ارائه روش کنترلی بهمنظور تنظیم دقیق ولتاژ بار و تقسیم دقیق توانهای اکتیو و راکتیو ریزشبکه

امین رنجبران'، دانشجوی دکتری؛ محمود عبادیان'، دانشیار

amin.ranjbaran@birjand.ac.ir – دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر – دانشگاه بیرجند – بیرجند – ایران – mahmoud_ebadian@birjand.ac.ir ۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر – دانشگاه بیرجند – بیرجند – ایران – hahmoud_ebadian@birjand.ac.ir

چکیده: در این مقاله، استراتژی کنترلی جدیدی جهت تنظیم ولتاژ بارهای بحرانی در مقدار نامی برای ریزشبکههای فشارضعیف پیشنهاد شده است. در این مقاله بدون ارتباط مخابراتی، افت ولتاژ امپدانس رابط بین خروجی ^۱DG تا نقطه اتصال مشترک ^۲(PCC) بهازای عبور توانهای اکتیو و راکتیو جبران شده است. روش کنترل V – Q اصلاح شده تا ولتاژ بار بحرانی در مقدار نامی تنظیم شود. همچنین، توانهای اکتیو و راکتیو بار بهصورت دقیق بر اساس ظرفیت منابع DG بین آنها تقسیم میشود. برای کنترل مجزای توانهای اکتیو و راکتیو و دقت تقسیم آنها بین منابع از امپدانس مجازی به همراه حلقههای کنترل ولتاژ و جریان استفاده شده است. همچنین، در این روش جریان چرخشی بین منابع حداقل شده است. شیه سازی روش پیشنهادی برای ارزیابی مؤثر بودن آن بر روی دو شبکه انجام شده که یکی دارای ۲ واحد DG و دیگری دارای ۴ واحد DG است. نتایج نشان دهنده مؤثر بودن روش پیشنهادی است.

واژههای کلیدی: کنترل افتی، تقسیم توانهای اکتیو و راکتیو، تنظیم ولتاژ و پایداری ریزشبکه، امپدانس مجازی، حلقه کنترل ولتاژ و جریان.

A Control Strategy for Load Voltage Restoration and Accurate Sharing of Active and Reactive Power in Microgrid

A. Ranjbaran¹, PhD Student; M. Ebadian², Associate Professor

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran, Email: amin.ranjbaran@birjand.ac.ir
2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran, Email: mebadian@birjand.ac.ir

Abstract: In this paper, a new control strategy is proposed that adjusts the voltage of critical loads at nominal value in low voltage microgrids. The strategy compensates the voltage drop between the DG's output and point of common coupling (PCC), without requiring any communication. The Q-V droop control method has been modified in order to restore the load voltage amplitude. Moreover, in the proposed method, the load is accurately shared between DGs based on their capacity. Virtual impedance along with voltage and current control loops have been used to avoid coupling between the active and reactive powers. Furthermore, this approach minimizes the circulating current between DG units. The presented control strategy has successfully been simulated for two microgrid designs with a two-DG and a four-DG unit system, where results have shown the effectiveness of this methodology.

Keywords: Droop control, active and reactive powers sharing, voltage regulation and stability of micro grid, virtual impedance, voltage and current control loop.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۵/۰۴ تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۶/۲۷ و ۱۳۹۵/۰۸/۲۷ تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۰۶/۲۷، ۱۳۹۵/۰۷/۲۷ و ۱۳۹۵/۰۸/۲۷ نام نویسنده مسئول: محمود عبادیان نشانی نویسنده مسئول: ایران – بیرجند – دانشگاه بیرجند – دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر.

۱ – مقدمه

ریزشبکه شامل منابع توزیعشده (مانند سلولهای فتوولتائیک و سلول خورشیدی، پیل سوختی، میکروتوربین و CHP و غیره) تجهیزات ذخیرهکننده انرژی، شبکه توزیع، کنترل، حفاظت و بارهای مرتبط با آن است [۱، ۲]. ریزشبکهها با توجه به ظرفیت کم منابع DG بیشتر در شبکههای فشار ضعیف استفاده می شوند [۳]. بنابراین در این مقاله به ریزشبکههای فشار ضعیف (LV^۳) پرداخته شده است.

با نصب واحدهای تولید پراکنده در ریزشبکه، پیچیدگی کنترل توان و تنظیم ولتاژ در شبکه بهطور قابل ملاحظهای افزایش می یابد و می توان با استفاده از خصوصیت «نصب و برداشت[†]» بدون اینکه تغییری در استراتژی کنترلی ایجاد شود واحدهای تولیدپراکنده جدید را به سیستم اضافه نمود [۴]. روشی که با این خصوصیت به کاربرده می شود، روش کنترل افتی⁶ یا دروپ است. این روش بر مبنای تئوری پخش توان در یک سیستم AC بوده و با استفاده از اطلاعات محلی هر DG، کنترل ولتاژ و فرکانس را انجام می دهد. این روش بر این فرض استوار است که امپدانس بین منابع به شدت اندوکتیو بوده و زاویه توان بهاندازه کافی کوچک است که تغییر توان اکتیو با زاویه و توان راکتیو با تغییر ولتاژ مرتبط است. این روش به کنترل افتی $\omega - q = q - Q$ مرسوم است.

از مزایای روش افتی سادگی آن است، زیرا نیاز به ارتباطات اضافی بین اینورترها ندارد. بنابراین قابلیت اطمینان و قابلیت انعطاف بالا فراهم میشود [۵]. با این وجود این روش دارای مشکلاتی به قرار زیر است:

۱- ریزشبکههای فشارضعیف (LV) عمدتاً دارای امپدانس مقاومتی هستند که این سبب ارتباط کنترل توان اکتیو و راکتیو میشود و نمی توان کنترل هر یک را بهطور جداگانه انجام داد.

۲- در این روش، ضرایب افتی بر اساس ظرفیت واحدها تعیین میشوند و بر اساس آن میزان مشارکت بارها در تأمین بار مشخص میشود. اما نکته مهم در این قسمت مصالحه بین کنترل ولتاژ و فرکانس با تقسیم توان بین منابع است. به طوری که که ضریب افتی بیش تر تقسیم بار ریز شبکه را بهبود می دهد اما پایداری ریز شبکه را به مخاطره می اندازد و ضریب افتی کم تر دقت تقسیم بار را کاهش می دهد [۶، ۷].

مریز و مسلم می او می استفاده از الگوریتم کنترلی $\omega - P$ یکسان برای هر دو مد متصل و مجزا از میکه وجود دارد، اما در کنترل افتی V – Q یک پیچیدگی وجود دارد که ولتاژ یک متغیر محلی است و تقسیم توان راکتیو بین DG های یک ریز میکه توسط مشخصه های افتی به تنهای نمی تواند دقت مناسبی را به همراه داشته باشد [۸–۱۰].

