



A Virtual Inertia Control Structure for Enhancing Frequency Stability in Low-Inertia Power Systems with High Renewable Energy Penetration

Abbas Ali Zamani¹

¹ Department of Electrical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Article Type:
Original Research

Received: 2025.02.17
Revised: 2025.05.06
Accepted: 2025.12.14

Keyword:
Virtual inertia
Nonlinear proportional-integral controller
Microgrid
Renewable energy sources
Optimal control

***Corresponding Author:**
Abbas Ali Zamani
Email: a-zamani@tvu.ac.ir

ABSTRACT

With the increasing incorporation of renewable energy sources into modern power systems, the resulting uncertainties present significant challenges, especially in controlling frequency fluctuations within isolated microgrids. To address these challenges, this research introduces an innovative approach called ONPIVIC, which combines an optimal Nonlinear Proportional-Integral (ONPI) controller within the virtual inertia (VI) control loop. This novel Virtual Inertia Control (VIC) method is designed to enhance frequency control in low-inertia microgrids with varying levels of renewable energy sources. The proposed strategy involves an optimal design based on a nonlinear PI controller and a virtual inertia control loop using the Arithmetic Optimization Algorithm (AOA). This approach enables the VIC unit to regulate the inverter-based Energy Storage System (ESS) while simulating different inertia levels and responding effectively to fluctuations in generation and load. To compare the performance of the proposed controller, two alternative control methods, namely the Optimal Virtual Inertia Controller (OVIC) and the Optimal PI-based Virtual Inertia Controller (PIVIC), are also considered. The effectiveness of the proposed controller is evaluated through five different scenarios that account for sudden changes in power demand and generation in isolated mode. The results demonstrate that the proposed ONPIVIC controller enhances frequency stability and control efficiency in microgrids incorporating renewable energy sources, facilitating a smoother transition to cleaner energy generation.



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

In recent years, the attention to renewable energy sources (RESs) as an alternative to fossil energy sources has increased dramatically in many parts of the world. These changes in energy generation sources, especially in power distribution networks, have brought new challenges, which are especially problematic in isolated microgrids (MGs) due to the lack of inertia. Compared to traditional synchronous generators, the exchange of power between inverter-based RESs and the microgrid reduces the overall system inertia and the initial frequency regulation capability. Therefore, the high penetration of RESs can lead to a reduction in the initial frequency regulation and the inertia response.

To improve the inertia in microgrids, virtual inertia (VI) simulation has been proposed as an efficient technique that allows the addition of additional inertia to the microgrid. Several studies have investigated the use of PI controllers as auxiliary controls for energy storage systems to improve virtual inertia in microgrids. Although these methods were able to improve the frequency response of microgrids, they proposed fixed values for the virtual inertia gains and the associated PI controller. Unlike the classical PI controller which has fixed gains, in the nonlinear PI controller the proportional and integral gains are adjusted adaptively and dependent on the operating conditions of the system.

To address these challenges, this research introduces an innovative approach called ONPIVIC, which combines an optimal Nonlinear Proportional-Integral (ONPI) controller within the virtual inertia control loop. This novel Virtual Inertia Control (VIC) method is designed to enhance frequency control in low-inertia microgrids with varying levels of renewable energy sources. The proposed strategy involves an optimal design based on a nonlinear PI controller and a virtual inertia control loop using the Arithmetic Optimization Algorithm (AOA). This approach enables the VIC unit to regulate the inverter-based Energy Storage System (ESS) while simulating different inertia levels and responding effectively to fluctuations in generation and load. To compare the performance of the proposed controller, two alternative control methods, namely the Optimal Virtual Inertia Controller (OVIC) and the Optimal PI-based Virtual Inertia Controller (PIVIC), are also considered. The effectiveness of the proposed controller is evaluated through five different scenarios that account for sudden changes in power demand and generation in isolated mode.

Methodology

In this study, a novel control method designated as ONPI is introduced and integrated into the VIC loop. The outcome of this integration is an efficient VIC controller termed ONPIVIC. The proposed control framework is specifically designed to emulate inertia in islanded microgrids with high penetration of renewable energy sources, aiming to enhance overall microgrid stability. Given the stability challenges arising from improper selection of VIC parameters, precise tuning of these variables can serve as a practical solution to significantly improve the frequency stability of the microgrid following disturbances induced by generation or load fluctuations. Initially, the focus is placed on the OVIC controller, illustrated in Figure 1, and its control parameters, namely K_{VI} and D_{VI} , are determined using the AOA algorithm.

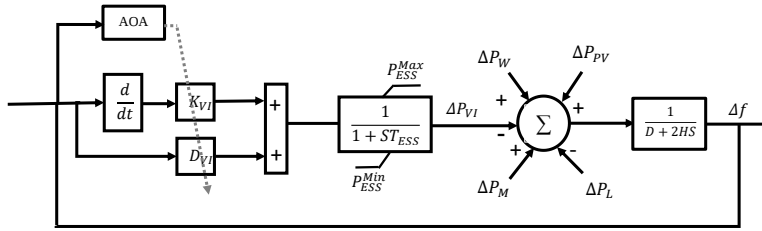


Figure 1. Block diagram of the proposed OVIC structure.

The Proportional-Integral controller is one of the most widely adopted control strategies in dynamic systems. However, in systems exhibiting nonlinear behavior, linear PI controllers may not provide adequate performance. Accordingly, nonlinear PI controllers have been developed to enhance system response under dynamic variations, disturbances, and uncertainties. In this paper, a nonlinear PI controller is incorporated into the VIC loop to improve microgrid stability. This approach is designated as ONPIVIC and is illustrated in Figure 2.

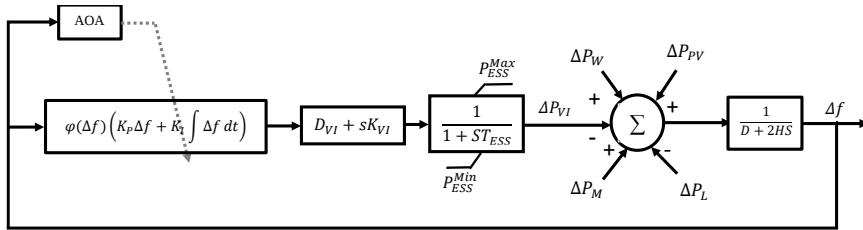


Figure 2. Block diagram of the proposed ONPIVIC structure.

Results and discussion

This section presents the results obtained from simulating various operational scenarios of the test system. The examined system comprises multiple renewable energy sources alongside two distinct load types, industrial/commercial and residential, which serve as disturbance sources. Furthermore, a comprehensive assessment of the controller performance includes the investigation of five different scenarios that account for unexpected variations in electricity demand and generation under islanded operating conditions. System performance is evaluated and validated using frequency deviation, denoted as Δf . The dynamic behavior of the system is quantified through performance indices such as IAE, ITAE, US, and OS, which are extensively utilized in power system dynamics studies.

As an illustrative example, the fifth scenario addresses extreme operating conditions characterized by concurrent step changes in both load demand and stochastic power generation. This scenario is designed to evaluate the microgrid performance under the most challenging conditions, where simultaneous random fluctuations in generation and load, as depicted in Figure 3, are imposed. The corresponding frequency deviation dynamics are graphically illustrated in Figure 4 for this particular scenario.

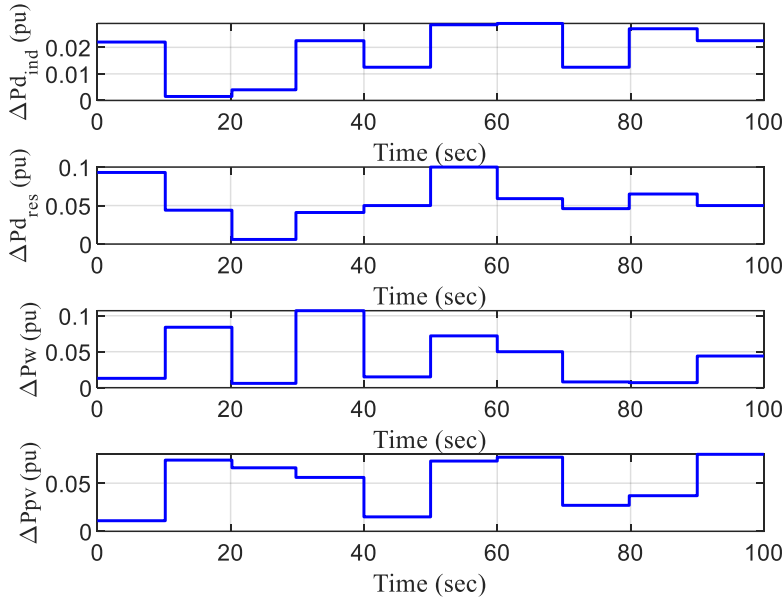


Figure 4. Step change profiles for simultaneous load and stochastic generation variations applied to the studied microgrid in Scenario 5.

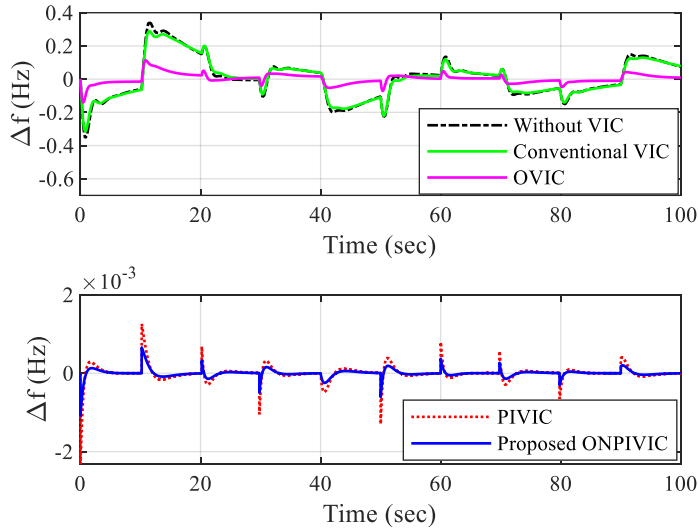


Figure 5. Comparative frequency response of various control strategies applied to the microgrid under Scenario 5.

