Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
P.P 55-66

Vol. 14/ No. 1/ Spring 2025
ISSN 2322-2344
EISSN 2717-1639

Decentralized load frequency control using backstepping method and fuzzy with supervisory control approach

Javad Ansari[1], Assis Professor, Ali Reza Abbasi[2], Asso Professor, Mahmoud Zadehbagheri[3], Asso Professor

[1] Department of Electrical Engineering, NM.C., Islamic Azad University, Noorabad Mamasani, Iran, Email: ansari.engieee@iau.ac.ir
[2] Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Fasa University, Fasa, 74616-86131, Iran, Email: abbasi.a@fasau.ac.
[3] Department of Electrical Engineering, Yasuj Branch, Islamic Azad University, Yasuj, Iran, Email: Ma.Zadehbagheri@iau.ac.ir

Abstract:
This paper proposes a new load frequency control (LFC) method for multi-area power systems using the backstepping algorithm and fuzzy control based on decentralized control strategy. At first, a backstepping controller is designed for the single-area system, and the stability of the method is proved by the Lyapunov method. In addition to, in order to rejects large disturbances and making the system more robust against parameters variations an optimal supplementary fuzzy controller is used for decentralized LFC. For optimal performance of the two controllers, the particle swarm optimization algorithm is used to obtain the control parameters of the two controllers. Coordination and switching between the two controllers is done by a supervisory control strategy. Finally, sseveral simulations are performed on one area system, three area system and four area system. The merits of the proposed scheme include faster response speed, stronger robustness against disturbances and system parameter variations over the state-of the-arts.

Keywords: load frequency control, fuzzy control, backstepping control, supervisory control, Lyapunov method

Date of sending the article: 2024/05/24
Acceptance date of the article: 202411/24

Name of the Corresponding Author: Dr Javad Ansari

Corresponding Author's Address: Department of Electrical Engineering, NM.C., Islamic Azad University, Noorabad Mamasani, Iran

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1404.14.1.6.9]

Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
ص.ص ۶۶-۵۵

Vol. 14 / No. 1/ Spring 2025
ISSN 2322-2344
EISSN 2717-1639

کنترل غیرمتمرکز فرکانس بار با استفاده از روش‌های کنترل پسگام به عقب و فازی با دیدگاه کنترل نظارتی

جواد انصاری, استادیار[۱]، علیرضا عباسی, دانشیار[۲]، محمود زاده باقری، دانشیار[۳]

۱- دانشکده فنی و مهندسی، گروه برق, دانشگاه آزاد اسلامی واحد نورآباد ممسنی، فارس، ایرانansari.engieee@iau.ac.ir
۲- گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه فسا، فسا، فارس، ایران abbasi.a@fasau.ac.ir
۳- دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد یاسوج ، یاسوج، کهگیلویه و بویراحمد، ایران Ma.Zadehbagheri@iau.ac.ir

چکیده:

این مقاله یک روش جدید جهت کنترل فرکانس بار برای سیستم قدرت چند ناحیه‌ای با استفاده از الگوریتم پسگام به عقب و کنترل فازی بر ا ساس ا ستراتژی کنترل غیر متمرکز ارائه می‌دهد. در ابتدا یک کنترلر پ سگام به عقب برای سی ستم تک ناحیه‌ای طراحی می‌شود و پایداری روش توسط روش لیاپانف اثبات می‌شود. علاوه بر این، جهت حذف اغتشاشات بزرگ و مقاوم‌تر کردن بیشترسیستم نسبت به تغییر پارامترها از یک کنترلر فازی بهینه مکمل جهت کنترل غیرمتمرکز فرکانس بار استفاده شده است. جهت عملکرد بهینه دو کنترلر از الگوریتم بهینه سازی جمعیت ذرات برای بد ست آوردن پارامترهای کنترلی دو کنترلر ا ستفاده شده ا ست. هماهنگی و کلیدزنی بین دو کنترلر پسگام به عقب و کنترلر فازی توسط استراتژی کنترل نظارتی انجام شده است. نتایج شبیه‌سازی برای سیستم تک ناحیه‌ای، سه ناحیه‌ای و چهار ناحیه‌ای نشان‌دهنده مزایای روش پیشنهادی شامل سرعت پا سخ سریع‌تر و همچنین مقاوم بودن بیشتر نسبت به اغتشاشات و تغییرات پارامتری سیستم نسبت به روش‌های دیگر می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: کنترل فرکانس بار, کنترل فازی, کنترل پسگام به عقب، کنترل نظارتی، روش لیاپانف

تاریخ ارسال مقاله :۱۴۰۳/۰۳/۰۴
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۹/۰۴

نام نویسنده‌ی مسئول : دکتر جواد انصاری (ansari.engieee@iau.ac.ir)
نشانی نویسنده ی مسئول : - دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نورآباد ممسنی ، نورآباد ممسنی، فارس، ایران

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1404.14.1.6.9]