۴- روش کنترل افتی سبب انحراف ولتاژ و فرکانس خروجی مبدل واسط DGهای ریزشبکه در حالت جزیرهای میشود. این مشکل زمانی حادتر میشود که در سیستم بارهای حساس از قبیل بارهای الکترونیکی و موتورهای القایی وجود داشته باشد که به تغییرات ولتاژ بسیار حساس هستند.

۵- وجود جریان چرخشی بین منابع DG. تفاوت بین ولتاژهای خروجی چندین واحد DG موازی سبب جریان چرخشی بین آنها می شود. این جریان چرخشی می تواند منجر به اضافه جریان اینور ترها شده و همچنین کارایی کنترل افتی را تنزل دهد.

با این حال مقالات متعددی به حل مشکلات روش افتی پرداختهاند. در [۱۱] برای کنترل مجزای توانهای اکتیو و راکتیو، چهارچوب انتقال توان پیشنهاد شده است. در [۱۲، ۱۳] از چهارچوب مجازی ولتاژ و فرکانس برای کنترل مجزای توانها استفاده شده است. همچنین می توان برای ریزشبکههای مقاومتی از روش کنترل افتی V – P وf – Q استفاده کرد [۱۴، ۱۵]. اما مشکلی که این روش دارد این است که در حالت متصل به شبکه با ژنراتورهای بزرگ در تقسیم بار سازگاری ندارد [۷].

راه دیگر برای جلوگیری از کوپل توان، استفاده از امپدانس خروجی مجازی است که امپدانس خروجی اینورترها را بهشدت اندوکتیو می کند [۱۶]. حلقه امپدانس مجازی مقاومتی- اندوکتیو با هدف بهبود تقسیم توان در [۱۷–۲۰] پیشنهاد شده است. همچنین در [۲۱] از امپدانس مجازی تعمیمیافته بهمنظور کاهش جریان چرخشی بین اینورترها استفاده شده است. مهمترین مشکل این روشها این است که دقت تقسیم توان راکتیو را بهدلیل افزایش افت ولتاژ امپدانس مجازی کاهش می دهد [۲۲].

بهمنظور بازیابی ولتاژ، در [۲۳] روش کنترل افتی بهبود داده شده و از مشتق ولتاژ برای بازیابی ولتاژ خروجی استفاده شده است. در [۲۶-۲۴] از کنترل ثانویه استفاده شده که وظیفه بازیابی دامنه و فرکانس ولتاژ خروجی DGها به مقادیر نامی را بر عهده دارد. این روش نیازمند ارتباط مخابراتی بین قسمتهای مختلف ریزشبکه است که باعث افزایش هزینهها و آسیبپذیری، کاهش قابلیت اطمینان و محدود کردن قابلیت توسعه و انعطافپذیری سیستم میشود.

همچنین بهمنظور دقت تقسیم توان در ریزشبکهها، در [۲۷] روش کنترلی بر مبنای کنترل افتی I–V پیشنهاد شده است. مؤلفین [۲۸] با بهکارگیری یک حلقه فیدبک توان راکتیو برای هر DG ضرایب افتی را با هدف افزایش دقت تقسیم توان راکتیو و حفظ پایداری سیستم افزایش دادهاند.

در بیش تر مطالعات انجامشده به تنظیم ولتاژ خروجی DGها و کم تر به تنظیم ولتاژ بارها پرداخته شده که ولتاژ بارها به دلیل افت ولتاژ روی امپدانس واسط بین منابع تا PCC افت خواهد داشت. این مسئله زمانی بیش تر حائز اهمیت خواهد بود که در سیستم بار بحرانی یا حساس به ولتاژ داشته باشیم. از طرفی در شبکههای توزیع فشار ضعیف، افت ولتاژ در طول فیدر عمدتاً وابسته به عبور توان اکتیو است درحالی که مقالات به تأثیر توان راکتیو در افت ولتاژ ریزشبکهها پرداختهاند و کم تر اثر توان اکتیو را لحاظ کردهاند. بنابراین، در این مقاله، استراتژی کنترلی برای حالت بهرهبرداری مجزا از شبکه پیشنهاد شده تا ضمن حل کردن مشکلات روش افتی، ولتاژ بار حساس را در مقدار نامی تنظیم و همچنین بار را به طور دقیق بر اساس ظرفیت واحدها بین منابع تقسیم کند. برای

این منظور افت ولتاژ روی امپدانس واسط بین خروجی منابع DG تا PCC بهازای عبور توانهای اکتیو و راکتیو تخمین زده شده و به ولتاژ مرجع روش افتی اضافه میشود. همچنین تنظیم ضرایب کنترل افتی Q-V بهصورت بههنگام انجامشده و در آن افت ولتاژ روی امپدانس مجازی در نظر گرفته شده که در بیشتر مقالات لحاظ نشده و سبب کاهش دقت روش کنترل افتیV-Q میشود. برای ارزیابی روش پیشنهادی شبیهسازی بر روی دو شبکه انجامشده که یکی دارای ۲ واحد DG و دیگری دارای ۴ واحد DG است.

مهمترین نوآوریهای این مقاله عبارتاند از: (۱) حل مشکلات روش افتی بدون ارتباط مخابراتی بین منابع و محقق کردن خصوصیت «نصب و برداشت» برای هر واحد DG، (۲) تنظیم دقیق مقدار ^۶RMS ولتاژ بارهای بحرانی در مقدار نامی. برای رسیدن به این هدف، افت ولتاژ تخمینی روی امپدانس فیدر به ولتاژ مرجع تولیدی توسط روش افتی اضافه میشود، (۳) بهبود روش کنترل افتی V – Q با تعیین تطبیقی ضرایب آن بهصورت بههنگام و در نظر گرفتن افت ولتاژ روی امپدانس مجازی که سبب بهبود کنترل ولتاژ و افزایش دقت تقسیم توان راکتیو بین منابع میشود.

ادامه مقاله به اینصورت است که در بخش دوم به کنترل ریزشبکه پرداخته شده است. در قسمت سوم استراتژی کنترلی پیشنهادی برای حالت مجزا از شبکه توضیح داده شده است. در قسمت چهارم نتایج شبیهسازی با روش پیشنهادی برای یک شبکه با ۲ واحد DG نشان داده شده و با روش کنترل افتی متداول مقایسه شده است. در قسمت پنجم ارزیابی روش پیشنهادی برای یک ریزشبکه با ۴ واحد DG صورت گرفته و نهایتاً در قسمت پنجم نتیجه گیری انجامشده است.