Conclusion

With the rising penetration of renewable energy sources, maintaining frequency stability in low-inertia islanded microgrids has become a critical challenge. Traditional control systems often rely on fixed-gain controllers, which are inadequate for the highly dynamic and uncertain nature of such networks. Improper tuning or rigid parameterization of virtual inertia and supplementary controllers can induce unwanted oscillations and degrade system performance. Hence, advanced virtual inertia control

strategies are indispensable. This paper proposes a novel control framework, termed Optimal Nonlinear PI based Virtual Inertia Control, which integrates a nonlinear PI controller within the VIC loop for isolated microgrids. By simultaneously emulating virtual inertia and virtual damping, the proposed method significantly enhances system inertia, damping characteristics, and overall frequency stability. The Arithmetic Optimization Algorithm is employed for optimal parameter tuning. For comparative assessment, two alternative schemes, Optimal VIC and Optimal PI-based VIC, are also implemented. Comprehensive evaluation under various load scenarios and renewable generation uncertainties demonstrates the clear superiority of the ONPIVIC strategy. Quantitative results reveal that ONPIVIC achieves an average reduction of approximately 47% in IAE and ITAE indices compared to PIVIC, and about 90% improvement over the other conventional methods across all test scenarios. These findings confirm that the proposed control framework substantially enhances the stability and frequency regulation of microgrids.



ارائه یک ساختار کنترلری اینرسی مجازی به منظور ارتقای پایداری فرکانسی در شبکه‌های با اینرسی پایین و نفوذ بالای منابع انرژی تجدیدپذیر

عباسعلی زمانی^۱ 

۱- گروه مهندسی برق، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	با گسترش ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر در شبکه‌های برق مدرن، عدم قطعیت‌های مرتبط با آن‌ها چالش‌هایی به‌ویژه در کنترل نوسانات فرکانس در ریزشبکه‌های ایزوله ایجاد کرده است. برای مقابله با این چالش‌ها، این پژوهش یک روش نوآورانه را که ترکیبی از یک کنترل‌کننده تناسبی-انترگالی غیرخطی بهینه در حلقه کنترل اینرسی مجازی است را با نام ONPIVIC معرفی می‌کند. این روش جدید کنترل اینرسی مجازی با هدف بهبود کنترل فرکانس در ریزشبکه‌های با اینرسی پایین با سطح متغیر منابع انرژی تجدیدپذیر طراحی شده است. استراتژی پیشنهادی شامل طراحی بهینه مبتنی بر کنترل‌کننده تناسبی-انترگالی غیرخطی و حلقه کنترل اینرسی مجازی از طریق الگوریتم بهینه‌سازی حسابی است. این روش به واحد کنترل اینرسی مجازی اجازه می‌دهد تا سیستم ذخیره‌سازی انرژی مبتنی بر اینورتر را کنترل کند، درحالی‌که سطوح مختلف اینرسی را شبیه‌سازی کرده و به نوسانات تولید و بار پاسخ دهد. برای مقایسه عملکرد کنترل‌کننده پیشنهادی، دو روش کنترل جایگزین دیگر با نام‌های کنترل‌کننده اینرسی مجازی بهینه (OVIC) و کنترل‌کننده PI مبتنی بر اینرسی مجازی بهینه (PIVIC) نیز در نظر گرفته شده‌اند. اثربخشی کنترل‌کننده پیشنهادی از طریق پنج سناریو مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که کنترل‌کننده ONPIVIC پیشنهادی باعث بهبود پایداری فرکانس و کارایی کنترل در ریزشبکه‌های دارای منابع انرژی تجدیدپذیر شده و گذار به استفاده از تولید انرژی پاک‌تر را تسهیل می‌کند.
کلیدواژگان: اینرسی مجازی کنترل‌کننده تناسبی-انترگالی غیرخطی ریزشبکه منابع انرژی تجدیدپذیر کنترل بهینه	
*نویسنده مسئول: عباسعلی زمانی پست الکترونیکی: a-zamani@tvu.ac.ir	



مقدمه

با توجه به مسائل زیست محیطی و کمبود منابع انرژی، توجه به اهمیت منابع انرژی تجدیدپذیر به عنوان جایگزینی برای منابع انرژی فسیلی در بسیاری از نقاط جهان به طور چشمگیری افزایش یافته است [۱؛ ۲]. این تغییرات در استفاده گسترده از منابع تولید انرژی تجدیدپذیر، به ویژه در شبکه های توزیع برق، موجب بروز چالش های جدیدی شده است که به ویژه در ریزشبکه های ایزوله به دلیل کمبود اینرسی، مشکلات بیشتری را ایجاد می کند.

ریز شبکه ها در دو حالت عملیاتی جزیره ای و متصل به شبکه کار می کنند. در حالت متصل به شبکه، فرکانس و ولتاژ ریزشبکه توسط شبکه اصلی تعیین می شود [۲؛ ۳]. در مقابل، در حالت جزیره ای، برخی منابع موجود در ریزشبکه مسئول ایجاد تعادل میان تولید و تقاضای توان هستند. از این رو، کنترل ریزشبکه در حالت جزیره ای پیچیده تر از کنترل آن در حالت متصل به شبکه است [۴؛ ۵]. در مقایسه با ژنراتورهای سنکرون سنتی، تبادل توان بین منابع انرژی تجدیدپذیر مبتنی بر اینورتر و ریزشبکه، اینرسی کلی سیستم و قابلیت تنظیم اولیه فرکانس را کاهش می دهد. بنابراین، نفوذ بالای منابع انرژی تجدیدپذیر می تواند منجر به کاهش تنظیم اولیه فرکانس و پاسخ اینرسی شود [۶]. چنین شرایطی ممکن است حتی در اثر اغتشاشات کوچک، تغییرات سریع و شدیدی را در فرکانس ریز شبکه ایجاد کند. بنابراین، استفاده از روش های مناسب جهت بهبود اینرسی و تنظیم فرکانس در ریزشبکه های جزیره ای ضروری به نظر می رسد.

برای بهبود اینرسی در ریز شبکه ها، شبیه سازی اینرسی مجازی (VI) به عنوان یک راه حل کارآمد پیشنهاد شده است که امکان افزودن اینرسی اضافی را به ریز شبکه فراهم می کند. یکی از روش های مؤثر برای پیاده سازی اینرسی مجازی، استفاده از فناوری اینرسی مجازی مبتنی بر مشتق گیر است [۷؛ ۸]. در سال های اخیر، کاربرد اینرسی مجازی در ریز شبکه های جزیره ای به منظور بهبود پایداری فرکانس، مورد بررسی قرار گرفته است [۹؛ ۱۰]. در مطالعات [۹]، کنترل اینرسی مجازی (VIC) مبتنی بر کنترل مقاوم در سیستم ذخیره سازی انرژی برای پشتیبانی از پاسخ فرکانسی ریز شبکه بررسی شده است. عدم استفاده از کنترل اینرسی مجازی در ریز شبکه ها می تواند منجر به ناپایداری شبکه و بروز خرابی های زنجیره ای شود. در مرجع [۱۰]، به مرور کاربرد ژنراتور سنکرون مجازی برای افزایش اینرسی سیستم و پایداری فرکانس پرداخته شده است. همچنین در این مرجع یک ساختار کنترل کننده مبتنی بر کنترل کننده تناسبی-انترگالی (PI) نیز ارائه شده که ضرایب کنترل کننده را ثابت لحاظ کرده است. مرجع [۱۱] به ارائه یک روش برای پیاده سازی اینرسی مجازی در ابر خازن ها به منظور تثبیت فرکانس ریز شبکه اختصاص دارد. در مرجع [۱۲] یک بررسی جامع درباره پاسخ اینرسی و استراتژی های تنظیم فرکانس برای منابع انرژی تجدیدپذیر ارائه شده است. نویسندگان در مرجع [۱۳] به مرور روش های بهبود تنظیم فرکانس سیستم، با استفاده از جبران کننده های سنکرون و سیستم ذخیره سازی انرژی باتری پرداخته اند. در مرجع [۱۴] عملکرد دینامیکی کنترل اینرسی مبتنی بر کنترل کننده منطق فازی بررسی شده است که هدف آن، شبیه سازی نوسانات فرکانسی در شبکه های قدرت است. مراجع [۱۵] کنترل کننده مبتنی بر روش کنترل پیش بین را برای VIC مورد بررسی قرار گرفته داده اند تا پاسخ فرکانسی ریز شبکه جزیره ای را بهبود ببخشند.

در مرجع [۱۶] یک کنترل کننده بازخوردی LQR مبتنی بر یادگیری عمیق را برای بهبود عملکرد VIC در ریز شبکه های جزیره ای معرفی می کند. در مرجع [۱۷] یک کنترل کننده اینرسی مجازی مبتنی بر یادگیری تقویتی را برای بهبود انحراف فرکانس در ریز شبکه های جزیره ای ارائه می دهد و عملکرد آن در بهبود پاسخ فرکانس شبکه را نمایش می دهد.

کنترل کننده PI یکی از رایج ترین و پرکاربردترین استراتژی های کنترلی در سیستم های قدرت و فرآیندهای صنعتی محسوب می شود. این کنترل کننده به دلیل ساختار ساده، پیاده سازی آسان و توانایی مطلوب در کاهش خطای حالت ماندگار، به عنوان یک روش مؤثر در تنظیم فرکانس و ولتاژ مورد استفاده قرار می گیرد. در ریز شبکه ها و

سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی، کنترل‌کننده PI نقشی کلیدی در بهبود پایداری دینامیکی ایفا کرده و عملکرد سیستم را در برابر نوسانات بار و تغییرات ناگهانی در تولید توان بهبود می‌بخشد. علاوه بر این، ترکیب کنترل‌کننده PI با روش‌های بهینه‌سازی پیشرفته نظیر الگوریتم ژنتیک و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات امکان بهینه‌سازی پارامترهای کنترلی را فراهم می‌سازد و موجب افزایش کارایی در سیستم‌های غیرخطی و متغیر با زمان می‌شود. از این رو، کنترل‌کننده PI همچنان به‌عنوان یک ابزار کارآمد در بهبود پایداری، قابلیت اطمینان و عملکرد سیستم‌های قدرت، به‌ویژه در شبکه‌هایی با نفوذ بالای منابع انرژی تجدیدپذیر، مورد توجه قرار دارد [۱۸].