۱- مقدمه

کنترل فرکانس در خلال تغییرات بارو منابع همواره مشکل اساسی در بهره برداری سیستم قدرت بوده است که مستلزم این است که تعادل بین تولید و مصرف برقرار باشد(Shankar, Ansari , Kundur, Rahmani, Shiroei و همکاران). برای یک سیستم قدرت چند ناحیه‌ای که از طریق خطوط ارتباطی به هم متصل شده‌اند، هدف از کنترل فرکانس بار نگهداری خطای حالت دایمی صفر و مینیمم کردن فلوی توان خطوط ارتباطی برنامه‌ریزی شده بین نواحی مجاور متصل به هم و تغییرات گذرای فرکانس نواحی می‌باشد. از طرفی تبادل توان بین نواحی متصل به هم و عدم قطعیت‌های ژنراتورهای تولید شده، پارمترهای مدل و تقاضای توان مسئله کنترل فرکانس بار را پیچیده‌تر می‌کند (Pandey, Ansari و همکاران). تاکنون روش‌های کنترلی متفاوت جهت حل مسئله ای LFC ارائه شده‌است. در ابتدا از کنترلرهای خطی متعارف همچون PID با ساختار پارامترهای ثابت استفاده شد که معمولاً برای یک نقطه کاری مشخص تنظیم می شدند. اما چون مشخصات عناصر سیستم قدرت غیرخطی می باشد این کنترلرها قادر به عملکرد دلخواه برای شرایط کار دیگر نبودند بهمین خاطر از تکنیک‌های کنترل هوش مصنوعی جهت تنظیم بهینه پارامترهای کنترلر PID استفاده می‌شد(Kavousi-Fard, Farahani, Tan, Ansari و همکاران). در سال‌های اخیر استراتژی‌های کنترلی توسعه یافته جدیدی همچون کنترل توزیع شده (Benysek, Tan و همکاران)، کنترل بهینه (Kumari و همکاران)، کنترل مقاوم (Bensenouci و همکاران)، کنترل فازی (Yousefو همکاران)، کنترل پیش‌بین (Ma, Abbasi و همکاران) و الگوریتم‌های کنترل هیبریدی(Ramlal و همکاران)، جهت طراحی مسئله LFC به کار برده شده‌است. در روش‌های ارائه شده بالا سیستم چند عاملی توزیع شده و سیستم پاسخ تقاضای فعال غیرمتمرکز آماری جهت طراحی LFC سیستم قدرت چند ناحیه‌ای به ترتیب در (Benysek و همکاران) و (Tan و همکاران) ارائه شده‌است. در (Tan, و همکاران) کنترل فرکانس بار غیرمتمرکز برای سیستم های قدرت چند ناحیه‌ای مورد مطالعه قرار گرفته است. روشی برای تجزیه و تحلیل پایداری یک سیستم قدرت چند ناحیه‌ای تحت یک LFC غیرمتمرکز که با درنظرگرفتن ساختار ذاتی سیستم قدرت چند ناحیه‌ای مشتق شده است. این روش، ماتریس انتقال محلی را از شبکه جریان برق خطوط ارتباطی بین ناحیه‌ای جدا می‌کند و تأثیرات شبکه جریان برق خط ارتباطی بین ناحیه‌ای و کنترل کننده‌های فرکانس بار محلی بر روی سیستم قدرت را بررسی می‌کند که این امکان را فراهم می‌کند تا کنترل کننده LFC محلی را برای هر منطقه با نادیده گرفتن شبکه جریان برق خط ارتباطی تنظیم کند. در مرجع (Tan و همکاران) خطاهای پارامتری (عدم قطعیت‌ها) در نظر گرفته نشده است. در مرجع(Kumari و همکاران) از یک رگولاتور خطی درجه دوم یرای طراحی LFC استفاده شده است که پارامترهایش توسط الگوریتم بهینه-سازی جمعیت ذرات تنظیم می‌شود. مرجع(Bensenouci و همکاران) یک LFC مقاوم مبتنی بر تکنیک کنترل H بی‌نهایت ارائه می‌دهد که از الگوریتم ناتساوی ماتریس خطی برای بهبود مقاوم بودن سیستم علیه عدم قطعیت‌های سیستم قدرت استفاده می کند. بر اساس مرجع (Yousef, و همکاران)، کنترل فرکانس بار آنلاین با دیدگاه منطق فازی و الگوریتم تطبیقی در طراحی LFC استفاده شده است. مرجع(Ma و همکاران)، از کنترل پیش‌بین تعمیم یافته خطی جهت حل مسله کنترل فرکانس بار استفاده کرده است. در مرجع(Abbasi و همکاران)، از کنترل پیش‌بین مدل مبتنی بر ناتساوی ماتریس خطی (LMI) همراه با تاخیر مخابراتی در سیگنال کنترل در طراحی LFC استفاده کرده است. در مرجع (Ramlal و همکاران) از یک کنترلر فازی مبتنی بر H_∞ (FILC) با روش یادگیری تکراری در طراحی LFC غیرمتمرکزاستفاده کرده است. مرجع (Bevrani و همکاران) از نفوذ بالای مزارع بادی جهت تنظیم فرکانس همراه با هوش مصنوعی استفاده کرده است. در مرجع (Saxena و همکاران) LFC برای سیستم تک ناحیه ای از طریق دیدگاه کنترل مدل داخلی مبتنی بر کاهش مرتبه مدل ارائه شده است. جهت بکارگیری اطلاعات توان خطوط ارتباطی، پارامتر های کنترلر PID بر اساس دانش سیستم آبشاری و پورت هامیلتونین در (Cai و همکاران) به دست آمده است و نتایج شبیه سازی پاسخ سریع‌تر و مقاوم‌تر بودن آن را در مقایسه با بقیه PID دیگر نشان می‌دهد. با این حال روش‌های تنظیم پارامتری منجر به بار محاسباتی زمان حقیقی زیاد شده که باعث جلوگیری از اعمال این روش‌ها در کاربردهای عملی می‌شود. علاوه بر این سرعت پاسخ و مقاوم بودن چنین کنترلرهای به خاطر محدودیت ذاتی کنترلرهای PID محدود می‌باشد. تکنیک‌های کنترلی ساختار متغیر به خاطر مزایای سرعت پاسخ سریع و عملکرد مقاوم بالا مورد توجه بسیاری از مهندسین قدرت قرار گرفته است. در میان این کنترلرها، دینامیک مدل صرفنظر از پارامترهای سیستم و اغتشاشات می‌تواند طراحی شود که منجر به افزایش مقاوم بودن کنترل مدل لغزشی می‌شود. (Al-Hamouz, Ansari و همکاران) در مرجع(Liao و همکاران) از یک کنترلر مد لغزشی مرتبه دوم (SOSMC)همراه با مشاهده‌گر حالت جهت تخمین اغتشاش برای سیستم قدرت چند ناحیه‌ای استفاده کرده است.Kishor Nand از کنترل مد لغزشی مبتنی بر H_∞ در طراحی LFC بهره برده‌است. (Prasad) .همچنین در (Qian و همکاران) از ترکیب شبکه عصبی و مد لغزشی در طراحی LFC استفاده شده است. با این حال پدیده چترینگ در سیگنال کنترل ورودی عیب روش‌های ذکر شده می‌باشد. تحقیقات بسیار کمی در مورد کاربرد الگوریتم پسگام به عقب در طراحی مسئله LFC انجام شده‌است. در (Du و همکاران) از کنترل مدلغزشی مبتنی بر روش پسگام به عقب با استفاده از ایده مرکز فرکانس اینرسی در یک سیستم دوناحیه ای متصل بهم AC/DC بهره می‌برد. بر اساس(Wu و همکاران)، کنترل

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1404.14.1.6.9]

مد لغزشی پایانه مبتنی بر پسگام به عقب با هدف گرفتن بیشینه انرژی باد برای DFIG طراحی شده است. در(Dehkordi و همکاران) جهت تنظیم بار و فرکانس میکروگرید صرفنظر از دینامیک بار از کنترل مد لغزشی مرتبه بالا استفاده شده‌است. تحقیقات موثر بودن و مقاوم بودن چنین روش‌هایی را در برابر تغییرات بار و عدم قطعیت‌ها نشان می‌دهد. با اینحال ایده پسگام به عقب تاکنون در طراحی مسله LFC استفاده نشده است.

بقیه مقاله به صورت زیر سازماندهی شده است: مدل دینامیکی کنترل فرکانس بار سیستم قدرت در بخش دو ارائه می شود. در بخش سه روش پیشنهادی و تحلیل پایداری به روش لیاپانف اثبات می شود. در بخش چهار نتایج شبیه سازی بر روی سیستم تک ناحیه‌ای، سه ناحیه‌ای و چهارناحیه‌ای نشان داده می‌شود و در بخش پنج نتیجه‌گیری ارائه می‌شود.

۲- مدلسازی دینامیکی سیستم قدرت چند ناحیه متصل بهم

مدل کنترل فرکانس بار ناحیه iام یک سیستم قدرت چند ناحیه‌ای در شکل ۱ نشان داده شده‌است. مدل سیستم شامل گاورنر، واحد توربین ژنراتور، جرم چرخان و بار می باشد. برای سیستم تحت مطالعه متغیرهای حالت عبارتند از: $\Delta P_{tie,i}$, ΔP_g, ΔP_{mi}, Δf_i که به ترتیب عبارتند از تغییرات فرکانس بر حسب هرتز، تغییرات توان خروجی ژنراتور، تغییرات وضعیت شیر گاورنر و تغییرات توان خط ارتباطی بین ناحیه i و بقیه نواحی معادلات دیفرانسیل خطی ناحیه iام به صورت زیر می‌باشد(Liao و همکاران).

$$\Delta\dot{f}_i = -\frac{1}{T_{pi}}\Delta f_i + \frac{K_{pi}}{T_{pi}}\Delta P_{mi} - \frac{K_{pi}}{T_{pi}}\Delta P_{tie} - \frac{K_{pi}}{T_{pi}} \quad (1)$$

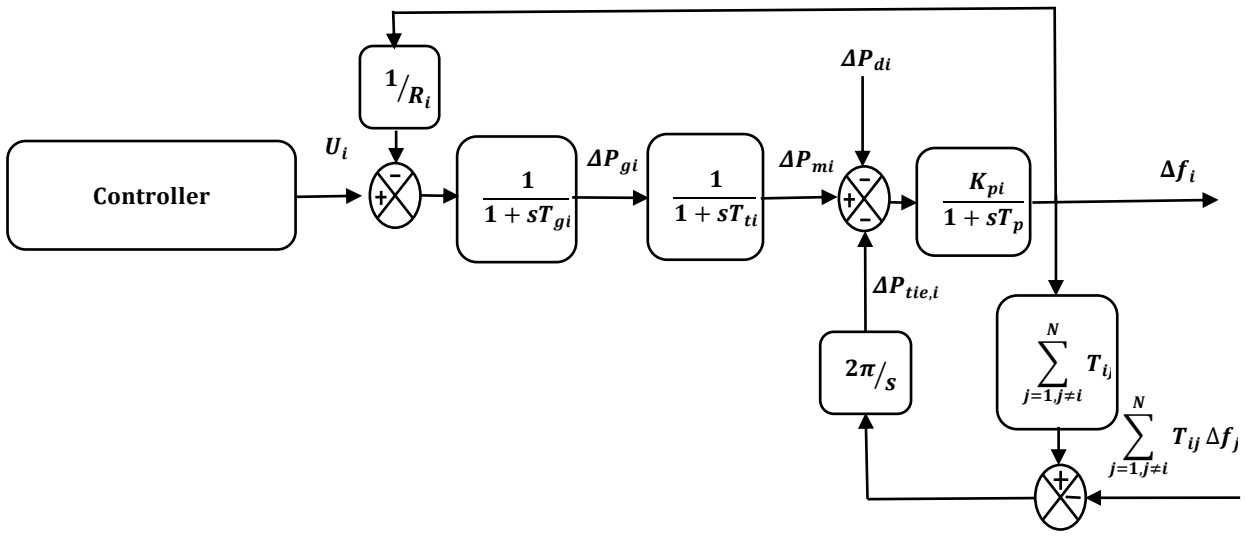
$$\Delta\dot{P}_{mi} = -\frac{1}{T_{ti}}\Delta P_{mi} + \frac{1}{T_{ti}}\Delta P_{gi} \quad (2)$$

$$\Delta\dot{P}_{gi} = -\frac{1}{R_i T_{gi}}\Delta f_i - \frac{1}{T_{gi}}\Delta P_{gi} + \frac{u_i}{T_{gi}} \quad (3)$$

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

که i شماره نواحی و N تعداد نواحی می‌باشد. T_{pi}, K_{pi} گین و ثابت زمانی سیستم قدرت می‌باشد. T_{ti} T_{gi} , به ترتیب ثابت زمانی گاورنر و ثابت زبانی توربین سرعت می‌باشد. u_i و ΔP_{di} سیگنال ورودی کنترلی و تغییرات ناگهانی بار ناحیه iام بترتیب می باشد. R_i اشاره به پارامتر تنظیم سرعت گاورنر دارد. T_{ij} ضریب سنکرون کننده بین ناحیه i و jاست. نویسندگان بسیاری از این مدل LFC در کارهای خود استفاده کرده اند. بر اساس مدلLFC ارائه شده در معادلات ۱ تا ۴ در این مقاله یک استراتژی کنترل نظارتی مبتنی بر روش پس گام به عقب فازی جهت کنترل فرکانس بار طراحی می شود.

