



Computational Intelligence in Electrical Engineering
Vol. 14, No. 1, 2023
Research Paper

Accurate Reactive Power-Sharing Using Modified Droop Method Based on Virtual Impedance Control in the Islanded Microgrids

Monir Ashrafi¹, Mahdi Banjad ^{*2}, Ali Akbarzadeh Kalat ³, Ali Dastfan⁴

¹ Faculty of Electrical Engineerig, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

² Faculty of Electrical Engineerig, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

³ Faculty of Electrical Engineerig, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

⁴ Faculty of Electrical Engineerig, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

Abstract:

In the islanded microgrids, distributed energy sources are responsible for power-sharing, and accurate power-sharing is essential among these microgrids. Due to the mismatch of the physical impedance of power lines, poor reactive power-sharing is observed. Therefore, in this paper, the use of virtual impedance in the form of two methods of virtual positive impedance and virtual negative impedance is proposed to improve the accuracy of reactive power-sharing in a conventional droop controlled islanded microgrid. In this paper, in addition to presenting a controller to properly adjust the virtual impedance, the concept of virtual negative impedance is used to correct the effective impedance of the power supply line and improve the common bus voltage, and increase the output power of energy sources. To evaluate the proposed control methods, a test islanded microgrid is simulated in PSCAD/EMTDC software. The results show that both proposed methods have a good effect on the proper reactive power-sharing in the microgrid. In addition, the results show that the virtual negative impedance method can improve the common bus voltage and increase the output power of the source by reducing the effective line impedance.

Keywords: Negative Virtual Impedance, Positive Virtual Impedance, Inverter, Reactive Power Sharing, Islanded Microgrids.



This is an open access article under the CC BY-NC-ND/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



<https://doi.org/10.22108/isee.2022.131929.1531>

تقسیم صحیح توان راکتیو با روش افی بهبود یافته بر پایه کنترل امپدانس مجازی در

ریزشبکه‌های جزیره‌ای

منیر اشرفی^۱، مهدی بانژاد^{۲*}، علی کلات اکبرزاده کلات^۳، علی دستفان^۴

۱- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق - دانشگاه صنعتی شاهرود- شاهرود- ایران

ashrafi.monir@yahoo.com

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی برق - دانشگاه صنعتی شاهرود- شاهرود- ایران

m.banejad@shahroodut.ac.ir

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی برق - دانشگاه صنعتی شاهرود- شاهرود- ایران

akbarzadeh@shahroodut.ac.ir

۴- دانشیار، دانشکده مهندسی برق - دانشگاه صنعتی شاهرود- شاهرود- ایران

dastfan@shahroodut.ac.ir

چکیده: در ریزشبکه‌های جزیره‌ای، منابع انرژی پراکنده مسئول تقسیم توان‌اند و تقسیم صحیح توان در میان آنها امری مهم و ضروری تلقی می‌شود. زمانی که از روش افی متداول برای کنترل ریزشبکه استفاده می‌شود، مسئله تقسیم ضعیف توان راکتیو به دلیل عدم تطبیق امپدانس فیزیکی خطوط تغذیه اهمیت پیدا می‌کند؛ از این رو، در این مقاله استفاده از امپدانس مجازی در قالب دو روش امپدانس مثبت مجازی و امپدانس منفی مجازی به منظور بهبود صحت تقسیم توان راکتیو در یک ریزشبکه جزیره‌ای کنترل شده با روش افی متداول پیشنهاد می‌شود. در این مقاله، علاوه بر ارائه کنترل کننده‌ای با هدف تنظیم مناسب امپدانس مجازی، از مفهوم امپدانس منفی مجازی برای اصلاح امپدانس مؤثر خط تغذیه و به منظور بهبود ولتاژ باس مشترک و افزایش توان خروجی منابع انرژی استفاده می‌شود. به منظور ارزیابی روش‌های کنترلی پیشنهادی، یک ریزشبکه جزیره‌ای نمونه در نرم‌افزار PSCAD/EMTDC شبیه‌سازی می‌شود. در نهایت، نتایج نشان می‌دهند هر دو روش ارائه شده دارای اثری مطلوب بر عملکرد تقسیم توان با منابع متعدد در ریزشبکه‌اند. علاوه بر این، روش امپدانس منفی مجازی با کاهش امپدانس مؤثر خط باعث بهبود ولتاژ باس مشترک و افزایش توان خروجی منابع می‌شود.

واژه‌های کلیدی: امپدانس مثبت مجازی، امپدانس منفی مجازی، اینورتر، تقسیم توان راکتیو، ریزشبکه جزیره‌ای.

۱- مقدمه

انرژی تجدیدپذیر و پیشرفت روزافزون فناوری الکترونیک قدرت، کاربرد منابع انرژی تجدیدپذیر یا ریز منابع مانند سلول‌های سوختی، صفحات خورشیدی، توربین‌های بادی و غیره در شبکه‌های قدرت رو به افزایش است. منابع انرژی پراکنده معمولاً با مبدل‌های الکترونیک قدرت از قبیل اینورتر به شبکه قدرت متصل می‌شوند [۱-۳].

با افزایش نفوذ تولیدات پراکنده مبتنی بر اینورتر و به منظور عملکرد بهتر منابع انرژی پراکنده و تحقق تقسیم

به دلیل رشد منابع انرژی پراکنده^۱ (DER) مبتنی بر

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۰/۰۹/۲۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۲/۲۱

نام نویسنده مسئول: مهدی بانژاد

نشانی نویسنده مسئول: ایران، شاهرود، دانشگاه صنعتی شاهرود- دانشکده مهندسی برق

یکسانی در تغذیه بار سهم باشند [۱۰].

روش‌های کنترل تقسیم توان به‌طور کلی به دو گروه تقسیم می‌شوند. گروه نخست، روش کنترل رئیس - مرئوس^۵ است که برای تقسیم توان در سیستم‌های تغذیه توان بدون وقفه^۶ توسعه داده می‌شود. گروه دوم، روش کنترل افتی^۷ است که برای کنترل تقسیم توان در بین واحدهای تولید پراکنده در ریزشبه جزیره‌ای مناسب‌تر است [۱۱، ۱۲].

کنترل مشخصه افتی متداول منابع انرژی پراکنده از جمله روش‌هایی است که امکان اتصال موازی منابع در ریزشبه و همچنین، کنترل تقسیم توان در حالت عملکرد جزیره‌ای را میسر می‌سازد [۱، ۱۳] و قادر است با مهیاساختن ویژگی وصل و اجرای^۸ واحدها، قابلیت اطمینان سیستم را افزایش دهد [۷-۹].

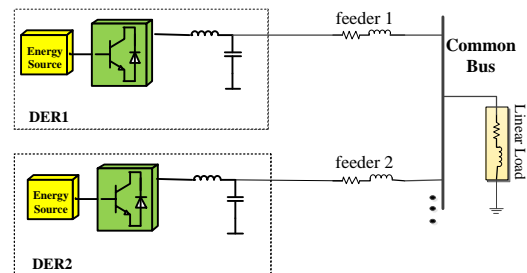
مزیت اصلی روش افتی متداول که رفتار ژنراتورهای سنکرون را تبعیت می‌کند، این است که برای کنترل به خطوط ارتباطی نیاز ندارد و کنترل‌کننده بر مبنای اندازه‌گیری محلی ولتاژ و فرکانس و تنظیم مشخصه افتی، وظیفه خود را اجرا می‌کند [۷-۹، ۱۴]؛ از این رو، کنترل افتی، کنترل بی‌سیم^۹ یا خودمختار^{۱۰} نیز نامیده می‌شود؛ در نتیجه، در یک ریزشبه که در استفاده از خطوط ارتباطی برای مبادله اطلاعات به دلیل موقعیت فیزیکی واحدها یا اغتشاشات محدودیت دارد، روش افتی یک انتخاب مناسب برای کنترل تقسیم توان است [۱۳، ۱۵].

استفاده از روش افتی متداول معایبی از جمله مصالحه بین صحت تقسیم توان راکتیو و انحراف ولتاژ و نیز وابستگی زیاد به امپدانس خروجی اینورتر را دارا است [۱۶، ۱۷]؛ بنابراین، مسئله تقسیم توان راکتیو در ریزشبه‌های جزیره‌ای توجه ویژه‌ای را به خود جلب می‌کند [۱۸].

اگرچه کنترل مشخصه افتی متداول توان اکتیو - فرکانس ($P-f$)، به دلیل ثابت بودن فرکانس حالت دائمی در سراسر ریزشبه قادر است تقسیم صحیح توان اکتیو را فراهم کند، به دلیل محلی بودن متغیر ولتاژ، تقسیم توان راکتیو به‌واسطه کنترل مشخصه افتی متداول توان راکتیو - ولتاژ ($Q-E$) به‌درستی انجام نمی‌شود؛ زیرا عملکرد روش افتی توان راکتیو - ولتاژ تحت تأثیر میزان فواصل منابع

صحیح توان، کنترل هماهنگ اینورترها در قالب یک ریزشبه^۱ ارائه می‌شود [۱، ۴]. ریزشبه به‌صورت مجموعه‌ای از منابع انرژی پراکنده (که معمولاً مبتنی بر مدل‌های الکترونیک هستند) ذخیره‌سازهای انرژی و بارها تعریف می‌شود [۴].

