

Analysis and Simulation of Small Signal Model of Virtual Synchronous Generator in Microgrid System

Ghazanfar Shahgholian^{1,2*}  | Mohammadreza Moradian^{1,2}  | S. Mohammadali Zanjani^{1,2} 

¹Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.
shahgholian@iau.ac.ir

²Smart Microgrid Research Center, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.
moradian@iau.ac.ir
smazanjani@iau.ac.ir

Correspondence

Ghazanfar Shahgholian, Professor of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.
Email: shahgholian@iau.ac.ir

Main Subjects:
Microgrid system

Paper History:

Received: 27 December 2024

Revised: 2 February 2025

Accepted: 8 February 2025

Abstract

Microgrids based on distributed generation sources are connected to the main power grid through power electronic converters that have low mechanical inertia and damping, so the dynamic characteristics of the power system must be improved simultaneously with the integration of renewable energy sources for stability. Virtual synchronous generators are one of the effective methods for integrating renewable energy systems into the power grid. In order to have a behavior similar to that of a real synchronous generator when changed or disturbed by a virtual synchronous generator, the control operation is performed in the power electronic converter of the distributed generation unit. In this paper, the characteristics of two droop methods and a virtual synchronous generator for controlling active and reactive powers are compared using the small signal model and the state space model. The evaluation between these two different control strategies is performed using simulation results in the MATLAB environment. Also, the characteristics of the synchronous generator due to changes in the moment of inertia and damping coefficient are shown. Integrating the virtual synchronous generator in the microgrid, in addition to reducing frequency and voltage deviations, also improves stability.

Keywords: Inverter, Oscillation equation, Small signal, Synchronous generator, Virtual inertia.

Highlights

- Study of attenuation reduction of power electronic converters in the network.
- Comparison of droop control method with virtual synchronous generator technique.
- Determination of small signal model of virtual synchronous generator connected to infinite bus.
- Comparison of response speed for load changes of two control methods.

Citation: G. Shahgholian, M. Moradian, and S.M.A. Zanjani, "Analysis and Simulation of Small Signal Model of Virtual Synchronous Generator in Microgrid System," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 14, no. 55, pp. 21–35, 2025, doi:10.30495/jce.2025.1993480.1331 [in Persian].

COPYRIGHTS

©2025 by the authors. Published by the Islamic Azad University Bushehr Branch. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>



1. Introduction

Environmental problems have caused the power industry to move towards the use of green and low-carbon energy and the reduction of greenhouse gases, so a larger share of the power system has been allocated to renewable energy sources. The energy crisis and environmental pollution have led to the penetration of renewable energies such as photovoltaic systems and wind turbines in the power system. The transformation of the global energy structure, along with the rapid development of energy technologies, has increased the proportion of electricity generation due to the advantages of renewable energy production such as flexible distribution and economic benefits. It is possible to set up power plants near load centers using renewable energy sources in a dispersed manner. Given the many advantages of using renewable energy, their integration into the power system will reduce inertia and affect the stability of the system due to the lack of mechanical rotating components and their non-adjustable nature. Also, the unpredictability and fluctuations of renewable energy sources in the network will be challenging, which is why microgrids are used as a solution to overcome these limitations [1,2]. Microgrids are considered a suitable solution for integrating renewable energy sources, for energy availability in remote locations, as well as ensuring improved flexibility and increased system reliability. Voltage source converters or inverters are usually the interface between energy storage systems, distributed generators and loads. The limited capacity of converters makes it possible to operate a number of them in parallel, forming a microgrid [3,4].

2. Innovation and contributions

The use of power electronic converters increases the generation but leads to a lack of inertia and reduced damping of the power system and reduces the ability of the power system to withstand disturbances. The droop control and virtual synchronous generator control methods can be used in the voltage source inverter. In this paper, by presenting a small signal model, the two above methods are compared in terms of response speed to load changes. The simulation results show the angular velocity changes and active power changes of the inverter output for step changes in the input. Among the innovations of this paper, the following can be stated:

- Study of attenuation reduction of power electronic converters in the network.
- Comparison of droop control method with virtual synchronous generator technique.
- Determination of small signal model of virtual synchronous generator connected to infinite bus.
- Comparison of response speed for load changes of two control methods.

3. Materials and Methods

Virtual synchronous generators (VSG) are similar to a generating unit with a power electronic converter that has similar dynamic behavior and characteristics to synchronous generators, which are used as one of the effective methods for integrating renewable energy sources into the power grid due to their ability [5,6]. Droop control is one of the applied methods for controlling converters in microgrids and virtual synchronous generator is an alternative way. Virtual synchronous generator is an inverter-based control method applied in distributed generation unit and has a behavior similar to synchronous machine in order to support power system stability [7,8]. The main purpose of using virtual synchronous generator technique is to improve power system stability. Energy storage in conventional synchronous generators is mechanical, but in virtual synchronous generator, energy is stored electrically using inverter. In a real synchronous machine, the damping factor and the moment of inertia are constant, but by controlling with the oscillation equation, the dynamic characteristics of the virtual synchronous generator can be adjusted according to the system requirements [9,10].

4. Results and Discussion

In order to maintain the frequency while reducing the equivalent grid inertia due to the increase in the penetration of renewable energy in the grid, a virtual synchronous generator control scheme is used.

5. Conclusion

The rapid expansion of microgrids and the increasing penetration of renewable energy sources using power electronic converters due to the absence of arbiter mass that has low inertia has reduced the inertia of the entire system and affected the stability. One of the practical techniques to overcome the problem of lack of inertia in renewable power systems is the use of virtual synchronous generator, which plays an important role in the production of renewable resources due to its various advantages. Virtual synchronous generator is one of the simplest methods for applying virtual inertia in the power system, which has been studied and simulated in this paper. Simulating the inertia and rotor droop by an inverter similar to a conventional synchronous generator causes the control of the virtual synchronous generator to have better frequency support than droop control. The simulation results have shown the effect of the control scheme of the virtual synchronous generator compared to droop control.

6. Acknowledgement

We would like to thank the esteemed reviewers of the article who guided us in increasing the quality of the article. We also express our appreciation and gratitude to the esteemed editor and the executive staff of the journal.

References

- [1] J. Song, X. Zhou, Z. Zhou, Y. Wang, Y. Wang and X. Wang, "Review of low inertia in power systems caused by high proportion of renewable energy grid integration," *Energies*, vol. 16, no. 16, Article Number: 6042, Aug. 2023, doi:[10.3390/en16166042](https://doi.org/10.3390/en16166042).
- [2] F. Mesrinejad, S. Yaghoubi and B. Fani, "Secondary frequency control for improved dynamic performance in interconnected power system," *Journal of Simulation and Analysis of Novel Technologies in Mechanical Engineering*, vol. 14, no. 3, pp. 47-54, Sept. 2022, dor: 20.1001.1.27834441.2022.14.3.5.9.
- [3] Y. Du, J. M. Guerrero, L. Chang, J. Su and M. Mao, "Modeling, analysis, and design of a frequency-droop-based virtual synchronous generator for microgrid applications," *Proceeding of the IEEE/ECCE*, pp. 643-649, Melbourne, VIC, Australia, June 2013, doi: [10.1109/ECCE-Asia.2013.6579167](https://doi.org/10.1109/ECCE-Asia.2013.6579167).
- [4] M. Mahdavian, G. Shahgholian, M. Janghorbani, B. Soltani and N. Wattanapongsakorn, "Load frequency control in power system with hydro turbine under various conditions," *Proceeding of the IEEE/ECTICON*, pp. 1-5, Hua Hin, Thailand, June 2015, doi: [10.1109/ECTICON.2015.7206938](https://doi.org/10.1109/ECTICON.2015.7206938).
- [5] M. Cheng, W. Yan, D. Zhang, X. Liu, L. He, M. Xu and Q. Yao, "Frequency stability of new energy power systems based on VSG adaptive energy storage coordinated control strategy," *Energy Informatics*, vol. 7, Article Number: 54, July 2024, doi: [10.1186/s42162-024-00359-7](https://doi.org/10.1186/s42162-024-00359-7).
- [6] C. Citro, M. Al-Numay and P. Siano, "Extensive assessment of virtual synchronous generators in intentional island mode", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 157, Article Number: 109853, June 2024, doi: [10.1016/j.ijepes.2024.109853](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2024.109853).
- [7] H.U. Rehman, X. Yan, M.A. Abdelbaky, M.U. Jan and S. Iqbal, "An advanced virtual synchronous generator control technique for frequency regulation of grid-connected PV system", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 125, Article Number: 106440, Feb. 2021, doi: [10.1016/j.ijepes.2020.106440](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106440).
- [8] G. Shahgholian, B. Fani, B. Keyvani, H. Karimi and M. Moazzami, "An improve in the rea-ctive power sharing by uses to modify droop characteristics in autonomous microgrids," *Energy Engineering and Management*, vol. 9, no. 3, pp. 64-71, Oct. 2019, doi: [10.22052/9.3.64](https://doi.org/10.22052/9.3.64).
- [9] J. Alipoor, Y. Miura and T. Ise, "Power system stabilization using virtual synchronous generator with alternating moment of inertia," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 3, no. 2, pp. 451-458, June 2015, doi: [10.1109/JESTPE.2014.2362530](https://doi.org/10.1109/JESTPE.2014.2362530).
- [10] Z. Wang, F. Meng, Y. Zhang, W. Wang, G. Li and J. Ge, "Cooperative adaptive control of multi-parameter based on dual-parallel virtual synchronous generators system," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 38, no. 4, pp. 2396-2408, Dec. 2023, doi: [10.1109/TEC.2023.3283048](https://doi.org/10.1109/TEC.2023.3283048).

