستند، حتی اگر امپدانس خطوط تغذیه مساوی باشند، واحد با تغذیه

توان بیشتر نسبت به واحد با تغذیه توان کمتر افت ولتاژ بیشتری را در طول خط تغذیه خود موجب

می‌شود. در این شرایط بدترین حالت زمانی است که واحد با ظرفیت توان بزرگ‌تر از طریق یک خط

تغذیه با امپدانس بزرگ‌تر به بار متصل شود.

۳-۷-۳- عوامل مؤثر بر تقسیم توان راکتیو

در ادامه با فرض استفاده از روش افتی ولتاژ متداول جهت کنترل تقسیم توان راکتیو در ریزشبکه جزیره‌ای شامل دو منبع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر مطابق سیستم نشان داده شده در شکل (۳-۱۲)، عوامل مؤثر بر صحت تقسیم توان راکتیو بررسی شده است. در ابتدا جهت انجام محاسبات ساده امپدانس خطوط تغذیه به صورت کاملاً اندوکتیو در نظر گرفته شده است و رابطه‌ای شامل عوامل متعدد اثرگذار بر تقسیم توان راکتیو به دست آورده شده است و سپس مراحل انجام محاسبات برای خط تغذیه کاملاً اندوکتیو به خط تغذیه با امپدانس مختلط تعمیم داده می‌شود و رابطه کلی برای بررسی عوامل مؤثر بر تقسیم توان راکتیو حاصل می‌شود. بر این اساس معادله مشخصه افتی ولتاژ برای کنترل هر یک از منابع تولید پراکنده ۱ و ۲ به ترتیب به صورت معادلات (۳-۷۱) و (۳-۷۲) در نظر گرفته می‌شود:

$$E_1^* = E_0 - k_q Q_1 \quad (۳-۷۱)$$

$$E_1^* = E_0 - k_q Q_2 \quad (۳-۷۲)$$

با توجه به اینکه در این پژوهش منابع با مقدار نامی توان یکسان فرض شده‌اند در نتیجه ضرایب مشخصه افتی منابع نیز یکسان در نظر گرفته می‌شود. با کم کردن طرفین روابط (۳-۷۱) و (۳-۷۲) از یکدیگر رابطه (۳-۷۳) حاصل می‌شود:

$$E_1^* - E_2^* = -k_q Q_1 + k_q Q_2 \quad (۳-۷۳)$$

با توجه به رابطه (۳-۳۱) که در بخش ۳-۲-۳ اثبات شد، افت ولتاژ روی امپدانس خط تغذیه کاملاً اندوکتیو به صورت معادله (۳-۷۴) تقریب زده می‌شود:

$$\Delta V \approx \frac{XQ}{E_0} \quad (۳-۷۴)$$

که X راکتانس خط تغذیه، Q توان خروجی منبع تولید پراکنده، E_0 دامنه ولتاژ نامی و ΔV افت ولتاژ روی امپدانس خط تغذیه است. از این رو افت ولتاژ روی امپدانس خط تغذیه دو منبع به صورت رابطه (۷۵-۳) و (۷۶-۳) به دست می آید:

$$\Delta V_1 \approx \frac{X_1 Q_1}{E_0} ; \Delta V_1 = E_1^* - V_{PCC} \quad (۷۵-۳)$$

$$\Delta V_2 \approx \frac{X_2 Q_2}{E_0} ; \Delta V_2 = E_2^* - V_{PCC} \quad (۷۶-۳)$$

با کم کردن طرفین روابط (۷۵-۳) و (۷۶-۳) می توان نوشت:

$$E_1^* - E_2^* = \frac{X_1 Q_1}{E_0} - \frac{X_2 Q_2}{E_0} \quad (۷۷-۳)$$

حال با مساوی قرار دادن طرف راست روابط (۷۳-۳) و (۷۷-۳) و با فرض $Q_2 = Q_L - Q_1$ ، که Q_L بیانگر توان راکتیو بار است، می توان نوشت:

$$\frac{X_1 Q_1}{E_0} - \frac{X_2 (Q_L - Q_1)}{E_0} = -k_q Q_1 + k_q (Q_L - Q_1)$$

$$Q_1 \left(\frac{X_1}{E_0} + \frac{X_2}{E_0} + 2k_q \right) = Q_L \left(k_q + \frac{X_2}{E_0} \right)$$

$$Q_1 = \frac{k_q + \frac{X_2}{E_0}}{\frac{X_1}{E_0} + \frac{X_2}{E_0} + 2k_q} Q_L$$

با ضرب صورت و مخرج کسر فوق در E_0 رابطه (۷۸-۳) برای توان راکتیو منبع تولید پراکنده اول به صورت رابطه (۷۸-۳) به دست می آید:

$$Q_1 = \frac{k_q E_0 + X_2}{X_1 + X_2 + 2k_q E_0} Q_L \quad (78-3)$$

و به طور مشابه برای توان راکتیو منبع تولید پراکنده دوم می توان نوشت:

$$Q_2 = \frac{k_q E_0 + X_1}{X_1 + X_2 + 2k_q E_0} Q_L \quad (79-3)$$

با استفاده از روابط (78-3) و (79-3) نسبت توان راکتیو دو منبع به صورت رابطه (80-3) است:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{X_2 + k_q E_0}{X_1 + k_q E_0} \quad (80-3)$$

بنابراین طبق رابطه فوق در صورتی که خطوط کاملاً راکتیو باشد، تقسیم توان راکتیو به ضریب مشخصه افتی ولتاژ متداول و راکتانس خط تغذیه وابسته است. با توجه به روابط (78-3) و (79-3) اختلاف توان راکتیو دو واحد و یا به عبارت دیگر خطای توان راکتیو به صورت رابطه (81-3) به دست می آید:

$$Q_1 - Q_2 = \frac{(X_2 - X_1)}{X_1 + X_2 + 2k_q E_0} Q_L \quad (81-3)$$

حال مراحل محاسبات انجام شده را می توان به خطوط تغذیه دارای امپدانس مختلط $Z = R + jX$ تعمیم داد. بنابراین توان راکتیو دو منبع و همچنین خطای توان راکتیو آن ها در ریزشکه جزیره ای با خطوط تغذیه مختلط به ترتیب در معادلات (82-3) و (83-3) و (84-3) نشان داده شده اند:

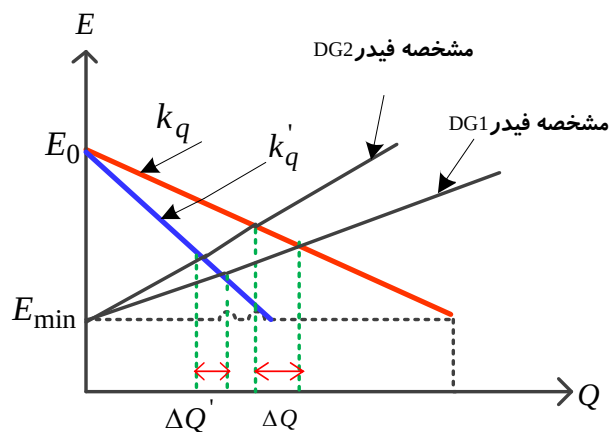
$$Q_1 = \frac{R_2 P_L + (k_q E_0 + X_2) Q_L - (R_1 + R_2) P_1}{X_1 + X_2 + 2k_q E_0} \quad (82-3)$$

$$Q_2 = \frac{R_1 P_L + (k_q E_0 + X_1) Q_L - (R_1 + R_2) P_2}{X_1 + X_2 + 2k_q E_0} \quad (83-3)$$

$$Q_1 - Q_2 = \frac{(R_2 - R_1)P_L + (X_2 - X_1)Q_L - (R_1 + R_2)(P_1 - P_2)}{X_1 + X_2 + 2k_q E_0} \quad (۸۴-۳)$$

که در نتیجه می‌توان گفت در صورتی که خطوط تغذیه مختلط باشد، خطای توان راکتیو علاوه بر ضریب مشخصه افتی و راکتانس خط تغذیه، به مقاومت خط تغذیه و توان حقیقی واحدها و توان بار نیز وابسته است [۱۵، ۳۵]، که در این پایان‌نامه جبران عامل عدم تطبیق امپدانس خط تغذیه مورد هدف است.

برای بررسی دقیق‌تر اثر ضریب مشخصه افتی بر خطای توان راکتیو شکل (۱۴-۳) در نظر گرفته شده است.



شکل (۱۴-۳): عملکرد تقسیم توان راکتیو در ریز شبکه جزیره‌ای شامل دو اینورتر با مشخصه‌های خط تغذیه متفاوت [۱۵].

با توجه به رابطه (۸۴-۳)، در صورتی که ضریب مشخصه افتی واحدها افزایش یابد خطای تقسیم توان راکتیو کاهش می‌یابد. این واقعیت در شکل (۱۴-۳) نیز قابل رؤیت است. همان‌طور که از شکل (۳-۱۴) مشاهده می‌شود، با افزایش ضریب مشخصه افتی ولتاژ $k'_q > k_q$ ، خطای توان راکتیو کاهش می‌یابد یعنی $\Delta Q' < \Delta Q$ خواهد شد. به عبارت دیگر با افزایش شیب مشخصه افتی ولتاژ تقسیم توان راکتیو توسط منابع تولید پراکنده بهبود می‌یابد [۱۵].

یکی از موانعی که برای روش افی ولتاژ متداول مطرح است مصالحه بین صحت تقسیم توان راکتیو و افت ولتاژ است [۳۵]. این بدان معنی است که با ضریب افی بزرگتر تقسیم توان راکتیو صحیحتر انجام شود اما این می‌تواند مسائلی چون ولتاژ بار کوچک و همچنین تغییر تقاضای توان راکتیو به علت تغییر ولتاژ و غیره را منجر شود و این موارد نامطلوب هستند. بنابراین ضریب افی بزرگ نمی‌تواند به عنوان یک انتخاب مناسب جهت بهبود دقت تقسیم توان راکتیو به شمار آید [۱۵]. در مرجع [۵] با توجه به تحقق تقسیم صحیح توان حقیقی با استفاده از روش افی فرکانس-توان، با پیشنهاد روش کنترل افی ولتاژ-توان راکتیو تطبیقی تقسیم توان راکتیو به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود داده شده است.

۳-۸- جمع بندی

در این فصل تئوری مربوط به تقسیم توان حقیقی و راکتیو در ریزشبکه‌های با امپدانس خطوط تغذیه مختلف و همچنین روش‌های افی متناسب با آن‌ها به طور مفصل مورد بحث و بررسی قرار گرفت. روش افی متداول و مخالف به عنوان دو روش مورد استفاده در کنترل تقسیم توان در ریزشبکه بررسی شدند و همچنین به بررسی اثر نوع بار بر میزان افت ولتاژ روی امپدانس خط تغذیه پرداخته شد و در نهایت عوامل موثر بر تقسیم توان راکتیو و حقیقی مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به عدم توانایی روش افی متداول در تقسیم صحیح توان راکتیو در ریزشبکه، در فصل بعد به ارائه مفهوم امپدانس مجازی و همچنین کنترل آن جهت حل چالش مذکور پرداخته خواهد شد.

فصل چهارم

**اثر امیدانس مجازی در ریز شبکه‌های جزیره‌ای مبتنی بر اینورتر
کنترل شده با روش اف‌تی**

در این پایان‌نامه از روش افتی متداول که در فصل سوم مورد بررسی قرار گرفت جهت کنترل تقسیم توان بین منابع تولید پراکنده در ریزشبکه جزیره‌ای استفاده می‌شود. اما با توجه به اینکه با استفاده از این روش، تقسیم توان راکتیو تحت تاثیر عدم تطبیق امپدانس خطوط تغذیه منابع تولید پراکنده به صورت نادرست انجام می‌شود از روش امپدانس مجازی برای جبران این عدم تطبیق و همچنین فراهم کردن تقسیم صحیح توان راکتیو استفاده شده است که در این فصل به معرفی و بررسی این روش پرداخته شده است.

۴-۲- تشریح امپدانس مجازی در ریزشبکه‌ها

بر اساس تئوری ارائه شده در بخش ۳-۲-۱ و ۳-۲-۲، در شبکه‌های ولتاژ پایین به علت پایین بودن نسبت راکتانس به مقاومت خط تغذیه و به عبارت دیگر مقاومتی بودن آن استفاده از روش افتی متداول منجر به وابستگی بین پخش توان حقیقی و راکتیو می‌شود [۱۸]، لذا برای حل مسئله وابستگی تقسیم توان حقیقی و راکتیو روش‌هایی نظیر توان حقیقی و راکتیو مجازی [۳، ۴۶] و همچنین روش ولتاژ و فرکانس مجازی [۴۷، ۴۸] پیشنهاد شده است. اما این دو روش نمی‌توانند در همان‌زمان چالش تقسیم نادرست توان را نیز برطرف کنند [۳، ۶، ۱۵، ۱۸، ۲۷]. لازم به ذکر است که استفاده از روش توان حقیقی و راکتیو مجازی معایبی از جمله: ناتوانی تقسیم مستقیم توان حقیقی و راکتیو واقعی و انحراف از محدوده توان نامی منبع تولید پراکنده را شامل می‌شود [۴۷]. مرجع [۴۶] روشی ارائه کرده است که می‌تواند با اصلاح روش توان مجازی به‌طور هم‌زمان کنترل توان‌های حقیقی و راکتیو را از یکدیگر مستقل و دقت تقسیم آن‌ها را بهبود بخشد.

روش دیگری که برای رفع مسئله وابستگی پخش توان حقیقی و راکتیو در شبکه‌های ولتاژ پایین [۱۱] و همچنین مسئله عدم تقسیم صحیح توان ناشی از عدم تطبیق امپدانس‌های خط تغذیه

منابع تولید پراکنده در ریزشبه‌های جزیره‌ای پیشنهاد شده است روش امپدانس مجازی است [۳، ۱۰، ۴۶، ۴۹، ۵۰].

امپدانس مجازی که بدون اتصال فیزیکی در خروجی اینورتر قرار می‌گیرد [۵۱، ۵۲] برای اصلاح و بهبود عملکرد روش‌های افتی پیشنهاد شده است و می‌تواند امپدانس خط تغذیه منابع تولید پراکنده را در مقداری مطلوب تثبیت کند [۶، ۱۴، ۵۲، ۵۳]. امپدانس مجازی می‌تواند با اندازه و زوایای فاز مختلف و به عبارت دیگر با مشخصه‌های مختلفی از جمله سلفی [۱۱، ۱۸]، مقاومتی [۱۴، ۵۴]، سلفی-مقاومتی [۱۰، ۱۲]، خازنی-مقاومتی [۳۲، ۵۵] طراحی شود که از هر یک از حالت‌های مذکور وابسته به نوع امپدانس خطوط تغذیه ریزشبه، نوع روش افتی و اهداف کنترلی می‌توان بهره گرفت. برای مثال، مرجع [۱۴] با استفاده از امپدانس مقاومتی مجازی در ریزشبه جزیره‌ای ولتاژ پایین کنترل شده با روش افتی مخالف طبیعت مقاومتی ریزشبه را افزایش و همچنین عملکرد روش افتی را بهبود داده است.

در مرجع [۱۰] مفهوم امپدانس مجازی مختلط ارائه شده است، که با کنترل تطبیقی امپدانس مجازی به بهبود تقسیم توان راکتیو پرداخته است. استفاده از مفهوم امپدانس مجازی و پیاده‌سازی امپدانس مجازی اندوکتیو در خروجی اینورتر بدون نیاز به امپدانس فیزیکی بزرگ و گران، خط تغذیه معادل (خط تغذیه فیزیکی و خط تغذیه مجازی) به صورت اندوکتیو خواهد شد و به این ترتیب روش افتی متداول در ریزشبه‌های مقاومتی ولتاژ پایین نیز قابل پیاده‌سازی خواهد بود [۵۶]. استفاده از امپدانس اندوکتیو مجازی بزرگ در خروجی منابع تولید پراکنده در ریزشبه‌های ولتاژ پایین با خطوط تغذیه غالباً مقاومتی منجر به عدم وابستگی تقسیم توان حقیقی و راکتیو به یکدیگر و همچنین باعث بهبود عملکرد روش افتی متداول می‌شود [۱۸].

با توجه به بخش ۳-۲-۴ و ۳-۶ امپدانس خروجی منابع تولید پراکنده می‌تواند در میزان جریان چرخشی نیز مؤثر باشد [۱۲]. بنابراین با استفاده از روش امپدانس مجازی می‌توان جریان چرخشی

جاری شده در بین اینورترها را نیز کنترل کرد. از این رو در مقالات متعدد روش امپدانس مجازی به عنوان روشی جهت بهبود تقسیم توان [۶, ۱۰, ۱۵, ۱۶] و کاهش جریان چرخشی [۱۱, ۳۲] بین منابع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر در نظر گرفته شده است. مرجع [۱۱] با استفاده از روش امپدانس مجازی از نوع اندوکتیو جریان چرخشی جاری شده در بین اینورترهای با عملکرد موازی در ریزشبکه‌های جزیره‌ای ولتاژ پایین را کاهش داده است.

۴-۲-۱- مروری بر روش افی متداول

همان طور که در بخش ۲-۶-۲ اشاره شد، روش کنترل افی روش غیرمتمرکزی است که به صورت محلی و توسط متغیرهای محلی ولتاژ و فرکانس منابع تولید پراکنده قابل پیاده سازی است. این روش، اینورتر منابع تولید پراکنده را برای ایجاد ولتاژ و فرکانس مرجع کنترل می کند. اما همان طور که در بخش ۳-۴ بحث شد عملکرد این روش دارای معایبی از جمله وابستگی به امپدانس خط تغذیه منابع تولید پراکنده، عدم تقسیم صحیح توان، مصالحه بین دقت تقسیم توان و ولتاژ و فرکانس، عدم توانایی کنترل جریان های چرخشی بین واحدها و غیره می باشد و همچنین به دلیل وابستگی توان حقیقی و راکتیو در شبکه های ولتاژ پایین با خطوط تغذیه غالباً مقاومتی و مختلط دارای عملکرد ضعیفی هستند.

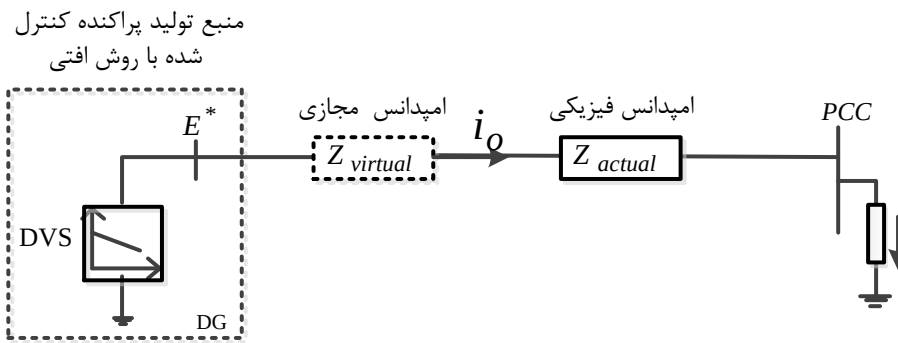
مسئله ای که در [۳, ۱۲, ۵۴, ۵۷] برای روش افی متداول عنوان شده است و در بخش ۴-۲ نیز به آن اشاره شد، فرض اندوکتیو بودن سیستم و به عبارت دیگر نسبت مقاومت به راکتانس پایین خطوط در استفاده از روش افی متداول است که این فرض در شبکه های ولتاژ پایین و ولتاژ متوسط با خطوط تغذیه دارای نسبت مقاومت به راکتانس بالا و تقریباً یک نامعتبر است. از این رو برای حل چالش های مذکور پیاده سازی روش های امپدانس مجازی در کنترل کننده واحدها پیشنهاد داده شده است [۱۰, ۱۱, ۱۶, ۵۴, ۵۸].

در این پایان نامه مطالعه روی اهمیت و کاربرد روش کنترل امپدانس مجازی بر مبنای فرض استفاده از روش افتی متداول جهت کنترل منابع تولید پراکنده است. با این فرض تقسیم صحیح توان حقیقی با استفاده از روش افتی فرکانس متداول با تنظیم مناسب ضریب مشخصه افتی به خوبی محقق می شود [۱۳] اما تقسیم صحیح توان راکتیو با استفاده از روش افتی ولتاژ متداول به دلیل عدم تطبیق امپدانس خط تغذیه و در نتیجه عدم تطبیق ولتاژ یک چالش است و این مسئله می تواند منجر به جاری شدن جریان های چرخشی نیز شود [۱۱، ۳۲، ۳۸، ۴۰]. مؤثرترین راه حل برای حذف عدم تطبیق تقسیم توان راکتیو ناشی از عدم تطبیق امپدانس خط تغذیه و همچنین جریان چرخشی، حداقل کردن اختلاف ولتاژ خروجی اینورترها است [۱۱]. در فصل قبل عملکرد روش افتی، تقسیم توان و جریان های چرخشی به صورت مفصل مورد بحث واقع شد.

۴-۲-۲- مفهوم امپدانس مجازی

در ابتدا در ریزشبه ها، روش امپدانس مجازی به منظور حذف وابستگی توان حقیقی و راکتیو بین منابع تغذیه بدون وقفه که مستقیماً از طریق خطوط تغذیه مقاومتی به نقطه اتصال مشترک در ریزشبه های ولتاژ پایین متصل می شدند بکار گرفته شدند [۱۱].

امپدانس مجازی به منظور تثبیت امپدانس خط تغذیه منابع تولید پراکنده برای بهبود عملکرد تقسیم توان توسط روش کنترل افتی پیشنهاد شده است [۶، ۱۴، ۵۲، ۵۳] که می تواند بدون اتصال فیزیکی در خروجی اینورتر قرار گیرد [۷، ۱۸، ۵۱، ۵۲]. با پیاده سازی امپدانس مجازی در کنترل کننده واحد تولید پراکنده، امپدانس معادل خط تغذیه منبع دو بخش امپدانس فیزیکی و امپدانس مجازی قابل تقسیم بندی است. زمانی که امپدانس مجازی لحاظ می شود، منبع تولید پراکنده می تواند به عنوان یک منبع ولتاژ کنترل شده با روش افتی (DVS) به صورت سری با امپدانس مجازی در نظر گرفته شود [۴۴]، که در شکل (۴-۱) نشان داده شده است.



شکل (۴-۱): مدار معادل منبع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر کنترل شده با روش کنترل افی با در نظر گرفتن امپدانس مجازی.

تقسیم توان به عدم تطبیق امپدانس فیزیکی خطوط تغذیه وابسته است که با جبران این عدم تطبیق، عدم تطبیق تقسیم توان راکتیو می‌تواند به خوبی حذف شود [۴۴]. در این پژوهش برای تطبیق خطوط تغذیه منابع تولید پراکنده از امپدانس مجازی استفاده شده است که به‌طور کلی می‌تواند به دو طریق انجام شود: (۱) استفاده از امپدانس مجازی منفی در خروجی واحد با امپدانس خط تغذیه بزرگ‌تر و (۲) استفاده از امپدانس مجازی مثبت در خروجی واحد با امپدانس خط تغذیه کوچک‌تر [۵۹]. در نتیجه جبران عدم تطبیق ولتاژ خروجی اینورترها در ریزش‌بکه، شرط $Q_2 = Q_1$ که بیانگر تقسیم صحیح توان راکتیو است برقرار می‌شود [۵]. مرجع [۱۰] از امپدانس مجازی منفی جهت جبران عدم تطبیق ولتاژ استفاده کرده است.

امپدانس مجازی برای اهداف مختلفی استفاده می‌شود که از جمله این اهداف می‌توان به مستقل کردن کنترل توان‌های حقیقی و راکتیو، تحقق تقسیم صحیح توان، افزایش ظرفیت انتقال توان و غیره اشاره کرد [۷، ۱۱، ۱۶، ۵۸]. از این رو اگر امپدانس مجازی به‌درستی طراحی و کنترل شود می‌تواند با کاهش وابستگی تقسیم توان به امپدانس خط تغذیه تأثیر بسزایی در بهبود عملکرد روش‌های کنترلی داشته باشد.

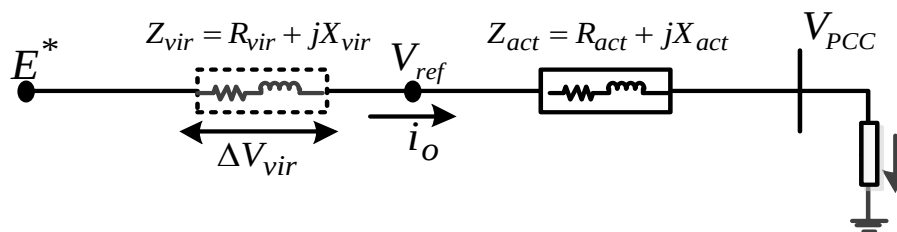
به‌منظور سهولت استفاده از روش کنترل افی متداول در ریزش‌بکه‌های ولتاژ پایین و حل مسئله عدم تطبیق امپدانس خط، یک سلف رابط مجازی و یا فیزیکی معمولاً در خط تغذیه واحد تولید

پراکنده برای کاهش وابستگی بین پخش توان اکتیو و راکتیو در نظر گرفته می‌شود [۵۳، ۱۰]. اضافه کردن سلف به صورت سری در خروجی واحد به منظور تثبیت امپدانس خروجی است [۵۳]. با این وجود به دلیل بزرگ بودن سلف، اضافه کردن سلف سری به صورت فیزیکی، اندازه و هزینه تجهیزات را افزایش می‌دهد [۵۱، ۵۲]. اما با استفاده از مفهوم امپدانس مجازی و پیاده‌سازی امپدانس مجازی اندوکتیو در خروجی اینورتر بدون نیاز به امپدانس فیزیکی، خط تغذیه معادل (مجموع خط تغذیه فیزیکی و خط تغذیه مجازی) به صورت اندوکتیو خواهد [۵۶].

استفاده از امپدانس مجازی از نوع اندوکتیو بزرگ در خروجی منابع تولید پراکنده در ریزشبکه‌های ولتاژ پایین با خطوط تغذیه غالباً مقاومتی منجر به عدم وابستگی تقسیم توان حقیقی و راکتیو از یکدیگر می‌شود و باعث بهبود عملکرد روش اکتی متداول می‌شود [۱۸]. همچنین اندوکتانس کم خط تغذیه در ریزشبکه‌ها، باعث افزایش جریان چرخشی می‌شود. اگر به دلیل عدم تطبیق بین ولتاژ منابع همچنان جریان چرخشی وجود داشته باشد، اندوکتانس مجازی به دلیل افزایش اندوکتانس اینورترها می‌تواند جریان چرخشی را تا اندازه زیادی کاهش دهد [۱۱].

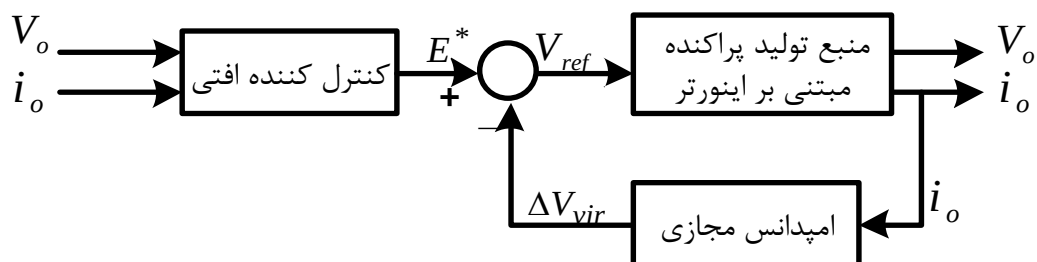
۴-۳- پیاده‌سازی روش امپدانس مجازی

جهت کنترل مؤثر تقسیم توان توسط منابع تولید پراکنده، وابستگی کنترل تقسیم توان به امپدانس خط تغذیه باید از بین برود. از این رو با استفاده از روش امپدانس مجازی افت ولتاژی به واسطه عبور فیدبک جریان خروجی منبع تولید پراکنده از امپدانس مجازی، در خروجی منبع ایجاد می‌شود. این مقدار امپدانس یک پارامتر کنترلی اضافی و انعطاف‌پذیر جهت برآورده ساختن اهداف کنترلی مورد نظر است [۹] و مقدار آن می‌تواند به صورت اختیاری انتخاب شود [۹، ۲۹].



شکل (۲-۴): پیاده‌سازی امپدانس مجازی در خروجی منبع تولید پراکنده به صورت فرضی [۵۸].

محل قرارگیری فرضی این امپدانس در خروجی منبع تولید پراکنده در شکل (۲-۴) نشان داده شده است. که در شکل فوق، $Z_{ac} = R_{ac} + jX_{ac}$ امپدانس واقعی و فیزیکی خط تغذیه و $Z_{vir} = R_{vir} + jX_{vir}$ امپدانس مجازی است. E^* ولتاژ مرجع به دست آمده از روش افتی است، i_o جریان خروجی منبع تولید پراکنده، و V_{ref} ولتاژ مرجع نهایی است که با بکارگیری امپدانس مجازی در خروجی منبع تولید پراکنده و اصلاح ولتاژ مرجع حاصل از روش افتی به دست می‌آید، و ΔV_{vir} افت ولتاژ ناشی از امدانس مجازی است.



شکل (۳-۴): بلوک دیاگرام کنترل کننده منبع تولید پراکنده.

همان‌طور که در شکل (۳-۴) نشان داده شده، امپدانس مجازی برای اصلاح مشخصه امپدانس خط تغذیه منبع تولید پراکنده، در خروجی منبع تولید پراکنده و در مسیر فیدبک جریان خروجی آن قرار می‌گیرد و با افزودن امپدانس‌های مجازی مختلف در فیدبک جریان خروجی، امپدانس معادل خط تغذیه اینورتر می‌تواند زوایای امپدانس مختلفی داشته باشد [۳۲].

