

کنترل مقاوم فرکانس ریزشبه‌ی جزیره‌یی با کنترل گر PI تنظیم شده با منطق فازی و الگوریتم رقابت استعماری

فاطمه جمشیدی^۱، استادیار^۲؛ محمدمهدی قنبریان، استادیار^۳؛ اسما تفکر، دانشجوی کارشناسی ارشد^۴

۱- دانشکده مهندسی - گروه مهندسی برق - دانشگاه فسا - فسا - فارس - jamshidi@fasau.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی - گروه مهندسی برق - واحد کازرون - دانشگاه آزاد اسلامی - کازرون - ghanbarian@kau.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی - گروه مهندسی برق - واحد کازرون - دانشگاه آزاد اسلامی - کازرون

چکیده: با به کارگیری انرژی‌های تجدیدپذیر در ریزشبه‌ی به عنوان یکی از منابع انرژی پراکنده، توان الکتریکی تولید می‌گردد. بارهای پراکنده در حالت‌های متصل به/منفصل از شبکه سراسری قدرت از ریزشبه‌ها خدمات دریافت می‌نمایند. نوسانات طبیعی میزان توان تولیدی با انرژی‌های تجدیدپذیر و نامعینی‌های سیستم قدرت، عملکرد کنترل گرهای کلاسیک را تضعیف می‌نمایند. در مقاله‌ی حاضر در پاسخ به این چالش، منطق فازی مقدار لحظه‌یی پارامترهای کنترل گر PI را محاسبه می‌کند. الگوریتم رقابت استعماری برای تعیین بهینه‌ی مقادیر نامی پارامترهای کنترل گر و محدوده توابع عضویت سیستم فازی پیشنهادی به کار می‌رود. محدوده پارامترهای پایدارساز کنترل گر پیشنهادی با قضیه خاریتانوف تعیین می‌شود. مقایسه‌ی معیارهای RMS، فراجش و فروجش، تعداد نوسانات و زمان نشست تغییرات فرکانس طرح کنترلی پیشنهادی با کنترل گر PI بازای تغییرات بار مختلف، عملکرد بهتر کنترل گر پیشنهادی را تایید می‌نماید. شبیه‌سازی‌ها با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های پارامترهای سیستم، مقاوم بودن کنترل گر پیشنهادی را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم رقابت استعماری، ریزشبه جزیره‌یی، ریشه میانگین مربعات تغییرات فرکانس، قضیه خاریتانوف، کنترل گر PI، منطق فازی.

Robust Frequency Control of Island Microgrid using PI Controller Tuned by ICA- Based Fuzzy Logic

F. Jamshidi¹, Assistant Professor; M. M. Ghanbarian², Assistant Professor; A. Tafakkor³, MSc Student

1- Electrical Engineering, Engineering Department, University of Fasa, Fasa, Fars, Iran, Email: jamshidi@fasau.ac.ir

2- Electrical Engineering Department, Islamic Azad University, Kazerun Branch, Kazerun, Iran, Email: ghanbarian@kau.ac.ir

3- Electrical Engineering Department, Islamic Azad University, Kazerun Branch, Kazerun, Iran

Abstract: Renewable energies are used by micro grid (MG) to produce electrical power. Scattered loads receive service from MG in both Island and Grid connected operation modes. Uncertainties of power system and natural deviations of power produced by renewable energies attenuate the performance of classic controllers. In this paper, fuzzy system determines the parameters of PI controller in response to this challenge. The Imperialist competitive algorithm (ICA) optimizes the nominal values of controller parameters and the membership functions of the proposed fuzzy system. The interval of the proposed controller parameters are determined by Kharitonov's theorem to ensure the stability of the closed loop system. Comparison of RMS, overshoot and undershoot, number of oscillations, and settling time of the frequency deviations of the proposed control scheme with two other controllers in several load changes demonstrates the better performance of the proposed controller. Considering the uncertainties of system parameters proves that the proposed controller is robust.

Keywords: Fuzzy logic, imperialist competitive algorithm (ICA), Kharitonov's theorem, microgrid, PI controller, root mean square (RMS) of frequency deviation.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۹/۱۳

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۱۱/۰۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۴/۲۶

نام نویسنده مسئول: فاطمه جمشیدی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - فارس - فسا - بلوار معلم - دانشگاه فسا - دانشکده مهندسی - گروه مهندسی برق.

۱- مقدمه

تولیدات پراکنده و حضور ریزشبه‌ها به دلیل پیشرفت تکنولوژی، محدودیت بازار برق و مسایل محیط زیست رشد چشم‌گیر داشته است. در چند سال گذشته، افزایش قابل ملاحظه‌ی مصرف انرژی الکتریکی، چالش‌هایی همچون ناکافی بودن سوخت فسیلی، گرمایش جهانی و هزینه‌ی گزاف راه‌اندازی نیروگاه را برای واحدهای تولید سیستم قدرت ایجاد نموده است. استفاده از منابع تولید پراکنده (DG)^۱ برای برطرف‌سازی نگرانی‌های محیط زیستی، بهبود قابلیت اطمینان و افزایش عرضه‌ی سیستم‌های قدرت در محیط‌های خصوصی، پیشنهاد گردیده است. استفاده‌ی مناسب از منابع پراکنده نیازمند استانداردهای زیادی است، به این دلیل کنسرسیوم CERTS^۲، ریزشبه را اجتماعی از تعدادی بار و منبع کوچک به‌صورت سیستم کوچک تولیدکننده‌ی هم‌زمان برق و گرما تعریف کرد [۱]. منبع‌های اصلی توان در ریزشبه، واحدهای تولیدی کوچک با ظرفیت چند ده کیلو وات در سمت مصرف‌کننده می‌باشند که به‌صورت منابع تولید پراکنده به شبکه متصل هستند. منابع تولید پراکنده، CHP^۳، توربین بادی، منبع زمین گرمایی، سلول خورشیدی، سلول سوختی، میکروتوربین همراه با عناصر ذخیره‌کننده انرژی مثل باتری، چرخ طیار و خازن انرژی می‌باشند. بهره‌برداری از منبع‌های انرژی نو، به‌عنوان واحد تولیدی جانشین در سیستم‌های قدرت مدرن، این سوال را مطرح می‌کند که این منبع‌ها در کنار واحدهای تولیدی موجود، آیا قادر هستند به‌صورت پایدار کار کنند. به‌علاوه در صورت رخداد مساله‌ی جدی مثل اختلالات بار یا قطع یک واحد تولیدی، شاخص‌های اصلی سیستم همچون ولتاژ و فرکانس به دلیل اینرسی اندک منبع‌های کوچک به شدت تاثیر می‌گیرند و احتمال وقوع شرایط بحرانی وجود دارد [۲]. پروژه‌های عملی و تحقیقاتی بسیاری مثل پروژه CERTS در کشور آمریکا [۳]، پروژه ریزشبه در کشور سنگال [۴] و تعدادی پروژه در کشور ژاپن [۵] در زمینه ریزشبه انجام گردیده است. در سیستم قدرت، با حضور ریزشبه در کنار واحدهای تولیدی بزرگ، به‌منظور تضمین پایداری و عملکرد مناسب سیستم، لازم است شاخص‌های اصلی سیستم کنترل شوند. اخیراً، تحقیقات گسترده‌ی در زمینه کنترل فرکانس و ولتاژ ریزشبه‌ها صورت گرفته است.