.



شکل ۱: مدل کنترل فرکانس بار ناحیه iام در یک سیستم قدرت N ناحیه‌ای

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1404.14.1.6.9]

۳- استراتژی کنترلی پیشنهادی

در این بخش ابتدا با در نظرگرفتن دیدگاه کنترل غیرمتمرکز ($\Delta P_{tie,i}=0$) یک کنترلر مقاوم به روش مرحله به مرحله بازگشتی برای سیستم تک ناحیه ای سه حالته طراحی می شود. سپس جهت حذف سریع اغتشاشات بزرگ یک کنترلر فازی بهینه و سریع طراحی می شود و در نهایت هماهنگی این دو کنترلر توسط دیدگاه کنترل نظارتی انجام می شود.

۳-۱- استراتژی کنترلی پسگام به عقب

در این بخش هدف طراحی کنترل فیدبک حالت خطی برای سیستم قدرت تک ناحیه ای می باشد به گونه ای که سیستم حلقه بسته نشان داده شده در شکل ۱ پایدارمجانبی شود. پس گام به عقب یک دیدگاه مبتنی بر لیاپانوف بازگشتی می‌باشد که در اوایل دهه ۱۹۹۰ توسط Krstic, Kanellakopoulos و Kokotovic in ارائه شد(Krstic و همکاران). ایده پس گام به عقب شامل طراحی کنترلر به صورت بازگشتی با در نظر گرفتن بعضی از حالات به عنوان کنترل‌های مجازی و طراحی قوانین کنترل میانی برای آنها می باشد. در این مقاله جهت اعمال روش روی سیستم مقیاس بزرگ و به منظور کاهش بار محاسباتی استراتژی کنترل غیر متمرکز استفاده می شود. بر این اساس از اطلاعات حالت محلی در طراحی کنترلر استفاده می شود و از ارتباط بین نواحی صرف نظر می شود .($\Delta P_{tie,i}=0$) (Zhang, Kavousi-Fard و همکاران) با در نظر گرفتن دیدگاه استراتژی کنترل غیر متمرکز و اختصاص متغیرهای حالت ذکر شده در بخش دو به x_1 x_2 و x_3 معادلات سیستم قدرت ناحیه iام بترتیب بصورت حالات زیر در نظر گرفته می شود.

$$\dot{x}_1 = -a_1 x_1 + a_2 x_2 - a_2 \Delta P_{di} \quad (5)$$
$$\dot{x}_2 = -a_3 x_2 + a_3 x_3 \quad (6)$$
$$\dot{x}_3 = -a_4 x_1 - a_5 x_3 + a_5 u_i \quad (7)$$

با

$$a_1 = \frac{1}{T_{pi}},\ a_2 = \frac{K_{pi}}{T_{pi}},\ a_3 = \frac{1}{T_{ti}},\ a_4 = \frac{1}{R_i T_{gi}},\ a_5 = \frac{1}{T_{gi}}$$

که x_1 x_2 و x_3 حالات سیستم بترتیب معادل $\Delta P_{gi}, \Delta P_{mi}, \Delta f_i$ می باشند. هدف کنترلی طراحی قانون کنترلی فیدبک حالت می باشد بگونه ای که سیستم را پایدار مجانبی کند. فرایند طراحی کنترلر پسگام به عقب در سه مرحله صورت می گیرد(Abbasi و همکاران).

مرحله۱:

با تغییر متغیر $z_1 = x_1$ در رابطه(۵) دینامیک مختصات جدید بصورت زیر خواهد شد(Dehkordi و همکاران).

$$\dot{z}_1 = -a_1 x_1 + a_2 x_2 - a_2 \Delta P_{di} \quad (8)$$

x_2 را بعنوان یک متغیر کنترلی درنظر می گیریم و یک قانون کنترل مجازی α_1 برای رابطه (۸) تعریف می‌شود سپس اختلاف بین کنترل های مجازی و واقعی با متغیر خطای z_2 تعریف می‌شود.

$$z_2 = x_2 - \alpha_1 \quad (9)$$

بنابراین از دیدگاه متغیر حالت‌های جدید، رابطه(۸) بصورت زیر بازنویسی می‌شود.

$$\dot{z}_1 = -a_1 x_1 + a_2 (z_2 + \alpha_1) - a_2 \Delta P_{di} \quad (10)$$

در این مرحله هدف طراحی قانون کنترل مجازی α_1 است بگونه‌ای که $z_1 \to 0$, بنابراین تابع لیاپانف کنترلی بصورت رابطه(۱۱) تعریف می شود.

$$v_1 = \frac{1}{2} z_1^{\,2} \quad (11)$$

با مشتق گیری از رابطه (۱۱) خواهیم داشت.

$$\dot{v}_1 = z_1 (a_2 \alpha_1 - a_1 x_1) + a_2 z_1 z_2 - a_2 z_1 \Delta P_{di} \quad (12)$$

اکنون می توان یک کنترل مجازی مناسب را بگونه ای انتخاب کرد که سیستم مرتبه اول پایدار شود.

$$\alpha_1 = \frac{(a_1 - c_1)}{a_2} x_1 + \Delta P_{di} \quad (13)$$
$$\dot{\alpha}_1 = \frac{(a_1 - c_1)}{a_2} (-a_1 x_1 + a_2 x_2 - a_2 \Delta P_{di}) + \Delta \dot{P}_{di} \quad (14)$$

که c_1 یک ثابت مثبت است. در نتیجه رابطه (۱۲) بصورت زیر خواهد شد.

$$\dot{v}_1 = -c_1 z_1^{\,2} + a_2 z_1 z_2 \quad (15)$$

واضح است که اگر $z_2 = 0$ آنگاه $\dot{v}_1 = -c_1 z_1^{\,2}$ در نتیجه همگرایی z_1 بصورت مجانبی بسمت صفر تضمین می‌شود (Ansari و همکاران).

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1404.14.1.6.9]

مرحله ۲:

دینامیک خطا برای $z_2 = x_2 - \alpha_1$ بصورت رابطه (۱۶) بدست می آید.

$$\dot{z}_2 = \dot{x}_2 - \dot{\alpha}_1 = -a_3 x_2 + a_3 x_3 - \frac{(a_1 - c_1)}{a_2}(-a_1 x_1 + a_2 x_2 - a_2 \Delta P_{di}) - \Delta \dot{P}_{di} \quad (16)$$

در این رابطه x_3 بعنوان ورودی کنترل مجازی دیده می‌شود. در ادامه α_2 بعنوان قانون کنترل مجازی تعریف می‌شود. z_3 متغیر خطا فرض می‌گردد که نمایانگر اختلاف کنترل‌های واقعی و مجازی است.

$$z_3 = x_3 - \alpha_2 \quad (17)$$

که رابطه (۱۶) بصورت زیر در می‌آید.

$$\dot{z}_2 = -a_3 x_2 + a_3 (z_3 + \alpha_2) - \frac{(a_1 - c_1)}{a_2}(-a_1 x_1 + a_2 x_2 - a_2 \Delta P_{di}) - \Delta \dot{P}_{di} \quad (18)$$

هدف کنترلی $z_2 \to 0$ می‌باشد. تابع کنترلی لیاپانف بصورت زیر تعریف می‌گردد.

$$v_2 = v_1 + \frac{1}{2} {z_2}^2 \quad (19)$$

با مشتق گیری از (۱۹) خواهیم داشت.

