

کنترل اکتیو تطبیقی مبتنی بر امپدانس مجازی به منظور بهبود تسهیم توان راکتیو در ریزشبکه‌های اینورتری

محمد شهرکی^۱، بهادر فانی^{۲*}، ایمان صادق‌خانی^۳

^۱ کارشناسی ارشد مرکز تحقیقات ریزشبکه‌های هوشمند، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، اصفهان، ایران

m.shahraki@sel.iaun.ac.ir

^۲ استادیار مرکز تحقیقات ریزشبکه‌های هوشمند، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، اصفهان، ایران

b.fani@pel.iaun.ac.ir

^۳ استادیار مرکز تحقیقات ریزشبکه‌های هوشمند، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، اصفهان، ایران

sadeghkhani@pel.iaun.ac.ir

چکیده: با توجه به پیشرفت‌های اخیر در زمینه الکترونیک قدرت، ریزشبکه‌های مبتنی بر منابع پراکنده با واسط‌های الکترونیک قدرت در حال گسترش هستند. یکی از روش‌های متداول تسهیم توان بین این منابع در یک ریزشبکه جزیره‌ای، استفاده از کنترل اکتیو است. اما به دلیل اختلاف امپدانس خطوط، تسهیم توان راکتیو با استفاده از این روش دقیق نبوده و منجر به اضافه‌بار در برخی از منابع می‌شود. برای رفع این مشکل، در این مقاله روشی ارائه شده است که بر پایه استفاده از مشخصه‌های اکتیو مرسوم شکل گرفته و از پتانسیل امپدانس مجازی در سیستم کنترل منابع پراکنده استفاده می‌کند. افت ولتاژ ایجاد شده توسط امپدانس مجازی، منجر به افزایش دقت تسهیم توان راکتیو بین منابع خواهد شد. برای تولید امپدانس مجازی مناسب، کنترل‌کننده‌های محلی هر یک از منابع با استفاده از یک لینک مخابراتی با پهنای باند کم، اطلاعات مورد نیاز را با مرکز مدیریت ریزشبکه مبادله می‌کنند. سپس با استفاده از مشخصه اکتیو امپدانس مجازی-توان راکتیو پیشنهادی در سیستم کنترل منابع، مقدار امپدانس مجازی هر منبع متناسب با بار ریزشبکه و ظرفیت منبع تعیین می‌شود. با توجه به تغییرات بار در ریزشبکه، شیب مشخصه پیشنهادی به صورت تطبیقی تنظیم می‌شود. برای تأیید کارایی روش پیشنهادی، سناریوهای مختلفی در ریزشبکه تست ولتاژ کم شبیه‌سازی می‌شوند.

واژه‌های کلیدی: منابع اینورتری، کنترل اکتیو مرسوم، تسهیم توان راکتیو، امپدانس مجازی، ریزشبکه.

۱. مقدمه

در سال‌های اخیر، منابع تولید پراکنده با اهدافی نظیر تغذیه بارهای محلی، افزایش قابلیت اطمینان، کاهش گازهای گلخانه‌ای و تحویل توان به شبکه‌های ولتاژ کم مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱]. برای غلبه بر مشکلات فنی اتصال این منابع به سیستم توزیع، مفهوم ریزشبکه مطرح شده است [۲]. یک ریزشبکه مجموعه‌ای از واحدهای تولید پراکنده، ادوات ذخیره‌کننده انرژی و بارهاست که از طریق یک سیستم توزیع به هم متصل می‌شوند. هدف از ایجاد یک ریزشبکه، کنترل هماهنگ منابع پراکنده و داشتن شبکه‌ای با قابلیت اطمینان بالاست. یک ریزشبکه قادر است در حالت متصل به شبکه اصلی مورد بهره‌برداری قرار بگیرد، یا به علت وقوع خطا و یا به صورت برنامه‌ریزی شده در حالت جزیره‌ای به کار خود ادامه دهد [۳].

مدیریت توان منابع پراکنده برای تأمین توان مورد نیاز ریزشبکه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ زیرا این منابع دارای ظرفیتی محدود و مشخصه‌های تولیدی متفاوتی هستند. یکی از روش‌های مرسوم تسهیم توان بین منابع پراکنده در یک ریزشبکه جزیره‌ای، استفاده از کنترل افتی فرکانس-توان حقیقی ($\omega-P$) و ولتاژ-توان راکتیو ($E-Q$) است که در آن از اندازه‌گیری پارامترهای محلی منابع استفاده می‌شود. روش کنترل افتی با تسهیم متناسب توان بین منابع و کاهش جریان چرخشی بین آن‌ها، عملکرد منابع و ریزشبکه را بهبود می‌بخشد. با توجه به سراسری بودن کمیت فرکانس، تسهیم توان حقیقی بین منابع به‌طور دقیق انجام می‌شود. اما به دلایلی همچون تزویج میان توان‌های حقیقی و راکتیو، محدود بودن تغییرات اندازه ولتاژ و وابستگی توان راکتیو به پارامترهای شبکه، کنترل افتی مرسوم قادر به تسهیم مناسب توان راکتیو بین منابع نیست؛ که نتیجه آن امکان اضافه‌بار برخی منابع پراکنده خواهد بود [۴]. در کنار تسهیم توان راکتیو، تنظیم ولتاژ مورد قبول برای مصرف‌کنندگان نیز دارای اهمیت ویژه‌ای است.

برای رفع مشکل فوق، روش‌های متفاوتی برای بهبود مشخصه افتی ولتاژ منابع مبتنی بر مبدل‌های اینورتری ارائه شده است. از جمله می‌توان به کنترل نیمه‌متمرکز [۵]، استفاده از مشخصه ولتاژ تطبیقی^۲ [۶]، استفاده از قاب مجازی^۳ [۷]، تزریق سیگنال [۸] و استفاده از امیدانس مجازی^۴ اشاره کرد. در مرجع [۹]، به‌منظور دستیابی به تسهیم مناسب بار و کاهش جریان گردشی به‌ازای امیدانس‌های مختلف خط، از مفهوم امیدانس مجازی در کنار کنترل تک‌سیکلی^۵

استفاده شده است. مرجع [۱۰] از مشخصه «توان راکتیو- مشتق زمانی اندازه ولتاژ» برای بهبود تسهیم توان راکتیو استفاده می‌کند. هرچند که استفاده از این روش خطای تسهیم توان راکتیو را کاهش می‌دهد، تسهیم ایدئال توان راکتیو بین منابع را تضمین نمی‌کند. همچنین در این مرجع، بهبود تسهیم توان راکتیو با در نظر گرفتن بار محلی مورد ارزیابی قرار نگرفته است. در مرجع [۱۱] روشی برای اصلاح مشخصه $E-Q$ با هدف دستیابی به تسهیم ایدئال توان راکتیو در ریزشبکه‌ای با ساختار دلخواه و منابع پراکنده دارای کنترل محلی ارائه شده است. خطای تسهیم توان راکتیو در زمان‌هایی مشخص و با انجام فرایند خاصی از طریق اصلاح عرض از مبدأ مشخصه‌های $E-Q$ منابع مختلف از بین رفته و تسهیم ایدئال توان راکتیو نیز حاصل می‌شود. از آنجایی که برای دستیابی به نتیجه مطلوب، تمامی منابع موجود در ریزشبکه باید به‌صورت همزمان فرایند مذکور را انجام دهند، از یک کانال مخابراتی با پهنای باند کم بین منابع استفاده می‌شود که از طریق آن، سیگنالی هماهنگ‌کننده برای آغاز فرایند اصلاح مشخصه به تمامی منابع ارسال می‌شود. به‌رغم اینکه روش ارائه‌شده جزء معدود روش‌هایی است که برای پیاده‌سازی آن، قید خاصی روی شبکه در نظر گرفته نمی‌شود، فرایند اصلاح مشخصه در این روش، فرایندی با دینامیک نامناسب همراه با نوسانات شدید در خروجی منابع پراکنده است. همچنین در زمان اجرای فرایند اصلاح مشخصه، امکان تغییر بار بزرگ وجود ندارد. در ریزشبکه‌هایی که خطوط ارتباطی و فیدرهای توزیع آن‌ها از نوع کابل‌های زمینی است، امیدانس خطوط غالباً مقاومتی است. در این حالت، توان حقیقی به‌طور مستقیم به‌وسیله دامنه ولتاژ و توان راکتیو به‌وسیله فرکانس قابل کنترل است. بنابراین در ریزشبکه‌های مقاومتی می‌توان برای تضعیف تزویج میان توان‌های حقیقی و راکتیو از مشخصه‌های معکوس $E-P$ و $\omega-Q$ استفاده کرد تا پایداری سیستم حفظ شود و پاسخ دینامیکی تا حد امکان مطلوب باشد. در این روش، درحالی‌که مشخصه $E-P$ همچنان از نوع افتی است، به‌علت رابطه معکوس توان راکتیو با فرکانس، مشخصه $\omega-Q$ باید از نوع افزایشی باشد [۱۲].

