





Vol. 13/ No. 49/Autumn 2023

Research Article

Virtual Inertia Control of Microgrid Consisting of Low Inertia Resources

Sahar Roudi, PhD. Student¹  | Reza Ebrahimi, Assistant Professor^{2*}  | Mahmood Ghanbari, Assistant Professor³  |
Soheil Ranjbar, Assistant Professor⁴ 

¹PhD. Student of Electrical Engineering, Gorgan Branch, Islamic Azad University, Gorgan, Iran, roudisahar@gmail.com

²Department of Electrical Engineering, Gorgan Branch, Islamic Azad University, Gorgan, Iran, reza.ebrahimi@iau.ac.ir

³Department of Electrical Engineering, Gorgan Branch, Islamic Azad University, Gorgan, Iran, ma.ghanbari@iau.ac.ir

⁴Department of Electrical Engineering, Velayat University, Iranshahr, Iran, s.ranjbar@velayat.ac.ir

Correspondence

Reza Ebrahimi, Assistant Professor of Electrical Engineering, Gorgan Branch, Islamic Azad University, Gorgan, Iran, reza.ebrahimi@iau.ac.ir

Abstract

In this paper, an adaptive concept of virtual generator based controller for dynamic stability of microgrids consisting of low inertia resources. For this purpose, considering a set of energy storage systems dispatched in the network, a controlled islanding scheme is provided to dynamically control the microgrid frequency. In this context, based on the concept of center of inertia, the proposed virtual generator scheme is developed through mathematical formulation. Also, from the Inter-area torques evaluated by microgrid control areas in the center of inertia frame are used as input signals of the developed virtual generator based controller. For the energy storage systems, an equivalent dispatch model is provided and developed through the microgrid dynamic model for improving frequency stability during inter-area oscillations. The proposed virtual generator-based controller is an online and non-model-based scheme which controls several microgrid systems together as an integrated network connected to the upstream network. In order to evaluate the ability of the proposed scheme, realtime simulations are carried out on one test system consisting of several microgrids. Numerical results demonstrate the effectiveness of the proposed scheme in increasing system inertia constant resulting in a proper dynamic performance with a high damping ratio in facing severe inter-area oscillation.

Keywords: Inter-area oscillation, Low inertia resources, Virtual generator-based damping controller, Controlled islanding scheme

Received: 21 December 2022

Revised: 28 January 2023

Accepted: 27 February 2023

Highlights

- Using storage energy device for damping dynamic oscillations.
- Present a new method based on center of inertia theory and center of gravity concept.
- Using a controller for damping microgrid oscillations in presence of low inertia resources.

Citation: S. Roudi, R. Ebrahimi, M. Ghanbari, and S. Ranjbar, "Dynamic Oscillation Damping Through Virtual Inertia Control in Smart Grids with Low Inertia Renewable Resources," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 13, no. 49, pp. 65–80, 2023, doi: 10.30495/jce.2023.1975407.1184. (In Persian).

مقاله پژوهشی

کنترل اینرسی مجازی به منظور میراسازی نوسانات دینامیکی ریزشبه‌ها در حضور منابع تجدیدپذیر با اینرسی پایین

سحر رودی^۱ | رضا ابراهیمی^{۲*} | محمود قنبری^۳ | سهیل رنجبر^۴

چکیده:

با توجه به نفوذ گسترده‌ی ریزشبه‌ها در شبکه‌ی برق به دلیل مسائل اقتصادی و محیط زیستی بررسی این سیستم‌ها از منظر پایداری بسیار حائز اهمیت است. یکی از مسائل مربوط به پایداری ریزشبه‌ها، مسئله‌ی اینرسی پایین این اجزا به دلیل منابع تجدید پذیر است. در این مقاله، یک مفهوم تطبیقی از کنترل‌کننده مبتنی بر ژنراتور مجازی، برای پایداری دینامیکی ریزشبه‌ها با منابع اینرسی کم پیشنهاد می‌شود. برای این منظور، مجموعه‌ای از سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی توزیع‌شده در نظر گرفته شده است. یک طرح جزیره‌ای کنترل‌شده برای کنترل دینامیکی فرکانس ریزشبه نیز ارائه گردیده است. در این زمینه، بر اساس مفهوم مرکز اینرسی، طرح ژنراتور مجازی پیشنهادی از طریق فرمول‌بندی ریاضی توسعه می‌یابد. همچنین از گشتاورهای بین ناحیه‌ای ارزیابی شده توسط مناطق کنترل ریزشبه در قاب مرکز اینرسی، به‌عنوان کنترل‌کننده مبتنی بر ژنراتور مجازی توسعه‌یافته، استفاده می‌شود. علاوه بر این برای سیستم‌های ذخیره انرژی، یک مدل توزیع معادل از طریق مدل دینامیکی ریزشبه برای بهبود پایداری فرکانسی در طول نوسان‌های بین ناحیه‌ای ارائه و توسعه داده شده است. به‌منظور ارزیابی توانایی طرح پیشنهادی، شبیه‌سازی بلادرنگ بر روی یک سیستم آزمایشی دو ناحیه‌ای متشکل از چندین ریزشبه انجام می‌شود. نتایج عددی اثربخشی طرح پیشنهادی را در افزایش ثابت اینرسی سیستم که منجر به عملکرد دینامیکی مناسب با نسبت میرایی بالا در مواجهه با نوسانات شدید بین ناحیه‌ای می‌شود، نشان می‌دهد. کلید واژه‌ها: نوسان بین ناحیه‌ای، منابع اینرسی پایین، کنترل‌کننده میرایی مبتنی بر ژنراتور مجازی، طرح جزیره‌ای کنترل‌شده

^۱ دانشجوی دکتری مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی، گرگان، ایران،
roudisahar@gmail.com

^۲ استادیار، گروه برق، دانشگاه آزاد اسلامی، گرگان، ایران،
reza.ebrahimi@iau.ac.ir

^۳ استادیار، گروه برق، دانشگاه آزاد اسلامی، گرگان، ایران،
ma.ghanbari@iau.ac.ir

^۴ استادیار، دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه ولایت، ایرانشهر، ایران،
s.ranjbar@velayat.ac.ir

نویسنده مسئول

* رضا ابراهیمی، استادیار، گروه برق، دانشگاه آزاد اسلامی، گرگان، ایران،
reza.ebrahimi@iau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۳۰ آذر ۱۴۰۱

تاریخ بازنگری: ۸ بهمن ۱۴۰۱

تاریخ پذیرش: ۸ اسفند ۱۴۰۱

<https://doi.org/10.30495/jce.2023.1975407.1184>

۱-مقدمه

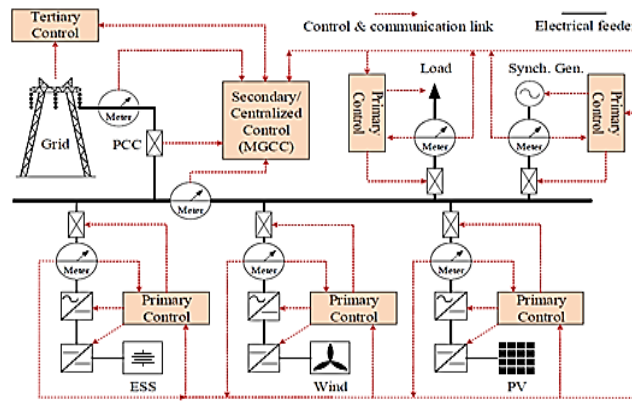
امروزه با توجه به گسترش روزافزون استفاده از ریزشبه‌ها در یک سیستم قدرت، مسائل مختلفی در تحقیقات موردبررسی قرار گرفته است. ریزشبه^۱ مجموعه‌ای از منابع انرژی پراکنده^۲ (DERs)، از جمله منابع انرژی تجدیدپذیر^۳ (RES)، سیستم‌های ذخیره انرژی^۴ (ESS) و تعدادی بار است که می‌تواند به‌عنوان یک نهاد کنترل‌پذیر اجرا شود [۱]. شمای کلی یک ریزشبه در شکل ۱ نشان داده شده است.