۲- کنترل ریزشبکهها

بهمنظور بهرهبرداری مطمئن ریزشبکه، استراتژی کنترلی مناسبی بایستی اتخاذ شود. استراتژیهای کنترل ریزشبکه به حالت بهرهبرداری آنها وابسته است. ریزشبکه در دو حالت متصل به شبکه یا مجزا از شبکه توزیع بهرهبرداری میشود. در حالت متصل به شبکه، ولتاژ و فرکانس ریزشبکه توسط شبکه قدرت اصلی دیکته میشود و منابع هم به میزان از پیشتعیینشده توان اکتیو/راکتیو تولید میکنند. وقتیکه خطا در سیستم رخ میدهد، ریزشبکه از شبکه اصلی جدا شده و بهصورت مجزا از شبکه بهرهبرداری میشود. با جدا شدن ریزشبکه از سیستم قدرت، وظایف و حالات عملکردی منابع موجود در آن تغییر مییابد. این وظایف جدید شامل: کنترل ولتاژ و فرکانس و تقسیم مناسب توان بار بین تمام منابع است [۲۹].

۱-۲ - کنترل ریزشبکه در حالت متصل به شبکه

در حالت متصل به شبکه هر واحد تولید پراکنده باید توانهای اکتیو و راکتیو از پیش تعیین شده را تولید نماید. در این حالت عملکرد مبدلها بر اساس کنترل جریان است [۳۰]. این روش کنترلی میتواند در قابهای مرجع مختلف از قبیل، قاب سنکرون (qβ)، قاب ساکن (αβ) و

قاب مرجع abc انجام شود [۳۱، ۳۲]. در این مقاله، از روش قاب مرجع ساکن ($\alpha\beta$)، استفاده شده که در شکل (۱) نشان داده شده است. توانهای اکتیو و راکتیو مرجع (Po,Qo) با توان خروجی هر DG مقایسه شده و به یک کنترل کننده PI داده می شود تا جریان های مرجع محور dq بهدست آید. سپس به محور $\alpha\beta$ منتقل شده و با جریان خروجی مبدل مقایسه و به یک کنترل کننده Pr که برای قاب مرجع $\alpha\beta$ دارای عملکرد بهتری است داده می شود. تابع انتقال کنترل کننده به صورت زیر است [۳۳]:

$$G_{PR}(s) = k_p + \frac{2k_i \,\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2} \tag{1}$$

همچنین بهمنظور حذف هارمونیکهای مرتبه پائین مثل ۳ و ۵ و ۷ از جبرانسازی هارمونیکی با تابع انتقال رابطه زیر استفاده شده است [۳۴]:

$$G_{HS}(s) = \sum_{h=3,5,7} \frac{2k_{ih} \,\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + (h\omega_0)^2} \tag{7}$$

سپس ولتاژ مرجع تولیدشده به PWM داده میشود.

۲-۲- کنترل ریزشبکه در حالت مجزا از شبکه

ریزشبکه در حالت مجزا از شبکه، باید علاوه بر تنظیم ولتاژ و فرکانس خروجی منابع DG، توانهای اکتیو و راکتیو بار را بین منابع بر اساس ظرفیت آنها تقسیم کند. یکی از روشهای متداول روش کنترل افتی است.

۲-۲-۱- روش کنترل افتی متداول

روش متداول در کنترل ولتاژ و فرکانس ریزشبکه در حالت مجزا از شبکه روش کنترل افتی است که در ادامه به تشریح آن پرداخته می شود.

روش کنترل افتی یا دروپ که به کنترل اولیه، کنترل مستقل یا بدون ارتباط مخابراتی معروف است، بر اساس ظرفیت واحدها توانهای اکتیو و راکتیو را بین آنها تقسیم میکند و از طرفی ولتاژ و فرکانس سیستم را نیز کنترل میکند.

روش کنترل افتی متداول را میتوان با استفاده از اتصال یک مبدل منبع روش کنترل افتی متداول را میتوان با استفاده از اتصال یک مبدل منبع ولتاژ VSC به باس AC که در شکل (۲) نشان داده شده است، بررسی کرد. میتوان VSC را با یک منبع ولتاژ AC با ولتاژ $Vs\delta$ مدل کرد که از طریق امیدانس $XZ = e^{j\theta} = R + jX$ مشترک PCC با ولتاژ VL متصل شده باشد. توانهای اکتیو و راکتیو تحویلی به بار از رابطه زیر بهدست میآید:

$$P = \frac{V_s^2}{Z} \cos\theta - \frac{V_s V_L}{Z} \cos(\theta + \delta) \tag{(7)}$$

$$Q = \frac{V_s^2}{Z} \sin \theta - \frac{V_s V_L}{Z} \sin(\theta + \delta)$$
 (*)

اگر فرض شود امپدانس خط کاملاً اندوکتیو است یعنی $^{o}90= heta$ آنگاه روابط (۳) و (۴) بهصورت زیر ساده می شوند:



شکل ۱: شماتیک ساختار کنترلی در حالت متصل به شبکه



شکل ۲: مدار معادل یک VSC متصل به باس بار

این روش کنترل افتی به روش $\varpi - P$ و Q - V شناخته می شود که در شکل ۳ نشان داده شده است.

با روش افتی بار بین منابع تولید پراکنده بر اساس ظرفیت واحدها تقسیم و ولتاژ و فرکانس تنظیم می شود اما همان طور که گفته شد ولتاژ و فرکانس را در مقدار نامی تنظیم نمی کند و سبب انحراف ولتاژ و فرکانس می شود.



۳- استراتژی کنترلی پیشنهادی در حالت مجزا از شبکه

در این قسمت استراتژی کنترلی جدیدی پیشنهادی گردیده است تا با استفاده از خصوصیت «نصب و برداشت» برای هر واحد تولید پراکنده، کنترل ولتاژ و فرکانس و تقسیم دقیق توانهای اکتیو و راکتیو را به گونهای انجام دهد تا مقدار RMS ولتاژ بارهای بحرانی را در مقدار نامی تنظیم نماید و جریان چرخشی بین منابع را حداقل نماید.

استراتژی کنترلی پیشنهادی در حالت مجزا از شبکه شامل ۳ مرحله است. مرحله ۱: با استفاده از روش کنترل افتی پیشنهادی، مقادیر ولتاژ و فرکانس مرجع تولید میشود. مرحله ۲: از حلقه کنترل امیدانس مجازی استفاده میشود. مرحله ۳: از حلقه های کنترل ولتاژ و جریان بهمنظور تولید شکل موج مرجع ولتاژ برای PWM استفاده شده است. در شکل ۴ بلوک دیاگرام روش پیشنهادی نشان داده شده است.

