Journal of **N**ovel **R**esearches on **S**mart **P**ower **S**ystems - Vol. 14 - No. 1 – Spring 2025
P-ISSN: 2322-2468, E-ISSN: 2981-0272, https://jeps.dezful.iau.ir/

مقاله پژوهشی

Improving Small Signal Microgrid Stability under Virtual Impedance Model–Using Modified Honey Bee Mating Optimization Algorithm

Hamid Shahravi[1], *Ph.D. student*, Javad Olamaei[2], *Professor*, Morteza Kheradmandi[3], *Associate Professor*, Ali Sadr[4], *Associate Professor*
[1]Department of Electrical engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
Hamidrezashahravi200@gmail.com
[2]Department of Electrical engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
J_olamaei@azad.ac.ir
[3]Faculty of Electrical Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
kheradmandi@sbu.ac.ir
[4]School of Electrical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran
Sadr@ust.ac.ir

Abstract:
The aim of this paper is to monitor the performance of distributed generation (DG) units in a microgrid by considering the interfacing converters to ensure efficient power distribution within the microgrid. A microgrid model that integrates virtual impedances with a phase-locked loop (PLL) is introduced, followed by a novel method for small-signal stability analysis of the microgrid. A virtual impedance tuning strategy is developed using the Modified Honey Bee Mating Optimization (MHBMO) algorithm. Simulation was performed using MATLAB/Simulink software, and results demonstrated that the microgrid voltage and frequency remained within acceptable limits, and the microgrid stability index was significantly improved.

Keywords: Small-signal stability; Virtual impedances; Modified Honey Bee Mating Optimization (MHBMO).

Received: 20 Feb. 2025
Revised: 10 May 2025
Accepted: 17 May 2025

*** Corresponding Author:** Dr. Javad Olamaei

Citation: Hamid Shahravi, Javad Olamaei, Morteza Kheradmandi, Ali Sadr, "Improving Small Signal Microgrid Stability under Virtual Impedance Model–Using Modified Honey Bee Mating Optimization Algorithm", Journal of Novel Researches on Smart Power Systems, vol. 14, no. 1, 45-60, June 2025 (in Persian).

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.82362/jeps.2025.1.541]

مقاله پژوهشی

بهبود پایداری سیگنال کوچک ریزشبکه تحت مدل امپدانس مجازی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی جفت‌گیری زنبور عسل اصلاح شده

حمید شهروی [۱]، جواد علمایی[۲]، مرتضی خردمندی[۳]، علی صدر[۴]

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی برق، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- استاد، گروه مهندسی برق، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، J_olamaei@azad.ac.ir

۳- دانشیار، گروه مهندسی برق، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۴- دانشیار، گروه مهندسی برق ، دانشگاه علم و صنعت ایران

چکیده: هدف این مقاله نظارت بر عملکرد منابع تولید پراکنده در ریز شبکه با در نظر گرفتن مبدل‌های واسط برای تضمین توزیع کارآمد توان در یک ریزشبکه است. مدلی از ریزشبکه که امپدانس‌های مجازی را با حلقه قفل فاز یکپارچه می‌کند, معرفی شده است. سپس روش منحصر به‌فردی برای تجزیه و تحلیل پایداری سیگنال کوچک در ریزشبکه ارائه شده است. استراتژی تنظیم امپدانس مجازی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی جفت‌گیری زنبور عسل اصلاح شده (MHBMO) توسعه یافته است. برای شبیه‌سازی از نرم‌افزار MATLAB/Simulink استفاده شد و نتایج نشان داد که ولتاژ و فرکانس ریزشبکه در محدوده قابل قبول باقی می‌مانند و شاخص پایداری ریزشبکه نیز به میزان قابل توجهی افزایش یافته است.

کلمات کلیدی: پایداری سیگنال کوچک, امپدانس‌های مجازی, الگوریتم جفت گیری زنبور عسل اصلاح شده

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۲/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۲/۲۷

* **نام نویسنده مسئول:** دکتر جواد علمایی

نشانی نویسنده مسئول: تهران، بلوار ابوذر، خیابان پیروزی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، دانشکده فنی، گروه مهندسی برق

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.82362/jeps.2025.1.541]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 1- Spring 2025

۱- مقدمه

بخش انرژی به‌دلیل نگرانی‌های مربوط به انتشار گازهای گلخانه‌ای و آینده منابع انرژی، مجبور به پذیرش منابع انرژی تجدیدپذیر شده است [۱, ۲]. ریز شبکه‌ها (MG) در سیستم‌های قدرت مدرن, حیاتی هستند زیرا ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر در شبکه‌های انرژی سنتی را تسهیل می‌کنند [۳, ۴]. با این‌حال، استفاده از ریزشبکه چالش‌های قابل توجهی مانند مدیریت پیچیده و مسائل پایداری، فقدان اینرسی ذاتی، تعداد بیش‌تر ژنراتورها، و تنوع محرک‌های اولیه ایجاد می‌کند [۵, ۶].

پایداری ریزشبکه شامل دو بخش است: یکی پایداری سیگنال کوچک و دیگری پایداری گذرا در مفهوم اختلالات بزرگ است. به‌جز اختلالات بزرگ، قدرت خروجی از توربین‌های بادی، آرایه‌های فتوولتائیک و دیگر منابع تجدیدپذیر متغیر با زمان می‌باشند، که می‌توانند به‌عنوان اختلالات کوچک لحاظ گردند. این نوسانات بسیار رایج هستند به‌طوری‌که موجب وقوع نوسانات فرکانس پایین در ریزشبکه‌ها می‌شوند و به‌صورت پیوسته نحوه کار ریز شبکه‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهند. این مشکل مربوط به میرایی ناکافی نوسان‌های سیستم است و معمولاً با به کارگیری پایدارسازهای سیستم قدرت جهت کنترل تحریک سیستم‌های ژنراتور که اقتصادی‌ترین روش تقویت پایداری است، میرایی این نوسانات را افزایش داد [۷].

تکنیک استفاده از امپدانس مجازی برای اصلاح توزیع ناکامل توان راکتیو (عدم تطابق راکتیو) برای اولین بار در [۸ و ۹] معرفی شد. علاوه بر این، امپدانس‌های مجازی از محدوده‌های مشخص شده انتخاب می‌شوند با در نظرگیری جنبه‌هایی مانند پایداری ریز شبکه تحت شرایط سیگنال کوچک، محدودیت‌های ولتاژ، توزیع توان راکتیو، و میرایی موردنیاز [۱۰]. در [۱۱]، پذیرش مجازی برای کاهش جریان‌های هارمونیک و به حداقل رساندن تلفات انتقال در تولیدات پراکنده کنترل‌شده جریان موازی، چه متصل به شبکه یا بخشی از ریزشبکه باشند، استفاده شده است. امپدانس مجازی قابل تنظیم، همان‌طور که در مرجع [۱۲] توضیح داده شده، برای بهبود توزیع توان اکتیو و راکتیو در ریز شبکه جزیره‌ای شبکه‌ای طراحی شده است. مفهوم امپدانس مجازی پیچیده در مرجع [۱۳] به‌عنوان وسیله‌ای برای تثبیت ولتاژها و تضمین توزیع دقیق توان در ریزشبکه جزیره‌ای معرفی شد. روش امپدانس مجازی که در مرجع [۱۴] پیشنهاد شده، یک تکنیک قوی با هدف افزایش پایداری ریزشبکه، کاهش اعوجاج ولتاژ، و بهبود عملکرد مبدل پس از وقوع خطا است. با این‌حال، وقوع ناپایداری ریزشبکه ناشی از نوسانات بار یا قطع تولیدات پراکنده در ریزشبکه‌ها هم‌چنان مسئله‌ای گسترده است [۲، ۱۵]. پایداری ریزشبکه با انجام ارزیابی پایداری سیگنال کوچک (S-SS) در یک نقطه کاری خاص ارزیابی می‌شود. ضرایب کنترل‌کننده و حلقه قفل فاز (PLL) نقش حیاتی در تعیین پایداری ریزشبکه دارند [۱۶،۱۷]. مطالعه‌ای در [۱۸] برای مقایسه پایداری سیگنال کوچک کنترل‌کننده‌های ولتاژ و جریان در سیستم ریز شبکه انجام شده است. مقاله [۱۹] محدوده‌های پارامتر بهینه برای ریزشبکه را با استفاده از مدل‌سازی سیگنال کوچک برای بهبود پاسخ دینامیکی مبدل‌ها شناسایی می‌کند. تجزیه و تحلیل پایداری در دو مرحله اخیر انجام می شود. پیاده‌سازی رویه‌های بازپیکربندی ریزشبکه به‌طور قابل توجهی حاشیه‌های پایداری را بهبود بخشیده است. در مطالعه‌ای که در [۲۰] انجام شد، ریزشبکه جزیره دونگائو بررسی شد. تجزیه و تحلیل بر کنترل فرکانس ریزشبکه متمرکز بود که به سه مرحله متمایز تقسیم شد: پایدار، احتیاطی، و اضطراری. علاوه بر این، یک مدل سیگنال کوچک در مرجع [۲۱] برای ساختار کنترل دو لایه سیستم ریزشبکه ارائه شد. الگوریتم بهینه‌سازی جفت‌گیری زنبور عسل (HBMO) به‌عنوان یکی از الگوریتم‌های فراابتکاری جدید، بر اساس رفتار جفت‌گیری زنبورهای عسل طراحی شده است [۲۲]. این الگوریتم قابلیت‌های جستجوی مؤثری در فضای حل دارد و در مسائل بهینه‌سازی چندمتغیره عملکرد خوبی نشان می‌دهد [۲۳]. الگوریتم‌های بهینه‌سازی اصلاح شده اخیراً توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. نسخه اصلاح شده الگوریتم جفت‌گیری زنبور عسل (MHBMO) با بهبود مکانیزم‌های جستجوی محلی و سراسری، عملکرد بهتری نسبت به نسخه کلاسیک نشان می‌دهد [۲۴]. این الگوریتم قابلیت همگرایی سریع‌تر و اجتناب از بهینه‌های محلی را دارد [۲۵].