Declaration of Competing Interest: Authors do not have conflict of interest. The content of the paper is approved by the authors.

Author Contributions: All authors reviewed the manuscript.

Open Access: Journal of Southern Communication Engineering is an open access journal. All papers are immediately available to read and reuse upon publication.

تحلیل و شبیه‌سازی مدل سیگنال کوچک ژنراتور سنکرون مجازی در سیستم ریزشبکه

غضنفر شاهقلیان*^{۲۰۱} | محمدرضا مرادیان^{۲۰۱} | سید محمدعلی زنجانی^{۲۰۱}

چکیده:

ریزشبکه‌های مبتنی بر منابع تولید پراکنده از طریق مبدل‌های الکترونیک قدرت به شبکه اصلی برق متصل می‌شوند که دارای اینرسی مکانیکی و میرایی کمی هستند، بنابراین باید مشخصات دینامیکی سیستم قدرت همزمان با ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر به منظور پایداری بهبود پیدا کنند. ژنراتورهای سنکرون مجازی یکی از روش‌های موثر برای ادغام سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر در شبکه برق است. برای داشتن رفتاری مشابه ژنراتور سنکرون واقعی به تغییر یا اختلال توسط ژنراتور سنکرون مجازی، عمل کنترل در مبدل الکترونیک قدرت واحد تولید پراکنده انجام می‌شود. در این مقاله با استفاده از مدل سیگنال کوچک و مدل فضای حالت ویژگی‌های دو روش افت و ژنراتور سنکرون مجازی برای کنترل توان‌های اکتیو و راکتیو مقایسه شده است. ارزیابی بین این دو استراتژی کنترلی متفاوت با استفاده از نتایج شبیه‌سازی در محیط متلب انجام شده است. همچنین ویژگی‌های ژنراتور سنکرون در اثر تغییرات ممان اینرسی و ضریب میرایی نشان داده شده است. مدل سیگنال کوچک سیستم مورد مطالعه در سیمولینک متلب نیز پیاده‌سازی شده است. ادغام ژنراتور سنکرون مجازی در ریزشبکه علاوه بر کاهش انحرافات فرکانس و ولتاژ، باعث بهبود پایداری نیز می‌شود.

^۱دانشکده مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف-آباد، نجف‌آباد، ایران.

shahgholian@iau.ac.ir

^۲مرکز تحقیقات ریزشبکه‌های هوشمند، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران.

moradian@iau.ac.ir

smazanjani@iau.ac.ir

نویسنده مسئول:

*غضنفر شاهقلیان، استاد دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران.

shahgholian@iau.ac.ir

موضوع اصلی:

سیستم ریز شبکه

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۷ دی ۱۴۰۳

تاریخ بازنگری: ۱۴ بهمن ۱۴۰۳

تاریخ پذیرش: ۲۰ بهمن ۱۴۰۳

کلید واژه‌ها: اینورتر، اینرسی مجازی، ژنراتور سنکرون، سیگنال کوچک، معادله نوسان.

تازه های تحقیق:

- بررسی کاهش میرایی کاربرد مبدل‌های الکترونیک قدرت در شبکه
- مقایسه روش کنترل افتی با تکنیک ژنراتور سنکرون مجازی
- تعیین مدل سیگنال کوچک ژنراتور سنکرون مجازی متصل به شین بی‌نهایت
- مقایسه سرعت پاسخ‌دهی به ازای تغییرات بار دو روش کنترلی

COPYRIGHTS

©2025 by the authors. Published by the Islamic Azad University Bushehr Branch. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>



۱-مقدمه

مشکلات زیست محیطی باعث حرکت صنعت برق به سمت استفاده از انرژی سبز و کم کربن و کاهش گازهای گلخانه‌ای^۱ شده است، بنابراین سهم بیشتری از سیستم قدرت به منابع انرژی‌های تجدیدپذیر^۲ تعلق پیدا کرده است. بحران انرژی و آلودگی‌های زیست محیطی منجر به نفوذ انرژی‌های تجدیدپذیر مانند سیستم فتوولتائیک^۳ و توربین‌های بادی در سیستم قدرت شده‌اند. دگرگونی ساختار انرژی جهانی همراه با توسعه سریع فناوری‌های انرژی، باعث افزایش نسبت تولید برق با توجه به مزایای تولید انرژی تجدیدپذیر مانند توزیع انعطاف‌پذیر و منافع اقتصادی شده است. امکان راه‌اندازی نیروگاه‌ها در نزدیکی مراکز بار با استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر به صورت پراکنده وجود دارد. با توجه به مزایای زیاد استفاده از انرژی تجدیدپذیر ولی ادغام آنها در سیستم قدرت به علت عدم داشتن اجزای چرخشی مکانیکی و قابل تنظیم نبودن، باعث کاهش اینرسی شده و پایداری سیستم تحت تاثیر قرار خواهد گرفت [۱،۲]. همچنین غیرقابل پیش‌بینی و نوسانات منابع انرژی تجدیدپذیر در شبکه چالش برانگیز خواهد بود که برای برطرف کردن محدودیت‌ها از ریزشبکه‌ها به عنوان یک راه‌حل استفاده می‌شود. ریزشبکه‌ها^۴ یک راه‌حل مناسب برای یکپارچه‌سازی منابع انرژی تجدیدپذیر، برای در دسترس بودن انرژی در مکان‌های دور و همچنین تضمین بهبود انعطاف‌پذیری و افزایش قابلیت اطمینان سیستم، مورد توجه قرار گرفته‌اند. مبدل‌های منبع ولتاژ^۵ یا اینورترها معمولاً رابط بین سیستم‌های ذخیره کننده انرژی، ژنراتورهای توزیع شده و بارها هستند. ظرفیت محدود مبدل‌ها باعث می‌شود که تعدادی از آنها به صورت موازی کار کنند و یک ریزشبکه را تشکیل دهند [۳،۴]. با وجود پاسخ سریع و کنترل انعطاف‌پذیر ولی اینرسی کم ناشی از واحدهای تولید مبتنی بر مبدل الکترونیک قدرت ممکن است باعث ایجاد اختلال در پایداری فرکانس و قابلیت اطمینان سیستم شود. کاهش اینرسی سیستم ریزشبکه به علت ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر، باعث تأثیر نامطلوب بر پایداری فرکانس و پشتیبانی از ولتاژ در ریزشبکه می‌شود [۵،۶]. همچنین حوادث اعمال ناگهانی بار و وقوع اتصال کوتاه، باعث ایجاد نوسانات فرکانس می‌شود که امنیت سیستم را تهدید می‌کند و ممکن است منجر به خاموشی کامل و یا آسیب دیدن تجهیزات سیستم شود [۷،۸]. اینرسی کم^۶ در سیستم‌های قدرت به طور کلی بر دو موضوع کلیدی تأثیر خواهد داشت: الف- اینرسی کمتر باعث ایجاد فرکانس ضعیف‌تر در طول اختلال‌ها خواهد بود و با توجه به عدم وجود انرژی جنبشی کافی برای نگهداری فرکانس در یک سطح معلوم، انحراف فرکانس بیشتر شده و امکان آسیب رساندن به تولید و مصرف کنندگان وجود دارد. ب- اینرسی پایین‌تر منجر به یک نرخ تغییر فرکانس^۷ بزرگ می‌شود که با تحریک کردن سیستم حفاظت فعال باعث خاموش شدن ژنراتورها می‌شود [۹،۱۰].

۱-۱- بیان مسئله

ریزشبکه‌ها دارای دو حالت عملیاتی هستند: متصل به شبکه^۸ و مستقل از شبکه^۹ (جزیره‌ای). ریزشبکه در حالت جزیره‌ای از سمت شبکه پشتیبانی نمی‌شود و فرکانس آن معمولاً توسط ریزمنبع‌ها و ذخیره انرژی کنترل می‌شود که ظرفیت یک ریزشبکه مستقل محدود و در برابر نوسانات غیرخطی تصادفی آسیب‌پذیر است [۱۱،۱۲].

