

A Framework for Monitoring and Enhancing the Dynamic Stability of Islanded Multi-Microgrid Systems

Masood Sorouri,¹ Mahmoud Reza Shakarami,² Meysam Doostizadeh,^{3*} Houman Bastami⁴

¹ Faculty of Engineering, Lorestan University, Khorramabad, Lorestan, Iran, soroori.ma@fe.lu.ac.ir

² Faculty of Engineering, Lorestan University, Khorramabad, Lorestan, Iran, shakarami.mr@lu.ac.ir

³ Faculty of Engineering, Lorestan University, Khorramabad, Lorestan, Iran, doostizadeh.m@lu.ac.ir

⁴ Faculty of Engineering, Lorestan University, Khorramabad, Lorestan, Iran, bastami.h@lu.ac.ir

Keywords:

multi-microgrid system,
islanded operation,
adaptive stability improvement,
two-layer network,
hierarchical control.

Abstract: With the expansion of multi-microgrid networks incorporating inverter-based distributed energy resources (IBDER), maintaining and enhancing system stability has become a significant challenge. The complex interactions between microgrids and control levels can reduce the damping of system eigenvalues or modes. These low-damping modes (LDMs) degrade system stability and increase oscillations. To address this challenge, this paper presents a method for stability monitoring and enhancement in islanded multi-microgrid networks controlled through a three-level hierarchical structure. At the primary level, droop control is employed for power sharing among generation units. At the secondary level, voltage and frequency deviations from nominal values are restored using a distributed consensus method. At the tertiary level, the proposed method, known as Reduced Consensus Coefficient Estimation (RCCE), is utilized to monitor and improve system stability adaptively. In the RCCE method, the consensus coefficient is reduced until the damping of LDMs is enhanced, leading to improved dynamic system stability. Simulation results in MATLAB demonstrate that the proposed method effectively enhances stability and reduces frequency and voltage oscillations in multi-microgrid systems.

Original Research Article

Paper History:

Received: 11/03/2025

Revise: 03/08/2025

Accepted: 13/08/2025

How to cite this article: Sorouri, M., Shakarami, M.R., Doostizadeh, M., Bastami, H., "A Framework for Monitoring and Enhancing the Dynamic Stability of Islanded Multi-Microgrid Systems", Energy Engineering and Management, Vol. 14, No. 3, PP. 48-67, 2024, <https://doi.org/10.22052/EEM.2025.256466.1106>

© 2023 University of Kashan Press.

This is an open access article under the CC BY license. (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Extended Abstract

Introduction

This paper presents a novel adaptive stability enhancement method for multi-microgrid (MMG) systems using a two-layer hierarchical control structure. The proposed method, termed Reduced Consensus Coefficient Estimation (RCCE), conducts stability monitoring at the second control layer. Initially, the overall system state matrix is computed, and modes with a damping ratio below 0.1 are identified as low-damping modes (LDMs) that adversely affect system stability. The analysis

conducted in this study reveals that consensus gains, in distributed secondary control, play a crucial role in the emergence of these critical modes. The consensus gain that contributes most significantly to the LDMs is selectively adjusted to improve system stability. Consensus gains are adjusted through a bi-level optimization process that iteratively establishes a direct relationship between damping ratios and consensus gains. This represents the first instance in which such a relationship has been systematically integrated into a stability improvement framework. Furthermore, a

small-signal stability analysis is conducted to evaluate the impact of consensus gains on the overall dynamic performance of the system.

Materials and Methods

The RCCE method is designed to monitor and improve system stability adaptively by analyzing eigenvalues. To identify the key parameters influencing stability, the eigenvalues of the entire system are computed and analyzed. Utilizing the participation coefficient method, these eigenvalues are categorized into three distinct groups based on their frequency ranges. The results indicate that the active power controller has a significant impact on the low-frequency modes, which are particularly sensitive to system stability. A comprehensive stability analysis is conducted for three consensus gains: c_p , c_ω , and c_v . Among these, c_p has the most significant effect on stability. Increasing c_p results in system instability, while decreasing it improves stability. However, an excessive reduction in c_p can prolong the response time of the system. Therefore, it is essential to maintain an optimal balance between stability improvement and response speed. The RCCE method formulates a bi-level iterative optimization problem that minimizes the number of computational iterations. The damping ratio is calculated at the first level by updating dynamic system data and recomputing the eigenvalues. Notably, most system data remain static, while only a small portion of dynamic variables such as load power is updated in each iteration. At the second level, the new value of c_p is estimated by approximating the slope of the tangent line to the response curve. The process then returns to the first level. These iterations continue until all critical modes (LDMs) are eliminated.

Results

The proposed method was tested on a multi-microgrid system consisting of three microgrids, each of which contains four inverter-based distributed energy resources (IBDERs). The system was simulated using MATLAB and analyzed both in frequency and in time domains under three diverse operational scenarios. In the frequency domain analysis, the system initially exhibited two LDMs. By using the proposed RCCE algorithm, the most significant contributor to the emergence of these LDMs was identified as IBDER3 in the first microgrid. As a result, the corresponding consensus control parameter (c_{p3}) was reduced from 75 to 51 after four iterations, eliminating the LDMs and enhancing system stability. In the time-domain

analysis, a load disturbance scenario was implemented in which the second load in the first microgrid increased from 22.3 A to 74.6 A at the 10th second and, then, decreased to 47.8 A at the 20th second. The simulation results indicated that when employing the RCCE method, the oscillations in angular frequency, voltage, and active power were dampened significantly faster compared to the system not using this method. Specifically, oscillations in angular frequency and voltage were dampened approximately 2 seconds faster than those observed without the RCCE method. These findings validate the effectiveness of the RCCE method, confirming that it enhances system stability by reducing oscillation durations following disturbances. The results underscore the method's ability to provide a more efficient and responsive solution to sudden system changes, thereby ensuring an improved overall performance under dynamic conditions.

Discussion and Conclusion

This paper proposed the Reduced Consensus Coefficient Estimation (RCCE) method to enhance the adaptive stability of multi-microgrid systems by utilizing a two-layer hierarchical control structure. The RCCE method operates at the second control layer, beginning with the computation of the overall system state matrix and the identification of critical modes that compromise stability. By adjusting the control gains of Inverter-Based Distributed Generators (IBDERs), the system's stability can be significantly improved. The tuning of these control gains is accomplished through a bi-level optimization problem, which iteratively establishes a direct relationship between damping ratios and consensus control gains for the first time. Furthermore, a small-signal stability analysis is conducted to assess the impact of control gains on the overall system stability. To evaluate the effectiveness of the proposed RCCE method, both time-domain and frequency-domain analyses were conducted on a multi-microgrid test system under three diverse operational scenarios. The results indicated that, in comparison to cases without RCCE, the proposed method significantly reduced oscillation durations, improved stability, and enhanced the system's resilience against disturbances. The findings confirm that the RCCE method provides a robust and efficient approach for enhancing adaptive stability in multi-microgrid systems. By enabling adaptive control gain tuning, multi-microgrid systems can effectively respond to sudden fluctuations in load and generation while maintaining optimal performance across various operational conditions.

راهکاری برای پایش و افزایش پایداری دینامیکی سیستم‌های جزیره‌ای چندریزشبکه‌ای

مسعود سروری^۱، محمودرضا شاکرمی^۲، میثم دوستی‌زاده^{۳*}، هومن بسطامی^۴

^۱ دانشجوی دکتری دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران، soroori.ma@fe.lu.ac.ir

^۲ استاد دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران، shakarami.mr@lu.ac.ir

^۳ دانشیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران، doostizadeh.m@lu.ac.ir

^۴ استادیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران، bastami.h@lu.ac.ir

واژه‌های کلیدی:

سیستم چندریزشبکه،
بهره‌برداری جزیره‌ای،
بهبود تطبیقی پایداری،
شبکه دولایه،
کنترل سلسله‌مراتبی.

مقاله علمی پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۲۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۲۲

چکیده: با گسترش استفاده از سیستم‌های چندریزشبکه‌ای (MMG) شامل منابع تولید پراکندهٔ اینورتری (IBDER)، حفظ و بهبود پایداری این سیستم‌ها در حالت جزیره‌ای به چالشی اساسی تبدیل شده است. تعاملات پیچیده میان ریزشبکه‌ها و سطوح کنترلی مختلف، می‌تواند منجر به کاهش میرایی مقادیر ویژه یا حالت‌های سیستم شود. حالت‌های کم‌میرایی (LDM) می‌توانند پایداری سیستم را به خطر اندازند و نوسانات را افزایش دهند. در این مقاله، برای غلبه بر این چالش، یک روش جدید برای پایش و بهبود پایداری سیستم‌های جزیره‌ای چندریزشبکه‌ای با ساختار کنترلی سلسله‌مراتبی سه‌سطحی پیشنهاد شده است. در سطح اول، از کنترل افقی برای تسهیم توان میان واحدهای تولید پراکنده استفاده شده است. در سطح دوم، انحرافات ولتاژ و فرکانس از مقادیر نامی با استفاده از یک روش اجماع توزیع‌شده، تصحیح می‌شوند. در سطح سوم، یک روش پیشنهادی به نام تخمین ضریب اجماع کاهش‌یافته (RCCE)، برای پایش و بهبود تطبیقی پایداری سیستم چندریزشبکه‌ای به کار گرفته می‌شود. در روش RCCE، ضریب اجماع به‌گونه‌ای کاهش می‌یابد که میرایی LDMها افزایش یافته و پایداری دینامیکی سیستم بهبود یابد. نتایج شبیه‌سازی‌ها در MATLAB نشان می‌دهند که روش پیشنهادی به‌طور مؤثری پایداری سیستم چند ریزشبکه‌ای را افزایش داده و نوسانات ولتاژ و فرکانس را کاهش می‌دهد.

۱. مقدمه

امروزه به کارگیری منابع انرژی تجدیدپذیر در قالب ریزشبکه^۱ (MG) روزه‌به‌روز در حال افزایش است [۱]. اما در موارد خاص مانند اختلالات بزرگ، یک ریزشبکه واحد ممکن است پایداری را به دلیل ظرفیت تولید محدود تضمین نکند [۲]. برای رفع این مشکل، یک راه حل امیدوارکننده، ادغام چندین ریزشبکه برای تشکیل یک سیستم چندریزشبکه (MMG)^۲ است [۳]. با این حال، این شبکه‌ها با چالش‌هایی مانند افزایش پیچیدگی سیستم‌های کنترل و ارتباطی، و همچنین به دلیل برهم‌کنش میان ریزشبکه‌ها با کاهش پایداری مواجه‌اند [۴]. به همین دلیل، ساده‌سازی ارتباط، کنترل و بهبود پایداری این شبکه‌ها، توجه محققان را به خود جلب کرده است.

کنترل دولایه در سیستم‌های چندریزشبکه‌ای، برای کاهش پیچیدگی ارتباطی و کنترلی به عنوان یک راه حل کارآمد شناخته می‌شود [۵]. این ساختار کنترلی شامل دو سطح کنترل اولیه و ثانویه در لایه ریزشبکه و یک سطح ثالثیه در لایه چند ریزشبکه است. این ساختار می‌تواند به صورت متمرکز یا توزیع شده اجرا شود که روش توزیع شده به دلیل هزینه کمتر و قابلیت اطمینان بیشتر محبوب‌تر است [۶]. در این روش، هر واحد تولید پراکنده^۳ (DG) یا ریزشبکه تنها نیاز به تبادل اطلاعات با حداقل یکی از همسایگان خود دارد [۷]. با این حال، برهم‌کنش بین دو لایه و میان DGها و ریزشبکه‌های همسایه می‌تواند موجب ایجاد حالت‌های با میرایی کم، موسوم به حالت‌های کم میرایی (LDM)^۴ شود که نوسانات و کاهش پایداری سیستم را به دنبال دارد [۸]. بنابراین، تحلیل سیگنال کوچک، شناسایی LDM و افزایش نسبت میرایی آن‌ها بسیار مهم است.

تاکنون در مطالعات معدودی به آنالیز پایداری سیگنال کوچک سیستم چندریزشبکه‌ای پرداخته شده است [۹]. برای مثال، در مرجع [۱۰]، یک روش مدل‌سازی سیگنال کوچک برای سیستم چندریزشبکه پیشنهاد شده است که در آن هر ریزشبکه به عنوان یک واحد DG بدون در نظر گرفتن دینامیک داخلی آن ساده شده است. بنابراین، روش ارائه شده در آن مطالعه دقیق نیست. مقاله [۱۱] به تحلیل پایداری سیگنال کوچک در سیستم‌های ریزشبکه جزیره‌ای مبتنی بر اینورتر پرداخته است و تأثیر تأخیرات ارتباطی بر پایداری این سیستم‌ها را بررسی می‌کند. در این مطالعه، مدل‌های ریاضی برای تحلیل پایداری و شناسایی شرایط بحرانی که ممکن است باعث

نوسانات غیرقابل قبول در ریزشبکه‌های جزیره‌ای شوند، ارائه شده است. در مرجع [۱۲] به بررسی روش‌های تحلیل سیگنال کوچک برای بهبود پایداری همگام‌سازی ژنراتورهای مجازی سنکرون (VSG) با عملکرد شبکه‌ساز پرداخته شده است. در آن مطالعه، یک روش سیستماتیک برای تحلیل سیگنال کوچک ارائه شده است که به بهبود پایداری همگام‌سازی ژنراتورهای مجازی سنکرون کمک می‌کند.

در مرجع [۱۳] به بررسی استفاده از کنترل‌کننده‌های مرتبه کسری برای بهبود پایداری سیگنال کوچک در ریزشبکه‌های مبتنی بر اینورتر پرداخته شده است. کنترل‌کننده‌های مرتبه کسری با ویژگی‌های خاص خود می‌توانند به بهبود پایداری سیستم‌های قدرت کمک کنند. در آن مطالعه، عملکرد این نوع کنترل‌کننده‌ها در شرایط مختلف شبیه‌سازی شده است.

