

# کنترل سلسله‌مراتبی برای تقسیم صحیح توان و کاهش جریان‌های گردشی در ریزشبه‌های متناوب مقاومتی با به کارگیری امیدانس مجازی تطبیقی و بستر مخابراتی توزیع شده

مسعود اسماعیلی و محمد هجری

شده تا نیازمند سیستم‌های بزرگ‌تر با ظرفیت بالا باشیم. برای رسیدن به این هدف، یکی از راهکارها استفاده از اینورترهای با ظرفیت بالا می‌باشد که در این صورت با مشکلاتی از قبیل پایین آمدن قابلیت اطمینان سیستم، نبود افزونگی<sup>۱</sup> در سیستم، هزینه بیشتر در صورت خرابی، پایین آمدن مشخصه‌های کیفیت توان و غیره در شبکه روبرو شده و در صورت خرابی تک‌اینورتر موجود با ظرفیت بالا، کل تولید انرژی برای تغذیه بارها به صفر می‌رسد. در نتیجه، استفاده از منابع کوچک و پراکنده در قالب ریزشبه، یک راه حل منطقی برای تضمین تداوم تغذیه بارهای محلی و حساس، بهبود کیفیت توان و پروفیل ولتاژ، کاهش تلفات انتقال توان و همچنین تأمین انرژی مناطق دوردست که به صورت جزیره‌ای و مستقل از شبکه اصلی هستند، می‌باشد. موضوع مهم برای یک ریزشبه، رویکرد کنترلی مناسب است که موجب تضمین تقسیم صحیح توان متناسب با توان‌های نامی بین منابع تولید پراکنده و عدم وجود جریان گردشی در بین آنها می‌شود [۱]. تا کنون روش‌های کنترلی بسیاری برای حل این مسایل در یک ریزشبه مورد استفاده قرار گرفته که این روش‌ها را می‌توان به دو دسته اصلی زیر تقسیم‌بندی کرد [۲] و [۳]:

۱) روش‌های کنترلی بر اساس بسترهای مخابراتی بین واحدها

۲) روش‌های کنترلی بدون بستر مخابراتی (کنترل دروپ)

در روش اول، بسترهای مخابراتی پرسرعت برای کنترل و هماهنگی واحدها وجود دارد. همچنین به دلیل وجود مسیرهای ارتباطی زیاد، استفاده از این روش برای کنترل منابع تولید پراکنده که در فواصل دور از هم قرار دارند نیز امری هزینه‌بر و با قابلیت اطمینان پایین می‌باشد. در مقابل، در روش کنترلی مبتنی بر دروپ بدون بستر مخابراتی، هر واحد تولید پراکنده، کنترلر مخصوص به خود را دارد که محاسبات را انجام داده و دستورات کنترل را بر اساس اندازه‌گیری‌های محلی به واحد مربوط به خود می‌دهد، بدون این که از اقدامات کنترلی انجام شده توسط واحدهای دیگر آگاه باشد. بنابراین، این روش دارای مزیت‌هایی نظیر قابلیت توسعه آسان و قابلیت اطمینان خوب است. در ریزشبه‌های با خطوط تغذیه دارای مقدار بزرگ نسبت راکتانس به مقاومت ( $X/R$ ) به دلیل ارتباط بین توان اکتیو با فرکانس و همچنین ارتباط بین توان راکتیو با دامنه ولتاژ، از روش کنترل دروپ متداول استفاده می‌شود. اما در ریزشبه‌های ولتاژ پایین با توجه به مقدار کم نسبت راکتانس به مقاومت در خطوط تغذیه، در میان اینورترها و باس مشترک اتصال مقاومتی وجود داشته و از این رو توان اکتیو با دامنه ولتاژ و توان راکتیو با فرکانس متناسب است. بنابراین در این

چکیده: این مقاله به ارائه یک روش کارا مبتنی بر امیدانس مجازی تطبیقی و یک بستر مخابراتی توزیع شده با ساختار کنترلی سلسله‌مراتبی در ریزشبه‌های متناوب مقاومتی جزیره‌ای به منظور تقسیم صحیح توان و کاهش جریان‌های گردشی می‌پردازد. در روش‌های موجود، مقاومت مجازی تطبیقی می‌تواند مقادیر منفی را احراز نموده و فرض غالب بودن خاصیت مقاومتی خط تغذیه را که کنترلر دروپ بر مبنای آن طراحی شده، نقض و عملکرد دروپ را مختل نماید. همچنین مقاومت مجازی منفی با کاهش میرایی کل سیستم، می‌تواند حاشیه پایداری را کاهش داده و اثرات نامطلوبی بر عملکرد سیستم حلقه بسته، بالاخص در حالت‌های گذرا داشته باشد. در روش پیشنهادی با اجرای هوشمندانه یک بستر مخابراتی توزیع شده جدید بین اینورترهای ریزشبه، مشکل منفی شدن مقاومت مجازی رفع گردیده است. مزایای سیستم کنترلی پیشنهادی عبارت هستند از حذف جریان گردشی، تقسیم صحیح توان بین منابع تولید پراکنده متناسب با ظرفیت نامی آنها، جلوگیری از انحراف فرکانس و دامنه ولتاژ باس نقطه اتصال مشترک از مقدار نامی، عدم نیاز به اندازه‌گیری و یا تخمین امیدانس خطوط تغذیه واصل بین اینورتر و باس نقطه اتصال مشترک، تضمین غالب بودن خاصیت سلفی یا مقاومتی امیدانس کل خط تغذیه در شرایط کاری مختلف، جلوگیری از ایجاد وابستگی بین توان‌های اکتیو و راکتیو و در نتیجه تضمین عملکرد مطلوب کنترلر دروپ در نقاط کاری مختلف، بهبود پایداری و پاسخ حالت گذرا و در نهایت استفاده از یک بستر مخابراتی توزیع شده ساده و یک‌طرفه با پهنای باند پایین به جای بسترهای مخابراتی پیچیده، متمرکز و دوطرفه. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در محیط سیمولینک نرم‌افزار متلب نشان می‌دهد که روش کنترل پیشنهادی معایب کنترل دروپ و امیدانس مجازی تطبیقی مرسوم را به طرز مطلوبی رفع نموده است.

کلیدواژه: امیدانس مجازی، تقسیم توان، جریان گردشی، کنترل دروپ، کنترل سلسله‌مراتبی.

## ۱- مقدمه

در سال‌های اخیر با توجه به رشد شبکه و زیاد شدن بارهای مختلف، میزان توان درخواستی نیز به تبع آن افزایش یافته و همین عامل باعث

این مقاله در تاریخ ۹ اسفند ماه ۱۳۹۹ دریافت و در تاریخ ۱۲ دی ماه ۱۴۰۰ بازنگری شد.

مسعود اسماعیلی، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران، (email: m\_esmaeili96@sut.ac.ir).

محمد هجری (نویسنده مسئول)، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران، (email: hejri@sut.ac.ir).

## Archive of SID

طریق یک بستر مخابراتی به کنترلرهای محلی اینورترها استفاده گردیده است. در این کار، امپدانس خطوط تغذیه توسط روش‌های تخمین امپدانس خطوط تعیین شده است. ولی روش تخمین به کار رفته مبتنی بر وجود هارمونیک‌های ولتاژ در باس نقطه اتصال مشترک بوده و در حالت تغذیه بارهای خطی با محتوای هارمونیک کم، دقت محاسبه پایین خواهد بود. علاوه بر این، روش تخمین پیشنهادی نیاز به استفاده از حلقه‌های قفل‌شونده فاز دارد که منجر به افزایش پیچیدگی سیستم کنترلی می‌شود. نهایت این که بحثی راجع به بازگردانی ولتاژ و فرکانس به مقادیر نامی آنها و همچنین جریان‌های گردشی بین اینورترها به میان نیامده است.

لازم به ذکر است که روش‌های متنوع دیگری نیز برای تخمین امپدانس خطوط وجود دارد که در آنها نیازی به اندازه‌گیری ولتاژ باس نقطه اتصال مشترک و ایجاد بستر مخابراتی بین این باس و منابع تولید پراکنده وجود ندارد. این روش‌ها معمولاً مبتنی بر تزریق یک سیگنال میان هارمونیک‌های جریان و اندازه‌گیری ولتاژ میان هارمونیک‌های متناظر بوده و به دلیل احتمال افزایش اعوجاج هارمونیک‌های جریان، ظرافت خاصی را در فرایند طراحی می‌طلبد [۱۰]. در [۱۱] به منظور تقسیم صحیح توان بین اینورترهای موازی با توان‌های نامی نابرابر و بدون استفاده از واسط مخابراتی بین واحدها، نسبت ضرایب دروپ و امپدانس خطوط تغذیه، با به کارگیری امپدانس مجازی سلفی در آنها، متناسب با نسبت عکس توان‌های نامی اینورترها قرار داده شده است. در این روش به جای اندازه‌گیری امپدانس خطوط تغذیه و یا تخمین آنها، افت ولتاژ روی خط تغذیه با استفاده از اندازه‌گیری ولتاژ باس مشترک و ارسال آن به کنترلرهای محلی از طریق خطوط مخابراتی بین نقطه باس مشترک و اینورترها محاسبه شده است. لکن در این کار بحثی راجع به حلقه‌های کنترلی بازگردانی ولتاژ و فرکانس و یا جریان‌های گردشی بین اینورترها به میان نیامده است. در [۱۲] با استفاده از یک ساختار کنترلی سلسله‌مرباتی و استفاده از بستر مخابراتی بین منابع و باس نقطه اتصال مشترک، یک روش کنترل دروپ مبتنی بر کنترل ولتاژ باس نقطه اتصال مشترک برای افزایش دقت تقسیم توان راکتیو در توان‌های نامی برابر در یک ریزشبه‌ک جزییره‌ای پیشنهاد شده است. در روش پیشنهادی، حلقه بازگردانی ولتاژ در لایه دوم در نظر گرفته شده ولی حلقه بازگردانی فرکانس مورد بحث قرار نگرفته است. در [۱۳] با استفاده از یک بستر مخابراتی بین واحدها و یک ساختار کنترلی سلسله‌مرباتی، تقسیم صحیح توان بین منابع با ظرفیت‌های اسمی برابر انجام یافته است. در لایه دوم هر دو حلقه کنترلی ولتاژ و فرکانس به منظور تنظیم ولتاژ و فرکانس باس مشترک در مقادیر نامی آنها در نظر گرفته شده است. لکن در روش پیشنهادی لازم است که هر منبع تولید پراکنده اطلاعات مربوط به توان راکتیو خروجی خود را به کلیه منابع تولید پراکنده دیگر ارسال نماید که قاعده‌تاً منجر به پیچیدگی بستر مخابراتی مورد نیاز در روش پیشنهادی خواهد شد. همچنین در این کار راجع به جریان‌های گردشی و شرایط لازم برای جلوگیری از جاری‌شدن آنها مابین اینورترهای با توان نامی نابرابر بحثی به میان نیامده است. در [۱۴] با در نظر گرفتن بارهای محلی و با تنظیم شیب کنترل دروپ ولتاژ و امپدانس مجازی، افت ولتاژهای خطوط تغذیه واحدهای تولید پراکنده با هم برابر شده که موجب تقسیم صحیح توان راکتیو در ظرفیت‌های نامی برابر منابع شده است. در این کار، مقدار امپدانس مجازی با فرض معلوم‌بودن امپدانس خطوط تغذیه اینورترها تعیین شده است. علاوه بر این، استفاده توأم از امپدانس مجازی و تغییر شیب کنترلر دروپ منجر به پیچیدگی سیستم کنترل پیشنهادی شده است. همچنین در این سیستم کنترلی، انحرافات فرکانس و دامنه ولتاژ از

نوع ریزشبه‌کها بهتر است که از روش دروپ مخالف<sup>۱</sup> استفاده شود [۴]. با این وجود، در صورت استفاده از روش‌های دروپ، تقسیم توان میان منابع در ریزشبه‌کها تحت تأثیر امپدانس خطوط تغذیه منابع تولید پراکنده است و در شرایطی که امپدانس خطوط تغذیه با عکس توان‌های نامی اینورترها متناسب نباشند، تقسیم توان به صورت نادرست انجام می‌شود. تشریح این مطلب با روابط ریاضی مربوط در بخش ۲ آورده شده است. در ریزشبه‌ک‌های دارای منابع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر، این عدم تناسب باعث تفاوت در افت ولتاژ در خطوط تغذیه و در نتیجه نابرابری ولتاژ پایانه‌های منابع تولید پراکنده شده و در نهایت منجر به جاری‌شدن جریان گردشی بین منابع می‌شود. همچنین این اختلاف افت ولتاژ باعث تقسیم نادرست توان راکتیو یا اکتیو متناسب با نوع روش دروپ استفاده‌شده هم می‌شود. لذا باید سیستم کنترل دروپ سنتی به گونه‌ای بهبود یابد که در تغذیه بار علاوه بر تقسیم صحیح توان اکتیو و راکتیو بین منابع متناسب با ظرفیت اینورترها، منجر به کاهش چشم‌گیر جریان گردشی بین آنها در شرایط امپدانس خطوط تغذیه نامتناسب با عکس توان‌های نامی منابع گردد. در این راستا، روش‌های مختلفی با استفاده از بسترهای مخابراتی به منظور افزایش قابلیت روش کنترل دروپ سنتی ارائه شده است. این بسترهای مخابراتی در صورت وجود، گاهی بین اینورترها در داخل ریزشبه‌ک بدون نیاز به ارتباط با باس نقطه اتصال مشترک برقرار می‌شوند و در برخی مواقع بین باس نقطه اتصال مشترک و اینورترها بدون نیاز به خطوط مخابراتی مابین اینورترها اجرا می‌شوند. یک معیار برای انتخاب هر یک از این ساختارها می‌تواند فاصله بین منابع تولید پراکنده با همدیگر و یا فاصله آنها تا نقطه باس مشترک باشد. مرجع [۵] مرور جامعی بر روش‌های مختلف تقسیم صحیح توان‌های اکتیو و راکتیو در ریزشبه‌ک‌های جزییره‌ای و چالش‌های موجود در جهت نیل به این هدف را ارائه نموده است. یکی از راهکارهای مؤثر در بهبود تسهیم توان و کاهش جریان‌های گردشی، استفاده از مفهوم امپدانس مجازی است که به دو صورت ثابت و تطبیقی مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد. در ادامه مروری بر کارهای انجام‌یافته در این زمینه ارائه می‌گردد.