ژنراتورهای سنکرون مجازی^{۱۰} (VSG) مشابه یک واحد تولید کننده با یک مبدل الکترونیک قدرت است که رفتار دینامیکی و ویژگی‌های مشابه ژنراتورهای سنکرون دارند که به علت توانایی آنها به عنوان یکی از روش‌های موثر برای ایجاد یکپارچگی منابع انرژی تجدیدپذیر در شبکه برق استفاده می‌شوند [۱۳،۱۴]. کنترل افت^{۱۱} یکی از روش‌های کاربردی برای کنترل مبدل‌ها در ریزشبکه‌ها است و ژنراتور سنکرون مجازی یک راه جایگزین است [۱۵،۱۶]. ژنراتور سنکرون مجازی یک روش کنترلی مبتنی

¹ Greenhouse Gases

² Renewable Energy Sources

³ Photovoltaic System

⁴ Microgrids

⁵ Voltage Source Converters

⁶ Low Inertia

⁷ Rate of Change of Frequency

⁸ Connected to the Network

⁹ Autonomous

¹⁰ Virtual Synchronous Generators

¹¹ Control Droop

بر اینورتر است که در واحد تولید پراکنده اعمال می‌شود و رفتاری مشابه ماشین سنکرون به منظور پشتیبانی پایداری سیستم قدرت دارد [۱۷،۱۸]. هدف اصلی از به کار بردن تکنیک ژنراتور سنکرون مجازی، بهبود پایداری سیستم قدرت است. ذخیره انرژی در ژنراتورهای سنکرون معمولی به صورت مکانیکی است ولی در ژنراتور سنکرون مجازی با استفاده از اینورتر انرژی به صورت الکتریکی ذخیره می‌شود. در یک ماشین سنکرون واقعی، ضریب میرایی و ممان اینرسی ثابت هستند ولی کنترل با معادله نوسان، ویژگی‌های دینامیکی ژنراتور سنکرون مجازی می‌تواند مطابق نیازهای سیستم تنظیم شود [۱۹،۲۰].

۱-۲- مرور ادبیات

تاکنون مطالعات مختلفی در زمینه کنترل ژنراتور سنکرون مجازی برای اینورترهای واسط در ریزشبکه‌های مبتنی بر منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر ارائه شده است [۲۱،۲۲].

یک روش کنترل ژنراتور سنکرون مجازی مبتنی بر امپدانس مجازی تطبیقی^۱ (شامل یک مقاومت مجازی تطبیقی و یک اندوکتانس مجازی ثابت) در دو حالت عملکرد ریزشبکه‌ها به منظور کاهش اختلاف امپدانس در خروجی اینورتر در [۲۳] پیشنهاد شده که هدف آن بهبود اشتراک توان^۲ راکتیو متناسب بین واحدهای تولید پراکنده است. در این روش مقاومت مجازی با توجه به نقاط عملیاتی ریزشبکه به صورت تطبیقی طراحی می‌شود و بر روی کنترل ژنراتور سنکرون مجازی پیاده‌سازی می‌شود.

کنترل ماشین سنکرون مجازی بهبود یافته در [۲۴] با توجه محدودیت ذخیره انرژی ارائه شده است که در آن برای شبیه‌سازی اینرسی و میرایی از کنترل بازیابی انرژی استفاده می‌شود. در این روش ثابت بودن ذخیره انرژی تضمین می‌شود و سیستم ذخیره انرژی با سرعت کند نیز توسط گاورنر برای ارائه خدمات انرژی طولانی مدت تنظیم می‌شود.

استراتژی تطبیقی ترکیبی برای کنترل اینرسی مجازی VSG در [۲۵] برای بهبود نوسانات فرکانس پایین ارائه شده که به طور همزمان باعث بهبود معیارهای عملکرد کنترل فرکانس اولیه نیز می‌شود. برای تامین میرایی نوسانات فرکانس پایین، حداکثر اینرسی VSG بر اساس متغیر تخمین گرادیان فرکانس شبکه به منظور شناسایی مراحل فرآیند کنترل فرکانس اولیه استفاده می‌کند. نتایج شبیه‌سازی کاهش ذخیره سازی انرژی VSG را تا حدود ۵۰ درصد نشان می‌دهد.

امکان نوسان در توان تحویلی و فرکانس در VSG در هنگام نوسانات در سیستم قدرت وجود دارد که با تنظیم اینرسی چرخشی و ضریب میرایی قابل کنترل هستند. به همین منظور در [۲۶] یک مدل سیگنال کوچک برای بررسی تاثیر اغتشاشات و پارامترها ارائه شده است. سپس راهبرد کنترل تطبیقی برای حفظ نسبت میرایی بهینه در کل فرآیند میرا کردن نوسانات پیشنهاد شده است.

راهبرد کنترل تطبیقی با در نظر گرفتن منحنی زاویه توان برای بهینه‌سازی پارامترها در یک ژنراتور سنکرون مجازی در [۲۷] ارائه شده است که در آن اینرسی و میرایی در دوره نوسان تحلیل می‌شود. همچنین استراتژی کنترل سوئیچینگ چندحالتی به منظور انطباق با سناریوهای مختلف کنترلی با در نظر گرفتن تقاضا برای پاسخ تنظیم سریع و تقاضا برای پشتیبانی همگام‌سازی در شرایط خطای اختلال بررسی شده است.

۱-۳- نوآوری و ساختار

استفاده از مبدل‌های الکترونیک قدرت باعث افزایش تولید می‌شود ولی منجر به کمبود اینرسی و کاهش میرایی سیستم قدرت می‌شود و توانایی سیستم قدرت را در برابر اختلالات کاهش می‌دهد. روش‌های کنترل افقی و کنترل ژنراتور سنکرون مجازی قابل استفاده در اینورتر منبع ولتاژ هستند. در این مقاله با ارائه مدل سیگنال کوچک، دو روش فوق از نظر سرعت پاسخ‌دهی به ازای تغییرات بار مقایسه شده‌اند. نتایج شبیه‌سازی تغییرات سرعت زاویه‌ای و تغییرات توان اکتیو خروجی اینورتر را به ازای تغییرات پله‌ای ورودی نشان می‌دهند.

¹ Adaptive Virtual Impedance

² Power Sharing

۲- سیستم‌های کنترل

هر دو طرح سیستم کنترل افی و ژنراتور سنکرون مجازی، روش کنترل یکسانی برای کنترل توان راکتیو دارند [۲۸،۲۹]. مشخصه‌های افت ویژگی اصلی کنترل توان اکتیو و توان راکتیو در روش‌های ژنراتور سنکرون مجازی و کنترل افت است و تنها اختلاف آنها در این است که روش ژنراتور سنکرون مجازی دارای اینرسی است ولی روش کنترل افت فاقد اینرسی است. بنابراین کنترل افت کمکی به ضریب اینرسی و میرایی لازم برای سیستم قدرت نمی‌کند، ولی ژنراتور سنکرون مجازی قابلیت‌های ژنراتور سنکرون را با استفاده از حلقه‌های کنترل افت به منظور بهبود پاسخ اینرسی روتور و تنظیم ولتاژ ترمینال فراهم می‌کند [۳۰،۳۱]. در استراتژی کنترل افی فقط تنظیم فرکانس اولیه و ویژگی‌های تنظیم تحریک جزئی ژنراتورهای سنکرون شبیه‌سازی می‌شود و ویژگی‌های حرکت روتور ژنراتورهای سنکرون شبیه‌سازی نمی‌شوند. کنترل افی توانایی ارائه اینرسی مجازی را ندارد و ژنراتور سنکرون مجازی یکی از راه‌های ساده برای تزریق اینرسی مجازی در سیستم قدرت است [۳۲]. به دلیل تزریق اینرسی مجازی در فناوری کنترل VSG، اینرسی شبکه افزایش می‌یابد ولی زمان پاسخ و سرعت تنظیم تولید مدولاسیون فرکانس در سیستم محدود خواهد بود و زمان تنظیم فرکانس و اورشوت را کاهش می‌دهد. سرعت پاسخ‌دهی توان اکتیو روش VSG نسبت به روش افی بسیار پایین است و افت زیادی وجود دارد. همچنین انتخاب پارامترهای کنترل آن پیچیده‌تر است [۳۳،۳۴]. در جدول ۱ مقایسه بین دو روش کنترلی در کمیت‌های مختلف آمده است.

