

Improved Reactive Power Sharing in Islanded Micro Grids using Adaptive Virtual Impedance

Ardavan Orakzadeh^{1,2}, Bahador Fani^{1,2}, Farshad Zandi^{1,2}, Majid Moazzami^{1,2}

¹ Smart Microgrid Research Center, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.

² Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

Abstract:

Nowadays distributed generation has been given considerable attention due to the increase in energy consumption and the need for using renewable energies. So, the concept of the micro grids for connecting and coordinating different distributed resources via the local power control systems has been introduced. A micro grid connects to the network at normal condition of the operation but in order to increase the system reliability and to promote the generated power quality to feed the sensitive loads, they can operate in the islanding mode too. In the islanding mode of operation in order to supply the whole load and to maintain the balance between the supply and demand, these resources use the conventional droop methods. Generally, using the conventional voltage droop control due to the difference in the impedance of the feeder connect to the resources and also the asymmetrical nature of the network, dose not lead to an appropriate reactive power sharing between the resources. In fact, using conventional droop control creates an intrinsic compromise between the accuracy of reactive power sharing and voltage regulation of micro grid buses. Therefore, in the proposed method of this paper, the coefficients of the voltage droops characteristics of the grid resources are determined by solving an optimization problem using the genetic algorithm (GA). Also in order to improve the reactive power sharing, a novel control strategy based on the adaptive virtual impedance is presented. In this method the ideal reactive power sharing is achieved by using the virtual impedance and compensating the voltage drop of the lines. The virtual impedance setting is done through the data of the voltage of PCC bus in microgrid and sending via a low bandwidth communicational link to the local controller of each resource. The proposed method is robust against the network structure changes, presence of local loads, and interruption in the communication link. Simulation results show the effectiveness of the proposed method.

Keywords: Virtual Impedance, Reactive Power Sharing Improvement, Islanded Micro Grid, Conventional Droop Characteristic.

بهبود تقسیم توان راکتیو در ریزشبهه‌های جزیره‌ای با استفاده از امپدانس

مجازی و فقی

اردوان اورکزاده^۱، بهادر فانی^۲، فرشاد زندی^۲، مجید معظمی^۲

۱- مرکز تحقیقات ریزشبهه‌های هوشمند، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

۲- دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

oardavan@gmail.com, bahador.fani@gmail.com, farshad_zandi@yahoo.com
m_moazzami@pel.iaun.ac.ir

چکیده: امروزه استفاده از منابع تولید پراکنده مورد توجه ویژه قرار گرفته و بدین منظور مفهوم ریزشبهه برای اتصال و هماهنگی منابع مختلف انرژی پراکنده از طریق سیستم‌های کنترل توان محلی، مطرح شده است. یک ریزشبهه در حالت عادی به شبکه قدرت متصل است اما در صورت نیاز می‌تواند بصورت جزیره‌ای نیز به فعالیت خود ادامه دهد. در حالت جزیره‌ای به منظور تأمین کل بار و حفظ تعادل بین تولید و مصرف به طور گسترده از روش‌های افتی معمول، استفاده شده است. استفاده از کنترل افتی معمول ولتاژ به دلیل اختلاف در امپدانس فیدر متصل به منابع و همچنین عدم تقارن شبکه معمولاً منجر به تسهیم متناسب توان راکتیو میان منابع نمی‌شود. در واقع استفاده از استراتژی افتی معمول سبب ایجاد یک مصالحه‌ی ذاتی میان دقت تقسیم توان راکتیو و تنظیم ولتاژ باس‌های ریزشبهه می‌گردد. از این رو در روش پیشنهادی در این مقاله ضرایب مشخصه‌های کنترل ولتاژ افتی منابع ریزشبهه با استفاده از حل یک مسئله بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک تعیین می‌شوند. همچنین به منظور بهبود تقسیم توان راکتیو، یک استراتژی کنترلی جدید بر مبنای امپدانس مجازی و فقی ارائه شده است. در این روش تقسیم ایده‌آل توان راکتیو با استفاده از امپدانس مجازی و از طریق جبران اختلاف افت ولتاژ روی خطوط حاصل می‌شود. تنظیم امپدانس مجازی پیشنهادی از طریق یک حلقه‌ی کنترلی و با بهره‌مندی از اطلاعات مربوط به ولتاژ باس مشترک ریزشبهه و ارسال آن از طریق یک لینک مخابراتی با پهنای باند کم، به کنترل‌کننده‌ی محلی هر منبع صورت می‌پذیرد. روش پیشنهادی در مقابل تغییرات ساختار شبکه، حضور یا عدم حضور بارهای محلی متصل به منابع و وقوع تأخیر در لینک مخابراتی مقاوم بوده و سبب تسهیم ایده‌آل توان راکتیو می‌شود. در نهایت برای بررسی عملکرد و صحت‌سنجی روش پیشنهادی از شبیه‌سازی این روش روی یک سیستم تست ۳ اینورتری استفاده شده است.

واژه‌های کلیدی: امپدانس مجازی، بهبود تقسیم توان راکتیو، ریزشبهه‌های جزیره‌ای، مشخصه‌های افتی معمول

۱- مقدمه

شده است. ویژگی اصلی ریزشبهه این است که در هنگام وقوع مشکل در سیستم قدرت به جای خارج شدن منابع پراکنده از سیستم، این منابع و قسمتی از بارهای نزدیکشان از شبکه اصلی جدا شده و به صورت جزیره‌ای به کار خود ادامه می‌دهند. در مد عملکرد جزیره‌ای کنترل‌کننده‌ی منابع موجود در ریزشبهه باید ولتاژ و فرکانس سیستم را کنترل کرده و مجموعه‌ی بارها را متناسب با ظرفیت منابع بین آنها تقسیم نماید. بدین منظور غالباً از روش‌های افتی معمول، یعنی روش افتی ω - P و E - Q استفاده شده است [۱، ۲]. روش‌های کنترلی افتی معمول بر اساس تئوری پخش توان

با نفوذ منابع تولید پراکنده به سیستم‌های توزیع، مفهوم ریزشبهه در حوزه‌ی سیستم‌های انرژی الکتریکی مطرح

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۰۷/۰۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۱۰/۲۲

نام نویسنده مسئول: مجید معظمی

نشانی نویسنده مسئول: ایران، اصفهان، نجف‌آباد، دانشگاه آزاد

اسلامی واحد نجف‌آباد، دانشکده برق

در یک سیستم AC بنا شده است. بر این اساس چنانچه امیدانس بین منابع غالباً سلفی و زوایای انتقال توان نیز به اندازه کافی کوچک باشند، توان حقیقی منابع عمدتاً توسط زاویه‌ی انتقال توان و توان راکتیو آنها توسط اندازه‌ی ولتاژ کنترل می‌گردد [۳]. بکارگیری کنترل افتی معمول ω -P منجر به تقسیم دقیق توان حقیقی بین منابع بر اساس ظرفیت اسمی آنها می‌گردد. اما به دلیل متفات بودن امیدانس خطوط متصل به هر منبع، ولتاژ باس متصل به منابع موجود در یک ریزشبه‌ها دارای مقادیر متفاوتی است. در نتیجه به علت محلی بودن پارامتر ولتاژ و همچنین ترویج بین توان‌های حقیقی و راکتیو، استفاده از کنترل افتی معمول $E-Q$ در تمام شرایط منجر به تقسیم توان راکتیو مطلوب بین منابع نمی‌گردد [۲]. خطای تقسیم توان راکتیو بین منابع باعث ایجاد مشکلاتی مانند انحراف ولتاژ و فرکانس از مقدار نامی، تضعیف پارامترهای مربوط به کیفیت توان و همچنین اختلال در عملکرد سیستم حفاظت منابع و به دنبال آن اثرات نامطلوب بر پایداری سیستم می‌گردد [۴].

روش‌های متعددی مبتنی بر امیدانس مجازی، برای بهبود تسهیم بار در ریزشبه‌ها معرفی شده‌اند. تمرکز این روش‌ها روی کاهش اختلاف امیدانس خروجی ریزمنابع است. روش امیدانس مجازی با اضافه کردن بخشی به کنترل‌کننده سبب می‌شود ولتاژ مرجع اینورتر، متناسب با جریان خروجی منبع کاهش یابد [۵]. عملکرد مطلوب این روش نیازمند اطلاعات لحظه‌ای از ریزشبه‌ها است تا کنترل‌کننده بتواند مقدار بهینه امیدانس مجازی مورد نیاز را با شرایط شبکه تنظیم کند.

