

## Improvement of Frequency Control with Model Prediction Control Based on Virtual Synchronous Generator

Mohammadreza Najafi,<sup>1\*</sup> Mohammadreza Toulabi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Electrical and Computer faculty, Khajeh Nasir Toosi university, Tehran, Iran,  
[mohammadreza.najafi@email.kntu.ac.ir](mailto:mohammadreza.najafi@email.kntu.ac.ir)

<sup>2</sup> Electrical and Computer faculty, Khajeh Nasir Toosi university, Tehran, Iran,  
[mreza.toulabi@gmail.com](mailto:mreza.toulabi@gmail.com)

---

### Keywords:

virtual synchronous generator (VSG), model predictive control, frequency control, microgrid, virtual inertia.

**Abstract:** Concerns over the depletion of fossil fuel resources, rising global temperatures and environmental challenges have accelerated the integration of distributed generation units and renewable energy sources into power grids. Unlike traditional large power plants, which predominantly use synchronous generators, these distributed units exhibit significantly lower inertia and damping properties. The increasing penetration of renewable energy sources has led to reduced system inertia, posing challenges for grid stability and control. Consequently, analyzing and controlling power grids in the presence of distributed and renewable generation have become a critical area of research. This study proposes an optimal control method for virtual synchronous generators (VSGs), using power electronics and advanced mechanical control techniques to provide the necessary virtual inertia for grid stability. A nonlinear model of a power network, containing multiple parallel VSGs along with local loads, is developed and analyzed in both grid-connected and islanded operating modes. The nonlinear models are subsequently linearized, and a model predictive control (MPC) strategy is employed to enhance frequency regulation within the grid. To validate the effectiveness of the proposed approach, simulations are conducted in the MATLAB/SIMULINK environment under various disturbance scenarios.

---

### Original Research Article

#### Paper History:

Received: 22/09/2024

Revise: 11/03/2025

Accepted: 17/03/2025

---

**How to cite this article:** Najafi, M., Toulabi, M., "Improvement of Frequency Control with Model Prediction Control Based on Virtual Synchronous Generator", Energy Engineering and Management, Vol. 14, No. 2, PP. 44-57, 2024.  
<https://doi.org/10.22052/eem.2025.255498.1087>

© 2023 University of Kashan Press.

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



### Introduction

The increasing integration of renewable energy sources in power grids is driven by concerns over fossil fuel depletion, climate change, and

environmental sustainability. Unlike conventional synchronous generators, inverter-based renewable energy units lack inherent inertia, which leads to reduced system stability and frequency regulation

challenges. As the share of renewable generation rises, maintaining grid stability becomes crucial, particularly in the microgrids that operate in both grid-connected and islanded modes. Virtual Synchronous Generators (VSGs) have emerged as a promising solution for addressing the inertia deficit in power systems. By emulating the dynamic behavior of synchronous generators, VSGs provide virtual inertia and damping characteristics, which contributes to improved frequency stability. However, conventional VSG control strategies often rely on proportional-integral-derivative (PID) controllers, which may not perform optimally under varying operating conditions and disturbances.

Future research will focus on extending the control framework to multi-VSG networks and exploring hybrid control techniques for further optimization.

### Methodology

This research proposes a Model Predictive Control (MPC)-based VSG strategy to enhance frequency regulation in microgrids. The study begins with the development of a nonlinear dynamic model of a microgrid incorporating multiple parallel VSGs and local loads. The model is analyzed under both grid-connected and islanded scenarios, considering the impact of line impedances and system parameters. To facilitate control design, the nonlinear model is linearized into a state-space representation. The MPC strategy is, then formulated to optimize the control inputs while minimizing frequency deviations and ensuring smooth transient responses. The cost function of the MPC includes terms for tracking frequency setpoints, for minimizing control effort, and for accounting for system constraints.

### Results and Discussion

The effectiveness of the proposed MPC-based VSG control is validated through simulations in MATLAB/SIMULINK under various disturbance scenarios. The performance of the conventional VSG control is compared against the MPC-based control in terms of:

- Frequency deviation reduction
- Transient response improvement
- Damping enhancement
- Robustness against load variations and grid disturbances

The simulation results indicated that the MPC-based VSG control significantly reduced frequency overshoot and settling time compared with traditional approaches. Additionally, the proposed controller effectively mitigates frequency oscillations in islanded operation, addressing a key challenge in microgrid stability.

### Conclusion

This study has demonstrated that MPC-based control can significantly enhance the frequency stability of microgrids employing VSGs. The proposed strategy has improved transient performance, reduced frequency deviations, and ensured stable operation under both grid-connected and islanded conditions.

## بهبود کنترل فرکانسی با کنترل پیش‌بین مدل بر پایه ژنراتور سنکرون مجازی

محمد رضا نجفی<sup>۱</sup>،\* محمد رضا طولابی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

[mohamadreza.najafi@email.kntu.ac.ir](mailto:mohamadreza.najafi@email.kntu.ac.ir)

<sup>۲</sup> استادیار دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

[mreza.toulabi@gmail.com](mailto:mreza.toulabi@gmail.com)

واژه‌های کلیدی:

ژنراتور سنکرون مجازی،  
کنترل پیش‌بین مدل،  
کنترل فرکانس،  
ریزشبکه،  
اینرسی مجازی.

چکیده: نگرانی‌های ناشی از کاهش منابع سوخت‌های فسیلی، افزایش دمای کره زمین و مشکلات زیست‌محیطی، موجب حضور واحدهای تولید پراکنده و منابع انرژی‌های تجدیدپذیر در شبکه قدرت شده است. در مقایسه با نیروگاه‌های بزرگ که قسمت اصلی آن را ژنراتورهای سنکرون تشکیل می‌دهند، اینرسی و خاصیت میرایی این واحدها بسیار کم است. با افزایش نفوذ منابع تجدیدپذیر، اینرسی شبکه به شدت کاهش می‌یابد و کنترل شبکه قدرت در حضور منابع تولید پراکنده و تجدیدپذیر به امری حیاتی تبدیل شده است. در این مقاله، یک روش کنترلی بهینه ژنراتور سنکرون مجازی پیشنهاد شده است که با استفاده از ادوات الکترونیک قدرت و سازوکار کنترلی مناسب، اینرسی مجازی مورد نیاز شبکه را تأمین می‌کند.

مقاله علمی پژوهشی

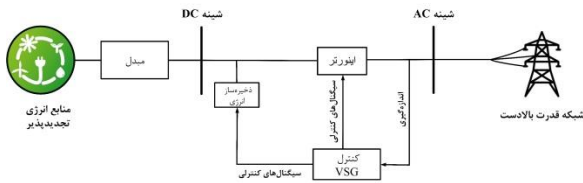
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۰۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۷

برای بررسی کاربرد ژنراتور سنکرون مجازی در بهبود فرکانس شبکه، یک مدل غیرخطی از یک شبکه حاوی یک ژنراتور سنکرون مجازی در حضور بار محلی ارائه شده است و در دو حالت متصل به شبکه و جزیره‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس مدل‌های به دست آمده خطی سازی می‌شود و برای بهبود تنظیم فرکانس شبکه، از کنترل پیش‌بین مدل بهره برده می‌شود. برای صحت سنجی و ارزیابی عملکرد روش ارائه شده، مدل‌های استخراج شده را در محیط MATLAB/SIMULINK تحت انواع سناریوهای اغتشاش شبیه‌سازی می‌شود.

## ۱. مقدمه



شکل (۱): ساختار مفهومی از ژنراتور سنکرون مجازی

در سال‌های اخیر، نگرانی‌های فزاینده‌ای درباره منابع انرژی تجدیدپذیر نظیر نفت، زغال‌سنگ و گاز طبیعی، همراه با پیامدهای زیست‌محیطی ناشی از استفاده از این منابع، از جمله در تولید برق مطرح شده است؛ در نتیجه نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر در سیستم‌های قدرت با سرعت زیادی افزایش یافته و به یک ضرورت تبدیل شده است. برای انتقال بهینه انرژی الکتریکی از منابع تجدیدپذیر به سیستم قدرت، استفاده از اینورترها الزامی است؛ زیرا این تجهیزات امکان ادغام واحدهای تولید مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر را در سیستم قدرت فراهم می‌کنند. با این حال، به دلیل فقدان جرم‌گردان در اینورترها، این تجهیزات از اینرسی برخوردار نیستند؛ بنابراین، افزایش نفوذ واحدهای تولید مبتنی بر اینورتر به معنای کاهش اینرسی کلی سیستم قدرت است [۱ و ۲].