جدول ۱: مقایسه ویژگی‌های دو روش کنترلی

Table 1. Comparison of the characteristics of the two control methods

	Output oscillation	Rate of frequency change	Inertia support	Response speed	Current sharing effect
Virtual Synchronous Generator	Yes	Low	Yes	Fast	General
Droop Control	Yes	High	No	Slow	General

۲-۱- کنترل افی

کنترل افی یک استراتژی کنترل غیرمتمرکز^۱ و پرکاربرد است که در ریزشکه‌ها به منظور کنترل مبدل‌های الکترونیک قدرت استفاده می‌شود. کنترل افت معمولی برای جبران انحراف فرکانس از طریق P-f توان اکتیو و برای جبران انحراف ولتاژ از طریق Q-U توان راکتیو را فعال می‌کند [۳۵،۳۶]. رابطه‌های کنترل افی متداول برای ریزشکه به صورت زیر بیان می‌شوند [۳۷]:

$$\begin{cases} \omega = \omega_n - m_p (P - P_0) \\ U = U_n - n_q (Q - Q_0) \end{cases} \quad (1)$$

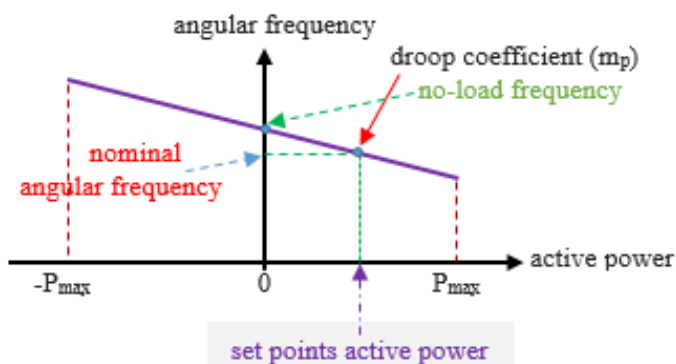
که در آن ω فرکانس زاویه‌ای با نقطه تنظیمی ω_n و U اندازه ولتاژ با نقطه تنظیمی U_n است. شیب‌های افی توان اکتیو و توان راکتیو به ترتیب با m_p و n_q نشان داده می‌شوند [۳۸،۳۹]. شکل‌های ۱ و ۲ نمایش گرافیکی معادلات افی را به ترتیب برای مشخصه‌های افتادگی توان اکتیو-فرکانس ($p-\omega$) و توان راکتیو-ولتاژ ($q-U$) نشان می‌دهند [۴۰]. انتخاب ثابت‌های افت مستلزم در نظر گرفتن تعادل دقت ولتاژ و عملکرد اشتراک بار است. انتخاب شیب‌های افت بالاتر باعث بهبود اشتراک بار می‌شود ولی منجر به افت ولتاژ بیشتر در ریزشکه می‌شود [۴۱،۴۲]. اثر راکتانس فیلتر باعث می‌شود که رابطه افت بین ولتاژ و توان راکتیو در کنترل افت معمولی کاملاً خطی نباشد [۴۳]. برای مبدل‌های مد کنترل ولتاژ با اتصال موازی، توزیع توان و مدیریت با اختصاص ضریب افی مناسب برای هر مبدل بدست می‌آید. در هنگام اختلال در سیستم قدرت، کنترل افی سنتی در اینورتر دارای مشکلاتی مانند تغییر سریع فرکانس و نوسانات زیاد است که باعث بدتر شدن کیفیت توان می‌شود.

۲-۲- ژنراتور سنکرون مجازی

در ژنراتورهای سنکرون معمولی ثابت اینرسی و ضریب میرایی دارای مقادیر ثابتی هستند و در پاسخ به اختلال و تغییرات انعطاف‌پذیری ندارند. ژنراتور سنکرون مجازی می‌تواند مشابه ویژگی‌های گذرا الکترومکانیکی ژنراتورهای سنکرون سنتی عمل

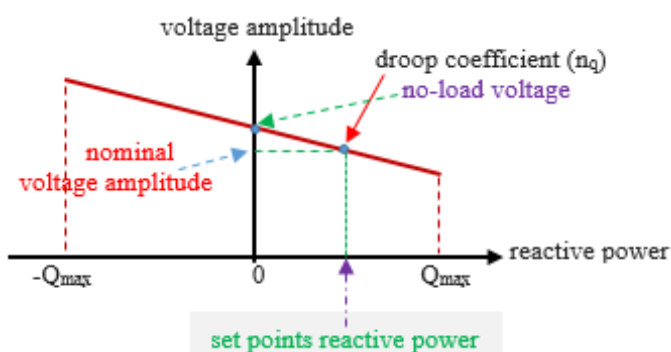
¹ Decentralized Control

کند و باعث افزایش اینرسی و میرایی سیستم شود. ادغام ژنراتور سنکرون مجازی در سیستم ریزشبه نه تنها باعث بهبودی پایداری ریزشبه می‌شود بلکه انحرافات فرکانس و ولتاژ را کاهش خواهد داد [۴۴،۴۵].



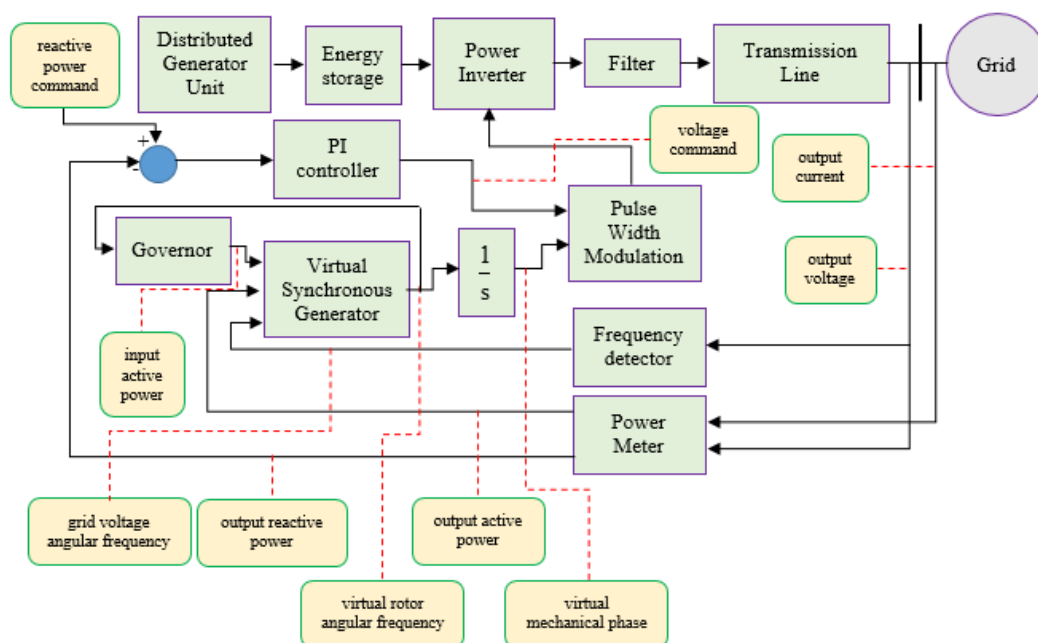
شکل ۱: مشخصه افتی توان اکتیو-فرکانس

Figure 1. Active power drop-frequency characteristic



شکل ۲: مشخصه افتی توان راکتیو-ولتاژ

Figure 2. Reactive power drop-voltage characteristic



شکل ۳: توپولوژی ژنراتور سنکرون مجازی همراه با بلوک دیاگرام کنترل

Figure 3. Virtual synchronous generator topology with control block diagram

شکل ۳ نمای کلی شبکه الکتریکی سیستم کنترل مبدل الکترونیک قدرت مبتنی بر ژنراتور سنکرون مجازی را نشان می‌دهد [۴۶]. همان‌طور که مشاهده می‌شود از یک واحد تولید پراکنده، سیستم ذخیره کننده انرژی، مبدل الکترونیک قدرت، مدار

فیلتر و شبکه انتقال تشکیل شده است [۴۷،۴۸]. سه حلقه کنترل اصلی شامل حلقه کنترل داخلی، مدل ژنراتور سنکرون مجازی و حلقه کنترل بیرونی است. حلقه کنترل داخلی یک بخش معمولی از سیستم کنترل است و از کنترل‌کننده‌های تناسبی-انتگرالی (PI) تشکیل شده که سیگنال مرجع را برای مدولاسیون عرض پالس تشکیل می‌دهد.