یکپارچه‌سازی منابع انرژی پراکنده در قالب ریزشبه امکان تغذیه بارها را به‌صورت محلی فراهم می‌کند. در مقایسه با سیستم‌های توزیع توان سنتی، ریزشبه قادر است در دو حالت عملکردی متصل به شبکه برق سراسری یا مستقل از آن عمل کند. ریزشبه در زمان خاموشی شبکه برق سراسری یا ملاحظات دیگر نظیر مسائل فیزیکی، اقتصادی و یا بروز خطا می‌تواند در حالت عملکرد جزیره‌ای بارهای محلی و بحرانی را به‌طور پیوسته تغذیه کند؛ بنابراین، ریزشبه جزیره‌ای می‌تواند دسترس‌پذیری، قابلیت اطمینان و کیفیت توان تغذیه‌شده به مصرف‌کننده‌ها را بهبود بخشد [۵-۸].



شکل (۱): ریزشبه جزیره‌ای نمونه مبتنی بر اینورتر

شکل ۱ یک ریزشبه جزیره‌ای نمونه مبتنی بر اینورتر را نشان می‌دهد که هر منبع انرژی پراکنده از طریق یک اینورتر و یک خط تغذیه^۳ به باس مشترک^۴ (CB) ریزشبه متصل می‌شود.

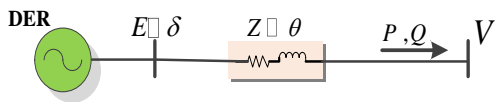
در حالت عملکرد جزیره‌ای، باید تقسیم توان با منابع انرژی پراکنده مختلف به‌صورت صحیح انجام شود [۶، ۷، ۹]؛ از این رو، یکی از مسائل مهم و چالش‌برانگیز مطرح‌شده در کنترل ریزشبه‌های جزیره‌ای، کنترل تقسیم توان در بین منابع تولید پراکنده است. تقسیم صحیح توان به این صورت تعریف می‌شود که هر منبع باید متناسب با مقدار نامی توان خود به تغذیه بار پردازد؛ بنابراین، اگر منابع دارای مقدار نامی توان یکسان باشند، هر یک از منابع باید به میزان

می‌شود. تحلیل عملکرد دو روش با استفاده از تحلیل ریاضی انجام می‌شود. ویژگی‌های مهم این روش‌ها این است که به تخمین امپدانس و همچنین، تخمین بار نیازی ندارند و علاوه بر این، ضرورتی به استفاده از ارتباط مخابراتی با پهنای باند بزرگ وجود ندارد.

در ادامه مقاله، در بخش ۲ به بررسی مسئله تقسیم توان راکتیو پرداخته می‌شود. در بخش ۳ مفهوم امپدانس مجازی در دو روش امپدانس مثبت مجازی و امپدانس منفی مجازی معرفی و بررسی می‌شود و همچنین، کنترل‌کننده‌ای برای تنظیم آنها ارائه می‌شود. تحلیل نتایج شبیه‌سازی در بخش ۴ ارائه می‌شود. در نهایت، در بخش ۵ نتیجه‌گیری بیان می‌شود.

۲- مسئله تقسیم توان راکتیو

معادله پخش توان اکتیو P و توان راکتیو Q در سیستم توان مانند شکل ۲، به ترتیب به صورت معادلات (۱) و (۲) است [۲۵].



شکل (۲): مدار معادل یک منبع انرژی پراکنده مبتنی بر اینورتر

$$P = \frac{V}{Z} [(E \cos \delta - V) \cos \theta + E \sin \theta \sin \delta] \quad (1)$$

$$Q = \frac{V}{Z} [(E \cos \delta - V) \sin \theta - E \cos \theta \sin \delta] \quad (2)$$

که E و V به ترتیب ولتاژ خروجی اینورتر و ب‌اس بار هستند و δ اختلاف زاویه بین ولتاژ خروجی اینورتر و ب‌اس بار است. Z و θ به ترتیب اندازه و زاویه امپدانس خروجی (شامل امپدانس خط تغذیه و امپدانس فیلتر اینورتر) منبع انرژی هستند.

در شکل ۲، با فرض اینکه امپدانس خروجی منبع انرژی اندوکتیو باشد و زاویه توان نیز خیلی کوچک باشد، توان اکتیو به زاویه توان وابسته است؛ در حالی که توان راکتیو عمدتاً تحت تأثیر اختلاف دامنه ولتاژ است [۷]. این وابستگی و استفاده از روش اف‌تی متداول با شرط بزرگ‌بودن اندوکتانس خروجی واحدها معتبر و صحیح است؛ در حالی

انرژی تا مرکز بار و متعاقباً مقدار امپدانس خطوط، امپدانس فیلتر یا اختلاف پارامترهای اینورترهای منابع است و در این شرایط، ولتاژهای خروجی اینورترهای منابع دقیقاً یکسان نیستند [۷، ۸].

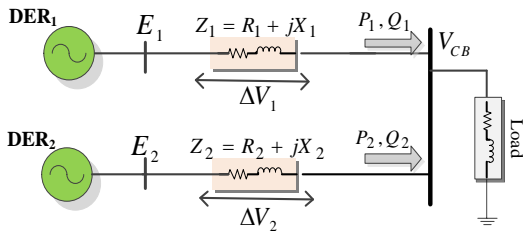
تقسیم توان راکتیو به دلیل افت ولتاژهای نامساوی به‌واسطه امپدانس‌های نامساوی خطوط تغذیه تحت تأثیر است؛ بنابراین، در مراجع متعدد مفهوم امپدانس مجازی به‌منظور تحقق تقسیم صحیح توان معرفی می‌شود. امپدانس مجازی سهم مهمی برای بهبود صحت تقسیم توان راکتیو دارد و همچنین، می‌تواند با جبران عدم تطبیق امپدانس‌های فیزیکی خطوط و با اصلاح ولتاژ خروجی مرجع (به‌واسطه فیدبک جریان خروجی اینورتر) این مهم را محقق سازد [۲، ۷، ۸، ۱۹، ۲۰].

در مرجع [۲۱] از ایده امپدانس مجازی برای حل مشکل تقسیم توان به‌صورت غیرمستقیم بهره‌برده شده است؛ به طوری که عبارات جبران‌سازی به روابط مربوط به مشخصه اف‌تی افزوده شده است که می‌تواند تأثیرات امپدانس مجازی را تولید کند و در نتیجه، به اثرات نابرابری امپدانس خطوط در خطای تقسیم توان غلبه کند. در مرجع [۲۲] یک استراتژی جدید مبتنی بر کنترل تطبیقی برای تنظیم پارامترهای امپدانس مجازی ارائه شده است که خطای تقسیم توان را به‌طور مؤثری کاهش می‌دهد. در مرجع [۲۳] طرح کنترلی برای بهبود تقسیم توان در شرایط مختلف ریزش‌بکه اعم از ریزش‌بکه‌های مقاومتی و نیز اندوکتیو ارائه شده است که با افزودن یک مسیر پیشخور مبتنی بر امپدانس مجازی در حلقه کنترل جریان موجب بهبود اغتشاشات جریان می‌شود.

در مرجع [۲۴] با در نظر گرفتن تأثیرات مقاومتی و اندوکتیو امپدانس خطوط، از ایده امپدانس مجازی برای کاهش جریان گردشی و نیز کاهش خطای تقسیم توان راکتیو بهره‌برده شده است.

این مقاله نیز برای حل چالش تقسیم نادرست توان راکتیو در ریزش‌بکه از امپدانس مجازی استفاده می‌کند. نوآوری‌های مقاله به‌صورت کاربرد امپدانس مجازی به دو روش (۱) امپدانس مثبت مجازی و (۲) امپدانس منفی مجازی، با هدف کاهش عدم تطبیق امپدانس‌های خطوط تغذیه منابع انرژی و در نتیجه، بهبود تقسیم توان راکتیو بیان

در این مقاله برای مطالعه، ریزشبه‌های جزیره‌ای شامل دو منبع انرژی پراکنده (DER_1 و DER_2) مطابق شکل ۱ در نظر گرفته می‌شود. شکل ۴ مدار معادل ریزشبه را به منظور بررسی و تحلیل مسئله تقسیم توان راکتیو نشان می‌دهد.



شکل (۴): مدار معادل ریزشبه جزیره‌ای نمونه

با توجه به فاصله الکتریکی متفاوت منابع تا بار متصل شده در ب‌اس مشترک، امپدانس خطوط تغذیه واحدها نیز متفاوت است که هر یک از آنها با Z_1 (امپدانس خط تغذیه واحد اول (DER_1)) و Z_2 (امپدانس خط تغذیه واحد دوم (DER_2)) مشخص می‌شوند.

مسئله تقسیم توان راکتیو به واسطه تحلیل افت ولتاژ روی امپدانس خطوط تغذیه (Z_2 و Z_1) واحدها بررسی می‌شود؛ بنابراین، افت ولتاژ روی امپدانس خط تغذیه اول (ΔV_1) و افت ولتاژ روی امپدانس خط تغذیه دوم (ΔV_2) به ترتیب با استفاده از دو رابطه تقریبی (۵) و (۶) به دست می‌آید [۱۸].

$$\Delta V_1 \approx \frac{R_1 P_1 + X_1 Q_1}{E_0} \quad (5)$$

$$\Delta V_2 \approx \frac{R_2 P_2 + X_2 Q_2}{E_0} \quad (6)$$

که R_1, X_1, R_2, X_2 به ترتیب مقاومت و راکتانس خط تغذیه اول و دوم هستند. P_1, Q_1, P_2, Q_2 به ترتیب توان اکتیو و راکتیو خروجی واحدهای اول و دوم هستند.

