



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^a, Mohsen Ahmadnia^{a,*}, Ahmad Hajipoor^a

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

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2023-12-23

Revised: 2024-07-21

Accepted: 2024-08-21

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/10.22075/jme.2024.32739.2591>

© 2025 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

How to cite this article:

Ramezany, M. , Ahmadnia, M. and Hajipoor, A. (2025). An Adaptive Load-Frequency Controller for Interconnected Power Systems Combining Model Predictive Control and System Identification. Journal of Modeling in Engineering, 23(80), 289-306. doi: 10.22075/jme.2024.32739.2591

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

مهدی رضانی^۱، محسن احمدنیا^{۱*}، احمد حاجی‌پور^۱

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۰۲ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۴/۳۱ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۵/۳۱	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.

واژگان کلیدی:

کنترل پیش‌بین مدل تطبیقی،
فیلتر کالمن بی‌اثر بهبودیافته،
کنترل فرکانس-بار،
شناسایی مدل.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.32739.2591>

© 2025 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

۱-۱- انگیزه تحقیق

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 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.

۱-۲- مرور ادبیات

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 گرادین سیاست قطعی عمیق چند-عاملی در [۲] پیشنهاد شد. نویسندگان در [۳]

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: ahmadniamohsen85@gmail.com

۱. دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

استناد به این مقاله:

رضانی، مهدی، احمدنیا، محسن و حاجی‌پور، احمد. (۱۴۰۴). کنترل کننده فرکانس-بار تطبیقی برای سیستم‌های قدرت بهم‌پیوسته با ترکیب کنترل پیش‌بین مدل و شناسایی سیستم. مدل سازی در مهندسی، ۲۳(۸۰)، ۲۸۹-۳۰۶. doi: 10.22075/jme.2024.32739.2591

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، رانندگی خودکار، پتروشیمی و سیستم‌های قدرت اعمال شده است [۲۱].

مقاومت در برابر اغتشاشات سیستم و قابلیت جابدهی 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 بهبود یافته 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 جزئیات برای رگولاتور فرکانس-بار بر مبنای روش کنترل پیش‌بین مدل در [۲۴] 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.

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 بهبود یافته 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 کنترل مود لغزشی برای مساله کنترل فرکانس-بار سیستم‌های 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 اندازه‌گیری، لختی کم، تغییرات آنی در واحدهای ذخیره انرژی و کلیدزنی بار اعمال شد. در [۱۶] یک طرح سلسله-مراتبی 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_∞ 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 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 چندمنبعی مورد مطالعه قرار گرفت.

۱-۳- ضرورت تحقیق بر مبنای چالش‌های در ادبیات

موضوع

فیلتر کالمن بی‌اثر^۲ 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 تأیید 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 پیش‌بین 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 روزرسانی آنلاین مدل پیش‌بینی به منظور دستیابی به مشخصه‌های متغیر سیستم طراحی می‌شود. ساختار کنترل پیشنهادی می‌تواند برای کنترل خودکار تولید در سیستم‌های قدرت فعلی و همین‌طور ریزشکه‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

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 روش-های 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 بهم-پیوسته 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

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

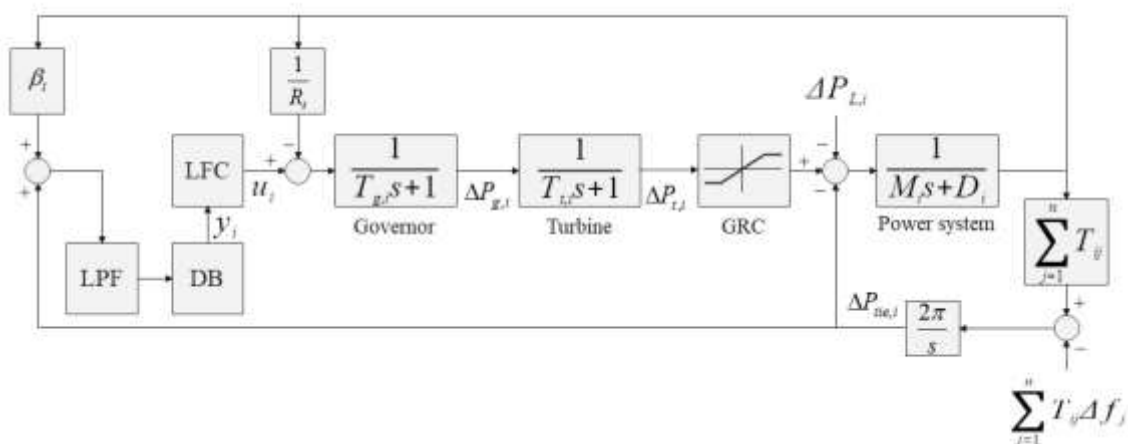
۲-۱- دینامیک‌های سیستم کنترل فرکانس-بار استاندارد

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 کنترل کننده

² Unscented Kalman Filter

سیستم (y_i) با توجه به سنجش‌های انحراف فرکانس (Δf_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 (β_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:

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



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

۲-۲- کنترل پیش‌بین مدل تطبیقی پیشنهادی

یک کنترل پیش‌بین مدل تطبیقی دارای قابلیت پیش‌بینی رفتار آتی سیستم با استفاده از یک مدل داخلی است که دینامیک‌های اساسی سیستم را دربر می‌گیرد. با استفاده از این مدل داخلی، کنترل پیش‌بین مدل تطبیقی می‌تواند بطور موثری سیستم را تحت کنترل قرار دهد. اگرچه، با توجه به عدم قطعیت‌های موجود در دینامیک‌های سیستم واقعی و اغتشاشات خارجی در سیستم‌های قدرت واقعی، قابلیت‌های بالاتری برای سیستم کنترلی بایستی در نظر گرفته شود. بنابراین، به منظور حصول کنترل بهینه با در نظر گرفتن رفتار سیستم واقعی، کنترل‌کننده 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 بی‌اثر بهبودیافته پیشنهاد شده است که برای تخمین متغیرهای حالت و پارامترهای سیستم و بروزرسانی آنالین