^۱ Microgrid

^۲ Distributed Energy Resources

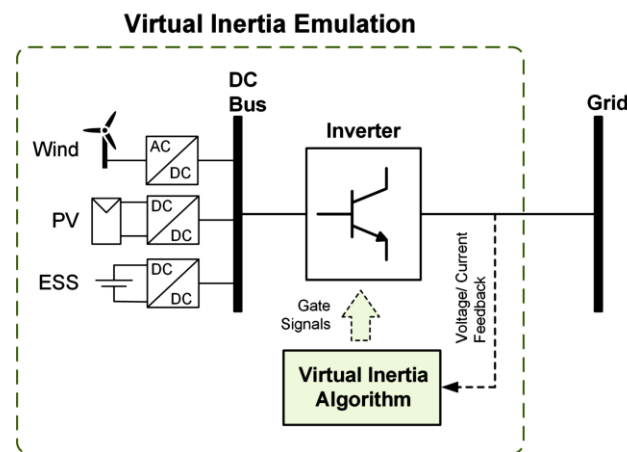
^۳ Renewable Energy Sources

^۴ Energy Storage Systems



شکل ۱: پیکربندی یک ریزشبه
Figure 1. Configuration of a microgrid

ژنراتورهای سنکرون با روتور^۱ وزن داری که در حال چرخش است، تأمین کننده توان شبکه‌های قدرت سنتی هستند. در این نوع از سیستم‌های قدرت، چرخش روتور وزن دار عامل اصلی اینرسی است [۲]. مفهوم اینرسی در سیستم‌های قدرت، مقاومت در برابر وجود تغییرات فرکانسی است که واحد اینرسی، ثابته است [۳]. اینرسی بالا علاوه بر اینکه نقش بسیار مهمی در مسئله پایداری سیستم‌های قدرت دارد، از سیستم نیز در برابر اختلالات و ناتعادلی‌ها حفاظت می‌کند. از این رو کاهش اینرسی منجر می‌شود تا سیستم نسبت به عدم تعادل و اختلالات حساس‌تر باشد. این موضوع در ریزشبه‌ها که بانفوذ بالای RES روبه‌رو است که بسیار حائز اهمیت است چراکه می‌تواند پایداری ریزشبه‌ها را در حالت‌های مختلف بهره‌برداری متصل به شبکه و جزیره‌ای به خطر می‌اندازد. راهبرد رفع این مشکل (یعنی افزایش پایداری) ایجاد اینرسی مجازی از طریق منابع فاقد اینرسی است. این رویکرد با عنوان "ژنراتور سنکرون مجازی" شناخته می‌شود. با این کار منابع فاقد اینرسی عملکردی همانند یک ژنراتور سنکرون با یک روتور وزن دار و در حال چرخش خواهند داشت [۲]. اینرسی مجازی ترکیبی از الگوریتم‌های کنترل منابع انرژی تجدیدپذیر سیستم ذخیره انرژی و الکترونیک قدرت است که اینرسی یک سیستم قدرت معمولی را تقلید می‌کند. مفهوم اینرسی مجازی در شکل ۲، خلاصه شده است [۴].



شکل ۲: مفهوم اینرسی مجازی
Figure 2. The concept of virtual inertia

در برخی منابع به بررسی پایداری ولتاژ از دید کوتاه‌مدت پرداخته شده است. در به بررسی تأثیر برنامه‌ی پاسخگویی بار در پایداری دینامیکی سیستم پرداخته شده است که خلأ بررسی تأثیر اینرسی در پایداری سیستم به چشم می‌آید [۵]. در تحقیقی، نویسندگان به بررسی و محاسبه‌ی توزیع اینرسی در سیستم‌های قدرت پرداخته‌اند که عدم ارائه‌ی راه‌حلی جهت افزایش اینرسی

^۱ Rotor

بررسی نشده است [۶]. محققان در مرجع [۷] بر روی ایجاد بیشینه‌ی اینرسی از طریق خازن‌های DC-link^۱ پرداخته‌اند. در این پژوهش بیشینه‌ی اینرسی در نسبت‌های زمانی به دست آورده شده است. برای این منظور، مطالعات تحقیقاتی مختلفی در ادبیات انجام شده است که تمرکز آن‌ها برای بررسی تأثیر منابع با اینرسی کم بر روی پایداری فرکانس ریزش شبکه بوده است [۸-۱۰]. در این مقالات استفاده از سیستم‌های ذخیره‌سازی در افزایش اینرسی مجازی بررسی نشده است. همچنین، عملکرد میرایی طرح‌های کنترل اضافی مانند ژنراتورهای توزیع شده^۲ (DGs) در ریزش شبکه‌های اینرسی کم با منابع مبتنی بر اینورتر^۳ سطح بالا به طور گسترده مورد بررسی قرار نگرفته است [۸]. تحقیقات انجام شده از طریق مقالات اخیر منتشر شده نشان می‌دهد که استفاده از ESSها به عنوان یک طرح کنترلی اضافی به درستی بررسی شده است [۱۱، ۱۲]. هدف اصلی تخمین حداکثر مقدار مجاز برای منابع مبتنی بر اینورتر است که توسط آن حاشیه‌های فرکانس مجاز سیستم حفظ شوند. از این رو با استفاده از ESSها، همواره سعی بر آن بوده است یک کنترل فرکانسی اولیه با در نظر گرفتن معیارهای قابلیت اطمینان برای ریزش شبکه طراحی شود. رویکرد پیشنهادی یک الگوریتم فرموله شده ریاضی است که در مراجع ارائه شده است [۸، ۱۳]. در با در نظر گرفتن منابع مبتنی بر ESS، یک کنترل فرکانس اولیه مجازی برای ریزش شبکه متشکل از منابع مبتنی بر اینورتر توسعه داده شده است [۱۴]. همچنین در مورد اینرسی مجازی، مطالعاتی وجود دارد که استفاده از خازن‌های بزرگ را به عنوان کنترل کننده‌های اینرسی مجازی از طریق سیستم‌های مبتنی بر اینورتر بررسی می‌کند [۱۵]. با این حال، در این مرجع مدل کنترلی پیشنهادی تنها برای سیستم‌های ساده اعمال می‌شود و عملکرد دینامیکی حلقه‌های کنترل ارائه شده در سیستم‌های قدرت بزرگ بررسی نشده است. از طریق بررسی ادبیات، مشخص شد که توسعه یک مدل دینامیکی دقیق از دستگاه‌های ESS به عنوان یک شکاف تحقیقاتی در امنیت دینامیکی ریزش شبکه باقی می‌ماند. در برخی منابع با در نظر گرفتن استانداردهای ریزش شبکه IEEE، تأثیر دستگاه‌های مبتنی بر اینورتر برای نسبت انحراف فرکانس بررسی شده است. با این حال، در هر دو مرجع با توجه به عدم وجود یک مدل پویا ESS، عملکرد میرایی ESS ارزیابی نشده است [۸، ۱۶]. بنابراین، بدون توسعه دقیق مدل دینامیکی ریزش شبکه، رفتارهای گذرا ذاتی را نمی‌توان کشف کرد و این منجر به استراتژی‌های نامناسب برای طرح‌های جزیره‌ای کنترل شده ریزش شبکه می‌شود. خلأ موجود در این زمینه، این پژوهش را جهت بررسی دقیق‌تر این مسئله و در نهایت ارائه‌ی راه‌حلی مناسب تشویق کرده است. در نهایت دستاوردهای این پژوهش به شکل زیر عنوان می‌گردد:

- یک استراتژی مفهومی دینامیکی برای تقسیم‌بندی یک سیستم چند محدوده‌ای به مجموعه‌ای از محدوده‌های نوسانی ارائه شده است. سپس منابع دارای اینرسی پایین در این محدوده‌ها بر اساس مفهوم COI فرمول بندی می‌شود.
- یک مدل اینرسی مجازی تطبیق یافته به منظور کنترل یک ریزش شبکه‌ی متصل به شبکه‌ی قدرت بانفوذ منابع دارای اینرسی پایین فراهم آورده شده است. در این مورد، مدل دینامیکی ESS بر اساس رفتار حالت گذرای سیستم بهبود یافته است تا کنترل کننده فرکانس مبتنی بر اینرسی مجازی برای کنترل فرکانس محدوده‌های مختلف بهبود یابد.

در بخش دوم به بررسی روش پیشنهادی پرداخته شده است و مفهوم مکانیکی روش پیشنهادی به تفصیل معرفی می‌گردد. در بخش سوم به بررسی نتایج شبیه‌سازی می‌پردازیم و ضرایب مورد استفاده در شبیه‌سازی معرفی می‌گردند. در نهایت در بخش چهارم به نتایج این پژوهش پرداخته می‌شود و کارآمدی سیستم بررسی می‌گردد.

۲- روش پیشنهادی

۲-۱- فرمول بندی ریاضی اینرسی مجازی

در این مقاله، بر اساس مفاهیم مرکز اینرسی، به اختصار مرکز ثقل اینرسی^۴ (COI)، طرح ژنراتور مجازی^۵ (VG) پیشنهادی توسط فرمول بندی ریاضی توسعه یافته است.