اگر امپدانس خطوط تغذیه متفاوت باشد، به دنبال آن افت ولتاژ روی خطوط و همچنین، ولتاژهای خروجی اینورترها نیز متفاوت است که در نتیجه این عدم تطابق، تقسیم توان راکتیو به گونه‌ای انجام می‌شود که واحد با امپدانس خط تغذیه کوچک‌تر و با فاصله الکتریکی کمتر

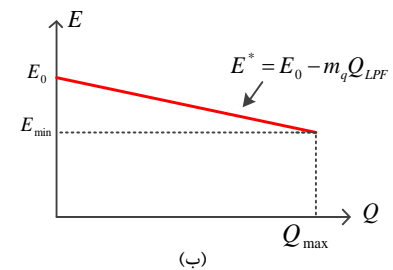
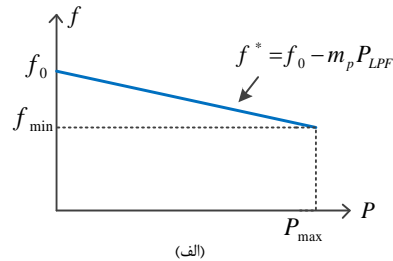
که امپدانس خط تغذیه ممکن است به گونه‌ای باشد که نتوان از مقاومت و راکتانس آن صرف‌نظر کرد؛ بنابراین، محدودیت استفاده از روش افی متداول در ریزشبه‌های دارای خطوط تغذیه با امپدانس مختلط با به‌کارگیری امپدانس مجازی برطرف می‌شود [۱۳، ۲۵].

روش افی متداول به‌عنوان کنترل‌کننده توان در کنترل محلی پیاده‌سازی می‌شود و ولتاژ خروجی مرجع را تولید می‌کند. روش افی متداول بر این اصل استوار است که فرکانس و دامنه ولتاژ به ترتیب می‌توانند برای کنترل پخش توان اکتیو و راکتیو به کار گرفته شوند [۱۳]. مشخصه افی متداول فرکانس و ولتاژ به ترتیب به صورت روابط (۱) و (۲) هستند [۱۸].

$$f^* = f_0 - m_p P_{LPF} \quad (3)$$

$$E^* = E_0 - m_q Q_{LPF} \quad (4)$$

که f_0 و f^* به ترتیب فرکانس نامی و فرکانس مرجع، E_0 و E^* به ترتیب دامنه ولتاژ نامی و ولتاژ مرجع اند. m_p و m_q به ترتیب شیب مشخصه افی $P-f$ و $Q-E$ نشان داده شده در شکل‌های ۳-الف و ۳-ب هستند. P_{LPF} و Q_{LPF} توان اکتیو و راکتیو اندازه‌گیری شده در خروجی واحدها هستند که از فیلتر پایین گذر (LPF) عبور داده می‌شوند [۱۸]؛ بنابراین، با استفاده از روش افی متداول، ولتاژ مرجع به صورت $V_{droop} = E^* \sin(2\pi f^* t)$ برای کنترل اینورترها حاصل می‌شود.



شکل (۳): (الف): مشخصه افی $P-f$ ، (ب): مشخصه افی $Q-E$

تغذیه است که این روش نیز در کنترل کننده منبع انرژی پراکنده پیاده سازی می شود [۲۷, ۱۸]

۳- اصلاح روش افی با امپدانس مجازی

همان طور که در مقدمه نیز بیان شد تقسیم صحیح توان اکتیو با کنترل مشخصه افی متداول فرکانس و با تنظیم مناسب شیب این مشخصه به خوبی محقق می شود [۲۸]؛ اما تقسیم صحیح توان راکتیو با کنترل مشخصه افی متداول و لذا به دلیل عدم تطبیق امپدانس خطوط تغذیه به عنوان یک چالش مطرح است [۲۷].

به منظور سهولت استفاده از روش کنترل افی متداول در ریزشبه‌های با خطوط تغذیه مختلط و حل مسئله عدم تطبیق امپدانس خطوط تغذیه، معمولاً یک امپدانس رابط مجازی یا فیزیکی در خط تغذیه منبع در نظر گرفته می شود. اضافه کردن امپدانس سری در خروجی واحد به منظور تثبیت و اصلاح امپدانس خروجی است [۲۹, ۳۰]؛ بنابراین، امپدانس مجازی بدون اتصال فیزیکی در خروجی اینورتر قرار می گیرد [۳۱, ۳۲]؛ زیرا اضافه کردن امپدانس سری به صورت فیزیکی به دلیل سنگین و حجیم بودن آن، اندازه و هزینه تجهیزات را افزایش می دهد [۱۷, ۳۳].

امپدانس مجازی برای اصلاح مشخصه امپدانس خط تغذیه منبع انرژی پراکنده، در خروجی منبع و در مسیر فیدبک جریان خروجی آن قرار می گیرد و با افزودن امپدانس های مجازی با اندازه و زوایای مختلف در فیدبک جریان خروجی، امپدانس معادل خط تغذیه (شامل امپدانس فیزیکی خط تغذیه و امپدانس مجازی)، اندازه و زوایای امپدانس مختلفی را در بر می گیرد [۳۴, ۳۵]؛ از این رو، امپدانس مجازی برای اهداف مختلفی استفاده می شود که از جمله این اهداف، کنترل مستقل توان های اکتیو و راکتیو، تحقق تقسیم صحیح توان، افزایش ظرفیت انتقال توان و غیره هستند [۲, ۱۹, ۲۰, ۲۷].

با توجه به معادلات پخش توان (۱) و (۲)، توان حقیقی و راکتیو به طور معکوس متناسب با مقدار امپدانس هستند و همچنین، طبق روابط (۳) و (۴)، افت ولتاژ روی خطوط به طور مستقیم متناسب با مقدار امپدانس است. این

نسبت به بار سهم بیشتری در تغذیه بار داشته باشد [۲۶]. به عبارت دیگر، تقسیم توان راکتیو به صورت نادرست انجام می شود که بیان ریاضی این مطلب در رابطه (۷) تشریح می شود.

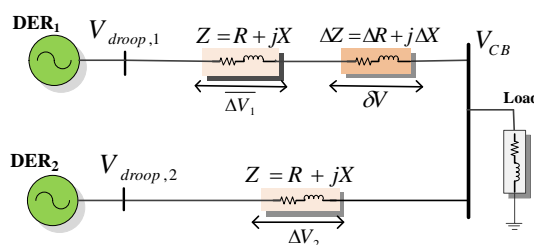
$$Z_1 \neq Z_2 \rightarrow \Delta V_1 \neq \Delta V_2 \rightarrow Q_1 \neq Q_2 \quad (7)$$

در شکل ۴ با فرض $Z_1 > Z_2$ می توان نتیجه گرفت $\Delta V_1 > \Delta V_2$ است و در این صورت، مقاومت و راکتانس خط تغذیه واحد اول به ترتیب به صورت رابطه (۸) و (۹) در نظر گرفته می شود.

$$R_1 = R_2 + \Delta R \quad (8)$$

$$X_1 = X_2 + \Delta X \quad (9)$$

با در نظر گرفتن $X_2 = X$ و $R_2 = R$ ، مدار معادل ریزشبه نشان داده شده در شکل ۴ با ملاحظه عدم تطبیق امپدانس خطوط تغذیه ($\Delta Z = \Delta R + j\Delta X$) به صورت شکل ۵ نمایش داده می شود.



شکل (۵): مدار معادل ریزشبه با در نظر گرفتن عدم تطبیق امپدانس خطوط

بنابراین، افت ولتاژ محاسبه شده برای خط تغذیه اول در رابطه (۵) به صورت رابطه (۱۰) در نظر گرفته می شود.

$$\Delta V_1 \approx \frac{(R + \Delta R)P_1 + (X + \Delta X)Q_1}{E_0} \quad (10)$$

$$= \frac{RP_1 + XQ_1}{E_0} + \frac{\Delta RP_1 + \Delta XQ_1}{E_0} = \overline{\Delta V_1} + \delta V$$

یک راه حل برای حذف عدم تطبیق افت ولتاژ (δV) و در نتیجه، تحقق تقسیم صحیح توان راکتیو، استفاده از امپدانس مجازی و تطبیق دادن امپدانس های فیزیکی خطوط

بر اساس مدار معادل نشان‌داده در شکل ۶، مقاومت معادل (R_{eq}) و راکتانس معادل (X_{eq}) خط تغذیه دوم به ترتیب به صورت رابطه (۹) و (۱۰) است.

$$R_{eq} = R_{vir}^+ + R \quad (11)$$

$$X_{eq} = X_{vir}^+ + X \quad (12)$$

که R_{vir}^+ و X_{vir}^+ به ترتیب مقاومت و راکتانس مثبت مجازی هستند. با توجه به رابطه (۱۱) و (۱۲)، امپدانس مؤثر خط با استفاده از امپدانس مثبت مجازی افزایش می‌یابد؛ بنابراین، با توجه به رابطه معکوس توان‌ها با امپدانس (که در معادلات پخش توان (۱) و (۲) مشهود است)، با افزایش امپدانس مؤثر خط توان اکتیو و راکتیو خروجی واحدها کاهش می‌یابد.