در روش استفاده از امیدانس مجازی، هدف جبران عدم تقارن امیدانس‌های خطوط ریزشبکه است. مفهوم امیدانس مجازی در واقع اضافه‌کردن بخشی به سیستم کنترل منابع اینورتری است که باعث ایجاد افت ولتاژی در خروجی منابع می‌شود که عامل فیزیکی ندارد. برای عملکرد مناسب این روش، به اطلاعات ریزشبکه نیاز است تا کنترل‌کننده بتواند مقدار مناسب امیدانس مجازی مورد نیاز را با توجه به

1. Reactive Power
2. Adaptive
3. Virtual Frame
4. Virtual Impedance
5. One-Cycle Control

و همسایگان آن در گراف جهت‌دار^۴ سیستم محاسبه می‌کند. در طرح پیشنهادی در مرجع [۲۴]، توان راکتیو مرجع هر منبع توسط مرکز کنترل محاسبه می‌شود و با استفاده از یک انتگرال‌گیر، مقدار امپدانس مجازی مورد نیاز برای کاهش خطای تسهیم توان راکتیو به دست می‌آید.

در این مقاله، از مفهوم امپدانس مجازی به منظور کاهش خطای تسهیم توان راکتیو استفاده شده است. در روش پیشنهادی که بر پایه استفاده از مشخصه‌های اکتیو مرسوم شکل می‌گیرد، کنترل‌کننده‌های محلی منابع اطلاعات مورد نیاز را با مرکز مدیریت ریزشبه‌کده مبادله می‌کنند. پس از دریافت مرجع توان راکتیو از مرکز مدیریت ریزشبه‌کده، مقدار مناسب امپدانس مجازی با استفاده از مشخصه اکتیو امپدانس مجازی-توان راکتیو پیشنهادی محاسبه می‌شود. شیب این مشخصه به صورت وقتی و با توجه به اطلاعات دریافتی از مرکز مدیریت ریزشبه‌کده تعیین می‌شود. با تغییر ولتاژ مرجع ناشی از وجود امپدانس مجازی، توان راکتیو خروجی منابع تغییر کرده و در نتیجه تسهیم توان راکتیو بین آن‌ها با دقت بیشتری انجام می‌شود.

قسمت دوم این مقاله، سیستم کنترل ریزشبه‌کده‌های مبتنی بر مبدل در حالت کار جزیره‌ای را معرفی و مشکل تسهیم توان راکتیو را تشریح می‌کند. در قسمت سوم، راهکارهای ارائه شده در مراجع برای بهبود این مشکل با جزئیات بیشتری ارائه می‌شوند. قسمت چهارم به ارائه روش پیشنهادی برای کاهش مشکل تسهیم توان راکتیو اختصاص یافته است. در قسمت پنجم، برای ارزیابی کارایی روش پیشنهادی، سناریوهای مختلفی در ریزشبه‌کده تست مورد مطالعه قرار می‌گیرند. در نهایت، نتایج حاصل از این مطالعه در قسمت ششم ارائه می‌شود.

۲. ساختار پایه کنترل ریزشبه‌کده در حالت کار جزیره‌ای

ساختار یک ریزشبه‌کده جزیره‌ای متشکل از منابع تولید پراکنده اینورتری و مجموعه‌ای از بارها در شکل (۱) نشان داده شده است. هر منبع توسط فیذر مربوطه به باس AC مشترک^۵ متصل می‌شود. کنترل‌کننده‌های محلی منابع قادرند اطلاعات مورد نیاز را توسط یک لینک مخابراتی دوطرفه با پهنای باند کم با مرکز مدیریت ریزشبه‌کده مبادله کنند؛ از جمله این اطلاعات می‌توان به توان‌های حقیقی و راکتیو خروجی هر منبع اشاره کرد. چنانچه از مقاومت خطوط در مقابل راکتانس آن‌ها صرف‌نظر شود، توان حقیقی P و راکتیو Q خروجی هر منبع را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$P_i = \frac{E_i V_{BUS}}{X_i} \delta, \quad (1)$$

شرایط ریزشبه‌کده محاسبه کند [۱۳]. در مرجع [۱۴] با استفاده از یک کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی^۱، با ایجاد افت ولتاژی متناسب با توان راکتیو خروجی منبع، این توان تنظیم می‌شود. در مرجع [۱۵] برای کاهش خطای تسهیم توان راکتیو بین منابع، امپدانس مجازی به گونه‌ای طراحی می‌شود که در فرکانس‌های پایین، خاصیت سلفی و در فرکانس‌های بالا، خاصیت مقاومتی دارد. مزیت‌های دیگر این روش، میرا کردن نوسانات و انتخاب بهینه امپدانس مجازی با توجه به ساختار ریزشبه‌کده و نوع سیستم کنترل آن است. در مرجع [۱۶] برای بهبود خطای ناشی از عدم تطابق امپدانس‌های خطوط، از یک کنترل‌کننده انتگرالی با هدف تغییر امپدانس خروجی هر یک از منابع متناسب با توان راکتیو نامی آن‌ها استفاده شده است که در نهایت منجر به رسیدن توان راکتیو هر منبع به مقدار نامی آن می‌شود.

دسته دیگری از روش‌های مبتنی بر امپدانس مجازی بر مبنای تخمین امپدانس فیذر^۲ کار می‌کنند. در مرجع [۱۷]، ترکیب امپدانس مجازی و تنظیم شیب مشخصه اکتیو منجر به کاهش خطای تسهیم توان راکتیو شده است. با استفاده از سلف مجازی از پیش تعیین‌شده و تخمین امپدانس فیذر، شیب مشخصه اکتیو ولتاژ با هدف جبران افت ولتاژ بر روی امپدانس فیذر اصلاح می‌شود. اما برای تخمین امپدانس، نیاز است قبل از کار در حالت جزیره‌ای، ریزشبه‌کده در حالت متصل به شبکه کار کرده باشد. در مرجع [۱۸] هارمونیک‌های ولتاژ باس مشترک اندازه‌گیری شده و از طریق لینک مخابراتی به کنترل‌کننده محلی منابع ارسال می‌شود تا امپدانس فیذر تخمین زده شود. این تخمین با فرض تفاوت کوچک اختلاف زاویه ولتاژ منبع و باس مشترک انجام می‌شود که برای فیذرهای بلند یا سطوح بالای توان ممکن است برقرار نباشد. با اندازه‌گیری جریان فیذر، مرجع [۱۹] امپدانس فیذر را تخمین می‌زند.