مطالعات متعددی به بررسی استفاده از کنترل‌کننده‌های PI به‌عنوان کنترل‌کننده برای سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی به‌منظور بهبود اینرسی مجازی در ریزشبکه‌ها پرداخته‌اند. در یکی از این مطالعات [۱۹]، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای طراحی بهینه این کنترل‌کننده به کار گرفته شد، که در آن تنظیم بهینه پارامترهای کنترل‌کننده مجازی جهت بهبود پایداری و تاب‌آوری سیستم قدرت تعیین گردید. در مرجع [۲۰]، از راه حل تزریق اینرسی مبتنی بر کنترل‌کننده PI به‌عنوان راهکاری برای شبکه‌های با اینرسی پایین استفاده شد. این روش شامل استفاده از یک کنترل‌کننده PI در خروجی یک روش کنترلی مشتقی مبتنی بر سیستم‌های فتوولتائیک و سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی بود که در نهایت منجر به بهبود عملکرد فرکانسی سیستم‌های اینرسی مجازی شد. مشکل اکثر ساختارهای کنترلی مبتنی بر کنترل‌کننده PI استفاده از کنترل‌کننده با بهره‌های ثابت برای شبکه‌های با اینرسی پایین می‌باشد. کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی غیرخطی (Nonlinear PI) به‌عنوان یک رویکرد پیشرفته در بهبود عملکرد سیستم‌های دینامیکی، به‌ویژه در ریزشبکه‌ها و سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی در این مقاله مورد توجه قرار گرفته است [۲۱؛ ۲۲]. برخلاف کنترل‌کننده PI کلاسیک با بهره‌های ثابت بکار رفته در تحقیقات گذشته برای شبکه‌های با اینرسی پایین، در کنترل‌کننده PI غیرخطی بهره‌های تناسبی و انتگرالی به‌صورت تطبیقی و وابسته به شرایط عملیاتی سیستم قدرت تنظیم می‌شوند. این ویژگی موجب افزایش انعطاف‌پذیری و کارایی کنترل‌کننده در مواجهه با تغییرات ناگهانی بار و نوسانات تولید در سیستم‌های قدرت می‌شود. در ریزشبکه‌های با اینرسی پایین که تحت تأثیر عدم قطعیت‌های ناشی از منابع انرژی تجدیدپذیر قرار دارند، استفاده از کنترل‌کننده PI غیرخطی می‌تواند پایداری فرکانسی را بهبود بخشد و عملکرد سیستم را در شرایط گذرا ارتقا دهد. علاوه بر این، ترکیب این کنترل‌کننده با روش‌های بهینه‌سازی مانند الگوریتم بهینه‌سازی حسابی (AOA) امکان تنظیم بهینه پارامترهای کنترلی را فراهم کرده و موجب بهبود پاسخ دینامیکی سیستم‌های قدرت می‌شود.

الگوریتم بهینه‌سازی حسابی یکی از روش‌های نوین بهینه‌سازی مبتنی بر اصول ریاضی است که برای حل مسائل بهینه‌سازی پیچیده در حوزه‌های مختلف مهندسی از جمله سیستم‌های قدرت مورد استفاده قرار گرفته است [۲۳]. این الگوریتم با الهام از عملیات حسابی مانند جمع، تفریق، ضرب و تقسیم، فرایند جستجوی بهینه را در فضای طراحی هدایت کرده و تعادل مناسبی بین جستجوی سراسری (Exploration) و جستجوی محلی (Exploitation) برقرار می‌کند. از مزایای کلیدی AOA می‌توان به سادگی پیاده‌سازی، همگرایی سریع و توانایی اجتناب از به دام افتادن در بهینه‌های محلی اشاره کرد. در کنترل و مدیریت ریزشبکه‌ها الگوریتم AOA می‌تواند برای تنظیم بهینه پارامترهای کنترل‌کننده‌های غیرخطی مانند کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی غیرخطی مورد استفاده قرار گیرد و موجب بهبود پایداری فرکانسی و کارایی سیستم‌های قدرت با نفوذ بالای منابع انرژی تجدیدپذیر شود.

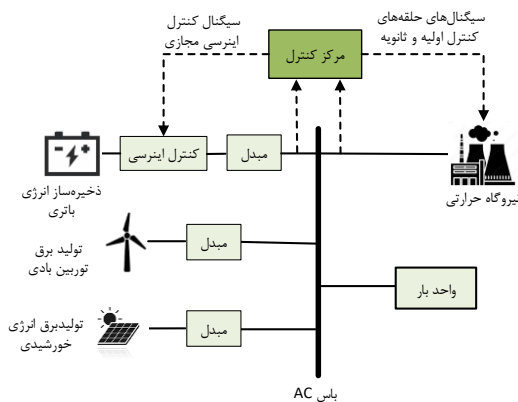
در این مقاله، یک رویکرد نوآورانه تحت عنوان ONPIVIC معرفی شده است که ترکیبی از کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی غیرخطی بهینه (ONPI) در حلقه کنترل اینرسی مجازی است. هدف از این رویکرد، بهبود کنترل فرکانس در ریزشبکه‌های با اینرسی پایین است که با سطوح مختلف منابع انرژی تجدیدپذیر کار می‌کنند. به‌طور خاص، استراتژی پیشنهادی شامل طراحی بهینه‌ای مبتنی بر کنترل‌کننده PI غیرخطی و حلقه کنترل اینرسی مجازی است که از الگوریتم بهینه‌سازی حسابی برای بهینه‌سازی این سیستم استفاده می‌کند.

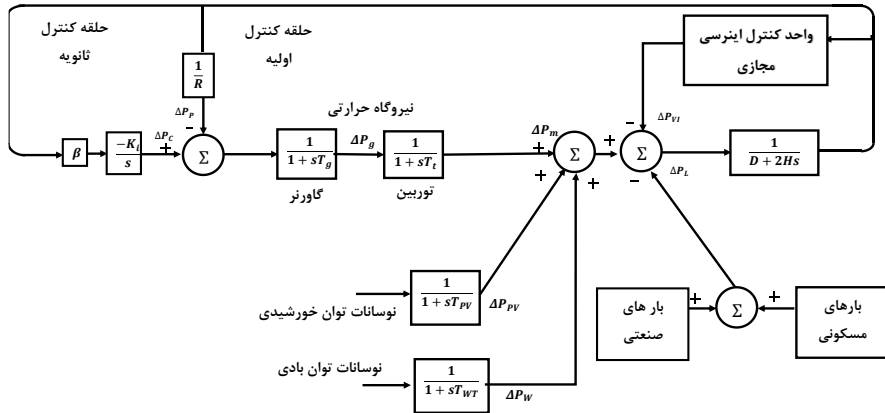
یکی از ویژگی‌های برجسته این روش، توانایی آن در تنظیم سیستم ذخیره‌سازی انرژی مبتنی بر اینورتر است که می‌تواند سطوح مختلف اینرسی را شبیه‌سازی کرده و به نوسانات تولید و بار پاسخ دهد. در واقع، این سیستم قادر است تا تغییرات تولید و مصرف انرژی را در ریز شبکه ایزوله شبیه‌سازی کرده و فرکانس را به‌طور مؤثری کنترل کند. برای ارزیابی عملکرد این کنترل‌کننده، دو روش دیگر به‌عنوان مقایسه در نظر گرفته شده‌اند. این روش‌ها عبارتند از کنترل اینرسی مجازی ساده، کنترل‌کننده اینرسی مجازی بهینه (OVIC) و کنترل‌کننده PI مبتنی بر اینرسی مجازی بهینه (PIVIC) در مراجع [۲۴؛ ۲۵؛ ۲۶] می‌باشند. در این مقاله، برای ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی، پنج سناریوی مختلف مورد بررسی قرار گرفته است که تغییرات ناگهانی در تقاضا و تولید انرژی را در حالت ایزوله در نظر می‌گیرد. برای اعتبارسنجی عملکرد، معیارهایی مانند انتگرال قدر مطلق خطا (IAE)، انتگرال قدر مطلق خطا در زمان (ITAE)، کمینه فرکانس (US) و بیشینه فرکانس (OS) به کار گرفته شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که کنترل‌کننده پیشنهادی ONPIVIC می‌تواند موجب بهبود پایداری فرکانس و کارایی کنترل در ریز شبکه‌های دارای منابع انرژی تجدیدپذیر شود و مسیر را برای انتقال به تولید انرژی پاک‌تر هموار سازد.

ساختار مقاله به این صورت سازمان‌دهی شده است که در بخش دوم، سیستم قدرت مورد مطالعه معرفی می‌شود. در بخش سوم، ساختار کنترل اینرسی معمول و مفاهیم آن مطرح شده و در بخش چهارم طرح کنترل اینرسی غیرخطی بهینه پیشنهادی تشریح می‌گردد. در بخش پنجم، روش کنترلی پیشنهادی از طریق تحلیل عددی در پنج سناریوی مختلف ارزیابی می‌شود. در نهایت، بخش پایانی به نتیجه‌گیری اختصاص دارد.

معرفی ریز شبکه مستقل مورد مطالعه

برای انجام یک تحلیل مقایسه‌ای جامع، از یک سیستم ریز شبکه مستقل که در مقالات اخیر مورد بررسی قرار گرفته است به‌عنوان بستر مطالعات استفاده می‌کنیم. این سیستم شامل اجزای مختلفی است، از جمله یک نیروگاه حرارتی کوچک با توان تولیدی ۲۰ مگاوات، یک مزرعه خورشیدی با ظرفیت ۴ مگاوات، یک پارک بادی با ظرفیت ۸ مگاوات، مصرف خانگی با توان ۵ مگاوات و مصرف صنعتی با توان ۱۰ مگاوات. توان پایه در این سیستم برابر با ۲۰ مگاوات در نظر گرفته شده است [۲۴؛ ۲۵؛ ۲۶]. برای تحلیل کنترل فرکانس ریز شبکه مورد مطالعه، از نمای شماتیک سیستم زیر به همراه مدل دینامیکی آن در حضور نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر استفاده می‌شود، که در شکل ۱ نمایش داده شده است [۲۴؛ ۲۵؛ ۲۶].