در مرجع [۱۴] به معرفی یک روش کنترل جدید برای بهبود پایداری ریزشبکه‌های هیبریدی AC/DC پرداخته شده است. این روش کنترل شامل دو لایه است که ابتدا ولتاژ و فرکانس را تنظیم کرده، سپس با استفاده از کنترل توزیع شده، پایداری سیستم در برابر تغییرات بار و اختلالات را حفظ می‌کند.

در مرجع [۱۵] یک روش کنترل مشارکتی توزیع شده دولایه برای سیستم‌های چند ریزشبکه ارائه شده است که در لایه چند ریزشبکه، کنترل ثالثیه، پخش بار را از طریق نقطه اتصال مشترک^۵ (PCC) هر ریزشبکه به صورت غیرمتمرکز تنظیم می‌کند. همچنین کنترل چهارم توزیع شده فرکانس سیستم و ولتاژ باس بحرانی را به مقادیر اسمی خود باز می‌گرداند و اشتراک‌گذاری دقیق توان بین ریزشبکه‌ها را تضمین می‌کند. به علاوه، یک مدل دینامیکی سیگنال کوچک برای ارزیابی عملکرد دینامیکی سیستم‌های چندریزشبکه با روش کنترل پیشنهادی توسعه داده شده است. با این حال، در آن مطالعه تنها به تجزیه و تحلیل و دلیل به وجود آمدن حالت‌های با میرایی ضعیف پرداخته شده و در آن و نیز در سایر مطالعات مذکور، روشی برای بهبود پایداری ارائه نشده است. در مرجع [۱۶] یک چارچوب کنترل توزیع شده لایه‌ای برای سیستم چندریزشبکه پیشنهاد شده است که در آن از اینرسی مجازی برای بهبود پاسخ فرکانسی گذرای سیستم بهره برده شده است. همچنین یک مدل سیگنال کوچک برای یک سیستم چندریزشبکه تعمیم یافته، برای تجزیه و تحلیل تأثیر اتصال ریزشبکه‌ها و پارامترهای مختلف بر روی پایداری دینامیکی سیستم چندریزشبکه ارائه شده است. با وجود این، در آن مطالعه روشی برای بهبود

1. Microgrid
2. Multi-Microgrid
3. Distributed generation
4. Low Damping Modes

پارامترهای کنترلی ارائه نشده است. تنها در مرجع [۱۷] یک مدل دینامیکی سیگنال کوچک سیستم چندریزشبکه پیشنهاد شده است که با آن پارامترهای کنترل توزیع شده با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات به‌منظور افزایش پایداری سیستم بهینه شده‌اند. هرچند

که در آن روش بهبود پایداری سیستم به‌صورت تطبیقی نیست و با تغییر سیستم ممکن است پایداری آن کاهش یابد. مقایسه‌ای از پژوهش‌های اخیر در زمینه معماری، کنترل و تحلیل پایداری سیستم‌های MMG در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول (۱): مقایسه پژوهش‌های اخیر در پایداری MMGها

مرجع	ساختار کنترلی		تجزیه و تحلیل سیگنال کوچک	کنترل توزیع شده		ضرایب کنترل اجماع	
	دولایه	ترکیبی		فرکانس	ولتاژ	ارزیابی پایداری	بهبود تطبیقی پایداری
[5]	✓	×	✓	×	✓	×	×
[18]	×	×	✓	×	×	×	×
[19]	×	✓	✓	✓	×	×	×
[13]	×	×	✓	×	×	×	×
[20]	×	×	×	×	✓	×	×
[21]	×	×	✓	×	×	×	×
[22]	✓	×	✓	✓	✓	×	×
[16]	✓	✓	✓	×	×	✓	×
[15]	✓	×	✓	✓	✓	✓	×
[17]	✓	×	✓	✓	✓	✓	×
این مطالعه	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

- در الگوریتم RCCE پیشنهادی به‌منظور تضمین پایداری سیستم، ابتدا با محاسبه نسبت‌های میرایی، پایداری سیستم پایش می‌شود. سپس با استفاده از روش ضریب مشارکت، منشأ LDMها یافت و پارامتر کنترلی مربوطه در جهت افزایش پایداری تغییر داده می‌شود. در روش پیشنهادی، نیازی به تغییر سایر پارامترهای کنترلی و یا عملیات اصلاحی دیگر نیست.

- عملیات تحلیل و تضمین پایداری برخلاف مطالعات قبلی به‌صورت تطبیقی و در حین عملکرد انجام می‌شود و محدود به زمان طراحی سیستم نیست. بنابراین، موجب بهبود پایداری سیستم در شرایط عملکرد مختلف می‌شود. در ادامه مقاله، چارچوب کنترل لایه‌ای پیشنهادی، مدل‌سازی ریاضی و تحلیل سیگنال کوچک سیستم در بخش ۲ ارائه شده است. تجزیه و تحلیل پایداری و الگوریتم پیشنهادی در بخش ۳ ارائه می‌شود. در بخش ۴، نتایج شبیه‌سازی حوزه فرکانس و زمان ارائه شده، و در نهایت، نتیجه‌گیری در بخش ۵ آورده شده است.

۲. ساختار سیستم چندریزشبکه پیشنهادی

۱.۲. چارچوب دولایه پیشنهادی

ساختار کنترل دولایه پیشنهادی در شکل (۱) نشان داده شده است. براساس این شکل، هر سیستم چندریزشبکه از k ریزشبکه مجاور

همان‌طور که در جدول (۱) نشان داده شده است، تنها مراجع [۱۵]، [۱۷] و [۲۲] از معماری دولایه استفاده کرده‌اند و در آن‌ها کنترل ولتاژ و فرکانس به‌صورت توزیع شده انجام شده است. مدل‌سازی سیگنال کوچک نیز در این مراجع ارائه شده است. بااین‌حال، این مطالعات به‌طور کامل به موضوع تنظیم تطبیقی ضرایب کنترل اجماع با هدف بهبود پایداری در حین بهره‌برداری نپرداخته‌اند. بر اساس جدول (۱)، مطالعه حاضر با ارائه رویکردی منحصربه‌فرد در بهبود تطبیقی عملکرد دینامیکی در معماری HMMG، همراه با کنترل توزیع شده ولتاژ و فرکانس، سهم نوآورانه‌ای ارائه می‌کند. در روش پیشنهادی که در لایه چندریزشبکه قرار دارد، پایداری سیستم مورد پایش قرار می‌گیرد و در صورت وجود LDM با استفاده از الگوریتم پیشنهادی موسوم به تخمین ضریب اجماع کاهش یافته (RCCE)^۱، نسبت میرایی LDMها را افزایش و پایداری را بهبود می‌بخشد. به‌طور خلاصه، نوآوری‌های این مقاله به شرح زیر است:

- کنترل چندریزشبکه به‌صورت یک سیستم دولایه ارائه شده است که در آن پایداری سیستم با روش RCCE پایش و تضمین می‌شود. این روش برای نخستین بار رابطه بین نسبت میرایی حالت‌های سیستم و ضریب‌های کنترل اجماع را در قالب یک مسئله دوسطحی بررسی می‌کند.

1. Reduced Consensus Coefficient Estimation

هر کنترل کننده دارای معادلات دیفرانسیل مربوط به خود است. مدل ریاضی هر IBDER شامل ۱۳ معادله دیفرانسیل است که جزئیات مربوط به آن‌ها و معادلات مربوط به خط و بار در [۱۸] پیدا می‌شود. به منظور ایجاد مدل یکپارچه دینامیکی از سیستم چندریزشبکه‌ای، کلیه متغیرهای دینامیکی شامل ولتاژها، جریان‌ها و سیگنال‌های کنترلی، به یک قاب مرجع مشترک منتقل شده‌اند. در این مطالعه، قاب مرجع مربوط به IBDER شماره یک از ریزشبکه اول به عنوان قاب مرجع مشترک انتخاب شده است که با فرکانس ثابت $\omega_{com} = 314 \text{ rad/s}$ دوران می‌کند.

برای انتقال متغیرهای هر IBDER به این قاب، زاویه اختلاف بین قاب محلی اینورتر i و قاب مرجع مشترک به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\delta_i^k = \int (\omega_i^k - \omega_{com}) dt \quad (1)$$

که در آن، ω_i^k فرکانس زاویه‌ای IBDER $_i$ است که بر مبنای کنترل اُفتی توان اکتیو و به صورت دینامیکی توسط کنترل کننده توان اینورتر محاسبه می‌شود.

برای تبدیل مؤلفه‌های dq از قاب محلی به قاب مرجع مشترک، از ماتریس دوران وابسته به زاویه اختلاف بین قاب‌ها استفاده می‌شود که به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

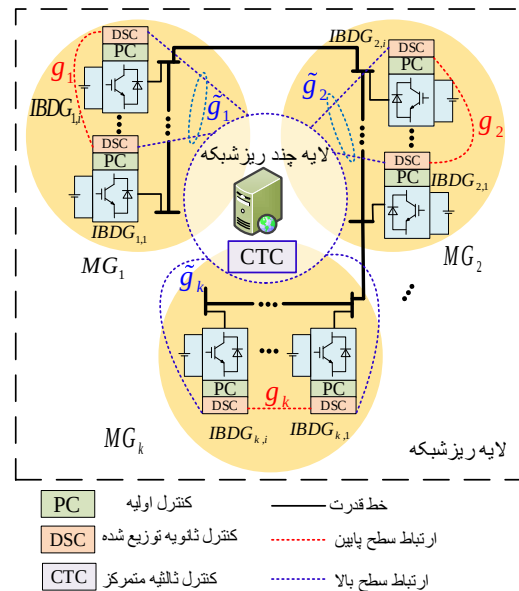
$$T_i^k = \begin{bmatrix} \cos(\delta_i^k) & -\sin(\delta_i^k) \\ \sin(\delta_i^k) & \cos(\delta_i^k) \end{bmatrix} \quad (2)$$

به طور مشابه، برای تبدیل متغیرها از قاب مرجع مشترک به قاب محلی IBDER، از معکوس ماتریس انتقال معادله (۲) استفاده می‌شود. این تبدیل‌ها امکان تجمیع تمامی زیرسیستم‌ها در فضای حالت و تحلیل سیگنال کوچک را فراهم می‌کند. جزئیات بیشتر در مورد نحوه انتقال متغیرها بین مرجع محلی IBDERها و قاب مرجع مشترک در [۱۸] یافت می‌شود.

بر اساس شکل (۲)، $\mathbf{V}_{o,i}$ (ولتاژ خازن $\mathbf{C}_{f,i}$) و $\mathbf{i}_{o,i}$ (جریان خروجی فیلتر LC)، به ورودی کنترل کننده توان اعمال می‌شوند. این کنترل کننده فرکانس زاویه‌ای IBDER (ω_i) و همچنین مقدار ولتاژ مرجع ($\mathbf{V}_{o,i}^*$) را برای کنترل کننده ولتاژ تولید می‌کند. کنترل کننده توان دارای اهمیت ویژه‌ای در پایداری سیستم است. در ادامه، جزئیات بیشتر و همچنین دلیل اهمیت آن در پایداری ذکر خواهد شد. در مرحله بعد، کنترل کننده ولتاژ، مرجع کنترل کننده جریان ($\mathbf{i}_{ij}^*$) را تولید می‌کند. در نهایت، کنترل کننده جریان، ولتاژ مرجع ($\mathbf{V}_i^*$) را برای تبدیل شدن به موج PWM^۳ تولید می‌کند. کنترل کننده توان شامل سه

تشکیل شده است. همچنین هر ریزشبکه شامل منابع تولید پراکنده اینورتری (IBDER)، l بار و m خط است. این سیستم چندریزشبکه‌ای دارای دو شبکه ارتباطی سطح پایین (G) و سطح بالا ($\tilde{G}$) است. تبادل اطلاعات IBDERهای همسایه از طریق شبکه G است. هر IBDER لازم است حداقل با یکی از IBDERهای دیگر در ارتباط باشد [۲۳]. شایان ذکر است که کنترل سطح اولیه با اندازه‌گیری محلی به صورت غیرمتمرکز انجام می‌شود و نیازی به برقراری ارتباط با سایر IBDERها نیست. در شبکه $\tilde{G}$ اطلاعات بین هر IBDER با کنترل ثالثیه مبادله می‌شود [۵]. گفتنی است کنترل ثالثیه در فضای سایبری قرار دارد و به صورت متمرکز است. اهداف کنترل سطوح مختلف کنترل در سیستم چندریزشبکه‌ای به شرح زیر است:

- سطح کنترل اولیه توان خروجی هر IBDER را با استفاده از روش اُفتی^۲ تنظیم می‌کند.
- کنترل ثانویه بازیابی فرکانس و ولتاژ هر IBDER را به مقادیر اسمی آن‌ها، به صورت توزیع شده انجام می‌دهد. در این سطح کنترلی از روش اجماع استفاده می‌شود [۲۴].
- کنترل ثالثیه به طور متمرکز با روش پیشنهادی RCCE، پایداری سیستم چندریزشبکه را پایش و بهبود می‌بخشد.



شکل (۱): ساختار سیستم چندریزشبکه‌ای مبتنی بر اینورتر

۲.۲. مدل ریاضی IBDER

بخش قدرت و سطوح کنترل یک IBDER در شکل (۲) نشان داده شده است. هر IBDER دارای سه کنترل کننده توان، ولتاژ و جریان، و

1. Inverter-Based Distributed Energy Resources
2. droop

3. Pulse width modulation

$$\begin{cases} \omega_i^k = \omega^* - m_{p,i}^k \cdot P_i^k \\ v_{od,i}^k = v^* - m_{q,i}^k \cdot Q_i^k \\ v_{oq,i}^k = 0 \end{cases} \quad (۳)$$

که در آن، ω^* و v^* فرکانس و ولتاژ اسمی، $m_{p,i}^k$ و $m_{q,i}^k$ ضرایب افت فرکانس و ولتاژ هستند. در صورت استفاده از کنترل اولیه فوق به‌تنهایی، فرکانس و ولتاژ دارای مقداری انحراف خواهند بود. بنابراین، برای حذف انحراف لازم است که کنترل ثانویه هم به کار گرفته شود. به عبارت دیگر، کنترل ثانویه توزیع شده برای دستیابی به هدف بازیابی فرکانس و ولتاژ، به روش توزیع شده است. در این کنترل، هر IBDER اطلاعاتی با حداقل یک IBDER همسایه دیگر تبادل می‌کند. در این مطالعه، از روش اجماع به‌عنوان روش کنترلی توزیع شده ثانویه استفاده می‌شود. برای طراحی این روش از کنترل کننده توان استفاده می‌شود که در شکل (۳) بلوک آن نمایش داده شده است.

