

## **A Decentralized Control Method Based on Virtual Frequency-Voltage Frame for Accurate Active and Reactive Powers Sharing in Microgrids**

**Nader Kazemi-Esfeh, M.Sc, Mehdi Baharizadeh, Assistant Professor**

Department of Electrical Engineering- Khomeinishahr Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran  
[nader.kazemi@iaukhsh.ac.ir](mailto:nader.kazemi@iaukhsh.ac.ir), [Baharizadeh@iaukhsh.ac.ir](mailto:Baharizadeh@iaukhsh.ac.ir)

### **Abstract**

In the islanded operation mode of microgrids, active and reactive powers sharing among sources is required. In order to provide this and based on decentralized approach, droop characteristics are used. The conventional droop characteristics of active power-frequency ( $P-\omega$ ) and reactive power-voltage ( $Q-V$ ) are based on the assumption of inductive output impedance of sources. Since the dominant inductive output impedances are not provided, especially in low voltage microgrids, the virtual frequency-voltage frame droop characteristics, which include active power-virtual frequency ( $P-\omega'$ ) and reactive power-virtual voltage ( $Q-V'$ ) droop characteristics have been considered by researchers. By employing these droops, local property of both the virtual frequency and the virtual voltage leads to active power sharing error as well as reactive power sharing error. In addition, required small intended variation range of both virtual frequency and virtual voltage, results in big power sharing errors. In order to eliminate active and reactive power sharing errors, a decentralized control method is proposed in this paper. In the proposed method, instead of virtual frequency and virtual voltage of their terminal, sources droop virtual frequency and virtual voltage of point of common coupling (PCC) in order to a common parameter becomes in charge of active power generation as well as a common parameter becomes responsible for reactive power generation. Accordingly, the power sharing errors are resolved. Realization method of these droop characteristics will be explained in details. In order to confirm the performance of the proposed control method, simulation results of a test microgrid in PSIM software are presented.

**Keywords:** droop characteristics, islanded operation mode, microgrid, power sharing

**Received:** 19 February 2022

**Revised:** 26 March 2022

**Accepted:** 1 May 2022

**Corresponding Author:** Dr. Mehdi Baharizadeh

**Citation:** N. Kazemi-Esfeh, M. Baharizadeh, "A decentralized control method based on virtual frequency-voltage frame for accurate active and reactive powers sharing in microgrids", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 14, no. 55, pp. 55-66, December 2023 (in Persian).

## یک ساختار کنترل غیرمتمرکز مبتنی بر قاب مجازی فرکانس-ولتاژ برای فراهم کردن تقسیم صحیح توان‌های اکتیو و راکتیو در ریزشبکه‌ها

نادر کاظمی‌اسفه، دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد، مهدی بهاری‌زاده، استادیار

دانشکده مهندسی برق - واحد خمینی‌شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران  
nader.kazemi@iaukhsh.ac.ir, baharizadeh@iaukhsh.ac.ir

**چکیده:** در حالت عملکرد جزیره‌ای ریزشبکه‌ها تقسیم توان‌های اکتیو و راکتیو بار بین منابع نیاز است. برای فراهم کردن آن و بر اساس رویکرد غیرمتمرکز از مشخصه‌های افتی استفاده می‌شود. مشخصه‌های افتی مرسوم توان اکتیو-فرکانس ( $P-\omega$ ) و توان راکتیو-ولتاژ ( $Q-V$ ) بر فرض خاصیت سلفی امیدانس خروجی منابع بنا نهاده شده‌اند. از آنجا که امیدانس خروجی سلفی غالب مخصوصاً در ریزشبکه‌های ولتاژ پایین فراهم نمی‌شوند، مشخصه‌های افتی قاب مجازی فرکانس-ولتاژ که شامل مشخصه افتی توان اکتیو-فرکانس مجازی ( $P-\omega'$ ) و مشخصه افتی توان راکتیو-ولتاژ مجازی ( $Q-V'$ ) هستند مورد توجه محققان قرار گرفته‌اند. خاصیت محلی هر دو کمیت فرکانس مجازی و ولتاژ مجازی منجر به بروز خطاهای تقسیم توان اکتیو و راکتیو با به‌کار بردن این مشخصه‌ها می‌شود. همچنین نیاز به محدوده کوچک تغییرات فرکانس مجازی و ولتاژ مجازی، منجر به بروز خطاهای بزرگ تقسیم توان می‌شود. برای برطرف کردن خطاهای تقسیم توان اکتیو و راکتیو، در این مقاله یک روش کنترل غیر متمرکز پیشنهاد می‌شود. در روش پیشنهادی منابع به‌جای فرکانس مجازی و ولتاژ مجازی ترمینال خود، فرکانس و ولتاژ مجازی نقطه اتصال مشترک (PCC) را افت می‌دهند تا پارامتری مشترک مسئول تولید توان اکتیو و همچنین پارامتری مشترک مسئول تولید توان راکتیو منابع شده و خطای تقسیم توان برطرف شود. نحوه تحقق این مشخصه‌های افتی با جزئیات توضیح داده خواهد شد. برای تایید عملکرد ساختار کنترل پیشنهادی، شبیه‌سازی زمانی یک ریزشبکه نمونه در نرم افزار PSIM ارائه شده است.

**کلمات کلیدی:** تقسیم توان، حالت عملکرد جزیره‌ای، ریزشبکه، مشخصه‌های افتی

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۳۰

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۱/۰۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۲/۱۱

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر مهدی بهاری‌زاده

نشانی نویسنده‌ی مسئول: اصفهان - خمینی‌شهر - منظریه - انتهای بلوار دانشجو - دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی‌شهر

## ۱- مقدمه

یک ریزشبه بخشی از سیستم توزیع شامل منابع انرژی پراکنده و بارهای الکتریکی با توانایی عملکرد متصل به شبکه و جزیره‌ای است. ریزشبه‌ها در شرایط عادی در حالت متصل به شبکه کار می‌کنند اما در صورت بروز مشکل در شبکه بالا دست کلید باز شده و ریزشبه به حالت جزیره‌ای می‌رود [۱-۳]. در حالت جزیره‌ای که تمرکز این مقاله نیز بر آن است، یک ساختار کنترل هماهنگ برای تقسیم بار بین منابع و تنظیم ولتاژ و فرکانس ریزشبه نزدیک به مقدار نامی نیاز است. برای فراهم کردن این موارد به صورت غیرمتمرکز (بدون نیاز به ارتباطات مخابراتی)، منابع مشخصه‌های افتی را به کار می‌برند.