بنابراین، افت ولتاژ روی امپدانس معادل خطوط تغذیه واحد اول ($\Delta V_{eq,1}$) و واحد دوم ($\Delta V_{eq,2}$) به ترتیب مطابق روابط (۱۳) و (۱۴) هستند.

$$V_{droop,1} = \overline{\Delta V_1} + \delta V + V_{CB} \quad (13)$$

$$\Delta V_{eq,1} = V_{droop,1} - V_{CB} = \overline{\Delta V_1} + \delta V$$

$$V_{droop,2} = \delta V^+ + \Delta V_2 + V_{CB} \quad (14)$$

$$\Delta V_{eq,2} = V_{droop,2} - V_{CB} = \delta V^+ + \Delta V_2$$

که $V_{droop,1}$ و $V_{droop,2}$ به ترتیب ولتاژ مرجع به دست آمده از روش ایتی متداول برای واحد اول و واحد دوم هستند. δV^+ و V_{CB} به ترتیب ولتاژ باس مشترک و افت ولتاژ روی امپدانس مثبت مجازی هستند و δV عدم تطبیق افت ولتاژ خطوط است. با توجه به روابط (۱۳) و (۱۴) جبران عدم تطبیق افت ولتاژ روی امپدانس خطوط تغذیه با استفاده از امپدانس مثبت مجازی به صورت رابطه (۱۵) انجام می‌شود.

$$\overline{\Delta V_1} + \delta V = \delta V^+ + \Delta V_2 \quad (15)$$

با توجه به اینکه امپدانس مجازی باید عدم تطبیق امپدانس خطوط را جبران کند، افت ولتاژ روی امپدانس مجازی نیز به صورت رابطه (۱۶) محاسبه می‌شود.

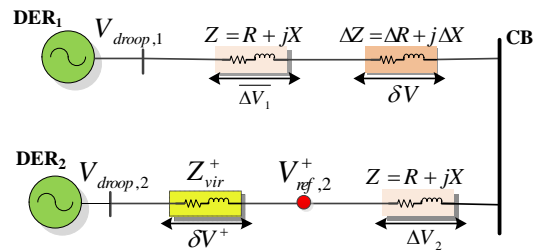
$$\delta V^+ = \delta V \rightarrow \frac{R_{vir}^+ P_2 + X_{vir}^+ Q_2}{E_0} = \frac{\Delta R P_2 + \Delta X Q_2}{E_0} \quad (16)$$

وابستگی‌ها برای کنترل مؤثر امپدانس مجازی استفاده می‌شوند؛ بنابراین، با اصلاح امپدانس فیزیکی خطوط با کنترل امپدانس مجازی، علاوه بر کنترل تقسیم توان، امکان کنترل توان خروجی منابع انرژی و همچنین، کنترل افت ولتاژ روی خطوط و متعاقباً ولتاژ باس مشترک در ریزشکبه میسر می‌شود [۳۶].

در این مقاله برای مدل‌سازی، پیاده‌سازی و کنترل امپدانس مجازی به منظور بهبود تقسیم توان راکتیو دو معیار در نظر گرفته می‌شود: (۱) انتخاب واحد با امپدانس خط تغذیه بزرگ‌تر به عنوان واحد مرجع و پیاده‌سازی امپدانس مثبت مجازی به صورت $R_{vir}^+ = +\Delta R$ و $X_{vir}^+ = +\Delta X$ (۲) انتخاب واحد با امپدانس خط تغذیه کوچک‌تر به عنوان واحد مرجع و پیاده‌سازی امپدانس منفی مجازی به صورت $-R_{vir}^- = \Delta R$ و $-X_{vir}^- = \Delta X$ به ترتیب اختلاف مقاومت و راکتانس خط تغذیه واحدها هستند. این دو معیار مبنایی برای طراحی امپدانس مجازی به صورت امپدانس مثبت و منفی در این مقاله در نظر گرفته می‌شوند که هر دو روش با توجه به رابطه (۷) شرط $Q_1 = Q_2$ را برآورده می‌کنند که بیان‌کننده تقسیم مساوی توان راکتیو در میان واحدها است.

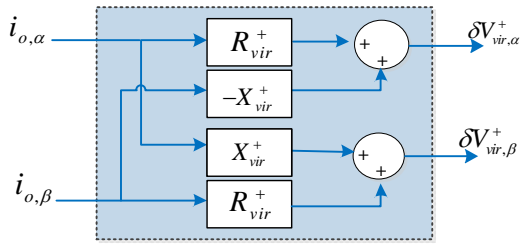
۳-۱- روش اول: امپدانس مثبت مجازی

با انتخاب واحد اول در شکل ۵ (که دارای امپدانس خط تغذیه بزرگ‌تر است) به عنوان واحد مرجع برای محاسبه عدم تطبیق بین امپدانس خطوط تغذیه، مدار معادل ریزشکبه برای پیاده‌سازی امپدانس مثبت مجازی به صورت شکل ۶ در نظر گرفته می‌شود.



شکل (۶): مدار معادل ریزشکبه با در نظر گرفتن امپدانس مثبت

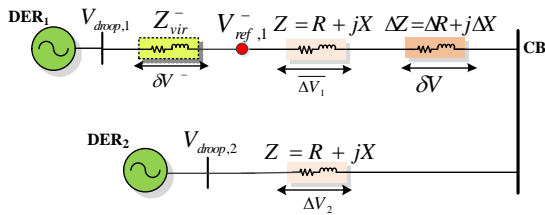
مجازی



شکل (۷): مدل امپدانس مثبت مجازی استفاده شده در روش پیشنهادی

۲-۳- روش دوم: امپدانس منفی مجازی

به طور کلی امپدانس منفی مجازی برای خنثی کردن اثر امپدانس خط تغذیه و همچنین، جبران عدم تطبیق امپدانس های خطوط تغذیه استفاده می شود. مفهوم امپدانس منفی در سیستم تحریک ژنراتور سنکرون، ادوات FACTS و همچنین، فیلترهای اکتیو هیبرید برای جبران بخشی از امپدانس به کار برده می شود [۳۸, ۳۹].



شکل (۸): مدار معادل ریزشکبه با در نظر گرفتن امپدانس منفی مجازی

با توجه به شکل ۵، اگر امپدانس واحد دوم با امپدانس خط تغذیه کوچک تر برای محاسبه عدم تطبیق امپدانس خطوط تغذیه به عنوان واحد مرجع انتخاب شود، مدار معادل ریزشکبه اصلاح شده با امپدانس منفی مجازی به صورت شکل ۸ است.

با توجه به شکل ۸، مقاومت و راکتانس معادل خط تغذیه واحد اول با در نظر گرفتن امپدانس منفی مجازی به ترتیب به صورت روابط (۱۹) و (۲۰) است.

$$R_{eq} = -R_{vir}^- + R_2 + \Delta R \quad (19)$$

$$X_{eq} = -X_{vir}^- + X_2 + \Delta X \quad (20)$$

در رابطه (۱۵) اگر $\delta V^+ = \delta V$ باشد (همان گونه که در رابطه (۱۶) داده شده است)، آنگاه δV و در نتیجه، اثر عدم تطبیق امپدانس خطوط تغذیه (ΔZ) روی تقسیم توان راکتیو جبران می شود؛ این جبران می تواند به واسطه اصلاح ولتاژ مرجع حاصل از روش افتی متداول صورت گیرد [۱۸] که رابطه (۱۷) ولتاژ مرجع اصلاح شده با استفاده از امپدانس مثبت مجازی را ارائه می کند. این روش می تواند با اصلاح ولتاژ مرجع حاصل از روش افتی تقسیم، توان راکتیو را بهبود بخشد.

$$\begin{aligned} V_{ref,2}^+ &= V_{droop,2} - \delta V^+ \\ &= V_{droop,2} - Z_{vir}^+ i_o \\ &= V_{droop,2} - (R_{vir}^+ + jX_{vir}^+) i_o \end{aligned} \quad (17)$$

که i_o جریان خروجی اینورتر است. عبارت $Z_{vir}^+ i_o$ ، افت ولتاژی را به دلیل امپدانس مثبت مجازی ایجاد می کند و کم کردن این مقدار از ولتاژ حاصل از روش افتی باعث کاهش مقدار ولتاژ مرجع نهایی می شود؛ بنابراین، یکی از معایب روش امپدانس مثبت مجازی، کاهش ولتاژ بآس بار است.

همانند [۲, ۳۷]، در این مقاله نیز کنترل منابع انرژی پراکنده در مرجع ساکن^{۱۱} انجام می شود؛ بنابراین، مدل امپدانس مثبت مجازی شامل مقاومت و اندوکتانس در این مرجع به صورت رابطه (۱۸) است که شکل ۷ نیز مدل آن را به صورت بلوک دیاگرام نشان می دهد.

$$\begin{bmatrix} \delta V_{vir,\alpha}^+ \\ \delta V_{vir,\beta}^+ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{vir} & -X_{vir} \\ X_{vir} & R_{vir} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{o,\alpha} \\ i_{o,\beta} \end{bmatrix} \quad (18)$$

که $\delta V_{vir,\alpha}^+$ و $\delta V_{vir,\beta}^+$ ، $i_{o,\alpha}$ و $i_{o,\beta}$ به ترتیب افت ولتاژ ایجاد شده با امپدانس مثبت مجازی و جریان خروجی اینورتر در راستای محور α و β مرجع ساکن اند.

$$\begin{aligned} V_{ref,1}^- &= V_{droop,1}^- - \delta V^- \\ &= V_{droop,1}^- - Z_{vir}^- i_o \\ &= V_{droop,1}^- - (-R_{vir}^- - X_{vir}^-) i_o \end{aligned} \quad (26)$$

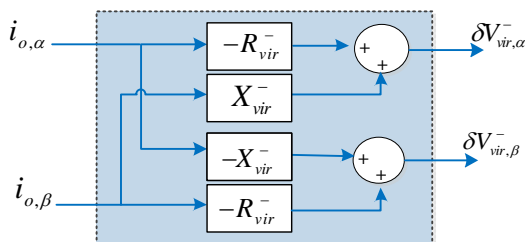
با توجه به روابط (۲۱) تا (۲۶)، این روش قادر است اثر δV^- ناشی از عدم تطبیق امپدانس‌های خطوط تغذیه را روی تقسیم توان راکتیو جبران کند.