شکل ۱. نمودار ریز شبکه مستقل مورد بررسی به همراه مدل بلوکی شبیه سازی دینامیکی آن.

این شکل نمودار بلوکی یک ناحیه کنترلی متداول در ریز شبکه را نشان می دهد که شامل یک واحد تولید متداول به همراه واحدهای تولید انرژی تجدیدپذیر است. سیستم ذخیره سازی انرژی به نیروگاه حرارتی در تأمین توان مورد نیاز کمک کرده و همچنین ویژگی های اینرسی و میرایی را برای کنترل اینرسی شبیه سازی می کند. نیروگاه های تجدیدپذیر می توانند مقدار قابل توجهی توان را برای سیستم تأمین کنند، اما در کنترل فرکانس مشارکت ندارند. از این رو، توان تولیدی باد و خورشیدی و همچنین تقاضای بار به عنوان اغتشاشات در ریز شبکه در نظر گرفته می شوند. نوسانات فرکانس و تغییرات توان خروجی منابع تجدیدپذیر را می توان با در نظر گرفتن تأثیر استراتژی های کنترلی و حلقه کنترل اینرسی مجازی شناسایی کرد، که به صورت ریاضی در معادلات زیر بیان می شوند.

$$\Delta f(s) = \frac{1}{2Hs + D} (\Delta P_m(s) + \Delta P_W(s) + \Delta P_{PV}(s) + \Delta P_{VI}(s) - \Delta P_L(s)) \quad (1)$$

که اجزای این معادله در ادامه بصورت زیر تعریف می شوند.

$$\Delta P_m(s) = \frac{1}{1 + sT_t} \Delta P_g(s) \quad (2)$$

$$\Delta P_g(s) = \frac{1}{1 + sT_g} \left(\Delta P_c(s) - \frac{1}{R} \Delta f(s) \right) \quad (3)$$

$$\Delta P_c(s) = \frac{K_S}{s} (\beta \cdot \Delta f(s)) \quad (4)$$

$$\Delta P_W(s) = \frac{1}{1 + sT_{WT}} \Delta P_{wind}(s) \quad (5)$$

$$\Delta P_{PV}(s) = \frac{1}{1 + sT_{PV}} \Delta P_{solar}(s) \quad (6)$$

پارامترهای ریز شبکه مورد مطالعه عبارتند از: تغییرات در پا سخ خطای کنترل ناحیه به دلیل کنترل ثانویه P_C ، تغییرات در توان خروجی نیروگاه حرارتی، ΔP_m ، تغییرات در اقدامات کنترلی ناشی از کنترل اولیه، ΔP_p ، نوسانات در تولید انرژی بادی، ΔP_w ، تغییرات در توان اولیه تولیدی از انرژی بادی، ΔP_{wind} ، توان تولیدی توربین، ΔP_g ، تغییرات در تولید اولیه انرژی فوتوولتائیک، ΔP_{solar} ، نوسانات در تولید توان نیروگاه خورشیدی، ΔP_{pv} ، تغییرات در میزان مصرف صنایع، ΔP_{ind} ، تغییرات در میزان مصرف تقاضای خانگی، ΔP_{resi} ، تغییرات کلی در تقاضای کل، ΔP_L و تغییرات در خروجی بخش اینرسی مجازی، ΔP_{VI} [۲۴؛ ۲۵؛ ۲۶]. علاوه بر این مشخصات پارامتری ریز شبکه مورد بررسی عبارتند از: اینرسی شبکه با نماد H مقدار ۰.۸۳ و واحد $p.u.MW.s$ ، ضریب دمپینگ سیستم با نماد D مقدار ۰.۰۱۵ و واحد $p.u.MW/Hz$ ، ضریب بهره با نماد K_{VI} که باید طراحی شود، ضریب دمپینگ مجازی با نماد D_{VI} که باید طراحی شود، ثابت زمانی ذخیره سازی انرژی با نماد T_{ESS} و مقدار ۱.۰s، ظرفیت حداکثر و حداقل ذخیره سازی انرژی با نماد P_{ESS} و مقدار ± 0.3 و واحد $p.u.MW$ ، ضریب Droop با نماد R مقدار ۲.۴ و واحد $Hz/p.u.MW$ ، ثابت زمانی گاورنر با نماد T_g ، مقدار ۰.۱s، ثابت زمانی توربین با نماد T_t و مقدار ۰.۴s، محدودیت نرخ تولید با نماد GRC و مقدار ۲۰٪، حداکثر محدودیت باز بودن شیر با نماد V_U و V_L و مقدار ± 0.3 و واحد $p.u.MW$ ، ضریب β با مقدار ۰.۱ و واحد $p.u.MW/Hz$ ، بهره کنترل انتگرالی با نماد K_s و مقدار ۰.۰۵، ثابت زمانی توربین بادی با نماد T_{WT} و مقدار ۱.۵s، در نهایت، ثابت زمانی سیستم فوتوولتائیک با نماد T_{PV} و مقدار ۱.۸s است.

کنترل فرکانس در ریز شبکه ایزوله با سیستم های ذخیره ساز انرژی مبتنی بر اینورتر

در شبکه های قدرت سنتی، انرژی جنبشی جرم چرخشی واحدهای تولید برق سنتی نقش کلیدی در تأمین اینرسی شبکه و پایداری کلی شبکه برق ایفا می کند. مکانیسم کنترل فرکانس سنتی از سه مرحله متمایز تشکیل شده است: کنترل اینرسی، کنترل فرکانس اولیه و کنترل فرکانس ثانویه. از میان این مراحل، کنترل اینرسی به عنوان محافظ اولیه در برابر نوسانات تقاضا عمل می کند. به این ترتیب، اینرسی سیستم تعیین کننده سرعتی است که انرژی جنبشی یا توسط ریز شبکه جذب یا تأمین می شود. اینرسی سیستم سنتی با استفاده از تحلیل انرژی جنبشی آن ارزیابی می شود، همانطوری که در مراجع [۲۴؛ ۲۵؛ ۲۶] بیان شده است. این تحلیل نشان می دهد که چگونه انرژی جنبشی با ویژگی های دینامیکی ژنراتور سنکرون مرتبط است، که طبق معادلات زیر تعریف می شود.

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e = \frac{P_m}{\omega} - \frac{P_e}{\omega} \quad (7)$$

$$E_{KE} = \frac{1}{2} J \omega^2 \quad (8)$$

$$\omega = 2\pi f_0 \quad (9)$$

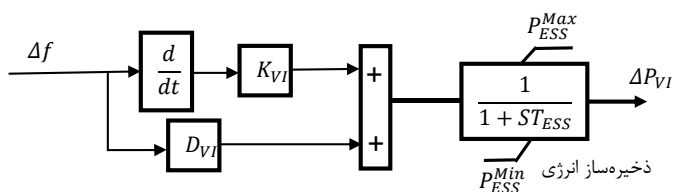
در این معادلات، J نمایانگر گشتاور اینرسی است، ω سرعت چرخشی روتور ژنراتور سنکرون را نشان می دهد و f_0 فرکانس اسمی را مشخص می کند. T_m گشتاور مکانیکی تولید شده توسط توربوژنراتور است، در حالی که T_e گشتاور الکتریکی را نشان می دهد. علاوه بر این، P_m توان مکانیکی تولید شده توسط ژنراتور و P_e

توان تولید شده را نشان می‌دهند. E_{KE} انرژی جنبشی ذخیره‌شده در جسم چرخشی است. معادله زیر همبستگی بین قدرت مکانیکی و الکتریکی را نمایان می‌کند.

$$P_m - P_e = \frac{dE_{KE}}{dt} = J\omega \frac{d\omega}{dt} \quad (10)$$

$$H = \frac{E_{KE}}{S} = \frac{J\omega^2}{2S} \quad (11)$$

که در آن H ثابت اینرسی برای تولید حرارتی و S توان نامی ژنراتور سنکرون است. در ریزشبکه‌های ایزوله، سناریوی متفاوتی پیش می‌آید. در اینجا، ادغام گسترده منابع انرژی تجدیدپذیر در ریزشبکه‌های با اینرسی پایین باعث کاهش اینرسی سیستم می‌شود. با گنجاندن VIC در سیستم ذخیره‌سازی انرژی، مقدار مناسبی از اینرسی به ریزشبکه تزریق خواهد شد و در نتیجه پایداری فرکانس شبکه افزایش می‌یابد. نمودار بلوکی ساختار دینامیکی VIC مبتنی بر تناسب و مشتق در شکل ۲ نشان داده شده است [۲۴؛ ۲۶]. قدرت تولید شده توسط بخش کنترل اینرسی مجازی به شرح زیر توصیف می‌شود.



شکل ۲. مکانیزم کنترل اینرسی مجازی.

$$\Delta P_{VI} = K_{VI} \left(d \frac{\Delta f}{dt} \right) + D_{VI} (\Delta f) \quad (12)$$

$$\Delta P_{VI} = [sK_{VI} + D_{VI}] \left[\frac{1}{1 + sT_{ESS}} \right] \Delta f \quad (13)$$

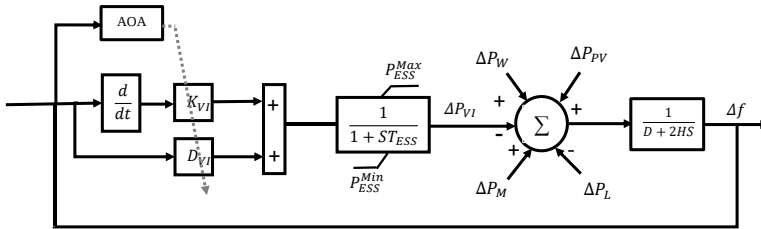
استراتژی کنترلی پیشنهادی

در این پژوهش، یک روش کنترلی نوین تحت عنوان ONPI معرفی شده و در حلقه VIC یکپارچه می‌شود. نتیجه این ترکیب، یک کنترل‌کننده VIC کارآمد با نام ONPIVIC است. چارچوب کنترلی پیشنهادی با هدف شبیه‌سازی اینرسی در ریز شبکه‌های جزیره‌ای با نفوذ بالای منابع انرژی تجدیدپذیر طراحی شده و بهبود پایداری ریز شبکه را دنبال می‌کند. علاوه بر این، برای مقایسه، سه استراتژی کنترلی جایگزین در مراجع [۲۴؛ ۲۵] نیز توسعه داده شده‌اند. در بخش‌های بعدی، به بررسی دقیق این سه رویکرد کنترلی پرداخته خواهد شد.