در مرجع‌های [۴] الی [۶] مشخصه‌های افتی توان اکتیو-فرکانس<sup>۱</sup> (P- $\omega$ ) و توان راکتیو-ولتاژ<sup>۲</sup> (Q-V) پیشنهاد شده‌اند تا در ازای انحراف فرکانس و ولتاژ به ترتیب تقسیم توان اکتیو و راکتیو بار بین منابع را فراهم کنند. این مشخصه‌ها بر فرض سلفی بودن امپدانس خروجی منبع (امپدانس منبع+امپدانس خط) بنا نهاده شده‌اند. اگرچه خطوط سیستم توزیع سلفی غالب نیستند اما با به کارگیری سلف یا ترانسفورماتور در خروجی منابع، امپدانس خروجی سلفی غالب مورد نظر می‌تواند فراهم شود. اما در صورت عدم استفاده از آنها و مخصوصاً در ریزشبه‌های ولتاژ پایین، امپدانس خروجی مقاومتی غالب شده و متعاقباً استفاده از مشخصه‌های افتی P- $\omega$  و Q-V منجر به تزویج بین توان‌های اکتیو و راکتیو و در پی آن تضعیف پایداری و حتی بروز ناپایداری خواهد شد [۷]. برای برطرف کردن این مشکل در مرجع [۸] منابع امپدانس مجازی (اندوکتانس مجازی) را به کار برده‌اند تا خاصیت سلفی امپدانس خروجی منابع را افزایش دهند. با این حال امپدانس مجازی بزرگ خود مشکل ناپایداری را به همراه خواهد داشت.

برای انطباق بهتر با خاصیت مقاومتی غالب خطوط توزیع ولتاژ پایین، مشخصه‌های معکوس توان اکتیو-ولتاژ (P-V) و توان راکتیو-فرکانس (Q- $\omega$ ) منابع مورد توجه قرار گرفته‌اند [۹-۱۱]. این درحالی است که بعضی از منابع می‌توانند سلف یا ترانسفورماتور خروجی داشته و بعضی دیگر فاقد آن باشند. در این شرایط مشخصه‌های P-V و Q-f منابع نیز درگیر مشکل پایداری خواهند شد. برای برطرف کردن این محدودیت‌ها در مرجع‌های [۷] و [۱۲] مشخصه‌های قاب مجازی فرکانس-ولتاژ که ترکیبی از مشخصه‌های مرسوم و معکوس هستند پیشنهاد شده‌اند. این مشخصه‌ها که شامل توان اکتیو-فرکانس مجازی<sup>۳</sup> (P- $\omega'$ ) و توان راکتیو-ولتاژ مجازی<sup>۴</sup> (Q-V') هستند در ازای انحراف فرکانس مجازی و ولتاژ مجازی به ترتیب تقسیم توان اکتیو و راکتیو بار بین منابع را فراهم کنند. با انتقال فرکانس و ولتاژ از قاب واقعی به قاب مجازی تزویج بین توان اکتیو و راکتیو برطرف شده و عملکرد مطلوب دینامیکی فراهم شده است. در این روش نیاز است محدوده تغییرات ولتاژ مجازی و فرکانس مجازی چنان کوچک انتخاب شوند که ولتاژ واقعی و فرکانس واقعی در محدوده مجاز قرار گیرند [۱۳، ۱۲].

مشخصه‌های افتی علی‌رغم سادگی و مقبولیت درگیر مشکل خطای تقسیم توان هستند. از این دست می‌توان به خطای تقسیم توان راکتیو بین منابع در صورت به کارگیری مشخصه‌های افتی مرسوم P- $\omega$  و Q-V اشاره کرد. دلیل بروز خطا خاصیت محلی ولتاژ به معنای تفاوت اندازه آن در ترمینال منابع است [۱۳-۱۵]. برای برطرف کردن این مشکل تلاش‌هایی شده است. در مرجع‌های [۴]، [۱۵] و [۱۶] حلقه‌های کنترل بیرونی مجهز به ارتباطات مخابراتی که به عنوان سطح کنترل ثانویه شناخته می‌شوند به کار برده شده‌اند تا خطای تقسیم توان برطرف شود. این روش‌ها به دلیل نیاز به ارتباط مخابراتی هزینه بالا و قابلیت اطمینان پایین دارند. محققان روش‌های برطرف کردن خطای تقسیم توان راکتیو بدون نیاز به ارتباطات مخابراتی را نیز ارائه نموده‌اند. در مرجع [۱۷] شیب مشخصه افتی Q-V منابع چنان اصلاح شده که افت ولتاژ مربوط به امپدانس خروجی منابع جبران شود. در این مطالعه فرض شده که افت ولتاژ مربوط به امپدانس خروجی منبع متأثر از تغییرات ولتاژ ترمینال منبع نیست که خود منجر به بروز خطای تقسیم توان راکتیو شده است. در مرجع [۱۸] نیز منابع ولتاژ ترمینال خود را چنان تنظیم می‌کنند که تولید توان راکتیو آنها متناظر با افت ولتاژ نقطه اتصال مشترک<sup>۵</sup> (PCC) شود. از آنجا که ولتاژ PCC به عنوان یک پارامتر مشترک مشخص کننده تولید توان راکتیو همه منابع است خطای تقسیم توان راکتیو برطرف خواهد شد.

مشکل خطای تقسیم توان با به کارگیری مشخصه‌های افتی قاب مجازی فرکانس-ولتاژ (P- $\omega'$  و Q-V') تشدید شده است. دلایل آن عبارتند از: (۱) هر دو کمیت فرکانس مجازی و ولتاژ مجازی خاصیت محلی داشته پس مشخصه‌های افتی قاب مجازی فرکانس-ولتاژ منجر به بروز هر دو نوع خطای تقسیم توان اکتیو و راکتیو می‌شوند. (۲) محدوده تغییرات فرکانس مجازی در

مشخصه  $P-\omega'$  و ولتاژ مجازی در مشخصه  $Q-V'$  باید چنان کوچک انتخاب شوند که حفظ فرکانس واقعی و ولتاژ واقعی در محدوده مجاز استانداردهای کیفیت توان تضمین شود. این محدوده‌های کوچک تغییرات، منجر به خطای بزرگ تقسیم توان اکتیو و راکتیو می‌شوند. علیرغم شرایط نامطلوب تقسیم توان با بکارگیری مشخصه‌های افتی قاب مجازی فرکانس-ولتاژ، براساس اطلاعات نویسندگان، دلایل بروز مشکل و راه‌کار برطرف کردن آن تاکنون مطالعه نشده است.

در این مقاله ابتدا بروز خطای تقسیم توان اکتیو و خطای تقسیم توان راکتیو بین منابع ریزشبه که با به‌کار بردن مشخصه‌های افتی قاب مجازی فرکانس-ولتاژ به بحث گذاشته شده می‌شود. سپس یک روش کنترل غیرمتمرکز برای برطرف کردن این خطاهای تقسیم توان ارائه خواهد شد.

در روش پیشنهادی منابع مشخصه‌های افتی توان اکتیو-فرکانس مجازی  $PCC (P-\omega'_{PCC})$  و توان راکتیو-ولتاژ مجازی  $PCC (Q-V'_{PCC})$  را محقق می‌کنند تا پارامتر مشترک فرکانس مجازی  $PCC (\omega'_{PCC})$  مسئول میزان تولید توان اکتیو و پارامتر مشترک ولتاژ مجازی  $PCC (V'_{PCC})$  مسئول میزان تولید توان راکتیو شده و متناظرا تقسیم صحیح توان‌های اکتیو و راکتیو فراهم شود. در این روش منابع فرکانس و ولتاژ ترمینال خود را چنان تنظیم می‌کنند که افت فرکانس مجازی  $PCC$  و افت ولتاژ مجازی  $PCC$  مطابق با مشخصه‌های افتی مربوطه بصورت غیرمتمرکز فراهم شود.

