



دانشگاه صنعتی سهند

DOR:

20.1001.1.23223146.1400.8.2.5.6

نشریه سالانه علمی در مهندسی برق

دوره ۸ - شماره ۲

پاییز و زمستان ۱۴۰۰

صفحات ۸۱ الی ۹۷

ISSN: 2322-3146

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

کنترل فرکانس-بار تطبیقی با استفاده از کنترل پیش بین مدل بر مبنای شبکه لاگر و تخمین حداقل مربعات بازگشتی برای سیستم قدرت سه-ناحیه‌ای

وحیدرضا جعفری نیا^۱، محسن احمدنیا^۲ و احمد حاجی پور^۳

^۱ کارشناس ارشد مهندسی برق، شرکت برق منطقه‌ای خراسان، مشهد، vahidreza.jafarinia@gmail.com

^۲ نویسنده مسئول، استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار،

mn.ahmadnia@gmail.com

^۳ دانشیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار،

ahmad.hajipoor@gmail.com

چکیده

واژه‌های کلیدی

در این مقاله یک روش کنترل پیش بین مدل تطبیقی جدید بر مبنای توابع لاگر برای مساله کنترل فرکانس-بار یک سیستم قدرت چند-ناحیه‌ای ارائه شده است که در آن، تخمین مدل داخلی سیستم قدرت با استفاده از روش حداقل مربعات بازگشتی بطور آنلاین بروزرسانی می‌شود. استفاده از مدل داخلی تطبیقی دارای کاهش مرتبه در ساختار کنترل پیش بین مدل، نوآوری این پژوهش است. در سیستم مورد مطالعه، کنترل هر ناحیه بطور مستقل طراحی شده است بطوریکه پایداری سیستم حلقه بسته کل تضمین شود. به منظور تایید کارایی طرح پیشنهادی، شبیه‌سازی‌های عددی برای یک سیستم قدرت سه-ناحیه‌ای انجام شده و نتایج آن با نتایج حاصل از کنترل پیش بین مدل (MPC) مرسوم و کنترل تناسبی-انتگرالی-مشتقی (PID) مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که طرح پیشنهادی نسبت به کنترل‌های PID و MPC در دفع اغتشاش بار پله‌ای (با توجه به پارامترهای نامی و پارامترهای دارای عدم قطعیت) بهتر عمل می‌کند و با استفاده از مدل دارای کاهش مرتبه و توابع لاگر، بار محاسباتی را نسبت به MPC مرسوم بطور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد.

کنترل پیش بین مدل،

روش حداقل مربعات،

کنترل فرکانس-بار،

شناسایی مدل داخلی.



Sahand University
of Technology

DOR:

[20.1001.1.23223146.1400.8.2.5.6](https://doi.org/10.1001.1.23223146.1400.8.2.5.6)

Journal of Nonlinear
Systems in Electrical
Engineering

Vol.8, No.2

Autumn and Winter 2021

ISSN: 2322 – 3146

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

Adaptive Load Frequency Control For A Three-Area Power System Using Laguerre-Network-Based Model Predictive Control And Recursive Least Squares Estimation

VahidReza Jafarinia¹, Mohsen Ahmadnia² and Ahmad Hajipoor³

¹Master of power Electrical Engineering, Khorasan Regional Electric Company, Mashhad, vahidreza.jafarinia@gmail.com

²**Corresponding Author**, Assistant professor, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, mn.ahmadnia@gmail.com

³Associate Professor, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, ahmad.hajipoor@gmail.com

ABSTRACT

Keywords

Model predictive control,
least square method,
load frequency control,
internal model identification.

In this paper, a new adaptive model predictive control based on Laguerre functions is proposed for the load-frequency control problem of a multi-area power system, in which the estimation of the internal model of the power system is updated online using the recursive least squares method. The use of the adaptive reduced-order internal model in the structure of model predictive control is the innovation of this research. In the studied system, the controller of each area is designed independently so that the stability of the overall closed-loop system is guaranteed. Numerical simulations for a three-area power system are carried out to validate the effectiveness of the proposed scheme and the results were compared with those of conventional model predictive control (MPC) and proportional-integral-derivative control (PID). The simulation results show that the proposed scheme performs better than PID and MPC in rejecting step load disturbance (with respect to nominal and uncertain parameters) and nevertheless, thanks to the use of the reduced-order model and Laguerre functions, reduces the computational burden significantly compared to conventional MPC.

۱- مقدمه

کنترل سیستم قدرت یکی از چالشی‌ترین کارها در مهندسی کنترل به حساب می‌آید، زیرا با وجود بخش‌های الکتریکی مختلف از قبیل واحدهای تولید، وسایل حفاظت، حلقه‌های کنترلی و خطوط انتقال قدرت که در نواحی جغرافیایی وسیعی گسترده شده‌اند، می‌بایست مجموع توان تولیدی با تقاضای بار الکتریکی در تعادل باشند. عدم تعادل می‌تواند به نتایج نامطلوبی از قبیل کاهش عملکرد در غالب نوسانات فرکانسی، انحراف در مقدار برنامه‌ریزی شده توان در خطوط ارتباطی، ناپایداری ولتاژ، محدودیت‌های کاری، ناپایداری زاویه روتور، پخش بار غیراقتصادی و اغتشاشات فیزیکی و محیطی منجر شود. بنابراین، برای عملکرد رضایت‌بخش سیستم قدرت، این عدم تعادل بایستی برطرف شود [۱].

در میان استراتژی‌های مختلف کنترل سیستم قدرت [۲]، کنترل فرکانس-بار به مساله رگولاسیون فرکانس می‌پردازد بطوریکه همواره فرکانس در تمام نواحی کنترلی تقریباً در مقدار نامی ثابت باقی بماند. بطور خلاصه، کنترل فرکانس-بار، نقطه مرجع بار توربین‌ها را با توجه به تغییرات در تقاضای بار تنظیم می‌کند تا فرکانس سیستم و توان خطوط ارتباطی تا حد امکان به مقادیر مطلوب نزدیک باشند. اهداف اصلی کنترل فرکانس-بار را می‌توان این‌گونه طور بیان کرد: (۱) خطای حالت ماندگار صفر برای انحرافات فرکانس و توان خطوط ارتباطی، (۲) دفع اغتشاش حاصل از تغییرات ناگهانی بار، (۳) حصول پاسخ گذرای بهینه با توجه به معیارهایی از قبیل حداکثر انحراف و زمان نشست، (۴) عملکرد مقاوم در حضور عدم قطعیت‌های مدل‌سازی و مشخصه‌های غیرخطی، (۵) حصول حاشیه امنیت بهتر سیستم از نظر رگولاسیون فرکانس پایدار و توان محاسباتی کمتر [۳-۷].

کنترل پیش‌بین مدل یک نظریه کنترل مدرن است که یک تکنولوژی عملی با عملکرد بالا به حساب می‌آید. از مهم‌ترین مزایای کنترل پیش‌بین مدل می‌توان به قابلیت گنجاندن خودکار قیود در روند طراحی، فرمول‌بندی آسان مساله چند-متغیره و جبران کامل تاخیر در سیستم اشاره کرد. طراحی کنترل پیش‌بین مدل برای مساله کنترل فرکانس-بار در مراجع متعددی گزارش شده است [۱۰-۸]. با توجه به حل آنلاین مساله بهینه‌سازی، امکان مدیریت آنلاین مصالحه بین رفع اثر اغتشاش و قیود حاکم بر سیستم با کنترل پیش‌بین مدل فراهم می‌شود و به این ترتیب، یک استراتژی کارآمد در کاربردهای موجود در صنعت به شمار می‌آید. در [۱۱] پاسخ سریع و مقاوم در برابر عدم قطعیت‌های پارامتری و تغییرات در بار با استفاده از کنترل پیش‌بین مدل برای مساله کنترل فرکانس-بار یک سیستم یک-ناحیه‌ای حاصل شده است. در [۱۲] کاربرد کنترل پیش‌بین مدل در سیستم قدرت چند-ناحیه‌ای از جنبه اقتصادی مورد بررسی قرار گرفته است. الگوریتم MPC در [۱۳] به یک سیستم قدرت چند-ناحیه‌ای شامل توربین بادی اعمال شده و در [۱۴] عملکرد MPC با کنترل تناسبی-انتگرالی (PI) مرسوم مورد مقایسه قرار گرفته است.