با توجه به رابطه (۲۶)، هرچه مقدار Z_{vir}^- افزایش یابد، مقدار ولتاژ مرجع نهایی نیز افزایش می‌یابد؛ زیرا این امپدانس دارای مقدار منفی است؛ در نتیجه، این روش می‌تواند با اصلاح ولتاژ مرجع حاصل از روش افتی علاوه بر بهبود تقسیم توان راکتیو، ولتاژ ب‌ا‌س مشترک را به دلیل کاهش امپدانس معادل خط افزایش دهد و همچنین، با کاهش امپدانس مؤثر خط تغذیه، توان خروجی منابع انرژی را افزایش دهد [۲، ۴۰].

مدل امپدانس منفی مجازی در مرجع ساکن به صورت رابطه (۲۷) است و این مدل شامل مقاومت منفی مجازی و اندوکتانس منفی مجازی است. شکل ۹ پیاده‌سازی این نوع امپدانس مجازی در کنترل‌کننده محلی منبع را نشان می‌دهد.

$$\begin{bmatrix} \delta V_{vir,\alpha}^- \\ \delta V_{vir,\beta}^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_{vir}^- & X_{vir}^- \\ -X_{vir}^- & -R_{vir}^- \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{o,\alpha} \\ i_{o,\beta} \end{bmatrix} \quad (27)$$

که $\delta V_{vir,\alpha}^-$ و $\delta V_{vir,\beta}^-$ به ترتیب افت ولتاژ تولیدی توسط امپدانس منفی مجازی در راستای محور α و β مرجع ساکن هستند.



شکل (۹): مدل امپدانس منفی مجازی استفاده‌شده در روش پیشنهادی

در نهایت، از تحلیل‌های ریاضی انجام‌شده در این بخش استخراج می‌شود که در مقایسه با روش امپدانس مثبت مجازی (روش اول)، استفاده از روش امپدانس منفی مجازی

که R_{vir}^- و X_{vir}^- مقاومت و راکتانس منفی مجازی‌اند. در صورتی که از امپدانس منفی مجازی برای حذف اثر عدم تطبیق امپدانس خطوط تغذیه استفاده شود، ولتاژ خروجی واحد اول به صورت رابطه (۲۱) است.

$$V_{droop,1}^- = \delta V^- + \overline{\Delta V}_1 + \delta V + V_{CB} \quad (21)$$

با این فرض که δV^- توسط افت ولتاژ ایجادشده امپدانس منفی مجازی حذف می‌شود یعنی: $\delta V^- = -\delta V$ ، افت ولتاژ روی امپدانس معادل خط تغذیه اول طبق رابطه (۲۲) به دست می‌آید.

$$\Delta V_{eq,1} = V_{droop,1}^- - V_{CB} = \overline{\Delta V}_1 + V_{CB} \quad (22)$$

افت ولتاژ روی امپدانس معادل خط تغذیه دوم نیز به صورت رابطه (۲۳) است.

$$\begin{aligned} V_{droop,2}^- &= \Delta V_2 + V_{CB} \\ \Delta V_{eq,2} &= V_{droop,2}^- - V_{CB} = \Delta V_2 \end{aligned} \quad (23)$$

بنابراین، با توجه به شکل ۸، با استفاده از امپدانس منفی مجازی جبران عدم تطبیق افت ولتاژ به صورت رابطه (۲۴) بیان می‌شود.

$$\overline{\Delta V}_1 + \delta V + \delta V^- = \Delta V_2 \quad (24)$$

همچنین، افت ولتاژ روی امپدانس منفی مجازی با هدف جبران عدم تطبیق افت ولتاژهای خطوط به صورت رابطه (۲۵) است.

$$\delta V^- = -\delta V \rightarrow \frac{R_{vir}^- P_1 + X_{vir}^- Q_1}{E_0} = -\frac{\Delta R P_1 + \Delta X Q_1}{E_0} \quad (25)$$

در صورتی که در رابطه (۲۴)، $\delta V^- = -\delta V$ باشد (همان‌طور که در رابطه (۲۵) بیان شد)، آنگاه δV^- و در نتیجه، عدم تقسیم صحیح توان راکتیو ناشی از اثر عدم تطبیق امپدانس خطوط تغذیه (ΔZ) جبران می‌شود؛ به همین منظور، رابطه (۲۶) ولتاژ مرجع حاصل از روش افتی متداول را نشان می‌دهد که به واسطه پیاده‌سازی امپدانس منفی مجازی در خروجی منبع تولید پراکنده اصلاح می‌شود.

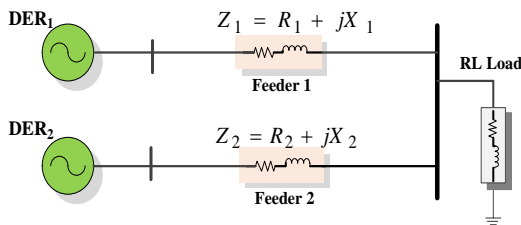
$$R_{vir}^+ = X_{vir}^+ = \frac{\Delta R P_2 + \Delta X Q_2}{P_1 + Q_1} \quad (28)$$

$$-R_{vir}^- = -X_{vir}^- = \frac{\Delta R P_1 + \Delta X Q_1}{P_1 + Q_1} \quad (29)$$

منظور از بهینه‌سازی مصرف انرژی انتخاب الگوها، اتخاذ و به‌کارگیری روش‌ها و سیاست‌هایی در مصرف انرژی الکتریکی است. ساختمان‌های مسکونی بخش مهمی از مصرف‌کنندگان انرژی الکتریکی به شمار می‌آیند. ورود تکنولوژی سیستم مدیریت هوشمند به ساختمان‌های مسکونی، تا حدودی مصرف انرژی الکتریکی را بهینه کرده است.

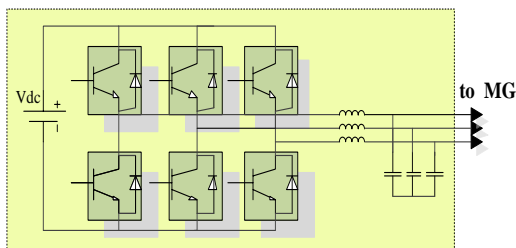
۴- شبیه‌سازی

در این بخش، به‌منظور ارزیابی کارایی دو روش امیدانس مثبت مجازی و امیدانس منفی مجازی و همچنین، ارزیابی نحوه عملکرد تقسیم توان در دو روش مذکور، یک ریزشبه‌جزیره‌ای سه‌فاز در نرم‌افزار PSCAD/EMTDC شبیه‌سازی می‌شود.



شکل (۱۰): ساختار ریزشبه‌جزیره‌ای شبیه‌سازی شده

با توجه به شکل ۱۰، ریزشبه‌جزیره تحت شبیه‌سازی شامل دو منبع تولید پراکنده اینورتری با مشخصات و ظرفیت توان‌های نامی یکسان است (مشخصات در جدول ۳ در پیوست داده شده است).



شکل (۱۱): ساختار منبع انرژی پراکنده مبتنی بر اینورتر استفاده‌شده در شبیه‌سازی

(روش دوم) به افت ولتاژ کمتر روی امیدانس معادل خطوط تغذیه منجر می‌شود. این مطلب یک مزیت برای روش دوم برای کنترل امیدانس مجازی به شمار می‌آید؛ زیرا در این روش به دلیل افت ولتاژ کمتر روی خطوط، توان خروجی واحدها در مقایسه با روش اول، بیشتر و همچنین، تلفات نیز کمتر می‌شود. علاوه بر این، ولتاژ ب‌ا‌س مشترک نیز در روش امیدانس منفی مجازی نسبت به روش افتی متداول و روش امیدانس مثبت مجازی بیشتر است.

۳-۳- کنترل‌کننده امیدانس مجازی

همان‌طور که در بخش‌های قبل نیز بیان شد با پیاده‌سازی روش امیدانس مجازی انتظار می‌رود با یکسان‌شدن امیدانس معادل خطوط تغذیه منابع تولید پراکنده متعدد، تقسیم توان راکتیو به‌صورت صحیح انجام شود. برای کنترل مناسب امیدانس مجازی و محقق‌شدن هدف مدنظر، در این بخش کنترل‌کننده‌ای برای تنظیم مقدار امیدانس مجازی ارائه می‌شود.

اساس این روش کنترلی بدین صورت است که یکی از منابع تولید پراکنده به‌عنوان واحد مرجع انتخاب می‌شود و دیگر منابع (Q_n) باید توان آن واحد (Q^*) را به‌عنوان توان مرجع دنبال کنند. با توجه به رابطه (۲۸)، در این کنترل‌کننده از یک انتگرال‌گیر ساده با بهره k و ثابت زمانی τ ، برای تنظیم متغیر امیدانس مجازی (k_{adj}) استفاده می‌شود که در این رابطه s متغیر لاپلاس است. به عبارت دیگر، خطای توان راکتیو (Q_{mis}) با این کنترل‌کننده کنترل می‌شود.

$$k_{adj} = \frac{k}{\tau s} (Q_n - Q^*) = \frac{k}{\tau s} Q_{mis} \quad (27)$$

هدف این کنترل‌کننده، تنظیم مستقیم توان راکتیو نیست؛ بلکه k_{adj} را در مقداری معین برای جبران اثر عدم تطبیق امیدانس بر صحت تقسیم توان راکتیو تنظیم می‌کند. بنابراین، با به‌کارگیری این کنترل‌کننده و با استفاده از روابط (۱۶) و (۲۵)، مقاومت و راکتانس مجازی در دو روش امیدانس مثبت مجازی و امیدانس منفی مجازی به‌صورت روابط (۲۸) و (۲۹) به دست می‌آیند.