افت ولتاژ روی امپدانس مجازی به ولتاژ مرجع به دست آمده از کنترل کننده افتی اضافه می شود تا ولتاژ مرجع به دست آمده از روش افتی را اصلاح کند [۱۴، ۲۹]، که به طور ریاضی می توان به صورت رابطه (۱-۴) بیان کرد:

$$V_{ref} = E^* - \Delta V_{vir} \quad (1-4)$$

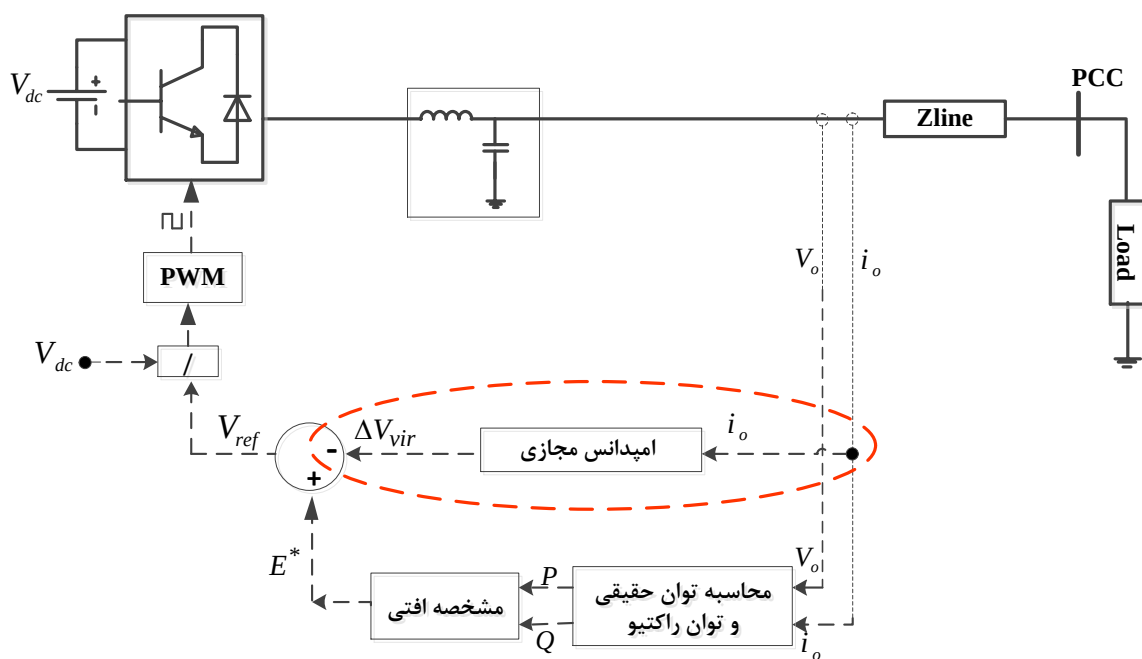
در واقع، با کم کردن افت ولتاژ روی امپدانس مجازی (ΔV_{vir}) از ولتاژ مرجع ایجاد شده توسط کنترل افتی (E^*)، ولتاژ مرجع نهایی برای کنترل اینورتر منبع تولید پراکنده (V_{ref}) توسط رابطه (۱-۴) به دست می آید [۱۱، ۱۸].



شکل (۴-۴): مراحل پیاده سازی روش کنترل افتی با در نظر گرفتن روش امپدانس مجازی [۹].

همان طور که در فصل سوم نیز بیان شد، کنترل کننده افتی با استفاده از رابطه توان حقیقی و راکتیو با فرکانس و ولتاژ، دامنه و فرکانس ولتاژ مرجع را جهت کنترل تقسیم توان تولید می کند که

در این فرایند از ولتاژ و جریان خروجی منبع تولید پراکنده جهت محاسبه توان حقیقی و راکتیو لحظه‌ای خروجی استفاده می‌شود [۳۹]. با پیاده‌سازی روش امپدانس مجازی انتظار می‌رود که با یکسان شدن امپدانس معادل خط تغذیه منابع تولید پراکنده متعدد، تقسیم توان راکتیو به‌صورت صحیح انجام شود [۴۴]. مراحل پیاده‌سازی روش کنترل افتی که در بخش ۳-۴ نیز به آن پرداخته شد با در نظر گرفتن روش امپدانس مجازی به‌صورت نشان داده شده در شکل (۴-۴) تکمیل می‌شود. فرایند بیان‌شده در شکل (۴-۴) برای پیاده‌سازی روش کنترل افتی و روش امپدانس مجازی در سیستم کنترلی کنترل‌کننده محلی در شکل (۴-۵) نشان داده شده است.



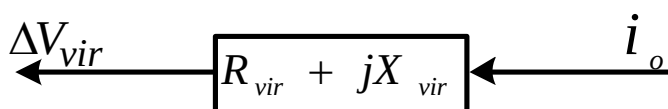
شکل (۴-۵): پیاده‌سازی روش کنترل افتی با در نظر گرفتن روش امپدانس مجازی در کنترل‌کننده محلی.

در ادامه به تحلیل ریاضی روش امپدانس مجازی پرداخته شده است که مدلسازی آن در مرجع ساکن انجام می‌شود. هدف از تحلیل ریاضی، محاسبه افت ولتاژ روی امپدانس مجازی و سپس کم کردن این ولتاژ از ولتاژ مرجع تولیدشده توسط روش کنترل افتی است. بنابراین به‌منظور محاسبه افت ولتاژ روی امپدانس مجازی، امپدانس مجازی به‌صورت رابطه (۴-۲) در نظر گرفته می‌شود:

$$Z_{vir} = R_{vir} + jX_{vir} \quad (۲-۴)$$

راکتانس مجازی به صورت $X_{vir} = L_{vir}\omega_0$ تعریف می‌شود، که در این صورت امپدانس مجازی به صورت رابطه (۳-۴) نیز قابل بیان است، که ω_0 فرکانس زاویه‌ای نامی و L_{vir} مقدار اندوکتانس مجازی است.

$$Z_{vir} = R_{vir} + jL_{vir}\omega_0 \quad (۳-۴)$$



شکل (۴-۶): مدل امپدانس مجازی [۶۰].

همان‌طور که قبلاً بیان شد و در شکل (۴-۶) نیز نشان داده شده، امپدانس مجازی در مسیر فیدبک جریان خروجی منبع واقع می‌شود و با ضرب در آن، افت ولتاژ روی امپدانس مجازی (ΔV_{vir}) را حاصل می‌کند یعنی:

$$\Delta V_{vir} = Z_{vir} \times i_o \quad (۴-۴)$$

به‌منظور مدلسازی امپدانس مجازی از مرجع ساکن استفاده می‌شود و بر این اساس امپدانس مجازی و جریان خروجی منبع تولید پراکنده در مرجع سه فاز، در مرجع ساکن و بر روی محورهای α و β تصویر می‌شوند. در این صورت با استفاده از تبدیل کلارک، افت ولتاژ روی امپدانس مجازی در روابط (۵-۴) الی (۹-۴) محاسبه شده است [۱۱]:

$$\Delta V_{vir,\alpha} + j\Delta V_{vir,\beta} = (R_{vir} + jL_{vir}\omega_0)(I_{o\alpha} + jI_{o\beta}) \quad (۵-۴)$$

$$= R_{vir}I_{o\alpha} + jR_{vir}I_{o\beta} + jL_{vir}\omega_0I_{o\alpha} - L_{vir}\omega_0I_{o\beta} \quad (۶-۴)$$

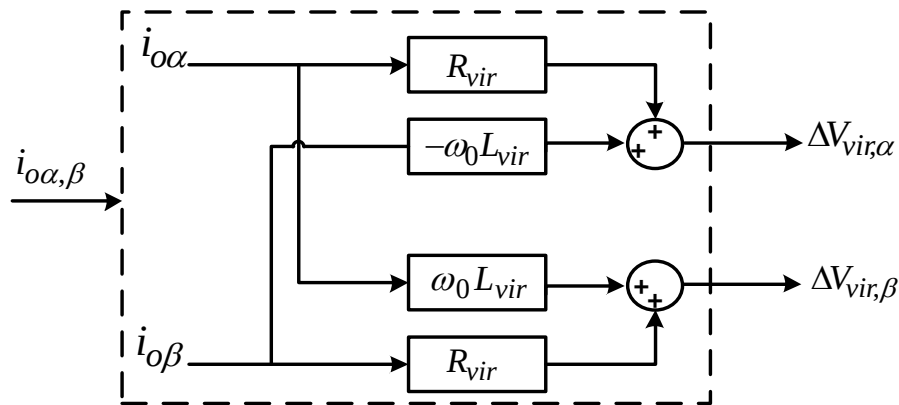
$$= R_{vir}I_{o\alpha} - L_{vir}\omega_0I_{o\beta} + j(R_{vir}I_{o\beta} + L_{vir}\omega_0I_{o\alpha}) \quad (۷-۴)$$

که $\Delta V_{vir,\alpha}$ و $\Delta V_{vir,\beta}$ به ترتیب ولتاژ محور α و β ناشی از امپدانس مجازی، $i_{o,\alpha}$ و $i_{o,\beta}$ به ترتیب جریان خروجی محور α و β هستند [۱۸]. بنابراین مؤلفه‌های α و β افت ولتاژ امپدانس مجازی به ترتیب به صورت روابط (۸-۴) و (۹-۴) به دست می‌آیند:

$$\Delta V_{vir,\alpha} = R_{vir} i_{o\alpha} - L_{vir} \omega_0 i_{o\beta} \quad (۸-۴)$$

$$\Delta V_{vir,\beta} = R_{vir} i_{o\beta} + L_{vir} \omega_0 i_{o\alpha} \quad (۹-۴)$$

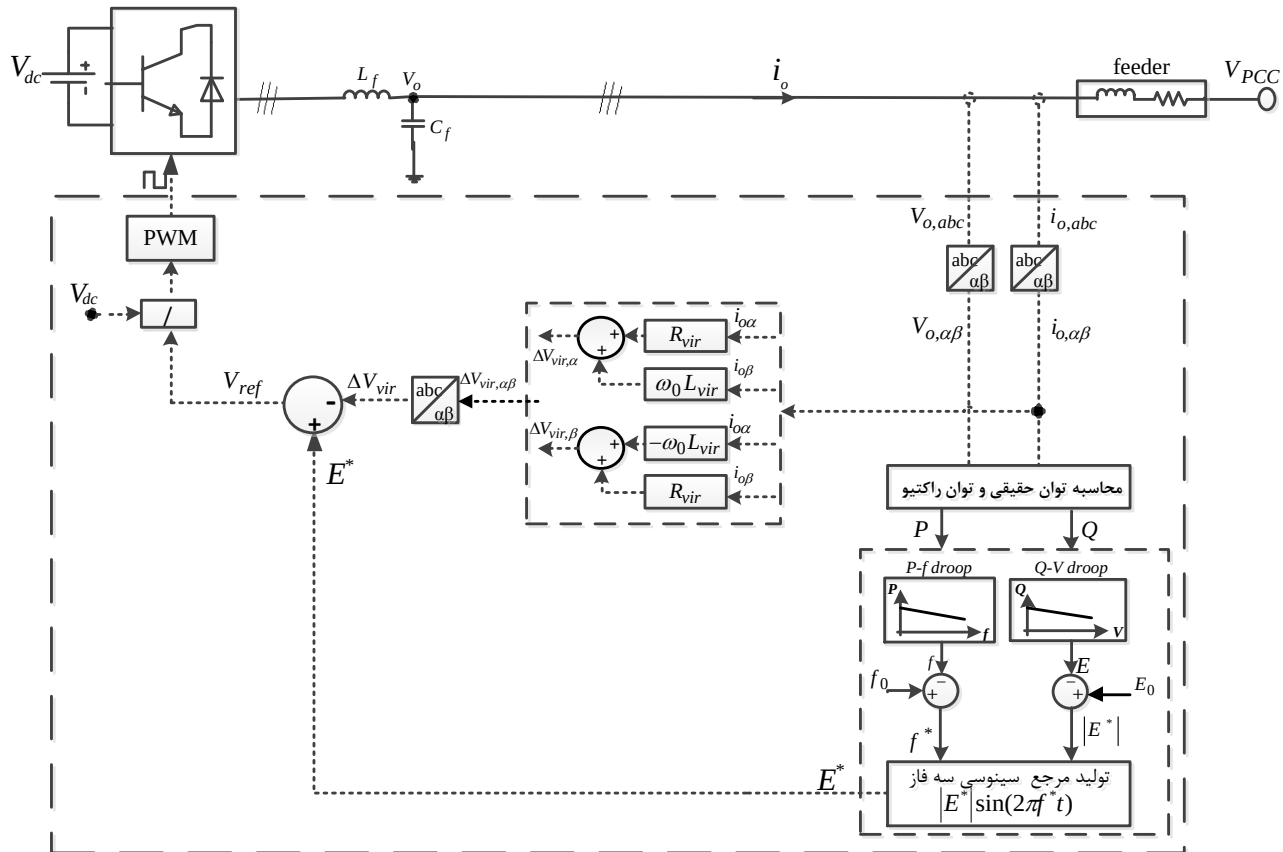
مدلسازی امپدانس مجازی در کنترل‌کننده محلی طبق معادلات به دست‌آمده از محاسبات فوق در شکل (۷-۴) نشان داده شده است. درواقع محاسبه افت ولتاژ در طول راکتانس مجازی، انتقال فاز ۹۰ درجه از ولتاژ در مرجع ساکن است که این شیفت فاز به سادگی توسط تعویض محور $\alpha-\beta$ مؤلفه‌های جریان به دست می‌آید [۶۰].



شکل (۷-۴): مدلسازی امپدانس مجازی [۷].

ساختار منبع تولید پراکنده به همراه کنترل‌کننده آن که شامل کنترل‌کننده افتی متداول و کنترل‌کننده امپدانس مجازی است در شکل (۸-۴) نشان داده شده است. در پیاده‌سازی روش افتی و روش امپدانس در کنترل‌کننده محلی واحد تولید پراکنده با توجه به روندی که در شکل (۴-۴) بیان شد، از جریان و ولتاژ خروجی منبع تولید پراکنده جهت محاسبه توان حقیقی و راکتیو خروجی منبع

نمونه‌گیری شده است و سپس در قالب مرجع ساکن مدل شده‌اند و روش افی متداول به‌منظور محاسبه ولتاژ مرجع بکار گرفته می‌شود.

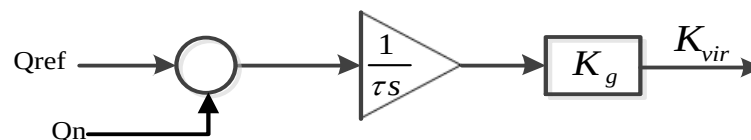


شکل (۴-۸): کنترل‌کننده واحد تولید پراکنده.

در شکل (۴-۸)، امپدانس مجازی در مسیر فیدبک جریان خروجی منبع (i_o) واقع شده و بعد از محاسبه افت ولتاژ روی امپدانس مجازی (ΔV_{vir}) و کم کردن آن از ولتاژ مرجع (E^*) ولتاژ مرجع نهایی (V_{ref}) به‌دست می‌آید. از V_{ref} جهت ایجاد سیگنال مناسب برای انجام عمل سوئیچ‌زنی توسط PWM استفاده می‌شود.

۴-۴- طراحی کنترل کننده امپدانس مجازی

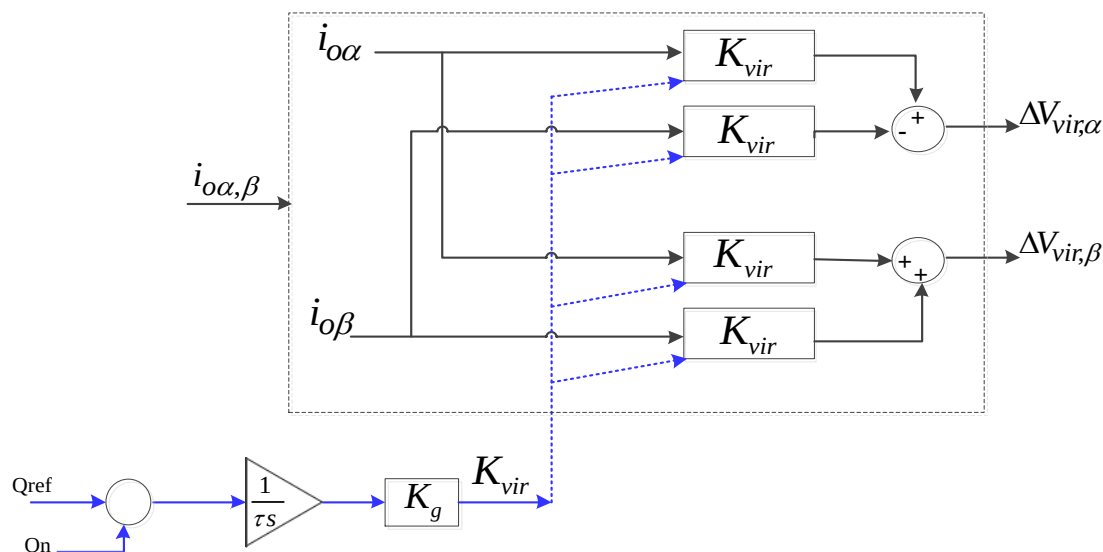
امپدانس مجازی می‌تواند به دو صورت در کنترل کننده پیاده‌سازی شود: (۱) امپدانس مجازی ثابت^۱ (۲) امپدانس مجازی قابل تنظیم^۲. برای تحقق تقسیم صحیح توان در روش امپدانس مجازی ثابت با استفاده از اطلاعات مربوط به امپدانس خطوط تغذیه امپدانس مجازی در یک مقدار ثابت تنظیم می‌شود. در این روش اگر نقطه کار سیستم به ازای ایجاد هرگونه تغییر از جمله تغییر بار، تغییر امپدانس خطوط تغذیه تغییر کند، تقسیم صحیح توان محقق نخواهد شد. بنابراین کنترل کننده امپدانس مجازی باید به گونه‌ای طراحی شود که بتواند نقاط کار مختلف سیستم را دنبال کند.



شکل (۴-۹): حلقه کنترل انتگرال برای تنظیم مقاومت و راکتانس مجازی.

جهت کنترل مناسب امپدانس مجازی و محقق شدن هدف مورد نظر، در این بخش کنترل کننده‌ای برای تنظیم مقدار امپدانس مجازی طراحی و ارائه شده است. اساس این روش کنترلی به این صورت است که یکی از منابع تولید پراکنده به عنوان مرجع انتخاب می‌شود و بقیه منابع، توان آن واحد را به عنوان توان مرجع تعقیب می‌کنند. به محض تنظیم متغیر امپدانس مجازی (K_{vir}) شامل مقاومت مجازی^۳ (R_{vir}) و راکتانس مجازی^۴ (X_{vir})، که $K_{vir} = R_{vir} = X_{vir}$ است، تقسیم توان راکتیو به صورت صحیح انجام می‌شود.

1- Fixed Virtual Impedance
 2- Tunable Virtual Impedance
 3- Virtual Resistance
 4- Virtual Reactance

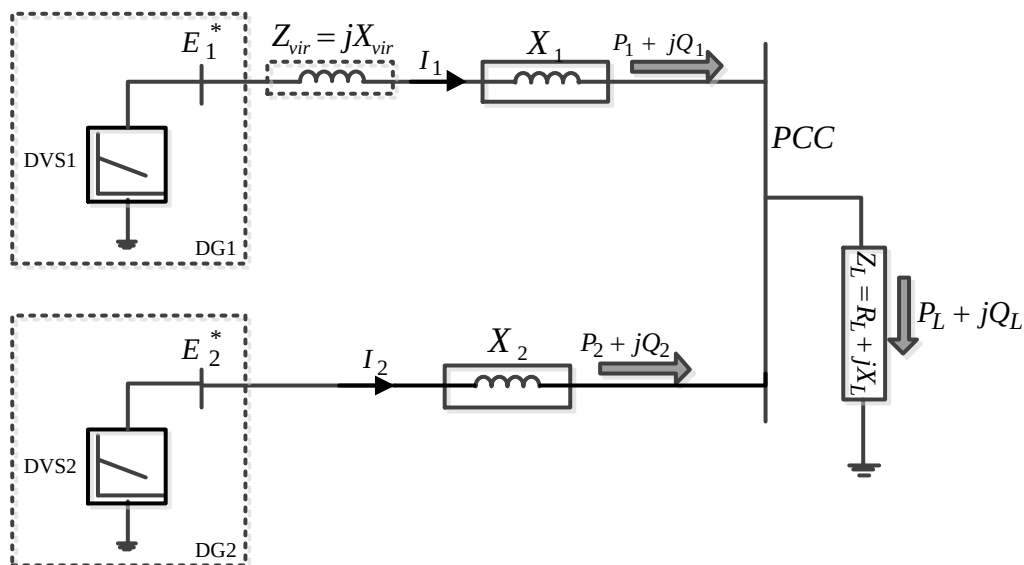


شکل (۴-۱۰): کنترل کننده تنظیم امپدانس مجازی [۱۰].

در این کنترل کننده که در شکل (۴-۹) نشان داده شده است، از یک انتگرال ساده برای تنظیم K_{vir} از طریق کنترل Q_n جهت دنبال کردن Q_{ref} ، استفاده شده است و به عبارت دیگر خطای توان راکتیو توسط این کنترل کننده کنترل می شود. بلوک دیاگرام کامل کنترل کننده امپدانس مجازی در شکل (۴-۱۰) نشان داده شده است. هدف کنترل کننده تنظیم مستقیم توان راکتیو نیست، اما متغیر امپدانس مجازی را به مقداری برای جبران اثر عدم تطبیق امپدانس روی صحت تقسیم توان راکتیو تنظیم می کند. در زیربخش های ۴-۴-۱ و ۴-۴-۲ به تنظیم امپدانس مجازی به ترتیب برای دو حالت خاص ریزش شبکه کاملاً اندوکتیو و ریزش شبکه کاملاً مقاومتی پرداخته شده است.

۴-۴-۱- ریزش شبکه کاملاً اندوکتیو

همان طور که در شکل (۴-۱۱) نشان داده شده است، در صورتی که خط تغذیه منابع تولید پراکنده اندوکتیو باشد و به عبارتی نسبت مقاومت به راکتانس خط کوچک باشد برای جبران عدم تطبیق امپدانس های خط تغذیه منابع تنها از راکتانس مجازی ($Z_{vir} = jX_{vir}$) استفاده می شود.



شکل (۱۱-۴): ریزشبه با خطوط تغذیه کاملاً اندوکتیو با لحاظ راکتانس مجازی.

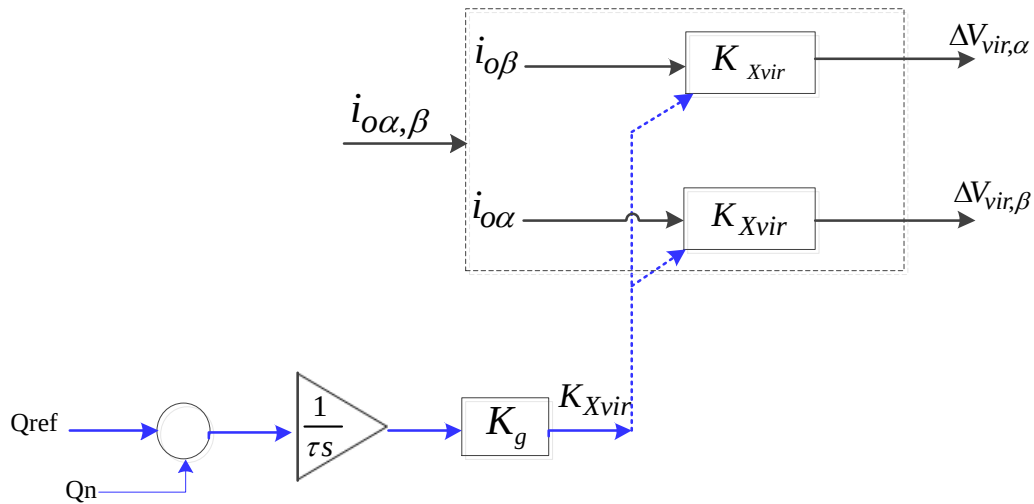
بنابراین با توجه به رابطه افت ولتاژ روی امپدانس مجازی مربوط به خط تغذیه اندوکتیو که در روابط (۵-۴) الی (۹-۴) اثبات شد، افت ولتاژ روی راکتانس مجازی در مرجع ساکن از رابطه (۱۰-۴) محاسبه می‌شود.

$$\begin{aligned} \Delta V_{vir,\alpha} + j\Delta V_{vir,\beta} &= (jL_{vir}\omega_0)(I_{o\alpha} + jI_{o\beta}) \\ &= jL_{vir}\omega_0 I_{o\alpha} - L_{vir}\omega_0 I_{o\beta} \end{aligned} \quad (۱۰-۴)$$

بنابراین با استفاده از تبدیل کلارک، مؤلفه‌های افت ولتاژ راکتانس مجازی در راستای محورهای α و β مرجع ساکن به ترتیب به صورت روابط (۱۱-۴) و (۱۲-۴) به دست می‌آیند:

$$\Delta V_{vir,\alpha} = -L_{vir}\omega_0 \dot{I}_{o\beta} \quad (۱۱-۴)$$

$$\Delta V_{vir,\beta} = L_{vir}\omega_0 \dot{I}_{o\alpha} \quad (۱۲-۴)$$



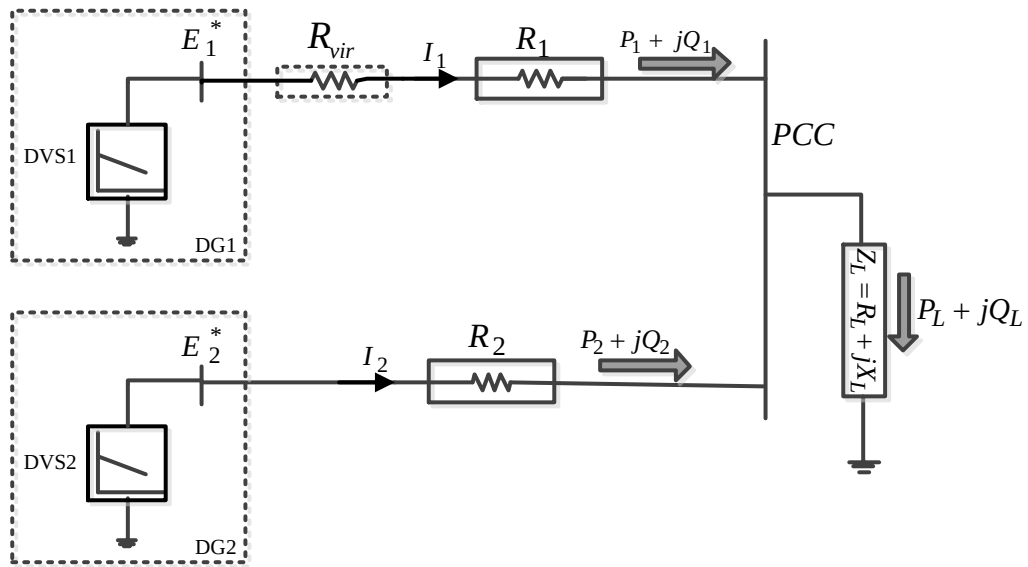
شکل (۴-۱۲): کنترل کننده تنظیم راکتانس مجازی.

لذا در مواردی که ریزشبه اندوکتیو است کنترل کننده امپدانس مجازی را می توان به نحو ساده تری طراحی کرد. در این حالت چون خط تغذیه کاملاً اندوکتیو است لذا تنها لازم است راکتانس خط تغذیه با استفاده از مفهوم امپدانس مجازی تثبیت شود، از این رو کنترل کننده راکتانس مجازی به صورت شکل (۴-۱۲) است.

۴-۲-۴- ریزشبه مقاومتی

در ریزشبه های ولتاژ پایین معمولاً امپدانس خط تغذیه منابع تولید پراکنده مقاومتی است. در صورتی که امپدانس خط تغذیه مقاومتی باشد برای جبران اثر عدم تطبیق مقاومت خطوط تغذیه می توان از امپدانس مقاومتی مجازی ($Z_{vir} = R_{vir}$) استفاده کرد.

شکل (۴-۱۳) یک ریزشبه با خطوط تغذیه مقاومتی را نشان می دهد، که هر یک از منابع از طریق یک خط مقاومتی به PCC متصل می شوند. همان طور که بخش ۴-۳ نیز ذکر شد، محاسبه افت ولتاژ ناشی از امپدانس مجازی با استفاده از تبدیل کلارک و در مرجع ساکن انجام می شود. به منظور محاسبه افت ولتاژ روی مقاومت مجازی از رابطه (۴-۱۳) استفاده می شود.