در برخی مراجع مانند [۶] و [۷] از کنترل‌کننده‌ی مرکزی برای تنظیم امیدانس مجازی و بهبود تقسیم توان راکتیو در ریزشبه‌ها استفاده شده است. در [۶] تنظیم امیدانس مجازی برای جبران اختلاف افت ولتاژ بر روی فیدر منابع مختلف بوسیله‌ی لینک مخابراتی دو طرفه و یک واحد کنترل‌کننده‌ی مرکزی تحت عنوان EMS صورت می‌پذیرد. در این روش اطلاعات مربوط به توان راکتیو لحظه‌ای هر منبع از طریق لینک مخابراتی به واحد EMS ارسال می‌شود. EMS سهم توان راکتیو هر واحد را بر

اساس توان نامی آن منبع و بار موجود در ریزشبه‌ها محاسبه کرده و آن را بصورت یک سیگنال کنترلی به منبع ارسال می‌کند. به دنبال آن هر واحد از توان راکتیو دریافتی از EMS بعنوان مرجعی برای تولید امیدانس مجازی استفاده می‌کند. هنگامی که امیدانس مجازی به ازای مقدار مشخصی از بار راکتیو در شبکه تعیین شد، تسهیم ایده‌آل توان راکتیو تا زمانی که بار موجود در شبکه تغییر نکرده است، حتی در صورت بروز اختلال در لینک مخابراتی، بدرستی صورت می‌گیرد. هرچند برای پیاده‌سازی روش پیشنهادی در [۶] نیازی به اطلاع از امیدانس فیدرها نبوده و تقسیم توان راکتیو به نحو مطلوبی صورت می‌گیرد، طراحی کنترل‌کننده‌ی امیدانس مجازی برای ریزشبه‌هایی دارای مقیاس بزرگ، بسیار پیچیده است. همچنین در [۷] روشی مبتنی بر امیدانس مجازی به منظور بهبود تقسیم توان راکتیو و کاهش هارمونیک‌های ولتاژ باس مشترک، در ریزشبه‌های تک‌فاز ارایه شده است. در این روش همچنین از کنترل سطح دوم به منظور بازیابی ولتاژ و فرکانس سیستم استفاده می‌شود. بهبود تقسیم توان راکتیو از طریق کنترل‌کننده‌ی مرکزی (MGCC) صورت می‌پذیرد. مقادیر مربوط به توان راکتیو تولیدی منابع از طریق لینک مخابراتی به MGCC ارسال می‌شود. سپس MGCC با توجه به ظرفیت منابع سهم هر منبع در تولید توان راکتیو مورد نیاز سیستم را محاسبه کرده و به کنترل‌کننده‌ی محلی آن منبع ارسال می‌کند. بازیابی ولتاژ و فرکانس سیستم نیز از طریق MGCC انجام می‌شود. در این روش همچنین از یک حلقه امیدانس مجازی خازنی به منظور از بین بردن هارمونیک‌های ولتاژ (هارمونیک سوم تا نهم) در نقطه‌ی اتصال به باس مشترک استفاده شده است. در این مقاله اثر امیدانس فیدر در نظر گرفته نشده و دقت تقسیم توان راکتیو در این روش در برابر بروز تأخیر در لینک مخابراتی مقاوم نیست. همچنین وجود کنترل‌کننده‌ی مرکزی و لینک مخابراتی دوطرفه نیاز به سیستم مخابراتی پیچیده در سیستم داشته و اختلال در لینک مخابراتی منجر به ناپایداری کل ریزشبه‌ها می‌گردد. این روش برای پیاده‌سازی در ریزشبه‌هایی با مقیاس بزرگ مناسب نبوده و قابلیت بسط‌پذیری و گسترش برای ریزشبه‌ها را فراهم نمی‌کند.

وابستگی به تغییرات نقطه‌ی کار و حساسیت کنترل‌کننده به وقوع تأخیر در لینک مخابراتی از جمله مشکلاتی است که به دنبال استفاده از روش‌های متداول مبتنی بر امیدانس مجازی بوجود می‌آید. لذا در این مقاله، یک روش کنترلی مبتنی بر امیدانس مجازی و فقی پیشنهاد شده است به گونه‌ای که کلیه‌ی محدودیت‌ها و معایب ذکر شده را بطور همزمان مرتفع سازد.

در روش پیشنهادی با استفاده از توان اکتیو هر منبع و اطلاعات یک باس مرجع، امیدانس مجازی پیشنهادی تعیین شده و از طریق تعدیل افت ولتاژ روی امیدانس فیدرها تسهیم ایده‌آل توان راکتیو صورت می‌پذیرد. به منظور اینکه کنترل‌کننده بتواند مقدار بهینه امیدانس مجازی مورد نیاز را با شرایط لحظه‌ای شبکه تطبیق دهد، از اطلاعات یک باس مرجع برای تنظیم امیدانس مجازی استفاده می‌شود. این اطلاعات از طریق یک لینک مخابراتی یک طرفه با پهنای باند کم به کنترل‌کننده‌ی محلی هر منبع ارسال می‌شود. روش پیشنهادی ارائه شده بر مبنای امیدانس مجازی، نسبت به وقوع تأخیر در لینک مخابراتی مقاوم بوده و برای تمامی محدوده‌ی X/R شبکه، با استفاده از مشخصه‌های افقی معمول سبب تقسیم ایده‌آل توان راکتیو می‌شود.

در بخش دوم این مقاله عملکرد ریزش‌بکه با استفاده از مشخصه‌های افقی معمول و دلایل ایجاد خطای تقسیم توان راکتیو در صورت استفاده از این روش‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بخش سوم اصول عملکرد امیدانس مجازی در بهبود تقسیم توان راکتیو مورد بررسی قرار است. در بخش چهارم نحوه‌ی عملکرد روش پیشنهادی و تنظیم امیدانس مجازی و فقی شرح داده شده است. در بخش پنجم به منظور بررسی عملکرد استراتژی پیشنهادی یک ریزش‌بکه شامل سه منبع تولید پراکنده دو بار مشترک و سه بار محلی در محیط نرم‌افزار MATLAB شبیه‌سازی شده است و در نهایت در بخش ششم نتیجه‌ی حاصل از این مطالعه بیان می‌شود.

۲- بررسی عملکرد ریزش‌بکه

شکل (۱) یک ریزش‌بکه‌ی ساده شامل دو منبع اینورتری را نشان می‌دهد که بصورت موازی یک بار

گروهی از روش‌های مبتنی بر امیدانس مجازی، بر پایه‌ی تخمین امیدانس فیدر بنا نهاده شده‌اند [۸-۱۳]. در [۸] به منظور بهبود پایداری، ترکیب روش امیدانس مجازی همزمان با تنظیم شیب مشخصه‌ی افقی، سبب کاهش خطای تقسیم توان راکتیو در شرایط ماندگار می‌شود. در این روش به منظور جبران افت ولتاژ متفاوت در امیدانس خطوط، شیب مشخصه‌ی افقی $Q-V$ از طریق یک سلف مجازی از پیش تعیین شده و تخمین امیدانس خط، اصلاح می‌گردد. فرآیند تخمین امیدانس نیازمند این است که سیستم قبل از حالت عملکرد جزیره‌ای، در حالت متصل به شبکه قرار داشته باشد.

در [۱۲] با در نظر گرفتن مدل سیگنال کوچک ریزش‌بکه محدوده‌ی مجاز امیدانس مجازی بر اساس بهبود شاخص‌های پایداری، پاسخ گذرا و همچنین تقسیم بار میان منابع تعیین می‌گردد. همچنین اثر اعوجاج شکل موج ولتاژ ناشی از بارهای هارمونیک و کنترل توان تولیدی منابع هنگام وقوع خطا، در طراحی امیدانس مجازی در نظر گرفته شده است.

در [۱۴] یک استراتژی کنترلی بر اساس مقاومت مجازی به منظور بهبود تقسیم توان راکتیو در حضور بارهای غیرخطی و نامتقارن ارائه شده است. در این روش با استفاده از اندازه‌گیری توان بار محلی، کنترل‌کننده‌ی امیدانس مجازی طراحی و پیاده‌سازی می‌گردد. سپس کلیه‌ی پارامترهای مربوط به این کنترل‌کننده با استفاده از الگوریتم ژنتیک و با هدف حداقل کردن خطای موجود در تقسیم توان راکتیو در ریزش‌بکه بصورت آفلاین بهینه‌سازی می‌شوند. استفاده از روش پیشنهادی [۱۴] در صورت قطعی بار و یا فیدر سبب ناپایداری شبکه می‌گردد. این مسأله باعث ایجاد محدودیت‌های عملی در استفاده از این روش می‌شود.