در مرجع [۲۰] از مفاهیم مشخصه اکتیو وقتی و امپدانس مجازی استفاده شده است که در آن، از حلقه سلف مجازی برای افزایش دقت تسهیم توان راکتیو و بهبود پاسخ‌گذا استفاده شده است. در مراجع [۲۱ و ۲۲] با در نظر گرفتن مدل سیگنال کوچک ریزشبه‌کده، محدوده مجاز و مقدار بهینه امپدانس مجازی به منظور بهبود شاخص‌های پایداری، تنظیم ولتاژ ریزشبه‌کده، کاهش تزویج میان توان حقیقی و راکتیو و بهبود تسهیم توان تعیین می‌شوند. در مرجع [۲۳] از کنترل مبتنی بر الگوریتم توافق عام^۳ و امپدانس مجازی وقتی برای تسهیم توان ایدئال بین منابع ریزشبه‌کده استفاده شده است. الگوریتم توافق عام خطای تسهیم توان راکتیو را با استفاده از اطلاعات حاصل از هر منبع

4. Directed Graph
5. Common AC Bus

1. Proportional-Integral
2. Feeder Impedance
3. Consensus

با جای گذاری رابطه (۴) در رابطه (۲)، توان راکتیو خروجی هر منبع به صورت زیر بیان می شود:

$$Q_i = \frac{E_i^* V_{BUS} - V_{BUS}^2}{X_i + n_{qi} V_{BUS}} \quad (5)$$

اگر ظرفیت منابع یکسان باشد، شیب مشخصه افقی ولتاژ در همه آن ها برابر است؛ در نتیجه میزان خطا در تسهیم توان راکتیو بین منابع را می توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\Delta Q_{error} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{X_2 - X_1}{X_2 + n_{q2} V_{BUS}}, \quad n_{q1} = n_{q2} = n_q \quad (6)$$

رابطه (۶) نشان می دهد که امیدانس فیدر منابع و شیب مشخصه افقی ولتاژ عوامل تأثیرگذار بر خطای تسهیم توان راکتیو بین واحدها هستند.

۳. روش های کاهش خطای تسهیم توان راکتیو

با توجه به عواملی که در قسمت قبل بیان شد، روش های متفاوتی برای کاهش خطای تسهیم توان راکتیو بین منابع ارائه شده است. همان طور که در شکل (۲-الف) مشاهده می شود، افزایش شیب مشخصه افقی ولتاژ منجر به کاهش اختلاف توان های راکتیو خروجی منابع پراکنده می شود. اگرچه این روش خطای تسهیم توان راکتیو را کاهش می دهد، بر اساس رابطه (۴)، سبب کاهش اندازه ولتاژ خروجی هر واحد نیز خواهد شد. این افت ولتاژ بر عملکرد بارهای ریز شبکه به خصوص بارهای حساس اثر می گذارد. بنابراین مصالحه ای ذاتی بین دقت تسهیم توان راکتیو و دامنه ولتاژ وجود دارد. یکی دیگر از روش های مؤثر برای بهبود دقت تسهیم توان راکتیو بین منابع که در شکل (۲-ب) نشان داده شده، تغییر اندازه ولتاژ نامی (E^*) است. این تغییر ولتاژ به گونه ای خواهد بود که توان راکتیو هر منبع برابر با مقدار نامی آن باشد. اما این روش باعث کاهش ولتاژ باس AC مشترک می شود. برای جبران این افت ولتاژ می توان از سیستم بازبازی ولتاژ استفاده کرد. روش دیگر کاهش خطای تسهیم توان راکتیو، تغییر شیب مشخصه ولتاژ خروجی منابع است. در این روش با تغییر امیدانس خروجی منابع، اختلاف بین امیدانس واسط بین منبع و باس AC مشترک کاهش می یابد (شکل ۲-ج). این کار با استفاده از مفهوم امیدانس مجازی در سیستم کنترل منابع انجام می شود. در ادامه، این روش با جزئیات بیشتری تشریح می شود.

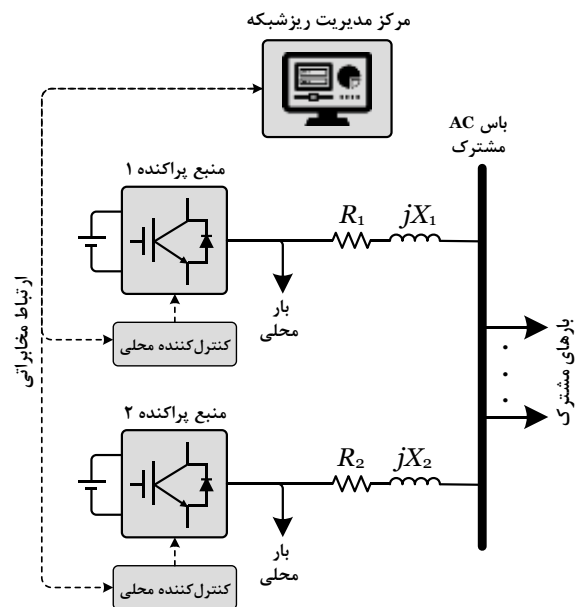
$$Q_i = \frac{V_{BUS}(E_i - V_{BUS})}{X_i} \quad (2)$$

در روابط فوق، E_i ولتاژ خروجی منبع نام و V_{BUS} ولتاژ باس AC مشترک است. X_i نیز راکتانس فیدر متصل به منبع نام است. از روابط (۱) و (۲) نتیجه می شود که توان حقیقی بیشتر به زاویه انتقال توان (δ) وابسته است، در حالی که مقدار توان راکتیو خروجی منبع بیشتر به اندازه ولتاژ بستگی دارد. بنابراین با تنظیم مناسب توان حقیقی و راکتیو می توان به ترتیب زاویه δ (یا مشتق آن فرکانس) و دامنه ولتاژ خروجی را کنترل کرد. بر این اساس، مشخصه های افقی مرسوم $\omega - P$ و $\omega - Q$ که از رفتار ژنراتور سنکرون^۲ الهام گرفته شده اند، به صورت زیر بیان می شوند:

$$\omega_i = \omega_i^* - n_{pi} \cdot P_i \quad (3)$$

$$E_i = E_i^* - n_{qi} \cdot Q_i \quad (4)$$

که در آن، ω_i^* و E_i^* به ترتیب مقادیر نامی فرکانس زاویه ای و اندازه ولتاژ خروجی هر منبع و ω_i فرکانس زاویه ای ولتاژ مرجع مبدل است. n_{pi} و n_{qi} نیز شیب مشخصه های افقی هر منبع بوده که بر اساس ظرفیت نامی منابع و میزان انحراف مجاز فرکانس و ولتاژ تعیین می شوند. به دلیل سراسری بودن کمیت فرکانس، به کارگیری مشخصه افقی $\omega - P$ منجر به تسهیم متناسب توان حقیقی بین منابع خواهد شد. اما به دلیل وابستگی توان راکتیو به ولتاژ که کمیتی محلی است، مشخصه افقی $E - Q$ قادر به تسهیم دقیق توان راکتیو بین منابع نیست.



