



Sahand University  
of Technology

DOR:

[20.1001.1.23223146.1404.12.1.6.9](https://doi.org/10.1001.1.23223146.1404.12.1.6.9)

Journal of Nonlinear  
Systems in Electrical  
Engineering

Vol.12, No.1

Spring and Summer 2025

ISSN: 2322 – 3146

<http://jnsee.sut.ac.ir>

# Adaptive Model Predictive Control for Load Frequency Control Problem of Multi-Area Interconnected Power Systems with Time-Varying Parameters

Amin Khadem, Mohsen Ahmadian\*, Ahmad Hajipour

Faculty of Electrical and Computer Engineering, Hakim Sabzevari University,  
Sabzevar, Iran

[energypak4271@chmail.ir](mailto:energypak4271@chmail.ir); [ahmadniamohsen85@gmail.com](mailto:ahmadniamohsen85@gmail.com);  
[ahmad.hajipour@gmail.com](mailto:ahmad.hajipour@gmail.com)

## Abstract

With the rapid development of power generation technology and the increasing demand from power users, interconnected multi-area power systems have become a development trend. In this paper, an adaptive model predictive control scheme is proposed for the load frequency problem of an interconnected multi-area power system in the presence of parameter variations. The controller includes an autoregressive with exogenous inputs (ARX) model, a linear time-varying Kalman filter (LTVKF), and a recurrent polynomial model estimator (RPME) algorithm. A reduced-order ARX model of the original power system is identified using the recurrent polynomial model estimator and is used as the system prediction model in the adaptive model predictive control. The system state variables are observed using a linear time-varying Kalman filter, and the constrained receding horizon optimization problem is solved by quadratic programming. In addition to estimating a reduced-order model, the future control sequence is estimated using Laguerre basis functions to reduce the computational burden. Numerical simulations show that the proposed adaptive model predictive control is more efficient in rejecting load disturbances in power systems with time-varying parameters compared to other control schemes.

## Keywords

Load frequency control; Adaptive model predictive control; Recursive polynomial model estimator; Autoregressive with exogenous inputs model; Linear time-varying Kalman filter.

## 1. Short Introduction

Load-frequency control (LFC) is critical in multi-area power systems, but high renewable penetration reduces inertia and challenges conventional PI/PID controllers. Model predictive control (MPC) improves performance and handles constraints, yet standard MPC faces high computational load and limited robustness. This paper proposes an adaptive MPC (AMPC) using a reduced-order data-driven model and time-varying Kalman filter to enhance robustness and reduce computation. The approach is validated on a three-area thermal system under load disturbances and generation constraints, outperforming standard MPC and PID control.

## 2. Proposed Work

In this paper, an adaptive model predictive control (AMPC) strategy is proposed for load-frequency control in a multi-area interconnected power system, effectively addressing both parametric variations and load disturbances. Initially, a reduced-order ARX model of the primary power system is identified offline using a recursive polynomial model estimator, which captures the essential dynamic characteristics of each control area while substantially reducing computational complexity. This simplified model enables efficient prediction of future system behavior, maintaining sufficient fidelity for accurate control design. In each sampling instant, the predictive controller updates the model online, allowing continuous adaptation to real-time variations in system parameters, generation conditions, and external disturbances. A time-varying Kalman filter (LTVKF) is integrated to provide precise estimation of both measurable and unmeasurable system states, mitigating the effects of sensor noise and unmodeled dynamics. The AMPC controller explicitly enforces input constraints and rate-of-change limits while regulating frequency deviations and tie-line power flows across multiple areas, ensuring safe and stable operation under varying load conditions. To achieve this, the control law leverages Laguerre functions to efficiently compute future control sequences, significantly reducing online computational burden compared to standard MPC. The proposed approach is particularly suitable for modern power grids with high penetration of renewable energy sources, where system uncertainties and load fluctuations are frequent. Numerical simulations are performed on a three-area interconnected power system under two scenarios: nominal parameters and parametric variations of up to 20% in generator and turbine time constants, inertia, and damping coefficients. The AMPC performance is compared against standard MPC and conventional PID controllers. Results demonstrate that the proposed AMPC substantially reduces overshoot, settling time, and control errors for all monitored variables, while providing smoother and faster dynamic responses even under continuous disturbances and parametric uncertainties. Moreover, the controller exhibits strong robustness to variations in system parameters, maintaining superior frequency regulation and tie-line power control. Computationally, AMPC achieves near-PID efficiency while delivering advanced predictive capabilities. These findings highlight that the proposed adaptive MPC not only improves dynamic performance and stability in multi-area power systems but also offers a practical and reliable alternative to traditional PID controllers, especially for modern power networks facing uncertain and time-varying operating conditions. The proposed methodology can also be extended to larger-scale multi-area networks, providing a scalable and adaptable framework for future smart grid applications, including automated load management and integration of distributed energy resources. Additionally, the adaptability of the controller ensures long-term reliability and resilience, crucial for maintaining power quality in the presence of unexpected disturbances or component failures. Furthermore, the AMPC framework facilitates coordination between control areas, enhancing system-wide stability and minimizing inter-area oscillations. The approach also supports future integration with real-time monitoring and predictive analytics, enabling proactive control actions in response to forecasted load or generation variations. Overall, this study establishes a comprehensive strategy for adaptive, high-performance, and resilient load-frequency control in modern interconnected power systems.

## 3. Conclusion

An adaptive MPC was proposed for LFC in multi-area interconnected power systems under parameter variations. A reduced-order ARX model was identified offline using a recursive polynomial estimator and updated online at each step, while a linear time-varying Kalman filter estimates system states. Compared to standard MPC and PID control, the proposed AMPC reduces computational burden and enhances dynamic performance, including faster settling time, lower overshoot, and improved disturbance rejection. Results demonstrate that AMPC is a robust, efficient, and practical alternative to conventional PID control for modern complex power systems.



دانشگاه صنعتی سهند

DOR:

20.1001.1.23223146.1404.12.1.6.9

نشریه علمی غیرنخبی در مهندسی برق

دوره ۱۲ - شماره ۱

بهار و تابستان ۱۴۰۴

صفحات ۱۱۸ الی ۱۳۹

ISSN: 2322-3146

http://jnsee.sut.ac.ir

# کنترل پیش‌بین مدل تطبیقی برای مساله کنترل بار-فرکانس سیستم‌های قدرت بهم‌پیوسته چند ناحیه‌ای با پارامترهای متغیر با زمان

امین خادم<sup>۱</sup>، محسن احمدنیا<sup>۲\*</sup> و احمد حاجی‌پور<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، [energypak4271@chmail.ir](mailto:energypak4271@chmail.ir)

<sup>۲</sup> نویسنده مسئول، استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، [ahmadniamohsen85@gmail.com](mailto:ahmadniamohsen85@gmail.com)

<sup>۳</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، [ahmad.hajipoor@gmail.com](mailto:ahmad.hajipoor@gmail.com)

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۸/۲۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۶/۳۰ و ۱۴۰۴/۸/۱۲

تاریخ ارسال: ۱۴۰۴/۴/۲۷

## چکیده

با پیشرفت سریع فناوری تولید برق و افزایش تقاضا از سوی کاربران، سیستم‌های قدرت چند ناحیه‌ای بهم‌پیوسته به یک روند توسعه تبدیل شده‌اند. در این مقاله، یک طرح کنترل پیش‌بین مدل تطبیقی برای کنترل بار-فرکانس (LFC) یک سیستم قدرت چند ناحیه‌ای بهم‌پیوسته در حضور تغییرات پارامتری پیشنهاد شده است. این کنترل کننده شامل یک مدل خود رگرسیون با ورودی خارجی (ARX)، یک فیلتر کالمن خطی متغیر با زمان (LTVKF) و یک الگوریتم تخمینگر مدل چندجمله‌ای بازگشتی (RPME) می‌شود. با استفاده از تخمینگر مدل چندجمله‌ای بازگشتی یک مدل ARX با مرتبه کاهش یافته از سیستم قدرت اصلی شناسایی می‌شود و به‌عنوان مدل پیش‌بینی سیستم در کنترل پیش‌بین مدل تطبیقی مورد استفاده قرار می‌گیرد. متغیرهای حالت سیستم با کمک فیلتر کالمن خطی متغیر با زمان رویت می‌شوند و مساله بهینه‌سازی با افق متحرک مقید از طریق برنامه‌ریزی مربعی حل می‌شود. علاوه بر تخمین حاصل از مدل دارای کاهش مرتبه، دنباله کنترلی آینده با استفاده از توابع پایه لاگر تخمین زده می‌شود تا بار محاسباتی کاهش یابد. شبیه‌سازی‌های عددی نشان می‌دهند که کنترل پیش‌بین مدل تطبیقی پیشنهادی در مقایسه با سایر طرح‌های کنترلی، در دفع اغتشاشات بار در سیستم‌های قدرت با پارامترهای متغیر با زمان، کارآمدتر است.

## واژه‌های کلیدی

کنترل بار-فرکانس،  
کنترل پیش‌بین مدل تطبیقی،  
تخمینگر مدل چندجمله‌ای بازگشتی،  
مدل خود رگرسیون با ورودی  
خارجی،  
فیلتر کالمن خطی متغیر با زمان.

## ۱- مقدمه

به منظور حفظ فرکانس سیستم قدرت چند ناحیه‌ای بهم‌پیوسته در مقدار نامی و توان خطوط ارتباطی بین نواحی مجاور در مقادیر برنامه‌ریزی شده از کنترل بار-فرکانس<sup>۱</sup> (LFC) بهره گرفته می‌شود [۱]. به‌طور مرسوم، کنترل تولید خودکار برای حصول این اهداف بکار می‌رود به طوری که یک سیستم کنترلی در هر ناحیه، وظیفه ارسال سیگنال‌های لازم برای تنظیم بار مرجع ژنراتورهای درون ناحیه را بر عهده دارد. اما نفوذ رو به رشد واحدهای تولید تجدیدپذیر از قبیل مزارع بادی و خورشیدی، به ویژه واحدهای بر مبنای واسط مبدل فرکانسی، سبب ایجاد چالش در کنترل فرکانس سیستم قدرت می‌شود. از یک سو، مشخصه نوسانی و قابلیت پیش‌بینی محدود واحدهای تجدیدپذیر، کارایی سیستم کنترل تولید خودکار را با چالش همراه می‌سازد. از سوی دیگر، واحدهای تجدیدپذیر با واسط فرکانسی نقشی در تامین لختی چرخشی سیستم قدرت ندارند [۲]. هنگامی که ژنراتورهای سنکرون بیشتری با واحدهای تجدیدپذیر با واسط فرکانسی جایگزین شوند، لختی چرخشی سیستم به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد و حتی با زمان تغییر می‌کند که باعث می‌شود سیستم در برابر اغتشاشات، شکننده‌تر و کنترل آن دشوارتر شود [۳].