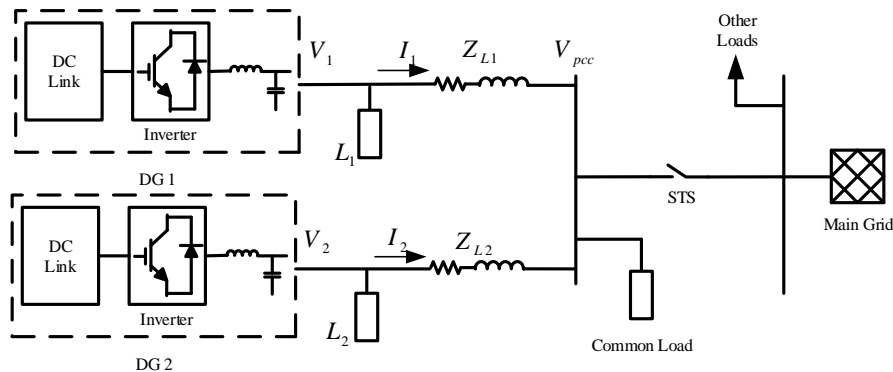
هرچند استفاده از روش‌های مبتنی بر امیدانس مجازی برای بهبود تقسیم توان کارآمد بوده و سبب تقسیم توان راکتیو بصورت ایده‌آل میان منابع می‌گردد اما استفاده از این روش مشکلاتی را نیز به دنبال دارد. وابستگی کنترل‌کننده به پارامترهای شبکه، نیاز به تخمین امیدانس خط و سایر پارامترها و بدنال آن پیچیدگی در طراحی محاسبات،

$$E_i = E_0 - D_{Q_i} Q_i \quad (2)$$

که در آنها ω_0 و E_0 به ترتیب مقادیر نامی فرکانس و دامنه‌ی ولتاژ منابع بوده و P_i و Q_i مقادیر توان اکتیو و راکتیو اندازه‌گیری شده‌ی هر منبع می‌باشند که برای محاسبه‌ی مقدار متوسط از یک فیلتر پایین‌گذر عبور داده شده‌اند. D_{P_i} و D_{Q_i} به ترتیب شیب مشخصه‌های افتی فرکانس و ولتاژ می‌باشند. استفاده از کنترل افتی معمول فرکانس، منجر به تسهیم دقیق توان حقیقی بین منابع (بر اساس ظرفیت اسمی آنها) می‌گردد، در حالیکه استفاده از کنترل افتی معمول ولتاژ منجر به تسهیم متناسب توان راکتیو میان منابع نمی‌شود. علت این امر تفاوت امیدانس تونن ریزشبه‌ها از دید پایانه‌ی خروجی هر ریزمنبع است. این تفاوت ممکن است به دلیل تفاوت در امیدانس فیدر خروجی هر ریزمنبع تا باس مشترک، عدم تقارن شبکه و یا وجود بارهای محلی متفاوت در خروجی هر ریزمنبع بوجود آید. اختلاف امیدانس تونن

مشترک را تغذیه می‌کنند. مطابق شکل (۱) ریزشبه‌ها می‌تواند از طریق کنترل کلید استاتیک متصل به باس مشترک، هم در حالت جزیره‌ای و هم بصورت متصل به شبکه به فعالیت خود ادامه دهد. در حالت جزیره‌ای تأمین ولتاژ و فرکانس مناسب در سراسر ریزشبه‌ها، وظیفه‌ی منابع موجود در ریزشبه‌ها است. علاوه بر این به دلیل عدم ارتباط ریزشبه‌ها با شبکه قدرت، تأمین کل بار و حفظ تعادل بین تولید و مصرف، وظیفه‌ی منابع موجود بوده و این منابع بایستی متناسب با کم و زیاد شدن بار، تولید خود را کنترل کنند. به طور گسترده برای عملکرد ریزشبه‌ها در حالت جزیره‌ای از روش‌های افتی معمول، یعنی روش افتی معمول "فرکانس - توان اکتیو" برای تقسیم توان اکتیو و روش افتی معمول "ولتاژ - توان راکتیو" برای تقسیم توان راکتیو استفاده می‌شود. کنترل افتی ولتاژ و فرکانس معمول بصورت روابط (۱) و (۲) است [۳]:

$$\omega_i = \omega_0 - D_{P_i} P_i \quad (1)$$



شکل (۱): ریزشبه‌ی نمونه شامل دو منبع مشابه مبتنی بر اینورتر

۲- طبق رابطه‌ی (۳) دو راه اساسی برای بهبود دقت تقسیم توان راکتیو وجود دارد: ۱- کم کردن اختلاف امیدانس خطوط واحدها ۲- افزایش شیب منحنی افتی D_{Q_i} در یک شبکه با شرایط و بارهای مشخص، هرچه شیب مشخصه افتی یعنی D_{Q_i} بزرگتر باشد، اختلاف توان تولیدی ریزمنابع کمتر می‌گردد که این به معنای تسهیم مناسب‌تر توان راکتیو بین ریزمنابع موجود در ریزشبه‌ها است. با این حال افزایش شیب مشخصه، بر تنظیم ولتاژ

در خروجی هر ریزمنبع مانع از همگرایی نقاط کار و تقسیم توان راکتیو ایده‌آل میان منابع می‌شود. مطابق شکل (۱) در صورتیکه از مقاومت خطوط در برابر راکتانس صرف‌نظر شود، خطای تقسیم توان راکتیو بصورت رابطه‌ی (۳) محاسبه می‌شود [۱۵]:

$$\Delta Q_{err} = \frac{X_1 - X_2}{X_2 + V_{pcc} D_{Q_i}} \quad (3)$$

شینه‌ای که ریزمنبع به آن متصل است اثر نامطلوبی دارد که ممکن است توسط بار قابل تحمل نباشد. از طرفی با تنظیم عرض از مبدأ منحنی افتی (E_0) می‌توان اثر تضعیف تنظیم ولتاژ را تعدیل نمود. لذا یک مصالحه‌ی ذاتی میان دقت تقسیم توان راکتیو و بهبود تنظیم ولتاژ وجود دارد. بمنظور دستیابی همزمان به حداکثر دقت تقسیم توان در محدوده‌ی ولتاژ مجاز ریزشبه‌ی می‌توان دو پارامتر D_{Qi} و E_0 را از طریق حل یک مسئله‌ی بهینه‌سازی تنظیم نمود. در ادامه این بخش انتخاب ضرایب طرح ولتاژ افتی معمول به روش بهینه‌اراییه می‌شود. ضرایب مشخصه‌های کنترل ولتاژ منابع بر اساس یک مسئله بهینه‌سازی تعیین می‌شوند که در آن جریان گردشی بین منابع و اختلاف اندازه ولتاژ باس مشترک ریزشبه‌ی نسبت به مقدار مطلوب آن به عنوان معیارهای بهینه‌سازی مطابق با روابط (۴) و (۵) در نظر گرفته شده‌اند.

