



Semnan University

# Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: <https://modelling.semnan.ac.ir/>

ISSN: 2783-2538



## Research Article

# An Adaptive Load-Frequency Controller for Interconnected Power Systems Combining Model Predictive Control and System Identification

Mehdy Ramezany<sup>a</sup>, Mohsen Ahmadnia<sup>a,\*</sup>, Ahmad Hajipoor<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Faculty of electrical and computer engineering, Hakim Sabzevari university, Sabzevar, Iran

## PAPER INFO

### Paper history:

Received:

Revised:

Accepted:

### Keywords:

adaptive model predictive control, improved unscented Kalman filter, load frequency control, model identification.

## ABSTRACT

This paper introduces a new adaptive load frequency control method based on model predictive control using an improved unscented Kalman filter. This research aims to design a robust controller for changes in the frequency characteristic of power systems. An adaptive model predictive controller with online updating of the predictive model is designed to reproduce the fundamental frequency characteristics of the target system. A simplified predictive model is identified in the preliminary investigations of the closed-loop performance of the power system. Then, the parameters of this model are estimated according to real-time measurements. In addition, the control sequence is approximated using Laguerre functions, which helps to reduce the computational load further. A three-zone test system in the presence of generation rate constraint and dead-band is considered for simulation to prove the effectiveness of the proposed scheme. The simulation results show that the proposed adaptive control scheme can successfully stabilize frequency deviations caused by load disturbances and is robust against parameter uncertainties.

DOI: <https://doi.org/>

© 2024 Published by Semnan University Press.

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

\* Corresponding author.

E-mail address: [ahmadniamohsen85@gmail.com](mailto:ahmadniamohsen85@gmail.com)

How to cite this article:

## کنترل کننده فرکانس-بار تطبیقی برای سیستم‌های قدرت بهم‌پیوسته با ترکیب کنترل پیش‌بین مدل و شناسایی سیستم

مه‌دی رضانی<sup>۱</sup>، محسن احمدنیا<sup>۲\*</sup> و احمد حاجی‌پور<sup>۳</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: بازنگری مقاله: پذیرش مقاله:	در این مقاله یک روش کنترل فرکانس-بار تطبیقی جدید بر مبنای کنترل پیش‌بین مدل با استفاده از فیلتر کالمن بی‌اثر بهبودیافته معرفی شده است. هدف از این پژوهش، طراحی یک کنترل کننده مقاوم در برابر تغییرات در مشخصه فرکانسی سیستم‌های قدرت است. یک کنترل کننده پیش‌بین مدل تطبیقی با بروزرسانی آنلاین مدل پیش‌بینی برای بازتولید مشخصه‌های فرکانسی اساسی سیستم هدف طراحی شد. یک مدل پیش‌بینی ساده شده در بررسی‌های اولیه عملکرد حلقه بسته سیستم قدرت شناسایی شد. سپس، تخمین پارامترهای مدل مذکور با توجه به سنجش‌های زمان-حقیقی به دست آمد. علاوه بر آن، دنباله کنترلی با استفاده از توابع لاگر تقریب زده می‌شود که به کاهش بیشتر بار محاسباتی کمک می‌کند. یک سیستم آزمایشی سه-ناحیه‌ای در حضور قید نرخ تولید و باند مرده برای شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته شد تا کارایی طرح پیشنهادی اثبات شود. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که روش کنترل پیش‌بین مدل پیشنهادی می‌تواند بطور موفقیت‌آمیزی انحرافات فرکانسی حاصل از اغتشاشات بار را میرا کند و نسبت به تغییرات پارامتری مقاوم است.
<b>واژگان کلیدی:</b> کنترل پیش‌بین مدل تطبیقی، فیلتر کالمن بی‌اثر بهبودیافته، کنترل فرکانس-بار، شناسایی مدل.	

DOI: <https://doi.org/>

© 2024 Published by Semnan University Press.

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

### ۱-مقدمه<sup>۱</sup>

#### ۱-۱-انگیزه تحقیق

برای کاهش نوسانات فرکانس حاصل از اغتشاشات بار مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به توسعه منابع تولید پراکنده و افزایش پیچیدگی سیستم‌های قدرت فعلی، روش‌های کنترل فرکانس-بار موثرتری به منظور بهبود پایداری فرکانس نیروگاه‌های توان مرسوم و ژنراتورهای پراکنده مورد نیاز است.

در سال‌های اخیر، مقادیر زیادی از انرژی‌های تجدیدپذیر در غالب واحدهای تولید پراکنده از قبیل سیستم‌های خورشیدی و توربین‌های بادی در سیستم‌های قدرت مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند. کاهش لختی دورانی سیستم‌های قدرت حاصل از کاهش ژنراتورهای مرسوم و افزایش تعداد واحدهای تولید پراکنده، کاهش پایداری فرکانس سیستم را به همراه داشته است. کنترل فرکانس-بار بطور گسترده‌ای

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: [ahmadniamohsen85@gmail.com](mailto:ahmadniamohsen85@gmail.com)

۱. کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه حکیم سبزواری

۲. استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه حکیم سبزواری

۳. دانشیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه حکیم سبزواری

استناد به این مقاله: نحوه استناد فارسی در اینجا درج گردد.

فهرست اندیس‌ها و متغیرها	تابع تبدیل مدل ناحیه $i$	$G_i(s)$
اندیس ناحیه	ماتریس‌های مدل ناحیه $i$	$A_i, B_i, C_i$
اندیس شبکه لاگر	متغیر لاپلاس	$s$
اندیس بازه زمانی	ماتریس یکانی	$I$
اندیس پله زمانی	بردار پارامترهای مدل شناسایی ناحیه $i$	$\theta_i$
خروجی ناحیه $i$	پارامترهای مدل شناسایی	$K_b, T_{b1}, T_{b2}$
انحراف فرکانس ناحیه $i$	بازه زمانی	$dt$
توان خط ارتباطی ناحیه $i$	ضریب اصلاح فیدبک اصلاحی	$\xi$
ضریب گشتاور سنکرون کننده ناحیه $i$ و $j$	افق پیش‌بینی	$N_p$
مشخصه پاسخ فرکانسی ناحیه $i$	افق کنترلی	$N_c$
مشخصه دروپ سرعت گاورنر ناحیه $i$	بردار حالت سیستم افزوده	$X$
ثابت میرایی ناحیه $i$	ماتریس‌های سیستم افزوده	$A_e, B_e, C_e$
ثابت لختی ناحیه $i$	تفاضل بردار حالت	$\Delta x$
خطای کنترل ناحیه $i$	تفاضل سیگنال ورودی	$\Delta u$
سیگنال کنترلی فرکانس-بار ناحیه $i$	ضریب وزنی تابع هدف	$r_w$
بردار حالت ناحیه $i$	مرتب‌به شبکه لاگر	$N$
بردار حالت سیستم ناحیه $i$	بردار پارامترهای لاگر	$\eta$
بهره فیدبک بهینه	قطب شبکه لاگر	$\alpha$
خروجی کنترلی ناحیه $i$	شبکه لاگر	$L$

## ۱-۲- مرور ادبیات

کنترل مود لغزشی برای مساله کنترل فرکانس-بار سیستم-های قدرت چندناحیه‌ای در حضور عدم قطعیت پارامتری در [۹ و ۱۰] پیشنهاد شد. در [۱۱، ۱۲ و ۱۳]، روش‌های هوشمند از قبیل کنترل تناسبی-انتگرالی (PI) فازی و کنترل پیش‌بین مدل بر مبنای تکنیک شبکه عصبی برای مساله کنترل فرکانس-بار معرفی شد. در [۱۴]، یک رهیافت هوشمند بر مبنای یادگیری تقویتی چند-منظوره به منظور دستیابی به عملکرد بهینه مساله کنترل فرکانس-بار پیشنهاد شد. در [۱۵]، یک رگولاتور مربعی خطی (LQR) در ترکیب با فیلتر کالمن مکعبی برای کنترل فرکانس-بار مقاوم یک سیستم قدرت در حضور نویز اندازه-گیری، لختی کم، تغییرات آنی در واحدهای ذخیره انرژی و کلیدزنی بار اعمال شد. در [۱۶] یک طرح سلسله‌مراتبی دو-سطحی با استفاده از LQR، کنترل PI و فیلتر کالمن برای مساله کنترل خودکار تولید یک سیستم قدرت سه-ناحیه‌ای طراحی شد؛ لایه بیرونی با استفاده از LQR با افق محدود، مقدار مرجع بهینه را برای کنترل PI لایه داخلی تولید می‌کند. در [۱۷] یک فیلتر  $H_\infty$  به منظور بهبود مقاومت سیستم‌های قدرت بکار رفت. به منظور حذف سیگنال‌های نامطلوب فرکانس-بالا بطور معمول از فیلترهای پایین‌گذر و باند مرده در نیروگاه‌های واقعی

کنترل فرکانس در سیستم‌های قدرت بطور معمول شامل کنترل اولیه، کنترل ثانویه (کنترل فرکانس-بار) و کنترل ثالثیه می‌شود که کنترل ثانویه به کنترل خودکار تولید نیز شهرت دارد. نویسندگان در [۱] از روش یادگیری تقویتی برای تنظیم توان نیروگاه بادی به منظور بهبود عملکرد کنترل خودکار تولید بهره گرفتند. یک طرح کنترل فرکانس-بار ناحیه‌ای و یک الگوریتم گرادیان سیاست قطعی عمیق چند-عاملی در [۲] پیشنهاد شد. نویسندگان در [۳] یک روش تعیین اندازه برای یک سیستم ذخیره انرژی ترکیبی را به منظور بهبود پاسخ کنترل فرکانس-بار پیشنهاد کردند. در سال‌های اخیر، محققان زیادی به مطالعه روش‌های بهبودیافته و کارآمدتر برای مساله کنترل فرکانس-بار پرداخته‌اند. در [۴ و ۵]، از شبکه عصبی و منطق فازی برای بهبود عملکرد کنترل فرکانس-بار بهره گرفته شد. در [۶ و ۷]، روش کنترل مدل داخلی به منظور بهبود مقاومت کنترل پیش‌بین مدل مورد استفاده قرار گرفت. نویسندگان در [۸] یک روش کنترل پیش‌بین مدل تطبیقی را بر مبنای کنترل مدل داخلی و یادگیری ماشین پیشنهاد کردند. یک الگوریتم غیرخطی بر مبنای روش

آورده شده است. در [۲۷]، یک کنترل پیش‌بین مدل پراکنده مقید برای تنظیم فرکانس در یک سیستم قدرت بهم‌پیوسته پیشنهاد شد که بطور موثری در برابر اغتشاشات مقاوم است؛ کنترل پیشنهادی بر مبنای یک مدل پیچیده از سیستم هدف ایجاد شده است که بار محاسباتی زیادی را برای پیش‌بینی متغیرهای حالت سیستم و محاسبه ورودی کنترلی به سخت‌افزار کنترلی تحمیل می‌کند.