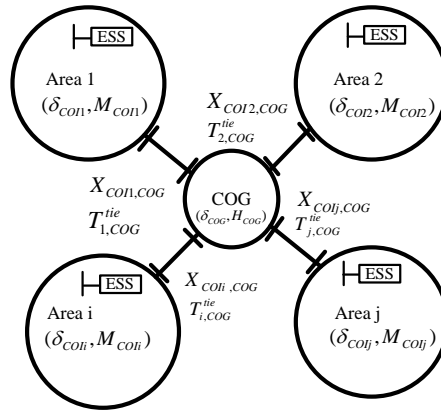
^۱ Direct current Link

^۲ Distributed Generation

^۳ Inverter

^۴ Center of Inertia

^۵ Virtual generator



شکل ۳: مفهوم اساسی استراتژی COI برای یک سیستم توان در ریزشکته‌های چند ناحیه‌ای
Figure 3. Fundamental concept of COI strategy for a power system with multi-area microgrids

با توجه به شکل ۳ و بر اساس مفاهیم COI، هر سیستم قدرت را می‌توان به مجموعه‌ای از ریزشکته‌ها با انحراف‌های فرکانسی و اینرسی‌های معادل^۱ متفاوت تقسیم کرد. هنگام مدل‌سازی ژنراتور مجازی بر مبنای مفاهیم فرمول‌بندی ریزشکته با دو محدودیت مواجه هستیم که اولین محدودیت متوجه منابع تغذیه ریزشکته‌ها است. دوم اینکه، بسته به نقاط عملیاتی ریزشکته، عملکردشان می‌تواند به دو صورت مختلف، متصل به شبکه و یا جزیره‌ای باشد. مراجع [۸، ۱۷-۱۸] از مفهوم COI برای مدل‌سازی سیستم‌های قدرت با زیرشکته‌های بین ناحیه‌ای با ارزیابی انحراف فرکانسی استفاده کرده‌اند. هر ریزشکته می‌تواند با استفاده از مفاهیم COI و مرکز ثقل گشتاور^۲ (COG) مدل‌سازی شود. در یک مفهوم بنیادی، گشتاور معادل $T_{COI,COG}$ برای نقطه مرجع مجازی برابر با صفر خواهد بود،

$$\sum_{i=1}^n T_{COI,COG}^{tie} = \sum_{i=1}^n \frac{P_{COI,COG}^{tie}}{\omega_{COG}} \quad (1)$$

اندازه $P_{COI,COG}^{tie}$ ، توان مجازی بین ریزشکته و خط اتصال شبکه بالادستی را می‌توان طبق رابطه ۲ بدست آورد،

$$P_{COI,COG}^{tie} = \frac{|V_{COI_i}| \times |V_{COG}|}{X_{COI,COG}^{tie}} \sin(\delta_{COI_i} - \delta_{COG}) \quad (2)$$

که در آن δ_{COI_i} و δ_{COG} به ترتیب زاویه معادل مرجع و زاویه معادل آمین ریزشکته هستند. پارامتر V_{COG} ولتاژ معادل در قاب COG و V_{COI_i} دامنه ولتاژ شین معادل آمین ریزشکته هستند. راکتانس مجازی فرضی $X_{COI,COG}^{tie}$ برای ریزشکته و همچنین نقطه مرجع مجازی است که می‌توان از طریق مدل پیشنهادی آن را تخمین زد. با در نظر گرفتن روابط ۱ و ۲، می‌توان یک روش مبتنی بر بهینه‌سازی برای ارزیابی متغیرهای مجهول پیاده‌سازی کرد.

$$\min_{X_{COI,COG}^{tie}} \sum \xi^- - \xi^+ \quad (3)$$

$$s.t \sum_{i=1}^n \frac{1}{\omega_{COG}} \left(\frac{|V_{COI_i}| \times |V_{COG}|}{X_{COI,COG}^{tie}} \sin(\delta_{COI_i} - \delta_{COG}) + \xi^- - \xi^+ \right) = \sum_{i=1}^n \Delta P_i^{MG} \quad (4)$$

$\xi^-, \xi^+ > 0$
 $0 < X_{COI,COG}^{tie} \leq 1$

در رابطه ۴ متغیرهای ξ^- و ξ^+ به ترتیب دو انحراف کوچک منفی و مثبت هستند که بر مبنای آن‌ها مقدار هدف^۳ اصلی ξ تعیین می‌گردد. با استفاده از متغیرهای تخمین زده شده، مسئله بهینه‌سازی ۴ را می‌توان به صورت رابطه ۶ بازنویسی کرد،

¹ Equivalent Inertias

² Center of Gravity

³ Objective

$$\min_{X_{COI_i,COG}^{tie}} \sum_{s=1}^S p_s \sum (\xi_s^- - \xi_s^+) \quad (5)$$

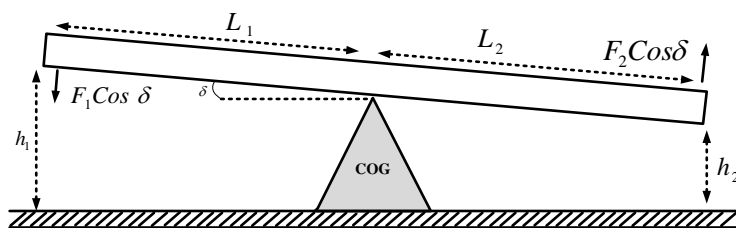
$$s.t \sum_{i=1}^n \frac{1}{\omega_{COG}} \left(\frac{|V_{COI_i}| \times |V_{COG}|}{X_{COI_i,COG}^{tie}} \sin(\delta_{COI_i} - \delta_{COG}) + \xi_s^- - \xi_s^+ \right) = \sum_{i=1}^n \Delta P_{i,s}^{MG} \quad (6)$$

$\xi_s^-, \xi_s^+ > 0$
 $0 < X_{COI_i,COG}^{tie} \leq 1$

در رابطه ۶، S بیانگر تعداد سناریوهای است که با احتمال مشخص p مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. لازم به ذکر است بر این اساس، با استفاده از روش کمینه‌سازی، یکی یا هر دو انحراف‌های ξ^- و ξ^+ به مقدار صفر تخمین زده می‌شود. روش محاسبه‌ی سناریوها و احتمال‌های متناظر هر سناریو که مربوط به انحراف‌های مربوط به توان‌های تولیدی است در مرجع توضیح داده شده است [۱۹]. با توجه به ۶، با مشخص کردن احتمالات مختلف، محدودیت‌های متناظر ارزیابی و با استفاده از الگوریتم ژنتیک باینری^۱ بهینه‌سازی انجام شده و مقدار بهینه اصلی ξ_s^- ، برآورد می‌شود [۲۰].

۲-۲- ساختار مفهومی طرح کنترلی پیشنهادی

مفهوم پایه کنترل کننده ریزشکه را می‌توان به یک سیستم مکانیکی متشکل از دو نیروی متفاوت، مطابق شکل ۴ بسط داد. در حالت تعادل، هنگامی که نیروهای F_1 و F_2 در برابر یکدیگر خنثی می‌شوند، سیستم با اختلاف زاویه δ_0 به عنوان زاویه پایه عمل می‌کند. در این حالت δ زاویه هر ناحیه را نسبت به نقطه مرکزی COG نشان می‌دهد.



شکل ۴: توصیف مفهومی طرح کنترلی پیشنهادی با استفاده از یک قیاس مکانیکی
Figure 4. Conceptual description of proposed controlling scheme using a mechanical analogy

شکل ۴ گویای این حقیقت است که گشتاور معادل متناظر با نقطه مرکزی COG، در وضعیت تعادل برابر با صفر است [۲۰]. به بیان ریاضی،

$$F_i = m_i \times g_i \times h_i \quad (7)$$

$$(F_1 \times \cos(\delta \times L_1)) - (F_2 \times \cos(\delta \times L_2)) = 0 \quad (8)$$

در رابطه ۷، F_i به نیروهای تأمین شده برای هر ناحیه و m_i ، g_i و h_i به ترتیب جرم، ضریب ثابت و ارتفاع هستند. همچنین L طول هر ناحیه و δ زاویه هر ناحیه نسبت به نقطه مرکزی COG را بیان می‌دارند. برای توصیف مدل دینامیکی ریزشکه، هر ناحیه ریزشکه را می‌توان با معادل‌های مکانیکی نشان داد. در این صورت مدل دینامیکی رابطه ۸ با استفاده از متغیرهای ریزشکه همانند آنچه در رابطه ۹ نشان داده شده است، توسعه می‌یابد،

$$\left(\frac{\Delta P_1^{MG}}{M_1^{MG}} X_{COI_1,COG}^{tie} \right) + \left(\frac{\Delta P_2^{MG}}{M_2^{MG}} X_{COI_2,COG}^{tie} \right) + \dots + \left(\frac{\Delta P_i^{MG}}{M_i^{MG}} X_{COI_i,COG}^{tie} \right) = 0 \quad (9)$$

¹ BGA: Binary Genetic Algorithm

در رابطه ۹ مقدار پارامتر $\Delta P_i/M_i$ به عنوان انحراف فرکانسی ریزش شبکه متناظر با فرمول بندی دینامیکی سوینگ^۱ همانند آنچه در رابطه ۱۰ آمده، محاسبه می شود [۲۱]،

$$2M \frac{df(t)}{dt} = T_m(t) - T_e(t) \quad (10)$$

که در آن T_e گشتاور الکتریکی خروجی و T_m گشتاور مکانیکی ورودی است. با توجه به تعریف گشتاور-توان، رابطه ۱۰ را می توان مطابق رابطه ۹ بازنویسی کرد [۲۲]،

$$\dot{\Delta f} = \frac{1}{2\pi M} (\Delta P - 2\pi P \Delta f - \sum P^{tie}) \quad (11)$$

که در آن D ضریب میرایی بارهای دینامیکی ریزش شبکه را نشان می دهد و P^{tie} به منزله توان پخش بار انتقالی توسط خطوط اتصال ریزش شبکه است. همچنین Δf نشان دهنده ی مقدار تغییرات فرکانس است.

