

کنترل فرکانس ریزشبه‌ی جزیره‌ای با کنترلگر تناسبی - انتگرالی تنظیم شده با منطق فازی و الگوریتم ازدحام ذرات

فاطمه جمشیدی^{۱*}، سیده لیلی امام زاده‌ی^۱، محمد مهدی قنبریان^۲

۱- گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه فسا، فسا، ایران

۲- گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد کازرون، کازرون، ایران

Jamshidi@fasau.ac.ir, leyli.00e@gmail.com, ghanbarian@kau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۷ آبان ۱۳۹۵ تاریخ بازنگری: ۶ اسفند ۱۳۹۵ تاریخ پذیرش: ۳۱ فروردین ۱۳۹۶

* نشانی نویسنده مسئول: فاطمه جمشیدی، استان فارس، فسا، انتهای بلوار شهید محب، دانشگاه فسا، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی برق، کدپستی: ۷۴۶۱۷-۸۱۱۸۹

چکیده- ریزشبه‌ها منابع انرژی پراکنده‌ایی هستند که با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، توان الکتریکی تولید و به بارهای پراکنده در حالت‌های متصل به شبکه‌ی سیستم‌های توزیع و یا منفصل از آن انتقال می‌دهند. در این مقاله از کنترلگر تناسبی - انتگرالی (PI) تنظیم شده با منطق فازی و بهینه شده با الگوریتم ازدحام ذرات برای کنترل فرکانس ریزشبه‌ی جزیره‌ای استفاده شده است. به دلیل تغییرات طبیعی توان تولیدی با انرژی‌های تجدیدپذیر و عدم قطعیت‌های سیستم قدرت، کنترلگرهای کلاسیک در شرایط مختلف، عملکرد مناسب ندارند. در پاسخ به این چالش، در اینجا مقدار نامی پارامترهای کنترلگر PI با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات بهینه می‌گردد. سیستم فازی، نیز مقدار لحظه‌ایی پارامترهای کنترلگر را محاسبه می‌کند. الگوریتم ازدحام ذرات محدوده بهینه توابع عضویت سیستم فازی پیشنهادی را نیز تعیین می‌نماید. شبیه سازی‌ها عملکرد بهتر طرح کنترل پیشنهادی در مواجهه با اغتشاش بارهای مختلف از لحاظ RMS، فراجش و فروجش، فرکانس نوسانات و زمان نشست تغییرات فرکانس در مقایسه با کنترلگر PI کلاسیک زیگلر نیکولز، کنترلگر PI-فازی و کنترلگر مشابه دیگری را نشان می‌دهد. به علاوه نتایج بیانگر عملکرد مقاوم مطلوب کنترلگر پیشنهادی در برابر تغییرات پارامترهای سیستم است.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم ازدحام ذرات (PSO)، ریزشبه، ریشه میانگین مربعات (RMS) تغییرات فرکانس، کنترلگر PI، سیستم فازی.

Using Fuzzy PI controller Optimized by PSO for Frequency Control of Island Microgrids

Fatemeh Jamshidi^{1*}, Seyedeh Leili Emamzadehei¹, Mohammad Mehdi Ghanbarian²

1- Electrical Engineering, Engineering Department, University of Fasa, Fasa, Fars Province, Iran

2- Electrical Engineering, Engineering Department, Islamic Azad University, Kazerun Branch, Kazerun, Iran.

jamshidi@fasau.ac.ir, leyli.00e@gmail.com, ghanbarian@kau.ac.ir

Abstract- In this paper, the fuzzy proportional- integral controller (PI) optimized by particle swarm algorithm is applied to control the frequency of island Micro-grids. Micro-grids are distributed energy sources that usually use renewable energies in order to produce and transmit electrical power to distributed loads in both connected and islanded modes. Because of natural variations of power that produced by renewable energy sources and uncertainties of power systems, classic controllers do not have a good performance. So nominal values of PI parameters and interval of fuzzy membership functions are optimized using PSO algorithm. Fuzzy system updates PI parameters momentarily. Simulations show the better performance of proposed controller in terms of RMS, overshoot and undershoot, frequency of oscillations and settling time in facing different load disturbances in comparison to classic PI controller, fuzzy PI controller and another PSO fuzzy controller. Results indicate the robust performance of the proposed controller in dealing with variation of system parameters.

Keywords- Frequency deviation, Fuzzy system, Particle Swarm Optimization (PSO), PI controller, Micro-grid, Root Mean Square (RMS).

۱- مقدمه

در سیستم‌های قدرت، حفظ فرکانس ماندگار با وجود اغتشاشات سنگین با حداقل تلفات در واحدهای تولید و بار توصیف شده است. در [۹]، از تکنیک‌های کنترل مقاوم سنتز μ و H_∞ برای کنترل فرکانس ریزشکته‌ی جزیره‌ای استفاده شده است و عملکرد مقاوم کنترلگر پیشنهادی در حضور انواع اغتشاش‌ها و عدم قطعیت‌های پارامتری مورد مطالعه قرار گرفته است.