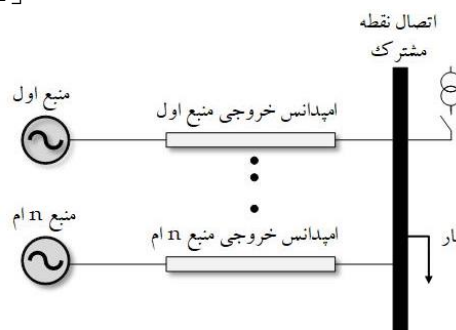
مقاله به این صورت بخش‌بندی شده است. بخش دوم ساختار کنترل متداول و مشکل خطای تقسیم توان را توضیح می‌دهد. در بخش سوم ساختار کنترل پیشنهادی ارائه خواهد شد. تحلیل پایداری سیگنال کوچک در بخش چهارم و نتایج شبیه‌سازی زمانی نیز در بخش پنجم ارائه می‌گردند. در نهایت در بخش ششم نتیجه‌گیری مقاله بیان شده است.

## ۲- مشخصه‌های افتی قاب مجازی فرکانس-ولتاژ و مشکل خطای تقسیم توان

ریزشبکه شکل (۱) را در نظر بگیرید. با فرض خاصیت سلفی غالب امپدانس خروجی، توان اکتیو تولیدی منبع متناسب با اختلاف فاز (که به‌صورت دینامیکی مرتبط با فرکانس است) و توان راکتیو تولیدی منبع متناسب با اختلاف اندازه بین ولتاژ خروجی منبع و ولتاژ  $PCC$  می‌شود [۱۹]. از این‌رو مشخصه‌های افتی مرسوم  $P-\omega$  و  $Q-V$  مورد توجه قرار گرفته‌اند. به ازای امپدانس خروجی سلفی-مقاومتی منابع، توان اکتیو تولیدی منبع هم وابسته به اختلاف فاز ولتاژها و هم وابسته با اختلاف اندازه آنها خواهد بود. شرایط مشابه نیز برای توان راکتیو تولیدی منبع به‌وجود می‌آید. حال اگر مشخصه‌های افتی مرسوم استفاده شوند تزویج بین توان اکتیو و راکتیو تولیدی منبع منجر به دینامیک نامطلوب و حتی بروز ناپایداری می‌شود. برای برطرف کردن تزویج، قاب ولتاژ-فرکانس  $(\omega-V)$  به اندازه زاویه‌ی  $\phi$  (زاویه بین امپدانس و راکتانس) دوران داده می‌شود. این دوران قاب متعامد با استفاده از ماتریس تبدیل  $T_{\omega V}$  مطابق با رابطه‌های (۱) و (۲) انجام می‌گردد [۷].

$$\begin{bmatrix} \omega' \\ V' \end{bmatrix} = T_{\omega V} \begin{bmatrix} \omega \\ V \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$T_{\omega V} = \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{X}{Z} & \frac{R}{Z} \\ -\frac{R}{Z} & \frac{X}{Z} \end{bmatrix} \quad (2)$$



شکل (۱): ساختار ریزشبه

Figure (1): Microgrid structure

در این روابط  $X, R, Z$  به ترتیب مقاومت، راکتانس و امپدانس خروجی از زاویه دید منبع و  $\omega'$  و  $V'$  فرکانس مجازی و ولتاژ مجازی هستند. با دوران قاب  $\omega-V$  به اندازه زاویه  $\varphi$ ، توان اکتیو وابسته به اختلاف فاز ولتاژهای مجازی و توان راکتیو وابسته به اختلاف اندازه ولتاژهای مجازی می‌شود. به عبارت دیگر از زاویه دید قاب مجازی فرکانس-ولتاژ  $(\omega'-V')$ ، امپدانس خروجی منبع سلفی شده و تزویج بین توان‌های اکتیو و راکتیو برطرف شده است [۷، ۱۲]. بر این اساس مشخصه‌های افتی توان اکتیو-فرکانس مجازی  $(P-\omega')$  و توان راکتیو-ولتاژ مجازی  $(Q-V')$  به صورت زیر به کار می‌روند:

$$\omega_i'^* = \omega_{\max}' - m'_{p,i} \cdot P_i \quad (۳)$$

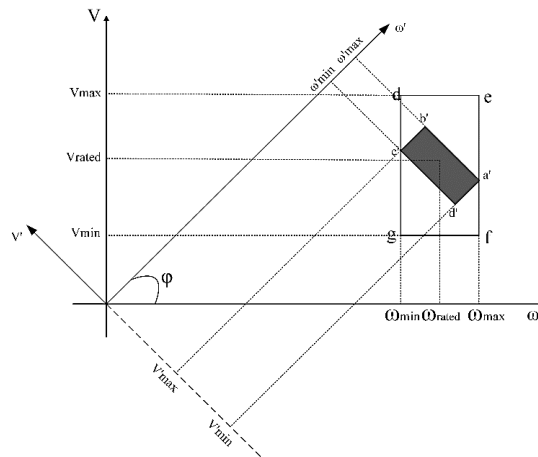
$$V_i'^* = V_{\max}' - n'_{q,i} \cdot Q_i \quad (۴)$$

در این روابط  $\omega_i'^*$  و  $V_i'^*$  مقادیر مرجع فرکانس و دامنه ولتاژ مجازی،  $P_i$  و  $Q_i$  توان‌های اکتیو و راکتیو تولیدی و  $m'_{p,i}$  و  $n'_{q,i}$  شیب مشخصه افتی منبع  $i$  ام هستند. شیب مشخصه‌ها به این صورت انتخاب می‌شوند:

$$m'_{p,i} = \frac{\omega_{\max}' - \omega_{\min}'}{P_{i,\text{rated}}} \quad (۵)$$

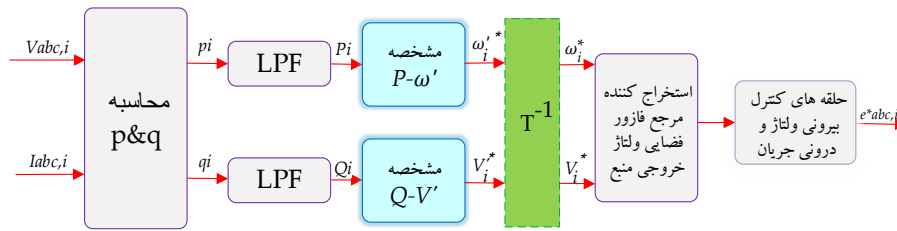
$$n'_{q,i} = \frac{V_{\max}' - V_{\min}'}{Q_{i,\text{rated}}} \quad (۶)$$