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

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

مدل دینامیکی زمان-گسسته یک سیستم قدرت چند-ناحیه‌ای در غالب معادلات حالت توسط (۳) و (۴) تعریف می‌شود:

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

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

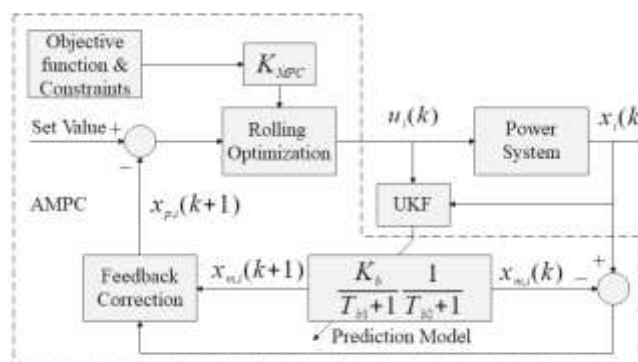
که در آن شماره ناحیه توسط اندیس i مشخص می‌شود و ماتریس‌های سیستم در پیوست آورده شده است. بردار حالت $x_i(k)$ شامل بردار حالت سیستم برای هر ناحیه $x_{sys,i}$ ، انحراف فرکانس سیستم قدرت (Δf_i) و توان خط ارتباطی $(\Delta P_{tie,i})$ می‌شود:

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

۳-۲- شناسایی مدل داخلی و فیدبک اصلاحی

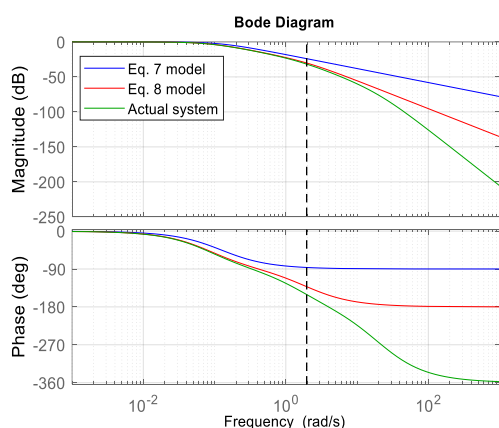
با توجه به شکل (۲)، کنترل کننده تطبیقی پیشنهادی بر مبنای شناسایی یک مدل داخلی دارای کاهش مرتبه طراحی می‌شود. تابع تبدیل سیستم اصلی در شکل (۱) از خروجی کنترلی u_i به خروجی سیستم y_i طبق (۶) تعیین می‌شود:

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



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

استفاده قرار داد که با زمان پاسخ بزرگ‌تر از 0.5 s متناظر است.



شکل ۳- دیاگرام‌های فرکانسی مدل‌ها و سیستم واقعی.

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

مدل داخلی کنترل پیش‌بین کاربرد دارد. سپس، مدل مذکور در غالب مدل پیش‌بینی در روند محاسبه سیگنال کنترلی در یک رهیافت کنترل پیش‌بین تطبیقی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

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

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 دینامیک‌های متغیر و مشخصه بار نامعلوم استفاده می‌شود. بررسی‌های مختلفی برای شناسایی یک مدل پیش‌بینی مناسب به عنوان تقریبی از $G(s)$ انجام شد. بنابراین، بعد از بررسی‌های مختلف، مدل‌های ساده در (۷) و (۸) به عنوان مدل‌های پیش‌بینی برای الگوریتم پیش‌بین مدل تطبیقی در نظر گرفته می‌شوند:

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

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

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 فرکانسی معادل در بازه فرکانسی کمتر از 2 Hz مورد

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:

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

که در آن ξ 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 کند و محاسبات مربوط به ورودی کنترلی (u) را در افق کنترلی محدود (N_c) انجام دهد. روند اجرای روش بهینه‌سازی 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:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) \\ y(k) &= Cx(k) \end{aligned} \quad (15)$$

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:

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:

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

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

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

$$b_i = \left[\frac{K_b(k)}{T_{b1}(k)} T_s \quad 0 \quad 0 \quad 0 \right]^T \quad (13)$$

بنابراین، پارامترهای مدل (۸) یعنی مقادیر K_b ، T_{b1} و T_{b2} با استفاده از سنجش‌های حقیقی آنالیز 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

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

که در آن N_p افق پیش‌بینی، 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 می‌شوند:

$$\begin{aligned} \Delta u_{\min} &\leq \Delta u(k) \leq \Delta u_{\max} \\ u_{\min} &\leq u(k) \leq u_{\max} \\ y_{\min} &\leq y(k) \leq y_{\max} \end{aligned} \quad (19)$$

انتخاب ضریب وزنی r_w با هدف دستیابی به عملکرد بهینه و بطور معمول با روش سعی و خطا انجام می‌شود. روش کنترل پیش‌بین مدل پیشنهادی از برنامه‌ریزی مربعی برای حل تابع هدف مرتبه-دوم مقید (۱۸) به منظور تولید بهره فیدبک بهینه در افق محدود بهره می‌گیرد. شکل (۵) روند اجرای کنترل پیشنهادی را نشان می‌دهد.