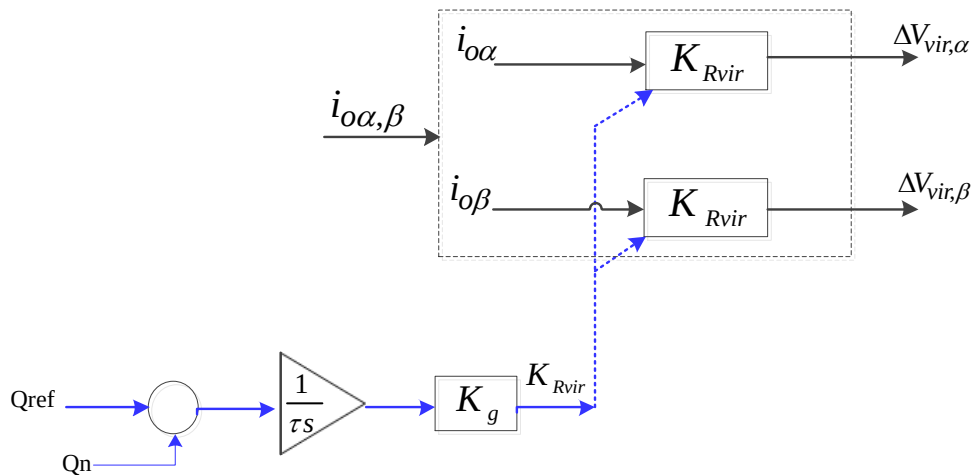
شکل (۱۳-۴): ریزشبهه با خط تغذیه کاملاً مقاومتی با لحاظ مقاومت مجازی.

$$\begin{aligned}\Delta V_{vir,\alpha} + j\Delta V_{vir,\beta} &= R_{vir}(I_{o\alpha} + jI_{o\beta}) \\ &= R_{vir}I_{o\alpha} + jR_{vir}I_{o\beta}\end{aligned}\quad (۱۳-۴)$$

با استفاده از تبدیل کلارک مؤلفه‌های α و β افت ولتاژ روی مقاومت مجازی به ترتیب در روابط (۴-۴) و (۱۴-۴) آورده شده‌اند. با توجه به اینکه خط تغذیه کاملاً مقاومتی است بنابراین فقط مقاومت خط تغذیه با استفاده از مفهوم امپدانس مجازی تثبیت می‌شود و با توجه به محاسبات انجام‌شده، کنترل‌کننده مناسب جهت تنظیم مقاومت مجازی می‌تواند به صورت شکل (۱۴-۴) طراحی شود.

$$\Delta V_{vir,\alpha} = R_{vir}i_{o\alpha} \quad (۱۴-۴)$$

$$\Delta V_{vir,\beta} = R_{vir}i_{o\beta} \quad (۱۵-۴)$$



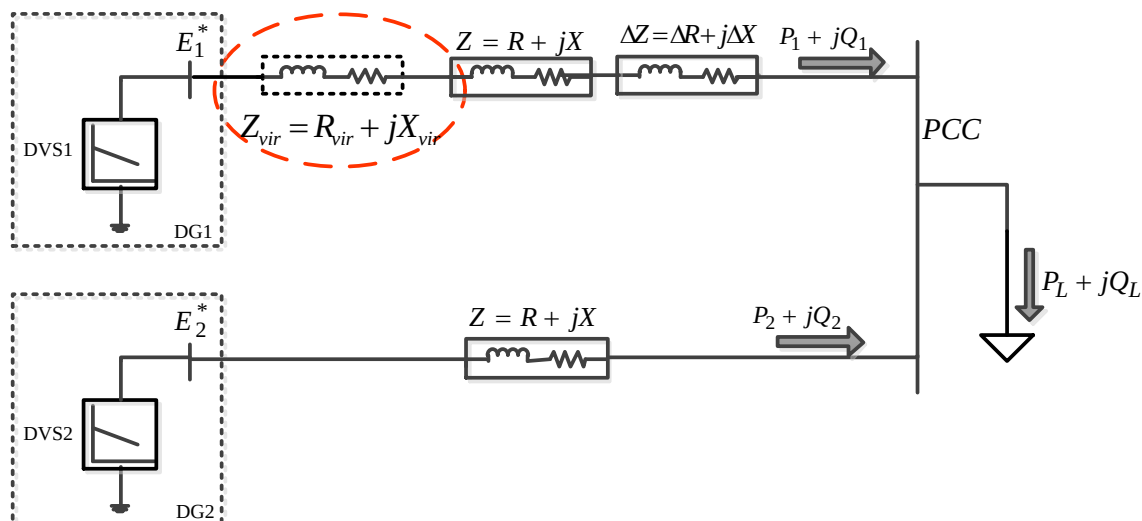
شکل (۴-۱۴): کنترل کننده تنظیم مقاومت مجازی.

روش دیگری که برای جبران عدم تطبیق امپدانس خطوط تغذیه مقاومتی واحدها در شبکه‌های ولتاژ پایین کاربرد دارد، استفاده از امپدانس اندوکتیو مجازی بزرگ در خروجی واحدها است [۴]. این امپدانس اندوکتیو مجازی باید به اندازه کافی بزرگ باشد تا بتوان از مقاومت واقعی خطوط تغذیه در مقابل آن‌ها صرف نظر کرد.

همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد به منظور تقسیم صحیح توان امپدانس مجازی می‌تواند به دو صورت مثبت و منفی در سیستم کنترلی پیاده‌سازی شود. به این صورت که امپدانس مجازی مثبت در کنترل کننده واحدی در نظر گرفته می‌شود که دارای امپدانس خط تغذیه کوچک‌تری است، که از این طریق عدم تطبیق امپدانس خطوط تغذیه منابع حذف می‌گردد. درحالی‌که در روش امپدانس مجازی منفی، امپدانس مجازی در خروجی واحدی که دارای امپدانس واقعی بزرگ‌تری است قرار داده می‌شود. که در این صورت امپدانس معادل خط تغذیه کاهش می‌یابد.

۴-۵- تأثیر مدل بار بر مقدار امپدانس مجازی

در بخش ۳-۳ مدل‌های بار از جمله بار توان ثابت، جریان ثابت و امپدانس ثابت بررسی شدند.



شکل (۴-۱۵): مدل ریزشبه جزیره‌ای به‌منظور در نظر گرفتن اثر بار.

در این بخش به بررسی اثر این نوع از بارها بر مقدار مقاومت و راکتانس مجازی جهت تحقق تقسیم صحیح توان راکتیو پرداخته شده است. به همین منظور ریزشبه جزیره‌ای مطابق شکل (۴-۱۵) در نظر گرفته شده است. با توجه به رابطه تقریبی افت ولتاژ روی امپدانس خط تغذیه $(\frac{\Delta X Q_1 + \Delta R P_1}{E_0})$ که در بخش ۳-۲-۳ اثبات شد، به‌منظور جبران عدم تطبیق افت ولتاژ رابطه تقریبی (۴-۱۶) باید برقرار شود [۱۰].

$$\frac{X_{vir} Q_1 + R_{vir} P_1}{E_0} \approx \frac{\Delta X Q_1 + \Delta R P_1}{E_0} \quad (۴-۱۶)$$

به‌منظور حذف عدم تطبیق امپدانس خطوط تغذیه منابع تولید پراکنده از امپدانس مجازی استفاده می‌شود که در شکل (۴-۱۵) قابل مشاهده است. در این شکل امپدانس مجازی $Z_{vir} = R_{vir} + jX_{vir}$ به‌منظور جبران عدم تطبیق امپدانس خطوط تغذیه $(\Delta Z = \Delta R + j\Delta X)$ در نظر گرفته شده است.

با توجه به اینکه با استفاده از کنترل کننده ارائه شده در شکل (۴-۱۰)، مقاومت و راکتانس مجازی باهم برابر هستند بنابراین: $X_{vir} = R_{vir}$ ، که در این صورت با استفاده از رابطه (۴-۱۵) مقدار مقاومت و راکتانس مجازی به صورت رابطه (۴-۱۷) به دست می آید [۱۰]:

$$X_{vir} = R_{vir} \approx \frac{\Delta X Q_1 + \Delta R P_1}{P_1 + Q_1} \quad (۴-۱۷)$$

با توجه به رابطه (۴-۱۷) می توان دریافت که مقدار توان حقیقی و راکتیو بار می تواند نقش مؤثری در تعیین و تنظیم مقدار امپدانس مجازی داشته باشند. در ادامه از نظر تحلیل ریاضی، به تاثیر هر یک از انواع بار توان ثابت، جریان ثابت و امپدانس بر میزان امپدانس مجازی لازم به منظور تحقق تقسیم صحیح توان با در نظر گرفتن رابطه (۴-۱۷) پرداخته شده است.

۴-۵-۱- بار توان ثابت

در این قسمت هدف بررسی اثر بار توان ثابت بر مقدار مقاومت و راکتانس مجازی است. با توجه به مطالب ارائه شده در بخش ۳-۳-۱ در بار توان ثابت، $P_1 = P_0$ و $Q_1 = Q_0$ است [۳۶] و حال با جایگذاری توان حقیقی (P_0) و راکتیو (Q_0) بار در رابطه (۴-۱۷)، رابطه (۴-۱۸) برای مقاومت و راکتانس مجازی به دست می آید.

$$X_{vir} = R_{vir} \approx \frac{\Delta X Q_0 + \Delta R P_0}{P_0 + Q_0} \quad (۴-۱۸)$$

۴-۵-۲- بار جریان ثابت

با توجه به بخش ۳-۳-۲، در بار جریان ثابت توان حقیقی و راکتیو بار به ترتیب $P_1 = (\frac{V_{PCC}}{E_0})P_0$ و $Q_1 = (\frac{V_{PCC}}{E_0})Q_0$ است [۳۶] و با جایگذاری P_1 و Q_1 از دو رابطه اخیر در رابطه

(۱۷-۴)، رابطه (۱۹-۴) برای مقاومت و راکتانس مجازی مورد نیاز برای تحقق تقسیم صحیح توان راکتیو در شرایطی که بار ریزشکه از نوع جریان ثابت است به دست می‌آید.

$$X_{vir} = R_{vir} \approx \frac{\Delta X \left(\frac{V_{PCC}}{E_0} \right) Q_0 + \Delta R \left(\frac{V_{PCC}}{E_0} \right) P_0}{\left(\frac{V_{PCC}}{E_0} \right) P_0 + \left(\frac{V_{PCC}}{E_0} \right) Q_0}$$

$$\approx \frac{\Delta X Q_0 + \Delta R P_0}{P_0 + Q_0} \quad (۱۹-۴)$$

۴-۵-۳- بار امپدانس ثابت

در بار امپدانس ثابت توان حقیقی و راکتیو بار به ترتیب به صورت $P_1 = \left(\frac{V_{PCC}}{E_0} \right)^2 P_0$ و $Q_1 = \left(\frac{V_{PCC}}{E_0} \right)^2 Q_0$ است [۳۶] که در بخش ۳-۳-۳ نیز مطرح شد و با جایگذاری P_1 و Q_1 در رابطه (۱۷-۴)، رابطه (۲۰-۴) برای مقاومت و راکتانس مجازی در حالتی که بار امپدانس ثابت است به دست می‌آید.

$$X_{vir} = R_{vir} \approx \frac{\Delta X \left(\frac{V_{PCC}}{E_0} \right)^2 Q_0 + \Delta R \left(\frac{V_{PCC}}{E_0} \right)^2 P_0}{\left(\frac{V_{PCC}}{E_0} \right)^2 P_0 + \left(\frac{V_{PCC}}{E_0} \right)^2 Q_0}$$

$$\approx \frac{\Delta X Q_0 + \Delta R P_0}{P_0 + Q_0} \quad (۲۰-۴)$$

بنابراین با توجه به محاسبات انجام شده برای بررسی اثر نوع بار بر میزان امپدانس مجازی جهت محقق شدن تقسیم صحیح توان راکتیو، مقدار امپدانس مجازی در سه بار مختلف توان ثابت، جریان ثابت و امپدانس ثابت تقریباً باهم برابر هستند.

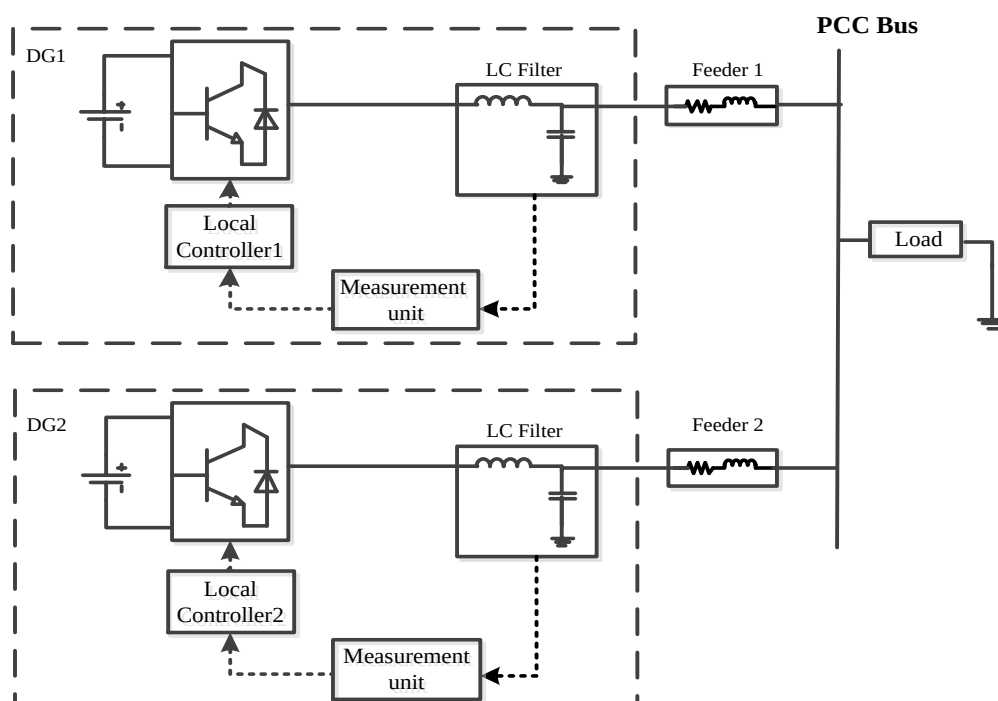
۴-۶- جمع بندی

در این فصل به بررسی کامل مفهوم امپدانس مجازی، مدلسازی و پیاده‌سازی آن در کنترل‌کننده منبع تولید پراکنده پرداخته شد. به منظور حذف اختلاف امپدانس خط تغذیه منابع، کنترل‌کننده‌ای جهت کنترل مقدار امپدانس مجازی با در نظر گرفتن سه حالت برای خط تغذیه منابع شامل امپدانس مختلط، امپدانس کاملاً اندوکتیو و امپدانس کاملاً مقاومتی ارائه شد. در انتهای فصل نیز اثر نوع بار از جمله بار توان ثابت، بار جریان ثابت و امپدانس ثابت بر مقدار امپدانس مجازی بررسی شد. در فصل بعد نیز به منظور اعتبار سنجی تئوری‌های ارائه‌شده در فصل سوم و چهارم به شبیه‌سازی ریزشبکه جزیره‌ای نمونه پرداخته خواهد شد.

فصل پنجم

شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

سیستم مورد هدف مطالعه در این پایان نامه ریزشبه جزیره‌ای شامل منابع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر است و هدف از این پژوهش محقق شدن تقسیم صحیح توان توسط منابع تولید پراکنده متعدد کنترل شده با روش کنترل اکتی متداول در ریزشبه است. چالش پیش روی تقسیم صحیح توان، تحت تأثیر بودن آن توسط امپدانس خطوط تغذیه منابع تولید پراکنده است. همان طور که در فصل چهارم نیز ذکر شد، برای حل چالش مذکور از روش امپدانس مجازی استفاده می‌شود.

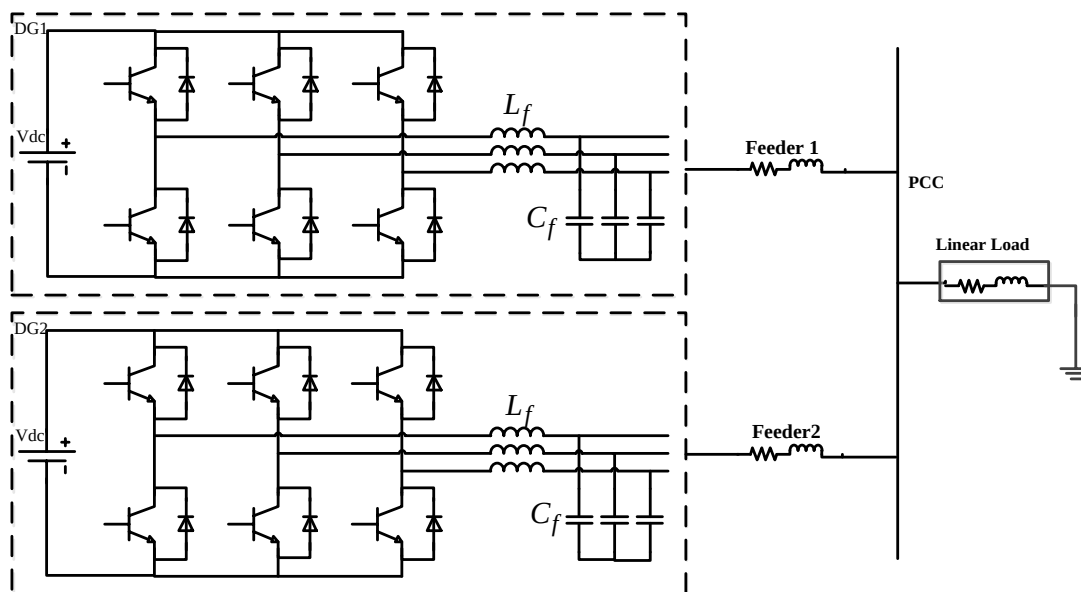


شکل (۵-۱): ریزشبه جزیره‌ای نمونه.

با توجه به شکل (۵-۱) ریزشبه جزیره‌ای نمونه‌ای که مورد مطالعه و شبیه‌سازی قرار گرفته است شامل دو منبع تولید پراکنده است که به‌طور محلی توسط روش اکتی متداول کنترل می‌شوند. در این روش با اندازه‌گیری ولتاژ و جریان خروجی منابع تولید پراکنده، توان حقیقی و راکتیو توسط واحد اندازه‌گیری^۱ محاسبه می‌شود و سپس در کنترل‌کننده محلی هر یک از منابع جهت کنترل

1- Measurement Unit

تقسیم توان حقیقی و راکتیو در ریزشبه استفاده می‌شود. روش اُفتی دامنه و فرکانس ولتاژ مرجع موردنیاز برای ایجاد سیگنال سینوسی مرجع جهت انجام عملیات سوئیچ‌زنی سوئیچ‌های IGBT اینورترها را فراهم می‌کند. همان‌گونه که در فصل چهارم به‌طور کامل بحث شد، به‌منظور اصلاح ولتاژ مرجع تولیدشده توسط روش اُفتی و محقق شدن تقسیم صحیح توان از مفهوم امپدانس مجازی و پیاده‌سازی آن در کنترل‌کننده محلی استفاده می‌شود.



شکل (۲-۵): مدل گسترده ریزشبه جزیره‌ای مورد مطالعه [۱۵].

۲-۵- ساختار و مشخصات ریزشبه مورد مطالعه

جهت انجام بررسی اهداف موردنظری که تشریح شدند، سیستم مورد هدف مطالعه در این پایان‌نامه در شکل (۲-۵) به‌طور گسترده نشان داده‌شده است. سیستم مورد مطالعه ریزشبه جزیره‌ای است که شامل دو منبع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر است. این دو اینورتر با فیلتر LC و از طریق یک خط تغذیه به نقطه اتصال مشترک (PCC) متصل می‌شوند و باری را در نقطه اتصال مشترک تغذیه می‌کنند. لازم به ذکر است که ریز منابع در این پژوهش منابع ولتاژ ثابت dc در نظر گرفته شده‌اند.

جدول (۵-۱): مشخصات ریزشبه مورد آزمایش

مشخصات اینورتر [۵۴]	
سلف فیلتر (L_f)	۱/۸ میلی هانری
خازن فیلتر (C_f)	۲۵ میکرو فاراد
ولتاژ نامی (E_0)	۲۳۰ ولت
فرکانس نامی (f_0)	۵۰ هرتز
فرکانس سوئیچ زنی (f_s)	۱۰ کیلوهرتز
ولتاژ منبع ورودی (V_{dc})	۶۵۰ ولت
مشخصات خط تغذیه	
امپدانس خط تغذیه منبع تولید پراکنده ۱	مقاومت: ۰/۴ اهم اندوکتانس: ۲ میلی هانری
امپدانس خط تغذیه منبع تولید پراکنده ۲	مقاومت: ۰/۲ اهم اندوکتانس: ۱ میلی هانری
مشخصات بار	
امپدانس بار	مقاومت: ۳ اهم اندوکتانس: ۵ میلی هانری
کنترل کننده افقی	
بهره افقی فرکانس (k_p)	۲/۵e-۵ هرتز / وات
بهره افقی ولتاژ (k_q)	۱e-۵ ولت / وار
امپدانس مجازی ثابت	
مقاومت و راکتانس	۰/۶۵ اهم
امپدانس مجازی قابل تنظیم	
بهره انتگرال گیر (K_g)	۰/۰۱۲

۵-۳- شبیه‌سازی در نرم‌افزار PSCAD/ EMTDC

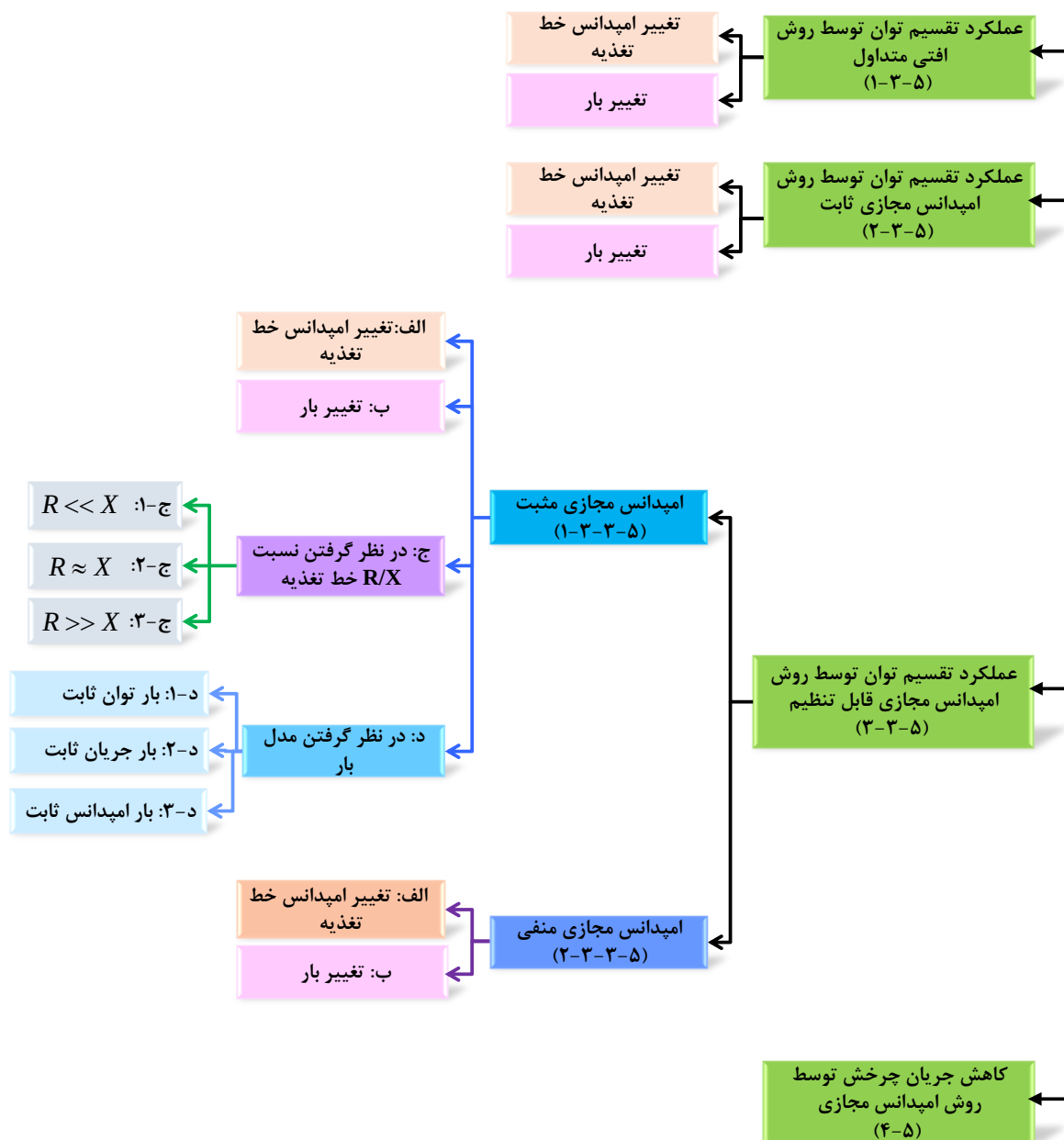
یک ریزشبه‌جک جزیره‌ای با دو منبع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر (مانند شکل (۵-۲)) در نرم‌افزار PSCAD/EMTDC برای اعتبارسنجی تئوری‌های مطرح‌شده در فصل سوم و چهارم و همچنین روش کنترلی ارائه‌شده در فصل چهارم شبیه‌سازی شده است. مشخصات ریزشبه‌جک در جدول (۵-۱) داده شده است. به‌منظور بررسی صحت روش کنترلی ارائه‌شده در حضور امپدانس خطوط تغذیه متفاوت، مقدار نامی توان منابع تولید پراکنده و مشخصات فیلتر آن‌ها یکسان در نظر گرفته شده است و همچنین مقادیر امپدانس خط تغذیه واحدها به‌گونه‌ای انتخاب شده‌اند که عدم تطابق قابل‌ملاحظه‌ای ایجاد گردد.

برای ارزیابی عملکرد کنترل‌کننده ارائه‌شده، مقدار عدم تطبیق^۲ تقسیم توان راکتیو از مقدار مرجع آن (Q_{mis}) در نظر گرفته شده است:

$$Q_{mis} = Q_n - Q_{ref}$$

که Q_n توان راکتیو اندازه‌گیری شده در خروجی واحد n است و Q_{ref} توان راکتیو اندازه‌گیری شده در خروجی واحد مرجع است که در حالت ایده‌آل واحد n باید آن را دنبال کند. در حالت‌های مختلف شبیه‌سازی که در ادامه ارائه داده شده است به‌منظور تصدیق عملکرد کنترل‌کننده ارائه‌شده برای امپدانس مجازی اثر تغییرات امپدانس خط تغذیه و بار بر تقسیم صحیح توان، که ممکن است به هر دلیلی در ریزشبه‌جک رخ دهند در نظر گرفته شده است. با توجه به مطالب و تئوری‌های بیان شده در فصل چهارم شبیه‌سازی بر طبق موارد آورده شده در شکل (۵-۳) انجام می‌شود. مواردی که شبیه‌سازی می‌شوند با عنوان هر زیر بخش در این شکل مشخص شده‌اند.

2- Mismatch

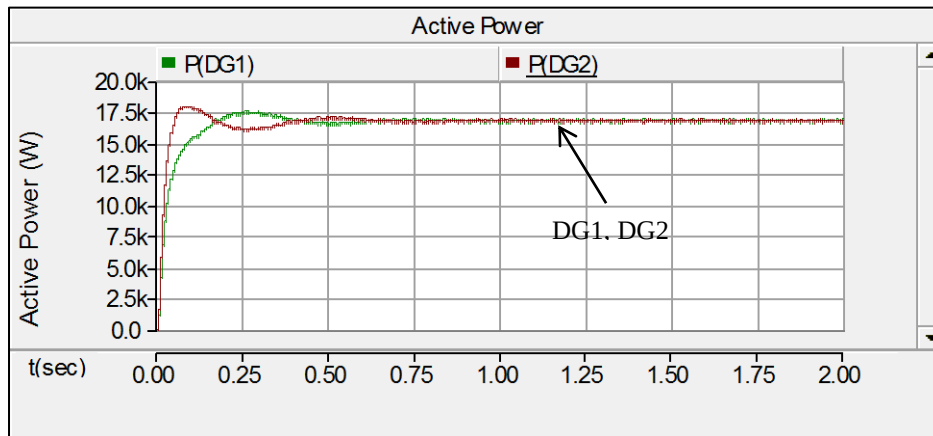


شکل (۳-۵): موارد مورد شبیه سازی در این فصل.

۱-۳-۵- عملکرد تقسیم توان توسط روش افتی متداول

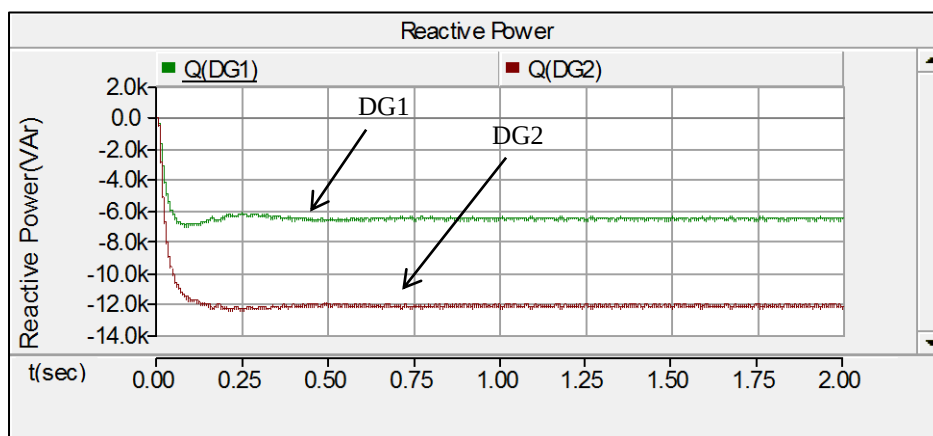
در این بخش هدف بررسی عملکرد تقسیم توان توسط منابع تولید پراکنده است که صرفاً هر یک از آن‌ها تنها با استفاده از روش افتی متداول کنترل می‌شوند. عملکرد تقسیم توان حقیقی و

راکتیو تنها با استفاده از کنترل افتی متداول به ترتیب در شکل‌های (۴-۵) و (۵-۵) نشان داده شده است.



شکل (۴-۵): عملکرد تقسیم توان حقیقی توسط واحدهای DG با روش افتی متداول.

با توجه به شکل (۴-۵) و تئوری ارائه‌شده در بخش ۳-۴، تقسیم توان حقیقی توسط روش افتی فرکانس متداول به صورت صحیح و مساوی توسط منابع تولید پراکنده در ریزش شبکه انجام می‌شود. کنترل توان حقیقی توسط فرکانس که به عنوان یک متغیر سراسری در شبکه قدرت شناخته شده است، بدون توجه به امپدانس خطوط تغذیه به صورت صحیح انجام می‌شود و تحت تأثیر عدم تطبیق ولتاژ ناشی از امپدانس خطوط تغذیه متفاوت نیست.

