

# کنترل بار-فرکانس در یک ریزشبکه AC با استفاده از کنترل کننده فازی PID خودتنظیم و با در نظر گرفتن تاخیر در ورودی

روح‌الله شاهی<sup>(۱)</sup> - کامل صباحی<sup>(۲)</sup> - مهدی توان<sup>(۳)</sup> - امین حاجی‌زاده<sup>(۴)</sup>

(۱) کارشناسی ارشد - دانشکده مهندسی برق، واحد بین‌المللی جلفا، دانشگاه آزاد اسلامی، جلفا، ایران

(۲) استادیار - دانشکده مهندسی برق، واحد ممقان، دانشگاه آزاد اسلامی، ممقان، ایران

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

(۴) دانشیار - دانشکده مهندسی انرژی، دانشگاه آلبورگ، دانمارک

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۳/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۶/۱۳

**خلاصه:** در یک سیستم ریزشبکه، اغلب منابع تولید پراکنده از جمله پیل سوختی، انرژی خورشیدی دارای ماهیت غیرخطی و متغیر با زمان می‌باشند، که مسئله کنترل را در آن با مشکلاتی مواجه می‌کند. همچنین، با توجه به اینکه در اغلب سیستم‌های ریزشبکه کنترل کننده‌های فرکانس به صورت متمرکز بوده و منابع کنترل شونده در فواصل دوری از اتاق کنترل قرار دارند، بوجود آمدن تاخیر زمانی امری انکارناپذیر است که می‌بایست در طراحی کنترل کننده مورد توجه قرار گیرد. برای همین منظور و در این مقاله، از کنترل کننده فازی PID خودتنظیم برای کنترل بار-فرکانس در یک سیستم ریزشبکه استفاده شده است. کنترل کننده فازی PID معرفی شده توانایی مناسبی جهت مقابله با غیرخطی‌گری و تغییر در نقاط کار سیستم را دارد، اما جهت مقابله با تاخیر زمانی در ورودی سیستم، از خاصیت خودتنظیم مشابه با روش زیگلر-نیکولز استفاده شده است. کنترل کننده فازی PID خودتنظیم طراحی شده برای کنترل بار-فرکانس یک سیستم ریزشبکه که در حالت جدا شده از شبکه می‌باشد، اعمال شده و نتایج آن با کنترل کننده فازی PID ساختار ثابت مقایسه شده است. شبیه‌سازی‌ها به ازای مقادیر مختلف تاخیر زمانی برتری روش پیشنهادی را در مواجهه با تأخیر زمانی و تغییر در بار درخواستی را نشان داده و با کیفیت مناسبی تغییرات فرکانس را به صفر رسانده است.

**کلمات کلیدی:** ریزشبکه، تولیدات پراکنده، تاخیر زمانی، کنترل بار فرکانس و کنترل کننده فازی PID.

## Self-Tuning Fuzzy PID Controller for Load Frequency Control in AC Micro-Grid Considering Input Delay

Rohollah Shahedi<sup>(1)</sup> - Kamel Sabahi<sup>(2)</sup> - Mehdi Tavan<sup>(3)</sup> - Amin Hajizadeh<sup>(4)</sup>

(1) MSc - Dept. of Electrical Engineering, Jolfa International Branch, Islamic Azad University, Jolfa, Iran  
shahedi.roholah@gmail.com

(2) Assistant Professor - Dept. of Electrical Engineering, Mamaghan branch, Islamic Azad University, Mamaghan, Iran  
ksabahi@tabrizu.ac.ir

(3) Assistant Professor - Dept. of Electrical Engineering, Mahmudabad branch, Islamic Azad University, Mahmudabad, Iran  
m.tavan@srbiau.ac.ir

(4) Associate Professor - Dept. of Energy Technology, Aalborg University, Esbjerg, Denmark  
aha@et.aau.dk

**Abstract:** A micro grid (MG) system that benefits from distributed generation (DG) resources has a non-linear and time-varying nature which encounters the control problem with some difficulties. Also, due to the fact that in the most MG systems the frequency controllers are centralized in the control room and, the DGs are located at distances from the control room, the occurrence of delay is undeniable and it should be considered in the design of the controller. For this purpose, a self-tuning fuzzy PID controller has been designed for load frequency control in a MG system in the presence of delay. The designed fuzzy PID controller is a nonlinear controller and can handle the nonlinearities. To deal with the delay in the input of the system, the Ziegler-Nichols like criteria has been utilized to derive the adaptive mechanism which tunes the scaling factors according to the maximum amount of delay in the online manner. The proposed self-tuning fuzzy PID controller has been applied for load frequency control of a time-delay MG system and the simulation results have been compared with the results of fixed structure fuzzy PID controller. The simulation results indicate the efficiency of the proposed controllers in dealing with time-varying delay.