فیلتر کالمن بی‌اثر<sup>۲</sup> یک تکنیک تخمین غیرخطی است که اغلب در کاربردهای یادگیری ماشین، تخمین حالت و تخمین پارامترهای سیستم‌های دینامیکی غیرخطی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۸]. نویسندگان در [۲۹] یک کنترل پیش‌بین مدل تطبیقی با استفاده از فیلتر کالمن بی‌اثر را برای مساله کنترل فرکانس-بار پیشنهاد کردند که کاربرد این فیلتر را در کنترل پیش‌بین مدل تطبیقی برای تخمین متغیرهای حالت یا پارامترهای سیستم‌های قدرت تایید می‌کند. در [۳۰] از فیلتر کالمن بی‌اثر برای تخمین باند مرده گاورنر در یک طرح کنترل فرکانس-بار بهره گرفته شد که می‌تواند به سیستم‌های دارای مشخصه غیرخطی اعمال شود. کارایی کنترل پیش‌بین مدل تا اندازه زیادی به دقت مدل داخلی مورد استفاده ارتباط دارد. استفاده از مدل‌های تطبیقی می‌تواند تا اندازه زیادی این نیازمندی را پوشش دهد. همچنین، کاهش بار محاسباتی کنترل پیش-بین مدل از دیگر مواردی است که بایستی به منظور حفظ کارایی و قابلیت اجرا در کاربردهای عملی به آن توجه ویژه‌ای داشت.

#### ۱-۴- نوآوری و موارد برجسته پژوهش

در این مقاله یک روش کنترل فرکانس-بار جدید بر مبنای کنترل پیش‌بین مدل تطبیقی با استفاده از فیلتر کالمن بی‌اثر بهبودیافته به منظور افزایش مقاومت در برابر تغییرات در مشخصه‌های سیستم قدرت پیشنهاد شده است. کنترل پیش‌بین مدل بر مبنای توابع پایه لاگر با استفاده از بروزرسانی آنلاین مدل پیش‌بینی به منظور دستیابی به مشخصه‌های متغیر سیستم طراحی می‌شود. ساختار کنترل پیشنهادی می‌تواند برای کنترل خودکار تولید در سیستم-های قدرت فعلی و همین‌طور ریزش‌بکه‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

استفاده می‌شود. اثر باند مرده روی پایداری سیستم قدرت در [۱۸] مورد بحث قرار گرفت. در [۱۹]، اثر قید غیرخطی نرخ تولید و مشخصه باند مرده لحاظ شد و عملکرد کنترل خودکار تولید در یک سیستم قدرت بهم‌پیوسته چند-منبعی مورد مطالعه قرار گرفت.

#### ۱-۳- ضرورت تحقیق بر مبنای چالش‌های در ادبیات موضوع

مقاومت طرح و قابلیت اطمینان سیستم در مساله کنترل فرکانس-بار از اهمیت بالایی برخوردار هستند [۲۰]. کنترل‌های خطی از قبیل PI و LQR نمی‌توانند عملکرد مطلوب و حتی پایداری سیستم را در کل بازه کاری و در هنگام وقوع اغتشاشات بزرگ تضمین کنند. از طرفی دیگر، وجود مشخصه‌های غیرخطی همانند باند مرده و قید نرخ تولید نیز کاهش عملکرد را به همراه دارد. کنترل پیش‌بین مدل دارای قابلیت پیش‌بینی رفتار آتی سیستم است و بطور گسترده‌ای در زمینه‌های مختلف از قبیل فرآیندهای شیمیایی، راندگی خودکار، پتروشیمی و سیستم‌های قدرت اعمال شده است [۲۱]. مقاومت در برابر اغتشاشات سیستم و قابلیت جابجایی خودکار قیود در روند محاسبه سیگنال کنترلی از مزایای برجسته این طرح کنترلی به شمار می‌آید. در [۲۲]، یک طرح کنترل پیش‌بین مدل پراکنده بر مبنای الگوریتم برنامه‌ریزی مربعی خطی برای مساله کنترل فرکانس-بار یک سیستم قدرت چند-ناحیه‌ای مجهز به واحدهای ذخیره انرژی معرفی شد. در [۲۳]، یک الگوریتم پیش‌بین مدل مقاوم برای کنترل فرکانس-بار یک سیستم قدرت در حضور عدم قطعیت‌های حاصل از منابع تولید بادی و پارامترهای سیستم معرفی شد؛ مدل سیستم با استفاده از یک روش داده-محور تحت شناسایی قرار گرفت و مساله بهینه مقاوم با تبدیل به مدل برنامه‌ریزی مربعی عدد صحیح مخلوط حل شد. در [۲۴]، کنترل پیش‌بین مدل به همراه یک فیلتر کالمن بهبودیافته در غالب رویکرد به مساله تنظیم فرکانس اعمال شد. در [۲۵]، فیلتر کالمن در ترکیب با مدل خود-رگرسیون با ورودی خارجی (ARX) به منظور بهبود دقت تخمین پیشنهاد شد. نویسندگان در [۲۶]، یک کنترل پیش‌بین مدل پراکنده را برای کنترل توربین‌های بادی پیشنهاد کردند. یک توصیف همراه با جزییات برای رگولاتور فرکانس-بار بر مبنای روش کنترل پیش‌بین مدل در [۲۴]

ادامه مقاله اینطور سازماندهی شده است. طراحی کنترل پیش‌بین مدل تطبیقی در فصل ۲ توصیف شده است. سپس، مطالعات موردی و نتایج شبیه‌سازی در فصل ۳ آورده شده است. در پایان، فصل ۴ به نتیجه‌گیری و پیشنهادات برای کارهای آتی اختصاص دارد.

## ۲- طراحی کنترل پیش‌بین مدل تطبیقی

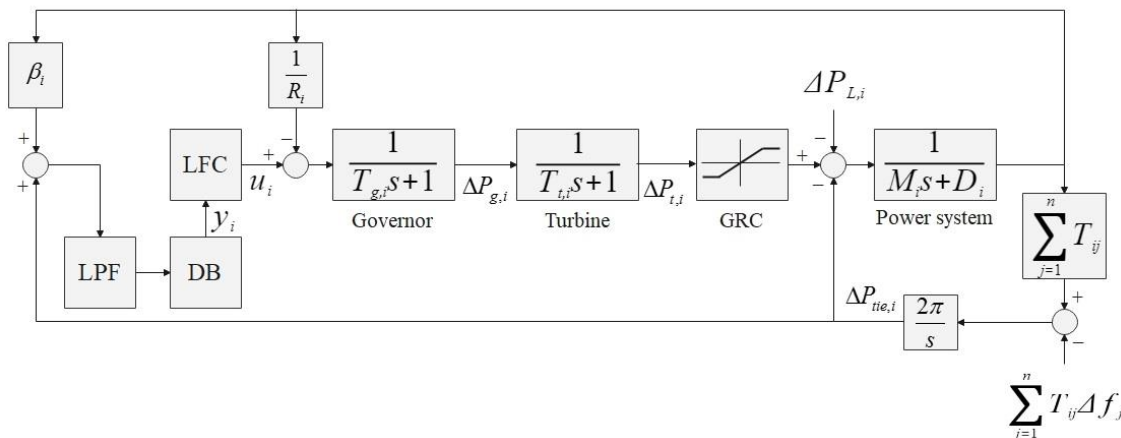
### ۲-۱- دینامیک‌های سیستم کنترل فرکانس-بار استاندارد

در این مقاله، یک کنترل پیش‌بین مدل تطبیقی زمان-گسسته جدید برای مساله کنترل فرکانس-بار طراحی شده است. یک مدل کنترل فرکانس-بار استاندارد برای هر ناحیه در شکل ۱ نشان داده شده است که شامل کنترل‌کننده فرکانس-بار، نیروگاه حرارتی به همراه گاورنر و توربین بخار و مدل سیستم قدرت می‌شود. نقطه-تنظیم نیروگاه‌های حرارتی مرسوم توسط سیستم کنترل فرکانس-بار تعیین می‌شود. سیگنال خطای کنترل ناحیه در غالب خروجی سیستم به کنترل‌کننده فرکانس-بار فیدبک می‌شود. باند مرده و فیلتر پایین-گذر بطور معمول برای حذف مولفه‌های فرکانس-بالا در نیروگاه‌های واقعی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در نظر گرفتن این مشخصه‌های دینامیکی در طراحی یک کنترل‌کننده فرکانس-بار از دیدگاه دینامیک-های سیستم واقعی دارای اهمیت است. طبق رابطه (۱)، متغیر خطای کنترل ناحیه  $(ACE_i)$  در غالب خروجی سیستم  $(y_i)$  با توجه به سنجش‌های انحراف فرکانس  $(\Delta f_i)$  و توان خط ارتباطی  $(\Delta P_{tie,i})$  محاسبه می‌شود. توان خط ارتباطی، سهم توان برنامه‌ریزی شده از یک ناحیه به ناحیه دیگر را مشخص می‌کند و توسط ضریب گشتاور سنکرون‌کننده  $(T_{ij})$  بیان می‌شود. مشخصه پاسخ فرکانسی  $(\beta_i)$  بطور کلی توسط مشخصه دروپ سرعت گاورنر  $(R_i)$  و ثابت میرایی سیستم قدرت  $(D_i)$  تعیین می‌شود. با توجه به بلوک-دیاگرام سیستم قدرت در شکل ۱، پاسخ سیستم به تغییرات بار توسط ثابت لختی  $(M_i)$  و ثابت میرایی تعیین می‌شود. مدل سیستم کنترل فرکانس-بار توسط (۱) و (۲) قابل توصیف است:

سیستم اصلی در این مقاله یک شبکه قدرت بهم‌پیوسته است که در آن، نیروگاه‌های حرارتی دارای نقش مهمی در تامین لختی دورانی هستند و بنابراین، یک روش کنترلی موثر برای شناسایی دینامیک‌های متغیر سیستم مورد نیاز است. نیروگاه‌ها به منظور حفاظت از سخت‌افزار خود به فیلترهای پایین‌گذر و باند مرده نیاز دارند. تحت این شرایط برای سیستم قدرت، ساختار کنترل پیش‌بین مدل می‌تواند برای کار با مشخصه‌های غیرخطی سیستم مفید واقع شود. با توجه به مشخصه‌های سیستم هدف، یک مدل تطبیقی از سیستم برای پیش‌بینی مد نظر است. بعد از بررسی روش‌های موجود از قبیل روش حداقل مربعات و فیلتر کالمن بهبودیافته، فیلتر کالمن بی‌اثر در این مقاله اتخاذ شده است که دارای عملکرد بهتری در مقایسه با روش‌های مذکور است. بنابراین، یک روش کنترل فرکانس-بار جدید بر مبنای کنترل پیش‌بین تطبیقی با استفاده از فیلتر کالمن بی‌اثر بهبودیافته به منظور بهبود مقاومت در برابر تغییرات در مشخصه‌های سیستم هدف پیشنهاد شده است. در روش پیشنهادی، یک مدل پیش‌بینی دارای کاهش مرتبه در بررسی اولیه عملکرد حلقه بسته مدل سیستم واقعی تحت شناسایی قرار می‌گیرد. سپس، پارامترهای مدل پیش‌بینی بطور آنلاین تخمین زده می‌شوند تا بهره بهینه کنترل پیشنهادی بدست آید. شبیه‌سازی‌های سیستم قدرت بهم‌پیوسته نشان می‌دهد که کنترل پیش‌بین مدل تطبیقی پیشنهادی دارای عملکرد رضایت‌بخش است. موارد برجسته این مقاله در ادامه فهرست شده‌اند:

- یک مدل ساده شده تطبیقی از سیستم قدرت با استفاده از فیلتر کالمن بی‌اثر بهبودیافته بطور آنلاین تخمین زده می‌شود بطوریکه مشخصه‌های اصلی سیستم هدف را دربر می‌گیرد.
- مدل تطبیقی مذکور در یک ساختار کنترل پیش‌بین مدل تطبیقی بر مبنای توابع لاگر برای تنظیم فرکانس یک سیستم قدرت بهم‌پیوسته مورد استفاده قرار می‌گیرد.