اگرچه افزایش سریع نفوذ واحدهای تولید مبتنی بر منابع تجدیدپذیر از طریق اینورترها از منظر زیست‌محیطی مطلوب بوده و به معنای بهره‌برداری بهینه از منابع تجدیدپذیر موجود است، این روند می‌تواند تأثیرات منفی بر پایداری سیستم قدرت، به ویژه پایداری فرکانسی داشته باشد. این امر به دلیل ارتباط تنگاتنگ پایداری فرکانسی با میزان اینرسی در شبکه است که با کاهش اینرسی ناشی از نفوذ بالای واحدهای مبتنی بر اینورتر به خطر می‌افتد [۳ و ۴]. علاوه بر تأثیر مستقیم بر کاهش اینرسی کلی سیستم، افزایش نفوذ واحدهای تولیدی مبتنی بر منابع تجدیدپذیر می‌تواند اثرات منفی دیگری نیز به همراه داشته باشد. این اثرات شامل تأمین بیش از حد برق در سیستم هنگام تولید حداکثری توسط این منابع، نوسانات توان به دلیل ماهیت متغیر و غیرقابل پیش‌بینی منابع تجدیدپذیر، و تشدید مشکلات در تنظیم و پایداری فرکانس است [۵].

بنابراین، برای تسهیل نفوذ بالای منابع انرژی تجدیدپذیر در سیستم قدرت، یک روش کنترلی جدید مورد نیاز است که بتواند پشتیبانی اینرسی را برای سیستم قدرت فراهم کند. این هدف می‌تواند با استفاده از یک ذخیره‌ساز انرژی به‌همراه ادوات الکترونیک قدرت و یک مکانیزم کنترلی مناسب محقق شود، به گونه‌ای که اینرسی مورد نیاز واحدهای تولید پراکنده به صورت مجازی تأمین شود [۶ و ۷]. این مفهوم با عنوان ژنراتور سنکرون مجازی شناخته می‌شود. ژنراتور سنکرون مجازی از سه بخش اساسی تشکیل شده است: ذخیره‌ساز انرژی، اینورتر و مکانیزم کنترلی که ساختار آن در شکل (۱) نمایش داده شده است.

طرح‌های مختلفی از ژنراتور سنکرون مجازی تاکنون پیشنهاد شده است که می‌توان آن‌ها را به دودسته ژنراتورهای سنکرون مجازی کنترل‌شده با جریان و کنترل‌شده با ولتاژ تقسیم کرد [۸]. در مرجع [۹]، برای نخستین بار یک ژنراتور سنکرون مجازی کنترل‌شده با جریان پیشنهاد شد. با این حال، این روش تنها شامل یک حلقه کنترل جریان است که توانایی عملکرد در حالت جزیره‌ای را ندارد. در مرجع [۱۰]، ساختار ژنراتور سنکرون مجازی کنترل‌شده با ولتاژ پیشنهاد شد که از بهره‌برداری در حالت جزیره‌ای پشتیبانی می‌کند. با این حال، این روش تنها یک حلقه کنترل ولتاژ را پیاده‌سازی می‌کند و در نتیجه فاقد قابلیت محدود کردن جریان است.

مکانیزم بهره‌برداری مناسب از اینورتر به ژنراتور سنکرون مجازی امکان می‌دهد تا ورودی و خروجی خود را به صورت مؤثر کنترل کند. اجرای استراتژی کنترلی در سیستم معمولاً به نحوه بهره‌برداری از سیستم قدرت وابسته است. در مرجع [۱۱]، یک تکنیک کنترلی جدید برای اینرسی مجازی پیشنهاد شده است که تحلیل عمیقی درباره عدم تطابق مناسب بین مفهوم اینرسی مجازی و الگوریتم کنترل ذخیره‌ساز انرژی ارائه می‌دهد. در مرجع [۱۲]، یک روش کنترل چندحلقه‌ای منحصربه‌فرد برای مدیریت منابع تجدیدپذیر مبتنی بر اینورتر با استفاده از ژنراتور سنکرون مجازی معرفی شده است. این روش از طریق نصب و اجرا،<sup>۱</sup> یکپارچگی سیستم را تضمین می‌کند. در این رویکرد کنترلی چندحلقه‌ای، کنترل‌کننده مجازی با هدف حذف نفوذ هارمونیک‌ها و اطمینان از عملکرد صحیح سیستم کنترل بردار<sup>۲</sup> مبتنی بر بازخورد حلقه بسته ولتاژ یا جریان به کار گرفته می‌شود. این مکانیزم فرایند جهت‌گیری بهره‌برداری را به طور مؤثر مدیریت می‌کند.

با استفاده از روش کنترلی ژنراتور سنکرون مجازی، یک مدل حرکتی معادل گذرا در مرجع [۱۳] استخراج شده است که پایداری گذرا شبکه‌ای شامل مبدل‌ها را ارزیابی کند. در مرجع [۱۴] مدل سیگنال کوچک از یک واحد ژنراتور سنکرون مجازی ایجاد شده

در این پژوهش، برای بررسی کاربرد ژنراتور سنکرون مجازی در بهبود پایداری فرکانس شبکه، یک مدل غیرخطی از یک شبکه حاوی ژنراتور سنکرون مجازی در حضور بار محلی، با در نظر گرفتن امپدانس خطوط ارائه شده است. این مدل در دو حالت متصل به شبکه و جزیره‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس مدل‌های به‌دست‌آمده خطی‌سازی شده و برای بهبود تنظیم فرکانس شبکه، از کنترل پیش‌بین مدل استفاده می‌شود. در نهایت، با بهره‌گیری از فضای حالت سیستم، مدل استخراج‌شده در محیط متلب-سیمولینک شبیه‌سازی شده و عملکرد شبکه تحت انواع سناریوهای اغتشاش سحت‌سنجی و ارزیابی می‌شود.

این مقاله به‌صورت زیر تنظیم شده است:

بخش دوم، مدل جامع دینامیکی از یک ریزشبکه در حضور ژنراتور سنکرون مجازی را ارائه می‌کند و یک کنترل پیش‌بین مدل طراحی می‌شود تا کنترل فرکانس را بهبود دهد. در بخش سوم، عملکرد مدل به‌دست‌آمده را در حالت کنترل پایه و کنترل پیش‌بین مدل توسط شبیه‌سازی تحت چندین اغتشاش راستی‌آزمایی می‌شود. در بخش چهارم، پژوهش جمع‌بندی شده و نتایج مقاله ارائه خواهد شد.

## ۲. مدل‌سازی و کنترل بر پایه ژنراتور سنکرون

### مجازی

#### ۱.۲. فضای حالت سیستم در مدل خطی شده

ریزشبکه‌ای حاوی یک ژنراتور سنکرون مجازی در نظر گرفته شده است. ساختار کلی این ریزشبکه در شکل (۲) نشان داده شده است. ژنراتور سنکرون مجازی از طریق یک خط با مقاومت  $R_1$  و راکتانس  $X_1$  به باس  $b$  متصل شده و شبکه از طریق خط انتقالی با مقاومت  $R_g$  و راکتانس  $X_g$  به باس  $b$  متصل است. معادله اساسی در ساختار ژنراتور سنکرون مجازی، معادله نوسان است. مشابه با ژنراتور سنکرون، این معادله به‌صورت زیر مطرح می‌شود [۱۹]:

$$M\dot{\omega} + D(\omega - \omega_0) = P_{in} - P_{out} \quad (1)$$

$M$ ،  $D$  و  $\omega_0$  به ترتیب ثبات اینرسی، ضریب میرایی و فرکانس زاویه‌ای مرجع است.  $P_{out}$  نیز توان خروجی ژنراتور سنکرون مجازی می‌باشد که برابر است با:

$$\Delta P_{out} = \left( \frac{V_1^2}{R_1^2 + X_1^2} \right) R_1 - \left( \frac{V_1 V_b}{R_1^2 + X_1^2} \right) (R_1 \cos(\delta_1 - \delta_b) - X_1 \sin(\delta_1 - \delta_b)) \quad (2)$$

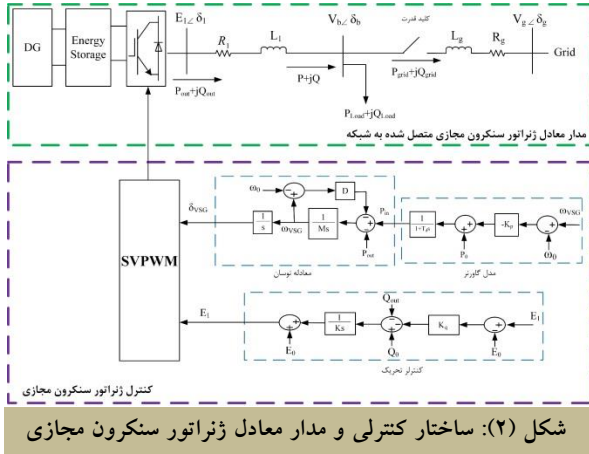
است که در آن مشخصه گاورنر را در نظر می‌گیرد. مدل ریاضی یک سیستم دوناحیه‌ای شامل ژنراتور سنکرون مجازی و ژنراتور سنکرون به‌عنوان سیستم مورد مطالعه ارزیابی می‌شود. مدل استفاده‌شده ژنراتور سنکرون مجازی از مرتبه دو است. روش کنترلی که اغلب مورد استفاده قرار گرفته، کنترل‌کننده تناسبی-انتگرال‌گیر-مشتق‌گیر<sup>۱</sup> است؛ با این حال، دارای ایرادات جدی از جمله کاهش عملکرد در طول اغتشاش‌هاست [۱۵]. در مرجع [۱۶]، روش کنترلی سلسله‌مراتبی<sup>۲</sup> برای مدیریت توان اکتیو شبکه‌ای با ژنراتور سنکرون مجازی ارائه شده است. در مرجع [۱۷]، یک کنترل‌کننده خودتطبیق اینرسی مجازی مبتنی بر فازی، برای اطمینان از پایداری فرکانس در یک شبکه جزیره‌ای توسعه یافته است. این رویکرد کنترلی، ثابت اینرسی مجازی را براساس تزریق توان حقیقی از منابع انرژی تجدیدپذیر و تغییرات فرکانس سیستم به‌روزرسانی می‌کند. در اکثر مطالعات بیان‌شده، از مدل مرتبه پایین ژنراتور سنکرون مجازی استفاده شده و سیستم تنها به‌صورت جزیره‌ای در نظر گرفته شده است. همچنین خطوط به‌صورت اندوکتانس مدل‌سازی شده و از مقاومت خط صرف‌نظر شده است؛ با وجود آنکه خاصیت مقاومتی خطوط قابل توجه است و نسبت اندوکتانس به مقاومت تقریباً برابر ۲ می‌باشد [۱۸ و ۱۹].