**Index Terms:** Micro grid system, time-delay, fuzzy PID controller, load frequency control, and distributed generation.

نویسنده مسئول: کامل صباحی، استادیار - دانشکده مهندسی برق، واحد ممقان، دانشگاه آزاد اسلامی، ممقان، ایران، ksabahi@tabrizu.ac.ir

## ۱- مقدمه

افزایش قابلیت اطمینان سیستم‌های قدرت و نیز بهبود مسایل اقتصادی و زیست محیطی از مهم‌ترین دلایل ورود ریزشبكة‌ها<sup>۱</sup> به سیستم‌های قدرت می‌باشند [۱-۲]. در این میان، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در ریزشبكة‌ها به کاهش گرم‌شدن کره زمین و سرعت بخشیدن به ورود صنعت برق به محیط تجدیدساختار شده کمک می‌کنند [۳]. واحدهای تولیدکننده کوچک با ظرفیت ده‌ها کیلووات، از منابع اصلی توان در ریزشبكة‌ها بوده که در سمت مصرف‌کننده قرار داده شده و به شکل تولید پراکنده به شبکه قدرت متصل می‌شوند. ژنراتورهای با موتور دیزل، میکروتوربین‌ها، پنل‌های خورشیدی، ژنراتورهای توربین بادی، ذخیره‌کننده‌های انرژی، پیل‌های سوختی و موتورهای پیستونی از انواع متداول تولیدات پراکنده می‌باشند.

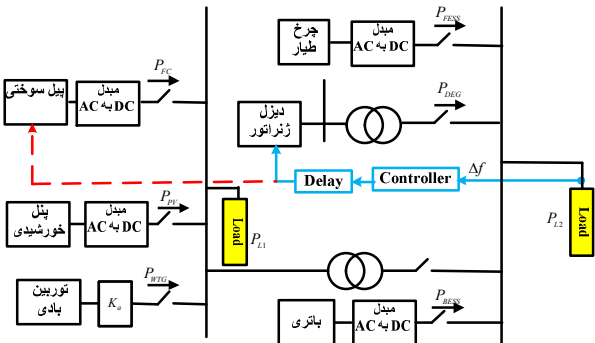
در یک سیستم قدرت، ریزشبكة‌ها در شبکه‌های توزیع فشار ضعیف و فشار متوسط قرار داده می‌شوند. اما با وجود مزایای ذکر شده، با اتصال چندین منبع کوچک به سطوح توزیع، چالش‌های جدیدی از جمله پایداری سیستم، کیفیت توان و عملکرد شبکه در یک سیستم ریزشبكة پدیدار می‌شوند. همچنین، اغلب منابع انرژی تجدیدپذیر در یک ریزشبكة دارای توان تولیدی متغیر می‌باشند. بنابراین، این چالش‌ها می‌بایست با استفاده از تکنیک‌های کنترلی پیشرفته در سطوح ولتاژ فشار ضعیف و متوسط به‌جای سطوح ولتاژ فشار قوی که در کنترل قدیمی‌تر سیستم قدرت رایج است، حل شوند. امروزه به دلیل اهمیت و افزایش ریزشبكة‌ها، مطالعات زیادی هم در بحث عملی و هم پژوهشی در این زمینه صورت گرفته است [۴]. با حضور ریزشبكة‌ها در کنار واحدهای تولیدکننده بزرگ همانند ژنراتورها در سیستم قدرت، شاخص‌های اصلی سیستم همانند ولتاژ و فرکانس می‌بایستی با استفاده از روش‌های کنترلی مناسبی تنظیم شوند. ریزشبكة‌ها علاوه بر کارکرد مستقل، می‌بایست با شبکه اصلی نیز در ارتباط باشند [۵]. در حالت جزیره‌ای‌شده (جدا شده از شبکه اصلی) و به منظور فائق آمدن بر تغییرات و برای پاسخ به تداخلات بار و نیز اجرای تنظیم توان اکتیو/فرکانس و تنظیم توان راکتیو/ولتاژ، می‌بایست از حلقه‌های کنترلی مناسب در ریزشبكة‌ها استفاده شود.