### ۱-۵- سازماندهی ساختار مقاله



شکل ۱: مدل کنترل فرکانس-بار استاندارد برای ناحیه  $i$ .

گرفته شود. بنابراین، به منظور حصول کنترل بهینه با در نظر گرفتن رفتار سیستم واقعی، کنترل کننده بایستی بطور موثری به تغییرات بار پاسخ دهد.

ساختار کنترل پیشنهادی در شکل ۲ نشان شده است. در ابتدا، یک روش شناسایی مدل داخلی بر مبنای فیلتر کالمن بی اثر بهبودیافته پیشنهاد شده است که برای تخمین متغیرهای حالت و پارامترهای سیستم و برورسانی آنلاین مدل داخلی کنترل پیش بین کاربرد دارد. سپس، مدل مذکور در غالب مدل پیش بینی در روند محاسبه سیگنال کنترلی در یک رهیافت کنترل پیش بین تطبیقی مورد استفاده قرار می گیرد.

در سیستم پیشنهادی، بهره فیدبک بهینه ( $K_{MPC}$ ) با توجه به شناسایی مدل داخلی به دست می آید [۳۱]، که در غالب سیگنال ورودی به نیروگاه مورد استفاده قرار می گیرد. روش شناسایی مدل داخلی در بخش بعدی توصیف می شود.

### ۲-۳- شناسایی مدل داخلی و فیدبک اصلاحی

با توجه به شکل ۲، کنترل کننده تطبیقی پیشنهادی بر مبنای شناسایی یک مدل داخلی دارای کاهش مرتبه طراحی می شود. تابع تبدیل سیستم اصلی در شکل ۱ از خروجی کنترلی  $u_i$  به خروجی سیستم  $y_i$  طبق (۶) تعیین می شود:

$$G_i(s) = \frac{y_i(k)}{u_i(k)} = C_i (sI - A_i)^{-1} B_i \quad (6)$$

$$y_i(t) = ACE_i(t) = P_{tie,i}(t) + \beta_i f_i(t) \quad (1)$$

$$P_{tie,i}(t) = \frac{2\pi}{s} \left[ \sum_{j=1}^n T_{ij} f_j(t) - \sum_{j \neq i}^n T_{ij} f_j(t) \right] \quad (2)$$

مدل دینامیکی زمان-گسسته یک سیستم قدرت چند-ناحیه ای در غالب معادلات حالت توسط (۳) و (۴) تعریف می شود:

$$x_i(k+1) = A_i x_i(k) + B_i u_i(k) + E_i w_i(k) \quad (3)$$

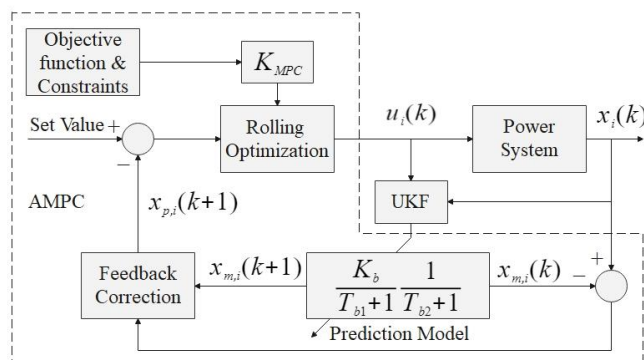
$$y_i(k) = C_i x_i(k) \quad (4)$$

که در آن شماره ناحیه توسط اندیس  $i$  مشخص می شود و ماتریس های سیستم در پیوست آورده شده است. بردار حالت  $x_i(k)$  شامل بردار حالت سیستم برای هر ناحیه  $x_{sys,i}$ ، انحراف فرکانس سیستم قدرت ( $\Delta f_i$ ) و توان خط ارتباطی ( $\Delta P_{tie,i}$ ) می شود:

$$x_i(k) = \left[ \Delta f_i(k) \quad \Delta P_{tie,i}(k) \quad x_{sys,i}(k) \right]^T \quad (5)$$

### ۲-۲- کنترل پیش بین مدل تطبیقی پیشنهادی

یک کنترل پیش بین مدل تطبیقی دارای قابلیت پیش بینی رفتار آتی سیستم با استفاده از یک مدل داخلی است که دینامیک های اساسی سیستم را دربر می گیرد. با استفاده از این مدل داخلی، کنترل پیش بین مدل تطبیقی می تواند بطور موثری سیستم را تحت کنترل قرار دهد. اگرچه، با توجه به عدم قطعیت های موجود در دینامیک های سیستم واقعی و اغتشاشات خارجی در سیستم های قدرت واقعی، قابلیت های بالاتری برای سیستم کنترلی بایستی در نظر



شکل ۲: طرح کنترل پیش‌بین مدل تطبیقی با استفاده از فیلتر کالمن بی‌اثر.

فرکانسی معادل در بازه فرکانسی کمتر از 2 Hz مورد استفاده قرار داد که با زمان پاسخ بزرگ‌تر از 0.5 s متناظر است.

این محدوده فرکانسی، تمام بازه سیگنال‌های کنترل فرکانس-بار از مرکز کنترل تا نیروگاه‌های حرارتی را پوشش می‌دهد. بنابراین، مدل پیش‌بینی در (۸) می‌تواند یک مدل کارآمد با قابلیت تقریب مناسب برای پاسخ سیستم قدرت واقعی در نظر گرفته شود. یک ساختار کنترل تطبیقی در شکل ۲ به منظور تخمین پارامترهای مدل (۸) اتخاذ شده است بطوریکه فیلتر کالمن بی‌اثر بهبودیافته برای تخمین زمان حقیقی مورد استفاده قرار می‌گیرد. فیلتر کالمن بی‌اثر می‌تواند مقادیر متوسط و کوواریانس متغیرهای تصادفی گاوسی را در مقایسه با روش‌های دیگر با دقت بالاتری محاسبه کند [۳۲]. فیلتر کالمن بی‌اثر استاندارد دارای عملکرد خوبی برای تخمین سیستم‌های با مشخصه‌های غیرخطی ملایم است ولی برای تخمین متغیرهای حالت سیستم‌های غیرخطی شدید با تغییرات پارامتری دچار افت عملکرد می‌شود [۸]. در اینجا از الگوریتم فیلتر کالمن بی‌اثر بهبودیافته در [۸] استفاده می‌شود که در آن روشی بر مبنای ملاک تطابق کوواریانس برای بررسی واگرایی فیلتر اتخاذ شده است. در الگوریتم مذکور، یک ضریب تضعیف تطبیقی وجود دارد که کوواریانس پیش‌بینی را اصلاح و ماتریس بهره فیلتر را به منظور رفع واگرایی تنظیم می‌کند. فرمول‌بندی پیشنهادی برای فیلتر کالمن بی‌اثر بهبودیافته به منظور تخمین پارامترهای مدل (۸) در ادامه توصیف شده است:

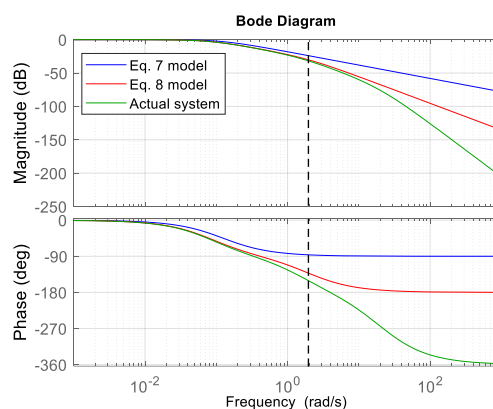
$$\begin{bmatrix} x_i(k+1) \\ \theta_i(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_i(\theta_i) & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i(k) \\ \theta_i(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_i \\ 0 \end{bmatrix} u_i(k) \quad (9)$$

که در آن داریم:

مدل پیش‌بینی برای ناحیه  $i$  در غالب ماتریس‌های  $(A_i, B_i, C_i)$ ، سیستم واقعی را تقریب می‌زند. در اینجا از مدل در شکل ۱ به عنوان یک سیستم واقعی با دینامیک-های متغیر و مشخصه بار نامعلوم استفاده می‌شود. بررسی-های مختلفی برای شناسایی یک مدل پیش‌بینی مناسب به عنوان تقریبی از  $G(s)$  انجام شد. بنابراین، بعد از بررسی-های مختلف، مدل‌های ساده در (۷) و (۸) به عنوان مدل-های پیش‌بینی برای الگوریتم پیش‌بین مدل تطبیقی در نظر گرفته می‌شوند:

$$G_{PMa}(s) = \frac{K_a}{T_a s + 1} \quad (7)$$

$$G_{PMb}(s) = \frac{K_b}{T_{b1}s + 1} \frac{1}{T_{b2}s + 1} \quad (8)$$



شکل ۳: دیاگرام‌های فرکانسی مدل‌ها و سیستم واقعی.

همانطور که در ادامه مورد بحث قرار می‌گیرد، مدل مرتبه-دوم (۸) نسبت به مدل مرتبه-اول (۷) در توصیف سیستم هدف بهتر عمل می‌کند. نمودار فرکانسی مدل سیستم هدف و مدل‌های پیش‌بینی (۷) و (۸) با پارامترهای مناسب در شکل ۳ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که، در مقایسه با مدل (۷)، مدل (۸) را می‌توان در غالب مدل پاسخ

کند و محاسبات مربوط به ورودی کنترلی ( $u$ ) را در افق کنترلی محدود ( $N_c$ ) انجام دهد. روند اجرای روش بهینه-سازی غلطشی در یک بازه محدود در شکل ۴ نشان داده شده است. افق کنترلی همواره کمتر از افق پیش‌بینی در نظر گرفته می‌شود. این دو پارامتر روی عملکرد کنترل پیش‌بین مدل و بار محاسباتی تاثیر می‌گذارند.