در [۶]، با روش زمان‌بندی ضرایب اف‌تی، فرکانس ریزشبه کنترل شده است. در [۷] و [۸]، پایداری فرکانس، حفظ فرکانس با کمترین تلفات در بار و واحدهای تولیدی علی‌رغم وجود اغتشاش‌های سنگین تعریف گردیده است. در [۹]، دو روش کنترل مقاوم سنتز H_∞ و H_2 برای کنترل فرکانس ریزشبه‌ها به‌کار رفته و عملکرد مقاوم کنترل‌گر پیشنهادی در حضور اغتشاش‌های مختلف و عدم قطعیت‌های پارامتری مطالعه شده است. در [۱۰]، متداول‌ترین کنترل‌گر فرکانس ریزشبه یعنی تناسبی-انتگرالی (PI)، استفاده گردیده است. از آنجا که تعیین پارامترهای پیکربندی‌های مختلف کنترل‌گر PID از جمله PI به روش کلاسیک قادر به به‌روزرسانی خود با شرایط متغیر نیست،

کارایی این کنترل‌گر تضعیف می‌شود. برای حل این چالش در [۱۰]، برای تنظیم برخط^۴ پارامترهای کنترل‌گر PI، ساختار دوسطحی که سطح اول آن کنترل‌گر PI و سطح دوم آن سیستم فازی است، پیشنهاد شده است. تغییرات فرکانس و اغتشاش بار، ورودی و پارامترهای کنترل‌گر، خروجی سیستم فازی است. عملکرد این ساختار به توابع عضویت سیستم فازی بستگی دارد و الگوریتم بهینه‌یابی ازدحام ذرات (PSO)^۵ برای تعیین برخط پارامترهای توابع عضویت هم‌زمان با تغییرات سیستم استفاده گردیده است. به‌منظور کنترل فرکانس ریزشبه جزیره‌ی، در [۱۱] شبکه عصبی مصنوعی برای تعیین پارامترهای کنترل‌گر PI به کار رفته است و در [۱۲]، ترکیب سیستم فازی و الگوریتم تفاضل تکاملی بهبود یافته برای تعیین برخط پارامترهای کنترل‌گر PID با در نظر گرفتن عوامل غیرخطی و عدم قطعیت‌ها اعمال شده است.

به سبب سرعت و دقت بالای الگوریتم رقابت استعماری (ICA)^۶، از آن در حل بسیاری از مسایل بهینه‌یابی استفاده گردیده است [۱۳-۱۶].

در مقاله‌ی حاضر، کنترل‌گر PI برای کنترل فرکانس ریزشبه جزیره‌ی استفاده خواهد شد. محدوده پارامترهای پایدارساز این کنترل‌گر با محاسبه‌ی معادله مشخصه ریزشبه جزیره‌ی کنترل‌شده با PI و اعمال قضیه خاریتانوف به آن و با استفاده از الگوریتم دو بخشی تعیین خواهد گردید. ICA مقدار نامی بهینه‌ی پارامترهای را تعیین خواهد کرد. از منطق فازی برای تنظیم برخط پارامترهای کنترل‌گر PI استفاده خواهد شد. تغییرات فرکانس و مشتق آن، ورودی و تغییرات نسبی پارامترهای کنترل‌گر، خروجی سیستم فازی پیشنهادی خواهد بود. سپس از ICA برای تعیین بهینه‌ی محدوده‌ی توابع عضویت سیستم فازی پیشنهادی به‌صورت غیرهم‌زمان بهره گرفته خواهد شد. در بهینه‌یابی‌ها ریشه میانگین مربعات (RMS) تغییرات فرکانس کمینه خواهد گردید. برتری طرح کنترلی ارایه شده، با مقایسه‌ی نتایج روش پیشنهادی با کنترل‌گر PI کلاسیک زیگلر-نیکولز و کنترل‌گر ارائه شده در [۱۰]، نشان داده خواهد شد.

در ادامه در بخش ۲، ریزشبه‌ی AC و سیستم آزمون توصیف می‌شود. تعیین محدوده پارامترهای کنترل‌گر PI پایدارساز با استفاده از قضیه خاریتانوف و الگوریتم دو بخشی در بخش ۳ بیان می‌گردد. در بخش ۴، الگوریتم بهینه‌یابی رقابت استعماری و در بخش ۵، روش‌های کنترلی به‌کار رفته توصیف می‌گردند. در بخش ۶، نتایج شبیه‌سازی‌ها ارائه می‌شود. در پایان، نتایج بررسی می‌گردد.

۲- ریزشبه‌ی AC

شکل ۱ پیکربندی یک ریزشبه نمونه را نشان می‌دهد. در نقطه‌ی اتصال مشترک (PCC)^۷، ریزشبه به شبکه‌ی سراسری قدرت متصل می‌گردد. کنترل‌گر مرکزی (CC)^۸ ریزشبه که با پردازش هم‌زمان اطلاعات دریافتی از ریزشبه و شبکه‌ی سراسری برای حالت‌های کاری ریزشبه و ریزمنبع‌ها تصمیم می‌گیرد، الزامی است. عناصر الکترونیک

مدل سیستم آزمون این مقاله در حوزه‌ی فرکانس مطابق شکل ۳ در نظر گرفته شده است. هر واحد واقعی با یک تابع تبدیل درجه ۱ تقریب زده شده است. این بلوک‌های تاخیری که در اکثر مطالعات کنترل فرکانس به کار می‌روند، در جدول ۱ توصیف شده‌اند. ورودی اغتشاش خارجی تغییرات بار است.