$$P = \frac{V_S V_L}{X} \sin(\delta) \tag{(a)}$$

$$Q = \frac{V_s^2}{X} - \frac{V_s V_L}{X} \cos(\delta) \tag{6}$$

اگر اختلاف فاز بین خروجی مبدل و باس بار بهاندازه کافی کوچک باشد در اینصورت میتوان از تقریبهای $1 \approx \delta$ cos و $\delta \approx \delta$ in استفاده کرد و رابطه (۵) و (۶) را بهصورت زیر تقریب زد:

$$\delta = \frac{XP}{V_s V_L} \tag{Y}$$

$$V_s - V_L = \frac{XQ}{V_s} \tag{A}$$

روابط (۲) و (۸) وجود یک رابطه قوی بین توان اکتیو و فرکانس و همچنین بین توان راکتیو و ولتاژ ریزشبکههای اندوکتیو را نشان میدهد. بنابراین:

$$\omega = \omega_0 - D_p (P_0 - P) \tag{9}$$

$$D_p = \frac{\omega_0 - \omega_{\min}}{P_0 - P_{\max}} \tag{(1)}$$

که ۵۵ فرکانس زاویهای شبکه، P توان اکتیو خروجی DG م D ضریب افتی توان اکتیو است که از رابطه (۱۰) بهدست میآید. P۵ توان تولیدی برنامهریزیشده DG در فرکانس۵۵ در حالت بهرهبرداری متصل به شبکه است.

$$V = V_0 - D_q(Q_0 - Q) \tag{11}$$

$$D_q = \frac{V_0 - V_{\min}}{Q_0 - Q_{\max}} \tag{11}$$

که Vo ولتاژ نامی VSC، Q توان راکتیو خروجی DG و Dq ضریب افتی توان راکتیو است که با استفاده از رابطه (۱۲) بهدست میآید. Q0 توان راکتیو تولیدی DG در حالت متصل به شبکه است که در ولتاژ Vo بهرهبرداری میشود که توسط شبکه اصلی کنترل میشود.



شکل ۴: بلوک دیاگرام روش پیشنهادی

۳-۱- مرحله ۱: تعیین ولتاژ و فرکانس مرجع با استفاده از الگوریتم پیشنهادی

در این مرحله با استفاده از ولتاژ و جریان خروجی هر DG مقدار توانهای اکتیو و راکتیو تولید هر واحد بهدست میآید. سپس با استفاده از فیلتر پائین گذر، توانهای اکتیو و راکتیو متوسط متناظر با مؤلفههای اصلی مطابق با روابط (۱۱) و (۱۲) استخراج میشود.

$$P = \frac{\omega_f}{s + \omega_f} p \tag{17}$$

$$Q = \frac{\omega_f}{s + \omega_f} q \tag{14}$$

که ω_f فرکانس قطع فیلتر می باشد [۳۵].

سپس با استفاده از روش افتی پیشنهادی که در ادامه توضیح داده خواهد شد، مقادیر مرجع ولتاژ و فرکانس بهدست میآیند که در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵: تولید شکل موج مرجع ولتاژ با استفاده از روش افتی

۳-۱-۱- روش کنترل افتی پیشنهادی

یکی از مشکلات روش افتی کاهش ولتاژ بهدلیل افت ولتاژ روی امپدانس خط میباشد. اگر این افت ولتاژ به ولتاژهای خروجی هر DG اضافه شود به شرطی که از محدوده مجاز خارج نشود میتوان ولتاژ بار را در مقدار نامی با انحراف خیلی کم تنظیم نمود. برای این منظور یک ریزشبکه ساده با دو منبع بهصورت شکل ۶ در نظر گرفته شده که یک بار حساس را تأمین میکنند.

جریان عبوری از هر فاز اینورتر مطابق رابطه (۱۵) است.





توان توليدى مختلط هر فاز واحدها بهصورت زير است:

$$S_i = V_i \cdot I_i * \tag{19}$$

اگر از رابطه (۱۵) جریان را در رابطه (۱۶) قرار دهیم:

$$S_i^* = V_i^* \cdot \frac{\Delta V_i}{Z_i} \tag{1Y}$$

$$\Delta V_i = \frac{S_i^* \cdot Z_i}{V_i^*} \tag{1A}$$

$$\Delta V_{i} = \frac{(P_{i} - jQ_{i}).(R_{i} + jX_{i})}{V_{i}^{*}}$$
(19)

$$\Delta V_{i} = \frac{R_{i}P_{i} + X_{i}Q_{i}}{V_{i}^{*}} + j\frac{X_{i}P_{i} - R_{i}Q_{i}}{V_{i}^{*}}$$
$$\Delta V_{i} = \Delta V_{R} + j\Delta V_{X}$$
$$|\Delta V_{i}| = \frac{|S_{i}^{*}|.|Z_{i}|}{|\Delta V_{i}|}$$
(7.)

$$\left|\Delta V_{i}\right| = \frac{\left|S_{i}\right| \cdot \left|Z_{i}\right|}{\left|V_{i}^{*}\right|} \tag{(7.)}$$

همان طور که در رابطه (۱۹) نشان داده شده است، به دلیل اینکه در سیستمهای توزیع مقدار R از X بیش تر است و همچنین توان اکتیو ΔV_X نسبت به توان راکتیو Q که سبب افزایش $A V_R$ نسبت به Δv_X میشود. بنابراین تأثیر توان اکتیو در افت ولتاژ خطوط توزیع قابل توجه خواهد بود. به این منظور در این مقاله به منظور تنظیم دقیق ولتاژ بارهای حساس، افت ولتاژ ناشی از عبور توانهای اکتیو و راکتیو از فیدر یا خط

توزیع لحاظ گردیده است که در رابطه (۲۰) نشان داده شده است. ضریب *kvi* را مطابق رابطه (۲۱) تعریف میکنیم که ضریب افزایش ولتاژ خروجی هر DG است.

$$k_{vi} = \frac{\left|\Delta V_i\right|}{\left|S_i\right|} = \frac{\left|Z_{i_Line}\right|}{\left|V_i\right|} \tag{(1)}$$

بنابراین افت ولتاژ روی امپدانس خط به صورت زیر است:

$$\left|\Delta V_{i}\right| = k_{vi} \cdot \left|S_{i}\right| \tag{(YY)}$$

با استفاده از روابط فوق افت ولتاژ روی امپدانس خط بهازای عبور توان اکتیو و راکتیو بهدست میآید. بنابراین ولتاژ مرجع جدید بهصورت زیر تعریف میشود:

$$\left|V_{0i}^{new}\right| = \left|V_{0i}\right| + \left|\Delta V_{i}\right| \tag{YT}$$

در این روش ضریب افتی برای کنترل توان راکتیو بهطور بههنگام تنظیم میشود. به اینصورت که علاوهبر تغییر ولتاژ مرجع، حداقل ولتاژ خروجی هر DG نیز تغییر میکند

$$\left|V_{i\min}^{new}\right| = \left|V_{i\min}\right| + k_{vi} \left|S_{i\max}\right| \tag{14}$$

در تعیین ضریب افتی باید به افت ولتاژ روی امپدانس مجازی هم توجه شود [۳۶]. بنابراین ضریب افتی کنترل Q-V بهصورت زیر اصلاح می شود:

$$D_{qi}^{new} = \frac{V_{0i}^{new} - V_{i\min}^{new} - I_{o\max} \left| Z_{vi} \right|}{Q_{0i} - Q_{i\max}}$$
(Y Δ)

با افزایش ولتاژ مرجع و همچنین اصلاح ضریب افتی، ولتاژ شین بار به مقدار نامی بازیابی میشود. در شکل ۷ روش کنترلی پیشنهادی بهمنظور تعیین ولتاژ مرجع نشان داده شده است.

