



Computational Intelligence in Electrical Engineering
Vol. 11, No. 4, 2021
Research Paper

Adaptive T2FPID Controller for Load Frequency Control in a Nonlinear Time-delay Power System

Kamel Sabahi^{1,2}, Mehdi Tavan³, And Amin Hajizadeh⁴

¹ Dep. of Engineering Sciences, Faculty of Advanced Technologies, University of Mohaghegh Ardabili, Namin, Iran.

² Dep. of Engineering Sciences, Faculty of Advanced Technologies, Sabalan University of Advanced Technologies (SUAT), Namin, Iran.

³ Dep. of Electrical Engineering, Mahmudabad branch, Islamic Azad University, Mahmudabad, Iran

⁴ Dep. of Energy Technology, Aalborg University, Esbjerg, Denmark

Abstract:

In this paper, an adaptive T2FPID controller is designed for load frequency control (LFC) in a nonlinear, uncertain and time-delay power system. The time-varying delay at the input of the power system that is mainly due to the signal processing, filtering, calculations and breakdown in the communication channels in most cases may lead to system instability. The designed T2FPID controller is a nonlinear and adaptive controller and is able to handle the nonlinearities, uncertainties and time-varying delay at the input of the power system. An appropriate Lyapunov-Krasovskii functional has been used to examine the stability of the closed loop system and to obtain the adaptive rules for the T2FPID controller. Using this functional, it has been shown that the frequency deviations in the control areas have reached to zero and the adaptive parameters of the controller remain bounded. To demonstrate the efficiency of the proposed method, a two-area nonlinear input delayed power system (with four generation and distribution companies) is used for simulations and it is shown that the proposed control strategy outperforms other methods in terms of overshoot and settling time.

Keywords: Load frequency control, Time-delay system, and Adaptive T2FPID controller.



2252-083X/ © 2021 The Authors. Published by University of Isfahan

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



<http://dx.doi.org/10.22108/isee.2020.120309.1306>

مقاله پژوهشی

طراحی کنترل کننده تطبیقی T2FPID برای کنترل بار - فرکانس در یک سیستم قدرت

تأخیردار

کامل صباحی^۱، مهدی توان^۳ و امین حاجی زاده^۴

۱- استادیار، گروه علوم مهندسی، دانشکده فناوری‌های نوین - دانشگاه محقق اردبیلی - نمین - ایران

۲- استادیار، دانشکده فناوری‌های نوین - دانشگاه فناوری‌های نوین سبلان - نمین - ایران

k.sabahi@uma.ac.ir

۳- استادیار، دانشکده برق - واحد محمودآباد - دانشگاه آزاد اسلامی - محمودآباد - ایران

m.tavan@srbiau.ac.ir

۴- دانشیار، دانشکده تکنولوژی انرژی - دانشگاه آلبورگ - دانمارک

aha@et.aau.ac.dk

چکیده: در این مقاله، کنترل کننده تطبیقی T2FPID برای کنترل بار - فرکانس در یک سیستم قدرت تأخیردار - غیرخطی طراحی شده است. تأخیر متغیر با زمان در ورودی سیستم قدرت که عمدتاً ناشی از کندی عملکرد عملگرها، فیلترکردن سیگنال، محاسبات مربوط به عملیات کنترلی و ازکارافتادگی خطوط مخابراتی است، در بیشتر موارد ناپایداری در سیستم قدرت را باعث می‌شود. کنترل کننده T2FPID طراحی شده دارای ساختاری غیرخطی و تطبیقی بوده و از تابع لیاپانوف - کراسوسکی برای بررسی پایداری حلقه بسته و به دست آوردن قوانین تطبیقی آن استفاده شده است. از یک سیستم قدرت دو ناحیه‌ای غیرخطی با تأخیر در ورودی (با چهار کمپانی تولید و توزیع)، برای شبیه‌سازی استفاده و نشان داده شد با اعمال کنترل کننده T2FPID پیشنهادی، اهداف مسئله کنترل بار - فرکانس (به صفر رساندن تغییرات فرکانس و توان انتقالی در نواحی) با کیفیت مناسبی محقق می‌شود و پارامترهای تطبیقی آن محدود باقی می‌مانند. همچنین، روش پیشنهادی با کنترل کننده مبتنی بر سیستم فازی نوع ۱ مقایسه و کارایی آن در مواجهه با نامعینی‌ها و تأخیر زمانی‌های موجود در سیستم قدرت نشان داده شده است.

واژه‌های کلیدی: کنترل بار - فرکانس، سیستم تأخیردار و کنترل کننده T2FPID تطبیقی

۱- مقدمه

نواحی در بازه مشخص شده است. در این میان، خطوط ارتباطی بین نواحی برای تبادل توان و به‌منزله پشتیبان در موارد اضطراری کاربرد دارد [۱]. اگر درخواست بار در یک ناحیه اتفاق افتد، این مسئله بر فرکانس دیگر نواحی نیز تأثیر می‌گذارد و باعث انحراف آن از مقدار نامی می‌شود. تأمین بار درخواستی باید با کنترل بار - فرکانس^۱ (LFC) با ارسال سیگنال به بخش‌های تولیدی پاسخ داده شود. بار درخواستی می‌تواند با واحدهای تولیدی خود ناحیه یا سایر نواحی تأمین شود که این مسئله با طراحی کنترل کننده مناسب برای LFC در دسترس است [۲]؛ بنابراین، برای بهبود LFC

هدف کنترل بار - فرکانس در یک سیستم قدرت به‌هم‌پیوسته، نگه‌داشتن فرکانس نواحی و توان تبادل بین

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۸/۰۹/۱۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۰۲/۱۴

نام نویسنده مسئول: کامل صباحی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - اردبیل - نمین - دانشگاه محقق اردبیلی - دانشکده فناوری‌های نوین

متغیرهای حالت و مدل خطی از سیستم تحت کنترل مورد نیاز است که این مسئله در سیستم قدرت با ابعاد بزرگ، دارای محدودیت‌هایی است. در [۱۴] و [۱۵] از روش مقاوم برای طراحی کنترل‌کننده برای مسئله LFC در یک سیستم قدرت تأخیردار دو ناحیه‌ای استفاده شده و کارایی این کنترل‌کننده‌ها در مواجهه با تأخیر متغیر با زمان نشان داده شده است؛ اما در طراحی LFC برای سیستم‌های قدرت، کنترل‌کننده‌های مناسب‌اند که در آنها به مدل دقیق و همچنین تمامی متغیرهای حالت سیستم نیاز نباشد و تنها از سیگنال‌های ورودی و خروجی در طراحی آنها استفاده شود. به همین منظور و به دلیل سادگی و توانایی مناسب کنترل‌کننده PID ، از این کنترل‌کننده برای کنترل سیستم‌های صنعتی از جمله LFC در سیستم‌های قدرت به‌وفور استفاده می‌شود [۱۶]. در [۱۷] با فرض خطی بودن و در دسترس بودن تمامی متغیرهای حالت سیستم قدرت، کنترل‌کننده مقاوم PID برای LFC با حضور تأخیر زمانی طراحی شده است. در این میان، وجود عواملی از قبیل غیرخطی‌گری و تغییر در نقاط کار سیستم، کارایی کنترل‌کننده PID را کاهش می‌دهند. برای افزایش کارایی این کنترل‌کننده‌ها، پژوهشگران به ترکیب آنها با سیستم‌های فازی توجه داشته‌اند که از این سیستم‌ها برای تنظیم بهره‌های کنترل‌کننده PID استفاده شده است [۱۸]. تحقق کنترل‌کننده PID کلاسیک با استفاده از سیستم فازی، که به کنترل‌کننده فازی PID^2 (FPID) معروف است، در [۱۹] بررسی شده است. بدون در نظر گرفتن اثر تأخیر زمانی در سیستم قدرت به‌هم‌پیوسته، در مراجع [۲۰] و [۲۱] از روش‌های بهینه‌سازی تکاملی برای تعیین پارامترهای بهینه کنترل‌کننده FPID برای LFC استفاده شده است. در [۲۲] از سیستم فازی منطقی نوع ۲ فاصله‌ای^۲ (IT2FLS) در قسمت فازی کنترل‌کننده FPID برای مقابله با نامعینی‌ها در سیستم قدرت در مسئله بار - فرکانس استفاده شده است. کنترل‌کننده مذکور دارای ساختاری ثابت بوده و پایداری حلقه بسته و اثر تأخیر زمانی در آن بررسی نشده است. به همین منظور، در [۲۳] کنترل‌کننده شبکه عصبی - فازی نوع ۲^۲ (T2FNN) ترکیبی با کنترل‌کننده PD برای کنترل بار - فرکانس در سیستم قدرت تأخیردار معرفی شده که در آن