بهینه‌سازی آنلاین در کنترل پیش‌بین مدل با توجه به پیش‌بینی‌های پاسخ دینامیکی آتی سیستم تحت کنترل انجام می‌گیرد. بنابراین، عملکرد بهینه‌سازی به دقت این پیش‌بینی‌ها بستگی دارد. کنترل پیش‌بین مدل کلاسیک از یک مدل پیش‌بینی (به عنوان مثال، مدل دینامیکی خطی تغییرناپذیر با زمان) برای این پیش‌بینی بهره می‌برد. در مواردی که دینامیک‌های سیستم تحت کنترل، دارای مشخصه غیرخطی شدید یا دارای پارامترهای تغییرپذیر با زمان باشند، پیش‌بینی‌های حاصل از مدل خطی تغییرناپذیر با زمان ممکن است خیلی دقیق نباشند و در نتیجه، عملکرد کنترلی تنزل می‌یابد. از این لحاظ، یک کنترل پیش‌بین مدل تطبیقی می‌تواند موثر واقع

شود، زیرا مدل خطی تغییرناپذیر با زمان مورد استفاده در روند پیش‌بینی در هر چرخه کنترلی بروزرسانی می‌شود تا دینامیک‌های تغییرپذیر سیستم تحت کنترل را دربر گیرد [۱۵-۱۶].

به علت پیشرفت سریع در تکنولوژی صنعت برق، اندازه و پیچیدگی سیستم‌های قدرت بهم پیوسته روز به روز در حال گسترش است. مدل‌سازی ریاضیاتی چنین سیستم پیچیده‌ای به مدل‌های مقیاس-بزرگ منجر می‌شود که مواردی از قبیل شبیه‌سازی دینامیکی، تحلیل پایداری، طراحی کنترل و بار محاسباتی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در چنین مواردی، روش‌های تقریب مدل نقش مهمی در تعیین یک مدل با مرتبه کوچک‌تر دارند، بطوریکه مشخصه‌های غالب سیستم قدرت مقیاس-بزرگ را باز تولید می‌کنند [۱۷-۱۸]. استفاده از مدل با کاهش مرتبه به جای سیستم اصلی مقیاس-بزرگ برای طراحی کنترل دارای چندین مزیت است از قبیل: (۱) کاهش مرتبه و هزینه کنترل مقاوم، (۲) کاهش پیچیدگی‌های محاسباتی و (۳) کاهش حافظه مورد نیاز و انجام سریع‌تر شبیه‌سازی. در دهه اخیر، طراحی با استفاده از رهیافت کاهش مرتبه سیستم در زمینه‌های تحقیقاتی و کاربردی مورد توجه قرار گرفته است. طراحی و اجرای کنترل فرکانس-بار بر مبنای مدل با کاهش مرتبه به تعداد نسبتاً کمی در این موضوع گزارش شده است [۱۹-۲۳].

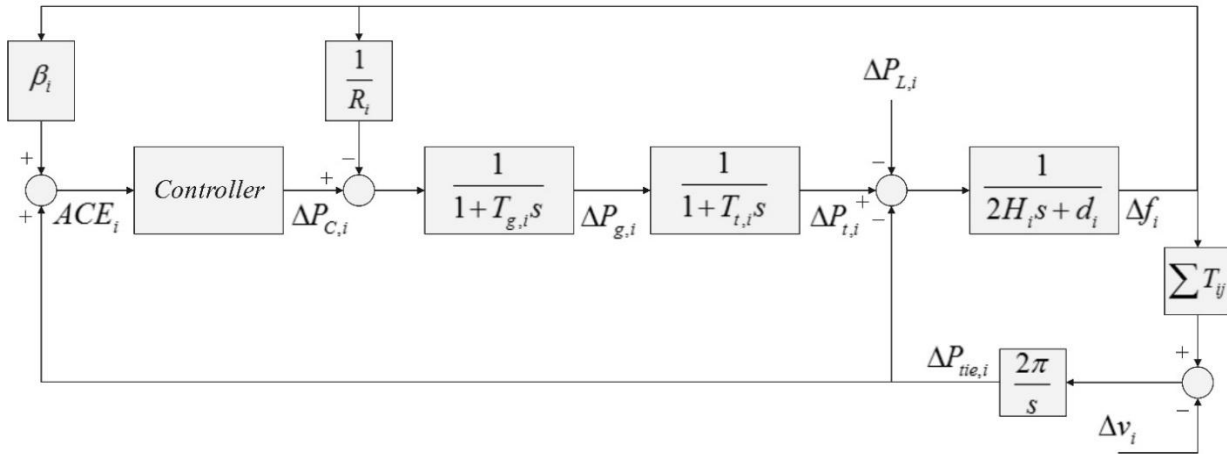
همانطور که ذکر شد، پیچیدگی ساختار و عمل سیستم‌های قدرت مدرن چند-ناحیه‌ای در حال افزایش است بطوری که مشخصه-های سیستم با توجه به شرایط مختلف تغییر می‌کنند. با توجه به شرایط متغیر سیستم، چرخه‌ی کنترل فرکانس-بار فعلی، نسبتاً کند (معادل با چرخه‌ی کنترل دیسپاچینگ تولید در یک سیستم قدرت نوعی) است. بنابراین، یک روش کنترل فرکانس-بار پیشرفته برای شناسایی مشخصه‌های غالب سیستم هدف به منظور بهبود پایداری مورد نیاز است. در این پژوهش، یک روش کنترل فرکانس-بار جدید بر مبنای MPC تطبیقی پیشنهاد شده است که در آن، تخمین مدل پیش‌بینی با استفاده از روش حداقل مربعات بازگشتی بروزرسانی می‌شود. خروجی بهینه‌ی قانون کنترلی با توجه به کمینه‌سازی یک تابع هزینه‌ی مربعی بر مبنای مدل دینامیکی هر ناحیه کنترلی مجزا (بدون نیاز به پارامترهای مدل و اطلاعات انحراف فرکانسی نواحی مجاور) تولید می‌شود. ساختار مدل دارای کاهش مرتبه‌ی سیستم طوری اختیار می‌شود تا مشخصه‌های غالب سیستم هدف را باز تولید کند. کاهش مرتبه مدل داخلی به معنی کاهش در حجم محاسبات و ساده‌سازی کنترل است. در فرمولبندی الگوریتم پیشنهادی، قید نرخ تولید لحاظ شده است. علاوه بر آن، به منظور کمک به کاهش بار محاسباتی، توابع پایه لاگر برای تقریب توالی کنترلی مورد استفاده قرار می‌گیرد. سیگنال کنترلی در هر بازه‌ی نمونه‌برداری در دو مرحله محاسبه می‌شود: در مرحله اول با استفاده از سیگنال‌های ورودی-خروجی سیستم، یک مدل ساده شده‌ی از سیستم با استفاده از الگوریتم حداقل مربعات بازگشتی تخمین زده می‌شود بطوری که دینامیک‌های اساسی سیستم را شامل شود؛ در مرحله دوم، مدل مذکور در ساختار کنترل تطبیقی به منظور پیش‌بینی مسیرهای آتی سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد. کنترل‌کننده پیشنهادی با شناسایی مشخصه‌های غالب سیستم هدف، به طور موثری قادر به دفع اغتشاش حاصل از بار و در نتیجه رگولاسیون فرکانس سیستم در زمان کوتاهی است. کارایی کنترل فرکانس-بار پیشنهادی در دفع اغتشاش بار پله‌ای و در حضور عدم قطعیت‌های پارامتری از طریق شبیه‌سازی روی یک مدل استاندارد از سیستم قدرت بهم پیوسته سه-ناحیه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج آن با MPC مرسوم و کنترل PID مقایسه شده است. مشخصه‌های برجسته پژوهش حاضر در ادامه اشاره می‌شود:

- مدل داخلی دارای کاهش مرتبه‌ی سیستم در هر گام با توجه به شرایط سیستم بروزرسانی می‌شود؛
- با توجه به مدل ساده شده سیستم، سرعت تخمین پارامترهای مدل بهبود می‌یابد؛
- قابلیت اعمال قید نرخ تولید در روند محاسبه سیگنال کنترلی میسر می‌شود؛

- کنترل پیشنهادی نسبت به عدم قطعیت‌های مدل مقاوم است.
- بار محاسباتی بطور قابل ملاحظه‌ای با استفاده از توابع لاگر کاهش می‌یابد.