در رابطه‌های (۵) و (۶)  $\omega_{\min}'$  و  $\omega_{\max}'$  به ترتیب مقادیر حداکثر و حداقل فرکانس مجازی،  $V_{\min}'$  و  $V_{\max}'$  به ترتیب مقادیر حداکثر و حداقل ولتاژ مجازی و  $P_{i,\text{rated}}$  و  $Q_{i,\text{rated}}$  به ترتیب مقادیر نامی تولید توان اکتیو و راکتیو منبع هستند. برای اطمینان از حفظ ولتاژ و فرکانس واقعی در محدوده مجاز براساس معیارهای کیفیت توان، حدود تغییرات فرکانس و ولتاژ مجازی در مشخصه افتی با ملاحظات انتخاب می‌شوند. شکل (۲) را که هر دو قاب  $\omega-V$  و  $\omega'-V'$  را نشان می‌دهد در نظر بگیرید. مستطیل  $d-e-f-g$  توسط  $\omega_{\max}, \omega_{\min}, V_{\max}$  و  $V_{\min}$  به عنوان حدود مجاز فرکانس و ولتاژ در قاب  $\omega-V$  مشخص شده است. مستطیل  $a'-b'-c'-d'$  نیز توسط  $\omega_{\max}', \omega_{\min}', V_{\max}'$  و  $V_{\min}'$  در قاب  $\omega'-V'$  مشخص شده است. برای حفظ ولتاژ و فرکانس واقعی در محدوده مجاز نیاز است مطابق شکل (۲) مستطیل  $a'-b'-c'-d'$  درون مستطیل  $d-e-f-g$  قرار گیرد. این منجر خواهد شد که محدوده تغییرات در نظر گرفته برای فرکانس مجازی و همچنین ولتاژ مجازی باریک شده و منجر به تشدید خطای تقسیم توان بین منابع گردد. مشکل دیگر مشخصه‌های افتی قاب مجازی فرکانس-ولتاژ این است که هر دو کمیت ولتاژ مجازی و فرکانس مجازی خاصیت محلی داشته و یا به عبارت دیگر مقدار آنها در ترمینال منابع متفاوت است. دلیل آن از این قرار است که ولتاژ مجازی و فرکانس مجازی هر دو ترکیب خطی از فرکانس (به عنوان کمیت سراسری) و ولتاژ (به عنوان کمیتی محلی) هستند. در این شرایط تفاوت ولتاژ ترمینال منابع منجر به تفاوت ولتاژ مجازی و فرکانس مجازی در ترمینال آنها می‌شود. ساختار کنترل منبع در شکل (۳) نشان داده شده است. همان طور که دیده می‌شود توان‌های اکتیو و راکتیو لحظه‌ای پس از فیلتر شدن به مشخصه‌های افتی  $P-\omega'$  و  $Q-V'$  اعمال می‌شوند تا مقدار مرجع فرکانس مجازی  $(\omega_i'^*)$  و ولتاژ مجازی  $(V_i'^*)$  منبع محاسبه شوند.



شکل (۲): قاب های فرکانس-ولتاژ واقعی و مجازی

Figure (2): Real and virtual frequency-voltage frames



شکل (۳): ساختار کنترل متداول منبع  $i^{\text{th}}$   
 Figure (3): Conventional control structure of  $i^{\text{th}}$  source

سپس با استفاده از معکوس ماتریس تبدیل  $T_{\omega V}$  ارائه شده در رابطه (۷)، فرکانس و ولتاژ واقعی استخراج شده و به وسیله حلقه بیرونی کنترل ولتاژ و حلقه درونی کنترل جریان محقق می‌شود.

$$T_{\omega V}^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (7)$$

نکته‌ای که باید در به کار بردن مشخصه قاب مجازی فرکانس-ولتاژ لحاظ شود برابر در نظر گرفتن زاویه تبدیل قاب ( $\varphi$ ) برای همه منابع علی‌رغم امکان تفاوت جنس امیدانس خروجی آنها است. براساس تحلیل‌های پایداری ارائه شده در مرجع [۷] انتخاب  $\varphi = \pi/4$  گزینه مناسبی است که در این مقاله هم در نظر گرفته شده است.

### ۳- ساختار کنترل پیشنهادی

برای برطرف کردن خطای تقسیم توان اکتیو به جای تحقق مشخصه افتی  $P-\omega'$  در باس منابع، این مشخصه در باس PCC محقق می‌شود. به عبارتی منابع مشخصه افتی  $P-\omega'_{PCC}$  را محقق می‌کنند تا  $\omega'_{PCC}$  به عنوان یک پارامتر مشترک مسئول تولید توان اکتیو منابع بوده و تقسیم صحیح توان اکتیو فراهم شود. طی روال مشابه برای برطرف کردن خطای تقسیم توان راکتیو منابع مشخصه افتی  $Q-V'_{PCC}$  را محقق کنند تا  $V'_{PCC}$  به عنوان یک پارامتر مشترک مسئول تولید توان راکتیو منابع بوده و تقسیم صحیح توان راکتیو فراهم شود. براساس استراتژی پیشنهادی، منابع به ترتیب به جای مشخصه‌های افتی (۳) و (۴)، مشخصه‌های افتی قاب مجازی فرکانس-ولتاژ PCC ارائه شده در رابطه‌های (۸) و (۹) را محقق می‌کنند:

$$\omega_{PCC}^* = \omega'_{\max} - m'_{p,i} \cdot P_i \quad (8)$$

$$V'_{PCC}^* = V'_{\max} - n'_{q,i} \cdot Q_i \quad (9)$$

اما تحقق (۸) و (۹) سراسر نیست. زیرا اولاً منابع ولتاژ و فرکانس واقعی را می‌توانند کنترل کنند نه مقدار مجازی آنها را، دوماً منابع ولتاژ و فرکانس ترمینال خود را کنترل می‌کنند نه مقادیر مربوطه در PCC را. برای پوشش دادن این موارد ابتدا هر منبع با بکار بردن ماتریس  $T_{\omega V}^{-1}$  مقادیر مرجع ولتاژ و فرکانس واقعی PCC را بصورت زیر محاسبه می‌کند.

$$\begin{bmatrix} \omega_{PCC}^* \\ V'_{PCC}^* \end{bmatrix} = T_{\omega V}^{-1} \begin{bmatrix} \omega_{PCC}^* \\ V'_{PCC}^* \end{bmatrix} \quad (10)$$

سپس منابع تلاش می‌کنند ولتاژ و فرکانس ترمینال خود را چنان کنترل کنند که نتیجه آن تحقق مقادیر مرجع ولتاژ و فرکانس PCC محاسبه شده براساس رابطه (۱۰) باشد. با توجه به سراسری بودن فرکانس، منابع مطابق با رابطه (۱۱) فرکانس مرجع ترمینال خود را برابر با فرکانس مرجع PCC قرار می‌دهند.

$$\omega_i^* = \omega_{PCC}^* \quad (11)$$

اما محلی بودن ولتاژ شرایط متفاوتی را به همراه دارد. ابتدا رابطه افت ولتاژ امیدانس خروجی منبع مطابق با (۱۲) را در نظر بگیرید.