امروزه از سه استراتژی کنترلی اصلی یعنی تک عامله، غیرمتمرکز و کنترل مرکزی به منظور داشتن عملکرد و پایداری مطلوب استفاده می‌شود. در روش تک عامله ریزشبكة توسط یک تولید پراکنده قابل کنترل بزرگ اقدام به کنترل بارها و پارامترهای سیستم می‌نماید. در این روش، همه عملیات کنترلی بر تولیدات پراکنده قابل کنترل اعمال می‌شود. هزینه‌ی بالا از عیوب اصلی این روش می‌باشد. در روش غیرمتمرکز، هر تولید پراکنده مجهز به یک کنترل‌کننده‌ی محلی بوده و با استفاده از سیگنال فیدبک محلی کار کنترل را انجام می‌دهد [۶]. در روش مرکزی نیز، که بحث اصلی در این مقاله است، سیستم ریزشبكة با استفاده از یک واحد کنترل مرکزی اقدام به کنترل بارهای محلی و پارامترهای سیستم می‌نماید. در این روش، همه اطلاعات مربوط به بارها و تولیدات پراکنده در ریزشبكة، توسط یک واحد مرکزی جمع شده و

سپس تصمیمات مناسب برای بارها و تولیدات پراکنده اتخاذ می‌شود. در مرجع [۷] از ترکیب سیستم منطق فازی و بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای تنظیم بهینه‌ی کنترل‌کننده کلاسیک PI جهت کنترل فرکانس در ریزشبكة استفاده شده است. در این روش که سیگنال کنترلی نهایی توسط کنترل‌کننده PI تولید می‌شود، سیستم فازی به صورت برخط بهره‌های تناسبی و انتگرالی آن را براساس یک تعداد قوانین تعیین می‌کند. در این ساختار کنترلی، از الگوریتم بهینه‌سازی ذرات برای به دست آوردن پارامترهای سیستم فازی (از قبیل جایگاه‌های توابع تعلق مثلثی) بهره برده شده است. با استفاده از شبیه‌سازی نشان داده شده است که روش پیشنهادی نسبت به کنترل‌کننده PI ساختار ثابت عملکرد بهتری داشته است. در مرجع [۸] و جهت مقابله با نامعینی‌ها و افزایش کارایی کنترل‌کننده، از سیستم فازی نوع ۲ جهت تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده PI در یک ریزشبكة AC بهره برده شده است. در این روش برای تنظیم پارامترهای سیستم فازی نوع ۲ نیز از الگوریتم جستجوی هارمونی استفاده شده و نشان داده شده است که روش پیشنهادی با کیفیت بهتری تغییرات فرکانس را به صفر می‌رساند. همانند مرجع [۸] در مرجع [۹] نیز از سیستم فازی نوع ۲ به همراه کنترل‌کننده PI برای کنترل فرکانس در یک ریزشبكة و با حضور خودرو برقی بهره برده شده است. سیستم فازی نوع ۲ استفاده شده در این مراجع از نوع عمومی<sup>۲</sup> بوده و محاسبات بالا از معایب این روش کنترلی می‌باشد.