۲- مدل سیستم قدرت

بلوک دیاگرام یک سیستم قدرت چند-ناحیه‌ای برای مساله‌ی کنترل فرکانس-بار شامل کنترل‌کننده، گاورنر، توربین، جسم دوار، بایاس فرکانسی، بار و تبادل توان در خطوط ارتباطی را می‌توان در شکل ۱۲ مشاهده نمود. در شکل مذکور $\Delta P_{g,i}$ توان خروجی گاورنر، $\Delta P_{m,i}$ توان مکانیکی توربین، $\Delta P_{L,i}$ تغییرات بار، Δv_i واسط ناحیه، $\Delta P_{C,i}$ سیگنال کنترلی، Δf_i انحراف فرکانسی، $\Delta P_{tie,i}$ توان در خط ارتباطی، ACE_i خطای کنترل ناحیه، H_i ثابت لختی معادل، d_i ثابت میرایی معادل، R_i مشخصه‌ی دروپ سرعت و β_i ضریب بایاس فرکانس، $T_{g,i}$ و $T_{t,i}$ به ترتیب ثابت زمانی گاورنر و توربین برای ناحیه i و T_{ij} ثابت سنکرون-کننده‌ی خط ارتباطی ناحیه‌ی i با ناحیه‌ی j است.



شکل ۱۲. بلوک-دیاگرام سیستم قدرت یک-ناحیه‌ای.

تبادل توان در خطوط ارتباطی ΔP_{tie} برای هر ناحیه با نواحی مجاور طبق رابطه‌ی (۱) و خطای کنترل ناحیه ACE که یک ترکیب خطی مناسب از انحراف فرکانسی و تبادل توان در خطوط ارتباطی برای هر ناحیه است، با استفاده از رابطه‌ی (۲) محاسبه می‌شود [۱۳]:

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

$$ACE_i = \Delta P_{tie,i} + \beta_i \Delta f_i \quad (2)$$

مدل فضای حالت سیستم قدرت در شکل ۱۲ طبق رابطه‌ی (۳) توصیف می‌شود [۱۳]:

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = A_i x_i(t) + B_i u_i(t) + F_i w_i(t) \\ y_i(t) = C_i x_i(t) + D_i u_i(t) \\ |\dot{u}_i(t)| \leq r_{max}, i = 1, \dots, n \end{cases} \quad (3)$$

که در آن $x_i(t) = [\Delta P_{g,i} \Delta P_{m,i} \Delta f_i \Delta P_{tie,i}]^T$ بردار متغیرهای حالت، $u_i(t) = \Delta P_{C,i}$ ورودی کنترل، $w_i =$ $y_i(t) = ACE_i$ بردار ورودی اغتشاش، $[\Delta P_{L,i} \Delta v_i]^T$ بردار خروجی سیستم و r_{max} قید نرخ تولید است. واسط ناحیه v_i (اثر نواحی مجاور روی ناحیه i) طبق رابطه‌ی (۴) محاسبه می‌شود:

$$\Delta v_i = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n T_{ij} \Delta f_j \quad (۴)$$

به علت عدم اتصال مستقیم بین متغیر ورودی و متغیر خروجی، ماتریس فیدفوروارد D_i از مدل حذف می‌شود. بنابراین ماتریس‌های مدل کامل سیستم قدرت یک-ناحیه‌ای طبق رابطه‌های (۸)-(۵) محاسبه می‌شوند [۱۳]:

$$A_i = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_{g,i}} & 0 & -\frac{1}{R_i T_{g,i}} & 0 \\ \frac{1}{T_{t,i}} & -\frac{1}{T_{t,i}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2H_i} & -\frac{d_i}{2H_i} & -\frac{1}{2H_i} \\ 0 & 0 & 2\pi \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n T_{ij} & 0 \end{bmatrix} \quad (۵)$$

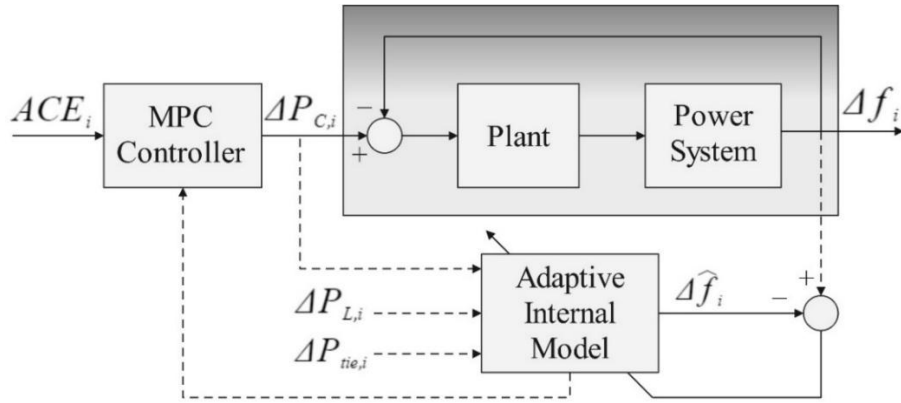
$$B_i = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_{g,i}} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (۶)$$

$$C_i = [0 \quad 0 \quad \beta_i \quad 1] \quad (۷)$$

$$F_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -\frac{1}{2H_i} & 0 \\ 0 & -2\pi \end{bmatrix} \quad (۸)$$

۳- کنترل کننده

محاسبات کنترل کننده پیشنهادی در هر گام نمونه‌برداری در دو مرحله اجرا می‌شود: در مرحله اول با استفاده از سیگنال‌های ورودی و سنجش انحراف فرکانس، پارامترهای مدل داخلی ساده شده‌ی سیستم با استفاده از روش حداقل مربعات بازگشتی به طور تطبیقی شناسایی می‌شوند. در مرحله دوم، بهره‌ی کنترلی با توجه به مدل داخلی مذکور و با استفاده از روش کنترل پیش‌بین مدل بر مبنای توابع لاگر محاسبه خواهد شد. ورودی کنترلی فرکانس-بار در غالب بار مرجع به توربین اعمال می‌شود بطوریکه قید نرخ تولید (نرخ تغییر ورودی توربین) در نظر گرفته شده است. شکل ۱۳ ساختار کلی طرح کنترل فرکانس-بار تطبیقی پیشنهادی بر مبنای کنترل پیش‌بین مدل را نشان می‌دهد. در ادامه، مراحل اجرای کنترل کننده پیشنهادی با جزئیات آورده شده است.



شکل ۱۳. طرح کلی کنترل فرکانس-بار پیشنهادی.