در [۶] و [۷] به ترتیب از روش امپدانس مجازی سلفی و امپدانس مجازی مقاومتی غالب برای تقسیم صحیح توان بین اینورترهای با توان نامی برابر استفاده شده است. با بزرگ‌گرفتن اندازه امپدانس مجازی، اثرات نابرابر بودن امپدانس خطوط تغذیه در تقسیم نابرابر توان‌های راکتیو کاهش پیدا می‌کند. در این روش، نیازی به ایجاد بستر مخابراتی بین اینورترها و یا بین اینورترها و باس نقطه اتصال مشترک وجود ندارد. اما در این روش‌ها، استفاده از امپدانس مجازی بزرگ می‌تواند فرض کوچک‌بودن اختلاف زاویه بین ولتاژ خروجی اینورتر و ولتاژ باس نقطه اتصال مشترک را که بر مبنای آن، کنترل دروپ مستقل توان‌های اکتیو و راکتیو بنا نهاده می‌شود تحت‌الشعاع خود قرار دهد. همچنین بزرگ‌گرفتن امپدانس مجازی منجر به افزایش افت ولتاژ و در نتیجه کاهش دامنه ولتاژ باس نقطه اتصال مشترک و کاهش حداکثر توان قابل انتقال توسط اینورتر خواهد شد.

در [۸] و [۹] از مفاهیم امپدانس مجازی مؤلفه‌های اصلی و هارمونیک برای تقسیم صحیح توان بین واحدها با ظرفیت‌های اسمی نابرابر و بهبود کیفیت ولتاژ باس نقطه اتصال مشترک در حالت تغذیه بارهای غیر خطی و هارمونیک‌زا استفاده شده است. در این روش از یک کنترل‌کننده مرکزی برای اندازه‌گیری مؤلفه‌های هارمونیک ولتاژ باس مشترک و ارسال آنها از

## Archive of SID

تغییر یافته تا حدی که امکان دارد فرض غالب‌بودن خاصیت سلفی یا اهمی خط تغذیه که بر مبنای آن کنترلر دروپ مستقیم یا مخالف طراحی می‌شود نقض شده و عملکرد کنترلر دروپ مختل گردد. مرجع [۱۹] با ارائه یک الگوریتم خاص بر روی اندازه اندوکتانس مجازی محدودیت اعمال نموده است. لکن این کار از یک طرف منجر به محدودشدن گستره عملکرد سیستم حلقه بسته شده و از طرف دیگر منجر به پیچیدگی بالای تجزیه و تحلیل آن می‌شود. در [۲۰] تا [۲۲] بدون اعمال محدودیت بر روی اندازه اندوکتانس مجازی و با استفاده از بستر مخابراتی دوطرفه بین واحدها با ظرفیت نامی برابر و کنترلر مرکزی ریزشبه، به ترتیب از امپدانس مجازی سلفی، اهمی-سلفی و مقاومتی تطبیقی برای تقسیم صحیح توان بین واحدها استفاده شده است. در این کارها به ترتیب ابتدا فرض شده که امپدانس ریزشبه از نوع سلفی یا مقاومتی غالب بوده و در نتیجه از دروپ متداول شبکه‌های سلفی غالب [۲۰] و [۲۱] و یا دروپ مخالف [۲۲] استفاده شده است. ولی استفاده از امپدانس مجازی تطبیقی با مؤلفه‌های اهمی و یا سلفی منفی ممکن است رابطه غالب‌بودن مقدار راکتانس سلفی بر مقدار مقاومت و یا بالعکس را دستخوش تغییرات قرار داده به نحوی که استفاده از دروپ متداول و یا مخالف منجر به تضعیف عملکرد سیستم کنترلی گردد. در این مقالات، تضمینی برای سلفی و یا مقاومتی‌ماندن امپدانس شبکه با اعمال امپدانس مجازی تطبیقی داده نشده است.

در [۲۳] از ترکیب راکتانس مجازی ثابت و مقاومت مجازی تطبیقی در ریزشبه‌های مقاومتی متصل به شبکه استفاده شده است. مقاومت مجازی مقادیر منفی احراز کرده که می‌تواند با کاهش میرایی سیستم منجر به کاهش پایداری و عملکرد نامطلوب در حالت‌های گذرا گردد. مرجع [۲۴] بدون نیاز به بستر مخابراتی، از امپدانس مجازی تطبیقی که به صورت تابعی خطی (در قالب یک دروپ) از جریان‌های خروجی مبدل تغییر می‌کند برای تسهیم صحیح توان استفاده کرده است. در این مقاله بسته به این که نسبت  $X/R$  بزرگ باشد یا نسبت  $R/X$ ، کنترل‌کننده بین دو نوع دروپ مستقیم یا دروپ مخالف کلیدزنی انجام می‌دهد. اگرچه با این روش، منفی‌شدن مؤلفه‌های امپدانس مجازی مشکلی در عملکرد کنترلر دروپ به وجود نمی‌آورد، ولی تعیین مقدار دقیق نسبت  $X/R$  که برآیند مؤلفه‌های امپدانس مجازی و امپدانس خط تغذیه است نیاز به اندازه‌گیری و یا تخمین پارامترهای خط تغذیه دارد. علاوه بر این، در این مقاله تدابیری برای جبران‌سازی افت ولتاژ ناشی از کاربرد امپدانس مجازی و کنترلر دروپ در نظر گرفته نشده است. در [۲۵] بدون نیاز به بستر مخابراتی از امپدانس مجازی تطبیقی مبتنی بر روابط جبری برای توزیع متعادل توان مؤلفه منفی و هارمونیک استفاده شده است. روش پیشنهادی مبتنی بر تزریق یک سیگنال با دامنه و فرکانس خاص است که بایستی به منظور جلوگیری از اثرات سوء آن بر روی کیفیت ولتاژ شبکه با دقت و احتیاط بالایی تعیین شوند. در این کار با توجه به روابط جبری مورد استفاده، مشکل منفی‌شدن مؤلفه‌های امپدانس مجازی هارمونیک حل شده است. ولی مسئله افت ولتاژ ناشی از مقادیر بالای امپدانس مجازی و همچنین توزیع متعادل توان مؤلفه اصلی و مثبت مورد بحث قرار نگرفته است. در [۲۶] بدون استفاده از بستر مخابراتی، از مقاومت مجازی تطبیقی دومرحله‌ای برای تقسیم صحیح توان در ریزشبه‌های ولتاژ پایین با غالب‌بودن خاصیت مقاومتی خطوط تغذیه استفاده شده است. در این کار، افت ولتاژ ناشی از کنترلر دروپ و مقاومت مجازی با استفاده از سنکرون‌سازی بین اینورترها حل شده است. ولی مسئله سنکرون‌سازی بین اینورترها و تضمین همگرایی کنترلر تطبیقی

مقدار نامی جبران نشده و بحثی راجع به جریان‌های چرخشی بین اینورترها و ماهیت آنها به عمل نیامده است. در [۱۵] مشابه با [۶]، با به کارگیری امپدانس مجازی سلفی به اندازه کافی بزرگ و تخمین افت ولتاژ روی امپدانس خط تغذیه و امپدانس مجازی با استفاده از اندازه‌گیری ولتاژ باس نقطه اتصال مشترک و خط مخابراتی بین این باس و کنترلرهای محلی، عملکرد کنترلر دروپ متداول بهبود داده شده و خطای تقسیم توان راکتیو بین واحدها برای اینورترها با ظرفیت توان نامی برابر کاهش پیدا کرده است. در این کار برای جلوگیری از تقویت نویز در فرکانس‌های بالا و احتمال ناپایداری سیستم کنترل در حالت‌های گذرا از تقریب  $sL_v = jL_v\omega$  استفاده شده که در آن  $L_v$  اندوکتانس سلف مجازی و  $\omega$  فرکانس زاویه‌ای نامی سیستم است. حال آن که فرکانس ریزشبه در حالت جزیره‌ای ثابت نبوده و حتی با کنترل آن توسط لایه دوم مقدارش در حالت‌های گذرا متغیر است. مرجع [۱۶] از مفهوم تغییر تطبیقی ضریب دروپ ولتاژ برای تقسیم صحیح توان بین اینورترها با توان‌های نامی نابرابر و با امپدانس سلفی غالب استفاده کرده است. در روش پیشنهادی از یک بستر مخابراتی بین واحدهای تولید پراکنده و یک کنترلر مرکزی استفاده گردیده است. ولی در این کار بحثی راجع به جریان‌های گردشی بین اینورترها و شرایط لازم برای جلوگیری از شارش آنها به میان نیامده و حلقه‌های کنترلی ثانویه به منظور تنظیم ولتاژ و فرکانس باس نقطه اتصال مشترک در نظر گرفته نشده است. در [۱۷] مشابه با [۷]، با استفاده از امپدانس مجازی مقاومتی به اندازه کافی بزرگ و بدون ارتباط مخابراتی، تقسیم صحیح توان بین اینورترهای تک‌فاز با توان‌های نامی نابرابر و تغذیه بارهای غیر خطی و هارمونیک‌زا صورت پذیرفته است. در این کار از کنترلرهای دروپ هارمونیک برای بهبود کیفیت ولتاژ خروجی استفاده شده است. لکن در این مطالعه از خط تغذیه بین خروجی اینورترها و باس نقطه اتصال مشترک صرف‌نظر گردیده است. در این صورت اگر بارها به باس نقطه اتصال مشترک وصل شده باشند به ناچار برای اندازه‌گیری ولتاژ این باس و انتقال آن به کنترلرهای محلی نیاز به بستر مخابراتی خواهد بود. اگر هم بارها به خروجی اینورترها بعد از فیلتر خروجی و قبل از خط تغذیه وصل شوند، در این حالت با دو مسأله روبه‌رو خواهیم شد: اول این که جبران‌سازی هارمونیک ولتاژ خروجی اینورترها به معنای جبران‌سازی هارمونیک ولتاژ باس نقطه اتصال مشترک نخواهد بود [۱۸]. دوم این که وجود هر گونه بار در خروجی اینورترها علاوه بر بارهای موجود در باس نقطه اتصال مشترک به منزله بارهای محلی محسوب شده و بایستی تدابیر خاصی به منظور عملکرد صحیح کنترلر دروپ صورت پذیرد [۶] و [۱۵].

اگرچه استفاده از امپدانس مجازی ثابت و مرسوم می‌تواند در ایجاد عدم وابستگی بین توان‌های اکتیو و راکتیو و بهبود عملکرد دروپ مؤثر واقع شود، لکن در مواقعی که امپدانس خط تغذیه بسته به شرایط ریزشبه مدام در حال تغییر باشد راهکار مناسبی برای جلوگیری از پیدایش جریان‌های گردشی و تسهیم صحیح توان بین منابع تولید پراکنده نخواهد بود. بر این اساس، مفهوم امپدانس مجازی تطبیقی در [۱۹] و [۲۰] معرفی شد که بر اساس آن مؤلفه‌های امپدانس مجازی بسته به میزان خطای موجود در اندازه جریان گردشی و یا توان‌های راکتیو تولیدی هر یک از واحدها به طور هوشمندانه بدون نیاز به داشتن پارامترهای خط تغذیه تغییر می‌یابند به گونه‌ای که اندازه جریان گردشی به صفر رسیده و تسهیم صحیح توان بین واحدها صورت پذیرد. با این وجود، یکی از چالش‌هایی که مفهوم امپدانس مجازی تطبیقی با آن روبه‌روست این است که با تغییر امپدانس مجازی، امپدانس کل خط تغذیه و نسبت  $X/R$  آن

توسط لایه ثانویه بازگردانی می‌شوند.

## ۲-۱-۱ سطح اول کنترل

این لایه پایین‌ترین سطح و دارای سریع‌ترین پاسخ در کنترل سلسله‌مراتبی است که در آن تسهیم توان، کنترل ولتاژ و کنترل فرکانس انجام می‌شود. ساختار این لایه در همه  $DG$  ها مشابه هم هستند. در این بخش، ابتدا ساختار حلقه‌های داخلی کنترل جریان و ولتاژ تشریح و طراحی گردیده و سپس نحوه عملکرد کنترل دروپ مخالف توضیح داده شده است. همچنین با تحلیل مسئله تقسیم صحیح توان و جریان گردشی بین  $DG$  ها، نحوه به کارگیری امپدانس مجازی پیشنهادی و عملکرد آن در سیستم کنترل شرح داده می‌شود. نهایتاً راهکار عملی برای جلوگیری از منفی شدن امپدانس مجازی مقاومتی تطبیقی برای جلوگیری از دست دادن ماهیت مقاومتی غالب خط تغذیه ارائه می‌گردد.

## ۲-۱-۲ حلقه کنترل جریان

شکل ۳ حلقه کنترل جریان خروجی اینورتر را نشان می‌دهد [۲۹]. هنگامی که از روش کنترل حلقه‌های تودرتو استفاده می‌شود، درونی‌ترین حلقه، سریع‌ترین پاسخ و در نتیجه بالاترین پهنای باند را دارد و بنابراین حلقه جریان باید بیشترین پهنای باند را داشته باشد. در این مقاله به منظور طراحی ضرایب کنترل‌کننده‌ها، فرکانس قطع حلقه کنترل جریان  $1/4$  برابر فرکانس کلیدزنی و حاشیه فاز پایداری  $52$  درجه در نظر گرفته شده است.

## ۲-۱-۳ حلقه کنترل ولتاژ

در اینجا هدف، کنترل تنظیم ولتاژ خروجی هر یک از منابع تولید پراکنده ( $DG$ ) می‌باشد و شکل ۴ حلقه کنترل ولتاژ را نشان می‌دهد [۲۹]. به منظور تعیین ضرایب کنترل‌کننده‌ها، فرکانس قطع حلقه ولتاژ  $1/10$  فرکانس قطع حلقه جریان و حاشیه فاز پایداری  $52$  درجه در نظر گرفته شده است.

## ۲-۱-۴ کنترل دروپ مخالف

روش دروپ متداول ( $P-\omega$  و  $Q-V$ ) برای ریزشبه‌هایی با خطوط تغذیه کاملاً سلفی کاربرد دارد و استفاده از آن برای کنترل تقسیم توان با فرض سلفی غالب بودن امپدانس شبکه معتبر است. از این رو، این نوع روش دروپ در ریزشبه‌های ولتاژ پایین که خطوط تغذیه دارای امپدانس غالباً مقاومتی هستند، به دلیل تابعیت توان اکتیو از ولتاژ و توان راکتیو از فرکانس معتبر نمی‌باشد. بنابراین در این مقاله از روش کنترل دروپ مخالف برای کنترل منابع تولید پراکنده استفاده شده است. برای بیان این مسئله به صورت ریاضی با در نظر گرفتن شکل ۵ معادلات توان برای خطوط تغذیه با ماهیت مقاومتی به صورت زیر به دست می‌آیند [۳۰]

$$P = \frac{EV \cos \delta - V^2}{R} \quad (1)$$

$$Q = \frac{-EV \sin \delta}{R} \quad (2)$$

با توجه به (۱) و (۲)، توان اکتیو و راکتیو به ترتیب وابسته به دامنه ولتاژ و زاویه توان می‌باشند و بنابراین مشخصه‌های دروپ در نظر گرفته شده برای این حالت به صورت زیر هستند [۳۰]

$$f^* = f + mQ \quad (3)$$

$$E^* = E - nP \quad (4)$$

پیشنهادی در این کار شرایط خاصی را ایجاد نموده و یک مسأله چالش‌برانگیز است. علاوه بر این، در این کار مسأله منفی شدن مقاومت مجازی و احتمال از بین رفتن فرض غالب بودن ماهیت مقاومتی امپدانس کل خط تغذیه مورد بحث قرار نگرفته است.