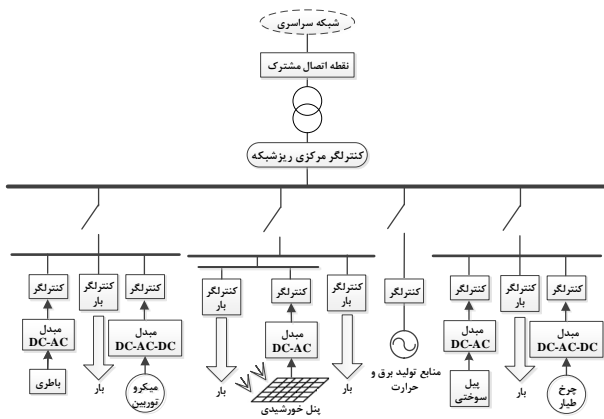
در [۱۰]، از رایج‌ترین کنترلگر فرکانس یعنی کنترلگر تناسبی-انتگرالی (PI) در سیستم‌های ریزشکته، استفاده گردیده است. با توجه به اینکه طراحی کنترلگر PI/PID به روش‌های کلاسیک قادر نیست خود را با شرایط متغیر به‌روز کند، از کارایی مطلوب این کنترلگرها کاسته می‌شود. در [۱۰]، برای تنظیم پارامترهای کنترلگرهای PI/PID به صورت برخط، استفاده از سیستم فازی پیشنهاد شده است. اما عملکرد این کنترلگر دو سطحی که سطح اول آن را کنترلگر PI و سطح دوم آن را سیستم فازی تشکیل می‌دهد، کاملاً وابسته به توابع عضویت سیستم فازی است. به همین جهت استفاده از یک الگوریتم بهینه‌یابی برای تنظیم پارامترهای توابع عضویت به صورت همزمان با تغییرات به وجود آمده در سیستم، کارآمد است. در [۱۰]، برای تنظیم پارامترهای کنترلگر از ترکیب سیستم فازی و بهینه‌یابی ازدحام ذرات (PSO)^۱ به صورت برخط بهره گرفته شده است. تغییرات فرکانس و اغتشاش بار، ورودی‌ها، و پارامترهای کنترلگر، خروجی‌های سیستم فازی انتخاب شده‌اند. در [۱۱]، شبکه‌ی عصبی مصنوعی برای تنظیم ضرایب کنترلگر PI در حلقه ثانویه کنترل فرکانس یک ریزشکته‌ی جزیره‌ای گمارده شده است. در [۱۲]، از ترکیب منطق فازی و الگوریتم بهبود یافته تکاملی به صورت برخط برای تنظیم پارامترهای کنترلگر PID به منظور کنترل فرکانس ریزشکته‌ی جزیره‌ای با در نظر گرفتن عوامل غیرخطی و عدم قطعیت‌ها استفاده شده است.

در مقاله‌ی حاضر، مقدار نامی پارامترهای کنترلگر PI با استفاده از PSO بهینه می‌شود. از سیستم فازی برای تنظیم برخط پارامتر-های کنترلگر PI استفاده می‌گردد. تغییرات فرکانس و مشتق آن، ورودی‌ها و تغییرات نسبی پارامترهای کنترلگر، خروجی‌های سیستم فازی پیشنهادی در نظر گرفته می‌شوند. از PSO برای تعیین بهینه‌ی محدود توابع عضویت سیستم فازی پیشنهادی استفاده می‌گردد. به دلیل سرعت کم PSO، از آن به صورت غیرهمزمان استفاده می‌شود. در بهینه‌یابی‌ها، ریشه‌ی میانگین مربعات (RMS) تغییرات فرکانس کمینه می‌گردد. به منظور نشان دادن برتری طرح کنترلی ارائه شده، نتایج روش پیشنهادی با

در سال‌های اخیر، واحدهای تولید مرسوم در سیستم قدرت به دلیل افزایش قابل ملاحظه‌ی مصرف انرژی الکتریکی با مشکلاتی مانند کمبود سوخت‌های فسیلی، گرمایش زمین، هزینه‌ی بالای احداث نیروگاه‌های جدید روبرو شده‌اند. انگیزه‌های زیست محیطی، محدودیت بازار برق و پیشرفت تکنولوژی به افزایش تولیدات پراکنده و افزایش ریزشکته‌ها در سیستم‌های قدرت منجر گردیده است. برای رفع نگرانی‌های زیست محیطی، افزایش قابلیت اطمینان و عرضه‌ی هر چه بیشتر سیستم‌های قدرت در محیط‌های خصوصی، استفاده از منابع تولید پراکنده (DG)^۱ مطرح شده است. به منظور بهره‌برداری مناسب از این منابع استانداردهای بسیاری نیاز است. از آن جمله کنسرسیوم CERTS^۲، تجمعی از بارها و منابع کوچک به صورت سیستم‌های کوچک تولید کننده‌ی همزمان برق و گرما را ریزشکته خوانده است [۱].

واحدهای تولید کننده‌ی کوچک در سمت مصرف کننده با ظرفیت ده‌ها کیلو وات، منابع اصلی توان در ریزشکته‌ها می‌باشند که به شکل DG به شبکه قدرت متصل هستند. منابع DG می‌توانند، CHP^۳ها، توربین‌های بادی، سلول‌های خورشیدی، سلول‌های سوختی، منابع زمین گرمایی، میکروتوربین‌ها به همراه وسایل ذخیره ساز انرژی نظیر باتری‌ها، چرخ طیارها و خازن‌های انرژی باشد. استفاده از منابع انرژی نو، به عنوان جایگزین واحد تولید کننده در یک سیستم قدرت مدرن، این چالش را به وجود آورده است که آیا این منابع می‌توانند در کنار واحدهای تولید کننده‌ی موجود، به‌طور پایدار کار کنند یا نه. شاخص‌های اصلی سیستم مانند ولتاژ و فرکانس، در صورت وقوع رویدادهای جدی همچون اغتشاش بار یا قطع شدن یک واحد تولید کننده، به دلیل اینرسی کم در بیشتر منابع کوچک، تحت تاثیر قرار گرفته و ممکن است شرایط بحرانی رخ دهد [۲].