مطالعه حاضر یک تکنیک دینامیکی جامع سیگنال کوچک برای ریزشبکه جزیره‌ای ارائه می‌دهد که شامل امپدانس‌های مجازی و حلقه قفل فاز است. متعاقباً، ارزیابی پایداری سیگنال کوچک با استفاده از مدل دینامیکی ریز شبکه انجام می‌شود. الگوریتم پیشنهادی رویکرد جدیدی برای بهینه‌سازی پیکربندی امپدانس مجازی در مبدل‌های ریزشبکه معرفی می‌کند. هدف اصلی آن افزایش شاخص پایداری سیستم ریزشبکه و هم‌زمان کاهش عدم تعادل در توان راکتیو است. این تکنیک بهینه‌سازی پایداری ریزشبکه را در تمام نقاط عملیاتی ممکن ارزیابی می‌کند. تابع هدف بیان شده، امکان دست‌یابی هم‌زمان به اهداف مختلف را فراهم می‌کند. این مطالعه از یک مدل دینامیکی پیشرفته ریزشبکه استفاده می‌کند این مدل بر اساس تحقیقات قبلی انجام شده در مراجع [۱۸, ۲۶] استوار است. در مقاله [۳۷] برای مقابله با چالش سطح نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر در برابر عدم قطعیت‌ها و به‌منظور توسعه حلقه کنترل فرکانس‌بار ثانویه،

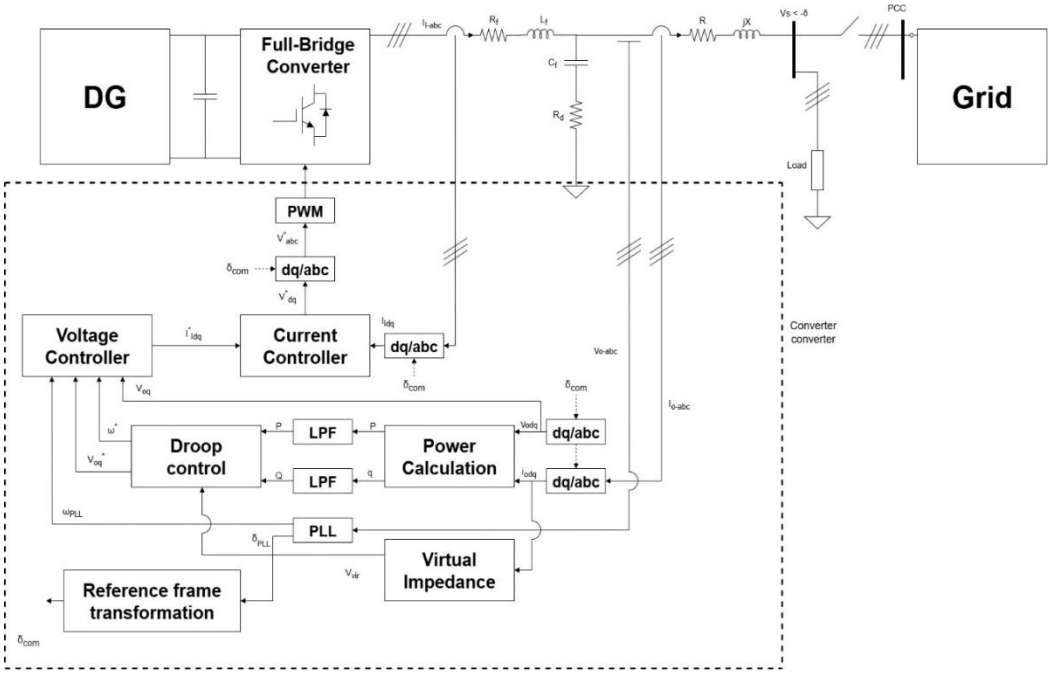
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.82362/jeps.2025.1.541]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 1- Spring 2025

با هدف کاهش تأثیر اغتشاشات و تنظیم ضریب بهره مقاوم نسبت به عدم‌قطعیت‌ها، با استفاده از یک کنترل‌کننده اینرسی مجازی مبتنی بر کنترل مقاوم روش سنتزمیو، جهت کمبود اینرسی در خوشه‌های ریزشبکه جزیره‌ای جریان متناوب انجام شده‌است. نتایج نشان از عملکرد کنترل‌کننده پیشنهادی را برای توسعه کنترل فرکانس بار سنتی در مقایسه با کنترل اینرسی مجازی ارتقاءیافته و حالت بدون اینرسی، تحت اغتشاشات مختلف تأیید می‌کند که به کارگیری کنترل‌کننده اینرسی مجازی مبتنی بر سنتزمیو، باعث بهبود پایداری خوشه‌های ریزشبکه جزیره‌ای و میرایی نوسانات توان می‌شود و هم‌چنین انحرافات فرکانسی را به میزان قابل توجهی، کاهش می‌دهد. در [۳۸] یک سیستم حفاظتی جدید مبتنی بر محدودکننده جریان خطای مقاومتی با قابلیت سوئیچینگ برای محافظت از توربین‌های بادی مبتنی بر ژنراتور القایی از دو سو تغذیه و توربین بادی مبتنی بر ژنراتور سنکرون در حین خطاهای سمت شبکه معرفی کرده است. محدود کننده پیشنهادی در سمت DC مبدل سمت روتور استفاده می شود. محدودکننده‌ی پیشنهادی هیچ تأثیر قابل توجهی بر عملکرد کلی شبکه در حین عملکرد نرمال ندارد. هر زمان که خطا، خواه متقارن یا نامتقارن، رخ دهد، نه تنها جریان اضافی روتور را محدود می‌کند، بلکه از شتاب سرعت روتور جلوگیری می‌کند و نوسانات گشتاور بال را حتی در هنگام ولتاژ شبکه صفر محدود می‌کند. ساختار مقاله به شرح زیر است: در بخش ۲، مدل‌سازی ریزشبکه شامل مدل مفهومی، امپدانس مجازی، و تحلیل پایداری سیگنال کوچک ارائه می‌شود. بخش ۳ به طراحی امپدانس مجازی با استفاده از الگوریتم MHBMO و ارائه نتایج عددی اختصاص دارد. در نهایت، بخش ۴ به ارائه نتیجه‌گیری می‌پردازد.

۲- مدل‌سازی‌های ریزشبکه

متدولوژی مبتنی بر مدل‌سازی مفهومی ریز شبکه، انجام تحلیل پایداری و هم‌چنین طراحی امپدانس مجازی است و هدف آن بررسی تعامل اجزای مختلف ریزشبکه و تأثیر امپدانس مجازی بر عملکرد پایدار سیستم می‌باشد.



شکل (۱): ساختار شماتیک و بلوک کنترلی پیشنهادی برای ریزشبکه جزیره‌ای

Figure (1): Proposed schematic and control block structure for islanded microgrid

۲-۱- مدل‌سازی مفهومی ریزشبکه و تحلیل پایداری

در ساختارهای ریزشبکه جزیره‌ای، اتصال منابع تولید پراکنده معمولاً توسط مبدل‌های قدرت صورت می‌گیرد که می‌تواند مبدل منبع ولتاژ یا مبدل منبع جریان باشد. مبدل‌های اغلب در حالت‌های تشکیل‌دهنده شبکه به‌کار رفته تا ریز شبکه را با کنترل دقیق پارامترهای ولتاژ و فرکانس تشکیل دهند. این امر امکان تأثیرگذاری بر دینامیک عملیاتی ریزشبکه جزیره‌ای را فراهم می‌آورد. پایداری در یک ریزشبکه به توانایی سیستم برای بازیابی و حفظ مقادیر پایدار در محدوده‌های عملیاتی پس از تجربه هر نوع اختلالی اشاره دارد،

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.1.541]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 1- Spring 2025