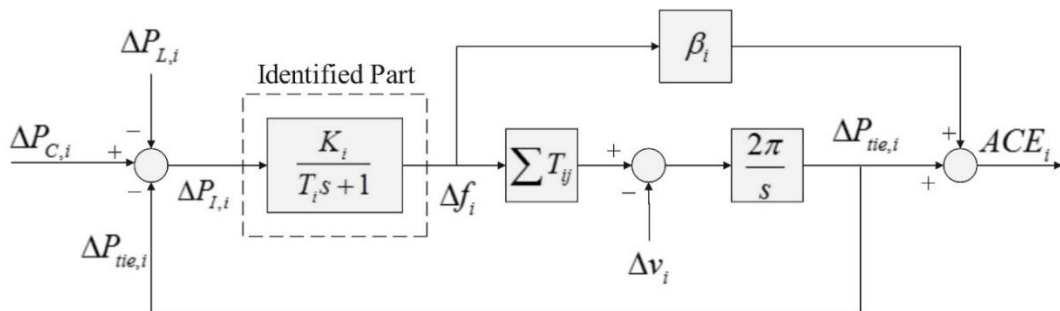
۳-۱- شناسایی مدل داخلی

در این پژوهش، یک مدل داخلی ساده شده‌ی مرتبه-دوم در غالب مدل داخلی مورد استفاده قرار می‌گیرد بطوری که دینامیک-های اساسی سیستم قدرت را شامل شود. شکل ۱۴ بلوک-دیگرام مدل داخلی (مدل پیش‌بینی) مورد استفاده در روند طراحی کنترل-کننده پیشنهادی را نشان می‌دهد. منظور از دینامیک‌های اساسی، مدهای سیستم با ثابت‌های زمانی ۱۰ ثانیه و بیشتر است و در نتیجه، مدهای با ثابت‌های زمانی خیلی کوچک‌تر مربوط به دینامیک‌های گاورنر و توربین حذف می‌شوند. بنابراین، با صرف‌نظر از مدهای مربوط به دینامیک‌های گاورنر و توربین، معادله‌ی انحراف فرکانس Δf را می‌توان با مدل ساده‌ی مرتبه-اول (۹) تقریب زد:

$$\Delta f(k) = \hat{\theta}_1 \cdot \Delta f(k-1) + \hat{\theta}_2 \cdot \Delta P_I(k) \quad (9)$$

که در آن $\hat{\theta}_1$ و $\hat{\theta}_2$ تخمین پارامترهای مدل تحت شناسایی و ورودی بلوک شناسایی است:

$$\Delta P_I(k) = \Delta P_C(k) - \Delta P_L(k) - \Delta P_{tie}(k) \quad (10)$$



شکل ۱۴. مدل ساده شده‌ی سیستم قدرت.

با توجه به سنجش سیگنال‌های ورودی و خروجی سیستم تحت کنترل واقعی، تخمین پارامترهای مدل (۹) به طور تطبیقی با استفاده از روش حداقل مربعات بازگشتی به دست می‌آید. در سیستم قدرت واقعی، سیگنال‌های $\Delta f(k)$ و $\Delta P_I(k)$ اندازه‌گیری می‌شوند و بنابراین، این داده‌ها با استفاده از الگوریتم حداقل مربعات بازگشتی به منظور تخمین مجموعه‌ی پارامترها مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روند برای حصول تخمین پارامتری در زمان حقیقی بسیار ساده و کارآمد است. ضمناً سیستم گسسته‌ی (۹) با سیستم تاخیری مرتبه-اول پیوسته با بازه‌ی نمونه‌برداری dt معادل می‌باشد که بهره K و ثابت زمانی T آن با رابطه‌ی (۱۱) محاسبه می‌شوند:

$$K = \frac{\hat{\theta}_2}{1-\hat{\theta}_1}, T = \frac{\hat{\theta}_1}{1-\hat{\theta}_1} dt \quad (11)$$

با توجه به شکل ۱۴، مدل داخلی ساده شده برای هر ناحیه در سیستم قدرت بهم پیوسته در غالب معادلات حالت (مورد استفاده در روند طراحی کنترل پیش‌بین مدل) طبق رابطه‌های (۱۲) توصیف می‌شود:

$$\begin{cases} \dot{x}_{s,i}(t) = A_{s,i}x_{s,i}(t) + B_{s,i}u_i(t) + F_{s,i}w_i(t) \\ y_i(t) = C_{s,i}x_{s,i}(t) \end{cases} \quad (12)$$

که در آن $x_{s,i}(t) = [\Delta f_i \quad \Delta P_{tie,i}]^T$ بردار حالت مدل داخلی است و ماتریس‌های مدل در ادامه تعریف شده‌اند:

$$A_{s,i} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_i} & -\frac{K_i}{T_i} \\ 2\pi T_{12} & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$B_{s,i} = [K_i/T_i \quad 0]^T \quad (14)$$

$$F_{s,i} = \begin{bmatrix} -\frac{K_i}{T_i} & 0 \\ 0 & -2\pi \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$C_{s,i} = [\beta_i \quad 1] \quad (16)$$

مدل مذکور در بخش بعدی بعد از تبدیل به حالت گسسته در زمان به عنوان مدل داخلی برای پیش‌بینی مسیرهای آتی سیستم در افق پیش‌بینی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۳-۲- کنترل پیش‌بین مدل

کنترل پیش‌بین مدل یک الگوریتم کنترلی چند-متغیره و بر مبنای تکرار است که از مدل سیستم و یک تابع هزینه در افق پیش‌بینی استفاده می‌کند تا توالی کنترلی بهینه را محاسبه کند. گنجانیدن قیود عملیاتی در روند محاسبه‌ی سیگنال کنترل از مهم‌ترین مشخصه‌های کنترل پیش‌بین مدل به حساب می‌آید. نمایش فضای حالت گسسته در زمان سیستم را در نظر می‌گیریم که از گسسته‌سازی مدل پیوسته (۱۲) بدون لحاظ ورودی اغتشاش حاصل شده است:

$$\begin{cases} X_m(k+1) = A_m x_m(k) + B_m u(k) \\ Y_m(k) = C_m x_m(k) \end{cases} \quad (17)$$

که در آن $u(k)$ ورودی، $x_m(k)$ متغیر حالت و $y_m(k)$ خروجی مدل گسسته است.

تذکر: مدل گسسته در زمان (۱۷) به عنوان مدل داخلی در کنترل پیش‌بین مدل پیشنهادی مورد استفاده قرار می‌گیرد. همان‌طور که در این مدل مشخص است، ورودی اغتشاش در آن وجود ندارد. بنابراین، به منظور پیاده‌سازی کنترل برای هر ناحیه در سیستم قدرت چند-ناحیه‌ای، به اطلاعات انحراف فرکانسی نواحی مجاور نیاز نخواهد بود.

در اجرای کنترل پیش‌بین مدل، سیستم (۱۷) در غالب مدل تعمیم‌یافته (۱۸) بازتعریف می‌شود که در آن، تفاضل سیگنال ورودی $\Delta u(k)$ به عنوان ورودی و $X(k) = [\Delta x_m(k) \quad y_m(k)]^T$ به عنوان بردار حالت سیستم تعمیم‌یافته در نظر گرفته شده است:

$$\begin{cases} X(k+1) = A_e X(k) + B_e \Delta u(k) \\ Y_m(k) = C_e X(k) \end{cases} \quad (18)$$

ماتریس‌های مدل تعمیم‌یافته در ادامه تعریف شده‌اند:

$$A_e = \begin{bmatrix} A_m & 0_m^T \\ C_m A_m & 1 \end{bmatrix}, B_e = \begin{bmatrix} B_m \\ C_m B_m \end{bmatrix}, C_e = [0_m \quad 1] \quad (19)$$

که در آن $0_m = [0 \quad 0]$ است.

مدل تعمیم‌یافته برای پیش‌بینی مسیرهای حالت آتی سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد. بایستی خاطر نشان شود که پارامترهای مدل مذکور با توجه به تخمین پارامتری توسط روش حداقل مربعات بازگشتی از قبل معلوم هستند. این پارامترها بر مبنای وضعیت جاری سیستم قدرت به دست می‌آیند که قید نرخ تولید نیز در آن لحاظ شده است. در رهیافت کنترل پیش‌بین مدل، تابع هزینه‌ی مربعی (۲۰) در هر گام نمونه‌برداری کمینه‌سازی می‌شود:

$$J = \sum_{m=1}^{N_p} \Delta ACE(k+m|k)^2 + r_w \sum_{m=0}^{N_c-1} \Delta P_C(k+m)^2 \quad (20)$$

که در آن N_p افق پیش‌بینی، N_c افق کنترلی و r_w ضریب وزنی است.