۲-۳- مدل سازی پاسخ فرکانسی طرح کنترلی پیشنهادی

با در نظر گرفتن پاسخ فرکانسی که در مدل رابطه ۱۱ ارائه شده است، یک سناریو اختلال خطا از منظر ریاضی به طریق زیر مدل سازی می شود،

$$(2M_{COG}) \frac{d\Delta f_{COG}}{dt} = (\Delta R - \Delta P_{LF}) \quad (12)$$

در رابطه ۱۱، ΔR توان اکتیو اضافی در مگاوات است که با توجه به مدل پاسخ دینامیکی ارائه شده است [۲۳].

$$\Delta f_{COG}^{max}(t) = \frac{2M_{COG}^2 \times \left(\frac{d\Delta f}{dt}\right)^2 \times T_D}{4M_{COG} \times R} = \frac{M_{COG} \times \left(\frac{d\Delta f}{dt}\right)^2 \times T_D}{R} = \frac{M_{COG} \times (ROCOF)^2 \times T_D}{R} \quad (13)$$

که در آن ROCOF نشان دهنده نرخ تغییر انحراف فرکانس^۲ در طول هر بازه زمانی T_D است. لازم به ذکر است تمام متغیرهای رابطه ۱۳ به جز نسبت R/T_D ، به مدل سیستم وابسته هستند و بر اساس پاسخ دینامیکی سیستم تخمین زده می شوند به منظور تخمین بالاترین سطح نفوذ منابع با اینرسی کم، متغیر فرکانسی از رابطه ۱۳ استفاده می شود، نوسانات دینامیکی محلی طبق رابطه ۱۴ بدست می آید،

$$\frac{\Delta f_{COI_i}}{\Delta f_{COG}} = \frac{M_{COG}}{M_{COI_i}} \cdot \frac{(\Delta P_i - 2\pi D_i \Delta f_{COI_i} - P_{COI_i,COG}^{tie} - \Delta P_i^{MG_i})}{\Delta P_m - \Delta P_e} \quad (14)$$

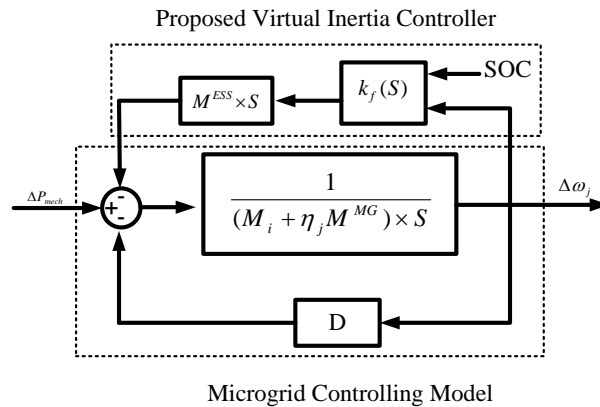
$$\Delta f_{COI_i} = \frac{M_{COG}}{M_{COI_i}} \left(\frac{\Delta P_{LF} - \sum P_{COI_i,COG}^{tie} - \Delta P_i^{MG_i}}{\Delta P_m - \Delta P_e} \right) \Delta f_{COG} \quad (15)$$

$$1 + \left(\frac{M_{COG}}{M_{COI_i}} \frac{2\pi D_i}{\Delta P_m - \Delta P} \right) \Delta f_{COG}$$

اینرسی M_{COG} در رابطه ۱۵ دارای تعریفی مشابه با اینرسی M_i^{MG} در رابطه ۹ است. بلوک های کنترلی نشان داده شده در شکل ۵ توسعه داد که بیانگر مفهوم اینرسی مجازی پیشنهادی با توجه به پاسخ فرکانس ریزش شبکه ارزیابی شده است [۲۴-۲۶].

¹ Swing Dynamics

² Rate of Change of Frequency

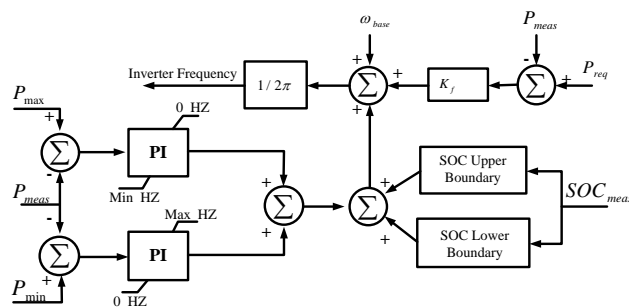


شکل ۵: مفهوم کنترل نظریه اینرسی مجازی برای تنظیم پاسخ فرکانس ریزشبه
Figure 5. Control concept of virtual inertia theory for adjusting microgrid frequency response

بر اساس مدل کنترلی توسعه یافته در شکل ۵، اینرسی مجازی دستگاه‌های ESS، M^{ESS} مسئول کنترل تابع انتقال ریزشبه هستند که با ضریب $k_f(s)$ به عنوان کنترل منبع ولتاژ در یک مدل فرکانس حلقه بسته هماهنگ کار می‌کنند.

۲-۴- مدل سازی دستگاه‌های ضروری در مدل کنترل اینرسی مجازی

در این بخش، یک مدل طول عمر پیشنهاد می‌شود، که برای آن ظرفیت محوشدگی سلول‌های باتری LPF/C در شرایط چرخه‌ای در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد تخمین زده می‌شود [۲۷].



شکل ۶: مدل کنترل ESS با توجه به حالت‌های مختلف عملکرد SOC
Figure 6. ESS control model with respect to different SOC operating modes

در یک مدل معمولی، دستگاه‌های ESS مجهز به یک سیستم کنترل آتش مبتنی بر اینورتر، یک سیستم DC و یک منبع اینورتر هستند و می‌توانند در هر دو حالت عملیات متصل به شبکه و جزیره‌ای کار کنند [۲۸].

۲-۵- مدل دینامیکی ESS در مد عملیاتی جزیره‌ای

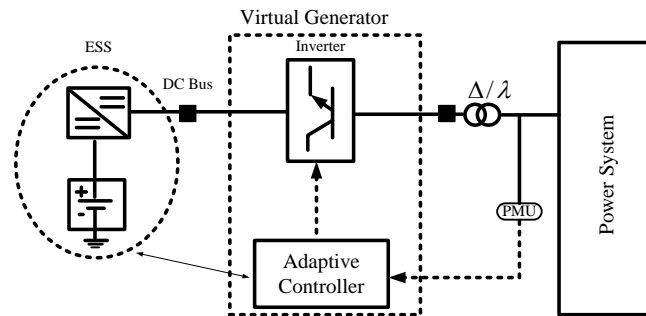
با توجه به عملکرد فرکانس بالای دستگاه‌های سوئیچینگ ESS (نسبت سوئیچینگ حدود ۱۰ کیلوهرتز)، سیگنال‌های خروجی ESS مربوطه با اجزای هارمونیک مختلف مرتبه بالا ترکیب می‌شوند. با استفاده از برخی فیلترهای LC پایین گذر، می‌توان فرکانس‌های سوئیچینگ ناخواسته را با سیگنال‌های کنترل خروجی حذف کرد [۲۹]. در مد عملیاتی جزیره‌ای، اینورترهای ESS را می‌توان به عنوان منابع ولتاژ ایده‌آل در نظر گرفت که شامل سه فاز متعادل هستند [۳۰].

$$\begin{aligned} V_{ab}^{ESS} &= V_m \cos(\omega t + \theta) \\ V_{bc}^{ESS} &= V_m \cos(\omega t + \theta + 120) \\ V_{ca}^{ESS} &= V_m \cos(\omega t + \theta - 120) \end{aligned} \quad (16)$$

در رابطه ۱۶ مقدار ولتاژ V_m و فرکانس زاویه‌ای ω را می‌توان با استفاده از بلوک‌های کنترل کننده اینورتر ESS، تنظیم کرد.

۲-۶- مدل دینامیکی ESS در حالت عملیات متصل به شبکه

بر اساس شکل ۳، ریزشیکه از ژنراتورهای سنکرون مختلف در مقیاس کوچک^۱ (SSSG) تشکیل می‌شود که با رفتارهای دینامیکی متفاوت و اینرسی مشخص در نوسان هستند.