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

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

که در آن $L_n(m)$, $n=1, \dots, N$ تابع لاگر گسسته در زمان با گام نمونه‌برداری k است و تعداد توابع یا مرتبه شبکه لاگر با N مشخص می‌شود. با کمینه‌سازی تابع هدف (۱۸) می‌توان پارامترهای بهینه شبکه لاگر η_n , $n=1, \dots, N$ را به دست آورد.

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

$$\begin{aligned} L(k+1) &= A_l L(k) \\ L(0)^T &= \sqrt{\beta} [1 \quad -\alpha \quad \alpha^2 \quad -\alpha^3 \quad \dots \quad (-1)^{N-1} \alpha^{N-1}] \\ \beta &= 1 - \alpha^2 \end{aligned} \quad (21)$$

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

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

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

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

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

که در آن داریم:

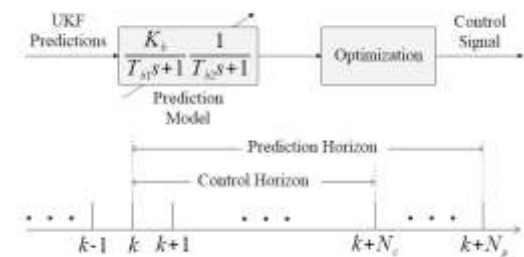
$$A_e = \begin{bmatrix} A & o_m^T \\ CA & 1 \end{bmatrix}, B_e = \begin{bmatrix} B \\ CB \end{bmatrix} \quad (17)$$

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

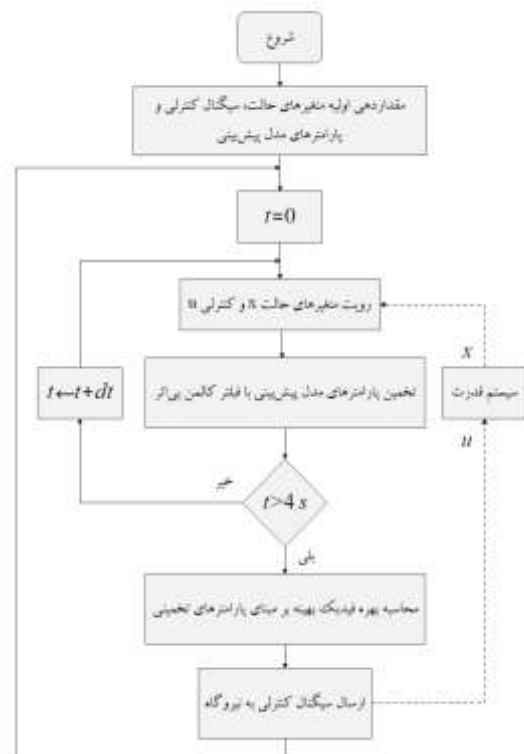
$$X(k) = [\Delta x(k) \quad y(k)]^T$$

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

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



شکل ۴- روند بهینه‌سازی غلطشی.

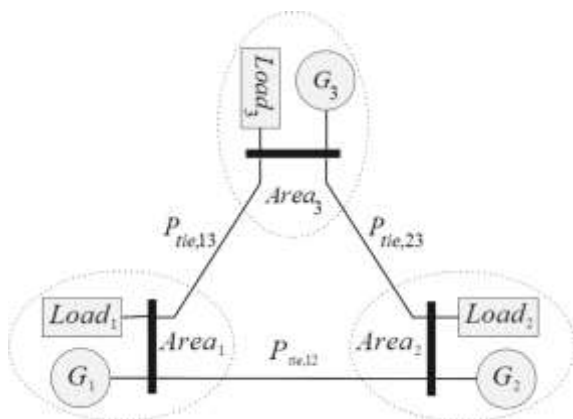


شکل ۵- فلوچارت روند اجرای کنترل پیشنهادی.

این مدل افزوده در ادامه برای پیش‌بینی مسیرهای حالت آتی سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد. معادله (۱۸) در غالب تابع هدف برای کنترل پیش‌بین مدل تطبیقی پیشنهادی مورد استفاده قرار می‌گیرد:

حرارتی باشند، قید نرخ تولید یا نرخ ورودی کنترل در مقدار 0.05 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. پارامترهای کنترل پیشنهادی به قرار $N = 3, N_p = 20$ ، $\alpha = 0.9$ و $r_w = 15$ انتخاب شد. با لحاظ قید نرخ تولید 0.05 pu/s برای تمام سناریوهای مورد مطالعه، عملکرد کنترل پیش‌بین مدل تطبیقی پیشنهادی با کنترل پیش‌بین مدل مرسوم MPC و کنترل تناسبی-انتگرالی-مشتقی (PID) مقایسه شد. افق پیش‌بینی $N_p = 20$ 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: $K_{P1} = 0.1363$ ، $K_{P2} = 0.4258$ ، $K_{D1} = 0.2295$ ، $K_{I1} = 0.3443$ ، $K_{P3} = 0.1638$ ، $K_{D2} = 0.1785$ ، $K_{I2} = 0.5000$ ، $K_{D3} = 0.3465$ و $K_{I3} = 0.4382$.



شکل ۶- سیستم قدرت سه-ناحیه‌ای بهم‌پیوسته.

جدول ۱- پارامترهای شبکه قدرت بهم‌پیوسته سه‌ناحیه‌ای.