$$V_i - V_{PCC} = \frac{R_i \cdot P_i + X_i \cdot Q_i}{V_i} \quad (12)$$

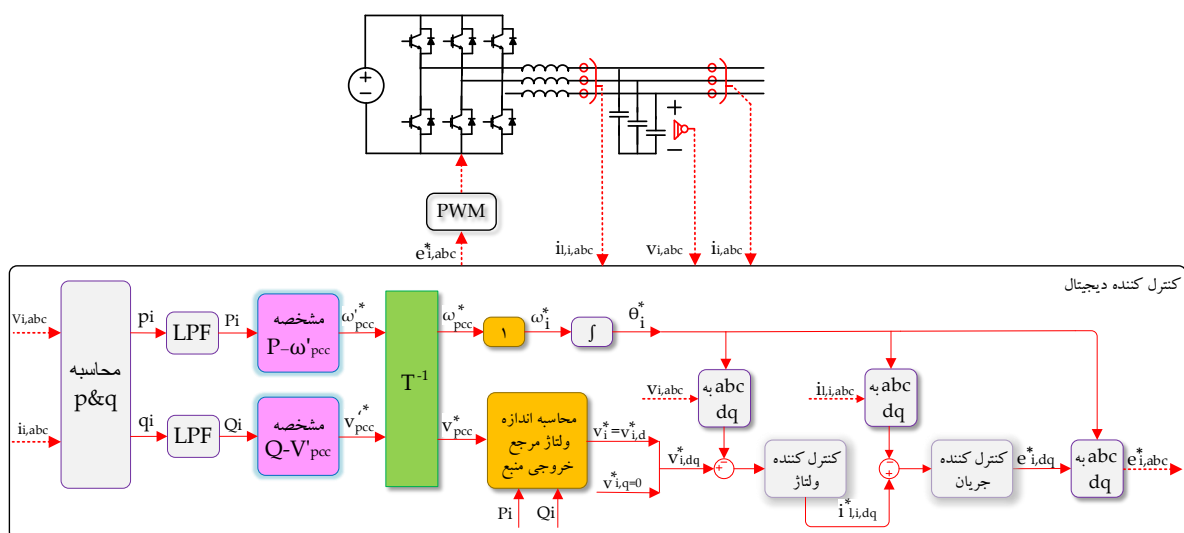
در این رابطه  $R_i$  و  $X_i$  مقاومت و راکتانس خروجی منبع  $i$ ام هستند. با اطلاع منبع از توان اکتیو و راکتیو تولیدی خود و همچنین ولتاژ مرجع PCC، معادله (۱۲) حل شده و ولتاژ مرجع منبع مطابق رابطه (۱۳) استخراج شده است:

$$V_i^* = \frac{V_{PCC} + \sqrt{V_{PCC}^2 + 4(R_i P_i + X_i Q_i)}}{2} \quad (13)$$

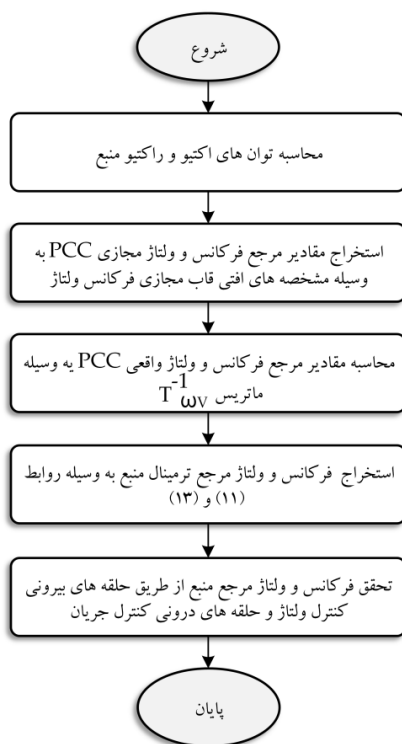
ساختار کنترل پیشنهادی در شکل (۴) و فلوچارت مربوط به آن در شکل (۵) نشان داده شده است. همان طور که دیده می شود بر اساس ولتاژ و جریان خروجی اندازه گیری شده منبع، توان های اکتیو و راکتیو لحظه ای محاسبه شده اند. این توان ها پس از فیلتر شدن به مشخصه های افتی  $P-\omega'_{PCC}$  و  $Q-V'_{PCC}$  اعمال شده تا مقادیر مرجع فرکانس و ولتاژ مجازی PCC استخراج شوند. سپس ماتریس  $T^{-1}_{\omega V}$  مقادیر مرجع فرکانس و ولتاژ واقعی PCC را محاسبه کرده است. براساس رابطه های (۱۱) و (۱۳) فرکانس و ولتاژ مرجع ترمینال منبع استخراج شده است. این فرکانس و ولتاژ مرجع از طریق دستگاه مختصات سنکرون و به وسیله حلقه های بیرونی کنترل ولتاژ و حلقه های درونی کنترل جریان که مجهز به کنترل کننده های PI هستند محقق می شوند. این حلقه های کنترلی نیازمند اطلاع از مقادیر اندازه گیری شده ولتاژ خروجی و جریان سلف فیلتر منبع هستند.

#### ۴- تحلیل پایداری سیگنال کوچک

به منظور تایید پایداری ساختار کنترل پیشنهادی و بررسی تاثیر تغییر پارامتر بر عملکرد دینامیکی آن، تحلیل پایداری سیگنال کوچک ارائه شده است. تحلیل ها در این بخش و بخش بعدی برای ریزشبهه شکل (۱) با دو منبع و پارامترهای ارائه شده در جدول (۱) انجام شده است. مدل سیگنال کوچک مرتبه کامل بر اساس روش توضیح داده شده در مرجع های [۲۰] و [۲۱] استخراج شده است. مقادیر ویژه سیستم با به کار بردن ساختار کنترل پیشنهادی در جدول (۲) ارائه شده اند. همان طور که دیده می شود، مقدار حقیقی همه مقادیر ویژه منفی است که بر پایداری حلقه-بسته سیستم دلالت دارد. تاثیر تغییر شیب مشخصه های افتی بر مقادیر ویژه غالب در شکل (۶) نشان داده شده است. همان طور که دیده می شود با افزایش  $m'_p$  مقدار ویژه غالب حقیقی  $S1$  (به عنوان کندترین مقدار ویژه) از محور موهومی فاصله گرفته و مقادیر ویژه غالب مزدوج مختلط  $S2$  و  $S3$  اندکی به محور موهومی نزدیک شده اند. افزایش  $n'_q$  نیز منجر به فاصله گرفتن  $S2$  و  $S3$  از محور موهومی شده در حالی تاثیر چشم گیری بر  $S1$  نداشته است. در نهایت گفته می شود که افزایش شیب مشخصه های افتی می تواند منجر به بهبود عملکرد دینامیکی شود. این در حالی است که مقدار بزرگ شیب مشخصه های افتی متناظر با مقدار بزرگ حدود تغییرات فرکانس و ولتاژ مجازی است که می تواند منجر به انحراف فرکانس و ولتاژ واقعی از محدوده مجاز کیفیت توان شود.



شکل (۴): ساختار کنترل پیشنهادی منبع  $i$ ام  
Figure (4): Proposed control structure of  $i^{\text{th}}$  source