با افزایش اهمیت ریزشکته‌ها در عمل و در تحقیقات دانشگاهی، پروژه‌هایی مانند پروژه‌ی CERTS در امریکا [۳]، پروژه‌ی ریزشکته در سنغال [۴] و چندین پروژه در ژاپن [۵] انجام شده است. با حضور ریزشکته‌ها در کنار واحدهای تولید کننده‌ی بزرگ در سیستم قدرت، شاخص‌های اصلی سیستم باید با استفاده از روش‌های کنترلی مناسب، برای حفظ پایداری و عملکرد مناسب سیستم کنترل شوند. در سال‌های اخیر، تحقیقات گسترده‌ی در زمینه‌ی کنترل فرکانس و ولتاژ ریزشکته‌ها انجام شده است. از آن جمله در [۶]، روش زمان بندی ضرایب افتی برای تنظیم فرکانس در ریزشکته‌ها، به کار رفته است. در [۷] و [۸] پایداری فرکانسی

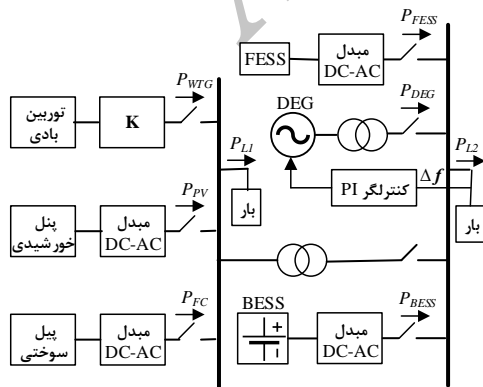


شکل ۱: ساختار کلی ریزشبهه

۳- ریزشبهه‌ی آزمون

در طرح‌های کنترلی حفظ پایداری ریزشبهه‌ها، حالت جزیره‌ای از حالت متصل اهمیت بیشتری دارد. از این رو روش کنترلی به سیستم آزمون [۱۴] مطابق شکل ۲ در حالت جزیره‌ای اعمال شده است. این مدل شامل توربین بادی (WTG) ^۱، پیل سوختی (FC) ^۲، پانل خورشیدی (PV) ^۳، ژنراتور دیزلی (DEG) ^۴ و دو منبع ذخیره کننده انرژی BESS ^۵ و FESS ^۶ می‌باشد، که هر دو در نزدیکی بار نصب شده‌اند. اگر تولید جوابگوی بار مصرفی شبکه نباشد، این منابع، انرژی را سریعاً به شبکه می‌دهند.

مدل فرکانسی سیستم آزمون مطابق شکل ۳ است که در آن مدل‌های ریاضی هر واحد، توابع تبدیل درجه اول یا بلوک‌های تأخیری $G_1 = \frac{1}{1+T_g s}$ ، $G_2 = \frac{1}{1+T_t s}$ ، $G_3 = \frac{1}{1+T_{FC} s}$ ، $G_4 = \frac{1}{1+T_{IN} s}$ ، $G_5 = \frac{1}{1+T_{I/C} s}$ ، $G_6 = \frac{1}{D+2Hs}$ و $G_7 = \frac{1}{1+T_{BESS} s}$ و $G_8 = \frac{1}{1+T_{FESS} s}$ در نظر گرفته شده‌اند.



شکل ۲: مدل واقعی ریزشبهه‌ی آزمون

کنترلگر PI کلاسیک زیگلر-نیکولز، کنترلگر PI تنظیم شده با فازی و کنترلگر ارایه شده در [۱۰]، مقایسه می‌شود. نتایج بیانگر عملکرد بهتر کنترلگر پیشنهادی در مواجهه با اغتشاش از لحاظ RMS، فرافشش و فروجهش، زمان نشست و تعداد نوسانات تغییرات فرکانس است.

در ادامه در بخش ۲، ساختار ریزشبهه‌ی AC بیان می‌شود. در بخش ۳، سیستم آزمون مورد مطالعه معرفی می‌گردد. در بخش ۴، روش‌های کنترلی به کار رفته توصیف می‌شود. در بخش ۵، نتایج شبیه سازی در ۳ سناریو ارایه می‌گردد و در بخش ۶، شاخص‌های کمی مقایسه‌ی نتایج تعریف و ارزیابی می‌شود. در پایان در بخش ۷، نتایج بررسی می‌گردد.