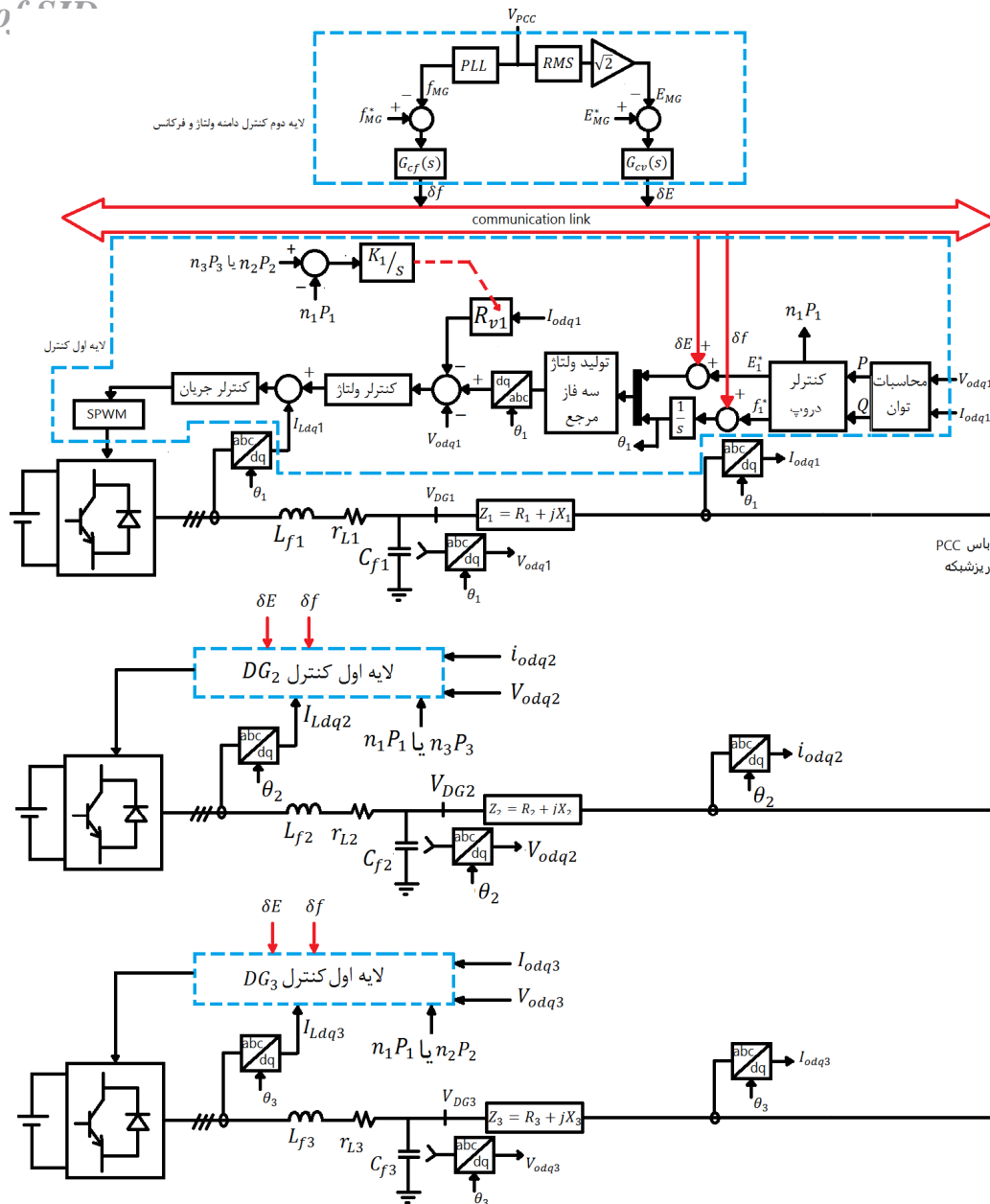
با توجه به مشکلات ذکر شده در حوزه تقسیم صحیح توان در ریزشبه‌های جزیرهای و مرور کارهای موجود در این زمینه، ارائه یک روش کنترل ساده و کامل که معایب کنترل دروپ را در ریزشبه‌های با امپدانس مقاومتی و منابع با ظرفیت‌های نامی متفاوت به طور کامل مرتفع سازد، ضروری است. لذا این مقاله با پیاده‌سازی روش کنترل سلسله‌مراتبی و با به کارگیری امپدانس مجازی مقاومتی تطبیقی بدون نیاز به اطلاعات امپدانس خطوط تغذیه و یک شبکه مخابراتی توزیع شده بدون نیاز به کنترل مرکزی به حل مشکلات کنترل دروپ در منابع با ظرفیت‌های متفاوت پرداخته است. تفاوت اساسی رویکرد پیشنهادی با روش‌های موجود در مقالات به قرار زیر است: اول این که در مقایسه با روش‌های امپدانس تطبیقی موجود از قبیل [۲۰] تا [۲۲] که در آنها تضمینی برای مثبت ماندن امپدانس مجازی وجود نداشته و در نتیجه فرض غالب بودن خاصیت سلفی ( $X \gg R$ ) و یا خاصیت مقاومتی ( $R \gg X$ ) خط تغذیه اینورتر که اساس طراحی سیستم کنترل دروپ است ممکن است برقرار نشود، در این مقاله مشکل منفی شدن مؤلفه‌های امپدانس مجازی تطبیقی مورد بحث قرار گرفته و یک راهکار عملی برای حل آن و جلوگیری از دست دادن ماهیت مقاومتی غالب خط تغذیه، مبتنی بر یک بستر مخابراتی توزیع شده جدید ارائه گردیده است. بر اساس مطالعات انجام یافته در [۵] و [۲۶] تا [۲۸]، اندازه کوچک مقاومت کل خط تغذیه که در اثر مقادیر منفی مقاومت مجازی امکان تحقق می‌یابد می‌تواند منجر به ناپایداری سیستم حلقه بسته گردد. لذا روش پیشنهادی با جلوگیری از منفی شدن مقاومت مجازی در ریزشبه‌های مقاومتی، منجر به افزایش پایداری و بهبود عملکرد سیستم در حالت‌های گذرا می‌گردد. دوم این که برخلاف اغلب کارهای موجود که اینورترهای ریزشبه را به طور ساده با توان‌های نامی برابر و سیستم کنترلی آن را به طور جزئی از دیدگاه خاصی مورد بررسی قرار داده و فاقد یک نگرش جامع به کلیه حلقه‌های کنترلی آن هستند، در این مقاله یک ریزشبه مستقل از شبکه مشتمل بر اینورترهایی با توان‌های نامی نابرابر و کلیه حلقه‌ها و لایه‌های کنترلی اعم از حلقه‌های کنترل جریان، ولتاژ، کنترل دروپ، امپدانس مجازی، بازگردانی فرکانس و بازگردانی ولتاژ و ارتباط آنها با یکدیگر مورد مطالعه قرار گرفته است. در نهایت با انجام شبیه‌سازی نشان داده می‌شود که در مقایسه با روش‌های موجود [۲۰]، رفتار حالت گذرا و ماندگار سیستم حلقه بسته به طور قابل توجهی بهبود می‌یابد.

## ۲- کنترل سلسله‌مراتبی

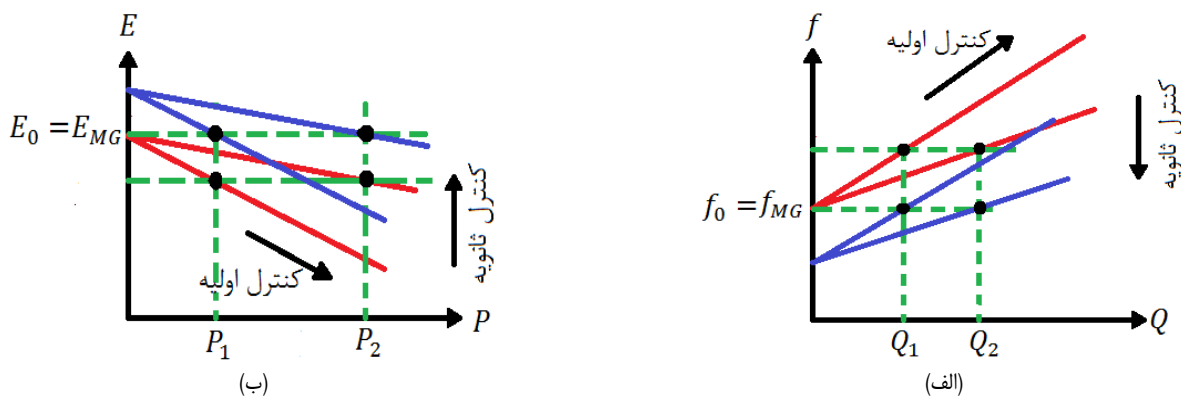
طرح کنترل سلسله‌مراتبی شامل دو لایه کنترل‌کننده اولیه و کنترل‌کننده ثانویه می‌باشد. شکل ۱ لایه‌های کنترلی برای کنترل یک منبع تولید پراکنده را نشان می‌دهد. لایه اولیه شامل کنترل دروپ و حلقه‌های کنترل ولتاژ و جریان اینورترها است. یک حلقه امپدانس مجازی مقاومتی دیگر نیز برای تنظیم امپدانس فیزیکی خطوط در این لایه اضافه شده است. در ادامه با افزودن لایه کنترلی ثانویه به سیستم، افت ولتاژ و فرکانس ناشی از کنترل دروپ جبران می‌شود.

شکل ۲ عملکرد سطوح کنترل اولیه و ثانویه را برای دو واحد تولید پراکنده با ظرفیت‌های متفاوت نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود که انحرافات فرکانس و دامنه ولتاژ ناشی از کنترل دروپ مخالف





شکل ۱: بلوک دیاگرام کنترل لایه اول و دوم ریزشبه.



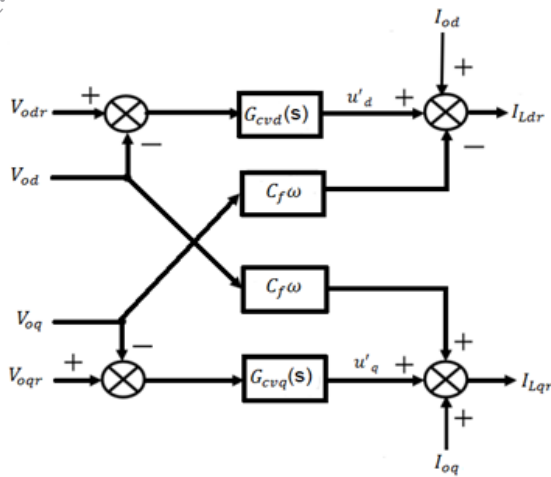
شکل ۲: پاسخ کنترل سطوح اولیه و ثانویه، (الف) بازگردانی فرکانس و (ب) بازگردانی دامنه ولتاژ.

۲-۱-۴ تحلیل مسئله تقسیم صحیح توان و کاهش جریان گردشی بین منابع تولید پراکنده

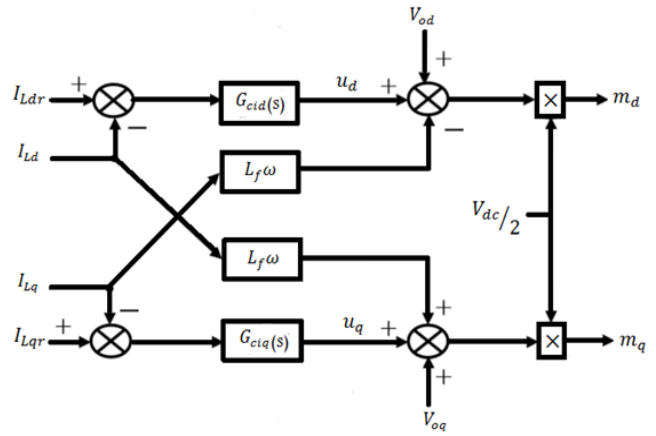
در روش دروپ مخالف با توجه به این که فرکانس، یک پارامتر سراسری در ریزشبه است، توان راکتیو به صورت صحیح، متناسب با

در (۳) و (۴)،  $f$  و  $E$  فرکانس و دامنه ولتاژ نامی و  $m$  و  $n$  ضرایب دروپ فرکانس و ولتاژ هستند. برای تعیین ضرایب دروپ، حداکثر انحراف در فرکانس و دامنه ولتاژ به ترتیب  $\pm 0.3$  Hz و  $\pm 5\%$  مقدار نامی در نظر گرفته شده است [۳۱].

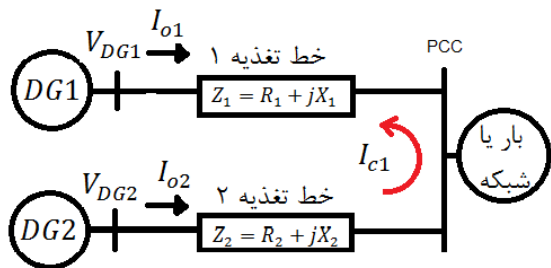
Arc



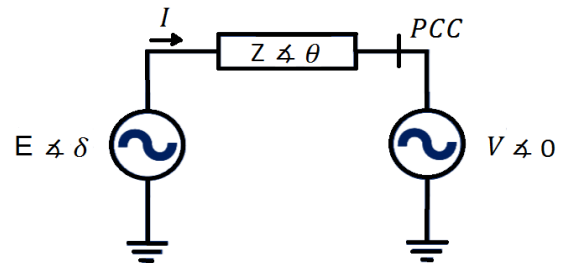
شکل ۴: ساختار کنترلی حلقه ولتاژ.



شکل ۳: بلوک دیاگرام حلقه کنترل جریان.



شکل ۶: مدار معادل ریزشبهه متصل به بار یا شبکه.