توابع لاگر دارای مزایایی از قبیل قابلیت تقریب خوب تابع هدف و بار محاسباتی کم هستند. در این پژوهش از شبکه‌ی لاگر برای توصیف توالی ورودی کنترلی استفاده می‌شود:

$$\Delta P_C(k+m) = L(m)^T \cdot \eta = [l_1(m) \dots l_N(m)][\eta_1 \dots \eta_N]^T \quad (21)$$

که در آن N مرتبه (تعداد توابع) شبکه‌ی لاگر و $l_i(m), i = 1, \dots, N$ توابع لاگر گسسته در زمان با گام نمونه‌برداری k است. پارامترهای شبکه لاگر $\eta_i, i = 1, \dots, N$ از طریق کمینه‌سازی تابع هزینه (۲۰) به دست می‌آیند.

توابع لاگر گسسته با استفاده از رابطه‌ی تفاضلی (۲۲) قابل محاسبه هستند:

$$\begin{cases} L(k+1) = A_l L(k) \\ L(0)^T = \sqrt{\beta} [1 \quad -\alpha \quad \alpha^2 \quad -\alpha^3 \quad \dots \quad (-1)^{N-1} \alpha^{N-1}], \beta = 1 - \alpha^2 \end{cases} \quad (22)$$

که در آن $L(0)$ مقدار اولیه شبکه لاگر است و ماتریس $A_l (N \times N)$ با رابطه‌ی (۲۳) تعریف می‌شود:

$$A_l = \begin{bmatrix} \alpha & 0 & \dots & 0 \\ \beta & \alpha & \dots & 0 \\ -\alpha\beta & \beta & \dots & 0 \\ \alpha^2\beta & -\alpha\beta & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (-\alpha)^{N-2}\beta & (-\alpha)^{N-3}\beta & \dots & \alpha \end{bmatrix} \quad (23)$$

که در آن α ضریب مقیاس زمانی یا قطب شبکه لاگر است و به منظور پایداری در بازه‌ی $0 \leq \alpha < 1$ اختیار می‌شود.

بعد از کمینه‌سازی در هر گام نمونه‌برداری، نمو کنترلی در گام زمانی فعلی k با رابطه‌ی (۲۴) تعیین می‌شود:

$$\Delta u(k) = -K_{mpc} X(k) \quad (24)$$

که در آن داریم:

$$\begin{cases} K_{mpc} = L(0)^T \Omega^{-1} \Psi \\ \Omega = \sum_{m=1}^{N_p} \varphi(m) Q \varphi(m)^T + R_L, \Psi = \sum_{m=1}^{N_p} \varphi(m) Q A^m \\ \varphi(m) = \sum_{i=0}^m A^{m-i-1} B L(i)^T, Q = C^T C, R_L = r_w \cdot \text{diag}[1, \dots, 1] \end{cases} \quad (25)$$

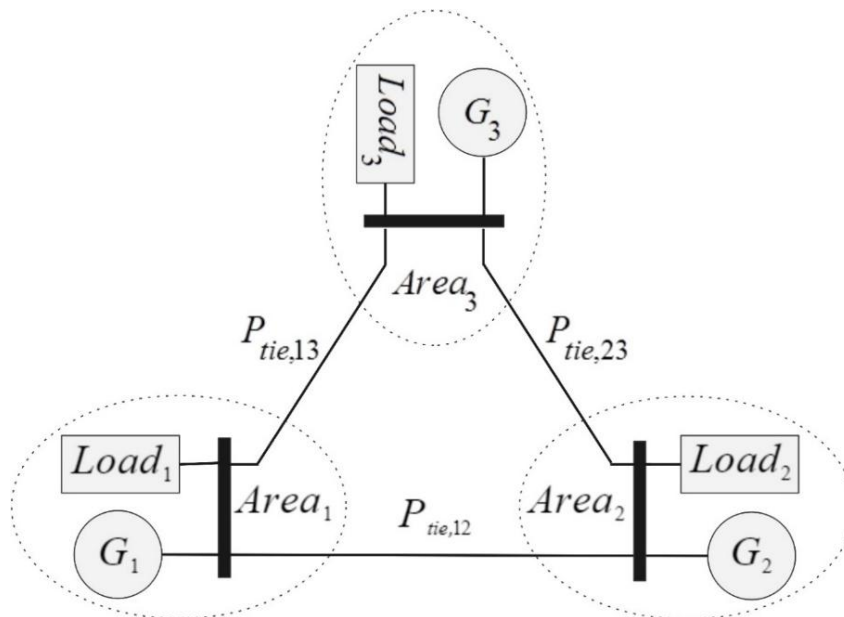
بنابراین، سیگنال کنترل فرکانس-بار برای سیستم قدرت با رابطه‌ی (۲۶) بروزرسانی می‌شود:

$$\Delta P_C(k) = \Delta P_C(k-1) + \Delta u(k) \quad (26)$$

در طراحی کنترل پیش‌بین مدل با استفاده از توابع لاگر، به منظور حصول عملکرد کنترلی مطلوب، ضرورت دارد تا ضریب مقیاس زمانی α و مرتبه شبکه‌ی لاگر N به درستی تعیین شوند. صرف‌نظر از ضریب مقیاس زمانی α ، با افزایش مرتبه شبکه N ، دقت تخمین بهبود می‌یابد. به طور معمول با در نظر گرفتن مرتبه شبکه لاگر برابر با $N = 3$ ، تخمین قابل قبولی از تابع هدف به دست می‌آید. به این ترتیب، تعداد پارامترهای بهینه‌سازی به مقدار کوچکی محدود و در نتیجه زمان محاسبات برای کاربردهای آن‌لاین مناسب خواهد شد.

۴- نتایج شبیه‌سازی

به منظور بررسی عملکرد طرح پیشنهادی، چندین شبیه‌سازی کامپیوتری در محیط نرم‌افزار سیمولینک متلب انجام شد. ساختار قدرت بهم پیوسته‌ی سه-ناحیه‌ای در شکل ۱۵ به عنوان سیستم اصلی مورد بررسی قرار می‌گیرد که پارامترهای نامی آن در جدول ۱ فهرست شده است [۱]. در سیستم قدرت مذکور، مدل هر ناحیه با رابطه‌ی (۳) توصیف می‌شود. بازه نمونه‌برداری در مقدار $dt = 0.01$ s و ظرفیت کنترل فرکانس-بار در مقدار $0.2 pu$ و با فرض اینکه تمام واحدهای تولید توان از نوع نیروگاه‌های حرارتی هستند، قید نرخ تولید (نرخ ورودی کنترل) در مقدار $0.05 pu/s$ تنظیم شده است. لازم به ذکر است که کنترل‌کننده پیشنهادی با پارامترهای کنترلی مشابه به هر یک از نواحی سیستم قدرت اعمال شده است.



شکل ۱۵. ساختار سیستم قدرت سه-ناحیه‌ای.

مقدار اولیه بهره‌ی کنترل پیشنهادی K_{mpc} با توجه به پارامترهای نامی مدل داخلی محاسبه می‌شود که در حین شبیه‌سازی با استفاده از داده‌های حقیقی بروزرسانی خواهد شد. برای کنترل‌کننده پیشنهادی، افق پیش‌بینی $N_p = 12$ ، ضریب مقیاس زمانی $\alpha = 0.95$ ، مرتبه شبکه لاگر $N = 3$ و ضریب وزنی $r_w = 7.5$ لحاظ شده است.