منابع بین آنها تقسیم می‌گردد. شیب مشخصه‌های افتی ω - P منابع براساس حداکثر افت فرکانس قابل قبول در ریزشبه‌ی و ظرفیت اسمی منابع تعیین می‌گردد. بنابراین ضریب D_{pi} در فرآیند بهینه‌سازی معلوم فرض می‌شود. برای حل مسئله بهینه‌سازی از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. در این الگوریتم ضرایب مشخصه‌های کنترل ولتاژ منابع، بعنوان یک کروموزوم یا کاندید جواب مسئله بهینه‌سازی در نظر گرفته می‌شوند. هر کروموزوم در بردارنده‌ی کدهای دودویی مربوط به ضرایب مشخصه‌های کنترل ولتاژ منابع است. با استفاده از فاکتورهای مقیاس مناسب، تغییرات این ضرایب در محدوده مشخص باقی می‌ماند. اندازه ولتاژ باسهای ریزشبه‌ی و توان راکتیو تولیدی منابع به ازای هر یک از کروموزوم‌ها (کاندیدهای جواب) تعیین می‌گردد. کاندیدهای جواب مسئله توسط تابع هدف ریزشبه‌ی ارزیابی شده و کروموزوم‌های بهتر مشخص می‌گردند. در الگوریتم ژنتیک موردنظر، برای کنار گذاشتن کاندیدهای جوابی که به ازای آنها توان‌های تولیدی منابع از محدوده مجاز خارج می‌شوند یا قیود مربوط به محدوده ولتاژ مجاز باس‌های سیستم نقض می‌شود، یک عدد مثبت بزرگ به مقدار تابع هدف نظیر آن کروموزوم اضافه می‌گردد تا این کروموزوم شانس کمتری برای انتخاب شدن در نسل بعدی الگوریتم داشته باشد. محدوده‌ی مجاز تغییرات ولتاژ از 0.95 تا 1.05 ولتاژ نامی در نظر گرفته شده است. با استفاده از یک مکانیزم انتخاب که در آن کاندیدهای جواب با مقدار تابع هدف کوچکتر از شانس بیشتری برای انتخاب شدن برخوردارند و اعمال عملگرهای ژنتیکی جابجایی و جهش بر روی کروموزوم‌های انتخاب شده، نسل بعدی الگوریتم تشکیل می‌گردد. همچنین برای آنکه مقدار بهینه تابع هدف در هر نسل روند غیر - افزایشی داشته باشد، بهترین کروموزوم بدست آمده در هر نسل بدون تغییر به نسل بعدی منتقل می‌شود. الگوریتم ژنتیک به تعداد کافی تکرار و پس از پایان مراحل آن، ضرایب مشخصه‌های کنترل ولتاژ منابع ریزشبه‌ی تعیین می‌گردند. مقادیر بهینه‌ی ضرایب مشخصه‌ی افتی ولتاژ در جدول (۱) قابل مشاهده است.

$$\alpha = \frac{1}{N_{LB}} \sum_{i=1}^{N_{LB}} |V_i - V_{des}| \quad (4)$$

$$\beta = \frac{2}{N_s (N_s - 1)} \sum_{x=1}^{N_s} \sum_{i=x+1}^{N_s} \left| \frac{i_x}{i_{xn}} - \frac{i_i}{i_{in}} \right| \quad (5)$$

α و β به ترتیب شاخص‌های ولتاژ بار و جریان گردشی‌اند. نزدیکتر بودن مقادیر این شاخص‌ها به صفر نشان‌دهنده عملکرد مناسب‌تر طرح کنترل ولتاژ پیشنهادی است. در روابط فوق N_s و N_{LB} به ترتیب نشان‌دهنده تعداد منابع و تعداد باس‌های بار بوده و V_i اندازه ولتاژ در باس نام V_{des} مقدار مطلوب آن است. با ترکیب وزن‌دار شاخص‌های α و β یک شاخص چند منظوره برای ارزیابی عملکرد طرح کنترل ولتاژ پیشنهادی بدست می‌آید. شاخص چند منظوره، TFO بصورت زیر تعریف می‌شود.

$$TFO = \omega_1 \alpha + \omega_2 \beta \quad (6)$$

ضرایب وزنی اهمیت شاخص‌های α و β را در شاخص TFO مشخص می‌کنند. شاخص TFO به عنوان تابع هدف مسئله بهینه‌سازی استفاده می‌شود. در مشخصه‌های کنترلی بکار گرفته شده از روش افتی فرکانس معمول برای تقسیم توان حقیقی بین منابع استفاده شده است. در این روش توان حقیقی به نسبت ظرفیت اسمی

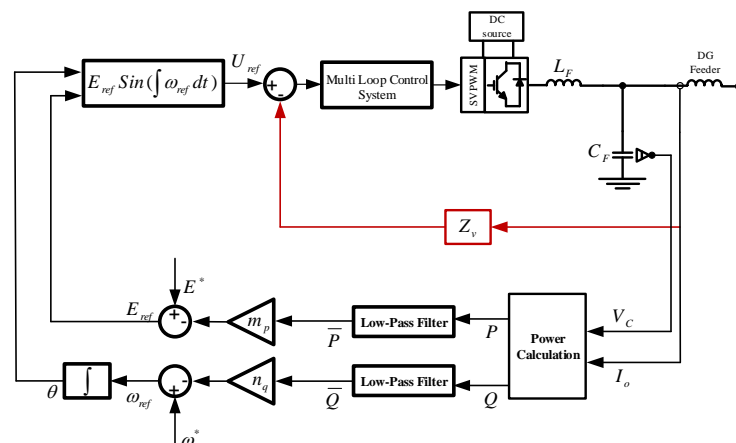
۳- امپدانس مجازی

از روش امپدانس مجازی برای بهبود تقسیم توان راکتیو، کاهش تزویج میان کنترل توان اکتیو و راکتیو و همچنین بهبود پایداری سیستم استفاده می‌شود. تمرکز این روش روی کاهش اختلاف امپدانس خروجی ریزمنابع است. امپدانس مجازی در واقع با اضافه کردن بخشی به کنترل‌کننده، باعث می‌شود افت ولتاژ مجازی در شبکه ایجاد شود که به صورت واقعی وجود ندارد. به منظور اینکه کنترل‌کننده مقدار بهینه امپدانس مجازی مورد نیاز را با شرایط لحظه‌ای شبکه تطبیق دهد، نیازمند اطلاعات لحظه‌ای از ریزشبه است. ساختار کنترلی به منظور پیاده‌سازی روش امپدانس مجازی متداول به صورت شکل (۲) است. همانگونه که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، از طریق ضرب جریان خروجی اندازه‌گیری شده‌ی ریزمنبع در مقدار محاسبه شده برای امپدانس مجازی، مقدار افت ولتاژ مجازی بدست می‌آید. اگر منابع موجود در ریزشبه در نقطه‌ی کار یکسان فعالیت کنند، تسهیم توان اکتیو و راکتیو بصورت ایده‌آل میان منابع حاصل می‌شود. با تنظیم مناسب امپدانس مجازی برای هر واحد می‌توان اختلاف امپدانس خروجی ریزمنابع را تعدیل نمود. لیکن بارهای مشترک و محلی و همچنین نسبت X/R شبکه ممکن است تغییر کند. بنابراین نیاز است مقدار طراحی شده برای امپدانس مجازی با تغییرات ایجاد شده در سیستم بروز شود.

۴- امپدانس مجازی و فقی پیشنهادی

۴-۱- تنظیم امپدانس خطوط

همانگونه که بحث شد اختلاف در امپدانس خطوط عامل بروز خطای تقسیم توان راکتیو میان منابع می‌گردد. شکل (۳) ساختار ریزشبه‌ی مورد مطالعه شامل سه واحد DG با ظرفیت یکسان را نشان می‌دهد که بارهای مشترک و محلی را تغذیه می‌کنند. مطابق این شکل Z_1 امپدانس معادل خروجی DG_1 است. این امپدانس برابر امپدانس معادل میان خروجی منبع و باس مشترک بوده و شامل امپدانس خط و بار محلی متصل به DG_1 است. برای بررسی اختلاف امپدانس معادل خروجی میان منابع، Z_1 بعنوان مرجع در نظر گرفته شده است. ΔZ_2 و ΔZ_3 به ترتیب اختلاف امپدانس معادل خروجی DG_2 و DG_3 نسبت به امپدانس معادل خروجی DG_1 هستند. δZ_{vi} پارامتر امپدانس مجازی بوده که برای هر منبع بصورت جداگانه و بوسیله‌ی کنترل‌کننده‌ی محلی آن منبع تعیین می‌گردد. امپدانس مجازی بهینه برای منابع به گونه‌ای تنظیم می‌گردد که از طریق تعدیل افت ولتاژ روی امپدانس خطوط متصل به منابع سبب برابر شدن امپدانس معادل خروجی واحدها و تسهیم ایده‌آل توان راکتیو در سیستم می‌گردد. پارامتر امپدانس مجازی با استفاده از یک مشخصه‌ی خطی با شیب منفی تعیین می‌گردد و همواره دارای مقداری منفی است. در این رابطه در بخش ۲-۴ توضیح داده خواهد شد. امپدانس مجازی برای هر واحد باید به گونه‌ای تنظیم گردد که پس از رسیدن به حالت دائمی رابطه‌ی (۷) برقرار گردد.