به دلیل طراحی ساده، قابلیت اطمینان و نسبت قیمت به عملکرد جذاب، مهندسان همچنان کنترل کننده تناسبی-انتگرالی [۴] و تناسبی-انتگرالی-مشتقی<sup>۲</sup> (PID) [۵] را برای کنترل بار-فرکانس در سیستم‌های قدرت واقعی انتخاب می‌کنند. با توجه به پیچیدگی رو به رشد سیستم‌های قدرت فعلی و چالش‌های موجود، کنترل‌های کلاسیک مذکور با ساختار ساده نمی‌توانند جوابگوی نیازهای کنترلی باشند و نیاز به روش‌های مدرن بیش از پیش احساس می‌شود. طراحی کنترل کننده‌های بر مبنای PID با درجات آزادی بیشتر می‌تواند تا حد زیادی محدودیت‌های کنترل‌های مرسوم را برطرف کند [۶]. علاوه بر آن، در سال‌های اخیر، روش‌های کنترلی مدرن برای طراحی کنترل کننده بار-فرکانس معرفی شده است که از این میان می‌توان به کنترل مد لغزشی [۷]، کنترل پیش‌بین مدل<sup>۳</sup> (MPC) [۳]، کنترل منطبق فازی [۸]، کنترل شبکه عصبی مصنوعی [۹]، یادگیری تقویتی [۱۰]، کنترل  $H_\infty$  [۸ و ۱۱]، کنترل بر مبنای ناتساوی ماتریسی خطی [۱۲]، کنترل بر مبنای رویکر اغتشاش غیرخطی [۱۳]، رگولاتور مربعی خطی [۱۴] و کنترل تطبیقی بر مبنای فیلتر کالمن [۱۴-۱۵] اشاره کرد.

کنترل پیش‌بین مدل که یک طرح کنترل مدرن بر مبنای مدل شناخته می‌شود، دارای مشخصه‌هایی از قبیل پاسخ بهینه، قابلیت اعمال به سیستم‌های چند-ورودی چند-خروجی و جایدهی خودکار قیود در روند محاسبه عمل کنترلی است. در این روش، یک مساله بهینه‌سازی آنلاین با افق محدود با استفاده از روش برنامه‌ریزی مربعی برای محاسبه عمل کنترلی در هر پله زمانی حل می‌شود. کنترل پیش‌بین مدل برای مساله کنترل بار-فرکانس برای اولین بار در [۱۶] بکار رفت و سپس در مطالعات متعددی در قالب کاربردهای مختلف از قبیل کنترل پیش‌بین مدل متمرکز [۱۷]، کنترل پیش‌بین مدل نامتمرکز [۱۸]، کنترل پیش‌بین مدل سلسله‌مراتبی [۱۹]، کنترل پیش‌بین مدل تطبیقی [۳] و کنترل پیش‌بین مدل مقاوم [۲۰] مورد استفاده قرار گرفت. کنترل پیش‌بین مدل استاندارد برای محاسبه عمل کنترلی به مدل دقیق سیستم وابسته است و در نتیجه، در صورت وجود عدم قطعیت در پارامترهای مدل و دینامیک مدل نشده، عملکرد کنترلی می‌تواند تا حد زیادی تنزل یابد [۲۱]. علاوه بر آن، بار محاسباتی بالای حاصل از ساختار پیچیده روش

<sup>1</sup> Load frequency control

<sup>2</sup> Proportional-Integral-Derivative

<sup>3</sup> Model predictive control

برنامه‌ریزی مربعی، سبب تاخیر در زمان پاسخ می‌شود و می‌تواند کاربرد این طرح در سیستم‌های قدرت واقعی را با مشکل مواجه کند.

در [۲۲]، یک روش کنترل پیش‌بین مدل مقاوم برای سیستم‌های قدرت چند ناحیه‌ای در حضور سیستم‌های ذخیره انرژی ترکیبی برای مساله کنترل بار-فرکانس پیشنهاد شده است. روش پیشنهادی بر مبنای یک قید برای مقاوم‌سازی قرار دارد که به‌طور موثری اغتشاشات نامعلوم سیستم را با فشرده‌سازی یک مجموعه تغییرناپذیر اغتشاش مدیریت می‌کند. در [۲۳]، یک روش کنترل پیش‌بین مدل نامتمرکز برای مساله کنترل بار-فرکانس سیستم‌های قدرت چند ناحیه‌ای با ژنراتورهای حرارتی و سیستم ذخیره انرژی پیشنهاد شده است و سیگنال بهینه کنترلی با روش برنامه‌ریزی مربعی خطی به دست آمده است. در [۲۴]، یک طرح کنترل بار-فرکانس با ترکیب واحد پیش‌بینی توان باد و کنترل پیش‌بین مدل طراحی شده است که به‌طور انعطاف‌پذیری به تغییرات تصادفی توان باد پاسخ می‌دهد. به منظور کاهش بار محاسباتی از توابع لاگرم<sup>۱</sup> در فرمول‌بندی مساله پیش‌بین مدل استفاده شده است. در [۲۱]، به منظور غلبه بر عدم قطعیت‌های مربوط به تولید و پارامترهای الکترومکانیکی ناشی از نفوذ بالای انرژی تجدیدپذیر، یک طرح کنترل بار-فرکانس پیش‌بین مدل بر مبنای داده برای یک سیستم قدرت چند ناحیه‌ای در حضور منابع بادی پیشنهاد شده است؛ یک مدل با استفاده از داده‌های ورودی-خروجی بصورت بازگشتی یادگیری می‌شود و بجای مدل پیش‌بینی دقیق مورد استفاده قرار می‌گیرد. در یک کار مشابه، در [۳]، یک طرح کنترل بار-فرکانس پیش‌بین مدل تطبیقی برای سیستم‌های قدرت چند ناحیه‌ای با لختی چرخشی نامعلوم و متغیر با زمان طراحی شده است؛ در ابتدا یک مدل اولیه با استفاده از داده‌های ورودی-خروجی به‌طور آفلاین به دست می‌آید و سپس با استفاده از روش تخمین افق متحرک در هر پله زمانی به‌طور آنلاین به‌روزرسانی می‌شود. در [۲۵]، یک طرح کنترل پیش‌بین مدل اقتصادی نامتمرکز برای مساله کنترل بار-فرکانس سیستم‌های قدرت چند ناحیه‌ای با توربین‌های بادی معرفی شده است؛ سیستم قدرت به چندین زیرسیستم با ترویج دینامیکی تقسیم و طراحی کنترل بهینه برای هر ناحیه با توجه به اطلاعات محلی همان ناحیه انجام شده است. در طرح مذکور، مسیرهای حالت آتی زیرسیستم‌های مجاور با استفاده از اطلاعات انتقالی بین نواحی تخمین زده می‌شود. با وجود نتایج قابل قبول کنترل‌های پیش‌بین مدل مذکور در تنظیم فرکانس در سیستم‌های قدرت بهم‌پیوسته چند ناحیه‌ای، تمام محدودیت‌های کنترل پیش‌بین مدل استاندارد از قبیل بار محاسباتی بالا (در نتیجه استفاده از مدل کامل برای پیش‌بینی مسیرهای آتی سیستم و لزوم تعداد نسبتاً بالای متغیرهای بهینه‌سازی برای حفظ عملکرد)، مدل ثابت پیش‌بینی و مشخصه مقاومت کنترلی ضعیف در حضور عدم قطعیت و تغییرات پارامتری در یک کار مورد بررسی قرار نگرفته است.

با توجه به چالش‌های مذکور در طراحی کنترل پیش‌بین مدل، در این مقاله یک روش کنترل پیش‌بین مدل تطبیقی<sup>۲</sup> (AMPC) برای بهبود مقاومت کنترلی در حضور تغییرات در پارامترهای سیستم قدرت و کاهش بار محاسباتی پیشنهاد شده است. موارد برجسته پژوهش در ادامه فهرست شده است:

- ساختار کنترلی شامل یک روش تخمین پارامتر بر مبنای تخمینگر مدل چند-جمله‌ای بازگشتی<sup>۳</sup> (RPME) و مدل خود رگرسیون با ورودی خارجی<sup>۴</sup> (ARX) برای ایجاد یک مدل کاهش مرتبه یافته از سیستم، فیلتر کالمن خطی تغییرپذیر با

<sup>1</sup> Laguerre functions

<sup>2</sup> Adaptive model predictive control

<sup>3</sup> Recursive polynomial model estimator

<sup>4</sup> Auto-regressive model with exogenous input

زمان<sup>۱</sup> (LTVKF) برای تخمین متغیرهای حالت سیستم و یک الگوریتم بهینه‌سازی با استفاده از توابع متعامد نرمال برای محاسبه عمل کنترلی با لحاظ قیود روی ورودی و خروجی سیستم می‌شود. روش کنترل پیشنهادی تنها بر مبنای طراحی یک کنترل‌کننده واحد است که به بار محاسباتی و فضای حافظه کمتری نیاز دارد و در عین حال، مشخصه مقاومت در برابر تغییرات در پارامترهای سیستم را بهبود می‌بخشد.

- بر خلاف کارهای انجام شده در [۲۲-۲۵]، یک روش شناسایی آنلاین داده‌محور در ساختار کنترلی گنجانده شده است؛ پارامترهای سیستم در هر گام کنترلی توسط واحد شناسایی به‌روزرسانی می‌شود تا با تغییرات دینامیکی در سیستم تطبیق یابند. بدین ترتیب، مقاومت طرح نسبت به تغییرات پارامتری به‌طور قابل ملاحظه‌ای بهبود می‌یابد. علاوه بر آن، استفاده از فیلتر کالمن متغیر با زمان می‌تواند در کاهش اثر نویز اندازه‌گیری روی عملکرد سیستم موثر واقع شود.
- بر خلاف روش کنترل مدل پیش‌بین تطبیقی در [۳ و ۲۶]، که یک مدل با مرتبه کامل از سیستم اصلی را شناسایی می‌کند، مدل شناسایی شده در کار پیشنهادی کاهش مرتبه یافته است. مدل مذکور می‌تواند مشخصه‌های اصلی رفتار سیستم را با دقت مطلوب بازتولید کند. در نتیجه، بار محاسباتی تا حد زیادی کاهش پیدا می‌کند و کیفیت مدل تخمینی نیز حفظ می‌شود. همچنین، در مقایسه با کارهای مراجع [۲۷-۲۸]، دنباله کنترلی آتی با استفاده از توابع متعامد نرمال لاگر تخمین زده می‌شود تا با کاهش تعداد متغیرهای بهینه‌سازی، به کاهش بیشتر بار محاسباتی کمک کند.
- کارایی روش کنترل پیش‌بین مدل تطبیقی پیشنهادی در دفع اغتشاش بار یک سیستم قدرت بهم‌پیوسته سه ناحیه‌ای با منابع حرارتی در حضور قید نرخ تولید<sup>۲</sup> (GRC) با استفاده از دو سناریوی پارامترهای نامی و با پارامترهای دارای عدم قطعیت بررسی شد و با عملکرد روش کنترل پیش‌بین مدل استاندارد MPC و کنترل PID مورد مقایسه قرار گرفت.