معادله‌های دیفرانسیل فیلترهای پایین‌گذر درجه یک به‌صورت معادله‌های (۴) و (۵) نوشته می‌شوند [۲۴].

$$\tau_i^{P,k} \cdot \dot{P}_i^k = -P_i^k + P_{ins,i}^k \quad (۴)$$

$$\tau_i^{Q,k} \cdot \dot{Q}_i^k = -Q_i^k + Q_{ins,i}^k \quad (۵)$$

که در آن، $\tau_i^{P,k}$ و $\tau_i^{Q,k}$ ثابت زمانی فیلترهای توان‌های اکتیو و راکتیو هستند. با ترکیب معادله‌های (۴) و (۵) با (۳)، معادلات زیر به دست می‌آیند:

$$\tau_i^{P,k} \cdot \dot{\omega}_i^k = -\omega_i^k + \omega^* - m_{p,i}^k \cdot P_i^k + u_{\omega,i}^k + u_{p,i}^k \quad (۶)$$

$$\tau_i^{Q,k} \cdot \dot{v}_{od,i}^k = -v_{od,i}^k + v^* - m_{q,i}^k \cdot Q_i^k + u_{v,i}^k + u_{q,i}^k \quad (۷)$$

جایی که $u_{\omega,i}^k$ و $u_{p,i}^k$ و $u_{v,i}^k$ و $u_{q,i}^k$ به‌ترتیب ورودی‌های کنترلی فرکانس، توان اکتیو و ولتاژ هستند، که به‌صورت (۸) تا (۱۰) طراحی شده‌اند [۲۶]:

$$\dot{u}_{\omega,i}^k = c_{\omega,i}^k \left[\sum_{j \in N_i} a_{ij}^k \cdot (\omega_j^k - \omega_i^k) + g_i^k \cdot (\omega^* - \omega_i^k) \right] \quad (۸)$$

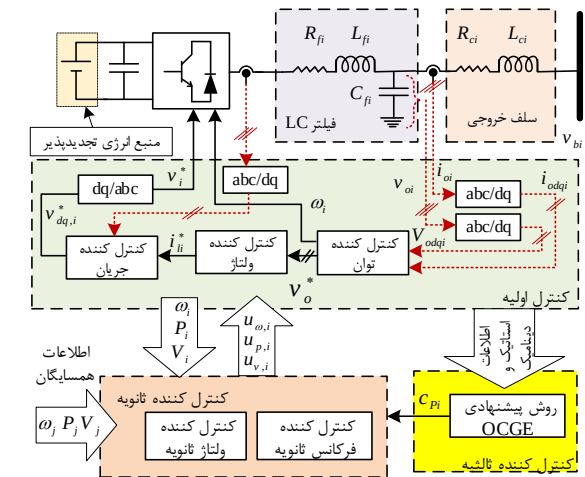
$$\dot{u}_{v,i}^k = c_{v,i}^k \left[\sum_{j \in N_i} a_{ij}^k \cdot (v_{od,j}^k - v_{od,i}^k) + g_i^k \cdot (v^* - v_{od,i}^k) \right] \quad (۹)$$

$$\dot{u}_{p,i}^k = c_{p,i}^k \sum_{j \in N_i} a_{ij}^k \cdot (m_{p,j}^k \cdot P_j^k + m_{p,i}^k \cdot P_i^k) \quad (۱۰)$$

که در آن، $c_{\omega,i}^k$ ، $c_{v,i}^k$ و $c_{p,i}^k$ به‌ترتیب ضرایب کنترلی فرکانس، ولتاژ و توان اکتیو هستند که در ادامه تأثیر آن‌ها بر روی پایداری سیستم بررسی شده است. a_{ij}^k ضریب ارتباط بین IBDERهای i و j در MG_k است، اگر IBDERهای i و j باهم تبادل اطلاعات داشته باشند آنگاه $a_{ij}^k = 1$ در غیر این صورت $a_{ij}^k = 0$ بهره

قسمت محاسبه توان لحظه‌ای، فیلتر پایین‌گذر و کنترل اکتی است. در شکل (۳) نمای بسط یافته این کنترل کننده نمایش داده شده است. پانویس i نشان‌دهنده اینورتر i ام و بالانویس k نشانگر ریزشبکه k ام است. $P_{ins,i}^k$ و $Q_{ins,i}^k$ توان‌های اکتیو و راکتیو لحظه‌ای هستند که به‌ترتیب به‌صورت $V_{od,i} \cdot I_{od,i} - V_{od,i} \cdot I_{od,i} + V_{oq,i} \cdot I_{oq,i}$ و $V_{od,i} \cdot I_{oq,i} - V_{od,i} \cdot I_{od,i}$ محاسبه می‌شوند. سپس توان‌های خروجی اکتیو و راکتیو (Q_i, P_i) پس از عبور مقادیر لحظه‌ای از فیلتر پایین‌گذر با فرکانس قطع ω_c به دست می‌آیند. در مورد کنترل‌های اولیه فرکانس و ولتاژ و نحوه ساخت پارامترهای کنترلی ثانویه در ادامه توضیح داده شده است. کنترل کننده‌های اولیه از مقادیر تولید شده توسط خود و اینورترهای همسایه برای تنظیم ورودی‌های کنترلی استفاده می‌کنند. به‌طور خاص، کنترل ثانویه هر اینورتر از مقادیر فرکانس، ولتاژ و توان تولید شده توسط کنترل اولیه آن اینورتر و اینورترهای همسایه استفاده می‌کند و ورودی‌های کنترلی برای تنظیم کنترل اولیه تولید می‌کند تا انحرافات از مقادیر نامی را تصحیح کند.

این تبادل اطلاعات بین اینورترها از طریق یک شبکه ارتباطی سطح پایین (G) انجام می‌شود که مسئول مدیریت تبادل اطلاعات بین IBDERهای همسایه است. کنترل کننده‌های ثانویه با استفاده از این اطلاعات، ورودی‌های خود را به‌طور مداوم به‌روزرسانی می‌کنند و به این ترتیب پایداری و عملکرد بهینه سیستم حفظ می‌شود.



شکل (۲): بخش‌های قدرت و سطوح کنترل IBDER

۳.۲. کنترل اولیه و ثانویه توزیع شده

در این مطالعه کنترل کننده اولیه بر مبنای روش افی است. این روش به‌طور گسترده‌ای برای کنترل ولتاژ و فرکانس DGها در ریزشبکه جزیره‌ای استفاده می‌شود. معادله مشخصه افت فرکانس و ولتاژ برای IBDER_i در ریزشبکه k در معادله (۳) نشان داده شده است [۲۵]:

سیستم است [۱۲]. بنابراین، مدل سیگنال کوچک مورد نیاز است. برای به دست آوردن مدل سیگنال کوچک سیستم مدل غیرخطی سیستم حول نقطه عملیاتی حالت پایدار خطی سازی شده است. هدف از خطی سازی سیستم غیرخطی پیدا کردن ماتریس حالت سیستم به صورت معادله (۱۱) است.

$$[\Delta \dot{X}_{MMG}] = A_{MMG} \cdot [\Delta X_{MMG}] \quad (11)$$

جایی که A_{MMG} ماتریس حالت کل سیستم، و ΔX_{MMG} نشان دهنده همه حالت های سیستم شامل IBDERها، خطوط، بارها و کنترل های ثانویه $([\Delta X_{MMG}] = [\Delta X_{IBDER} \Delta X_{NET} \Delta X_{LOAD} \Delta X_{SC}])$ است. از طرفی ΔX_{IBDER} نمایشگر حالت های همه IBDERهای کل ریز شبکه های سیستم است که به صورت

$$\begin{bmatrix} \Delta X_{IBDER}^1 \\ \Delta X_1^1 \Delta X_2^1 \cdots \Delta X_1^1 \Delta X_{IBDER}^2 \cdots \Delta X_{IBDER}^k \end{bmatrix}^T$$

می شود. که ΔX_1^1 نشان دهنده حالت های هر IBDER است. تعداد این حالت ها ۱۳ عدد است و به صورت زیر نشان داده می شود:

$$\Delta X_i^1 = [\Delta \delta_i^k \Delta P_i^k \Delta Q_i^k \Delta \phi_{d,i}^k \Delta \phi_{q,i}^k \Delta X_{\gamma_{d,i}}^k \Delta \gamma_{q,i}^k \Delta i_{ld,i}^k \Delta i_{lq,i}^k \Delta v_{od,i}^k \Delta v_{oq,i}^k \Delta i_{od,i}^k \Delta i_{oq,i}^k]^T$$

ΔX_{NET} نشانگر حالت های مربوط به خطوط شبکه است که

شکل بسط یافته آن به صورت

$$\begin{bmatrix} \Delta i_{lineDQ}^1 \\ \Delta i_{lineDQ,1}^1 \Delta i_{lineDQ,2}^1 \cdots \Delta X_{lineDQ,m}^1 \Delta i_{lineDQ}^2 \cdots \Delta i_{lineDQ}^k \end{bmatrix}^T$$

در ماتریس فوق $\Delta i_{lineDQ,m}^k$ جریان خط m در ریز شبکه k ام در قالب مرجع مشترک است. همچنین ΔX_{LOAD} نشانگر حالت های بارهای سیستم است که

$$\begin{bmatrix} \Delta i_{loadDQ}^1 \\ \Delta i_{loadDQ,1}^1 \Delta i_{loadDQ,2}^1 \cdots \Delta X_{loadDQ,l}^1 \Delta i_{loadDQ}^2 \cdots \Delta i_{loadDQ}^k \end{bmatrix}^T$$

آن است. در ماتریس فوق $\Delta i_{loadDQ,l}^k$ جریان بار l ام در ریز شبکه k ام در قالب مرجع مشترک است. ΔX_{SC} ماتریس حالت مربوط به کنترل ثانویه همه IBDERهاست که به صورت

$$\begin{bmatrix} \Delta X_{SC}^1 \\ \Delta X_{SC1}^1 \Delta X_{SC2}^1 \cdots \Delta X_{SCi}^1 \Delta X_{SC}^2 \cdots \Delta X_{SC}^k \end{bmatrix}^T$$

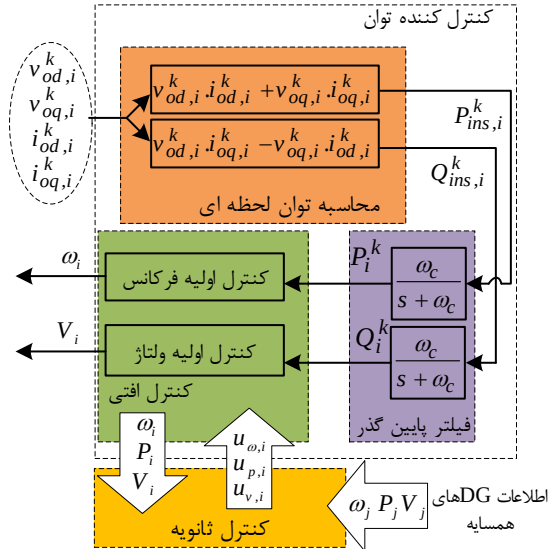
همچنین $\Delta X_{SC,i}^k$ شامل ۵ متغیر حالت به صورت

$$X_{SC,i}^k = [\Delta \omega_i^k \Delta v_{od,i}^k \Delta u_{p,i}^k \Delta u_{\omega,i}^k \Delta u_{v,i}^k]^T$$

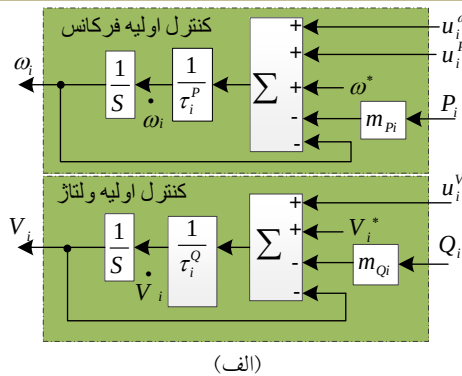
جزئیات بیشتر راجع به مدل سیگنال کوچک ریز شبکه را می توان در مراجع [۱۵-۱۷] و [۱۸ و ۲۲] پیدا کرد.

۳. بهبود پایداری با روش پیشنهادی

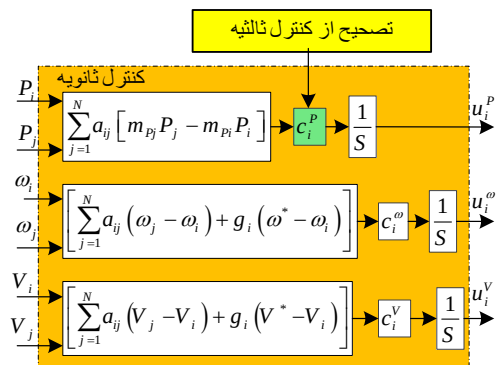
بین IBDER_i است، اگر IBDER_i مستقیماً اطلاعات مرجع را دریافت کند $g_i^k = 1$ و در غیر این صورت $g_i^k = 0$ است. در شکل (۴) طرح کنترل ثانویه براساس معادلات فوق ترسیم شده است.