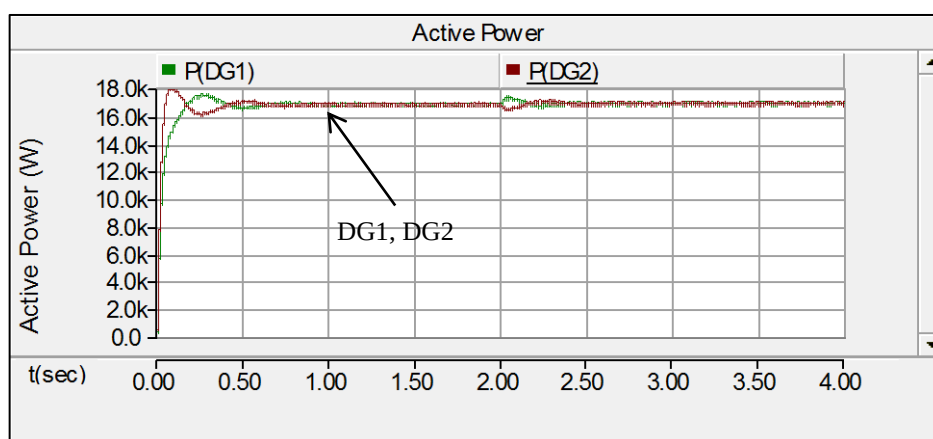


شکل (۵-۵): عملکرد تقسیم توان راکتیو توسط واحدهای DG با روش افتی متداول.

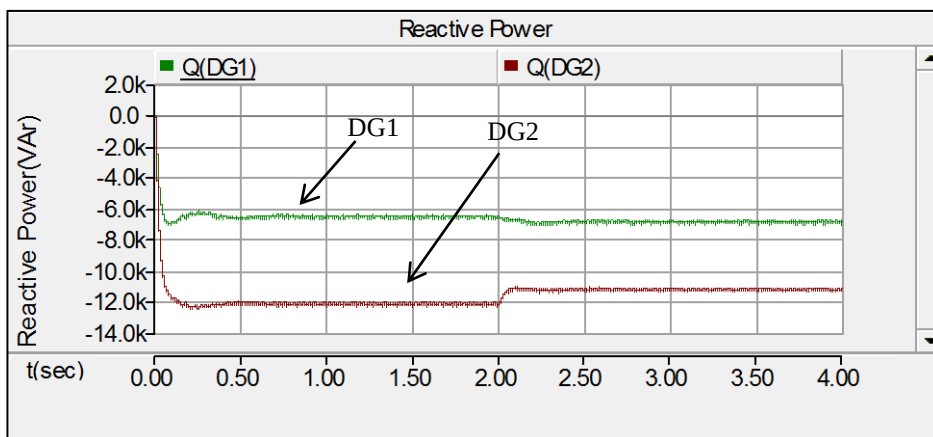
از شکل (۵-۵) می‌توان دریافت که صحت تقسیم توان راکتیو با استفاده از کنترل افتی ولتاژ متداول تحت تأثیر عدم تطبیق امپدانس خطوط تغذیه است. ولتاژ در شبکه قدرت به‌عنوان یک پارامتر محلی است و تحت تأثیر امپدانس خط تغذیه در نقاط مختلف دارای مقادیر متفاوتی است. از این‌رو عدم تطبیق امپدانس خطوط تغذیه موجب عدم تطبیق ولتاژهای خروجی منابع می‌شود، و از آنجایی که در روش افتی متداول تقسیم توان راکتیو توسط ولتاژ کنترل می‌شود بنابراین عدم تطبیق امپدانس خطوط تغذیه موجب عدم تطبیق در توان راکتیو خروجی منابع می‌شود و به عبارت دیگر تقسیم توان راکتیو به صورت صحیح توسط منابع انجام نمی‌شود.

الف: تغییر امپدانس خط تغذیه

در این قسمت، تغییر امپدانس خط تغذیه در نظر گرفته شده و عملکرد تقسیم توان حقیقی و راکتیو در بین منابع تولید پراکنده متعدد در پاسخ به این تغییر در ریزش‌بکه به ترتیب در شکل‌های (۵-۶) و (۵-۷) نشان داده شده است. تغییر اعمال شده به این صورت است که، مقاومت و اندوکتانس امپدانس خط تغذیه DG1 در ثانیه ۲ به ترتیب به مقادیر 0.35 اهم و $1/8$ میلی هانری تغییر داده شده‌اند.



شکل (۵-۶): عملکرد تقسیم توان حقیقی توسط واحدهای DG با روش افتی متداول با در نظر گرفتن تغییر در امپدانس خط تغذیه DG1.



شکل (۷-۵): عملکرد تقسیم توان راکتیو توسط واحدهای DG با روش افی متداول با در نظر گرفتن تغییر در امپدانس خط تغذیه DG1.

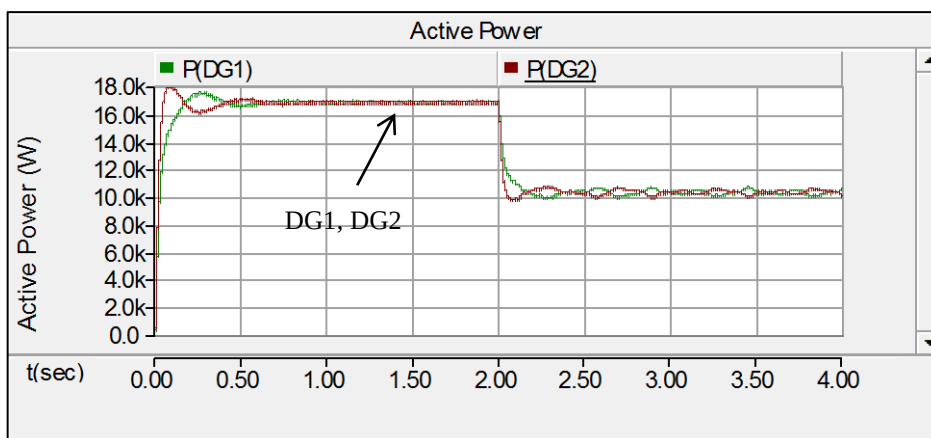
با توجه به فاصله زمانی ۲ تا ۴ ثانیه در شکل (۷-۵)، هرچه اختلاف بین امپدانس خطوط تغذیه منابع کمتر باشد عدم تطبیق تقسیم توان راکتیو کمتر خواهد بود. در هر دو حالت قبل (فاصله زمانی ۰ تا ۲ ثانیه) و بعد از تغییر (فاصله زمانی ۲ تا ۴ ثانیه) امپدانس خط تغذیه DG1 و همچنین دو حالت در مقایسه با یکدیگر، میزان قابل ملاحظه‌ای اختلاف تقسیم توان راکتیو وجود دارد که این می‌تواند نشان‌دهنده این حقیقت باشد که تقسیم توان راکتیو توسط روش افی متداول به‌طور چشم‌گیری تحت تأثیر امپدانس خطوط تغذیه است.

ب: تغییر بار

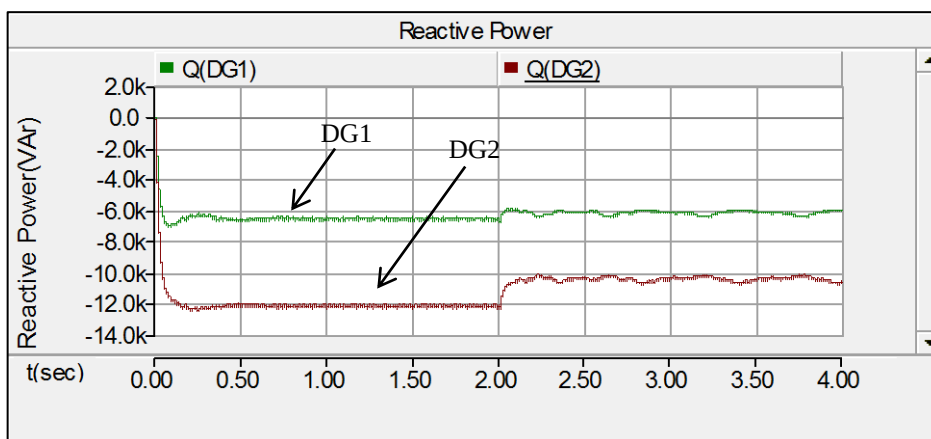
در این قسمت هدف مشاهده اثر تغییر بار بر نحوه تقسیم توان توسط منابع تولید پراکنده متعدد در شرایطی که منابع فقط با روش افی متداول کنترل می‌شوند، در ریزشبهه است. به این منظور مقاومت و راکتانس بار به ترتیب به ۴ و ۳/۱۴ اهم در ثانیه ۲ تغییر داده شده است. عملکرد تقسیم توان حقیقی و راکتیو تحت تأثیر تغییر بار به ترتیب در شکل‌های (۸-۵) و (۹-۵) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۹-۵) صحت تقسیم توان راکتیو توسط کنترل افی متداول تحت تأثیر تغییر بار ریزشبهه است. این مطلب را می‌توان با استفاده از رابطه افت ولتاژ روی امپدانس خط تغذیه نیز اثبات کرد زیرا طبق رابطه افت ولتاژ که در زیر آورده شده است توان بار در میزان افت ولتاژ روی

امپدانس خط تغذیه نقش مستقیم دارد. با تغییر مقدار اختلاف افت ولتاژ روی امپدانس خطوط تغذیه، عدم تطبیق تقسیم توان راکتیو نیز تغییر خواهد کرد.

$$\Delta V \approx \frac{RP + XQ}{E_0}$$



شکل (۵-۸): عملکرد تقسیم توان حقیقی توسط واحدهای DG با روش ایتی متداول با در نظر گرفتن تغییر در بار ریز شبکه.

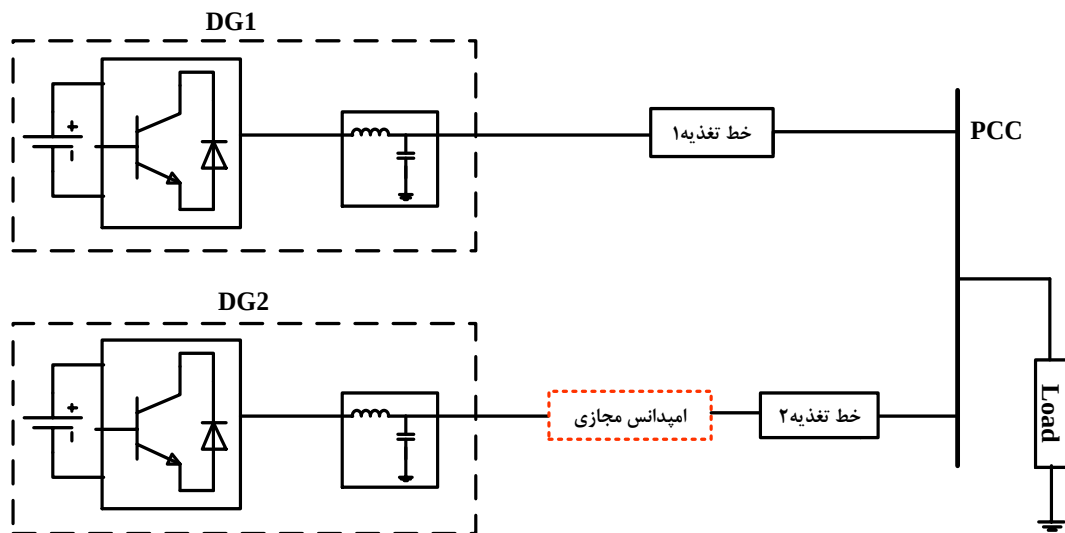


شکل (۵-۹): عملکرد تقسیم توان راکتیو توسط واحدهای DG با روش ایتی متداول با در نظر گرفتن تغییر در بار ریز شبکه.

ج: تحلیل نتایج

بنابراین با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام شده در این بخش می‌توان دریافت که در روش ایتی متداول تحت تأثیر امپدانس خط تغذیه و توان بار، تقسیم توان راکتیو به درستی انجام نمی‌شود این در

حالی است که تقسیم توان حقیقی با استفاده از روش افی متداول تحت شرایط مختلف ایجاد شده در ریزشبه به صورت صحیح توسط منابع تولید پراکنده انجام می‌شود.

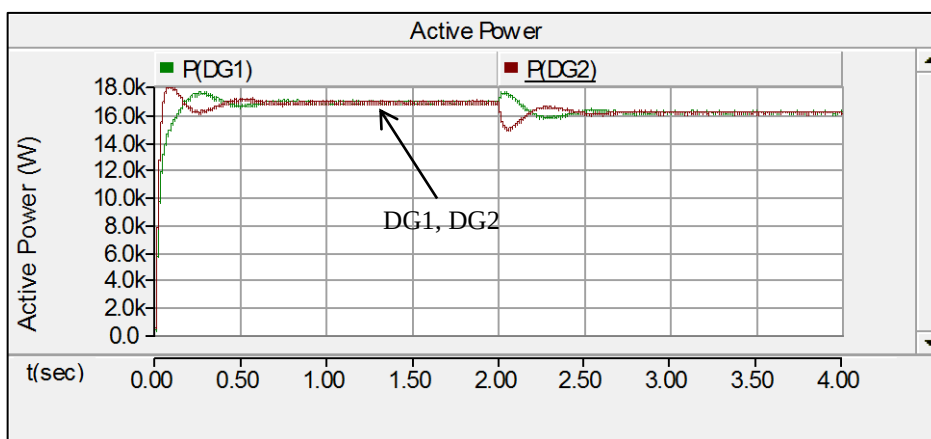


شکل (۵-۱۰): ریزشبه جزیره‌ای مورد آزمایش با در نظر گرفتن امپدانس مجازی.

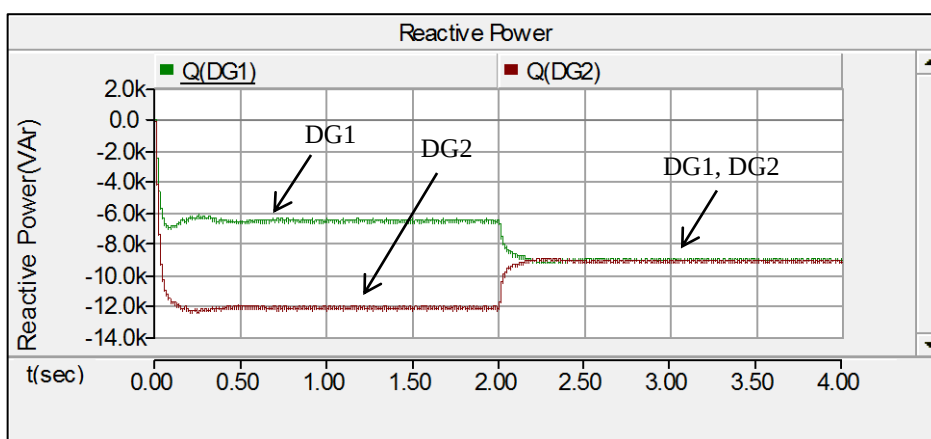
۵-۳-۲- عملکرد تقسیم توان توسط روش امپدانس مجازی ثابت

در این بخش هدف بررسی عملکرد تقسیم توان در ریزشبه جزیره‌ای نشان داده شده در شکل (۵-۱۰)، با استفاده از روش امپدانس مجازی ثابت است. لازم به ذکر است که روش پایه و اولیه برای کنترل تقسیم توان روش افی متداول است و روش امپدانس مجازی به‌منظور اصلاح روش افی و تحقق تقسیم صحیح توان بکار گرفته می‌شود.

عملکرد تقسیم توان حقیقی و راکتیو توسط روش امپدانس مجازی ثابت به ترتیب در شکل‌های (۵-۱۱) و (۵-۱۲) نشان داده شده است. روش امپدانس مجازی ثابت در ثانیه ۲ اعمال شده است و تا قبل از ثانیه ۲ تنها روش افی متداول فعال بوده است. مقاومت و راکتانس مجازی ثابت به‌منظور تقسیم صحیح توان ۰/۶۵ اهم در کنترل‌کننده DG1 در نظر گرفته شده‌اند.



شکل (۵-۱۱): عملکرد تقسیم توان حقیقی توسط واحدهای DG با اصلاح روش ایتی متداول توسط روش امپدانس مجازی ثابت.

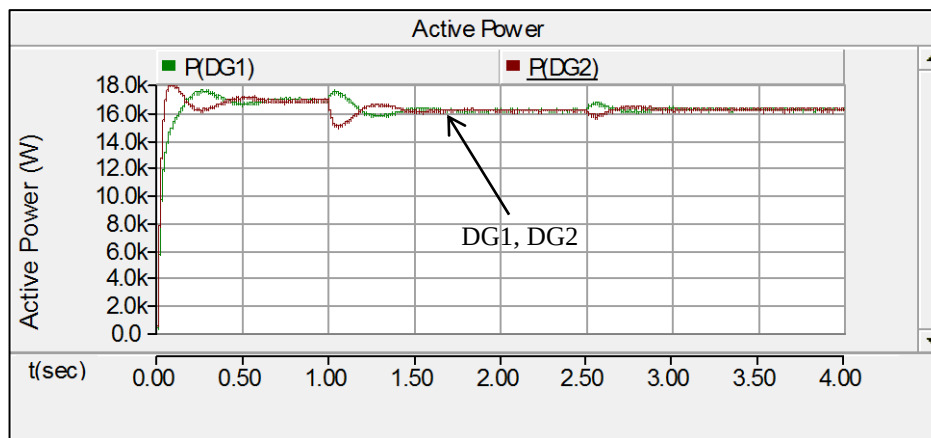


شکل (۵-۱۲): عملکرد تقسیم توان راکتیو توسط واحدهای DG با اصلاح روش ایتی متداول توسط روش امپدانس مجازی ثابت.

همان‌طور که از شکل (۵-۱۲) قابل مشاهده است، با فعال شدن روش امپدانس مجازی ثابت خطای تقسیم توان راکتیو به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش یافته است. از نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای یک نقطه عملکردی انتخابی در قبل از فعال شدن (فاصله زمانی ۰ تا ۲ ثانیه) روش امپدانس مجازی ثابت و بعد از آن (فاصله زمانی ۲ تا ۴ ثانیه)، می‌توان دریافت که خطای تقسیم توان راکتیو به‌خوبی حذف شده است و می‌توان گفت تقریباً به صفر کاهش یافته است.

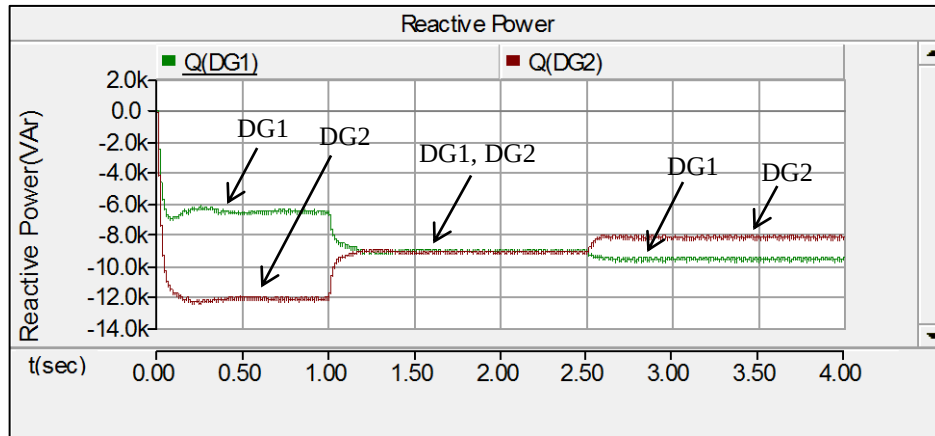
الف: تغییر امپدانس خط تغذیه

در این قسمت هدف مشاهده عملکرد روش امپدانس مجازی ثابت در طی یک تغییر در امپدانس خط تغذیه است و با حالتی که تنها از روش افتی متداول برای کنترل تقسیم توان استفاده شده است مقایسه گردد. به این منظور مانند بخش اول، مقاومت و اندوکتانس امپدانس خط تغذیه DG1 به ترتیب به مقادیر 0.35 اهم و $1/8$ میلی هانری تغییر داده شده است. عملکرد تقسیم توان حقیقی و راکتیو تحت شرایط مذکور به ترتیب در شکل‌های (۵-۱۳) و (۵-۱۴) نشان داده شده است.



شکل (۵-۱۳): عملکرد تقسیم توان حقیقی توسط واحدهای DG با اصلاح روش افتی متداول توسط روش امپدانس مجازی ثابت با در نظر گرفتن تغییر در امپدانس خط تغذیه DG1.

به‌منظور نمایش این حقیقت که روش افتی متداول به‌عنوان روش پایه برای کنترل تقسیم توان استفاده شده است، روش امپدانس مجازی ثابت در ثانیه ۱ فعال شده است و سپس در ثانیه $2/5$ امپدانس خط تغذیه ۱ با مشخصات ذکرشده در پاراگراف قبل تغییر داده شده است. از شکل (۵-۱۴) می‌توان دریافت که روش امپدانس مجازی ثابت تحت تأثیر تغییر امپدانس خط تغذیه بوده و بنابراین تقسیم صحیح توان راکتیو که در فاصله زمانی بین ۱ تا $2/5$ ثانیه توسط روش امپدانس مجازی ثابت محقق شده بود منتفی می‌شود.



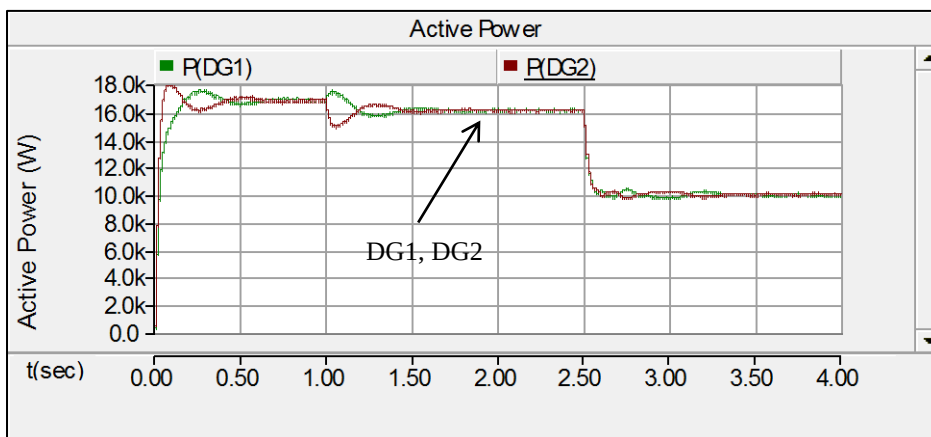
شکل (۵-۱۴): عملکرد تقسیم توان راکتیو توسط واحدهای DG با اصلاح روش ایتی متداول توسط روش امپدانس مجازی ثابت با در نظر گرفتن تغییر در امپدانس خط تغذیه DG1.

ب: تغییر بار

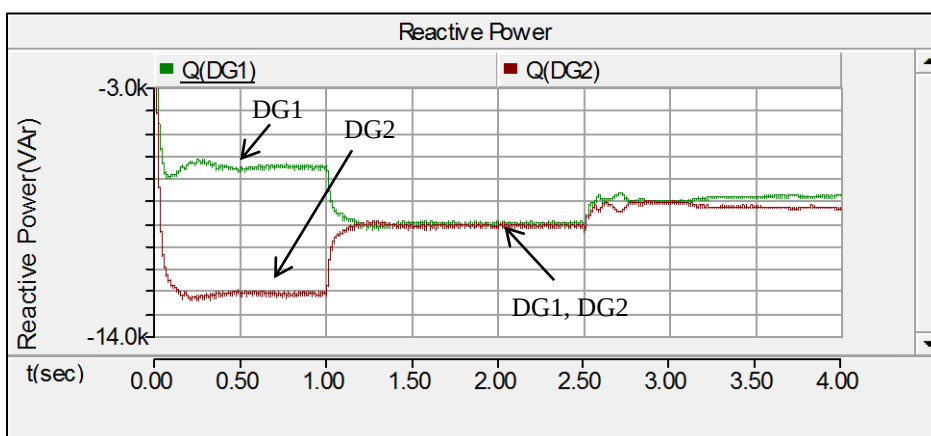
در این قسمت به منظور بررسی میزان تحت تأثیر بودن روش امپدانس مجازی ثابت با ایجاد تغییر در بار، یعنی مقاومت و راکتانس آن به ترتیب به ۴ و ۳/۱۴ اهم در ثانیه ۲/۵ افزایش یافته است. با توجه به بخش ۳-۲-۳ و ۴-۵، مقدار توان حقیقی و راکتیو بار می‌تواند در میزان مقاومت و راکتانس مجازی نقش موثری داشته باشد که این حقیقت در رابطه زیر نشان داده شده است:

$$X_{vir} = R_{vir} \approx \frac{\Delta XQ + \Delta RP}{P + Q}$$

یعنی با تغییر در مقدار توان بار ریزش شبکه، مقدار مقاومت و راکتانس مجازی جهت بهبود تقسیم توان نیز باید تغییر کند. عملکرد تقسیم توان حقیقی و راکتیو در شکل‌های (۵-۱۵) و (۵-۱۶) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۵-۱۶)، با وجود فعال شدن روش امپدانس مجازی ثابت در ثانیه ۱، با تغییر در بار (در ثانیه ۲/۵) تقسیم مساوی توان راکتیو توسط واحدهای DG به هم می‌خورد. لذا می‌توان دریافت که صحت تقسیم توان راکتیو با استفاده از امپدانس مجازی ثابت تحت تأثیر تغییر بار ریزش شبکه است.



شکل (۵-۱۵): عملکرد تقسیم توان حقیقی توسط واحدهای DG با اصلاح روش افاقی متداول توسط روش امپدانس مجازی ثابت با در نظر گرفتن تغییر در بار ریز شبکه.



شکل (۵-۱۶): عملکرد تقسیم توان راکتیو توسط واحدهای DG با اصلاح روش افاقی متداول توسط روش امپدانس مجازی ثابت با در نظر گرفتن تغییر در بار ریز شبکه.

ج: تحلیل نتایج

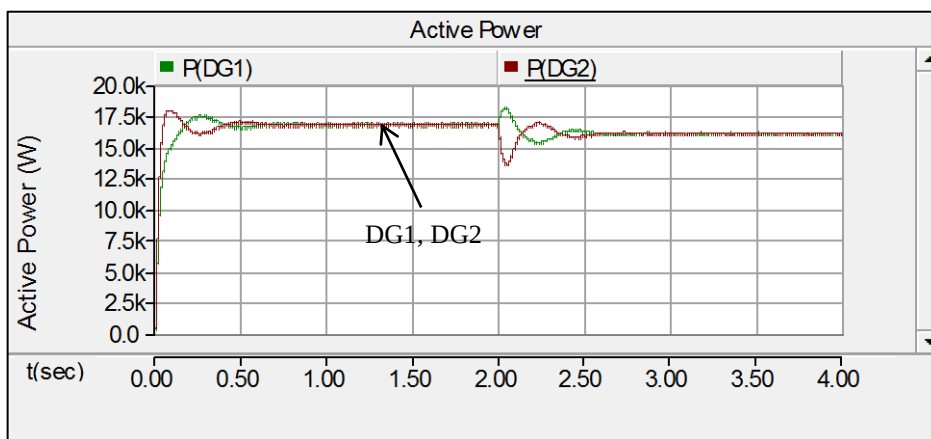
با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام‌شده می‌توان دریافت که امپدانس مجازی ثابت که برای یک نقطه کار تنظیم می‌شود، در صورتی که در نقطه کار تغییری ایجاد شود، این روش دیگر قادر به جبران عدم تطبیق امپدانس خطوط تغذیه واحدهای DG نیست و همچنین نمی‌تواند تقسیم توان راکتیو صحیحی را فراهم کند.

۵-۳-۳- عملکرد تقسیم توان توسط روش امپدانس مجازی قابل تنظیم

همان‌طور که در فصل چهارم ذکر شد امپدانس مجازی می‌تواند به دو صورت مثبت و یا منفی در کنترل‌کننده واحدهای DG پیاده‌سازی شود. به همین منظور در این بخش جهت مقایسه عملکرد تقسیم توان در ریزش‌بکه شکل (۵-۱۰) امپدانس مجازی، با در نظر گرفتن امپدانس مجازی مثبت و منفی به ترتیب در زیربخش‌های ۵-۳-۳-۱ و ۵-۳-۳-۲ مورد بررسی قرار گرفته است.

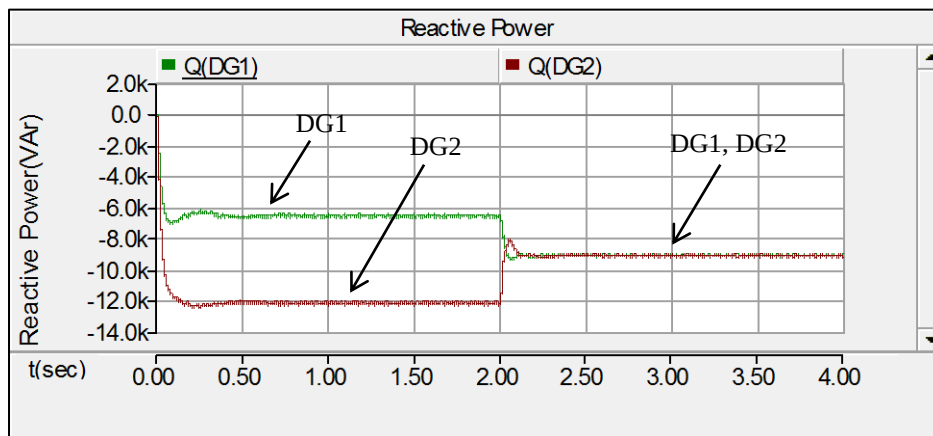
۵-۳-۳-۱- عملکرد تقسیم توان توسط روش امپدانس مجازی قابل تنظیم مثبت

هدف این قسمت بررسی عملکرد تقسیم توان حقیقی و راکتیو توسط روش امپدانس مجازی قابل تنظیم مثبت است که به ترتیب در شکل‌های (۵-۱۷) و (۵-۱۸) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۵-۱۸)، در ابتدا (فاصله زمانی ۰ تا ۲ ثانیه) روش افتی متداول فعال بوده و روش امپدانس مجازی قابل تنظیم مثبت در ثانیه ۲ اعمال شده است. با آغاز عملکرد روش مذکور تقسیم توان راکتیو به‌طور قابل ملاحظه‌ای بهبود یافته است.