سیستم قدرت به‌هم‌پیوسته، کنترل‌کننده‌های مبتنی بر روش‌های کلاسیک [۳، ۴]، روش‌های مقاوم [۵] و روش‌های هوشمند نظیر سیستم فازی منطقی و شبکه‌های عصبی مصنوعی [۶-۱۰] طراحی شده است. در این میان و با پیدایش مسئله تجدید ساختار در صنعت برق و با توجه به اینکه در این ساختار نواحی در یک بازار آزاد برای خرید و فروش برق باهم رقابت می‌کنند، نقش مسئله LFC چشمگیرتر می‌شود [۱۱]. در این ساختار برخلاف ساختار قدیم صنعت برق که ارتباط و تبادل توان بین نواحی از قبل تعیین شده‌اند، ارتباط بین نواحی به صورت شبکه مخابراتی آزاد است و هر ناحیه می‌تواند بر حسب نیاز و البته براساس صرفه اقتصادی با نواحی دیگر و از طریق خطوط ارتباط برقرار کند و خرید و فروش توان را انجام دهد؛ بنابراین، وجود این رقابت آزاد در سیستم قدرت به پیچیدگی (غیرخطی‌گری و نامعینی‌های زیاد) این سیستم برای مسئله بار - فرکانس منجر می‌شود و استراتژی کنترلی قوی‌تری را می‌طلبد. علاوه بر این پیچیدگی مدل، یکی از مشکلاتی که در این رقابت آزاد در طراحی کنترل بار - فرکانس به وجود می‌آید، مسئله تأخیر زمانی است که ناشی از دوربودن عملگرها از اتاق مرکزی (اتاق کنترل) و تداخل در ارسال و دریافت داده‌ها از بسترهای مخابراتی است. همچنین، فیلترکردن سیگنال، محاسبات مربوط به عملیات کنترلی، کندی عملکرد عملگرها و از کارافتادگی خطوط مخابراتی نیز می‌تواند باعث به وجود آمدن تأخیر زمانی متغیر با زمان شوند. بدیهی است تأخیر زمانی نه تنها باعث تنزل عملکرد حلقه کنترل بار - فرکانس خواهد شد، باعث ناپایداری آن نیز می‌تواند باشد [۱۲]. این ناپایداری بدین معنی است که خطای کنترل نواحی و تغییرات فرکانس رفته‌رفته از مقدار مطلوب خود یعنی صفر فاصله می‌گیرد و در نتیجه، نواحی کنترلی به برآوردن استانداردهای لازم قادر نخواهند شد [۱۳]؛ بنابراین، برای غلبه بر تأخیر زمانی و نامعینی‌های سیستم از الگوریتم‌های کنترلی مقاوم نظیر H_∞ و H_2 برای LFC استفاده شده که این الگوریتم‌ها در نهایت به حل و برقراری یک LMI منجر شده و پارامترهای کنترل‌کننده از حل این نامساوی خطی ماتریسی قابل دست‌یابی است [۱۲، ۱۳]. در این روش‌ها، برای آنالیز و طراحی کنترل‌کننده تمامی

است. با توجه به این شکل، در این سیستم و در هریک از نواحی، کمپانی‌های تولید^۶ (Genco) و وظیفه تأمین توان و کمپانی‌های توزیع^۷ (Disco) وظیفه خریداری کردن توان برای بارها را بر عهده دارند [۱۱]. Genco‌ها دارای بخش‌های تولید جداگانه شامل توربین و گاورنر هستند که باید براساس میزان توان درخواستی Disco‌ها و براساس میزان قرارداد خود به تولید توان اقدام کنند. درخور ذکر است در سیستم‌های قدرت، توربین‌ها و گاورنرهای موجود در بخش‌های تولید نیز دارای ساختار غیرخطی‌اند. در این سیستم قدرت، در ناحیه اول $Genco_1$ و $Genco_2$ و در ناحیه دوم $Genco_3$ و $Genco_4$ مسئولیت تأمین توان درخواستی از جانب Disco‌ها (که تعداد آنها نیز چهار تا است) را دارند. نحوه تبادل توان در $Genco$ ‌ها و $Disco$ ‌ها به صورت ماتریس زیر نشان داده می‌شود که در آن ردیف‌ها نشان‌دهنده

$Genco$ ‌ها و ستون‌ها نشان‌دهنده $Disco$ ‌ها هستند [۲۴]:

$$GPM = \begin{bmatrix} gpf_{11} & gpf_{12} & gpf_{13} & gpf_{14} \\ gpf_{21} & gpf_{22} & gpf_{23} & gpf_{24} \\ gpf_{31} & gpf_{32} & gpf_{33} & gpf_{34} \\ gpf_{41} & gpf_{42} & gpf_{43} & gpf_{44} \end{bmatrix} \quad (1)$$

در سیستم قدرت مذکور، دو ناحیه از طریق خط ارتباطی به هم متصل‌اند و $Genco$ ‌ها و $Disco$ ‌های نواحی می‌توانند برحسب نیاز باهم تبادل توان داشته باشند. توان جاری شده در این خط با ΔP_{tie} نشان داده می‌شود. در مسئله کنترل بار - فرکانس، به صفر رساندن تغییرات فرکانس (Δf_1 و Δf_2) و همچنین تغییرات توان انتقالی (ΔP_{tie}) از اهداف اصلی است که می‌باید با کنترل‌کننده برقرار شود. در این سیستم، ورودی کنترل‌کننده‌ها متشکل از خطای کنترل نواحی $(ACE)^A$ است که به صورت زیر تعریف می‌شود [۷]:

$$ACE_i = \Delta P_{tie-error} + B_i \Delta f_i \quad (2)$$

که در آن ACE_i ترکیب خطی از تغییرات فرکانس و خطای تغییرات توان انتقالی (اختلاف توان برنامه‌ریزی شده و توان انتقالی) است. در این رابطه B_i ضریب ثابت ناحیه i است ($i=1,2$).

در کنترل بار - فرکانس در سیستم‌های قدرت، با توجه به اینکه کنترل‌کننده‌ها در فاصله‌های دور و در اتاق مرکزی (اتاق کنترل) مستقرند و ارسال و دریافت داده‌ها به این مرکز

کنترل‌کننده T2FNN نقش کنترل‌کننده اصلی را برعهده داشته و PD پایدارساز است. در این ساختار، هرچند پایداری حلقه بسته با استفاده از تابع لیاپانوف - کراسوسکی بررسی شده، همگرایی و محدودبودن پارامترهای کنترل‌کننده بحث نشده است.

بنابراین، برای بهره‌بردن از مزایای توأم کنترل‌کننده PID و سیستم فازی نوع ۲، در این مقاله، کنترل‌کننده پایدار و تطبیقی PID تحقق یافته با استفاده از سیستم فازی نوع ۲ برای کنترل بار - فرکانس یک سیستم قدرت تأخیردار طراحی شده است. این روش، کنترل‌کننده PID فازی نوع ۲^{۵۲} (T2FPID) نام دارد و دارای ساختار تطبیقی بوده و اثر تأخیر زمانی برای بهبود کارایی در قوانین تطبیقی آن در نظر گرفته شده است. مهم‌ترین نوآوری‌های ساختار کنترلی پیشنهادی به صورت زیرند:

۱- پایداری کنترل‌کننده تطبیقی T2FPID پیشنهادی با استفاده از تابع لیاپانوف - کراسوسکی بررسی شده و قوانین تطبیقی این کنترل‌کننده از این تابع به دست آمده است. اثبات شده است خطای حلقه بسته محدود است و با گذشت زمان به سمت صفر میل می‌کند.