همان‌طور که در [۲۷] گزارش شده است. حلقه قفل فاز در این پیکربندی برای تعیین فرکانس یا هم‌راستا کردن یک مبدل با ریزشبکه بسیار مهم است. شکل (۱) ساختار ارائه شده و ساختار بلوک کنترل برای ریزشبکه جزیره‌ای را نشان می‌دهد. ریزشبکه با استفاده از یک سیستم مرجع منسجم کار می‌کند که نیازمند تبدیل بین چهارچوب‌های مرجع محلی و جهانی است. در این مطالعه، اندیس‌های 'dq'به مقادیری که مخصوص یک محیط محلی هستند اشاره دارند، در حالی‌که اندیس‌های 'DQ' مقادیر در یک محیط جهانی را نشان می‌دهند. متغیرهای جهانی حیاتی شامل ولتاژهای شین (v_{bD},v_{bQ}) می‌شود که در ایجاد معادلات دینامیکی برای تعاملات خط و بار اساسی هستند. دینامیک‌های مختص مبدل، همان‌طور که در معادله (۱) شرح داده شده، نیازمند ولتاژهای شین (v_{bd},v_{bq}) است. به‌طور مشابه، جریان‌های خروجی تولید شده توسط مبدل‌ها (i_{od} , i_{oq}) باید به چهارچوب جهانی (i_{oD},i_{oQ}) تبدیل شوند تا جریان‌های تحویل شده به ریزشبکه را به‌طور دقیق نمایش دهند. علاوه براین، زاویه **δcm** تفاوت فاز بین محور D جهانی و محور d محلی یک مبدل را نشان می‌دهد.

$$\begin{cases}\begin{bmatrix} i_{oD} \\ i_{oQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\delta_{cm}) & -\sin(\delta_{cm}) \\ \sin(\delta_{cm}) & \cos(\delta_{cm}) \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} i_{od} \\ i_{oq} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} v_{bd} \\ v_{bq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\delta_{cm}) & \sin(\delta_{cm}) \\ -\sin(\delta_{cm}) & \cos(\delta_{cm}) \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} v_{bD} \\ v_{bQ} \end{bmatrix}\end{cases} \quad (۱)$$

بخش‌های بعدی معادلات دینامیکی که اساس طرح‌های کنترل نشان داده شده در شکل (۱) را تشکیل می‌دهند، تشریح می‌کنند.

۲-۱-۱- محاسبه توان

محاسبه توان‌های اکتیو و راکتیو (p,q) از تحلیل مؤلفه‌های خروجی dq ولتاژها و جریان‌های مبدل به‌دست می‌آید. متعاقباً، این مقادیر از طریق یک فیلتر پایین‌گذر (LPF) با فرکانس قطع مشخص (ωc) پردازش می‌شوند. این رویه دو معادله دینامیکی تولید می‌کند که برای تحلیل S-SS ریز شبکه حیاتی هستند. شکل (۱) ترتیب و حرکت ورودی‌ها و خروجی‌ها از طریق فیلتر پایین‌گذر و محاسبات توان را مشخص می‌کند.

$$\begin{cases} P = p \times \dfrac{\omega_c}{\omega_c + s}; \quad p = \dfrac{3 \times (v_{oq} \cdot i_{oq} + v_{od} \cdot i_{od})}{2} \\ Q = q \times \dfrac{\omega_c}{\omega_c + s}; \quad q = \dfrac{3 \times (v_{oq} \cdot i_{od} - v_{od} \cdot i_{oq})}{2} \end{cases} \quad (۲)$$

۲-۱-۲- معادلات امپدانس مجازی

معادله (۳) نحوه گنجاندن امپدانس مجازی در حلقه‌های کنترل ولتاژ برای تولید افت‌های ولتاژ را توصیف می‌کند. متغیرهای (V_{vd})، (X_{vi}) و (R_{vi}) به‌ترتیب نمایانگر افت ولتاژ مجازی، راکتانس و مقاومت هستند. روش کنترل تضمین می‌کند که مؤلفه ولتاژ در راستای محور d در صفر باقی می‌ماند. بخش بعدی فرآیند بهینه‌سازی که مقادیر مناسب این امپدانس‌های مجازی را تعیین می‌کند، تشریح خواهد شد. معادله (۳) هم‌چنین تأثیر تغییرات جزئی در هر نقطه عملیاتی مشخص بر افت‌های ولتاژ در امپدانس‌های مختلف را نشان می‌دهد.

$$\begin{cases} V_{vd} = (X_{vi} . i_{od} + R_{vi} . i_{oq}) \\ \Delta V_{vd} = (X_{vi} . \Delta i_{oq} + R_{vi} . \Delta i_{oq}) \end{cases} \quad (۳)$$

۲-۱-۳-کنترل ولتاژ و فرکانس

کنترل افت در شکل (۱) نشان داده شده است. در این روش کنترل، مدیریت فرکانس (ω*) و (Voq*) ولتاژ محور q با استفاده از معادلات استاندارد انجام می‌شود، در حالی‌که ولتاژ محور d=0 است. ضرایب (m) و (n) به‌ترتیب ضرایب افت برای توان فعال و راکتیو را منعکس می‌کنند. محاسبه افت ولتاژ مجازی (Vvd) ناشی از امپدانس مجازی توسط معادله (۴) تعیین می‌شود. هنگامی که تنظیمات توان فعال/راکتیو روی صفر قرار می‌گیرند، انحرافاتی از مقادیر اسمی ولتاژ و فرکانس (ω_n,V_{oqn}) وجود دارد. با این وجود، ضروری است که سطوح توان تعیین شده (P_0,Q_0) در معادلات افت گنجانده شوند تا تنظیم دقیق توان حاصل شود.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.1.541]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 1- Spring 2025

$$\begin{cases} \omega^* = \omega_n - (P - P_0)m; \quad \Delta\omega^* = -\Delta P \cdot m \\ V_{oq}^* = V_{oqn} - V_{vd} - (Q - Q_0).n; \quad \Delta V_{oq}^* = -\Delta Q \cdot n - \Delta V_{vd} \end{cases} \quad (۴)$$

۲-۱-۴ -کنترل‌کننده ولتاژ

تکنیک کنترل ولتاژ از معادلات (۵) از ادبیات مرجع [۲۶] استفاده می‌کند که در زیر برای بهبود درک دینامیک سیستم ارائه شده است. هر مبدل به‌طور مستقل نقطه تنظیم فرکانس خود (ω*) را در طول زمان تعدیل می‌کند. کنترل‌کننده ولتاژ دارای یک کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی (PI) است که توسط ضرایب تناسبی (k_{pv}) و انتگرالی (k_{iv}) آن تعریف می‌شود. برای تسهیل مدل‌سازی دینامیکی سیستم، متغیرهای کمکی (ϕ_d) و (ϕ_q) معرفی شده‌اند. فرکانس ریزشبکه، که با (ω_{PLL}) نشان داده می‌شود، با استفاده از یک سیستم حلقه قفل فاز تعیین می‌شود. نقاط تنظیم فرکانس مطلوب (ω*) و (Voq*) از معادلات کنترل افت به‌دست می‌آیند. مشتقات مرتبه اول (ϕ_d) و (ϕ_q) در بررسی S-SS ریز شبکه حیاتی هستند. علاوه براین، خروجی‌های این بلوک شامل dq دستورات جریان (I_{ldq}*) است، همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است.

$$\begin{cases} \dot{\phi}_d = \omega_{PLL} - \omega^*; \quad i_{ld}^* = (\dot{\phi}_d \cdot k_{pv}) + (\phi_d \cdot k_{iv}) \\ \dot{\phi}_q = V_{oq}^* - v_{oq}; \quad i_{lq}^* = (\dot{\phi}_q \cdot k_{pv}) + (\phi_q \cdot k_{iv}) \end{cases} \quad (۵)$$

۲-۱-۵- کنترل‌کننده جریان

کنترل‌کننده از معادله (۶) برای ایجاد دستورات ولتاژ برای مبدل‌ها با استفاده از چهارچوب مرجع dq استفاده می‌کند. ضرایب (k_{pc}) و (k_{ic}) کنترل‌کننده PI پاسخ دینامیکی کنترل‌کننده جریان را تعیین می‌کنند. علاوه براین، (ω_n) نماد مورد استفاده برای نمایش فرکانس اسمی ریزشبکه است، در حالی‌که (L_f) نماد مورداستفاده برای نمایش اندوکتانس فیلتر است. مدل‌سازی دینامیکی ریزشبکه با گنجاندن متغیرهای کمکی (γ_d) و (γ_q) بهبود می‌یابد. خروجی کنترل‌کننده فعلی شامل دستورات ولتاژ (v^*_{id}) و (v^*_{iq}) است، با فرض تطابق مستقیم با ولتاژهای تولید شده توسط مبدل‌ها.

$$\begin{cases} \dot{\gamma}_d = i_{ld}^* - i_{ld}; \quad v_{id}^* = (\dot{\gamma}_d \cdot k_{pc}) + (\gamma_d \cdot k_{ic}) - (L_f \cdot \omega_n \cdot i_{lq}) \\ \dot{\gamma}_q = i_{lq}^* - i_{lq}; \quad v_{iq}^* = (\dot{\gamma}_q \cdot k_{pc}) + (\gamma_q \cdot k_{ic}) + (L_f \cdot \omega_n \cdot i_{ld}) \end{cases} \quad (۶)$$