کنترل‌کننده فازی مرتبه کسری PID بهینه شده با الگوریتم بهینه‌سازی سیاه چاله در مرجع [۱۰] برای کنترل بار فرکانس در یک ریزشبكة و با حضور خودرو برقی طراحی شده است. با استفاده از یک سیستم عملی کارایی کنترل‌کننده پیشنهادی در مقایسه با کنترل‌کننده PID معمولی نشان داده شده است. در مرجع [۱۱] از کنترل پیش‌بین برای کنترل فرکانس در یک ریزشبكة که کنترل‌کننده در حلقه ثانویه قرار دارد، استفاده شده است. کنترل پیش‌بین توانایی پیش‌بینی رخداد‌های آینده را داشته و در این صورت می‌تواند تصمیمات کنترلی مناسبی اعمال کند. این روش با کنترل‌کننده‌های فازی مقایسه شده و نشان داده شده است که توانایی مناسبی در مواجهه با تغییرات بار دارد. یکی از معایب روش مبتنی بر کنترل پیش‌بین این است که قابل اعمال به سیستم‌های خطی بوده و اثرات غیرخطی توربین بادی و سایر منابع تجدیدپذیر بررسی نشده است. کنترل‌کننده PID مرتبه کسری بهینه‌شده با الگوریتم بهینه‌سازی استعماری در مرجع [۱۲] برای کنترل فرکانس در یک ریزشبكة جزیره‌ای طراحی شده است. نشان داده شده است که روش طراحی شده در مقابل تغییرات بار درخواستی و اغتشاشات عملکرد بهتری دارد. در سیستم ریزشبكة با توجه به مرکزی بودن کنترل‌کننده‌ها، فاصله میان عملگرها و سنسورها از اتاق کنترل، خطا در خطوط انتقالی و عملیات کنترلی و فیلترینگ باعث بوجود آمدن تاخیر زمانی می‌شود که در روش‌های کنترلی مرور شده نادیده گرفته شده است. عامل تاخیر زمانی در این سیستم‌ها که می‌تواند مقداری ثابت یا متغیر داشته باشد، نه تنها باعث کاهش کارایی شده بلکه ممکن است

پیل سوختی (با توان تولیدی  $P_{FC}$ )، سیستم ذخیره‌کننده انرژی باتری (با توان تولیدی  $P_{BESS}$ ) و سیستم ذخیره‌کننده انرژی چرخ‌طیار<sup>۳</sup> (با توان تولیدی  $P_{FESS}$ ) می‌باشد، نشان داده شده است. در سیستم ریزشبه کلیه منابع و ذخیره‌کننده‌ها از طریق یک مبدل DC به AC به شبکه وصل شده‌اند. همچنین، کلیه تأخیر زمانی‌های گفته شده در سیستم، به صورت یک بلوک در ورودی سیستم (بعد از کنترل‌کننده) آورده شده است. در شکل ۱، کنترل‌کننده طراحی شده با توجه به تغییرات فرکانس (که به ورودی کنترل‌کننده اعمال شده است)، می‌بایست سیگنال کنترلی مناسبی را در حضور تأخیر زمانی به پیل سوختی و دیزل ژنراتور اعمال کند تا تقاضای بار پاسخ داده شده و تغییرات فرکانس صفر شوند. با توجه به رفتار غیرخطی تمامی منابع کوچک ذکر شده و ماهیت متغیر با زمان توان تولیدی آنها، کنترل‌کننده طراحی شده بایستی توانایی مقابله با این موارد را نیز داشته باشد. همچنین هر ریزمنبع مجهز به یک کلید قدرت برای جداکردن آن از شبکه است تا از اثرات ناشی از اختلال شدید توسط ریزشبه جلوگیری شود. لازم به ذکر است که این عمل برای اهداف نگهداری مهم می‌باشد.



شکل (۱): ساختار یک ریزشبه به همراه تأخیر در ورودی [۷]  
Fig. (1): Input delay micro-grid system structure [7]

### ۳- کنترل‌کننده فازی PID

به خاطر سادگی و توانایی مناسب کنترل‌کننده PID، از این کنترل‌کننده در ساختارهای مختلف جهت کنترل سیستم‌های صنعتی از جمله کنترل بار-فرکانس در سیستم‌های قدرت به وفور استفاده می‌شود. در این میان، وجود عواملی از قبیل غیرخطی‌گری و تغییر در نقاط کار سیستم و همچنین تأخیر زمانی کارکرد این کنترل‌کننده‌ها را با مشکلاتی مواجه کرده و کارایی آن‌ها را کاهش می‌دهند [۱۵]. برای مقابله با این مشکلات لازم است که بهره‌های کنترل‌کننده متناسب با تغییرات در نقاط کار و تأخیر زمانی تنظیم شود تا پایداری حلقه بسته برقرار شده و کارایی آن افزایش یابد. برای این منظور از سیستم‌های فازی به دو صورت برای افزایش کارایی کنترل‌کننده‌های PID استفاده می‌شود: ۱- در روش اول، سیستم فازی به صورت برخط و براساس تغییر در نقاط کار سیستم، بهره‌های کنترل‌کننده PID را تنظیم کرده و سیگنال کنترلی نهایی توسط کنترل‌کننده PID تولید می‌شود. در این روش، ساختار و قوانین فازی استفاده شده بر عملکرد کنترلی تأثیر داشته و روش‌هایی برای بهینه کردن ساختار سیستم فازی استفاده شده معرفی شده است [۱۶-۱۷].