طراحی OVIC

با توجه به چالش‌های پایداری ناشی از انتخاب نادرست متغیرهای VIC، تنظیم دقیق این متغیرها می‌تواند به عنوان یک راهکار عملی، به‌طور قابل توجهی پایداری فرکانس ریز شبکه را پس از اختلالات ناشی از تغییرات تولید یا بار بهبود بخشد. در این بخش، بر کنترل‌کننده OVIC که در شکل ۳ نشان داده شده است، تمرکز خواهیم کرد. این کنترل‌کننده به منظور مدیریت سیستم ذخیره‌سازی انرژی مبتنی بر اینورتر طراحی شده است.

با در نظر گرفتن تابع هدف تعریف شده در معادله (۱۴) و بردار طراحی d_v^{OVIC} مربوط به کنترل کننده VI، مقادیر پارامترهای کنترلی آن شامل K_{VI} و D_{VI} تعیین خواهند شد. برای این منظور از الگوریتم AOA استفاده می شود که در ادامه مراحل آن بیان شده است.



شکل ۳. نمایش ساختار بلوکی OVIC پیشنهادی.

$$C_f(d_v^{OVIC}) = \int_{t=0}^{t_f} t |df| dt \quad (14)$$

$$d_v^{OVIC} = [K_{VI} D_{VI}]^T \quad (15)$$

مراحل اصلی الگوریتم بهینه سازی حسابی

الگوریتم بهینه سازی حسابی (AOA) به دلیل طراحی خلاقانه و انعطاف پذیری بالا، یکی از روش های بهینه سازی کارآمد در حل مسائل بهینه سازی است [۲۳]. نتایج مطالعات نشان می دهد که این الگوریتم در مقایسه با سایر روش های فراابتکاری، عملکردی رقابتی و مؤثر دارد و می تواند به عنوان یک روش جدید در حل مسائل مختلف بهینه سازی مورد استفاده قرار گیرد از این پژوهش از آن استفاده شده است.

در الگوریتم AOA موقعیت راه حل ها در هر مرحله بر اساس چهار عمل اصلی ریاضی یعنی جمع، تفریق، ضرب و تقسیم به روز رسانی می شود. این فرمول ها به دو بخش جستجوی گسترده و جستجوی محلی تقسیم می شوند. مراحل اصلی الگوریتم بهینه سازی حسابی عبارتند از:

گام اول مقداردهی اولیه: در ابتدا، جمعیت اولیه از راه حل های ممکن به صورت تصادفی در یک فضای جستجو تولید می شود:

$$X = \begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & \dots & x_{1,n} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & \dots & x_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{N,1} & x_{N,2} & \dots & x_{N,n} \end{bmatrix} \quad (16)$$

در رابطه بالا ماتریس X شامل N راه حل است. منظور از n تعداد متغیرهای هر راه حل و منظور از $x_{i,j}$ مقدار متغیر j ام در راه حل i ام است.

گام دوم محاسبه ضریب شتاب دهنده: ضریب محاسبه ضریب شتاب دهنده (MOA) برای کنترل میزان جستجوی گسترده و محلی استفاده می شود و مقدار آن در هر مرحله به روز رسانی می شود.

$$MOA(C_{iter}) = Min + C_{iter} \times \frac{(Max - Min)}{M_{iter}} \quad (17)$$

که در این رابطه منظور از C_{iter} شماره تکرار کنونی و M_{iter} حداکثر تعداد تکرارها بوده و Max و Min به ترتیب کمترین و بیشترین مقدار MOA هستند.

گام سوم فاز جستجوی گسترده: در مرحله فاز جستجوی گسترده (Exploration) الگوریتم از ضرب و تقسیم برای بررسی فضای جستجو استفاده می کند.

$$x_{i,j}(t+1) = \begin{cases} \frac{best(x_j)}{MOP + \epsilon} \times ((UB_j - LB_j) \times \mu + LB_j), & r_2 < 0.5 \\ best(x_j) \times MOP \times ((UB_j - LB_j) \times \mu + LB_j), & Otherwise \end{cases} \quad (18)$$

که در این رابطه $best(x_j)$ بهترین مقدار شناخته شده تاکنون برای متغیر μ و UB_j و LB_j به ترتیب حد بالایی و حد پایینی متغیر μ هستند. پارامتر μ یک پارامتر کنترلی است که معمولاً مقدار ۰.۵ انتخاب می شود. مقدار ϵ یک مقدار کوچک برای جلوگیری از تقسیم بر صفر می باشد. پارامتر MOP مقدار احتمالی عملکرد ریاضی است و طبق رابطه زیر محاسبه می شود.

$$MOP(C_{iter}) = 1 - \frac{C_{iter}^{1/\alpha}}{M_{iter}^{1/\alpha}} \quad (19)$$

که در آن α مقدار حساسیت تنظیم شدت جستجو است که معمولاً مقدار ۵ انتخاب می شود.

گام چهارم فاز جستجوی محلی: در فاز جستجوی محلی (Exploitation)، الگوریتم با استفاده از جمع و تفریق موقعیت راه حل ها را بهبود می بخشد. این رابطه همان متغیرهای مرحله قبل را دارد.

$$x_{i,j}(t+1) = \begin{cases} best(x_j) - MOP \times ((UB_j - LB_j) \times \mu + LB_j), & r_3 < 0.5 \\ best(x_j) + MOP \times ((UB_j - LB_j) \times \mu + LB_j), & Otherwise \end{cases} \quad (20)$$

گام پنجم شرط توقف: الگوریتم تا زمانی که یکی از شرایط رسیدن به حداکثر تعداد تکرارها یا عدم تغییر محسوس در مقدار تابع هدف برقرار شود، ادامه پیدا می کند. در این پژوهش حداکثر تکرار برای تمامی حالات برابر ۵۰ تکرار انتخاب شده است.

کنترل کننده PI غیرخطی و ساختار آن

کنترل کننده تناسبی-انتگرالی (PI) یکی از پرکاربردترین روش های کنترلی در سیستم های دینامیکی است. با این حال، در سیستم های دارای رفتار غیرخطی، کنترل کننده های PI خطی ممکن است پاسخگویی مناسبی نداشته باشند. از این رو، کنترل کننده های PI غیرخطی توسعه یافته اند تا عملکرد سیستم را در مواجهه با تغییرات دینامیکی، اغتشاشات و عدم قطعیت ها بهبود بخشند.

در ساختار کنترل کننده PI غیرخطی پیشنهادی خروجی کنترل کننده مورد بررسی به صورت زیر تعریف می شود.

$$U(t) = \varphi(e(t)) \left(K_P e(t) + K_I \int e(t) dt \right) \quad (21)$$

در این معادله K_P و K_I به ترتیب ضرایب تناسبی و انتگرالی هستند و $\varphi(e(t))$ یک تابع غیرخطی است که میزان تأثیر کنترل کننده را بر اساس مقدار خطا تغییر می دهد. این تابع به صورت زیر تعریف شده است.

$$\varphi(e(t)) = |(1 - K_n)e(t)| + K_n \quad (22)$$

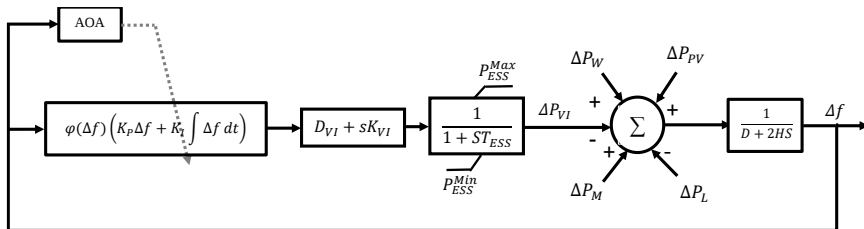
تابع غیرخطی $\varphi(e(t))$ یک ضریب تطبیقی است که میزان تأثیر کنترل را نسبت به مقدار خطا تنظیم می‌کند. مقدار $0 \leq K_n \leq 1$ تعیین‌کننده حداقل میزان تقویت سیگنال کنترلی است.

طراحی ساختار کنترلی اینرسی پیشنهادی

در این تحقیق، یک کنترل‌کننده PI غیر خطی به حلقه VIC اضافه شده است تا پایداری ریز شبکه را بهبود بخشد. این رویکرد به نام ONPIVIC شناخته می‌شود و در شکل ۴ نشان داده شده است. با این حال، در استفاده از VIC برای سیستم‌های ذخیره سازی انرژی مبتنی بر اینورتر، انتخاب نادرست مقادیر کنترل‌کننده تکمیلی که در اینجا کنترل‌کننده PI غیر خطی است، می‌تواند منجر به انحرافات فرکانسی بیشتر، زمان‌های بازپایی کندتر و ناپایداری شود. برای حل این مشکل، در این بخش از الگوریتم AOA استفاده می‌کنیم تا تنظیمات دقیق‌تری برای کنترل‌کننده ایجاد کنیم و از این طریق گین‌های مناسب را به‌طور خودکار تنظیم کنیم تا نیروی اینرسی موثر را شبیه‌سازی کرده و پایداری فرکانسی سیستم را بهبود بخشیم. با در نظر گرفتن تابع هزینه که در معادله (۲۳) توصیف شده است و بردار طراحی d_v^{ONPIVIC} برای ONPIVIC، پارامترهای آن را طراحی خواهیم کرد. شایان ذکر است که پارامترهای K_{VI} و D_{VI} مانند آنچه در طراحی OVIC استفاده شده‌اند، ثابت باقی می‌مانند و همان پارامترهای مورد استفاده در طراحی OVIC (که در شکل ۳ نشان داده شده است) باقی می‌مانند.

$$C_f(d_v^{\text{ONPIVIC}}) = \int_{t=0}^{t_f} (\Delta f)^2 dt \quad (23)$$

$$d_v^{\text{ONPIVIC}} = [K_n \ K_p \ K_I]^T \quad (24)$$



شکل ۴. نمودار بلوکی ONPIVIC پیشنهادی.