۲-۲- مرحله ۲: حلقه کنترل امپدانس مجازی

در این مقاله از امپدانس مجازی مختلط استفاده شده که شامل اندوکتانس مجازی و مقاومت مجازی است. حلقه امپدانس مجازی بهمنظور کاهش جریان چرخشی و کنترل مجزای بین توانهای اکتیو و راکتیو و از مقاومت مجازی بهمنظور بهبود میرایی سیستم استفاده شده است.



همانطور که در شکل ۸ نشان داده شده است، افت ولتاژ امپدانس مجازی مطابق رابطه (۲۶) از ولتاژ مرجع تولیدشده مرحله اول کاسته میشود.

$$V_{ref} = V_0^{new} - Z_v i_0 \tag{(YY)}$$

روشهای مختلفی برای محاسبه افت ولتاژ امپدانس مجازی وجود دارد. در [۲۱] از مشتق جریان برای محاسبه افت ولتاژ روی اندوکتانس

مجازی (*vir* = $R_v.io + sL_v$ io) استفاده کرده است که استفاده از مشتق جریان سبب نویز فرکانس بالا می شود و برای رفع آن از یک فیلتر استفاده کرده است. اما در [۳۷] بهجای sL_v از $y\omega L_v$ استفاده و بهمنظور کنترل بهتر از قاب مرجع ساکن $\alpha\beta$ استفاده شده است و جریان شبکه به این قاب مرجع ساکن تبدیل می شوند (یعنی $\alpha_{\beta} = o = 0$) بنابراین افت ولتاژ امپدانس مختلط مجازی در محور $\alpha\beta$ به صورت زیر خواهد بود که در شکل ۹ نشان داده شده است [۳۸]:

$$\begin{aligned} V_{\nu\alpha} + jV_{\nu\beta} &= (R_{\nu} + j\omega L_{\nu})(i_{0\alpha} + ji_{o\beta}) \\ V_{\nu\alpha} &= R_{\nu}.i_{0\alpha} - \omega L_{\nu}i_{o\beta} \\ V_{\nu\beta} &= R_{\nu}.i_{0\beta} + \omega L_{\nu}i_{0\alpha} \end{aligned} \tag{7A}$$



شکل ۸: بلوک دیاگرام کنترلکننده امپدانس مجازی

۳-۳- مرحله ۳: حلقههای کنترل ولتاژ و جریان

شکل موج مرجع ولتاژ با استفاده از روش افتی پیشنهادی بهدست میآید سپس به حلقه کنترل امپدانس مجازی داده شده و نتیجه آن به حلقه کنترل ولتاژ وارد میشود. کنترلکننده ولتاژ در قاب مرجع ساکن *αβ* بوده و از کنترلکننده تناسبی رزونانسی *PR* استفاده میشود که تابع انتقال آن بهصورت زیر است[۳۹]:

$$G_{V}(s) = k_{pv} + \frac{2k_{iv}\omega_{c}s}{s^{2} + 2\omega_{c}s + \omega_{0}^{2}}$$
(79)



شکل ۹: بلوک دیاگرام محاسبه افت ولتاژ امپدانس مجازی

PR که در آن k_{pv} ضریب تناسبی و k_{iv} ضریب رزونانسی کنترل کننده pr ولتاژ است و ω_c هم فرکانس قطع برای کنترل پهنای باند رزونانسی استفاده می شود.

جریان خروجی اینورتر با خروجی کنترلکننده ولتاژ مقایسه شده و سپس به کنترلکننده جریان داده میشود. کنترلکننده جریان مشابه

ولتاژ از یک کنترل کننده PR تشکیل شده که تابع انتقال آن بهصورت زیر است:

$$G_{I}(s) = k_{pi} + \frac{2k_{iI}\omega_{c}s}{s^{2} + 2\omega_{c}s + \omega_{0}^{2}}$$
(7.)

که در آن k_{Pi} ضریب تناسبی و ki ضریب رزونانسی کنترلکننده PR جریان است. خروجی کنترلکننده جریان به PWM داده میشود.

۴- نتایج حاصل از شبیهسازی روش پیشنهادی

روش پیشنهادی با استفاده از سیمولینک مطلب برای یک شبکه با دو DG که در شکل ۱۰ نشان داده شده، شبیهسازی شده است. پارامترهای سیستم در جدول ۱ نشان داده شدهاند. برای ارزیابی روش پیشنهادی حالتهای مختلفی بررسی شده و با روش کنترل افتی متداول مقایسه شده است.



شکل ۱۰: ریزشبکه تحت مطالعه با دو واحد DG

جدول ۱: پارامترهای ریزشبکه با ۲ واحد DG به همراه مقادیر آنها

| | پارامترها | مقدا | | | |
|------------------------------------|--|------------------------------|--|--|--|
| نماد | كميت | للعدار | | | |
| V_{dc} | ولتاژ لينک DC | ۱۷۰ | | | |
| \mathbf{V}_0 | ولتاژ نامی خط شبکه (rms) | ۱۰۴ V | | | |
| V_{min} | حداقل ولتاژ ريزشبكه | ۹۸ V | | | |
| ω_0 | فرکانس نامی شبکه | $17 \cdot \pi \text{ rad/s}$ | | | |
| ω_{min} | حداقل فركانس ريزشبكه | 119π rad/s | | | |
| P _{max} ,Q _{max} | حداکثر توان DG ها | ۵۰۰W ، ۲۲۵ VAr | | | |
| C_{f} | كاپاسيتانس فيلتر خروجي اينورتر | ۴۰ μF | | | |
| $L_{\rm f}$ | اندوكتانس فيلتر خروجي اينورتر | ۵ mH | | | |
| R_{v1} | مقاومت مجازى واحد اول | $\cdot/$ ۱۹ Ω | | | |
| L_{v1} | اندوکتانس مجازی واحد اول | ۲mH | | | |
| R_{v2} | مقاومت مجازى واحد دوم | \cdot /bbd Ω | | | |
| L _{v2} | اندوكتانس مجازى واحد دوم | Y mH | | | |
| Z_{Line} | امپدانس خط | ۱ Ω ، ۰/۲۵ mH | | | |
| k _{pv} | ضريب تناسبي كنترلكننده PR ولتاژ | ٠/١۵ | | | |
| k _{iv} | ضریب انتگرالی کنترل کننده PR ولتاژ | ۹/۵ | | | |
| k _{pI} | ضریب تناسبی کنترلکننده PR جریان | ۹/۵ | | | |
| k _{iI} | ضریب انتگرالی کنترل کننده PR جریان | ۲۰۰/۵ | | | |
| ω_{f} | فركانس قطع براي محاسبه توان | ٣٠ | | | |
| ω _c | فرکانس قطع برای کنترل پهنای باند رزونانسی | ۱. | | | |

حالت ۱: ظرفیت دو DG باهم برابرند

در این حالت ظرفیت تولیدی توانهای اکتیو و راکتیو دو DG با هم برابر بوده و بار را به نسبت مساوی بین خود تقسیم میکنند. همچنین در این حالت امپدانسهای مجازی واحدهای اول و دوم با هم برابر هستند.