شکل ۵: اتصال یک DG با باس PCC.

$$n_1 P_1 = \frac{V_{PCC}(E_1 - V_{PCC})}{\frac{R_1}{n_1} + V_{PCC}} \quad (10)$$

$$n_r P_r = \frac{V_{PCC}(E_r - V_{PCC})}{\frac{R_r}{n_r} + V_{PCC}} \quad (11)$$

با توجه به (۱۰) و (۱۱) برای برقراری رابطه  $n_1 P_1 = n_r P_r$  باید داشته باشیم

$$\frac{R_1}{n_1} = \frac{R_r}{n_r} \quad (12)$$

با ضرب طرفین (۱۲) و (۸) با هم، حاصل می‌شود

$$P_1 R_1 = P_r R_r \quad (13)$$

در نتیجه برای تقسیم صحیح توان اکتیو بین منابع تولید پراکنده متناسب با توان نامی آنها باید نسبت بین مقاومت خطوط تغذیه برابر با نسبت عکس توان خروجی واحدهای تولید پراکنده باشد. در این مقاله برای برقراری این رابطه از حلقه امپدانس مجازی به منظور تنظیم امپدانس خطوط تغذیه استفاده شده است.

به منظور بررسی جریان گردشی بین منابع تولید پراکنده، مدار معادل یک ریزشبهه متصل به بار یا شبکه در شکل ۶ در نظر گرفته شده است.

جریان گردشی برای اینورتر  $i$  ام به صورت زیر تعریف شده است [۳۲]

$$I_{ci} = a_i I_{unit} - I_{oi} \quad (14)$$

که

$$a_1 : a_r : \dots : a_n = P_1^r : P_r^r : \dots : P_n^r \quad (15)$$

توان نامی بین منابع تولید پراکنده تقسیم می‌شود. اما تقسیم توان اکتیو و همچنین وجود یا عدم وجود جریان گردشی تحت تأثیر امپدانس خطوط تغذیه و اختلاف افت ولتاژهای آنها می‌باشد. بر این اساس برای تحقق تقسیم صحیح توان اکتیو و حذف جریان گردشی بین منابع باید افت ولتاژهای خطوط تغذیه با هم برابر شوند. در ادامه، این توضیحات بر اساس روابط حاکم تأیید می‌شوند. مشخصه کنترل دروپ ولتاژ برای  $DG_1$  و  $DG_r$  به صورت زیر است

$$E_1^* = E_1 - n_1 P_1 \quad (5)$$

$$E_r^* = E_r - n_r P_r \quad (6)$$

از آنجایی که حداکثر افت دامنه ولتاژ ( $\Delta E_{max}$ ) در هنگام تعیین ضرایب دروپ برای  $DG$  ها یکسان در نظر گرفته می‌شود، بنابراین

$$\left. \begin{aligned} n_1 &= \frac{\Delta E_{max1}}{P_1^r} \\ n_r &= \frac{\Delta E_{maxr}}{P_r^r} \end{aligned} \right\} \xrightarrow{\Delta E_{max1} = \Delta E_{maxr}} n_1 P_1^r = n_r P_r^r \quad (7)$$

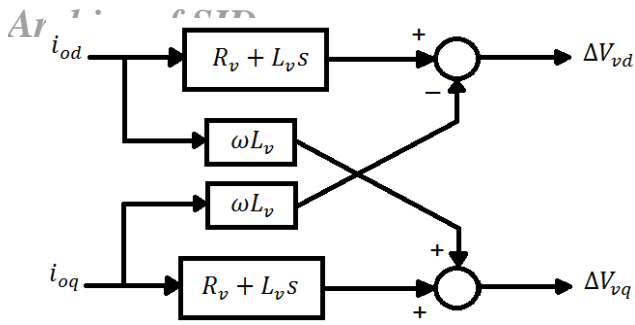
برای تقسیم صحیح توان اکتیو بین منابع تولید پراکنده باید (۸) برقرار باشد

$$n_1 P_1 = n_r P_r \quad (8)$$

با تقسیم طرفین (۸) بر طرفین (۷) به (۹) دست یافته و در نتیجه، تقسیم صحیح توان اکتیو بین منابع صورت می‌پذیرد

$$\frac{P_1}{P_1^r} = \frac{P_r}{P_r^r} \quad (9)$$

بنابراین برای تحقق این امر، از معادله توان به دست آمده در (۱) و جایگذاری (۵) و (۶) در آن خواهیم داشت



شکل ۸: مدل‌سازی امپدانس مجازی در قاب dq.

خطوط تغذیه را با هم برابر نمود. لازم به ذکر است که در روابط بالا  $R_1$  و  $R_2$  مجموع امپدانس حقیقی و امپدانس مجازی در خطوط تغذیه می‌باشند. همان‌طور که بیان شد، شرط دیگر صفر بودن جریان گردشی بین واحدهای تولید پراکنده برقراری رابطه  $a_r/Z_r = a_l/Z_l$  می‌باشد که در ریزشکله مقاومتی  $Z_1 \approx R_1$  و  $Z_r \approx R_r$  است. با توجه به (۷) و (۱۵) داریم

$$\frac{a_1}{a_r} = \frac{n_r}{n_1} \quad (21)$$

لذا شرط  $a_r/Z_r = a_l/Z_l$  نیز با توجه به (۱۲)، (۲۱) و تقریب‌های  $Z_1 \approx R_1$  و  $Z_r \approx R_r$  استخراج می‌شود.

### ۲-۱-۵ حلقه کنترل امپدانس مجازی مقاومتی پیشنهادی

شکل ۷ یک واحد تولید پراکنده با محل قرارگیری فرضی امپدانس مجازی را نشان می‌دهد [۲۰]. در این شکل،  $E$  ولتاژ مرجع تولیدشده از کنترل دروپ است.  $i_o$  جریان خروجی منبع تولید پراکنده،  $\Delta V_v$  افت ولتاژ امپدانس مجازی و  $V_{ref}$  ولتاژ مرجع نهایی بعد از به کارگیری امپدانس مجازی برای اصلاح امپدانس خروجی در سیستم کنترل است. برای مدل‌سازی امپدانس مجازی در قاب dq با توجه به شکل ۷ افت ولتاژ ناشی از امپدانس مجازی در سیستم سه‌فاز  $a$ ،  $b$  و  $c$  برابر خواهد بود با

$$\Delta V_{vabc} = R_v i_{oabc} + L_v \frac{di_{oabc}}{dt} \quad (22)$$

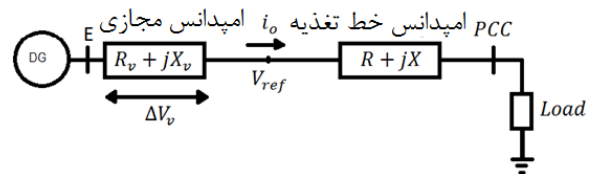
معادله بالا در قاب dq به صورت زیر بیان می‌شود

$$\begin{cases} \Delta V_{vd} = (R_v + L_v s) i_{od} - \omega L_v i_{oq} \\ \Delta V_{vq} = (R_v + L_v s) i_{oq} + \omega L_v i_{od} \end{cases} \quad (23)$$

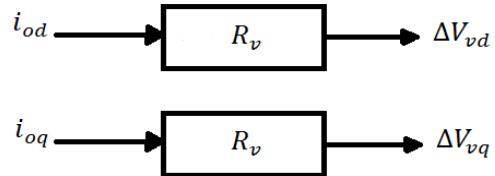
مدل‌سازی امپدانس مجازی در قاب dq به صورت بلوک دیاگرام در شکل ۸ نشان داده شده است.

در ریزشکله‌های ولتاژ پایین که مقصود این مقاله می‌باشد، معمولاً امپدانس خط تغذیه بین منابع تولید پراکنده و باس PCC به صورت مقاومتی است. در این صورت، برای جبران و تنظیم امپدانس مقاومتی فیزیکی خط تغذیه و به تبع آن تقسیم صحیح توان بین منابع، باید از امپدانس مقاومتی مجازی استفاده کرد. در این صورت بلوک دیاگرام شکل ۸ به صورت شکل ۹ ساده می‌شود.

برای تنظیم امپدانس مجازی و محقق‌شدن اهداف مورد نظر، باید مقدار امپدانس مجازی با استفاده از یک کنترل‌کننده تنظیم شود. همان‌طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است برای تنظیم مقدار امپدانس مجازی از یک انتگرال‌گیر استفاده گردیده که مقدار ضریب انتگرال‌گیر را می‌توان با استفاده از مدل سیگنال کوچک سیستم طوری تعیین کرد که ریشه‌های معادله مشخصه سیستم حلقه بسته، سمت چپ محور موهومی



شکل ۷: پیاده‌سازی امپدانس مجازی.



شکل ۹: امپدانس مجازی مقاومتی در قاب dq.

$I_{oi}$  جریان خروجی واحد تولید پراکنده  $i_m$  و  $I_{unit}$  به صورت زیر بیان می‌شود

$$I_{unit} = \frac{\sum_{i=1}^n I_{oi}}{\sum_{i=1}^n a_i} \quad (16)$$

جریان گردشی بین دو واحد تولید پراکنده در شکل ۶ در رابطه زیر به دست آمده است

$$\begin{aligned} I_{C1} = -I_{C2} &= a_1 \frac{I_{o1} + I_{or}}{a_1 + a_r} - I_{o1} = \frac{1}{a_1 + a_r} (a_1 I_{or} - a_r I_{o1}) \\ &= \frac{1}{a_1 + a_r} (a_1 \frac{V_{DG1} - V_{PCC}}{Z_r} - a_r \frac{V_{DG1} - V_{PCC}}{Z_1}) \end{aligned} \quad (17)$$

در (۱۷) مشاهده می‌شود که جریان گردشی بین منابع تحت تأثیر ولتاژ خروجی و نسبت امپدانس خطوط تغذیه می‌باشد. بر این اساس هنگامی که  $V_{DG1} = V_{DG2}$  و  $a_r/Z_r = a_l/Z_l$  باشد، جریان گردشی بین منابع صفر خواهد شد. برای برابری ولتاژ خروجی واحدهای تولید پراکنده باید افت ولتاژها در طول امپدانس خطوط تغذیه با هم برابر شوند. افت ولتاژ در طول امپدانس خط تغذیه برای هر واحد تولید پراکنده به صورت رابطه تقریبی زیر به دست می‌آید [۲۰]

$$\Delta V \approx \frac{RP + XQ}{E} \quad (18)$$

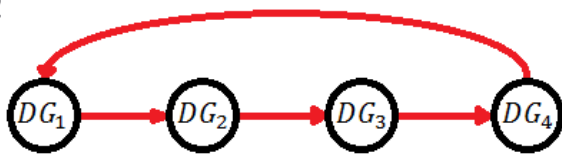
که  $R$  و  $X$  به ترتیب مقاومت و راکتانس خط تغذیه،  $P$  و  $Q$  به ترتیب توان اکتیو و راکتیو جاری شده از خط تغذیه و  $E$  ولتاژ خروجی نامی واحد تولید پراکنده می‌باشد. با توجه به شکل ۶ در ریزشکله‌های ولتاژ پایین به دلیل ماهیت مقاومتی امپدانس، افت ولتاژهای خطوط تغذیه  $DG_1$  و  $DG_2$  به صورت رابطه‌های تقریبی زیر خواهند بود

$$\Delta V_1 \approx \frac{R_1 P_1}{E_1} \quad (19)$$

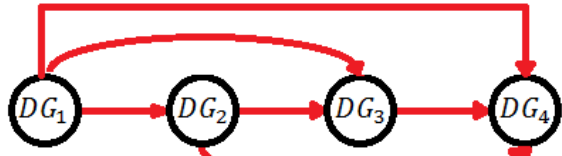
$$\Delta V_r \approx \frac{R_r P_r}{E_r} \quad (20)$$

در (۱۹) و (۲۰) دیده می‌شود که برای برابری افت ولتاژهای خطوط تغذیه باید رابطه  $P_1 R_1 = P_r R_r$  برقرار باشد. این رابطه همان‌طور که در (۱۳) اثبات شد، علاوه بر ارضای شرط برابری افت ولتاژهای خطوط، شرایط تقسیم صحیح توان بین منابع تولید پراکنده را نیز برآورده می‌سازد. بنابراین با پیاده‌سازی امپدانس مجازی مقاومتی می‌توان افت ولتاژهای

Arct ...



شکل ۱۲: اتصال زنجیری بین DG ها در مرحله اول پیاده‌سازی حلقه‌های امپدانس مجازی.



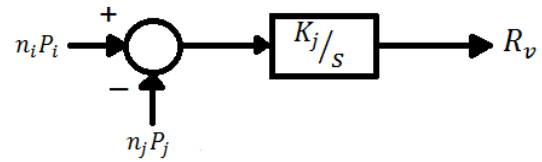
شکل ۱۳: مراجع مجاز برای انتخاب ساختار مخابراتی بین واحدهای تولید پراکنده.



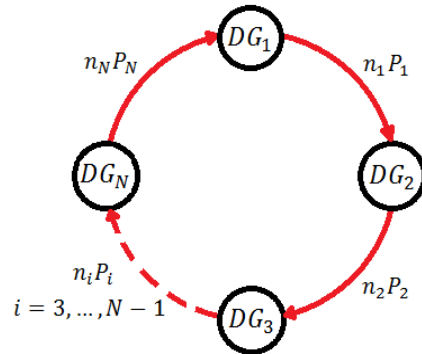
شکل ۱۴: ساختار مخابراتی انتخابی با کمترین فاصله بین DG ها در مرحله دوم پیاده‌سازی حلقه‌های امپدانس مجازی.

قرار گرفته و سیستم حلقه بسته پایدار باشد [۲۰]. در این مقاله، این ضرایب به صورت تجربی و با توجه به نتایج عددی استخراج و در جدول بخش ۳ ارائه شده‌اند. اساس کار این روش به این صورت است که سیگنال  $n_i P_i$  از یک واحد به عنوان مرجع برای  $n_j P_j$  در واحد دیگر قرار می‌گیرد.

برای تضمین مقاومتی ماندن امپدانس خطوط تغذیه و عملکرد صحیح کنترلر دروپ، پیاده‌سازی حلقه کنترل امپدانس مجازی مقاومتی در دو مرحله انجام می‌شود. در مرحله اول ابتدا به صورت زنجیره‌ای همانند شکل ۱۱، سیگنال مرجع  $n_i P_i$  از یک واحد برای واحد همسایه خود قرار می‌گیرد. با این کار پس از راه‌اندازی سیستم با توجه به (۹) و (۱۳) و تعمیم آنها برای  $N$  واحد تولید پراکنده، رابطه زیر بین DG ها برقرار می‌شود



شکل ۱۰: حلقه کنترل امپدانس مجازی برای واحد  $j$  ام،  $i \neq j$ .



شکل ۱۱: اتصال زنجیری بین DG ها در یک ریزشکه.