شبیه‌سازی و بحث

در این بخش، نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی حالت‌های عملیاتی مختلف سیستم مورد بررسی قرار می‌گیرد. سیستم آزمایش شده در شکل ۱ نشان داده شده است که شامل منابع مختلف انرژی تجدیدپذیر به همراه دو نوع بار صنعتی-تجاری و مسکونی است که به‌عنوان منابع اغتشاش عمل می‌کنند. علاوه بر این، ارزیابی جامع کارایی کنترل‌کننده شامل بررسی پنج سناریو مختلف است که تغییرات غیرمنتظره در تقاضای برق و تولید در حالت ایزوله را مد نظر قرار می‌دهد. ارزیابی و اعتبارسنجی عملکرد سیستم از طریق استفاده از انحراف فرکانس، که به‌عنوان Δf نشان داده می‌شود، انجام می‌شود. دینامیک سیستم‌های قدرت معمولاً با استفاده از شاخص‌های عملکردی همچون IAE، ITAE، US و OS ارزیابی می‌شوند که در مطالعات دینامیک سیستم‌های قدرت به‌طور گسترده استفاده شده‌اند. برای بهبود پایداری در حضور منابع انرژی تجدیدپذیر و

بارهای متغیر، از کنترل کننده ONPIVIC استفاده شده است. این کنترل کننده به طور دقیق در هر مرحله زمانی، پارامترهای کنترل کننده را محاسبه می کند. از الگوریتم AOA برای تعیین بهینه پارامترهای OVIC و ONPIVIC استفاده می شود. متغیرهای AOA با استفاده از تعداد جمعیت ۱۰۰ و تعداد تکرار ۵۰ تنظیم می شوند. معیار توقف به رسیدن به آخرین تکرار و محدوده تعریف با تست های مختلف برای متغیرهای روش پیشنهادی به شرح زیر تعریف می شوند.

$$\begin{aligned} 0 &\leq K_{VI} \leq 5 \\ 0 &\leq D_{VI} \leq 5 \\ 0 &\leq K_n \leq 1 \\ 0 &\leq K_P \leq 200 \\ 0 &\leq K_I \leq 200 \end{aligned} \quad (25)$$

نتایج جدول ۱ مقادیر پارامترهای OVIC و ONPIVIC و VIC سنتی در مراجع [۲۴؛ ۲۵؛ ۲۶] را نشان می دهند. مقادیر بهینه پارامترها برای کنترل کننده پیشنهادی ONPIVIC نیز در این جدول گزارش شده است. مقایسه ای دقیق از این کنترل کننده ها را در پنج سناریوی مختلف ارائه می شود. سناریو اول شامل ارزیابی تأثیر نوسانات تصادفی بارهای صنعتی است. در این سناریو، پیامدهای تغییرات تصادفی در بارهای صنعتی مورد بررسی قرار می گیرد.

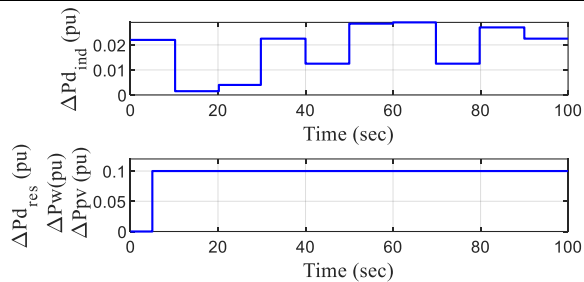
جدول ۱. پارامترهای بهینه کنترل کننده های بهینه طراحی شده.

	K_n	K_P	K_I	K_{VI}	D_{VI}
Without VIC	-	-	-	-	-
Conventional VIC	-	-	-	۰/۵۰	-
OVIC	-	-	-	۴/۳۷۷	۴/۲۱۰
PIVIC	-	۱۱۳/۶۶۳	۱۲۲/۱۴۰	۳/۷۱۰	۴/۷۹۴
ONPIVIC	۰/۷۸۵	۲۶۵/۹۱۵	۲۹۶/۴۲۳	۴/۳۷۷	۴/۲۱۰

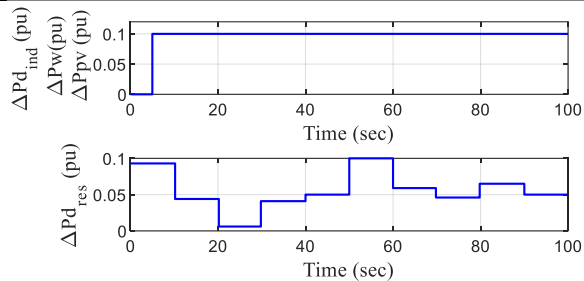
ریز شبکه تحت آزمایش، تغییرات پله ای بارهای صنعتی را تجربه می کند که در بالای شکل ۵ قسمت ۱ نمایش داده شده است. سناریو دوم شامل ارزیابی تأثیر نوسانات تصادفی بار مسکونی می باشد. در این سناریو، تأثیر تغییرات تصادفی در بار مسکونی با اعمال ورودی های پله ای بار به ریز شبکه، مطابق شکل ۵ قسمت ۲، مورد بررسی قرار می گیرد. سناریو سوم شامل ارزیابی تأثیر تغییرات تصادفی در تولید توربین بادی است. در این سناریو، پیامدهای تغییرات تصادفی در تولید برق بادی در ریز شبکه، مطابق شکل ۵ قسمت ۳، مورد بررسی قرار می گیرد. سناریو چهارم شامل ارزیابی تأثیر تغییرات تصادفی در تولید نیروگاه فتوولتائیک است. در این سناریو، تأثیر تغییرات تصادفی در تولید فتوولتائیک در ریز شبکه، مطابق شکل ۵ قسمت ۴، بررسی می شود. سناریو پنجم به بررسی شرایط شدید با تغییرات همزمان در بار و تولید تصادفی اختصاص دارد. در این سناریو، عملکرد ریز شبکه تحت شرایط سخت تر بررسی شده و تأثیر تغییرات تصادفی همزمان در تولید و بار مطابق شکل ۵ قسمت ۵، ارزیابی می شود. تغییرات پله ای در بار و تولید در این سناریو اعمال می شود.

پاسخ های دینامیکی مربوط به انحراف فرکانس به صورت گرافیکی برای هر پنج سناریو بصورت گرافیکی در شکل ۶ ارائه شده است. جدول ۲ بیانگر مقادیر دقیق شاخص های عملکردی استراتژی های VIC سنتی، OVIC و PIVIC کنترل کننده پیشنهادی ONPIVIC برای ریز شبکه مورد مطالعه می باشد.

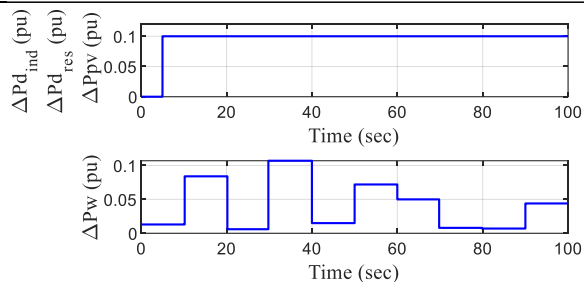
۱)



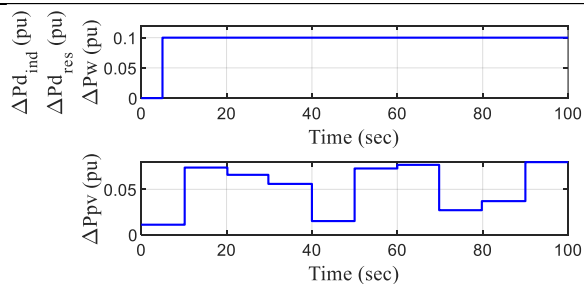
۲)



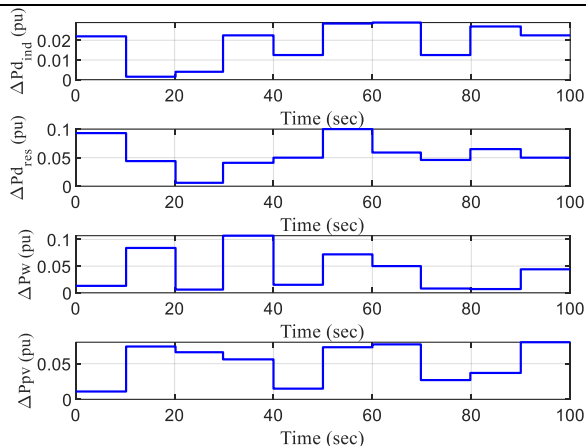
۳)



۴)

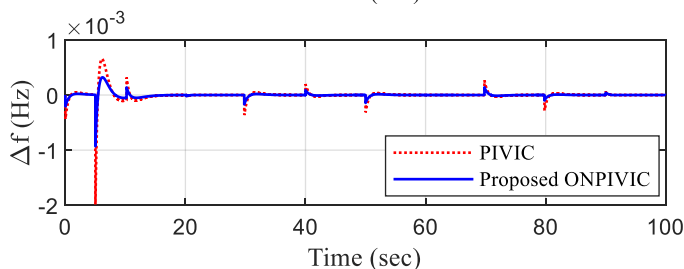
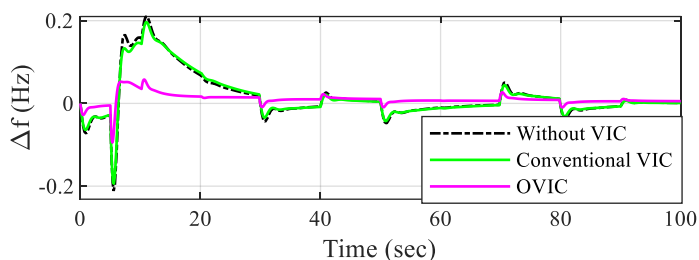


۵)