حتی منجر به ناپایداری آن‌ها نیز شود [۱۳-۱۴]. سیستم‌های با تأخیر در ورودی، در حالت حلقه بسته حساسیت زیاد به تغییرات تأخیر زمانی داشته و با تنظیم نامناسب بهره‌های کنترل‌کننده ناپایدار می‌شوند. بنابراین، نیاز است که در آن عامل تأخیر زمانی در طراحی لحاظ شود تا اهداف کنترلی از قبیل پایداری، ردیابی ورودی مرجع و غلبه بر اغتشاش در آنها برقرار باشد. برای همین منظور و در این مقاله کنترل‌کننده فازی PID خودتنظیم برای کنترل فرکانس در یک ریزشبه که دارای تأخیر زمانی در ورودی است، طراحی شده است. از لحاظ رابطه ورودی-خروجی و طرز عملکرد کنترلی، کنترل‌کننده فازی PID معرفی شده همانند کنترل‌کننده PID کلاسیک عمل می‌کند، با این تفاوت که این کنترل‌کننده دارای خاصیت غیرخطی بوده و توانایی مناسبی برای مقابله با غیرخطی‌گری و نامعینی‌های سیستم ریزشبه دارد. از طرفی، جهت جلوگیری از ناپایداری ناشی از تأخیر در ورودی، بهره‌های بخش انتگرالی و مشتق‌گیر که نقش مهمی در پایداری حلقه بسته دارند، با استفاده از روابط پیشنهادی و متناسب با میزان تأخیر زمانی تنظیم می‌شوند. در این روش و براساس روابط تنظیم این بهره‌ها، با افزایش تأخیر زمانی بهره‌های انتگرالی و مشتق‌گیر به ترتیب کم و زیاد می‌شوند تا سیستم حلقه بسته در معرض تأخیر زمانی پایدار بماند. روش کنترلی معرفی شده برای کنترل سیستم یک ریزشبه با تأخیر در ورودی اعمال شده و با شبیه‌سازی‌های مختلف کارایی روش پیشنهادی در مقایسه با روش‌های کنترلی دیگر نشان داده شده است.

در ادامه در بخش ۲ ساختار یک ریزشبه که دارای تأخیر در ورودی است توضیح داده شده است. در بخش ۳، کنترل‌کننده فازی PID خودتنظیم پیشنهادی برای مسئله کنترل بار-فرکانس سیستم ریزشبه تاخیردار معرفی شده است. در بخش ۴ نتایج شبیه‌سازی برای یک سیستم نمونه آورده شده است و در نهایت، در بخش ۵ نتیجه‌گیری بیان شده است.

### ۲- سیستم ریزشبه

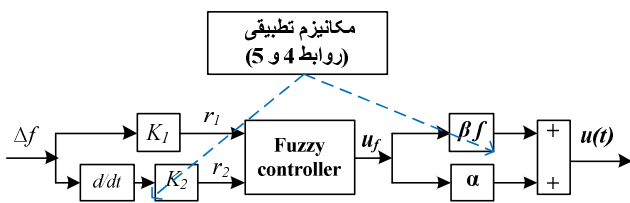
یک سیستم ریزشبه AC، یک اتصال میان بارهای توزیع شده داخلی و منابع انرژی توزیع شده فشار ضعیف مانند میکروتوربین‌ها، توربین‌های بادی، سلول‌های خورشیدی و وسایل ذخیره‌کننده انرژی است. در این میان وجود منابع انرژی تجدیدپذیر نظیر انرژی خورشیدی و بادی برای کاهش گرمایش جهانی و مسائل زیست محیطی دارای اهمیت است [۷]. در سیستم ریزشبه، تغییرات پارامتری و تغییرات نقاط کار بخصوص در حالت جدا شده از شبکه بسیار سریع بوده و همچنین توان تولیدی توسط منابع تجدیدپذیر متغیر می‌باشد که اهمیت طراحی کنترل‌کننده برای این سیستم را دوچندان می‌کند. همان‌طور که بحث گردید، مرکزی بودن کنترل‌کننده‌ها، فاصله میان عملگرها و سنسورها از اتاق کنترل، خطا در خطوط انتقالی و عملیات کنترلی و فیلترینگ باعث بوجود آمدن تأخیر زمانی می‌شوند که بایست در آنالیز و طراحی کنترل‌کننده برای این سیستم‌ها مورد توجه قرار گیرند. در شکل (۱) ساختار یک سیستم ریزشبه که شامل یک دیزل ژنراتور (با توان تولیدی  $P_{DEG}$ )، پنل انرژی خورشیدی (با توان تولیدی  $P_{PV}$ )، توربین بادی (با توان تولیدی  $P_{WTG}$ )،