شکل (۱): ساختار ریز شبکه اینورتری در حالت کار جزیره ای^۳

1. Power Angle
2. Synchronous Generator
3. Islanded Mode of Operation

۱.۳. امپدانس مجازی

شکل (۳) یک ریزشبهه جزیره‌ای شامل دو منبع اینورتری را نشان می‌دهد. ظرفیت این منابع یکسان است ولی با امپدانس‌های متفاوتی به باس AC مشترک متصل شده‌اند. اگر برای نشان دادن اختلاف امپدانس فیدرهای منابع، امپدانس فیدر واحد دوم به‌عنوان مرجع در نظر گرفته شود، رابطه (۷) به دست می‌آید:

$$\begin{cases} R_1 = R_2 + \Delta R \\ X_1 = X_2 + \Delta X \end{cases} \quad (7)$$

با توجه به رابطه (۷)، افت ولتاژ روی فیدر خروجی منابع را می‌توان با استفاده از روابط (۸) و (۹) توصیف کرد:

$$\Delta V_1 = \frac{(X_2 + \Delta X)Q_1 + (R_2 + \Delta R)P_1}{E_1^*} \quad (7)$$

$$\Delta V_2 = \frac{X_2 Q_2 + R_2 P_2}{E_2^*} \quad (8)$$

با ساده‌سازی رابطه (۸)، می‌توان افت ولتاژ روی فیدر خروجی منبع اول را به‌صورت زیر بیان کرد:

$$\Delta V_1 = \frac{X_2 Q_1 + R_2 P_1}{E_1^*} + \frac{\Delta X Q_1 + \Delta R P_1}{E_1^*} \quad (9)$$

بر اساس رابطه (۱۰)، افت ولتاژ روی فیدر منبع اول متشکل از دو قسمت است: قسمت اول افت ولتاژ روی فیدر خروجی واحد و قسمت دوم افت ولتاژ ناشی از عدم تطابق امپدانس دو واحد است. نتیجه می‌توان ولتاژ خروجی منابع را به‌صورت زیر به دست آورد:

$$\begin{cases} \bar{E}_1 = \bar{V}_{BUS} + \Delta V_2 + \delta v \\ \bar{E}_2 = \bar{V}_{BUS} + \Delta V_2 \end{cases} \quad (10)$$

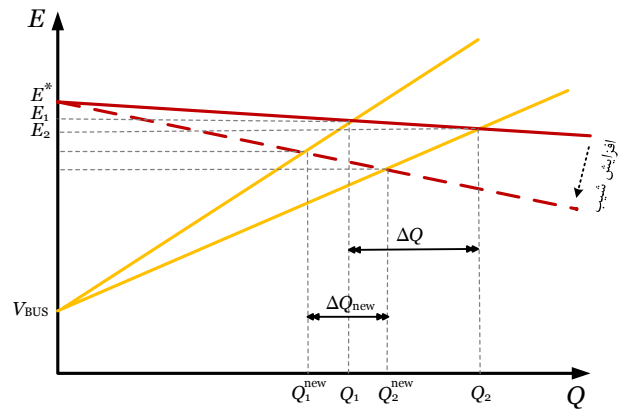
که در آن، δv نشان‌دهنده افت ولتاژ ناشی از اختلاف امپدانس فیدرهای منابع است. برای حذف افت ولتاژ δv ، کنترل‌کننده محلی منبع اول باید ولتاژ خروجی منبع را به‌اندازه افت ولتاژ ایجادشده افزایش دهد:

$$\bar{E}_1^{new} = \bar{E}_1 + \bar{V}_{vir}, \quad \bar{V}_{vir} = \delta v \quad (11)$$

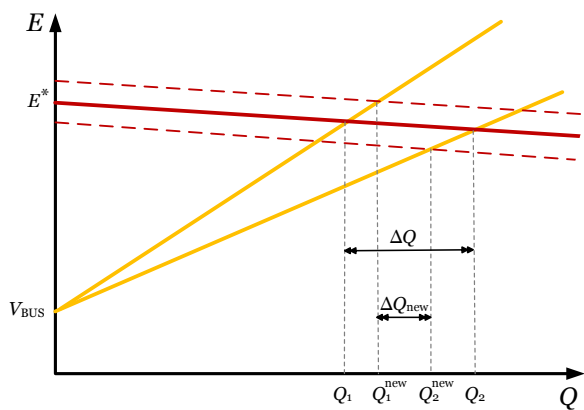
در نتیجه:

$$\bar{E}_1^{new} = \bar{E}_2 = \bar{V}_{BUS} + \Delta V_2 \quad (12)$$

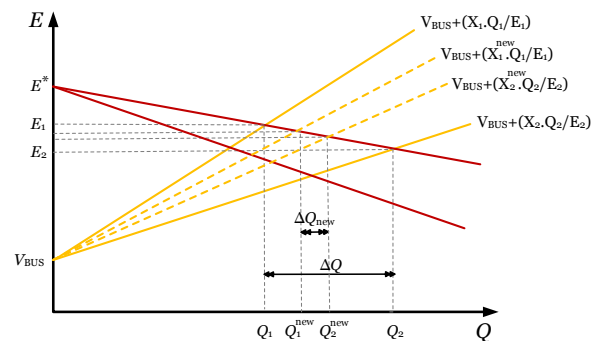
در رابطه (۱۲)، ولتاژی است که کنترل‌کننده واحد اول به‌منظور حذف افت ولتاژ ناشی از عدم تطابق امپدانس فیدرهای منابع ایجاد می‌کند. بنابراین با یکسان شدن ولتاژهای خروجی منابع و بر



(الف)

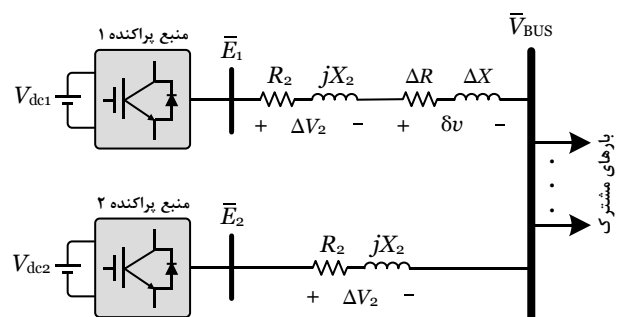


(ب)



(ج)

شکل (۲): روش‌های کاهش خطای تسهیم توان راکتیو. (الف) اصلاح شیب، (ب) تغییر عرض از مبدأ، (ج) امپدانس مجازی



شکل (۳): ساختار ریزشبهه جزیره‌ای با امپدانس‌های فیدر متفاوت

مخابراتی موجود در شبکه‌های هوشمند به این منظور استفاده کرد. از طرفی چون بار ریزش‌بکه به‌طور لحظه‌ای تغییر نمی‌کند و به اطلاعات لحظه‌ای نیازی نیست، ارتباط مخابراتی مورد نیاز با استفاده از کانال‌های مخابراتی با پهنای باند کم پیاده‌سازی می‌شود. شایان ذکر است در صورت قطع شدن این ارتباط مخابراتی، کنترل افقی مرسوم همچنان به کار خود ادامه می‌دهد و در نتیجه پایداری ریزش‌بکه حفظ می‌شود؛ هرچند که خطای تسهیم توان راکتیو دوباره افزایش می‌یابد. اگر توان راکتیو تولیدی هر منبع برابر با مقدار تعیین شده در رابطه (۱۷) باشد، توان راکتیو خروجی هر منبع را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

$$Q_i^* = \frac{V_{BUS}(E_i - V_{BUS})}{X_i^{new}}, \quad (18)$$

که در آن X_i^{new} امیدانس جدید بین منبع و باس AC مشترک با در نظر گرفتن اثر امیدانس مجازی حاصل از مشخصه پیشنهادی امیدانس مجازی-توان راکتیو است. با جایگذاری مشخصه افقی مرسوم ولتاژ به ازای توان راکتیو تعیین شده توسط مرکز مدیریت ریزش‌بکه و جایگذاری رابطه (۱۶) در رابطه (۱۸) و با توجه به این نکته که توان راکتیو خروجی منبع نسبت به میزان تعیین شده برای آن واحد در چه وضعیتی قرار دارد، شیب مشخصه افقی پیشنهادی مطابق با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$n_{vi} = \begin{cases} \frac{V_{BUS}(E_i^* - V_{BUS} - n_{qi} Q_i^*)}{Q_i Q_i^*}, & Q_i < Q_i^* \\ \frac{-V_{BUS}(E_i^* - V_{BUS} - n_{qi} Q_i^*) + 2X_i^* Q_i^*}{Q_i Q_i^*}. & Q_i > Q_i^* \end{cases} \quad (19)$$