تابع تبدیل از هر یک از ورودی‌های خارجی سیستم به خروجی Δf برابر است با:

$$G_{\frac{\Delta f}{P_{FC}}} = g_3 g_4 g_5 g'' = \frac{n_1(s)}{d(s)} \quad (1)$$

$$G_{\frac{\Delta f}{P_{PV}}} = g_4 g_5 g'' = \frac{n_2(s)}{d(s)} \quad (2)$$

$$G_{\frac{\Delta f}{P_{WTG}}} = g'' = \frac{n_3(s)}{d(s)} \quad (3)$$

$$G_{\frac{\Delta f}{\Delta P_L}} = g'' = \frac{n_3(s)}{d(s)} \quad (4)$$

$$G_{\frac{\Delta f}{u}} = \frac{R g_1 g_2 g'}{R + g_1 g_2 g'} = \frac{n(s)}{d(s)} \quad (5)$$

که در آن داریم:

$$g' = \frac{g_6}{1 + g_6(g_7 + g_8)} \quad (6)$$

$$g'' = \frac{g_6}{1 + g_6 \left(g_7 + g_8 + \frac{g_1 g_2}{R} \right)} \quad (7)$$

طبق اصل جمع آثار می‌توان نوشت:

$$\Delta f = \begin{bmatrix} G_{\frac{\Delta f}{u}} & G_{\frac{\Delta f}{P_{FC}}} & G_{\frac{\Delta f}{P_{PV}}} & G_{\frac{\Delta f}{P_{WTG}}} & G_{\frac{\Delta f}{\Delta P_L}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ P_{FC} \\ P_{PV} \\ P_{WTG} \\ \Delta P_L \end{bmatrix} \quad (8)$$

با اعمال کنترل گر PI، با تابع تبدیل:

$$G_{\frac{u}{\Delta f}} = -\frac{K_p s + K_i}{s} \quad (9)$$

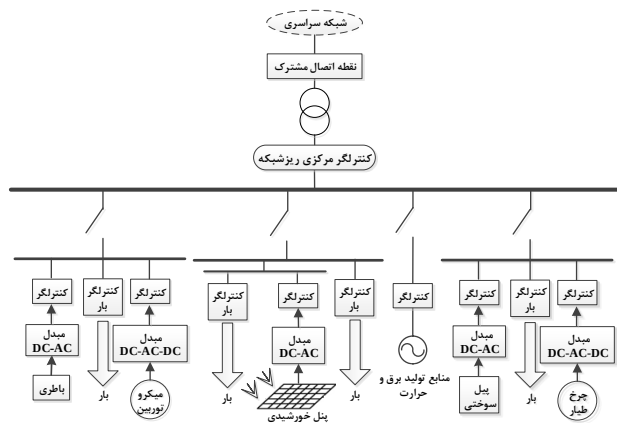
خروجی تغییرات فرکانس از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\Delta f = \frac{s \begin{bmatrix} n_1(s) & n_2(s) & n_3(s) & n_4(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{FC} \\ P_{PV} \\ P_{WTG} \\ \Delta P_L \end{bmatrix}}{sd(s) + (K_p s + K_i)n(s)} \quad (10)$$

چندجمله‌یی مشخصه سیستم حلقه بسته برابر است با:

$$P(s) = sd(s) + (K_p s + K_i)n(s) \quad (11)$$

که $d(s) = \sum_{j=0}^8 a_j s^j$ و $n(s) = \sum_{j=0}^5 b_j s^j$ می‌باشد.



شکل ۱: ریزشبهی در حالت کلی

قدرت، منابع در ریزشبهی را به باس اصلی متصل می‌کند. در محل هر ریزمنبع^۹ و هر بار الکتریکی، برای اعمال روش‌های کنترلی به کنترل‌گر بار نیاز است. منبع‌های DC با واسطه‌ی مبدل‌های DC/AC، برای متناوب‌سازی ولتاژ DC به کار می‌روند و منبع‌های AC همراه با واسطه‌های AC/DC/AC، به منظور هم‌زمان‌سازی فرکانسی، مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۷].

در حالت عادی، ریزشبهی به شبکه‌ی سراسری متصل است و در برنامه‌ریزی‌های کنترلی مشارکت دارد. در صورت وقوع اغتشاشی در سیستم، کلید قدرت در PCC عمل کرده و ریزشبهی به حالت جزیره‌یی می‌رود و توان بارهای محلی را تامین می‌کند. پارامترهای اصلی شبکه به دلیل نوسانات توان منابع تولید پراکنده و اینرسی کم آنها، حتی با اغتشاشی کوچک دچار تغییرات جدی شده و خطر ناپایداری، ریزشبهی را تهدید می‌کند. وجود منبع‌های ذخیره‌کننده‌ی انرژی برای حل این مشکل لازم است. کلید متصل به هر یک از این منبع‌ها، در صورت لزوم آن را از ریزشبهی جدا می‌کند. جدا شدن ریزشبهی به صورت پایدار از شبکه‌ی سراسری و کنترل منبع‌های ریزشبهی در حالت جزیره‌یی به گونه‌ای که منابع تولید پراکنده بتوانند فرکانس و ولتاژ سیستم را کنترل کنند، مسایل مهمی هستند [۱۰].

۲-۱- سیستم آزمون

حفظ پایداری ریزشبهی در حالت جزیره‌یی از حالت متصل به شبکه سراسری در اغلب طرح‌های کنترلی با اهمیت‌تر است. از این رو در مقاله‌ی حاضر سیستم آزمون در حالت جزیره‌یی مطابق شکل ۲ در نظر گرفته شده و روش کنترلی به آن اعمال گردیده است. مدل سیستم آزمون این مقاله دربرگیرنده‌ی توربین بادی (WTG)^{۱۰}، سلول سوختی (FC)^{۱۱}، پنل خورشیدی (PV)^{۱۲}، ژنراتور دیزلی (DEG)^{۱۳}، منبع ذخیره‌ی انرژی BESS^{۱۴} و منبع ذخیره‌ی انرژی FESS^{۱۵} است. منابع ذخیره‌ی انرژی در نزدیکی بار نصب هستند. چنانچه توان تولیدی از توان مصرفی بار کمتر باشد، منابع ذخیره‌ی انرژی، در مدت کوتاهی توان مناسب را به شبکه تزریق می‌نماید.

$$\begin{aligned} P_1(s) &= c_0^+ + c_1^+ s + c_2^- s^2 + c_3^- s^3 + \dots \\ P_2(s) &= c_0^- + c_1^- s + c_2^+ s^2 + c_3^+ s^3 + \dots \\ P_3(s) &= c_0^- + c_1^+ s + c_2^+ s^2 + c_3^- s^3 + \dots \\ P_4(s) &= c_0^+ + c_1^- s + c_2^- s^2 + c_3^+ s^3 + \dots \end{aligned} \quad (14)$$

بالانویس (+) و (-) روی پارامترها به ترتیب بیان گر کران بالا و پایین محدوده تغییرات مقدار هر پارامتر می‌باشد، با اعمال قضیه خاریتانونف به چندجمله‌یی (۱۱)، محدوده پارامترهای کنترل گر پایدار ساز به دست می‌آید. از آنجاکه:

$$\begin{aligned} P(s) &= s \sum_{j=0}^8 a_j s^j + (K_p s + K_i) \sum_{j=0}^5 b_j s^j \\ &= \sum_{j=1}^9 a_{j-1} s^j + \sum_{j=1}^6 K_p b_{j-1} s^j + \sum_{j=0}^5 K_i b_j s^j \\ &= \sum_{j=7}^9 a_{j-1} s^j + (a_5 + K_p b_5) s^6 + \\ &\quad + \sum_{j=1}^5 (a_{j-1} + K_p b_{j-1} + K_i b_j) s^j + K_i b_0 \end{aligned} \quad (15)$$