موجود در سیستم ریزشبه مقابله کند. اما برای بهبود رفتار سیستم حلقه بسته به ازای تأخیر زمانی، لازم است اصلاحاتی در ضرایب این کنترل کننده صورت گیرد. برای این منظور و در این مقاله از روشی شبیه روش ارائه شده توسط زیگلر-نیکولز [۱۹] در تنظیم بهره‌های کنترل کننده PID بهره برده شده است. براساس روش زیگلر-نیکولز، بهره انتگرالی رابطه معکوسی با میزان تأخیر زمانی داشته و در مقابل بهره مشتق‌گیر با آن رابطه مستقیمی دارد. با استفاده از این حقیقت و همچنین با در نظر گرفتن این که ضرایب مقیاس  $\beta$  و  $K_2$  به ترتیب در بهره‌های انتگرالی و مشتق‌گیر کنترل کننده فازی PID تأثیر دارند، روابط زیر جهت تنظیم برخط ضرایب گفته شده معرفی می‌شود:

$$\beta = c_1 - 0.2\tau_{max} \quad (۴)$$

$$K_2 = c_2 + 0.1\tau_{max} \quad (۵)$$

که در آنها  $c_1$  و  $c_2$  به ترتیب مقادیر نامی  $\beta$  و  $K_2$  بوده و  $\tau_{max}$  بیانگر مقدار ماکزیمم تأخیر زمانی می‌باشد. با دقت در روابط تنظیم (۴) و (۵) می‌توان دریافت که با افزایش  $\tau_{max}$  مقادیر  $\beta$  و  $K_2$  به ترتیب کاهش و افزایش یافته و از این لحاظ همانند روش تنظیم زیگلر-نیکولز عمل می‌کنند. ساختار کلی کنترل کننده پیشنهادی فازی PID خودتنظیم در شکل ۳ آورده شده است.



شکل (۳): کنترل کننده فازی PID خودتنظیم پیشنهادی

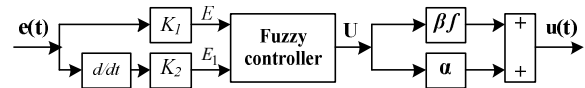
Fig. (3): The proposed self tuning fuzzy PID controller

در ساختار پیشنهادی شکل ۳، از مکانیزم تطبیقی معرفی شده در روابط (۴) و (۵) برای به‌روزرسانی برخط ضرایب  $\beta$  و  $K_2$  استفاده می‌شود تا عملکرد کنترل کننده فازی PID در مواجهه با تأخیر زمانی بهبود یابد.

#### ۴- شبیه‌سازی

برای نشان دادن کارایی کنترل کننده فازی PID خودتنظیم پیشنهادی، از یک سیستم ریزشبه که آرایش منابع کوچک و ذخیره‌کننده‌های آن به صورت شکل (۱) است، استفاده شده است. همچنین یک مدل ساده شده از ریزشبه مذکور نیز جهت شبیه‌سازی در شکل (۴) آورده شده که تأخیر زمانی در ورودی سیستم بوده و سیگنال کنترلی همزمان به پیل سوختی و دیزل ژنراتور اعمال می‌شود تا تغییرات فرکانس را به صفر برساند. پارامترهای سیستم ریزشبه در جدول (۱) آورده شده است. برای کنترل کننده فازی نیز توابع تعلق استفاده شده در قسمت مقدم تالی در شکل (۵) نشان داده شده است. همچنین قوانین تعریف شده برای کنترل کننده فازی در جدول ۲ و صفحه کنترل مربوطه نیز در شکل (۶) نشان داده شده است. برای تعیین مقادیر ضرایب مقیاس ورودی و