شکل (۳): بخش های کنترل کننده توان و نحوه ارتباط آن با کنترل ثانویه توزیع شده



(الف)



(ب)

شکل (۴): اجزای کنترل: (الف) کنترل اولیه؛ (ب) کنترل ثانویه

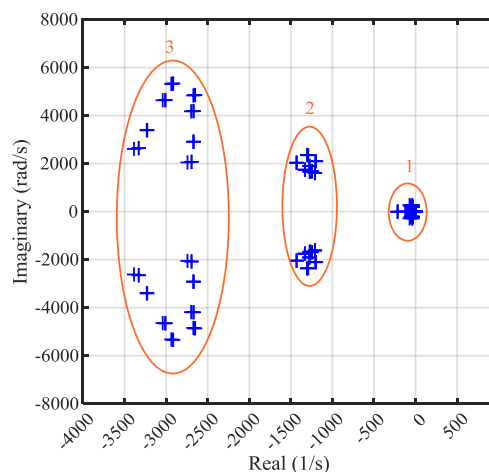
۴.۲. مدل سازی سیگنال کوچک

برای بررسی رفتار دینامیکی سیستم نیاز به مقادیر ویژه یا حالت های

۱.۳. تجزیه و تحلیل سیگنال کوچک

شکل (۵) تمام مقادیر ویژه سیستم چندریزشبکه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. این مقادیر ویژه در سه خوشه، با بازه‌های فرکانس متفاوت دسته‌بندی می‌شوند [۱۸]. حالت‌های با فرکانس بالا که در خوشه سه جای دارند، به متغیرهای حالت فیلتر LC و سلف خروجی IBDER و جریان‌های خط حساس هستند.

خوشه دو به متغیرهای حالت کنترل‌کننده‌های ولتاژ و جریان و فیلتر خروجی LC حساس هستند. متغیرهای حالت کنترل توان به‌طور قابل توجهی بر حالت‌های فرکانس پایین در خوشه یک تأثیر می‌گذارند. بنابراین، این مطالعه بر کنترل‌کننده توان اکتیو به‌عنوان یک عامل مؤثر در پایداری سیستم تمرکز دارد. حالت‌های مرتبط با این کنترل‌کننده نسبت به حالت‌های دیگر به محور موهومی نزدیک‌ترند و ممکن است باعث کاهش پایداری و حتی ناپایداری سیستم شوند.



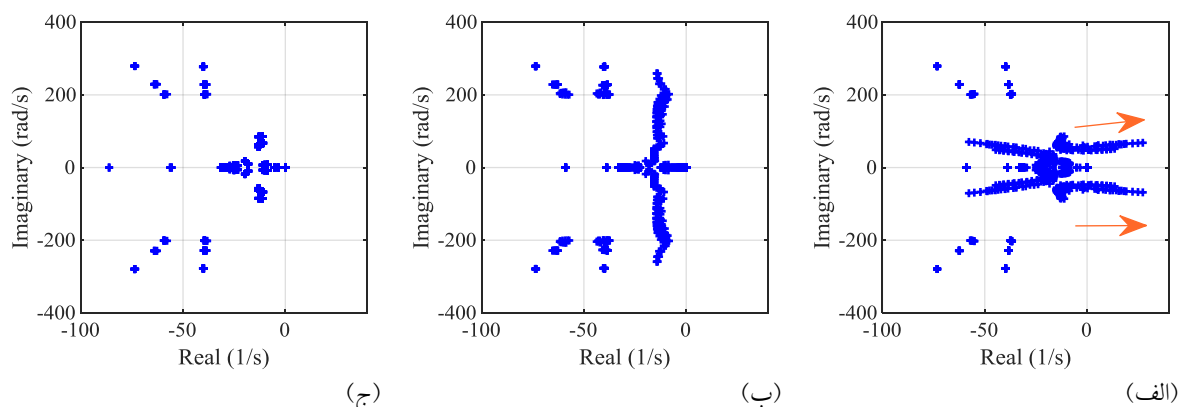
شکل (۵): مقادیر ویژه کل سیستم چندریزشبکه‌ای

در شکل (۶) تجزیه و تحلیل پایداری برای بررسی تأثیر ضریب‌های کنترلی C_p ، C_ω و C_v بر پایداری سیستم انجام شده است. شکل (۶ الف) ردیابی حالت‌ها را تحت افزایش C_p نشان می‌دهد. مطابق شکل با افزایش C_p دو تا از حالت‌ها به سمت راست محور موهومی منتقل شده‌اند که باعث ناپایداری سیستم می‌شوند. در قسمت‌های (ب) و (ج) شکل (۶)، به ترتیب افزایش C_v و C_ω بررسی شده‌اند که بر ناپایداری سیستم تأثیری نداشته‌اند. نتایج تجزیه و تحلیل پایداری نشان می‌دهد که C_p نسبت به سایر ضریب‌های کنترلی تأثیر بیشتری بر پایداری سیستم دارد. به این ترتیب افزایش C_p باعث کاهش پایداری و کاهش آن باعث پایداری بیشتر سیستم می‌شود. با این حال، کاهش بیش از حد این ضریب‌های کنترلی، زمان پاسخ‌گویی سیستم را افزایش می‌دهد که این نیز نامطلوب است. بنابراین هنگام تعیین این پارامتر علاوه بر پایداری سیستم، سرعت پاسخ‌گویی آن نیز باید در نظر گرفته شود. در این راستا، در این مقاله تعیین بهینه این پارامتر با استفاده از روش پیشنهادی RCCE انجام می‌شود تا پایداری سیستم تضمین شود.

۲.۳. روش پیشنهادی RCCE

در این مطالعه، یک الگوریتم دو سطحی برای بهینه‌سازی ضریب کنترل اجماع C_p در سیستم چندریزشبکه پیشنهاد شده است. هدف، افزایش نسبت میرایی مدهای بحرانی و بهبود پایداری سیستم با حداقل تعداد تکرار و کمترین زمان محاسباتی است. تحلیل سیگنال کوچک نشان می‌دهد که نسبت میرایی (۵) تابعی غیرخطی از C_p است، که می‌توان آن را به صورت رابطه زیر نمایش داد:

$$\xi = f(C_p) \quad (12)$$



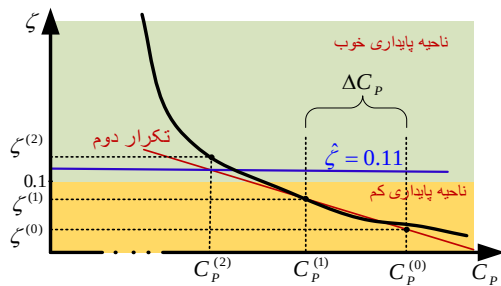
شکل (۶): بررسی حساسیت مقادیر ویژه به تغییر پارامترهای کنترلی از ۲۵ تا ۲۵۰ (الف) تغییر C_p ، (ب) تغییر C_ω ، (ج) تغییر C_v

ناشناخته بودن تابع، در روش پیشنهادی ابتدا معادله خط مماس در نقطه اولیه $C_p^{(0)}$ بر منحنی محاسبه شده و از آن برای تخمین مقدار جدید C_p استفاده می‌شود.

تابع f ناشناخته اما پیوسته و دارای رفتار غیرخطی است. اگر معادله این تابع مشخص بود، می‌توانستیم با جای‌گذاری مقدار مطلوب ξ مقدار بهینه C_p را مستقیماً محاسبه کنیم. با این حال، به دلیل

$$C_p^{(1)} = (1 - \Delta C_p) \cdot C_p^{(0)} \quad (15)$$

در این مطالعه، $\Delta C_p = 0.05$ در نظر گرفته شده است. علامت منفی ΔC_p به این دلیل است که براساس توضیحات زیربخش ۱.۳، می‌دانیم که برای افزایش ξ لازم است که C_p کاهش داده شود. سپس سطح دوم مسئله بهینه‌سازی با ورودی $C_p^{(1)}$ برای به دست آوردن $\xi^{(1)}$ حل می‌شود. پس از به دست آوردن $\xi^{(1)}$ لازم است شرط توقف بررسی شود. اگر $\xi^{(1)} > 0.1$ باشد آنگاه $C_p^{(1)}$ بهینه است و جواب به دست آمده است. در غیر این صورت تکرار بعدی انجام می‌شود.



شکل (۷): منحنی فرضی $\xi - C_p$ و افزایش ξ با دو تکرار

در مرحله بعد با توجه به مشخص بودن نقاط نزدیک به هم $(C_p^{(0)}, \xi^{(0)})$ و $(C_p^{(1)}, \xi^{(1)})$ از منحنی فرضی $\xi - C_p$ می‌توان معادله خط مماس بر منحنی را محاسبه کرد. به طور کلی، معادله خط تقریبی مماس بر منحنی فرضی $\xi - C_p$ در نقطه $(C_p^{(k)}, \xi^{(k)})$ به شرط $k > 1$ در تکرار k ام به صورت معادله (۱۶) به دست می‌آید:

$$\xi = a^{(k)} \cdot C_p + b^{(k)} \quad (16)$$

که $a^{(k)} = \frac{\xi^{(k)} - \xi^{(k-1)}}{C_p^{(k)} - C_p^{(k-1)}}$ و $b^{(k)} = \xi^{(k)} - a^{(k)} \cdot C_p^{(k)}$ هستند. حال

با داشتن معادله خط مماس بر منحنی فرضی $\xi - C_p$ در نقطه $(C_p^{(k)}, \xi^{(k)})$ می‌توان $C_p^{(k+1)}$ را تخمین زد. با جای‌گذاری ξ مطلوب، که در شکل (۷) با ξ نشان داده شده است، در معادله خط، $C_p^{(k+1)}$ تخمین زده می‌شود. معادله (۱۷) در $C_p^{(k+1)}$ نشان داده شده است:

$$C_p^{(k+1)} = \frac{(\xi - b^{(k)})}{a^{(k)}} \quad (17)$$

در این مطالعه، $\xi = 0.11$ در نظر گرفته شده است. با داشتن $C_p^{(k+1)}$ و اعمال آن به سطح دوم مسئله بهینه‌سازی مقدار $\xi^{(k+1)}$ به دست می‌آید. اگر شرط توقف $\xi^{(k+1)} > 0.1$ برقرار شود، آنگاه $C_p^{(k+1)}$ بهینه است و مسئله حل شده است. در غیر این صورت تکرار بعدی با معادله (۱۶) انجام می‌شود و تا وقتی که شرط توقف برقرار شود، تکرارها ادامه می‌یابند. نمودار مراحل اجرای روش پیشنهادی RCCE در شکل (۸) نشان داده شده است.

منظور از $C_p^{(0)}$ مقدار اولیه ضریب کنترل اجماع مربوط به آن IBDER خاص است که بیشترین سهم را در ایجاد مود بحرانی شناسایی شده دارد. پس از به‌روزرسانی مدل دینامیکی سیستم، مقادیر ویژه و نسبت‌های میرایی آن‌ها محاسبه می‌شوند. اگر نسبت میرایی یک یا چند مود کمتر از ۰/۱ باشد (که به عنوان حالت‌های کم‌میرایی یا LDM شناخته می‌شوند)، با استفاده از تحلیل ضریب مشارکت، IBDERی که بیشترین تأثیر را در ایجاد آن مود دارد مشخص می‌شود. مقدار C_p مربوط به این IBDER که هنوز کاهش داده نشده، به عنوان $C_p^{(0)}$ شناخته می‌شود و پایه فرایند اصلاح در الگوریتم RCCE است.

در این الگوریتم، محاسبه نسبت میرایی در سطح اول، و تخمین مقدار جدید C_p در سطح دوم مسئله بهینه‌سازی انجام می‌شود. در هر تکرار، با جای‌گذاری مقدار موجود C_p در معادلات دیفرانسیل، مقادیر ویژه سیستم به دست می‌آید. در تکرار صفرم، مقدار اولیه $C_p^{(0)}$ استفاده می‌شود و در تکرارهای بعدی، مقدار تخمینی از سطح دوم جایگزین آن می‌شود. مقادیر ویژه به صورت $\lambda = \sigma \pm j\omega$ بوده که σ نمایانگر مؤلفه میرایی و ω نشان‌دهنده فرکانس نوسان است. نسبت میرایی از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\xi = \frac{-\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}} \quad (13)$$

در این مطالعه حالت‌هایی که نسبت میرایی آن‌ها کمتر از ۰/۱ است، به عنوان LDM در نظر گرفته می‌شوند که باعث کم شدن پایداری سیستم می‌شوند. به طور کلی فرایند انجام‌شده در سطح اول مسئله بهینه‌سازی برای تکرار k ام به اختصار با رابطه زیر نشان داده شده است:

$$\xi^{(k)} = f(C_p^{(k)}) \quad (14)$$

پس از به دست آوردن $\xi^{(k)}$ لازم است که شرط توقف بررسی شود. اگر $\xi^{(k)} > 0.1$ باشد، آنگاه $C_p^{(k)}$ بهینه است، در غیر این صورت تکرار بعدی انجام می‌شود. منحنی فرضی $\xi - C_p$ و روش افزایش ξ در شکل (۷) نشان داده شده است. در این شکل به دلیل اجتناب از شلوغی، و برای وضوح بیشتر دو تکرار انجام شده است، درحالی‌که تعداد تکرارها ممکن است بیشتر باشد. در ابتدا $C_p^{(0)}$ مشخص است و با توجه به آن $\xi^{(0)}$ در سطح اول مسئله بهینه‌سازی در تکرار صفرم به دست می‌آید. برای به دست آوردن خط مماس بر منحنی فرضی $\xi - C_p$ در نقطه $(C_p^{(0)}, \xi^{(0)})$ لازم است که یک نقطه دیگر از خط مشخص باشد. بنابراین در تکرار اول نقطه $C_p^{(1)}$ به صورت معادله زیر در سطح دوم مسئله بهینه‌سازی تخمین زده می‌شود:

• اطلاعات دینامیک شامل مقادیر لحظه‌ای مانند فرکانس، ولتاژ، توان اکتیو و راکتیو خروجی IBDER هستند که در هر چرخه اجرای الگوریتم RCCE جمع‌آوری می‌شوند.