شکل ۷: نمای کلی مدل کنترل کننده ESS در حضور نوسانات الکترومکانیکی ریزشیکه
Figure 7. Overall view of ESS controlling model in the presence of microgrid electromechanical oscillations

با در نظر گرفتن بلوک‌های کنترلی ارائه شده در شکل ۵ و مدل متصل به شبکه در شکل ۷، بلوک سیستم قدرت^۲ به‌عنوان مدل شبکه بالادستی کار کرده که سیگنال‌های ورودی را به بلوک کنترل کننده ژنراتور مجازی ارائه داده و ضریب فاکتور مناسب k_f را برای مدل کنترل کننده حلقه بسته ایجاد می‌کند.

۲-۷- جبران تأخیر زمانی مخیره

در یک تحلیل بلادرنگ، سیگنال‌ها با تأخیرهای زمانی مختلف گنجانده می‌شوند. با در نظر گرفتن دو مهر زمانی شامل زمان محلی t_1 و لحظه دریافت داده‌ها در مرکز کنترل t_2 ، تأخیر کل به‌صورت $\Delta T_1 = t_2 - t_1$ به دست خواهد آمد. در این مورد، به‌منظور جبران تأخیر فاز ارزیابی شده $(\exp(-\lambda_0 \Delta T_1))$ ، با در نظر گرفتن فرکانس غالب $\lambda_0 = \sigma_0 + j\omega_0$ و همچنین با استفاده از یک طرح جبران آنالین به‌عنوان تقریب پاده^۳، تأخیر فاز برآورد شده به‌صورت زیر جبران می‌شود،

$$e^{-\lambda_0 \Delta T_1} \cong 1 + \frac{\sum_{i=1}^n \frac{(2n-i)!n!}{(2n)!(n-i)!i!} \left(\frac{-\lambda_0 \Delta T}{i} \right)^i}{\sum_{i=1}^n \frac{(2n-i)!n!}{(2n)!n(n-i)!i!} \left(\frac{\lambda_0 \Delta T}{i} \right)^i} \quad (17)$$

که در آن n ترتیب تقریبی است. ترتیب n می‌تواند بر روی مقدار فاز تخمینی تأثیر بگذارد. بر اساس فرکانس نوسان ریزشیکه (۵-۵ هرتز)، یک مرتبه تقریبی $n=8$ برای تخمین تأخیر فاز موردنیاز کافی است. سپس با استفاده از تأخیر ارزیابی شده در رابطه ۱۷، بلوک جبران پس‌فاز/پیش‌فاز^۴ به شرح زیر طراحی می‌شود،

$$H_C = K_C \left(\frac{1+sT_1}{1+sT_2} \right)^M \quad (18)$$

که در آن K_C بهره جبران، T_1 و T_2 به ترتیب ثابت‌های زمانی موردنیاز و m جبران ترتیبی هستند. در فرکانس غالب، رابطه ۱۸ باید داشته باشیم،

$$H_C(\lambda_0) = K_C e^{\lambda_0 \Delta T_1} \quad (19)$$

با در نظر گرفتن $\lambda_0 = \sigma_0 + j\omega_0$ در رابطه ۱۹ اندازه و فاز بلوک جبرانی به‌صورت زیر به دست می‌آید،

$$|H_C(\lambda_0)| = |e^{\lambda_0 \Delta T_1}| \quad (20)$$

¹ Small Scale Synchronous Generation

² Power System

³ Pade approximation

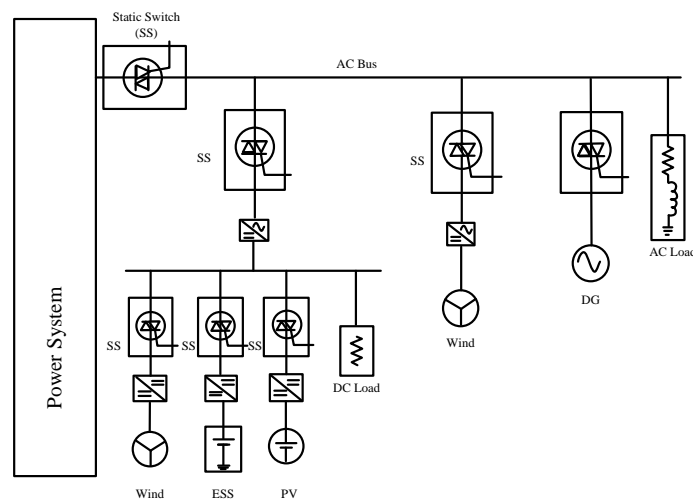
⁴ Lead/Lag

$$\arg(H_c(\lambda_0)) = \arg(e^{\lambda_0 \Delta T_i}) \quad (21)$$

با ارزیابی تقریبی فاز در هر پنجره زمانی و محاسبه مقدار و فاز تقریب پاده، بهره و فاز پس فاز به دست می آیند، که می تواند برای جبران تأخیرهای فاز از طریق طرح کنترل میرایی پیشنهادی استفاده شود.

۳- شبیه سازی و نتایج

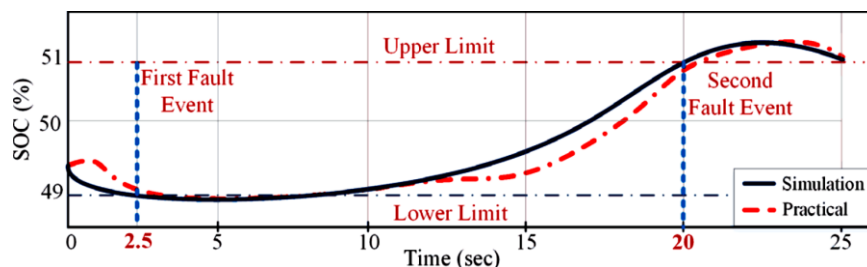
شکل ۸ نمودار تک خطی یک سیستم ریزشبه، متشکل از منابع مختلف با اینرسی کم را نشان می دهد. در این طرح، ریزشبه به یک مولد دیزلی با توان کل $P_{DG}=50\text{KW}$ ، یک آرایه فتوولتاییک با توان کل $P_{PV}=20\text{KW}$ ، دو توربین بادی با توان کل $P_{wind}=2 \times 7/5 = 15\text{KW}$ ، دو دستگاه ذخیره انرژی با توان کل خروجی $P_{ESS}=2 \times 70 = 140\text{KW}$ مجهز شده است. در این ریزشبه دستگاه های ذخیره انرژی، به صورت موازی کار می کنند. لازم به ذکر است که ریزشبه ی شکل ۸ که توسط نویسندگان ارائه شده است، مبنای شبیه سازی های این پژوهش جهت مقایسه قرار گرفته است [۳۱].



شکل ۸: نمودار تک خطی سیستم ریزشبه

Figure 8. Single line diagram of the microgrid system

هر دو ضریب K_p و K_i در بلوک کنترل کننده تناسبی-انتگرالی پیشنهادی شکل ۶، در مقدار ۴ تنظیم شدند. توضیحات بیشتر شامل ارزیابی نمودار بود^۱، مربوط به تنظیمات PLL^۲ به [۳۲] ارجاع می شود. در قدم اول، برای بررسی رفتارهای دینامیکی حالت شارژ^۳ (SOC) مدل کنترلی ESS، دو سناریو خطا در لحظات $t=2/5$ ثانیه و $t=20$ ثانیه در نظر گرفته شدند. نتایج شبیه سازی تأثیری که وقوع پیشامد خطا بر رفتارهای دینامیکی SOC گذاشته است، با نتایج تجربی آن که در مراجع [۳۴،۳۳] گزارش گردیده، مورد مقایسه گرفت. شکل ۹ نتیجه این مقایسه را نشان می دهد.



شکل ۹: مقایسه نتایج عملی و شبیه سازی طرح کنترلی ESS پیشنهادی

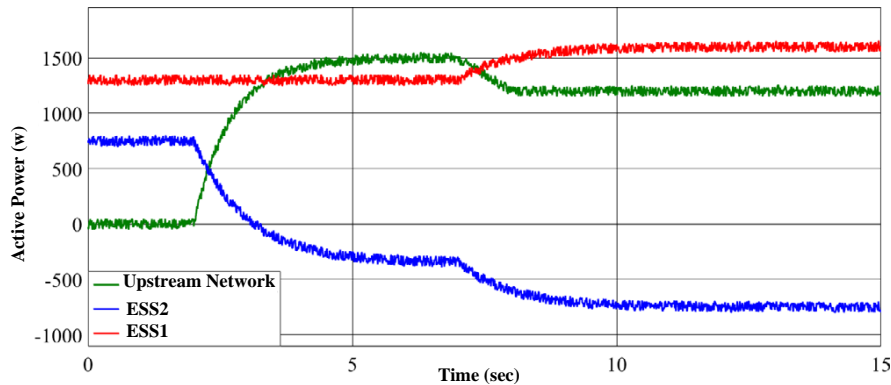
Figure 9. Comparison of practical and simulation results for the proposed ESS controlling scheme

¹ Bode Diagram

² Phase Lock Loop

³ State-of-Charge

به منظور ارزیابی بیشتر طرح کنترلی پیشنهادی، دو ESS به ریزشبه متصل به شبکه، در مدل شکل ۸ نصب شد و نتایج عملی این کار با نتایج حاصل از شبیه‌سازی آن، مورد بررسی قرار گرفت. این بار برای این هدف دو سناریو خطا متفاوت به شرح زیر در نظر گرفته شدند. در سناریو وقوع خطا اول فرض بر آن گرفته می‌شود که توان خروجی ESS2 تا زیر باند LAB^۱ کاهش می‌یابد. در سناریو وقوع خطا دوم فرض بر آن می‌شود که با در نظر گرفتن پخش بار مجدد^۲ DG، توان انتقالی از شبکه بالادستی^۳ به ریزشبه کاهش می‌یابد. شکل ۱۰ پاسخ دینامیکی طرح‌های کنترلی ESS را با توجه به اعمال سناریوهای خطا، نشان می‌دهد.