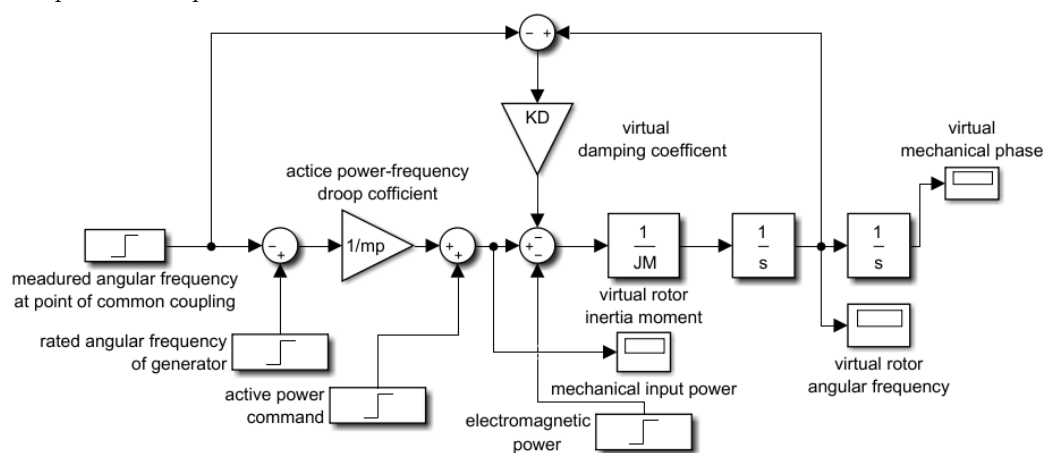
۳- مدل سیگنال کوچک

معادله نوسان مجازی VSG با توجه به معادله نوسان ماشین سنکرون به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\begin{cases} J_V \frac{d(\omega_v - \omega_g)}{dt} = \frac{P_{in}}{\omega_b} - \frac{P_{out}}{\omega_b} - K_D(\omega_v - \omega_g) \\ \frac{d\theta_m}{dt} = \omega_v \\ \frac{d\delta}{dt} = \omega_v - \omega_b \\ P_{in} = P_{out} - \frac{1}{m_p}(\omega_b - \omega_g) \\ E = U_b + \frac{1}{m_q}(Q_b - Q) \end{cases} \quad (2)$$

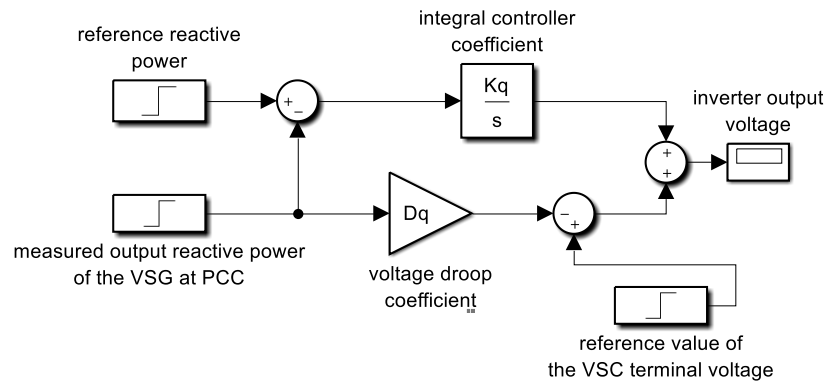
که در آن K_D ضریب میرایی مجازی، ω_g فرکانس زاویه‌ای شبکه در نقطه اتصال مشترک (سرعت چرخشی ولتاژ شبکه)، ω_b فرکانس زاویه‌ای مبنا و ω_v فرکانس زاویه‌ای خروجی (فرکانس زاویه‌ای روتور مجازی) است. همچنین J_V ممان اینرسی چرخشی مجازی، δ زاویه توان و θ_m فاز مکانیکی مجازی است. توان مکانیکی ورودی (توان اکتیو مرجع) و توان اکتیو الکتریکی (توان الکتریکی خروجی) به ترتیب با P_{in} و P_{out} در نظر گرفته شده‌اند [۴۹،۵۰]. معادله نوسان از اینرسی یک ژنراتور تقلید می‌کند و بنابراین می‌تواند به کنترل سنتی اکتی اضافه شود تا عملکرد حالت گذرا آن را افزایش دهد. شکل‌های ۴ و ۵ بلوک دیاگرام کنترل در ژنراتور سنکرون مجازی را نشان می‌دهد. اینرتر تشکیل دهنده ریزشبه به صورت یک منبع ولتاژ عمل می‌کند. مدل ساده اتصال ژنراتور سنکرون مجازی از طریق خط انتقال با امپدانس $R_L + jX_L$ در شکل ۶ نشان داده شده است. اندازه ولتاژ شبکه و اندازه ولتاژ خروجی VSG به ترتیب U_T و E_V و فازهای آنها به ترتیب صفر و δ در نظر گرفته شده‌اند. با صرفنظر از مقاومت خط انتقال و مقاومت مجازی، براساس توپولوژی معادل سیستم توان تحویلی از VSG به شبکه برابرند با:

$$\begin{cases} P_E = \frac{U_T E_V}{X_T} \sin \delta \\ Q_E = \frac{U_T E_V}{X_T} \cos \delta - \frac{U_T^2}{X_T} \end{cases} \quad (3)$$



شکل ۴: بلوک دیاگرام حلقه کنترل فرکانس در ژنراتور سنکرون مجازی با تنظیم توان اکتیو

Figure 4. Block diagram of the frequency control loop in a virtual synchronous generator with active power regulation



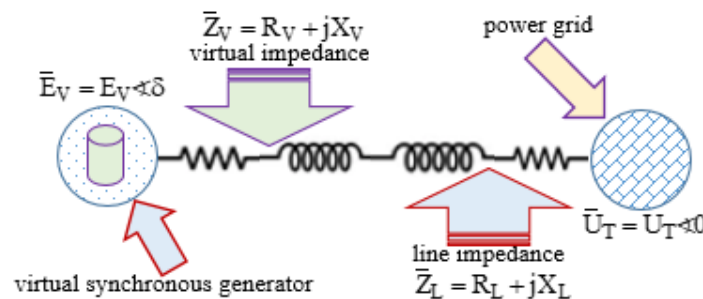
شکل ۵: بلوک دیاگرام حلقه کنترل ولتاژ در ژنراتور سنکرون مجازی با تنظیم توان راکتیو

Figure 5. Block diagram of the voltage control loop in a virtual synchronous generator with reactive power regulation

که در آن X_T راکتانس کل بین منبع ولتاژ خروجی VSG و شبکه و δ اختلاف فاز بین ولتاژ شبکه و خروجی VSG است. با کنترل اندازه ولتاژ خروجی اینورتر توان راکتیو تحویل به بار قابل کنترل است، بنابراین اندازه ولتاژ مرجع با استفاده از کنترل کننده از توان راکتیو خروجی قابل محاسبه است [۵۱]. مدل سیگنال کوچک با خطی سازی معادلات توان تعیین می‌شود:

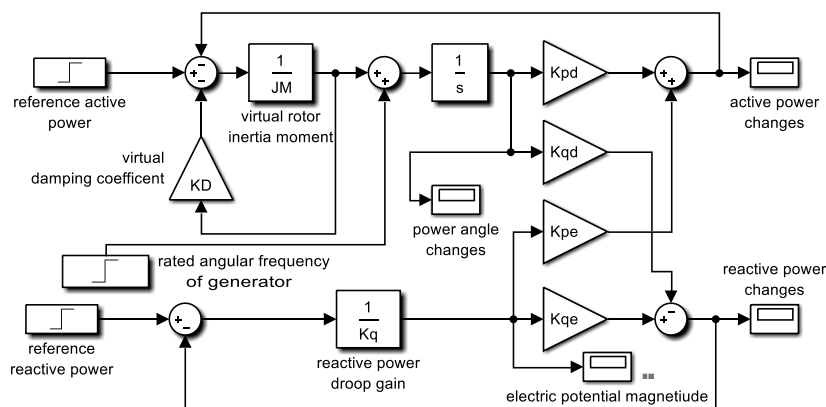
$$\begin{cases} \Delta P_E = \underbrace{\left(\frac{U_T E_V}{X_T} \cos \delta \right)}_{K_{pd}} \Delta \delta + \underbrace{\left(\frac{U_T}{X_T} \sin \delta \right)}_{K_{pe}} \Delta E \\ Q_E = -\underbrace{\left(\frac{U_T E_V}{X_T} \sin \delta \right)}_{K_{pd}} \Delta \delta + \underbrace{\left(\frac{U_T}{X_T} \cos \delta \right)}_{K_{pe}} \Delta E \end{cases} \quad (4)$$

بنابراین مدل سیگنال کوچک ژنراتور سنکرون مجازی براساس معادلات تنظیم توان اکتیو و توان راکتیو مطابق شکل ۷ خواهد بود.