داریم:

$$c_j = \begin{cases} a_{j-1} & j = 7, 8, 9 \\ a_5 + K_p b_5 & j = 6 \\ a_{j-1} + K_p b_{j-1} + K_i b_j & j = 1, \dots, 5 \\ K_i b_0 & j = 0 \end{cases} \quad (16)$$

و c_j^+ با جای گذاری کران بالای K_p و K_i و c_j^- با جای گذاری کران پایین K_p و K_i به دست می‌آیند. برای $j = 7, 8, 9$ ، نیز داریم:

$$c_j^+ = c_j^- = a_{j-1} \quad (17)$$

محدوده K_p و K_i که برای یافتن مجموعه کنترل گر پایدار ساز جستجو می‌شود، توسط طراح تعیین می‌گردد. بدین ترتیب در صفحه محورها مختصات، مستطیل:

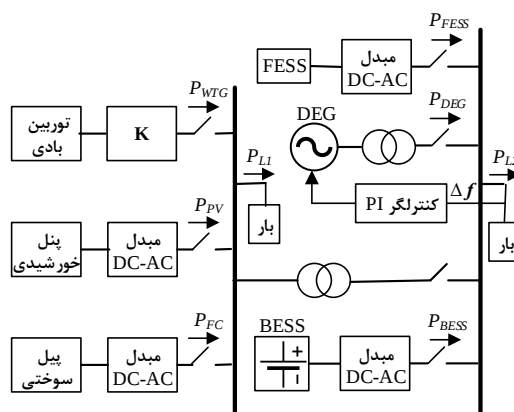
$$\begin{bmatrix} K_{i_{\min}} & K_{i_{\max}} & K_{p_{\min}} & K_{p_{\max}} \end{bmatrix} \quad (18)$$

تشکیل می‌شود که هر گوشه آن یکی از کران‌های K_p و K_i را برای تعیین c_j^+ و c_j^- مشخص می‌نماید. چنانچه ۴ چندجمله‌یی (۱۴) پایدار هرویتز باشد، این مستطیل یک مجموعه کنترل گر پایدار ساز است. اما چنانچه حداقل یکی از چندجمله‌یی‌های (۱۴)، پایدار هرویتز نباشد، طبق الگوریتم دو بخشی^{۱۶}:

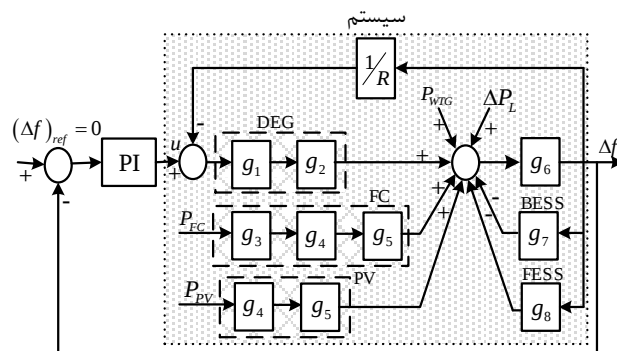
$$K_{p_M} = \frac{K_{p_{\min}} + K_{p_{\max}}}{2} \quad (19)$$

$$K_{i_M} = \frac{K_{i_{\min}} + K_{i_{\max}}}{2} \quad (20)$$

محاسبه و چهار مستطیل:



شکل ۲: سیستم آزمون این مقاله [۱۵]



شکل ۳: سیستم آزمون در حوزه فرکانس

جدول ۱: تابع تبدیل اجزای سیستم آزمون

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
g_1	$\frac{1}{1+T_g s}$	g_5	$\frac{1}{1+T_{FC} s}$
g_2	$\frac{1}{1+T_g s}$	g_6	$\frac{1}{D+2Hs}$
g_3	$\frac{1}{1+T_{FC} s}$	g_7	$\frac{1}{1+T_{BESS} s}$
g_4	$\frac{1}{1+T_{IN} s}$	g_8	$\frac{1}{1+T_{FESS} s}$

۳- تعیین محدوده پارامترهای کنترل گر PI پایدار ساز با استفاده از قضیه خاریتانونف

قضیه خاریتانونف ابزار ساده و کارآمدی برای بررسی پایداری و عملکرد مقاوم سیستم‌های با نامعینی پارامتری است.

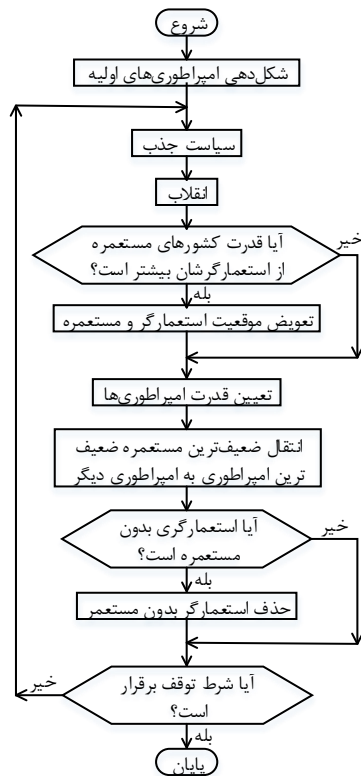
قضیه خاریتانونف [۱۹]: خانواده چندجمله‌یی‌های با پارامتر حقیقی:

$$P(s, c) = \sum_{j=0}^n c_j s^j, c \in C \quad (12)$$

که

$$C = \{c \in \mathbb{R}^{n+1} \mid c_j \in (c_j^-, c_j^+), i = 0, 1, \dots, n\} \quad (13)$$

پایدار مقاوم است اگر و تنها اگر چندجمله‌یی‌های زیر پایدار رو-هرویتز باشد.