شکل (۵): فلوچارت روش کنترل پیشنهادی

Figure (5): Flowchart of proposed control method

جدول (۱): پارامترهای ریزشبه نمونه

Table (1): parameters of the test microgrid

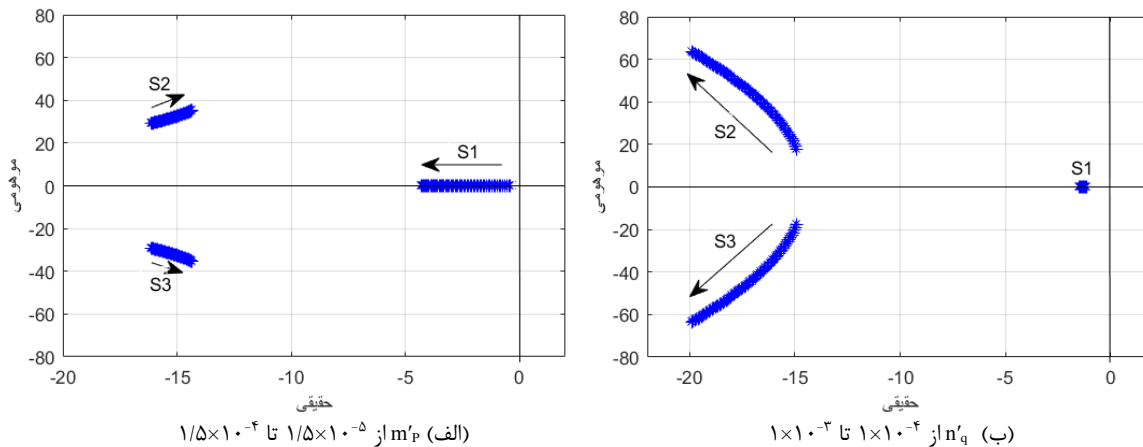
کمیت	مقادیر		
فرکانس نامی	۳۱۴/۱۶ رادیان بر ثانیه (۵۰ هرتز)		
ولتاژ نامی	۴۰۰ ولت		
امپدانس خروجی منبع اول	مقاومت	۰/۲	
	راکتانس	۰/۱۸۸	
امپدانس خروجی منبع دوم	مقاومت	۰/۵	
	راکتانس	۰/۴۷۱۲	
منبع اول و دوم	توان اکتیو نامی	۱۰ کیلووات	
	توان راکتیو نامی	۵ کیلووار	
	سلف	۱/۵ میلی هانری	
	خازن	۴/۲۳ میکروفاراد	
	کنترل کننده بیرونی ولتاژ	بهره متناسب	۰/۰۶۵
		بهره انتگرال گیر	۶/۵
	کنترل کننده درونی جریان	بهره متناسب	۱۵/۳۶
		بهره انتگرال گیر	۵۳۶۰۰
حدود تغییرات فرکانس و ولتاژ مجازی	ولتاژ	۶۰/۰۲ و ۶۱/۳۶ ولت	
	فرکانس	۵۰۴/۷۶ و ۵۰۵/۲ رادیان بر ثانیه	
حدود تغییرات فرکانس و ولتاژ	ولتاژ	۳۸۰ و ۴۲۰ ولت	
	فرکانس	۳۱۴/۷۹ و ۳۱۳/۵۳ رادیان بر ثانیه	



جدول (۲): مقادیر ویژه محاسبه شده

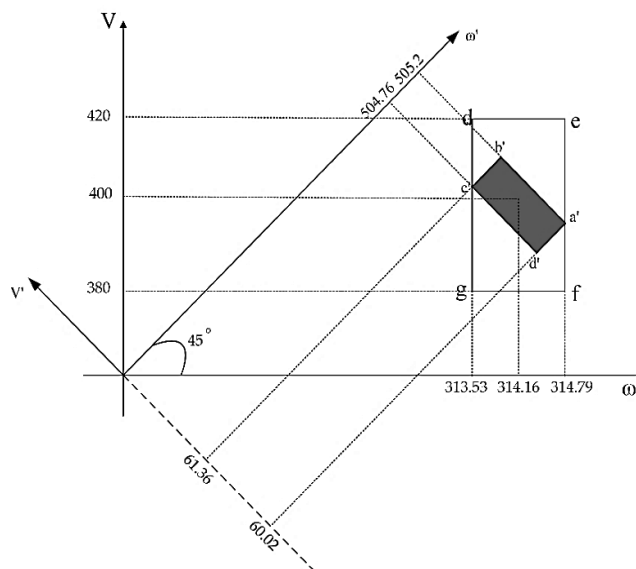
Table (1): Calculated eigenvalues

$(-0.34 \pm j2.06) \times 10^{-2}$	$(-3.46 \pm j0.17) \times 10^{-2}$	$-1.01 \times 10^{-2}$
$(-0.32 \pm j2.02) \times 10^{-4}$	$(-6.45 \pm j3.16) \times 10^{-2}$	$-2.99 \times 10^{-1}$
$(-0.19 \pm j1.55) \times 10^{-4}$	$(-3.50 \pm j3.47) \times 10^{-2}$	$-2.97 \times 10^{-1}$
$(-0.17 \pm j1.52) \times 10^{-4}$	$(-1.00 \pm j0.01) \times 10^{-2}$	S2, S3: $(-1.57 \pm j3.05) \times 10^{-1}$
$(-6.52 \pm j0.47) \times 10^{-2}$	$-1.01 \times 10^{-2}$	S1: $-1.38 \times 10^{-1}$



شکل (۶): مکان هندسی مقادیر ویژه غالب به ازای تغییرات

Figure (6): Trajectory of dominant eigenvalues with respect to a)  $m'_p$  from  $1.5 \times 10^{-5}$  to  $1.5 \times 10^{-4}$ , b)  $n'_q$  from  $1 \times 10^{-4}$  to  $1 \times 10^{-3}$ .