بر اساس رابطه (۱۹)، شیب مشخصه افقی پیشنهادی مطابق با تغییرات بار ریزش‌بکه و توان راکتیو خروجی واحد تنظیم می‌شود. در منابعی که توان راکتیو خروجی آن‌ها بیشتر از مقدار تعیین شده توسط مرکز مدیریت ریزش‌بکه است، شیب مشخصه افقی پیشنهادی به‌گونه‌ای تنظیم می‌شود که امیدانس مجازی ایجادشده دارای علامت مثبت باشد. در نتیجه مطابق با رابطه (۱۵)، ولتاژ مرجع تولیدشده کاهش یافته و با توجه به متناسب بودن توان راکتیو خروجی با ولتاژ، مقدار توان راکتیو خروجی این منابع کاهش می‌یابد. درحالی‌که در منابعی که توان راکتیو تولیدی آن‌ها کمتر از مقدار تعیین شده است، امیدانس مجازی ایجادشده دارای علامت منفی خواهد بود. این امر سبب افزایش ولتاژ مرجع مبدل اینورتری و در نتیجه افزایش توان راکتیو خروجی آن منبع می‌شود. شکل (۴) روش پیشنهادی مبتنی بر مشخصه افقی امیدانس مجازی-توان راکتیو را نشان می‌دهد.

اساس رابطه (۴)، تسهیم توان راکتیو بین منابع به نسبت ظرفیتشان انجام خواهد شد:

$$\frac{n_{q1}}{n_{q2}} = \frac{Q_2}{Q_1} \quad (14)$$

۴. روش پیشنهادی برای کاهش خطای تسهیم توان راکتیو

با توجه به تحلیل ارائه‌شده در قسمت ۱.۳، برای بهبود دقت تسهیم توان راکتیو، کنترل‌کننده‌های محلی منابع باید با ایجاد یک امیدانس مجازی مناسب، ولتاژ مطلوب در خروجی منابع را ایجاد کنند. به این منظور، ولتاژ مرجع مبدل متناسب با جریان خروجی آن تغییر می‌کند. بنابراین ولتاژ مرجع منبع اینورتری به‌صورت رابطه (۱۵) محاسبه می‌شود:

$$V_{ref}^{new} = V_{ref} - Z_v \cdot i_o, \quad (15)$$

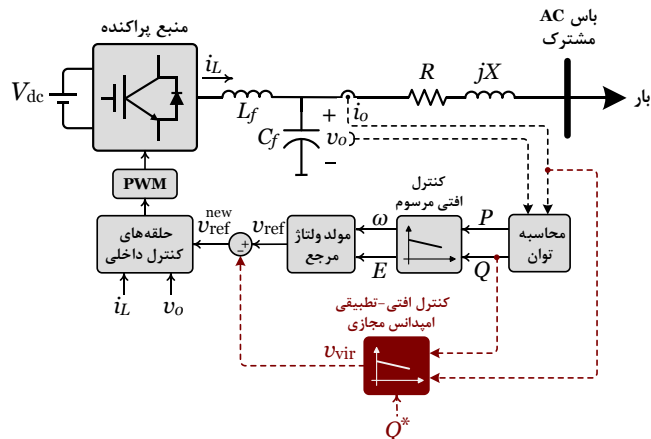
که در آن، V_{ref}^{new} بیانگر سیگنال ولتاژ مرجع مبدل، V_{ref} ولتاژ مرجع حاصل از مشخصه افقی مرسوم، Z_v امیدانس مجازی و i_o جریان خروجی منبع است. با سلفی در نظر گرفتن امیدانس مجازی و با توجه به اثر راکتانس فیدر منابع بر مقدار توان راکتیو خروجی، مشخصه افقی زیر برای محاسبه مقدار امیدانس مجازی متناسب با توان راکتیو خروجی هر منبع پیشنهاد می‌شود:

$$X_{vir} = X^* - n_v Q_i, \quad (16)$$

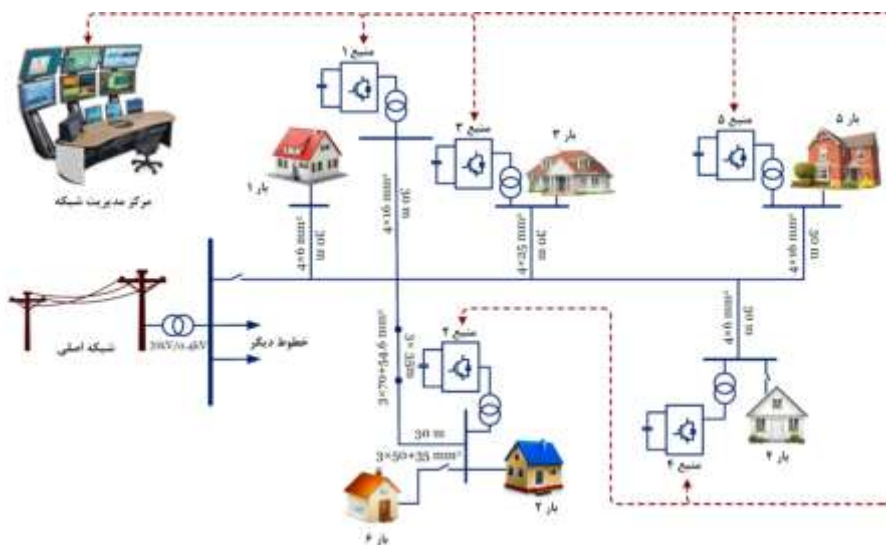
که در آن، X^* نشان‌دهنده راکتانس فیدر منبع و n_v شیب مشخصه افقی امیدانس مجازی-توان راکتیو است. برای تعیین مقدار مناسب شیب مشخصه، باید کنترل‌کننده‌های محلی منابع از میزان توان راکتیو مورد نیاز ریزش‌بکه اطلاعات لازم را در اختیار داشته باشند. به این منظور، با ارسال توان راکتیو خروجی هر واحد به مرکز مدیریت ریزش‌بکه، توان تعیین شده برای هر منبع (Q_i^*) محاسبه و از طریق ارتباط مخابراتی به کنترل‌کننده‌های منابع فرستاده می‌شود. مرکز مدیریت انرژی ریزش‌بکه مقدار توان راکتیو مناسب برای هر منبع را با استفاده از رابطه (۱۷) محاسبه می‌کند:

$$Q_i^* = \frac{Q_{i,rated} \cdot \sum_{i=1}^m Q_{i,load}}{\sum_{i=1}^n Q_{i,rated}}, \quad (17)$$

که در آن $Q_{i,load}$ و $Q_{i,rated}$ به ترتیب توان راکتیو نامی منبع i ام و توان راکتیو بار i ام ریزش‌بکه هستند. m و n نیز به ترتیب تعداد بارها و منابع پراکنده ریزش‌بکه باشند. بنابراین امیدانس مجازی محاسبه شده باید متناسب با تغییرات بار ریزش‌بکه و به‌صورت تطبیقی تنظیم شود. به این منظور، شیب مشخصه افقی پیشنهادی، باید متناسب با بار مورد نیاز ریزش‌بکه تعیین گردد. در شبکه‌های هوشمند آینده، ارتباطات مخابراتی با هزینه پایین‌تر در دسترس هستند؛ همچنین می‌توان از کانال‌های