۲- همگرایی و محدودبودن پارامترهای تطبیقی کنترل‌کننده پیشنهادی اثبات شده که در کارهای قبلی این مسئله بحث و بررسی نشده است.

۳- از سیستم قدرت تأخیردار دارای اجزای غیرخطی نظیر توربین برای شبیه‌سازی و نشان دادن کارایی روش پیشنهادی استفاده شده است.

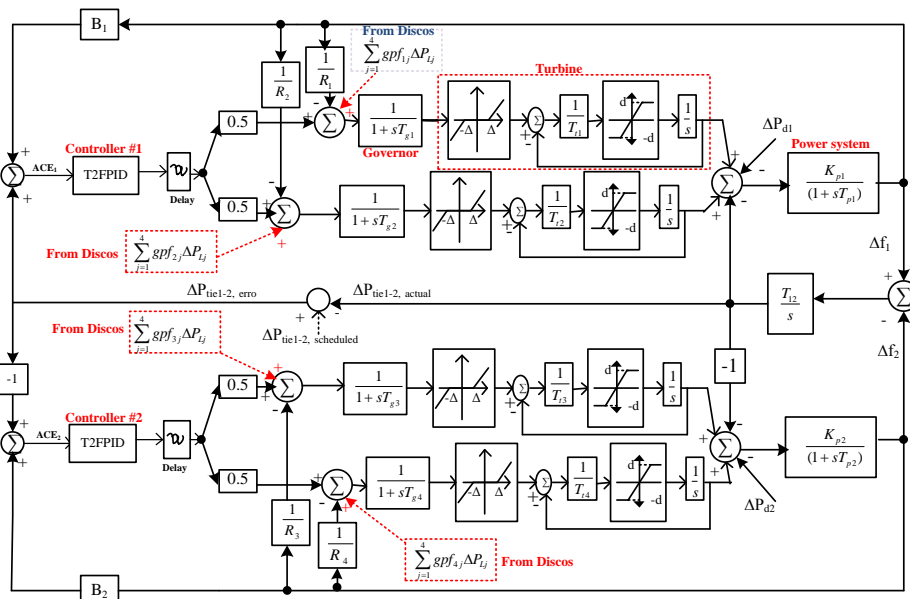
در ادامه در بخش ۲ ساختار یک سیستم قدرت که دارای تأخیر در ورودی بوده توضیح داده شده است. در بخش ۳، کنترل‌کننده تطبیقی T2FPID پیشنهادی برای مسئله کنترل بار - فرکانس سیستم قدرت تأخیردار معرفی شده است. در فصل ۴، نتایج شبیه‌سازی برای یک سیستم نمونه آورده شده و در نهایت، در فصل ۵ نتیجه‌گیری بیان شده است.

۲- مدل سیستم قدرت

مدل سیستم قدرت به کاررفته برای مسئله کنترل بار - فرکانس در سیستم قدرت در شکل (۱) نشان داده شده

خواهد شد. در این سیستم با توجه به اینکه Gencoها و Discoها آزادانه می‌توانند در تبادل بار باهم مشارکت داشته باشند، تأخیر زمانی در نظر گرفته شده با توجه به بستر مخابراتی می‌تواند متغیر با زمان نیز باشد.

با بسترهای مخابراتی صورت می‌گیرد، در این سیستم تأخیر زمانی امری انکارناپذیر است که در طراحی کنترل‌کننده می‌باید مدنظر قرار گیرند [۲۳]. به همین منظور، در سیستم قدرت مطالعه شده و در قسمت ورودی این سیستم تأخیر زمانی در نظر گرفته می‌شود و در طراحی کنترل‌کننده لحاظ

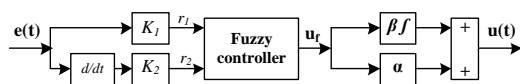


شکل ۱: مدل سیستم قدرت دو ناحیه‌ای برای بار-فرکانس

می‌شود [۲۶]. روش‌هایی برای بهینه‌کردن ساختار سیستم فازی از مراجع مختلف معرفی شده است [۲۱].
 ۲- در روش دوم، قوانین و ساختار سیستم فازی طراحی می‌شود که از لحاظ رابطه ورودی - خروجی همانند کنترل‌کننده PID عمل می‌کند [۲۲]. در این روش که به کنترل‌کننده فازی PID معروف است، سیستم فازی سیگنال کنترلی نهایی را تولید می‌کند و بنابراین کنترل‌کننده طراحی شده یک کنترل‌کننده غیرخطی است. ساختار یک نوع از کنترل‌کننده فازی PID در شکل (۲) نشان داده شده است.

۳- کنترل‌کننده فازی PID

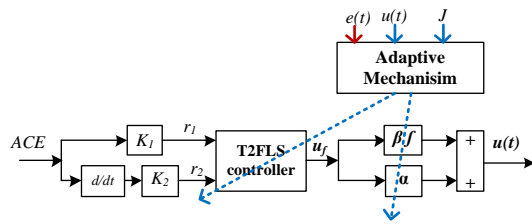
همان‌طور که قبلاً گفته شد کنترل‌کننده PID در ساختارهای مختلف برای کنترل سیستم‌های صنعتی از جمله کنترل بار - فرکانس در سیستم‌های قدرت به‌وفور استفاده می‌شود. در این میان، عواملی همچون غیرخطی‌گری و تغییر در نقاط کار سیستم و همچنین تأخیر زمانی، کارکرد این کنترل‌کننده‌ها را با مشکلاتی مواجه می‌کند و کارایی آنها را کاهش می‌دهد [۲۵]. برای مقابله با این مشکلات، سیستم‌های فازی به‌عنوان یک روش هوشمند و کارا به دو صورت در جهت بهبود کارایی و پایداری این کنترل‌کننده‌ها استفاده می‌شوند:



شکل ۲: ساختار کنترل‌کننده فازی PID

در این کنترل‌کننده سیگنال کنترلی نهایی، ورودی کنترل‌کننده، U خروجی سیستم فازی و α و β ضرایب

۱- در روش اول، سیستم فازی به‌عنوان یک سیستم خبره و براساس تغییر در نقاط کار سیستم، بهره‌های کنترل‌کننده PID را در حالت برخط تنظیم می‌کند. در این ساختار، سیگنال کنترلی نهایی با کنترل‌کننده PID تولید



شکل ۳: کنترل کننده تطبیقی T2FPID پیشنهادی

در کنترل کننده معرفی شده، برای مقابله با غیرخطی گری و نامعینی های موجود از کنترل کننده T2FLS (T2FLS controller) و برای مقابله با تغییرات پارامترها در سیستم قدرت و تأخیر زمانی از یک مکانیزم تطبیقی (Adaptive mechanism) برای تنظیم پارامترهای مقیاس خروجی α و β و همچنین θ (پارامترهای قسمت تالی کنترل کننده فازی) استفاده می شود.