ریزشبکه ابتدا بهصورت متصل به شبکه با توانهای اکتیو و راکتیو بهرهبرداری می شود. در t = ۱ ثانیه ریزشبکه از شبکه جدا شده و در مد کاری مجزا از شبکه بهرهبرداری می شود.

در شکل ۱۱ مقدار RMS ولتاژهای بار و خروجی واحدهای اول و دوم را با روش پیشنهادی و روش کنترل افتی متداول نشان داده شده که با روش پیشنهادی ولتاژ خروجی DGها ۱۰۶/۸ ولت است که افت ولتاژ تخمینی روی امپدانس فیدر بهازای عبور توانهای اکتیو و راکتیو مولتاژ نامی اضافه شده تا ولتاژ بار در مقدار نامی به طور دقیق تنظیم شود (۱۰۴ ۷) در حالی که در روش کنترل افتی در حالت مجزا از شبکه، همان طور که در شکل ۱۱ – ب نشان داده شده، ولتاژ خروجی منابع در مقدار نامی تنظیم شده و ولتاژ بار به دلیل افت ولتاژ روی امپدانس فیدر یا خط توزیع با افت همراه است (۱۰۱ ۷). بنابراین با روش پیشنهادی افت ولتاژ روی امپدانس فیدر به درستی تخمین زده شده بدون اینکه میچ ارتباط مخابراتی بین منابع و نقطه اتصال مشتر ک وجود داشته باشد تا ولتاژ بار بحرانی در مقدار نامی به طور دقیق تنظیم شود.



پیشنهادی، ب) با روش کنترل افتی متداول

-20 L

0.2 0.4 0.6 0.8

در شکل ۱۲ و ۱۳ توانهای اکتیو و راکتیو تولیدی واحدها با روش پیشنهادی و روش کنترل افتی را نشان میدهد. چون ظرفیت تولیدی واحدها باهم برابر است پس باید توانهای اکتیو و راکتیو خروجی واحدها با هم برابر باشد که همان طور که در شکل ۱۲- الف نشان داده شده است، توان تولیدی اکتیو واحدها کاملاً با هم برابر است و در حدود ۲۷۵ وات برای هر DG می باشد که بخشی از آن مربوط به تلفات فیدرها میباشد و مابقی به بار داده میشود. با توجه به تنظیم دقیق ولتاژ در روش پیشنهادی، توان نامی به بار حساس داده می شود. اما در روش کنترل افتی بهدلیل افت ولتاژ روی امپدانس فیدر در حالت مجزا از شبکه و نتیجتاً کاهش ولتاژ بار، توان اکتیو دادهشده به آن از توان نامی بار کمتر خواهد بود. در شکل ۱۲ - ب توان اکتیو تولید منابع DG نشان داده شده که تولید هر واحد برابر با ۲۶۵ وات میباشد. همچنین بهطور مشابه می توان برای تقسیم توان راکتیو نیز این قضیه را مشاهده نمود که در شکل ۱۳ توانهای راکتیو تولیدی واحدها با روش پیشنهادی و روش کنترل افتی نشان داده شده است. در روش پیشنهادی تولید واحدها با هم برابر و در حدود ۱۳۵/۵ وار و در روش کنترل افتی که توليد واحدها در حدود ۱۳۰ وار است. در حالت كنترل افتى توان راكتيو دادهشده به بار بهدلیل افت ولتاژ بار کمتر بوده درحالیکه در روش پیشنهادی مقدار توان راکتیو دادهشده به بار برابر مقدار نامی می باشد.



شکل ۱۲ توان اکتیو تولیدی DG ها؛ الف). با روش پیشنهادی، ب) با روش افتی



(ب) شکل ۱۳ توان راکتیو تولیدی DG ها؛ الف) با روش پیشنهادی، ب) با روش افتی

time(S)

1.2 1.4 1.6 1.8

در ادامه تأثیر روش پیشنهادی در جریان چرخشی بین منابع بررسی شده است. تفاوت بین ولتاژهای خروجی واحدهای موازی سبب جریان چرخشی بین آنها میشود. امپدانس مجازی با افزایش در امپدانس خروجی منابع DG اینورتری سبب کاهش جریان چرخشی میشود و همچنین با تنظیم دقیق ولتاژهای خروجی منابع که سبب کاهش اختلاف بین ولتاژها میشود، سبب کاهش بیشتر جریان چرخشی میشود. در این مقاله با استفاده از امپدانس مجازی و حلقههای کنترل ولتاژ و جریان، جریان چرخشی بین منابع کاهش قابلملاحظهای داشته که در شکل ۱۴– الف نشان داده شده و با روش کنترل افتی متداول شکل ۱۴– ب مقایسه شده است.

حالت ۲: ظرفیت دو DG باهم برابر نیستند.

در این حالت ظرفیت واحد دوم کم تر از واحد اول و در حدود ۸۰ درصد واحد اول است و همچنین امپدانس خط واحد اول در این حالت کم تر است. در این حالت نتایج مربوط به روش پیشنهادی فقط ارائه گردیده است. 120



شکل ۱۴ جریان چرخشی بین منابع DG؛ الف) با روش پیشنهادی، ب) با روش کنترل افتی

در شکل ۱۵ مقدار RMS ولتاژ خروجی DG ها و همچنین ولتاژ بار نشان داده شده است که ولتاژ خروجی DGها در حدود ۱۰۶/۷ ولت میباشد که افت ولتاژ تخمینی روی امپدانس فیدر بهازای عبور توانهای اکتیو و راکتیو به ولتاژ نامی اضافه شده تا ولتاژ بار در مقدار نامی یعنی ۱۰۴ ولت تنظیم شود.

ظرفیت واحد دوم در حدود ۸۰ درصد واحد اول است. همان طور که در شکلهای ۱۶ و ۱۷ نشان داده شده توانهای اکتیو و راکتیو بار به طور دقیق بر اساس ظرفیت واحدها بین آنها تقسیم شده است. به طوری که تولید توان اکتیو واحد اول در حدود ۳۱۰ وات و تولید واحد دوم در حدود ۲۵۰ وات می باشد و همچنین تولید توان راکتیو واحد اول در حدود ۱۵۰ وار و واحد دوم در حدود ۱۲۰ وار می باشد.