شکل (۴): کنترل افقی تطبیقی پیشنهادی برای بهبود دقت تسهیم توان راکتیو



شکل (۵): ریزشبهه تست ولتاژ کم اصلاح شده سیگره

۵. نتایج مطالعات

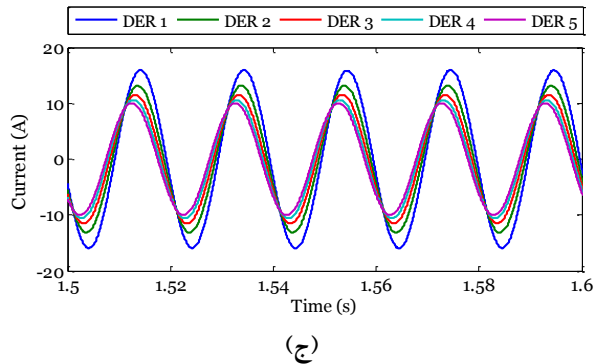
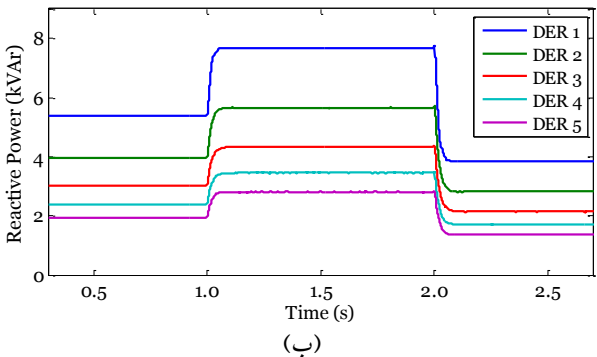
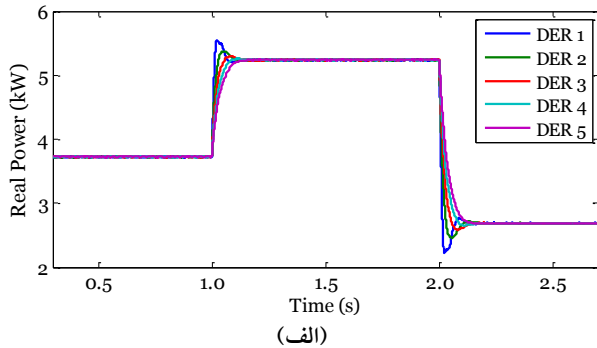
مشخصه افقی پیشنهادی در سیستم کنترل همه منابع پیاده سازی شده و شبیه سازی ها در حوزه زمان و با استفاده از نرم افزار متلب/سیمولینک^۴ انجام شده است. سیستم مورد مطالعه از ابتدا از شبکه اصلی جداسازی و در حالت جزیره ای کار می کند. کنترل کننده های محلی هر یک از منابع، مقدار توان راکتیو خروجی را محاسبه و آن را به مرکز مدیریت ریزشبهه ارسال می کنند. پس از مشخص شدن توان راکتیو تعیین شده برای هر منبع، اطلاعات از مرکز مدیریت انرژی به کنترل کننده محلی منابع فرستاده می شوند. کنترل کننده های محلی با محاسبه شیب مناسب مشخصه افقی پیشنهادی، امیدانس مجازی متناسب با توان راکتیو خروجی هر واحد را تولید می کنند؛ افت ولتاژ حاصل از آن با ولتاژ مرجع حاصل از مشخصه افقی مرسوم جمع می شود توان راکتیو خروجی هر واحد را تغییر می دهد. برای نشان دادن خاصیت تطبیقی بودن روش پیشنهادی نسبت به تغییرات بار در ریزشبهه، دو سناریوی مختلف در ریزشبهه تست بررسی و نتایج حاصل از آن با حالت استفاده از مشخصه افقی مرسوم مقایسه شده اند. در

برای ارزیابی کارایی روش پیشنهادی در این مقاله از ریزشبهه تست ولتاژ کم سیگره^۱ استفاده می شود [۲۵]. این ریزشبهه در پروژه ریزشبهه های اتحادیه اروپا ایجاد شده و سپس توسط سیگره به عنوان سیستم تست^۲ انتخاب شده است. این شبکه نمایانگر فیدرهای توزیع ولتاژ کم متداول شامل انواع بار و منابع پراکنده است و غیر شعاعی است. شکل (۵) نسخه اصلاح شده ریزشبهه تست ولتاژ کم سیگره را نشان می دهد که دارای ساختار نوع باس^۳ است. این ریزشبهه دارای ۵ واحد تولید پراکنده با ظرفیت مشابه بوده که بارهای موجود در ریزشبهه را تغذیه می کنند. علت مشابه در نظر گرفتن ظرفیت منابع، نشان دادن دقت روش پیشنهادی در تسهیم توان های حقیقی و راکتیو است. مشخصات منابع در جدول (۱) ارائه شده است.

1. CIGRE
2. Benchmark
3. Bus-Type

4. MATLAB/Simulink

چشمگیری هستند؛ این امر احتمال اختلال در عملکرد سیستم‌های حفاظتی در شرایط بارگذاری سنگین و وقوع خطا را افزایش می‌دهد، درحالی‌که شکل (۷-ج) مؤید کارایی روش پیشنهادی در کاهش جریان چرخشی بین منابع است.



شکل (۶): نتایج حاصل از مشخصه افتی معمول؛ الف. توان‌های اکتیو خروجی منابع، ب. توان‌های راکتیو خروجی منابع، ج. جریان خروجی منابع

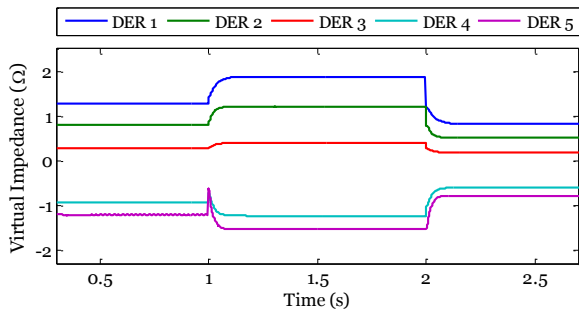
شکل (۸) اندازه امیدانس مجازی حاصل از مشخصه پیشنهادی را نشان می‌دهد. بر اساس رابطه (۱۵)، علامت امیدانس مجازی تولیدشده سبب کاهش ولتاژ مرجع در منابع با توان راکتیو تولیدی بیشتر از میزان تعیین شده و یا منجر به افزایش ولتاژ مرجع در منابع با توان راکتیو تولیدی کمتر از میزان تعیین شده می‌شود. به منظور تعیین دقت روش ارائه شده در این مقاله نسبت به مشخصه افتی مرسوم، خطای تسهیم توان راکتیو برای هر منبع به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۶]:

$$\Delta Q_{error,i} = \frac{Q_i}{Q_{rated,i}} - \frac{\sum_{i=1}^5 Q_i}{\sum_{i=1}^5 Q_{rated,i}} \quad (20)$$

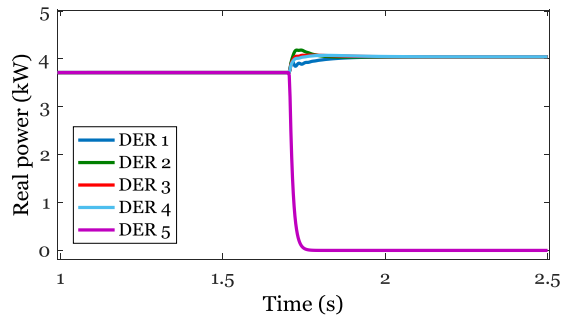
سناریوی اول، بار شماره ۶ در لحظه $t = 1$ s برقرار و منجر به افزایش بار کل ریزشبه می‌شود. در سناریوی دوم نیز، در لحظه $t = 2$ s، بار شماره ۴ به همراه بار شماره ۶ از مدار خارج می‌شوند و ریزشبه با کاهش بار مواجه می‌شود.