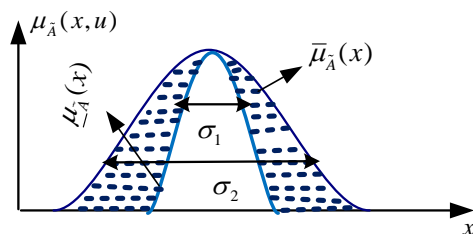
۳-۱-۱- کنترل کننده T2FLS

با فرض مدل تاکاگی - سوگنو - کانگ^۹ (T-SK) مرتبه صفر، قانون j -ام کنترل کننده فازی نوع ۲ به صورت زیر در نظر گرفته می شود [۲۸، ۲۹]:

$$R^j: \text{if } r_1(t) \text{ is } \tilde{A}_{j1} \text{ and } r_2(t) \text{ is } \tilde{A}_{j2}, \quad (6)$$

$$\text{Then } u_f = \theta_j$$

که در آن A_{ji} ها بیان کننده تابع تعلق نوع ۲ برای j -امین قانون و i -امین ورودی بوده اند و r_1 و r_2 ورودی های کنترل کننده فازی نوع ۲ هستند. همچنین، θ_j بیان کننده پارامترهای قسمت تالی اند که قابلیت تنظیم دارند. تابع تعلق در نظر گرفته شده برای قسمت مقدم از نوع نامعینی در انحراف معیار است که در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل ۴: تابع تعلق نوع ۲ با نامعینی در انحراف معیار

بدون از دست دادن کلیت مسئله، مقادیر پایین تر و بالاتر تحریک قانون j -ام به ترتیب به صورت زیر بیان می شوند:

$$f_j = \underline{\mu}^{j1}(r_1) \underline{\mu}^{j2}(r_2) \quad (7)$$

مقیاس خروجی و K_1 و K_2 نیز ضرایب مقیاس ورودی کنترل کننده اند. خروجی نهایی کنترل کننده به صورت زیر در نظر گرفته می شود:

$$u(t) = \alpha u_f + \beta \int u_f dt \quad (3)$$

با در نظر گرفتن توابع تعلق مثلثی برای ورودی و یک مقدار crisp برای خروجی، سیگنال تولیدی کنترل کننده فازی به صورت زیر نوشته می شود:

$$u_f(t) = A + PE + D\dot{E} \quad (4)$$

که در آن A و P و D مقادیر ثابت و E و \dot{E} ورودی سیستم فازی اند. با ترکیب روابط (۳) و (۴)، خروجی نهایی کنترل کننده فازی PID به صورت زیر قابل دستیابی است:

$$u(t) = \alpha A + \beta A t + \alpha K_1 P e + \beta K_2 D e + \beta K_1 P \int e dt + \alpha K_2 D \dot{e} \quad (5)$$

که در آن $\alpha K_1 P + \beta K_2 D$ و $\beta K_1 P$ و $\alpha K_2 D$ به ترتیب بهره های تناسبی، انتگرالی و مشتق گیر کنترل کننده فازی PID هستند. در این مقاله برای مقابله با غیرخطی گری و نامعینی های موجود در سیستم قدرت از سیستم فازی نوع ۲ استفاده می شود تا کارایی سیستم حلقه بسته بهبود یابد [۲۷]؛ اما برای مقابله با تأخیر زمانی موجود در ورودی سیستم قدرت نیاز است تمهیداتی در ساختار کنترلی آن ایجاد شود. برای همین منظور در این مقاله، از تابع لیاپانوف - کراسوسکی برای بررسی پایداری و به دست آوردن قوانین تنظیم پارامترهای کنترل کننده T2FPID استفاده شد که در ادامه بررسی می شود.

۳-۱- کنترل کننده T2FPID تطبیقی پیشنهادی

ساختار کنترل کننده تطبیقی T2FPID پیشنهادی در شکل (۳) نشان داده شده است.

$$\bar{f}_j = \bar{\mu}^{j1}(r_1)\bar{\mu}^{j2}(r_2) \quad (۸)$$

مقادیر پایین تر و بالاتر تابع تعلق از تابع گوسی، استفاده و به صورت معادلات زیر بیان می شوند:

$$\underline{\mu}^{j1}(r_1) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{r_1 - m^{j1}}{\sigma_1^{j1}}\right)^2\right) \quad (۹)$$

$$\bar{\mu}^{j1}(r_1) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{r_1 - m^{j1}}{\sigma_2^{j1}}\right)^2\right) \quad (۱۰)$$

$$\underline{\mu}^{j2}(r_2) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{r_2 - m^{j2}}{\sigma_1^{j2}}\right)^2\right) \quad (۱۱)$$

$$\bar{\mu}^{j2}(r_2) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{r_2 - m^{j2}}{\sigma_2^{j2}}\right)^2\right) \quad (۱۲)$$

که در آن σ_1, σ_2, m پارامترهای بخش مقدم قوانین فازی اند. خروجی نهایی سیستم فازی نوع ۲ مدل TSK به صورت زیر بیان می شود [۳۰]:

$$u_f(t) = \frac{\sum_{j=1}^M \theta_j (f_j + \bar{f}_j)}{\sum_{j=1}^M (f_j + \bar{f}_j)} \quad (۱۳)$$

که این خروجی بعد از نرمالسازی به صورت شکل ساده تر زیر نیز بیان می شود:

$$u_f(t) = \frac{\sum_{j=1}^M \theta_j \phi_j}{\theta^T \Phi} \quad (۱۴)$$

که در آن:

$$\phi_j = \frac{f_j + \bar{f}_j}{\sum_{j=1}^M (f_j + \bar{f}_j)} = \frac{f_j}{\sum_{j=1}^M f_j} \quad (۱۵)$$

و $\theta^T = [\theta_1, \dots, \theta_M]^T$ و $\Phi = [\phi_1, \dots, \phi_M]^T$ است.

۳-۱-۲- مکانیزم تطبیق پارامترها و پایداری

کنترل کننده پیشنهادی

در این مقاله برای بررسی پایداری، ساختار کنترلی معرفی می شود و همچنین به دست آوردن قانون تنظیم پارامترهای کنترل کننده، تابع لیاپانوف - کراسوسکی به صورت زیر در نظر گرفته می شود:

$$V(t) = \frac{1}{2}e(t)^2 + \int_{t-\tau(t)}^t e(s)^2 ds + \int_{-\tau_{\max}}^0 \int_{t+\theta}^t e(\theta)^2 d\theta ds + \frac{1}{\gamma_1}\bar{\alpha}^2 + \frac{1}{\gamma_2}\bar{\beta}^2 \quad (۱۶)$$

که در آن

$$e(t) = y_d - y(t) \quad (۱۷)$$

و y خطای کنترل نواحی (ACE) است و y_d برابر صفر در نظر گرفته می شود. همچنین $\tilde{\beta} = \beta^* - \beta$ و $\tilde{\alpha} = \alpha^* - \alpha$ است و γ_i پارامترهای طراحی و ثابت اند (α^* و β^* به ترتیب مقادیر بهینه α و β هستند).

قضیه (۱):

اگر قوانین تطبیقی برای پارامترهای کنترل کننده T2FPID پیشنهادی در شکل (۳) به صورت زیر در نظر گرفته شوند:

$$\dot{\tilde{\alpha}} = \gamma_1 (e(t)J)\dot{u}_f(t) \quad (۱۸)$$

$$\dot{\tilde{\beta}} = \gamma_2 (e(t)J)u_f(t) \quad (۱۹)$$

$$\dot{\theta} = -k_0\theta + eJ \frac{\Phi}{\|\Phi\|^2} \quad (۲۰)$$

که در آن J حساسیت سیستم و k_0 پارامتر طراحی اند. آنگاه:

- خطای سیستم حلقه بسته (e) در نواحی کنترلی محدود است و با گذشت زمان به سمت صفر میل می کند (تغییرات توان انتقالی و تغییرات فرکانس به صفر می رسد).
- پارامترهای تطبیقی کنترل کننده (α و β و همچنین θ) با گذشت زمان به یک مقدار محدود همگرا می شوند.

اثبات:

با مشتق گیری از تابع لیاپانوف - کراسوسکی و با فرض $\dot{\tau}(t) \leq \tau_{\max}$ و $\tau(t) \leq \tau_{\max}$ (که در آن τ_{\max} حد بالای تأخیر

زمانی

است)، داریم:

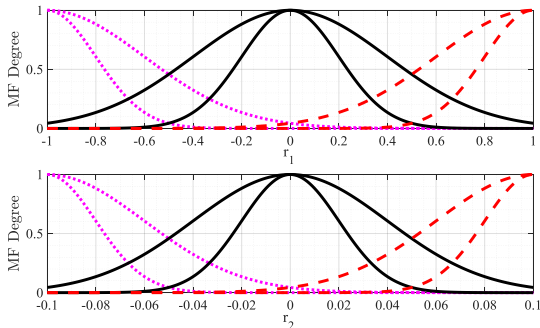
$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= e\dot{e} + e^2 - (1-\dot{\tau})e(t-\tau)^2 + \tau_{\max}e^2 - \int_{t-\tau_{\max}}^t e(s)^2 ds \\ &\quad - \frac{1}{\gamma_1}\dot{\tilde{\alpha}}\tilde{\alpha} - \frac{1}{\gamma_2}\dot{\tilde{\beta}}\tilde{\beta} \\ &\leq e\dot{e} + (1+\tau_{\max})e^2 - \frac{1}{\gamma_1}\dot{\tilde{\alpha}}\tilde{\alpha} - \frac{1}{\gamma_2}\dot{\tilde{\beta}}\tilde{\beta} \end{aligned} \quad (۲۱)$$

که در آن مشتق تابع خطا با استفاده از روش زنجیری به صورت زیر محاسبه می شود:

صفر رسیدن خطای کنترل نواحی نتیجه می‌شود.