شکل ۴: فلوجارت ICA

کنترل گر PI: پارامترهای کنترل گر PI کلاسیک با روش متداول زیگلر - نیکولز [۲۱] محاسبه شده است. در این روش، ابتدا فقط کنترل گر تناسبی به سیستم اعمال می‌شود. ورودی پله اعمال شده و بهره تناسبی به اندازه K_{pu} زیاد می‌گردد تا خروجی نوسانی با دوره‌ی تناوب T_u شود. بهره تناسبی و بهره انتگرالی کنترل گر PI از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$K_p = 0.45 K_{pu} \quad (22)$$

$$K_i = \frac{0.54 K_{pu}}{T_u} \quad (23)$$

کنترل گر PI تنظیم شده با فازی و الگوریتم ICA: شکل ۵، ساختار دو سطحی کنترل گر PI فازی شامل دو سطح کنترل گر PI و سیستم فازی را نشان می‌دهد. نوسانات فرانکس (Δf) و مشتق آن ($\frac{d(\Delta f)}{dt}$)، ورودی سیستم فازی و ضریب تغییرات بهره تناسبی (K_1) و ضریب تغییرات بهره انتگرالی (K_2)، خروجی سیستم فازی است. اگر $K_i \in \left[\frac{K_i^*}{C_i}, K_i^* C_i \right]$ و $K_p \in \left[\frac{K_p^*}{C_p}, K_p^* C_p \right]$ باشد، با انتخاب بهره تناسبی نامی K_p^* و بهره انتگرالی نامی K_i^* برای کنترل گر PI، بهره تناسبی، K_p ، و بهره انتگرالی، K_i ، برابر است با [۲۲]:

$$K_p = K_p^* + \Delta K_p, \begin{cases} K_1 > 0 & \Delta K_p = K_1 K_p^* C_p \\ K_1 < 0 & \Delta K_p = K_1 K_p^* \frac{C_p}{1 + C_p} \end{cases} \quad (24)$$

$$\begin{bmatrix} K_{i_{min}} & K_{i_M} & K_{p_{min}} & K_{p_M} \\ K_{i_{min}} & K_{i_M} & K_{p_M} & K_{p_{max}} \\ K_{i_M} & K_{i_{max}} & K_{p_{min}} & K_{p_M} \\ K_{i_M} & K_{i_{max}} & K_{p_M} & K_{p_{max}} \end{bmatrix} \quad (21)$$

تشکیل داده می‌شود. پایداری هرویتز هر مستطیل جداگانه بررسی می‌گردد. مستطیلی که چهار چندجمله‌یی (۱۴) برای آن پایدار هرویتز باشد رسم شده و مستطیلی که حداقل یکی از چندجمله‌یی‌های (۱۴) برای آن پایدار هرویتز نباشد، مجدداً به چهار مستطیل کوچک‌تر تقسیم می‌گردد. این روند تا جایی ادامه می‌یابد که شرط خاتمه برآورده گردد. در این مقاله زمانی که طول یا عرض مستطیل‌ها از حد از پیش تعیین شده‌ی کوچک‌تر شود، الگوریتم خاتمه می‌یابد.

۴- الگوریتم رقابت استعماری (ICA)

ICA مبتنی بر تکامل اجتماعی - سیاسی انسان است و سرعت و دقت آن در دستیابی به پاسخ بهینه بالا است. مشابه اغلب الگوریتم‌های تکاملی، این الگوریتم با جمعیت اولیه‌ی تصادفی آغاز می‌گردد. هر عضو جمعیت کشور خوانده می‌شوند. مقدار تابع هدف به‌ازای هر کشور محاسبه می‌شود. بهترین کشورها استعمارگر و بقیه مستعمره نامیده می‌گردند. هر استعمارگر، تعدادی مستعمره متناسب با قدرت خود دارد و یک امپراطوری تشکیل می‌دهد (شکل‌دهی امپراطوری‌های اولیه). استعمارگران بسته به قدرت خود، مستعمرات را به خود جذب می‌نمایند (جذب). با انتخاب تصادفی یک کشور مستعمره و جابه‌جایی تصادفی آن کشور به موقعیت جدید، انقلاب ----- بدل می‌گردد. انقلاب مانع گیرافتادن حرکت تکاملی در مینیمم محلی می‌شود. در حین حرکت مستعمرات به سمت کشور استعمارگر، اگر مستعمره‌یی به موقعیتی بهتر از کشور استعمارگر برسد جای کشور استعمارگر و کشور مستعمره، با یکدیگر عوض می‌شود. قدرت هر امپراطوری به استعمارگر و مستعمرات آن بستگی دارد. در جریان رقابت استعماری، امپراطوری‌های ضعیف، مستعمرات خود را از دست داده و امپراطور ----- سوری‌های قوی‌تر، آن مستعمرات را تصاحب کرده و بر قدرت خود می‌افزایند. امپراطوری‌های ضعیف با از دست دادن مستعمرات خود حذف می‌گردند. با گذشت زمان، قدرت مستعمرات به استعمارگرشان همگرا می‌شوند. شرط همگرایی الگوریتم این است که یک امپراطوری واحد تشکیل شده باشد با مستعمراتی که به استعمارگر خود خیلی نزدیک هستند [۱۶ و ۲۰]. شکل ۴، فلوجارت ICA را نشان می‌دهد.

۵- طراحی کنترل گر

در این قسمت، کنترل گرهای PI کلاسیک و PI تنظیم شده با سیستم فازی و ICA معرفی می‌شوند.

تابع هدف در بهینه یابی با الگوریتم ICA، ریشه میانگین مربعات تغییرات فرکانس Δf مطابق رابطه زیر است که نظیر هر کشور محاسبه می‌شود:

$$RMS(\Delta f) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \Delta f^2 dt} \quad (27)$$

۶- شبیه‌سازی

برای ارزیابی عملکرد ساختار کنترلی پیشنهادی، عملکرد کنترل‌گرهای PI کلاسیک، PI تنظیم شده با فازی و PSO [۱۰] و PI تنظیم شده با فازی و ICA که در این مقاله به‌اختصار PI-فازی - ICA خوانده می‌شود، با یکدیگر مقایسه شده‌اند. شبیه‌سازی‌ها در سه سناریو مشابه [۱۰] در نرم افزار Matlab انجام شده است. پارامترهای ریز شبکه آزمون مورد بررسی در جدول ۲ و مقادیر توان نامی هر واحد در جدول ۳ نشان داده شده است [۱۰]. شکل ۷، محدوده پارامترهای پایدار ساز کنترل‌گر PI که با استفاده از قضیه خارتانوف به دست آمده است را نشان می‌دهد. پارامترهای کنترل‌گر کلاسیک با استفاده از روش زیگلر نیک-ولز، $K_p = 4/0.95$ و $K_i = 21/84$ به دست آمده است. همچنین $C_p = C_i = 2$ در نظر گرفته شده است.

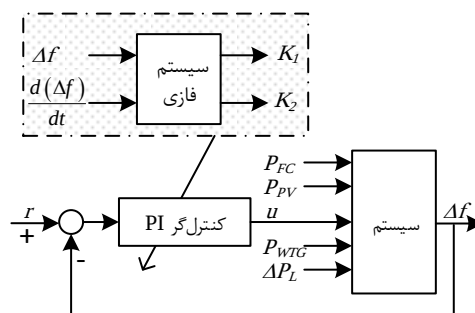
در هر سناریو محدوده توابع عضویت متغیرهای سیستم فازی کنترل‌گر PI-فازی - ICA و مقادیر نامی پارامترهای کنترل‌گر، با استفاده از الگوریتم ICA به‌صورت غیرهم‌زمان بهینه شده است. در ادامه نتایج شبیه‌سازی برای سه سناریو و معیارهای ارزیابی عددی آمده است.