شبیه‌سازی‌ها در حضور اغتشاش (افزایش پله‌ای) بار با بزرگی $\Delta P_L = 0.02 pu$ در ناحیه ۲ در زمان $t = 10 s$ در دو مورد (۱) با پارامترهای نامی طبق جدول ۱ و ۲) پارامترهای دارای عدم قطعیت انجام شد. با لحاظ قید نرخ تولید $0.05 pu/s$ برای تمام موارد و کنترل‌های مورد بررسی، عملکرد کنترل پیشنهادی (AMPC با رنگ قرمز) با کنترل PID (با رنگ آبی) و کنترل پیش‌بین مدل مرسوم (MPC با رنگ سیاه) مورد مقایسه قرار گرفت. برای MPC مرسوم، افق پیش‌بینی $N_p = 120$ و افق کنترلی $N_c = 7$ انتخاب شد.

جدول ۱. پارامترهای نامی سیستم قدرت سه-ناحیه‌ای [۱].

Area	d [pu/Hz]	$2H$ [pu s]	R [Hz/pu]	T_g [s]	T_t [s]	β [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	$T_{31} = 0.25$ $T_{32} = 0.15$

جدول ۲. مقایسه عددی کنترل‌های مورد بررسی در مورد ۱ (پارامترهای نامی).

ناحیه	نوع کنترل	زمان نشست		حداکثر انحراف (%)	
		ACE	Δf	ACE	Δf
ناحیه ۱	AMPC	6.3	6.2	0.48	2.64
	MPC	8.9	9.6	0.71	2.86
	PID	9.1	12.5	0.63	2.46
ناحیه ۲	AMPC	6.5	7.5	2.34	2.53
	MPC	9.5	9.4	2.79	2.74
	PID	12.2	12	2.32	2.49
ناحیه ۳	AMPC	3.8	6.3	0.11	2.36
	MPC	7.2	9.7	0.50	2.81
	PID	7.5	12.5	0.25	2.19

پارامتر افق پیش‌بینی در MPC مرسوم طوری تنظیم شده تا مصالحه‌ای بین عملکرد حالت نامی و مشخصه‌ی مقاوم ایجاد گردد. بهره‌های کنترل PID در ادامه فهرست شده است:

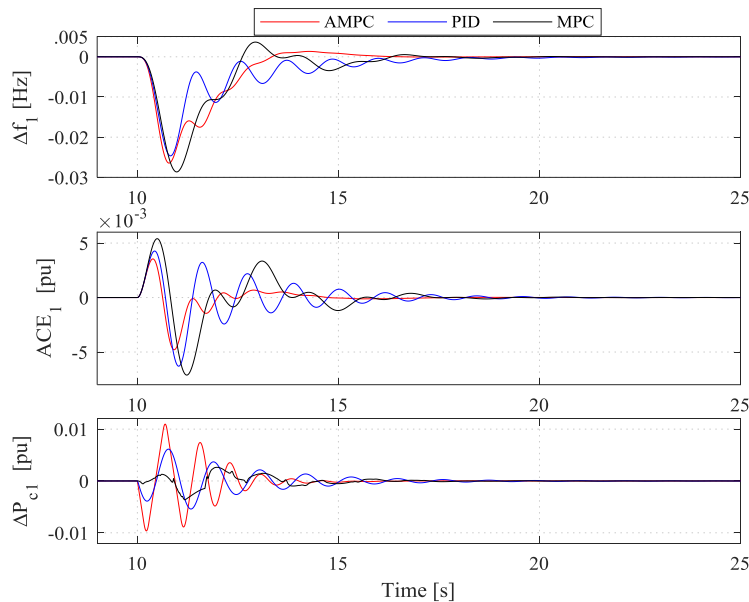
$$K_{P1} = 0.1363, K_{I1} = 0.3443, K_{D1} = 0.2295$$

$$K_{P2} = 0.4258, K_{I2} = 0.5000, K_{D2} = 0.1785$$

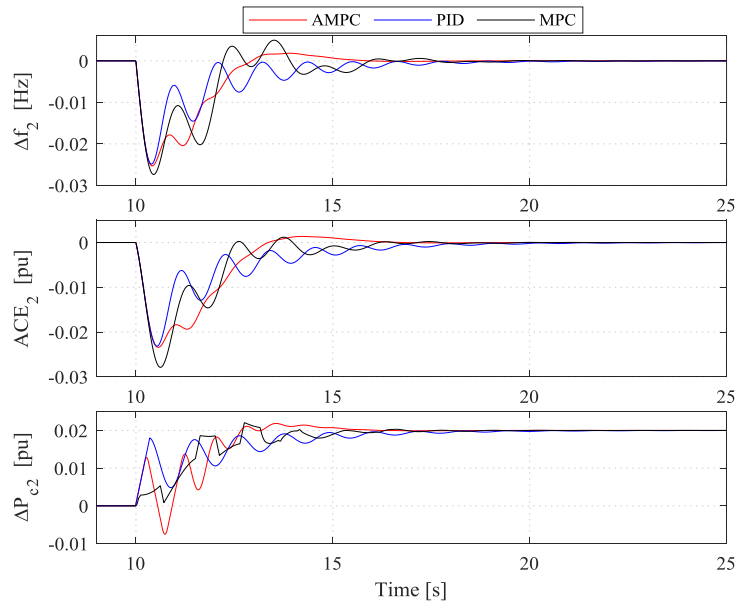
$$K_{P3} = 0.1638, K_{I3} = 0.4382, K_{D3} = 0.3465$$

۴-۱- مورد ۱: عملکرد نامی

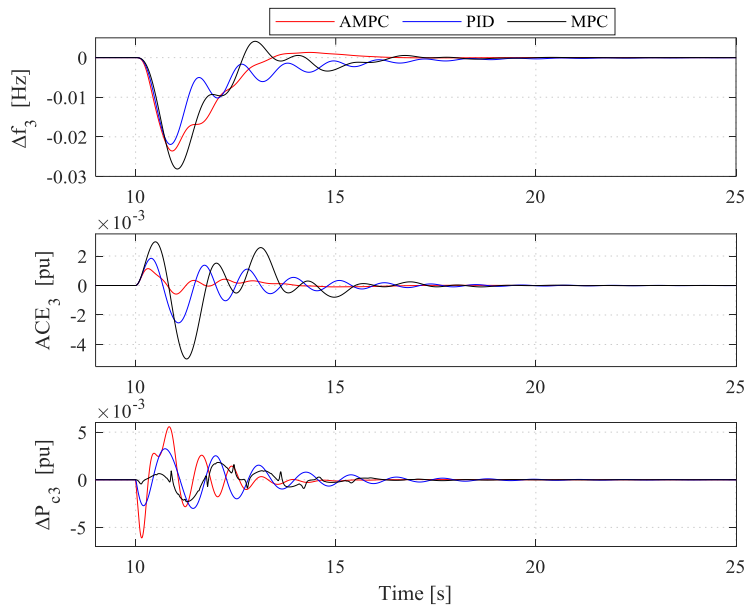
نتایج شبیه‌سازی با پارامترهای نامی برای سیستم قدرت سه-ناحیه‌ای در شکل ۱۶ نشان داده شده است. نتایج برای هر ناحیه از بالا به پایین به این قرار است: انحراف فرکانسی، خطای کنترل ناحیه (خروجی سیستم) و سیگنال کنترل فرکانس-بار. با توجه به نتایج، پاسخ خروجی نواحی ۱ و ۳ با کنترل پیشنهادی AMPC دارای حداکثر انحراف کمتر و سرعت میرایی بیشتر نسبت به کنترل PID و MPC است. برای ناحیه ۲ (ناحیه با اغتشاش بار)، حداکثر انحراف خروجی برای کنترل پیشنهادی و کنترل PID تقریباً برابر است ولی نوسانات پاسخ خروجی با کنترل پیشنهادی در مدت زمان کمتری میرا می‌شود. پاسخ خروجی در هر سه ناحیه برای کنترل MPC مرسوم دارای حداکثر انحراف بیشتری نسبت به کنترل پیشنهادی و کنترل PID است؛ می‌توان با انتخاب افق پیش‌بینی کوچک‌تر و در نتیجه افزایش سرعت پاسخ کنترل‌کننده، مقدار حداکثر انحراف را کاهش داد ولی در این صورت، عملکرد مقاوم کنترل MPC تضعیف می‌شود. با توجه به وقوع اغتشاش بار در ناحیه ۲، انحراف خروجی سیستم در این ناحیه نسبت به نواحی ۱ و ۳ دارای دامنه تغییرات بزرگتری است. مقایسه عددی کنترل پیشنهادی با کنترل MPC و کنترل PID در مورد پارامترهای نامی سیستم در جدول ۲ آورده شده است. معیار زمان نشست در اینجا بازه‌ی زمانی بعد از اعمال اغتشاش بار است که پاسخ برای اولین بار به محدوده‌ی ± 0.0001 حول صفر وارد می‌شود و در آن باقی می‌ماند. با توجه به قابلیت جابدهی قید نرخ تولید در روند محاسبه سیگنال کنترلی، کنترل پیشنهادی و MPC دارای زمان نشست کمتری نسبت به کنترل PID هستند؛ یعنی وجود قید نرخ تولید، عملکرد کنترل PID را بیشتر از عملکرد کنترل پیشنهادی و MPC تنزل می‌دهد. همچنین با توجه به کاهش بار محاسباتی، کنترل پیشنهادی نسبت به MPC از نظر سرعت پاسخ برتری دارد. زمان اجرای شبیه‌سازی برای کنترل PID برابر با 3.55 s، برای کنترل MPC برابر با 12.62 s و برای کنترل پیشنهادی برابر با 4.71 s است. بنابراین، کنترل پیشنهادی به لطف استفاده از توابع لاگر در توصیف دنباله‌ی کنترلی و کاهش مرتبه مدل داخلی سیستم، بار محاسباتی را بطور قابل ملاحظه‌ای نسبت به MPC مرسوم کاهش می‌دهد.