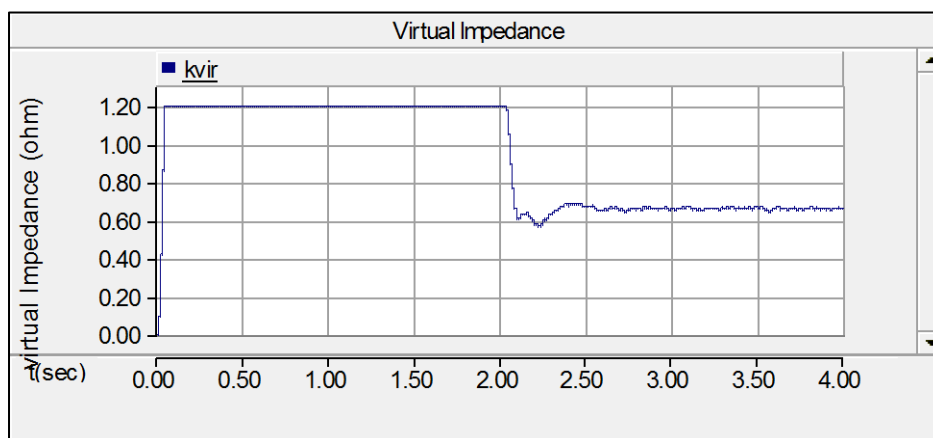


شکل (۵-۱۷): عملکرد تقسیم توان حقیقی توسط واحدهای DG با اصلاح روش افتی متداول توسط روش امپدانس مجازی قابل تنظیم مثبت.

در شکل (۵-۱۹) تغییرات مقاومت و راکتانس مجازی جهت بهبود تقسیم توان راکتیو نشان داده شده است. از این شکل می‌توان دریافت که جهت محقق شدن تقسیم صحیح توان راکتیو مقاومت و راکتانس مجازی باید تقریباً در مقدار ۰/۶۹ تنظیم شوند.



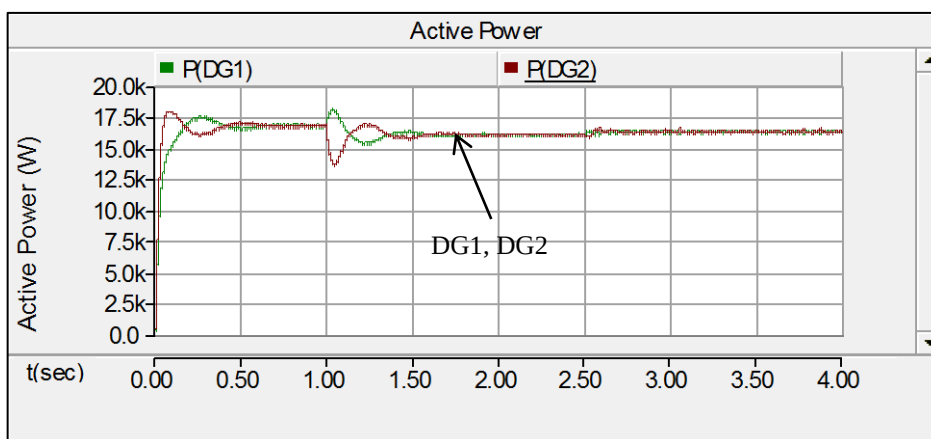
شکل (۵-۱۸): عملکرد تقسیم توان راکتیو توسط واحدهای DG با اصلاح روش افی متداول توسط روش امپدانس مجازی قابل تنظیم مثبت.



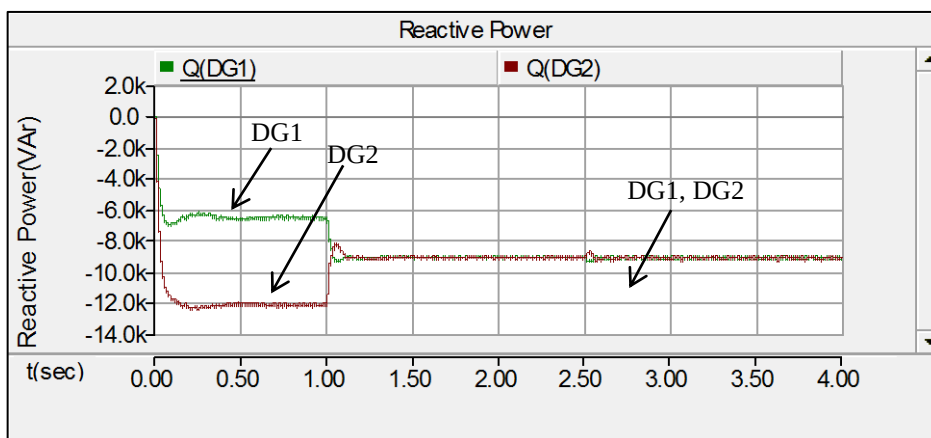
شکل (۵-۱۹): سیگنال کنترلی K_{vir} بیانگر مقاومت و راکتانس مجازی.

الف: تغییر امپدانس خط تغذیه

در این قسمت عملکرد تقسیم توان توسط واحدهای DG با استفاده از روش امپدانس مجازی قابل تنظیم مثبت در اثر تغییر امپدانس خط تغذیه بررسی شده است.

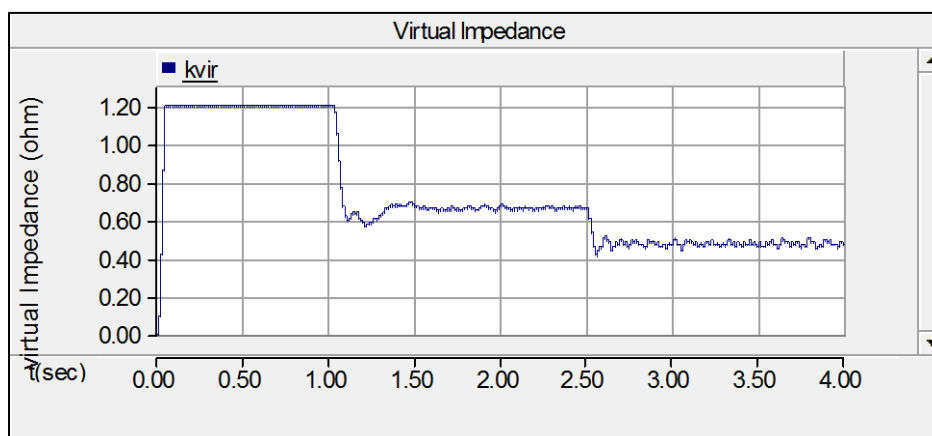


شکل (۵-۲۰): عملکرد تقسیم توان حقیقی توسط واحدهای DG با اصلاح روش ایتی متداول توسط روش امپدانس مجازی قابل تنظیم مثبت با در نظر گرفتن تغییر در امپدانس خط تغذیه DG1.



شکل (۵-۲۱): عملکرد تقسیم توان راکتیو توسط واحدهای DG با اصلاح روش ایتی متداول توسط روش امپدانس مجازی قابل تنظیم مثبت با در نظر گرفتن تغییر در امپدانس خط تغذیه DG1.

با توجه به شکل‌های (۵-۲۰) و (۵-۲۱) روش امپدانس مجازی قابل تنظیم مثبت در ثانیه ۱ فعال شده است و تقسیم صحیح توان از این زمان به بعد انجام شده است. در ثانیه ۲/۵، مقاومت و اندوکتانس امپدانس خط تغذیه DG1 به ترتیب به ۰/۳۵ اهم و ۱/۸ میلی هانری تغییر داده شده است. در واقع متناسب با تغییر امپدانس خط تغذیه، مقدار امپدانس مجازی به گونه‌ای تنظیم می‌شود که تقسیم توان راکتیو به صورت صحیح انجام گیرد.



شکل (۵-۲۲): سیگنال کنترلی K_{vir} بیانگر مقاومت و راکتانس مجازی با در نظر گرفتن تغییر در امپدانس خط تغذیه DG1.

در فاصله زمانی ۰ تا ۲/۵ ثانیه عدم تطبیق مقاومت (ΔR) و راکتانس (ΔX) دو خط تغذیه به ترتیب ۰/۲ و ۰/۳۱۴ اهم بوده است و در فاصله زمانی ۲/۵ تا ۴ ثانیه که تغییر امپدانس اعمال شده، عدم تطبیق مقاومت و راکتانس دو خط تغذیه به ترتیب تقریباً ۰/۱۵ و ۰/۲۵ اهم است. با توجه به این تغییر، مقاومت و راکتانس امپدانس مجازی جهت بهبود تقسیم توان راکتیو با توجه به شکل (۵-۲۲) از مقدار ۰/۶۹ اهم به ۰/۵ اهم تغییر می‌یابد و این شکل حساسیت امپدانس مجازی به تغییر در مقدار امپدانس فیزیکی خطوط تغذیه را نشان می‌دهد.

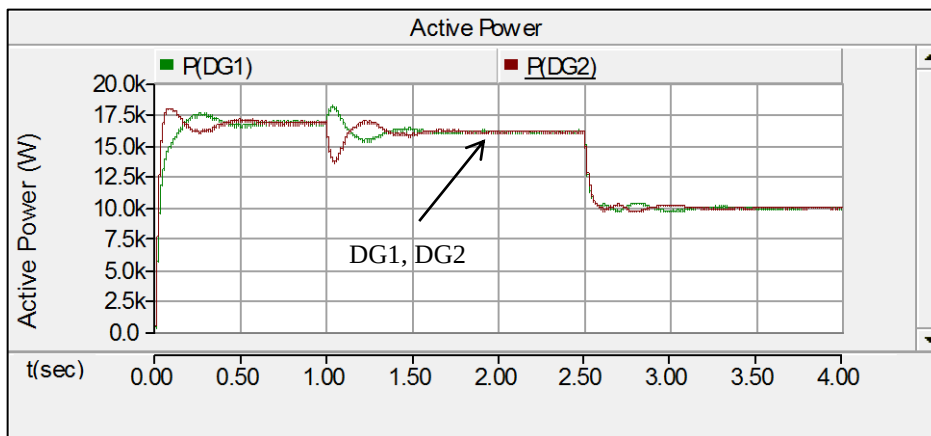
$$X_{vir} = R_{vir} \approx \frac{\Delta X Q + \Delta R P}{P + Q}$$

لذا با توجه به نتیجه حاصل از شبیه سازی و رابطه فوق که در فصل چهارم نیز به آن پرداخته شد، می‌توان دریافت که هر چه میزان عدم تطبیق امپدانس خطوط تغذیه واحدهای DG کمتر باشد به مقاومت و راکتانس مجازی کمتری جهت محقق شدن تقسیم صحیح توان راکتیو نیاز است.

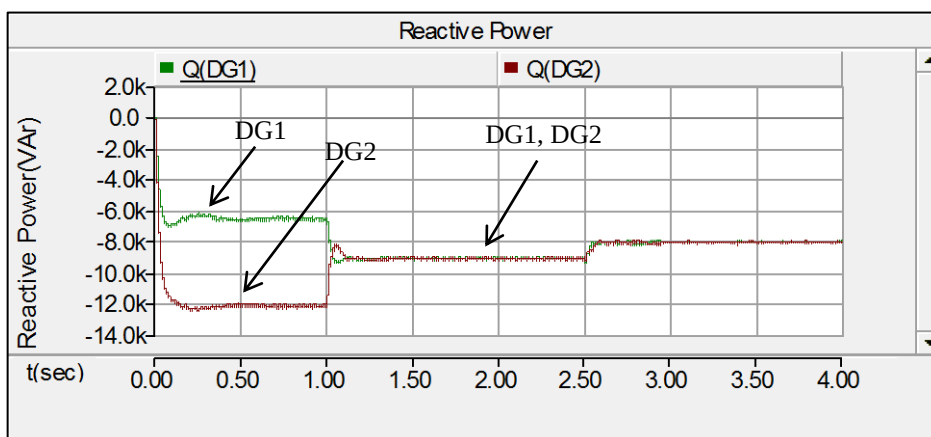
ب: تغییر بار

هدف از این قسمت بررسی اثر تغییر بار بر عملکرد تقسیم توان با در نظر گرفتن روش امپدانس مجازی قابل تنظیم مثبت است. به این منظور تغییری در بار اعمال شده است و مقاومت و راکتانس بار

در ثانیه ۲/۵ به ترتیب به مقدار ۴ و ۳/۱۴ اهم افزایش یافته است، که در شکل‌های (۲۳-۵) و (۲۴-۵) قابل مشاهده است.

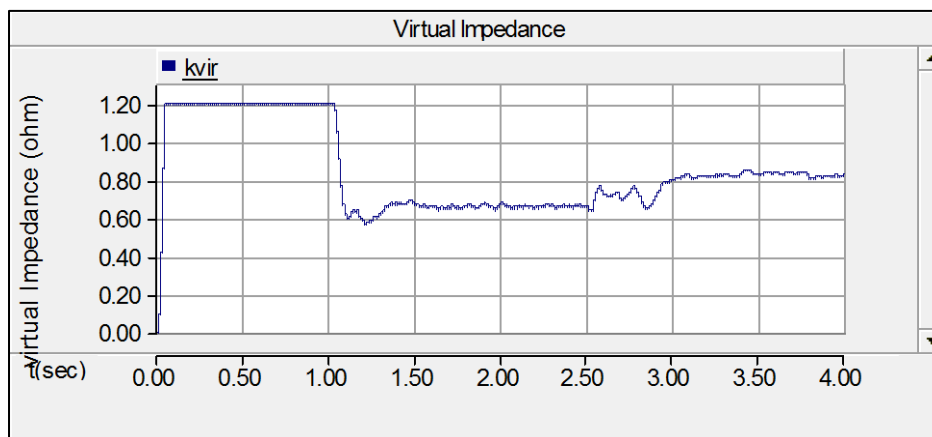


شکل (۲۳-۵): عملکرد تقسیم توان حقیقی توسط واحدهای DG با اصلاح روش ایتی متداول توسط روش امپدانس مجازی قابل تنظیم مثبت با در نظر گرفتن تغییر بار ریز شبکه.



شکل (۲۴-۵): عملکرد تقسیم توان راکتیو توسط واحدهای DG با اصلاح روش ایتی متداول توسط روش امپدانس مجازی قابل تنظیم مثبت با در نظر گرفتن تغییر بار ریز شبکه.

با توجه به شکل (۲۴-۵) با اعمال تغییر در بار در ثانیه ۲/۵ تقسیم توان راکتیو به صورت صحیح ادامه می‌یابد و این بیانگر این حقیقت است که با استفاده از روش امپدانس مجازی قابل تنظیم مثبت، سیستم کنترلی قادر است تغییرات بار را به منظور تحقق تقسیم صحیح توان دنبال کند. با توجه به شکل (۲۵-۵) برای اینکه سیستم کنترلی تغییرات ایجاد شده در بار را بتواند دنبال کند مقاومت و راکتانس امپدانس مجازی باید تقریباً در مقدار ۰/۸۲ اهم تنظیم شوند.



شکل (۵-۲۵): سیگنال کنترلی K_{vir} بیانگر مقاومت و راکتانس مجازی با در نظر گرفتن تغییر بار ریز شبکه.

ج: در نظر گرفتن نسبت مقاومت به راکتانس (R/X) خط تغذیه

همان طور که در تئوری ارائه شده در فصل سوم و چهارم بیان شد، نسبت مقاومت به راکتانس خط تغذیه می تواند نقش موثری در تعیین نوع و میزان امپدانس مجازی داشته باشد، از این رو جهت بررسی عملکرد روش امپدانس مجازی قابل تنظیم ارائه شده در فصل چهارم به ازای نسبت های مختلف مقاومت به راکتانس فیزیکی خط تغذیه مطابق جدول (۳-۱) برای یک خط نمونه، در سه حالت خط تغذیه با نسبت مقاومت به راکتانس پایین ($R \ll X$)، مقاومت و راکتانس تقریباً برابر ($R \approx X$) و نسبت مقاومت به راکتانس بالا ($R \gg X$) شبیه سازی ها انجام شده است.

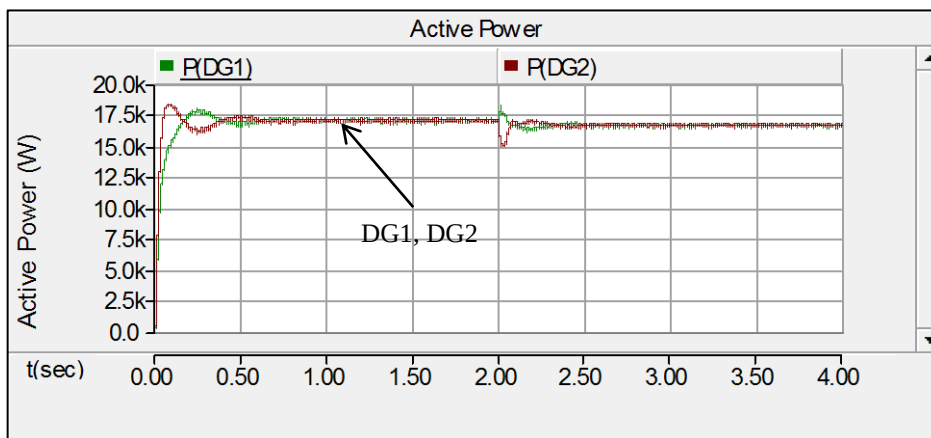
ج-۱: خط تغذیه با نسبت R/X پایین ($R \ll X$)

عملکرد تقسیم توان حقیقی و راکتیو روش امپدانس مجازی قابل تنظیم مثبت با در نظر گرفتن خطوط تغذیه دارای نسبت R/X پایین با مشخصات خطوط تغذیه داده شده در جدول (۵-۲) به ترتیب در شکل های (۵-۲۶) و (۵-۲۷) نشان داده شده است.

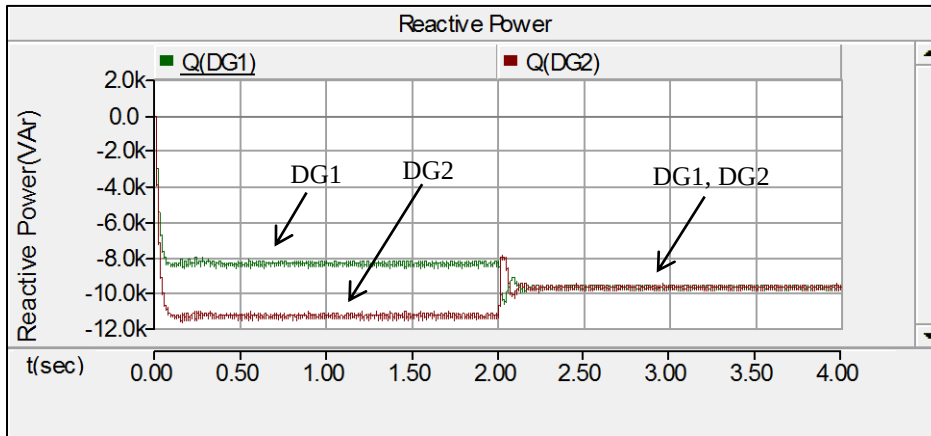
جدول (۵-۲): مشخصات خط تغذیه نمونه با نسبت R/X پایین.

مشخصات خط تغذیه	
خط تغذیه ۱	مقاومت: 0.04 اهم ، اندوکتانس: 2 میلی هانری
خط تغذیه ۲	مقاومت: 0.02 اهم ، اندوکتانس: 1 میلی هانری

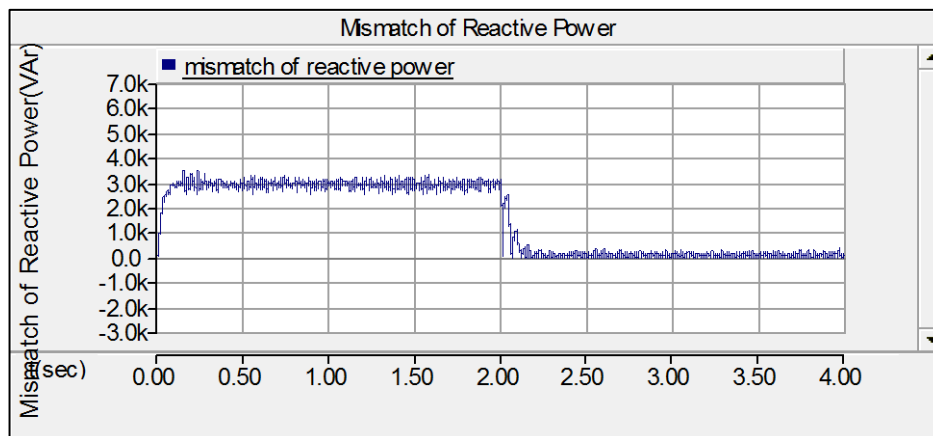
با توجه به شکل (۵-۲۷) روش کنترل ارائه شده برای متغیر امپدانس مجازی ارائه در بخش ۴-۴ می تواند در این ریزشبهه تقسیم صحیح توان راکتیو را محقق سازد. روند تغییر و کاهش خطای تقسیم توان راکتیو در شکل (۵-۲۸) نشان داده است. از شکل های (۵-۲۷) و (۵-۲۸) می توان دریافت که با در نظر گرفتن ریزشبهه با خط تغذیه دارای نسبت R/X پایین، تقسیم توان راکتیو می تواند توسط روش امپدانس مجازی قابل تنظیم بهبود داده شود.



شکل (۵-۲۶): عملکرد تقسیم توان حقیقی توسط واحدهای DG با اصلاح روش افا متداول توسط روش امپدانس مجازی قابل تنظیم مثبت با در نظر گرفتن خط تغذیه با نسبت R/X پایین.



شکل (۵-۲۷): عملکرد تقسیم توان راکتیو توسط واحدهای DG با اصلاح روش ایتی متداول توسط روش امپدانس مجازی قابل تنظیم مثبت با در نظر گرفتن خط تغذیه با نسبت R/X پایین.



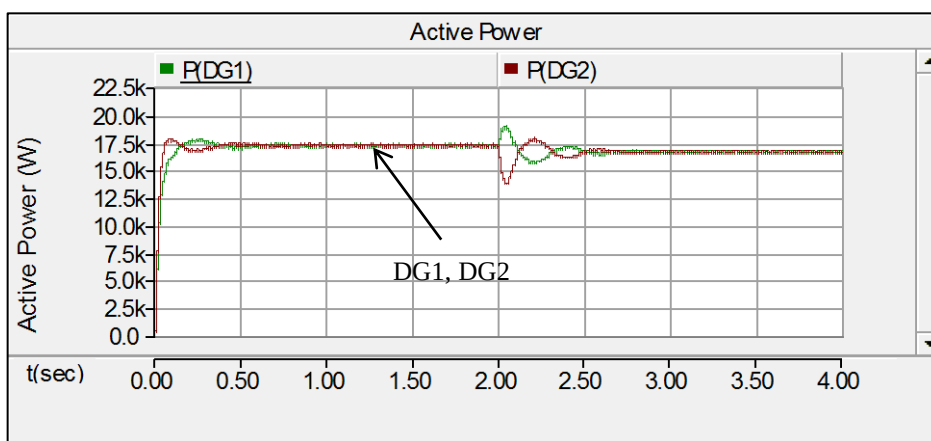
شکل (۵-۲۸): خطای تقسیم توان راکتیو با اصلاح روش ایتی متداول توسط روش امپدانس مجازی قابل تنظیم مثبت با در نظر گرفتن خط تغذیه با نسبت R/X پایین.

ج-۲: خط تغذیه با نسبت $\frac{R}{X} \approx 1$

به منظور ارزیابی عملکرد تقسیم توان با استفاده از روش امپدانس مجازی قابل تنظیم مثبت، ریزشکه با خطوط تغذیه دارای R و X تقریباً برابر و مطابق با مقادیر داده شده در جدول (۵-۳) شبیه سازی شده است. عملکرد تقسیم توان حقیقی و راکتیو به ترتیب در شکل های (۵-۲۹) و (۵-۳۰) نشان داده شده است.

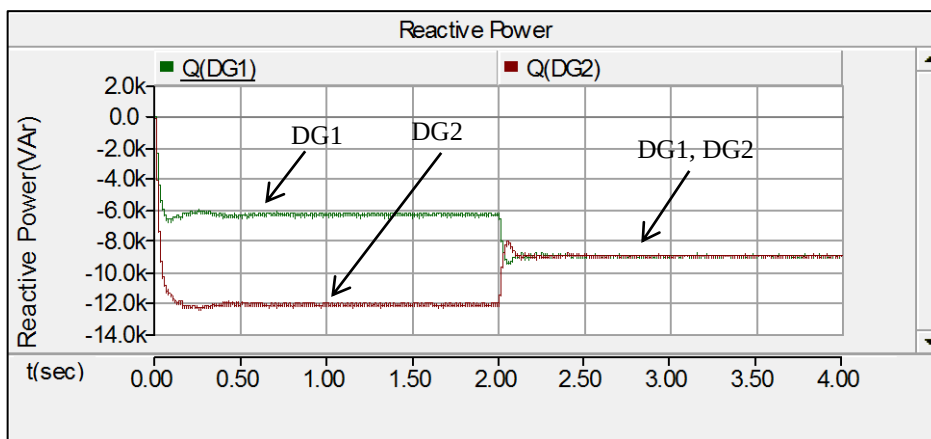
جدول (۵-۳): مشخصات خط تغذیه نمونه با نسبت $\frac{R}{X} \approx 1$.

مشخصات خط تغذیه	
خط تغذیه ۱	مقاومت: ۰/۴ اهم، اندوکتانس: ۱/۲ میلی هانری
خط تغذیه ۲	مقاومت: ۰/۲ اهم، اندوکتانس: ۰/۶ میلی هانری



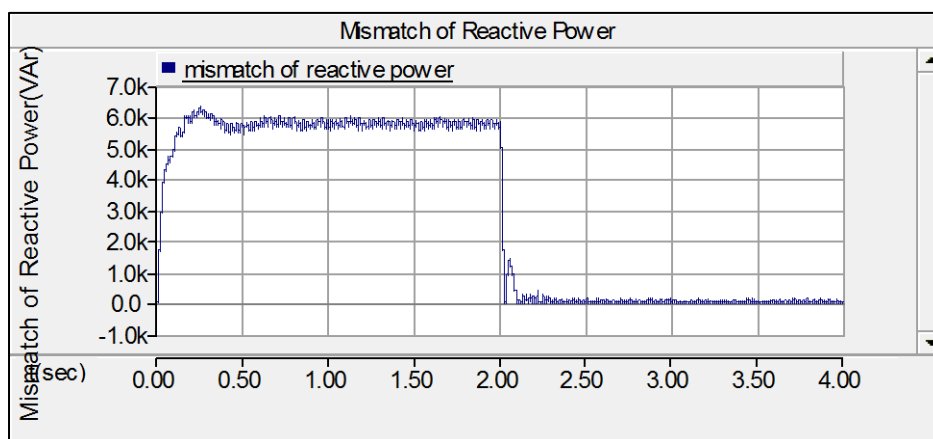
شکل (۵-۲۹): عملکرد تقسیم توان حقیقی توسط واحدهای DG با اصلاح روش ایتی متداول توسط روش امپدانس

مجازی قابل تنظیم مثبت با در نظر گرفتن خط تغذیه با نسبت $\frac{R}{X} \approx 1$.



شکل (۵-۳۰): عملکرد تقسیم توان راکتیو توسط واحدهای DG با اصلاح روش ایتی متداول توسط روش امپدانس

مجازی قابل تنظیم مثبت با در نظر گرفتن خط تغذیه با نسبت $\frac{R}{X} \approx 1$.



شکل (۳۱-۵): خطای تقسیم توان راکتیو با اصلاح روش ایتی متداول توسط روش امپدانس مجازی قابل تنظیم مثبت با در نظر گرفتن خط تغذیه با نسبت $\frac{R}{X} \approx 1$.

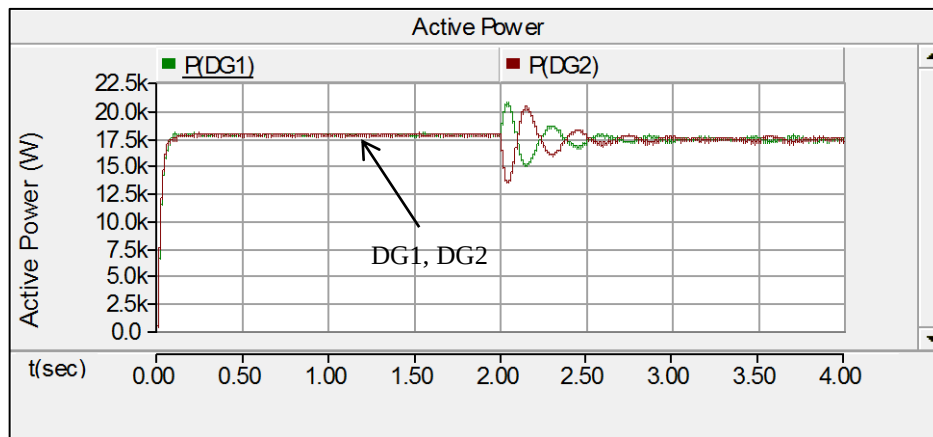
با توجه به شکل (۳۰-۵) و (۳۱-۵)، در صورتی مشخصات خطوط تغذیه به صورت جدول (۳-۵) لحاظ شوند، خطای تقسیم توان راکتیو با فعال شدن روش امپدانس مجازی به صفر کاهش می یابد.

ج-۳: خط تغذیه با نسبت R/X بالا ($R \gg X$)

در این قسمت نسبت مقاومت به راکتانس خطوط تغذیه بالا انتخاب شده است، که مشخصات خطوط تغذیه در جدول (۴-۵) داده شده است. به منظور بررسی عملکرد تقسیم توان با استفاده از روش امپدانس مجازی قابل تنظیم مثبت در این نوع ریزش شبکه، روش امپدانس مجازی در ثانیه ۲ به سیستم کنترلی اعمال شده است.