جدول ۲: پارامترهای سیستم آزمون این مقاله [۱۰]

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
$D \left[\frac{pu}{Hz} \right]$	۰/۰۱۵	$T_g [s]$	۰/۰۸
$2H [pu, s]$	۰/۱۶۶۷	$T_t [s]$	۰/۴
$T_{FESS} [s]$	۰/۱	$T_{I/C} [s]$	۰/۰۰۴
$T_{BESS} [s]$	۰/۱	$T_{IN} [s]$	۰/۰۴
$T_{FC} [s]$	۰/۲۶	$R \left[\frac{Hz}{pu} \right]$	۳

جدول ۳: توان نامی واحدهای سیستم آزمون [kW] [۱۰]

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
P_{WTG}	۰/۰۱	P_{FC}	۰/۰۰۷	P_{PV}	۰/۰۰۳

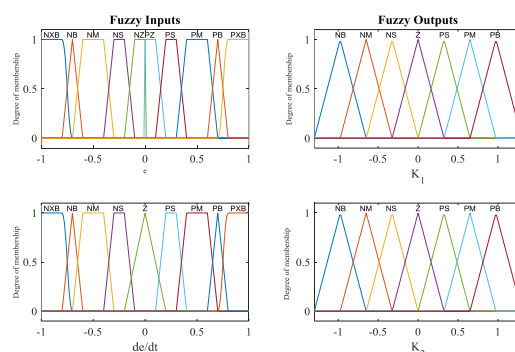


شکل ۵: پیکربندی ریز شبکه کنترل شده با PI-فازی

$$K_i = K_i^* + \Delta K_i, \begin{cases} K_2 > 0 & \Delta K_i = K_2 K_i^* C_i \\ K_2 < 0 & \Delta K_i = K_2 K_i^* \frac{C_i}{1 + C_i} \end{cases} \quad (28)$$

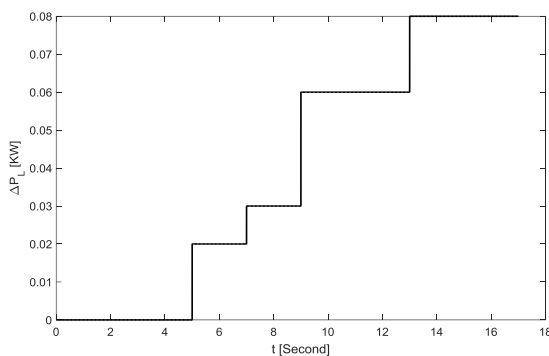
در این مقاله، عملگر اشتراک، عملگر کمینه، عملگر اجتماع، عملگر ماکزیمم و فازی زدایی با روش مرکز ثقل می‌باشد. قوانین فازی مشابه [۲۱] است. در شکل ۶، تابع عضویت‌های ورودی و خروجی‌های سیستم فازی این مقاله برابر با NB, NS, NM, NZ, PS, PM, PB, NXB, NXB و PXB آمده است. در سیستم فازی بالا محدوده توابع عضویت ورودی Δf ، $\left[-i_{\Delta f} \quad i_{\Delta f} \right]$ ، محدوده توابع عضویت ورودی $\frac{d(\Delta f)}{dt}$ ، $\left[-i_{\frac{d(\Delta f)}{dt}} \quad i_{\frac{d(\Delta f)}{dt}} \right]$ ، محدوده توابع عضویت خروجی K_1 ، $\left[-i_{K_1} \quad i_{K_1} \right]$ و محدوده توابع عضویت خروجی K_2 ، $\left[-i_{K_2} \quad i_{K_2} \right]$ است. از آنجاکه توابع عضویت به شدت عملکرد سیستم فازی را تحت تاثیر قرار می‌دهند، محدوده بهینه توابع عضویت سیستم فازی با استفاده از الگوریتم ICA، تعیین می‌گردد. همچنین مقادیر نامی پارامترهای کنترل‌گر PI توسط الگوریتم ICA، بهینه می‌شود. در اینجا هر عضو جمعیت (کشور) در الگوریتم ICA، شامل ۵ عنصر زیر است:

$$\left[K_p^* \quad K_i^* \quad i_{\Delta f} \quad i_{\frac{d(\Delta f)}{dt}} \quad i_{K_1} \quad i_{K_2} \right] \quad (29)$$

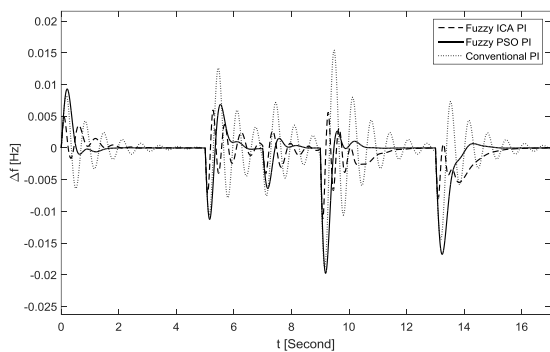


شکل ۶: تابع عضویت ورودی و خروجی‌های سیستم فازی

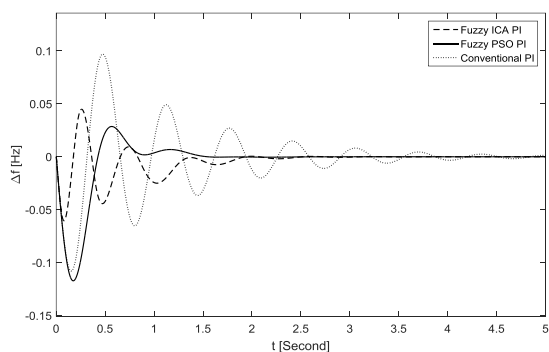
PSO، سرعت کنترل گر کند خواهد بود و در عمل مشکلاتی را به وجود می آورد.