$$\dot{v}_2 = \dot{v}_1 + z_2 \dot{z}_2 = -c_1 z_1^2 + a_2 z_1 z_2 + z_2(-a_3 x_2 + a_3 x_3 - \frac{(a_1 - c_1)}{a_2}(-a_1 x_1 + a_2 x_2 - a_2 \Delta P_{di}) - \Delta \dot{P}_{di}) = -c_1 z_1^2 + z_2(a_2 z_1 + a_3 \alpha_2 - a_3 x_2 - \frac{(a_1 - c_1)}{a_2}(-a_1 x_1 + a_2 x_2 - a_2 \Delta P_{di}) - \Delta \dot{P}_{di}) + a_3 z_2 z_3 \quad (20)$$

اکنون می توانیم کنترل مجازی α_2 جهت حذف بعضی از ترم‌های مرتبط با x_1, z_1 و x_2 انتخاب می‌شود در حالی که ترم های شامل z_3 نمی توانند حذف شوند.

$$\alpha_2 = -\frac{a_2}{a_3} z_1 - \frac{c_2}{a_3} z_2 + x_2 + \frac{(a_1 - c_1)}{a_2 a_3}(-a_1 x_1 + a_2 x_2 - a_2 \Delta P_{di}) + \frac{1}{a_3} \Delta \dot{P}_{di} \quad (21)$$

که c_2 یک ثابت مثبت است. بنابراین مشتق زمانی v_2 بصورت رابطه زیر تبدیل می‌شود.

$$\dot{v}_2 = -c_1 z_1^2 - c_2 z_2^2 + a_3 z_2 z_3 = -\sum_{i=1}^{2} c_i {z_i}^2 + a_3 z_2 z_3 \quad (22)$$

واضح است که اگر $z_3 = 0$ آنگاه $\dot{v}_2 = -\sum_{i=1}^{2} c_i {z_i}^2$ بنابراین هردوی z_1 و z_2 بصورت مجانبی به سمت صفر همگرا می‌شوند.

مرحله ۳:

در ادامه در رابطه (۷) دینامیک خطا را برای $z_3 = x_3 - \alpha_2$ بدست می آوریم.

$$\dot{z}_3 = -a_4 x_1 - a_5 x_3 + a_5 u_i - \frac{\partial \alpha_2}{\partial x_1}(-a_1 x_1 + a_2 x_2 - a_2 \Delta P_{di}) - \frac{\partial \alpha_2}{\partial x_2}(-a_3 x_2 + a_3 x_3) \quad (23)$$

در این رابطه ورودی کنترلی واقعی u_i ظاهر می شود که در اختیار ما می باشد. در اینجا هدف بدست آوردن ورودی کنترلی واقعی می باشد بگونه ای که z_1, z_2 و z_3 به سمت صفر همگرا شوند. تابع کنترلی لیاپانف بصورت زیر انتخاب شود.

$$v_3 = v_2 + \frac{1}{2} {z_3}^2 \quad (24)$$

که مشتق زمانی اش بصورت رابطه (۲۵) در می آید.

$$\dot{v}_3 = -\sum_{i=1}^{2} c_i {z_i}^2 + z_3(-a_4 x_1 - a_5 x_3 + a_5 u_i - \frac{\partial \alpha_2}{\partial x_1}(-a_1 x_1 + a_2 x_2 - a_2 \Delta P_{di}) - \frac{\partial \alpha_2}{\partial x_2}(-a_3 x_2 + a_3 x_3)) \quad (25)$$

با در نظرگرفتن $\dot{v}_3 \leq 0$ قانون کنترل نهایی بصورت رابطه (۲۶) ظاهر خواهد شد.

$$u_{bs} = u_i = -\frac{c_3}{a_5} z_3 - \frac{a_4}{a_5} x_1 + x_3 - \frac{a_3}{a_5} z_2 + \frac{1}{a_5}(\frac{\partial \alpha_2}{\partial x_1} \dot{x}_1 + \frac{\partial \alpha_2}{\partial x_2} \dot{x}_2) \quad (26)$$

که c_3 یک ثابت مثبت است. در نهایت مشتق تابع کنترل لیاپانف بصورت رابطه (۲۷) بدست می آید.

$$\dot{v}_3 = -\sum_{i=1}^{3} c_i {z_i}^2 \quad (27)$$

آنگاه قضیه لاسال محدودیت یکنواخت سراسری z_1, z_2 و z_3 را تضمین می کند. در نتیجه هنگامی که $t \to \infty$ آنگاه $z_1, z_2 \to 0$ و z_3. چون $z_1 = x_1$ همچنین x_1 محدود می باشد و $\lim_{t \to \infty} x_1 = 0$ محدودیت x_2 از محدودبودن α_1 در رابطه (۱۳) ناشی می شود و این حقیقت که $x_2 = z_2 + a_1$ بطور مشابه، محدودبودن x_3 از محدودیت α_2 در رابطه (۲۱) ناشی می‌شود و این حقیقت که $x_3 = z_3 + a_2$ ازترکیب این رابطه با رابطه (۲۶) نتیجه می‌شود که ورودی کنترلی u_i هم محدود می‌باشد. c_3, c_2, c_1 پارامترهای تنظیمی کنترلر پسگام به عقب می‌باشند (Abbasi و همکاران).

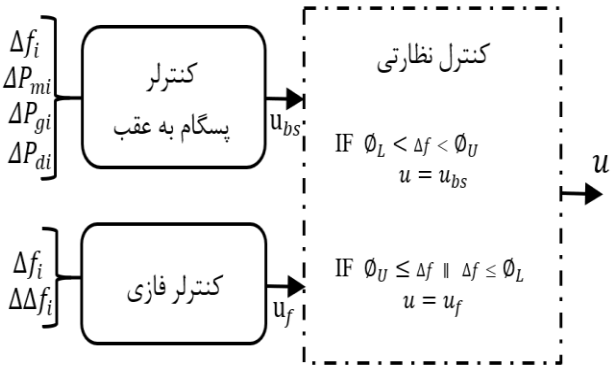
۳-۲- استراتژی کنترل فازی و نظارتی

کنترل نظارتی در چارچوب استراتژی سوئیچینگ به مدیریت سطح بالای سوئیچینگ بین سیستم‌ها یا حالت‌های کنترل مختلف در چارچوب کنترل بزرگ‌تر اشاره دارد. این امر به ویژه در سیستم‌هایی که بیش از حد فعال می‌شوند مرتبط است، به این معنی که آنها دارای محرک‌هایی بیش از حد لازم برای کنترل وضعیت سیستم هستند. کنترل نظارتی منطق و شرایطی را تعیین می کند که تحت آن سیستم بین کنترلرها

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1404.14.1.6.9]

یا استراتژی های کنترلی مختلف سوئیچ می کند .در اصل، کنترل نظارتی در استراتژی سوئیچینگ در مورد تصمیم گیری هوشمندانه در مورد زمان و نحوه تغییر بین حالت های مختلف کنترل برای حفظ عملکرد و پایداری بهینه سیستم است(Shiroei و همکاران). جهت حذف سریع اغتشاشات بزرگ معمولا از یک کنترلر فیدبک با گین بالا (C_3, C_2, C_1) استفاده می‌شود اما چنین کنترلرهایی باعث ایجاد پاسخ نوسانی و افزایش فراجهش سیگنال می‌شوند. جهت حل این مشکل در این مقاله از روش کلیدزنی مد های کنترلی استفاده می شود بگونه ای که در لحظه اغتشاش شدیدکنترلر فازی وارد عمل شده و به مرور زمان این کنترلر بدون اثرانتگرالی پایدار یا خطای حالت دایمی از مدار خارج می شود. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است. استراتژی کنترلی در اینحالت شامل کنترل نظارتی دو کنترلر پسگام به عقب و کنترلر فازی می‌باشد.