## ۲- مدل سیستم قدرت

دینامیک ناحیه  $i$  یک سیستم قدرت بهم‌پیوسته در شکل ۱ را می‌توان در حالت کلی با رابطه‌های (۱)-(۴) توصیف کرد [۲۹]:

$$\Delta \dot{f}_i = \frac{1}{2H_i} (\Delta P_{m,i} - \Delta P_{L,i} - \Delta P_{tie,i} - D_i \Delta f_i) \quad (1)$$

$$\Delta \dot{P}_{m,i} = \frac{1}{T_{t,i}} (\Delta P_{g,i} - \Delta P_{m,i}) \quad (2)$$

$$\Delta \dot{P}_{g,i} = \frac{1}{T_{g,i}} \left( \Delta P_{C,i} - \Delta P_{g,i} - \frac{1}{R_i} \Delta f_i \right) \quad (3)$$

$$\Delta \dot{P}_{tie,i} = 2\pi \sum_{j=1, j \neq i}^M T_{ij} (\Delta f_i - \Delta f_j) \quad (4)$$

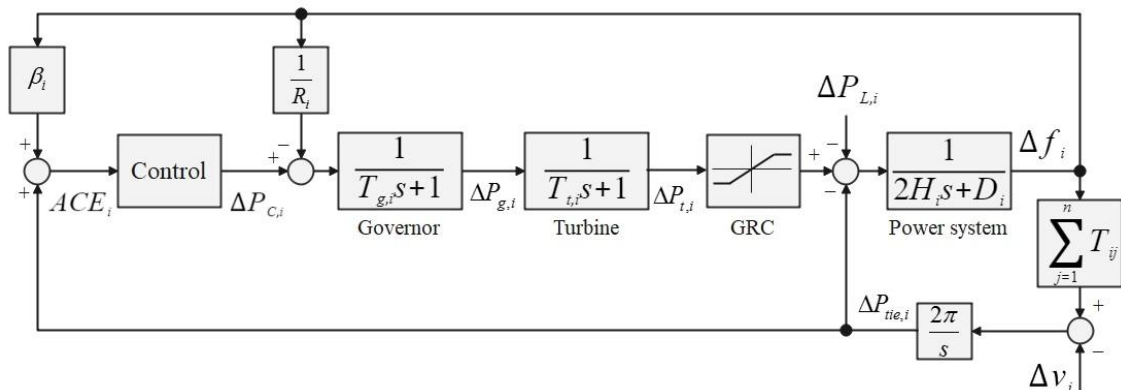
<sup>1</sup> Linear time-varying Kalman filter

<sup>2</sup> Generation rate control

که در آن  $\Delta f_i$  انحراف فرکانس در ناحیه  $i$ ،  $\Delta P_{m,i}$  و  $\Delta P_{g,i}$  به ترتیب توان مکانیکی توربین و خروجی گاورنر ژنراتور معادل و  $\Delta P_{L,i}$ ،  $\Delta P_{C,i}$  و  $\Delta P_{tie,i}$  به ترتیب اغتشاش بار، سیگنال کنترل فرکانس بار و انحراف توان خط ارتباطی است.  $R_i$ ،  $D_i$ ،  $H_i$ ،  $T_{t,i}$  و  $T_{g,i}$  به ترتیب لختی سنکرون، ضریب میرایی، دروپ سرعت، ثابت زمانی ژنراتور و ثابت زمانی توربین ژنراتور معادل ناحیه  $i$  و ثابت سنکرون خط ارتباطی ناحیه  $i$  با ناحیه  $j$  است. خطای کنترل ناحیه  $i$  ( $ACE_i$ ) طبق رابطه (۵) تعریف می‌شود:

$$ACE_i = \Delta P_{tie,i} + \beta_i \Delta f_i \quad (5)$$

که در آن  $\beta_i$  ضریب بایاس است. تضمین همگرایی  $ACE_i$  به صفر در حالت ماندگار و پاسخ دینامیکی مطلوب برای فرکانس از اهداف اصلی کنترل فرکانس بار است.



شکل ۱: مدل یک ناحیه در سیستم قدرت چند ناحیه‌ای.

معادلات (۱)–(۵) را می‌توان در قالب معادلات فضای حالت زمان-پیوسته نوشت [۳۰]:

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = A_i x_i(t) + B_i u_i(t) + F_i d_i(t) \\ y_i(t) = C_i x_i(t) + D_i u_i(t) \\ |\dot{u}_i(t)| \leq r_{\max} \end{cases} \quad (6)$$

که در آن  $x_i(t) = [\Delta P_{g,i}, \Delta P_{m,i}, \Delta f_i, \Delta P_{tie,i}]^T$  بردار متغیرهای حالت،  $u_i(t) = \Delta P_{C,i}$  ورودی کنترل،  $d_i = [\Delta P_{L,i}, \Delta v_i]^T$  بردار ورودی اغتشاش،  $y_i(t) = ACE_i$  خروجی سیستم و  $r_{\max}$  قید نرخ تولید است. ماتریس‌های مدل کامل ناحیه  $i$  به کمک معادلات (۱)–(۵) به دست می‌آیند [۳۰]:

$$A_i = \begin{bmatrix} -1/T_{g,i} & 0 & -1/R_i T_{g,i} & 0 \\ 1/T_{t,i} & -1/T_{t,i} & 0 & 0 \\ 0 & 1/2H_i & -D_i/2H_i & -1/2H_i \\ 0 & 0 & 2\pi \sum_{j=1, j \neq i}^n T_{ij} & 0 \end{bmatrix}, F_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -1/(2H_i) & 0 \\ 0 & -2\pi \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$B_i = [1/T_{g,i} \ 0 \ 0 \ 0]^T, C_i = [0 \ 0 \ \beta_i \ 1]$$

<sup>1</sup> Area control error

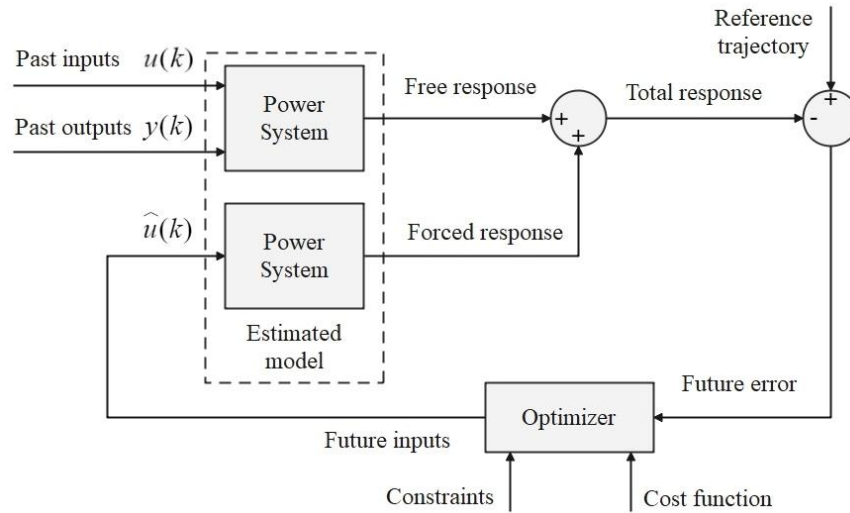
### ۳- طراحی سیستم کنترل

یک روش کنترل پیش‌بین مدل تطبیقی برای مساله کنترل بار-فرکانس سیستم‌های قدرت چند ناحیه‌ای در حضور تغییرات در پارامترهای سیستم و اغتشاش بار طراحی شده است. مدل خطی با کاهش مرتبه شناسایی شده سیستم قدرت در قانون کنترل پیش‌بین مدل تطبیقی مورد استفاده قرار می‌گیرد تا فرکانس هر ناحیه و توان تبدیلی در خط ارتباطی را، با تغییر در میزان بار مرجع تمام واحدهای تولیدی در هر ناحیه، تنظیم کند.

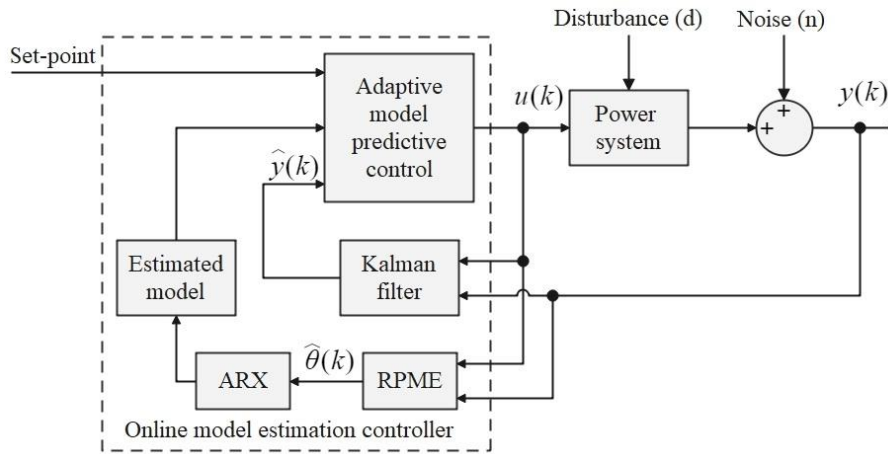
#### ۳-۱- کنترل پیش‌بین مدل تطبیقی

کنترل پیش‌بین مدل یک ابزار قوی برای حل مسایل کنترلی با وجود قیود و چرخه‌های کنترلی طولانی است. این روش کنترلی به‌طور موفق روی کاربردهای صنعتی مختلفی اجرا شده است. اگرچه این روش کنترلی برای کاربردهای مختلف به منظور دستیابی به عمل کنترلی بهینه مناسب است، سیستم‌های فیزیکی واقعی دارای مشخصه‌های غیرخطی قابل ملاحظه‌ای هستند. علاوه بر آن، مشخصه دینامیکی این سیستم‌ها ممکن است به‌طور آهسته یا سریع در زمان تغییر کند و با توجه به اینکه ساختار کنترل‌کننده پیش‌بین مدل استاندارد تطبیقی نیست، مقاومت آن در برابر تغییرات پارامترهای سیستم محدود است. با استفاده از این کنترل‌کننده در حضور عدم قطعیت در مدل، مسیر پیش‌بینی شده سیستم خیلی دقیق نخواهد بود و در نتیجه، عملکرد کنترلی تنزل می‌یابد.

یک رهیافت متداول برای رفع این عیب، اجرای کنترل پیش‌بین مدل تطبیقی است که امکان تخمین پارامترهای سیستم و به‌روزرسانی آنالین مدل پیش‌بینی را فراهم می‌آورد. مسیر آتی سیستم در کنترل پیش‌بین مدل تطبیقی در ابتدا با یک مدل خطی تغییرناپذیر با زمان در فضای حالت به دست می‌آید؛ اما مدل مذکور در طول زمان می‌تواند با توجه به شرایط سیستم به‌روزرسانی شود. ایده کلی کنترل پیش‌بین مدل با مدل تخمینی سیستم در شکل ۲ نشان داده شده است. عملکرد کنترل پیش‌بین مدل به افق پیش‌بینی و قیود خروجی بستگی دارد. در هر بازه کنترلی، مسیر آتی سیستم با استفاده از یک مدل پیش‌بینی و متغیرهای حالت فعلی سیستم (بعنوان شرایط اولیه) به دست می‌آید و یک مساله بهینه‌سازی زمان گسسته با ابعاد محدود به منظور حصول دنباله کنترلی آتی حل می‌شود [۳۱]. ساختار کنترل‌کننده پیش‌بین مدل تطبیقی در ترکیب با مدل سیستم قدرت، شامل فیلتر کالمن تغییرپذیر با زمان LTVKF، مدل خود رگرسیون با ورودی خارجی ARX و تخمینگر مدل چندجمله‌ای بازگشتی RPME در شکل ۳ تصویر شده است. تخمینگر مدل چندجمله‌ای بازگشتی به منظور تخمین پارامترهای سیستم در زمان حقیقی برای شناسایی مدل چندجمله‌ای ARX و استفاده از آن در به‌روزرسانی مدل پیش‌بینی کنترل پیش‌بین مدل بکار می‌رود.



شکل ۲. ایده کلی کنترل پیش‌بین مدل.



شکل ۳. ساختار کنترل پیش‌بین مدل تطبیقی پیشنهادی.