۴- شبیه‌سازی‌ها

در این قسمت برای نشان‌دادن کارایی روش کنترلی ارائه‌شده، تعدادی شبیه‌سازی روی سیستم قدرت انجام شده و کارایی این روش به‌ازای بارهای مختلف درخواستی و تغییرات در سیستم قدرت نشان داده شده است. با اعمال روش کنترلی پیشنهادی سعی شده است در حضور تأخیر زمانی، بار درخواستی و نامعینی‌ها سیستم قدرت پایدارشده و کلیه اهداف کنترلی آن برقرار شوند. پارامترهای سیستم قدرت مطالعه‌شده در جداول (۱) و (۲) (در قسمت ضمیمه) آورده شده است. در این شبیه‌سازی‌ها برای هر ناحیه مطابق با شکل (۱) کنترل‌کننده تطبیقی T2FPID مجزا طراحی می‌شود که سیستم فازی نوع ۲ در هر ناحیه شامل دو ورودی است که تابع عضویت گوسی قسمت مقدم آنها مطابق با شکل (۵) است.



شکل ۵: توابع تعلق برای کنترل‌کننده فازی نوع ۲

درخور ذکر است با در نظر گرفتن دو ورودی و سه تابع تعلق برای هر کدام، ۹ قانون خواهیم داشت که جزئیات این قوانین در [۲۷] آورده شده‌اند. همچنین $K_1=0.3$ و $K_2=2.3$ انتخاب شده‌اند. مقادیر اولیه پارامترهای α و β (برای هر دو ناحیه) نیز به‌صورت تصادفی انتخاب می‌شوند که این پارامترها در طول شبیه‌سازی با استفاده از روابط تطبیقی تعیین شده در روابط (۱۸) - (۲۰) تنظیم می‌شوند تا مقادیر مناسب برای آنها به دست آید. عملکرد کنترل‌کننده T2FPID پیشنهادی، با عملکرد کنترل‌کننده‌ای مقایسه شده

$$\dot{e}(t) = \frac{\partial e}{\partial t} = \frac{\partial e}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial u} \left(\frac{\partial u}{\partial u_f} \frac{\partial u_f}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial (\int u_f dt)} \frac{\partial (\int u_f dt)}{\partial t} \right) \quad (22)$$

$$= (-1)(J)(\alpha \dot{u}_f + \beta u_f)$$

با جای‌گزینی رابطه (۲۲) در (۲۱)، داریم:

$$\dot{V} \leq e(-J)(\alpha \dot{u}_f + \beta u_f) + (1 + \tau_{\max})e^2 - \frac{1}{\gamma_1} \dot{\alpha} \tilde{\alpha} - \frac{1}{\gamma_2} \dot{\beta} \tilde{\beta} \quad (23)$$

در رابطه فوق به جای β و α به ترتیب $\tilde{\beta} - \beta^*$ و $\tilde{\alpha} - \alpha^*$ جای‌گزینی شده است و بنابراین می‌توان نوشت:

$$\dot{V} \leq -eJ(\alpha^* \dot{u}_f + \beta^* u_f) + (1 + \tau_{\max})e^2 + (eJ\dot{u}_f - \frac{1}{\gamma_1} \dot{\alpha})\tilde{\alpha} + (eJu_f - \frac{1}{\gamma_2} \dot{\beta})\tilde{\beta} \quad (24)$$

حال با جای‌گزینی روابط تطبیقی (۱۸) و (۱۹) در مشتق تابع لیپانوف، این رابطه به‌صورت زیر ساده می‌شود:

$$\dot{V} \leq -eJ(\alpha^* \dot{u}_f + \beta^* u_f) + (1 + \tau_{\max})e^2 \quad (25)$$

با فرض ثابت بودن پارامترهای قسمت مقدم کنترل‌کننده فازی نوع ۲، مشتق خروجی این کنترل‌کننده (با تقریب) به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\dot{u}_f(t) \approx \theta^T \Phi \quad (26)$$

و با جای‌گزینی آن در رابطه (۲۵)، داریم:

$$\dot{V} \leq -eJ(\alpha^* \theta^T \Phi + \beta^* \theta^T \Phi) + (1 + \tau_{\max})e^2 \quad (27)$$

که به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\dot{V} \leq -eJ(\theta^T \Phi + \frac{\beta^*}{\alpha^*} \theta^T \Phi) + \frac{(1 + \tau_{\max})}{\alpha^*} e^2 \quad (28)$$

با جای‌گزینی رابطه تطبیقی (۲۰) در رابطه فوق و با فرض $k_0 = \frac{\beta^*}{\alpha^*} > 0$ ، مشتق تابع لیپانوف - کراسوسکی

به‌صورت زیر قابل دستیابی است:

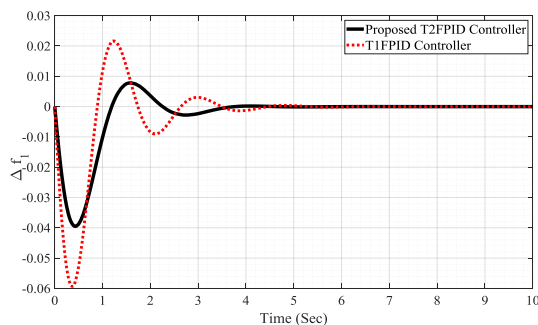
$$\dot{V} \leq -e^2 J^2 + \frac{(1 + \tau_{\max})}{\alpha^*} e^2 \quad (29)$$

با توجه به رابطه (۲۹) و برای منفی بودن \dot{V} ، یک حد بالایی برای تأخیر زمانی (حداکثر تأخیر زمانی) در ورودی سیستم قدرت می‌باید مطابق رابطه زیر در نظر گرفت:

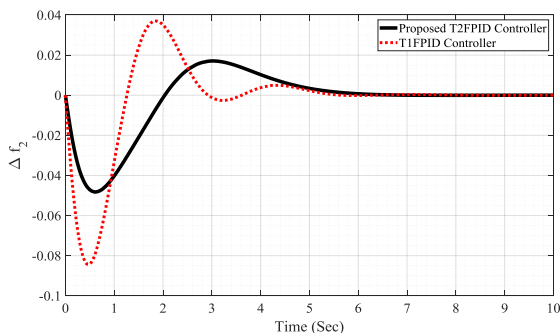
$$\tau_{\max} \leq (J^2 M_g - 1) \quad (30)$$

که در آن M_g نرم بی‌نهایت α^* است. با در نظر گرفتن حد بالای رابطه (۳۰) برای تأخیر زمانی، $\dot{V} \leq 0$ می‌شود و محدود بودن پارامترهای تطبیقی کنترل‌کننده پیشنهادی و به

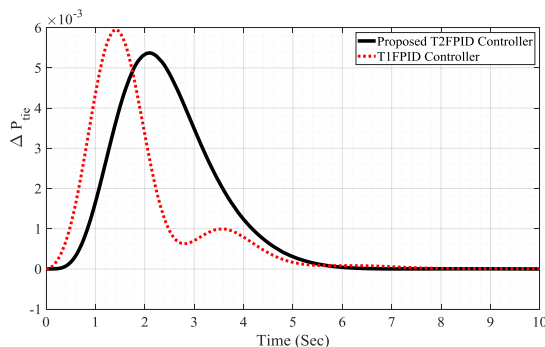
بهتری تغییرات فرکانس در نواحی را به صفر برساند. در این میان، کنترل‌کننده T1FPID نیز باتوجه به ضعف سیستم فازی نوع ۱ در مواجهه با نامعینی‌ها و غیرخطی‌گری‌ها عملکرد ضعیف‌تری نسبت به کنترل‌کننده پیشنهادی مبتنی بر فازی نوع ۲ دارد. همچنین، تغییرات در توان انتقالی به‌ازای کنترل‌کننده‌های یادشده در شکل (۸) نشان داده شده است.