برای طراحی بهره فیدبک بهینه با استفاده از کنترل پیش-بین مدل ابتدا مدل در (۳) و (۴) را بدون لحاظ ورودی اغتشاش در نظر می‌گیریم:

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (15)$$

$$y(k) = Cx(k)$$

حذف ورودی اغتشاش در (۱۵) سبب می‌شود تا طراحی بر مبنای مدل هر ناحیه مجزا بدون لحاظ اثر نواحی مجاور صورت گیرد.

سیستم گسسته در زمان (۱۵) را بایستی در غالب مدل افزوده (۱۶) بازنویسی کنیم بطوریکه  $\Delta u(k)$  به عنوان ورودی و  $X(k)$  به عنوان بردار حالت سیستم افزوده تعریف می‌شوند:

$$X(k+1) = A_e X(k) + B_e \Delta u(k) \quad (16)$$

$$y(k) = C_e X(k)$$

که در آن داریم:

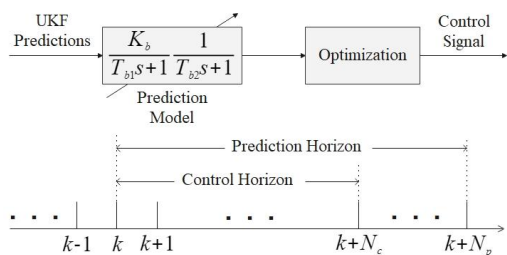
$$A_e = \begin{bmatrix} A & o_m^T \\ CA & 1 \end{bmatrix}, B_e = \begin{bmatrix} B \\ CB \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$C_e = [o_m \quad 1], o_m = [0 \quad 0]$$

$$X(k) = [\Delta x(k) \quad y(k)]^T$$

$$\Delta x(k) = x(k) - x(k-1)$$

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1)$$



شکل ۴: روند بهینه‌سازی غلطشی.

$$x_i(k) = [\Delta f_i(k) \quad \Delta P_{ie,i}(k) \quad \Delta f_i(k+1) \quad \Delta P_{ie,i}(k+1)]^T \quad (10)$$

$$\theta_i(k) = [K_b(k) \quad T_{b1}(k) \quad T_{b2}(k)]^T \quad (11)$$

$$A_i(\theta_i) = \begin{bmatrix} -\frac{T_s}{T_{b1}(k)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{T_s}{T_{b1}(k)} & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -\frac{T_s}{T_{b2}(k)} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -\frac{T_s}{T_{b2}(k)} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$b_i = \begin{bmatrix} \frac{K_b(k)}{T_{b1}(k)} T_s & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (13)$$

بنابراین، پارامترهای مدل (۸) یعنی مقادیر  $K_b$ ،  $T_{b1}$  و  $T_{b2}$  با استفاده از سنجش‌های حقیقی آنلاین ورودی-خروجی سیستم ( $u, y$ ) تخمین زده می‌شوند. در فیلتر کالمن بی‌اثر بهبودیافته، محاسبات تکراری در هر بازه زمانی،  $dt = 0.05$  s، تکرار می‌شوند و بهره فیدبک بهینه کنترل-کننده پیش‌بین مدل تطبیقی نیز بروزرسانی می‌شود. اگرچه، سیگنال کنترلی برای نیروگاه‌های حرارتی واقعی خیلی کندتر است. بنابراین، فرض بر آن است که سیگنال کنترلی از مرکز کنترل تا نیروگاه‌ها در هر 4 s بروزرسانی می‌شود. در نتیجه، این طرح کنترلی می‌تواند بطور مناسبی وضعیت واقعی سیستم‌های قدرت موجود را مدل کند. مدل پیش‌بینی دارای قابلیت بازتولید رفتار سیستم اصلی در بازه فرکانسی کمتر از 2 Hz است، که برای ارضای نیازمندی-های کنترلی سیستم‌های قدرت واقعی کافی به نظر می‌رسد. خطای مدل پیش‌بینی تطبیقی حاصل از روند ساده‌سازی سبب ایجاد عدم تطابق بین خروجی مدل و خروجی واقعی سیستم هدف می‌شود. بنابراین، یک فیدبک اصلاحی طبق رابطه (۱۴) به منظور جبران خطای پیش‌بینی در طرح تطبیقی پیشنهادی گنجانده شده است:

$$x_{p,i}(k+1) = x_{m,i}(k+1) + \xi [x_i(k) - x_{m,i}(k)] \quad (14)$$

که در آن  $\xi$  ضریب اصلاح است که قابلیت و سرعت بهبود مدل را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در این مقاله،  $\xi = 0.1$  اختیار می‌شود.

## ۲-۴- بهینه‌سازی غلطشی

بهینه‌سازی غلطشی یک روش بهینه‌سازی با وجود تابع هزینه و قیود برای روش کنترل پیش‌بین مدل است بطوریکه کنترل پیش‌بین مدل می‌تواند مسیرهای آتی سیستم را در یک افق پیش‌بینی محدود ( $N_p$ ) پیش‌بینی



که در آن  $L_n(m)$ ,  $n=1, \dots, N$  تابع لاگر گسسته در زمان با گام نمونه برداری  $k$  است و تعداد توابع یا مرتبه شبکه لاگر با  $N$  مشخص می شود. با کمینه سازی تابع هدف (۱۸) می توان پارامترهای بهینه شبکه لاگر  $\eta_n$ ,  $n=1, \dots, N$  را به دست آورد.

توابع لاگر گسسته در زمان به کمک معادله تفاضلی (۲۱) محاسبه می شوند:

$$L(k+1) = A_l L(k) \quad (21)$$

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

$$\beta = 1 - \alpha^2$$

که در آن  $L(0)$  مقدار اولیه شبکه لاگر است و ماتریس  $A_l (N \times N)$  با (۲۲) تعریف می شود:

$$A_l = \begin{bmatrix} \alpha & 0 & \dots & 0 \\ \beta & \alpha & \dots & 0 \\ -\alpha\beta & \beta & \dots & 0 \\ \alpha^2\beta & -\alpha\beta & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \alpha & \vdots \\ (-\alpha)^{N-2}\beta & (-\alpha)^{N-3}\beta & \dots & \alpha \end{bmatrix} \quad (22)$$

که در آن  $\alpha$  پارامتر قطب شبکه لاگر یا ضریب مقیاس زمانی است و برای تضمین پایداری بایستی در محدوده  $0 \leq \alpha < 1$  انتخاب شود.

بعد از کمینه سازی در هر گام نمونه برداری، نمو کنترلی در گام زمانی فعلی  $k$  با (۲۳) تعیین می شود:

$$\Delta u(k) = -K_{mpc} X(k) \quad (23)$$

که در آن داریم:

$$K_{mpc} = L(0)^T \Omega^{-1} \Psi$$

$$\Omega = \sum_{m=1}^{N_p} \varphi(m) Q \varphi(m)^T + R_L$$

$$\Psi = \sum_{m=1}^{N_p} \varphi(m) Q A^m \quad (24)$$

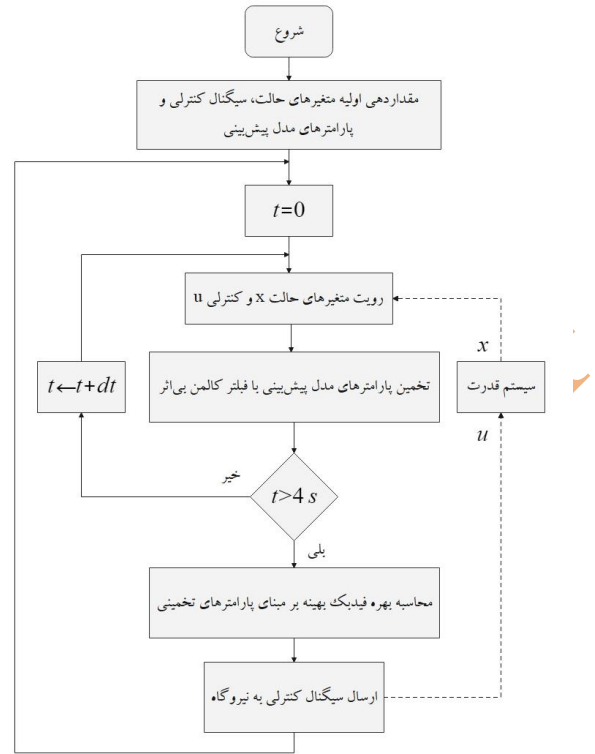
$$\varphi(m) = \sum_{i=0}^m A^{m-i-1} B L(i)^T$$

$$Q = C^T C, \quad R_L = r_w \text{diag}[1, \dots, 1]$$

بنابراین، سیگنال کنترل فرکانس-بار ورودی سیستم قدرت با (۲۵) به دست می آید:

$$\Delta P_C(k) = \Delta P_C(k-1) + \Delta u(k) \quad (25)$$

برای دستیابی به عملکرد کنترلی مطلوب در طراحی به کمک توابع لاگر، بایستی پارامترهای قطب شبکه لاگر  $\alpha$  و مرتبه شبکه لاگر  $N$  با دقت انتخاب شوند. برای هر مقدار قطب شبکه  $\alpha$ ، دقت تخمین با افزایش مرتبه شبکه  $N$  بهبود می یابد. مرتبه شبکه لاگر  $N=3$  می تواند تخمین



شکل ۵: فلوچارت روند اجرای کنترل پیشنهادی.