برای تضمین مقاومتی ماندن امپدانس خطوط تغذیه و عملکرد صحیح کنترلر دروپ، پیاده‌سازی حلقه کنترل امپدانس مجازی مقاومتی در دو مرحله انجام می‌شود. در مرحله اول ابتدا به صورت زنجیره‌ای همانند شکل ۱۱، سیگنال مرجع  $n_i P_i$  از یک واحد برای واحد همسایه خود قرار می‌گیرد. با این کار پس از راه‌اندازی سیستم با توجه به (۹) و (۱۳) و تعمیم آنها برای  $N$  واحد تولید پراکنده، رابطه زیر بین DG ها برقرار می‌شود

$$(R_1 + R_v)P_1^r = (R_2 + R_v)P_2^r = \dots = (R_N + R_v)P_N^r \quad (۲۴)$$

که  $R_i$  ها  $(i = 1, 2, \dots, N)$  مقاومت فیزیکی خطوط تغذیه هستند. از رابطه بالا با توجه به این که مقدار  $R_v$  ها معلوم می‌باشند، رابطه بین هر  $R_{iv} P_i^r$  از یک واحد تولید پراکنده با  $R_{jv} P_j^r$  در واحدهای دیگر مشخص است. بنابراین نسبت بین  $R_i P_i^r$  از یک واحد با  $R_j P_j^r$  در واحدهای دیگر مشخص می‌شود. تعداد حالت‌هایی که باید دوبه‌دو بین واحدها مقایسه شود، از رابطه زیر به دست می‌آید

$$S = \frac{N(N-1)}{2} \quad (۲۵)$$

که در آن  $S$  تعداد حالت و  $N$  تعداد منابع تولید پراکنده است. بعد از مشخص شدن نسبت بین  $R_i P_i^r$  از یک واحد با  $R_j P_j^r$  در واحدهای دیگر، در مرحله دوم برای پیاده‌سازی مجدد امپدانس مجازی دو حالت به وجود می‌آید:

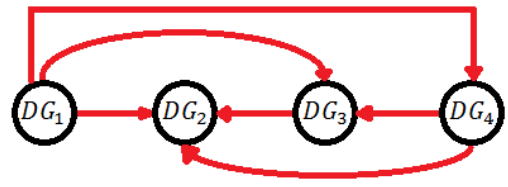
۱) اگر  $R_j P_j^r < R_i P_i^r$  باشد، در این صورت برای برقراری تساوی و تضمین مثبت بودن مقدار امپدانس مجازی، حلقه امپدانس مجازی باید در واحد  $j$  به کار گرفته شود و سیگنال مرجع  $n_i P_i$  از واحد  $i$  برای  $n_j P_j$  در واحد  $j$  قرار داده شود.

۲) اگر  $R_j P_j^r > R_i P_i^r$  باشد، در این صورت حلقه امپدانس مجازی باید در واحد  $i$  به کار گرفته شود و سیگنال مرجع  $n_j P_j$  در واحد

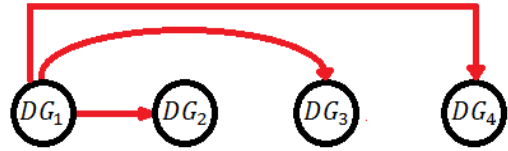


Archive of SID

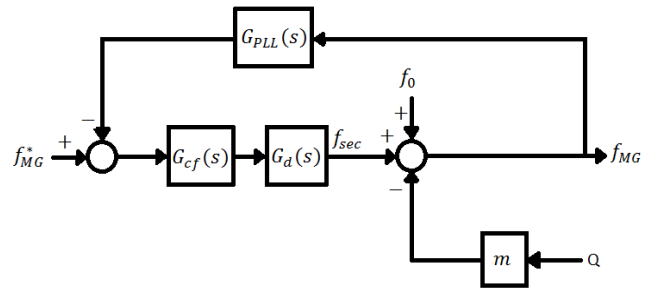
$L_{f1}$	۱ mH
$r_{Lf1}$	۱٫۶ Ω
$C_{f1}$	۸۲ μF
$L_{f2}$	۰٫۵ mH
$r_{Lf2}$	۰٫۸ Ω
$C_{f2}$	۱۲۳ μF
$L_{f3}$	۰٫۳۳ mH
$r_{Lf3}$	۰٫۵۳ Ω
$Z_1 = R_1 + jX_1$	۰٫۳۲۱ + j۰٫۴۱ Ω
$Z_2 = R_2 + jX_2$	۰٫۶۴۲ + j۰٫۸۲ Ω
$Z_3 = R_3 + jX_3$	۰٫۹۶۳ + j۰٫۱۲۱ Ω
$S_{m1}$	۱۰ kVA
$S_{m2}$	۲۰ kVA
$S_{m3}$	۳۰ kVA
$V_{RMS}^n$	۱۹۶ V
$f_c$	۵۰ Hz
$V_{DC}$	۸۵۳ V
$P_{load1}, Q_{load1}$	۱۳ kW , ۸ kVAR
$P_{load2}, Q_{load2}$	۵ kW , ۴ kVAR
$f_s$	۱۰ kHz



شکل ۱۵: مراجع مجاز برای انتخاب ساختار مخابراتی بین واحدهای تولید پراکنده.



شکل ۱۶: ساختار مخابراتی انتخابی با کمترین فاصله بین DG ها در مرحله دوم پیاده‌سازی حلقه‌های امیدانس مجازی.



شکل ۱۷: بلوک دیاگرام بازگردانی انحراف فرکانس.

فرمان‌ها و انحرافات دامنه ولتاژ و فرکانس به کنترل اولیه هر DG داده می‌شود [۳۴].

۲-۲-۱ بازگردانی فرکانس

به منظور حذف خطای حالت ماندگار در فرکانس از کنترل‌کننده PI استفاده گردیده و همچنین برای تعیین ضرایب آن از همان معیارهای به کار رفته در لایه اول برای جداسازی دینامیک حلقه‌ها از هم استفاده شده است. به این ترتیب که فرکانس قطع این لایه ۱/۱۰ برابر فرکانس قطع حلقه ولتاژ در لایه اول در نظر گرفته شده که در نتیجه آن در محاسبات لایه دوم، لایه اول بی‌اثر و با بهره یک در نظر گرفته شده و بدین ترتیب دینامیک حلقه‌ها از هم جدا می‌شود. بنابراین لایه دوم بازگردانی فرکانس به صورت شکل ۱۷ مدل‌سازی می‌گردد [۳۵].

توابع انتقال در لایه ثانویه به صورت زیر بیان می‌شوند [۳۵]

$$G_{ef}(s) = K_{pf} + \frac{K_{if}}{s} \tag{28}$$

$$G_d(s) = \frac{1,5\omega_s}{s + 1,5\omega_s} \tag{29}$$

$$G_{PLL}(s) = \frac{1}{1 + \tau s} \tag{30}$$

که در (۲۸) تا (۳۰)،  $G_{ef}(s)$  کنترلر تناسبی-انتگرالی فرکانس،  $G_d(s)$  تأخیر ناشی از لینک‌های ارتباطی بین لایه اول و دوم و  $G_{PLL}(s)$  تابع انتقال دینامیک PLL است.

با استفاده از مقادیر پارامترها در جدول ۱ و با رسم دیاگرام بود مربوط به سیستم جبران‌نشده حلقه کنترل فرکانس، حاشیه فاز در فرکانس قطع

بنابراین با توجه به این فواصل، شکل ۱۶ به عنوان بهترین ساختار مخابراتی بین DG ها انتخاب شده و مجدداً حلقه‌های امیدانس مجازی برای تضمین ماهیت مقاومتی ماندن خطوط تغذیه پیاده‌سازی می‌شوند. با این روش پیشنهادی، یک شبکه مخابراتی توزیع‌شده یک‌طرفه بدون نیاز به کنترلر مرکزی خواهیم داشت که در آن هر اینورتر لازم است با اینورترهای کناری و همسایه، تبادل اطلاعات نماید. این ساختار مخابراتی توزیع‌شده نسبت به ساختار مخابراتی متمرکز دوطرفه مطروح در [۲۰] تا [۲۲] از لحاظ اجرا از سادگی بیشتری برخوردار بوده و با اضافه‌شدن واحدهای جدید به شبکه تنها نیاز است در محل نصب واحد جدید، یک ارتباط مخابراتی با منابع همسایه موجود در محل برقرار شود. حال آن که در ساختار متمرکز با اضافه‌شدن واحد جدید، نرم‌افزار و الگوریتم موجود در کنترلر مرکزی به منظور محاسبه سیگنال‌های مرجع مناسب نیز باید تغییر نماید. علاوه بر این، با توجه به این که هر اینورتر فقط با اینورتر کناری که در نزدیک‌ترین فاصله با آن قرار دارند تبادل اطلاعات می‌کند، می‌توان انتظار داشت تأخیر مخابراتی در انتقال اطلاعات نسبت به ساختار متمرکز کاهش یابد.

۲-۲ سطح دوم کنترل

هنگام تغذیه بار، کنترل دروپ، انحرافات را در فرکانس و دامنه ولتاژ از مقادیر نامی ایجاد می‌کند. برای غلبه بر این مسایل، می‌توان از حلقه کنترل ثانویه استفاده کرد [۳۱] و [۳۳]. همانند شکل ۱ در کنترل ثانویه، دامنه ولتاژ و فرکانس ریزشبه که در باس PCC اندازه‌گیری شده، توسط یک کنترل‌کننده مرکزی جمع‌آوری می‌شوند که پس از محاسبات،

جدول ۱: مشخصات ریزشبه طراحی‌شده.

مقدار	پارامتر
۴۱ μF	$C_{f1}$

جدول ۲: پارامترهای سیستم کنترلی لایه اولیه.

پارامتر	مقدار
$G_{cid\gamma,gr}(s)$	$۱۱,۴۵ + ۱۷۲۵۶۰/s$
$G_{cid\tau,gr}(s)$	$۵,۶۸ + ۸۵۶۰/s$
$G_{cid\tau,gr}(s)$	$۳,۸۱ + ۵۷۵۲۰/s$
$G_{cvd\gamma,gr}(s)$	$۰,۰۵ + \frac{۶۱,۳}{s}$
$G_{cvd\tau,gr}(s)$	$۰,۱ + ۱۲۴/s$
$G_{cvd\tau,gr}(s)$	$۰,۱۵ + \frac{۱۸۳,۹}{s}$
$K_v/s$	$(-۸,۵)/s$
$K_r/s$	$(-۷)/s$
$K_r/s$	$(-۶,۵)/s$
$n_1$	$۱۳,۸۵ \times 10^{-4} (V/W)$
$n_r$	$۶۹,۲۵ \times 10^{-3} (V/W)$
$n_r$	$۴۶۲ \times 10^{-3} (V/W)$
$m_1$	$۱۵ \times 10^{-2} (Hz/VAR)$
$m_r$	$۷۵ \times 10^{-2} (Hz/VAR)$
$m_r$	$۵ \times 10^{-2} (Hz/VAR)$

جدول ۳: پارامترهای سیستم کنترلی لایه ثانویه.

پارامتر	مقدار
$G_{gf}(s)$	$۰,۰۰۱۶ + ۱/s$
$G_{cv}(s)$	$۰,۰۸۳ + ۱۱۶/s$
$\tau$	$۵۰ \text{ ms}$
$\omega_s$	$۳۱۴ \text{ rad/s}$

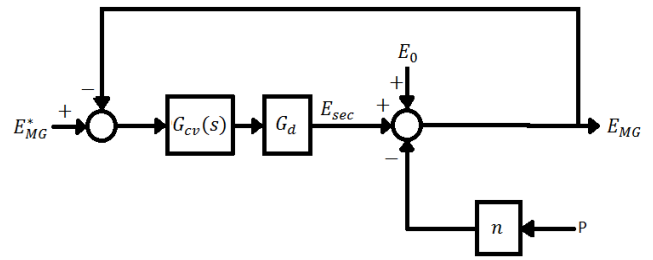
شکل ۱ در نظر گرفته شده و شبیه‌سازی‌های متعددی در سیمولینک متلب انجام گردیده است. مشخصات ریزشیکه طراحی شده و پارامترهای سیستم کنترلی آن در جداول ۱ تا ۳ بیان گردیده است.

### ۳-۱- شبیه‌سازی سه واحد تولید پراکنده با به کارگیری کنترل کننده لایه اول بدون امیدانس مجازی

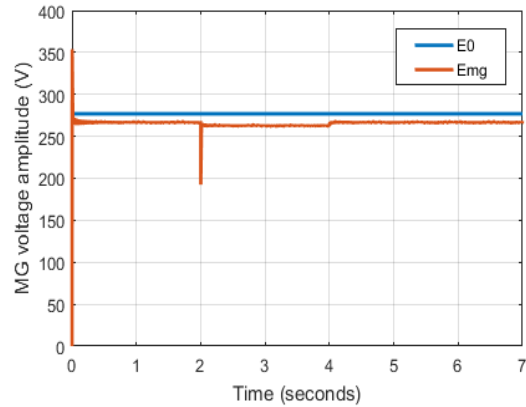
در تمامی شکل موج‌های رسم‌شده، بار ۲ توسط کلید به منظور بررسی پایداری سیستم مورد مطالعه در لحظه  $t = ۲s$  وصل و در لحظه  $t = ۴s$  قطع شده است. شکل ۱۹ با توجه به رابطه کنترل دروپ ولتاژ مخالف در (۴)، افت ولتاژ باس PCC از مقدار نامی آن (۲۷۷ ولت) ناشی از کنترل دروپ با تغییرات بار را نشان می‌دهد که در ادامه با افزودن لایه دوم کنترل، دامنه ولتاژ باس PCC به مقدار نامی آن بازگردانی می‌شود. شکل ۲۰ فرکانس سیستم ریزشیکه با تغییرات بار را نشان می‌دهد که با توجه به رابطه دروپ فرکانس مخالف در (۳)، هنگامی که بار بر روی ریزشیکه قرار می‌گیرد فرکانس باس PCC از مقدار نامی آن (۵۰ هرتز) بیشتر می‌شود. با اضافه کردن لایه دوم کنترل مشاهده خواهد شد که فرکانس ریزشیکه به مقدار نامی ۵۰ هرتز بازگردانی می‌شود.

### ۳-۲- نتایج شبیه‌سازی با افزودن لایه ثانویه بدون امیدانس مجازی

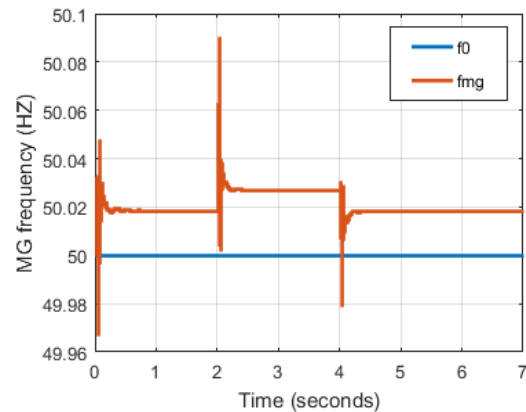
شکل‌های ۲۱ و ۲۲ مقدار مرجع و مقدار اندازه‌گیری شده فرکانس و دامنه ولتاژ باس PCC را هنگامی که کنترل لایه دوم به سیستم اضافه



شکل ۱۸: بازگردانی دامنه ولتاژ.