توصیف مدل خطی زمان گسسته هر ناحیه سیستم قدرت در فضای حالت را در نظر می‌گیریم که با استفاده از مدل ARX (در بخش ۳-۲) شناسایی شده است:

$$x(k+1) = A_{id}^k x(k) + B_{id}^k u(k) + L(k)d(k) \quad (8)$$

$$y(k) = C_{id}^k x(k) + n(k) \quad (9)$$

که در آنها  $A_{id}^k \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$  ماتریس حالت،  $B_{id}^k \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$  ماتریس ورودی و  $C_{id}^k \in \mathbb{R}^{1 \times 2}$  ماتریس سنجش است. همچنین،  $x(k)$ ،  $y(k)$ ،  $u(k)$  و  $L(k)$  به ترتیب تخمین بردار حالت سیستم، خروجی سیستم، متغیر کنترلی، پله زمانی و بهره کالمن است. علاوه بر آن، اغتشاش سیستم  $d(k)$  با ماتریس کواریانس  $Q(k)$  و نویز اندازه‌گیری  $n(k)$  با ماتریس کواریانس  $R(k)$  از نوع نویز سفید گوسی با مقدار متوسط صفر و کواریانس متقابل  $N(k)$  هستند:

$$Q(k) = E[d(k)d(k)^T], R(k) = E[n(k)n(k)^T], N(k) = E[d(k)n(k)^T], \quad (10)$$

که در آن  $E$  امید ریاضی متغیر تصادفی است. بایستی خاطرنشان کرد که اغتشاش سیستم  $d(k)$  و نویز اندازه‌گیری  $n(k)$  دارای همبستگی هستند. اغتشاش سیستم در اینجا تغییرات بار و اثر نواحی مجاور روی هر ناحیه و نویز اندازه‌گیری همان نویز حسگرها است. فرض بر آن است که ماتریس‌های کواریانس  $Q(k)$ ،  $R(k)$  و  $N(k)$  قطری هستند و برای تنظیم بهره فیلتر کالمن، نسبت به زمان تغییر می‌کنند. می‌توان  $d(k)$  و  $n(k)$  را در قالب معادلات فضای حالت توصیف کرد:

$$x_d(k+1) = A_d^k x_d(k) + B_d^k u_d(k) \quad (11)$$

$$d(k) = C_d^k x_d(k) \quad (12)$$

$$x_n(k+1) = A_n^k x_n(k) + B_n^k u_n(k) \quad (13)$$

$$n(k) = C_n^k x_n(k) \quad (14)$$

که در آنها  $A_d^k$ ،  $B_d^k$ ،  $C_d^k$ ،  $A_n^k$ ،  $B_n^k$ ،  $C_n^k$  ماتریس‌های مربوط به اغتشاش سیستم و نویز اندازه‌گیری هستند که در زمان حقیقی به‌روزرسانی می‌شوند و  $u_d(k)$  و  $u_n(k)$  به ترتیب اغتشاش ورودی و نویز ورودی است. این ورودی‌های مدل فضای حالت از نوع نویز سفید گوسی با متوسط صفر و واریانس واحد هستند. با افزودن تخمین‌های نویز اندازه‌گیری  $n(k)$  و اغتشاش سیستم  $d(k)$  به مدل شناسایی شده سیستم، یک مدل تعمیم‌یافته طبق رابطه‌های (۱۵) و (۱۶) به دست می‌آید:

$$x_c(k+1|k) = A_c^k x_c(k) + B_c^k u_c(k) \quad (15)$$

$$y(k) = C_c^k x_c(k) \quad (16)$$

که در آنها  $x_c = [x(k), x_d(k), x_n(k)]^T$  و  $u_c = [u(k), u_d(k), u_n(k)]^T$  به ترتیب بردار حالت و ورودی مدل تعمیم‌یافته هستند و ماتریس‌های سیستم با رابطه (۱۷) به دست می‌آیند:

$$A_c^k = \begin{bmatrix} A_{id}^k & B_{id,d}^k & 0 \\ 0 & A_d^k & 0 \\ 0 & 0 & A_n^k \end{bmatrix}, B_c^k = \begin{bmatrix} B_{id}^k & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & B_n^k \end{bmatrix}, C_c^k = [C_{id}^k \quad 0 \quad C_n^k] \quad (17)$$

که در آن  $B_{id,d}^k$  ماتریس اغتشاش ورودی است. بنابراین، تخمین بردار حالت و خروجی سیستم در پله زمانی فعلی با استفاده از بردار سنجش در پله زمانی  $k$  با رابطه‌های (۱۸) و (۱۹) توصیف می‌شود:

$$x_c(k|k) = x_c(k|k-1) + M(k)(y(k) - C_c^k x_c(k|k-1)) \quad (18)$$

$$\hat{y}(k|k) = C_c^k x_c(k|k) \quad (19)$$

که در آنها  $\hat{y}(k|k)$  تخمین خروجی سیستم در پله زمانی فعلی است. تخمین حالت مدل و خروجی متناظر برای پله کنترلی  $k+1$  با رابطه‌های (۲۰)–(۲۲) به دست می‌آیند:

$$x_c(k+1|k) = A_c^k x_c(k|k) + B_c^k u_c(k) + L(k)e(k) \quad (20)$$

$$\hat{y}(k|k) = C_c^k x_c(k+1|k) \quad (21)$$

$$e(k) = y(k) - C_c^k x_c(k+1|k) \quad (22)$$

بایستی خاطر نشان کرد که عبارت  $L(k)e(k)$  در رابطه (۲۰) برای حصول قانون کنترل صحیح در فرمول‌بندی بهینه‌سازی کنترل پیش‌بین مدل نقش مهمی دارد [۳۲]. در هر بازه کنترلی، بهره‌های کالمن  $L(k)$  و  $M(k)$  به منظور تطبیق مدل تخمینی با سیستم واقعی تنظیم می‌شوند. بهره‌های مذکور با استفاده از تخمین قبلی ماتریس کواریانس حالت و حل معادله ریکاتی جبری طبق رابطه‌های (۲۳)–(۲۵) تعیین می‌شوند [۳۳]:

$$L(k) = \left( A_c^k P(k|k-1) C_c^{kT} + N(k) \right) \left( C_c^k P(k|k-1) C_c^{kT} + R(k) \right)^{-1} \quad (23)$$

$$M(k) = P(k|k-1) C_c^{kT} \left( C_c^k P(k|k-1) C_c^{kT} + R(k) \right)^{-1} \quad (24)$$

$$P(k+1|k) = A_c^k P(k|k-1) A_c^{kT} - \left( A_c^k P(k|k-1) C_c^{kT} + N(k) \right) + Q(k) \quad (25)$$

$$P(k) = \left( I - M(k) C_c^k \right) P(k|k-1) \quad (26)$$

که در آنها  $P(k|k-1)$  ماتریس کواریانس خطای تخمین حالت در پله زمانی  $k+1$  است که با استفاده از اطلاعات موجود در پله زمانی  $k$  به دست می‌آید. رابطه (۲۳)، ماتریس بهره کالمن بهینه را برای یک سیستم با اغتشاش و نویز اندازه‌گیری دارای همبستگی محاسبه می‌کند. هنگامی که تخمین پارامترهای مدل در زمان حقیقی با استفاده از تخمینگر مدل چندجمله‌ای بازگشتی به دست آید و با استفاده از مدل ARX به قالب فضای حالت تبدیل شوند، ماتریس‌های کواریانس اغتشاش  $d(k)$  و نویز  $n(k)$ ، یعنی ماتریس‌های  $R(k)$ ،  $Q(k)$  و  $N(k)$ ، در فضای حالت نیز با زمان تغییر می‌کنند. بنابراین، اغتشاش سیستم و نویز اندازه‌گیری در معادلات (۱۱)–(۱۴) را می‌توان با استفاده از یک فیلتر کالمن تخمین زد:

$$\hat{x}_d(k|k) = \hat{x}_d(k|k-1) + M(k)(y - \hat{y}) \quad (27)$$

$$\hat{x}_n(k|k) = \hat{x}_n(k|k-1) + M(k)(y - \hat{y}) \quad (28)$$

و تخمین متغیرهای حالت مذکور برای بازه کنترلی بعدی،  $k+1$ ، با استفاده از رابطه‌های (۲۹) و (۳۰) به دست می‌آید:

$$\hat{x}_n(k+1|k) = A_n \hat{x}_n(k|k) \quad (29)$$

$$\hat{x}_d(k+1|k) = A_d \hat{x}_d(k|k) \quad (30)$$

همانطور که قبلا ذکر شد، کارایی کنترل پیش‌بین مدل تا حد زیادی به دقت پیش‌بینی خروجی سیستم بستگی دارد. با استفاده از فیلتر کالمن، می‌توان تضمین کرد که اطلاعات خروجی با نویز کم در اختیار کنترل‌کننده قرار گیرد. بدون استفاده از فیلتر کالمن، نویز اندازه‌گیری در مساله بهینه‌سازی وارد می‌شود که می‌تواند عملکرد کنترلی را کاهش دهد. علاوه بر آن، فیلتر کالمن می‌تواند تخمینی از متغیرهای حالت غیر قابل سنجش را فراهم کند.

### ۳-۲- شناسایی و تخمین آنلاین پارامترهای مدل

بار محاسباتی بالای شبیه‌سازی مدل دینامیکی غیرخطی و پیچیده سیستم قدرت سبب می‌شود تا استفاده از آن به‌طور مستقیم در چارچوب کنترل پیش‌بین مدل با دشواری همراه باشد. بنابراین، یک مدل ساده شده که مشخصه‌های کلی رفتار سیستم قدرت واقعی را بازسازی می‌کند به منظور پیش‌بینی رفتار آتی سیستم در کنترل پیش‌بین مدل مورد نیاز است. شناسایی سیستم شامل ایجاد مدل‌های دینامیکی بر مبنای داده مانند مدل ARX است، تا رفتار دینامیکی متغیرهای موردنظر را پیش‌بینی کند.

یک معادله تفاضلی خطی شاید ساده‌ترین فرم یک سیستم خطی گسسته در زمان باشد:

$$y(k) + a_1 y(k-1) + \dots + a_{n_a} y(k-n_a) = b_1 u(k-1) + \dots + b_{n_b} u(k-n_b) + e(k) \quad (31)$$

که در آن  $a_i, i=1, \dots, n_a$  و  $b_i, i=1, \dots, n_b$  پارامترهای مدل هستند که بایستی تخمین زده شوند و  $n_a, n_b$  مرتبه‌های مدل هستند.

توصیف کلی مدل چند جمله‌ای ARX در رابطه (۳۱) طبق رابطه (۳۲) قابل بیان است:

$$A(z)y(k) = B(z)u(k) + e(k) \quad (32)$$

که در آن  $u(k)$  و  $y(k)$  به ترتیب ورودی و خروجی مدل سیستم هستند؛  $e(k)$  نویز سفید با متوسط و واریانس صفر است و  $A(z)$  و  $B(z)$  چند جمله‌هایی بر حسب عملگر شیفت زمانی رو به عقب هستند:

$$A(z) = 1 + a_1(k)z^{-1} + a_2(k)z^{-2} + \dots + a_{n_a}(k)z^{-n_a} \quad (33)$$

$$B(z) = b_1(k)z^{-1} + b_2(k)z^{-2} + \dots + b_{n_b}(k)z^{-n_b} \quad (34)$$

$$z^{-1}y(k) = y(k - \Delta k) = y(k-1) \quad (35)$$

که در آنها  $z^{-1}$  عملگر شیفت زمانی رو به عقب و  $\Delta k$  بازه نمونه‌برداری است. فرض کنید که مرتبه‌های  $n_a$  و  $n_b$  معلوم هستند و مدل (۳۱) را می‌توان در هر زمان  $k$  در قالب شبه‌رگرسیون بیان کرد:

$$y(k) = \phi^T(k)\theta(k) + e(k) \quad (36)$$

که در آن  $\theta(k) \in \mathbb{R}^n$  بردار پارامترهایی هستند که بایستی تخمین زده شوند:

$$\theta(k) = [a_1(k), a_2(k), \dots, a_{n_a}(k), b_1(k), b_2(k), \dots, b_{n_b}(k)]^T \quad (37)$$

و  $\phi(k) \in \mathbb{R}^n$  بردار گرادیان متغیرهای ورودی و خروجی است:

$$\phi(k) = [-y(k-1), -y(k-2), \dots, -y(k-n_a), u(k-1), u(k-2), \dots, u(k-n_b)]^T \quad (38)$$

با توجه به بردار پارامترها در رابطه (۳۷)، یک مدل تک-ورودی تک-خروجی مرتبه دوم برای هر ناحیه از سیستم قدرت در نظر گرفته شده است که طبق رابطه (۳۹) بیان می‌شود:

$$y(k+1) = -a_1 y(k-1) - a_2 y(k-2) + b_1 u(k-1) + b_2 u(k-2) + e(k) \quad (39)$$

که در آن  $a_1, a_2, b_1, b_2$  پارامترهای متغیر با زمان مدل هستند.