شکل ۸: ورودی تغییرات بار پله‌ای متغیر (سناریو ۱) [۱۰]



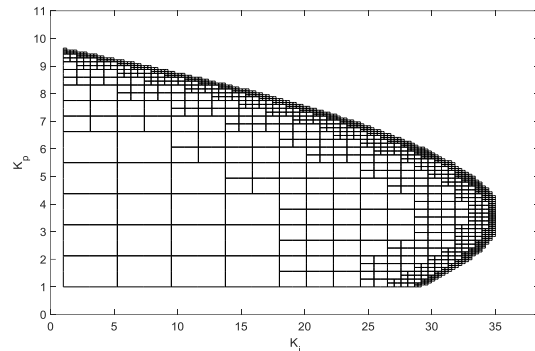
شکل ۹: تغییرات فرکانس ریزشکته (سناریو ۱)



شکل ۱۰: تغییرات فرکانس ریزشکته (سناریو ۲)

جدول ۴: محدوده تغییر پارامترها نسبت به مقادیر نامی (سناریو ۳)

پارامتر	محدوده تغییر	پارامتر	محدوده تغییر
T_i [s]	[۰/۵۰ ۱/۰۰]	T_g [s]	[۱/۰۰ ۱/۵۰]
H [p.u. s]	[۱/۰۰ ۱/۵۰]	D [$\frac{p.u.}{Hz}$]	[۰/۶۰ ۱/۰۰]
T_{FESS} [s]	[۰/۵۵ ۱/۰۰]	R [$\frac{Hz}{p.u.}$]	[۱/۰۰ ۱/۳۰]
T_{BESS} [s]	[۱/۰۰ ۱/۵۵]		



شکل ۷: محدوده پارامترهای پایدار ساز کنترل گر PI مبتنی بر قضیه خارتانوف

۶-۱- سناریوهای شبیه سازی

سناریو ۱ [۱۰]: در این سناریو، ورودی تغییرات بار پله‌ای متغیر ΔP_L مطابق شکل ۸ است. شکل ۹ تغییرات فرکانس ریزشکته با کنترلگرهای مختلف در این سناریو را مقایسه می کند.

سناریو ۲ [۱۰]: در این سناریو، تغییرات بار پله‌ای با دامنه‌ی ۲/۰ برای ارزیابی عملکرد کنترل گرهای مختلف در مواجهه با اغتشاش سنگین به ریزشکته اعمال می گردد. انحرافات فرکانس ریزشکته با کنترل گرهای مختلف در این سناریو در شکل ۱۰ مقایسه شده است.

سناریو ۳ [۱۰]: عدم قطعیت و متغیر بودن پارامترهای سیستم، عملکرد کنترل گر را به شدت تحت تاثیر قرار می دهد. در این سناریو مقاوم بودن عملکرد طرح کنترل پیشنهادی در برابر عدم قطعیت‌های سیستم، با در نظر گرفتن انحراف پارامترهای ریز شبکه از مقادیر نامی مطابق جدول ۴ نشان داده می شود. تغییرات فرکانس ریزشکته با کنترل گرهای مختلف در این سناریو در شکل ۱۱ مقایسه گردیده است. نتایج شبیه سازی در هر سه سناریو نشان می دهد عملکرد ساختار کنترل پیشنهادی این مقاله از لحاظ معیارهای تعداد نوسانات، بیشینه ی اندازه و زمان نشست تغییرات فرکانس بهبود قابل ملاحظه یافته است.

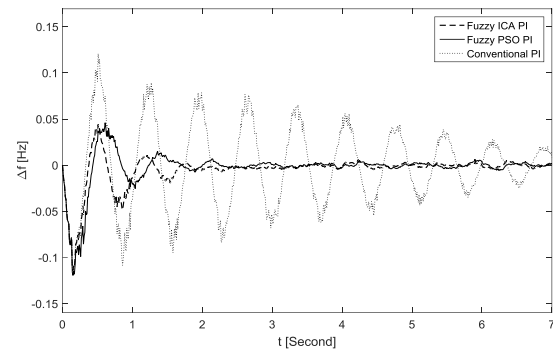
۶-۲- معرفی معیارهای ارزیابی عددی

عملکرد طرح کنترل پیشنهادی با دو معیار ارزیابی عددی ریشه میانگین توان دوم انحرافات فرکانس ($RMS(\Delta f)$) و بیشترین اندازه ی تغییرات فرکانس ($\max(|\Delta f|)$) ارزیابی گردیده است. این معیارهای عددی برای سه سناریو برای کنترل گر PI - فازی - ICA و کنترل گر [۱۰] به ترتیب در جدول ۵ و جدول ۶ با کنترل گر کلاسیک زیگلر نیکولز مقایسه شده است. همان گونه که مشاهده می شود کنترل گر PI - فازی - ICA بهترین عملکرد را دارد و کنترل گر [۱۰]، به دلیل استفاده از ساختار فازی متفاوت و عدم توجه به مشتق Δf ، عملکرد ضعیف تری نسبت به طرح پیشنهادی دارد. ضمن اینکه الگوریتم PSO در آن به صورت برخط استفاده شده است که با توجه به سرعت کم

عملکرد به مراتب مطلوب‌تر است. معیارهای عددی نیز موید عملکرد بهتر کنترل کننده پیشنهادی است.

مراجع

- [1] R. H. Lasseter, A. Akhil, C. Marnay, J. Stephens, J. Dagle, R. Guttromson, A. Meliopoulos and R. J. Yinger, *The CERTS microgrid concept*, White Paper, Transmission Reliability Program, Office of Power Technologies, U.S. Dept. Energy, Apr. 2002.
- [2] C. Chowdhury, S. P. Chowdhury and P. Crossley, *The institution of engineering and technology, in Microgrids and Active Distribution Networks*, London, U.K.: Institution of Engineering and Technology, 2009.
- [3] R. H. Lasseter, J. H. Eto, B. Schenkman, J. Stevens, H. Vollkommer, D. Klapp, E. Linton, H. Hurtado and J. Roy, "CERTS microgrid laboratory test bed," IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 26, pp. 325–332, 2011.
- [4] H. Camblong, J. Sarr, A. T. Niang, O. Curea, J. A. Alzola, E. H. Sylla and M. Santos, "Micro-grids project, part 1: Analysis of rural electrification with high content of renewable energy sources in Senegal," Renewable Energy, vol. 34, pp. 2141–2150, 2009.
- [5] H. Bevrani and T. Hiyama, *Intelligent Automatic Generation Control*. New York: CRC, Apr. 2011.
- [6] H. Bevrani, A. Ghosh and G. Ledwich, "Renewable energy sources and frequency regulation: Survey and new perspectives," IET Renewable Power Generation, vol. 4, pp. 438–457, 2010.
- [7] P. Kundur, J. Paserba, V. Ajarapu, Hill, J. Dagle, A. Stankovic, C. Taylor, T. Van Cutsem and V. Vittal, "Definition and classification of power system stability IEEE/ CIGRE joint task force on stability terms and definitions," IEEE Transaction on Power Systems, vol. 19, no. 3, pp. 1387–1401, 2004.
- [8] H. Bevrani, *Robust Power System Frequency Control*. New York: Springer, 2009.
- [9] H. Bevrani, M. R. Feizi and S. Ataee, "Robust Frequency Control in an Islanded Microgrid: H_∞ and μ - Synthesis Approaches," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 7, no. 2, pp. 706–717, 2016.
- [10] H. Bevrani, F. Habibi, M. Watanabe and Y. Mitani, "Intelligent Frequency Control in an AC Microgrid: Online PSO-Based Fuzzy Tuning Approach," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. PP, pp. 1–10, 2012.
- [11] فرشید حبیبی، حسن بیورانی، جمال مشتاق، «کاربرد شبکه‌های عصبی مصنوعی در طراحی یک کنترل گر هوشمند فرکانس برای یک ریز شبکه جزیره‌ای»، مجله مهندسی برق و مهندسی کامپیوتر ایران - الف مهندسی برق، شماره ۲، دوره ۱۰، صفحه ۸۸ تا ۹۵، پاییز ۱۳۹۱.
- [12] حسین شایقی، حمزه آریانپور، «طراحی مقاوم کنترل گر فازی PID بلادرنگ مبتنی بر الگوریتم بهبود یافته تکامل تفاضلی برای کنترل فرکانس ریز شبکه جزیره‌ای با در نظر گرفتن عوامل غیر خطی و عدم قطعیت‌ها»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۶، شماره ۳، صفحه ۲۴۱ تا ۲۵۶، پائیز ۱۳۹۵.
- [13] A. Karami, E. Rezaei, M. Shahhosseini and M. Aghakhani, "Optimization of heat transfer in an air cooler equipped with classic twisted tape inserts using imperialist competitive algorithm," Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 38, pp. 195–200, 2012.