شکل ۱۹: دامنه ولتاژ باس PCC ریزشیکه بدون لایه ثانویه.



شکل ۲۰: فرکانس ریزشیکه بدون لایه ثانویه.

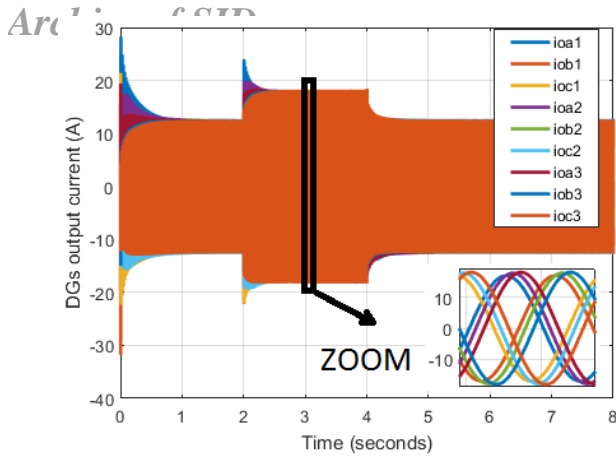
برابر  $۱۵۳,۷^\circ$  به دست می‌آید. به دلیل محدودیت کنترل کننده PI که حداکثر  $۹۰^\circ$  درجه فاز منفی را می‌تواند به سیستم حلقه باز جهت جبران‌سازی تزریق نماید، در این لایه با توجه به حاشیه فاز سیستم جبران‌نشده ( $۱۵۳,۷^\circ$ ) امکان رسیدن به حاشیه فاز پایداری  $۵۲^\circ$  نمی‌باشد. بنابراین حاشیه فاز  $۷۸^\circ$  به عنوان معیار پایداری در این لایه در نظر گرفته شده است.

### ۲-۲- بازگردانی دامنه ولتاژ

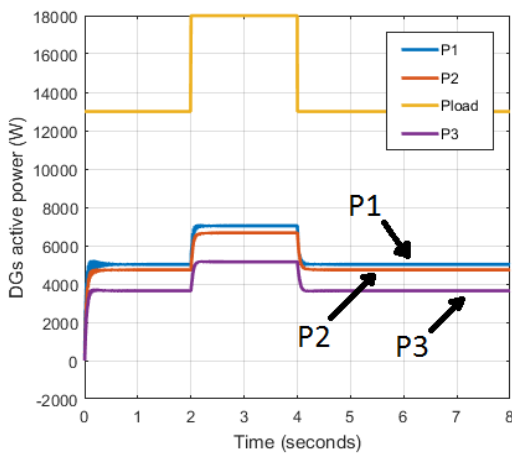
به منظور بازگردانی انحراف دامنه ولتاژ از مقدار نامی حلقه کنترل ثانویه دامنه ولتاژ را می‌توان به صورت شکل ۱۸ در نظر گرفت [۳۵]. به طور مشابه با حلقه کنترل فرکانس، حاشیه فاز پایداری  $۷۸^\circ$  درجه و فرکانس قطع  $۱/۱۰$  برابر فرکانس قطع حلقه ولتاژ در لایه اول برای تعیین ضرایب کنترل کننده دامنه ولتاژ در نظر گرفته شده است.

### ۳- نتایج عددی

برای بررسی عملکرد کنترل کننده طراحی شده، یک ریزشیکه با ۳ منبع تولید پراکنده با ظرفیت‌های متفاوت ( $S_{rn} = ۱,۵S_{rn} = ۳S_{rn}$ ) مطابق



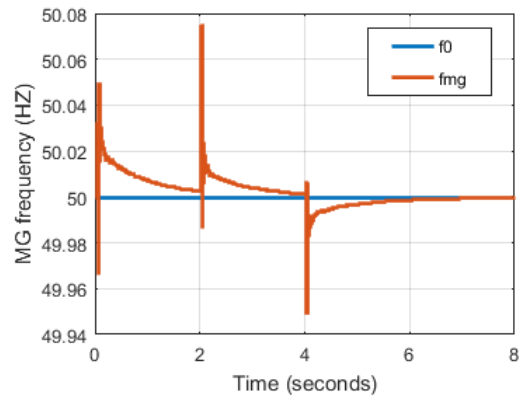
شکل ۲۳: جریان خروجی بدون حلقه امپدانس مجازی تحت شرایط نسبت امپدانس‌های خطوط تغذیه نابرابر با نسبت عکس توان‌های نامی اینورترها.



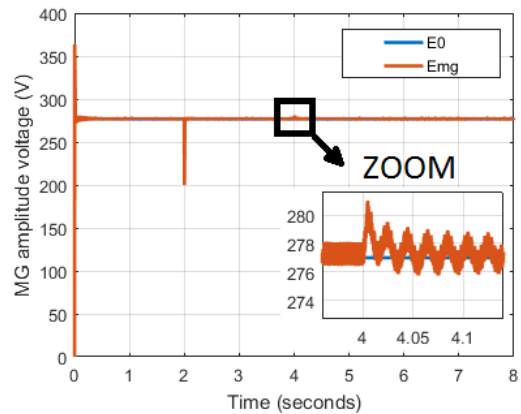
شکل ۲۴: توان اکتیو خروجی بدون حلقه امپدانس مجازی تحت شرایط نسبت بین امپدانس‌های خطوط تغذیه نابرابر با نسبت عکس توان‌های نامی اینورترها.

اول، در سیستم کنترل همه  $DG$  ها حلقه امپدانس مجازی به کار گرفته شده و برای تنظیم مقدار امپدانس‌های مجازی به صورت زنجیری سیگنال  $n_i P_i$ ،  $(i = 1, 2, 3, \dots, N)$  از یک واحد برای واحد همسایه خود مرجع قرار داده می‌شود. در سیستم مورد مطالعه، همانند شکل ۲۷ سیگنال‌های  $n_i P_i$ ،  $(i = 1, 2, 3)$  برای واحد همسایه خود به عنوان مرجع حلقه‌های امپدانس مجازی قرار داده شده‌اند. بنابراین پس از راه‌اندازی سیستم و در حالت پایدار، (۲۴) بین واحدهای تولید پراکنده برقرار می‌شود. در شکل ۲۸ نمودار مقاومت‌های مجازی در سیستم کنترل  $DG_1$ ،  $DG_2$  و  $DG_3$  نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۲۸ و (۲۴)، بدون اطلاع از مقادیر امپدانس‌های خطوط تغذیه مشخص می‌شود که روابط  $R_1 P_1^* < R_2 P_2^*$ ،  $R_2 P_2^* < R_3 P_3^*$  و  $R_3 P_3^* < R_4 P_4^*$  بین  $DG$  ها برقرار است. همچنین در جدول ۴ مقادیر مقاومت‌های مجازی به ازای تغییرات بار نشان داده شده است. از نتایج ارائه شده در این جدول مشخص است که در واحد ۳، امپدانس مجازی در بارهای با توان پایین دارای مقادیر منفی بزرگی می‌باشد. با توجه به این نتایج، در ریزشبه‌های ولتاژ پایین که کنترلر دروپ بر اساس مقاومتی بودن خطوط تغذیه تنظیم می‌شود، ممکن است فرض غالب بودن مقاومت بر راکتانس سلفی دستخوش تغییر شده و کنترل کننده دروپ درست عمل نکند. بنابراین برای تضمین غالب بودن مقاومت در خطوط تغذیه، در شکل ۲۹ سیگنال‌های مرجع مجازی که می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند نشان داده شده است. با توجه به شکل ۲۹ از بین دو حالت ممکن، شکل ۳۰ به صورت دلخواه به عنوان ساختار مخابراتی بین



شکل ۲۱: بازگردانی فرکانس ریزشبه به مقدار نامی توسط لایه ثانویه.



شکل ۲۲: بازگردانی دامنه ولتاژ ریزشبه به مقدار نامی (۲۷۷ ولت) توسط لایه ثانویه کنترل ولتاژ.

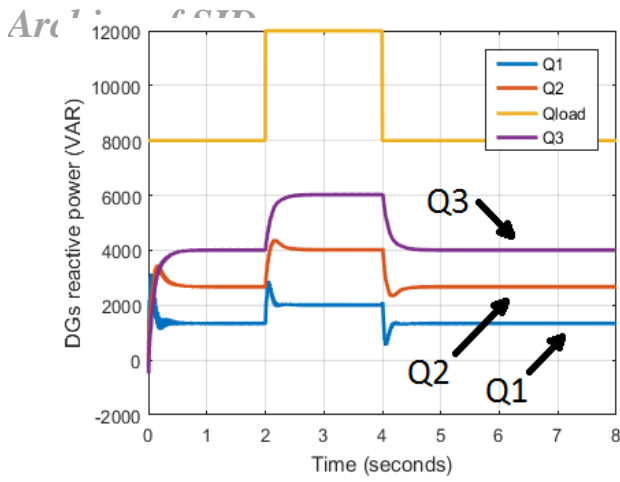
شده است نشان می‌دهند. از این دو شکل دیده می‌شود که فرکانس و دامنه ولتاژ باس PCC ریزشبه، با تغییرات بار به طور دقیق بازگردانی شده و مقادیر مرجع نامی را دنبال می‌کنند.

همان طور که در بخش ۲ بحث شد، عدم برابری نسبت بین امپدانس‌های خطوط تغذیه با نسبت عکس توان‌های نامی اینورترها موجب اختلاف در افت ولتاژ خطوط تغذیه شده و این اختلاف باعث به وجود آمدن جریان گردشی و همچنین تقسیم نادرست توان بین منابع تولید پراکنده در تغذیه بار می‌شود. در این مقاله توان نامی اینورترها متفاوت و نسبت بین امپدانس‌های خطوط تغذیه، نابرابر با نسبت عکس توان‌های نامی اینورترها در نظر گرفته شده است. در این شرایط برای جلوگیری از آسیب رسیدن به اینورترها، جریان تزریقی و همچنین توان جاری شده از  $DG_3$  باید ۳ برابر جریان و توان جاری شده از  $DG_1$  و  $1/5$  برابر  $DG_2$  باشد. اما به دلیل اختلاف در افت ولتاژ خطوط تغذیه در شکل‌های ۲۳ و ۲۴ دیده می‌شود که این نسبت برای جریان خروجی و توان اکتیو جاری شده از  $DG$  ها برای تغذیه بار رعایت نشده است. همچنین در شکل ۲۵ جریان گردشی جاری شده بین واحدهای تولید پراکنده در شرایط مذکور نشان داده شده است.

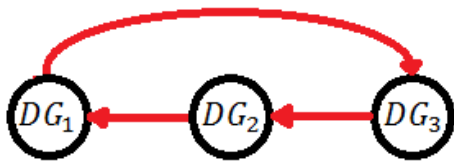
لازم به ذکر است که توان راکتیو جاری شده از  $DG$  ها مستقل از اختلاف افت ولتاژ خطوط تغذیه و وابسته به فرکانس می‌باشد. در نتیجه در شکل ۲۶ به دلیل سراسری بودن فرکانس در ریزشبه، دیده می‌شود که توان راکتیو مصرفی بار به صورت صحیح بین منابع تقسیم شده و توان راکتیو تولیدی از هر منبع متناسب با ظرفیت نامی آن می‌باشد.

### ۳-۳ نتایج مرحله اول افزودن حلقه امپدانس مجازی

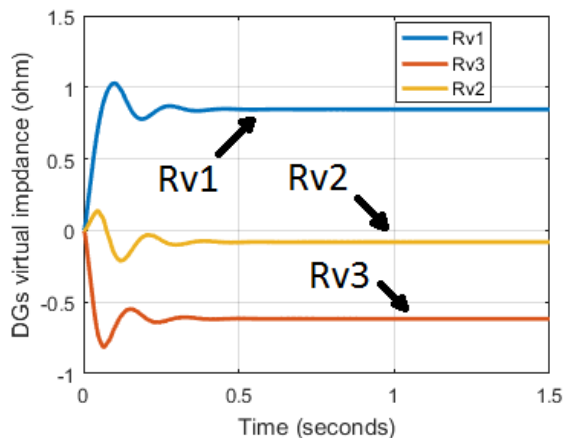
همان طور که بیان گردید، برای پیاده‌سازی امپدانس مجازی در مرحله



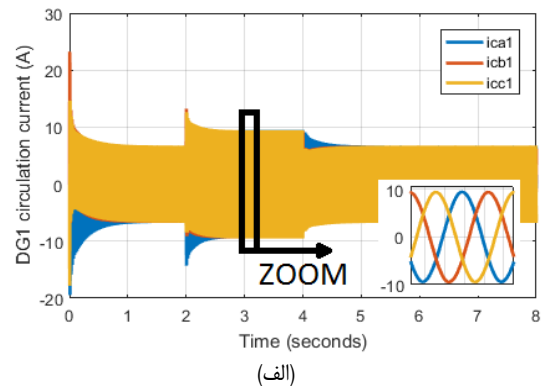
شکل ۲۶: توان راکتیو خروجی بدون حلقه امپدانس مجازی تحت شرایط نسبت بین امپدانس‌های خطوط تغذیه نابرابر با نسبت عکس توان‌های نامی اینورترها.



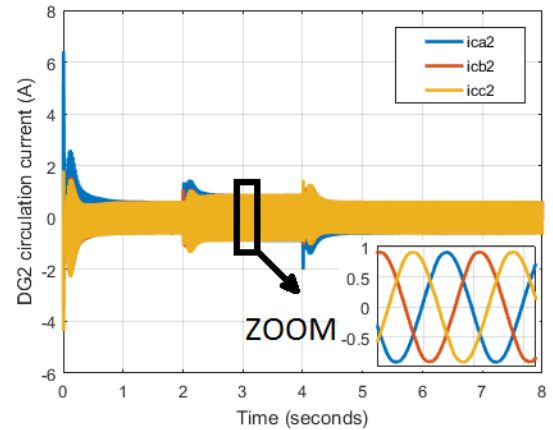
شکل ۲۷: مرحله اول پیاده‌سازی حلقه‌های امپدانس مجازی.