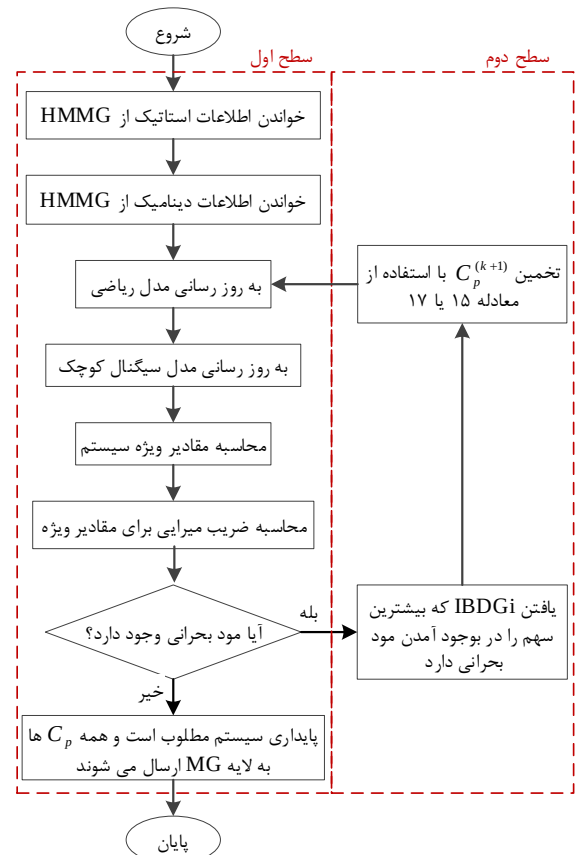
با توجه به اندازه کوچک سیستم، استخراج مقادیر ویژه و نسبت‌های میرایی نیز به سرعت انجام می‌شود. الگوریتم RCCE پس از دریافت اطلاعات جدید و شناسایی مود بحرانی (در صورت وجود)، تکرارهای بهینه‌سازی را آغاز می‌کند. در صورت عدم شناسایی مود بحرانی، تکراری انجام نمی‌شود و ساختار کنترل ثانویه به فعالیت عادی خود ادامه می‌دهد.

۴. نتایج

روش پیشنهادی در یک سیستم چندریزشبکه شامل سه ریزشبکه که هرکدام مجهز به چهار IBDER هستند، در محیط MATLAB شبیه‌سازی شده است. شبیه‌سازی‌ها بر روی یک لپ‌تاپ مجهز به پردازنده Intel Core i7-2630 QM (۲/۰۰ گیگاهرتز) و ۱۲.۰ گیگابایت حافظه رم انجام گرفت. هر تکرار شبیه‌سازی تقریباً ۱/۲ ثانیه به طول انجامید و زمان اجرای کل به تعداد تکرارهای بهینه‌سازی مورد نیاز توسط روش پیشنهادی بستگی داشت. این سیستم چندریزشبکه در شکل (۹) نشان داده شده است که پارامترها و شرایط اولیه هریک از ریزشبکه‌ها از مرجع [۱۸] استخراج شده است. آزمایش سیستم چندریزشبکه در هر دو حوزه فرکانس و زمان، با در نظر گرفتن سه سناریوی عملیاتی مختلف شبیه‌سازی شده است.

۱.۴. نتایج حوزه فرکانس

در این شبیه‌سازی، فرض می‌شود که مقادیر $C_{p,i}^k$ ، $C_{\omega,i}^k$ و $C_{v,i}^k$ یکسان و برابر ۷۵ هستند. برای ارزیابی پایداری سیستم، مقادیر ویژه سیستم چندریزشبکه مورد مطالعه و نسبت میرایی آن‌ها محاسبه می‌شود. با توجه به نتایج به دست آمده، این سیستم چندریزشبکه دارای دو LDM است. با استفاده از روش ضریب مشارکت، IBDER3 در ریزشبکه اول به عنوان منشأ ایجاد LDMها شناسایی می‌شود. بنابراین، پارامتر $C_{p,3}^1$ باید کاهش یابد. همان‌طور که از شکل (۱۰) مشخص است، الگوریتم RCCE پیشنهادی $C_{p,3}^1$ را پس از چهار تکرار از ۷۵ به ۵۱ کاهش می‌دهد.



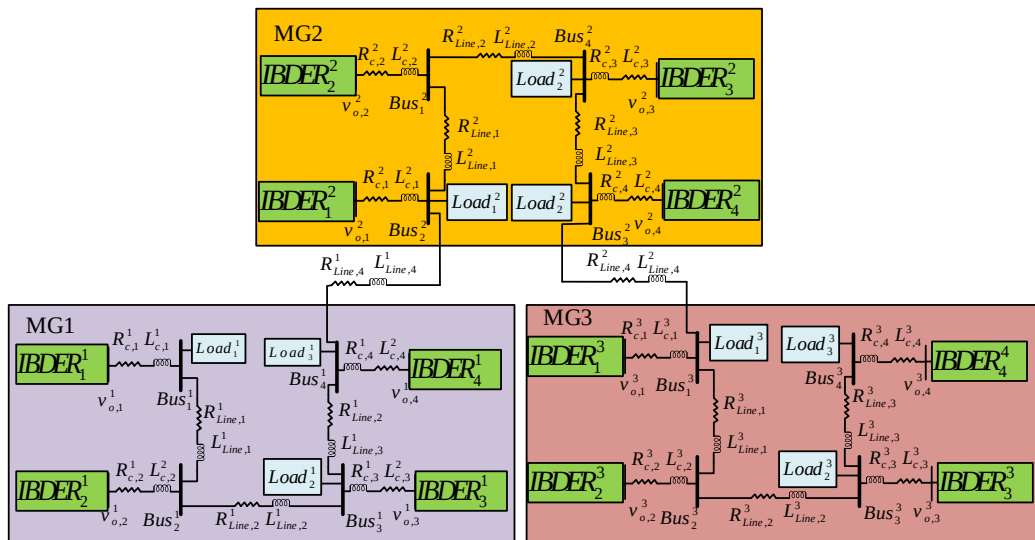
شکل (۸): الگوریتم روش RCCE پیشنهادی

۳.۳. ملاحظات ارتباطی و عملیاتی در اجرای الگوریتم RCCE

در الگوریتم پیشنهادی RCCE که در لایه سوم ساختار کنترل سیستم چندریزشبکه قرار دارد، تبادل اطلاعات تنها در فواصل زمانی مشخص (مثلاً هر ۱۵ دقیقه یک بار) انجام می‌شود و برخلاف کنترل ثانویه، ماهیت پیوسته یا بلادرنگ ندارد. علاوه بر این، سیستم مورد بررسی یک چندریزشبکه کوچک متشکل از تعداد محدودی ریزشبکه و IBDER است؛ در نتیجه، جمع‌آوری اطلاعات از این اجزا به صورت عملی به پهنای باند بالا یا زیرساخت‌های پیچیده نیاز ندارد.

اطلاعات مورد نیاز الگوریتم RCCE به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند:

- اطلاعات استاتیک شامل پارامترهایی هستند که در شرایط عادی بدون تغییر باقی می‌مانند، مانند مشخصات خطوط انتقال، پارامترهای فیلتر پایین‌گذر، ضرایب PI کنترل‌کننده‌های ولتاژ و جریان، و مشخصات نامی بارها و منابع تولید پراکنده. این داده‌ها فقط در صورت اعمال تغییر ساختاری یا تنظیم مجدد، نیاز به به‌روزرسانی دارند.

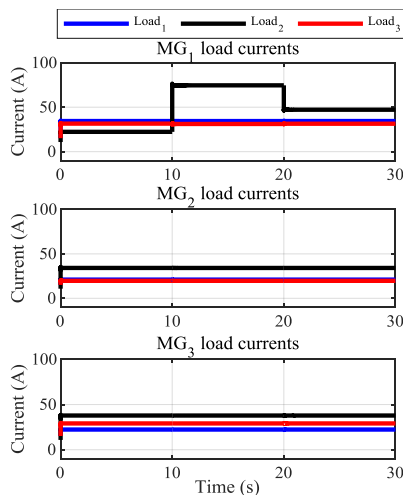


شکل (۹): سیستم چندریشبه مورد مطالعه متشکل از سه ریشبه و اجزای آن

در تمامی شکل‌های ارائه‌شده، بخش (الف) مربوط به نتایج حاصل از اعمال روش ارائه‌شده در مرجع [۱۷] بوده و بخش (ب) مربوط به نتایج حاصل از به‌کارگیری روش پیشنهادی RCCE است.

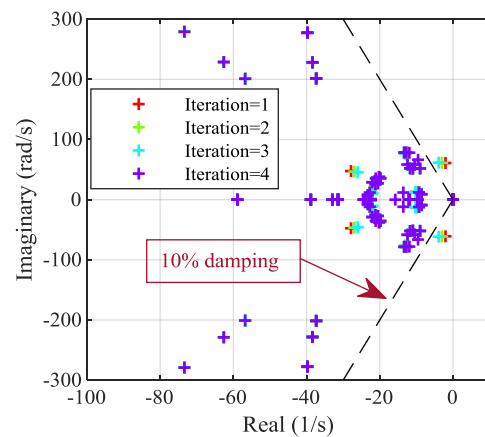
۱.۲.۴. سناریو ۱: پاسخ سیستم به تغییر دینامیکی جریان بار

در این سناریو، که در شکل (۱۱) نشان داده شده است، به‌منظور ارزیابی پاسخ دینامیکی سیستم، یک تغییر ناگهانی در جریان بار ریشبه اول اعمال می‌شود. در ثانیه دهم، جریان بار دوم ریشبه اول از ۲۲/۳ آمپر به ۷۴/۶ آمپر افزایش می‌یابد. سپس، در ثانیه بیستم، این جریان به ۴۷/۸ آمپر کاهش پیدا می‌کند. جریان سایر بارها در ریشبه‌ها بدون تغییر باقی می‌ماند.



شکل (۱۱): تغییر دینامیکی جریان بار در سناریو اول

شکل (۱۲) فرکانس زاویه‌ای کلیه IBDERها را در هر سه ریشبه تحت سناریوی تغییر بار دینامیکی نشان می‌دهد. در این شکل به‌منظور نمایش بهتر نوسان به‌وجودآمده بر اثر اختلال، از نمای بزرگ‌نمایی شده نیز به همراه شکل اصلی استفاده شده است.



شکل (۱۰): حذف LDM با الگوریتم پیشنهادی RCCE در چهار تکرار

۲.۴. نتایج حوزه زمان

به‌منظور نشان دادن اثربخشی روش پیشنهادی RCCE بر پایداری سیستم چندریشبه مورد مطالعه، شبیه‌سازی‌های حوزه زمانی تحت سه سناریوی زیر انجام شده است:

- سناریو ۱: تغییر دینامیکی جریان بار؛
- سناریو ۲: کاهش لحظه‌ای جریان بار؛
- سناریو ۳: تغییر توپولوژی سیستم چندریشبه و افزایش لحظه‌ای جریان بار.

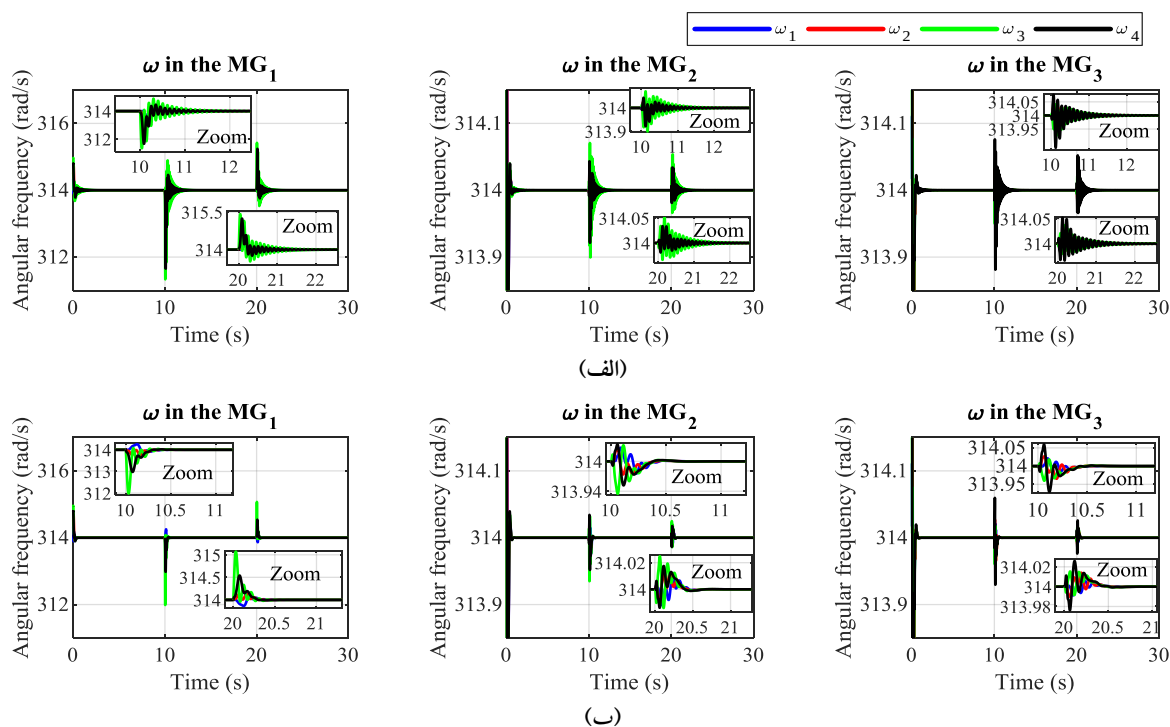
تأثیر سناریوهای اعمال‌شده بر روی فرکانس زاویه‌ای، ولتاژ خروجی و توان اکتیو تولیدی IBDERها بررسی شده است. نتایج به‌دست‌آمده در روش ارائه‌شده در مرجع [۱۷] با نتایج روش پیشنهادی RCCE، که یک روش تطبیقی است، مقایسه شده است.