Ar	D	M	R	T_g	T_t	β	T_{ij}
ea[pu/Hz]	[pu.s]	[Hz/pu]		[s]	[s]	[pu/Hz]	[pu/Hz]
1	0.01	0.1	3.00	0.	0.	0.34	$T_{12}=0$
	5	667		08	40	83	$T_{13}=0$
							25
2	0.01	0.2	2.73	0.	0.	0.38	$T_{21}=0$
	6	017		06	44	27	$T_{23}=0$
							15
3	0.01	0.1	2.82	0.	0.	0.36	$T_{31}=0$
	5	247		07	30	92	$T_{32}=0$
							15

بعد از کمینه‌سازی در هر گام نمونه‌برداری، نمو کنترلی در گام زمانی فعلی k با (۲۳) تعیین می‌شود:

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

که در آن داریم:

$$\begin{aligned} K_{mpc} &= L(0)^T \Omega^{-1} \Psi \\ \Omega &= \sum_{m=1}^{N_p} \varphi(m) Q \varphi(m)^T + R_L \\ \Psi &= \sum_{m=1}^{N_p} \varphi(m) Q A^m \\ \varphi(m) &= \sum_{i=0}^m A^{m-i-1} B L(i)^T \\ Q &= C^T C, \quad R_L = r_w \text{diag}[1, \dots, 1] \end{aligned} \quad (24)$$

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

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

برای دستیابی به عملکرد کنترلی مطلوب در طراحی به کمک توابع لاگر، بایستی پارامترهای قطب شبکه لاگر α و مرتبه شبکه لاگر N با دقت انتخاب شوند. برای هر مقدار قطب شبکه α ، دقت تخمین با افزایش مرتبه شبکه N بهبود می‌یابد. مرتبه شبکه لاگر $N = 3$ می‌تواند تخمین 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 پیش‌بین 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 پیش‌بینی برای کنترل تطبیقی پیشنهادی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مقاله، ظرفیت کل هر ناحیه برابر با 1 GW (1 pu) فرض شده است. ظرفیت ذخیره کنترل فرکانس-بار به میزان ۲۰٪ ظرفیت تولید کل تنظیم شده است. همچنین، با فرض اینکه تمام نیروگاه‌های توان از نوع واحدهای

۳-۱- بررسی عملکرد نامی

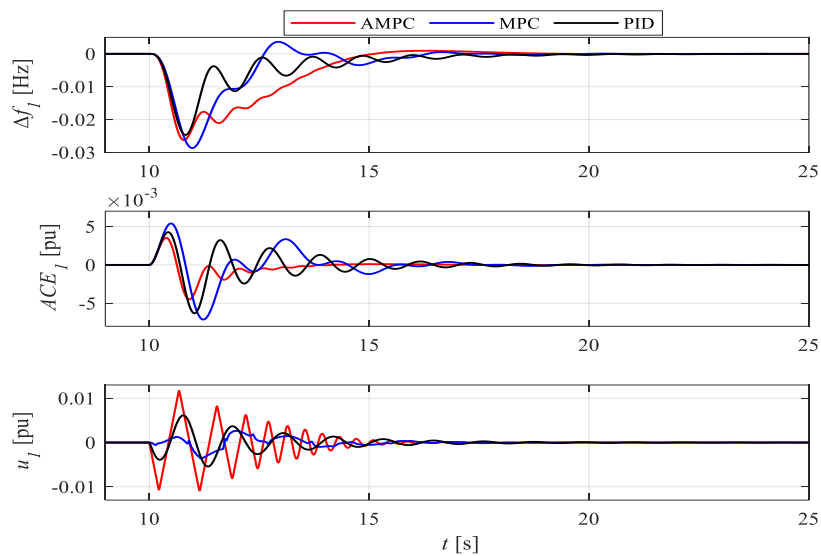
نتایج شبیه‌سازی با در نظر گرفتن پارامترهای نامی سیستم قدرت سه-ناحیه‌ای در شکل (۷) نشان داده شده است. نتایج برای هر ناحیه از بالا به پایین به این قرار است: انحراف فرکانسی، خطای کنترل ناحیه (خروجی سیستم) و سیگنال کنترل فرکانس-بار (ورودی سیستم). با توجه به نتایج، پاسخ خروجی ناحیه‌های ۱ و ۳ با کنترل پیشنهادی AMPC دارای بیشینه انحراف پایین‌تر و نرخ میرایی بالاتر (یا زمان نشست کمتر) نسبت به طرح‌های PID و MPC است. برای ناحیه ۲ (ناحیه وقوع اغتشاش بار)، بیشینه 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 بیشینه انحراف بیشتر نسبت به کنترل پیشنهادی و PID است؛ می‌توان با انتخاب افق پیش‌بینی کوچک‌تر و در نتیجه افزایش سرعت پاسخ کنترل‌کننده، مقدار بیشینه انحراف را کاهش داد ولی در 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 ± 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 کنترل PID نسبت به کنترل پیشنهادی و MPC مرسوم خواهد شد.