جدول (۱): مشخصات منابع پراکنده و سیستم کنترل آن‌ها		
پارامتر	نماد	مقدار
توان نامی	S_n (kVA)	۱۰
ولتاژ نامی	V_n (V)	۴۰۰
ولتاژ باس DC	V_{DC} (V)	۱۰۰۰
فرکانس اصلی	f_0 (Hz)	۵۰
سلف فیلتر	L_f (mH)	۶
خازن فیلتر	C_f (μ F)	۱۰۰
امپدانس ترانس ایزوله	Z_{eq} (Ω)	$0.3 + j1/2$
ضریب افتی توان حقیقی	n_p	3×10^{-4}
ضریب افتی توان راکتیو	n_q	$1/5 \times 10^{-3}$
ضریب تناسبی کنترل کننده ولتاژ	kp_v	۰/۸
ضریب انتگرالی کنترل کننده ولتاژ	ki_v	۴۵۰
ضریب تناسبی کنترل کننده جریان	kp_i	۳
ضریب انتگرالی کنترل کننده جریان	ki_i	۹۰
فرکانس قطع فیلتر محاسبه توان	ω_c (rad/s)	$2\pi \times 5$
توان حقیقی (W)	توان راکتیو (VAr)	
بار اول	۲۰۰۰	۱۷۰۰
بار دوم	۱۵۰۰	۱۲۷۵
بار سوم	۳۲۰۰	۲۷۲۰
بار چهارم	۴۰۰۰	۳۴۰۰
بار پنجم	۲۸۰۰	۲۳۸۰
بار ششم	۶۲۰۰	۵۲۱۰

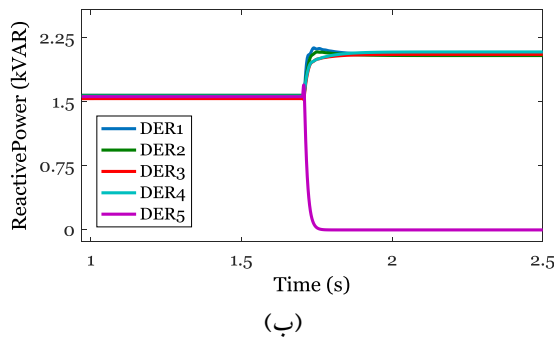
شکل‌های (۶) و (۷) توان‌های حقیقی و راکتیو و جریان‌های خروجی منابع ریزشبه را به ترتیب در حالت استفاده از کنترل افتی مرسوم و مشخصه امیدانس مجازی-توان راکتیو پیشنهادی نشان می‌دهند. از آنجایی که پنج منبع موجود در ریزشبه یکسان فرض شده و ضرایب مشخصه افتی فرکانس-توان حقیقی آن‌ها برابر است، توان حقیقی مورد نیاز ریزشبه به طور مساوی بین منابع تسهیم می‌شود. نتایج حاصل از شکل‌های (۶-الف) و (۷-الف) مؤید این مطلب در شرایط مختلف کاری ریزشبه است. اما همان طور که در شکل (۶-ب) مشاهده می‌شود، برخلاف توان حقیقی، کنترل افتی مرسوم عملکرد مناسبی در تسهیم توان راکتیو بین منابع ندارد. اما شکل (۷-ب) نشان می‌دهد که با استفاده از مشخصه افتی امیدانس مجازی-توان راکتیو پیشنهادی در کنار مشخصه افتی مرسوم، دقت تسهیم توان راکتیو بین منابع بهبود می‌یابد. از طرف دیگر شکل (۶-ج) نشان می‌دهد که جریان‌های خروجی منابع هنگام استفاده از کنترل افتی مرسوم، از نظر اندازه و فاز دارای اختلاف



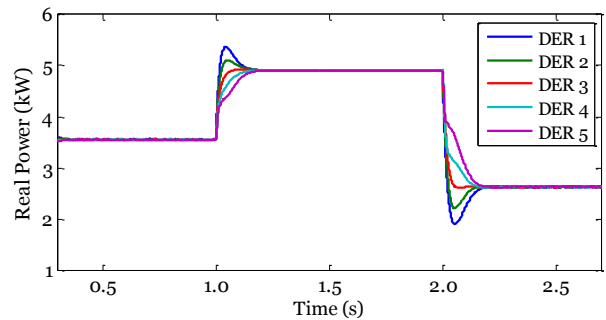
شکل (۸): امپدانس‌های مجازی تولیدشده توسط روش پیشنهادی



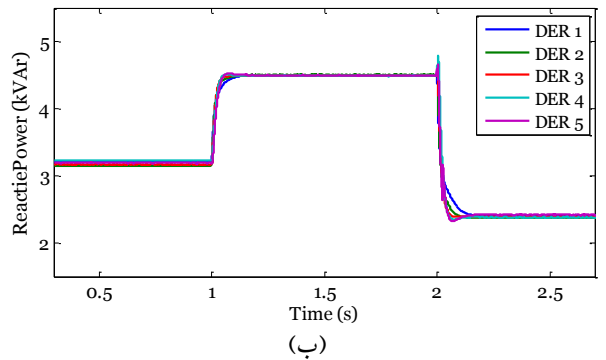
(الف)



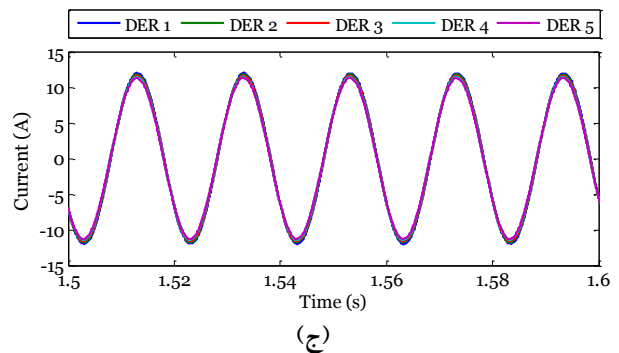
(ب)



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۹): نتایج حاصل از روش پیشنهادی هنگام خروج منبع ۵؛

الف. توان‌های حقیقی خروجی منابع، ب. توان‌های راکتیو خروجی منابع به دلیل سراسری بودن کمیت فرکانس، تسهیم توان حقیقی با استفاده از مشخصه افتی مرسوم چه قبل و چه بعد از خروج منبع به خوبی انجام می‌شود. همچنین با تغییر وقتی امپدانس مجازی منابع متناسب با تغییر توان خروجی آن‌ها، سیستم کنترل پیشنهادی توانسته است پس از خروج یکی از منابع نیز تسهیم توان راکتیو را با دقت مناسب انجام دهد. نتایج مؤید این مطلب است که روش پیشنهادی ویژگی اتصال و کار کردن منابع را تحت تأثیر قرار نمی‌دهد.