شکل (۲): ساختار کنترلی به منظور پیاده‌سازی روش امپدانس مجازی متداول

فرکانس کنترل گردد، تسهیم ایده‌آل برای آن کمیت حاصل می‌شود. بنابراین اگر توان راکتیو هر واحد بوسیله‌ی فرکانس کنترل شود، تسهیم ایده‌آل توان راکتیو برای تمامی منابع حاصل می‌شود. همانگونه که در بخش (۲) بررسی شد، مطابق رابطه‌ی (۱) توان اکتیو با فرکانس در یک مشخصه قرار گرفته و توسط فرکانس کنترل می‌شود. بنابراین در ریزشکته‌ی مورد مطالعه که ظرفیت نامی تمامی منابع یکسان است، در حالت دایمی سهم تمامی واحدها در تولید توان اکتیو برابر خواهد بود. برای کنترل توان راکتیو از طریق فرکانس، مشخصه‌ی $\delta Z_v - P$ مطابق رابطه‌ی (۱۰) پیشنهاد می‌شود:

$$\delta Z_{vi} = k_i P_i \quad (10)$$

که در این رابطه P_i توان اکتیو منبع نام، δZ_i امپدانس مجازی وقتی منبع نام و k_i شیب مشخصه‌ی $\delta Z_v - P$ است که برای هر منبع متناسب با امپدانس خط مربوط به آن تعیین می‌شود. شکل (۴) مشخصه‌ی $\delta Z_v - P$ را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌گردد مشخصه‌ی $\delta Z_v - P$ همواره دارای شیب منفی بوده و با توجه به مثبت بودن مقدار توان اکتیو، پارامتر امپدانس مجازی δZ_v همواره منفی است.

همانگونه که توضیح داده شد، اختلاف امپدانس معادل خروجی واحدها مانع از همگرایی نقاط کار و تقسیم توان راکتیو ایده‌آل میان منابع می‌شود. بدین معنا که مطابق رابطه‌ی (۹) با توجه به یکسان بودن منابع و اختلاف راکتانس فیدر هر منبع توان راکتیو منابع با هم برابر نخواهد بود. پس از تعیین δZ_v برای هر منبع به منظور جبران افت ولتاژ ناشی از امپدانس فیدر، با ضرب امپدانس مجازی بدست آمده در جریان خروجی منبع، ولتاژ مرجع جدید برای هر منبع مطابق رابطه‌ی (۱۱) محاسبه می‌شود:

$$E_i^* = E_i - \delta Z_{vi} I_{out} \quad (11)$$

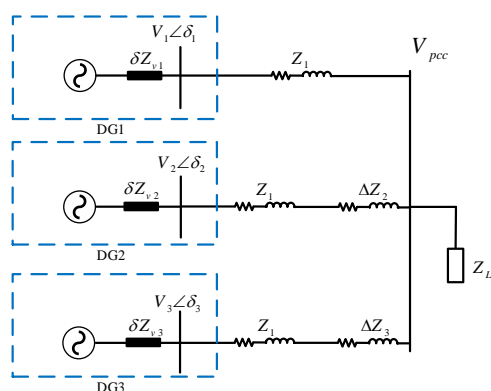
در این رابطه E_i ولتاژ خروجی مشخصه‌ی افقی هر منبع و E_i^* ولتاژ خروجی مشخصه‌ی افقی هر منبع پس از اعمال امپدانس مجازی است. بدلیل اینکه پارامتر δZ_{vi} همواره منفی است، لذا ترم $\delta Z_{vi} I_{out}$ همواره دارای مقداری مثبت است. در واقع با اضافه کردن ترم $\delta Z_{vi} I_{out}$ به ولتاژ

$$Z_1 - \delta Z_{v1} = Z_1 + \Delta Z_2 - \delta Z_{v2} = Z_1 + \Delta Z_3 - \delta Z_{v3} \quad (7)$$

مطابق رابطه‌ی (۷) امپدانس مجازی منبعی که دارای امپدانس معادل خروجی کمتری نسبت به سایر واحدها است باید از لحاظ اندازه کوچکتر از امپدانس مجازی تنظیم شده برای منابع دیگر باشد بگونه‌ای که اثر اختلاف امپدانس خطوط و بارهای محلی به نحو مطلوب جبران شده و تسهیم ایده‌آل توان راکتیو میان منابع صورت پذیرد.

۴-۲- تنظیم امپدانس مجازی وقتی

مطابق شکل (۳) توان اکتیو و راکتیو هر منبع با فرض کوچک بودن اختلاف زاویه‌ی ولتاژ منبع نام نسبت به ولتاژ بار به صورت زیر محاسبه می‌شود:



شکل (۳): سیستم مورد مطالعه

$$P_i = \frac{V_{pcc} V_i}{X_i} \delta_i \quad (8)$$

$$Q_i = \frac{V_{pcc} (V_i - V_{pcc})}{X_i} \quad (9)$$

که در روابط فوق P_i و Q_i توان اکتیو و راکتیو منبع نام، V_{pcc} ولتاژ باس مشترک، V_i ولتاژ خروجی منبع، X_i امپدانس راکتانس فیدر متصل به منبع و δ_i اختلاف زاویه‌ی ولتاژ منبع نام نسبت به ولتاژ بار است. همانگونه که از روابط (۸) و (۹) استنباط می‌شود توان اکتیو منابع توسط زاویه‌ی انتقال توان و توان راکتیو آنها توسط اندازه‌ی ولتاژ کنترل می‌گردد.

با توجه به اینکه فرکانس یک سیگنال سراسری در سیستم است، مقدار آن در پایانه خروجی تمام ریزمنابع در حالت دایمی یکسان است. لذا هر کمیتی که از طریق

بهبود تقسیم توان راکتیو در ریزشکته‌های جزیره‌ای با استفاده از امپدانس مجازی و فقی

فیدر که سیگنال ΔV نامیده شده است، مقایسه می‌شود. با اعمال این سیگنال اختلاف، به یک کنترل کننده PI پس از رسیدن به حالت دائمی، رابطه‌ی (۱۲) برقرار می‌گردد.

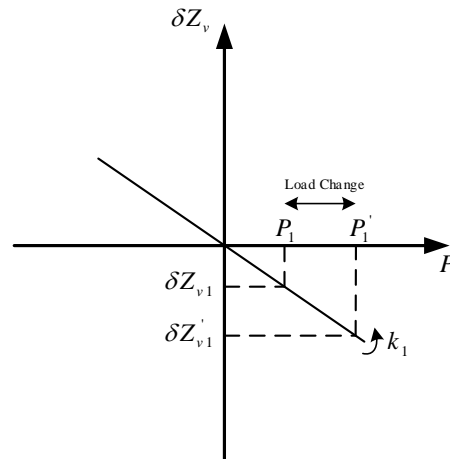
$$V_i - V_{pcc} = \delta Z_{vi} \times I_{out} \quad (12)$$

که در رابطه‌ی فوق V_i ولتاژ خروجی منبع، V_{pcc} ولتاژ باس مشترک، I_{out} جریان خروجی منبع و δZ_{vi} امپدانس مجازی و فقی تولید شده توسط مشخصه‌ی $\delta Z_v - P$ است. پارامتر δZ_{vi} به گونه‌ای تعیین می‌شود که افت ولتاژ هر منبع به نسبت اندازه‌ی امپدانس مربوط به فیدر آن جبران گردد. در واقع منبعی که دارای امپدانس معادل خروجی بزرگتری است، k_i بزرگتر و به دنبال آن δZ_{vi} بزرگتری تولید می‌کند. پس از تنظیم مناسب امپدانس مجازی، افت ولتاژ روی امپدانس فیدر منابع جبران شده و تسهیم ایده‌آل توان راکتیو میان واحدها حاصل می‌شود.