تحقق فضای حالت یک مدل ARX با پارامترهای ثابت در رابطه (۳۹) به یک قالب مدل فضای حالت برای فیلتر کالمن حالت ماندگار در رابطه‌های (۸) و (۹) منجر می‌شود [۳۴].

به منظور تخمین پارامترهای سیستم  $\theta$  و ماتریس کواریانس مربوطه  $Q(k)$  در زمان حقیقی، رهیافت تخمینگر مدل چندجمله‌ای بازگشتی با الگوریتم تطبیق ضریب فراموشی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳۴]. این رهیافت برای سازگاری با مدل ARX زمان گسسته شناخته شده است [۳۵]. بردار پارامترهای تخمینی  $\hat{\theta}(k)$  طبق رابطه (۴۰) توصیف می‌شود:

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + K(k)(y(k) - \hat{y}(k)) \quad (40)$$

که در آن  $K(k)$  بهره‌ای است که روی به‌روزرسانی بردار پارامترها اثر می‌گذارد:

$$K(k) = Q(k)\phi(k) \quad (41)$$

که در آن  $\phi(k)$  بردار گرادیان  $\hat{y}(k)$  است و  $Q(k)$  با رابطه (۴۲) به دست می‌آید:

$$Q(k) = \frac{P_{ide}(k-1)}{\gamma + \phi^T(k)P_{ide}(k-1)\phi(k)} \quad (42)$$

طبق معادلات رگرسیون خطی، تخمین خروجی با استفاده از تخمین بردار پارامترها  $\hat{\theta}(k)$  حاصل می‌شود:

$$\hat{y}(k) = \phi^T(k)\hat{\theta}(k-1) \quad (43)$$

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + \frac{P_{ide}(k-1)\phi(k)}{\gamma + \phi^T(k)P_{ide}(k-1)\phi(k)} (y(k) - \phi^T(k)\hat{\theta}(k-1)) \quad (44)$$

که در آن  $P_{ide}(k-1)$  ماتریس کواریانس خطای شناسایی پارامترها و  $\gamma$  ضریب فراموشی است.

برای اجتناب از بار محاسباتی در نتیجه محاسبه معکوس ماتریس کواریانس،  $P_{ide}(k)$  با استفاده از رابطه (۴۵) به دست می‌آید:

$$P_{ide}(k) = \frac{1}{\gamma} \left[ P_{ide}(k-1) - \frac{P_{ide}(k-1)\phi(k)\phi^T(k)P_{ide}(k-1)}{\gamma + \phi^T(k)P_{ide}(k-1)\phi(k)} \right] \quad (45)$$

روش تخمینگر مدل چندجمله‌ای بازگشتی با ضریب فراموشی واحد ( $\gamma=1$ ) می‌تواند دقت تخمین را کاهش دهد. برای سیستم‌های غیرخطی متغیر با زمان، تخمینگر مدل چندجمله‌ای بازگشتی با ضریب فراموشی نمایی ( $\gamma < 1$ ) به نتایج قابل قبول منجر خواهد شد [۳۶]. در مراحل اولیه محاسبات، بهتر است که ضریب فراموشی در یک مقدار کوچک تنظیم شود. این کار کمک می‌کند تا اثر خطای بزرگ بین مقادیر تخمینی قبلی و واقعی روی دقت تخمین پارامتر کاهش یابد. هنگامی که خطای تخمین پارامتر در ادامه روند محاسبات کوچک‌تر می‌شود، بهتر است تا ضریب فراموشی را افزایش دهیم و در مقادیر نزدیک به واحد تنظیم کنیم. تخمین بردار پارامتر  $\hat{\theta}(k)$  برای هر بازه کنترلی تعیین می‌شود و سپس، چندجمله‌ای‌های  $A(z)$  و  $B(z)$  در قالب توصیف فضای حالت به ماتریس‌های  $A_{id}^k$ ،  $B_{id}^k$  و  $C_{id}^k$  تبدیل می‌شوند که در معادلات (۸) و (۹) مورد استفاده قرار گرفته‌اند. الگوریتم تخمینگر مدل چندجمله‌ای بازگشتی در صورتی در تخمین بردار پارامتر  $\hat{\theta}(k)$  خوب عمل می‌کند که متغیرهای ورودی و خروجی رویت‌پذیر باشند. اگر پارامترهای سیستم به کندی نسبت به زمان تغییر کنند، تاثیر داده‌های قبلی روی بردار پارامتر می‌تواند با افزایش سطح اطمینان بردار داده‌های ورودی-خروجی نزدیک به زمان فعلی، کاهش یابد [۳۷]. زمانی که داده‌های نمونه ورودی-خروجی کافی جمع‌آوری شد، مساله حداقل مربعات برای تعیین پارامترهای مدل چندجمله‌ای ARX حل می‌شود. این کار با کمینه‌سازی تابع هدف زیر انجام می‌شود:

$$J_k(\hat{\theta}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k \gamma^{k-i} [y_i(k) - \phi^T(k)\hat{\theta}(k)]^2 \quad (46)$$

از آنجایی که  $J_k(\hat{\theta})$  یک تابع مربعی اکیدا محدب است،  $\theta(k+1) = \arg \min_{\hat{\theta} \in \mathbb{R}^{n \times n}} J_k(\hat{\theta})$  تنها پاسخ مساله بهینه‌سازی است. مراحل تخمین پارامترهای اولیه مدل با استفاده از معادلات تخمینگر مدل چندجمله‌ای بازگشتی در ادامه فهرست شده است. مراحل تخمین پارامترهای اولیه مدل با استفاده از معادلات تخمینگر مدل چندجمله‌ای بازگشتی در ادامه فهرست شده است:

۱. مقداردهی اولیه:  $k = 1$ ، بیشینه طول داده‌ها  $L_{data} = 1200$ ،  $\gamma < 1$ ،  $\phi(0) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ،  $\theta(0) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ،  $P(0) = p_0 I_{n \times n}$ ،  $p_0 = 10^6$ .
۲. ایجاد بردار داده‌های سنجش ورودی-خروجی  $\phi(k)$  با استفاده از رابطه (۳۸).
۳. محاسبه بردار بهره  $K(k)$  و ماتریس کواریانس  $P(k-1)$  و  $P(k)$  با استفاده از معادلات (۳۸)، (۴۰)–(۴۲) و (۴۵).
۴. به‌روزرسانی بردار تخمین پارامترها  $\hat{\theta}(k)$  با استفاده از رابطه (۴۴).
۵. اگر  $k < L_{data}$ ، افزایش  $k$  به اندازه یک واحد و رفتن به مرحله ۲، در غیر اینصورت، خاتمه اجرای الگوریتم.

### ۳-۳- فرمول‌بندی مساله بهینه‌سازی کنترل پیش‌بین مدل

بهینه‌سازی یکی از بخش‌های اصلی کنترل‌کننده کنترل پیش‌بین مدل است که در ضمن آن بهترین توالی عمل‌های کنترلی آتی با بهینه‌سازی تابع هدف به دست می‌آید. یک الگوریتم کنترل پیش‌بین مدل بر مبنای مدل خطی سیستم به‌طور معمول از تابع هدف برای کمینه‌سازی خطای بین خروجی سیستم و خروجی مطلوب بهره می‌گیرد. تابع هزینه در معرض قیود مختلف تساوی و ناتساوی قرار دارد و برای یافتن بهترین توالی کنترلی بهینه‌سازی می‌شود. این بهینه‌سازی به‌طور تکراری در هر بازه کنترلی انجام می‌شود. تابع هزینه مربعی شامل جمع وزنی خطاهای پیش‌بینی و مقادیر ورودی کنترلی آتی می‌شود:

$$\Phi = \sum_{j=1}^{H_p} R_j (y_r(k) - \hat{y}(k+j|k))^2 + \sum_{j=1}^{H_c} S_j (\Delta u(k+j))^2 \quad (47)$$

که در آن  $R_j = \text{diag}[r_j(k), \dots, r_j(H_p - 1)]$  و  $S_j = \text{diag}[s_j(k), \dots, s_j(H_c - 1)]$  ضرایب تنظیم وزنی،  $H_p$  افق پیش‌بینی،  $H_c$  افق کنترلی،  $\hat{y}$  و  $y_r$  به ترتیب مقدار پیش‌بینی و مقدار مرجع متغیر خروجی،  $u$  متغیر کنترلی و  $\Delta u(k+j) = u(k+j|k) - u(k+j-1|k)$  نمو ورودی در طول یک بازه زمانی است. خروجی سیستم توسط حدود بیشینه و کمینه محدود می‌شوند:

$$y_{\min} \leq \hat{y}(k+j) \leq y_{\max}, j = 1, \dots, H_p \quad (48)$$

علاوه بر آن، ورودی‌های کنترلی نیز دارای قیدهایی از قبیل محدودیت روی اندازه و محدودیت روی نرخ تغییر ورودی هستند:

$$\begin{cases} u_{\min} \leq u(k+j) \leq u_{\max} \\ \Delta u_{\min} \leq \Delta u(k+j) \leq \Delta u_{\max} \end{cases}, j = 1, \dots, H_c \quad (49)$$

به منظور کاهش بار محاسباتی، می‌توان نمو ورودی کنترلی را با استفاده از توابع لاگر تخمین زد:

$$\Delta u(k+j) = L(j)^T \eta = [L_1(j), \dots, L_N(j)] [\eta_1, \dots, \eta_N]^T \quad (50)$$

که در آن  $N$  مرتبه شبکه لاگر و  $L_i(j)$ ,  $i=1, \dots, N$  توابع پایه لاگر زمان گسسته است که با استفاده از یک معادله تفاضلی به دست می‌آید:

$$L(k+1) = A_l L(k), L(0)^T = \sqrt{\beta} [1, -\alpha, \alpha^2, -\alpha^3, \dots, (-1)^{N-1} \alpha^{N-1}], \beta = 1 - \alpha^2, \quad (51)$$

$$A_l = \begin{bmatrix} \alpha & 0 & \dots & 0 \\ \beta & \alpha & \dots & 0 \\ -\alpha\beta & \beta & \dots & 0 \\ \alpha^2\beta & -\alpha\beta & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ (-\alpha)^{N-2}\beta & (-\alpha)^{N-3}\beta & \dots & \alpha \end{bmatrix}$$

که در آن  $L(0)$  مقدار اولیه و  $0 \leq \alpha < 1$  ضریب مقیاس زمانی شبکه لاگر است.