مرجع [۲۲] روشی مبتنی بر کنترل پیش‌بین مدل (MPC) برای شبیه‌سازی اینرسی مجازی در یک ریزشبکه جزیره‌ای ارائه کرده است. این روش با هدف تنظیم دقیق‌تر فرکانس طراحی شده و عملکرد آن با شبیه‌سازی‌های مختلف ارزیابی شده است. اما بیشتر بر روی پاسخ گذرای سیستم در شرایط تغییر بار تمرکز دارد و از اثر پارامترهای خطوط انتقال یا حالت متصل به شبکه غفلت کرده است. در مرجع [۲۳]، یک روش کنترل پیش‌بین مدل بهینه برای کنترل اینرسی مجازی در ریزشبکه‌های خودمختار ارائه شده است. تمرکز اصلی بر روی کاهش مصرف انرژی و بهبود پاسخ سیستم به اغتشاشات است. این مرجع بهینه‌سازی توان مصرفی و کاهش نوسانات را هدف قرار داده است، اما جزئیاتی درباره حالت جزیره‌ای یا تأثیر پارامترهای سیستم ارائه نمی‌دهد. مرجع [۲۴]، یک روش کنترل دولایه مبتنی بر کنترل پیش‌بین مدل را معرفی کرده که به‌طور خاص بر روی تنظیم فرکانس و دینامیک ریزشبکه جزیره‌ای متمرکز است. استفاده از این روش، نوسانات فرکانسی و پاسخ دینامیکی را بهبود می‌دهد. با این حال، به تأثیر تغییر پارامترهای سیستم و خطوط انتقال به‌صورت خاص پرداخته نشده است.

1. Proportional Integral Derivative (PID)  
2. Hierarchical Control

$$K_{11} = \frac{E_1 V_b}{R_1^2 + X_1^2} (-R_1 \sin(\delta_1 - \delta_b) + X_1 \cos(\delta_1 - \delta_b)),$$

$$K_{12} = \frac{E_1}{R_1^2 + X_1^2} (-R_1 \cos(\delta_1 - \delta_b) + X_1 \sin(\delta_1 - \delta_b)) - \frac{2V_b}{R_1^2 + X_1^2} X_1$$



با توجه به توان عبوری بین باس b و شبکه قدرت، توان اکتیو خطی شده انتقال یافته از ریزشکبه به شبکه اصلی را می‌توان به صورت زیر به دست آورد:

$$\Delta P_{grid} = K_{13}(\Delta\delta_b - \Delta\delta_g) + K_{14}\Delta V_g + K_{15}\Delta V_b \quad (11)$$

که در آن مقادیر  $K_{13}$ ،  $K_{14}$  و  $K_{15}$  برابر است با:

$$K_{13} = \frac{2V_b V_g}{R_g^2 + X_g^2} (R_g \sin(\delta_b - \delta_g) + X_g \cos(\delta_b - \delta_g)), \quad (12)$$

$$K_{14} = \frac{-2V_b V_g}{R_g^2 + X_g^2} (R_g \cos(\delta_b - \delta_g) - X_g \sin(\delta_b - \delta_g)),$$

$$K_{15} = \frac{2V_b V_g}{R_g^2 + X_g^2} R_g - \frac{2V_b V_g}{R_g^2 + X_g^2} (R_g \cos(\delta_b - \delta_g) - X_g \sin(\delta_b - \delta_g))$$

به روش مشابه، توان راکتیو خطی شده و انتقال یافته از ریزشکبه به شبکه اصلی را می‌توان به صورت زیر به دست آورد:

$$\Delta Q_{grid} = K_{16}(\Delta\delta_b - \Delta\delta_g) + K_{17}\Delta V_g + K_{18}\Delta V_b \quad (13)$$

که در آن مقادیر  $K_{16}$ ،  $K_{17}$  و  $K_{18}$  برابر است با:

$$K_{16} = \frac{2V_b V_g}{R_g^2 + X_g^2} (-R_g \cos(\delta_b - \delta_g) + X_g \sin(\delta_b - \delta_g)), \quad (14)$$

$$K_{17} = \frac{-2V_b V_g}{R_g^2 + X_g^2} (R_g \sin(\delta_b - \delta_g) + X_g \cos(\delta_b - \delta_g)),$$

$$K_{18} = \frac{2V_b V_g}{R_g^2 + X_g^2} X_g - \frac{2V_b V_g}{R_g^2 + X_g^2} (R_g \sin(\delta_b - \delta_g) + X_g \cos(\delta_b - \delta_g))$$

توان خروجی محاسبه شده در فرمول (۲) غیر خطی است؛

در نتیجه، این معادله باید به صورت زیر خطی شود:

$$\Delta P_{out} = \frac{\partial P_{out}}{\partial \delta_1} \Delta \delta_1 + \frac{\partial P_{out}}{\partial \delta_b} \Delta \delta_b + \frac{\partial P_{out}}{\partial E} \Delta E + \frac{\partial P_{out}}{\partial V_b} \Delta V_b = K_1(\Delta\delta_1 - \Delta\delta_b) + K_2\Delta E + K_3\Delta V_b \quad (3)$$

که در آن مقادیر  $K_1$ ،  $K_2$  و  $K_3$  برابر است با:

$$K_1 = \frac{E_1 V_b}{R_1^2 + X_1^2} (R_1 \sin(\delta_1 - \delta_b) + X_1 \cos(\delta_1 - \delta_b)), \quad (4)$$

$$K_2 = \frac{2E_1}{R_1^2 + X_1^2} R_1 - \frac{V_b}{R_1^2 + X_1^2} (R_1 \cos(\delta_1 - \delta_b) - X_1 \sin(\delta_1 - \delta_b)),$$

$$K_3 = -\frac{E_1}{R_1^2 + X_1^2} (R_1 \cos(\delta_1 - \delta_b) - X_1 \sin(\delta_1 - \delta_b))$$

به صورت مشابه، توان راکتیو خروجی خطی شده ژنراتور سنکرون

مجازی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\Delta Q_{out} = K_4(\Delta\delta_1 - \Delta\delta_b) + K_5\Delta E + K_6\Delta V_b \quad (5)$$

که در آن مقادیر  $K_4$ ،  $K_5$  و  $K_6$  برابر است با:

$$K_4 = \frac{E_1 V_b}{R_1^2 + X_1^2} (-R_1 \cos(\delta_1 - \delta_b) + X_1 \sin(\delta_1 - \delta_b)), \quad (6)$$

$$K_5 = \frac{2E_1}{R_1^2 + X_1^2} X_1 - \frac{V_b}{R_1^2 + X_1^2} (R_1 \sin(\delta_1 - \delta_b) + X_1 \cos(\delta_1 - \delta_b)),$$

$$K_6 = -\frac{E_1}{R_1^2 + X_1^2} (R_1 \sin(\delta_1 - \delta_b) + X_1 \cos(\delta_1 - \delta_b))$$

همچنین توان اکتیو خطی سازی شده هر ژنراتور سنکرون مجازی که

به باس b تزریق می‌شود، به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\Delta P = K_7(\Delta\delta_1 - \Delta\delta_b) + K_8\Delta E + K_9\Delta V_b \quad (7)$$

که در آن مقادیر  $K_7$ ،  $K_8$  و  $K_9$  برابر است با:

$$K_7 = \frac{E_1 V_b}{R_1^2 + X_1^2} (-R_1 \sin(\delta_1 - \delta_b) + X_1 \cos(\delta_1 - \delta_b)), \quad (8)$$

$$K_8 = \frac{V_b}{R_1^2 + X_1^2} (R_1 \cos(\delta_1 - \delta_b) + X_1 \sin(\delta_1 - \delta_b)),$$

$$K_9 = \frac{E_1}{R_1^2 + X_1^2} (R_1 \cos(\delta_1 - \delta_b) + X_1 \sin(\delta_1 - \delta_b)) - \frac{2V_b}{R_1^2 + X_1^2} R_1.$$