۲-۱-۶- مدل حلقه قفل فاز

مدلPLL ، با پیروی از دستورالعمل‌های ارائه شده در [۲۶]، در چهارچوب dq عمل می‌کند تا تضمین کند که ولتاژ محور d در شرایط پایدار صفر شود و در نتیجه محور q با محور Q همگام‌سازی شود. پیکربندی حلقه قفل فاز شامل یک فیلتر پایین‌گذر تحت فرکانس قطع ($\omega_{c,PLL}$) و یک کنترل‌کننده PI تحت ($k_{p,PLL}$) و ($k_{i,PLL}$) است. تحلیل پایداری از فرکانس اسمی (f_n) همان‌طورکه در معادله (۷) مشخص شده است، استفاده می‌کند. این مدل نقش حیاتی در تضمین تراز ولتاژ و همگام‌سازی فاز در درون ریزشبکه ایفا می‌کند.

$$\begin{cases} v_{odf} = \dfrac{v_{od} \times \omega_{c,PLL}}{\omega_{c,PLL} + s} \;\&\; \dot{v}_{odf} = (v_{od} \cdot \omega_{c,PLL}) - (v_{odf} \cdot \omega_{c,PLL}) \\ \Delta\dot{v}_{odf} = (\Delta v_{od} \cdot \omega_{c,PLL}) - (\Delta v_{odf} \cdot \omega_{c,PLL}) \\ \dot{\delta} = \omega_{PLL} \;\&\; \Delta\dot{\delta} = \Delta\omega_{PLL} \\ \omega_{PLL} = (\phi_{PLL} \cdot k_{i,PLL}) + (f_n \cdot 2\pi) - (v_{odf} \cdot k_{p,PLL}) \\ \Delta\omega_{PLL} = (\Delta\phi_{PLL} \cdot k_{i,PLL}) - (\Delta v_{odf} \cdot k_{p,PLL}) \end{cases} \quad (۷)$$

۲-۱-۷- مدل بارگذاری

این کار از قوانین کیرشهف در چهارچوب DQ برای تولید معادلات دینامیکی بار برای مدل بار امپدانسی استفاده می‌کند. اجزای بار RL توسط مقاومت (R_{load}) و اندوکتانس (L_{load}) نمایش داده می‌شوند. فرکانس اندازه‌گیری شده ریزشبکه با (ω_{PLL}) نشان داده می‌شود. مدل ولتاژهای شین را به‌عنوان توابع ریاضی جریان‌های مختلف و متغیرهای حالت سیستم نمایش می‌دهد. از مفهوم مقاومت مجازی برای تسهیل فرآیند استخراج ماتریس‌های فضای حالت استفاده می‌کند. این مدل بر تعاملات دینامیکی بین ولتاژهای شین و بار تأثیر می‌گذارد که به نوبه خود بر پایداری کلی ریزشبکه تأثیر می‌گذارد.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.82362/jeps.2025.1.541]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 1- Spring 2025

$$\begin{cases} \dot{i}_{load,D} = (i_{load,Q} \cdot \omega_{PLL}) + \dfrac{v_{bD} - i_{load,D} \cdot R_{load}}{L_{load}} \\ \dot{i}_{load,Q} = -(i_{load,D} \cdot \omega_{PLL}) + \dfrac{v_{bQ} - i_{load,Q} \cdot R_{load}}{L_{load}} \\ v_{bD,1} = (-i_{load,D1} + i_{oD,1} \pm i_{line,D,1}) \times r_N \\ v_{bQ,1} = (-i_{load,Q1} + i_{oQ,1} \pm i_{line,Q,1}) \times r_N \end{cases} \quad (۸)$$

۲-۱-۸- مدل خط

مدل خط ترتیب استاندارد یک خط مقاومتی-سلفی (RL) بین دو شین مجاور را بررسی می‌کند. به‌دلیل استفاده گسترده از چهارچوب مرجع مشترک در تمام شین‌های ریزشبکه، ولتاژهایی که با یکدیگر مطابقت دارند در معادله‌بندی معادلات دینامیکی خط استفاده می‌شوند. مشخصات خط توسط مقاومت (r_{ln}) و اندوکتانس (L_{ln}) تعیین می‌شوند و این محاسبات به فرکانس انتگرالی (ω_{PLL}) ریزشبکه بستگی دارند. جهت مشخص شده جریان‌های خط برای شبیه‌سازی دقیق تعاملات ولتاژ بین شین‌های متصل حیاتی است.

$$\begin{cases} \dot{i}_{ln,D} = (i_{ln,Q} \cdot \omega_{PLL}) - \dfrac{i_{ln,D} \cdot r_{ln}}{L_{ln}} + \dfrac{v_{b_{D,i}} - v_{b_{D,j}}}{L_{ln}} \\ \dot{i}_{ln,Q} = -(i_{ln,D} \cdot \omega_{PLL}) - \dfrac{i_{ln,Q} \cdot r_{ln}}{L_{ln}} + \dfrac{v_{b_{Q,i}} - v_{b_{Q,j}}}{L_{ln}} \end{cases} \quad (۹)$$

۲-۱-۹- پایداری سیگنال کوچک

متغیرهای حالت برای یک ریزشبکه دو نودی معمولی با ادغام معادله‌های دینامیکی جامع از PLL، کنترل‌کننده‌های جریان/ولتاژ، مدل بار، فیلتر پایین‌گذر و رابط‌های خط تعریف می‌شوند. متغیرهای ذکر شده به‌عنوان پایه برای معادلات S-SS استفاده می‌شوند. این معادلات حول یک نقطه عملیاتی از پیش تعریف شده خطی‌سازی می‌شوند تا تحلیل ساده‌تر شود. ماتریس A حاصل برای یک ریزشبکه دو شینه، ماتریسی ۳۶×۳۶ است. فرآیند استخراج ماتریس A و انجام تحلیل S-SS برای پیکربندی‌های بزرگ‌تر ریزشبکه مشابه باقی می‌ماند. خطی‌سازی حول نقاط عملیاتی مختلف امکان ارزیابی جامع پایداری در چندین پیکربندی احتمالی ریزشبکه را فراهم می‌کند و مطالعه و طراحی دقیق عملیات را تضمین می‌کند [۲۶, ۱۳].

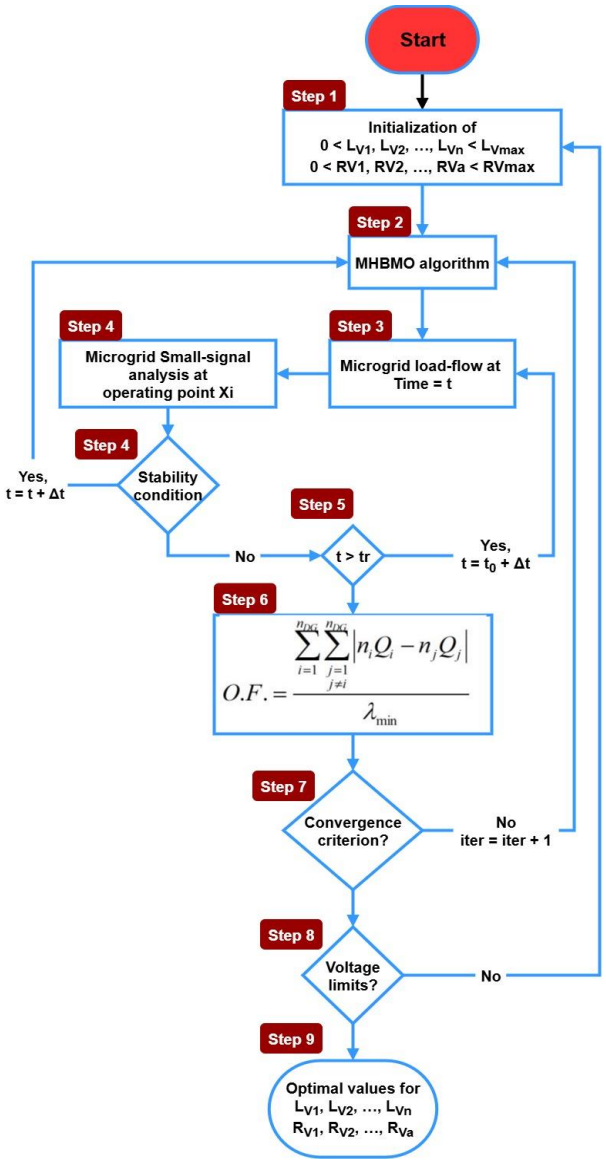
$$\begin{cases} \Delta\dot{x} = A \cdot \Delta x \\ x = \begin{bmatrix} \delta_1, P_1, Q_1, \phi_{d,1}, \phi_{q,1}, i_{ld,1}, i_{lq,1}, \gamma_{d,1}, \gamma_{q,1}, v_{od,1}, v_{oq,1}, \\ i_{od,1}, i_{oq,1}, v_{od,f,1}, \phi_{PLL,1}, \delta_2, P_2, Q_2, \phi_{d,2}, \phi_{q,2}, i_{ld,2}, \\ i_{lq,2}, \gamma_{d,2}, \gamma_{q,2}, v_{od,2}, v_{oq,2}, i_{od,2}, i_{oq,2}, v_{od,f,2}, \phi_{PLL,2}, \\ i_{ln,d}, i_{ln,q}, i_{load,d,1}, i_{load,q,1}, i_{load,d,2}, i_{load,q,2} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (۱۰)$$