ثانیه، روش افقی متداول فعال است و روش امپدانس مثبت مجازی در ثانیه ۱ اعمال می‌شود. در بخش ۲ و با استفاده از معادلات (۴)-(۷) و معادله (۱۰) اثبات شد تقسیم توان راکتیو با به کارگیری روش افقی متداول تحت تأثیر عدم تطبیق امپدانس خطوط تغذیه به صورت نادرست انجام می‌شود که این مطلب در فاصله زمانی ۰ تا ۱ ثانیه در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود.

با آغاز عملکرد روش امپدانس مثبت مجازی در فاصله زمانی دوم (۱ تا ۲ ثانیه) تقسیم توان راکتیو به طور چشمگیری بهبود می‌یابد و واحدها به میزان برابری در تقسیم توان راکتیو بار شرکت می‌کنند. به عبارتی، روش امپدانس مثبت مجازی به اصلاح عملکرد روش افقی متداول و کاهش خطای تقسیم توان راکتیو (ناشی از موقعیت فیزیکی متفاوت واحدها و به عبارتی عدم تطبیق امپدانس خطوط) منجر می‌شود. اثر امپدانس مثبت مجازی بر تقسیم توان راکتیو در تحلیل‌های ریاضی انجام شده در زیربخش ۳-۱ بررسی شد.

۴-۲- روش امپدانس منفی مجازی

با توجه به زیربخش ۳-۲، امپدانس مجازی می‌تواند به صورت منفی در خروجی منبع دارای امپدانس فیزیکی بزرگ‌تر قرار گیرد.

در ریزشکبه مطالعه شده، امپدانس خط تغذیه DER_1 دارای مقدار بزرگ‌تری است؛ از این رو، امپدانس منفی مجازی در خروجی DER_1 قرار می‌گیرد تا از این طریق، امپدانس معادل خط تغذیه کاهش یابد و عدم تطبیق امپدانس خطوط تغذیه منابع تضعیف شود.

شکل‌های ۱۴ و ۱۵ به ترتیب عملکرد تقسیم توان اکتیو و راکتیو با استفاده از روش امپدانس منفی مجازی را نشان می‌دهند. همان‌طور که در بخش ۲ و زیر بخش ۴-۱ نیز عنوان شد و همچنین با توجه به شکل ۱۴، روش افقی متداول فرکانس قادر است تقسیم صحیح توان اکتیو را فراهم آورد؛ در حالی که تقسیم توان راکتیو با استفاده از روش افقی متداول ولتاژ (فاصله زمانی ۰ تا ۱ ثانیه در شکل ۱۵) به درستی انجام نمی‌شود.

همان‌گونه که در قسمت مقدمه نیز ذکر شد هر دو منبع تولید پراکنده باید به میزان یکسانی در تغذیه بار شرکت کنند. درخور ذکر است به منظور ارزیابی بهتر دو روش، امپدانس‌های خطوط تغذیه متفاوت در نظر گرفته می‌شوند.

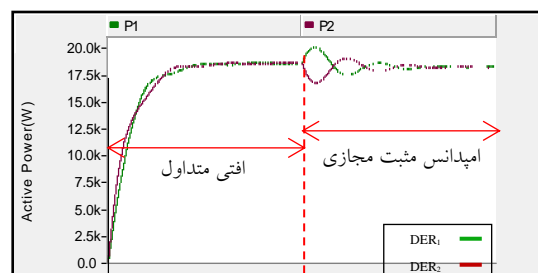
شکل ۱۱ ساختار کامل یک منبع انرژی پراکنده در ریزشکبه را نشان می‌دهد که یک فیلتر LC بین خروجی پل IGBT و خط تغذیه منبع واقع می‌شود و منبع انرژی اولیه نیز یک منبع ولتاژ ثابت فرض می‌شود.

با توجه به روش‌های پیشنهادی، شبیه‌سازی به صورت مواردی انجام می‌شود که در زیر بخش‌های ۴-۱، ۴-۲ و ۴-۳ و ۴-۴ بیان خواهد شد.

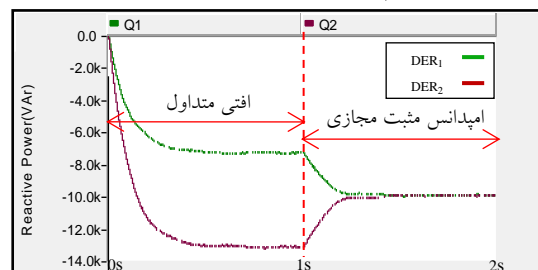
۴-۱- روش امپدانس مثبت مجازی

با توجه به زیربخش ۳-۱، هدف از این زیربخش، بررسی عملکرد تقسیم توان اکتیو و راکتیو با روش امپدانس مثبت مجازی است.

با توجه به بخش ۲ و شکل ۱۲، با استفاده از روش افقی متداول فرکانس تقسیم توان اکتیو همواره به صورت صحیح انجام می‌شود.



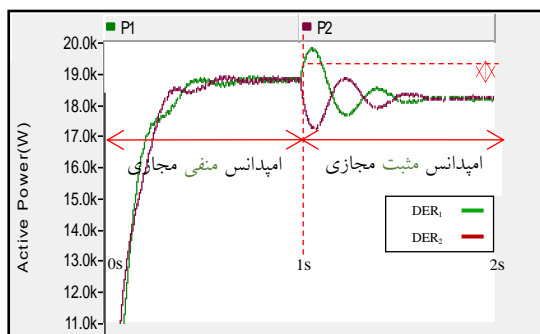
شکل (۱۲): تقسیم توان اکتیو با روش امپدانس مثبت مجازی



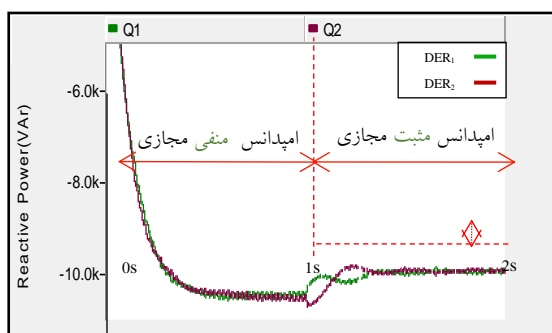
شکل (۱۳): تقسیم توان راکتیو با روش امپدانس مثبت مجازی

با توجه به شکل ۱۳، در ابتدا و در فاصله زمانی ۰ تا ۱

می‌شود. از شکل ۱۷ این نتیجه استنباط می‌شود که اصلاح روش افی متداول با استفاده از دو روش مذکور به تقسیم صحیح توان راکتیو منجر می‌شود.

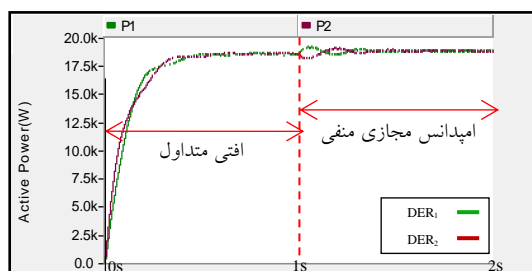


شکل (۱۶): تقسیم توان اکتیو با دو روش امپدانس مثبت مجازی و امپدانس منفی مجازی

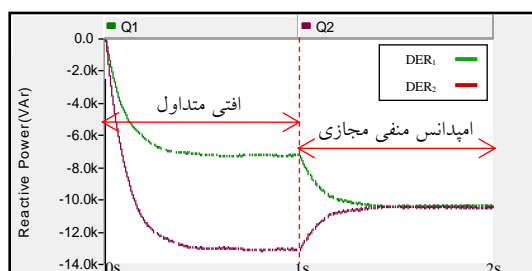


شکل (۱۷): تقسیم توان راکتیو با دو روش امپدانس مثبت مجازی و امپدانس منفی مجازی

با توجه به شکل‌های ۱۶ و ۱۷، این نتیجه استنباط می‌شود که میزان توان اکتیو و راکتیو خروجی منابع در دو روش متفاوت است. دلیل این امر این‌گونه تشریح می‌شود که با استفاده از روش امپدانس منفی مجازی، امپدانس کل خط تغذیه کاهش می‌یابد (با توجه به معادلات (۱۹) و (۲۰)) و متعاقباً افت ولتاژ روی امپدانس خط کاهش می‌یابد (با توجه به معادلات (۲۲) و (۲۳))؛ بنابراین، میزان توان تولیدی با منابع افزایش می‌یابد؛ در حالی که این موضوع در روش امپدانس مثبت مجازی برعکس است؛ زیرا با استفاده از این روش، امپدانس معادل خطوط تغذیه منابع انرژی پراکنده افزایش می‌یابد.