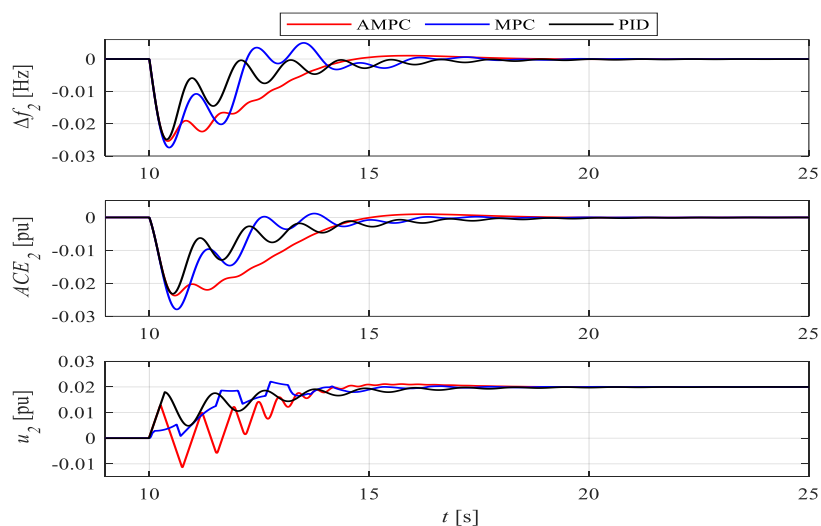
همچنین از جنبه میزان بار محاسباتی روی سخت‌افزار سیستم کنترلی و سرعت اجرا، طرح پیشنهادی نسبت به MPC مرسوم برتری محسوسی دارد. زمان متوسط اجرای شبیه‌سازی برای کنترل PID برابر با 0.75 s، برای کنترل MPC مرسوم برابر با 4.06 s و برای کنترل پیشنهادی برابر با 1.21 s است. کنترل پیشنهادی با توجه به شناسایی یک مدل 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.

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

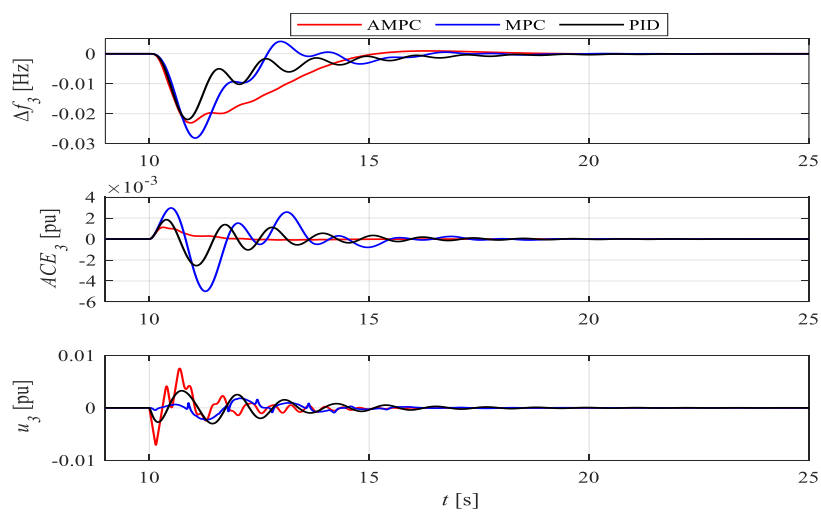
ناحیه	نوع کنترل	زمان نشست		بیشینه انحراف (%)	
		ACE	Δf	ACE	Δf
ناحیه ۱	AMPC	5.47	8.97	0.45	2.62
	MPC	8.87	9.54	0.71	2.87
	PID	9.11	12.43	0.63	2.47
ناحیه ۲	AMPC	8.98	8.58	2.37	2.53
	MPC	9.51	9.41	2.79	2.74
	PID	12.15	11.97	2.32	2.49
ناحیه ۳	AMPC	1.69	9.02	0.11	2.31
	MPC	7.15	9.64	0.50	2.81
	PID	7.42	12.47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



(الف)

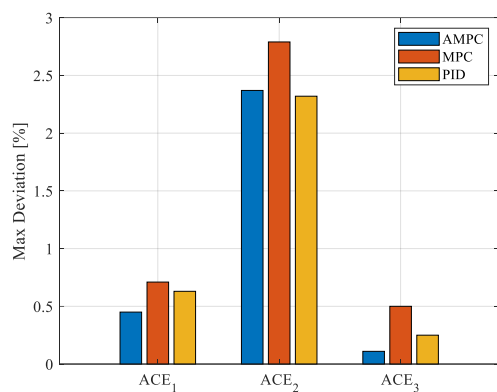


(ب)

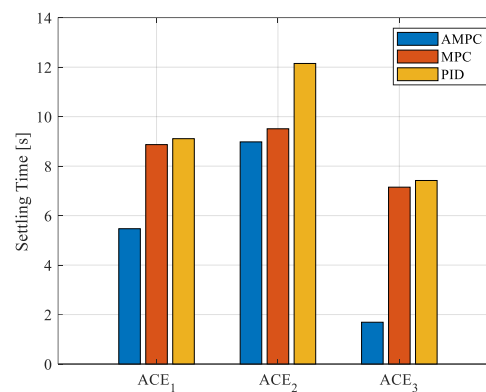


(ج)

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



(ب)