۵- نتایج شبیه‌سازی

به منظور صحت‌سنجی عملکرد روش پیشنهادی از یک سیستم تست مطابق ساختار نشان داده شده در شکل (۶) استفاده شده است. مطابق شکل (۶) این سیستم دارای ۳ منبع اینورتری دارای ظرفیت مشابه بوده که از طریق فیدرهایی با امپدانس متفاوت به باس مشترک متصل شده‌اند. همچنین این سیستم دارای ۵ بار خطی و ۲ کلید است. از آنجاییکه روش کنترلی پیشنهادی برای تنظیم امپدانس مجازی، بر مبنای ارسال ولتاژ باس مشترک به کنترل‌کننده‌ی محلی هر واحد و مقایسه‌ی آن با ولتاژ خروجی منبع طراحی شده است، لذا از لینک مخابراتی با پهنای باند کم برای انتقال اطلاعات

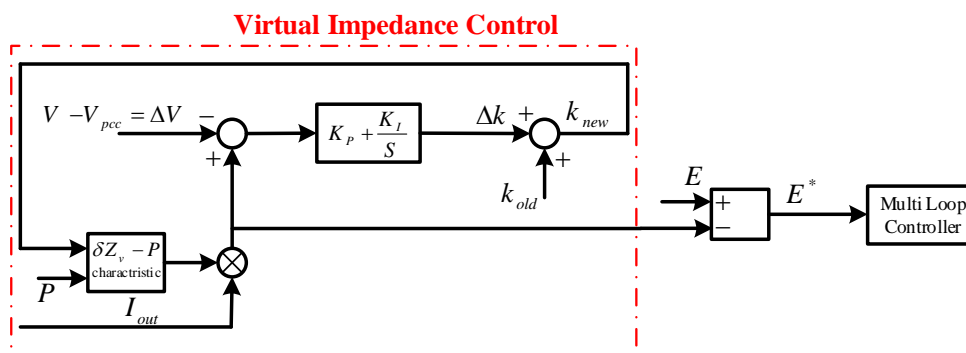
مرجع هر واحد، افت ولتاژ روی امپدانس فیدر منبع جبران می‌شود. هرچه میزان این افت ولتاژ بیشتر باشد، پارامتر امپدانس مجازی و فقی δZ_{vi} و به دنبال آن ترم $\delta Z_{vi} I_{out}$ افزایش می‌یابد.



شکل (۴): مشخصه‌ی $\delta Z_v - P$

با اعمال این روش ولتاژ مرجع هر منبع به تناسب افت ولتاژ روی امپدانس فیدر مربوط به آن افزایش یافته و تسهیم ایده‌آل توان راکتیو حاصل می‌شود.

همانگونه که در رابطه‌ی (۱۰) مشاهده می‌شود، تنظیم مقدار امپدانس مجازی وابسته به تعیین شیب مشخصه‌ی $\delta Z_v - P$ است. حلقه‌ی کنترلی به منظور تعیین پارامتر k_i در شکل (۵) نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، ابتدا ولتاژ خروجی هر منبع با یک ولتاژ مرجع مقایسه می‌شود. در این مقاله مقدار ولتاژ مرجع ولتاژ باس مشترک یا V_{pcc} در نظر گرفته شده است. در ابتدا با در نظر گرفتن یک شیب ابتدایی پارامتر δZ_{vi} و با استفاده از آن ترم $\delta Z_{vi} I_{out}$ محاسبه شده و با افت ولتاژ منبع ناشی از امپدانس

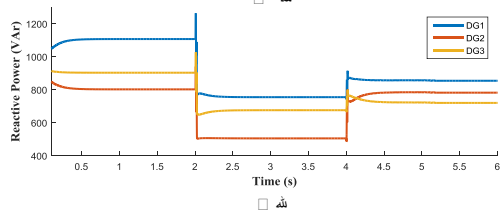
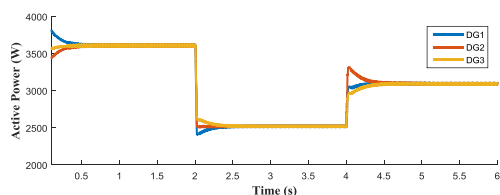


شکل (۵): استراتژی پیشنهادی به منظور تنظیم امپدانس مجازی و فقی

۵-۱- بررسی اثر تغییرات نقطه‌ی کار

برای بررسی کارآمدی روش پیشنهادی در نقاط کار مختلف، سناریوی شبیه‌سازی در این قسمت بصورت زیر تعریف شده است:

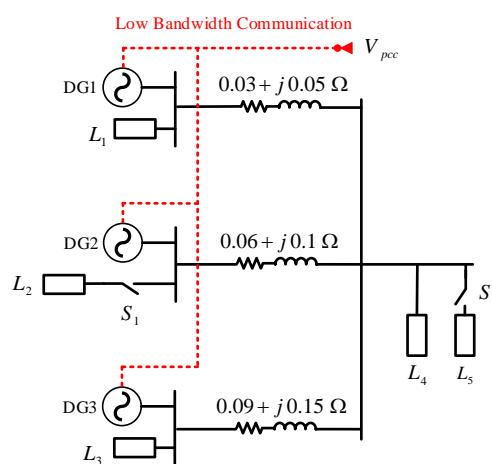
در ابتدا کلید S_1 باز بوده و کلید S_2 بسته است. پس از گذشت ۲ ثانیه از زمان شبیه‌سازی کلید S_2 باز شده و بار مشترک L_5 از مدار خارج می‌شود. سپس در ثانیه‌ی ۴ کلید S_1 بسته شده و بار محلی L_2 مربوط به منبع ۲ وارد مدار می‌شود. در شکل (۷) نتایج مربوط به شبیه‌سازی سناریوی فوق با استفاده از روش کنترلی افقی معمول نشان داده شده است. مطابق شکل (۷) توان اکتیو منابع با استفاده از استراتژی افقی معمول، بدلیل استفاده از مشخصه‌ی $\omega-P$ به نحو ایده‌آل میان منابع تقسیم شده است. اما خروجی مشخصه‌ی افقی منابع بدلیل عدم تعادل در امپدانس خطوط و همچنین استفاده از دامنه‌ی ولتاژ بعنوان یک پارامتر محلی، با هم برابر نبوده که منجر به خطای تقسیم توان راکتیو میان منابع می‌شود. شکل (۸) استفاده از روش پیشنهادی را در سناریوی بیان شده نشان می‌دهد. مطابق این شکل با استفاده از استراتژی پیشنهادی خطای تقسیم توان راکتیو پس از گذشت ۰/۷ ثانیه به صفر می‌رساند. همانطور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود، به ازای تغییرات نقطه‌ی کار خروجی راکتیو، به نسبت ظرفیت میان منابع تقسیم شده است. پارامتر امپدانس مجازی و فقی به ازای تغییرات نقطه‌ی کار در شکل (۸-د) نشان داده شده است.



شکل (۷): توان و خروجی مشخصه‌ی افقی منابع با استفاده از

جدول (۱): پارامترهای سیستم مورد مطالعه

پارامتر	مقدار
ولتاژ نامی	208 V
ولتاژ لینک DC	400 V
فیلتر	$R_f=0.15\Omega, C_f=40\mu F$ $L_f=1.5mH$
نسبت X/R سیستم	1.7
بارها	$L_1=L_2=L_3=10+j2.5\ \Omega$ $L_4=L_5=5+j1.25\ \Omega$
شیب مشخصه‌ی افقی	$D_{P1}=D_{P2}=D_{P3}=0.000167$
فرکانس	Rad/(Sec.W)
شیب بهینه‌ی مشخصه‌ی افقی	$D_{Q1}=D_{Q2}=D_{Q3}=0.00174$
افقی ولتاژ	V/VAr
پارامترهای کنترل‌کننده	$K_P=0.5, K_I=300, K_{old}=0.02$



شکل (۶): سیستم تست شامل سه منبع اینورتری موازی

باس مشترک استفاده شده است. مشخصات منابع اینورتری، بارها و فیدرهای متصل به منابع در جدول (۱) مشاهده می‌شود. برای بررسی کارآمدی روش پیشنهادی در تسهیم توان راکتیو سه سناریوی مختلف در نظر گرفته شده است. در بخش اول عملکرد روش پیشنهادی در مقابل تغییرات نقطه‌ی کار و بارهای محلی منابع ارزیابی می‌شود. در بخش دوم اثر تأخیر در لینک مخابراتی بر عملکرد سیستم بررسی می‌گردد و در بخش سوم با تغییر نسبت X/R شبکه بهبود تقسیم توان راکتیو با استفاده از روش پیشنهادی در ریز شبکه‌های مقاومتی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

امپدانس خطوط سیستم مورد مطالعه، $2/2$ برابر گشته تا سیستم مورد مطالعه به یک شبکه با نسبت $X/R = 0.6$ خاصیت مقاومتی غالب تبدیل شود. در این حالت سناریوی ۱ دوباره شبیه‌سازی شده و اثر تغییر پارامترهای خطوط شبکه روی عملکرد روش پیشنهادی مورد ارزیابی قرار گرفته است. شکل (۹-ج) و (۹-د) توان اکتیو و راکتیو خروجی منابع اینورتری را در طی فرآیند شبیه‌سازی نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل (۹-د) قابل مشاهده است با افزایش نسبت X/R خطوط، همچنان الگوریتم پیشنهادی دارای دقت تقسیم توان اکتیو و راکتیو بالایی است.