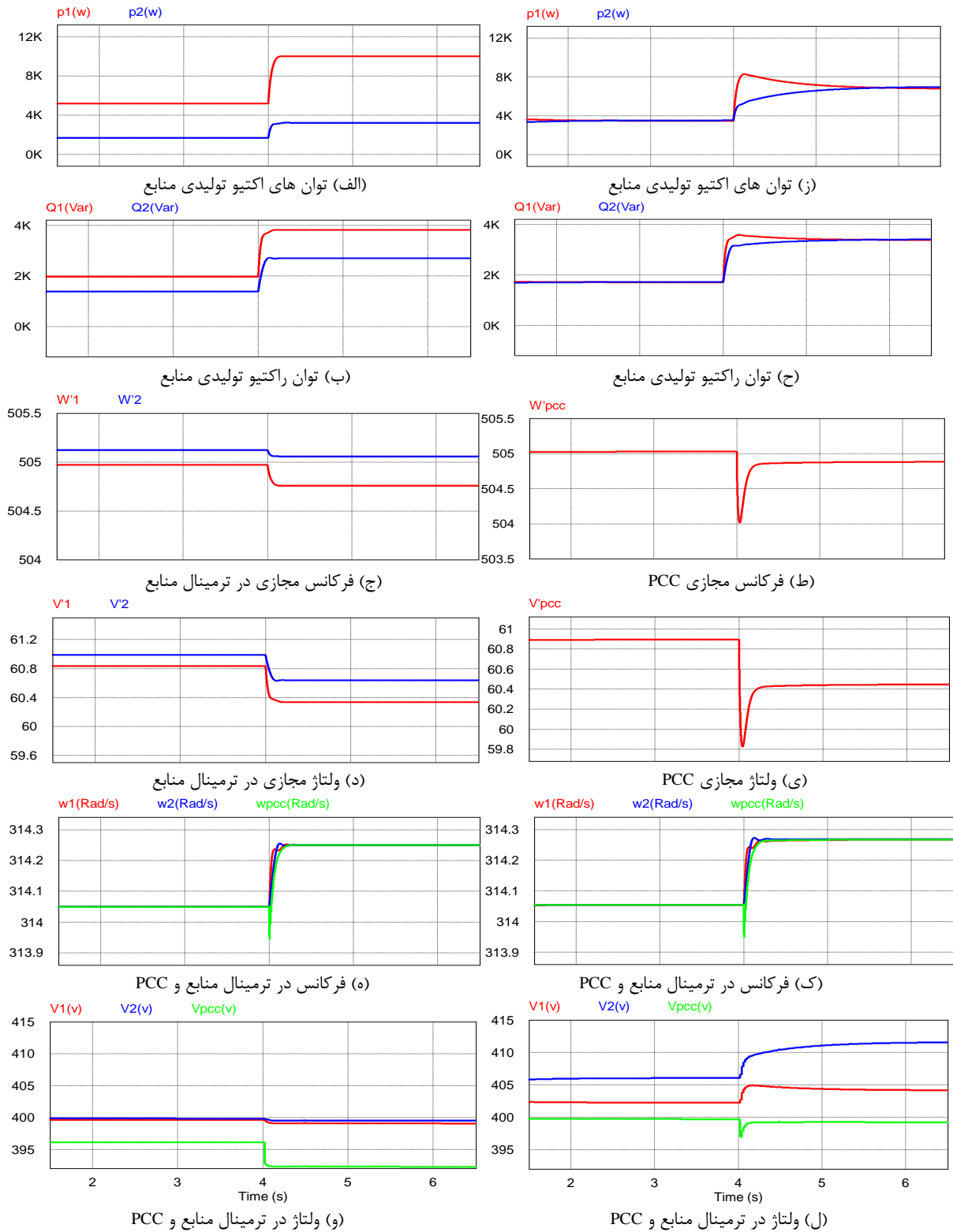


شکل (۷): قاب‌های فرکانس-ولتاژ واقعی و مجازی و ارتباط حدود تغییرات نظر گرفته شده کمیت‌ها در شبیه‌سازی

Figure (7): real and virtual frequency-voltage frames and relation between quantities intended variation range in simulations

## ۵- نتایج شبیه‌سازی زمانی

جهت تایید عملکرد استراتژی کنترلی پیشنهادی و مقایسه آن با ساختار کنترل متداول، شبیه‌سازی زمانی ریزشبه نمونه در نرم افزار PSIM با طول گام  $10^{-5}$  ثانیه انجام شده است. حدود مجاز انحراف فرکانس ( $\pm 0.1$  هرتز)  $\pm 628$  رادیان بر ثانیه و حدود مجاز انحراف ولتاژ  $\pm 20$  ولت معادل  $\pm 5$  درصد ولتاژ نامی در نظر گرفته شده است. برای حفظ فرکانس و ولتاژ در محدوده مجاز و با توجه به روش توضیح داده شده در بخش دوم، محدوده مجاز تغییرات فرکانس و ولتاژ مجازی تعیین و در جدول (۱) ارائه شده است.



شکل (۸): نتایج شبیه‌سازی به‌زای مشخصه‌های افتی قاب مجازی فرکانس-ولتاژ متداول (زیرشکل‌های الف تا و) و به‌زای ساختار کنترل پیشنهادی (ریزشکل‌های ز تا ل).

Figure (8): Simulation results by employing conventional virtual frequency-voltage frame droop characteristics (subfigures a to f) and by employing proposed control method (g to l). a) sources active power generation, b) sources reactive power generation, c) virtual frequency in sources terminal, d) virtual voltage in sources terminal, e) frequency in sources terminal and frequency in PCC, f) voltage in sources terminal and voltage in PCC, g) sources active power generation, h) sources reactive power generation, i) virtual frequency in PCC, j) frequency in sources terminal and frequency in PCC, k) voltage in sources terminal and frequency in PCC

برای وضوح بیشتر، هر دو قاب فرکانس-ولتاژ واقعی و مجازی در شکل (۷) ترسیم و ارتباط حدود تغییرات فرکانس و ولتاژ واقعی و مجازی در نظر گرفته شده در شبیه‌سازی مشخص شده است. در این شبیه‌سازی ابتدا بار ۷ کیلووات با ضریب توان ۰/۹ پس‌فاز است. در زمان ۴ ثانیه بار به ۱۳/۵ کیلووات و با همان ضریب توان ۰/۹ پس‌فاز اضافه خواهد شد. شکل (۸) (زیرشکل‌های الف تا و) نتایج شبیه‌سازی به ازای مشخصه‌های افتی قاب مجازی فرکانس-ولتاژ متداول را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل‌های (۸-الف) و (۸-ب) نشان داده شده با اضافه شدن بار تولید توان اکتیو و راکتیو منابع زیاد شده تا بار بین آنها تقسیم شود. اما تفاوت تولید توان اکتیو منابع و همچنین تفاوت تولید توان راکتیو آنها نشان دهنده بروز خطای تقسیم توان است. فرکانس مجازی و ولتاژ مجازی ترمینال منابع در شکل‌های (۸-ج) و (۸-د) نشان داده شده است. همان‌طور که دیده شده است طی افزایش بار این مقادیر مجازی در ترمینال منابع کاهش یافته‌اند که نتیجه عکس‌العمل مشخصه‌های افتی قاب مجازی فرکانس-ولتاژ محقق شده در ترمینال منابع است. تفاوت فرکانس مجازی ترمینال منابع و همچنین تفاوت ولتاژ مجازی ترمینال منابع تاییدکننده خاصیت محلی آنها است. شکل‌های (۸-ه) و (۸-و) فرکانس و ولتاژ باس‌های مختلف را نشان می‌دهند. مطابق با انتظار فرکانس و ولتاژ ترمینال منابع در محدوده در نظر گرفته شده قرار دارند. شکل (۸) (زیرشکل‌های ز تا ل) نتایج شبیه‌سازی به‌ازای ساختار کنترل پیشنهادی را نشان می‌دهد. فرکانس و ولتاژ ریزش‌بکه در شکل‌های (۸-ک) و (۸-ل) نشان داده شده‌اند که تایید می‌کنند فرکانس و ولتاژ ترمینال منابع در محدوده در نظر گرفته شده قرار دارند. مقایسه نتایج شکل‌های (۸-و) و (۸-ل) مشخص می‌کند که در روش پیشنهادی ولتاژ PCC (ولتاژ بار) کیفیت بهتری داشته و نزدیک تر به مقدار نامی ۴۰۰ ولت است. از آنجا که روش پیشنهادی به‌صورت غیرمستقیم ولتاژ PCC را تنظیم کرده اما روش متداول به‌صورت غیرمستقیم ولتاژ ترمینال منابع را تنظیم می‌کند و به‌واسطه افت ولتاژ خطوط این نتیجه مورد انتظار است.

## ۶- نتیجه گیری

در این مقاله بروز خطای تقسیم توان اکتیو و خطای تقسیم توان راکتیو بین منابع یک ریزش‌بکه با به‌کار بردن مشخصه‌های افتی قاب مجازی فرکانس-ولتاژ مورد توجه قرار گرفته است. توضیح داده شد که منشأ بروز خطای تقسیم توان اکتیو و راکتیو خاصیت محلی به‌ترتیب کمیت‌های فرکانس مجازی و ولتاژ مجازی است. این درحالی است که برای حفظ فرکانس و ولتاژ نزدیک به نامی نیاز است محدوده تغییرات فرکانس مجازی و ولتاژ مجازی کوچک در نظر گرفته شود که خود منجر به افزایش خطای تقسیم توان اکتیو و خطای تقسیم توان راکتیو شده است. در این مقاله مشخصه‌های افتی قاب مجازی فرکانس-ولتاژ چنان اصلاح شدند که توان اکتیو در ازای افت فرکانس مجازی PCC و توان راکتیو در ازای افت ولتاژ مجازی PCC بین منابع تقسیم شود. در این شرایط یک پارامتر مشترک مسئول تقسیم توان اکتیو بین منابع و یک پارامتر مشترک نیز مسئول تقسیم توان راکتیو بین منابع شده است. متعاقباً خطای تقسیم توان اکتیو و همچنین خطای تقسیم توان راکتیو برطرف شده است. پایداری ساختار کنترل پیشنهادی با استفاده از تحلیل سیگنال کوچک تایید و تاثیر دینامیکی تغییر شیب مشخصه‌های افتی بررسی شد. به کمک نتایج شبیه‌سازی زمانی نشان داده شد صحت تقسیم توان اکتیو و همچنین صحت تقسیم توان راکتیو برآورده شده درحالی که ولتاژ و فرکانس نزدیک به مقدار نامی تنظیم شده‌اند.