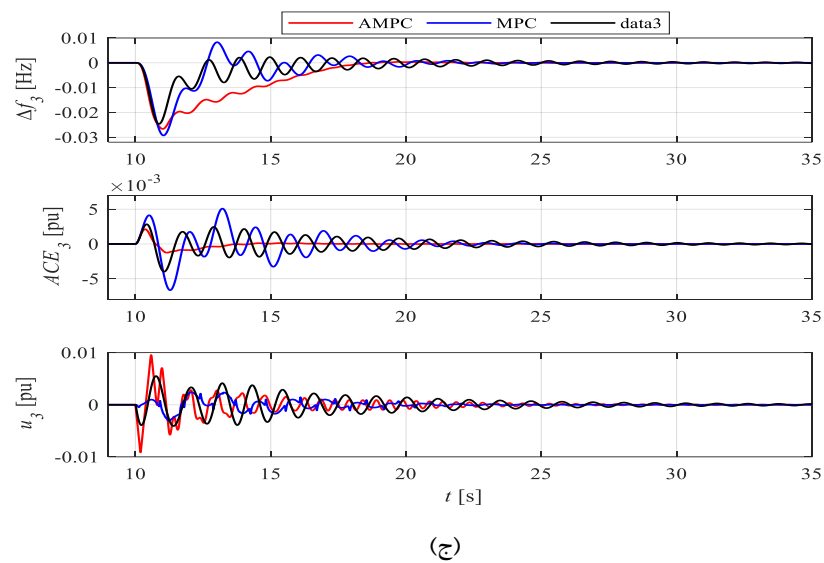
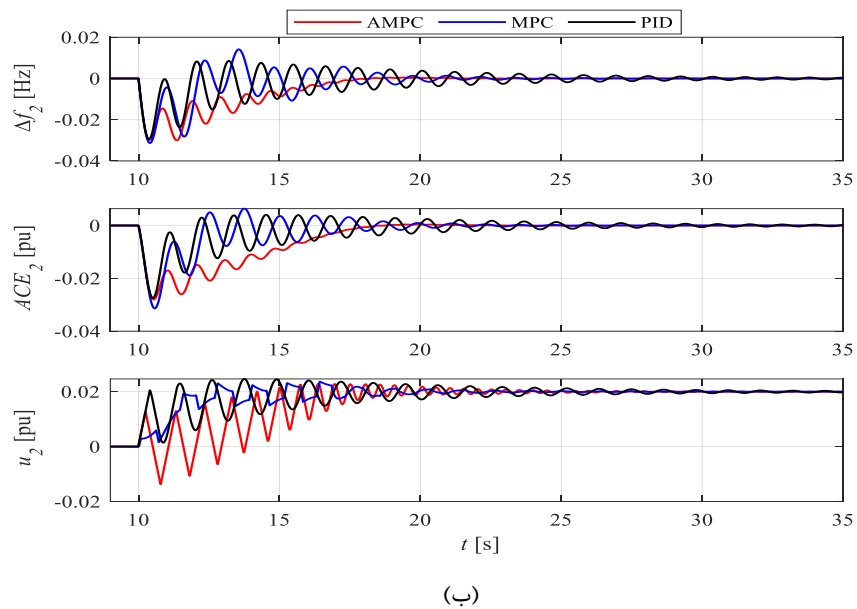
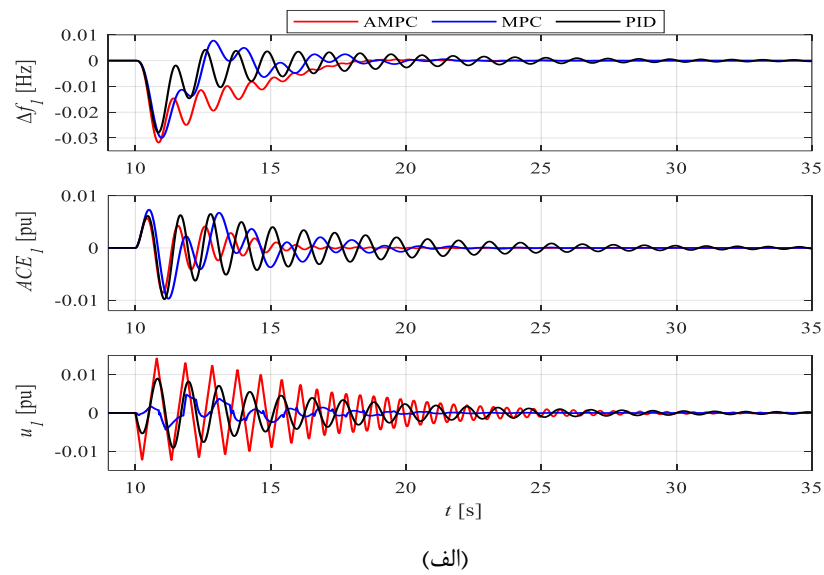
(الف)

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

هر سه کنترل کننده 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 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 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.

۲-۳- بررسی عملکرد مقاوم

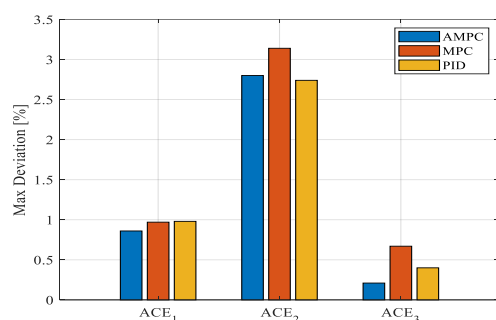
در این بخش، مشخصه مقاوم طرح تطبیقی پیشنهادی در دفع اغتشاش بار پله‌ای در حضور عدم قطعیت پارامتری مورد بررسی قرار می‌گیرد. فرض بر آن است که پارامترهای مدل سیستم هدف دارای عدم قطعیتی به اندازه 20% حول مقادیر نامی هستند. با توجه به اینکه هر یک از پارامترهای سیستم دارای اثر متفاوتی روی خروجی سیستم هستند، 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



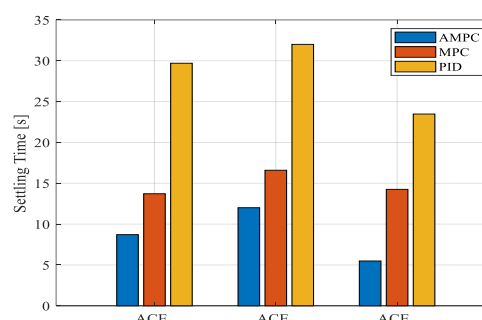
شکل ۹- پاسخ سیستم با پارامترهای دارای عدم قطعیت. (الف) ناحیه ۱، (ب) ناحیه ۲ و (ج) ناحیه ۳.