بنابراین روش پیشنهادی برای حالتی که ظرفیت DGها باهم برابر نباشد هم بهدرستی عمل میکند که بیشتر مقالات با فرض برابری ظرفیتها نتایج خود را ارائه کردهاند.





شکل ۱۷: توان راکتیو مصرفی بار و توان راکتیو تولیدی واحدها

۵- ارزیابی روش پیشنهادی برای یک ریزشبکه با چهار DG به منظور ارزیابی روش پیشنهادی، یک شبکه با تعداد واحد تولید پراکنده بیشتر و ولتاژ شبکه فشار ضعیف بررسی گردیده است. این ریزشبکه چندباسه دارای چهار DG و دو بار میباشد که در شکل ۱۸ نشان داده شده است. پارامترهای سیستم به همراه مقادیر آنها در جدول ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱۸: دیاگرام تکخطی ریزشبکه با ۲ DG

جدول ۲: پارامترهای ریزشبکه با ۴ واحد DG به همراه مقادیر آنها

| | 3 | نماد | | مقدار | | | | | |
|---------|----------------------------|----------|---------------------|---------------------------------------|---|-----------|---------|-------------------|--|
| | | | | DG (45 | 1 & 2 KVA) | | D (3 | G 3 & 3 4 KVA) | |
| | V _{dc} | | | ۶ | ۶۲۰ | | | | |
| | \mathbf{V}_0 | | | ۳۸ | ۳۸۰ V | | | | |
| واحدهای | ω ₀ | | | ١٠٠π | $\cdots \pi$ rad/s | | | | |
| توليد | D _p | | | - ٩/٢ | $- \gamma/\gamma \delta \cdot 1 \cdot 1_{-k}$ | | | | |
| پراکنده | R _f | | | •/' | •/\Ω | | | | |
| | L _f | | ۱/۳۵ | ۱/۳۵ mH | | | | | |
| | C _f | | ۵۰ | ۵· μF | | | | | |
| | R _c | | ۲/ ۰ | •/٣ Ω | | | | | |
| | L _c | | ۰/۳۵ | ۰/۳۵ mH | | | | | |
| | k _{pv} | | •/ | ٠/٠٠٩ | | | | | |
| | k _{iv} | | ۱/۶ | ١/٢۵ | | | | | |
| | k _{pI} | | ١/ | ۵/۵ | | | | | |
| | k _{iI} | | ۵۰/۵ | | ۱۵۰/۵ | | | | |
| امپدانس | R _{v2} | | $\cdot/۱۹ \ \Omega$ | | ٠/١٩ Ω | | | | |
| مجازى | L_{v1} | | ۲mH | | ۲mH | | | | |
| | خط اول | | خط دوم | | خط سوم | | | | |
| خطوط | R_{L1} | •/ | ۲۳ | R _{L2} | ۰/۳۵ | R | L3 | ۰/۳۳ Ω | |
| | T | <u>(</u> | Ω | T | Ω | Т | | | |
| | L_{L1} | ۳ | ۱۸ ப | L_{L2} | 1744 | L | 4L3 | τιν μΗ | |
| یار ها | لات بار اول | | | 1 | μΠ | ەم | یار دوم | | |
| | P _{L1} w | | | · · · · · · · · · · · · · · · · · · · | | το/9 KW | | | |
| | Q _{L1} 7 5 | | • KVar | Q _{L2} | | ۲۲/۸ KVar | | | |

در شکل ۱۹ مقدار RMS ولتاژ بارهای بحرانی که به باسهای ۱ و ۳ متصل هستند را با استراتژی کنترلی پیشنهادی نشان داده که ولتاژ بارها بهطور دقیق در مقدار نامی تنظیم شده است (۳۸۰ ولت).



شکل ۱۹: مقدار rms ولتاژ بارهای شبکه با ۴ واحد تولید پراکنده







 V_{b2}

islanded microgrids with power-electronic interfaces," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 19, no.3, pp. 613-628, 2013.

- [8] 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.
- [9] Q. Shafiee, J. M. Guerrero and J. C. Vasquez, "Distributed Secondary Control for Islanded Microgrids-A Novel Approach," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 2, pp. 1018-1031, 2014.
- [10] 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 .pp. 562-578, 2010.
- [11] K. De Brabandere, B. Bolsens, J. Van den Keybus, A. Woyte, J. Driesen and R. Belmans, "A Voltage and Frequency Droop Control Method for Parallel Inverters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 22, no. 4, pp. 1107-1115, 2007
- [12] Y. Li, and Y. W. Li, "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.
- [13] L. Yan, and L. Yan, "Decoupled power control for an inverter based low voltage microgrid in autonomous operation," pp. 2490-2496, 2009.
- [14] J J. Au-Yeung, G. Vanalme, J. Myrzik, P. Karaliolios, M. Bongaerts, J. Bozelie and W. L. Kling, "Development of a voltage and frequency control strategy for an autonomous LV network with distributed generators," *Proceedings of the 44th International Universities Power Engineering Conference(UPEC)*, pp.1-5,2009.
- [15] C. K. Sao and P. W. Lehn, "Control and power management of converter fed microgrids," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 23, no. 3, pp. 1088-1098, 2008.
- [16] J. M. Guerrero, J. Matas, L. García De Vicuña, M. Castilla and J. Miret, "Decentralized control for parallel operation of distributed generation inverters using resistive output impedance," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, no. 2, pp. 994-1004, 2007.
- [17] J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, J. Matas, V. de, x00F, L. G. a and M. Castilla, "Hierarchical Control of Droop-Controlled AC and DC Microgrids; A General Approach Toward Standardization,", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 1, pp. 158-172, 2011.
- [18] J. M. Guerrero, J. Matas, D. Vicuna, L. García, M. Castilla and J. Miret, "Wireless-control strategy for parallel operation of distributed-generation inverters," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 53, no. 5, pp. 1461-1470, 2006
- [19] J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, J. Matas, M. Castilla and L. G. De Vicuňa, "Control strategy for flexible microgrid based on parallel line-interactive UPS systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 3, pp. 726-736, 2009.
- [20] J. M. Guerrero, L. Garcia de Vicuna, J. Matas, M. Castilla, and J. Miret, "Output Impedance Design of Parallel-

در شکل ۲۰ تقسیم توانهای اکتیو و راکتیو بین واحدهای تولید پراکنده را نشان میدهد. همانطور که در شکل ۲۰ نشان داده شده تولید توانهای اکتیو و راکتیو واحدهای اول و دوم نسبت به واحدهای سوم و چهارم بیشتر بوده که دلیل آن بیشتر بودن ظرفیت آنها میباشد. بنابراین روش پیشنهادی علاوه بر اینکه ولتاژ بارهای حساس را در مقدار نامی تنظیم نموده، توانهای اکتیو و راکتیو بارها را نیز بهطور دقیق بر اساس ظرفیت واحدها بین آنها تقسیم کرده است.