این مدل افزوده در ادامه برای پیش بینی مسیرهای حالت آتی سیستم مورد استفاده قرار می گیرد. معادله (۱۸) در غالب تابع هدف برای کنترل پیش بین مدل تطبیقی پیشنهادی مورد استفاده قرار می گیرد:

$$J = \sum_{m=1}^{N_p} y(k+m|k)^2 + r_w \sum_{m=0}^{N_c-1} \Delta u(k+m)^2 \quad (18)$$

که در آن  $N_p$  افق پیش بینی،  $N_c$  افق کنترلی و  $r_w$  ضریب وزنی است. قیود زیر به ورودی کنترلی  $u_i$  و خروجی سیستم  $y_i$  در طرح پیشنهادی اعمال می شوند:

$$\Delta u_{\min} \leq \Delta u(k) \leq \Delta u_{\max} \quad (19)$$

$$u_{\min} \leq u(k) \leq u_{\max}$$

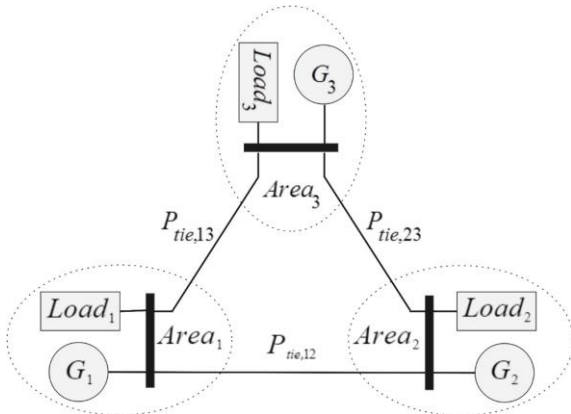
$$y_{\min} \leq y(k) \leq y_{\max}$$

انتخاب ضریب وزنی  $r_w$  با هدف دستیابی به عملکرد بهینه و بطور معمول با روش سعی و خطا انجام می شود. روش کنترل پیش بین مدل پیشنهادی از برنامه ریزی مربعی برای حل تابع هدف مرتبه-دوم مقید (۱۸) به منظور تولید بهره فیدبک بهینه در افق محدود بهره می گیرد. شکل ۵ روند اجرای کنترل پیشنهادی را نشان می دهد.

به منظور کاهش بار محاسباتی، در این مقاله از توابع لاگر برای تقریب دنباله ورودی کنترلی استفاده شده است:

$$P_C(k+m) = L(m)^T \eta = [L_1(m) \dots L_N(m)] [\eta_1 \dots \eta_N]^T \quad (20)$$

پارامترهای کنترل پیشنهادی به قرار  $N_p = 20, N = 3$ ،  $\alpha = 0.9$  و  $r_w = 15$  انتخاب شد. با لحاظ قید نرخ تولید  $0.05 \text{ pu/s}$  برای تمام سناریوهای مورد مطالعه، عملکرد کنترل پیش بین مدل تطبیقی پیشنهادی با کنترل پیش بین مدل مرسوم MPC و کنترل تناسبی-انترالی-مشتقی (PID) مقایسه شد. افق پیش بینی  $N_p = 20$  و افق کنترلی  $N_c = 5$  برای MPC تنظیم شد، بطوریکه مصالحه‌ای بین عملکرد نامی و عملکرد مقاوم برقرار شود. بهره‌های کنترل PID به این ترتیب انتخاب شده‌اند:  $K_{p1} = 0.1363$ ،  $K_{p2} = 0.4258$ ،  $K_{D1} = 0.2295$ ،  $K_{I1} = 0.3443$ ،  $K_{p3} = 0.1638$ ،  $K_{D2} = 0.1785$ ،  $K_{I2} = 0.5000$  و  $K_{D3} = 0.3465$  و  $K_{I3} = 0.4382$ .



شکل ۶: سیستم قدرت سه-ناحیه‌ای بهم‌پیوسته.

جدول ۱: پارامترهای شبکه قدرت بهم‌پیوسته سه‌ناحیه‌ای.

Area	$D$ [pu/Hz]	$M$ [pu.s]	$R$ [Hz/pu]	$T_g$ [s]	$T_l$ [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	$T_{31}=0.25, T_{32}=0.15$

است. برای ناحیه ۲ (ناحیه وقوع اغتشاش بار)، پیشینه انحراف خروجی برای کنترل پیشنهادی و کنترل PID تقریباً برابر است ولی کنترل پیشنهادی دارای نرخ میرایی بالاتری است، یعنی می‌تواند نوسانات پاسخ خروجی را در مدت زمان کمتری میرا کند. پاسخ خروجی در هر سه ناحیه برای کنترل MPC دارای پیشینه انحراف بیشتر نسبت به کنترل پیشنهادی و PID است؛ می‌توان با انتخاب افق پیش بینی کوچک‌تر و در نتیجه افزایش سرعت پاسخ کنترل‌کننده، مقدار پیشینه انحراف را کاهش داد ولی در

قابل قبولی از تابع هدف فراهم کند. بنابراین، تعداد متغیرهای بهینه‌سازی محدود می‌شود و در نتیجه بار محاسباتی برای کاربردهای واقعی به اندازه کافی کاهش می‌یابد.

### ۳- نتایج شبیه‌سازی

مطالعات شبیه‌سازی به منظور اثبات کارایی طرح کنترل پیش بین مدل تطبیقی پیشنهادی در این بخش آورده شده است. یک سیستم قدرت سه-ناحیه‌ای بهم‌پیوسته طبق شکل ۶ در غالب سیستم اصلی بکار گرفته شد که در آن مدل شکل ۱ برای نمایش سیستم واقعی هر ناحیه اتخاذ شد. پارامترهای نامی سیستم قدرت در جدول ۱ فهرست شده است [۸]. مدل ساده شده (۸) در غالب مدل پیش بینی برای کنترل تطبیقی پیشنهادی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مقاله، ظرفیت کل هر ناحیه برابر با  $1 \text{ GW} (1 \text{ pu})$  فرض شده است. ظرفیت ذخیره کنترل فرکانس-بار به میزان 20% ظرفیت تولید کل تنظیم شده است. همچنین، با فرض اینکه تمام نیروگاه‌های توان از نوع واحدهای حرارتی باشند، قید نرخ تولید یا نرخ ورودی کنترل در مقدار  $0.05 \text{ pu/s}$  لحاظ شده است.

شبیه‌سازی‌های مختلفی با وجود اغتشاش پله‌ای بار با دامنه  $\Delta P_L = 0.02 \text{ pu}$  در ناحیه ۲ در زمان  $t = 10 \text{ s}$  انجام شد و سه سناریوی (۱) با پارامترهای نامی، (۲) پارامترهای دارای عدم قطعیت و (۳) تحلیل حساسیت در نظر گرفته شد.

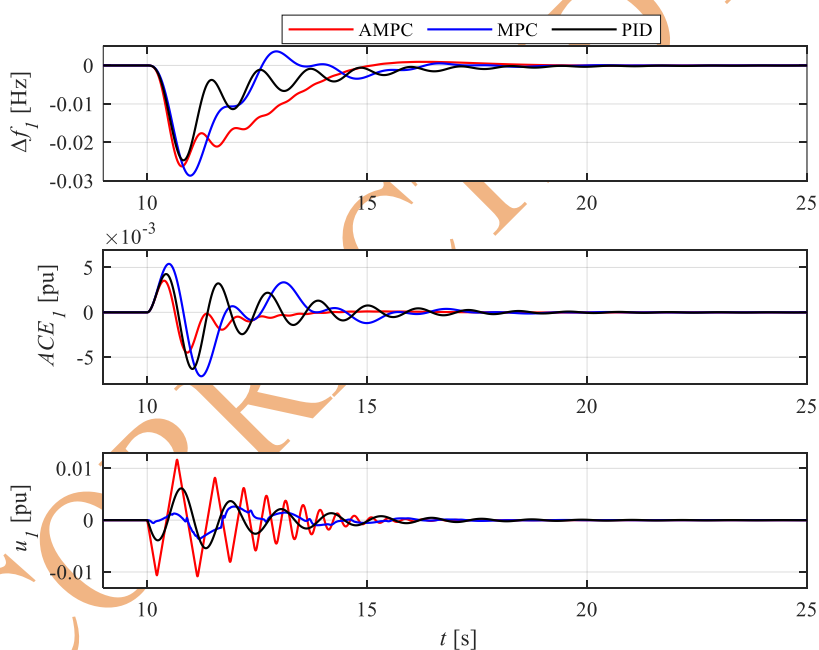
### ۳-۱- بررسی عملکرد نامی

نتایج شبیه‌سازی با در نظر گرفتن پارامترهای نامی سیستم قدرت سه-ناحیه‌ای در شکل ۷ نشان داده شده است. نتایج برای هر ناحیه از بالا به پایین به این قرار است: انحراف فرکانسی، خطای کنترل ناحیه (خروجی سیستم) و سیگنال کنترل فرکانس-بار (ورودی سیستم). با توجه به نتایج، پاسخ خروجی ناحیه‌های ۱ و ۳ با کنترل پیشنهادی AMPC دارای پیشینه انحراف پایین‌تر و نرخ میرایی بالاتر (یا زمان نشست کمتر) نسبت به طرح‌های PID و MPC

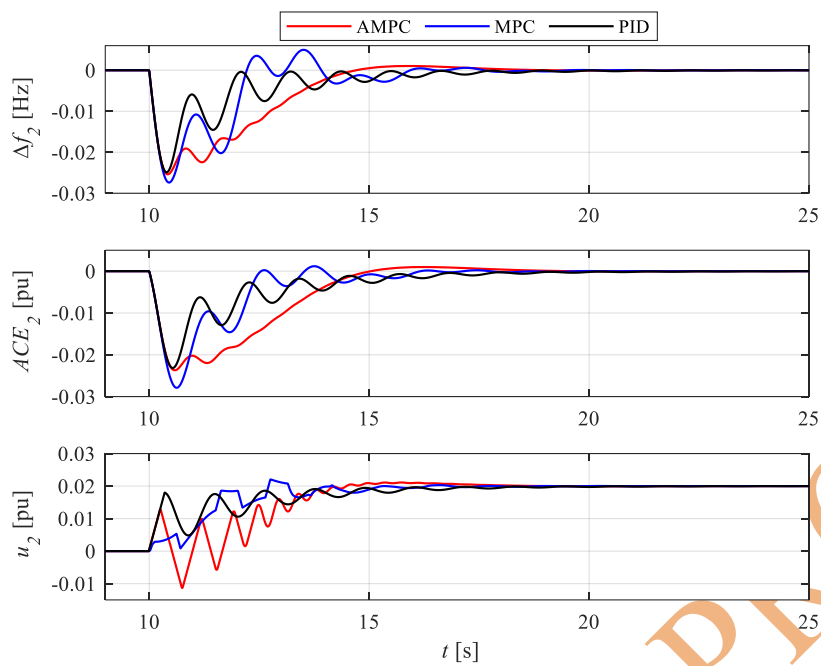
کنترل PID نسبت به کنترل پیشنهادی و MPC مرسوم خواهد شد.

همچنین از جنبه میزان بار محاسباتی روی سخت‌افزار سیستم کنترلی و سرعت اجرا، طرح پیشنهادی نسبت به MPC مرسوم برتری محسوسی دارد. زمان متوسط اجرای شبیه‌سازی برای کنترل PID برابر با 0.75 s، برای کنترل MPC مرسوم برابر با 4.06 s و برای کنترل پیشنهادی برابر با 1.21 s است. کنترل پیشنهادی با توجه به شناسایی یک مدل دارای کاهش مرتبه و تقریب توالی کنترلی با توابع لاگر، بار محاسباتی کمتری را نسبت به MPC مرسوم به سخت‌افزار کنترلی تحمیل می‌کند و بنابراین، می‌تواند به عنوان یک کنترل‌کننده آنلاین قابل اطمینان در عوض کنترل‌های مرسوم از قبیل PID برای کنترل خودکار تولید سیستم‌های قدرت واقعی مورد استفاده قرار گیرد.