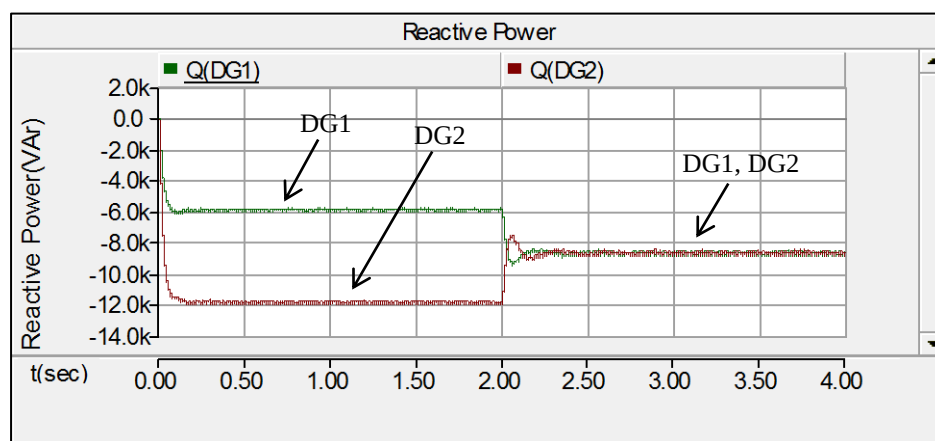
جدول (۴-۵): مشخصات خط تغذیه نمونه با نسبت R/X بالا.

مشخصات خط تغذیه	
خط تغذیه ۱	مقاومت: ۰/۴ اهم، اندوکتانس: ۰/۲ میلی هانری
خط تغذیه ۲	مقاومت: ۰/۲ اهم، اندوکتانس: ۰/۱ میلی هانری

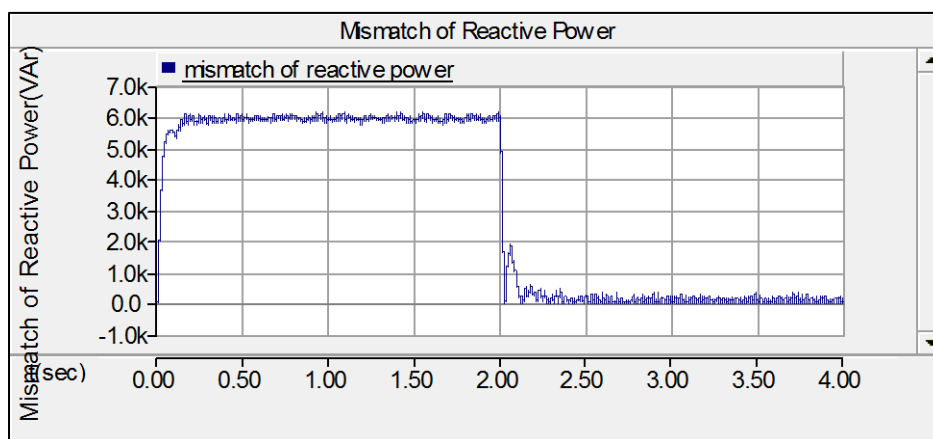


شکل (۳۲-۵): عملکرد تقسیم توان حقیقی توسط واحدهای DG با اصلاح روش ایتی متداول توسط روش امپدانس مجازی قابل تنظیم مثبت با در نظر گرفتن خط تغذیه با نسبت R/X بالا.

شکل‌های (۳۲-۵) و (۳۳-۵) به ترتیب عملکرد تقسیم توان حقیقی و راکتیو توسط واحدهای DG را نشان می‌دهند. همان‌طور که از شکل (۳۳-۵) می‌توان دریافت، عملکرد تقسیم توان راکتیو به‌گونه‌ای است که با فعال شدن روش مذکور تقسیم توان راکتیو به‌صورت صحیح انجام می‌شود. به‌عبارت‌دیگر همان‌طور که در شکل (۳۴-۵) نشان داده شده است با اعمال روش امپدانس مجازی در فاصله زمانی ۰ تا ۲ ثانیه خطای تقسیم توان راکتیو به مقدار صفر کاهش می‌یابد.



شکل (۳۳-۵): عملکرد تقسیم توان راکتیو توسط واحدهای DG با اصلاح روش ایتی متداول توسط روش امپدانس مجازی قابل تنظیم مثبت با در نظر گرفتن خط تغذیه با نسبت R/X بالا.



شکل (۵-۳۴): خطای تقسیم توان راکتیو با اصلاح روش ایتی متداول توسط روش امپدانس مجازی قابل تنظیم مثبت با در نظر گرفتن خط تغذیه با نسبت R/X بالا.

د: در نظر گرفتن مدل بار

همان‌طور که در بخش ۳-۳ مطرح شد، در شبکه برق انواع مختلفی از بارها وجود دارد که شبکه باید به تغذیه آن‌ها بپردازد. مدل بار در شبکه برق از جمله عوامل تأثیرگذار بر نحوه طراحی کنترل‌کننده‌ها است. از جمله این بارها، بارهای وابسته به ولتاژ هستند که در فصل سوم این پایان‌نامه به بررسی برخی از آن‌ها شامل بار توان ثابت، بار جریان ثابت و بار امپدانس ثابت پرداخته شد. توان حقیقی و توان راکتیو انواع مختلف بارها به ترتیب به صورت دو رابطه زیر است، که در آن‌ها n و m با توجه به آنچه در فصل سوم گفته شد تعیین‌کننده نوع بار هستند.

$$P_L = P_0 \left(\frac{V_{PCC}}{E_0} \right)^n$$

$$Q_L = Q_0 \left(\frac{V_{PCC}}{E_0} \right)^m$$

اگر توان انتقالی به باس بار با لحاظ نوع بار به صورت بار توان ثابت، جریان ثابت و امپدانس ثابت در نظر گرفته شود، اثر این نوع بارها را می‌توان در افت ولتاژ روی امپدانس خط تغذیه و مقدار توان خروجی واحدهای DG مشاهده کرد. که در نتیجه این اثر میزان اختلاف افت ولتاژ در خروجی واحدها

در هر یک از مدل‌های بار متفاوت خواهد بود، و از این‌رو نیاز است در هر حالت مقدار متغیر تنظیمی برای مقاومت و راکتانس مجازی متفاوت باشد تا تقسیم صحیح توان محقق شود.

در این قسمت هدف این است که کارایی روش کنترلی ارائه‌شده در حضور انواع مدل‌های بار بررسی گردد، از این‌رو سه مدل بار توان ثابت، جریان ثابت و امپدانس ثابت را همان‌گونه که در بخش ۳-۳ نیز بیان شد جهت انجام شبیه‌سازی و ارزیابی روش کنترلی در نظر گرفته شده است.

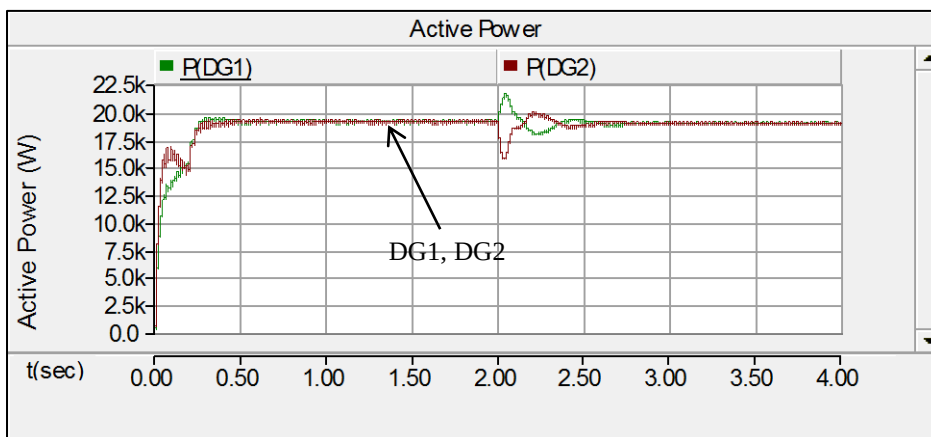
د-۱: مدل بار توان ثابت

هدف این بخش از شبیه‌سازی، در نظر گرفتن بار توان ثابت در باس نقطه مشترک و بررسی و مشاهده عملکرد تقسیم توان توسط واحدهای DG در حضور این نوع از بار است. همان‌طور که قبلاً و در بخش ۳-۳-۱ نیز اشاره شد n و m در معادلات مربوط به مدل بار $((32-3))$ و $((33-3))$ برابر با صفر هستند. از این‌رو توان حقیقی و راکتیو بار توان ثابت به‌صورت روابط زیر در نظر گرفته می‌شوند:

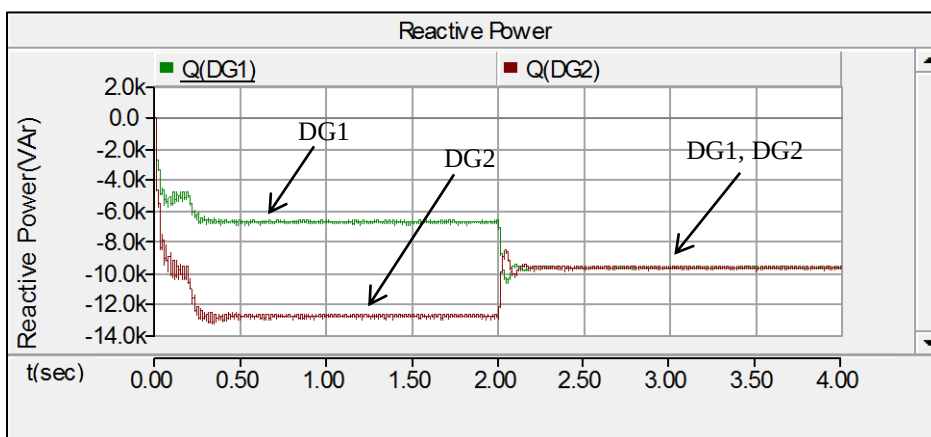
$$P_L = P_0$$

$$Q_L = Q_0$$

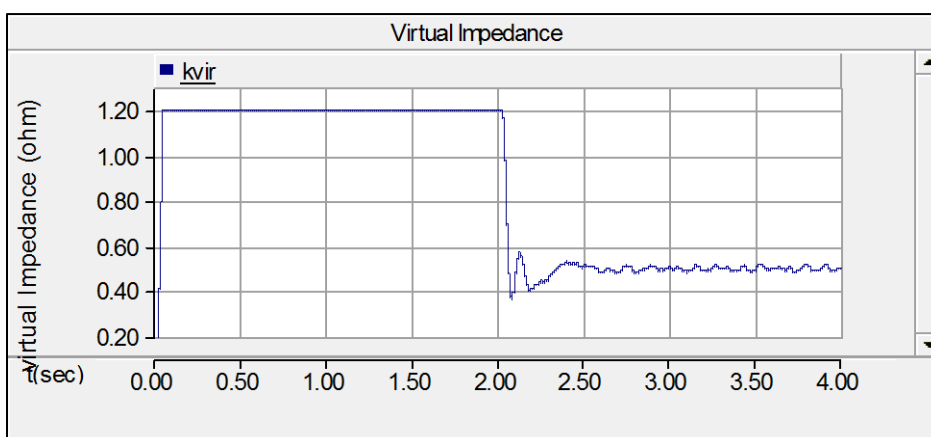
در این حالت با در نظر گرفتن بار توان ثابت، در فاصله زمانی بین ۰ تا ۲ ثانیه تنها از روش اُفتی متداول جهت کنترل تقسیم توان استفاده شده است و در ثانیه ۲ روش امپدانس مجازی نیز فعال شده است. همان‌طور که در شکل (۵-۳۶) نشان داده شده است با فعال شدن روش کنترلی ارائه‌شده، تقسیم صحیح توان راکتیو توسط واحدهای DG در ریزشبهه محقق می‌شود. در شکل (۵-۳۷) مقدار مقاومت و راکتانس مجازی لازم جهت جبران عدم تطبیق امپدانس خطوط تغذیه واحدهای DG در حضور بار توان ثابت نشان داده شده است.



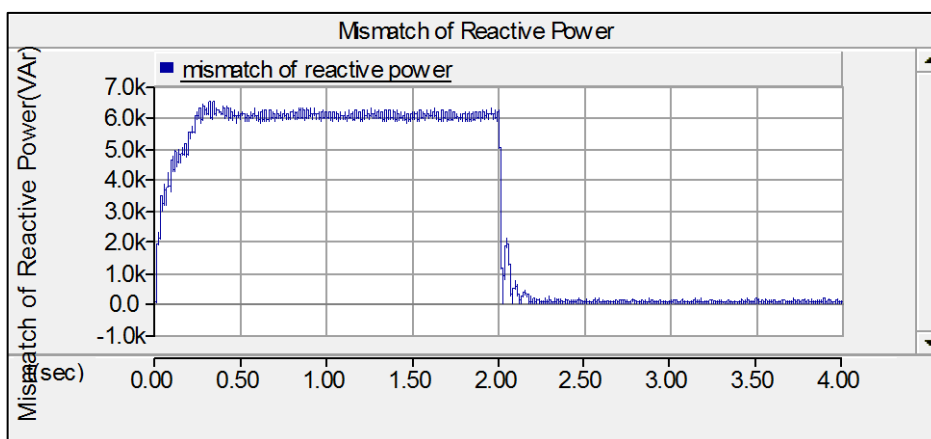
شکل (۵-۳۵): عملکرد تقسیم توان حقیقی توسط واحدهای DG با اصلاح روش افاقی متداول توسط روش امیدانس مجازی قابل تنظیم مثبت با در نظر گرفتن بار توان ثابت.



شکل (۵-۳۶): عملکرد تقسیم توان راکتیو توسط واحدهای DG با اصلاح روش افاقی متداول توسط روش امیدانس مجازی قابل تنظیم مثبت با در نظر گرفتن بار توان ثابت.



شکل (۵-۳۷): سیگنال کنترلی K_{vir} بیانگر مقاومت و راکتانس مجازی با در نظر گرفتن بار توان ثابت.



شکل (۵-۳۸): خطای تقسیم توان راکتیو با اصلاح روش افاقی متداول توسط روش امپدانس مجازی قابل تنظیم مثبت با در نظر گرفتن بار توان ثابت.

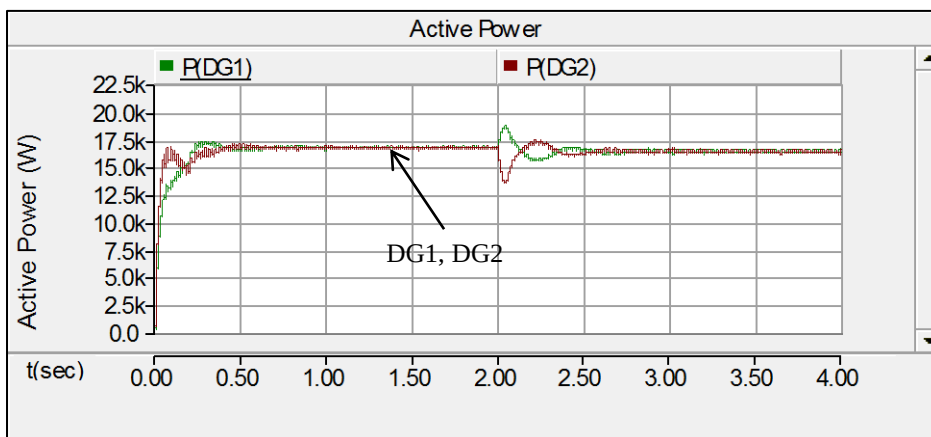
د-۲: مدل بار جریان ثابت

هدف از این قسمت در نظر گرفتن مدل بار جریان ثابت و مشاهده عملکرد تقسیم توان حقیقی و راکتیو توسط واحدهای DG در حضور بار جریان ثابت است. با توجه به مطالب ارائه شده در فصل سوم جهت مدل کردن بار جریان ثابت، n و m در معادلات مدل بار برابر با یک در نظر گرفته می شوند. با توجه به این مدل، توان حقیقی و راکتیو بار جریان ثابت به صورت روابط زیر هستند:

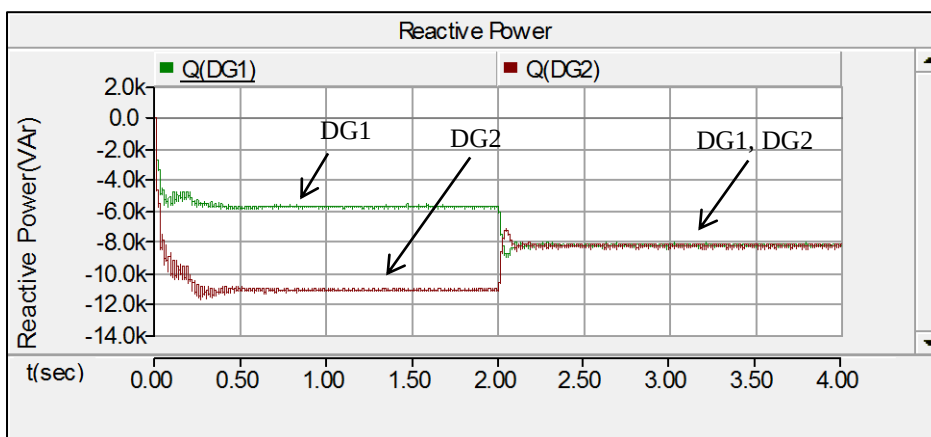
$$P_L = P_0 \left(\frac{V_{PCC}}{E_0} \right)$$

$$Q_L = Q_0 \left(\frac{V_{PCC}}{E_0} \right)$$

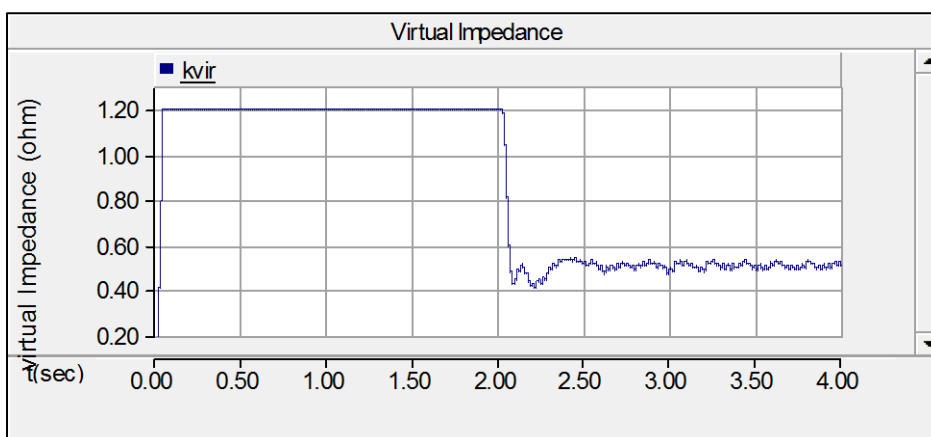
در فاصله زمانی بین ۰ تا ۲ ثانیه تنها از روش افاقی متداول جهت کنترل تقسیم توان استفاده شده است و در ثانیه ۲ روش امپدانس مجازی نیز اعمال شده است. همان طور که در شکل (۵-۴۰) و (۵-۴۲) نشان داده شده، با فعال شدن روش کنترلی ارائه شده تقسیم صحیح توان راکتیو محقق می شود و خطای تقسیم توان راکتیو به صفر کاهش می یابد. در شکل (۵-۴۱) مقدار مقاومت و راکتانس مجازی لازم جهت جبران عدم تطبیق امپدانس خطوط تغذیه واحدها نشان داده شده است.



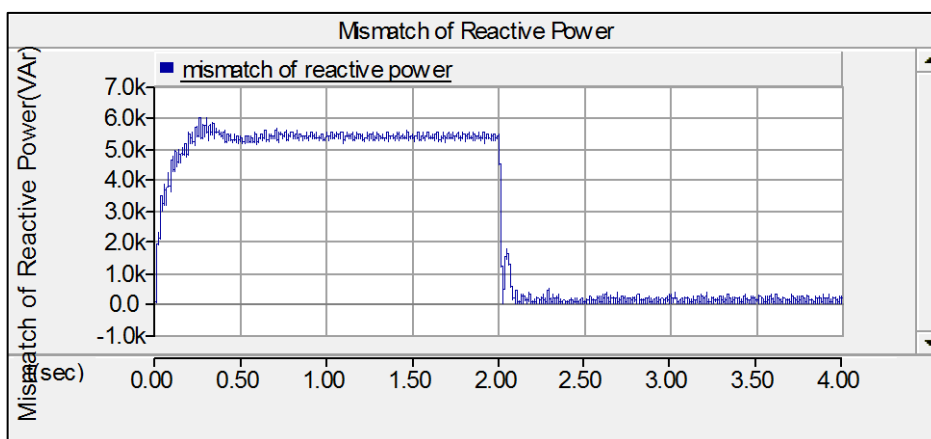
شکل (۵-۳۹): عملکرد تقسیم توان حقیقی توسط واحدهای DG با اصلاح روش ایتی متداول توسط روش امیدانس مجازی قابل تنظیم مثبت با در نظر گرفتن بار جریان ثابت.



شکل (۵-۴۰): عملکرد تقسیم توان راکتیو توسط واحدهای DG با اصلاح روش ایتی متداول توسط روش امیدانس مجازی قابل تنظیم مثبت با در نظر گرفتن بار جریان ثابت.



شکل (۵-۴۱): سیگنال کنترلی K_{vir} بیانگر مقاومت و راکتانس مجازی با در نظر گرفتن بار جریان ثابت.



شکل (۵-۴۲): خطای تقسیم توان راکتیو با اصلاح روش افی متداول توسط روش امپدانس مجازی قابل تنظیم مثبت با در نظر گرفتن بار جریان ثابت.

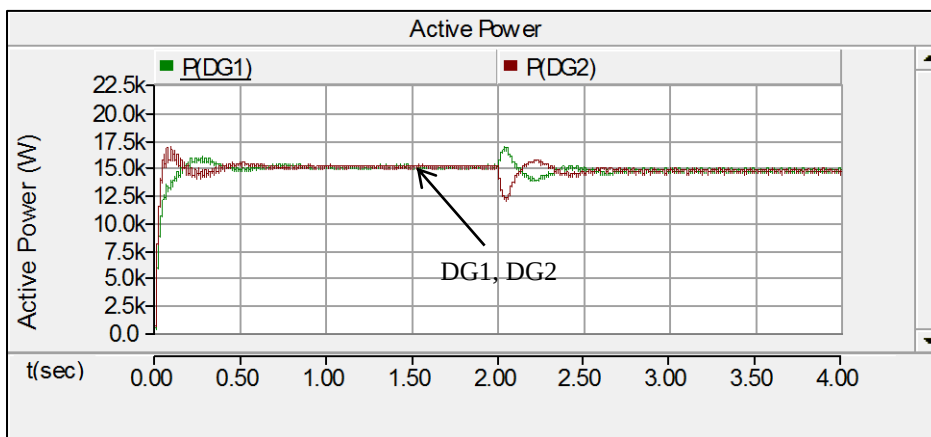
د-۳: مدل بار امپدانس ثابت

هدف در این قسمت، مشاهده عملکرد تقسیم توان حقیقی و راکتیو توسط واحدهای تولید پراکنده با در نظر گرفتن مدل بار توان ثابت در باس نقطه مشترک است. با توجه معادلات مربوط به مدل بار که در روابط (۳-۳۲) و (۳-۳۳) ارائه شدند به منظور مدل کردن توان حقیقی و راکتیو بار امپدانس ثابت n و m برابر با مقدار دو در نظر گرفته می شوند. بنابراین در مدل بار امپدانس ثابت توان حقیقی و راکتیو بار به ترتیب به صورت روابط زیر هستند:

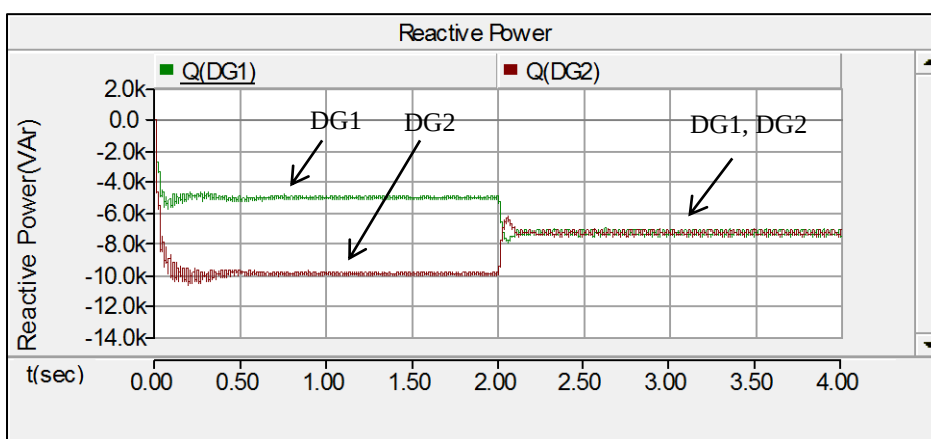
$$P_L = P_0 \left(\frac{V_{PCC}}{E_0} \right)^2$$

$$Q_L = Q_0 \left(\frac{V_{PCC}}{E_0} \right)^2$$

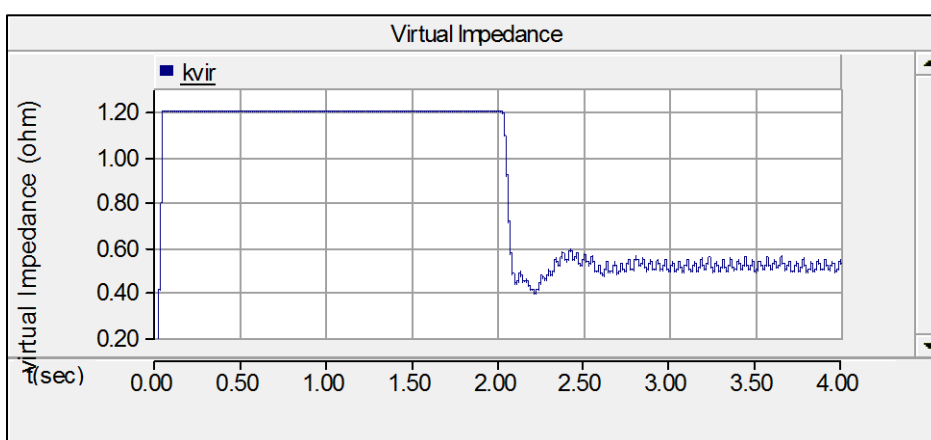
در فاصله زمانی بین ۰ تا ۲ ثانیه تنها از روش افی متداول جهت کنترل تقسیم توان استفاده شده است و در ثانیه ۲ روش امپدانس مجازی نیز فعال شده است. عملکرد تقسیم توان حقیقی و راکتیو توسط واحدهای DG به ترتیب در شکل های (۵-۴۳) و (۵-۴۴) نشان داده شده است.



شکل (۴۳-۵): عملکرد تقسیم توان حقیقی توسط واحدهای DG با اصلاح روش افاقی متداول توسط روش امیدانس مجازی قابل تنظیم مثبت با در نظر گرفتن بار امیدانس ثابت.

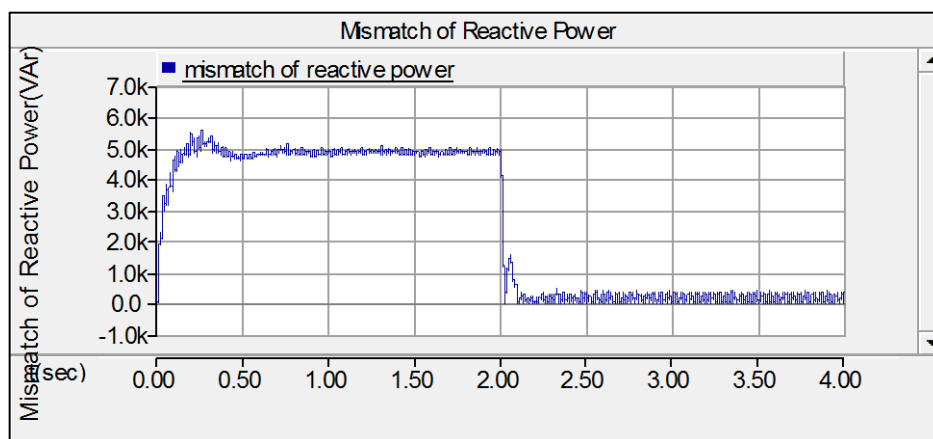


شکل (۴۴-۵): عملکرد تقسیم توان راکتیو توسط واحدهای DG با اصلاح روش افاقی متداول توسط روش امیدانس مجازی قابل تنظیم مثبت با در نظر گرفتن بار امیدانس ثابت.



شکل (۴۵-۵): سیگنال کنترلی K_{vir} بیانگر مقاومت و راکتانس مجازی با در نظر گرفتن بار امیدانس ثابت.

همان‌طور که در شکل (۴۴-۵) نشان داده شده با فعال شدن روش کنترلی ارائه‌شده تقسیم صحیح توان راکتیو محقق می‌شود، و با توجه به شکل (۴۶-۵) و فاصله زمانی ۲ تا ۴ ثانیه که روش امپدانس مجازی اعمال شده است می‌توان دریافت که این روش اثر مطلوبی بر حذف عدم تطبیق تقسیم توان راکتیو توسط واحدهای DG دارد. در شکل (۴۵-۵) مقدار مقاومت و راکتانس مجازی لازم جهت جبران عدم تطبیق امپدانس خطوط تغذیه واحدها نشان داده شده است.



شکل (۴۶-۵): خطای تقسیم توان راکتیو با اصلاح روش افی متداول توسط روش امپدانس مجازی قابل تنظیم مثبت با در نظر گرفتن بار امپدانس ثابت.