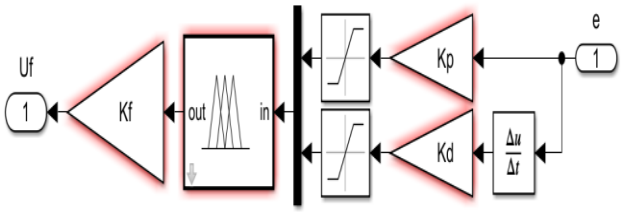


شکل ۲: استراتژی کنترلی پسگام به عقب فازی پیشنهادی

برای خطاهای فرکانسی بزرگ اما محدود، کنترل فازی با مزیت حذف اغتشاش زمان محدود انتخاب می شود در حالی که برای خطاهای کوچک کنترلر پسگام به عقب خطای سیستم را به صفر همگرا می کند. برای خطاهای محدود، ثابت های $\emptyset_U$ و $\emptyset_L$ را تعریف می‌کنیم. که اشاره به کران های بالا و پایین تغییرات فرکانس دارند. قوانین حاکم بر کنترل نظارتی بصورت رابطه (۲۸) می باشد. بسته به رابطه (۲۸) کنترلر نظارتی یا کنترلر پسگام به عقب یا کنترلر فازی را انتخاب می‌کند(Ansari و همکاران).

$$\text{اگر } \emptyset_L < \Delta f < \emptyset_U \quad \text{آنگاه } u = u_{bs} \qquad (28)$$
$$\text{اگر } \emptyset_U \leq \Delta f \parallel \Delta f \leq \emptyset_L \quad \text{آنگاه } u = u_f$$

شکل ۳ ساختار کنترلر فازی را نشان می‌دهد. وظیفه ضرایب مقیاس بندی در ورودی کنترل کننده فازی (k_p, k_d) نرمالیزه کردن مقادیر ورودی در بازه [-۱،۱] می باشد. k_f گین های خروجی کنترل کننده می باشد. تنظیم مناسب این ضرایب عملکرد بهینه کنترل کننده فازی را مشخص می کند. به علت داشتن پارامتر های تنظیمی کمتر توابع عضویت گوسی (میانگین و واریانس) نسبت به توابع عضویت مثلثی، از توابع عضویت گوسی در کنترل کننده فازی استفاده شده است. که این باعث کاهش ابعاد مسئله بهینه‌سازی می‌شود.



شکل ۳: ساختار کنترلر فازی

جدول(۱): قوانین کنترل کننده فازی

Δe	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	-	-	-	NB	NM	-	-
NM	-	-	-	NM	-	-	-
NS	-	-	-	NS	-	-	PM
Z	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
PS	NM	-	-	PS	-	-	-
PM	-	-	-	PM	-	-	-
PB	-	-	PM	PB	-	-	-

در طراحی کنترل کننده‌های فازی از توابع عضویت گوسین متقارن استفاده شده است. توابع عضویت استفاده شده از هفت مجموعه فازی تشکیل شده است. برای یک سیستم با داشتن دو متغیر کنترلی خطا و تغییرات خطای فرکانسی ($e, \Delta e$) و با داشتن هفت متغیر زبانی برای هر متغیر حداکثر چهل و نه قانون خواهیم داشت. جهت عملکرد سریعتر کنترل کننده فازی فقط هفده قانون از این چهل و نه قانون درطراحی کنترل کننده فازی پیشنهاد شده استفاده شده است. جدول(۱) قوانین استفاده شده در کنترل کننده‌های فازی طراحی شده را نشان می‌دهد. تنظیم پارامترهای کنترل کننده منطق فازی طبق تابع هدف ارایه شده در رابطه(۲۹) توسط الگوریتم بهینه‌سازی جمعیت ذرات (PSO) انجام می‌شود بطوری که تابع هدف کمینه شود. به عنوان تابع هدفی مناسب و یکی از مشخصه‌های حوزه زمان سیستم (مانند زمان صعود یا ماکزیمم نوسان) می‌تواند بکار رود. برای سیستم تحت بررسی, انتگرال قدر مطلق خطای حوزه زمان تغییرات فرکانس به عنوان یک معیار موثر برای تابع هدف می‌تواند در نظر گرفته‌شود. از آنجایی که میرایی هرچه سریعتر نوسانات پس از اغتشاشات مدنظر است (هر چند که انتگرال خطا کم باشد) برای تاثیر بیشتر زمان میرایی نوسانات تابع هدف در زمان t ضرب می‌شود(Ansari و همکاران).

$$J = \int_0^{tsim} t\left(\sum_{i=1}^{N} |\Delta f_i|\right) dt \qquad (29)$$

که tsim زمان شبیه‌سازی و Δf تغییرات فرکانسی ناحیه i ام می‌باشد. متغیرهای بهینه‌سازی پارامترهای کنترلی دو کنترلر پسگام به عقب

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1404.14.1.6.9]

(c_3, c_2, c_1) و کنترلر فازی (K_f, K_d, K_p) می‌باشند. جدول ۲ پارامترهای کنترلی بهینه شده را نشان می‌دهد. بدلیل کمبود جا از ذکر الگوریتم بهینه‌سازی خودداری می‌شود. (Ansari و همکاران).

جدول(۲): پارامتر های کنترلی بهینه شده

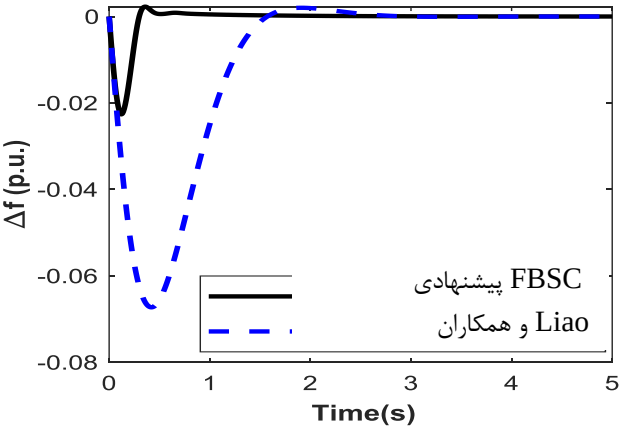
کنترل کننده	پسگام به عقب			فازی		
گین های کنترلی	c_1	c_2	c_3	k_f	k_d	k_p
سیستم قدرت تک ناحیه ای	۱/۴۹	۰/۶۲۵	۱/۷۸	۱/۱	۱/۹	۲/۱
سیستم قدرت سه ناحیه ای	۱/۱۵	۰/۶۱	۹/۷۸	۱/۹۵	۲/۱۵	۱/۸۳
سیستم قدرت چهار ناحیه ای	۱/۳۸	۱/۷۴	۱/۶۱	۱/۴	۲/۵	۱

۴- نتایج شبیه سازی

در این بخش شبیه سازی‌های عددی روی سیستم قدرت تک ناحیه ای، سه ناحیه‌ای و چهار ناحیه‌ای انجام خواهد شد و دیدگاه ارائه شده با مقالات دیگر مقایسه خواهد شد.

۴-۱- سناریوی اول: سیستم قدرت تک ناحیه‌ای

پارامترهای سیستم قدرت استفاده شده در شبیه‌سازی در جدول ۳ نشان داده شده‌است. مقادیر جدول از مرجع (Liao و همکاران) انتخاب شده‌است. شکل ۴ تغییرات فرکانس سیستم را موقعی که بار بطور ناگهانی به مقدار ۰.۰۵ پریونیت افزایش پیدا می کند را نشان می دهد.



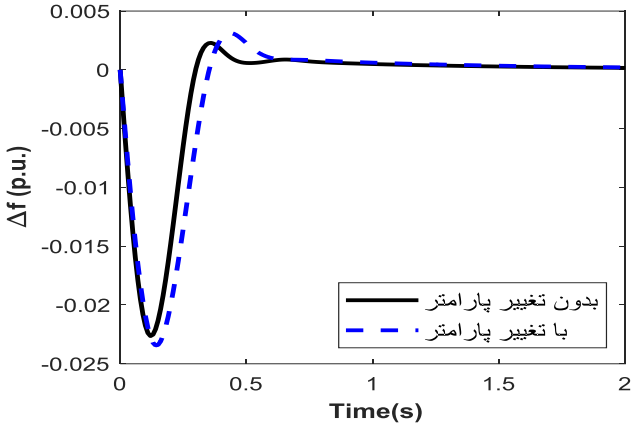
شکل ۴: پاسخ دینامیکی تغییرات فرکانسی سیستم

نمودارمشکی مربوط به کنترل پیشنهادی و خط چین مربوط به مرجع (Liao و همکاران) می‌باشد. همانطور که شکل ۴ نشان می دهد، بزرگترین تغییر انحراف فرکانس ۰.۰۲۳ پریونیت است. و انحراف فرکانس در عرض ۰.۵۳ ثانیه با استفاده از طرح LFC پیشنهادی صفر می شود. در حالی که برای مرجع (Liao و همکاران) مقادیر مربوطه به ترتیب ۰.۰۶۵ پریونیت و ۲.۵ ثانیه می باشد. این نتایج نشان می‌دهد که طرح LFC پیشنهادی می‌تواند به طور قابل‌توجهی باعث کاهش بیش از حد فراجهش و بهبود سرعت پاسخ در مقایسه با مرجع دیگری شود و در میرایی نوسان فرکانس سریع‌تر از مرجع (Liao و همکاران) است.