به طور مشابه، توان راکتیو خطی سازی شده مرتبط با هر ژنراتور

سنکرون مجازی که به باس b تزریق می‌شود، به صورت زیر به دست

می‌آید:

$$\Delta Q = K_{10}(\Delta\delta_1 - \Delta\delta_b) + K_{11}\Delta E + K_{12}\Delta V_b \quad (9)$$

که در آن مقادیر  $K_{10}$ ،  $K_{11}$  و  $K_{12}$  برابر است با:

$$K_{10} = \frac{E_1 V_b}{R_1^2 + X_1^2} (-R_1 \cos(\delta_1 - \delta_b) - X_1 \sin(\delta_1 - \delta_b)), \quad (10)$$



با جایگزینی فرمول‌های (۱۸) و (۲۰) در فرمول (۳)، می‌توان آن را به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\Delta P_{out} = \mu_{\delta_1} \Delta \delta_1 + \mu_{E_1} \Delta E_1 + \mu_P \Delta P_{mg} + \mu_Q \Delta Q_{mg} \quad (22)$$

که در آن مقادیر  $\mu_{\delta_1}$ ،  $\mu_{E_1}$ ،  $\mu_P$  و  $\mu_Q$  برابر است با:

$$\mu_{\delta_1} = -K_1 \gamma_{\delta_1} + K_3 \alpha_{\delta_1} + K_1, \quad (23)$$

$$\mu_{E_1} = -K_1 \gamma_{E_1} + K_3 \alpha_{E_1} + K_2,$$

$$\mu_P = -K_1 \gamma_P + K_3 \alpha_P,$$

$$\mu_Q = -K_1 \gamma_Q + K_3 \alpha_Q$$

به طور مشابه، جایگزینی فرمول‌های (۱۸) و (۲۰) در فرمول

(۵)، می‌تواند به صورت زیر بیان شود:

$$\Delta Q_{out} = \eta_{\delta_1} \Delta \delta_1 + \eta_{E_1} \Delta E_1 + \eta_P \Delta P_{mg} + \eta_Q \Delta Q_{mg} \quad (24)$$

که در آن مقادیر  $\eta_{\delta_1}$ ،  $\eta_{E_1}$ ،  $\eta_P$  و  $\eta_Q$  برابر است با:

$$\eta_{\delta_1} = -K_4 \gamma_{\delta_1} + K_6 \alpha_{\delta_1} + K_4, \quad (25)$$

$$\eta_{E_1} = -K_4 \gamma_{E_1} + K_6 \alpha_{E_1} + K_5,$$

$$\eta_P = -K_4 \gamma_P + K_6 \alpha_P,$$

$$\eta_Q = -K_4 \gamma_Q + K_6 \alpha_Q$$

در معادلات (۲۲) و (۲۴)، توان‌های اکتیو و راکتیو خروجی

هر ژنراتور سنکرون مجازی به صورت تابعی از متغیرهای حالت،

ورودی‌ها و اغتشاش‌ها محاسبه شده است. با جای‌گذاری معادله

(۲۲) در معادله (۳)، معادله نوسان مرتبط با ژنراتور سنکرون

مجازی به صورت معادله (۲۶) خواهد شد:

$$\Delta \dot{\omega} = \frac{D}{M} \Delta \omega_1 + \frac{1}{M} \Delta P_{in} - \frac{\mu_{\delta_1}}{M} \Delta \delta_1 - \frac{\mu_{E_1}}{M} \Delta E_1 - \frac{\mu_P}{M} \Delta P_{mg} - \frac{\mu_Q}{M} \Delta Q_{mg} \quad (26)$$

از حلقه کنترل تحریک ژنراتور سنکرون مجازی که در شکل

(۲) نشان داده شده است، معادله (۲۷) به دست می‌آید:

$$K \Delta \dot{E}_1 = -k_q \Delta E_1 - Q_{out} + \Delta Q_0 \quad (27)$$

در معادله (۲۳)، فرض می‌شود که مقدار ولتاژ مرجع تغییر

نمی‌کند؛ یعنی  $\Delta V_0 = 0$ . باین حال، برای ارزیابی اثر ولتاژ مرجع،

حالت دیگری مرتبط با ولتاژ مرجع باید به مدل اضافه شود. با

جایگزینی فرمول (۲۴) در (۲۷)، معادله را می‌توان به صورت زیر

ارائه کرد:

$$\Delta \dot{E}_1 = -\frac{\eta_{\delta_1}}{K} \Delta \delta_1 - \frac{\eta_{E_1} + k_q}{K} \Delta E_1 - \frac{\eta_P}{K} \Delta P_{mg} - \frac{\eta_Q}{K} \Delta Q_{mg} + \frac{1}{K} \Delta Q_0 \quad (28)$$

همچنین، حلقه مدل گاورنر ژنراتور سنکرون مجازی که در

شکل (۲) نشان داده شده است، می‌تواند به صورت زیر نوشته

شود:

$$\Delta \dot{P}_{in} = \frac{1}{T_d} (-k_p \Delta \omega_1 - \Delta P_{in} - \Delta P_0) \quad (29)$$

در معادلات فرمول (۱۲) و فرمول (۱۴)، پارامتر  $\mathcal{M}$  یک متغیر

باینری است که وقتی ریزشبه از شبکه اصلی جدا باشد، برابر با صفر

و زمانی که ریزشبه به شبکه اصلی متصل شود، برابر با یک خواهد

شد. توجه داشته باشید که با استفاده از این متغیر باینری، مدل

به دست آمده برای هر دو حالت بهره‌برداری از ریزشبه معتبر است.

در روابط بالا  $\Delta V_g$  و  $\Delta \delta_g$  به ترتیب تغییرات اندازه و زاویه ولتاژ

شبکه است و فرض شده که برابر صفر هستند؛ زیرا شبکه بسیار شبیه

به باس بی‌نهایت عمل می‌کند.

شایان ذکر است که در معادلات فوق، مقدار اندازه و زاویه ولتاژ

در باس  $b$  متغیرهای مستقلی نبوده و برحسب متغیرهای حالت و

اغتشاش قابل تعیین است. با توجه به باس  $b$  مجموع توان‌های

ورودی اکتیو و راکتیو به این باس با مجموع توان‌های خروجی اکتیو

و راکتیو برابر است که منجر به دستگاه معادلات زیر می‌شود:

$$\begin{cases} \Delta P = \Delta P_{grid} + \Delta P_{mg} \\ \Delta Q = \Delta Q_{grid} + \Delta Q_{mg} \end{cases} \quad (15)$$

با جایگزینی معادلات (۷)، (۹)، (۱۱) و (۱۳) در معادله فوق،

می‌توان فرمول (۱۵) را به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\begin{cases} A \Delta \delta_b + B \Delta V_b = K_7 \Delta \delta_1 + K_8 \Delta E_1 - \Delta P_{mg} \\ C \Delta \delta_b + D \Delta V_b = K_{10} \Delta \delta_1 + K_{11} \Delta E_1 - \Delta Q_{mg} \end{cases} \quad (16)$$

که در آن مقادیر  $A$ ،  $B$ ،  $C$ ،  $D$  برابر است با:

$$\begin{aligned} A &\equiv (K_{13} + K_7), \\ B &\equiv (K_{15} - K_9), \\ C &\equiv (K_{16} + K_{10}), \\ D &\equiv (K_{18} - K_{12}) \end{aligned} \quad (17)$$

با حل دستگاه معادلات فوق، زاویه ولتاژ در باس  $b$  به صورت

زیر به دست می‌آید:

$$\Delta \delta_b = \gamma_P \Delta P_{mg} + \gamma_Q \Delta Q_{mg} + \gamma_{\delta_1} \Delta \delta_1 + \gamma_{E_1} \Delta E_1, \quad (18)$$

که در آن مقادیر  $\gamma_P$ ،  $\gamma_Q$ ،  $\gamma_{\delta_1}$  و  $\gamma_{E_1}$  برابر است با:

$$\begin{aligned} \gamma_P &= -\frac{D}{AD - BC}, \\ \gamma_Q &= \frac{B}{AD - BC}, \\ \gamma_{\delta_1} &= \frac{DK_7 - BK_{10}}{AD - BC}, \\ \gamma_{E_1} &= \frac{DK_8 - BK_{11}}{AD - BC} \end{aligned} \quad (19)$$

سپس مقدار ولتاژ در باس  $b$  را می‌توان به صورت زیر محاسبه

کرد:

$$\Delta V_b = \alpha_P \Delta P_{mg} + \alpha_Q \Delta Q_{mg} + \alpha_{\delta_1} \Delta \delta_1 + \alpha_{E_1} \Delta E_1 \quad (20)$$

که در آن مقادیر  $\alpha_P$ ،  $\alpha_Q$ ،  $\alpha_{\delta_1}$  و  $\alpha_{E_1}$  برابر است با:

$$\begin{aligned} \alpha_P &= -\frac{C}{BC - AD}, \\ \alpha_Q &= \frac{B}{BC - AD}, \\ \alpha_{\delta_1} &= \frac{CK_7 - AK_{10}}{BC - AD}, \\ \alpha_{E_1} &= \frac{CK_8 - AK_{11}}{BC - AD} \end{aligned} \quad (21)$$