میرایی نوسانات ولتاژ به‌طور قابل ملاحظه‌ای سریع‌تر رخ می‌دهد، به‌گونه‌ای که نوسانات ناشی از اغتشاشات اول و دوم به‌ترتیب در زمان‌های ۱۰/۵ و ۲۰/۵ ثانیه میرا می‌شوند. این نتایج نشان‌دهنده کاهش تقریباً ۲ ثانیه‌ای در زمان میرایی نوسانات ولتاژ با به‌کارگیری روش پیشنهادی RCCE است.

شکل (۱۴) توان اکتیو خروجی IBDERها را در سناریوی تغییر بار دینامیکی نشان می‌دهد. تحلیل این شکل نیز الگوی مشابهی را با نتایج فرکانس زاویه‌ای و ولتاژ نشان می‌دهد. در حالتی که روش مرجع [۱۷] استفاده می‌شود (شکل ۱۴ الف)، نوسانات توان تولیدشده توسط IBDERها پس از اغتشاشات اول و دوم، به‌ترتیب در زمان‌های ۱۲/۵ و ۲۲/۵ ثانیه میرا می‌شوند. اما با به‌کارگیری روش پیشنهادی RCCE شکل (۱۴ ب)، این نوسانات به‌ترتیب در زمان‌های ۱۰/۵ و ۲۰/۵ ثانیه میرا می‌شوند. این مقایسه تأییدکننده این است که روش پیشنهادی RCCE منجر به میرایی سریع‌تر نوسانات توان (تقریباً ۲ ثانیه) می‌شود و اثربخشی و کارایی آن را در بهبود پایداری دینامیکی سیستم در شرایط تغییر بار عملیاتی به‌وضوح اثبات می‌کند.

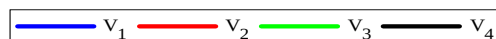
همان‌طور که از شکل (۱۲ الف) مشهود است، پس از اعمال تغییرات بار در ثانیه‌های دهم و بیستم، نوساناتی در فرکانس زاویه‌ای ایجاد می‌شود که به‌ترتیب در زمان‌های ۱۲/۵ و ۲۲/۵ ثانیه میرا می‌شوند. با این حال، با اعمال روش پیشنهادی RCCE، همان‌طور که در شکل (۱۲ ب) مشاهده می‌شود، این نوسانات به‌طور قابل توجهی سریع‌تر میرا می‌شوند، به‌طوری‌که نوسانات ناشی از اختلالات اول و دوم به‌ترتیب در زمان‌های ۱۰/۵ و ۲۰/۵ ثانیه کاملاً میرا می‌شوند. این مقایسه نشان می‌دهد که با استفاده از روش RCCE، زمان میرایی نوسانات فرکانس زاویه‌ای تقریباً ۲ ثانیه (در هر اغتشاش) کاهش می‌یابد که بهبود قابل ملاحظه‌ای در پاسخ دینامیکی سیستم محسوب می‌شود. شایان به ذکر است که به‌دلیل اعمال اغتشاش در ریزشبکه اول، دامنه نوسانات در ریزشبکه یک نسبت به ریزشبکه‌های دو و سه بیشتر است.

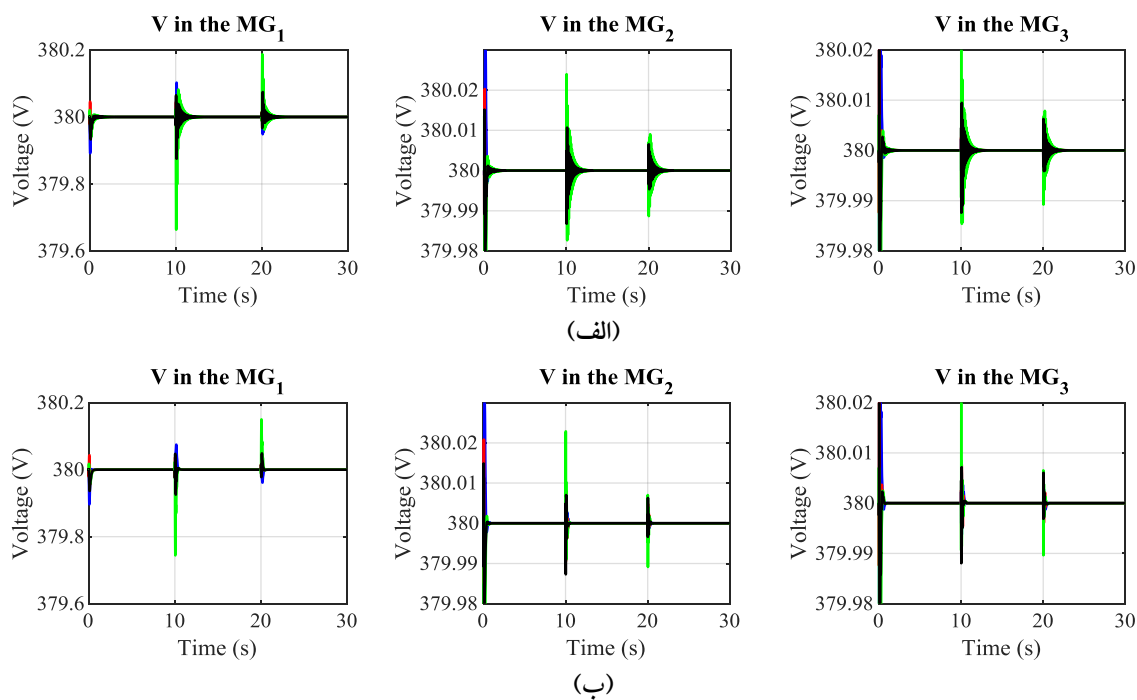
شکل (۱۳) ولتاژ خروجی IBDERها را در ریزشبکه‌های مختلف تحت سناریوی بار دینامیکی نمایش می‌دهد. مشابه نوسانات فرکانس زاویه‌ای، نوسانات ولتاژ نیز پس از اغتشاشات بار در سیستم مشاهده می‌شود. در شکل (۱۳ الف)، نوسانات ولتاژ به‌ترتیب در



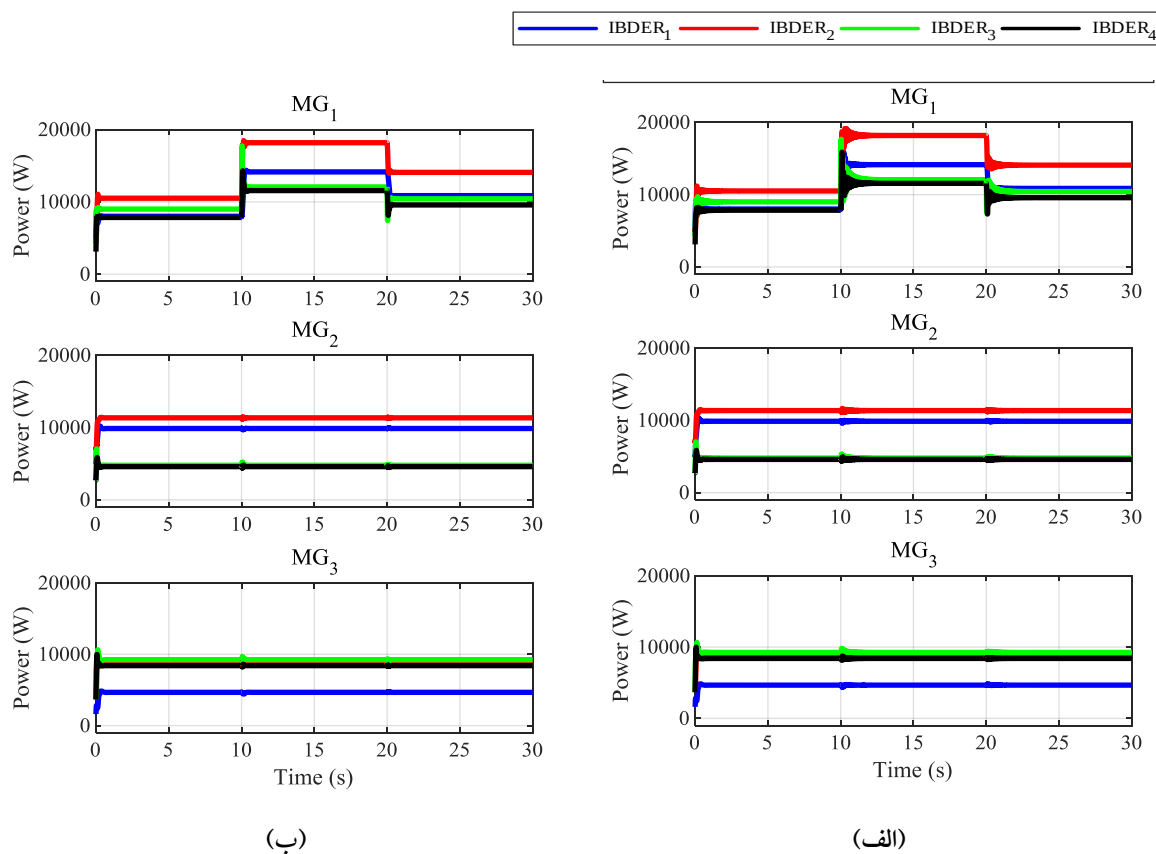
شکل (۱۲): فرکانس زاویه‌ای IBDERها، (الف) روش ارائه‌شده در [۱۷]، (ب) روش پیشنهادی RCCE

زمان‌های ۱۲/۵ و ۲۲/۵ ثانیه میرا می‌شوند. درمقابل، شکل (۱۳ ب)،



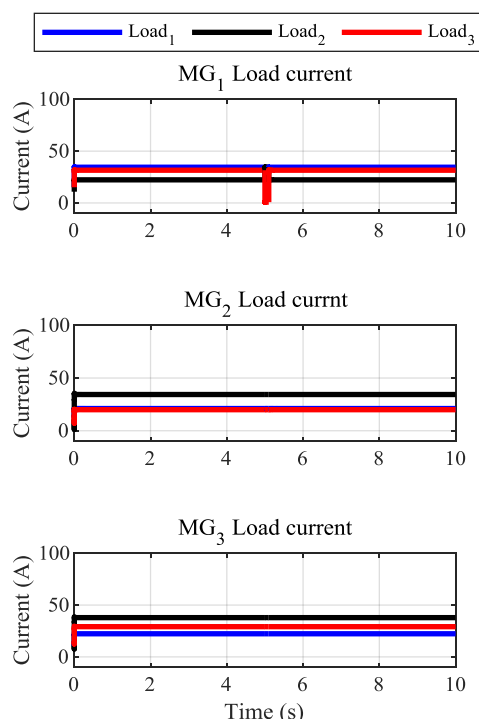


شکل (۱۳): ولتاژ خروجی IBDERها، (الف) روش ارائه شده در [۱۷]، (ب) روش پیشنهادی RCCE



شکل (۱۴): توان اکتیو خروجی IBDERها، (الف) روش ارائه شده در [۱۷]، (ب) روش پیشنهادی RCCE

کارایی روش پیشنهادی RCCE را در بهبود پایداری سیستم چندریزشبکه‌ای و افزایش سرعت میرایی نوسانات توان در شرایط اغتشاش لحظه‌ای، به‌وضوح اثبات می‌کند.



شکل (۱۵): کاهش لحظه‌ای جریان بار سوم ریزشبکه اول

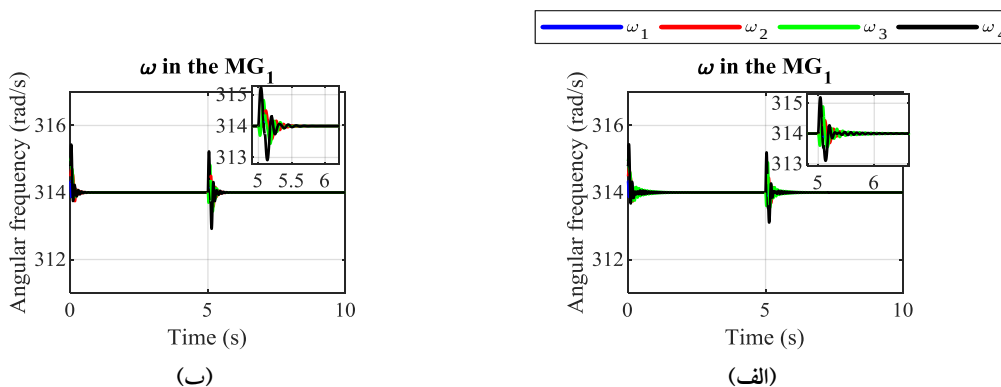
۲.۲.۴. سناریو ۲: عملکرد سیستم در مواجهه با کاهش لحظه‌ای جریان بار

در این سناریو، به‌منظور ارزیابی پاسخ سیستم به اغتشاشات گذرا، یک کاهش لحظه‌ای در جریان بار اعمال می‌شود. همان‌طور که در شکل (۱۵) نمایش داده شده است، جریان بار سوم در ریزشبکه اول در ثانیه پنجم از ۳۱/۵ آمپر به صفر آمپر کاهش می‌یابد. پس از گذشت ۰/۲ ثانیه (۵/۲ ثانیه کل)، جریان بار به مقدار اولیه خود (۳۱/۵ آمپر) باز می‌گردد. شایان ذکر است که این اغتشاش تنها در ریزشبکه اول اعمال شده است. از آنجاکه بیشترین تأثیر این اختلال در ریزشبکه اول مشاهده می‌شود و به‌منظور پرهیز از شلوغی در نمودارها، تنها پارامترهای مربوط به ریزشبکه اول (فرکانس زاویه‌ای، ولتاژ و توان اکتیو) در شکل‌های نتایج این سناریو نمایش داده شده‌اند. نتایج فرکانس زاویه‌ای، ولتاژ و توان اکتیو خروجی IBDERهای ریزشبکه اول، عملکرد روش پیشنهادی را در مقایسه با روش ارائه‌شده در مرجع [۱۷] به‌وضوح نشان می‌دهد.