۲- ریزشبهه‌ی AC

ساختار ریزشبهه‌ی نمونه در شکل ۱ نمایش داده شده است. ریزشبهه و شبکه سراسری در نقطه‌ی اتصال مشترک (PCC) ^۶ به یکدیگر متصل می‌شوند. کنترلگر مرکزی (CC) ^۷ ریزشبهه همزمان به پردازش اطلاعات دریافتی از ریزشبهه و شبکه‌ی اصلی پرداخته و بر پایه آن برای حالات کاری ریزشبهه و ریزمنابع تصمیم می‌گیرد. منابع مورد استفاده در ریزشبهه‌ها توسط عناصر الکترونیک قدرت به باس اصلی متصلند. برای اعمال روش‌های کنترلی به کنترلگرهای ریزمنبع در محل هر کدام از ریزمنابع و بارهای الکتریکی، کنترلگر بار نیاز است. در این سیستم‌ها، منابع DC با واسطه‌ی مبدل‌های DC/AC، برای متناوب‌سازی ولتاژ DC و منابع AC همراه با واسطه‌های AC/DC/AC، برای همزمان‌سازی فرکانسی، مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۳].

با توجه به توان نوسانی منابع DG و اینرسی پایین این شبکه‌ها، پارامترهای اساسی شبکه با کوچکترین اغتشاشی دستخوش تغییرات اساسی شده و پایداری ریزشبهه به خطر می‌افتد. برای غلبه بر این مشکل حضور منابع ذخیره کننده انرژی ضروری خواهد بود. به هر کدام از این منابع یک کلید وصل شده تا در موقع لزوم از ریزشبهه جدا گردند. در شرایط عادی، ریزشبهه‌ها به شبکه‌ی اصلی متصلند و در برنامه‌ریزی‌های کنترلی مشارکت می‌کنند. اما چنانچه اغتشاشی در سیستم رخ دهد، کلید قدرت موجود در PCC عمل کرده و ریزشبهه به حالت کار جزیره‌ای می‌رود و وظیفه‌ی تامین توان بارهای محلی را به عهده می‌گیرد.

جدا شدن ریزشبهه از شبکه‌ی سراسری به صورت پایدار مشکلی جدی است. از این رو کنترل منابع ریزشبهه در حالت جزیره‌ای به نحوی که منابع DG توانایی کنترل فرکانس و ولتاژ سیستم را داشته باشند، مسأله‌ی مهمی می‌باشد [۱۰].

۴- طراحی کنترلگر

ماکزیمم و فازی زدایی با روش مرکز ثقل انجام شده است. قواعد فازی مشابه [۱۵] می‌باشند. نوسانات فرکانس (Δf) و مشتق آن ($\frac{d(\Delta f)}{dt}$)، ورودی سیستم فازی، و خروجی آن K_1 و K_2 (ضریب تغییرات بهره‌ی تناسبی و ضریب تغییرات بهره‌ی انتگرالی) هستند. بهره‌ی تناسبی، K_p ، و بهره‌ی انتگرالی، K_i ، مطابق روابط زیر محاسبه می‌شود [۱۵].

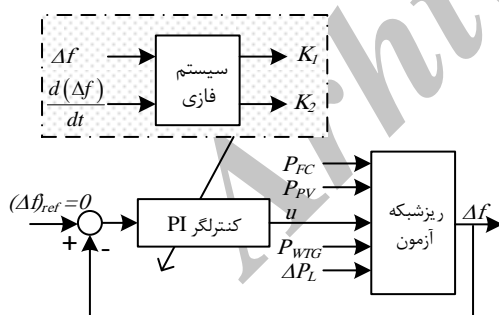
$$K_p = K_p^* + \Delta K_p, \begin{cases} K_1 > 0 & \Delta K_p = K_1 K_p^* C_p \\ K_1 < 0 & \Delta K_p = K_1 K_p^* \frac{C_p}{1+C_p} \end{cases} \quad (1)$$

$$K_i = K_i^* + \Delta K_i, \begin{cases} K_2 > 0 & \Delta K_i = K_2 K_i^* C_i \\ K_2 < 0 & \Delta K_i = K_2 K_i^* \frac{C_i}{1+C_i} \end{cases} \quad (2)$$

که در آن $K_i \in \left[\frac{K_i^*}{C_i}, K_i^* C_i \right]$ و $K_p \in \left[\frac{K_p^*}{C_p}, K_p^* C_p \right]$ است. K_i^* و K_p^* مقادیر نامی پارامترهای کنترلگر PI هستند که در این مقاله مقدار بهینه‌ی آن‌ها توسط PSO از کمینه سازی

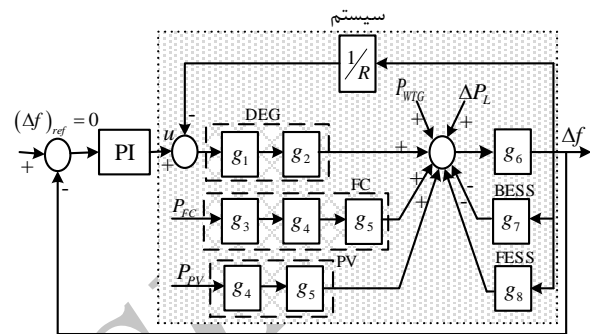
$$RMS(\Delta f) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \Delta f^2 dt}$$

به دست آمده است.



شکل ۴: ساختار کنترلگر فرکانس PI- فازی

در این مقاله سه کنترلگر PI کلاسیک، کنترلگر PI تنظیم شده با سیستم فازی که در این مقاله به اختصار PI- فازی نامیده می‌شود و کنترلگر PI تنظیم شده با سیستم فازی و بهینه شده با الگوریتم PSO که به اختصار PI- فازی- PSO خوانده می‌شود، به ریزشکبه-ی آزمون اعمال شده‌اند که در ادامه معرفی می‌گردند.