براساس مقادیر گذشته و حال و اقدامات کنترل بهینه در آینده استفاده می‌شود. این اقدامات توسط بهینه‌ساز با در نظر گرفتن تابع هزینه و محدودیت‌ها محاسبه می‌شود. معادلات خطی برای فضای حالت به‌دست‌آمده از سیستم به شرح زیر است:

$$\begin{aligned} x(t+1) &= Ax(t) + bu(t), \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (31)$$

با توجه به عبارت  $\Delta u(t) = u(t) - u(t-1)$  برای دستیابی به کنترل بدون افست، مدل را می‌توان به صورت افزایشی به صورت زیر بیان کرد [۲۲]:

$$\begin{bmatrix} x(t+1) \\ u(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ u(t-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ I \end{bmatrix} \Delta u(t), \quad (32)$$

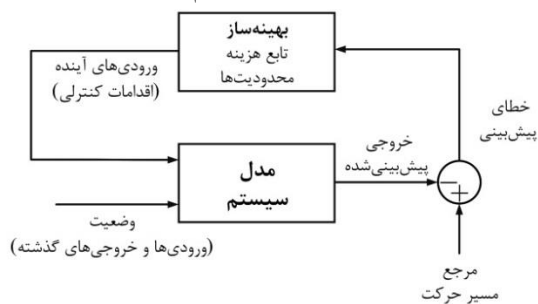
$$y(t) = [C \quad 0] \begin{bmatrix} x(t) \\ u(t-1) \end{bmatrix}$$

در معادله (۳۱)، کنترل ورودی مستقیماً در مدل گنجانده شده است، اما این باعث می‌شود که کنترل‌کننده در حضور اغتشاشات یا عدم تطابق مدل، دچار آفست شود. برای رفع این مشکل، معادله (۳۲) از ورودی افزایشی استفاده می‌کند. این کار باعث می‌شود که اگر یک اغتشاش ثابت در سیستم وجود داشته باشد، کنترل‌کننده بتواند مقدار آن را جبران کند و خطای ماندگار از بین برود.

با توجه به بردار حالت جدید  $\tilde{x}(t) = [x(t) \quad u(t-1)]^T$  مدل افزایشی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned} \tilde{x}(t+1) &= M\tilde{x}(t) + N\Delta u(t), \\ y(t) &= Q\tilde{x}(t) \end{aligned} \quad (33)$$

در جایی که مقادیر  $M$ ،  $N$  و  $Q$  را می‌توان با مقایسه فرمول‌های (۳۱) و (۳۳) به‌عنوان توابع  $A$ ،  $B$  و  $C$  بیان کرد. هنگامی که مدل فضای حالت به دست آمد، تابع هزینه برای محاسبه قانون کنترل استفاده شده و سیستم را به حداقل می‌رساند.



شکل (۴): ساختار اصلی کنترل پیش‌بین مدل [۲۱]

به‌طور معمول، هدف اصلی این است که خروجی آینده  $y(t)$  یک سیگنال مرجع مشخص  $w(t)$  را در امتداد افق دنبال کند. درحالی‌که تلاش کنترلی لازم برای انجام این کار را جریمه می‌کند. عبارت کلی برای چنین تابع هدفی در سیستم‌های تک‌ورودی-تک‌خروجی به شکل زیر خواهد بود:

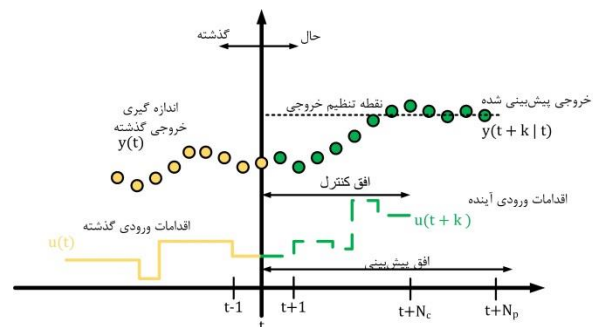
سپس با در نظر گرفتن معادلات (۲۶)، (۲۸) و (۲۹)، نمایش فضای حالت یک ریزشکه حاوی چند ژنراتور سنکرون مجازی موازی به صورت زیر استخراج شده است:

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta_1 \\ \Delta\dot{\omega}_1 \\ \Delta\dot{E}_1 \\ \Delta P_{in} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu_{\delta_1}}{M} & -\frac{D}{M} & -\frac{\mu_{E_1}}{M} & \frac{1}{M} \\ \frac{\eta_{\delta_1}}{K} & 0 & -\frac{\eta_{E_1} + k_q}{K} & 0 \\ 0 & -\frac{k_p}{T_d} & 0 & -\frac{1}{T_d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta_1 \\ \Delta\omega_1 \\ \Delta E_1 \\ \Delta P_{in} \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$+ \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{K} \\ \frac{1}{T_d} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_0 \\ \Delta Q_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\frac{\mu_p}{M} & -\frac{\mu_q}{M} \\ -\frac{\eta_p}{K} & -\frac{\eta_q}{K} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{mg} \\ \Delta Q_{mg} \end{bmatrix}$$

## ۲.۲. کنترل پیش‌بین مدل

کنترل پیش‌بین مدل یک رویکرد بصری برای کنترل بهینه سیستم‌های حاوی محدودیت است. این کنترل براساس انتخاب بهترین ورودی از بین تمام توالی‌های ورودی ممکن در افق آینده با توجه به برخی معیارهاست [۲۱]. راهکار کنترل پیش‌بین مدل در شکل (۳) نشان داده شده است. زنجیره کنترل بهینه در هر مرحله برای دستیابی به کمترین خطای بین حالت‌ها و مقادیر مرجع آن‌ها با کوچک‌ترین تلاش کنترلی استفاده می‌شود. با استفاده از مفهوم افق عقب‌نشینی، اولین ورودی این دنباله به سیستم اعمال می‌شود و طراحی در زمان نمونه‌برداری بعدی که اطلاعات حالت جدید در دسترس است، تکرار می‌شود. متعاقباً کنترل پیش‌بین مدل، یک مسئله کنترل بهینه پویا محدود را با استفاده از بهینه‌سازی برخط حلقه باز مسئله به‌جای محاسبه برون‌خط پیچیده قانون کنترل حل می‌کند.



شکل (۳): راهکار کنترل پیش‌بین مدل [۲۱]

ساختار اصلی کنترل پیش‌بین مدل در شکل (۴) نشان داده شده است. یک مدل فضای حالت برای پیش‌بینی خروجی سیستم آینده



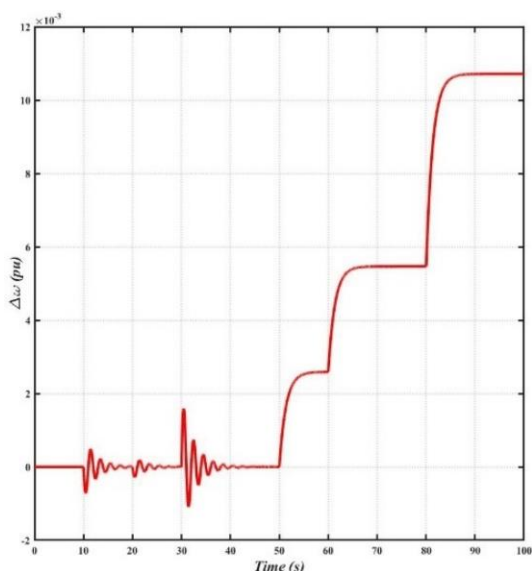
0	0	0	جزیره‌ای	$50 \leq t < 60$
0	0.1pu	0	جزیره‌ای	$60 \leq t < 70$
0.2pu	0	0	جزیره‌ای	$70 \leq t < 80$
0	0	0.2pu	جزیره‌ای	$80 \leq t < 100$

سناریوهای ذکر شده بر روی یک ریزشبه که از یک ژنراتور سنکرون مجازی موازی تشکیل شده و یک بار محلی را تأمین می‌کند، انجام شده است. در این شبیه‌سازی‌ها، عملکرد ریزشبه در شرایط مختلف ارزیابی می‌شود. این شرایط شامل تغییر در توان اکتیو و راکتیو بار محلی، تغییر در مقدار توان اکتیو مرجع و تغییر در حالت عملکرد ریزشبه است.

نمودار تغییرات فرکانس و تغییرات توان اکتیو ورودی ژنراتور سنکرون مجازی به ترتیب در شکل (۵) و شکل (۶) نشان داده شده است.

جدول (۲): مشخصات سیستم شامل ژنراتور سنکرون مجازی

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
$S_{base}$	10KVA	$R_g$	0.355pu
$V_{base}$	200V	$X_g$	0.29pu
$\omega_0$	377rad/s	$M$	50s
$R_1$	0.1pu	$D$	17pu
$X_1$	0.205pu	$k_q$	5pu
$k_p$	20pu	$K$	0.0125



شکل (۵): تغییرات فرکانس در ژنراتور سنکرون مجازی تحت اغتشاش‌های مختلف در حالت کنترل پایه

$$J(N_p, N_c) = \sum_{j=1}^{N_p} \delta(j) [\hat{y}(t+j|t) - \omega(t+j)]^2 + \sum_{j=1}^{N_c} \lambda(j) [4u(t+j-1)]^2 \quad (34)$$

که در آن  $\hat{y}(t)$  پیش‌بینی خروجی است.