۲-۲- طراحی امپدانس مجازی

فرآیند ایجاد امپدانس‌های مجازی در الگوریتم کاملی توصیف می‌شود که در شکل (۲) مشخص شده است. این رویکرد به‌صورت آفلاین پیاده‌سازی می‌شود و امکان گنجاندن امپدانس‌های مجازی طراحی شده با دقت در سیستم‌های کنترل مبدل پس از فاز طراحی اولیه را فراهم می‌کند. این فرآیند با تخصیص نقاط تنظیم ولتاژ آغاز می‌شود، سپس محدوده مثبت برای مقادیر مقاومت و اندوکتانس مجازی تعیین می‌شود. با ارجاع به [۳۶]، روش رایج این است که مقاومت مجازی روی۰/۲ برابر راکتانس تنظیم شود. این روش تضمین می‌کند که فواصل برای بهینه‌سازی کارآمد تابع مساوی شوند. حدود بالای این مقادیر بر اساس مهم‌ترین تفاوت‌های امپدانسی که کشف شده‌اند، تعیین می‌شوند. مراحل متوالی مربوط به فرآیند طراحی امپدانس مجازی در شکل (۲) آمده است. الگوریتم بهینه‌سازی زنبور عسل اصلاح‌شده MHBMO در مسائل بهینه‌سازی به‌دلیل قابلیت اطمینان و کارایی آن در حل مسائل بهینه‌سازی پیچیده استفاده می‌شود [۲۸،۲۹]. الگوریتم MHBMO به‌دلیل ویژگی‌های همگرایی مطلوب، سهولت تنظیم پارامترها و دقت بالا انتخاب می‌شود [۳۰]. این الگوریتم بر اساس رفتار اجتماعی زنبورهای عسل و استراتژی‌های جستجوی آن‌ها برای یافتن بهترین منابع غذا طراحی شده است. در

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.1.541]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 1- Spring 2025

MHBMO، زنبورهای کارگر، زنبورهای تماشاچی و زنبورهای پیشاهنگ برای اکتشاف فضای جستجو و یافتن راه‌حل بهینه با یکدیگر همکاری می‌کنند [۳۱].



شکل (۲): فلوچارت بهینه‌سازی برای طراحی امپدانس مجازی مبدل‌ها در میکروگرید جزیره‌ای

Figure (2): Optimization flowchart for designing virtual impedance of inverters in an islanded microgrid

۲-۳- مراحل متوالی مربوط به فرآیند طراحی امپدانس مجازی عبارتند از [۳۲،۳۳]:

۱. مقداردهی اولیه

مقادیر اولیه برای مقاومت‌های مجازی (R_v1, ..., R_vn) و اندوکتانس‌های مجازی (L_v1, ..., L_vn) در محدوده پایدار و قابل قبول تنظیم می‌شوند.

۲. اجرای الگوریتم MHBMO

الگوریتم MHBMO با تعریف اندازه جمعیت، تعداد تکرارها و سایر پارامترها آغاز می‌شود. موقعیت‌های اولیه زنبورهای کارگر به‌صورت تصادفی در فضای جستجو تولید می‌شوند.

۳. تحلیل پخش بار

از MATLAB برای انجام تحلیل پخش بار طی یک دوره زمانی مشخص، با در نظر گیری نوسانات بار در مکان‌های مختلف شین استفاده می‌شود.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.1.541]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 1- Spring 2025

۴. انجام تحلیل پایداری

با بررسی S-SS در تمام نقاط عملیاتی، تأثیر امپدانس‌های مجازی بررسی می‌شود. شاخص پایداری بر اساس اندازه جزء حقیقی حساس‌ترین مقدار ویژه تعیین می‌شود.

۵. ذخیره راه‌حل‌ها

پس از برآوردن شرایط پایداری، شاخص پایداری و راه‌حل‌های بهینه‌سازی ذخیره می‌شوند.

۶. ادامه شبیه‌سازی

شبیه‌سازی تا زمان پایان تعیین‌شده (t_f) ادامه می‌یابد.

۷. معیار همگرایی

توقف بر اساس تعداد تکرارها انجام می‌شود. تابع هدف شامل عدم تطابق توان راکتیو و شاخص پایداری است.

۸. بررسی محدودیت‌های ولتاژ

تأیید می‌شود که تمام ولتاژهای شین در محدوده مجاز باقی بمانند.

۹. تولید مقادیر بهینه

مقادیر بهینه امپدانس مجازی برای پیاده‌سازی در سیستم کنترل مبدل تعیین می‌شوند.

۳- نتایج عددی

ریزشبکه ۲ شینه که در مرجع [۳۴] معرفی شده، در MATLAB پیاده‌سازی شده است.

۳-۱- ریزشبکه ۲ شینه

ریزشبکه آزمایشی ۲ شینه نشان داده شده در شکل (۳) که در مرجع [۳۴] مورد مطالعه قرار گرفته بود، به‌عنوان اولین شبکه آزمایش پیاده‌سازی شده است. جدول (۱) مشخصات کاملی از کنترلرها و ریزشبکه ۲ شینه مورد مطالعه [۳۴] را نشان می‌دهد. الگوریتم طراحی امپدانس مجازی پیشنهادی برای به‌دست آوردن مقاومت‌ها و اندوکتانس‌های مجازی بهینه در این ریزشبکه اعمال شد. امپدانس‌های مجازی متناظر در جدول (۱) ارائه شده‌اند. پس از آن، در زمان t=2، $R_{pert1}+jX_{pert1}$ به ریزشبکه متصل شده و به‌صورت موازی با $R_{Load1}+jX_{Load1}$ در شین ۱ قرار می‌گیرد. بار محلی شین ۲ $R_{Load2}+jX_{Load2}$ در طول سناریو است. در ادامه، ویژگی‌های مختلف ریزشبکه پس سناریوی تغییر بار بررسی خواهد شد.

جدول (۱): پارامترهای مبدل‌ها و کنترل‌کننده‌ها در ریزشبکه ۲ شینه

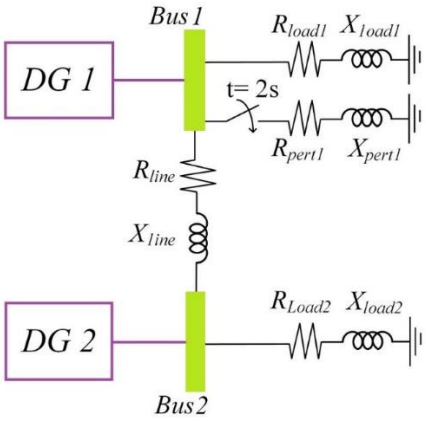
Table (1):Inverter and controller parameters in 2-bus microgrid

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
Lf	4.2 mH	rf	0.50 Ω
Lc	0.5 mH	rc	0.09 Ω
Cf	15 μF	Rd	2.025 Ω
ωc	50.26 rad/s	ωn	377 rad/s
ωc_PLL	7854 rad/s	ωn_PLL	377 rad/s
m	0.001 rad/Ws	q0n	0.001 V/Var
rN	1K Ω	V0qn	85.0 V
Rload1	25 Ω	Lload1	15 mH
Rload2	25 Ω	Lload2	7.5 mH
Rpert1	25 Ω	Lpert1	7.5 mH
Rline	0.155 Ω	Lline	1.5 mH
VbD1	0.606 V	VbQ1	84.16 V
VbD2	0.6394 V	VbQ2	84.529 V
kppll	0.25	kipll	1
kpv	0.5	kiv	25
kpc	2	kic	100
Rv1	0.01120	Lv1	0.01865
Rv2	0.00773	Lv2	0.01754
P0	0	Q0	0

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

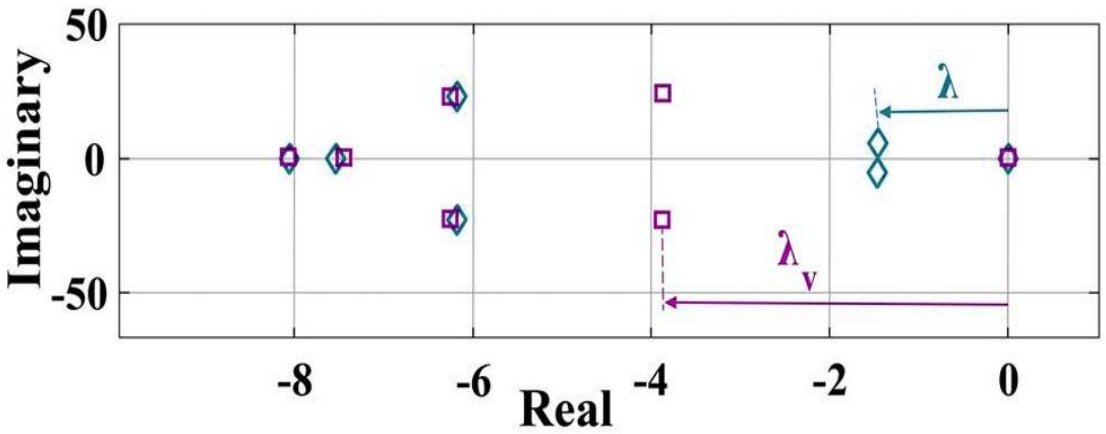
[DOI: 10.82362/jeps.2025.1.541]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 1- Spring 2025