شکل ۱۱: تغییرات فرکانس ریز شبکه (سناریو ۳)

جدول ۵: معیار ارزیابی میانگین توان دوم انحرافات فرکانس

کنترل گر [۱۰]	زیگler	کنترل گر PI - فازی - ICA	
۰/۰۰۳۷	۰/۰۰۴۳	۰/۰۰۲۱	سناریو ۱
۰/۰۱۳۰	۰/۰۱۷۱	۰/۰۰۷۴	سناریو ۲
۰/۰۱۹۸	۰/۰۴۴۱	۰/۰۱۸۱	سناریو ۳

جدول ۶: معیار ارزیابی بیشترین اندازه‌ی تغییرات فرکانس

کنترل گر [۱۰]	زیگler	کنترل گر PI - فازی - ICA	
۰/۰۱۹۸	۰/۰۱۸۸	۰/۰۱۱۱	سناریو ۱
۰/۰۱۱۷۲	۰/۰۱۷۹	۰/۰۰۶۰۴	سناریو ۲
۰/۱۲۳۴	۰/۱۲۱۰	۰/۱۱۴۱	سناریو ۳

۷- نتیجه‌گیری

از آنجاکه به دلیل تغییرات مداوم ریز منبع‌ها، شرایط نامی تغییر کرده و تنظیم پارامترهای کنترل گر PI در حالت نامی نمی‌تواند عملکرد مطلوب داشته باشد، در این مقاله برای تنظیم پارامترهای کنترل گر فرکانس PI، از سیستم فازی استفاده شده است. محدوده پارامترهای پایدار ساز کنترل گر PI با محاسبه معادله مشخصه ریز شبکه جزیره‌ای کنترل شده با PI و اعمال قضیه خاریتانونف به آن و با استفاده از الگوریتم دو بخشی تعیین گردیده است. از آنجاکه عملکرد سیستم فازی به توابع عضویت بستگی دارد، با استفاده از الگوریتم ICA، به صورت غیرهمزمان مقدار نامی پارامترهای کنترل گر PI و بهترین محدوده‌ی توابع عضویت متغیرهای ورودی و خروجی سیستم فازی به دست آمده است. تابع هدف بهینه‌یابی‌ها کمینه کردن ریشه میانگین مربعات تغییرات فرکانس انتخاب شده است. برای نشان دادن برتری طرح پیشنهادی نسبت به کنترل گر PI کلاسیک و کنترل گر مشابه دیگر، این کنترل گر‌ها در سه سناریوی بار پله‌ای مقدار متغیر، بار پله‌ای بزرگ ثابت و تغییرات مقادیر نامی پارامترهای نامی سیستم، مقایسه شده‌اند. نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد که معیارهای RMS، فراجش‌ها و فروجش‌ها، تعداد نوسانات و زمان نشست برای روش پیشنهادی

- [19] F. Habibi, A. H. Naghshbandy and H. Bevrani, "Robust voltage controller design for an isolated microgrid using Kharitonov's theorem and D-stability concept," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 44, no. 1, pp. 656-665, 2013.
- [۲۰] ابوالفضل حلوایی نیاسر، صابر فلاحتی علی آبادی، «کنترل موتور BLDC با استفاده از کنترلگر PID مرتبه کسری بهینه شده با الگوریتم رقابت استعماری»، *مجله محاسبات نرم*، شماره ۳، صفحه ۲ تا ۱۱، بهار و تابستان ۱۳۹۲.
- [21] J. J. Gude and E. Kahoraho, "Modified Ziegler-Nichols method for fractional PI controllers," 15th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA 2010), pp. 1-5, Bilbao, 2010.
- [22] A. De Carli, P. Liguori and A. Marroni, "A Fuzzy-PI Control Strategy," *Control Engineering Practice*, vol. 2, no. 1, pp. 147-153, 1994.
- [14] A. Kaveh and A. S. Talatahari, "Optimum design of skeletal structures using imperialist competitive algorithm," *Computers & Structures*, vol. 88, pp. 1220-1229, 2012.
- [15] S. Nazari - Shirkouhi, H. Eivazy, R. Ghodsi, K. Rezaei and E. Atashpaz - Gargari, "Solving the integrated product mix-outsourcing problem using the imperialist competitive algorithm," *Expert Systems with Applications*, vol. 37, no. 12, pp. 7615- 7626, 2010.
- [۱۶] شهرام جمالی، سپیده ملک‌تاجی، مرتضی آنالویی، «ماشین‌های مجازی با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۶، شماره ۱، بهار ۱۳۹۵.
- [17] H. Bevrani and T. Hiyama, *Intelligent Automatic Generation Control*, New York: CRC, Apr. 2011.
- [18] S. Obara, "Analysis of a fuel cell micro-grid with a small-scale wind turbine generator," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 32, pp. 323- 336, 2007.

زیرنویس‌ها

- ¹ Distributed Generation
- ² Consortium for Electric Reliability Technology Solution
- ³ Combined of Heat & Power
- ⁴ On line
- ⁵ Particle swarm optimization
- ⁶ Imperialism Competitive Algorithm
- ⁷ Point of Common Coupling
- ⁸ Microgrid Central Controller
- ⁹ Microsource
- ¹⁰ Wind Turbine Generator
- ¹¹ Fuel cell
- ¹² Photovoltaic
- ¹³ Diesel Energy Generator
- ¹⁴ Battery Energy Storage System
- ¹⁵ Flywheel Energy Storage System
- ¹⁶ bisection