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

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



(ب)



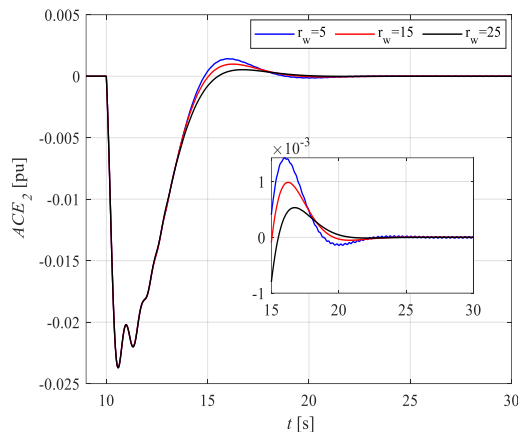
(الف)

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

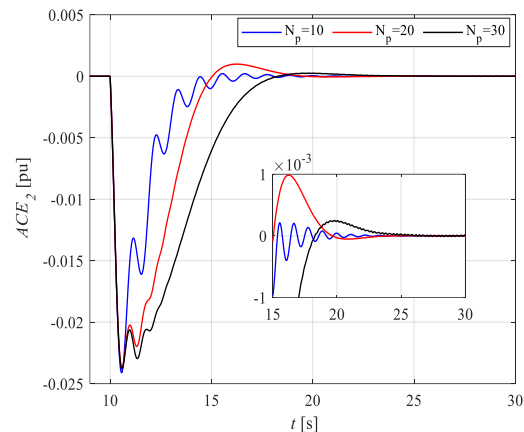
۳-۳- تحلیل حساسیت

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 بالادستی 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 ۱۲- اثر تغییر ضریب وزنی روی خروجی سیستم.



شکل ۱۱- اثر تغییر افق پیش‌بینی روی خروجی سیستم.

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

$N_p = 10$		$N_p = 20$		$N_p = 30$	
زمان نشست	بیشینه انحراف	زمان نشست	بیشینه انحراف	زمان نشست	بیشینه انحراف
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

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 بهبودیافته 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 سخت‌افزار 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 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.

تقدیر و تشکر:

نویسندگان این مقاله، مراتب تقدیر و تشکر خود را از

مدیریت محترم دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه
حکیم سبزواری اعلام می‌دارند.

مهدی رضانی: روش‌شناسی، نرم‌افزار، اعتبارسنجی،
نگارش پیش‌نویس مطالب

تعارض منافع:

نویسندگان اعلام می‌کنند که در مورد انتشار این مقاله
تعارض منافع وجود ندارد.

محسن احمدنیا: روش‌شناسی، اعتبارسنجی، بررسی و
ویرایش محتوا

احمد حاجی‌پور: بررسی و ویرایش محتوا

تاییدیه اخلاقی:

نویسندگان متعهد می‌شوند که مطالب این مقاله را در هیچ
مجله دیگری به چاپ نرسانده‌اند.

منابع مالی:
در انجام این مقاله هیچ منبع مالی مورد استفاده قرار نگرفته
است.

مشارکت‌های نویسندگان:

پیوست

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

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

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

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

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

فهرست اندیس‌ها و متغیرها

$G_i(s)$	تابع تبدیل مدل ناحیه i	i/j	اندیس ناحیه
A_i, B_i, C_i	ماتریس‌های مدل ناحیه i	n	اندیس شبکه لاگر
s	متغیر لاپلاس	t	اندیس بازه زمانی
I	ماتریس یکانی	k	اندیس پله زمانی
θ_i	بردار پارامترهای مدل شناسایی ناحیه i	y_i	خروجی ناحیه i
K_b, T_{b1}, T_{b2}	پارامترهای مدل شناسایی	Δf_i	انحراف فرکانس ناحیه i
dt	بازه زمانی	$\Delta P_{tie,i}$	توان خط ارتباطی ناحیه i
ξ	ضریب اصلاح فیدبک اصلاحی	T_{ij}	ضریب گشتاور سنکرون‌کننده ناحیه i و j
N_p	افق پیش‌بینی	β_i	مشخصه پاسخ فرکانسی ناحیه i
N_c	افق کنترلی	R_i	مشخصه دروپ سرعت گاورنر ناحیه i
X	بردار حالت سیستم افزوده		

A_e, B_e, C_e	ماتریس‌های سیستم افزوده	D_i	ثابت میرایی ناحیه i
Δx	تفاضل بردار حالت	M_i	ثابت لختی ناحیه i
Δu	تفاضل سیگنال ورودی	ACE_i	خطای کنترل ناحیه i
r_w	ضریب وزنی تابع هدف	$\Delta P_{c,i}$	سیگنال کنترلی فرکانس-بار ناحیه i
N	مرتبه شبکه لاگر	x_i	بردار حالت ناحیه i
η	بردار پارامترهای لاگر	$x_{i,sys}$	بردار حالت سیستم ناحیه i
α	قطب شبکه لاگر	K_{MPC}	بهره فیدبک بهینه
L	شبکه لاگر	u_i	خروجی کنترلی ناحیه i