۳-۱-۱- شاخص پایداری ریز شبکه



شکل(۳): ریزشبکه آزمایشی ۲ شینه
Figure (3): Test 2-bus microgrid

شاخص پایداری ریزشبکه به‌عنوان قدر مطلق بخش حقیقی بدترین مقدار ویژه تعریف می‌شود که بیش‌ترین تمایل به ناپایداری را دارد. نصب امپدانس مجازی می‌تواند این مود را کاهش دهد و قدر مطلق بخش حقیقی شاخص پایداری متناظر را حداکثرکند. شکل (۴) مقادیر ویژه اصلی ریزشبکه مطالعه شده را در دو سناریوی جداگانه مقایسه می‌کند. شاخص پایداری ریزشبکه در مطالعه قبلی [۳۴] که با λ نشان داده شده؛ و شاخص پایداری ریزشبکه متناظر با اعمال چارچوب کنترلی پیشنهادی که با λ_v نشان داده شده، در شکل (۴) مشاهده می‌شود. شاخص پایداری ریزشبکه با به‌کارگیری امپدانس مجازی طراحی شده از ۱/۴۱ به ۳/۸۵ افزایش می‌یابد. به‌عبارت دیگر، اعمال امپدانس مجازی بهینه در چارچوب کنترلی پیشنهادی، ریزشبکه را پایدارتر می‌کند. مقادیر ویژه ریزشبکه در جدول (۲) فهرست شده‌اند. مقادیر ویژه ریزشبکه در ستون دوم فهرست شده و نسبت‌های میرایی در ستون سوم نوشته شده‌اند. همان‌طور که در ستون سوم مشاهده می‌شود، تمام مودها میرا و پایدار هستند. با این‌حال، برخی مودها به‌خوبی میرا شده‌اند (مانند مود ۱،۲) و نسبت‌های میرایی بزرگ‌تری دارند (100%=ζ). نسبت میرایی متناظر با شاخص پایداری ریزشبکه ٪۱۵/۸۱ است. از آنجا که ریزشبکه یک مقدار ویژه در نقطه صفر و سایر مقادیر ویژه دارای بخش حقیقی منفی دارد، ریزشبکه به‌صورت مجانبی پایدار است [۳۵].



شکل (۴): مقادیر ویژه اصلی ریزشبکه ۲ شینه در دو سناریو، اعمال روش کنترلی پیشنهادی (مربع‌های بنفش) و روش [۳۴] (لوزی‌های سبز)
Figure (4): Main eigenvalues of 2-bus microgrid under two scenarios: proposed control method (purple squares) vs. method [34] (green diamonds)

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.1.541]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 1- Spring 2025

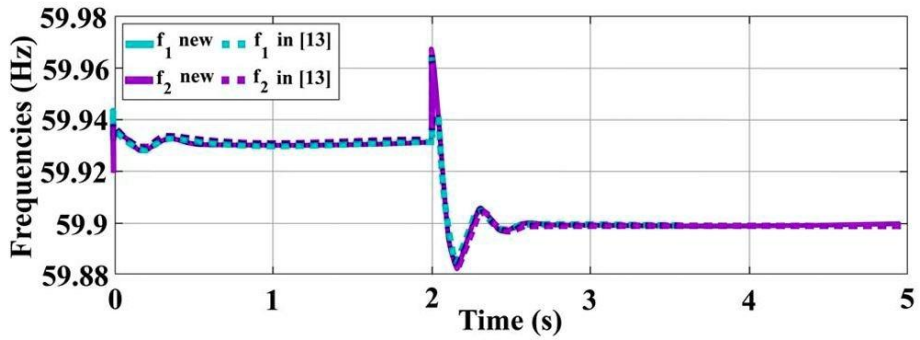
جدول (۱): مقادیر ویژه ریزشبکه ۲ شینه

Table (1): Inverter and controller parameters in 2-bus microgrid

Damping ratio (ζ %)	Eigenvalues (Real ± j.Imag)	Index
100	-7071712.453 ± j 376.57	1,2
100	-2073878.819 ± j 376.527	3,4
17.612	-1916.450 ± j 107676.012	5,6
15.882	-1641.904 ± j 10268.519	7,8
100	-7936.309	9,10
15.423	-835.148 ± j 5382.051	11,12
15.321	-714.058 ± j 4671.226	13,14
99.13	-2886.476 ± j 3848.441	15,16
99.66	-1483.247 ± j 376.412	17,18
96.11	-568.246 ± j 164.413	19,20
97.73	-107.016 ± j 263.368	21,22
100	-80.716	23
64.046	-26.006 ± j 31.304	24,25
15.91	-3.856 ± j 23.736	26,27
26.241	-6.104 ± j 22.999	28,29
100	-5.962	30
100	-4.880	31
100	-50.001 ± j 0.022	32,33
100	-50.001 ± j 0.022	34,35
∞	0	36

۳-۱-۲- تحلیل فرکانس ریز شبکه

فرکانس ریزشبکه توسط PLLهای نصب شده بر روی شین‌ها اندازه‌گیری می‌شود LL های اعمال شده از کنترلرهای PI در حلقه‌های کنترلی استفاده می‌کنند و پارامترهای PLL ها در جدول (۲) ذکر شده‌اند. پس از تغییر بار در زمان t=2 ثانیه، فرکانس بر اساس مشخصه توان اکتیو کاهش می‌یابد. شکل (۵) فرکانس ریزشبکه را پس از سناریوهای تغییر بار، با استفاده از استراتژی کنترلی جدید و اعمال روش قبلی در [۳۴] نشان می‌دهد. نرخ تغییر فرکانس (ROCOF) و نقطه حداقل (Nadir) با اعمال استراتژی قبلی و روش کنترلی جدید تقریباً یکسان هستند، اگرچه مقدار Nadir برای استراتژی جدید کمی کم‌تر از روش قبلی است.



شکل (۵): مقایسه فرکانس‌های ریزشبکه ۲ شینه با اعمال استراتژی کنترلی پیشنهادی (خطوط پیوسته) و روش [۳۴] (خطوط منقطع)

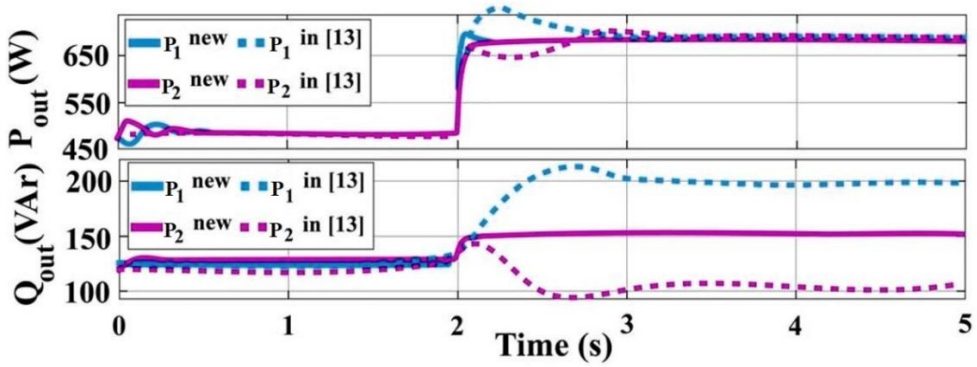
Figure (5): Comparison of 2-bus microgrid frequencies using the proposed control strategy (solid lines) vs. method ([34] (dashed lines)

۳-۱-۳- توان‌های خروجی مبدل‌ها

شکل (۶) توان‌های اکتیو و راکتیو خروجی تزریق شده توسط مبدل‌ها را در دو سناریو ارائه می‌دهد؛ اتخاذ استراتژی کنترلی جدید و به‌کارگیری روش کنترلی در [۳۴]. توان اکتیو تولید شده توسط مبدل‌ها با اعمال چارچوب کنترلی پیشنهادی (P_{out}) در شکل (۶) سریع‌تر از توان فعال متناظر در [۳۴] به حالت پایدار می‌رسد. علاوه بر این، overshoot در حالت اول کم‌تر از حالت دوم است. توان‌های فعال حالت پایدار با اعمال هر یک از استراتژی‌های کنترلی قبلی یا پیشنهادی یکسان هستند. توان‌های راکتیو ارائه شده توسط مبدل‌ها با اتخاذ چارچوب کنترلی پیشنهادی (Q_{out}) برای مبدل‌های ۱ و ۲ قبل از تغییر بار تقریباً یکسان هستند. پس از رویداد تغییر بار در زمان t=2s، هر دو مبدل توان راکتیو را به‌طور مساوی تقسیم می‌کنند. ($Q_1=Q_2=100$ Var) از آن‌جاکه هر دو مبدل یکسان هستند،

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.1.541]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 1- Spring 2025

این تقسیم توان راکتیو کامل است. با این‌حال، در حین اعمال روش کنترلی قبلی در [۱۳]، سهم‌های توان راکتیو پس از سناریوی تغییر بار ایده‌آل نبودند، توان‌های راکتیو تزریق شده بسیار متفاوت بودند (به ترتیب ۱۸۰ و ۱۰۰ VAR)