جدول(3): پارامتر های سیستم قدرت تک ناحیه ای

R	T_g	T_t	H	D
۳	۰/۰۸	۰/۴	۰/۰۸۳۳۵	۰/۰۱۱۵

یکی از مزیت‌های روش پیشنهادی مقاوم بودن آن در برابر تغییر پارامتر های سیستم می‌باشد. عملکرد سیستم در برابر عدم قطعیت های پارامتری تحت افزایش ناگهانی بار به مقدار ۰.۰۵ پریونیت به شرح زیر شبیه‌سازی شده‌است. $\Delta H = 0.01, \Delta D = 0.02,$ $\Delta T_p = 0.005, \Delta T_t = 0.06$ نتایج شبیه‌سازی در شکل ۵ مقایسه شده است. مقایسه نشان می‌دهد که خطاهای پارامتری تاثیر کمی روی عملکرد دینامیکی سیستم دارد که حاکی از مقاوم بودن این روش می‌باشد.



شکل ۵: عملکرد دینامیکی روش پیشنهادی با و بدون خطاهای پارامتری

۴-۲- سناریوی دوم: سیستم قدرت سه ناحیه‌ای

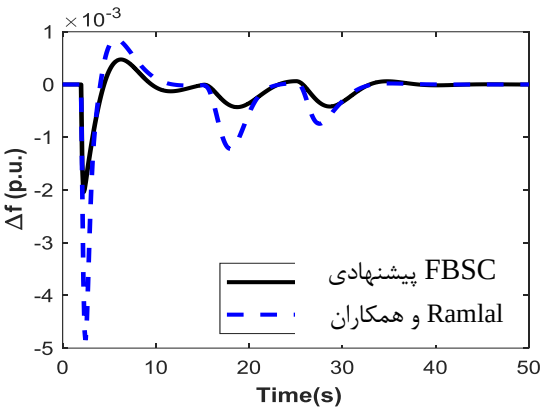
در این بخش جهت بررسی روش پیشنهادی یک سیستم قدرت سه ناحیه ای در نظرگرفته شده است. پارامترهای سیستم قدرت سه ناحیه ای در جدول ۴ نشان داد شده است که از مرجع (Ramlal و همکاران) استخراج شده است.

جدول(۴): پارامتر های سیستم قدرت سه ناحیه ای

	ناحیه ۱	ناحیه ۲	ناحیه ۳
K_p	۱	۰/۶۶۶	۰/۵۵۵
T_p	۱۰	۸	۶/۶۶
T_g	۰/۱	۰/۱۷	۰/۲
T_t	۰/۳	۰/۴	۰/۳۵
R	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵
T_{ij}	$T_{12} = 0.1986$	$T_{23} = 0.183$	$T_{13} = 0.2148$

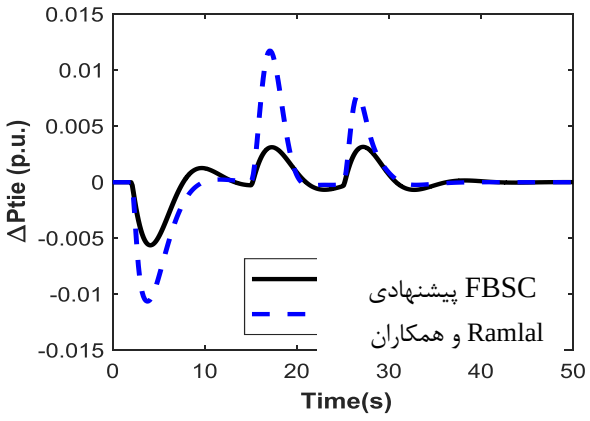
[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-29]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1404.14.1.6.9]

در زمان ۲ ، ۱۵ و ۲۵ ثانیه به تمام نواحی اغتشاش پله ۰.۲ پریونیت اعمال می‌شود. بدلیل کمبود جا فقط نتایج ناحیه یک نشان داده می شود. شکل ۶ تغییرات فرکانسی ناحیه یک و شکل ۷ تغییرات فلوی توان ارتباطی بین نواحی یک و دو را نشان می‌دهد.



شکل ۶: پاسخ دینامیکی تغییرات فرکانسی ناحیه ۱

مشاهده می شود که پاسخ سیستم از لحاظ کاهش فراجهش و زمان نشست نسبت به روش مرجع (Ramlal و همکاران) ارجحیت دارد. کنترلر پیشنهادی قادر است فرکانس را در عرض ۱۰ ثانیه تصحیح کند در حالی که زمان نشست با کنترل کننده مرجع (Ramlal و همکاران) بیشتر است. عملکرد بهبود یافته در هنگام نگاه کردن به حداکثر فراجهش در توان خط ارتباطی کمتر از نصف حداکثر انحراف در مورد کنترل کننده مرجع (Ramlal و همکاران) است مشهودتر است. در این حالت، حذف سریع اغتشاش به دلیل عملکرد کنترل کننده فازی است که وقتی روشن می شود که خطا از محدوده نظارتی تعیین شده توسط طراح کنترل فراتر می رود. هنگامی که خطا به محدوده قابل کنترل توسط کنترل کننده پیشنهادی کاهش می یابد، تکنیک پسگام به عقب خطا را به صفر می رساند و خروجی کنترل به بزرگی کنترل کننده فازی نیست. بنابراین عمل کنترل کلی نسبت به خطاهای بزرگ تهاجمی است.



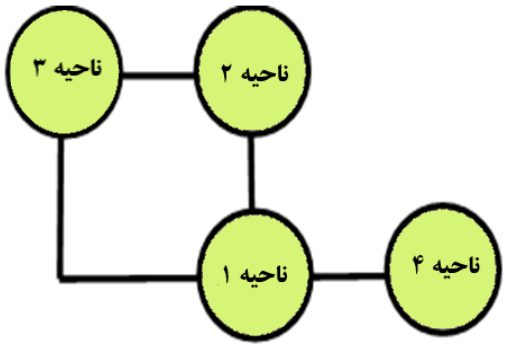
شکل ۷: تغییرات فلوی توان ارتباطی ناحیه یک و دو

۴-۳- سناریوی سوم: سیستم قدرت چهار ناحیه‌ای

این بخش به ارزیابی روش پیشنهادی روی یک سیستم قدرت چهار ناحیه‌ای اختصاص داده شده‌است. جدول ۵پارامترهای سیستم جهت شبیه سازی را نشان می‌دهد که از مرجع (Cai و همکاران) استخراج شده‌است. ساختار سیستم قدرت چهار ناحیه ای درشکل ۸ نشان داده شده است.

جدول(۵): پارامترهای سیستم قدرت سه ناحیه‌ای

	ناحیه ۱	ناحیه ۲	ناحیه ۳	ناحیه ۴
K_p	۱۲۰	۱۱۲/۵	۱۲۵	۱۱۵
T_p	۲۰	۲۵	۲۰	۱۵
T_g	۰/۰۸	۰/۰۷۲	۰/۰۷	۰/۰۸۵
T_t	۰/۳	۰/۳۳	۰/۳۵	۰/۳۷۵
R	۲/۴	۲/۷	۲/۵	۲
$T_{12} = T_{21} = T_{13} = T_{31} = T_{23} = T_{32} = T_{14} = T_{41} = 0.545$				
$T_{24} = T_{42} = T_{34} = T_{43} = 0$				