به این ترتیب، بهره کنترل پیش‌بین مدل  $K_{mpc}$  با استفاده از رابطه (۵۲) در هر گام کنترلی محاسبه می‌شود:

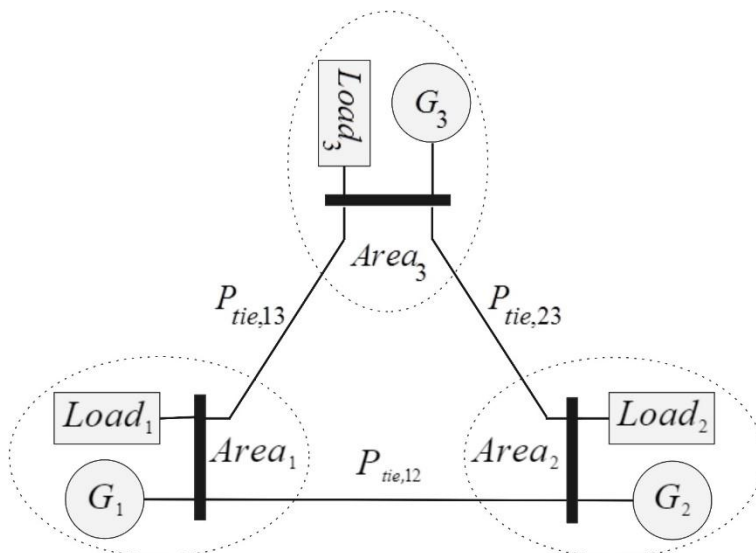
$$K_{mpc} = L(0)^T \Omega^{-1} \Psi, \Omega = \sum_{j=1}^{H_p} \varphi(j) Q \varphi(j)^T + R_L, \Psi = \sum_{j=1}^{H_p} \varphi(j) Q (A_c^k)^j, \quad (52)$$

$$\varphi(j) = \sum_{i=0}^j (A_c^k)^{j-i-1} B_c^k L(i)^T, Q = (C_c^k)^T C_c^k, R_L = r_w \text{diag}[1, \dots, 1]$$

#### ۴- نتایج شبیه‌سازی

برای بررسی عملکرد کنترل کننده بار-فرکانس پیش‌بین مدل تطبیقی پیشنهادی، شبیه‌سازی‌های عددی در نرم‌افزار سیمولینک متلب انجام شد. ساختار قدرت سه ناحیه‌ای بهم‌پیوسته در شکل ۴ به عنوان سیستم اصلی مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهای نامی مدل در جدول ۱ آورده شده است [۳۸]. مدل هر ناحیه در سیستم قدرت سه ناحیه‌ای مذکور با معادلات (۱)–(۵) توصیف می‌شود. ظرفیت کنترل فرکانس بار در مقدار 0.2 pu، گام نمونه‌برداری در مقدار  $dt = 0.01$  s و با توجه به اینکه تمام واحدهای تولید توان از نوع ژنراتورهای حرارتی هستند، نرخ تغییر ورودی کنترل (قید نرخ تولید) در مقدار 0.05 pu/min تنظیم شده است. مقادیر اولیه پارامترهای مدل با استفاده از شناسایی مدل به‌طور آفلاین به دست آمد و با توجه به تغییرات پارامترهای سیستم در زمان حقیقی به‌روزرسانی خواهد شد. برای کنترل کننده پیش‌بین مدل تطبیقی پیشنهادی، افق پیش‌بینی  $H_p = 20$ ، ضریب مقیاس زمانی  $\alpha = 0.9$ ، مرتبه شبکه لاگر  $N = 3$  و ضریب وزنی  $r_w = 45$  است. این پارامترهای کنترلی برای هر سه ناحیه کنترلی در شبکه قدرت در شکل ۴ یکسان است. شبیه‌سازی‌ها با اغتشاش پله‌ای بار با مقدار  $\Delta P_L = 0.02$  pu در ناحیه ۲ در زمان  $t = 0$  s با دو سناریوی (۱) با پارامترهای نامی طبق جدول ۱ و (۲) پارامترهای دارای عدم قطعیت انجام شد. باید خاطر نشان شود که اغتشاش بار در ناحیه ۲ از طریق خطوط ارتباطی روی نواحی دیگر اثر می‌گذارد. با توجه به قید نرخ تولید یکسان، عملکرد کنترل پیشنهادی AMPC با کنترل پیش‌بین مدل استاندارد MPC و کنترل تناسبی-انتگرالی-مشتقی PID مقایسه شد. برای تمام موارد، شاخص زمان نشست به بازه زمانی بعد از اعمال اغتشاش بار اشاره دارد که پاسخ به محدوده  $\pm 0.0001$  حول صفر همگرا می‌شود. برای پارامترهای کنترل پیش‌بین مدل استاندارد، افق پیش‌بینی  $H_p = 120$  و افق کنترلی  $H_c = 10$  برای هر سه ناحیه کنترلی تنظیم شد. برای تنظیم پارامترهای افق کنترلی و افق پیش‌بینی در کنترل پیش‌بین مدل استاندارد، مواردی از قبیل عملکرد حالت نامی، مشخصه مقاوم و بار محاسباتی در نظر گرفته

شده است. پارامترهای کنترل PID به‌طور جداگانه و با توجه به دینامیک‌های هر ناحیه انتخاب شده است:  $K_{P1} = 0.2726$ ،  $K_{I3} = 0.6135$ ،  $K_{P3} = 0.3276$ ،  $K_{D2} = 0.25$ ،  $K_{I2} = 0.7$ ،  $K_{P2} = 0.8515$ ،  $K_{D1} = 0.3213$ ،  $K_{I1} = 0.4821$  و  $K_{D3} = 0.4852$  و  $N_1 = N_2 = N_3 = 100$ .



شکل ۴: سیستم قدرت بهم‌پیوسته سه-ناحیه‌ای.

جدول ۱: پارامترهای سیستم قدرت سه-ناحیه‌ای [۳۸].

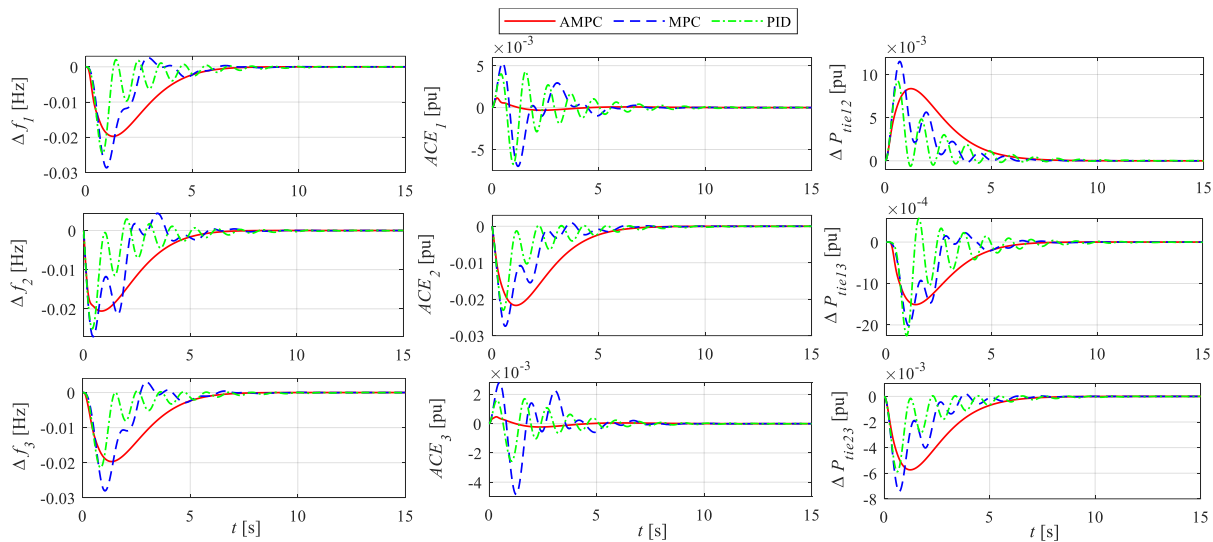
Area	$d$ [pu/Hz]	$2H$ [pu s]	$R$ [Hz/pu]	$T_g$ [s]	$T_r$ [s]	$\beta$ [pu/Hz]	$T_{ij}$ [pu/Hz]
1	0.015	0.1667	3.00	0.08	0.40	0.3483	$T_{12}=0.20, T_{13}=0.25$
2	0.016	0.2017	2.73	0.06	0.44	0.3827	$T_{21}=0.20, T_{23}=0.15$
3	0.015	0.1247	2.82	0.07	0.30	0.3692	$T_{31}=0.25, T_{32}=0.15$

#### ۴-۱- سناریوی ۱: بررسی عملکرد با پارامترهای نامی

نتایج شبیه‌سازی در این سناریو در شکل ۵ نشان داده شده است که شامل انحراف فرکانس، انحراف توان در خط ارتباطی و خطای کنترل ناحیه (متغیر خروجی تحت کنترل) می‌شود. با توجه به این شکل، هموار بودن پاسخ سیستم تحت کنترل پیشنهادی نسبت به کنترل پیش‌بین مدل استاندارد و کنترل PID نشان دهنده میرایی بهتر آن است؛ پاسخ سیستم تحت کنترل پیش‌بین مدل و کنترل PID با نوسانات بزرگی به صفر همگرا می‌شوند. با توجه به اغتشاشات دائمی در سیستم قدرت ناشی از تغییرات بار، سرعت و میرایی پاسخ سیستم از نظر حفظ کیفیت توان و پایداری بسیار دارای اهمیت است. مقایسه عددی کنترل‌کننده‌های مورد بررسی از نظر زمان نشست (سرعت پاسخ حالت ماندگار) و بیشینه انحراف متغیرهای مذکور در جدول ۲ و نمودار میله‌ای آن در شکل ۶ آورده شده است. با توجه به این جدول، بیشینه انحراف متغیرها برای تمام نواحی تحت کنترل پیشنهادی از مقادیر متناظر تحت کنترل پیش‌بین مدل استاندارد و کنترل PID کمتر است. به عنوان مثال، بیشینه انحراف فرکانس، تحت کنترل پیشنهادی نسبت به کنترل پیش‌بین مدل استاندارد و کنترل PID به ترتیب 31.36% و 19.92% برای ناحیه اول، 23.99% و 17.93% برای ناحیه دوم و 29.64% و 7.94% برای ناحیه سوم کاهش یافته است. سرعت پاسخ متغیرهای انحراف فرکانس و خطای کنترل ناحیه، تحت کنترل پیشنهادی برای تمام نواحی نیز بهتر از مقادیر متناظر تحت کنترل‌های مورد مقایسه است. به عنوان مثال، زمان نشست متغیر خطای کنترل ناحیه تحت کنترل پیشنهادی نسبت به کنترل پیش‌بین مدل استاندارد و کنترل PID به ترتیب 44.84% و 61.39% برای ناحیه اول، 9.16% و 26.99% برای

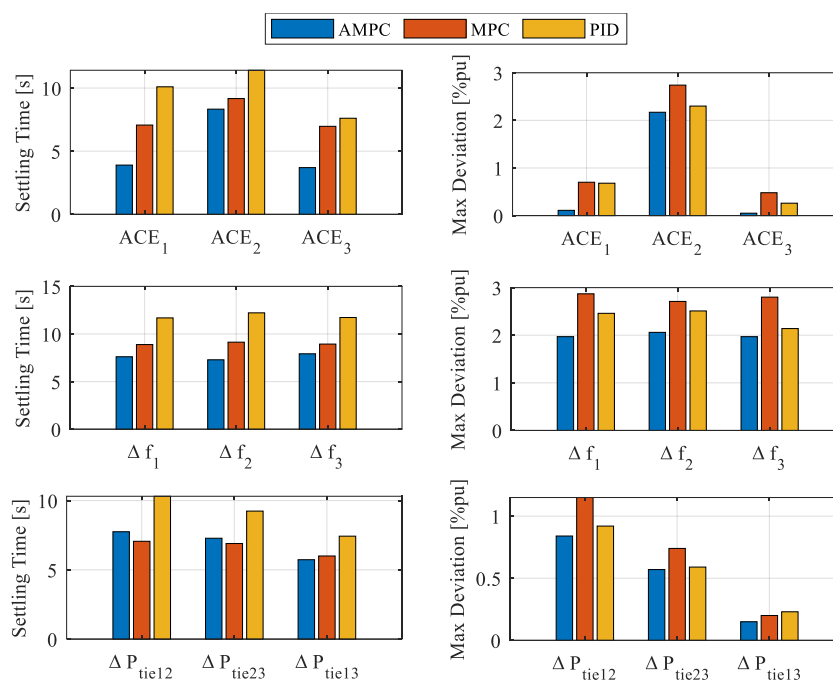
ناحیه دوم و 46.92% و 51.38% برای ناحیه سوم بهبود یافته است. همچنین، با وجود اغتشاش بار در ناحیه دوم، متغیر خروجی در این ناحیه نسبت به ناحیه‌های اول و سوم برای تمام کنترل‌کننده‌های مورد بررسی دارای بیشینه انحراف بزرگتری است. از آنجایی که می‌توان قید نرخ تولید را به‌طور خودکار در محاسبه سیگنال کنترل پیش‌بین مدل جابدهی کرد، کنترل پیشنهادی و کنترل پیش‌بین مدل استاندارد دارای سرعت پاسخ بهتر در مقایسه با کنترل PID هستند؛ به این ترتیب، عملکرد کنترل PID بیشتر از عملکرد کنترل پیشنهادی و کنترل پیش‌بین مدل استاندارد از قید نرخ تولید متاثر می‌شود.