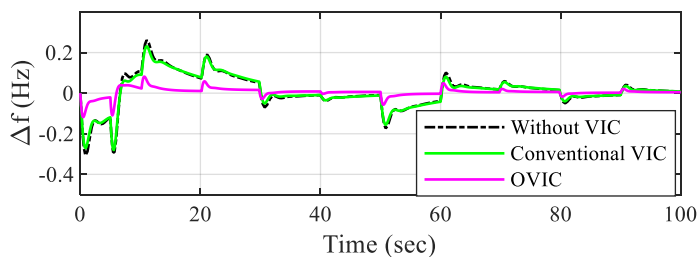


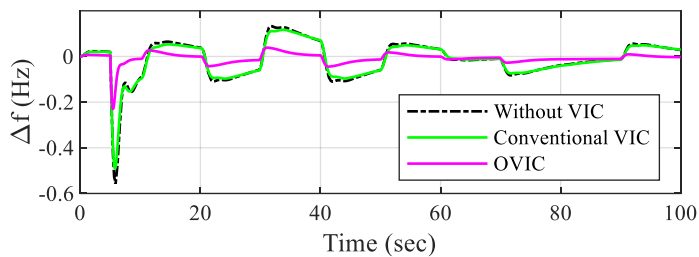
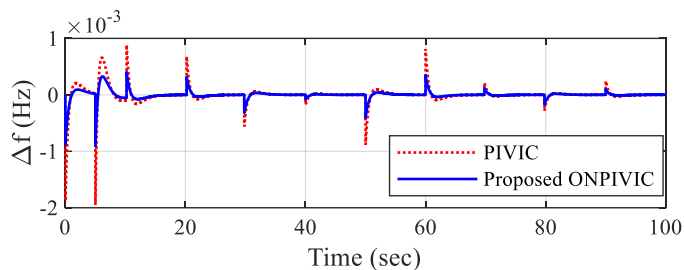
شکل ۵. نمودار گرافیکی (۱) تغییرات پله‌ای بار صنعتی اعمال شده به ریزشکبه تحت بررسی در سناریو اول، (۲) تغییرات پله‌ای بار مسکونی اعمال شده در سناریو دوم، (۳) تغییرات پله‌ای در تولید توربین بادی در سناریو سوم، (۴) تغییرات پله‌ای در تولید نیروگاه فتوولتائیک در سناریو چهارم، (۵) تغییرات پله‌ای در تغییرات همزمان در بار و تولید تصادفی در ریزشکبه تحت بررسی در سناریو پنجم.

۱)

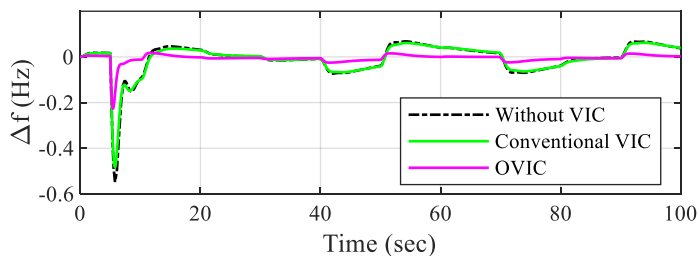
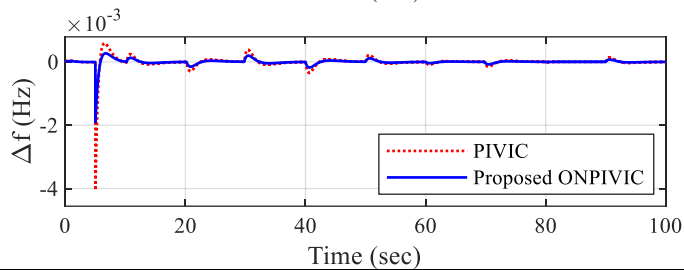


۲)

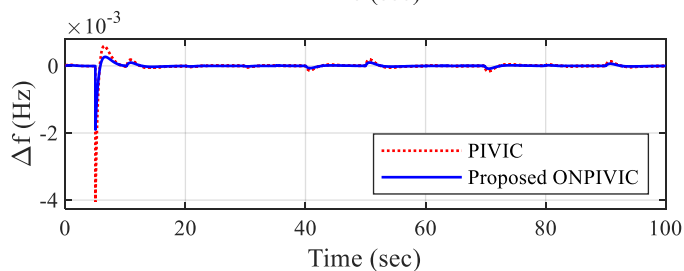


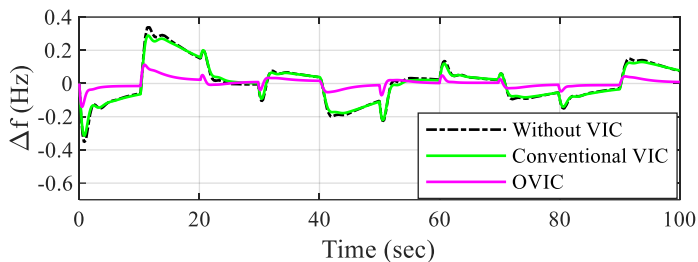


۳)

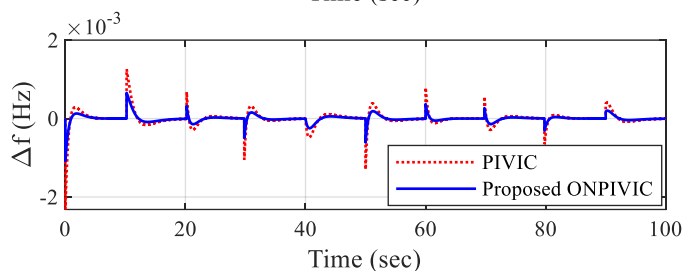


۴)





۵)



شکل ۶. عملکرد استراتژی‌های کنترلی مختلف برای ریز شبکه در (۱) سناریو اول، (۲) سناریو دوم، (۳) سناریو سوم، (۴) سناریو چهارم، (۵) سناریو پنجم.

جدول ۲. مقایسه عملکرد VIC سنتی، OVIC، PIVIC و کنترل‌کننده پیشنهاد ONPIVIC برای ریز شبکه در هر پنج سناریو.

معیار	Without VIC	Conventional VIC	OVIC	PIVIC	Proposed ONPIVIC
سناریو اول					
IAE	۳/۴۴۳	۳/۳۲۷	۱/۲۵۲	۰/۰۰۲۹	۰/۰۰۱۵
ITAE	۸۷/۰۳۹	۸۴/۱۵۳	۴۳/۴۶۱	۰/۰۵۸۶	۰/۰۳۱۷
OS	۰/۲۱۰	۰/۱۹۶	۰/۰۵۷۲	۰/۰۰۰۶۵	۰/۰۰۰۳۲
US	-۰/۲۱۱	-۰/۱۹۴	-۰/۰۹۴۰	-۰/۰۰۱۹۸	-۰/۰۰۰۹۳
سناریو دوم					
IAE	۵/۹۵۵	۵/۶۴۵	۱/۴۱۵	۰/۰۰۵۶	۰/۰۰۲۹
ITAE	۱۷۹/۷۴۷	۱۷۱/۷۳۲	۴۳/۳۲۰	۰/۱۳۵۱	۰/۰۷۱۴
OS	۰/۲۶۱	۰/۲۳۱	۰/۰۸۱۴	۰/۰۰۰۸۸	۰/۰۰۰۴۰
US	-۰/۳۰۷	-۰/۲۸۰	-۰/۱۱۸	-۰/۰۰۱۹۵	-۰/۰۰۰۹۱
سناریو سوم					
IAE	۶/۲۲۱	۵/۷۸۶	۱/۵۷۲	۰/۰۰۶۴	۰/۰۰۳۴
ITAE	۲۴۵/۷۸۶	۲۳۲/۲۲۷	۶۱/۸۷۱	۰/۱۸۰۸	۰/۱۰۰۵
OS	-۰/۱۳۳	۰/۱۱۷	۰/۰۳۸۸	۰/۰۰۰۵۹	۰/۰۰۰۲۷
US	-۰/۵۵۷	-۰/۴۹۰	-۰/۲۳۰	-۰/۰۰۴۱	-۰/۰۰۱۹
سناریو چهارم					

IAE	۴/۳۰۹	۴/۰۸۰	۱/۰۲۷	۰/۰۴۳	۰/۰۰۲۲
ITAE	۱۹۱/۴۱۴	۱۸۴/۹۹۴	۴۱/۸۸۴	۰/۱۲۰۱	۰/۰۶۳۵
OS	۰/۰۶۷۹	۰/۰۶۲۲	۰/۰۱۷۶	۰/۰۰۰۵۹	۰/۰۰۰۲۷
US	-۰/۵۴۷۷	-۰/۴۸۳۴	-۰/۲۲۶۹	-۰/۰۰۴۰	-۰/۰۰۱۸
سناریو پنجم					
IAE	۹/۵۱۱	۹/۰۹۹	۲/۱۸۳۴	۰/۰۰۸۷	۰/۰۰۴۶
ITAE	۴۰۴/۷۶۲	۳۸۶/۷۰۷۸	۸۹/۰۴۳۱	۰/۳۳۶۳	۰/۱۸۱
OS	۰/۳۳۸	۰/۲۸۸	۰/۱۱۳	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۰۶
US	-۰/۳۵۳	-۰/۳۱۴	-۰/۱۴۱	-۰/۰۰۲۳	-۰/۰۰۱۱

تحلیل مقایسه‌ای مطابق جدول ۲ میان کنترل کننده پیشنهادی ONPVIC و سایر روش‌های کنترلی از جمله VIC سنتی، OVIC و PIVIC نشان می‌دهد که در تمامی شاخص‌ها، عملکرد بهتری از خود نشان داده است. به عنوان نمونه برای سناریو اول، شاخص IAE کنترل کننده ONPVIC پیشنهادی به اندازه ۴۸٪، ۹۸٪ و ۹۹٪ نسبت به پاسخ کنترل کننده‌های VIC سنتی، OVIC، PIVIC کاهش پیدا کرده است.

برای سناریو دوم، شاخص ITAE کنترل کننده ONPVIC پیشنهادی به اندازه ۴۷٪ نسبت به پاسخ کنترل کننده PIVIC کاهش پیدا کرده است. به عنوان نمونه برای سناریو سوم، شاخص OS کنترل کننده ONPVIC پیشنهادی به اندازه ۵۴٪ نسبت به پاسخ کنترل کننده PIVIC کاهش پیدا کرده است. به عنوان نمونه برای سناریو چهارم، شاخص US کنترل کننده ONPVIC پیشنهادی به اندازه ۵۳٪ نسبت به پاسخ کنترل کننده PIVIC کاهش پیدا کرده است. به عنوان نمونه برای سناریو پنجم، شاخص ITAE کنترل کننده ONPVIC پیشنهادی به اندازه ۴۶٪ نسبت به پاسخ کنترل کننده PIVIC کاهش پیدا کرده است. یافته‌های ارائه شده بر کارایی بالای ONPVIC در کاربردهای کنترل VI تأکید دارند.