علاوه بر جریمه کردن تغییرات سیگنال کنترل، می‌توان یک جمله اضافی برای جریمه کردن خود سیگنال کنترل نیز در تابع هزینه گنجانده.  $N_p$  افق پیش‌بینی است و  $N_c \leq N_p$  افق کنترل است که لزوماً نباید همان مقدار را بگیرد. مقدار  $N_p$  محدوده لحظه‌های زمانی را تعیین می‌کند که در آن خروجی برای ردیابی مرجع، مطلوب است. مفهوم افق کنترل ( $N_c$ ) شامل در نظر گرفتن این است که پس از یک بازه مشخص  $N_c < N_p$ ، سیگنال‌های کنترل پیشنهادی ثابت نگه داشته می‌شوند، یعنی  $u(t+j)$  بعد از  $j = N_c$  تغییر نمی‌کند.  $\hat{y}(t+j)$  به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\hat{y}(t+j) = QM_j x(t) + \sum_{i=0}^{j-1} QM^{j-i-1} N \Delta u(t+i) \quad (35)$$

پیش‌بینی‌های خروجی به منظور استفاده در تابع هدف فرمول (۳۴) می‌توانند با به‌کارگیری از معادله (۳۱) یا (۳۳) و در صورت استفاده از یک مدل افزایشی محاسبه شوند. در این مورد، پیش‌بینی‌ها در معادله (۳۵) بیان می‌شود.

### ۳. شبیه‌سازی و بحث‌ها

به منظور اعتبارسنجی روش کنترل ژنراتور سنکرون مجازی مبتنی بر کنترل پیش‌بین مدل پیشنهادی، مدل فضای حالت به دست آمده در بخش ۲ تحت چندین اغتشاش با استفاده از متلب-سیمولینک شبیه‌سازی شده است. توالی سناریوهای اغتشاشات در جدول (۱) بیان می‌شود. پارامترهای سیستم نیز در جدول (۲) آورده شده است.

جدول (۱): سناریوهای شبیه‌سازی در مدل استخراج شده

زمان	شبکه	$\Delta P_0$	$\Delta P_{mg}$	$\Delta Q_{mg}$
$0 \leq t < 10$	متصل به شبکه	0	0	0
$10 \leq t < 20$	متصل به شبکه	0	0.2pu	0
$20 \leq t < 30$	متصل به شبکه	0	0	0.3pu
$30 \leq t < 50$	متصل به شبکه	0.3pu	0	0

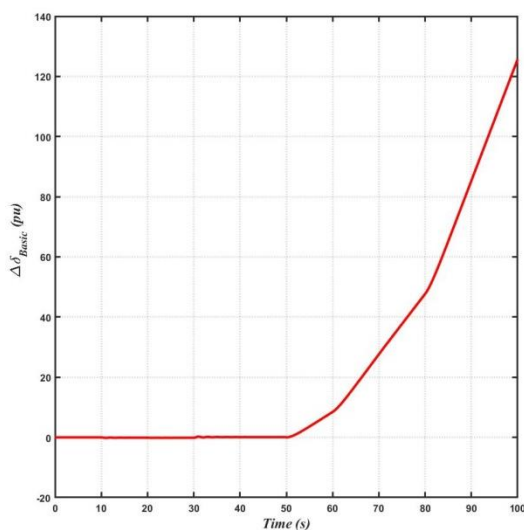
۱. نماد  $\hat{y}(t+j|t)$  مقدار متغیر را در لحظه  $t+j$  که در لحظه فعلی  $t$  محاسبه شده نشان می‌دهد.

پس از هر اغتشاش برابر صفر نشده است و میزانی خطای حالت دائم در شبکه وجود خواهد داشت.

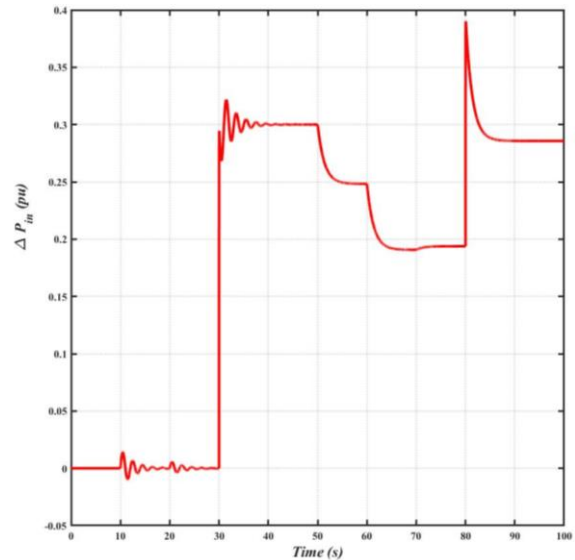
با توجه به شکل (۶)، در ثانیه ۱۰، توان اکتیو بار محلی ۰/۲ پریونیت افزایش می‌یابد. با توجه به رابطه (۳۰)، با افزایش توان اکتیو بار محلی، تغییرات فرکانس ژنراتور سنکرون مجازی کاهش یافته و با توجه به رابطه معکوس توان ورودی با فرکانس، توان ورودی افزایش می‌یابد. در ثانیه ۲۰، توان راکتیو بار محلی ۰/۳ پریونیت کاهش یافته است که موجب کاهش فرکانس ژنراتور سنکرون مجازی و در نتیجه افزایش توان ورودی شده است. در ثانیه ۳۰، با افزایش ۰/۳ پریونیت توان اکتیو مرجع، توان اکتیو ورودی ژنراتور سنکرون مجازی افزایش می‌یابد.

در ثانیه ۵۰، سیستم از شبکه جدا شده و وارد حالت جزیره‌ای می‌شود. با توجه به افزایش فرکانس، توان ورودی ژنراتور سنکرون مجازی کاهش می‌یابد. در ثانیه ۶۰، توان اکتیو بار محلی ۰/۱- تغییر می‌کند که افزایش فرکانس ژنراتور سنکرون مجازی را رقم می‌زند؛ در نتیجه توان ورودی کاهش می‌یابد. در ثانیه ۷۰، توان راکتیو بار محلی ۰/۲ پریونیت افزایش یافته که همانند ثانیه ۲۰، با توجه به رابطه معکوس میان آن‌ها، موجب کاهش فرکانس شده است و در نتیجه افزایش توان ورودی رقم می‌زند. در ثانیه ۸۰، با افزایش ۰/۲ پریونیت توان مرجع ژنراتور سنکرون مجازی، مشابه با ثانیه ۳۰، توان اکتیو ورودی ژنراتور سنکرون مجازی افزایش می‌یابد.

شکل (۷) و شکل (۸) به ترتیب تغییرات زاویه بار و تغییرات ولتاژ تحت اغتشاش‌های سناریو جدول (۱) را نشان می‌دهد.



شکل (۷): تغییرات زاویه بار در ژنراتور سنکرون مجازی تحت اغتشاش‌های مختلف در حالت کنترل پایه



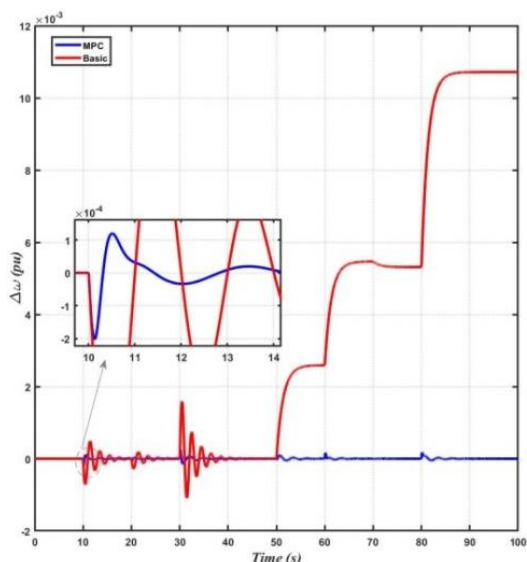
شکل (۶): تغییرات توان ورودی در ژنراتور سنکرون مجازی تحت اغتشاش‌های مختلف در حالت پایه

همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، در ثانیه ۱۰، توان اکتیو بار محلی ۰/۲ پریونیت افزایش می‌یابد. با توجه به رابطه (۳۰)، با افزایش توان اکتیو بار محلی، فرکانس ژنراتور سنکرون مجازی کاهش می‌یابد.