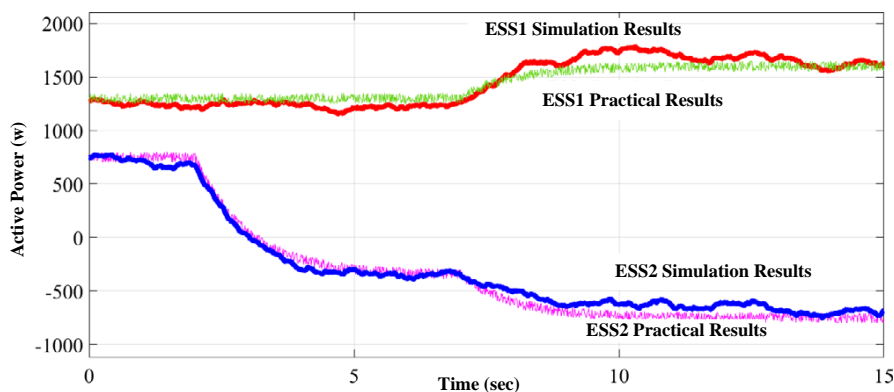
شکل ۱۰: پاسخ دینامیکی ESS ها به اعمال سناریوهای خطا

Figure 10. ESSs dynamic responses with respect to fault event scenarios

با توجه به شکل ۱۰، با در نظر گرفتن یک مدل تحلیلی از دوره زمانی وقوع خطاهای سناریو اول و دوم، امکان ارزیابی و بررسی تابع انتقال^۴ (TF) ریزشبه نیز وجود دارد. تابع انتقال ریزشبه از طریق ارزیابی ماتریس انتقال حالت به دست می‌آید. با توجه به محاسبات TF مذکور، توابع انتقال سیستم نیز از طریق شبیه‌ساز متلب، تعیین می‌شود. تابع انتقال ریزشبه در حوزه فرکانس را می‌توان با استفاده از توان اکتیو ESS2، ΔP^{ESS2} ، به‌عنوان سیگنال ورودی و انحراف فرکانس متناظر $\Delta \omega^{MG}$ به‌عنوان توان خروجی، به طریق زیر به دست آورد،

$$\Delta \omega^{MG} \cong \left[1533 + \frac{0.2}{(0.5 \times S) + 0.2} + \frac{11.35}{(0.33 \times S) + 0.19} \right] \Delta \times P^{ESS2} \quad (22)$$

آنچه از شکل ۱۱ مشخص است، مدل‌هایی ارائه شده TF، رفتارهای دینامیکی مشابهی دارند و نمودارهای خروجی مربوطه به خوبی هر چه تمام به نتایج تجربی منطبق شدند. در این مورد همبستگی ۹۶ درصدی بین نتایج تجربی و نمودارهای TF دیده می‌شود.



شکل ۱۱: مقایسه بین رفتارهای دینامیکی TF های ارائه شده با نتایج عملی

Figure 11. Comparison of the provided TFs dynamic behaviors against experimental results

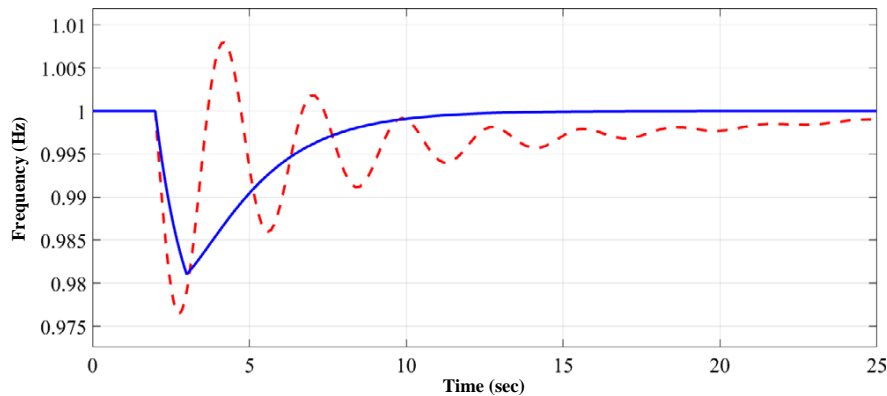
¹ Low Amplitude Bond

² re-Dispatches

³ Upstream network

⁴ Transfer function

شکل ۱۲ عملکرد دینامیکی مدل نوسانات رابطه ۲۲ را در مقایسه با نتایج پاسخ فرکانس تجربی نشان می‌دهد.



شکل ۱۲: مقایسه مدل معادله نوسانات با نتایج تجربی

Figure 12. Comparison of the swing equation model with experimental result

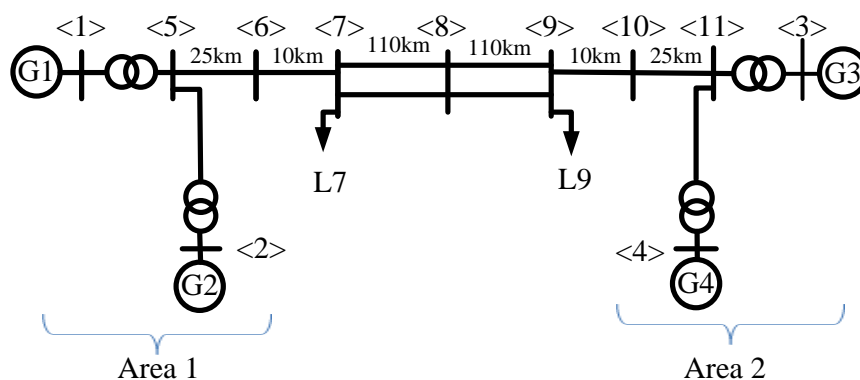
نتایج ارزیابی ریزشکه‌های به هم پیوسته نشان از آن است که بهترین زمان برای اتصال دو ریزشکه کاندید به یکدیگر و سنکرون‌سازی آن‌ها به یک شبکه واحد، هنگامی است که اختلاف فاز بین شین‌های کاندید به صفر میل کند. نتایج عددی مدل توسعه یافته برای پیکربندی‌های مختلف ریزشکه در جدول ۱ گزارش شده است.

Table 1. Dynamic variables required in TF model 18 with respect to microgrid configuration

جدول ۱: متغیرهای دینامیکی مورد نیاز در مدل TF رابطه ۱۸ با توجه به پیکربندی ریزشکه

شماره سناریو	اینرسی ریزشکه	نفوذ سطح ESS (%)	تعداد متغیرهای دینامیکی مورد نیاز
۱	۶	۵۵	۱
۲	۵	۳۸	۱
۳	۴/۵	۴۵	۲
۴	۳/۵	۳۳	۲
۵	۲/۵	۶۶	۳

در جدول ۱ با در نظر گرفتن ضریب همبستگی مناسب (بیش از ۹۵ درصد) بین رفتار دینامیکی ESS و نتایج تجربی مربوطه، تعداد متغیرهای دینامیکی مورد نیاز، تحلیل شدند. عملکرد دینامیکی مدل کنترلی توسعه یافته برای سیستم آزمایشی برای یک سیستم قدرت دو ناحیه‌ای شناخته شده^۱، مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.