کنترل پیش‌بین مدل تطبیقی نسبت به کنترل پیش‌بین مدل استاندارد از نظر کاهش بار محاسباتی نیز بهتر عمل می‌کند. زمان متوسط اجرای شبیه‌سازی برای کنترل PID برابر با 0.6511 s، برای کنترل پیش‌بین مدل استاندارد برابر با 1.7308 s و برای کنترل پیش‌بین مدل تطبیقی پیشنهادی برابر با 0.7216 s به طول می‌انجامد. به این ترتیب می‌توان گفت که بار محاسباتی کنترل پیش‌بین مدل تطبیقی پیشنهادی، با توجه به استفاده از مدل داخلی ساده شده و توابع لاگر در تخمین دنباله کنترلی، به اندازه قابل توجهی نسبت به کنترل پیش‌بین مدل استاندارد کاهش می‌یابد و دارای مقداری نزدیک به کنترل متداول PID است.



شکل ۵: انحراف فرکانس، خطای کنترل ناحیه و انحراف توان خط ارتباطی در سناریوی ۱ (پارامترهای ثابت نامی).  
 جدول ۲: مقایسه عددی کنترل‌های مورد بررسی در سناریوی ۱ (پارامترهای ثابت نامی).

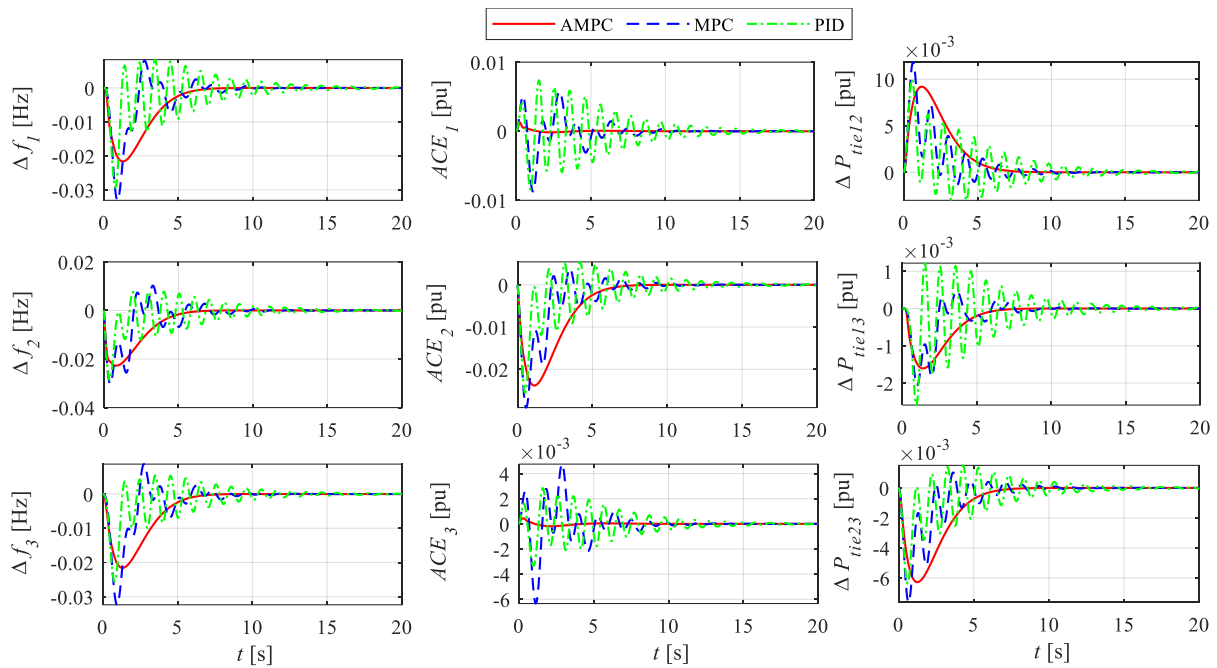
Variable	Settling Time [s]			Max. Deviation $\times 10^2$ [pu]		
	AMPC	MPC	PID	AMPC	MPC	PID
$\Delta f_1$	<b>7.61</b>	8.89	11.69	<b>1.97</b>	2.87	2.46
$ACE_1$	<b>3.90</b>	7.07	10.10	<b>0.11</b>	0.70	0.68
$\Delta P_{tie_{12}}$	7.75	<b>7.06</b>	10.31	<b>0.84</b>	1.15	0.92
$\Delta f_2$	<b>7.29</b>	9.14	12.22	<b>2.06</b>	2.71	2.51
$ACE_2$	<b>8.33</b>	9.17	11.41	<b>2.17</b>	2.74	2.30
$\Delta P_{tie_{23}}$	7.28	<b>6.90</b>	9.24	<b>0.57</b>	0.74	0.59
$\Delta f_3$	<b>7.92</b>	8.94	11.73	<b>1.97</b>	2.80	2.14
$ACE_3$	<b>3.70</b>	6.97	7.61	<b>0.05</b>	0.48	0.26
$\Delta P_{tie_{13}}$	<b>5.73</b>	6.00	7.43	<b>0.15</b>	0.20	0.23



شکل ۶: نمودار میله‌ای متغیرهای خطای کنترل ناحیه، انحراف فرکانس و انحراف توان خط ارتباطی در سناریوی ۱ (پارامترهای ثابت نامی). زمان نشست (چپ)، بیشینه انحراف (راست).

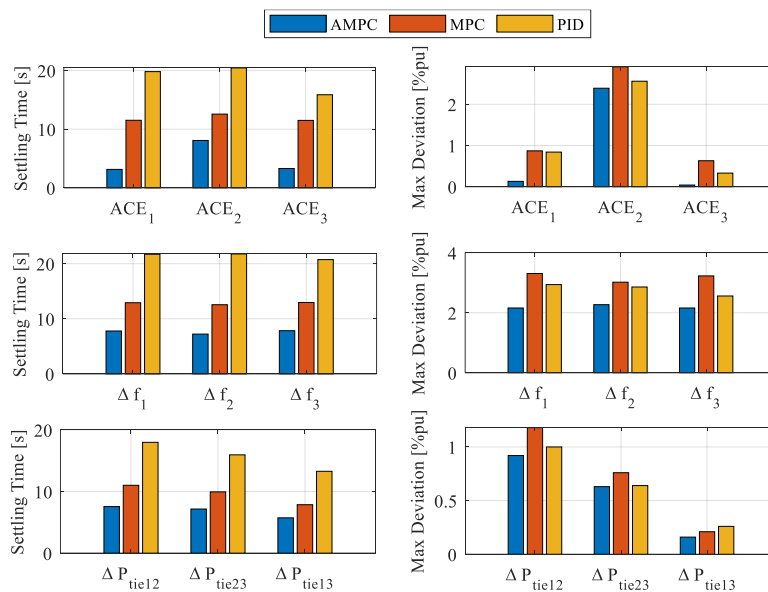
#### ۴-۲- سناریوی ۲: بررسی عملکرد با تغییرات پارامتری

در این بخش، عملکرد مقاوم کنترل پیش‌بین تطبیقی پیشنهادی در دفع اغتشاش بار پله‌ای در ناحیه ۲ در حضور تغییرات پارامترهای سیستم مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به ابعاد و پیچیدگی سیستم‌های قدرت فعلی، وجود عواملی از قبیل اغتشاشات پیوسته بار و خطاهای سیستم سبب تغییر در پارامترهای مدل می‌شود. تضمین کیفیت توان و پایداری سیستم به مشخصه مقاومت کنترل‌کننده بار-فرکانس بستگی دارد. برای نشان دادن مقاومت کنترل پیشنهادی، فرض شده است که در زمان صفر به میزان 20% تغییرات در پارامترهای سیستم بوجود آمده است، به‌طوری‌که پارامترهای ثابت زمانی ژنراتور و ثابت زمانی توربین به 20% بیشتر از مقادیر اولیه و پارامترهای لختی سنکرون و ضریب میرایی به 20% کمتر از مقادیر اولیه تغییر کرده است. افزایش ثابت‌های زمانی و کاهش میرایی سیستم سبب کاهش پایداری ذاتی سیستم قدرت و در نتیجه چالش برای سیستم کنترل می‌شود. نتایج شبیه‌سازی مقایسه‌ای در شکل ۷، جدول ۳ و شکل ۸ آورده شده است. کنترل پیش‌بین مدل تطبیقی پیشنهادی با توجه به شناسایی آنلاین پارامترهای مدل قادر به حفظ عملکرد دفع اغتشاش بار با وجود تغییرات پارامتری است ولی عملکرد کنترل پیش‌بین مدل استاندارد و کنترل PID با افت قابل‌ملاحظه‌ای مواجه می‌شود. سرعت پاسخ حالت ماندگار سیستم را می‌توان به مشخصه مقاومت و قابلیت کنترل‌کننده در دفع اغتشاش بار ارتباط داد. به عنوان مثال، زمان نشست متغیر خطای کنترل ناحیه تحت کنترل پیشنهادی نسبت به کنترل پیش‌بین مدل استاندارد و کنترل PID به ترتیب 72.72% و 84.14% برای ناحیه اول، 35.75% و 60.50% برای ناحیه دوم و 71.37% و 79.26% برای ناحیه سوم بهبود یافته است. با توجه به این اعداد و نوسانات زیاد با میرایی ضعیف در پاسخ کنترل PID می‌توان دریافت که میزان افت عملکرد کنترل PID نسبت به کنترل پیش‌بین استاندارد در حضور تغییرات پارامتری بیشتر است؛ کنترل پیش‌بین مدل استاندارد در ابتدای هر گام کنترلی، اطلاعات به‌روزرسانی شده متغیرهای حالت فعلی سیستم را در قابل شرایط اولیه دریافت می‌کند و در نتیجه می‌تواند تا حدی اثر تغییرات پارامتری را پوشش دهد.



شکل ۷: انحراف فرکانس، خطای کنترل ناحیه و انحراف توان خط ارتباطی در سناریوی ۲ (20% تغییرات پارامتری).  
 جدول ۳: مقایسه عددی کنترل‌های مورد بررسی در سناریوی ۲ (20% تغییرات پارامتری).