۵-۴- عملکرد روش پیشنهادی در حضور

بارهای محلی ناهمسان

به منظور بررسی اثر بارهای محلی نابرابر و همچنین وجود بارهای مقاومتی خالص بر تقسیم توان راکتیو، مقادیر بارهای محلی L_1 ، L_2 و L_3 به ترتیب برابر با مقادیر 10Ω و $20 + j5.02 \Omega$ و $15 + j3.76 \Omega$ تنظیم شده‌اند. مقادیر سایر بارها و خطوط انتقال سیستم مطابق جدول (۱) و شکل (۶) بوده و سناریوی شبیه‌سازی مشابه قسمت ۵-۱ است. شکل (۱۰) عملکرد روش پیشنهادی در حضور بارهای محلی ناهمسان و مقاومتی را نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل (۱۰-ب) مشاهده می‌گردد در ثانیه‌ی ۴ بار محلی L_2 که بصورت مقاومتی خالص است وارد سیستم می‌شود. در این زمان توان راکتیو منابع پس از رفع حالت گذرا به مقدار قبلی خود بازگشته و مجموع توان راکتیو تولید شده توسط منابع بدون تغییر باقی می‌ماند. اما مطابق شکل (۱۰-الف) توان اکتیو منابع از طریق مشخصه‌ی افقی فرکانس تنظیم شده و افزایش یافته است. همانگونه که مشاهده می‌شود روش پیشنهادی در این حالت نیز عملکرد مطلوبی داشته و منجر به تقسیم ایده‌آل توان راکتیو می‌شود.

استراتژی افقی معمول. الف: توان اکتیو، ب: توان راکتیو همانگونه که در این شکل مشاهده می‌شود امپدانس مجازی منبعی که دارای امپدانس معادل خروجی بیشتری است دارای اندازه‌ی بیشتری نسبت به سایر منابع بوده و از این طریق اختلاف امپدانس روی خطوط متصل به منابع جبران شده و تسهیم ایده‌آل توان راکتیو میان منابع صورت می‌پذیرد.

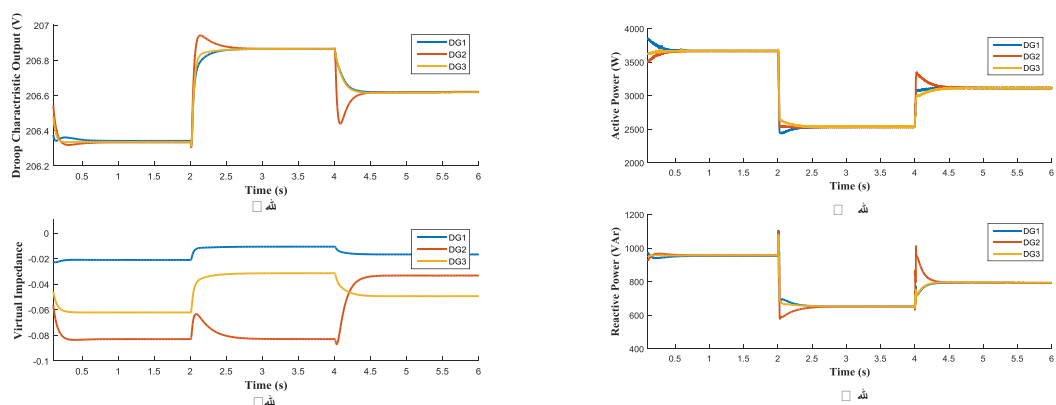
۵-۲- بررسی اثر تأخیر در لینک مخابراتی

تأخیر زمانی لینک مخابراتی از جمله مواردی است که در عمل، تأثیر بسزایی روی عملکرد سیستم‌های کنترلی می‌گذارد. از همین رو برای مطالعه‌ی اثر لینک مخابراتی بر عملکرد سیستم کنترلی پیشنهادی، سناریوی شبیه‌سازی این قسمت مطابق قسمت قبل در نظر گرفته شده است با این تفاوت که پس از گذشت ۱ ثانیه از زمان شبیه‌سازی لینک مخابراتی دچار تأخیر شده و اطلاعات با ۵۰۰ میلی‌ثانیه تأخیر به کنترل‌کننده‌ی محلی منابع ارسال می‌شود. همچنین در ثانیه‌ی سوم شبیه‌سازی لینک مخابراتی منابع مختلف دچار تأخیرات لحظه‌ی متفاوت شده و کنترل‌کننده‌ی محلی منابع ۱ تا ۳ به ترتیب با ۲۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ میلی‌ثانیه تأخیر اطلاعات را از باس مرجع دریافت می‌کنند. مطابق شکل (۹) در زمانهای ۱ و ۳ ثانیه یک اغتشاش لحظه‌ای در توان اکتیو و راکتیو منابع در اثر تأخیر بوجود آمده مشاهده می‌شود، که پس از گذشت حدود ۰/۵ ثانیه توسط حلقه‌های کنترلی جبران شده و از طریق برابری خروجی مشخصه‌ی افقی منابع، مقادیر توان راکتیو آن‌ها به مقدار ایده‌آل تسهیم شده باز می‌گردد. با بررسی نتایج بدست آمده می‌توان گفت روش پیشنهادی نسبت به تأخیر در لینک مخابراتی مقاوم بوده و دارای عملکرد مطلوبی است.

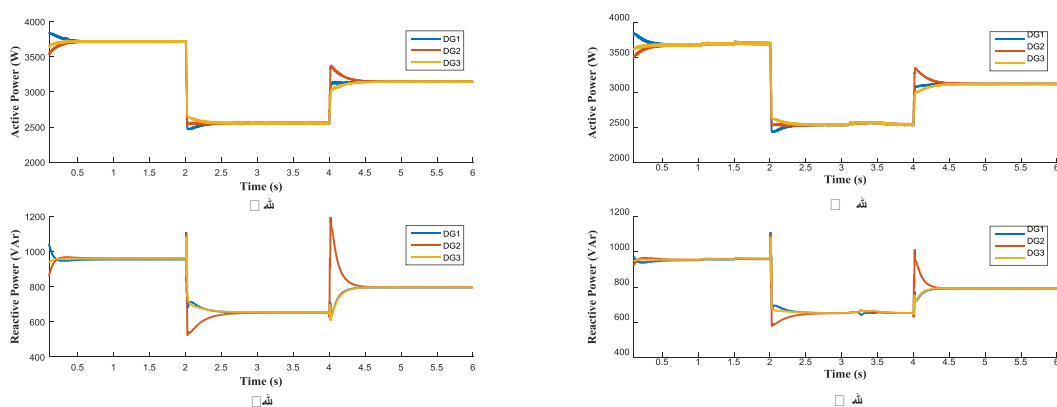
۵-۳- عملکرد روش پیشنهادی در ریزشکته‌های

مقاومتی

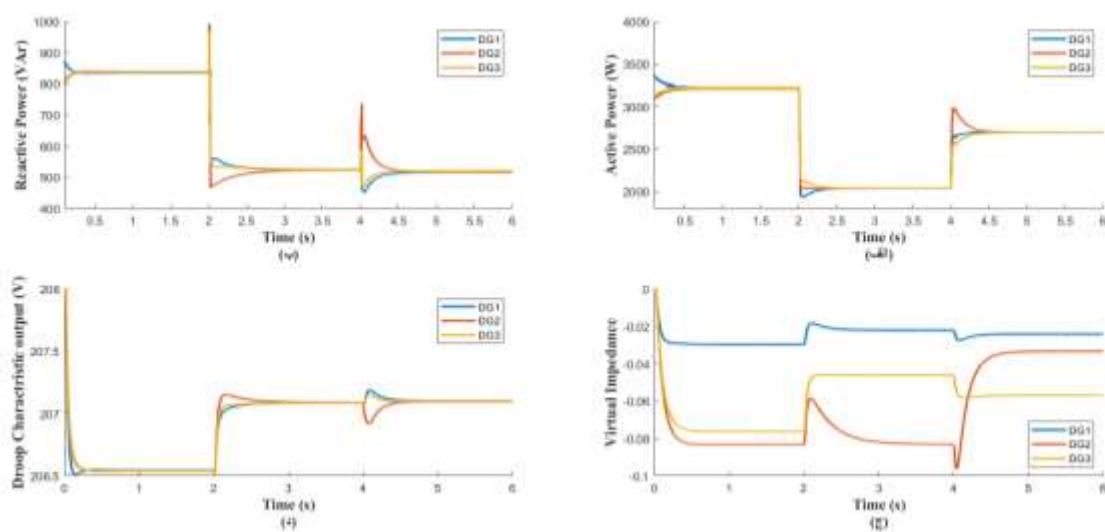
جهت بررسی دینامیک پاسخ روش پیشنهادی، برای شرایط مختلف شبکه از نظر نسبت X/R ، قسمت مقاومتی



شکل (۸): توان و خروجی مشخصه افتی منابع با استفاده از استراتژی پیشنهادی. الف: توان اکتیو، ب: توان راکتیو، ج: خروجی مشخصه افتی، د: امپدانس مجازی وقتی



شکل (۹): توان خروجی منابع با استفاده از استراتژی پیشنهادی. الف) و ب): عملکرد روش پیشنهادی در اثر تأخیر لینک مخابراتی، ج) و د): عملکرد روش پیشنهادی در ریزش شبکه مقاومتی.