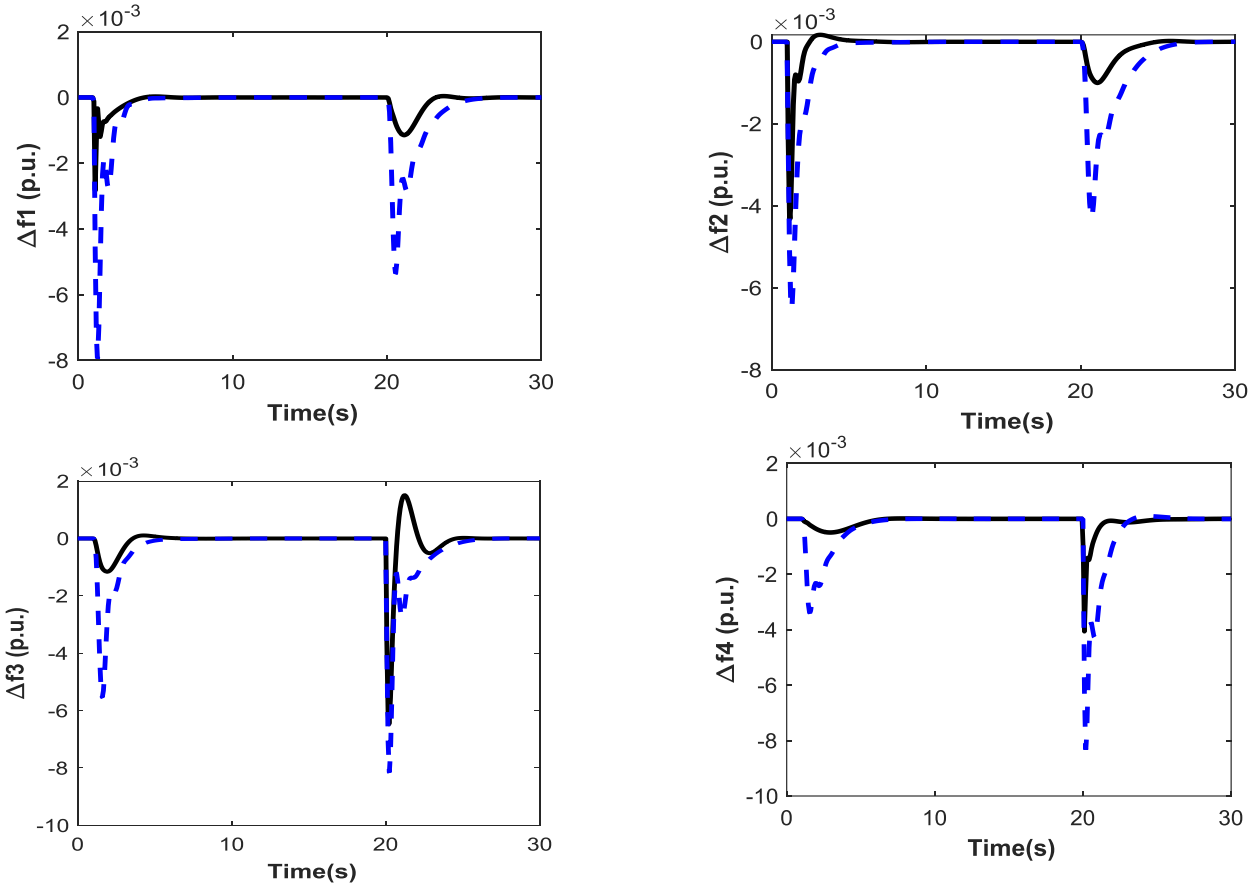


شکل ۸- ساختار سیستم قدرت ۴ ناحیه ای

یک افزایش بار پله ای۰.۰۱ پریونیت در ناحیه ۱ و ناحیه ۲ در t = 1s و افزایش بار پله ای۰.۰۱ پریونیت دیگر در ناحیه ۳ و ناحیه ۴ در t = 20s به ترتیب شبیه سازی شده است. پاسخ های دینامیکی انحراف فرکانس سیستم قدرت چهار ناحیه ای در شکل ۹ نشان داده شده است. خطوط یک یک افزایش بار پله ای۰.۰۱ پریونیت در ناحیه ۱ و ناحیه ۲ در t = 1s و افزایش بار پله ای۰.۰۱ پریونیت دیگر در ناحیه ۳ و ناحیه ۴ در t = 20s به ترتیب شبیه سازی شده است. پاسخ های دینامیکی انحراف فرکانس سیستم قدرت چهار ناحیه ای در شکل ۹ نشان داده شده است. خطوط یکپارچه سیاه با طرح LFC پیشنهادی مطابقت دارند

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-29]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1404.14.1.6.9]

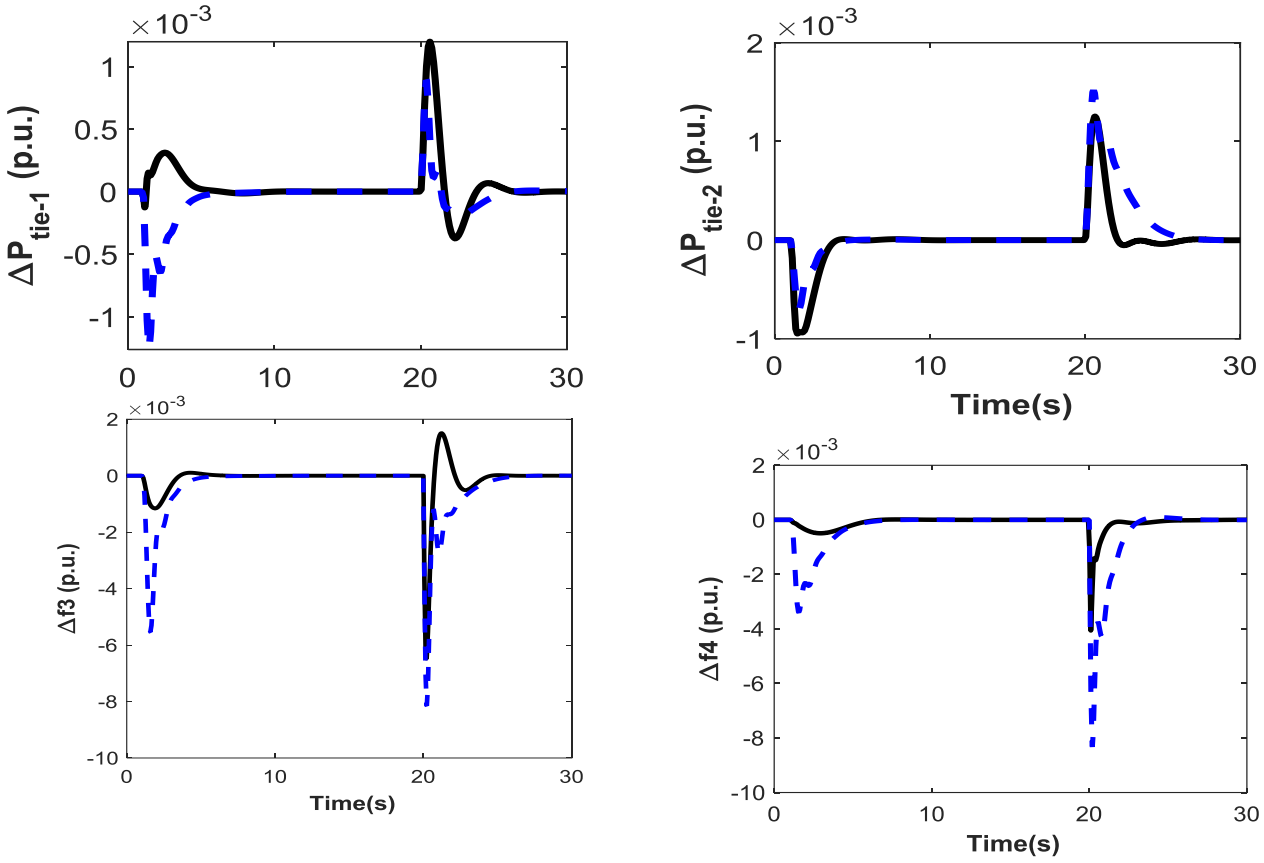
و خطوط راه راه آبی با LFC گزارش شده در مرجع (Cai و همکاران) مطابقت دارند. همانطور که در شکل ۹ نشان داده شده است، طرح LFC پیشنهادی به طور قابل توجهی عملکرد دینامیکی فرکانس سیستم را نسبت به طرح جدید منتشر شده بهبود می بخشد. با توجه به سرعت پاسخ سریع طرح پیشنهادی، عمل کنترل می تواند به سرعت در هنگام بروز اغتشاش در سیستم اجرا شود. بنابراین، طرح پیشنهادی می‌تواند فرکانس سیستم را بسیار سریع‌تر به حالت پایدار برساند و انحراف فرکانس را بسیار بیشتر از کنترل‌کننده موجود کاهش دهد. انحراف توان خط ارتباطی برای این چهار ناحیه در شکل ۱۰ آورده شده است. از شکل‌های ۱۰ واضح است که روش پیشنهادی نه تنها پاسخ گذرای سریعتر و فراجهش کمتری نسبت به مرجع (Cai و همکاران) دارد بلکه نوسانات و فراجهش به شدت کاهش پیدا کرده است.