شکل ۳: مدل پاسخ فرکانسی ریزشکبه‌ی آزمون

۴-۱- کنترلگر PI کلاسیک

پارامترهای کنترلگر PI کلاسیک از روش مرسوم زیگلر- نیکولز محاسبه شده‌اند. برای این منظور تنها بلوک تناسبی در مدار قرار گرفته، ورودی پله اعمال شده و بهره‌ی تناسبی آنقدر افزایش می‌یابد که خروجی نوسانی گردد. دوره‌ی تناوب نوسان، T_u و بهره‌ی تناسبی نوسان‌ساز، K_{pu} نامیده می‌شود. بهره‌ی تناسبی کنترلگر از رابطه‌ی $K_p = 0.45 K_{pu}$ و بهره‌ی انتگرالی از رابطه‌ی $K_i = \frac{0.54 K_{pu}}{T_u}$ بدست می‌آیند.

۴-۲- کنترلگر PI کلاسیک

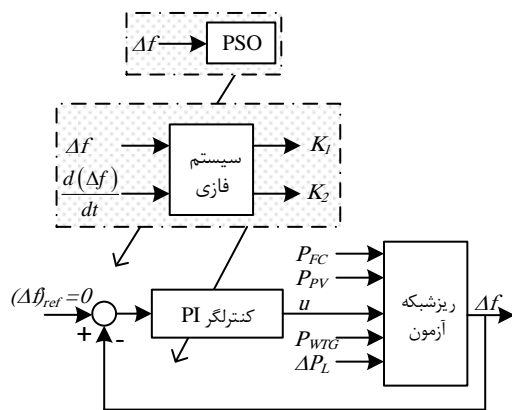
شکل ۴، چارچوب کنترلگر PI- فازی شامل دو سطح کنترلگر PI کلاسیک و سیستم فازی [۱۵] را نشان می‌دهد. توابع عضویت متغیرهای ورودی و خروجی به شکل ذوزنقه‌ای و مثلثی و با نشان ۵ داده شده‌اند. اشتراک با عملگر مینیمم، اجتماع با عملگر

۳-۴- کنترلرگر PI- فازی - PSO

با تجربه‌ی حاصل از مقادیر بالا، ذرات تصمیم می‌گیرند که در تکرار بعدی، چگونه حرکت کنند. در هر بار تکرار، همه‌ی ذرات در فضای m بعدی مسأله حرکت می‌کنند تا نقطه‌ی بهینه پیدا شود. سرعت و موقعیت ذرات بر حسب بهترین جواب‌های مطلق و محلی به روز می‌شوند. در هر لحظه سرعت و موقعیت در تکرار $n+1$ ام، به ترتیب از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$v_{ij}[n+1] = w \cdot v_{ij}[n] + c_1 \text{rand}_{1ij} (p_{best_{ij}}[n] - x_{ij}[n]) + c_2 \text{rand}_{2ij} (g_{best_j}[n] - x_{ij}[n]) \quad (9)$$

$$x_{ij}[n+1] = x_{ij}[n] + v_{ij}[n+1] \quad (10)$$



شکل ۶: ساختار کنترلرگر فرکانس PI- فازی - PSO

الگوریتم PSO یکی از پرکاربردترین الگوریتم‌های بهینه‌یابی هوش جمعی است که با جستجوی مستقیم در فضای جستجو، جواب بهینه‌ی مسأله را می‌یابد. این الگوریتم از تعداد مشخصی ذره تشکیل شده که به طور تصادفی، مقدار اولیه می‌گیرند. هر ذره با یک بردار مکان و یک بردار سرعت، مدل می‌شود. ذرات، به صورت تکرارشونده‌ای در فضای m بعدی مسأله حرکت می‌کنند و با محاسبه‌ی تابع هدف به عنوان ملاک سنجش، گزینه‌های ممکن جدید را جستجو می‌کنند. بُعد فضای مسأله، برابر تعداد پارامتر-های موجود در تابع بهینه‌یابی است. بردارهای موقعیت و سرعت i امین ذره در تکرار n ام به ترتیب با بردارهای زیر نشان داده می‌شوند [۱۶].