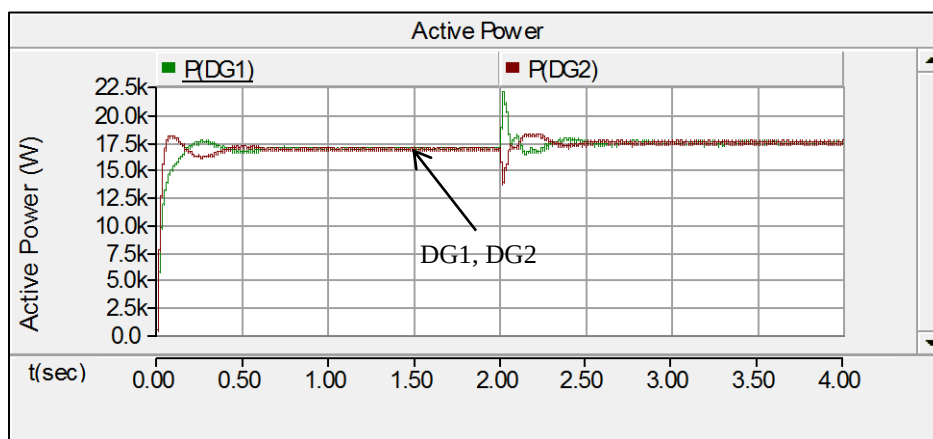
ه: تحلیل نتایج

با توجه به رابطه افت ولتاژ روی خط تغذیه در مدل بارهای مختلف که در بخش ۳-۳ بیان شد، و همچنین از شکل‌های (۳۸-۵)، (۴۲-۵) و (۴۶-۵) می‌توان دریافت که در بار توان ثابت، بار جریان ثابت و بار امپدانس ثابت به ترتیب اختلاف افت ولتاژ خطوط تغذیه منابع و در نتیجه خطای تقسیم توان راکتیو واحدها کم می‌شود. از شبیه‌سازی سه مدل بار مختلف و نتایج نشان داده شده در شکل‌های (۳۷-۵)، (۴۰-۵) و (۴۳-۵) می‌توان دریافت که در بارهای مختلف مقدار مقاومت و راکتانس مجازی باید در مقادیر مختلفی تنظیم شوند تا بتوانند عدم تطبیق ولتاژ ناشی از امپدانس خطوط تغذیه متفاوت را جبران کنند و تقسیم توان صحیحی را نتیجه دهند. اما ذکر این مسئله نیز

حائز اهمیت است که مقدار متغیر تعیین کننده امپدانس مجازی (K_{vir}) در سه نوع بار مختلف تقریباً باهم برابر هستند که این واقعیت در تئوری ارائه شده در بخش ۴-۵ نیز بیان شده است.

۵-۳-۳-۲- عملکرد تقسیم توان توسط روش امپدانس مجازی قابل تنظیم منفی

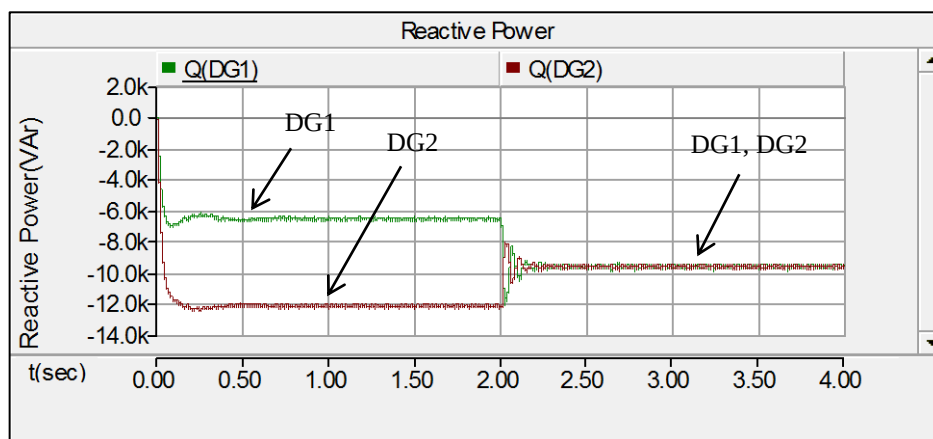
همان طور که در بخش ۴-۲-۲ بیان شد، امپدانس مجازی می تواند در خروجی واحد DG که دارای امپدانس خروجی واقعی بزرگتری است قرار گیرد. در ریزشکه مورد مطالعه امپدانس خط تغذیه DG1 دارای مقدار بزرگتری است، از این رو امپدانس مجازی منفی در خروجی DG1 قرار گرفته تا از این طریق امپدانس معادل خط تغذیه DG1 کاهش یافته و عدم تطبیق امپدانس خط تغذیه واحدهای DG تضعیف شود.



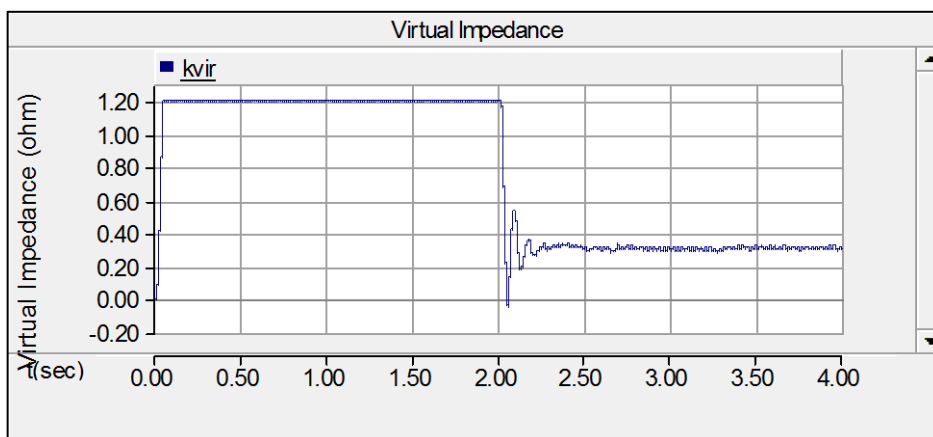
شکل (۵-۴۷): عملکرد تقسیم توان حقیقی توسط واحدهای DG با اصلاح روش افا متداول توسط روش امپدانس مجازی قابل تنظیم منفی.

در شکل های (۵-۴۷) و (۵-۴۸) به ترتیب عملکرد تقسیم توان حقیقی و راکتیو توسط واحدهای DG با استفاده از روش امپدانس مجازی قابل تنظیم منفی، نشان داده شده است. با توجه به شکل (۵-۴۸) و همچنین شکل (۵-۵۰) می توان دریافت که در ثانیه ۲ با پیاده سازی روش امپدانس مجازی منفی در خروجی واحدی که دارای امپدانس خط تغذیه بزرگتری است عدم تطبیق امپدانس دو خط

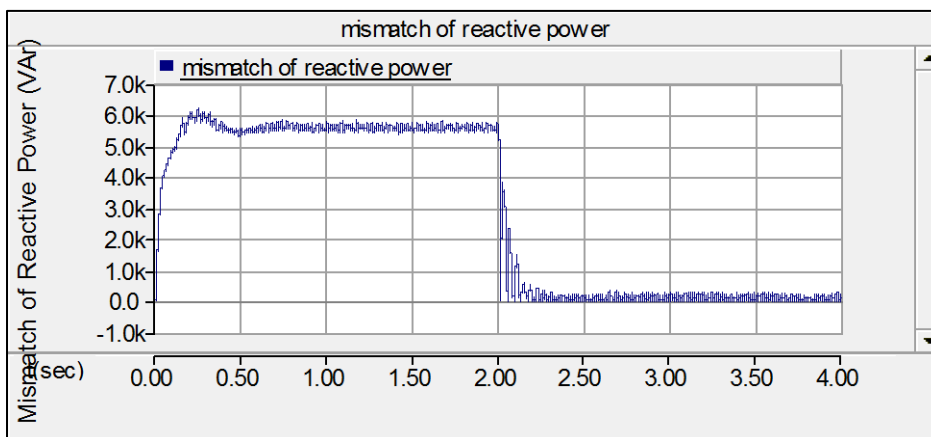
تغذیه حذف شده است و در نتیجه تقسیم صحیح توان راکتیو توسط واحدهای DG محقق شده است و متعاقباً خطای تقسیم توان راکتیو نیز کاهش یافته است.



شکل (۴۸-۵): عملکرد تقسیم توان راکتیو توسط واحدهای DG با اصلاح روش افی متداول توسط روش امپدانس مجازی قابل تنظیم منفی.



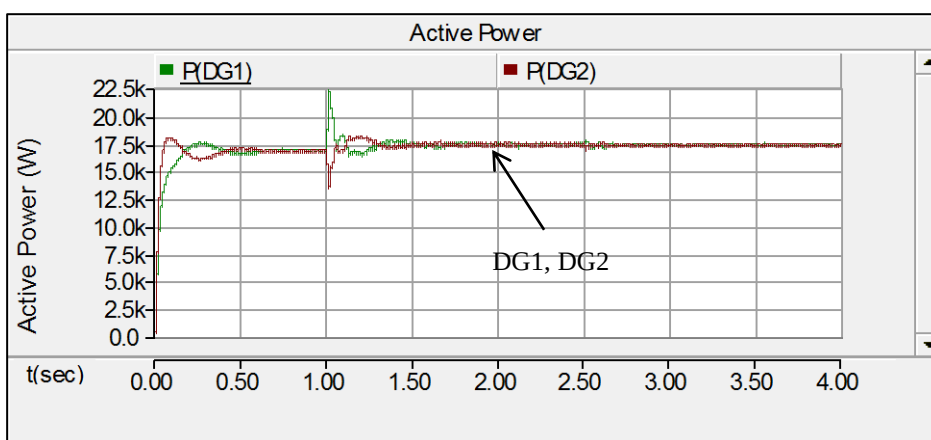
شکل (۴۹-۵۰): سیگنال کنترلی K_{vir} بیانگر مقاومت و راکتانس مجازی منفی.



شکل (۵-۵۰): خطای تقسیم توان راکتیو با اصلاح روش افسی متداول توسط روش امپدانس مجازی قابل تنظیم منفی.

الف: تغییر امپدانس خط تغذیه

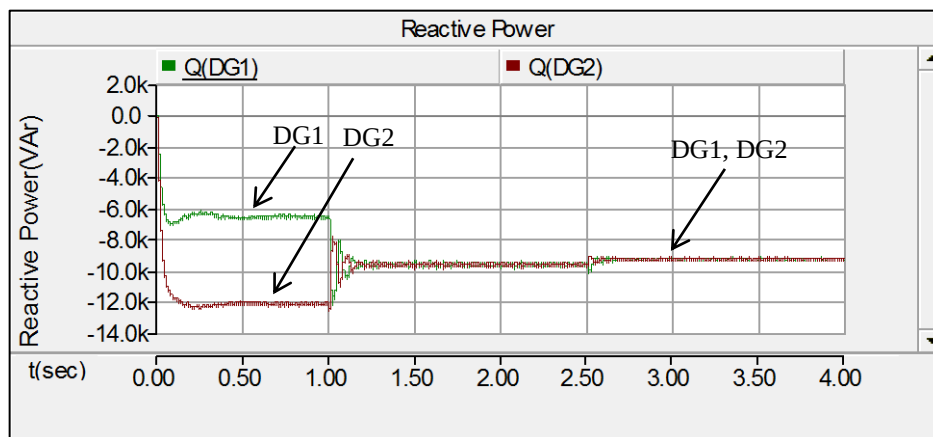
جهت بررسی عملکرد روش امپدانس مجازی منفی در اثر ایجاد تغییر در امپدانس خط تغذیه و نحوه تقسیم توان، در ثانیه ۲/۵ مقاومت و اندوکتانس خط تغذیه DG1 به ترتیب به مقادیر ۰/۴ اهم و ۲ میلی‌هنری تغییر داده شده است.



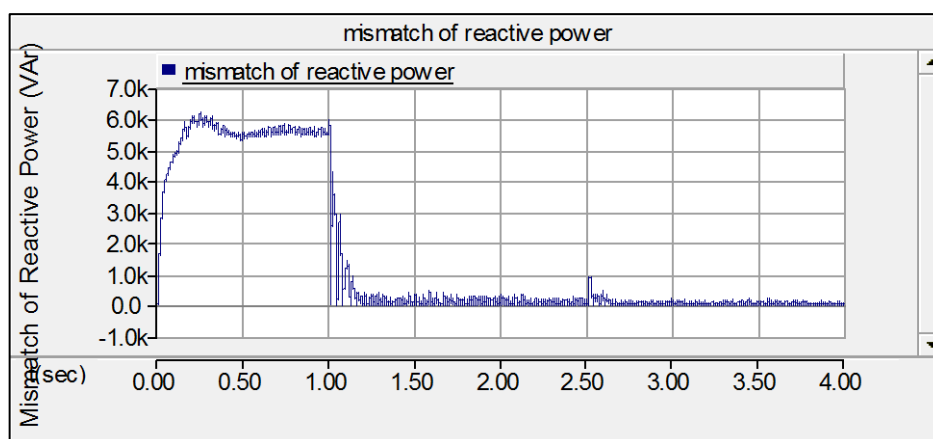
شکل (۵-۵۱): عملکرد تقسیم توان حقیقی توسط واحدهای DG با اصلاح روش افسی متداول توسط روش امپدانس مجازی قابل تنظیم منفی با در نظر گرفتن تغییر در امپدانس خط تغذیه DG1.

عملکرد تقسیم توان حقیقی و راکتیو با استفاده از روش امپدانس مجازی منفی با در نظر گرفتن تغییر مذکور به ترتیب در شکل‌های (۵-۵۱) و (۵-۵۲) نشان داده شده است. در فاصله زمانی ۱ تا ۲/۵ ثانیه روش امپدانس مجازی منفی به کنترل کننده DG1 اعمال شده و در فاصله زمانی ۲/۵ تا ۴ ثانیه تغییر موردنظر اعمال شده است. از شکل (۵-۵۲) مشاهده می‌شود که تقسیم توان راکتیو با

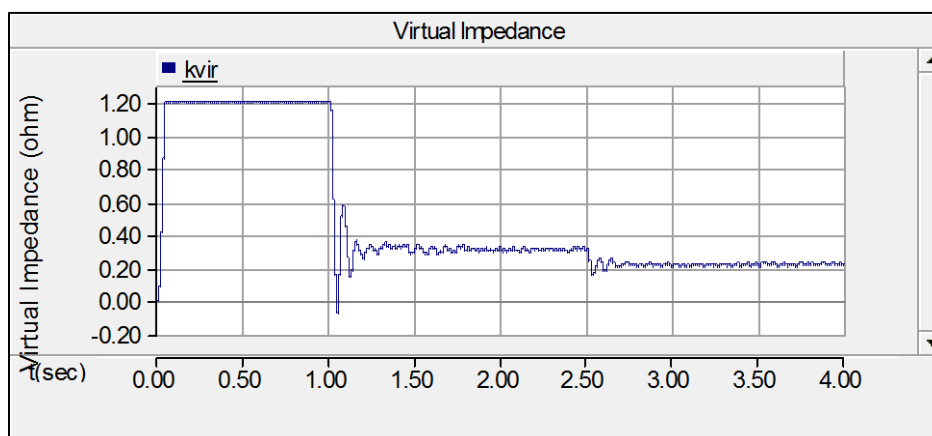
اعمال این تغییر همچنان به صورت صحیح انجام می شود. همان طور که از شکل (۵-۵۳) دیده می شود خطای تقسیم توان راکتیو تقریباً صفر است. میزان حساسیت متغیر تنظیم کننده امپدانس مجازی به تغییر اعمال شده در ریز شبکه در شکل (۵-۵۴) نشان داده شده است.



شکل (۵-۵۲): عملکرد تقسیم توان راکتیو توسط واحدهای DG با اصلاح روش افاقی متداول توسط روش امپدانس مجازی قابل تنظیم منفی با در نظر گرفتن تغییر در امپدانس خط تغذیه DG1.



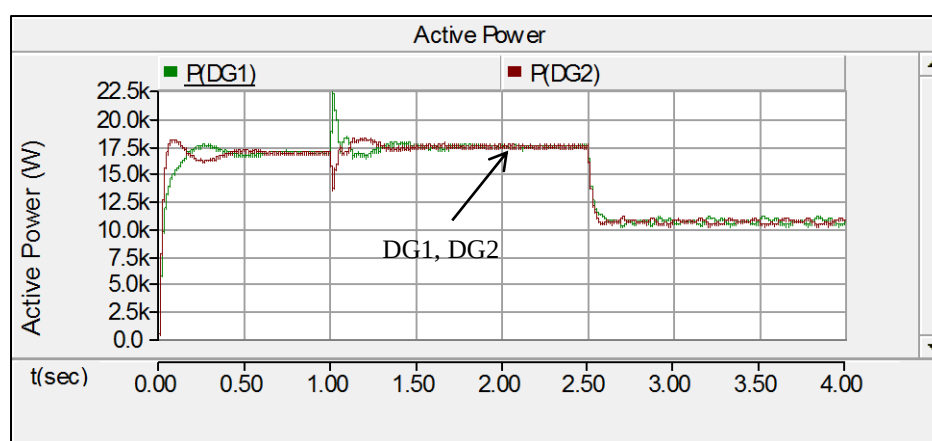
شکل (۵-۵۳): خطای تقسیم توان راکتیو با اصلاح روش افاقی متداول توسط روش امپدانس مجازی قابل تنظیم منفی با در نظر گرفتن تغییر در امپدانس خط تغذیه DG1.



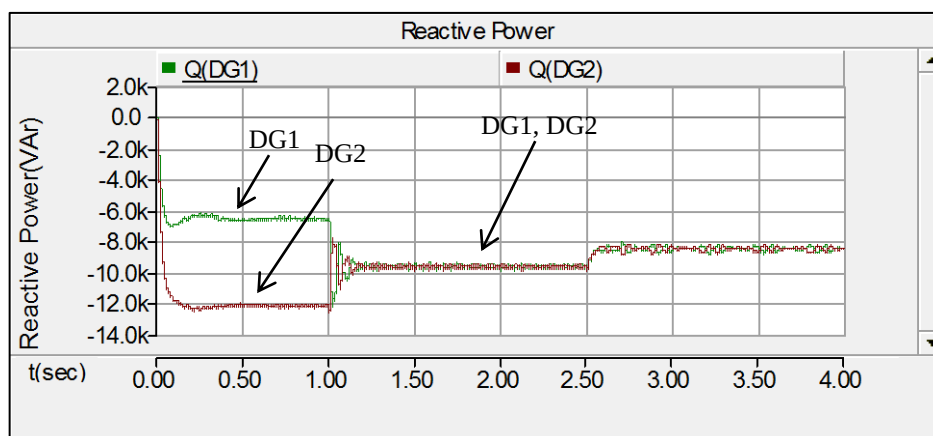
شکل (۵-۵۴): سیگنال کنترلی K_{vir} بیانگر مقاومت و راکتانس مجازی منفی با در نظر گرفتن تغییر در امپدانس خط تغذیه DG1.

ب: تغییر بار

هدف از این قسمت بررسی اثر تغییر بار بر عملکرد تقسیم توان توسط روش امپدانس مجازی قابل تنظیم منفی است. به این منظور تغییری در بار ایجاد شده است و مقاومت و راکتانس بار در ثانیه ۲/۵ به ترتیب به مقدار ۴ و ۳/۱۴ اهم افزایش می‌یابد. عملکرد تقسیم توان حقیقی و راکتیو به ترتیب در شکل‌های (۵-۵۵) و (۵-۵۶) نشان داده شده است.

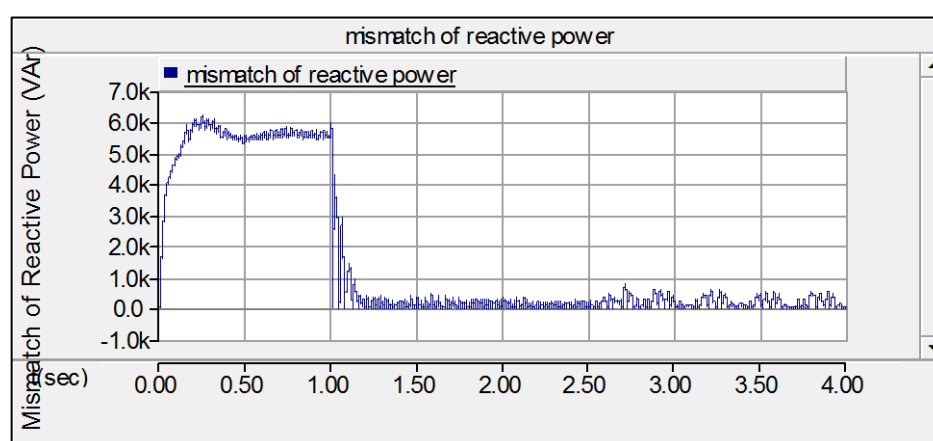


شکل (۵-۵۵): عملکرد تقسیم توان حقیقی توسط واحدهای DG با اصلاح روش افا متداول توسط روش امپدانس مجازی قابل تنظیم منفی با در نظر گرفتن تغییر در بار ریزشکه.



شکل (۵-۵۶): عملکرد تقسیم توان راکتیو توسط واحدهای DG با اصلاح روش ایتی متداول توسط روش امپدانس مجازی قابل تنظیم منفی با در نظر گرفتن تغییر در بار ریز شبکه.

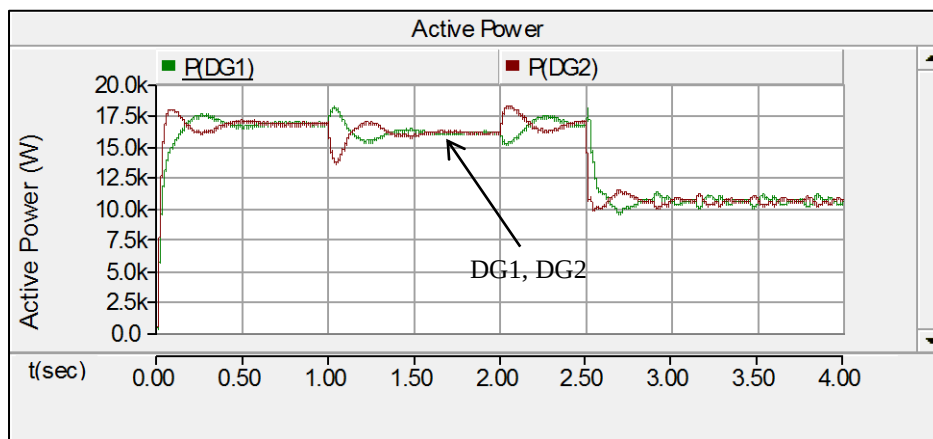
با توجه به شکل (۵-۵۶) با اعمال تغییر در بار در ثانیه ۲/۵، تقسیم توان راکتیو به صورت صحیح ادامه می‌یابد. این بیانگر این حقیقت است که با استفاده از روش امپدانس مجازی قابل تنظیم منفی، کنترل‌کننده قادر است تغییرات بار را به منظور تحقق تقسیم صحیح توان راکتیو دنبال کند. خطای تقسیم توان راکتیو توسط روش امپدانس مجازی منفی با در نظر گرفتن تغییر بار در شکل (۵-۵۷) نشان داده شده است و می‌توان نتیجه گرفت که با اعمال این تغییر در بار در ثانیه ۲/۵ خطای تقسیم توان راکتیو همچنان دارای مقدار قابل قبولی است.



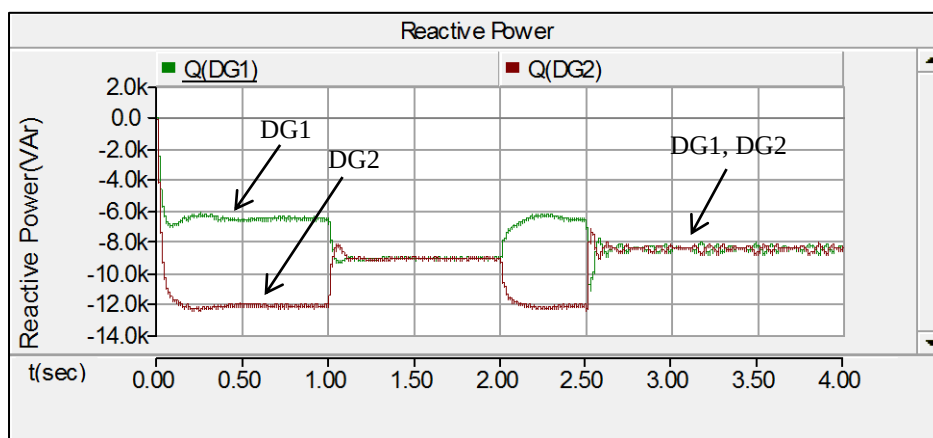
شکل (۵-۵۷): خطای تقسیم توان راکتیو با اصلاح روش ایتی متداول توسط روش امپدانس مجازی قابل تنظیم منفی با در نظر گرفتن تغییر در بار ریز شبکه.

۵-۳-۳- مقایسه عملکرد تقسیم توان توسط دو روش امپدانس مجازی قابل تنظیم مثبت و منفی

به منظور مقایسه عملکرد دو روش امپدانس مجازی مثبت و منفی، در ثانیه ۱ روش امپدانس مجازی مثبت فعال شده و در ثانیه ۲ غیرفعال شده است. در ثانیه ۲/۵ روش امپدانس مجازی منفی فعال شده و تا پایان زمان شبیه سازی فعال می ماند.



شکل (۵-۵۸): عملکرد تقسیم توان حقیقی توسط واحدهای DG با اصلاح روش افتی متداول توسط دو روش امپدانس مجازی قابل تنظیم مثبت و منفی.

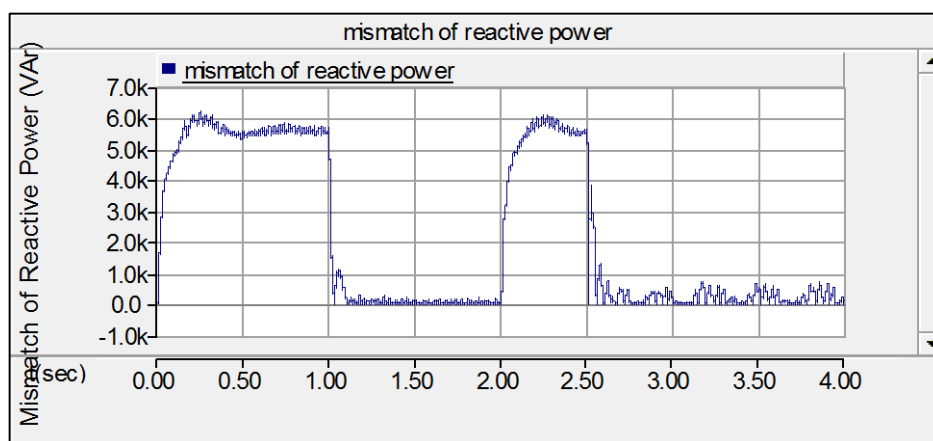


شکل (۵-۵۹): عملکرد تقسیم توان راکتیو توسط واحدهای DG با اصلاح روش افتی متداول توسط دو روش امپدانس مجازی قابل تنظیم مثبت و منفی.

عملکرد تقسیم توان حقیقی و راکتیو توسط دو روش مذکور به ترتیب در شکل های (۵-۵۸) و (۵-۵۹) نشان داده شده است. از شکل (۵-۵۸) می توان دریافت که با هر دو روش تقسیم صحیح توان

حقیقی میسر شده است. و با توجه به شکل (۵-۵۹) و (۵-۶۰) می توان دریافت که خطای تقسیم توان راکتیو توسط هر دو روش به طور قابل ملاحظه ای تضعیف شده است.

از شکل های (۵-۵۸) و (۵-۵۹) نیز می توان نتیجه گرفت که میزان توان حقیقی و راکتیو خروجی واحدهای DG در دو روش متفاوت است. دلیل این امر را می توان این گونه تشریح کرد که، با استفاده از روش امپدانس مجازی منفی امپدانس کل خط تغذیه کاهش می یابد و بنابراین میزان توان خروجی واحدها افزایش می یابد در حالی که این موضوع در روش امپدانس مجازی مثبت بالعکس است زیرا با استفاده از این روش امپدانس معادل خطوط تغذیه واحدهای تولید پراکنده افزایش می یابد.



شکل (۵-۶۰): خطای تقسیم توان راکتیو با اصلاح روش افتی متداول توسط دو روش امپدانس مجازی قابل تنظیم مثبت و منفی.

۵-۳-۴- تحلیل نتایج

در این قسمت دو حالت از کاربرد امپدانس مجازی شامل امپدانس مجازی ثابت و امپدانس مجازی قابل تنظیم که به دو صورت مثبت و منفی قابل پیاده سازی در کنترل کننده هر واحد DG هستند، در نظر گرفته شد. و عملکرد هر یک از این حالت ها و اثر آن ها بر نحوه تقسیم توان حقیقی و راکتیو با شبیه سازی یک ریزش شبکه جزیره ای در نرم افزار PSCAD/EMTDC نیز بررسی شد. از شبیه سازی های انجام شده با در نظر گرفتن تغییراتی از قبیل تغییر امپدانس خط تغذیه، تغییر بار و همچنین نسبت های مختلف مقاومت به راکتانس خطوط تغذیه و در نظر گرفتن انواع مدل بار می توان

دریافت که کنترل کننده ارائه شده برای تنظیم امپدانس مجازی در فصل چهارم قادر است به دو صورت منفی و مثبت در کنترل کننده واحدهای DG پیاده سازی شود و تقسیم صحیح توان را محقق سازد.

۵-۴- کاهش جریان چرخشی توسط روش امپدانس مجازی

همان طور که در تئوری ارائه شده در بخش ۳-۶ بیان شد، به علت عدم تطبیق ولتاژ خروجی منابع تولید پراکنده ناشی از عدم تطبیق امپدانس، در بین واحدها جریان چرخشی جاری می شود که مجدداً در رابطه زیر نشان داده شده است. در صورتی که این جریان خارج از محدوده مجاز خود باشد ممکن است منجر به آسیب رساندن به واحدهای DG شود.