شکل (۶): توان‌های خروجی مبدل‌ها در ۲ شینه، با اعمال استراتژی کنترلی پیشنهادی (خطوط پیوسته) و روش [۳۴] (خطوط منقطع)

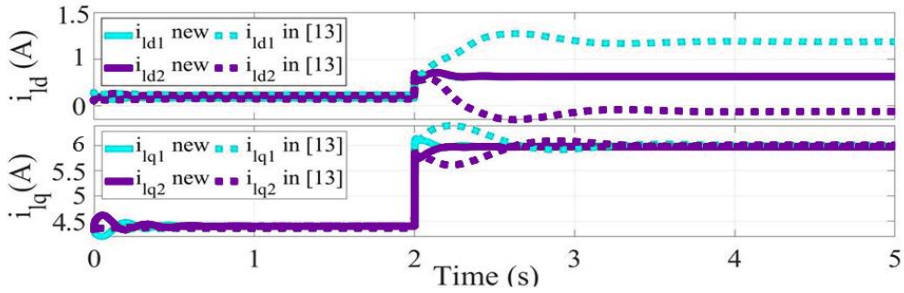
Figure (6): Output powers of inverters in the 2-bus system using the proposed control strategy (solid lines) vs. method [34] (dashed) (lines)

۳-۱-۴- مؤلفه‌های جریان ترمینال مبدل‌ها

جریان‌های ترمینالی که با i_{ld} وi_{lq} نشان داده می‌شوند، مؤلفه‌های dq جریان I_{l-abc} هستند. بدیهی است که این جریان‌ها مقادیر پیش از فیلترینگ هستند. جریان‌های ترمینال مبدل‌ها با به‌کارگیری ساختار کنترلی جدید و اتخاذ روش قبلی در [۳۴] در شکل (۷) نشان داده شده‌اند. مقایسه مؤلفه‌های محور d تأیید می‌کند که با اعمال استراتژی کنترلی جدید، جریان‌های محور d دو مبدل پس از رویداد تغییر بار مساوی هستند، در حالی‌که این مؤلفه‌ها در روش قبلی مشابه نبودند. این تقسیم عادلانه جریان از بارگذاری بیش از حد یک مبدل و برعکس جلوگیری می‌کند. سپس، بررسی مؤلفه‌های جریان محور q تأیید می‌کند که نوسانات جریان و زمان‌های تسویه در حین اعمال استراتژی کنترلی جدید کم‌تر از حالت قبلی با اتخاذ استراتژی کنترلی دیگر است. با این‌حال، جریان‌های محور q حالت پایدار در هر دو رویکرد یکسان هستند.

۳-۱-۵- مؤلفه‌های جریان خروجی مبدل‌ها

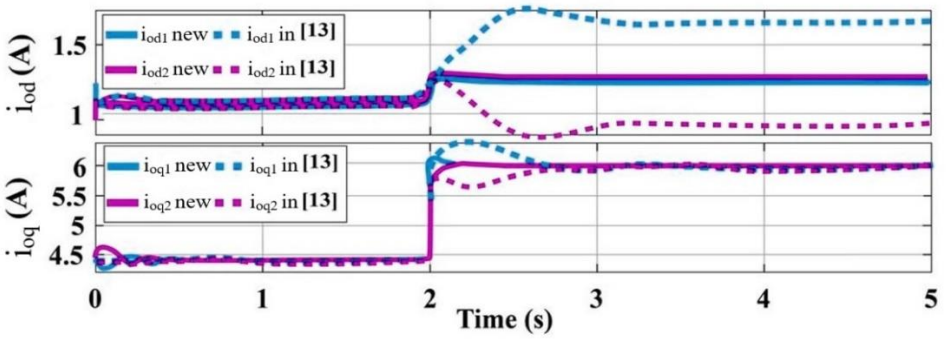
همان‌طور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، استراتژی کنترلی پیشنهادی برای تقسیم مؤلفه‌های جریان مؤثرتر است. مؤلفه‌های جریان محور d دو مبدل در شکل (۸) تقریباً مساوی هستند چه قبل از تغییر بار و چه بعد از آن (یعنی A۰/۸) با این‌حال، دو مبدل در مطالعه قبلی [۳۴] جریان‌های محور d متفاوتی تزریق می‌کنند اگرچه دو مبدل مشابه هستند (یعنی۱/۲و A۰/۴). در مورد جریان‌های خروجی محور q، مقادیر حالت پایدار یکسان هستند، اما overshoot جریان و زمان تسویه در حین اعمال استراتژی کنترلی جدید پیشنهادی کوتاه‌تر است (شکل (۸)، نمودار پایین).



شکل (۷): جریان‌های ترمینال مبدل‌ها در ریز شبکه ۲ شینه با اعمال استراتژی کنترلی پیشنهادی (خطوط پیوسته) و روش [۳۴] (خطوط منقطع)

Figure (7): Terminal currents of inverters in the 2-bus microgrid using the proposed control strategy (solid lines) vs. method [34] (dashed lines)

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.1.541]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 1- Spring 2025

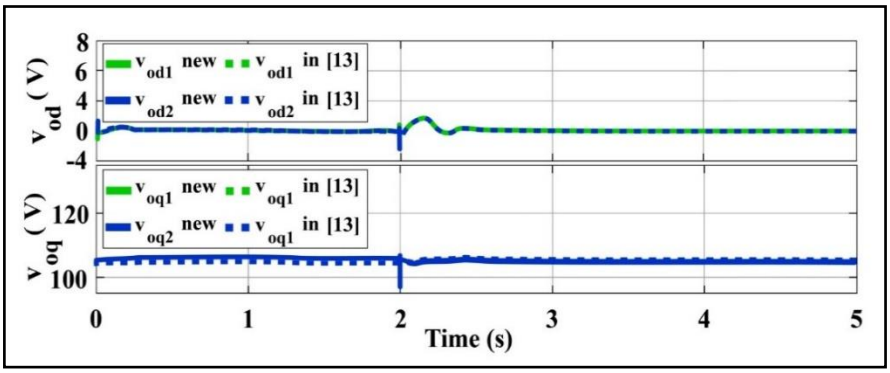


شکل (۸): جریان‌های خروجی مبدل‌ها در ریز شبکه ۲ شینه با اعمال استراتژی کنترلی پیشنهادی (خطوط پیوسته) و روش [۳۴] (خطوط منقطع)

Figure (8): Output currents of inverters in the 2-bus microgrid using the proposed control strategy (solid lines) vs. method [34] (dashed lines)

۳-۱-۶- مؤلفه‌های ولتاژ خروجی مبدل‌ها

مؤلفه‌های ولتاژ خروجی برای دو رویکرد مختلف؛ اعمال کنترل جدید و به‌کارگیری استراتژی در [۳۴] در شکل (۱۰) نشان داده شده‌اند. طبق این شکل، مؤلفه‌های محور d ولتاژ در هر دو روش به اجبار صفر هستند، نوسان ناچیزی در t=2 ثانیه مشاهده می‌شود که پس از نیم ثانیه کاهش می‌یابد. شکل (۹) تأیید می‌کند که نصب امپدانس‌های مجازی باعث افت ولتاژ بر روی این امپدانس‌ها می‌شود؛ بنابراین، افت ولتاژ تقریباً ۱/۵۵ ولت بر روی ولتاژهای خروجی محور q در حین اعمال استراتژی جدید مشاهده می‌شود. شایان ذکر است که برای ارائه ولتاژ خروجی یکسان، نقطه تنظیمی ولتاژ بر روی ۹۰ ولت تنظیم شده است. این نیز به‌عنوان یکی از مراحل بهینه‌سازی در شکل (۲) ذکر شده است.



شکل(۹): مؤلفه‌های ولتاژ خروجی مبدل‌ها در شبکه ۲ شینه با اعمال استراتژی کنترلی پیشنهادی (خطوط پیوسته) و روش [۳۴] (خطوط منقطع)

Figure (9): Output voltage components of inverters in the 2-bus microgrid using the proposed control strategy (solid lines) vs. method [34] (dashed lines)

۴ -نتیجه‌گیری

یک مدل سیگنال کوچک برای ریزشبکه جزیره‌ای شامل PLL و امپدانس‌های مجازی در این مطالعه توسعه داده شده است. پس از آن، بهینه‌سازی MHBMO معرفی شده که امپدانس‌های مجازی را برای مبدل‌ها در ریزشبکه بر اساس تحلیل پایداری سیگنال کوچک ریزشبکه و تبادلات توان راکتیو در ریزشبکه تعیین می‌کند. این روش پایداری سیگنال کوچک را در تمام نقاط کارکرد مختلف تحلیل می‌کند تا از پایداری ریزشبکه هنگام اعمال امپدانس‌های مجازی اطمینان حاصل کند. شاخص پایداری ریزشبکه برای تمام نقاط کارکرد حاصل از تحلیل جریان بار محاسبه می‌شود و حداقل شاخص پایداری، شاخص بحرانی است که با استفاده از امپدانس‌های مجازی طراحی شده بهبود خواهد یافت. امپدانس‌های مجازی طراحی شده در تمام مبدل‌های ریزشبکه نصب می‌شوند. هنگام اعمال روش کنترلی پیشنهادی به مبدل‌ها در ریزشبکه، یک رویکرد تغییر بار به ریزشبکه اعمال می‌شود. ولتاژ و فرکانس ریزشبکه در محدوده‌های

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.1.541]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 1- Spring 2025

استاندارد نگه داشته می‌شوند، شاخص پایداری ریزشبکه بهبود می‌یابد و عدم تطابق‌های توان راکتیو به حداقل می‌رسند. علاوه براین، رفتار گذرای مؤلفه‌های جریان و توان‌های اکتیو نیز با یک مقاله مقایسه و نتایج نشان از بهبود شاخص ها داشت.