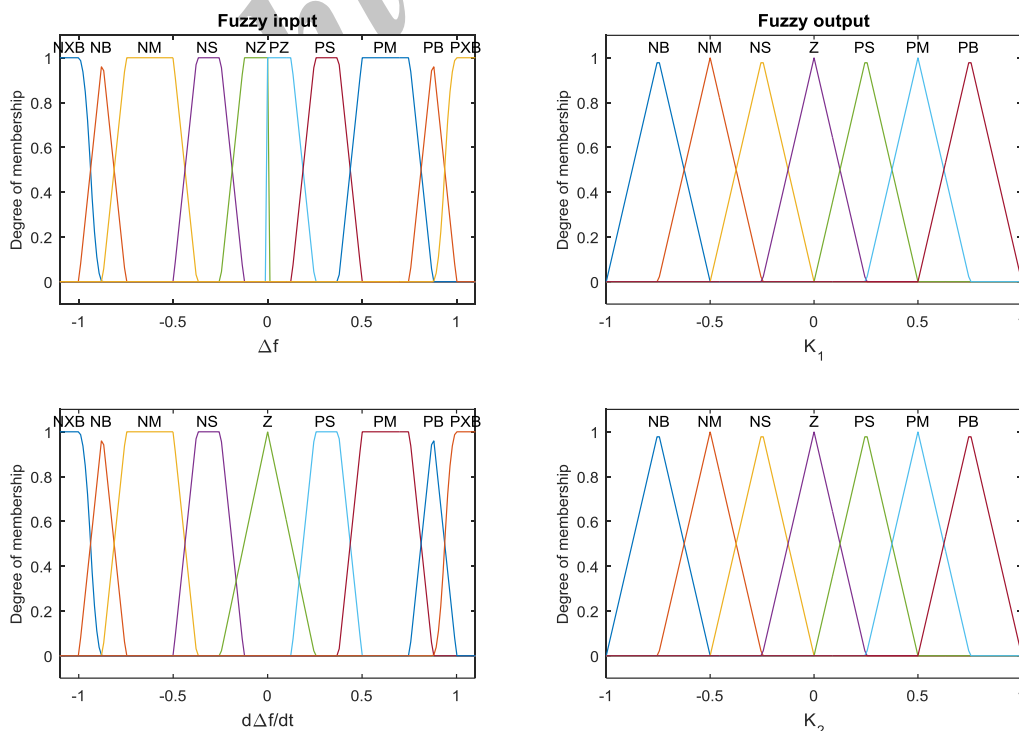
$$V_i[n] = [V_{i_1}[n] \quad V_{i_2}[n] \quad \dots \quad V_{i_m}[n]]^T \quad (5)$$

$$X_i[n] = [X_{i_1}[n] \quad X_{i_2}[n] \quad \dots \quad X_{i_m}[n]]^T \quad (6)$$

بهترین موقعیت ذره‌ی i ام تا تکرار n یعنی موقعیتی که بهترین مقدار شایستگی را برای آن ذره تا آن لحظه حاصل کرده است (بهترین جواب محلی) و بهترین موقعیت پیش آمده در میان همه-ی ذرات در تکرار n ام (بهترین جواب مطلق) به ترتیب در زیر آمده است:

$$P_{best_i}[n] = [P_{best_{i_1}}[n] \quad P_{best_{i_2}}[n] \quad \dots \quad P_{best_{i_m}}[n]] \quad (7)$$

$$g_{best}[n] = [g_{best_1}[n] \quad g_{best_2}[n] \quad \dots \quad g_{best_m}[n]] \quad (8)$$



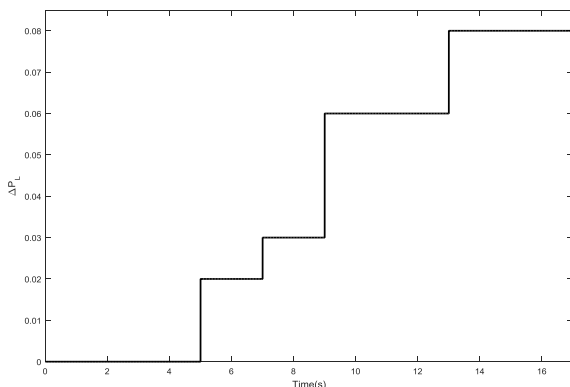
شکل ۵: توابع عضویت متغیرهای ورودی و خروجی فازی [۱۵]

جدول ۲: توان نامی واحدها (KW) [۱۰]

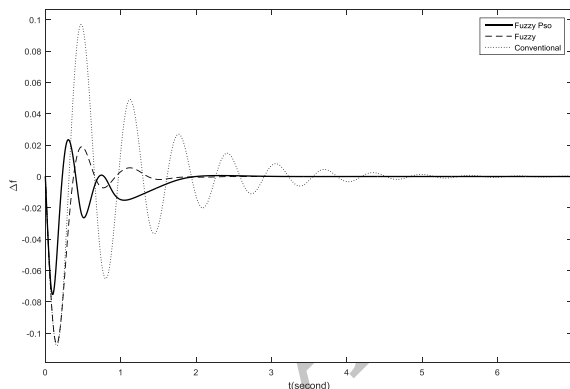
پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
P_{WTG}	0.01	P_{FC}	0.007	P_{PV}	0.003

۵-۱- سناریو اول

ΔP_L مطابق شکل ۷ به ریزشبه‌ی آزمون اعمال شده است. پاسخ ریزشبه با کنترلگرهای مختلف در شکل ۸ آمده است. بهبود عملکرد از لحاظ تعداد نوسانات، فراجش و فروجهش، زمان نشست با طرح کنترل پیشنهادی مشاهده می‌شود.



شکل ۷: بار پله‌ای مقدار متغیر [۱۰]



شکل ۸: پاسخ ریزشبه در سناریو اول

۵-۲- سناریو دوم

در سناریو دوم، برای مقایسه‌ی عملکرد کنترلگرهای مختلف در روبرویی با اغتشاش سنگین، بار پله‌ای با دامنه‌ی ۰/۲ به ریزشبه اعمال می‌شود. پاسخ ریزشبه با کنترلگرهای مختلف در شکل ۹ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد تعداد نوسانات، فراجش و فروجهش، زمان نشست با طرح کنترل پیشنهادی بهبود قابل ملاحظه داشته است.