شکل (۱۴): تقسیم توان اکتیو با روش امپدانس منفی مجازی



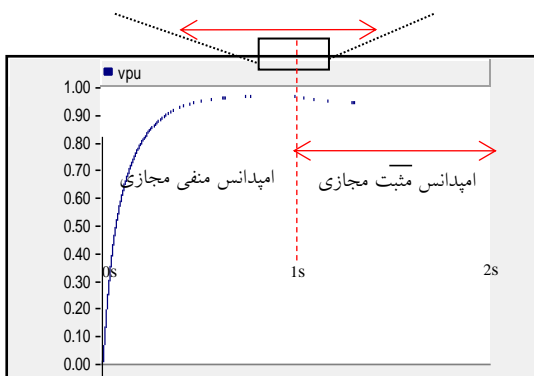
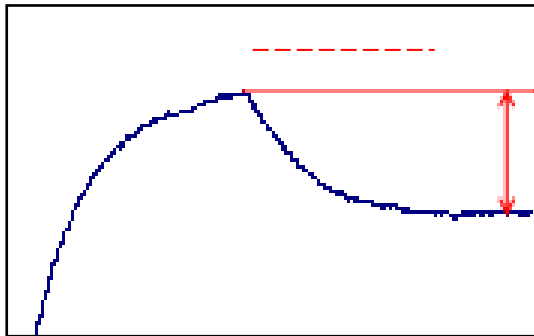
شکل (۱۵): تقسیم توان راکتیو با روش امپدانس منفی مجازی

با توجه به شکل ۱۵ و طبق معادلات ارائه شده (معادلات (۱۹) تا (۲۷)) در زیربخش ۳-۲، در ثانیه ۱ با پیاده‌سازی روش امپدانس منفی مجازی در خروجی منبعی که دارای امپدانس خط تغذیه بزرگ‌تری است، عدم تطبیق امپدانس دو خط تغذیه حذف می‌شود و در نتیجه، تقسیم صحیح توان راکتیو با منابع محقق می‌شود و عملکرد تقسیم توان راکتیو با روش افی متداول اصلاح می‌شود.

۴-۳- تقسیم توان با استفاده از دو روش امپدانس مثبت مجازی و امپدانس منفی مجازی

در این قسمت به منظور مشاهده و مقایسه عملکرد تقسیم توان اکتیو و راکتیو با دو روش امپدانس مثبت مجازی و امپدانس منفی مجازی، روش امپدانس مثبت مجازی در فاصله زمانی ۰ تا ۱ ثانیه فعال است و در ثانیه ۱ روش امپدانس مثبت مجازی، غیرفعال و روش امپدانس منفی مجازی، فعال می‌شود.

شکل‌های ۱۶ و ۱۷ به ترتیب عملکرد تقسیم توان اکتیو و راکتیو با دو روش مذکور را نشان می‌دهند. با استناد به تئوری ارائه شده در بخش ۳، از شکل ۱۶ می‌توان دریافت با استفاده از هر دو روش، تقسیم صحیح توان اکتیو میسر



شکل (۱۸): ولتاژ باس مشترک با دو روش امپدانس مثبت

مجازی و امپدانس منفی مجازی

۴-۴- تغییر بار

در این بخش، برای ارزیابی عملکرد تقسیم توان راکتیو با به‌کارگیری روش‌های امپدانس مثبت مجازی و امپدانس منفی مجازی، تغییر پله‌ای معینی در بار در نظر گرفته می‌شود؛ بنابراین، قسمت مقاومتی امپدانس بار به مقدار ۴ اهم تغییر داده می‌شود که فاصله زمانی ۰/۷۵ تا ۲ ثانیه در شکل‌های ۱۹ و ۲۰ بیان‌کننده این تغییر است. با استفاده از کنترل‌کننده پیشنهاد شده در زیربخش ۳-۳، مقاومت و راکتانس مجازی برای پاسخ به تغییر بار تنظیم می‌شود و با وجود این تغییر، تقسیم صحیح توان راکتیو همچنان ادامه می‌یابد.

جدول (۱): توان خروجی منابع (کیلووات)

امپدانس مثبت مجازی	امپدانس منفی مجازی	
۱۸/۱	۱۸/۸	توان اکتیو
۹/۹۵	۱۰/۵	توان راکتیو

در نتیجه، امپدانس منفی مجازی علاوه بر حذف اثر عدم تطبیق امپدانس خطوط تغذیه بر تقسیم توان راکتیو در ریزشبه، قادر است بخشی از امپدانس خطوط تغذیه را خنثی کند و از این طریق، توان اکتیو و راکتیو تولیدی با واحدها افزایش می‌یابد. میزان توان اکتیو و راکتیو خروجی منابع با استفاده از دو روش امپدانس مثبت مجازی و امپدانس منفی مجازی به صورت جدول ۱ است.

با توجه به بخش ۱-۳ و ۲-۳ و با استفاده از روابط ریاضی نیز اثبات شد روش امپدانس منفی مجازی در مقایسه با روش امپدانس مثبت مجازی دارای مزیت است؛ زیرا با امپدانس منفی مجازی میزان امپدانس مؤثر خط تغذیه کاهش می‌یابد که به کاهش افت ولتاژ روی امپدانس معادل خط تغذیه و در نتیجه، افزایش ولتاژ باس مشترک منجر می‌شود. برای نمایش این مطلب، همان‌گونه که از شکل ۱۸ مشاهده می‌شود، در فاصله زمانی ۰ تا ۱ ثانیه روش امپدانس منفی مجازی و در فاصله زمانی ۱ تا ۲ ثانیه امپدانس مثبت مجازی اعمال می‌شود. با فعال‌شدن امپدانس مثبت مجازی، ولتاژ باس مشترک تقریباً به اندازه ۰,۰۳ پریونیت کاهش می‌یابد. جدول ۲ مقادیر ولتاژ باس را در دو روش مذکور ارائه می‌کند.

جدول (۲): تغییرات ولتاژ باس مشترک (پریونیت)

امپدانس مثبت مجازی	امپدانس منفی مجازی	
۰/۹۴	۰/۹۷	ولتاژ (V_{CB})

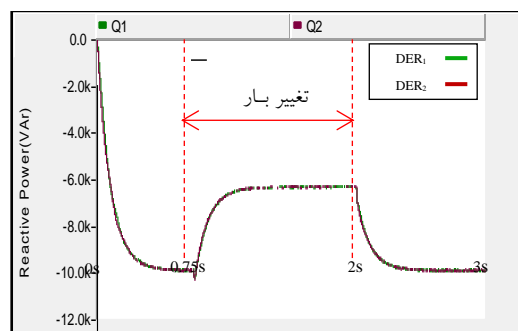
۵- نتیجه گیری

این مقاله با استفاده از مفهوم امیدانس مجازی به دو روش امیدانس مثبت مجازی و امیدانس منفی مجازی، صحت تقسیم توان راکتیو در ریزشبهه جزیره‌ای کنترل‌شده با روش افتی متداول را بهبود بخشید. در روش امیدانس منفی مجازی با نظر به اینکه اثر امیدانس فیزیکی خط تغذیه تا اندازه‌ای خنثی شد، توان خروجی منابع انرژی پراکنده و ولتاژ باس مشترک در مقایسه با روش امیدانس مثبت مجازی بیشتر شد. دو روش نامبرده با شبیه‌سازی یک ریزشبهه جزیره‌ای نمونه در نرم‌افزار PSCAD/EMTDC ارزیابی شدند و نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان دادند روش امیدانس مجازی قادر است در قالب دو روش امیدانس مثبت مجازی و امیدانس منفی مجازی تقسیم صحیح توان راکتیو در ریزشبهه را محقق سازد. روش‌های ارائه‌شده در این مقاله با تنظیم صحیح متغیر تعیین‌کننده مقاومت و راکتانس مجازی در پاسخگویی به تغییر بار ریزشبهه نیز توانمندند.

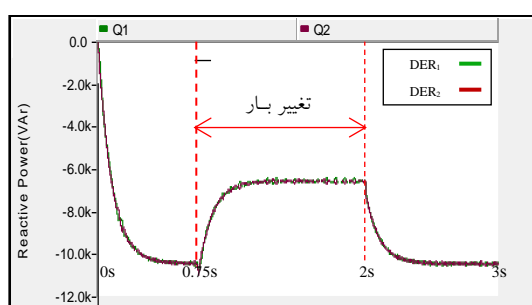
ضمایم

جدول (۳): مشخصات ریزشبهه

مشخصات ریزشبهه	
سلف فیلتر	۰/۶ میلی هانری
خازن فیلتر	۳۰ میکرو فاراد
فرکانس سوئیچ زنی	۱۰ کیلوهرتز
فرکانس نامی	۵۰ هرتز
ولتاژ منبع انرژی اولیه	۶۵۰ ولت
ولتاژ نامی	۲۳۰ ولت
خط تغذیه ۱	$0.1 + j0.314$ اهم
خط تغذیه ۲	$0.05 + j0.157$ اهم
امیدانس بار	$3 + j1.57$ اهم
کنترل‌کننده افتی	
بهره مشخصه افتی ولتاژ	۰/۰۱ ولت/کیلووار
بهره مشخصه افتی فرکانس	۰/۰۲۵ هرتز/کیلووات
امیدانس مثبت مجازی	
مقاومت	۰/۰۵ اهم
اندوکتانس	۱/۷ میلی هانری
بهره انتگرال‌گیر	۰/۰۰۵
امیدانس منفی مجازی	
مقاومت	۰/۰۸۵ اهم
اندوکتانس	۰/۳ میلی هانری
بهره انتگرال‌گیر	-۰/۰۰۵



شکل (۱۹): اثر تغییر بار بر تقسیم توان راکتیو در روش امیدانس مثبت مجازی



شکل (۲۰): اثر تغییر بار بر تقسیم توان راکتیو در روش امیدانس منفی مجازی

۴-۵- تحلیل نتایج

در این قسمت یک مقایسه در جدول ۳، بین روش‌های پیشنهادی و روش افتی متداول صورت گرفته است. همچنان که این جدول نشان می‌دهد خطای توان راکتیو در روش‌های پیشنهادی نسبت به روش افتی متداول کاهش پیدا کرده است. خطای ولتاژ در روش امیدانس منفی مجازی امیدانس نسبت به روش افتی متداول کاهش پیدا کرده است؛ اما این خطا در روش امیدانس مثبت مجازی کمی افزایش پیدا کرده است. در این مورد، با توجه به اینکه هدف تصحیح تقسیم توان راکتیو بوده است و این کار با حفظ ولتاژ در محدوده پذیرفتنی انجام شده است، از این خطا صرف‌نظر می‌شود.