شکل ۹: پاسخ دینامیکی تغییرات فرکانسی نواحی مختلف

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1404.14.1.6.9]



شکل ۱۰: تغییرات توان ارتباطی بین نواحی مختلف

۵- نتیجه‌گیری

در در این مقاله جهت حل مسئله کنترل فرکانس بار از ترکیب دو روش کنترلی پسگام به عقب و فازی با استراتژی کنترل نظارتی استفاده شد. روش کنترلی در روی سیستم تک ناحیه‌ای با دیدگاه کنترل غیر متمرکز پیاده سازی شد و سپس روی سیستم سه ناحیه‌ای و چهار ناحیه‌ای بسط داده شد. در ابتدا با استفاده از روش پسگام به عقب به صورت مرحله به مرحله و بازگشتی یک کنترلر جدید برای سیستم تک ناحیه‌ای طراحی شد و اثبات پایداری تابع توسط تابع لیاپانف انجام شد. سپس جهت پایین آوردن دامنه نوسانات و مقاوم‌تر کردن هرچه بیشتر سیستم از یک کنترل فازی به صورت ترکیبی در کنار کنترلر پسگام به عقب استفاده شد. جهت عملکرد بهینه دو کنترلر از الگوریتم بهینه سازی جمعیت ذرات برای به دست آوردن پارامترهای کنترلی استفاده شد. هماهنگی و ترکیب این دو کنترلر توسط استراتژی کنترل نظارتی صورت گرفته است بگونه‌ای که برای اغتشاشات با دامنه کم از کنترلر پسگام به عقب و برای اغتشات با دامنه زیاد کنترلر فازی توسط الگوریتم نظارتی وارد سیستم می شود. نتایج شبیه سازی موثر بودن روش پیشنهادی را نشان می‌دهد.

مراجع

Shankar, R., Pradhan, S., Chatterjee, K., & Mandal, R. (2017). A comprehensive state of the art literature survey on LFC mechanism for power system. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 76, 1185–1207.

Ansari, J., Abbasi, A. R., & Ansari, R. (2024). An event-triggered approach for uncertain load frequency control using memory-based adaptive practical sliding mode control. Energy Reports, 11, 2473-2483.

Kundur, P. (2007). Power system stability. Power system stability and control, 10(1), 7-1.

Rahmani, K., Kavousifard, F., & Abbasi, A. (2017). Consideration effect of wind farms on the network reconfiguration in the distribution systems in an uncertain environment. Journal of ExpErimEntal & thEorEtical artificial intElligEncE, 29(5), 995-1009.

Shiroei, M., & Ranjbar, A. M. (2014). Supervisory predictive control of power system load frequency control. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 61, 70-80.

Ansari, J., Homayounzade, M., & Abbasi, A. R. (2025). Innovative Load Frequency Control: Integrating Adaptive Backstepping and Disturbance Observers. IEEE Access.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1404.14.1.6.9]

Delays and Parametric Uncertainties. IEEE Transactions on power systems, 34(6), 4718-4727.

Bevrani, H., Daneshmand, P. R., Babahajyani, P., Mitani, Y., & Hiyama, T. (2013). Intelligent LFC concerning high penetration of wind power: synthesis and real-time application. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 5(2), 655-662.

Saxena, S., & Hote, Y. V. (2013). Load frequency control in power systems via internal model control scheme and model-order reduction. IEEE transactions on power systems, 28(3), 2749-2757.

Cai, L., He, Z., & Hu, H. (2016). A new load frequency control method of multi-area power system via the viewpoints of port-Hamiltonian system and cascade system. IEEE Transactions on Power Systems, 32(3), 1689-1700.

Al-Hamouz, Z., Al-Duwaish, H., & Al-Musabi, N. (2011). Optimal design of a sliding mode AGC controller: Application to a nonlinear interconnected model. Electric power systems research, 81(7), 1403-1409.

Ansari, J., Abbasi, A. R., & Firouzi, B. B. (2022). Decentralized LMI-based event-triggered integral sliding mode LFC of power systems with disturbance observer. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 138, 107971.

Liao, K., & Xu, Y. (2017). A robust load frequency control scheme for power systems based on second-order sliding mode and extended disturbance observer. IEEE Transactions on industrial informatics, 14(7), 3076-3086.

Prasad, S., Purwar, S., & Kishor, N. (2016). H-infinity based non-linear sliding mode controller for frequency regulation in interconnected power systems with constant and time-varying delays. IET Generation, Transmission & Distribution, 10(11), 2771-2784.

Qian, D., Zhao, D., Yi, J., & Liu, X. (2013). Neural sliding-mode load frequency controller design of power systems. Neural Computing and Applications, 22, 279-286.

Du, Z., Zhang, Y., Ni, Y., Shi, L., Yao, L., & Bazargan, M. (2009, July). COI-based backstepping sliding-mode emergency frequency control for interconnected AC/DC power systems. In 2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting (pp. 1-6). IEEE.

Wu, Z., Wang, X., & Zhao, X. (2016). Backstepping terminal sliding mode control of DFIG for maximal wind energy captured. International Journal of Innovative Computing, Information and Control, 12(5), 1565-1579.

Dehkordi, N. M., Sadati, N., & Hamzeh, M. (2017). A backstepping high-order sliding mode voltage control strategy for an islanded microgrid with harmonic/interharmonic loads. Control Engineering Practice, 58, 150-160.

Krstic, M., Kokotovic, P. V., & Kanellakopoulos, I. (1995). Nonlinear and adaptive control design. John Wiley & Sons, Inc..

Zhang, Y., Liu, X., & Qu, B. (2017). Distributed model predictive load frequency control of multi-area power

Pandey, S. K., Mohanty, S. R., & Kishor, N. (2013). A literature survey on load–frequency control for conventional and distribution generation power systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 25, 318-334.

Kavousi-Fard, A., Abasi, A., Rezazade, H., & Ansari, J. (2015). An intelligent approach for optimal capacitor placement problem as a reliability reinforcement strategy. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 29(5), 1857-1867.

Farahani, M., Ganjefar, S., & Alizadeh, M. (2012). PID controller adjustment using chaotic optimisation algorithm for multi-area load frequency control. IET Control Theory & Applications, 6(13), 1984-1992.

Kavousi-Fard, A., Abbasi, A., & Baziar, A. (2014). A novel adaptive modified harmony search algorithm to solve multi-objective environmental/economic dispatch. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 26(6), 2817-2823.

Ansari, J., Homayounzade, M., & Abbasi, A. R. (2023). Load frequency control in power systems by a robust backstepping sliding mode controller design. Energy Reports, 10, 1287-1298.

Tan, W. (2009). Unified tuning of PID load frequency controller for power systems via IMC. IEEE Transactions on power systems, 25(1), 341-350.

Benysek, G., Bojarski, J., Smolenski, R., Jarnut, M., & Werminski, S. (2016). Application of stochastic decentralized active demand response (DADR) system for load frequency control. IEEE Transactions on Smart Grid, 9(2), 1055-1062.

Tan, W. (2011). Decentralized load frequency controller analysis and tuning for multi-area power systems. Energy conversion and management, 52(5), 2015-2023.

Kumari, N., & Jha, A. N. (2014, December). Frequency control of multi-area power system network using PSO based LQR. In 2014 6th IEEE Power India International Conference (PIICON) (pp. 1-6). IEEE.

Bensenouci, A., & Ghany, A. A. (2007, September). Mixed H∞/H 2 with pole-placement design of robust LMI-based output feedback controllers for multi-area load frequency control. In EUROCON 2007-The International Conference on" Computer as a Tool" (pp. 1561-1566). IEEE.

Yousef, H. A., Khalfan, A. K., Albadi, M. H., & Hosseinzadeh, N. (2014). Load frequency control of a multi-area power system: An adaptive fuzzy logic approach. IEEE transactions on power systems, 29(4), 1822-1830.

Ma, M., Zhang, C., Liu, X., & Chen, H. (2016). Distributed model predictive load frequency control of the multi-area power system after deregulation. IEEE transactions on Industrial Electronics, 64(6), 5129-5139. [۱۹] Abbasi,

A., & Seifi, A. (2009). Fast and perfect damping circuit for ferroresonance phenomena in coupling capacitor voltage transformers. Electric Power Components and Systems, 37(4), 393-402.

Ramlal, C. J., Singh, A., Rocke, S., & Sutherland, M. (2019). Decentralized Fuzzy $ H_\infty $-Iterative Learning LFC With Time-Varying Communication

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1404.14.1.6.9]

renewable micro-grids. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 29(5), 1957-1966.

Ansari, J., Abbasi, A. R., Heydari, M. H., & Avazzadeh, Z. (2022). Simultaneous design of fuzzy PSS and fuzzy STATCOM controllers for power system stability enhancement. Alexandria Engineering Journal, 61(4), 2841-2850.

system with DFIGs. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 4(1), 125-135.

Kavousi-Fard, A., Khorram-Nia, R., Rostami, M., & Abbasi, A. (2015). An smart stochastic approach to model plug-in hybrid electric vehicles charging effect in the optimal operation of micro-grids. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 28(2), 835-842.

Abbasi, A., Abbasi, S., Ansari, J., & Rahmani, E. (2015). Effect of plug-in electric vehicles demand on the

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1404.14.1.6.9]