شکل (۱۰): عملکرد روش پیشنهادی در حضور بار مقاومتی خالص و بارهای محلی ناهمسان. الف: توان اکتیو، ب: توان راکتیو، ج: امپدانس مجازی وقتی، د: خروجی مشخصه افتی

جدول (۲): مقایسه روش پیشنهادی با روش‌های تقسیم توان راکتیو مبتنی بر امیدانس مجازی

استراتژی تقسیم توان	عدم نیاز به کنترل‌کننده‌ی مرکزی	عدم وابستگی به پارامترهای فیزیکی خط انتقال	سهولت در محاسبات و پیاده‌سازی	عدم وابستگی به تغییرات X/R سیستم	مقاومت در برابر تأخیر لینک مخابراتی
کنترل مرکزی به همراه مکانیزم بازیابی ولتاژ [۷]	x	✓	x	✓	x
امیدانس مجازی و کنترل‌کننده‌ی رزونانسی [۱۳]	x	x	✓	✓	x
کنترل غیر متمرکز (کنترل اجماع) [۱۶، ۱۷]	✓	✓	x	x	x
کنترل پراکنده با استفاده از بهینه‌سازی پارامترها [۱۴]	✓	x	x	x	✓
کنترل متمرکز و فقی [۶]	x	x	x	✓	✓
روش پیشنهادی	✓	✓	✓	✓	✓

روش‌های مشابه پوشش داده و روشی توانمند و قابل انعطاف است.

۵-۵- مقایسه روش پیشنهادی با روش‌های

امیدانس مجازی

در این بخش روش پیشنهادی در این مقاله با چند روش متداول تقسیم توان با استفاده از امیدانس مجازی مقایسه شده و نتیجه‌ی حاصل در جدول (۲) آورده شده است. در برخی از کارهای انجام شده در این زمینه تنظیم امیدانس مجازی با استفاده از یک کنترل‌کننده‌ی مرکزی، سبب وابستگی کنترل کل ریزشبه به یک واحد مرکزی و کاهش قابلیت اطمینان و همچنین عدم امکان گسترش سیستم می‌گردد. در گروهی دیگر تنظیم امیدانس مجازی از طریق تخمین پارامترهای خط انتقال و یا مدل کردن ساختار شبکه انجام می‌گردد که این امر نیازمند محاسبات پیچیده و طولانی است. برخی از روش‌ها اثر تغییرات نسبت X/R شبکه را در نظر نگرفته و عملکرد آنها در صورت تغییر در ساختار شبکه و خاصیت خطوط دچار اختلال می‌گردد. وابستگی گروهی دیگر از روش‌ها به تغییر پارامترهای شبکه و همچنین حساسیت کنترل‌کننده‌ها به تأخیر لینک مخابراتی سبب بروز مشکلاتی در استفاده از این روش‌ها می‌گردد. همانگونه که در جدول (۲) مشاهده می‌گردد روش پیشنهادی کلیه‌ی مسایل و چالش‌های مطرح در زمینه‌ی تقسیم بار به نحو مطلوبی نسبت به سایر

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی مبتنی بر امیدانس مجازی به منظور بهبود دقت تقسیم توان راکتیو در ریزشبه‌های جزیره‌ای ارائه شد. در این روش امیدانس مجازی بصورت و فقی در کنترل‌کننده‌ی محلی هر منبع تنظیم شده و از طریق تعدیل اختلاف امیدانس خطوط متصل به منابع سبب کاهش خطای تقسیم توان راکتیو در ریزشبه می‌گردد. به منظور تنظیم امیدانس مجازی ولتاژ باس مشترک از طریق یک لینک مخابراتی با پهنای باند کم به کنترل‌کننده‌ی محلی هر منبع ارسال شده و پس از رسیدن به حالت دایمی و تنظیم امیدانس مجازی مطلوب توان راکتیو بار به نسبت ظرفیت میان منابع تقسیم می‌گردد. برای پیاده‌سازی روش پیشنهادی نیازی به اطلاع از پارامترهای سیستم نظیر امیدانس خطوط وجود ندارد. همچنین از طریق شبیه‌سازی نشان داده شد که روش پیشنهادی نسبت به تغییرات نقطه‌ی کار، ساختار ریزشبه و تأخیر در لینک مخابراتی مقاوم بوده و در کلیه‌ی حالات منجر به تسهیم ایده‌آل توان راکتیو میان منابع می‌گردد.

مراجع

- International Symposium on*, 2012, pp. 229-235: IEEE.
- [10] L. Yun Wei and K. Ching-Nan, "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, No. 12, pp. 2977-2988, 2009.
- [11] Y. Zhu, F. Zhuo, F. Wang, B. Liu, and Y. Zhao, "A wireless load sharing strategy for islanded microgrid based on feeder current sensing," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 30, No. 12, pp. 6706-6719, 2015.
- [12] J. He and Y. W. Li, "Analysis, Design, and Implementation of Virtual Impedance for Power Electronics Interfaced Distributed Generation," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 47, No. 6, pp. 2525-2538, 2011.
- [13] 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 Transactions on Power Electronics*, Vol. 28, No. 11, pp. 5272-5282, 2013.
- [14] Y. Zhu, F. Zhuo, F. Wang, B. Liu, R. Gou, and Y. Zhao, "A Virtual Impedance Optimization Method for Reactive Power Sharing in Networked Microgrid," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 31, No. 4, pp. 2890-2904, 2016.
- [15] Han, H., et al., *An Improved Droop Control Strategy for Reactive Power Sharing in Islanded Microgrid*. IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 30, No. 6, pp. 3133-3141, 2015.
- [16] S. Kim, H. Zhang, Q. Sun, and R. Han, "Consensus-based distributed control for accurate reactive, harmonic and imbalance power sharing in microgrids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016.
- [17] H. Zhang, S. Kim, Q. Sun, and J. Zhou, "Distributed Adaptive Virtual Impedance Control for Accurate Reactive Power Sharing Based on Consensus Control in Microgrids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 8, No. 4, pp. 1749-1761, 2017.
- [1] R. H. Lasseter, "Microgrids," in *Power Engineering Society Winter Meeting, 2002. IEEE*, 2002, Vol. 1, pp. 305-308: IEEE.
- [2] F. Katiraei, R. Iravani, N. Hatziargyriou, and A. Dimeas, "Microgrids management," *IEEE power and energy magazine*, vol. 6, no. 3, 2008.
- [3] E. Rokrok and M. E. H. Golshan, "Adaptive voltage droop scheme for voltage source converters in an islanded multibus microgrid," *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 4, No. 5, 2010.
- [4] Q.-C. Zhong, "Harmonic droop controller to reduce the voltage harmonics of inverters," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 60, No. 3, pp. 936-945, 2013.
- [5] A. D. Paquette and D. M. Divan, "Virtual impedance current limiting for inverters in microgrids with synchronous generators," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 51, No. 2, pp. 1630-1638, 2015.
- [6] H. Mahmood, D. Michaelson, and J. Jiang, "Accurate Reactive Power Sharing in an Islanded Microgrid Using Adaptive Virtual Impedances," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 30, No. 3, pp. 1605-1617, 2015.
- [7] A. Micallef, M. Apap, C. Spiteri-Staines, J. M. Guerrero, and J. C. Vasquez, "Reactive power sharing and voltage harmonic distortion compensation of droop controlled single phase islanded microgrids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 5, No. 3, pp. 1149-1158, 2014.
- [8] 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 Transactions on Power Electronics*, Vol. 24, No. 12, pp. 2977-2988, 2009.
- [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 *Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), 2012 3rd IEEE*