نتیجه‌گیری

در شرایطی که میزان نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر در حال افزایش است، حفظ پایداری ریزشکه‌هایی که دارای اینرسی چرخشی کم هستند، به یک چالش اساسی تبدیل شده است. در سیستم‌های سنتی، پارامترهای کنترل کننده معمولاً مقدار ثابتی دارند، که این امر تأثیر عمیقی بر پایداری فرکانسی ریزشکه دارد. علاوه بر این، انتخاب نامناسب پارامترهای کنترل کننده اینرسی مجازی یا کنترل کننده‌های مکمل با پارامترهای ثابت می‌تواند منجر به نوسانات ناخواسته در فرکانس و رفتار ناپایدار شود. در نتیجه، استفاده از روش‌های کنترلی مبتنی بر اینرسی مجازی ضروری است. در این مقاله، یک استراتژی کنترلی نوآورانه برای ریزشکه‌های جزیره‌ای ارائه شده است که از کنترل کننده PI غیر خطی در حلقه VIC استفاده می‌کند. این روش جدید، که تحت عنوان ONPVIC معرفی گردید، با استفاده همزمان اینرسی مجازی و میرایی مجازی، به طور قابل توجهی اینرسی سیستم، میرایی و پایداری فرکانسی را بهبود می‌بخشد. الگوریتم بهینه‌سازی حسابی برای تنظیم بهینه پارامترهای روش پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفت. برای مقایسه، دو طراحی کنترلی جایگزین با نام‌های OVIC و PIVIC نیز استفاده شدند. ارزیابی جامع استراتژی پیشنهادی ONPVIC در سناریوهای مختلف بار

و عدم قطعیت‌های ناشی از رفتار متغیر منابع انرژی تجدیدپذیر نشان می‌دهد که این روش نسبت به سایر روش‌های کنترلی برتری دارد. به‌عنوان نمونه در کلیه سناریو ها، نتایج کنترل‌کننده پیشنهادی ONPVIC کاهش چشمگیری را در مقایسه با استراتژی کنترلی PIVIC در شاخص‌های IAE و ITAE به طور میانگین ۴۷٪ و برای سایر روش‌ها بهبود حدود ۹۰٪ را ایجاد کرده است. به‌طور کلی، نتایج این مقاله نشان می‌دهد که چارچوب کنترلی پیشنهادی تأثیر قابل‌توجهی در بهبود پایداری و تنظیم فرکانس ریز شبکه‌های مستقل دارد. به منظور پیشنهاد کارهای آینده، از آنجا که زیرساخت‌های ذخیره‌سازی انرژی، به‌ویژه ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی، به سرعت در حال گسترش‌اند، می‌توان از این تجهیزات به‌عنوان منابع بالقوه اینرسی و میرایی مجازی بهره گرفت. لذا در راستای توسعه آینده این پژوهش، پیشنهاد می‌شود نقش خودروهای برقی و ایستگاه‌های شارژ به‌عنوان عناصر فعال در تأمین اینرسی، در ساختار کنترلی پیشنهادی بررسی گردد.

References

- [1] Abdelghany, M. B., Mariani, V., Liuzza, D., & Glielmo, L. (2024). Hierarchical model predictive control for islanded and grid-connected microgrids with wind generation and hydrogen energy storage systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 51, 595-610. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.08.056>
- [2] Abbasi, S. M., Nafar, M., & Simab, M. (2021). Decentralized Control of Bidirectional Converters in a Grid-connected DC Microgrid to Increase System Stability Using a Genetic-Neural Algorithm. *Karafan Journal*, 18(3), 187-205. <https://doi.org/10.48301/kssa.2021.261332.1319>. (In Persian)
- [3] Taheri, N., Akbari, E., Askari, N., Ahmad Tajik, V., Orojlo, H., Kazemi, M. A., & Ghasemi, G. (2022). Supplementary damping controllers design in vsc hvdc systems and wind farms to improve stability and energy conversion in wind turbine using proposed genetic-bat algorithm. *Karafan Journal*, 19(1), 357-382. <https://doi.org/10.48301/kssa.2022.293314.1603>. (In Persian)
- [4] Hemmatpour, M. H., & Bahreini, M. (2024). Optimum Placement of Electric Vehicle Battery Replacement Stations for Energy Management of Distribution Networks in the Presence of Renewable Energy Sources. *Karafan Journal*, 21(1), 217-239. <https://doi.org/10.48301/kssa.2023.402164.2600>. (In Persian)
- [5] Wang, H., Wang, M., Cheng, Q., Lv, S., & Ji, X. (2022). Modeling simulation and inverter control strategy research of microgrid in grid-connected and island mode. *Energy Reports*, 8, 206-218. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.09.117>.
- [6] Saleem, M. I., & Saha, S. (2024). Assessment of frequency stability and required inertial support for power grids with high penetration of renewable energy sources. *Electric Power Systems Research*, 229, 110184. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.110184>.
- [7] Hamanah, W. M., Shafiullah, M., Alhems, L. M., Alam, M. S., & Abido, M. A. (2024). Realization of Robust Frequency Stability in Low-Inertia Islanded Microgrids with Optimized Virtual Inertia Control. *IEEE Access*. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3391890>.
- [8] Kumari, P., & Kumar, R. (2025). Adaptive virtual inertia-based optimal enhancement of micro-grid dynamics with integrated renewable energy sources. *International Journal of Ambient Energy*, 46(1), 2456762. <https://doi.org/10.1080/01430750.2025.2456762>.
- [9] Amiri, F., & Moradi, M. (2020). Designing a new robust control for virtual inertia control in the microgrid with regard to virtual damping. *Journal of Electrical and Computer*

- Engineering Innovations (JECEI), 8(1), 53-70.
<https://doi.org/10.22061/jecei.2020.6913.347>.
- [10] Cheema, K. M., Chaudhary, N. I., Tahir, M. F., Mehmood, K., Mudassir, M., Kamran, M., ... & Elbarbary, Z. S. (2022). Virtual synchronous generator: Modifications, stability assessment and future applications. *Energy Reports*, 8, 1704-1717.
<https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.12.064>.
- [11] Fregelius, M., & Lundin, U. (2023). Performance evaluation of a supercapacitor based synthetic inertia system using frequency locked loop and real time frequency derivative estimation. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 144, 108554.
<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108554>.
- [12] Debanjan, M., & Karuna, K. (2022). An overview of renewable energy scenario in India and its impact on grid inertia and frequency response. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 168, 112842. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112842>
- [13] Jafari, M., Gharehpetian, G. B., & Anvari-Moghaddam, A. (2024). On the Role of Virtual Inertia Units in Modern Power Systems: A Review of Control Strategies, Applications and Recent Developments. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 159, 110067. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2024.110067>.
- [14] Awda, Y., & Alowaiifeer, M. (2024). Adaptive optimization of virtual synchronous generator based on fuzzy logic control and differential evolution. *Ain Shams Engineering Journal*, 15(4), 102606. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102606>.
- [15] Oshnoei, S., Aghamohammadi, M. R., Oshnoei, S., Sahoo, S., Fathollahi, A., & Khooban, M. H. (2023). A novel virtual inertia control strategy for frequency regulation of islanded microgrid using two-layer multiple model predictive control. *Applied Energy*, 343, 121233. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121233>.
- [16] Amiri, F. (2025). Designing a robust method to improve virtual inertia control performance in islanded microgrid. *AUT Journal of Electrical Engineering*.
<https://doi.org/10.22060/eej.2025.23655.5628>.
- [17] Afifi, M. A., Marei, M. I., & Mohamad, A. M. (2024). Reinforcement-Learning-Based Virtual Inertia Controller for Frequency Support in Islanded Microgrids. *Technologies*, 12(3), 39. <https://doi.org/10.3390/technologies12030039>.
- [18] Vijayan, M., Udumula, R. R., Mahto, T., Lokeshgupta, B., Goud, B. S., Kalyan, C. N. S., ... & Twala, B. (2022). Optimal pi-controller-based hybrid energy storage system in dc microgrid. *Sustainability*, 14(22), 14666. <https://doi.org/10.3390/su142214666>.
- [19] Elshenawy, M., Fahmy, A., Elsamahy, A., Kandil, S. A., & El Zoghby, H. M. (2022). Optimal power management of interconnected microgrids using virtual inertia control technique. *Energies*, 15(19), 7026. <https://doi.org/10.3390/en15197026>.
- [20] Saxena, P., Singh, N., & Pandey, A. K. (2022). Enhancing the transient performance and dynamic stability of microgrid using PI inertia injection controller. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 134, 107334.
<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107334>.
- [21] Song, Y. D. (2018). Control of nonlinear systems via PI, PD and PID: Stability and performance. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429455070>.
- [22] Akbari, M., Zamani, A. A., Seifi, M., Pantò, B., Falborski, T., & Jankowski, R. (2025). An optimal nonlinear fractional order controller for passive/active base isolation building equipped with friction-tuned mass dampers. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 140, 108405.
<https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2024.108405>.

- [23] Abualigah, L., Diabat, A., Mirjalili, S., Abd Elaziz, M., & Gandomi, A. H. (2021). The arithmetic optimization algorithm. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 376, 113609. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2020.113609>.
- [24] Mandal, R., & Chatterjee, K. (2021). Virtual inertia emulation and RoCoF control of a microgrid with high renewable power penetration. *Electric Power Systems Research*, 194, 107093. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107093>.
- [25] Magdy, G., Shabib, G., Elbaset, A. A., & Mitani, Y. (2019). A novel coordination scheme of virtual inertia control and digital protection for microgrid dynamic security considering high renewable energy penetration. *IET Renewable Power Generation*, 13(3), 462-474. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2018.5513>.
- [26] Safiullah and Hote, Y. V. (2024). Enhancement of virtual inertia via delay designed GADRC in hybrid microgrid with communication delay. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 39, 101411. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2024.101411>.