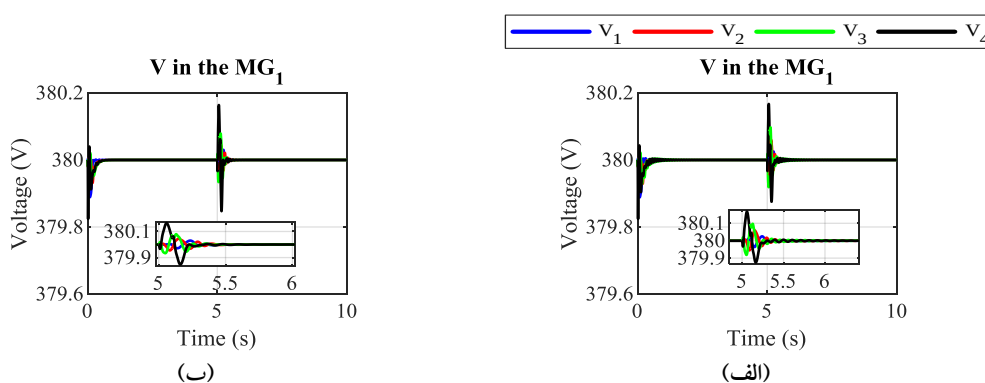
شکل (۱۶): فرکانس زاویه‌ای IBDERهای ریزشبکه اول را تحت سناریوی دوم نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل پیداست، فرکانس زاویه‌ای همه IBDERها پس از وقوع اختلال در ثانیه پنجم دچار نوسان شده است. در شکل (۱۶)، نوسان تا حدود یک ثانیه ادامه می‌یابد و پس از آن میرا می‌شود. درحالی‌که در شکل (۱۶)، که مربوط به سیستم مجهز به روش پیشنهادی RCCE است، نوسان پس از حدود ۰/۵ ثانیه میرا می‌شود. این امر، پایداری و پاسخ سریع‌تر سیستم را با استفاده از روش پیشنهادی در برابر اغتشاشات لحظه‌ای اثبات می‌کند.

شکل (۱۷): ولتاژ IBDERها را تحت سناریو دوم نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، پس از وقوع اختلال در ثانیه پنجم، ولتاژ IBDERها دچار نوسان می‌شود. در شکل (۱۷)، نوسان ولتاژ تا حدود یک ثانیه ادامه می‌یابد. درحالی‌که در شکل (۱۷)، نوسان پس از حدود ۰/۵ ثانیه میرا می‌شود. این بهبود در پاسخ ولتاژ، نشان‌دهنده اثربخشی روش RCCE در حفظ کیفیت توان سیستم در مواجهه با تغییرات ناگهانی بار است.

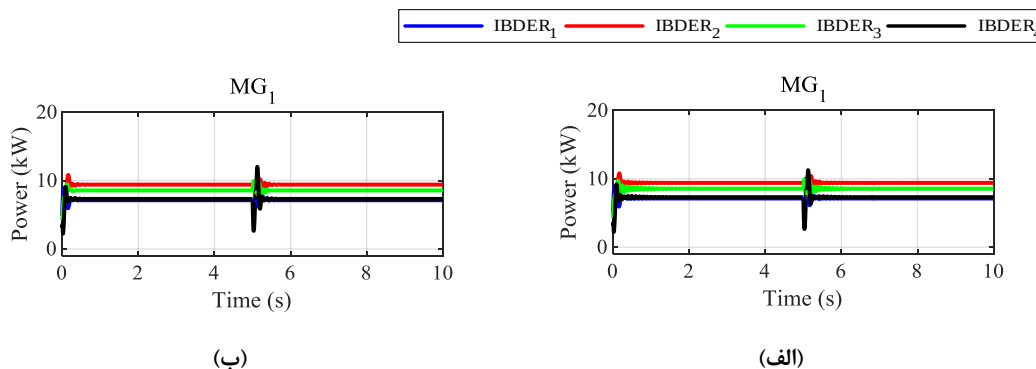
شکل (۱۸): توان اکتیو خروجی IBDERهای ریزشبکه اول را تحت سناریوی دوم نشان می‌دهد. در این شکل نیز همانند دو شکل قبلی این سناریو، نوسان ایجادشده بر اثر اختلال، در شکل (۱۸)، توان اکتیو IBDERهای ریزشبکه اول تحت سناریو دوم، (الف) روش ارائه‌شده در [۱۷]، (ب) روش پیشنهادی RCCE شکل (۱۸) (ب) حدود ۰/۵ ثانیه سریع‌تر از شکل (۱۸) (الف) میرا می‌شود. این موضوع،



شکل (۱۶): فرکانس زاویه‌ای IBDER های ریز شبکه اول تحت سناریو دوم، (الف) روش ارائه شده در [۱۷]، (ب) روش پیشنهادی RCCE



شکل (۱۷): ولتاژ IBDER های ریز شبکه اول تحت سناریو دوم، (الف) روش ارائه شده در [۱۷]، (ب) روش پیشنهادی RCCE



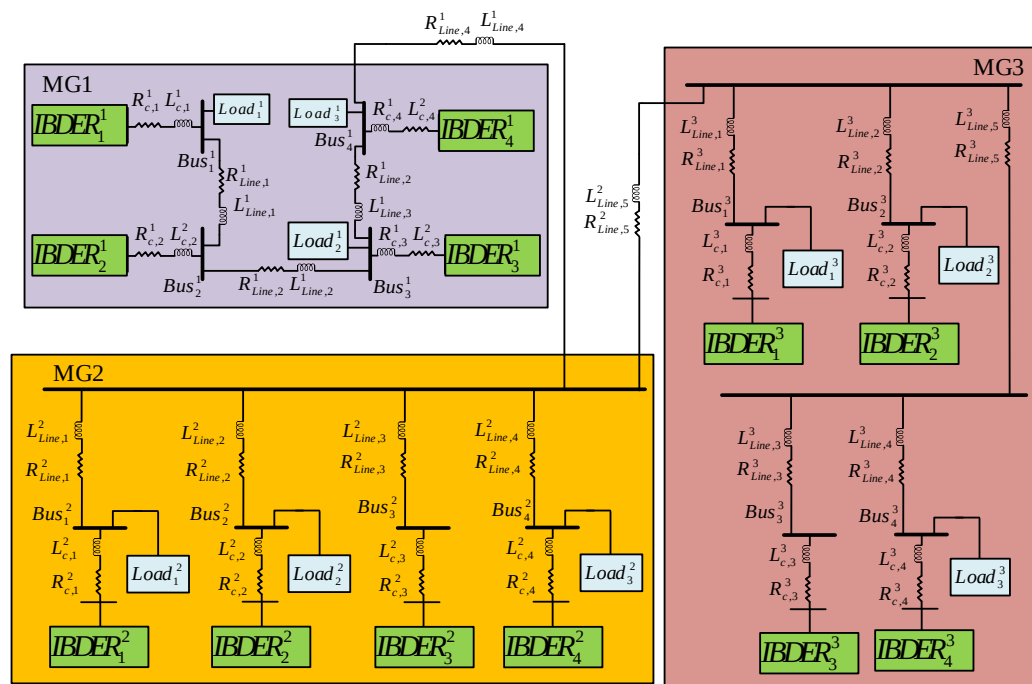
شکل (۱۸): توان اکتیو IBDER های ریز شبکه اول تحت سناریو دوم، (الف) روش ارائه شده در [۱۷]، (ب) روش پیشنهادی RCCE

دینامیکی، یک پیکربندی متفاوت از سیستم چند ریز شبکه مورد بررسی قرار گرفته است. ساختار جدید سیستم در شکل (۱۹) نشان داده شده است. در این پیکربندی، یک اغتشاش لحظه‌ای از نوع افزایش بار اعمال می‌شود. همان‌طور که در شکل (۲۰) نمایش داده شده است.

۳.۲.۴. سناریو ۳: ارزیابی پایداری در شرایط تغییر پیکربندی

و افزایش لحظه‌ای جریان بار

در این سناریو، به منظور ارزیابی مقیاس‌پذیری و پایداری روش پیشنهادی RCCE در شرایط تغییر پیکربندی سیستم و اغتشاشات

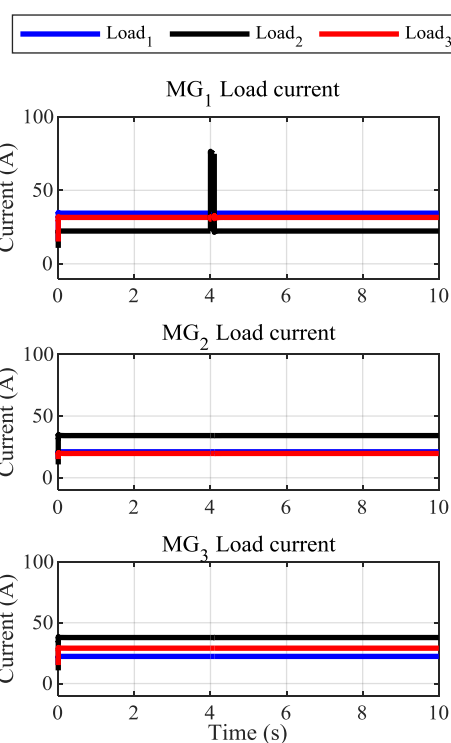


شکل (۱۹): ساختار سیستم چندریزشبکه با پیکربندی تغییر یافته برای سناریو ۳

فرکانس زاویه‌ای، ولتاژ و توان اکتیو) در ادامه نمایش داده شده‌اند. شکل (۲۱) فرکانس زاویه‌ای IBDERهای ریزشبکه اول را تحت سناریوی سوم نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پس از اعمال افزایش لحظه‌ای بار در ثانیه ۴، نوساناتی در فرکانس زاویه‌ای ایجاد می‌شود. در بخش (الف) این شکل، که مربوط به روش مرجع [۱۷] است، نوسانات برای مدت زمان طولانی‌تری ادامه می‌یابند. در مقابل، شکل (۲۱ ب) که مربوط به سیستم مجهز به روش پیشنهادی RCCE است، به‌وضوح نشان می‌دهد که نوسانات فرکانس زاویه‌ای به‌مراتب سریع‌تر میرا می‌شود و سیستم با سرعت بیشتری به حالت پایدار اولیه خود بازمی‌گردد.

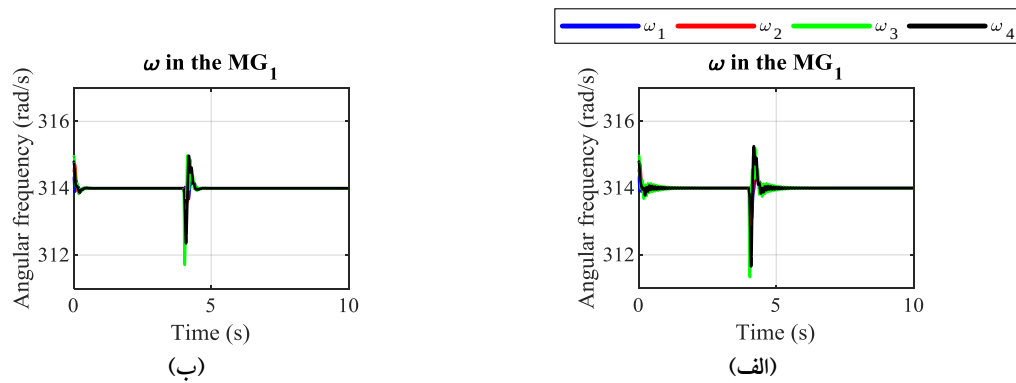
شکل (۲۲) ولتاژ IBDERهای ریزشبکه اول را تحت سناریوی سوم نمایش می‌دهد. با وقوع اغتشاش لحظه‌ای در ثانیه ۴، ولتاژ IBDERها دچار نوسان می‌شود. در شکل (۲۲-الف)، نوسانات ولتاژ با میرایی کندتری همراه است. این در حالی است که در شکل (۲۲ ب)، نوسانات ولتاژ به‌طور قابل ملاحظه‌ای سریع‌تر میرا شده و سیستم به‌سرعت به مقدار ولتاژ نامی بازمی‌گردد.

شکل (۲۳) توان اکتیو خروجی IBDERهای ریزشبکه اول را در سناریوی سوم به تصویر می‌کشد. در بخش (الف) این شکل، نوسانات توان اکتیو با میرایی طولانی‌تری همراه‌اند. اما در شکل (۲۳ ب)، توانایی بالاتری در میرایی سریع نوسانات توان اکتیو و تثبیت خروجی IBDERها در زمان کوتاه‌تری را نشان می‌دهد.