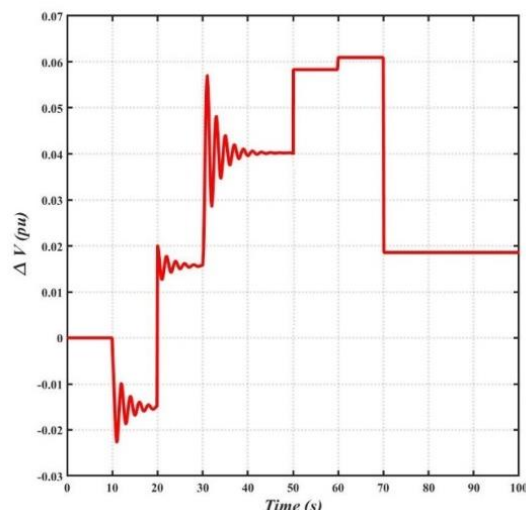
در ثانیه ۲۰، توان راکتیو بار محلی ۰/۳ پریونیت کاهش یافته است که موجب کاهش فرکانس ژنراتور سنکرون مجازی می‌شود. در ثانیه ۳۰، با افزایش ۰/۳ پریونیت توان اکتیو مرجع، توان اکتیو ورودی ژنراتور سنکرون مجازی افزایش یافته است. با توجه به رابطه مستقیم بین توان اکتیو مرجع و فرکانس ژنراتور سنکرون مجازی، فرکانس نیز افزایش می‌یابد.

در ثانیه ۵۰، سیستم از شبکه جدا شده و وارد حالت جزیره‌ای می‌شود. در این حالت تمام توان مورد نیاز بار محلی توسط ژنراتور سنکرون مجازی تأمین می‌شود و فرکانس افزایش می‌یابد. در ثانیه ۶۰، توان اکتیو بار محلی ۰/۱- تغییر می‌کند که افزایش فرکانس ژنراتور سنکرون مجازی را رقم می‌زند. در ثانیه ۷۰، توان راکتیو بار محلی ۰/۲ پریونیت افزایش یافته که همانند ثانیه ۲۰، با توجه به رابطه معکوس میان آن‌ها، موجب کاهش فرکانس شده است. در ثانیه ۸۰، با افزایش ۰/۲ پریونیت توان مرجع ژنراتور سنکرون مجازی، مشابه با ثانیه ۳۰، فرکانس ژنراتور سنکرون مجازی افزایش می‌یابد.

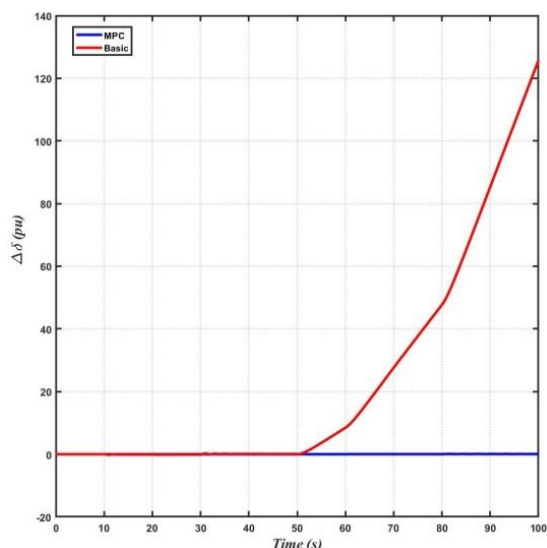
شایان توجه است که از ثانیه ۵۰ تا انتهای شبیه‌سازی به دلیل عدم اتصال ژنراتور سنکرون مجازی به شبکه، تغییرات فرکانس



شکل (۹): تغییرات فرکانس در ژنراتور سنکرون مجازی تحت اغتشاش‌های مختلف در حالت کنترل پیش‌بین مدل



شکل (۸): تغییرات ولتاژ ژنراتور سنکرون مجازی تحت اغتشاش‌های مختلف در حالت کنترل پایه



شکل (۱۰): تغییرات زاویه بار در ژنراتور سنکرون مجازی تحت اغتشاش‌های مختلف در حالت کنترل پیش‌بین مدل

با توجه به نتایج به‌دست آمده در شکل‌ها، مشاهده می‌شود که شبکه در حضور ژنراتور سنکرون مجازی در زمان اغتشاش پایدار می‌ماند اما تغییرات فرکانس صفر نمی‌شود. همچنین فراجش و نوسان در سیستم وجود دارد و سرعت میرایی نیز کم است. برای پاسخ به این مشکلات، از کنترل پیش‌بین مدل بر پایه ژنراتور سنکرون مجازی استفاده می‌شود.

با توجه به مدل فضای حالت به‌دست آمده، سیستم در حضور کنترل پیش‌بین مدل شبیه‌سازی می‌شود. در روش کنترلی ارائه شده، مقدار افق پیش‌بینی برابر ۲۰، مقدار افق کنترل برابر ۵ و زمان نمونه‌برداری برابر ۰/۰۱ ثانیه است.

در شکل (۸) تغییرات فرکانس سیستم ژنراتور سنکرون مجازی در حالت پایه و ژنراتور سنکرون مجازی به‌همراه کنترل پیش‌بین مدل نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که به کمک کنترل پیش‌بین مدل، اندازه تغییرات فرکانس به شدت کاهش یافته و با مقایسه با حالت پایه، مقدار جش‌ها کاهش یافته است.

همچنین پس از ۵۰ ثانیه که وارد حالت جزیره‌ای می‌شود، کنترل پیش‌بین مدل به‌خوبی توانسته تغییرات را به صفر برساند و کنترل مناسبی رقم بزند.

شکل (۹) تغییرات زاویه بار در ژنراتور سنکرون مجازی تحت اغتشاش‌های جدول (۱) در حالت کنترل پایه و حالت کنترل پیش‌بین مدل مقایسه می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در حالت کنترل پیش‌بین مدل در لحظات اغتشاش نوسان‌ها را به‌خوبی کنترل و فراجش سیستم را کاهش داده است. همچنین، برخلاف

با افزایش ثابت اینرسی ژنراتور سنکرون مجازی، فراجش فرکانس کاهش می‌یابد اما نوسانی‌تر می‌شود. همچنین با افزایش ضریب میرایی میزان تغییر فرکانس کاهش می‌یابد. اما با کنترل مبتنی بر کنترل پیش‌بین مدل برخلاف حالت پایه، میزان تغییرات فرکانس به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد و کنترل‌کننده نسبت به ضریب اینرسی و تغییرات ثابت میرایی مقاوم است.

#### ۴. نتیجه‌گیری

این مقاله مدل کامل دینامیکی یک ریزشبه شامل ژنراتور سنکرون مجازی را در دو حالت متصل به شبکه و حالت جزیره‌ای ارائه می‌دهد. تغییرات فرکانس در مدل به‌دست‌آمده در هنگام اغتشاشات، دچار نوسان و فراجش می‌شود. همچنین هنگامی که وارد حالت جزیره‌ای شده است، تغییرات فرکانس صفر نشده و دچار خطای حالت دائم می‌شود.

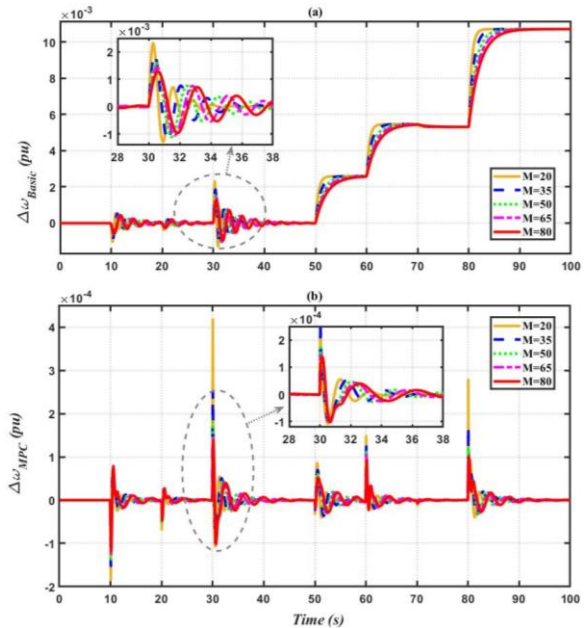
برای حل مشکلات فوق، از یک کنترل پیش‌بین مدل بر پایه ژنراتور سنکرون مجازی بهره گرفته شده است. کنترل ارائه‌شده تحت چند سناریو اغتشاش در دو حالت متصل به شبکه و در حالت جزیره‌ای ارزیابی می‌شود.

شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که با استفاده از روش کنترلی پیشنهادی، فراجش، زمان نشست، نرخ تغییر فرکانس و نوسانات در هنگام اغتشاش‌ها به‌شدت کاهش می‌یابد. همچنین در هنگام تغییر سیستم از حالت متصل به شبکه به حالت جزیره‌ای، کنترل پیش‌بین مدل بر پایه ژنراتور سنکرون به‌خوبی نوسان‌ها و فراجش‌ها را کاهش داده (تقریباً ۰/۱ برابر کاهش) و خطای حالت دائم را از بین می‌برد؛ در نتیجه سیستم پایدار می‌ماند.