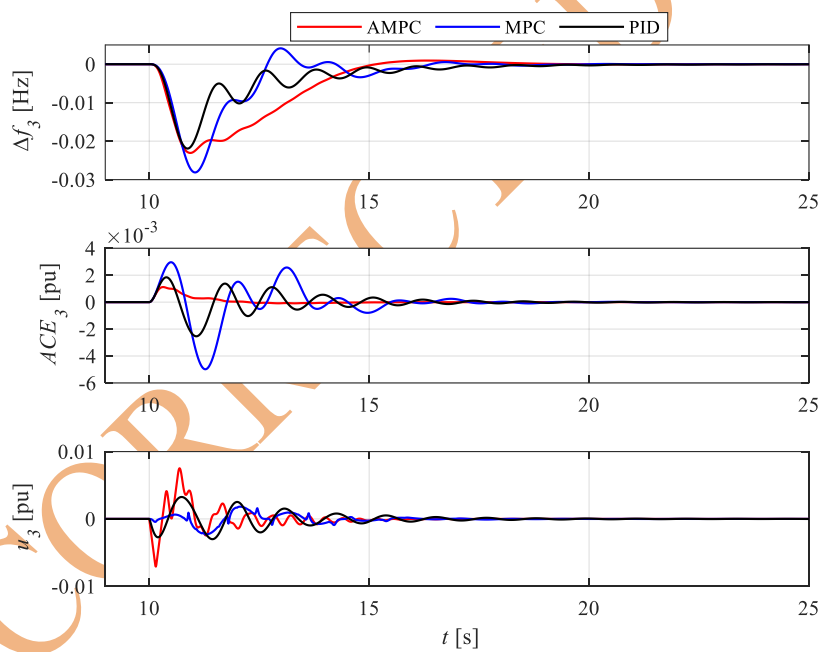
نقطه مقابل، عملکرد مقاوم کنترل MPC مرسوم کاهش می‌یابد. با توجه به وقوع اغتشاش بار در ناحیه ۲، دامنه تغییرات انحراف خروجی سیستم در این ناحیه نسبت به نواحی ۱ و ۳ مقادیر بزرگ‌تری را ثبت می‌کند. مقایسه عددی کنترل پیشنهادی با کنترل MPC و کنترل PID در سناریوی اول (پارامترهای نامی سیستم) در جدول ۲ و نمودار میله‌ای متناظر برای مقادیر خطای کنترل ناحیه در شکل ۸ آورده شده است. معیار زمان نشست در اینجا بازه زمانی بعد از اعمال اغتشاش بار است که پاسخ برای اولین بار به محدوده  $\pm 0.0001$  حول صفر وارد می‌شود و در آن باقی می‌ماند. با توجه به ویژگی اعمال خودکار قید نرخ تولید در روند محاسبه سیگنال خروجی کنترل‌کننده در الگوریتم پیش‌بین مدل، کنترل پیشنهادی و MPC مرسوم دارای زمان نشست کمتری نسبت به کنترل PID هستند؛ به این ترتیب، اعمال قید نرخ تولید، سبب افت عملکرد بیشتر در



(الف)



(ب)

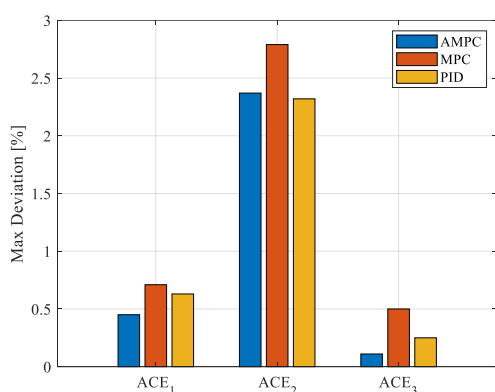


(ج)

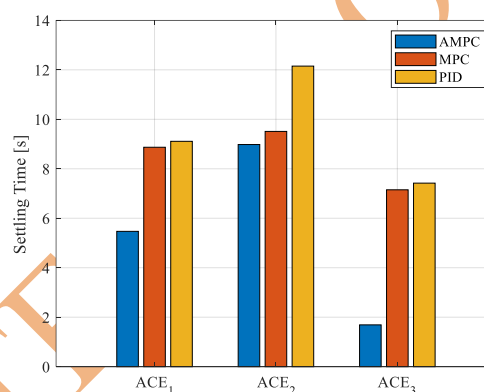
شکل ۷: پاسخ سیستم با پارامترهای نامی: (الف) ناحیه ۱، (ب) ناحیه ۲ و (ج) ناحیه ۳.

جدول ۲: مقایسه عددی کنترل‌های مورد بررسی با پارامترهای نامی.

بیشینه انحراف (%)		زمان نشست		نوع کنترل	ناحیه
ACE	$\Delta f$	ACE	$\Delta f$	مورد بررسی	کنترلی
0.45	2.62	5.47	8.97	AMPC	ناحیه ۱
0.71	2.87	8.87	9.54	MPC	
0.63	2.47	9.11	12.43	PID	
2.37	2.53	8.98	8.58	AMPC	ناحیه ۲
2.79	2.74	9.51	9.41	MPC	
2.32	2.49	12.15	11.97	PID	
0.11	2.31	1.69	9.02	AMPC	ناحیه ۳
0.50	2.81	7.15	9.64	MPC	
0.25	2.19	7.42	12.47	PID	



(ب)



(الف)

شکل ۸: نمودار میله‌ای مقادیر ACE در جدول ۲. (الف): زمان نشست، (ب): بیشینه انحراف.

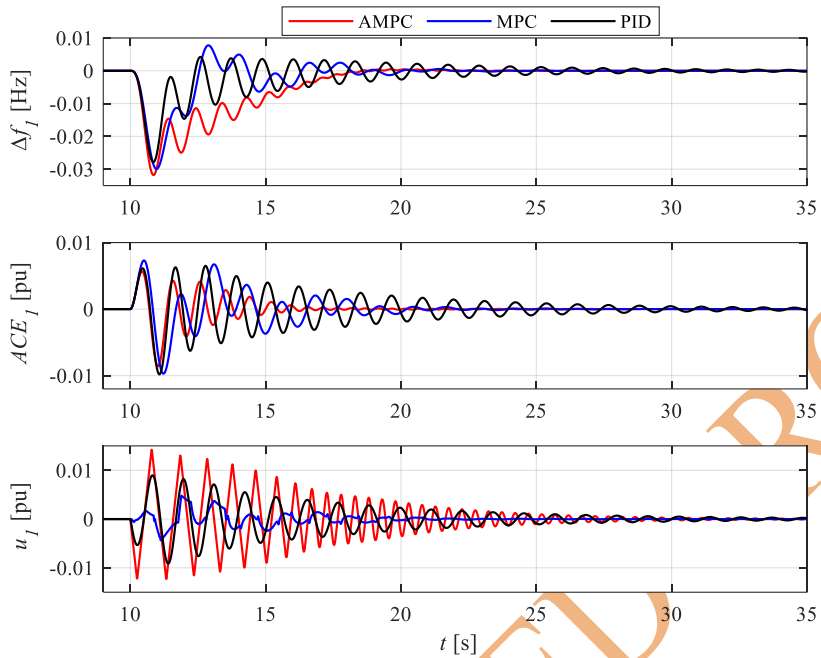
### ۲-۳- بررسی عملکرد مقاوم

در این بخش، مشخصه مقاوم طرح تطبیقی پیشنهادی در دفع اغتشاش بار پله‌ای در حضور عدم قطعیت پارامتری مورد بررسی قرار می‌گیرد. فرض بر آن است که پارامترهای مدل سیستم هدف دارای عدم قطعیتی به اندازه 20% حول مقادیر نامی هستند. با توجه به اینکه هر یک از پارامترهای سیستم دارای اثر متفاوتی روی خروجی سیستم هستند، عدم قطعیت‌ها طوری به پارامترهای مدل سیستم هدف اعمال شده‌اند تا بدترین وضعیت ممکن برای پاسخ سیستم ایجاد شود. برای این منظور، ثابت‌های گاورنر و توربین تمام ناحیه‌ها به میزان 20% افزایش، ثابت‌های میرایی معادل تمام ناحیه‌ها به میزان 20% کاهش، ثابت‌های لختی معادل نواحی ۱ و ۳ به میزان 20% افزایش و ثابت لختی ناحیه ۲ (ناحیه دارای اغتشاش پله‌ای بار) به میزان 20% کاهش نسبت به پارامترهای نامی مورد استفاده در طراحی کنترل در نظر گرفته شد. نتایج شبیه‌سازی این بخش در شکل ۹ نشان داده شده است. با توجه به نتایج، طبق انتظار، مقادیر

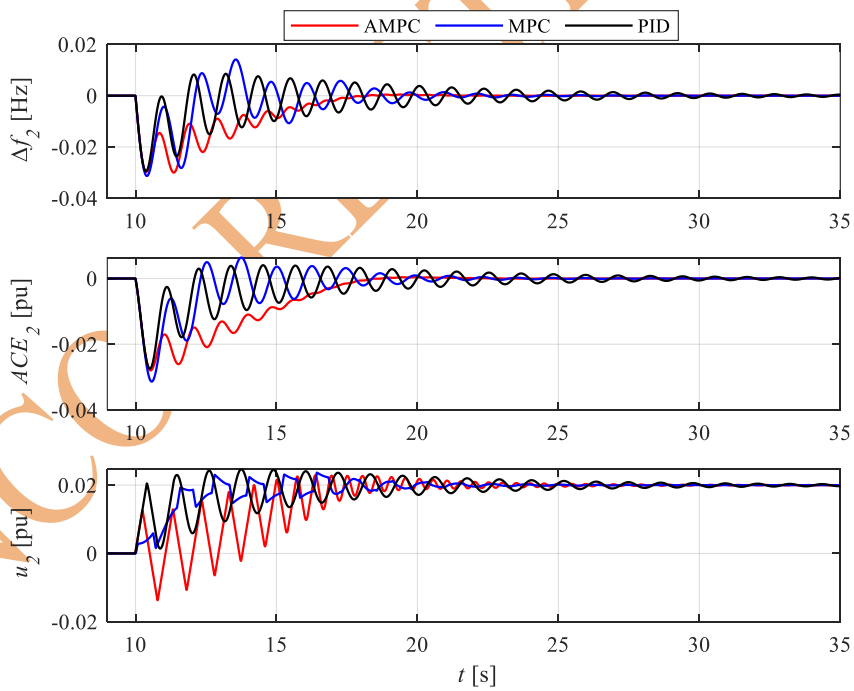
بیشینه انحراف و زمان نشست برای تمام کنترل‌های مورد بررسی نسبت به سناریوی با پارامترهای نامی افزایش پیدا می‌کنند ولی با این وجود، باز هم می‌توان اظهار داشت که هر سه کنترل‌کننده قادر به دفع اثر اغتشاش بار در بازه زمانی قابل قبول هستند. در حضور عدم قطعیت پارامتری، زمان نشست پاسخ سیستم به اغتشاش پله‌ای بار برای کنترل PID نسبت به کنترل پیشنهادی و MPC به میزان بیشتری متاثر می‌شود. بعنوان مثال، مقادیر زمان نشست خطای کنترل ناحیه ۲ برای کنترل‌های پیشنهادی، MPC و PID به ترتیب به 1.34، 1.75 و 2.63 برابر مقادیر متناظر نسبت به سناریوی با پارامترهای نامی می‌رسند؛ یعنی عملکرد مقاوم کنترل PID در دفع اغتشاش بار در حضور عدم قطعیت‌های پارامتری نسبت به کنترل پیشنهادی و MPC مرسوم ضعیف‌تر است. مقاومت کنترلی بهتر الگوریتم تطبیقی پیشنهادی و MPC نسبت به کنترل PID از ویژگی اعمال خودکار قید نرخ تولید در روند محاسبه ورودی کنترلی حاصل می‌شود. همچنین، عملکرد بهتر

عددی کنترل‌های مورد بررسی برای این مورد در جدول ۳ و نمودار میله‌ای متناظر برای مقادیر خطای کنترل ناحیه در شکل ۱۰ آورده شده است.