۶. نتیجه گیری

هدف این مقاله بهبود دقت تسهیم توان راکتیو میان منابع پراکنده اینورتری در یک ریزشبهه جزیره‌ای با استفاده از مفهوم امپدانس مجازی است. برای تنظیم مقدار امپدانس مجازی، یک مشخصه افتی امپدانس مجازی-توان راکتیو پیشنهاد شده است که شیب آن متناسب با بار ریزشبهه تغییر می‌کند. برای تنظیم شیب مشخصه پیشنهادی، کنترل‌کننده‌های محلی هر یک از

شکل (۷): نتایج حاصل از روش پیشنهادی؛ الف. توان‌های اکتیو خروجی منابع، ب. توان‌های راکتیو خروجی منابع، ج. جریان‌های خروجی منابع جدول (۲) بیشینه خطای تسهیم توان راکتیو در شرایط کاری مختلف ریزشبهه تست را در هر دو حالت استفاده از کنترل افتی مرسوم و کنترل افتی پیشنهادی نشان می‌دهد. بر اساس نتایج این جدول، دقت روش پیشنهادی در تسهیم توان راکتیو بیشتر از کنترل افتی مرسوم است.

جدول (۲): خطای تسهیم توان راکتیو

حالت کاری	مشخصه افتی معمول			روش پیشنهادی		
	عادی	افزایش بار	کاهش بار	عادی	افزایش بار	کاهش بار
حداکثر خطا (%)	۶۲/۴۵	۷۴/۰۶	۵۸/۹۳	۲/۸۶	۱/۶۷	۲/۳۳

در گام آخر کارایی روش پیشنهادی هنگام خروج منابع پراکنده بررسی می‌شود. در این سناریو بار شماره ۶ در مدار نبوده و در زمان $t = 1/75$ s، منبع شماره ۵ از ریزشبهه جدا می‌شود. نتایج شبیه‌سازی در شکل (۹) نشان داده شده است.

ولتاژ مرجع مبدل اینورتری کاهش یافته و در نتیجه توان راکتیو منبع کاهش یابد. از طرف دیگر، امیدانس مجازی در منابع با توان راکتیو کمتر از مقدار مرجع، منجر به افزایش تولید توان راکتیو آنها می‌شود. نتایج مطالعات روی ریزشبه‌تست ولتاژ کم نشان داد که مشخصه پیشنهادی، خطای تسهیم توان راکتیو را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد.

منابع با استفاده از یک لینک مخابراتی با پهنای باند کم، اطلاعات مورد نیاز را با مرکز مدیریت ریزشبه‌تست مبادله می‌کنند. امیدانس مجازی حاصل با تغییر ولتاژ مرجع مبدل، دقت تسهیم توان راکتیو را افزایش می‌دهد. در منابعی که توان راکتیو تولیدی آنها از مقدار مرجع تعیین شده توسط مرکز مدیریت ریزشبه‌تست بیشتر باشد، شیب مشخصه به گونه‌ای تنظیم می‌شود که

مراجع

- [1] Guerrero, M.J., Vasques, C.J., Matas, J., Garcia de Vicuna, L. and Castilla, M., "Hierarchical Control of Droop-Controlled AC And DC Microgrids—A General Approach Towards Standardization", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 58, No. 1, pp. 158–172, 2010.
- [2] Sadeghkhani, I., Hamedani Golshan, M.E., Mehrizi-Sani, A., Guerrero, J.M. and Ketabi, A., "Transient Monitoring Function-Based Fault Detection for Inverter-Interfaced Microgrids", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 9, No. 3, pp. 2097–2107, 2018.
- [3] Peas Lopes, J., Moreira, C. and Madureira, A., "Defining Control Strategies for Microgrids Islanded Operation", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 21, No. 2, pp. 916–924, 2006.
- [4] Saghafi, H. and Karshenas, H., "Power Sharing Improvement in Standalone Microgrids With Decentralized Control Strategy", Electric Power Components and Systems, Vol. 42, No. 12, pp. 1278–1288, 2014.
- [5] Lee, C., Chu, C. and Cheng, P., "A New Droop Control Method for the Autonomous Operation of Distributed Energy Resource Interface Converters", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 28, No. 4, pp. 1980–1993, 2013.
- [6] Rokrok, E. and Hamedani Golshan, M.E., "Adaptive Voltage Droop Scheme for Voltage Source Converters in an Islanded Multibus Microgrid", IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 4, No. 5, pp. 562–578, 2010.
- [7] Li, Y. and Li, Y.W., "Power Management of Inverter Interfaced Autonomous Microgrid Based on Virtual Frequency-Voltage Frame", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 2, No. 1, pp. 30–40, 2011.
- [8] Tuladhar, A., Jin, H., Unger, T. and Mauch, K., "Control of Parallel Inverters in Distributed AC Power Systems With Consideration of Line Impedance Effect", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 36, No. 1, pp. 988–998, 2000.
- [9] کتابی، عباس، زراعتی، مهدی، «تقسیم بار بین اینورترهای موازی میکروگرید با استفاده از روش کنترل تک‌سیکلی»، مهندسی و مدیریت انرژی، دوره ۴، شماره ۳، صفحه ۱۱۲–۱۳۹۳.
- [10] Lee, C., Chu, C. and Cheng, P., "A New Droop Control Method for the Autonomous Operation of Distributed Energy Resource Interface Converters", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 28, No. 4, pp. 1980–1993, 2013.
- [11] He, J. and Li, Y.W., "An Enhanced Microgrid Load Demand Sharing Strategy", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 27, No. 9, pp. 3984–3995, 2012.
- [12] Sao, C. and Lehn, P., "Control and Power Management of Converter Fed Microgrids", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 23, No. 3, pp. 1088–1098, 2008.
- [13] Zhong, Q.-C. and Zeng, Y., "Can The Output Impedance of an Inverter Be Designed Capacitive?" in 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2011), pp. 1220–1225, 2011.
- [14] Mahmood, H., Mishaelson, D. and Jiang, J., "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.
- [15] Zhong, Q.-C., "Robust Droop Controller for Accurate Proportional Load Sharing Among Inverters Operated in Parallel", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 60, No. 4, pp. 1281–1290, 2013.
- [16] Zhu, Y. and Liu, B., "A Virtual Resistance Based Reactive Power Sharing Strategy for Networked Microgrid", in 9th International Conference on Power Electronics-ECCE Asia, pp. 1–5, 2015.
- [17] Li, Y.W. and Kao, C.N., "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.
- [18] He, J., Li, Y.W., Guerrero, J.M., Vasquez, J.C. and Blaabjerg, F., "An Islanding Microgrid Reactive Power Sharing Scheme Enhanced by Programmed Virtual Impedances", in 3rd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), pp. 229–235, 2012.
- [19] Zhu, Y., Zhuo, F., Wang, F., Liu, B. and Zhao, Y., "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.
- [20] Hamzeh, M., Mokhtari, H. and Karimi, H., "A Decentralized Self-Adjusting Control Strategy for Reactive Power Management in an Islanded Multi-Bus MV Microgrid", Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering, Vol. 36, No. 1, pp. 18–25, 2013.
- [21] He, J. and Li, Y.W., "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.
- [22] Wu, X., Shen, C. and Iravani, R., "Feasible Range and Optimal Value of the Virtual Impedance for Droop-Based Control of Microgrids", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 8, No. 3, pp. 1242–1251, 2017.
- [23] Zhang, H., Kim, S., Sun, Q. and Zhou, J., "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.
- [24] Hoang, T.V. and Lee, H.H., "An Adaptive Virtual Impedance Control Scheme to Eliminate The Reactive-Power-Sharing Errors in an Islanding Meshed Microgrid", IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, Vol. 6, No. 2, pp. 966–976, 2018.
- [25] Papathanassiou, S., Hatzigiorgiou, N.D. and Strunz, K., "A Benchmark Low Voltage Microgrid Network", in Proc. CIGRE Symposium: Power Systems with Dispersed Generation, Athens, Greece, 2005.
- [26] Golsorkhi, M.S. and Dylan, D.C. Lu, "A Control Method for Inverter-Based Islanded Microgrids Based on V-I Droop Characteristics", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 30, No. 3, pp. 1196–1204, 2014.