٦- نتیجهگیری

در این مقاله استراتژی کنترلی جدیدی برای منابع DG اینورتری پیشنهاد گردید. این استراتژی بهمنظور تنظیم دقیق ولتاژ بارهای بحرانی و تقسیم توانهای اکتیو و راکتیو بار بین منابع بر اساس ظرفیت آنها ارائه گردیده که دارای سه مرحله است. در مرحله ۱، افت ولتاژ روی امپدانس فیدر تخمین زده شده و به ولتاژ مرجع اضافه میشود. همچنین ضریب کنترل افتی V–Q بهصورت بههنگام اصلاح شده و افت ولتاژ روی تنظیم شود. در مرحله ۲، با حلقه کنترل امپدانس مجازی توانهای اکتیو و راکتیو بهطور مجزا از هم کنترل شده و جریان چرخشی بین منابع کاهش یافته است. در مرحله ۳ با بهکارگیری حلقههای کنترل ولتاژ و جریان توانهای اکتیو و راکتیو بین منابع تقسیم شده است. نتایج شبیهسازی برای دو ریزشبکه نشان داد که روش پیشنهادی روشی مؤثر برای تنظیم ولتاژ بارهای بحرانی در مقدار نامی و تقسیم شده است. نتایج

مراجع

- G. N. S. Diaf, M. Belhamel, M. Haddadi and A. Louche, "Design and techno-economical optimization for hybrid PV/wind system under various metrological conditions," *Journal of Applied Energy*, vol. 85, pp. 968-987, 2008.
- [2] A. Salam, A. Mohamed and Hannan, "Technical challenges on microgrids," *ARPN Journal of engineering* and applied sciences, vol. 3, no. 6, pp. 64-69, 2008.
- [3] E. Hossain, E. Kabalci, R. Bayindir and R. Perez, "Microgrid testbeds around the world: State of art," *Energy Conversion and Management*, vol. 86, no. 1, pp. 132-153, 2014.
- [4] M. C. Chandorkar, D. M. Divan and R. Adapa, "Control of parallel connected inverters in standalone AC supply systems", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 29, no. 1, pp. 136-143, 1993.
- [5] A. Bidram and A. Davoudi "Hierarchical structure of microgrids control system," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, no. 4, pp. 1963-1976, 2012.
- [6] N. Pogaku, M. Prodanovic and T. C. Green, "Modeling, analysis and testing of autonomous operation of an inverter-based microgrid," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 22, no. 2, pp. 613-625, 2007.
- [7] T. L. Vandoorn, J. D. M. De Kooning, B. Meersman and L. Vandevelde, "Review of primary control strategies for

Resources," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, no. 2, pp. 803-812, 2012.

- [30] O. Palizban and K. Kauhaniemi, "Hierarchical control structure in microgrids with distributed generation: Island and grid-connected mode," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 44, pp. 797-813, 2015.
- [31] A. Timbus, M. Liserre, R. Teodorescu, P. Rodriguez and F. Blaabjerg, "Evaluation of current controllers for distributed power generation systems," *IEEE Transactions* on *Power Electronics*, vol. 24, no. 3, pp. 654-664, 2009.
- [32] S.Rafiei, Application of distributed generation sources for micro-grid power quality enhancement, Msc thesis Queen's University, Canada, 2014.
- [33] D. N. Zmood and D. G. Holmes, "Stationary frame current regulation of PWM inverters with zero steady-state error," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 18, no. 3, pp. 814-822, 2003.
- [34] R. Teodorescu, F. Blaabjerg, M. Liserre and P. C. Loh, "Proportional-resonant controllers and filters for gridconnected voltage-source converters," *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, vol. 153 ano. 5, pp. 750-762, 2006.
- [35] Y. A. R. I. Mohamed and E. F. El-Saadany, "Adaptive Decentralized Droop Controller to Preserve Power Sharing Stability of Paralleled Inverters in Distributed Generation Microgrids," *IEEE Transactions on Power Electronics*,

vol. 23, no. 6, pp. 2806-2816, 2008.

- [36] L. Mihalache, "Paralleling control technique with no intercommunication signals for resonant controller-based inverters," vol. 3, pp. 1882-1889.
- [37] M. Savaghebi, A. Jalilian, J. C. Vasquez and J. M. Guerrero, "Secondary Control Scheme for Voltage Unbalance Compensation in an Islanded Droop-Controlled Microgrid," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, no. 2, pp. 797-807, 2012.
- [38] J. He and Y. W. Li, "Analysis and design of interfacing inverter output virtual impedance in a low voltage microgrid," *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp. 2857-2864.2010
- [39] Y. Li, D. M. Vilathgamuwa and P. C. Loh, "Microgrid power quality enhancement using a three-phase four-wire grid-interfacing compensator," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 41 ano. 6, pp. 1707-1719, 2005.

Connected UPS Inverters With Wireless Load-Sharing Control," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 52, no. 4, pp. 1126-1135, 2005

- [21] W. Yao, M. Chen, J. Matas, J. M. Guerrero and Z.-M. Qian, "Design and analysis of the droop control method for parallel inverters considering the impact of the complex impedance on the power sharing," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 2, pp. 576-588, 2011.
- [22] R. Moslemi and J. Mohammadpour, "Accurate reactive power control of autonomous microgrids using an adaptive virtual inductance loop," *Electric Power Systems Research*, vol. 129, pp. 142-149, 2015.
- [23] C. Lee, C .Chu and P. Cheng, "A new droop control method for the autonomous operation of distributed energy resource interface converters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 4, pp. 1980-1993, 2013.
- [24] J. Rocabert, A. Luna, F. Blaabjerg and P. Rodriguez, "Control of power converters in AC microgrids," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, no. 11, pp. 4734-4749, 2012.
- [25] A. Micallef, M. Apap, C. Spiteri-Staines, and J. M. Guerrero, "Secondary control for reactive power sharing in droop-controlled islanded microgrids," IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), pp. 1627-1633, 2012.

- [27] M. Golsorkhi and D. Lu, "A Control Method for Inverter-Based Islanded Microgrids Based on V-I Droop Characteristics," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. PP, no. 99, pp. 1-1, 2014.
- [28] A. Haddadi, A. Shojaei and B. Boulet, "Enabling high droop gain for improvement of reactive power sharing accuracy in an electronically-interfaced autonomous microgrid," *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp. 673-679,2011.
- [29] M. B. Delghavi and A. Yazdani, "A Unified Control Strategy for Electronically Interfaced Distributed Energy
 - زيرنويسها

- ² Point Common Coupling
- ³ Low Voltage
- ⁴ plug and play
- ⁵ Droop control method
- ⁶ Root-Mean-Square
- ⁷ Proportional Resonant

¹ Distributed Generation