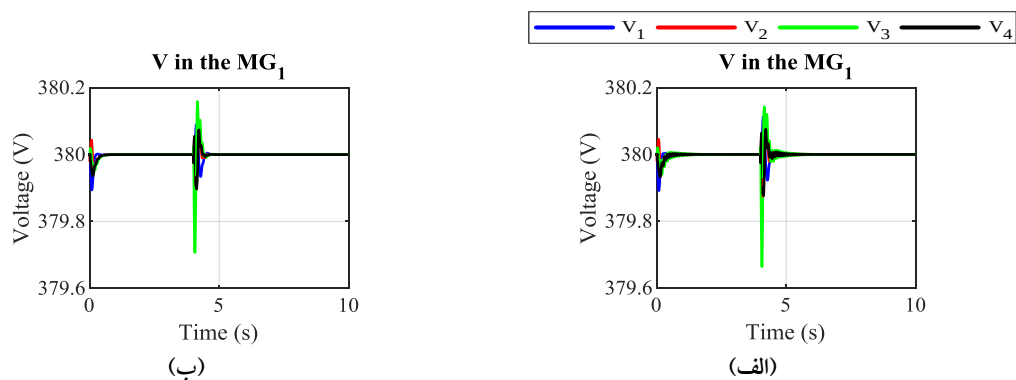


شکل (۲۰): افزایش ناگهانی و لحظه‌ای جریان بار دوم ریزشبکه اول

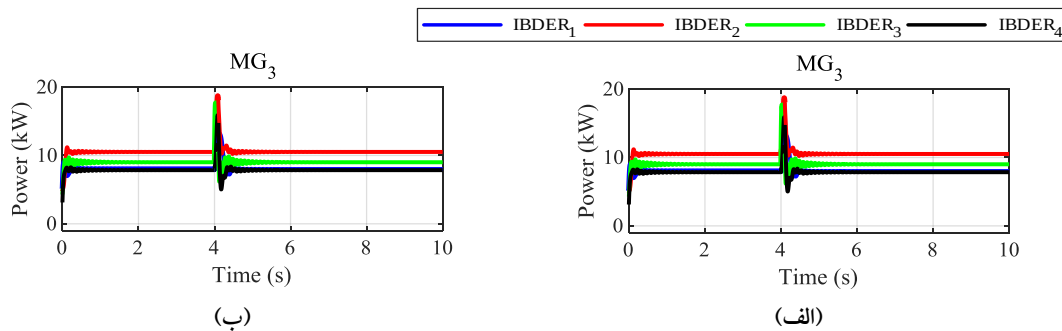
جریان بار دوم در ریزشبکه اول در ثانیه چهارم از ۲۲/۳ آمپر به ۷۵ آمپر افزایش می‌یابد و پس از گذشت ۰/۲ ثانیه، مجدداً به جریان قبل از اختلال بازمی‌گردد. همانند سناریوهای پیشین، به‌دلیل تمرکز اصلی اغتشاش در ریزشبکه اول و به‌منظور پرهیز از شلوغی و افزایش تعداد نمودارها، تنها نتایج مربوط به پارامترهای ریزشبکه اول (شامل



شکل (۲۱): فرکانس زاویه‌ای IBDERهای ریز شبکه اول تحت سناریو سوم، (الف) روش ارائه شده در [۱۷]، (ب) روش پیشنهادی RCCE



شکل (۲۲): ولتاژ IBDERهای ریز شبکه اول تحت سناریو سوم، (الف) روش ارائه شده در [۱۷]، (ب) روش پیشنهادی RCCE



شکل (۲۳): توان اکتیو خروجی IBDERهای ریز شبکه اول تحت سناریو سوم، (الف) روش ارائه شده در [۱۷]، (ب) روش پیشنهادی RCCE

دارد، ابتدا ماتریس حالت کلی سیستم محاسبه و سپس حالت‌های با میرایی کم، که باعث کاهش پایداری هستند، شناسایی می‌شوند. با تنظیم مجدد ضریب‌های توان اکتیو کنترل اجماع، پایداری سیستم بهبود داده می‌شود. تنظیم این ضریب‌های کنترل با حل یک مسئله بهینه‌سازی دوسطحی و تکراری انجام می‌شود. در این روش، برای اولین بار یک ارتباط بین نسبت‌های میرایی و ضریب‌های توان اکتیو کنترل اجماع برقرار شده است. همچنین، یک تجزیه و تحلیل سیگنال کوچک برای مشخص شدن تأثیر ضریب‌های کنترل اجماع بر

این نتایج در مجموع، کارایی و مقیاس‌پذیری روش پیشنهادی RCCE را در حفظ پایداری سیستم چند ریز شبکه، حتی در شرایط تغییر پیکربندی و اغتشاشات دینامیکی، به خوبی اثبات می‌کند.

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک روش جدید به نام RCCE برای افزایش پایداری تطبیقی سیستم‌های چند ریز شبکه با ساختار کنترلی دولایه پیشنهاد شده است. در روش پیشنهادی RCCE، که در لایه دوم ساختار کنترل قرار

بالین حال، لازم است به برخی محدودیت‌های این مطالعه و زمینه‌های آتی برای تحقیقات بیشتر نیز اشاره شود. اولاً پایش و بهبود پایداری در این روش متکی بر مدل‌سازی دقیق سیگنال کوچک سیستم و به‌روزرسانی مستمر آن است که می‌تواند در سیستم‌های بسیار بزرگ و پیچیده، نیازمند توان محاسباتی قابل توجهی باشد؛ ثانیاً درحالی‌که روش RCCE پایش و تنظیم پارامترهای کنترلی را به‌صورت تطبیقی در حین عملکرد سیستم انجام می‌دهد، فرایند به‌روزرسانی آن تقریباً هر ۱۵ دقیقه یک بار صورت می‌گیرد. این امر، اگرچه برای مقابله با تغییرات کندتر و دینامیک‌های طولانی‌مدت سیستم مؤثر است، ممکن است در برابر اغتشاشات بسیار سریع و ناگهانی که به پاسخ لحظه‌ای نیاز دارند، محدودیت‌هایی داشته باشد؛ ثالثاً تأخیرات ارتباطی و نویز احتمالی در شبکه کنترل توزیع شده لحاظ نشده‌اند، درحالی‌که این عوامل می‌توانند پایداری و کارایی روش پیشنهادی را در عمل تحت تأثیر قرار دهند. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی، روش پیشنهادی در شرایط پیچیده‌تر و واقع‌گرایانه‌تر شامل مدل‌های ساده‌شده برای کاهش پیچیدگی محاسباتی، و همچنین لحاظ کردن تأخیرهای ارتباطی متغیر و نویز سیستم، مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد.

پایداری سیستم انجام شده است. برای تأیید کارایی روش پیشنهادی RCCE، مطالعات گسترده‌ای در هر دو حوزه زمان و فرکانس بر روی یک سیستم چندریزشبکه آزمایشی با سه ریزشبکه شبیه‌سازی شده است. این مطالعات تحت سه سناریوی عملیاتی متنوع (شامل تغییر دینامیکی بار، کاهش لحظه‌ای بار، و تغییر توپولوژی با افزایش لحظه‌ای بار) انجام شده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده، نوسانات پس از اغتشاشات اعمال شده در هر سه سناریو، با استفاده از روش پیشنهادی RCCE نسبت به نوسانات بدون آن، با سرعت بیشتری میرا می‌شوند. این امر اثبات می‌کند که روش پیشنهادی به‌طور مؤثر پایداری را در حین عملکرد سیستم بهبود می‌بخشد. روش پیشنهادی RCCE با تکیه بر تحلیل سیگنال کوچک و شناسایی مدهای بحرانی کم‌میرایی، امکان بهبود هدفمند پایداری سیستم را در حین عملکرد و به‌صورت دوره‌ای فراهم می‌کند. برخلاف بسیاری از روش‌های موجود که تنها در مرحله طراحی ایستا باقی می‌مانند، RCCE قادر است وضعیت پایداری سیستم را به‌روزرسانی کرده و در صورت نیاز، تنظیمات مناسب را اعمال کند. از دیگر مزایای کلیدی این روش آن است که در صورت بروز اختلال در اجرای RCCE، ساختار کنترلی پایه (شامل کنترل اولیه و ثانویه) مستقل از آن به عملکرد خود ادامه می‌دهد و اختلالی در عملکرد سیستم ایجاد نمی‌شود.

مراجع

- [1] Sorouri, M., Shakarami, M. R., Soltani, J., "Autonomous active power control for an islanded AC microgrid using improved bus signaling method", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 113, pp. 549-563, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.05.070>.
- [2] Zhao, T., Liu, H., Su, J., Wang, N., Luo, Z., "Coordinated control for distributed energy resources in islanded microgrids with improved frequency regulation capability", Renewable Energy, p. 122690, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.122690>.
- [3] Islam, M., Yang, F., Amin, M., "Control and optimisation of networked microgrids: A review", IET Renewable Power Generation, Vol. 15, No. 6, pp. 1133-1148, 2021, <https://doi.org/10.1049/rpg2.12111>.
- [4] Saadati Toularoud, M., Khoshhal Rudposhti, M., Bagheri, S., Salemi, A. H., "Enhancing microgrid voltage and frequency stability through multilayer interactive control framework", International Transactions on Electrical Energy Systems, Vol. 2024, No. 1, p. 4933861, 2024, <https://doi.org/10.1155/2024/4933861>.
- [5] Golsorkhi, M. S., Hill, D. J., Karshenas, H. R., "Distributed voltage control and power management of networked microgrids", IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, Vol. 6, No. 4, pp. 1892-1902, 2018, <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2017.2773138>.
- [6] Xiong, J., Ye, Y., Wang, Q., Dong, X., Lu, T., Ma, D., "A comprehensive review on distributed energy cooperative control and optimization method for energy interconnection system", Electric Power Systems Research, Vol. 237, p. 111007, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.111007>.
- [7] Yang, T., Lai, J., Yu, C., Wang, X., Xiao, Q., "Distributed two-layer predictive control of ac microgrid clusters with communication delays", IEEE Transactions on Smart Grid, pp. 1-1, 2025, <https://doi.org/10.1109/TSG.2025.3539789>.
- [8] Satapathy, A. S., Mohanty, S., Mohanty, A., Rajamony, R. K., M Soudagar, M. E., Khan, T. M. Y., Kalam, M. A., Ali, M. M., Bashir, M. N., "Emerging technologies, opportunities and challenges for microgrid stability and control",

- Energy Reports, Vol. 11, pp. 3562-3580, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.03.026>.
- [9] Feng, J., Bai, F., Nadarajah, M., Ma, H., Pradana, A., "Virtual inertia control for damping low-frequency oscillation in IBR-Dominated networks", IEEE Transactions on Industry Applications, pp. 1-10, 2025, <https://doi.org/10.1109/TIA.2025.3532239>
- [10] Zhang, Y., Xie, L., Ding, Q., "Interactive control of coupled microgrids for guaranteed system-wide small signal stability", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 7, No. 2, pp. 1088-1096, 2016, <https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2495233>
- [11] Hassan, C. T., Mahmood Jadoon, T., Arif, A., "Delay-dependent small-signal stability analysis of inverter-based islanded microgrids", IET Smart Grid, Vol. 8, No. 1, p. e12206, 2025, <https://doi.org/10.1049/stg2.12206>.
- [12] Matas-Díaz, F. J., Barragán-Villarejo, M., Maza-Ortega, J. M., "A systematic small-signal analysis procedure for improving synchronization stability of grid-forming virtual synchronous generators", Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, Vol. 13, No. 1, pp. 102-114, 2025, <https://doi.org/10.35833/MPCE.2024.000316>
- [13] AbdelAty, A. M., Al-Durra, A., Zeineldin, H., El-Saadany, E. F., "Improving small-signal stability of inverter-based microgrids using fractional-order control", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 156, p. 109746, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109746>.
- [14] Khosravi, N., Baghbanzadeh, R., Oubelaid, A., Tostado-Véliz, M., Bajaj, M., Hekss, Z., Echalih, S., Belkhier, Y., Houran, M. A., Aboras, K. M., "A novel control approach to improve the stability of hybrid AC/DC microgrids", Applied Energy, Vol. 344, p. 121261, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121261>.
- [15] Wu, X., Xu, Y., Wu, X., He, J., Guerrero, J. M., Liu, C. C., Schneider, K. P., Ton, D. T., "A two-layer distributed cooperative control method for islanded networked microgrid systems", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 11, No. 2, pp. 942-957, 2020, <https://doi.org/10.1109/TSG.2019.2928330>
- [16] Yao, W., Wang, Y., Xu, Y., Lin, P., Qi, Y., Wu, Q., "Distributed layered control and stability analysis of islanded networked-microgrids", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 129, p. 106889, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.106889>.
- [17] He, J., Wu, X., Wu, X., Xu, Y., Guerrero, J. M., "Small-Signal stability analysis and optimal parameters design of microgrid clusters", IEEE Access, Vol. 7, pp. 36896-36909, 2019, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2900728>
- [18] Pogaku, N., Prodanovic, M., Green, T. C., "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, <https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2577542>
- [19] Zhao, Z., Yang, P., Wang, Y., Xu, Z., Guerrero, J. M., "Dynamic characteristics analysis and stabilization of pv-based multiple microgrid clusters", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 10, No. 1, pp. 805-818, 2019, <https://doi.org/10.1109/TSG.2017.2752640>
- [20] Liaqat, M., Alsuwian, T., Amin, A. A., Adnan, M., Zulfiqar, A., "Transient stability enhancement in renewable energy integrated multi-microgrids: A comprehensive and critical analysis", Measurement and Control, Vol. 57, No. 2, pp. 187-207, 2024/02/01 2023, <https://doi.org/10.1177/00202940231196193>
- [21] Mohammadi, F. D., Vanashi, H. K., Feliachi, A., "State-Space modeling, analysis, and distributed secondary frequency control of isolated microgrids", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 33, No. 1, pp. 155-165, 2018, <https://doi.org/10.1109/TEC.2017.2757012>
- [22] P, E. S. N. R., Jain, T., "A two-level hierarchical controller to enhance stability and dynamic performance of islanded inverter-based microgrids with static and dynamic loads", IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol. 15, No. 5, pp. 2786-2797, 2019, <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2869983>
- [23] Wu, X., Zhang, L., Xu, Y., Wang, S., Guerrero, J. M., "Hierarchical and distributed control of AC and DC microgrid clusters interconnected by flexible DC distribution network", CSEE Journal of Power and Energy Systems, pp. 1-12, 2025, <https://doi.org/10.17775/CSEEJPES.2024.01190>
- [24] Nguyen, T. L., Wang, Y., Tran, Q. T., Caire, R., Xu, Y., Gavriluta, C., "A distributed hierarchical control framework in islanded microgrids and its agent-based design for cyber-physical implementations", IEEE Transactions on Industrial Electronics, pp. 1-1, 2020, <https://doi.org/10.1109/TIE.2020.3026267>
- [25] Mohammadi, F., Mohammadi-Ivatloo, B., Gharehpetian, G. B., Ali, M. H., Wei, W., Erdinc, O., Shirkhani, M., "Robust control strategies for microgrids: a review", IEEE Systems Journal, Vol. 16, No. 2, pp. 2401-2412, 2022, <https://doi.org/10.1109/JSYST.2021.3077213>
- [26] Zuo, S., Davoudi, A., Song, Y., Lewis, F. L., "Distributed finite-time voltage and frequency restoration in islanded AC microgrids", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 63, No. 10, pp. 5988-5997, 2016, <http://doi.org/10.1109/TIE.2016.2577542>.