¹ Well-known

شکل ۱۳: سیستم دو ناحیه‌ای شامل چهار مولد سنکرون

Figure 13. Two-area system consisting of four synchronous generators

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مطابق شکل ۱۳ در سطح بار پایه، سیستم یک بار کلی ۲۵۵۰ مگاواتی توزیع شده در دو ناحیه دارد. در این مورد برای بررسی رفتار دینامیکی سیستم، یک خطای مولد در حدود $\Delta P_{LF} = 1000 \text{ MW} = 10 \text{ P.U.}$ از ناحیه دو، در نظر گرفته شده است. به‌منظور برآورد مدل TF معادل سیستم، با در نظر گرفتن مسئله بهینه‌سازی رابطه ۶، مدل ترتیبی کاهش یافته مربوطه، به دست آمد و پاسخ فرکانسی دینامیکی آن موردسنجش قرار گرفت. برای این کار، طبق رابطه ۵، چندین احتمال خاص P ارائه شد ($P = 0/15$). با اعمال ضرایب احتمال ارائه شده به مسئله بهینه‌سازی رابطه ۶ و حل آن با کمینه‌سازی هدف، $X_{CO_2, COG}^{tie}$ به‌عنوان راکتانس‌های tie-line، به ترتیب $X_{CO_1, COG}^{tie} = 0/2231$ و $X_{CO_2, COG}^{tie} = 0/3325$ تخمین زده شدند. در رابطه ۲۳ پارامتر T_M نمونه زمانی است که حداکثر انحراف فرکانس تشخیص داده می‌شود. برخی نتایج عددی ارائه شده در مرجع [۳۱، ۳۰] برابر با $\Delta f_1 = 1/15$ ، $\Delta f_1 = 0/85$ ، $\Delta f_1 = 0/95$ و $M_1 = 2 \times 2/66$ هستند. اینرسی معادل M^{ESS} ، در حدود ۱٪ از اینرسی ناحیه معادل تخمین زده شد که به اینرسی ریزشبه مجازی $M^{MG} = 1/4$ منجر گردید. با استفاده از مقادیر تجربی در مدل ریزشبه شکل ۸ داریم،

$$M^{MG} = 1.89 \times \frac{P^{DG}}{P^{MG}} = 1.89 \times \frac{5}{22} = 0.43 (s) \quad (23)$$

در رابطه ۲۳، P^{MG} و P^{DG} به ترتیب بر توان‌های اکتیو کل ریزشبه و تولید پراکنده دلالت دارند. اینرسی ثابت در این رابطه، بر مبنای تولید پراکنده ۵۰ کیلوواتی بوده است که از طریق سیستم ریزشبه در شکل ۸ مدل‌سازی شده است. در این مورد با در نظر گرفتن مقادیر $M^{MG} = 1/4$ و $P_{base} = 100 \text{ MV}$ توان معادل ریزشبه به شکل زیر به دست آمد،

$$P^{MG} = \left[\frac{1.4}{0.43 \times 0.05} \times 0.022 \right] \times 100 = 143.3 (MW) \quad (24)$$

و یعنی حدود ۱۵ درصد سطح نفوذ قابل قبول توان ESS در سیستم ریزشبه با در نظر گرفتن سطح نفوذ ۱۵٪، تعداد کل دستگاه‌های ESS موردنیاز در یک سیستم قدرت را می‌توان به دست آورد. از این‌رو بر مبنای اینرسی معادل $M^{ESS} = 1\%$ ، خواهیم داشت،

$$M^{ESS} = 0.01 \times M_2 = \frac{VAh^{ESS} = 0.5 \times j_{VI} \times \omega^2}{V A_{rated}} = 0.01 \times 6.6 = \frac{VAh^{ESS}}{900} \rightarrow VAh^{ESS} = 59.4 \quad (25)$$

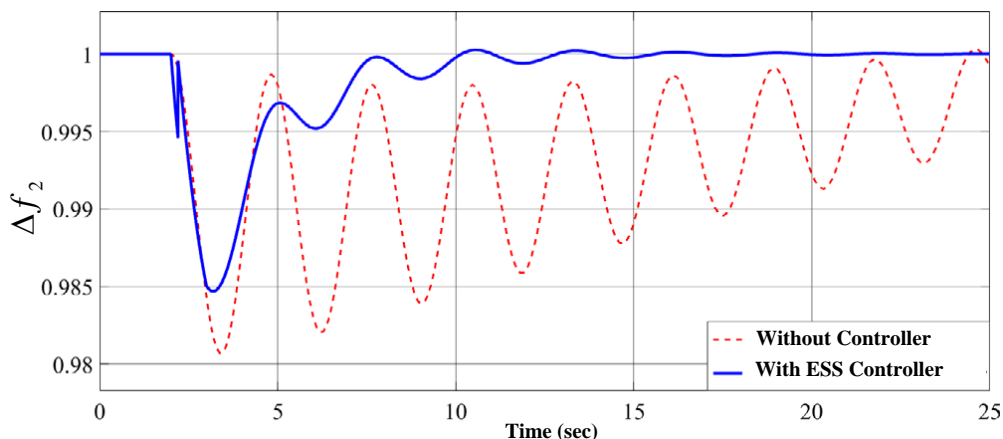
با توجه به نتیجه به‌دست آمده در رابطه ۲۵، بر اساس توان کل ESS، $VAh^{ESS} = 59/4$ و اینکه هر ESS دارای اندازه $V = 12 \text{ v}$ به‌عنوان ولتاژ ورودی و 480 Ah به‌عنوان جریان خروجی است، تعداد کل دستگاه‌های ESS موردنیاز برای سطح نفوذ ۱۵٪ به‌صورت زیر محاسبه می‌شود،

$$\begin{aligned} 59.4 &= N \times V^{ESS} \times Ah^{ESS} \\ \rightarrow 59.4 (MW) &= N \times 12 (V) \times 480 (Ah) \\ \rightarrow N &= \frac{59.4 (MW)}{12 \times 480} = 10313 \end{aligned} \quad (26)$$

یعنی حدوداً ۱۰۳۱۳ دستگاه ESS برای پوشش سطح نفوذ قابل قبول نیاز است. با در نظر گرفتن رابطه ۲۶، طی محاسبات مشابه می‌توان انحراف فرکانسی مدل رابطه ۲۷ به دست آورد،

$$\Delta f_{12} = \frac{1.012}{1 + (0.005 \times \Delta f_{CO_2})} \times \Delta f_{COG} \quad (27)$$

طبق نتایج به‌دست آمده طرح کنترلی پیشنهادی انحراف فرکانسی مربوطه را به‌درستی کاهش داده و باعث ایجاد حداکثر انحراف محدود در مرزهای قابل قبول می‌شود.



شکل ۱۴: مقایسه پاسخ فرکانس سیستم در حضور کنترل کننده میرایی ESS پیشنهادی

Figure 14. Comparison of the system frequency response in the presence of the proposed ESS damping controller

از شکل ۱۴، نتیجه می‌شود که طرح کنترلی ESS، پاسخ فرکانسی خوبی را با نسبت نوسانات مناسب ارائه می‌دهد و بعد از سه‌چرخه نوسانی، نوسانات فرکانسی سیستم، میرا می‌شوند.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله با در نظر گرفتن ریزش‌بکه با منابع اینرسی پایین، طرح جدیدی از مدل معادله نوسان شناخته‌شده، ارائه شده است. همچنین، به‌منظور کنترل عدم قطعیت‌های اینرسی پایین، یک طرح کنترل کننده تطبیقی برای سطح نفوذ بالای سیستم‌های ریزش‌بکه طراحی شد. بر اساس مفهوم COG، سیستم‌های قدرت با نواحی معادل مختلف مدل‌سازی شدند و با بسط معادله نوسان از طریق پاسخ‌های فرکانسی نواحی، مدل معادل طرح کنترلی توسعه‌یافته، تعیین گردید. در این مورد سه مشخصه فرکانسی حداکثر انحراف فرکانس، نسبت تغییر، رفتار دینامیکی فرکانسی به مدت ۱۵ ثانیه بعد از وقوع پیشامد سناریو خطا، در نظر گرفته و مدل کنترل کننده اینرسی مجازی توسعه داده شد. مدل پیشنهاد شده در این مقاله از مجموعه‌ای از دستگاه‌های ESS تشکیل شده است. این دستگاه‌ها به‌صورت یک دستگاه کنترلی تجمیع شده عمل کرده که اینرسی مجازی انعطاف‌پذیر را با توجه به پاسخ دینامیکی فرکانسی ریزش‌بکه‌های چند ناحیه‌ای فراهم می‌کند. نتایج حاکی از آن بود که با توجه به هر سناریوی رویداد خطا، تعداد خاصی از دستگاه‌های ESS برای پشتیبانی از پاسخ فرکانس ریزش‌بکه در محدوده‌های انحراف قابل قبول موردنیاز است. در این حالت با در نظر گرفتن بهره‌دروپ^۱ ریزش‌بکه پیشنهاد شده و به‌کارگیری آن در مدل کنترلی حلقه بسته، بالاترین سطح نفوذ مجاز ریزش‌بکه‌ها برای یک سیستم قدرت تخمین زده شده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده، باوجود تخمین مناسبی برای توان اکتیو و همچنین مقدار اینرسی مجازی مربوطه، می‌توان به انحراف فرکانس مناسب با باندهای محدود دست یافت. بعد از اعمال چندین سناریو رویداد خطا، نتایج شبیه‌سازی اثربخشی طرح کنترلی پیشنهادی را بر نوسانات فرکانس میرا سیستم‌های قدرت چند ناحیه‌ای با استفاده از نسبت نوسانات بالا نشان می‌دهد.