(الف)



(ب)



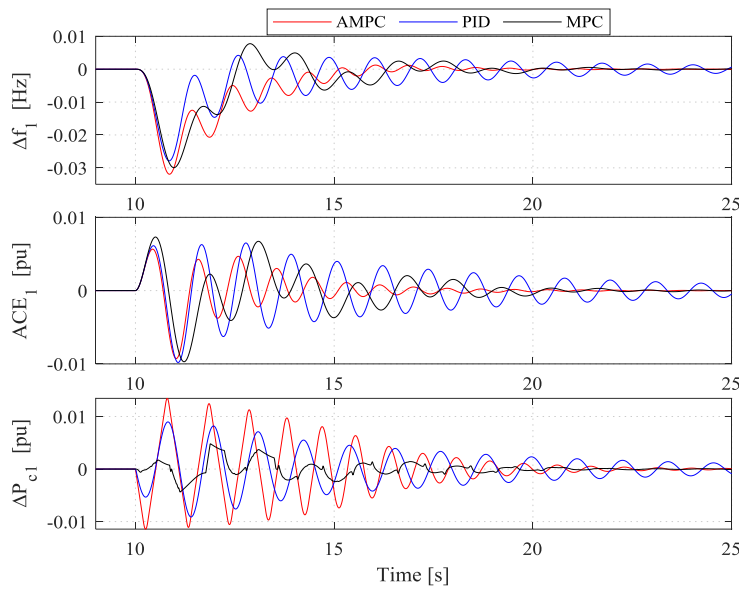
(ج)

شکل ۱۶. پاسخ سیستم در مورد ۱: (الف) ناحیه ۱، (ب) ناحیه ۲ و (ج) ناحیه ۳.

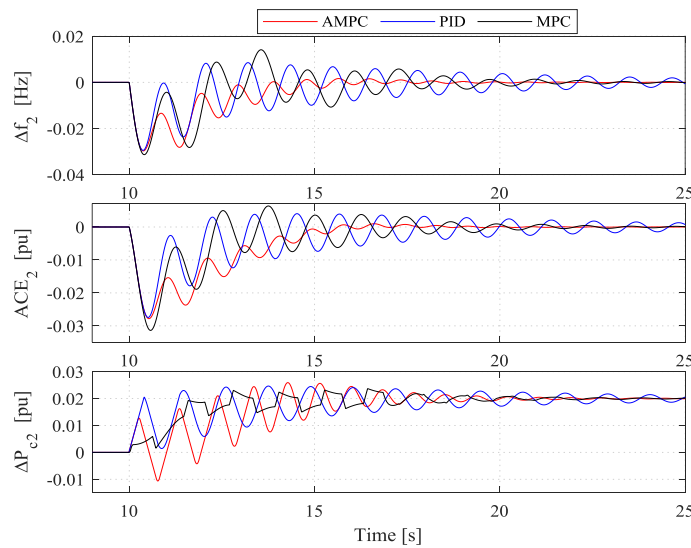
۴-۲- عملکرد مقاوم

در این بخش، مشخصه مقاوم کنترل پیشنهادی در دفع اغتشاش بار پله‌ای در حضور عدم قطعیت پارامتری مورد بررسی قرار می‌گیرد. فرض بر آن است که پارامترهای مدل دارای عدم قطعیتی به میزان 20% حول مقدار نامی هستند. این میزان عدم قطعیت طوری به پارامترهای مدل اعمال می‌شوند تا بدترین سناریوی 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 مقادیر

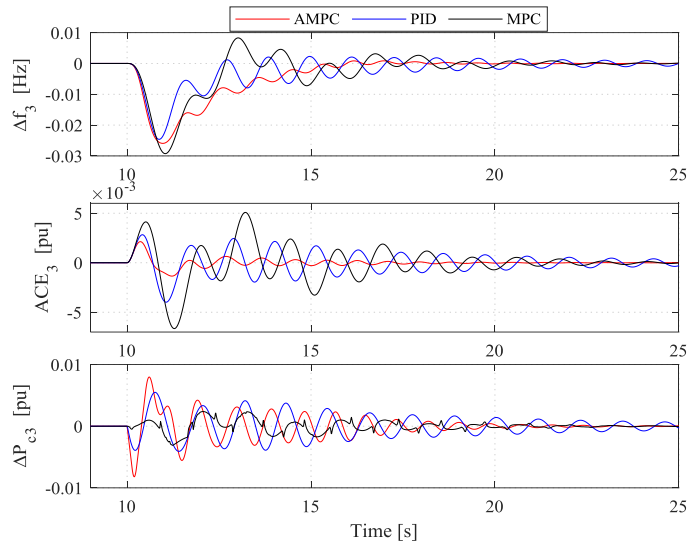
نامی مورد استفاده در طراحی کنترل در نظر گرفته شده است. نتایج شبیه‌سازی این بخش در شکل ۱۷ نشان داده شده است. با توجه به نتایج، هر سه کنترل‌کننده قادر هستند تا اثر اغتشاش بار را در بازه‌ی زمانی منطقی دفع کنند ولی مقادیر حداکثر انحراف و زمان نشست برای تمام کنترل‌های مورد بررسی نسبت به مورد ۱ افزایش پیدا می‌کنند. با وجود عدم قطعیت پارامتری، مقدار زمان نشست پاسخ سیستم به اغتشاش پله‌ای بار برای کنترل PID نسبت به کنترل پیشنهادی و MPC به میزان بیشتری متأثر می‌شود. بعنوان مثال، مقادیر زمان نشست خطای کنترل ناحیه ۲ برای کنترل‌های پیشنهادی، MPC و PID به ترتیب به 1.74، 1.75 و 2.63 برابر مقادیر متناظر نسبت به حالت نامی می‌رسند؛ یعنی مشخصه‌ی مقاوم کنترل PID در دفع اغتشاش بار با وجود عدم قطعیت‌های پارامتری نسبت به کنترل پیشنهادی و MPC ضعیف‌تر است. مقاومت بهتر کنترل پیشنهادی و MPC نسبت به کنترل PID از قابلیت جایدهی قید نرخ تولید در روند تولید سیگنال کنترلی ناشی می‌شود. مقایسه عددی کنترل‌های مورد بررسی برای این مورد در جدول ۳ آورده شده است.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۷. پاسخ سیستم در مورد ۲. (الف) ناحیه ۱، (ب) ناحیه ۲ و (ج) ناحیه ۳.