جدول (۲): تغییرات ولتاژ باس مشترک (پریونیت)

روش	پارامتر	خطای توان راکتیو (%)	خطای ولتاژ (%)
متداول	۳۰	۴	
امیدانس منفی مجازی	۱	۳	
امیدانس مثبت مجازی	۲	۶	

- Inverter Connected Renewable Energy Resources," in *2014 IEEE PES General Meeting | Conference & Exposition*, 2014, pp. 1-5.
- [12] M. A. A.-S. Suleiman M. Sharkh, Georgios I. Orfanoudakis, Babar Hussain *Power Electronic Converters for Microgrids*: Wiley-IEEE Press, 2014.
- [13] J. M. Guerrero, N. Berbel, J. Matas, J. L. Sosa, and L. G. d. Vicuna, "Droop Control Method with Virtual Output Impedance for Parallel Operation of Uninterruptible Power Supply Systems in a Microgrid," in *APEC 07 - Twenty-Second Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, pp. 1126-1132, 2007.
- [14] H. Moussa, A. Shahin, J. P. Martin, S. Pierfederici, and N. Moubayed, "Optimal Angle Droop for Power Sharing Enhancement with Stability Improvement in Islanded Microgrids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. PP, pp. 1-1, 2017.
- [15] T. Wu, Z. Liu, J. Liu, S. Wang, and Z. You, "A Unified Virtual Power Decoupling Method for Droop-Controlled Parallel Inverters in Microgrids," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 31, pp. 5587-5603, 2016.
- [16] J. Kim, J. M. Guerrero, P. Rodriguez, R. Teodorescu, and K. Nam, "Mode Adaptive Droop Control with Virtual Output Impedances for an Inverter-based Flexible AC Microgrid," *IEEE Transactions on power electronics*, Vol. 26, pp. 689-701, 2011.
- [17] J. M. Guerrero, L. G. De Vicuna, J. Matas, M. Castilla, and J. Miret, "Output Impedance Design of Parallel-Connected UPS Inverters with Wireless Load-Sharing Control," *IEEE Transactions on industrial electronics*, Vol. 52, pp. 1126-1135, 2005.
- [18] 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, pp. 1605-1617, 2015.
- [19] 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, pp. 2890-2904, 2016.
- [20] X. Wu, C. Shen, and R. Iravani, "Feasible Range and Optimal Value of the Virtual Impedance for Droop-Based Control of Microgrids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. PP, pp. 1-10, 2016.
- [21] S. Khanabdal, M. Banejad, F. Blaabjerg and N. Hosseinzadeh, "Adaptive Virtual Flux
- [1] 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, pp. 5272-5282, 2013.
- [2] 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, pp. 2525-2538, 2011.
- [3] Y. Han, H. Li, P. Shen, E. A. A. Coelho, and J. M. Guerrero, "Review of Active and Reactive Power Sharing Strategies in Hierarchical Controlled Microgrids," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 32, pp. 2427-2451, 2017.
- [4] 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, pp. 30-40, 2011.
- [5] H. Nikos, "Impacts of Microgrid," in *Microgrids: Architectures and Control*, ed: Wiley-IEEE Press, p. 344, 2014.
- [6] S. Obara, "Optimum Design of Renewable Energy Systems: Microgrid and Nature Grid Methods". United States of America: Engineering Science Reference (an imprint of IGI Global), 2014.
- [7] 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. PP, pp. 1-13, 2016.
- [8] I. Lorzadeh, H. A. Abyaneh, M. Savaghebi, and J. M. Guerrero, "A Hierarchical Control Scheme for Reactive Power and Harmonic Current Sharing in Islanded Microgrids," in *2015 17th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE-Europe)*, pp. 1-10, 2015.
- [9] D. E. Olivares, A. Mehrizi-Sani, A. H. Etemadi, C. A. Ca, x00F, izares, et al., "Trends in Microgrid Control," *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 5, pp. 1905-1919, 2014.
- [10] H. Mahmood, D. Michaelson, and J. Jiang, "Reactive Power Sharing in Islanded Microgrids Using Adaptive Voltage Droop Control," *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 6, pp. 3052-3060, 2015.
- [11] H. R. Pota, M. J. Hossain, M. A. Mahmud, and R. Gadh, "Control for Microgrids with

- Microgrid," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 24, pp. 2977-2988, 2009.
- [31] J. Schiffer, T. Seel, J. Raisch, and T. Sezi, "Voltage Stability and Reactive Power Sharing in Inverter-Based Microgrids With Consensus-Based Distributed Voltage Control," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 24, pp. 96-109, 2016.
- [32] T. L. Vandoorn, J. C. Vasquez, J. D. Kooning, J. M. Guerrero, and L. Vandeveldel, "Microgrids: Hierarchical Control and an Overview of the Control and Reserve Management Strategies," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, Vol. 7, pp. 42-55, 2013.
- [33] J. M. Guerrero, J. Matas, L. G. D. V. D. Vicuna, M. Castilla, and J. Miret, "Wireless-Control Strategy for Parallel Operation of Distributed-Generation Inverters," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 53, pp. 1461-1470, 2006.
- [34] Y. Chen, J. M. Guerrero, Z. Shuai, Z. Chen, L. Zhou, and A. Luo, "Fast Reactive Power Sharing, Circulating Current and Resonance Suppression for Parallel Inverters Using Resistive-Capacitive Output Impedance," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 31, pp. 5524-5537, 2016.
- [35] Q. C. Zhong and Y. Zeng, "Universal Droop Control of Inverters With Different Types of Output Impedance," *IEEE Access*, Vol. 4, pp. 702-712, 2016.
- [36] Y. Li, S. Zhikang, X. Qinming, and J. M. Guerrero, "Droop Control with an Adjustable Complex Virtual Impedance Loop Based on Cloud Model Theory," in *IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 3223-3228, 2016.
- [37] Y. Han, P. Shen, X. Zhao, and J. M. Guerrero, "Control Strategies for Islanded Microgrid Using Enhanced Hierarchical Control Structure With Multiple Current-Loop Damping Schemes," *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 8, pp. 1139-1153, 2017.
- [38] X. Wang, F. Blaabjerg, and Z. Chen, "Autonomous Control of Inverter-Interfaced Distributed Generation Units for Harmonic Current Filtering and Resonance Damping in an Islanded Microgrid," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 50, pp. 452-461, 2014.
- [39] C. Dou, Z. Zhang, D. Yue, and M. Song, "Improved Droop Control based on Virtual Impedance and Virtual Power Source in Low-Voltage Microgrid," *IET Generation, Droop Control Based on Virtual Impedance in Islanded AC Microgrids*, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2021 (early access).
- [22] D. M. Pham and H. Lee, "Effective Coordinated Virtual Impedance Control for Accurate Power Sharing in Islanded Microgrid," *IEEE Transaction on. Industrial Electronics*, Vol. 68, No. 3, pp. 2279-2288, 2021.
- [23] A. S. Vijay, N. Parth, S. Doolla, and M. C. Chandorkar, "An Adaptive Virtual Impedance Control for Improving Power Sharing Among Inverters in Islanded AC Microgrids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2021, (early access).
- [24] F. Zandi, B. Fani, I. Sadeghkhan and A. Orakzadeh, "Adaptive Complex Virtual Impedance Control Scheme for Accurate Reactive Power Sharing of Inverter Interfaced Autonomous Microgrids," *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 12, No. 22, pp. 6021-6032, 2018.
- [25] 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, pp. 576-588, 2011.
- [26] T. L. Vandoorn, J. D. M. D. Kooning, B. Meersman, J. M. Guerrero, and L. Vandeveldel, "Automatic Power-Sharing Modification of P/V Droop Controllers in Low-Voltage Resistive Microgrids," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 27, pp. 2318-2325, 2012.
- [27] 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.
- [28] T. L. Vandoorn, J. D. M. D. Kooning, B. Meersman, and L. Vandeveldel, "Improvement of active power sharing ratio of P/V droop controllers in low-voltage islanded microgrids," in *2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, pp. 1-5, 2013.
- [29] A. M. Bollman, "An Experimental Study of Frequency Droop Control in a Low-Inertia Microgrid," University of Illinois at Urbana-Champaign, 2009.
- [30] 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

'Virtual Negative Resistor' for Inverters in Low-Voltage Microgrids," *IET Power Electronics*, Vol. 9, pp. 1037-1044, 2016.

Transmission & Distribution, Vol. 11, pp. 1046-1054, 2016.
[40] P. Zhang, H. Zhao, H. Cai, J. Shi, and X. He, "Power Decoupling Strategy Based on

-
- ¹ DER
 - ² MiniGrid (MG)
 - ³ Feeder
 - ⁴ Common Bus(CB)
 - ⁵ Master-Slave
 - ⁶ Uninterrupted Power Supply (UPS)
 - ⁷ Droop Control
 - ⁸ Plug & Play
 - ⁹ Wireless
 - ¹⁰ Autonomous
 - ¹¹ Stationary Reference