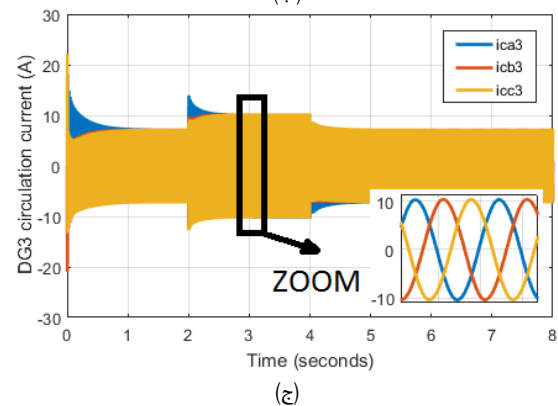
شکل ۲۸: مقاومت‌های مجازی در مرحله اول افزودن حلقه امپدانس مجازی.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۲۵: جریان گردشی در واحدهای تولید پراکنده بدون حلقه امپدانس مجازی تحت شرایط نسبت بین امپدانس‌های خطوط تغذیه نابرابر با نسبت عکس توان‌های نامی اینورترها، (الف)  $DG_1$ ، (ب)  $DG_2$ ، و (ج)  $DG_3$ .

جدول ۴: مقادیر مقاومت‌های مجازی به ازای تغییرات بارهای پس‌فاز تا حداکثر ظرفیت ریز شبکه.

$\cos \varphi = 0.98$	$S_{load}$ (kVA)						
	۵ kVA	۱۰ kVA	۲۰ kVA	۳۰ kVA	۴۰ kVA	۵۰ kVA	۶۰ kVA
$R_{v1}(\Omega)$	۰.۸۲ $\Omega$	۰.۸۱ $\Omega$	۰.۸ $\Omega$	۰.۷۸ $\Omega$	۰.۷۸ $\Omega$	۰.۷۷ $\Omega$	۰.۷۲ $\Omega$
$R_{v2}(\Omega)$	-۰.۰۸ $\Omega$	-۰.۰۷۸ $\Omega$	-۰.۰۷۶ $\Omega$	-۰.۰۷۵ $\Omega$	-۰.۰۷۳ $\Omega$	-۰.۰۷ $\Omega$	-۰.۰۷ $\Omega$
$R_{v3}(\Omega)$	-۰.۰۶ $\Omega$	-۰.۵۹ $\Omega$	-۰.۵۸ $\Omega$	-۰.۵۷ $\Omega$	-۰.۵۷ $\Omega$	-۰.۵۶ $\Omega$	-۰.۵۵ $\Omega$

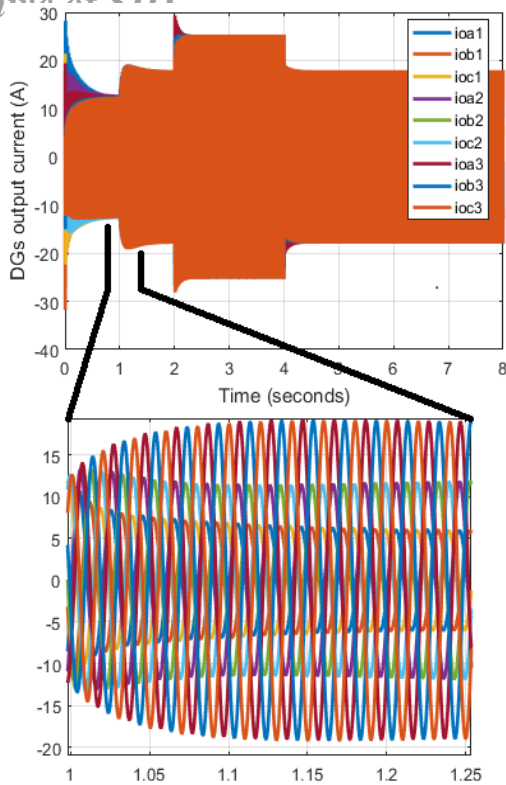
را نشان می‌دهد که به ازای هر گونه تغییر در بار دارای مقادیر مثبتی خواهند بود. در شکل ۳۲ توزیع توان‌های اکتیو بین  $DG$  ها نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که با افزودن حلقه امپدانس مجازی مقاومتی در زمان  $t = 1s$  تقسیم صحیح توان اکتیو بین منابع تولید پراکنده انجام شده و توان اکتیو خروجی در  $DG_1$  دو برابر  $DG_2$  و همچنین توان اکتیو خروجی  $DG_1$ ، ۳ برابر  $DG_2$  است. در شکل ۳۳ در زمان  $t = 1s$  دیده می‌شود که با افزودن حلقه امپدانس مجازی، جریان خروجی  $DG_1$  و  $DG_2$  متناسب با توان، به ترتیب دو و سه برابر جریان

واحدهای تولید پراکنده برای پیاده‌سازی مجدد امپدانس مجازی در نظر گرفته شده است.

### ۳-۴ نتایج شبیه‌سازی مرحله دوم افزودن حلقه امپدانس مجازی

برای ریز شبکه مورد مطالعه با پیاده‌سازی امپدانس مجازی در مرحله دوم، غالب بودن مقاومت بر راکتانس سلفی در خطوط تغذیه تضمین شده است. شکل ۳۱ مقاومت‌های مجازی پیاده‌سازی شده در  $DG_1$  و  $DG_2$

Architecture of SIM

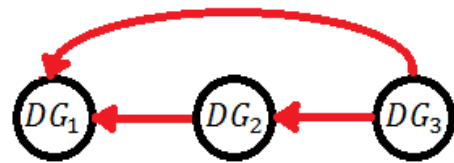


شکل ۳۳: جریان سه‌فاز خروجی از منابع تولید پراکنده با افزودن حلقه امپدانس مجازی در زمان  $t=1s$ ، تحت شرایط نسبت امپدانس‌های خطوط تغذیه نابرابر با نسبت عکس توان‌های نامی اینورترها.

انتگرال‌گیر در شکل ۱۰ برای روش [۲۰] با استفاده از روش تجربی مطروح در [۲۲] طوری انتخاب شود تا حالت‌های گذرای ناشی از فعال‌سازی کنترلر امپدانس مجازی در پروفیل مربوط به توان اکتیو از قبیل میزان بالازدگی و یا فروافتادگی و زمان‌های نشست تقریباً مشابه روش پیشنهادی باشد. در این راستا ضرایب  $K_1$  الی  $K_3$  به ترتیب برابر  $K_1 = -6.53 \times 10^{-3}$ ،  $K_2 = -3.265 \times 10^{-3}$  و  $K_3 = -2.1767 \times 10^{-3}$  انتخاب شدند. در این مطالعه بار شماره ۲ در زمان ۲ ثانیه و بار شماره ۳ با همان مشخصات بار شماره ۲ در جدول ۱ در زمان ۴ ثانیه به مدار اضافه شده و هر دو کنترلر مقاومت مجازی تطبیقی در زمان ۱ ثانیه فعال شدند. نتایج شبیه‌سازی در شکل‌های ۳۵ تا ۳۸ آورده شده است. با توجه به شکل ۳۸ واضح است که گذرای ناشی از این مرحله در قالب بالازدگی یا فروافتادگی‌های بزرگ توان راکتیو در روش [۲۰] به مراتب بیشتر از روش پیشنهادی است. بعد از فعال‌شدن کنترلرهای مقاومت مجازی در ثانیه اول، روش پیشنهادی از نظر دامنه نوسانات توان در حالت ماندگار و همچنین میرایی سریع نوسانات در گذرهای بعدی ناشی از تغییرات پله‌ای بار از عملکرد بهتری نسبت به روش [۲۰] برخوردار است. با توجه به شکل ۳۵، یک دلیل برای این امر منفی‌شدن یا کوچک‌تر بودن مقاومت مجازی در روش [۲۰] است که منجر به کاهش میرایی خط تغذیه و نوسانی‌تر شدن پاسخ‌ها شده است. این نتایج حاکی از عملکرد مطلوب کنترلر پیشنهادی بر مبنای بستر مخابراتی توزیع‌شده یک‌طرفه نسبت به روش مرسوم در [۲۰] بر مبنای بستر مخابراتی متمرکز دوطرفه می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

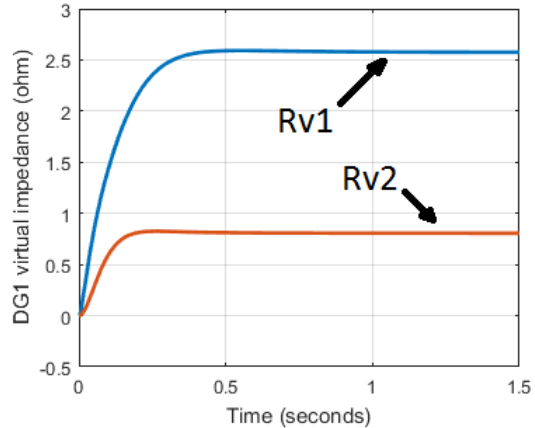
در این مقاله یک روش کنترل سلسله‌مراتبی مبتنی بر کنترل دروپ با به کارگیری حلقه امپدانس مجازی تطبیقی برای یک ریزشبه ولتاژ پایین جزیره‌ای با ظرفیت منابع متفاوت، ارائه شده است. ساختار شبکه مخابراتی



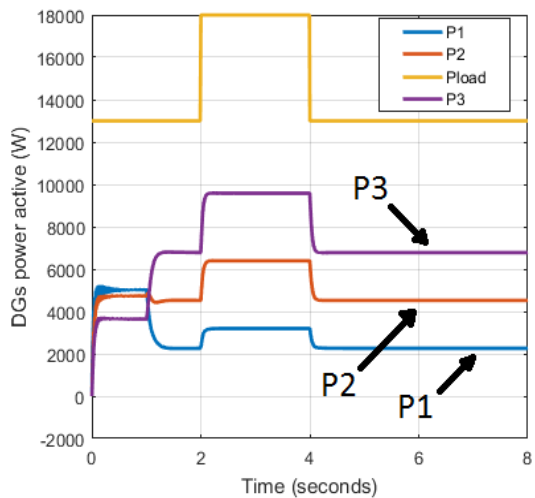
شکل ۳۹: سیگنال‌های مراجع مجاز برای انتخاب ساختار مخابراتی بین واحدهای تولید پراکنده.



شکل ۴۰: مرحله دوم پیاده‌سازی امپدانس مجازی و ساختار تضمینی برای مثبت‌بودن مقدار عددی مقاومت‌های مجازی.



شکل ۴۱: مقاومت‌های مجازی  $DG_1$  و  $DG_2$  در مرحله دوم پیاده‌سازی حلقه‌های امپدانس مجازی.



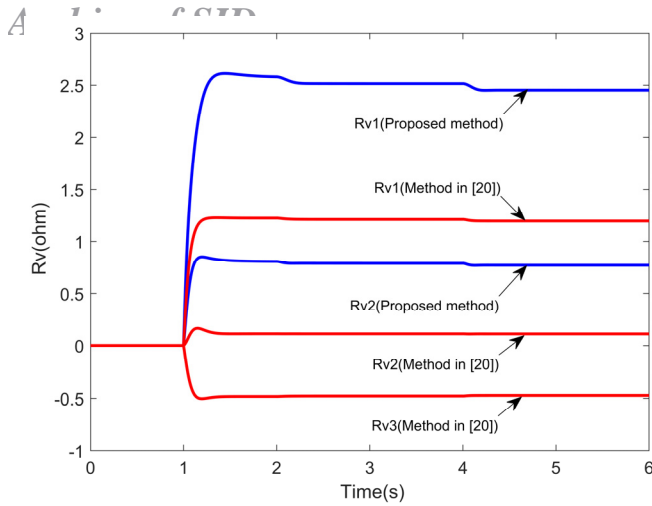
شکل ۴۲: توان اکتیو خروجی با افزودن حلقه امپدانس مجازی در زمان  $t=1s$ ، تحت شرایط نسبت بین امپدانس‌های خطوط تغذیه نابرابر با نسبت عکس توان‌های نامی اینورترها.

خروجی  $DG_1$  است. به دنبال تقسیم صحیح توان اکتیو و جریان خروجی متناسب با ظرفیت  $DG$  ها، در شکل ۳۴ نشان داده شده که جریان گردشی بین منابع تولید پراکنده با افزودن حلقه‌های امپدانس مجازی به صورت چشم‌گیری کاهش یافته است.

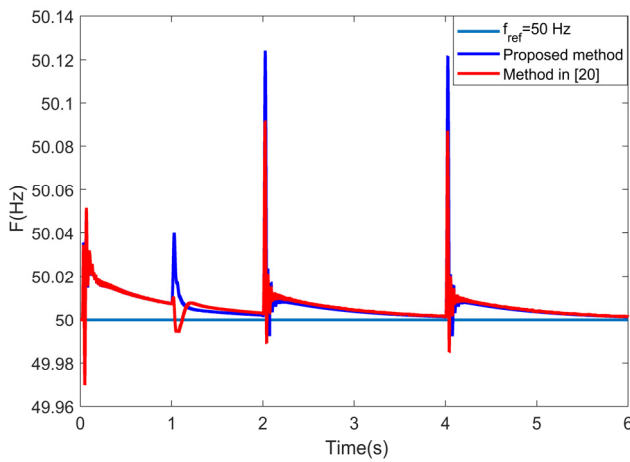
۳-۵ نتایج مقایسه روش پیشنهادی با روش [۲۰]

در ادامه به منظور ارزیابی عملکرد روش کنترلی پیشنهادی با استراتژی کنترل در [۲۰] با تعمیم از حالت سلفی به حالت مقاومتی غالب مورد مقایسه قرار می‌گیرد. به منظور انجام مقایسه منصفانه سعی شد تا ضریب

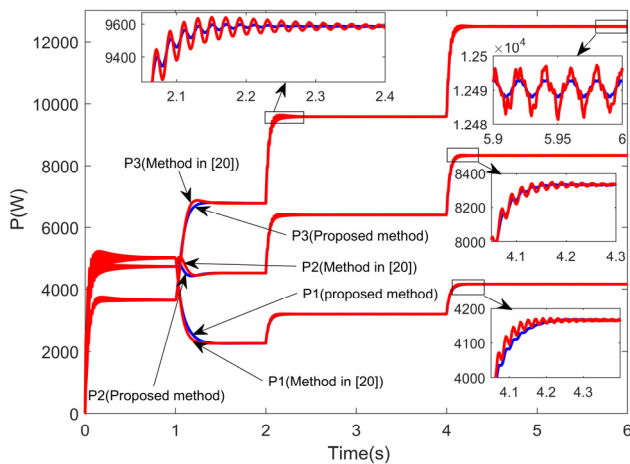




شکل ۳۵: مقاومتهای مجازی در روش پیشنهادی و روش [۲۰].



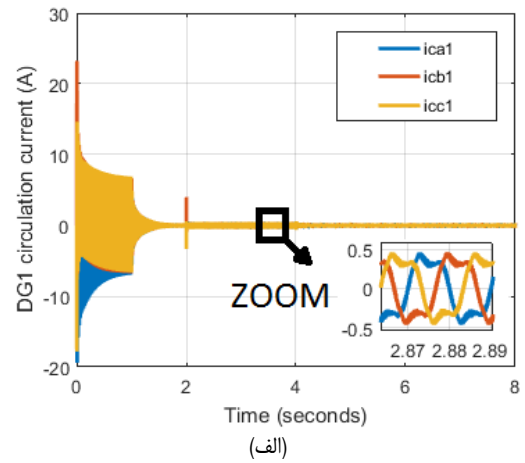
شکل ۳۶: بازگردانی فرکانس ریزشبه در روش پیشنهادی و روش [۲۰].