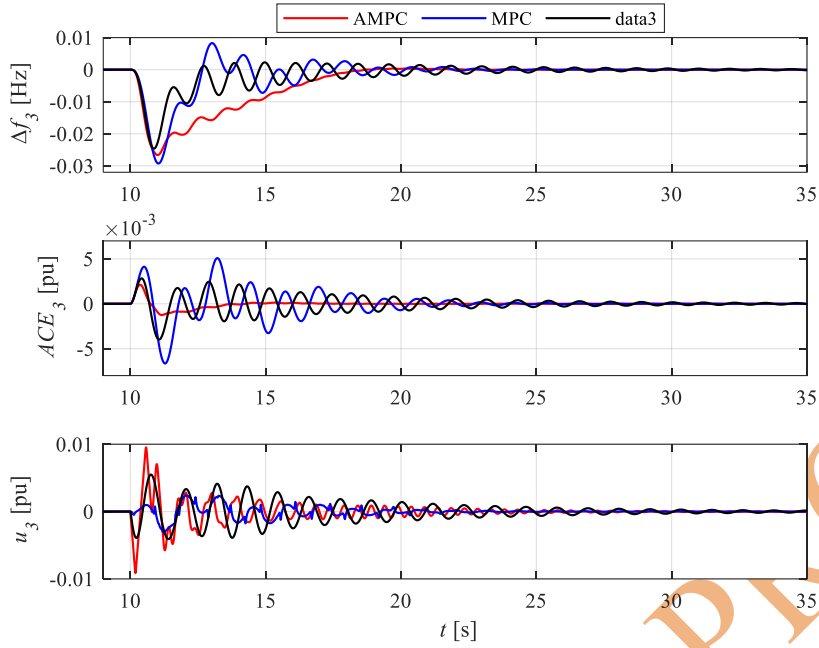
کنترل پیشنهادی در مقایسه با MPC در حضور عدم قطعیت پارامتری را می‌توان به استفاده از مدل تطبیقی (یا شناسایی مدل) در هر گام نمونه‌برداری نسبت داد. مقایسه



(الف)



(ب)

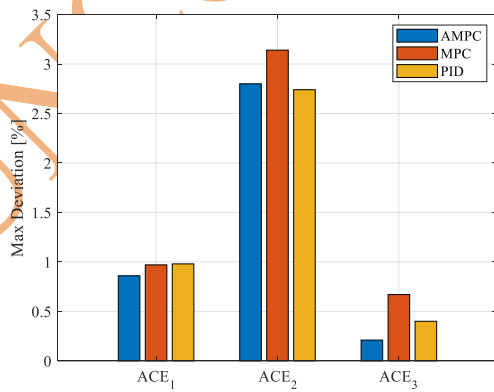


(ج)

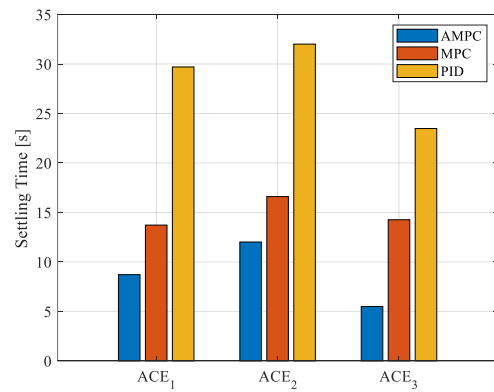
شکل ۹: پاسخ سیستم با پارامترهای دارای عدم قطعیت. (الف) ناحیه ۱، (ب) ناحیه ۲ و (ج) ناحیه ۳.

جدول ۳: مقایسه عددی کنترل‌های مورد بررسی با پارامترهای دارای عدم قطعیت.

ناحیه	نوع کنترل	زمان نشست		بیشینه انحراف (%)	
		ACE	$\Delta f$	ACE	$\Delta f$
ناحیه ۱	AMPC	8.71	12.61	0.86	3.18
	MPC	13.72	15.28	0.97	2.99
	PID	29.70	31.24	0.98	2.79
ناحیه ۲	AMPC	12.01	11.90	2.80	3.00
	MPC	16.60	17.65	3.14	3.13
	PID	32.01	34.17	2.74	2.95
ناحیه ۳	AMPC	5.49	12.22	0.21	2.66
	MPC	14.26	15.36	0.67	2.93
	PID	23.48	29.01	0.40	2.46



(ب)



(الف)

شکل ۱۰: نمودار میله‌ای مقادیر ACE در جدول ۳. (الف): زمان نشست، (ب): بیشینه انحراف.

### ۳-۳- تحلیل حساسیت

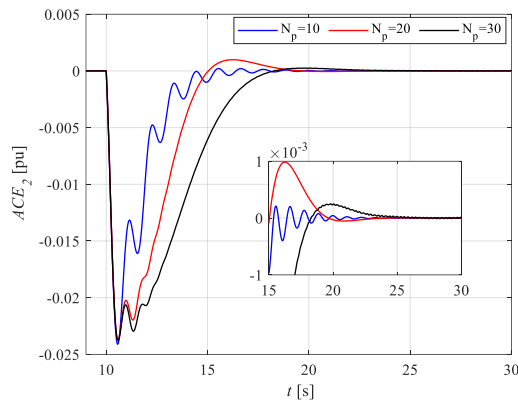
هدف از ارایه این زیربخش، بررسی حساسیت کنترل پیشنهادی نسبت به پارامترهای مهم طراحی از قبیل افق پیش‌بینی، ضریب وزنی و مرتبه شبکه لاگر است.

برای تحلیل اثر تغییر پارامتر افق پیش‌بینی، سه مقدار مختلف ( $N_p=10, 20, 30$ ) برای آن در نظر گرفته می‌شود و تمام پارامترهای دیگر کنترلی بدون تغییر باقی می‌ماند. اثر تغییر افق پیش‌بینی روی خروجی سیستم ناحیه ۲ در شکل ۱۱ و جدول ۴ نشان داده شده است. با توجه به این شکل می‌توان نتیجه گرفت که حساسیت عملکرد کنترلی نسبت به تغییرات در افق پیش‌بینی قابل توجه است. افق پیش‌بینی کوچک ( $N_p=10$ ) سبب ایجاد نوسان و در نتیجه کاهش پایداری می‌شود در حالیکه افق پیش‌بینی بزرگ ( $N_p=30$ )، کاهش سرعت پاسخ را به همراه دارد. در نتیجه، تنظیم افق پیش‌بینی با توجه به مصالحه بین سرعت پاسخ و حاشیه پایداری انجام می‌شود.

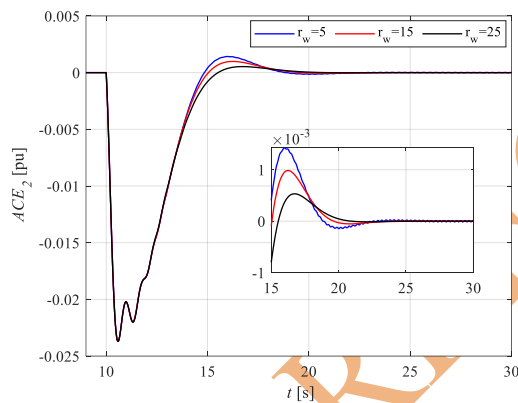
شبیه‌سازی دیگری برای بررسی اثر تغییر پارامتر وزن در تابع هدف به ازای سه مقدار مختلف ( $r_w=5, 15, 25$ ) انجام شد. ضریب وزنی بطور مستقیم روی سیگنال کنترلی تاثیر می‌گذارد بطوریکه مقادیر بزرگ‌تر این پارامتر با دامنه کوچک‌تر سیگنال کنترلی در تناظر قرار دارد. نتیجه این شبیه‌سازی در شکل ۱۲ و

جدول ۵ نشان داده شده است. با توجه به این شکل می‌توان دریافت که حساسیت عملکرد کنترلی نسبت به تغییرات پارامتر وزنی کمتر از افق پیش‌بینی است. ضریب وزنی کوچک ( $r_w=5$ )، میزان بالادگی بیشتر پاسخ و در نتیجه حاشیه پایداری کمتر را به همراه دارد. از طرفی دیگر، مقدار بزرگ ضریب وزنی  $r_w=25$ ، به علت کوچک شدن سیگنال کنترلی، به کاهش سرعت پاسخ منجر می‌شود. با توجه به اینکه سرعت پاسخ و پایداری کنترل فرکانس-بار از عوامل کلیدی در حفظ عملکرد مطلوب سیستم‌های

قدرت به حساب می‌آیند، پارامترهای افق پیش‌بینی و ضریب وزنی بایستی به درستی انتخاب شود. همچنین، از آنجاییکه مرتبه شبکه لاگر برابر با  $N=3$  می‌تواند دنباله کنترلی ورودی را با دقت کافی تخمین بزند، مقادیر بزرگ‌تر این پارامتر به افزایش بار محاسباتی منجر می‌شود بدون اینکه تاثیر قابل ملاحظه‌ای روی عملکرد کنترلی داشته باشد.



شکل ۱۱: اثر تغییر افق پیش‌بینی روی خروجی سیستم.



شکل ۱۲: اثر تغییر ضریب وزنی روی خروجی سیستم.

جدول ۴: نتایج عددی حساسیت کنترل پیشنهادی نسبت به تغییر افق پیش‌بینی.