شکل ۶: تغییرات فرکانس در ناحیه اول برای حالت ۱



شکل ۷: تغییرات فرکانس در ناحیه دوم برای حالت اول



شکل ۸: تغییرات در توان انتقالی برای حالت اول

با توجه به شکل مشخص است در لحظات ابتدایی، توان درخواستی با Discoها بر عملکرد ژنراتورهای سایر نواحی نیز اثر گذاشته (به‌منزله اغتشاش برای سایر نواحی‌اند) و سپس این تغییرات با کنترل‌کننده‌های تعبیه‌شده به سمت صفر هدایت شده‌اند. در این میان و با توجه به دلایل گفته‌شده، کنترل‌کننده T2FPID پیشنهادی رفتار

که به جای توابع تعلق فازی نوع ۲ در روش پیشنهادی از توابع تعلق فازی نوع ۱ استفاده شده است (که کنترل‌کننده T1FPID نامیده می‌شود).

حالت ۱:

تأخیر متغیر با زمان، که مقدار کوچکی است، در هر یک از ناحیه‌های کنترلی و در ورودی سیستم بار - فرکانس در سیستم قدرت به‌صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\tau(t) = 1.5 + 0.5 \sin(t)$$

که در آن τ_{max} برابر با ۲ ثانیه است. همچنین فرض می‌شود بارهای درخواستی از Discoها در هر یک از نواحی به‌صورت زیر باشند:

$$\Delta P_{L1} = 0.1 pu, \Delta P_{L2} = 0.1 pu, \\ \Delta P_{L3} = 0.1 pu, \Delta P_{L4} = 0.1 pu$$

نحوه قرارداد مابین Discoها و Gencoها با استفاده از

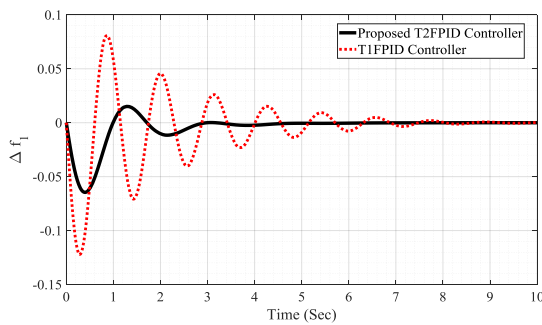
ماتریس زیر بیان می‌شود:

$$GPM = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & 0.0 & 0.0 \\ 0.5 & 0.5 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.5 & 0.5 \\ 0.0 & 0.0 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix}$$

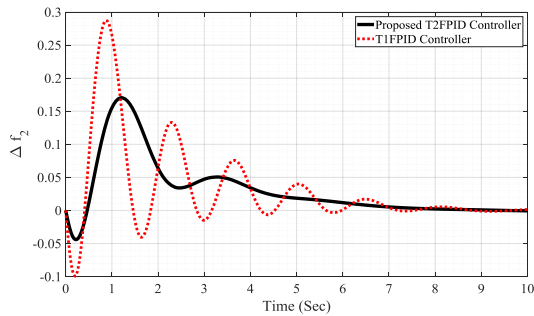
با توجه به ماتریس GPM مشخص است Discoهای

ناحیه اول از Gencoهای ناحیه دوم و برعکس باری خریداری نمی‌کنند و بنابراین، توان انتقالی برنامه‌ریزی‌شده بین ناحیه‌ها در حالت ماندگار صفر خواهد بود. در شکل (۶) و (۷)، به‌ترتیب تغییرات فرکانس در نواحی اول (Δf_1) و ناحیه دوم (Δf_2) به‌ازای کنترل‌کننده‌های مذکور نشان داده شده است. از پاسخ به‌دست‌آمده برای تغییرات فرکانس در نواحی، مشخص است کنترل‌کننده T2FPID پیشنهادی رفتار مناسبی (هم از لحاظ فروجهش و زمان نشست) نسبت به کنترل‌کننده دیگر داشته و تغییرات فرکانس در هر دو ناحیه را با کیفیت مناسبی به صفر رسانده است. از مهم‌ترین دلایل رفتار مناسب کنترل‌کننده پیشنهادی این است که در آن تأخیر زمانی در تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده T2FPID تأثیر داده شده و این کنترل‌کننده توانسته است در مقابل تأخیر و اغتشاش نواحی (بار درخواستی) ایستادگی کند و با سرعت

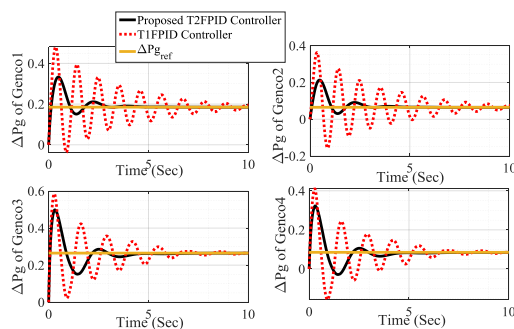
T1FPID شروع به نوسان می‌کند و دامنه نوسانات تا ثانیه ۷ نیز ادامه دارد که ناشی از ضعف سیستم فازی نوع ۱ در مواجهه با نامعینی‌ها است. در مقابل، کنترل‌کننده T2FPID پیشنهادی در مقایسه با این کنترل‌کننده و با یک فروجهش کم، بر اغتشاش، تغییرات در سیستم قدرت و تأخیر زمانی یادشده فایده‌آمده و خطای حالت ماندگار با کیفیت مناسبی از بین رفته و اهداف کنترلی در هر دو ناحیه محقق شده است. همچنین در شکل (۱۱) توان تولیدی با ژنراتورهای ناحیه ۱ و ۲ به‌ازای اعمال کنترل‌کننده‌های طراحی شده نشان داده شده که بیان‌کننده رفتار بسیار مناسب کنترل‌کننده پیشنهادی است.



شکل ۹: تغییرات فرکانس در ناحیه اول برای حالت ۲



شکل ۱۰: تغییرات فرکانس در ناحیه دوم برای حالت ۲



شکل ۱۱: توان تولیدی در نواحی ۱ و ۲ در حالت ۲

یکی از مهم‌ترین دلایل عملکرد بهتر کنترل‌کننده T2FPID پیشنهادی، استفاده از توابع تعلق فازی نوع ۲ در

مناسب‌تری نسبت به کنترل‌کننده T1FPID داشته و توانسته است بر اغتشاش و تأخیر زمانی موجود در سیستم قدرت با کیفیت بهتری غلبه کند.