شکل ۶: مدل الکتریکی سیستم اتصال ژنراتور سنکرون مجازی به شبکه

Figure 6. Electrical model of the virtual synchronous generator connection system to the grid

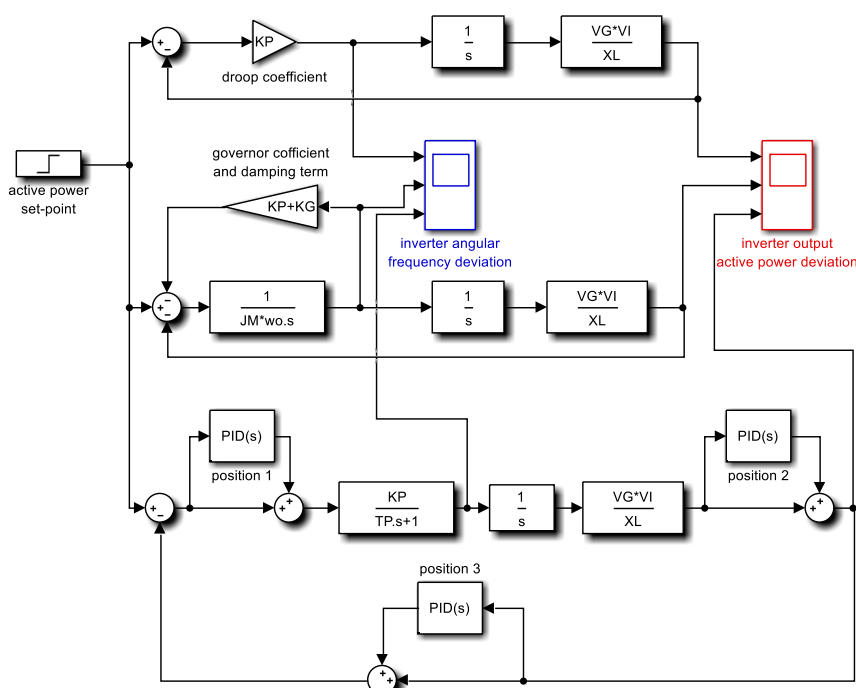


شکل ۷: مدل سیگنال کوچک ژنراتور سنکرون مجازی بر اساس معادلات تنظیم توان

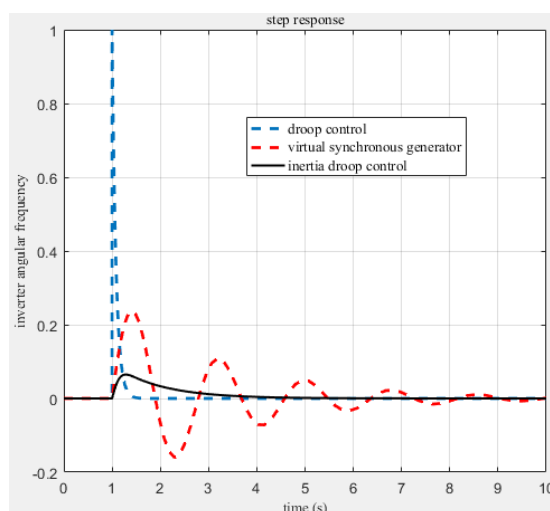
Figure 7. Small signal model of virtual synchronous generator based on power regulation equations

۴- نتایج شبیه‌سازی

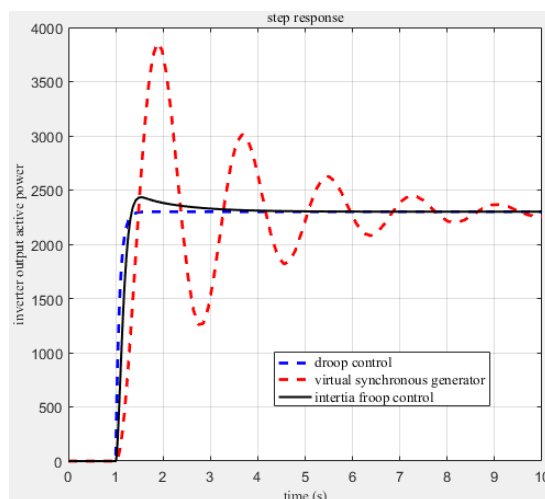
به منظور حفظ فرکانس همزمان با کاهش اینرسی معادل شبکه در اثر افزایش نفوذ انرژی تجدیدپذیر در شبکه، طرح کنترلی ژنراتور سنکرون مجازی استفاده می‌شود. شکل ۸ بلوک دیاگرام سیگنال کوچک برای کنترل افت (حلقه بالا)، کنترل ژنراتور سنکرون مجازی (حلقه وسط) و کنترل افت اینرسی (حلقه پایین) را نشان می‌دهد که در آن V_G ، V_I ، X_L و J_M به ترتیب ولتاژ شبکه، ولتاژ خروجی اینورتر، راکتانس خط و ثابت اینترسی لحظه‌ای است. همچنین ثابت میرایی سیستم، ثابت افت و ثابت گاورنر به ترتیب با K_P ، K_D و K_G نشان داده شده است. کنترل کننده PID فقط ترم مشتق‌گیر را دارد که در سه موقعیت می‌تواند قرار گیرد که در این روش در موقعیت دو قرار داده شده است. تنظیم ثابت K_M معادل افزایش نسبت میرایی معادل به منظور کاهش مقدار اورشوت و بهبود پاسخ گذرا سیستم است. ورودی مقدار نامی توان اکتیو و خروجی توان اکتیو اینورتر در نظر گرفته شده است. تغییرات فرکانس زاویه‌ای و تغییرات زاویه بار همراه با تغییرات خروجی کنترل کننده به عنوان متغیرهای حالت در نظر گرفته شده‌اند.



شکل ۸: مدل سیگنال کوچک برای کنترل افتی و کنترل ماشین سنکرون مجازی
Figure 8. Small signal model for droop control and virtual synchronous machine control



شکل ۹: پاسخ تغییرات سرعت زاویه‌ای به ازای تغییرات پله‌ای ورودی
Figure 9. Response of angular velocity changes to input step changes



شکل ۱۰: پاسخ تغییرات توان اکتیو خروجی اینورتر به ازای تغییرات پله‌ای ورودی
Figure 10. Response of inverter output active power changes to input step changes

پاسخ سرعت زاویه‌ای اینورتر و پاسخ توان اکتیو خروجی اینورتر به ازای تغییرات پله‌ای بار به ترتیب در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با کنترل افت معمولی، توان اکتیو خروجی واقعی اینورتر می‌تواند وقتی مقدار توان اکتیو در یک مرحله تغییر کند، به سرعت با تغییرات مطابقت پیدا کند و با توجه به اینکه سیستم مرتبه اول در نظر گرفته شده است، هیچ تغییر یا نوسانی ظاهر نمی‌شود. همچنین همان‌طور که مشاهده می‌شود برای کنترل ژنراتور سنکرون مجازی با افزایش مقدار توان اکتیو ورودی، توان اکتیو خروجی اینورتر اورشوت بالایی را تجربه می‌کند و زمان بیشتری برای نشست در طول دوره انتقالی نیاز دارد. کنترل ژنراتور سنکرون مجازی دارای مزایایی مشابه کنترل افتی است ولی به دلیل داشتن نرخ کمتر تغییرات فرکانس نسبت به زمان، نسبت به کنترل افتی دارای عملکرد بهتری از نظر پایداری فرکانس گذرا خواهد بود.

۵- نتیجه‌گیری

گسترش سریع ریزشکها و افزایش نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر با استفاده از مبدل‌های الکترونیک قدرت به علت عدم وجود جرم داور که دارای اینرسی کمی هستند، باعث کاهش اینرسی کل سیستم شده و پایداری را تحت تاثیر قرار داده است. یکی از تکنیک‌های کاربردی برای غلبه بر مشکل کمبود اینرسی در سیستم‌های قدرت تجدیدپذیر، استفاده از ژنراتور سنکرون مجازی است که به دلیل مزایایی مختلفی که دارد، در تولید منابع تجدیدپذیر نقش مهمی دارد. ژنراتور سنکرون مجازی یکی از ساده‌ترین روش‌ها برای اعمال اینرسی مجازی در سیستم قدرت است که در این مقاله مطالعه و شبیه‌سازی شده است. شبیه‌سازی اینرسی و افت روتور توسط اینورتر مشابه یک ژنراتور سنکرون معمولی باعث می‌شود که کنترل ژنراتور سنکرون مجازی نسبت به کنترل افت از پشتیبانی فرکانس بهتری برخوردار شود. نتایج شبیه‌سازی اثر طرحی کنترلی ژنراتور سنکرون مجازی را نسبت به کنترل افتی نشان داده است.