مراجع
References

[1] G. Abdulnasser, A. Ali, M. F. Shaaban et al., "Optimal resource allocation and operation for smart energy hubs considering hydrogen storage systems and electric vehicles," Energy, vol. 295, p. 130826, 2024.

[2] G. Er, G. Soykan, E. Canakoglu, "Stochastic optimal design of a rural microgrid with hybrid storage system including hydrogen and electric cars using vehicle-to-grid technology," Journal of Energy Storage, vol. 75, p. 109747, 2024.

[3] D. Kumar, A. Kumar, "A reliable hybrid autoregressive integrated moving average and deep reinforcement machine learning strategy for resiliency enhancement in microgrid," Sustainable Energy, Grids and Networks, vol. 39, p. 101424, 2024.

[4] D. G. Kyriakou, F. D. Kanellos, D. Ipsakis, "Multi-agent-based real-time operation of microgrids employing plug-in electric vehicles and building prosumers," Sustainable Energy, Grids and Networks, vol. 37, p. 101229, 2024.

[5] C. Yan, Y. Zou, Z. Wu et al., "Effect of various design configurations and operating conditions for optimization of a wind/solar/hydrogen/fuel cell hybrid microgrid system by a bio-inspired algorithm," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 60, pp. 378–391, 2024.

[6] Y. Zheng, X. Xue, S. Xi et al., "Enhancing microgrid sustainability: dynamic management of renewable resources and plug-in hybrid electric vehicles," Journal of Cleaner Production, vol. 450, p. 141691, 2024.

[7] T. Song, J. Teh, "Coordinated integration of wind energy in microgrids: A dual strategy approach leveraging dynamic thermal line rating and electric vehicle scheduling," Sustainable Energy, Grids and Networks, vol. 38, p. 101299, 2024.

[8] K. Yuan, Y. Ma, H. Zhang et al., "Optimal parameters estimation of the proton exchange membrane fuel cell stacks using a combined owl search algorithm," Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, vol. 45, pp. 11712–11732, 2023.

[9] W. Jiang, X. Wang, H. Huang et al., "Optimal economic scheduling of microgrids considering renewable energy sources based on energy hub model using demand response and improved water wave optimization algorithm," Journal of Energy Storage, vol. 55, p. 105311, 2022.

[10] H. Bevrani, S. Shokoohi, "An intelligent droop control for simultaneous voltage and frequency regulation in islanded microgrids," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 4, no. 3, pp. 1505–1513, July 2013.

[11] F. Zandi, B. Fani, I. Sadeghkhani et al., "Adaptive complex virtual impedance control scheme for accurate reactive power sharing of inverter interfaced autonomous microgrids," IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 12, no. 24, pp. 6021–6032, 2018.

[12] T. V. Hoang, H. H. Lee, "An adaptive virtual impedance control scheme to eliminate the reactive-power-sharing errors in an islanding meshed microgrid," IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 6, no. 2, pp. 966–976, Jun. 2018.

[13] R. J. Wai, Q. Q. Zhang, Y. Wang, "A novel voltage stabilization and power sharing control method based on virtual complex impedance for an off-grid microgrid," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 34, no. 2, pp. 1863–1880, Feb. 2019.

[14] Q. Hu, G. Zhao, H. Jian et al., "Maximizing energy storage in microgrids with an amended multi-verse optimizer," Heliyon, vol. 9, no. 8, p. e21471, 2023.

microgrids in households: Portuguese and French household case study," Applied Energy, vol. 349, p. 121495, 2023.

[16] A. Pajares, F. J. Vivas, X. Blasco et al., "Methodology for energy management strategies design based on predictive control techniques for smart grids," Applied Energy, vol. 351, p. 121809, 2023.

[17] I. Poonahela, A. Krama, S. Bayhan et al., "Hierarchical model-predictive droop control for voltage and frequency restoration in AC microgrids," IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society, vol. 4, pp. 85–97, 2023.

[18] S. H. Rouhani, C. L. Shen, S. Mobayen et al., "Cyber resilience in renewable microgrids: A review of standards, challenges, and solutions," Energy, vol. 309, p. 133081, 2024.

[DOI: 10.82362/jeps.2025.1.541] Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 1- Spring 2025 [Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

[19] K. Yu, Q. Ai, S. Wang et al., "Analysis and optimization of droop controller for microgrid system based on small-signal dynamic model," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 7, no. 1, pp. 1–11, Jan. 2016.
[20] M. Ghiasi, Z. Wang, M. Mehrandezh et al., "Enhancing power grid stability: design and integration of a fast bus tripping system in protection relays," IEEE Transactions on Consumer Electronics, early access, 2024.
[21] J. He, X. Wu, X. Wu et al., "Small-signal stability analysis and optimal parameters design of microgrid clusters," IEEE Access, vol. 7, pp. 36896–36909, 2019.
[22] H. A. Abbass, "A monogenous MBO approach to satisfiability," Proceedings of the International Conference on Computational Intelligence for Modelling, Control and Automation, vol. 2, pp. 758–763, 2001.
[23] O. B. Haddad, A. Afshar, and M. A. Marino, "Honey-bees mating optimization (HBMO) algorithm: a new heuristic approach for water resources optimization," Water Resources Manag[60] G. Kaur and S. Arora, "Chaotic whale optimization algorithm," Journal of Computational Design and Engineering, vol. 5, no. 3, pp. 275–284, 2018.
[24] M. G. Omran and A. Salman, "Constrained optimization using CACO," Applied Mathematics and Computation, vol. 208, no. 1, pp. 253–269, 2009.
[25] M. Farahmandian, S. M. Razavi, and H. Doagou-Mojarrad, "Modified honey bee mating optimization algorithm for solving of optimal reactive power dispatch problem," Applied Soft Computing, vol. 19, pp. 13–24, 2014.
[26] J. C. Vasquez, J. M. Guerrero, A. Luna et al., "Adaptive droop control applied to voltage-source inverters operating in grid-connected and islanded modes," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 56, no. 10, pp. 4088–4096, Oct. 2009.
[27] R. H. Lasseter, "Smart distribution: Coupled microgrids," Proceedings of the IEEE, vol. 99, no. 6, pp. 1074–1082, Jun. 2011.
[28] G. Kaur and S. Arora, "Chaotic whale optimization algorithm," Journal of Computational Design and Engineering, vol. 5, no. 3, pp. 275–284, 2018.
[29] A. Sharma, A. Sharma, M. Averbukh, V. Jately, and B. Azzopardi, "An effective method for parameter estimation of a solar cell," Electronics, vol. 10, no. 3, p. 312, 2021.
[30] R. S. Rao, S. V. L. Narasimham, M. R. Raju, and A. S. Rao, "Optimal network reconfiguration of large-scale distribution system using harmony search algorithm," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 23, no. 3, pp. 1044–1052, 2008.
[31] B. Akay and D. Karaboga, "A modified artificial bee colony algorithm for real-parameter optimization," Information Sciences, vol. 192, pp. 120–142, 2012.
[32] J. C. Bansal, H. Sharma, and S. S. Jadon, "Artificial bee colony algorithm: a survey," Advanced Engineering Informatics, vol. 27, no. 3, pp. 335–353, 2013.
[33] M. Mernik, S. H. Liu, D. Karaboga, and M. Črepinšek, "On clarifying misconceptions when comparing variants of the artificial bee colony algorithm by offering a new implementation," Information Sciences, vol. 291, pp. 115–127, 2015.ement, vol. 20, no. 5, pp. 661–680, 2006.
[34] M. Rasheduzzaman, J. A. Mueller, and J. W. Kimball, "An Accurate Small-Signal Model of Inverter-Dominated Islanded MGs Using dq Reference Frame," IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron., vol. 2, no. 4, pp. 1070–1080, Dec. 2014.
[35] P. Kundur, "Power Systems Stability and Control," McGraw-Hill, 1994.
[36] Y. Zhu, F. Zhuo, F. Wang et al., "A virtual impedance optimization method for reactive power sharing in networked microgrid," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 31, no. 4, pp. 2890–2904, Apr. 2016.
[37]. A. Samanfar, A. Tavakoli, M. Reza Ghod, "Improving the stability of microgrids clusters using virtual inertial control by the Mu-synthesis method", Journal of Innovative Research in Smart Power Systems, Volume 12, Issue 3, Pages 84-71, Islamic Azad University, Dezful Branch, 2023. (In Persian)

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.1.541]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 1- Spring 2025