حالت دوم:

در این قسمت سعی شده است میزان کارایی کنترل‌کننده‌های طراحی شده به‌ازای تأخیر زمانی بزرگ و همچنین، نامعینی در پارامترهای سیستم قدرت بررسی شود. برای همین منظور، تأخیر زمانی زیر در هر یک از ناحیه‌های کنترلی و در ورودی سیستم غیرخطی بار - فرکانس در نظر گرفته می‌شود:

$$\tau(t) = 5.5 + 0.5 \sin(t)$$

که در آن τ_{max} برابر با ۶ ثانیه است. همچنین فرض می‌شود تعدادی از پارامترهای سیستم قدرت در جداول (۱) و (۲) از مقادیر نامی خود به مقادیر $T_{12}=0.25$, $K_{pi}=90$ و $B_i=0.25$ تغییر یابند. در این شرایط، بار درخواستی از Discoها در هر یک از نواحی نیز به‌صورت زیر در نظر گرفته می‌شوند:

$$\Delta P_{L1} = 0.2 \text{ pu}, \Delta P_{L2} = 0.1 \text{ pu}, \Delta P_{L3} = 0.1 \text{ pu}, \Delta P_{L4} = 0.2 \text{ pu}$$

که نحوه قرارداد مابین Discoها و Gencoها در آن با

استفاده از ماتریس زیر بیان می‌شود:

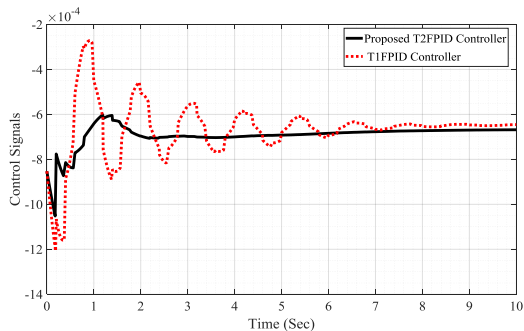
$$GPM = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.25 & 0.0 & 0.3 \\ 0.20 & 0.25 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.25 & 1.0 & 0.7 \\ 0.3 & 0.25 & 0.0 & 0.0 \end{bmatrix}$$

مشخص است تبادل توان بین Discoها و Gencoهای نواحی اول و دوم وجود دارد. با توجه به مقادیر GPM میزان توانی که باید با ژنراتورها تولید شوند، به‌صورت زیر قابل دستیابی است:

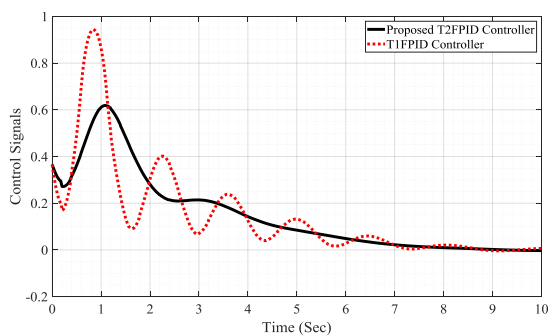
$$\begin{aligned} \Delta P_{g1} &= gpf_{11}\Delta P_{L1} + gpf_{12}\Delta P_{L2} + gpf_{13}\Delta P_{L3} + gpf_{14}\Delta P_{L4} \\ &= 0.5 \times 0.2 + 0.25 \times 0.1 + 0.0 \times 0.1 + 0.3 \times 0.2 = 0.185 \text{ pu} \\ \Delta P_{g2} &= 0.065 \text{ pu}, \Delta P_{g3} = 0.265 \text{ pu}, \Delta P_{g4} = 0.085 \text{ pu} \end{aligned}$$

تغییرات فرکانس در ناحیه اول (Δf_1) و ناحیه دوم (Δf_2) به‌ازای کنترل‌کننده تطبیقی T2FPID پیشنهادی و همچنین کنترل‌کننده T1FPID به‌ترتیب در شکل (۹) و (۱۰) نشان داده شده‌اند. با توجه به پاسخ این کنترل‌کننده‌ها مشخص است با افزایش تأخیر، تغییر شدید در پارامترهای سیستم (نامعینی) و همچنین درخواست بار در نواحی، کنترل‌کننده

مهم ترین دلایل عملکرد بهتر کنترل کننده T2FPID پیشنهادی در مقایسه با T1FPID می توان به استفاده از توابع عضویت فازی نوع ۲ در قسمت مقدم آن اشاره کرد که توانایی چشمگیری در مواجهه با نامعینی ها و اغتشاش وارده به سیستم غیرخطی دارند.



شکل ۱۴: سیگنال های کنترلی (u) به ازای اعمال کنترل کننده ها در ناحیه اول



شکل ۱۵: سیگنال های کنترلی (u) به ازای اعمال کنترل کننده ها در ناحیه دوم

جدول ۳: مقادیر RMSE به دست آمده از عملکرد

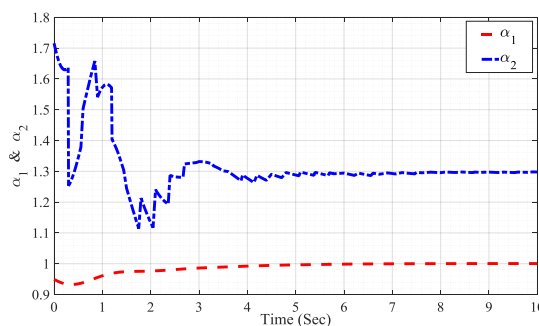
کنترل کننده ها

ناحیه دوم	ناحیه اول	
0.0566	0.0197	کنترل کننده T2FPID پیشنهادی
0.0714	0.0313	کنترل کننده T1FPID

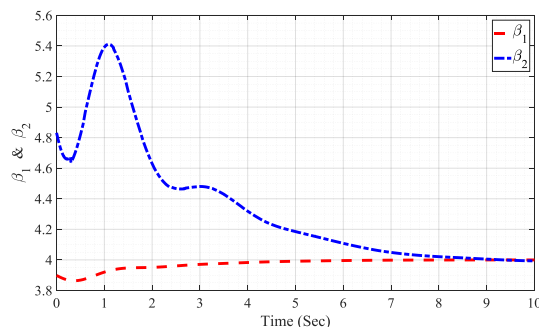
۵- نتیجه گیری

در این مقاله، برای مقابله با تأخیر زمانی، نامعینی ها و تقاضاهای بار مختلف در یک سیستم قدرت دوناحیه ای غیرخطی، کنترل کننده تطبیقی T2FPID با استفاده از تئوری لیاپانوف - کراسوسکی برای مسئله کنترل بار - فرکانس طراحی شد. کنترل کننده T2FPID پیشنهادی دارای ساختار غیرخطی و تطبیقی بود و از لحاظ رابطه ورودی - خروجی همانند کنترل کننده PID عمل می کند. نشان داده شد

قسمت مقدم و همچنین، تأثیر دادن تأخیر زمانی در قوانین تطبیق پارامترها کنترل کننده است که با تغییر پارامترهای سیستم (و تأخیر زمانی)، ضرایب تطبیقی این کنترل کننده (پارامترهای α و β در هر دو ناحیه) مطابق با شکل های (۱۲) و (۱۳) به مقادیر جدید و مناسبی برای مقابله با آنها همگرا می شوند. باتوجه به این شکل ها، پارامترهای α و β با مقادیر اولیه تصادفی شروع کرده و مطابق با الگوریتم تطبیقی به دست آمده تغییر کرده و در نهایت به مقادیر مشخص شده همگرا شده اند.



شکل ۱۲: نحوه همگرایی پارامترهای α در هر دو ناحیه



شکل ۱۳: نحوه همگرایی پارامترهای β در هر دو ناحیه

همچنین، سیگنال کنترلی اعمالی (u) با دو کنترل کننده ذکر شده، در شکل (۱۴) و (۱۵) نشان داده شده است. باتوجه به این شکل ها، مشخص است دامنه این سیگنال در کنترل کننده پیشنهادی نسبت به کنترل کننده T1FPID کمتر بوده و در این کنترل کننده با صرف انرژی کمتری اهداف مسئله بار - فرکانس برقرار شده است.