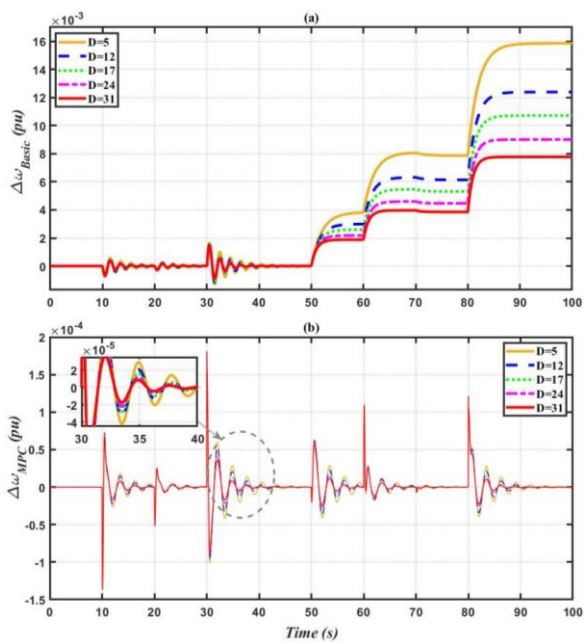
در نهایت عملکرد سیستم با تغییرات در ضریب اینرسی و ثابت میرایی ژنراتور سنکرون مجازی شبیه‌سازی شده است و مشاهده می‌شود که با روش کنترلی پیشنهادی، سیستم پایدار می‌ماند که بیانگر کارآمدی روش کنترلی است.

در پژوهش‌های آینده، سیستمی که متشکل از چند ژنراتور سنکرون مجازی به‌صورت بهره‌برداری موازی باشد، مدل‌سازی خواهد شد. همچنین به‌دلیل امکان استفاده از دیزل ژنراتورها به‌همراه منابع انرژی تجدیدپذیر در حالت جزیره‌ای، سیستم ژنراتور سنکرون مجازی موازی با یک ژنراتور سنکرون مدل‌سازی خواهد شد.

حالت پایه، پس از ورود سیستم به حالت جزیره‌ای، زاویه بار همچنان ثابت مانده است.



شکل (۱۱): تغییرات فرکانس در ژنراتور سنکرون مجازی با ضرایب اینرسی مختلف در حالت کنترل پیش‌بین مدل



شکل (۱۲): تغییرات فرکانس در ژنراتور سنکرون مجازی با ضرایب اینرسی مختلف در حالت کنترل پیش‌بین مدل

برای راستی‌آزمایی تأثیر پارامترهای ژنراتور سنکرون مجازی بر مدل به‌دست‌آمده، تغییرات فرکانس ژنراتور سنکرون مجازی با یا بدون کنترل پیشنهادی برای ضرایب اینرسی و ثابت‌های میرایی مختلف به‌ترتیب در شکل (۱۰) و شکل (۱۱) به‌دست آمده است.

## مراجع

- [1] Ashouri-Zadeh, A., Toulabi, M., Dobakhshari, A. S., Ranjbar, A. M., "Frequency stability improvement in wind-thermal dominated power grids", IET Gener. Transm. Distrib., Vol. 14, No. 4, pp. 619-627, Feb. 2020, <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2019.0875>.
- [2] Zhang, X., Liu, H., Fu, Y., Li, Y., "Virtual shaft control of DFIG based wind turbines for power oscillation suppression", IEEE Trans. Sustainable Energy, Vol. 13, No. 4, pp. 2316-2330, Oct. 2022, doi: <https://doi.org/10.1109/TSTE.2022.3194164>.
- [3] Ranjbar, S., "Intelligent Load-Frequency Control of Power System in the Presence of Wind Uncertainty Based on Latin Hyper Square and Particle Swarm Optimization Algorithms", Vol. 12, No.2, pp. 84-97, 2023, <https://doi.org/10.22052/eem.2023.252877.1015>.
- [4] Cheema, K. M., "A comprehensive review of virtual synchronous generator", Int.J. Electr. Power Energy Syst., Vol. 120, p. 106006, Sep. 2020, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106006>.
- [5] Serban, I., Ion, C. P., "Microgrid control based on a grid forming inverter operating as virtual synchronous generator with enhanced dynamic response capability", Int. J. Electr. Power Energy Syst., Vol. 89, pp. 94-105, Jul. 2017, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.01.009>.
- [6] Yap, K. Y., Sarimuthu, Lim J. M.-Y., "Virtual inertia-based inverters for mitigating frequency instability in grid-connected renewable energy system: A review", Appl. Sci., Vol. 9, No. 24, p. 5300, Dec. 05, 2019, <https://doi.org/10.3390/app9245300>.
- [7] Bevrani, H., Francois B., Ise T., *Microgrid Dynamics and Control*. John Wiley and Sons, Inc., 2017.
- [8] Beck, H.P., Hesse, R., "Virtual synchronous machine", 2007 9th Int. Conf. on Electr. Power Qual. Utilisation, Oct. 2007, <https://doi.org/10.1109/EPQU.2007.4424220>.
- [9] Zhong, Q.C., Weiss, G., "Synchronverters: inverters that mimic synchronous generators", IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 58, No. 4, pp. 1259-1267, Apr. 2011, <https://doi.org/10.1109/TIE.20102048839>.
- [10] Liu, J., Miura, Y., Ise T., "Comparison of dynamic characteristics between virtual synchronous generator and droop control in inverter-based distributed generators", IEEE Trans. Power Electron., Vol. 31, No. 5, pp. 3600-3611, May 2016, <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2465852>.
- [11] Shi, K., Ye, H., Song, W., Zhou, G., "Virtual inertia control strategy in microgrid based on virtual synchronous generator technology", IEEE Access, Vol. 6, pp. 27949-27957, 2018, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2839737>.
- [12] Zhao, H., Yang, Q., Zeng, H., "Multi-loop virtual synchronous generator control of inverter-based DGs under microgrid dynamics", IET Gener. Transm. Distrib., Vol. 11, No. 3, pp. 795-803, Feb. 2017, <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2016.0645>.
- [13] Wang, G., Fu, L., Hu, Q., Liu, C., Ma, Y., "Transient synchronization stability of grid-forming converter during grid fault considering transient switched operation mode", IEEE Trans. Sustainable Energy, pp. 111, 2023, <https://doi.org/10.1109/TEC.2023.3283396>.
- [14] Zhang, H., "Comparison of low frequency oscillation characteristic differences between VSG and SG", 2020 IEEE Sustainable Power Energy Conf. (iSPEC), Nov. 23, 2020, <https://doi.org/10.1109/iSPEC50848.2020.9351203>.
- [15] Yap, K. Y., Sarimuthu, C. R., Lim J. M.-Y., "Virtual inertia-based inverters for mitigating frequency instability in grid-connected renewable energy system: A review", Appl. Sci., Vol. 9, No. 24, p. 5300, Dec. 05, 2019, <https://doi.org/10.3390/app9245300>.
- [16] Fahad, S., Goudarzi, A., Xiang, J., "Demand management of active distribution network using coordination of virtual synchronous generators", IEEE Trans. Smart Grid, Vol. 12, No. 1, pp. 250-261, Jan. 2021, <https://doi.org/10.1109/TSG.2020.2990917>.
- [17] Kerdphol, T., Watanabe, M., Hongesombut, K., Mitani, Y., "Self-Adaptive virtual inertia control-based fuzzy logic to improve frequency stability of microgrid with high renewable penetration", IEEE Access, Vol. 7, pp. 76071-76083, 2019, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2920886>.
- [18] Liu, J., Miura, Y., Bevrani, H., Ise, T., "Enhanced virtual synchronous generator control for parallel inverters in microgrids", IEEE Trans. Smart Grid, Vol. 8, No. 5, pp. 2268-2277, Sep. 2017, <https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2521405>.
- [19] Zhao, Z., Yang, P., Guerrero, J. M., Xu, Z., Green, T. C., "Multi-time-scales hierarchical frequency stability control strategy of medium-voltage isolated microgrid", IEEE Trans. Power Electron., Vol. 31, No. 8, pp. 5974-5991, Aug. 2016, <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2496869>.
- [19] Pourmohammad, M., Toulabi, M., Ranjbar, A. M., "Application of state feedback controller to ensure robust D-stable operation of virtual synchronous generators", IEEE Trans. Energy Convers., Vol. 36, No. 2, pp. 602-610, Jun. 2021, <https://doi.org/10.1109/TEC.2020.3018586>.
- [21] Bordons, C., Garcia-Torres, F., Ridao, M. A., *Model Predictive Control of Microgrids*. Springer International Publishing, 2020.
- [22] Zheng, C., Dragičević, T., Blaabjerg, F., "Model predictive control-based virtual inertia emulator for an islanded alternating current microgrid", IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 68, No. 8, pp. 7167-7177, Aug. 2021, <https://doi.org/10.1109/TIE.2020.3007105>.
- [23] Saleh, A., Hasanien, H.M.A., Turky, R., Turdybek, B., Alharbi, M., Jurado, F., Omran, W.A., "Optimal Model Predictive Control for Virtual Inertia Control of

- Autonomous Microgrids", *Sustainability*, Vol. 15, No. 6, Mar, 2023, <https://doi.org/10.3390/su15065009>
- [24] Oshnoei, S., Aghamohammadi, M.R., Oshnoei, S., Sahoo, S., Fathollahi, A., Khooban, M.H., "A novel virtual inertia control strategy for frequency regulation of islanded microgrid using two-layer multiple model predictive control", *Applied Energy*, Vol. 343, MAY, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121233>.