$N_p = 10$		$N_p = 20$		$N_p = 30$	
بیشینه انحراف	زمان نشست	بیشینه انحراف	زمان نشست	بیشینه انحراف	زمان نشست
7.88	2.41	8.98	2.37	12.12	2.38



جدول ۵: نتایج عددی حساسیت کنترل پیشنهادی نسبت به تغییر پارامتر وزنی.

$r_w = 5$		$r_w = 15$		$r_w = 25$	
زمان نشست	بیشینه انحراف	زمان نشست	بیشینه انحراف	زمان نشست	بیشینه انحراف
10.96	2.37	8.98	2.37	9.42	2.37

ملاحظه‌ای روی عملکرد کنترلی هستند و بایستی طوری تنظیم شوند تا مصالحه‌ای بین سرعت پاسخ و حاشیه پایداری ایجاد شود.

در کارهای آتی، مدل پیش‌بینی داخلی طوری ارتقا می‌یابد تا مشخصه‌های فرکانسی سیستم را در حضور منابع تجدیدپذیر با عدم قطعیت بالا، از قبیل واحدهای خورشیدی، دربر گیرد.

### پیوست

ماتریس‌های مدل سیستم قدرت در (۳) و (۴) با رابطه‌های زیر توصیف می‌شوند:

$$A_i = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_{g,i}} & 0 & -\frac{1}{R_i T_{g,i}} & 0 \\ \frac{1}{T_{i,i}} & -\frac{1}{T_{i,i}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{M_i} & -\frac{D_i}{M_i} & -\frac{1}{M_i} \\ 0 & 0 & 2\pi \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n T_{ij} & 0 \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$B_i = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_{g,i}} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (27)$$

$$C_i = [0 \quad 0 \quad \beta_i \quad 1] \quad (28)$$

$$E_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -\frac{1}{M_i} & 0 \\ 0 & -2\pi \end{bmatrix} \quad (29)$$

### ۴- نتیجه‌گیری و پیشنهادات کارهای آتی

در این پژوهش یک طرح کنترل پیش‌بین مدل تطبیقی جدید برای مساله کنترل فرکانس-بار نیروگاه‌های حرارتی پیشنهاد شد. یک مدل پیش‌بینی جدید با استفاده از فیلتر کالمن بی‌اثر بهبود یافته برای کنترل پیش‌بین تطبیقی به دست آمد. یک مدل سیستم قدرت سه-ناحیه‌ای برای اثبات کارایی طرح پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، دستاوردهای نهایی این تحقیق را می‌توان اینگونه جمع‌بندی کرد: (۱) با توجه به ماهیت تطبیقی الگوریتم کنترل پیش‌بین مدل پیشنهادی، طرح مذکور دارای مشخصه عملکرد مقاوم نسبت به عدم قطعیت در پارامترهای سیستم است. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که طرح پیشنهادی نسبت به کنترل پیش‌بین مدل مرسوم و کنترل تناسبی-انتگرالی-مشتقی با پارامترهای نامی و همچنین پارامترهای دارای عدم قطعیت بهتر عمل می‌کند. (۲) کنترل تطبیقی پیشنهادی به لطف استفاده از مدل دارای کاهش مرتبه و تقریب توالی کنترلی با شبکه لاگر، بار محاسباتی کمتری را نسبت به کنترل پیش‌بین مدل مرسوم به ساخت‌افزار سیستم کنترلی تحمیل می‌کند. (۳) ویژگی اعمال خودکار قید نرخ تولید در الگوریتم پیش‌بین پیشنهادی، بهبود عملکرد را نسبت به کنترل تناسبی-انتگرالی-مشتقی در پی دارد. (۴) در نظر گرفتن فیلتر مرتبه اول و باند مرده به مدل‌سازی کامل‌تری از سیستم قدرت واقعی منجر شده است. (۵) تحلیل حساسیت نشان داد که پارامترهای افق پیش‌بینی و ضریب وزنی دارای تاثیر قابل

### مراجع

- [1] Zhang, Dongying, "Research on AGC performance during wind power ramping based on deep reinforcement learning," *IEEE Access* 8, (2020): 107409–107418.
- [2] Li, Jiawen, and et. al., "Multi-Agent Deep Reinforcement Learning for Sectional AGC Dispatch," *IEEE Access* 8, (2020): 158067–158081.
- [3] Zhang, Feng, and et. al., "HESS Sizing Methodology for an Existing Thermal Generator for the Promotion of AGC Response Ability," *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 11, no. 2 (2020): 608–617.
- [4] Chaturvedi, D. Kumar, P. Saran Satsangi, and P. Kumar Kalra, "Load frequency control: a generalized neural network approach," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 21, no. 6 (1999): 405–415.

- [5] Bevrani, Hassan, Takashi Hiyama, Yasunori Mitani, and Kiichiro Tsuji, "Load Frequency Regulation under a Bilateral LFC Scheme using Flexible Neural Networks," *International Journal of Engineering Intelligent Systems for Electrical Engineering and Communications* 14, no. 2 (2006): 109–117.
- [6] Rehiara, Adelhard Beni, and et. al., "An Adaptive IMC MPC Controller for Improving LFC Performance," in *IEEE Innovative Smart Grid Technologies (Asia)*, Auckland, 2017.
- [7] Qiu, Zeng, Mario Santillo, Jing Sun, and Mrdjan Jankovic, "Enhanced Composite Adaptive IMC for Boost Pressure Control of a Turbocharged Gasoline Engine," in *American Control Conference (ACC)*, Boston, MA, 2016.
- [8] Rehiara, Adelhard Beni, and et. al., "An Adaptive prediction Model for Load Frequency Control using Extreme Learning Machine," *TELKOMNIKA* 16, no. 6 (2018): 2879–2887.
- [9] Guo, Jianping, "Application of a Novel Adaptive Sliding Mode Control Method to the Load Frequency Control," *European Journal of Control* 57, (2021): 172–178.
- [10] Onyeka, Adrian E., et. al., "Robust Decentralized Load Frequency Control for Interconnected Time Delay Power Systems using Sliding Mode Techniques," *IET Control Theory & Applications* 14, no. 3 (2020): 470–480.
- [11] Juang, Chia-Feng, "Load-frequency Control by Hybrid Evolutionary Fuzzy PI controller," *IEE Proceedings - Generation Transmission and Distribution* 153, no. 2 (2006): 196–204.
- [12] Chang, Chesau, and Weihui Fu, "Area Load Frequency Control using Fuzzy Gain Scheduling of PI Controller," *Electric Power Systems Research* 42, no. 2 (1997): 145–152.
- [13] Han, Mei, and Xiaobing Kong, "Distributed MPC of the standalone hybrid wind and solar generation system based on neural network modeling," in *12th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA)*, Guilin, China, 2016.
- [14] Wang, Huaizhi, and et. al., "Multiobjective Reinforcement Learning-Based Intelligent Approach for Optimization of Activation Rules in Automatic Generation Control," *IEEE Access* 7, (2019): 17480–17492.
- [15] Gautam, Vishwas Vasuki, Renuka Loka, and Alivelu M. Parimi, "Cubature Kalman filter and linear quadratic regulator for load frequency control," *Electric Power Systems Research* 222, (2023).
- [16] Kunya, Abdullahi Bala, "Hierarchical bi-level load frequency control for multi-area interconnected power systems," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 155, Part B, (2024).
- [17] Sahoo, Harish K., and Pradiptaishore K. Dash, "Robust Estimation of Power Quality Disturbance using Unscented H $\infty$  Filter," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 73, (2015): 438–447.
- [18] Liu, Muyang, Federico Bizzarri, Angelo Maurizio Brambilla, and Federico Milano, "On the Impact of the Dead-Band of power System Stabilizers and Frequency regulation on Power System Stability," *IEEE Transactions on Power Systems* 34, no. 5 (2019): 3977–3979.
- [19] Morsali, Javad, Kazem Zare, and M. Tarafdar Hagh, "AGC of Interconnected Multi-source Power System with Considering GDB and GRC Nonlinearity Effects," in *IEEE Conference on Thermal Power Plants*, Tehran, Iran, 2016.
- [20] Jiang, Lin, and et. al., "Delay-Dependent Stability for Load Frequency Control with Constant and Time-Varying Delays," *IEEE Transactions on Power Systems* 27, no. 2 (2012): 932–941.
- [21] Maciejowski, Jan M, *Predictive Control with Constraints*, Prentice Hall, US, 2000.
- [22] Huang, Chongxin, et. al., "DMPC-based load frequency control of multi-area power systems with heterogeneous energy storage system considering SoC consensus," *Electric Power Systems Research* 228, (2024).
- [23] Cai, Guowei, et. al., "Data-driven predictive based load frequency robust control of power system with renewables," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems* 154, (2023).
- [24] Ersdal, Anne Ma, and et. al., "Model Predictive Load-frequency Control taking into account Imbalance Uncertainty," *Control Engineering Practice* 53, (2016): 139–150.
- [25] Mohamed, Mohamed A., Ahmed A. Zaki Diab, Hegazy Rezk, and Tao Jin, "A novel adaptive model predictive controller for load frequency control of power systems integrated with DFIG wind turbines," *Neural Computing and Applications* 32, (2020): 7171–7181.
- [26] Mohamed, Tarek Hassan, Jorge Morel, Hassan Bevrani, and Takashi Hiyama, "Model predictive based load frequency control design concerning wind turbines," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 43, (2012): 859–867.
- [27] Patel, Ragini, and et. al., "Automatic generation control of multi-area power system with network constraints and communication delays," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy* 8, no. 3 (2020): 454–463.

- [28] Qi, Junjian, Kai Sun, Jianhui Wang, and Hui Liu, "Dynamic State Estimation for Multi-Machine Power System by Unscented Kalman Filter with Enhanced Numerical Stability," *IEEE Transactions on Smart Grid* 9, no. 2 (2018): 1184–1196.
- [29] Rehiara, Adelhard Beni, Naoto Yorino, Yutaka Sasaki, and Yoshifumi Zoka, "A Novel Adaptive LFC Based on MPC Method," *IEEJ Trans. Electr. Electronic Eng.* 14, no. 8 (2019): 1145–1152.
- [30] Bhui, Pratyasa, Nilanjan Senroy, Abhinav K. Singh, and Bikash C. Pal, "Estimation of Inherent Governor Dead Band and Regulation Using Unscented Kalman Filter," *IEEE Transactions on Power Systems* 33, no. 4 (2018): 3546–3558.
- [31] Jacquot, Raymond G., *Modern Digital Control Systems (Electrical and Computer Engineering)*, Corona Press, 2015.
- [32] Wan, Eric, and R. Van Der Merwe, "The Unscented Kalman Filter for Nonlinear Estimation," in *Proceedings of the IEEE 2000 Adaptive System For Signal Processing*, Lake Louise, AB, Canada, 2000.

UNCORRECTED PROOF