همچنین، برای حالت ۲، مجذور مربعات خطا (RMSE) به ازای اعمال کنترل کننده های ذکر شده در جدول (۳) آورده شده است. باتوجه به مقادیر RMSE برای کنترل کننده ها، عملکرد بهتر کنترل کننده T2FPID پیشنهادی در مقایسه با کنترل کننده T1FPID مشهود است. همان طور که گفته شد از

- & Energy Systems, Vol. 55, pp. 51-58, 2014.
- [6] H. Yousef, "Design of adaptive fuzzy-based tracking control of input time delay nonlinear systems," *Nonlinear Dynamics*, Vol. 79, pp. 417-426, 2015.
- [7] H. Yousef, "Adaptive fuzzy logic load frequency control of multi-area power system," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 68, pp. 384-395, 2015.
- [8] K. Sabahi, M. Nekoui, M. Teshnehlab, M. Aliyari, and M. Mansouri, "Load frequency control in interconnected power system using modified dynamic neural networks," in *Mediterranean conference on control & automation Greece, 2007*, pp. 1-5.
- [9] K. Sabahi and M. Teshnehlab, "Recurrent fuzzy neural network by using feedback error learning approaches for LFC in interconnected power system," *Energy Conversion and Management*, Vol. 50, pp. 938-946, 2009.
- [10] [10] K. Sabahi, E. Narimani, and A. Faramarzi, "Dynamic neural network for AGC in restructure power system," in *2010 IEEE International Conference on Power and Energy*, 2010, pp. 594-599.
- [11] V. Donde, M. Pai, and I. A. Hiskens, "Simulation and optimization in an AGC system after deregulation," *IEEE transactions on power systems*, Vol. 16, pp. 481-489, 2001.
- [12] H. Bevrani and T. Hiyama, "Robust decentralised PI based LFC design for time delay power systems," *Energy Conversion and Management*, Vol. 49, pp. 193-204, 2008.
- [13] R. Dey, S. Ghosh, G. Ray, and A. Rakshit, " H_{∞} load frequency control of interconnected power systems with communication delays," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 42, pp. 672-684, 2012.
- [14] L. Jiang, W. Yao, Q. Wu, J. Wen, and S. Cheng, "Delay-dependent stability for load frequency control with constant and time-varying delays," *IEEE transactions on power systems*, Vol. 27, pp. 932-941, 2011.
- [15] C.-K. Zhang, L. Jiang, Q. Wu, Y. He, and M. Wu, "Further results on delay-dependent stability of multi-area load frequency control," *IEEE transactions on power systems*, Vol. 28, pp. 4465-4474, 2013.
- [16] M. Heshmati, S. Jalilzadeh, H. Shayeghi, and R. Noroozian, "Optimal design of NL-PIDF and SMES as load frequency controller in a hybrid nonlinear power system using krill herds algorithm," *Computational Intelligence in Electrical Engineering*, Vol. 8, pp. 46-58, 2017.
- [17] L. Xiong, H. Li, and J. Wang, "LMI based robust load frequency control for time delayed power system via delay margin estimation," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 100, pp. 91-103, 2018.
- [18] E. Çam and I. Kocaarslan, "A fuzzy gain scheduling PI controller application for an interconnected electrical power system," *Electric Power Systems Research*, Vol. 73, pp. 267-274, 2005.
- [19] E. Yeşil, M. Güzelkaya, and I. Eksin, "Self tuning

کنترل کننده تطبیقی پیشنهادی به ازای تأخیر زمانی های مختلف، تقاضای بار متنوع نواحی و نامعینی های سیستم قدرت، اهداف مسئله بار - فرکانس را برقرار می کند و پارامترهای تطبیقی آن محدود باقی می ماند. برای نشان دادن کارایی بهتر روش پیشنهادی، این روش با کنترل کننده T1FPID مقایسه شد و نشان داده شد کنترل کننده پیشنهادی به دلیل ساختار تطبیقی و توانایی بهتر در مقابله با نامعینی ها و غیرخطی گری ها، تغییرات فرکانس و توان انتقالی در سیستم قدرت غیرخطی تأخیردار را با کیفیت بهتر و با صرف انرژی کمتری به صفر می رساند. استفاده از توابع عضویت فازی نوع ۲ در قسمت مقدم کنترل کننده و همچنین اثر دادن تأخیر زمانی در قوانین تطبیق پارامترها از مهم ترین دلایل عملکرد بهتر کنترل کننده پیشنهادی اند.

ضمایم

جدول ۱: پارامترهای سیستم قدرت برای Genco ها [12]

	R_i	T_{ti}	T_{gi}	α_i
Genco i ($i=1:4$)	2.4	0.36	0.06	0.5

جدول ۲: پارامترهای سیستم قدرت برای Disco ها [12]

	K_{pi}	T_{pi}	B_i	T_{12}
Area i ($i=1,2$)	120	20	0.5	0.5

مراجع

- [1] H. Saadat, "Power system analysis.(2002)," ed: E-Publishing Inc, New York.
- [2] F. Jamshidi, M.M. Ghanbarian, "Robust Frequency Control of Islanded Microgrids: ICA-Based FFOPID Control Approach," *Computational Intelligence in Electrical Engineering*, Vol. 8, pp. 51-61, 2017.
- [3] F. Amiri, A. Hatami, "A model predictive control method for load-frequency control in islanded microgrids," *Computational Intelligence in Electrical Engineering*, Vol. 8, pp. 9-24, 2017.
- [4] W. Tan, "Tuning of PID load frequency controller for power systems," *Energy Conversion and Management*, Vol. 50, pp. 1465-1472, 2009.
- [5] M. Toulabi, M. Shiroei, and A. Ranjbar, "Robust analysis and design of power system load frequency control using the Kharitonov's theorem," *International Journal of Electrical Power*

- constant communication time delay," Transactions of the Institute of Measurement and Control, Vol. 40, pp. 1701-1710, 2018.
- [26] Y. Arya and N. Kumar, "Fuzzy gain scheduling controllers for automatic generation control of two-area interconnected electrical power systems," Electric Power Components and Systems, Vol. 44, pp. 737-751, 2016.
- [27] K. Sabahi, S. Ghaemi, J. Liu, and M. A. Badamchizadeh, "Indirect predictive type-2 fuzzy neural network controller for a class of nonlinear input-delay systems," ISA transactions, Vol. 71, pp. 185-195, 2017.
- [28] S. Ghaemi, K. Sabahi, and M. A. Badamchizadeh, "Lyapunov-Krasovskii stable T2FNN controller for a class of nonlinear time-delay systems," Soft Computing, Vol. 23, pp. 1407-1419, 2019.
- [29] K. Sabahi, S. Ghaemi, and M. A. Badamchizadeh, "Feedback error learning-based type-2 fuzzy neural network predictive controller for a class of nonlinear input delay systems," Transactions of the Institute of Measurement and Control, p. 0142331219834998, 2019.
- [30] M. D. Schrieber and M. Biglarbegian, "Hardware implementation and performance comparison of interval type-2 fuzzy logic controllers for real-time applications," Applied Soft Computing, Vol. 32, pp. 175-188, 2015.
- fuzzy PID type load and frequency controller," Energy Conversion and Management, Vol. 45, pp. 377-390, 2004.
- [20] M. H. Khooban and T. Niknam, "A new intelligent online fuzzy tuning approach for multi-area load frequency control: Self Adaptive Modified Bat Algorithm," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 71, pp. 254-261, 2015.
- [21] M. Gheisarnejad, "An effective hybrid harmony search and cuckoo optimization algorithm based fuzzy PID controller for load frequency control," Applied Soft Computing, Vol. 65, pp. 121-138, 2018.
- [22] E. Yesil, "Interval type-2 fuzzy PID load frequency controller using Big Bang-Big Crunch optimization," Applied Soft Computing, Vol. 15, pp. 100-112, 2014.
- [23] K. Sabahi, S. Ghaemi, and M. Badamchizadeh, "Designing an adaptive type-2 fuzzy logic system load frequency control for a nonlinear time-delay power system," Applied Soft Computing, Vol. 43, pp. 97-106, 2016.
- [24] K. Ramakrishnan and G. Ray, "Stability Criteria for Nonlinearly Perturbed Load Frequency Systems With Time-Delay," IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems, Vol. 5, pp. 383-392, 2015.
- [25] Ş. Sönmez and S. Ayasun, "Gain and phase margins based delay-dependent stability analysis of single-area load frequency control system with

¹ Load Frequency Control (LFC)

² Fuzzy PID (FPID)

³ Interval Type-2 Fuzzy Logic System (IT2FLS)

⁴ Type-2 Fuzzy Neural Network (T2FNN)

⁵ Type-2 Fuzzy PID (T2FPID)

⁶ Generation Company (Genco)

⁷ Distributed Company (Disco)

⁸ Area Control Error (ACE)

⁹ Takagi-Sugeno-Kang (TSK)