مراجع

- [1] D. Zhang. "Research on AGC performance during wind power ramping based on deep reinforcement learning." *IEEE Access* 8, (2020): 107409–107418.
- [2] J. Li, T. Yu, H. Zhu, F. Li, D. Lin, and Z. Li. "Multi-agent deep reinforcement learning for sectional AGC dispatch." *IEEE Access* 8 (2020): 158067-158081.
- [3] F. Zhang, Z. Hu, K. Meng, L. Ding, and Z. Dong. "HESS sizing methodology for an existing thermal generator for the promotion of AGC response ability." *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 11, no. 2 (2019): 608-617.
- [4] D.K. Chaturvedi, P.S. Satsangi, and P.K. Kalra. "Load frequency control: a generalized neural network approach." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 21, no. 6 (1999): 405–415.
- [5] H. Bevrani, T. Hiyama, Y. Mitani, and K. 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] A.B. Rehiara, H. Chongkai, Y. Sasaki, N. Yorino, and Y. Zoka. "An adaptive IMC-MPC controller for improving LFC performance." In *2017 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT-Asia)*, pp. 1-6. IEEE, 2017.
- [7] Z. Qiu, M. Santillo, J. Sun, and M. Jankovic. "Enhanced Composite Adaptive IMC for Boost Pressure Control of a Turbocharged Gasoline Engine." In *American Control Conference (ACC)*, Boston, MA, 2016.
- [8] A.B. Rehiara, H. Chongkai, Y. Sasaki, N. Yorino, and Y. Zoka. "An adaptive internal model for load frequency control using extreme learning machine." *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)* 16, no. 6 (2018): 2879-2887.
- [9] J. Guo. "Application of a Novel Adaptive Sliding Mode Control Method to the Load Frequency Control," *European Journal of Control* 57, (2021): 172–178.
- [10] A.E. Onyeka, Y. Xing-Gang, Z. Mao, B. Jiang, and Q. Zhang. "Robust decentralised load frequency control for interconnected time delay power systems using sliding mode techniques." *IET Control Theory & Applications* 14, no. 3 (2020): 470-480.
- [11] C.F. Juang. "Load-frequency Control by Hybrid Evolutionary Fuzzy PI controller." *IEE Proceedings - Generation Transmission and Distribution* 153, no. 2 (2006): 196–204.
- [12] C. Chang, 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] M. Han, and X. 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] H. Wang, Z. Lei, X. Zhang, J. Peng, and H. Jiang. "Multiobjective reinforcement learning-based intelligent approach for optimization of activation rules in automatic generation control." *IEEE Access* 7 (2019): 17480-17492.
- [15] V.V. Gautam, R. Loka, and A.M. Parimi. "Cubature Kalman filter and linear quadratic regulator for load frequency control." *Electric Power Systems Research* 222 (2023): 109509.
- [16] A.B. Kunya. "Hierarchical bi-level load frequency control for multi-area interconnected power systems." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 155 (2024): 109600.
- [17] H.K. Sahoo, and P.K. Dash. "Robust Estimation of Power Quality Disturbance using Unscented H ∞ Filter." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 73, (2015): 438–447.

- [18] M. Liu, F. Bizzarri, A.M. Brambilla, and F. 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] J. Morsali, K. Zare, and M. Tarafdar Hagh. "AGC of Interconnected Multi-source Power System with Considering GDB and GRC Nonlinearity Effects." *In 2016 6th Conference on Thermal Power Plants (CTPP)*, pp. 12-17. IEEE, 2016.
- [20] L. Jiang, W. Yao, Q.H. Wu, J.Y. Wen, and S.J. Cheng. "Delay-dependent stability for load frequency control with constant and time-varying delays." *IEEE Transactions on Power Systems* 27, no. 2 (2011): 932-941.
- [21] J.M. Maciejowski, *Predictive Control with Constraints*, Prentice Hall, US, 2000.
- [22] C. Huang, M. Yang, H. Ge, S. Deng, and C. Chen. "DMPC-based load frequency control of multi-area power systems with heterogeneous energy storage system considering SoC consensus." *Electric Power Systems Research* 228 (2024): 110064.
- [23] G. Cai, C. Jiang, D. Yang, X. Liu, S. Zhou, Z. Cao, C. Liu, and Z. Sun. "Data-driven predictive based load frequency robust control of power system with renewables." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 154 (2023): 109429.
- [24] A.M. Ersdal, L. Imsland, K. Uhlen, D. Fabozzi, and N.F. Thornhill. "Model predictive load–frequency control taking into account imbalance uncertainty." *Control Engineering Practice* 53 (2016): 139-150.
- [25] M.A Mohamed, A.A. Zaki Diab, H. Rezk, and T. 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] T.H. Mohamed, J. Morel, H. Bevrani, and T. Hiyama. "Model predictive based load frequency control design concerning wind turbines." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 43, (2012): 859–867.
- [27] R. Patel, L. Meegahapola, L. Wang, X. Yu, and B. McGrath. "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 (2019): 454-463.
- [28] J. Qi, K. Sun, J. Wang, and H. Liu. "Dynamic State Estimation for Multi-Machine Power System by Unscented Kalman Filer with Enhanced Numerical Stability." *IEEE Transactions on Smart Grid* 9, no. 2 (2018): 1184–1196.
- [29] A.B. Rehiara, N. Yorino, Y. Sasaki, and Y. Zoka. "A Novel Adaptive LFC Based on MPC Method." *IEEJ Trans. Electr. Electronic Eng.* 14, no. 8 (2019): 1145–1152.
- [30] Pr. Bhui, N. Senroy, A.K. Singh, and B.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] R.G. Jacquot. *Modern Digital Control Systems (Electrical and Computer Engineering)*, Corona Press, 2015.
- [32] E. Wan, 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.