مراجع

- [1] J. Song, X. Zhou, Z. Zhou, Y. Wang, Y. Wang and X. Wang, "Review of low inertia in power systems caused by high proportion of renewable energy grid integration," *Energies*, vol. 16, no. 16, Article Number: 6042, Aug. 2023, doi: [10.3390/en16166042](https://doi.org/10.3390/en16166042).
- [2] F. Mesrinejad, S. Yaghoubi and B. Fani, "Secondary frequency control for improved dynamic performance in interconnected power system," *Journal of Simulation and Analysis of Novel Technologies in Mechanical Engineering*, vol. 14, no. 3, pp. 47-54, Sept. 2022, dor: 20.1001.1.27834441.2022.14.3.5.9.
- [3] Y. Du, J. M. Guerrero, L. Chang, J. Su, M. Mao, "Modeling, analysis, and design of a frequency-droop-based virtual synchronous generator for microgrid applications," *Proceeding of the IEEE/ECCE*, pp. 643-649, Melbourne, VIC, Australia, June 2013, doi: [10.1109/ECCE-Asia.2013.6579167](https://doi.org/10.1109/ECCE-Asia.2013.6579167).

- [4] M. Mahdavian, G. Shahgholian, M. Janghorbani, B. Soltani and N. Wattanapongsakorn, "Load frequency control in power system with hydro turbine under various conditions", *Proceeding of the IEEE/ECTICON*, pp. 1-5, Hua Hin, Thailand, June 2015, doi: [10.1109/ECTICON.2015.7206938](https://doi.org/10.1109/ECTICON.2015.7206938).
- [5] M. Riahinasab, N. Behzadfar and H. Movahednejad, "Analysis and simulation of load frequency control in power system with reheater steam turbine," *Journal of Applied Dynamic Systems and Control*, vol. 5, no. 1, pp. 84-90, June 2022, dor: 20.1001.1.26764342.2022.5.1.12.0.
- [6] G. Shahgholian, M. Maghsoodi, M. Mahdavian, S. Farazpey, M. Janghorbani and M. Azadeh, "Design of fuzzy+PI controller in application of TCSC and PSS for power system stability improvement," *Proceeding of the IEEE/ECTI-CON*, pp. 1-6, Chiang Mai, Thailand, June/July 2016, doi: [10.1109/ECTICON.2016.7560908](https://doi.org/10.1109/ECTICON.2016.7560908).
- [7] G. Magdy, E. A. Mohamed, G. Shabib, A. A. Elbaset and Y. Mitani, "Microgrid dynamic security considering high penetration of renewable energy," *Protection and Control of Modern Power Systems*, vol. 3, Article Number: 23, 2018, doi: [10.1186/s41601-018-0093-1](https://doi.org/10.1186/s41601-018-0093-1).
- [8] A. Karimi, Y. Khayat, M. Naderi, T. Dragičević, R. Mirzaei, F. Blaabjerg and H. Bevrani, "Inertia response improvement in ac microgrids: A fuzzy-based virtual synchronous generator control," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 35, no. 4, pp. 4321-4331, April 2020, doi: [10.1109/TPEL.2019.2937397](https://doi.org/10.1109/TPEL.2019.2937397).
- [9] H.R. Chamorro, F.R.S. Sevilla, F. Gonzalez-Longatt, K. Rouzbehi, H. Chavez and V.K. Sood, "Innovative primary frequency control in low-inertia power systems based on wide-area RoCoF sharing," *IET Energy Systems Integration*, vol. 2, no. 2, pp. 151-160, June 2020, doi: [10.1049/iet-esi.2020.0001](https://doi.org/10.1049/iet-esi.2020.0001).
- [10] G. Shahgholian, M. Ebrahimi-Salary, "Effect of load shedding strategy on interconnected power systems stability when a blackout occurs," *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, vol. 4, no. 2, pp. 212-216, April 2012, doi: [10.7763/IJCEE.2012.V4.481](https://doi.org/10.7763/IJCEE.2012.V4.481).
- [11] P. Fan, S. Ke, J. Yang, R. Li, Y. Li, S. Yang, J. Liang, H. Fan and T. Li, "A load frequency coordinated control strategy for multimicrogrids with V2G based on improved MA-DDPG," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 146, Article Number: 108765, March 2023, doi: [10.1016/j.ijepes.2022.108765](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108765).
- [12] M. Bonyani, M. Ghanbarian and M. Simab, "Demand side management based on model predictive control in microgrid in grid connected mode," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 13, no. 52, Sept. 2024, doi: [10.30495/jce.2023.1996352.1280](https://doi.org/10.30495/jce.2023.1996352.1280).
- [13] M. Cheng, W. Yan, D. Zhang, X. Liu, L. He, M. Xu and Q. Yao, "Frequency stability of new energy power systems based on VSG adaptive energy storage coordinated control strategy," *Energy Informatics*, vol. 7, Article Number: 54, July 2024, doi: [10.1186/s42162-024-00359-7](https://doi.org/10.1186/s42162-024-00359-7).
- [14] C. Citro, M. Al-Numay and P. Siano, "Extensive assessment of virtual synchronous generators in intentional island mode," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 157, Article Number: 109853, June 2024, doi: [10.1016/j.ijepes.2024.109853](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2024.109853).
- [15] H.U. Rehman, X. Yan, M.A. Abdelbaky, M.U. Jan and S. Iqbal, "An advanced virtual synchronous generator control technique for frequency regulation of grid-connected PV system," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 125, Article Number: 106440, Feb. 2021, doi: [10.1016/j.ijepes.2020.106440](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106440).
- [16] G. Shahgholian, B. Fani, B. Keyvani, H. Karimi and M. Moazzami, "An improve in the rea-ctive power sharing by uses to modify droop characteristics in autonomous microgrids," *Energy Engineering and Management*, vol. 9, no. 3, pp. 64-71, Oct. 2019, doi: [10.22052/9.3.64](https://doi.org/10.22052/9.3.64).
- [17] J. Alipoor, Y. Miura and T. Ise, "Power system stabilization using virtual synchronous generator with alternating moment of inertia," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 3, no. 2, pp. 451-458, June 2015, doi: [10.1109/JESTPE.2014.2362530](https://doi.org/10.1109/JESTPE.2014.2362530).
- [18] Z. Wang, F. Meng, Y. Zhang, W. Wang, G. Li and J. Ge, "Cooperative adaptive control of multi-parameter based on dual-parallel virtual synchronous generators system," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 38, no. 4, pp. 2396-2408, Dec. 2023, doi: [10.1109/TEC.2023.3283048](https://doi.org/10.1109/TEC.2023.3283048).
- [19] M. Chen, D. Zhou and F. Blaabjerg, "Modelling, implementation, and assessment of virtual synchronous generator in power systems," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 8, no. 3, pp. 399-411, May 2020, doi: [10.35833/MPCE.2019.000592](https://doi.org/10.35833/MPCE.2019.000592).