الگوریتم PSO، بردار سرعت هر ذره را تحت تأثیر دو مقدار بهترین جواب محلی و بهترین جواب مطلق به‌روز کرده و مقدار سرعت جدید را به موقعیت ذره می‌افزاید. ثابت‌های c_1 و c_2 به ترتیب، پارامتر ادراکی و پارامتر اجتماعی نامیده می‌شوند.

در سیستم فازی معرفی شده در بخش قبل، محدوده‌ی توابع عضویت ورودی Δf ، $[-i_{\Delta f} \quad i_{\Delta f}]$ ، 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 ، $[-i_{K_1} \quad i_{K_1}]$ و محدوده توابع عضویت خروجی K_2 ، $[-i_{K_2} \quad i_{K_2}]$ است. در این مقاله با استفاده از الگوریتم PSO، مقدار بهینه‌ی $\left[i_{\Delta f} \quad i \frac{d(\Delta f)}{dt} \quad i_{K_1} \quad i_{K_2} \right]$ به گونه‌ی که $RMS(\Delta f)$ کمینه شود، یافت شده است. ساختار کنترل PI-فازی- PSO این مقاله در شکل ۶ آمده است.

۵- شبیه سازی‌ها

پارامترهای ریزشبه آزمون در جدول ۱ و توان نامی هر واحد در جدول ۲ آمده است [۱۰]. برای مقایسه‌ی کنترلگرهای PI کلاسیک، PI-فازی و PI-فازی- PSO، شبیه سازی‌ها در ۳ سناریو مشابه [۱۰]، در نرم افزار MATLAB انجام شده‌اند.

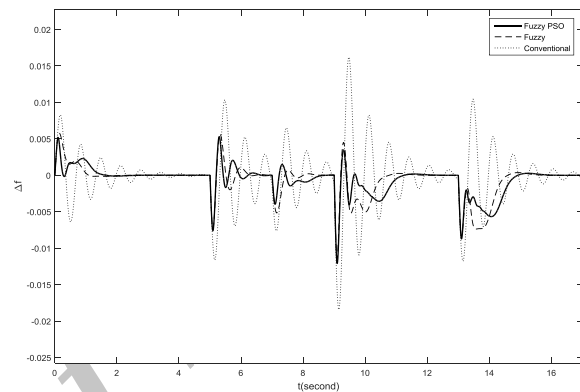
پارامترهای کنترلگر کلاسیک با استفاده از روش زیگلر نیکولز، بدست آمده‌است. پارامترهای نامی کنترلگرهای PI-فازی و PI-فازی- PSO، با استفاده از PSO، بدست آمده‌اند. $C_p = C_i = 2$ در نظر گرفته شده‌اند. در هر سناریو محدوده توابع عضویت متغیرهای سیستم فازی کنترلگر PI-فازی- PSO، با استفاده از الگوریتم PSO به صورت غیرهمزمان بهینه گردیده‌اند.

جدول ۱: پارامترهای ریزشبه آزمون [۱۰]

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
$D \left(\frac{p.u.}{Hz} \right)$	0.015	$T_g (s)$	0.08
$2H (p.u. s)$	0.1667	$T_i (s)$	0.4
$T_{FESS} (s)$	0.1	$T_{I/C} (s)$	0.004
$T_{BESS} (s)$	0.1	$T_{IN} (s)$	0.04
$T_{FC} (s)$	0.26	$R \left(\frac{Hz}{p.u.} \right)$	3

۳-۵- سناریو سوم

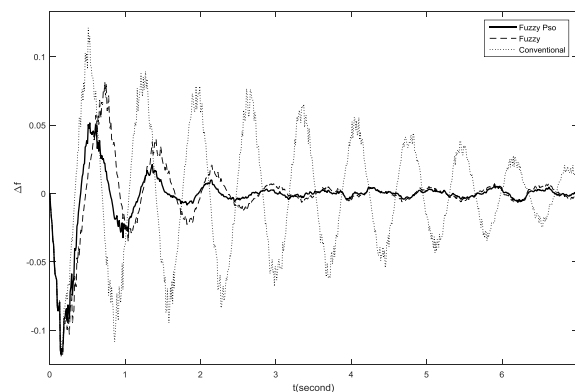
متغیر بودن پارامترهای سیستم قدرت، عملکرد سیستم حلقه بسته را تحت تاثیر قرار می‌دهد. برای نشان دادن عملکرد مقاوم و تطبیقی راهکار پیشنهادی در برابر تغییرات دینامیکی، در سناریو سوم، پارامترهای ریزشبهک مطابق جدول ۳ از مقادیر نامی انحراف داده می‌شوند. پاسخ ریزشبهک با کنترلگرهای مختلف این سناریو در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. نتایج بیانگر بهبود چشمگیر عملکرد از لحاظ تعداد نوسانات، فراجش و فروجش، زمان نشست با طرح کنترل پیشنهادی است.