جدول ۳. مقایسه عددی کنترل‌های مورد بررسی در مورد ۲ (پارامترهای دارای عدم قطعیت).

ناحیه	نوع کنترل	زمان نشست		حداکثر انحراف (%)	
		Δf	ACE	Δf	ACE
ناحیه ۱	مورد بررسی				
	AMPC	11.99	10.81	3.19	0.93
	MPC	15.3	13.73	2.99	0.97
ناحیه ۲	PID	31.29	29.73	2.79	0.98
	AMPC	12.05	11.32	2.97	2.78
	MPC	17.66	16.61	3.13	3.14
ناحیه ۳	PID	34.2	32.04	2.95	2.74
	AMPC	10.87	8.4	2.59	0.21
	MPC	15.37	14.28	2.93	0.67
	PID	29.01	23.48	2.46	0.40

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش کنترل فرکانس-بار جدید بر مبنای الگوریتم پیش‌بین مدل تطبیقی برای یک سیستم قدرت سه-ناحیه‌ای پیشنهاد شد که در آن مدل داخلی با استفاده از روش حداقل مربعات بازگشتی بروزرسانی می‌شود. مدل داخلی ساده شده‌ی سیستم از مرتبه دو در نظر گرفته شد تا بار محاسباتی در روند شناسایی و اجرای کنترل پیش‌بین را کاهش دهد. علاوه بر آن، دنباله‌ی کنترلی نیز به منظور کاهش بار محاسباتی در اجرای آنلاین کنترل‌کننده با استفاده از توابع لاگر توصیف شد.

چندین شبیه‌سازی عددی به منظور تایید کارایی طرح پیشنهادی انجام شد. عملکرد کنترل پیشنهادی در دفع اغتشاش بار پله‌ای در دو مورد پارامترهای نامی و پارامترهای دارای عدم قطعیت مورد بررسی قرار گرفت.

عملکرد کنترل پیشنهادی با عملکرد MPC مرسوم و PID مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که کنترل پیشنهادی در دفع اغتشاش پله‌ای بار بهتر عمل می‌کند، بدین معنی که نوسانات حاصل از اغتشاش بار در بازه‌ی زمانی کوچک‌تری میرا می‌شوند. همچنین، کنترل پیشنهادی نسبت به کنترل PID به میزان کمتری از عدم قطعیت در پارامترهای مدل متأثر می‌شود و نسبت به MPC مرسوم به میزان قابل ملاحظه‌ای بار محاسباتی را کاهش می‌دهد.

طراحی کنترل پیشنهادی با توجه به مدل مجزای هر ناحیه و بدون لحاظ اثر متقابل نواحی مجاور انجام شد. به عنوان یکی از پیشنهادات برای کارهای آتی، می‌توان مدل داخلی کنترل‌کننده را با توجه به ساختار کل سیستم قدرت چند-ناحیه‌ای در نظر گرفت؛ در کنترل پیش‌بین مدل متمرکز حاصل، عواملی همچون اثر تاخیر در انتقال اطلاعات، عملکرد مقاوم و بار محاسباتی قابل بررسی است.

مراجع

- [1] Adel A.B. Rehiara, H. Chongkai, Y. Sasaki, N. Yorino & Y. Zoka, "An Adaptive Internal Model for Load Frequency Control Using Extreme Learning Machine," *TELKOMNIKA*, vol. 16, no. 6, pp. 1-6, 2018.
- [2] P. Kundur, et al, "Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, no. 3, pp. 1387-1401, 2004.
- [3] H. Bevrani, *Robust Power System Frequency Control*, New York: Springer, 2009.
- [4] S. Saxena & Y.V. Hote, "Load Frequency Control in Power Systems via Internal Model Control Scheme and Model-Order Reduction," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 3, pp. 2749 - 2757, 2013.
- [5] S. Saxena & Y.V. Hote, "Decentralized PID load frequency control for perturbed multi-area power systems," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 81, pp. 405-415, 2016.
- [6] A. Kumar, M.N. Anwar & S. Kumar, "Sliding mode controller design for frequency regulation in an interconnected power system," *Protection and Control of Modern Power Systems*, vol. 6, no. 6, 2021.
- [7] S. Jain & Y.V. Hote, "Generalized Active Disturbance Rejection Controller for Load Frequency Control in Power Systems," *IEEE Control Systems Letters*, vol. 4, no. 1, pp. 73-78, 2020.
- [8] T.H. Mohamed, J. Morel, H. Bevrani & T. Hiyama, "Model predictive based load frequency control_design concerning wind turbines," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 43, no. 1, pp. 859-867, 2012.
- [9] M. Shiroei, M.R. Toulabi & A.M. Ranjbar, "Robust multivariable predictive based load frequency control considering generation rate constraint," *International Journal of Electrical Power & Energy*, vol. 46, no. 1, p. 405-413, 2013.
- [10] A.N. Venkat, I.A. Hiskens, J.B. Rawlings & S.J. Wright, "Distributed MPC Strategies With Application to Power System Automatic Generation Control," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 16, no. 6, pp. 1192-1206, 2008.

- [11] T.H. Mohamed, H. Bevrani, A.A. Hassan & T. Hiyama , "Model predictive based load frequency control design," in *16th international conference of electrical engineering*, Busan, Korea, 2010.
- [12] D. Rerkpreedapong, N. Atic & A. Feliachi, "Economy oriented model predictive load frequency control," in *Large engineering systems conference on power engineering*, Montreal, QC, Canada, 2003.
- [13] T.H. Mohamed, J. Morel, H. Bevrani & T. Hiyama, "Model predictive based load frequency control_design concerning wind turbines," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 43, no. 1, pp. 859-867, 2012.
- [14] A.M. Ersdal, L. Imsland & K. Uhlen, "Model predictive load-frequency control," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, no. 1, pp. 777-785, 2016.
- [15] A. Miliadis-Argeitis & M. Khammash, "Adaptive Model Predictive Control of an optogenetic system," in *54th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, Osaka, 2015.
- [16] M.A. Mohamed, A. Zaki Diab, H. Rezk & T. Jin, "A novel adaptive model predictive controller for load frequency control of power systems integrated with DFIG wind turbines," *Neural Computing and Applications*, vol. 32, p. pages7171–7181, 2020.
- [17] G. Vasu, M. Sivakumar & M. Ramalinga Raju, "Optimal model approximation of linear-time invariant systems using Enhanced DE and Improved MPPA algorithm," *Circuits Systems and Signal Processing*, vol. 34, p. 655–663, 2019.
- [18] G. Vasu, M. Sivakumar & M. Ramalingaraju , "Optimal IMC-PID controller design for large-scale power systems via EDE algorithm-based model approximation method," *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, vol. 43, no. 1, p. 59–77, 2021.
- [19] S. Saxena & Y.V. Hote, "Load Frequency Control in Power Systems via Internal Model Control Scheme and Model-Order Reduction," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 3, pp. 2749-2757, 2013.
- [20] J. Singh, C. Kalyan & C.B. Vishwakarma , "Two degree of freedom internal model control-PID design for LFC of power systems via logarithmic approximations," *ISA Transactions*, vol. 72, p. 185–196, 2018.
- [21] B. Sonker, D. Kumar & P. Samuel, "Design of two degree of freedom-internal model control configuration for load frequency control using model approximation," *International Journal of Modelling and Simulation*, vol. 39, no. 1, p. 27–37, 2019.
- [22] S. Saxena, "Load frequency control strategy via fractional-order controller and reduced-order modeling," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 104, pp. 603-614, 2019.
- [23] S. Jain, Y.V. Hote & S. Saxena, "Fractional Order PID Design Using Big Bang–Big Crunch Algorithm and Order Reduction: Application to Load Frequency Control," *Electric Power Components and Systems*, vol. 49, no. 6-7, pp. 624-636, 2021.