- [20] K.M. Cheema, "A comprehensive review of virtual synchronous generator," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 120, Article Number: 106006, Sept. 2020, doi: [10.1016/j.ijepes.2020.106006](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106006).
- [21] Y. Chen and W. Wang, "A novel improved droop control for grid-supporting inverter combined with the virtual synchronous generator control," *Journal of Electrical Engineering and Technology*, vol. 18, pp. 1601–1611, May 2023, doi: [10.1007/s42835-022-01297-8](https://doi.org/10.1007/s42835-022-01297-8).
- [22] I. Serban and C. P. Ion, "Microgrid control based on a grid-forming inverter operating as virtual synchronous generator with enhanced dynamic response capability," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 89, pp. 94-105, July 2017, doi: [10.1016/j.ijepes.2017.01.009](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.01.009).
- [23] X. Liang, C. Andalib-Bin-Karim, W. Li, M. Mitolo and M. N. S. K. Shabbir, "Adaptive virtual impedance-based reactive power sharing in virtual synchronous generator controlled microgrids," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 57, no. 1, pp. 46-60, Jan./Feb. 2021, doi: [10.1109/TIA.2020.3039223](https://doi.org/10.1109/TIA.2020.3039223).
- [24] C. Sun, S. Q. Ali, G. Joos and F. Bouffard, "Design of hybrid-storage-based virtual synchronous machine with energy recovery control considering energy consumed in inertial and damping support," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 37, no. 3, pp. 2648-2666, March 2022, doi: [10.1109/TPEL.2021.3111482](https://doi.org/10.1109/TPEL.2021.3111482).
- [25] M. Malekpour, A. Kiyomarsi and M. Gholipour, "A hybrid adaptive virtual inertia controller for virtual synchronous generators," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 31, no. 7, April 2021, doi: [10.1002/2050-7038.12913](https://doi.org/10.1002/2050-7038.12913).
- [26] F. Wang, L. Zhang, X. Feng and H. Guo, "An adaptive control strategy for virtual synchronous generator," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 54, no. 5, pp. 5124-5133, Sept./Oct. 2018, doi: [10.1109/TIA.2018.2859384](https://doi.org/10.1109/TIA.2018.2859384).
- [27] T. Shi, J. Sun, X. Han and C. Tang, "Research on adaptive optimal control strategy of virtual synchronous generator inertia and damping parameters," *IET Power Electronics*, vol. 17, no. 1, pp. 121-133, Jan. 2024, doi: [10.1049/pel2.12620](https://doi.org/10.1049/pel2.12620).
- [28] J. Liu, Y. Miura and T. Ise, "Comparison of dynamic characteristics between virtual synchronous generator and droop control in inverter-based distributed generators," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 31, no. 5, pp. 3600-3611, May 2016, doi: [10.1109/TPEL.2015.2465852](https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2465852).
- [29] J. Xiao, Y. Jia, B. Jia, Z. Li, Y. Pan and Y. Wang, "An inertial droop control based on comparisons between virtual synchronous generator and droop control in inverter-based distributed generators," *Energy Reports*, vol. 6, pp. 104-112, Dec. 2020, doi: [10.1016/j.egyr.2020.12.003](https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.12.003).
- [30] K. Shi, H. Ye, W. Song and G. Zhou, "Virtual inertia control strategy in microgrid based on virtual synchronous generator technology," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 27949-27957, May 2018, doi: [10.1109/ACCESS.2018.2839737](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2839737).
- [31] M.M. Elwakil, H.M.E. Zoghabay, S.M. Sharaf and M.A. Mosa, "Adaptive virtual synchronous generator control using optimized bang-bang for islanded microgrid stability improvement," *Protection and Control of Modern Power Systems*, vol. 8, Article Number: 57, Nov. 2023, doi: [10.1186/s41601-023-00333-7](https://doi.org/10.1186/s41601-023-00333-7).
- [32] M. Shadoul, R. Ahshan, R.S. AlAbri, A. Al-Badi, M. Albadi and M. Jamil, "A comprehensive review on a virtual-synchronous generator: topologies, control orders and techniques, energy storages, and applications," *Energies*, vol. 15, no. 22, Article Number: 8406, Nov. 2022, doi: [10.3390/en15228406](https://doi.org/10.3390/en15228406).
- [33] J. Liang, H. Fan, L. Cheng, S. Rong, T. Li, T. Yu and L. Wang, "Control strategy for improving the frequency response characteristics of photovoltaic and energy storage systems based on VSG control," *Energy Reports*, vol. 11, pp. 2295-2305, June 2024, doi: [10.1016/j.egyr.2024.01.036](https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.01.036).
- [34] D.Q. Yang, M.J. Li, T. Ma, J.W. Ni and Z.Y. Han, "Study on adaptive VSG parameters and SOC control strategy for PV-HESS primary frequency regulation," *Energy*, vol. 314, Article Number: 133909, Jan. 2025, doi: [10.1016/j.energy.2024.133909](https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133909).
- [35] A. Suvorov, A. Askarov, N. Ruban, V. Rudnik, P. Radko, A. Achitaev and K. Suslov, "An adaptive inertia and damping control strategy based on enhanced virtual synchronous generator model," *Mathematics*, vol. 11, no. 18, Article Number: 3938, Sept. 2023, doi: [10.3390/math11183938](https://doi.org/10.3390/math11183938).
- [36] S. D'Arco and J. A. Suul, "Virtual synchronous machines- Classification of implementations and analysis of equivalence to droop controllers for microgrids," *Proceeding of the IEEE/PTC*, pp. 1-7, Grenoble, France, June 2013, doi: [10.1109/PTC.2013.6652456](https://doi.org/10.1109/PTC.2013.6652456).

- [37] V. Thomas, S. Kumaravel and S. Ashok, "Virtual synchronous generator and its comparison to droop control in microgrids," *Proceeding of the IEEE/PICCC*, pp. 1-4, Thrissur, India, Jan. 2018, doi: [10.1109/PICCC.2018.8384798](https://doi.org/10.1109/PICCC.2018.8384798).
- [38] A. Villa, F. Belloni, R. Chiumeo and C. Gandolfi, "Conventional and reverse droop control in islanded microgrid: Simulation and experimental test," *Proceeding of the IEEE/SPEEDAM*, pp. 288-294, Capri, Italy, June 2016, doi: [10.1109/SPEEDAM.2016.7526020](https://doi.org/10.1109/SPEEDAM.2016.7526020).
- [39] B. Fani, H. Bisheh and A. Karami-Horestani, "An offline penetration-free protection scheme for PV-dominated distribution systems," *Electric Power Systems Research*, vol. 157, pp. 1-9, April 2018, doi: [10.1016/j.epsr.2017.11.020](https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.11.020).
- [40] G. Shahgholian, M. Moazzami and M. Dehghani, "A brief review of the application and control strategies of alternating current microgrids in the power system," *Technovations of Electrical Engineering in Green Energy System*, vol. 4, no. 2, pp. 17-34, Sept. 2025, doi: [10.30486/TEEGES.2025.1121457](https://doi.org/10.30486/TEEGES.2025.1121457).
- [41] X. Wang and H. Wang, "Improved droop control strategy of multiple energy storage applications in an ac microgrid based on the state of charge," *Electronics*, vol. 10, no. 14, Article Number: 1726, July 2021, doi: [10.3390/electronics10141726](https://doi.org/10.3390/electronics10141726).
- [42] R. Ayop and C. W. Tan, "Design of boost converter based on maximum power point resistance for photovoltaic applications," *Solar Energy*, vol. 160, pp. 322-335, Jan. 2018, doi: [10.1016/j.solener.2017.12.016](https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.12.016).
- [43] F. Lu and H. Liu, "An accurate power flow method for microgrids with conventional droop control," *Energies*, vol. 15, no. 16, Article Number: 5841, Aug. 2022, doi: [10.3390/en15165841](https://doi.org/10.3390/en15165841).
- [44] H. Wang, C. Yang, X. Liao, J. Wang, W. Zhou and X. Ji, "Artificial neural network-based virtual synchronous generator dual droop control for microgrid systems," *Computers and Electrical Engineering*, vol. 111, Article Number: 108930, Oct. 2023, doi: [10.1016/j.compeleceng.2023.108930](https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2023.108930).
- [45] X. Gao, D. Zhou, A. Anvari-Moghaddam and F. Blaabjerg, "An adaptive control strategy with a mutual damping term for paralleled virtual synchronous generators system," *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 38, Article Number: 101308, June 2024, doi: [10.1016/j.segan.2024.101308](https://doi.org/10.1016/j.segan.2024.101308).
- [46] B. Ren, Q. Li, Z. Fan and Y. Sun, "Adaptive control of a virtual synchronous generator with multiparameter coordination," *Energies*, vol. 16, no. 12, Article Number: 4789, June 2023, doi: [10.3390/en16124789](https://doi.org/10.3390/en16124789).
- [47] K.M. Cheema and K. Mehmood, "Improved virtual synchronous generator control to analyse and enhance the transient stability of microgrid," *IET Renewable Power Generation*, vol. 14, no. 4, pp. 495-505, March 2020, doi: [10.1049/iet-rpg.2019.0855](https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2019.0855).
- [48] V. Mallemaci, F. Mandrile, S. Rubino, A. Mazza, E. Carpaneto and R. Bojoi, "A comprehensive comparison of virtual synchronous generators with focus on virtual inertia and frequency regulation," *Electric Power Systems Research*, vol. 201, Article Number: 107516, Dec. 2021, doi: [10.1016/j.epsr.2021.107516](https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107516).
- [49] J. Chen and T. O'Donnell, "Analysis of virtual synchronous generator control and its response based on transfer functions," *IET Power Electronics*, vol. 12, no. 11, pp. 2965-2977, Sept. 2019, doi: [10.1049/iet-pel.2018.5711](https://doi.org/10.1049/iet-pel.2018.5711).
- [50] H.S. Salama, A. Bakeer, G. Magdy and I. Vokony, "Virtual inertia emulation through virtual synchronous generator based superconducting magnetic energy storage in modern power system," *Journal of Energy Storage*, vol. 44, Article Number: 103466, Dec. 2021, doi: [10.1016/j.est.2021.103466](https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103466).
- [51] G. Wang, C. Wang, Q. Hao and M. Shahidehpour, "Load frequency control method for cyber-physical power systems with 100% renewable energy," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 39, no. 2, pp. 4684-4698, March 2024, doi: [10.1109/TPWRS.2023.3301303](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2023.3301303).