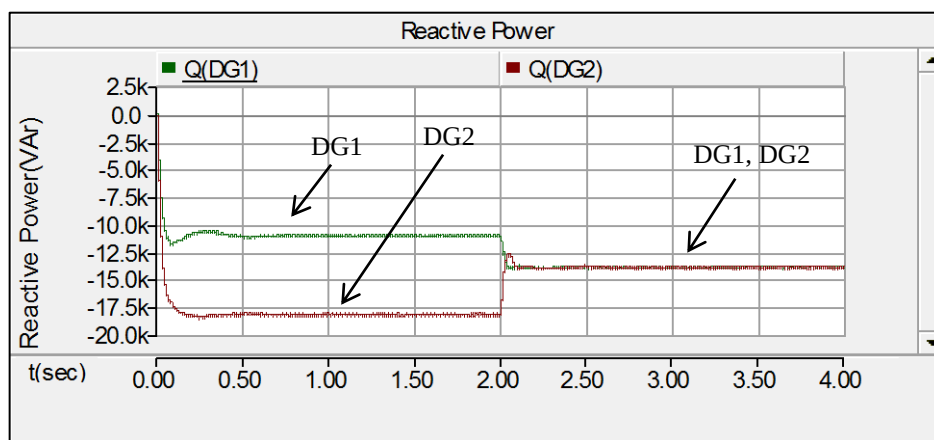
$$I_C = \frac{V_{DG1} - V_{DG2}}{Z_1 + Z_2}$$

حذف عدم تطبیق امپدانس خطوط تغذیه واحدهای DG باعث حذف خطای راکتیو می شود، همچنین می توان بیان کرد که با حذف عدم تطبیق خطای توان راکتیو تقسیم جریان در بین واحدهای DG به صورت صحیح انجام خواهد شد که کاهش جریان چرخشی در بین واحدها را به دنبال دارد. به همین منظور، در این بخش اثر حذف اختلاف امپدانس واقعی بین خطوط تغذیه واحدهای DG توسط امپدانس مجازی بر تقسیم جریان و همچنین جریان چرخشی بین واحدها بررسی شده است. به منظور بررسی و نمایش بهتر اثر روش امپدانس مجازی بر کاهش جریان چرخشی مشخصات آورده شده در جدول (۵-۵) برای ریزشبه در نظر گرفته شده است.

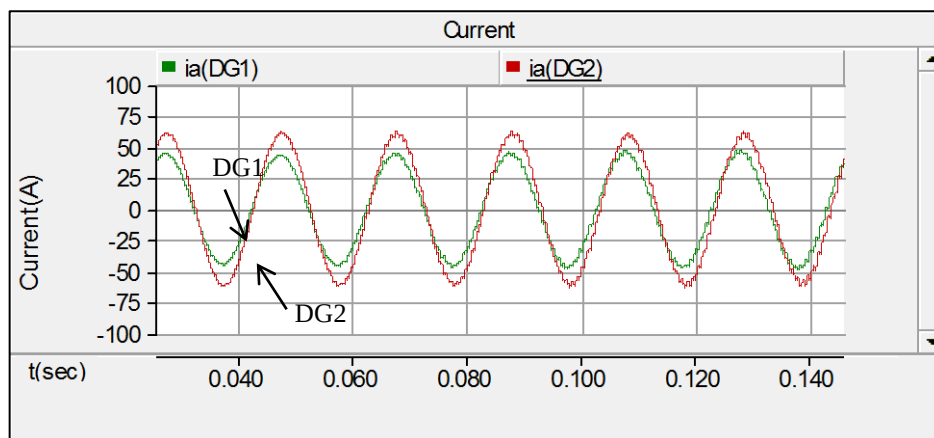
جدول (۵-۵): مشخصات سیستم برای محاسبه جریان چرخشی

مشخصات خط تغذیه و بار	
خط تغذیه ۱	مقاومت: ۵/۱۰ اهم، اندوکتانس: ۲ میلی هانری
خط تغذیه ۲	مقاومت: ۳/۰ اهم، اندوکتانس: ۱ میلی هانری
بار	مقاومت: ۲ اهم، اندوکتانس: ۵ میلی هانری

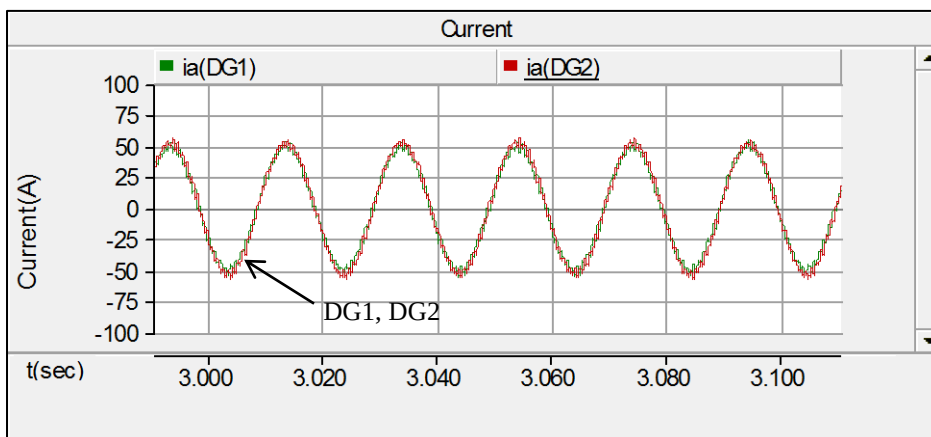
در شکل (۵-۶۱) عملکرد تقسیم راکتیو و در شکل (۵-۶۲) عملکرد تقسیم جریان واحدهای DG توسط روش امپدانس مجازی نشان داده شده است. با توجه به شکل‌های (۵-۶۱) و (۵-۶۲-ب) می‌توان فهمید که با اعمال روش امپدانس مجازی در ثانیه ۲، هم‌زمان با بهبود تقسیم توان راکتیو تقسیم جریان توسط واحدهای DG نیز بهبود یافته است. عملکرد تقسیم جریان قبل (فاصله زمانی ۰ تا ۲ ثانیه) و بعد از (فاصله زمانی ۲ تا ۴ ثانیه) اعمال روش امپدانس مجازی به ترتیب در شکل‌های (۵-۶۲-الف) و (۵-۶۲-ب) نشان داده شده است.



شکل (۵-۶۱): عملکرد تقسیم توان راکتیو توسط واحدهای DG با استفاده از روش امپدانس مجازی.

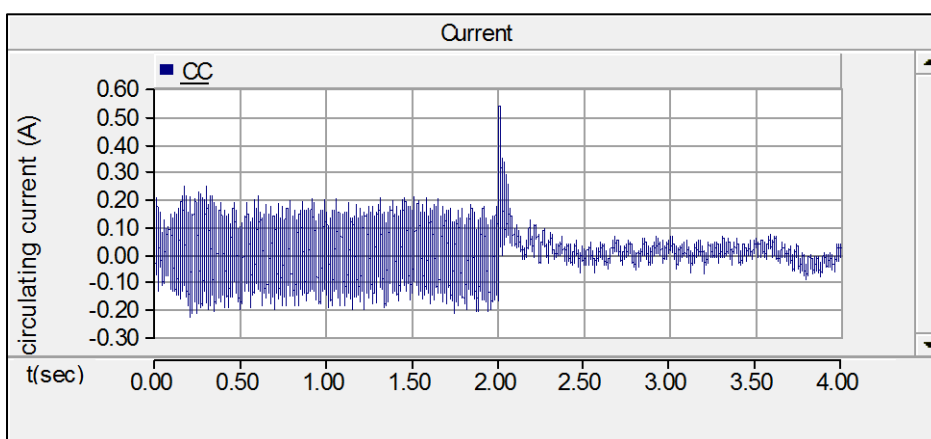


(الف)



(ب)

شکل (۵-۶۲): الف: عملکرد تقسیم جریان توسط واحدهای DG قبل از فعال شدن روش امپدانس مجازی، ب: بعد از فعال شدن روش امپدانس مجازی.



شکل (۵-۶۳): عملکرد جریان چرخشی در بین واحدهای DG با استفاده از روش امپدانس مجازی.

شکل (۵-۶۳) جریان چرخش بین واحدهای DG را نشان می دهد. بنابراین از این شکل و با توجه به تئوری ارائه شده در بخش ۳-۶ می توان دریافت که، به دنبال بهبود تقسیم توان راکتیو و تقسیم جریان توسط روش امپدانس مجازی جریان چرخشی در بین واحدها نیز تضعیف می شود.

تحلیل نتایج

با توجه به نتایج حاصل از شبیه سازی در این بخش می توان نتیجه گرفت که روش امپدانس مجازی می تواند با حذف عدم تطبیق امپدانس خط تغذیه واحدهای DG تقسیم توان راکتیو و در

نتیجه تقسیم جریان توسط منابع را بهبود دهد و به دنبال آن جریان چرخشی در بین منابع را کاهش دهد.

فصل ششم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۶-۱- نتیجه گیری

تقسیم توان در ریزشبکه‌های جزیره‌ای مسئله‌ای چالش‌برانگیز است و منابع تولید پراکنده قرارگرفته در ریزشبکه باید متناسب با مقدار نامی توان خود بار را تغذیه کنند. همان‌طور که در فصل دوم بیان شد و با توجه به تحلیل‌های ریاضی انجام شده در فصل سوم، جهت کنترل تقسیم توان توسط منابع تولید پراکنده در ریزشبکه‌های جزیره‌ای از روش کنترل افتی متداول که ازجمله روش‌های غیرمتمرکز و محلی است استفاده می‌شود. اما کنترل تقسیم توان با استفاده از روش افتی متداول موجب وابستگی تقسیم توان راکتیو به امپدانس خط تغذیه منابع تولید پراکنده می‌شود، به این معنی که اگر امپدانس خطوط تغذیه واحدها مختلف باشند این اختلاف می‌تواند منجر به عدم تقسیم صحیح توان راکتیو توسط واحدهای تولید پراکنده متعدد شود.

بر اساس تئوری ارائه شده در فصل سوم، در روش افتی متداول بین فرکانس و توان حقیقی و بین ولتاژ و توان راکتیو رابطه وجود دارد، از این رو توسط این روش توان حقیقی با فرکانس و توان راکتیو با ولتاژ قابل کنترل هستند. تقسیم توان حقیقی با استفاده از این روش به صورت صحیح انجام پذیرفت درحالی تقسیم توان راکتیو تحت تأثیر امپدانس خط تغذیه واحدها به صورت نادرست انجام شد. لذا در این پژوهش با ارائه و بکارگیری روش امپدانس مجازی، مسئله عدم تطبیق در امپدانس خطوط تغذیه و تقسیم توان راکتیو در بین منابع تولید پراکنده حل شده است.

در این پژوهش دو روش امپدانس مجازی ثابت و قابل تنظیم ارائه شد که در روش دوم به منظور تعقیب تغییرات ایجاد شده در ریزشبکه، نظیر تغییر بار و تغییر امپدانس خط تغذیه منابع تولید پراکنده، امپدانس مجازی توسط کنترل کننده ارائه شده در فصل چهارم تنظیم و کنترل شد. در روش امپدانس مجازی ثابت تقسیم توان راکتیو صحیحی حاصل شد اما این روش نسبت به تغییرات در ریزشبکه حساس بوده و با تغییر نقطه کار، تقسیم صحیح توان راکتیو به هم می‌خورد. در صورتی که در روش امپدانس مجازی قابل تنظیم، متغیرهای امپدانس مجازی به گونه‌ای کنترل شدند که تغییرات

اعمالی در ریزشبه را به منظور فراهم کردن تقسیم صحیح توان راکتیو دنبال کنند. در هر دو روش امپدانس مجازی ثابت و قابل تنظیم، امپدانس مجازی به دو صورت مثبت و منفی در کنترل کننده منبع تولید پراکنده پیاده سازی شد.

با توجه به مطالب ارائه شده در فصل چهارم، امپدانس مجازی به صورت های مختلف مختلط، کاملاً اندوکتیو و کاملاً مقاومتی قابل طراحی است. در صورتی که ریزشبه کاملاً اندوکتیو و یا کاملاً مقاومتی باشد کنترل کننده امپدانس مجازی می تواند ساده تر طراحی شود و در آن خطای توان راکتیو به ترتیب تنها برای تنظیم راکتانس مجازی و مقاومتی مجازی کنترل شود، در حالی که در ریزشبه با خطوط تغذیه مختلط به دلیل اینکه مقاومت و راکتانس خط تغذیه در مقابل یکدیگر قابل چشم پوشی نیستند، خطای توان راکتیو به منظور تنظیم مقاومت و راکتانس مجازی کنترل شد تا اینکه تقسیم توان صحیحی را فراهم کند.

نتایج حاصل از شبیه سازی ریزشبه جزیره ای نمونه شامل دو منبع تولید پراکنده در نرم افزار PSCAD/EMTDC نشان داد که روش امپدانس مجازی قابل تنظیم از طریق کنترل متغیرهای امپدانس مجازی در مقایسه با روش افی متداول و همچنین در مقایسه با روش امپدانس مجازی ثابت توانست خطای تقسیم توان راکتیو را به خوبی حذف کند و تقسیم توان راکتیو صحیحی را با در نظر گرفتن اثر مدل بار و میزان نسبت مقاومت به راکتانس خطوط تغذیه ریزشبه محقق سازد.

در این پژوهش علاوه بر بررسی اثر امپدانس مجازی بر تقسیم توان، اثر آن بر کاهش جریان چرخشی بین منابع تولید پراکنده نیز مورد بررسی قرار گرفت. و نتایج حاصل از شبیه سازی نشان داد که با استفاده از روش امپدانس مجازی می توان جریان چرخشی بین منابع را کاهش داد.

۶-۲- پیشنهادات

با توجه به نتایج حاصل از این پژوهش پیشنهادات زیر جهت توسعه و تکمیل آن و انجام کارهای بعدی ارائه می‌گردد:

۱. ریزشبکه جزیره‌ای مورد مطالعه در این پژوهش AC است و مطالعات برای این نوع از ریزشبکه انجام شده است. از این رو شاید بتوان مطالعات و تحقیقات انجام شده را در ریزشبکه‌های جزیره‌ای DC نیز تعمیم داد و این نوع از ریزشبکه‌ها را در کنار ریزشبکه AC در نظر گرفت.
۲. در این پایان‌نامه فرض شده است که ریزشبکه به صورت جزیره‌ای و مستقل از شبکه اصلی بارهای محلی را تغذیه می‌کند لذا می‌توان مطالعات و شبیه‌سازی‌های انجام شده را برای ریزشبکه‌های متصل به شبکه اصلی نیز توسعه داد.
۳. با توجه به اینکه در شبکه برق انواع مختلفی از بارهای الکتریکی نظیر بارهای استاتیکی و دینامیکی وجود دارند می‌توان روش کنترلی را با در نظر گرفتن انواع مدل بارهای الکتریکی و به منظور تحقق تقسیم صحیح توان اصلاح کرد.
۴. در این پژوهش به دلیل بررسی اثر روش امپدانس مجازی بر نحوه کنترل و تقسیم توان، منابع تولید پراکنده با ظرفیت توان‌های یکسان در نظر گرفته شده‌اند اما می‌توان کنترل‌کننده را به گونه‌ای طراحی کرد که در صورت وجود منابع تولید پراکنده با ظرفیت توان‌های متفاوت تقسیم توان به صورت صحیح انجام شود.
۵. ریزشبکه مورد مطالعه تنها شامل دو واحد تولید پراکنده است در حالی که روش کنترلی ارائه شده را می‌توان برای سیستم‌های بزرگ‌تر و با منابع تولید پراکنده بیشتر نیز پیاده‌سازی کرد.

- [١] H. Nikos, (2014), "*Impacts of Microgrid*," in *Microgrids:Architectures and Control*, ed: Wiley-IEEE Press, p. 344.
- [٢] S. Obara, (2014), "*Optimum Design of Renewable Energy Systems: Microgrid and Nature Grid Methods*", United States of America: Engineering Science Reference (an imprint of IGI Global).
- [٣] D. E. Olivares, A. Mehrizi-Sani, A. H. Etemadi, C. A. Ca, x00F, izares, *et al.*, (2014), "*Trends in Microgrid Control*," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 5, pp. 1905-1919.
- [٤] M. A. A.-S. Suleiman M. Sharkh ,Georgios I. Orfanoudakis, Babar Hussain, (2014), "*Power Electronic Converters for Microgrids*", Wiley-IEEE Press.
- [٥] H. Mahmood, D. Michaelson, and J. Jiang, (2015), "*Reactive Power Sharing in Islanded Microgrids Using Adaptive Voltage Droop Control*," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 6, pp. 3052-3060.
- [٦] J. He, Y. W. Li, J. M. Guerrero, F. Blaabjerg, and J. C. Vasquez, (2013), "*An Islanding Microgrid Power Sharing Approach Using Enhanced Virtual Impedance Control Scheme*", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 28, pp. 5272-5282.
- [٧] J. He and Y. W. Li, (2011), "*Analysis, Design, and Implementation of Virtual Impedance for Power Electronics Interfaced Distributed Generation*", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 47, pp. 2525-2538.
- [٨] J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, J. Matas, L. G. d. Vicuna, and M. Castilla, (2011), "*Hierarchical Control of Droop-Controlled AC and DC Microgrids-A General Approach Toward Standardization*", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 58, pp. 158-172.
- [٩] H. Nikos, (2014), "*Intelligent Local Controllers*", in *Microgrids:Architectures and Control*, ed: Wiley-IEEE Press.
- [١٠] H. Mahmood, D. Michaelson, and J. Jiang, (2015), "*Accurate Reactive Power Sharing in an Islanded Microgrid Using Adaptive Virtual Impedances*", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 30, pp. 1605-1617.
- [١١] R. Moslemi and J. Mohammadpour, (2015), "*Accurate Reactive Power Control of Autonomous Microgrids Using an Adaptive Virtual Inductance Loop*", Electric Power Systems Research, vol. 129, pp.142-149.
- [١٢] W. Yao, M. Chen, J. Matas, J. M. Guerrero, and Z. M. Qian, (2011), "*Design and Analysis of the Droop Control Method for Parallel Inverters Considering the Impact of the Complex Impedance on the Power Sharing*", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 58, pp. 576-588.
- [١٣] T. L. Vandoorn, J. D. M. D. Kooning, B. Meersman, and L. Vandevelde, (2013), "*Improvement of Active Power Sharing Ratio of P/V Droop Controllers in Low-*

- Voltage Islanded Microgrids*", in IEEE Power & Energy Society General Meeting, pp. 1-5.
- [١٤] T. L. Vandoorn, J. D. M. D. Kooning, B. Meersman, J. M. Guerrero, and L. Vandevelde, (2012), "*Automatic Power-Sharing Modification of P/V Droop Controllers in Low-Voltage Resistive Microgrids*", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 27, pp. 2318-2325.
 - [١٥] J. He and Y. W. Li, (2012), "*An Enhanced Microgrid Load Demand Sharing Strategy*", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 27, pp. 3984-3995.
 - [١٦] Y. Zhu, F. Zhuo, F. Wang, B. Liu, R. Gou, and Y. Zhao, (2016), "*A Virtual Impedance Optimization Method for Reactive Power Sharing in Networked Microgrid*", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 31, pp. 2890-2904.
 - [١٧] R. Majumder, G. Ledwich, A. Ghosh, S. Chakrabarti, and F. Zare, (2010), "*Droop Control of Converter-Interfaced Microsources in Rural Distributed Generation*", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 25, pp. 2768-2778.
 - [١٨] Y. W. Li and C.-N. Kao, (2009), "*An Accurate Power Control Strategy for Power-Electronics-Interfaced Distributed Generation Units Operating in a Low-Voltage Multibus Microgrid*", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 24, pp. 2977-2988.
 - [١٩] L. T. M. Mota and A. A. Mota, (2004), "*Load Modeling at Electric Power Distribution Substations Using Dynamic Load Parameters Estimation*", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 26, pp. 805-811.
 - [٢٠] R. P. Payasi, A. K. Singh, and D. Singh, (2013), "*Effect of Voltage Step Constraint and Load Models in Optimal Location and Size of Distributed Generation*", in International Conference on Power, Energy and Control (ICPEC), pp. 710-716.
 - [٢١] M. B. Delghavi, (2011), "*Advanced Islanded-Mode Control of Microgrids*", The University of Western Ontario.
 - [٢٢] S. Chowdhury and P. Crossley, (2009), "*Microgrids and Active Distribution Networks*", The Institution of Engineering and Technology.
 - [٢٣] A. Mukherjee, (2012), "*Case study of islanded microgrid control*", THE FLORIDA STATE UNIVERSITY.
 - [٢٤] D. M. Tagare, (2011), "*Distributed Generation (DG) and Distributed Resources (DR)*", Electric Power Generation: The Changing Dimensions, pp. 275-299.
 - [٢٥] T. L. Vandoorn, J. C. Vasquez, J. De Kooning, J. M. Guerrero, and L. Vandevelde, (2013), "*Microgrids: Hierarchical Control and an Overview of the Control and Reserve Management Strategies*", IEEE industrial electronics magazine, vol. 7, pp. 42-55.
 - [٢٦] A. Dimeas, A. Tsikalakis, G. Kariniotakis, and G. Korres, (2014), "*Microgrids Control Issues*", Microgrids: Architectures and control, pp. 25-80.

- [۲۷] Y. Han, P. Shen, X. Zhao, and J. M. Guerrero, (2016), "*An Enhanced Power Sharing Scheme for Voltage Unbalance and Harmonics Compensation in an Islanded Microgrid*".
- [۲۸] A. Yazdani and R. Iravani, (2010), "*Voltage-Sourced Converters in Power Systems: Modeling, Control, and Applications*", John Wiley & Sons.
- [۲۹] J. C. Vasquez, J. M. Guerrero, M. Savaghebi, J. Eloy-Garcia, and R. Teodorescu, (2013), "*Modeling, Analysis, and Design of Stationary-Reference-Frame Droop-Controlled Parallel Three-Phase Voltage Source Inverters*", IEEE Transactions on industrial electronics, vol. 60 ,pp. 1271-1280.
- [۳۰] H. Nikos, (2014), "*Operation of Multi-Microgrids, in Microgrids: Architectures and Control*", ed: Wiley-IEEE Press, p. 344.
- [۳۱] سعادت. ه.، (۱۳۸۵)، "بررسی سیستم های قدرت"، جلد اول. تهران: دانشگاه علم و صنعت.
- [۳۲] Y. Chen, J. M. Guerrero, Z. Shuai, Z. Chen, L. Zhou, and A. Luo, (2016), "*Fast Reactive Power Sharing, Circulating Current and Resonance Suppression for Parallel Inverters Using Resistive-Capacitive Output Impedance*", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 31, pp. 5524-5537.
- [۳۳] V. G. A. E.Acha, O. Anaya-Lara and T.J.E.Miller, (2002), "*Power Electronic Control in Electrical Systems*".
- [۳۴] T.J.E.Miller, (1982), "*Reactive Power Control in Electric System*".
- [۳۵] R. Majumder, (2010), "*Modeling, Analysis Stability and Control of Microgrids*", Doctor of Philosophy, School of Engineering Systems, Queensland University of Technology.
- [۳۶] P. KUNDUR, (1994), "*Power System Stability and Control*", toronto.
- [۳۷] A. A. F. P. M. ANDERSON, (1977), "*Power System Control and stability*".
- [۳۸] A. K. Arani, A. Tavakoli, G. Gharehpetian, and M. S. S. Abad, (2013), "*Improving Power Sharing and Reduction Circulating Current in Parallel Inverters of Isolated Microgrids*", in Smart Grid Conference (SGC), 2013, pp. 75-79.
- [۳۹] W. Wang, X. Zeng, X. Tang, and C. Tang, (2014), "*Analysis of Microgrid Inverter Droop Controller with Virtual Output Impedance under Non-linear Load Condition*", IET Power Electronics, vol. 7, pp. 1547-1556.
- [۴۰] S. Augustine, M. K. Mishra, and N. Lakshminarasamma, (2015), "*Adaptive Droop Control Strategy for Load Sharing and Circulating Current Minimization in Low-Voltage Standalone DC Microgrid*", IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 6, pp. 132-141.
- [۴۱] K. O. Oureilidis and C. S. Demoulias, (2016), "*A Decentralized Impedance-Based Adaptive Droop Method for Power Loss Reduction in a Converter-Dominated Islanded Microgrid*", Sustainable Energy, Grids and Networks, vol. 5, pp. 39-49.

- [۴۲] H. Xiao, A. Luo, L. Bai, C. Tu, J. Zhou, and Q. Liu, (2013), "*A deadbeat Control Method for Circulating Current between Parallel-Connected Inverters*", in International Future Energy Electronics Conference (IFEEEC), pp. 806-811.
- [۴۳] X. Yan, Y. Zhang, W. Zhang, and J. Tang, (2015), "*Circulating-Current Analysis and Power Sharing Control of Parallel Inverters with Different Capacities*", in International Conference on Renewable Power Generation (RPG 2015), pp. 1-6.
- [۴۴] Y. Zhu, F. Zhuo, F. Wang, B. Liu, and Y. Zhao, (2015), "*A Wireless Load Sharing Strategy for Islanded Microgrid Based on Feeder Current Sensing*", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 30, pp. 6706-6719.
- [۴۵] Q.-C. Zhong, (2013), "*Robust Droop Controller for Accurate Proportional Load Sharing among Inverters Operated in Parallel*", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 60, pp. 1281-1290.
- [۴۶] T. Wu, Z. Liu, J. Liu, S. Wang, and Z. You, (2016), "*A Unified Virtual Power Decoupling Method for Droop-Controlled Parallel Inverters in Microgrids*", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 31, pp. 5587-5603.
- [۴۷] Y. Li and Y. W. Li, (2011), "*Power Management of Inverter Interfaced Autonomous Microgrid based on Virtual Frequency-Voltage Frame*", IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 2, pp. 30-40.
- [۴۸] G. Chunfeng, Y. Rengang, J. Jiao, and D. Zhenhai, (2013), "*Power Control Strategy Design in an Islanded Microgrid Based on Virtual Frequency*", in Renewable Power Generation Conference (RPG 2013), 2nd IET, pp. 1-4.
- [۴۹] Y. A. R. I. Mohamed and E. F. El-Saadany, (2008), "*Adaptive Decentralized Droop Controller to Preserve Power Sharing Stability of Paralleled Inverters in Distributed Generation Microgrids*", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 23, pp. 2806-2816.
- [۵۰] H. R. Baghaee, M. Mirsalim, G. B. Gharehpetan, and H. A. Talebi, (2017), "*Nonlinear Load Sharing and Voltage Compensation of Microgrids Based on Harmonic Power-Flow Calculations Using Radial Basis Function Neural Networks*", IEEE Systems Journal, vol. PP, pp. 1-11.
- [۵۱] J. M. Guerrero, L. G. De Vicuna, J. Matas, M. Castilla, and J. Miret, (2005), "*Output Impedance Design of Parallel-Connected UPS Inverters with Wireless Load-Sharing Control*", IEEE Transactions on industrial electronics, vol. 52, pp. 1126-1135.
- [۵۲] J. M. Guerrero, J. Matas, L. G. D. V. D. Vicuna, M. Castilla, and J. Miret, (2006), "*Wireless-Control Strategy for Parallel Operation of Distributed-Generation Inverters*", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 53, pp. 1461-1470.
- [۵۳] X. Hu, X. Tang, N. Li, and G. Zhang, (2013), "*Virtual Impedance Based Parallel Operation of Multi-Converters in Low Voltage Microgrids*", in Instrumentation and Measurement, Sensor Network and Automation (IMSNA), 2nd International Symposium, pp. 1031-1036.

- [۵۴] Y. Guan, J. M. Guerrero, X. Zhao, J. C. Vasquez, and X. Guo, (2016), "A New Way of Controlling Parallel-Connected Inverters by Using Synchronous-Reference-Frame Virtual Impedance Loop—Part I: Control Principle", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 31, pp. 4576-4593.
- [۵۵] Y. Zhang and Y. W. Li, (2017), "Energy Management Strategy for Supercapacitor in Droop-Controlled DC Microgrid Using Virtual Impedance", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 32, pp. 2704-2716.
- [۵۶] C. Li, S. K. Chaudhary, M. Savaghebi, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero, (2016), "Power Flow Analysis for Low-Voltage AC and DC Microgrids Considering Droop Control and Virtual Impedance".
- [۵۷] J. Kim, J. M. Guerrero, P. Rodriguez, R. Teodorescu, and K. Nam, (2011), "Mode Adaptive Droop Control With Virtual Output Impedances for an Inverter-Based Flexible AC Microgrid", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 26, pp. 689-701.
- [۵۸] X. Wu, C. Shen, and R. Iravani, (2016), "Feasible Range and Optimal Value of the Virtual Impedance for Droop-Based Control of Microgrids", IEEE Transactions on Smart Grid, vol. PP, pp. 1-10.
- [۵۹] اشرفی. م. و همکاران. (۱۳۹۵)، "بهبود تقسیم توان راکتیو در ریزشبکه‌های جزیره‌ای با استفاده از امیدانس القایی مجازی"، کنفرانس بین المللی برق، تهران.
- [۶۰] P. Rodriguez, I. Candela, C. Citro, J. Rocabert, and A. Luna, (2013), "Control of Grid-Connected Power Converters Based on a Virtual Admittance Control Loop", in 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), pp. 1-10.

Abstract:

Recently, the application of distributed generation based on the use of renewable energy sources in the power network has been increased and the concept of microgrid as a regular structure has been accepted to integrate the distributed generation sources. The integration of distributed generation sources is facing with a variety of issues such as power sharing control in the islanded operation mode of microgrid. One of the power sharing control methods among the distributed generations in a microgrid is control the droop characteristics for each resource. Therefore, this thesis has investigated the power sharing in the islanded microgrid with inverter based distributed generation resources so that each source is controlled by the conventional droop method. The conventional droop method is able to realize the accurate real power sharing while reactive power sharing using this method is performed inaccurately. Inaccurate reactive power sharing is due to impedance mismatch of distributed generation feeders and it also can cause the flowing the circulating current among the distributed generation sources in the microgrid. So, in this study, the effect of virtual impedance in power sharing has been studied. In order to compensate the feeders' impedance mismatch the virtual impedance based method has been presented for two cases of fixed and adjustable virtual impedance. Also, in this study, the effect of resistance to reactance ratio of the feeders and load model in the presented method in compensating the impedance mismatch of feeders has been investigated. The proposed method has been simulated on a typical test system in PSCAD/EMTDC software. The simulation results show that the proposed method is fully capable to share the reactive power accurately with compensating the feeders' impedance mismatch. The simulation results also indicate that the circulating currents among the resources is reduced using the proposed method.

Keywords: Islanded Microgrid, Power Sharing, Local Control, Droop Control, Virtual Impedance.



Shahrood University of Technology

Faculty of Electrical Engineering and Robotic
M.Sc. Thesis in Electrical Power Systems Engineering

The Effect of Virtual Impedance on Power Sharing in Microgrids

By: Monir Ashrafi

Supervisor:

Dr. Mahdi Banejad

Assistant Supervisor:

Dr. Ali Dastfan

Dr. Ali Akbar Zadeh Kalat

January 2017