شکل ۹: پاسخ ریزشبهک در سناریو دوم

جدول ۳: محدوده تغییر پارامترهای ریزشبهک نسبت به مقادیر نامی

پارامتر	محدوده تغییر	پارامتر	محدوده تغییر
$T_i (s)$	[0.5 1]	$T_g (s)$	[1 1.5]
$H (p.u. s)$	[1 1.5]	$D \left(\frac{p.u.}{Hz} \right)$	[0.6 1]
$T_{FESS} (s)$	[0.55 1]	$R \left(\frac{Hz}{p.u.} \right)$	[1 1.3]
$T_{BESS} (s)$	[1 1.55]		



شکل ۱۰: پاسخ ریزشبهک در سناریو سوم

۴-۵- تعریف شاخص‌های کمی

مقایسه‌ی کمی عملکرد طرح کنترل پیشنهادی با دو شاخص $RMS(\Delta f) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \Delta f^2 dt}$ (ریشه‌ی متوسط مربعات تغییرات فرکانس) و $max(|\Delta f|)$ (بیشینه فراجش و فروجش) صورت گرفته است. درصد بهبود این دو شاخص برای سه سناریو برای کنترلگر PI-فازی و کنترلگر PI-فازی- PSO و کنترلگر [۱۰] به ترتیب در جدول ۴ و ۵ با کنترلگر کلاسیک مقایسه شده است. مشاهده می‌شود کنترلگر PI-فازی- PSO بهترین عملکرد را دارد. کنترلگر [۱۰]، به دلیل استفاده از ساختار فازی متفاوت و عدم توجه به مشتق Δf ، عملکرد ضعیف‌تری نسبت به طرح پیشنهادی دارد. ضمن اینکه الگوریتم PSO در [۱۰]، برخاسته از استفاده از آن در عمل دشوار می‌گردد. از الگوریتم PSO برای بهینه‌یابی در زمان رخداد تغییرات در بار استفاده شده است، اما به چگونگی تشخیص رخداد تغییر در بار اشاره نشده است.

جدول ۴: درصد بهبود شاخص $RMS(\Delta f)$ نسبت به کنترلگر PI کلاسیک

کنترلگر PI-فازی- PSO	کنترلگر PI-فازی	کنترلگر [۱۰]	
42%	32%	17%	سناریو اول
59%	37%	27%	سناریو دوم
56%	45%	16%	سناریو سوم

جدول ۵: درصد بهبود شاخص $max(|\Delta f|)$ نسبت به کنترلگر PI کلاسیک

کنترلگر PI-فازی- PSO	کنترلگر PI-فازی	کنترلگر [۱۰]	
38%	34%	15%	سناریو اول
30%	0.9%	0.7%	سناریو دوم
4%	3%	1%	سناریو سوم

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله برای تنظیم پارامترهای کنترلگر فرکانس PI، از سیستم فازی استفاده شده است. چرا که به دلیل تغییرات مداوم ریزمنبع‌ها، شرایط نامی تغییر کرده و تنظیم پارامترهای کنترلگر PI در حالت نامی نمی‌تواند عملکرد مطلوب داشته باشد. مقدار نامی پارامترهای کنترلگر PI با PSO بهینه شده‌اند. از آنجا که

[۱۲] حسین شایقی، حمزه آریانپور، «طراحی مقاوم کنترلگر فازی PID بلادرنگ مبتنی بر الگوریتم بهبود یافته تکامل تفاضلی برای کنترل فرکانس ریزشبه جزیره‌ای با در نظر گرفتن عوامل غیرخطی و عدم قطعیتها»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۶، شماره ۳، صفحات ۲۴۱ تا ۲۵۶، پائیز ۱۳۹۵.

- [13] H. Bevrani and T. Hiyama, Intelligent Automatic Generation Control, New York: CRC, Apr. 2011.
- [14] 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.
- [15] A. De Carli, P. Liguori and A. Marroni, "A Fuzzy-PI Control Strategy," Control Engineering Practice, vol. 2, no. 1, pp. 147-153, 1994.
- [16] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," Proc. IEEE Int. Conf. Neural Network, pp. 1942-1948, 1995.

عملکرد سیستم فازی به توابع عضویت بستگی دارد، با استفاده از الگوریتم PSO، به صورت غیرهمزمان بهترین محدوده‌ی توابع عضویت متغیرهای ورودی و خروجی سیستم فازی به دست آمده است. تابع هدف بهینه‌یابی‌ها کمینه کردن ریشه‌ی میانگین مربعات تغییرات فرکانس می‌باشد. برای نشان دادن برتری طرح پیشنهادی نسبت به کنترلگر PI کلاسیک، کنترلگر PI- فازی و کنترلگر مشابه دیگر، این کنترلگرها در سه سناریو مقایسه شده‌اند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که روش پیشنهادی عملکرد به مراتب مطلوب‌تری از لحاظ RMS، فراجش و فروجش، فرکانس نوسانات و زمان نشست داشته است. شاخص‌های کمی نیز مؤید این مطلب 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. Ajjarapu, 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. Ataei, "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. 3, no. 4, pp. 1935-1944, 2012.

[۱۱] فرشید حبیبی، حسن بیورانی، جمال مشتاق، «کاربرد شبکه‌های عصبی مصنوعی در طراحی یک کنترلگر هوشمند فرکانس برای یک ریز شبکه جزیره‌ای»، مجله مهندسی برق و مهندسی کامپیوتر ایران - الف مهندسی برق، شماره ۲، دوره ۱۰، صفحات ۸۸ تا ۹۵، پاییز ۱۳۹۱.

زیر نویس‌ها

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