مراجع

- [1] D. E. Olivares et al., "Trends in Microgrid Control," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, no. 4, pp. 1905-1919, July 2014, doi: 10.1109/TSG.2013.2295514.
- [2] H. Bevrani, "Robust power system frequency control," *New York: Springer*, vol. 4, July 2014, doi: 10.1007/978-3-319-07278-4.
- [3] T. V. Van et al., "Virtual synchronous generator: An element of future grids," *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe)*, pp. 1-7, Oct. 2010, doi: 10.1109/ISGT EUROPE.2010.5638946.

¹ Droop gain

- [4] U. Tamrakar et al., "Improving transient stability of photovoltaic-hydro microgrids using virtual synchronous machines," *IEEE Eindhoven PowerTech*, pp. 1-6, June 2015, doi: 10.1109/PTC.2015.7232663.
- [5] M. Zhang, Z. Zhang, H. Yi and X. Tang, "Demand Response Featured Dynamic Voltage Regulation of Active Distribution Network," *IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia (I&CPS Asia)*, Shanghai, China, 2022, pp. 1034-1039, doi: 10.1109/ICPSAsia55496.2022.9949836.
- [6] R. Wu, W. Li, Z. Li, H. Zeng, N. Zou and Z. Wang, "Quantification Method for Inertia Heterogeneity of Power System Considering Node Coupling," *IEEE 2nd International Conference on Electronic Technology, Communication and Information (ICETCI)*, Changchun, China, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICETCI55101.2022.9832214.
- [7] Q. Peng, J. Fang, Y. Yang, T. Liu and F. Blaabjerg, "Maximum Virtual Inertia From DC-Link Capacitors Considering System Stability at Voltage Control Timescale," in *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, vol. 11, no. 1, pp. 79-89, March 2021, doi: 10.1109/JETCAS.2021.3049686.
- [8] K. M. Cheema and K. Mehmood, "Improved virtual synchronous generator control to analyse and enhance the transient stability of microgrid," *IET Renewable Power Generation*, vol. 14, no. 4, pp. 495-505, March 2020, doi: 10.1049/iet-rpg.2019.0855.
- [9] H. Golpîra, H. Seifi, A. R. Messina and M. -R. Haghifam, "Maximum Penetration Level of Micro-Grids in Large-Scale Power Systems: Frequency Stability Viewpoint," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, no. 6, pp. 5163-5171, Nov. 2016, doi: 10.1109/TPWRS.2016.2538083.
- [10] J. Varela, N. Hatziaargyriou, L. J. Puglisi, M. Rossi, A. Abart and B. Bletterie, "The IGREENGrid Project: Increasing Hosting Capacity in Distribution Grids," in *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 15, no. 3, pp. 30-40, May-June 2017, doi: 10.1109/MPE.2017.2662338.
- [11] V. Knap, S. K. Chaudhary, D. -I. Stroe, M. Swierczynski, B. -I. Craciun and R. Teodorescu, "Sizing of an Energy Storage System for Grid Inertial Response and Primary Frequency Reserve," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, no. 5, pp. 3447-3456, Sept. 2016, doi: 10.1109/TPWRS.2015.2503565.
- [12] M. Karami, H. Seifi and M. Mohammadian, "Seamless control scheme for distributed energy resources in microgrids," *IET Gener Transm Distrib.*, vol. 10, no. 11, pp. 2756-2763, Aug. 2016, doi: 10.1049/iet-gtd.2015.1466.
- [13] I. Sepehrirad et al., "gent differential protection scheme for controlled islanding of microgrids based on decision tree technique," *J Control Autom Electr Syst (JCAE)*, vol. 31, no. 5, pp. 1233-1250, Oct. 2020, doi: 10.1007/s40313-020-00588-7.
- [14] J. Zhu, C. D. Booth, G. P. Adam, A. J. Roscoe and C. G. Bright, "Inertia Emulation Control Strategy for VSC-HVDC Transmission Systems," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 2, pp. 1277-1287, May 2013, doi: 10.1109/TPWRS.2012.2213101.
- [15] Q. -C. Zhong, "Power-Electronics-Enabled Autonomous Power Systems: Architecture and Technical Routes," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 7, pp. 5907-5918, July 2017, doi: 10.1109/TIE.2017.2677339.
- [16] Milano, F. Dörfler, G. Hug, D. J. Hill and G. Verbič, "Foundations and Challenges of Low-Inertia Systems (Invited Paper)," *Power Systems Computation Conference (PSCC)*, Dublin, Ireland, 2018, pp. 1-25, doi: 10.23919/PSCC.2018.8450880.
- [17] M. Choopani, S. Hosseinain and B. Vahidi, "A novel comprehensive method to enhance stability of multi-VSG grids," *Int J Electr Power Energy Syst*, vol. 104, pp. 502-514, 2019, doi: 10.1016/j.ijepes.2018.07.027.
- [18] K.M. Cheema, "A comprehensive review of virtual synchronous generator," *Int J Electr Power Energy Syst.*, vol. 120, p. 106006, 2020, doi: 10.1016/j.ijepes.2020.106006.
- [19] M.J. Alinezhad, M. Radmehr, and S. Ranjbar. "Adaptive wide area damping controller for damping inter-area oscillations considering high penetration of wind farms." *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 30, no. 6, 2020, doi: 10.1002/2050-7038.12392.

- [20] S. Katoch,, S.S. Chauhan and V. Kumar, "A review on genetic algorithm: past, present, and future," *Multimed Tools Appl*, vol. 80, pp. 8091–8126, 2021, doi: 10.1007/s11042-020-10139-6.
- [21] J.L. Meriam and L.G. Kraige," Engineering Mechanics: Dynamics," *Blacksburg, Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University*.,July 2012.
- [22] H. Bevrani, "Robust Power System Frequency Control" 2nd ed. Berlin, Germany: Springer; 2014.
- [23] T. Amraee and S. Ranjbar,"Transient instability prediction using decision tree technique," *IEEE Trans Power Syst.*, vol. 28, pp. 3028-3037, February 2013, doi: 10.1109/PESGM.2017.8274126.
- [24] F. Teng, V. Trovato and G. Strbac,"Stochastic scheduling with inertia-dependent fast frequency response requirements," *IEEE Trans Power Syst.*, vol. 31, no. 2, pp.1557-1566 ,June 2016, doi: 10.1109/TPWRS.2015.2434837.
- [25] J. Fang et al., "Distributed power system virtual inertia implemented by grid-connected power converters," *IEEE Transactions on Power Electronics.*, vol 33, no. 10, pp. 8488-8499, December 2017, doi: 10.1109/TPEL.2017.2785218.
- [26] S. D'Arco, J.A. Suul and O.B. Fosso, "A virtual synchronous machine implementation for distributed control of power converters in SmartGrids," *Electr Power Syst Res.*, vol. 122, pp.180-197, May 2015, doi: 10.1016/j.epsr.2015.01.001.
- [27] J. Fang, H. Li, Y. Tang and F. Blaabjerg, "Distributed Power System Virtual Inertia Implemented by Grid-Connected Power Converters," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, no. 10, pp. 8488-8499, Oct. 2018, doi: 10.1109/TPEL.2017.2785218.
- [28] C. Li, J. Xu and C. Zhao, "A Coherency-Based Equivalence Method for MMC Inverters Using Virtual Synchronous Generator Control," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 31, no. 3, pp. 1369-1378, June 2016, doi: 10.1109/TPWRD.2015.2499262.
- [29] J. Rocabert, A. Luna, F. Blaabjerg and P. Rodríguez, "Control of Power Converters in AC Microgrids," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, no. 11, pp. 4734-4749, Nov. 2012, doi: 10.1109/TPEL.2012.2199334.
- [30] M. Lemmon," Comparison of Hardware Tests with SIMULINK Models of UW Microgrid," *Technical Report, University of Notre Dame*, 2010
- [31] S. Roudi et al.,"Virtual generator-based damping controller for microgrids with low inertia resources based on energy storage systems," *International Transactions on Electrical Energy Systems.*, vol. 31, no. 5, p. 12832, May 2021,doi: 10.1002/2050-7038.12832.
- [32] S.P. Kundur and O.P. Malik, *Power System Stability and Control*, 2nd ed. New York: McGraw Hill, 2022.
- [33] Y. Sun,"The impact of voltage-source-converters' control on the power system: the stability analysis of a power electronics dominant grid," *Technical Report., Phd Thesis., Technische Universiteit Eindhoven.*, Dec 2018.
- [34] H. Bevrani, T. Ise and Y. Miura," Virtual synchronous generators: a survey and new perspectives," *Int J Electr Power Energy Syst.*, vol. 54, pp. 244-254, January 2014, doi:10.1016/j.ijepes.2013.07.009.

COPYRIGHTS

©2023 by the authors. Published by the Islamic Azad University Bushehr Branch. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