## References

### مراجع

- [1] G. Shahgholian, "A brief review on microgrids: Operation, applications, modeling, and control", International Transactions on Electrical Energy Systems, vol. 31, no. 6, Article Number: e12885, June 2021 (doi: 10.1002/2050-7038.12885).
- [2] M. Baharizadeh, M.S. Golsorkhi, M. Shahparasti, M. Savaghebi, "A two-layer control scheme based on P – V droop characteristic for accurate power sharing and voltage regulation in dc microgrids", IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 12, no. 4, pp. 2776-2787, July 2021 (doi: 10.1109/TSG.2021.3060074).
- [3] S. Gorji, S. Zamanian, M. Moazzami, "Techno-economic and environmental base approach for optimal energy management of microgrids using crow search algorithm", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 11, no. 43, pp. 49-68, Oct. 2020 (dor: 20.1001.1.23223871.1399.11.43.4.7).

- [4] H. Han, X. Hou, J. Yang, J. Wu, M. Su, J.M. Guerrero, "Review of power sharing control strategies for islanding operation of ac microgrids", *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 7, no. 1, pp. 200-215, Jan. 2016 (doi: 10.1109/TSG.2015.2434849).
- [5] J.M. Guerrero, J.C. Vasquez, J. Matas, L.G. Vicuna, M. Castilla, "Hierarchical control of droop-controlled ac and dc microgrids- A general approach toward standardization", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 1, pp. 158-172, Jan. 2011 (doi: 10.1109/TIE.2010.2066534).
- [6] A. Khaledian, "High-reliability electric power generation system for aircraft based on generators smart droop control method", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 13, no. 52, pp. 19-32, June 2023 (doi: 20.1001.1.23223871.1402.14.53.2.6).
- [7] Y. Li, Y.W. Li, "Power management of inverter interfaced autonomous microgrid based on virtual frequency-voltage frame", *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 2, no. 1, pp. 30-40, March 2011 (doi: 10.1155/2013/816525).
- [8] J. He, Y.W. Li, "Analysis, design, and implementation of virtual impedance for power electronics interfaced distributed generation", *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 47, no. 6, pp. 2525-2538, Nov./Dec. 2011 (doi: 10.1109/TIA.2011.2168592).
- [9] J.M. Guerrero, J. Matas, L.G. Vicuna, M. Castilla, J. Miret, "Decentralized control for parallel operation of distributed generation inverters using resistive output impedance", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 54, no. 2, pp. 994-1004, April 2007 (doi: 10.1109/TIE.2007.892621).
- [10] D.C. Raj, D.N. Gaonkar, J.M. Guerrero, "Power sharing control strategy of parallel inverters in ac microgrid using improved reverse droop control", *International Journal of Power Electronics*, vol. 11, no. 1, pp. 116-137, 2020 (doi: 10.1504/IJPELEC.2020.103953).
- [11] M. Kamali, B. Fani, G. Shahgholian, G.B. Gharehpetian, M. Shafiee, "Harmonic compensation and microgrid voltage and frequency control based on power proportional distribution with adaptive virtual impedance method", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 14, no. 53, pp. 33-60, June 2023 (doi: 20.1001.1.23223871.1402.14.53.3.7).
- [12] Y. Li, Y.W. Li, "Virtual frequency-voltage frame control of inverter based low voltage microgrid", *Proceeding of the IEEE/EPEC*, pp. 1-6, Montreal, QC, Canada, Oct. 2009 (doi: 10.1109/EPEC.2009.5420973).
- [13] Y. Han, H. Li, P. Shen, E.A.A. Coelho, J.M. Guerrero, "Review of active and reactive power sharing strategies in hierarchical controlled microgrids", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 32, no. 3, pp. 2427-2451, March 2017 (doi: 10.1109/TPEL.2016.2569597).
- [14] J. Zhou, P. Cheng, "A modified Q-V droop control for accurate reactive power sharing in distributed generation microgrid", *IEEE Trans. on Industrial Application*, vol. 55, no. 4, pp. 4100-4109, July/Aug. 2019 (doi: 10.1109/TIA.2019.2903093).
- [15] Y. Khayat, Q. Shafiee, R. Heydari, M. Naderi, T. Dragičević, J.W. Simpson-Porco, F. Dörfler, M. Fathi, F. Blaabjerg, J.M. Guerrero, H. Bevrani, "On the secondary control architectures of ac microgrids: An overview", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 35, no. 6, pp. 6482-6500, June 2020 (doi: 10.1109/TP-EL.2019.2951694).
- [16] A. Micallef, M. Apap, C. Spiteri-Staines, J.M. Guerrero, J.C. Vasquez, "Reactive power sharing and voltage harmonic distortion compensation of droop controlled single phase islanded microgrids", *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 5, no. 3, pp. 1149-1158, May 2014 (doi: 10.1109/TSG.2013.2291912).
- [17] Y.W. Li, C.N. Kao, "An accurate power control strategy for power-electronics-interfaced distributed generation units operating in a low-voltage multibus microgrid", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 24, no. 12, pp. 2977-2988, Dec. 2009 (doi: 10.1109/TPEL.2009.2022828).
- [18] M. Baharizadeh, H.R. Karshenas, J.M. Guerrero, "An improved power control strategy for hybrid ac-dc microgrids", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 95, pp. 364-373, Feb. 2018 (doi: 10.1016/j.ijepes.2017.08.036).
- [19] A. Mohammed, S.S. Refaat, S. Bayhan, H. Abu-Rub, "AC microgrid control and management strategies: Evaluation and review", *IEEE Power Electronics Magazine*, vol. 6, no. 2, pp. 18-31, June 2019 (doi: 10.1109/MP-EL.2019.2910292).
- [20] S. Leitner, M. Yazdani, A. Mehrizi-Sani, A. Muetze, "Small-signal stability analysis of an inverter-based microgrid with internal model-based controllers", *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 9, no. 5, pp. 5393-5402, Sept. 2018 (doi: 10.1109/TSG.2017.2688481).
- [21] N. Pogaku, M. Prodanovic, T.C. Green, "Modeling, analysis and testing of autonomous operation of an inverter-based microgrid", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 22, no. 2, pp. 613-625, March 2007 (doi: 10.1109/TPEL.2006.8900003).

1. Active power-frequency
2. Reactive power-voltage
3. Active power-virtual frequency
4. Reactive power-virtual voltage
5. Point of common coupling