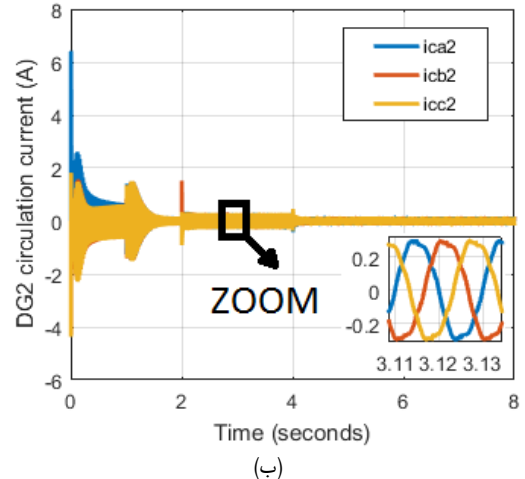
شکل ۳۷: توان اکتیو خروجی اینورترها در روش پیشنهادی و روش [۲۰].

## مراجع

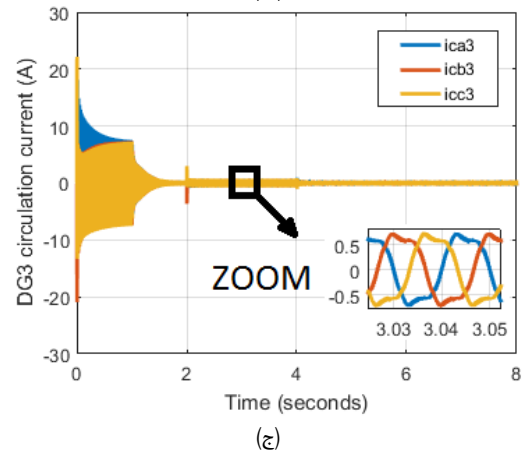
- [1] X. Huang, Z. Wang, and J. Jiang, "Control and load-dispatching strategies for a microgrid with a DC/AC inverter of fixed frequency," *International J. of Electrical Power and Energy System*, vol. 43, no. 1, pp. 1127-1136, Dec. 2012.
- [2] H. Han, X. Hou, J. Yang, J. Wu, M. Su, and J. M. Guerrero, "Review of power sharing control strategies for islanding operation of AC microgrids," *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 7, no. 1, pp. 200-215, Jun. 2015.



(الف)



(ب)

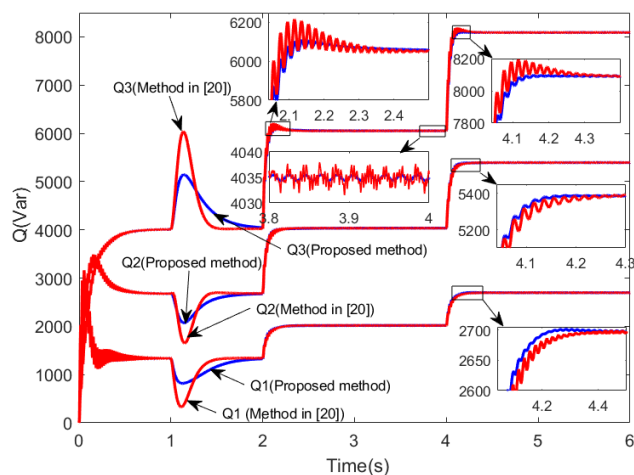


(ج)

شکل ۳۴: جریان گردشی واحدهای تولید پراکنده با افزودن حلقه امپدانس مجازی در زمان  $t=1s$ ، (الف)  $DG_1$ ، (ب)  $DG_2$  و (ج)  $DG_3$ .

بین اینورترها در روش پیشنهادی از نوع توزیع شده است که نسبت به ساختارهای متمرکز موجود دارای مزایای چندی از قبیل عدم نیاز به کنترلر مرکزی، سادگی اجراء، انعطاف پذیری بالا در قبال اضافه شدن واحدهای جدید به ریزشبه و تأخیر کمتر در نقل و انتقال اطلاعات است. همچنین یک راهکار عملی برای جلوگیری از منفی شدن امپدانس مجازی مقاومتی تطبیقی و در نتیجه حفظ ماهیت مقاومتی غالب خطوط تغذیه ارائه گردید. علاوه بر این، فرایند طراحی کلیه کنترل کننده های محلی در لایه های اول و دوم به طور گام به گام ارائه شد. روش پیشنهادی با رفع معایب سیستم کنترل دروپ و امپدانس مجازی تطبیقی مرسوم موفق به تسهیم صحیح توان بین واحدهای با ظرفیت های نامی نابرابر و همچنین کاهش قابل ملاحظه جریان گردشی بین واحدها شده است. نتایج شبیه سازی کارایی کنترل کننده طراحی شده را تأیید می کند.

- [18] M. Savaghebi, A. Jalilian, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero, "Secondary control for voltage quality enhancement in microgrids," *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 3, no. 4, pp. 1893-1902, Dec. 2012.
- [19] M. Zhang, Z. Du, X. Lin, and J. Chen, "Control strategy design and parameter selection for suppressing circulating current among SSTs in parallel," *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 6, no. 4, pp. 1602-1609, Jul. 2015.
- [20] H. Mahmood, D. Michaelson, and J. Jiang, "Accurate reactive power sharing in an islanded microgrid using adaptive virtual impedances," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 30, no. 3, pp. 1605-1617, Mar. 2015.
- [21] M. Pham and H. Lee, "Effective coordinated virtual impedance control for accurate power sharing in islanded microgrid," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 20, no. 14, pp. 125-135, Jul. 2020.
- [22] B. Wei, A. Marzabal, R. Ruiz, J. M. Guerrero, and J. C. Vasquez, "DAVIC: a new distributed adaptive virtual impedance control for parallel-connected voltage source inverters in modular UPS system," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 34, no. 6, pp. 5953-5968, Jun. 2019.
- [23] X. Liang, C. Andalib-Bin-Karim, W. Li, M. Mitolo, and M. N. S. K. Shabbir, "Adaptive virtual impedance-based reactive power sharing in virtual synchronous generator controlled microgrids," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 57, no. 1, pp. 46-60, Jan./Feb. 2021.
- [24] A. S. Vijay, N. Parth, S. Doolla, and M. C. Chandorkar, "An adaptive virtual impedance control for improving power sharing among inverters in islanded AC microgrids," *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 12, no. 4, pp. 2991-3003, Jul. 2021.
- [25] B. Liu, Z. Liu, J. Liu, R. An, H. Zheng, and Y. Shi, "An adaptive virtual impedance control scheme based on Small-AC-Signal injection for unbalanced and harmonic power sharing in islanded microgrids," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 34, no. 12, pp. 12333-12355, Dec. 2019.
- [26] Z. Chen, X. Pei, M. Yang, and L. Peng, "An adaptive virtual resistor (AVR) control strategy for low-voltage parallel inverters," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 34, no. 1, pp. 863-867, Jan. 2019.
- [27] Y. X. Zhu, F. Zhuo, F. Wang, B. Q. Liu, and Y. J. Zhao, "A wireless load sharing strategy for islanded microgrid based on feeder current sensing," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 12, pp. 6706-6719, Dec. 2015.
- [28] M. Eskandari and L. Li, "Microgrid operation improvement by adaptive virtual impedance," *IET Renewable Power Generation*, vol. 13, no. 2, pp. 296-307, Feb. 2019.
- [29] X. Chen, C. Zhang, Q. Huang, and M. Ofori-Oduro, "Small-signal modeling and analysis of grid-connected inverter with power differential droop control," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2016, Article ID: 3965945, Jun. 2016.
- [30] Y. Chen, J. M. Guerrero, Z. Shuai, Z. Chen, L. Zhou, and A. Luo, "Fast reactive power sharing, circulating current and resonance suppression for parallel inverters using resistive-capacitive output impedance," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 31, no. 8, pp. 5524-5537, Aug. 2016.
- [31] J. M. Guerrero, *et al.*, "Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids-a general approach toward standardization," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 2, pp. 158-172, Jan. 2011.
- [32] M. Zhang, B. Song, and J. Wang, "Circulating current control strategy based on equivalent feeder for parallel inverters in islanded microgrid," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 34, no. 1, pp. 595-605, Jan. 2019.
- [33] Q. Shafiee, J. M. Guerrero, and J. C. Vasquez, "Distributed secondary control for islanded microgrids-a novel approach," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 29, no. 2, pp. 1018-1031, Feb. 2014.
- [34] M. B. Delghavi, *Advanced Islanded-Mode Control of Microgrids*, the University of Western Ontario, Oct. 2011.
- [35] J. C. Vasquez, J. M. Guerrero, M. Savaghebi, J. E. Garcia, and R. Teodorescu, "Modeling, analysis, and design of stationary-reference-frame droop-controlled parallel three-phase voltage source inverters," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 4, pp. 1271-1280, Apr. 2013.



شکل ۳۸: توان راکتیو خروجی اینورترها در روش پیشنهادی و روش [۲۰].

- [3] A. Mohd, E. Ortjohann, D. Morton, and O. Omari, "Review of control techniques for inverters parallel operation," *Electric Power Systems Research*, vol. 80, no. 12, pp. 1477-1487, Dec. 2010.
- [4] T. L. Vandom, J. D. M. De Koning, B. Meersman, J. M. Guerrero, and L. Vandeveld, "Automatic power-sharing modification of P/V droop controllers in low-voltage resistive microgrids," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 27, no. 4, pp. 2318-2325, Oct. 2012.
- [5] Y. Han, H. Li, P. Shen, E. A. A. Coelho, and J. M. Guerrero, "Review of active and reactive power sharing strategies in hierarchical controlled microgrids," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 32, no. 3, pp. 2427-2451, Mar. 2017.
- [6] J. M. Guerrero, L. G. De Vicuna, J. Matas, M. Castilla, and J. Miret, "Output impedance design of parallel-connected UPS inverters with wireless load-sharing control," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 52, no. 4, pp. 1126-1135, Aug. 2005.
- [7] J. M. Guerrero, J. Matas, L. G. de Vicuna, M. Castilla, and J. Miret, "Decentralized control for parallel operation of distributed generation inverters using resistive output impedance," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 54, no. 2, pp. 994-1004, Apr. 2007.
- [8] J. He, Y. W. Li, J. M. Guerrero, F. Blaabjerg, and J. C. Vasquez, "An islanding microgrid power sharing approach using enhanced virtual impedance control scheme," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 28, no. 11, pp. 5272-5282, Nov. 2013.
- [9] J. He, Y. W. Li, J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, and F. Blaabjerg, "An islanding microgrid reactive power sharing scheme enhanced by programmed virtual impedances," in *Proc. 3rd IEEE Int. Symp. on Power Electronics for Distributed Generation System*, pp. 229-235,alborg, Denmark, 25-28 Jun. 2012.
- [10] L. Asiminoaei, R. Teodorescu, F. Blaabjerg, and U. Borup, "A digital controlled PV-inverter with grid impedance estimation for ENS detection," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 20, no. 6, pp. 1480-1490, Nov. 2005.
- [11] S. Huang and J. Luo, "Accurate power sharing in proportion for parallel connected inverters by reconstructing inverter output impedance," *J. on Power Electronics*, vol. 18, no. 6, pp. 1751-1759, Nov. 2018.
- [12] Q. Guo, *et al.*, "Secondary voltage control for reactive power sharing in an islanded microgrid," *J. of Power Electronics, Korean Institute of Power Electronics*, vol. 16, no. 1, pp. 329-339, Jan. 2016.
- [13] M. Hamzeh, H. Karimi, H. Mokhtari, and M. Popov, "An accurate power sharing method for control of a multi-DG microgrid," in *Proc. Int. Conf. on Power Systems Transients*, 6, pp., Delft, The Netherlands, 14-17 Jun. 2011.
- [14] X. H. T. Pham and T. T. Le, "Control strategy for accurate reactive power sharing in islanded microgrids," *J. of Power Electronics*, vol. 19, no. 4, pp. 1020-1033, Jul. 2019.
- [15] Y. W. Li and C. N. Kao, "An accurate power control strategy for power-electronics-interfaced distributed generation units operating in a low-voltage multibus microgrid," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 24, no. 12, pp. 2977-2988, Dec. 2009.
- [16] H. Mahmood, D. Michaelson, and J. Jiang, "Reactive power sharing in islanded microgrids using adaptive voltage droop control," *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 6, no. 6, pp. 3052-3060, Nov. 2015.

[۱۷] ب. فانی، م. معظمی و ع. فرهودی، "کاهش هامونیک‌های ولتاژ با استفاده از کنترل‌کننده افتی در عملکرد موازی اینورترها،" *نشریه مهندسی برق و مهندسی*

*Archive of SID*

**محمد هجری مدارک** کارشناسی و کارشناسی ارشد خود را به ترتیب در سال‌های ۱۳۷۹ و ۱۳۸۱ در مهندسی برق، گرایش قدرت از دانشگاه‌های تبریز و صنعتی شریف دریافت نمود. وی موفق به اخذ مدرک دکتری خود در سال ۱۳۸۹ در مهندسی برق و در قالب برنامه همکاری مشترک بین دانشگاه صنعتی شریف و دانشگاه کالیاری ایتالیا گردید. نامبرده همکاری‌های متعددی با صنایع و مراکز تحقیقاتی مختلف من جمله شرکت ریخته‌گری تراکتورسازی ایران، شرکت فولاد خوزستان، شرکت برق منطقه‌ای آذربایجان، پالایشگاه تبریز و مرکز تحقیقات نیرو (متن) داشته است. همچنین وی در سال ۱۳۸۹ موفق به دریافت بورسیه دوره پسادکتری از دانشکده مهندسی برق دانشگاه KTH سوئد گردید. ایشان از سال ۱۳۹۱ تاکنون به عنوان عضو هیأت علمی دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی سهند تبریز مشغول به فعالیت می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه وی مشتمل بر نظریه کنترل و کاربردهای آن در الکترونیک قدرت، انرژی‌های نو و سیستم‌های قدرت می‌باشد.

**مسعود اسماعیلی** تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق - قدرت در سال ۱۳۹۶ از دانشگاه ایلام و در مقطع کارشناسی ارشد مهندسی برق - الکترونیک قدرت و ماشین‌های الکتریکی در سال ۱۳۹۹ از دانشگاه صنعتی سهند تبریز به پایان رسانده است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان مبدل‌های الکترونیک قدرت، کنترل ریزشکبه و سیستم‌های قدرت می‌باشد.