Variable	Settling Time [s]			Max. Deviation $\times 10^2$ [pu]		
	AMPC	MPC	PID	AMPC	MPC	PID
$\Delta f_1$	7.78	12.91	21.71	2.16	3.31	2.94
$ACE_1$	3.14	11.51	19.80	0.13	0.87	0.84
$\Delta P_{tie_{12}}$	7.56	11.01	17.98	0.92	1.18	1.00
$\Delta f_2$	7.22	12.55	21.77	2.27	3.02	2.86
$ACE_2$	8.07	12.56	20.43	2.39	2.91	2.56
$\Delta P_{tie_{23}}$	7.16	9.94	15.95	0.63	0.76	0.64
$\Delta f_3$	7.83	12.95	20.74	2.16	3.23	2.56
$ACE_3$	3.29	11.49	15.86	0.04	0.63	0.33
$\Delta P_{tie_{13}}$	5.73	7.86	13.28	0.16	0.21	0.26



شکل ۸: نمودار میله‌ای متغیرهای خطای کنترل ناحیه، انحراف فرکانس و انحراف توان خط ارتباطی در سناریوی ۲ (20% تغییرات پارامتری). زمان نشست (چپ)، بیشینه انحراف (راست).

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک کنترل پیش‌بین مدل تطبیقی برای مساله کنترل بار-فرکانس یک سیستم قدرت بهم‌پیوسته چند ناحیه‌ای در حضور تغییرات پارامتری پیشنهاد شد. یک مدل ساده شده ARX از سیستم قدرت اصلی به کمک تخمینگر مدل چند جمله‌ای بازگشتی در ابتدا به‌طور آفلاین تخمین زده شد و سپس در قالب مدل پیش‌بینی کنترل‌کننده، در هر گام زمانی به‌طور آفلاین به‌روزرسانی می‌شود. یک فیلتر کالمن خطی تغییرپذیر با زمان وظیفه رویت متغیرهای سیستم را بر عهده دارد. عملکرد کنترل پیشنهادی با عملکرد کنترل پیش‌بین مدل استاندارد و کنترل PID در دفع اغتشاش بار پله‌ای در سیستم قدرت با پارامترهای ثابت نامی و پارامترهای متغیر با زمان مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج حاصل از خروجی شبیه‌سازی را می‌توان به این ترتیب جمع‌بندی کرد: (۱) با توجه به شناسایی یک مدل کاهش مرتبه یافته و استفاده از توابع لاگر برای تخمین دنباله کنترلی آتی، بار محاسباتی کنترل پیش‌بین مدل تطبیقی پیشنهادی به اندازه زیادی در مقایسه با کنترل پیش‌بین مدل استاندارد کاهش می‌یابد و قابل مقایسه با کنترل متداول PID است. (۲) با توجه به تخمین آفلاین پارامترهای مدل و به‌روزرسانی مدل پیش‌بینی در هر گام کنترلی، عملکرد پاسخ دینامیکی (از نظر زمان نشست و بیشینه انحراف) کنترل پیشنهادی در مقایسه با کنترل پیش‌بین مدل استاندارد و به ویژه کنترل PID به‌طور قابل ملاحظه‌ای بهبود می‌یابد. بنابراین، کنترل پیش‌بین مدل تطبیقی پیشنهادی می‌تواند جایگزین مناسبی برای کنترل متداول PID برای مساله بار-فرکانس سیستم‌های قدرت پیچیده فعلی باشد. از آنجایی که بکارگیری منابع انرژی تجدیدپذیر در سیستم‌های قدرت فعلی رو به رشد است، کارهای آتی به توسعه یک مدل جامع‌تر از سیستم قدرت با در نظر گرفتن منابع انرژی تجدیدپذیر متداول از قبیل مزارع بادی و خورشیدی و بررسی اثر دینامیک‌ها و خروجی نوسانی این واحدها روی عملکرد سیستم کنترل بار-فرکانس اختصاص دارد.

## مراجع

- [1] D. Jiao, C. Shao, B. Hu, K. Xie, C. Lin, Z. Ju, "Age-of-information-aware PI controller for load frequency control," *Prot. Control Mod. Power Syst.*, vol. 8, no. 3, p. 631–645, 2023.
- [2] F. Milano, F. Dörfler, G. Hug, D.J. Hill, G. Verbič, "Foundations and challenges of low-inertia systems," in *Power Syst. Computation Conf*, Dublin, Ireland, 2018.
- [3] Y. Zhao, T. Liu, D. J. Hill, "Data-driven adaptive predictive frequency control for power systems with unknown and time-varying inertia," *Electric Power Systems Research*, vol. 234, p. 110815, 2024.
- [4] S. Tripathi, V.P. Singh, N. Kishor, A.S. Pandey, "Load frequency control of power system considering electric Vehicles' aggregator with communication delay," *Int J Electr Power Energy Syst*, vol. 145, p. 108697, 2023.
- [5] L. Jin, et al., "Delay-dependent stability of load frequency control with adjustable computation accuracy and complexity," *Control Eng Pract.*, vol. 135, p. 105518, 2023.
- [6] B. Khokhar, K. Pal Singh Parmar, "Impact analysis of capacitive energy storage integration on load frequency control performance of microgrids employing a new dual-stage controller," *ISA Transactions*, 2025.
- [7] J. Ansari, A. Abbasi, B. Bahmani Firouzi, "Decentralized LMI-based event-triggered integral sliding mode LFC of power systems with disturbance observer," *Int J Electr Power Energy Syst.*, vol. 138, p. 107971, 2022.
- [8] Z. Ming, H. Zhang, J. Sun, "Self-triggered load frequency control using T-S fuzzy ADP method for unknown power systems," *ISA Transactions*, 2025.

- [9] P. Samal, N. Nayak, A. Satapathy, S. Kumar Bhuyan, "Load frequency control in renewable based micro grid with Deep Neural Network based controller," *Results in Engineering*, vol. 25, p. 103554, 2025.
- [10] J. Li, T. Zhou, "Fully autonomous load frequency control for integrated energy system with massive energy prosumers using multi-agent deep meta reinforcement learning," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 213, p. 115489, 2025.
- [11] W. Qian, D. Lu, Y. Wu, "Adaptive memory event-triggered load frequency control for multiarea power systems with non-ideal communication channel," *Electric Power Systems Research*, vol. 245, p. 111596, 2025.
- [12] X. H Linyun, L. Hao, W. Jie, "LMI based robust load frequency control for time delayed power system via delay margin estimation," *Int. J. Electr. Power Ener. Syst.*, vol. 100, pp. 91-103, 2018.
- [13] G. I.Y. Mustafa, MD. Masum, MD. Siam, "A new model-free control for load frequency control of interconnected power systems based on nonlinear disturbance observer," *Energy Reports*, vol. 25, p. 4998–5008, 2024.
- [14] V. Vasuki Gautam, R. Loka, A. M. Parimi, "Cubature Kalman filter and linear quadratic regulator for load frequency control," *Electric Power Systems Research*, vol. 222, p. 109509, 2023.
- [15] S. Mokhtari, K. K. Yen, "Dynamic state estimation with additive noise for load frequency control using bilateral fuzzy adaptive unscented Kalman filter," *Electric Power Systems Research*, vol. 220, p. 109363, 2023.
- [16] A.M. Ersdal, L. Imsland & K. Uhlen, "Model predictive load-frequency control," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, no. 1, pp. 777-785, 2016.
- [17] N. Zhao, et al., "Model predictive based frequency control of power system incorporating air-conditioning loads with communication delay," *Int J Electr Power Energy Syst.*, vol. 138, p. 107856, 2022.
- [18] Y Zheng, J Zhou, Y Xu, Y Zhang & Z Qian, "A distributed model predictive control based load frequency control scheme for multi-area interconnected power system using discrete-time Laguerre functions," *ISA Transactions*, vol. 68, pp. 127-140, 2017.
- [19] W. Liu, Y. Liu, "Hierarchical model predictive control of wind farm with energy storage system for frequency regulation during black-start," *Int J Electr Power Energy Syst.*, vol. 119, p. 105893, 2020.
- [20] A. Oshnoei, M. Kheradmandi, R. Khezri, A. Mahmoudi, "Robust model predictive control of gate-controlled series capacitor for LFC of power systems," *IEEE Trans Ind Inf.*, vol. 17, no. 7, p. 4766–4776, 2021.
- [21] G. Cai, et al., "Data-driven predictive based load frequency robust control of power system with renewables," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 154, p. 109429, 2023.
- [22] Z. An, et al., "Tube-based MPC strategy for load frequency control of multi-area interconnected power system with HESS," *Journal of Energy Storage*, vol. 99, p. 113340, 2024.
- [23] C. Huang, et al., "DMPC-based load frequency control of multi-area power systems with heterogeneous energy storage system considering SoC consensus," *Electric Power Systems Research*, vol. 228, p. 110064, 2024.
- [24] P. Wang, et al., "A MPC-based load frequency control considering wind power intelligent forecasting," *Renewable Energy*, vol. 244, p. 122636, 2025.
- [25] M. Ma, J. Cui, X. Liu, K. Y. Lee, "Distributed Economic Model Predictive Load Frequency Control for the Multiarea Interconnected Power System With WTs," *IEEE Systems Journal*, vol. 18, no. 3, pp. 1629-1638, 2024.
- [26] P.A. Gbadega, A.K. Saha, "Load Frequency Control of a Two-Area Power System With a Stand-Alone Microgrid Based on Adaptive Model Predictive Control," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 9, no. 6, pp. 7253-7263, 2021.

- [27] W. Wang, et al., "A novel adaptive model predictive frequency control using unscented Kalman filter," *Electric Power Systems Research*, vol. 213, p. 108721, 2022.
- [28] W. Wang, et al., "Adaptive Model Predictive-Based Load Frequency Controller using Unscented Kalman Filter," in *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia)*, Brisbane, Australia, 2021.
- [29] S. Jiang, et al., "Feedback-Based Setpoint Mechanism in Model Predictive Load Frequency Control," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 39, no. 4, pp. 6115 - 6118, 2024.
- [30] T.H. Mohamed, J. Morel, H. Bevrani & T. Hiyama, "Model predictive based load frequency control\_design concerning wind turbines," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 43, no. 1, pp. 859-867, 2012.
- [31] M. Bujarbaruah, X. Zhang, M. Tanaskovic, F. Borrelli, "Adaptive stochastic MPC under time-varying uncertainty," *IEEE Trans. Automat. Control*, vol. 66, no. 6, p. 2840–2845, 2021.
- [32] J.B. Jorgensen, J.K. Huusom, J.B. Rawlings, "Finite horizon MPC for systems in innovation form," in *50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference*, Orlando, FL, USA, 2011.
- [33] N. Assimakis, M. Adam, "Kalman filter Riccati equation for the prediction, estimation, and smoothing error covariance matrices," *ISRN Comput Math*, vol. 2013, no. 1, pp. 1-7, 2013.
- [34] L. Ljung, *System Identification—Theory for the User*, Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall PTR, 1999.
- [35] D. Ioan, G.Z. Landau, *Adaptive Control*, London: Springer-Verlag, 1997.
- [36] J.L. Garriga, M. Soroush, "Model predictive control tuning methods: a review," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 49, no. 8, pp. 3505-3515, 2010.
- [37] A.L. Bruce, A. Goel, D.S. Bernstein, "Convergence and consistency of recursive least squares with variable-rate forgetting," *Automatica*, vol. 119, pp. 1-6, 2020.
- [38] Adel A.B. Rehiara, H. Chongkai, Y. Sasaki, N. Yorino & Y. Zoka, "An Adaptive Internal Model for Load Frequency Control Using Extreme Learning Machine," *TELKOMNIKA*, vol. 16, no. 6, pp. 1-6, 2018.