۲- در روش دوم، قوانین و ساختار سیستم فازی طوری طراحی می‌شود که از لحاظ رابطه ورودی-خروجی همانند کنترل کننده PID عمل می‌کند [۱۸]. در این روش که به کنترل کننده فازی PID معروف است، سیستم فازی سیگنال کنترلی نهایی را تولید کرده و کنترل کننده طراحی شده یک کنترل کننده غیرخطی می‌باشد. ساختار یک نوع از کنترل کننده فازی PID در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل (۲): ساختار کنترل کننده فازی PID

Fig. (2): The fuzzy PID controller structure

در این کنترل کننده  $u$  سیگنال کنترلی نهایی،  $e$  ورودی کنترل کننده (در این مقاله تغییرات فرکانس  $\Delta f$ )،  $U$  خروجی سیستم فازی بوده و  $\alpha$  و  $\beta$  ضرایب مقیاس خروجی و  $K_1$  و  $K_2$  نیز ضرایب مقیاس ورودی کنترل کننده هستند. خروجی نهایی کنترل کننده را می‌توان به صورت زیر در نظر گرفت:

$$u(t) = \alpha U + \beta \int U dt \quad (۱)$$

با در نظر گرفتن توابع تعلق مثلثی برای ورودی و یک مقدار crisp برای خروجی، سیگنال کنترلی نهایی را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$U(t) = A + PE + DE_1 \quad (۲)$$

که در آن  $A$ ،  $P$  و  $D$  مقادیر ثابتی بوده و  $E = K_1 e$  و  $E_1 = K_2 \dot{e}$  می‌باشد. با ترکیب روابط (۱) و (۲)، خروجی نهایی کنترل کننده فازی PID به صورت زیر قابل دستیابی است:

$$u(t) = \alpha A + \beta At + \alpha K_1 Pe + \beta K_2 De + \beta K_1 P \int e dt + \alpha K_2 D \dot{e} \quad (۳)$$

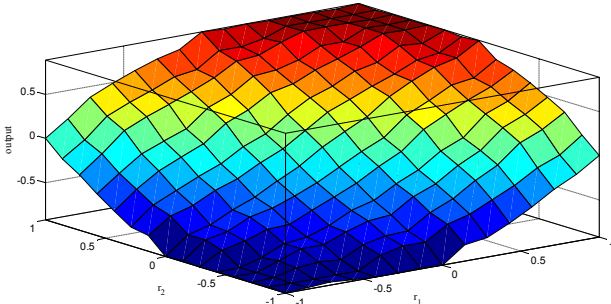
که در آن  $\alpha K_1 P + \beta K_2 D$  و  $\beta K_1 P$  و  $\alpha K_2 D$  به ترتیب بهره‌های تناسبی، انتگرالی و مشتق‌گیر کنترل کننده فازی PID می‌باشند. لازم به ذکر است که این کنترل کننده با توجه به ساختار غیرخطی آن، توانایی بسیار مناسبی در مواجهه با غیرخطی‌گری و نامعینی‌های سیستم تحت کنترل داشته و از طرفی توانایی دفع اغتشاش ثابت (همانند کنترل کننده PID کلاسیک) را نیز دارا می‌باشد. همان‌طور که قبل‌تر بحث گردید، تأخیر زمانی موجود در ورودی سیستم ریزشبه در مسئله کنترل بار-فرکانس نه تنها می‌تواند کارایی کنترل کننده را کاهش دهد، بلکه در اغلب موارد به ناپایداری آن نیز منجر می‌شود. بنابراین، در کنترل کننده فازی PID معرفی شده و جهت مقابله با تأخیر زمانی در ورودی سیستم ریزشبه، نیاز است که تمهیداتی در ساختار کنترلی آن ایجاد گردد. برای همین منظور در این مقاله، مکانیزم تطبیقی برای ضرایب مقیاس خروجی و ورودی کنترل کننده فازی PID معرفی شده است تا پایداری آن بهبود یافته و کارایی سیستم افزایش یابد.

#### ۳-۱- کنترل کننده فازی PID خودتنظیم

همان‌طور که بیان گردید، کنترل کننده فازی PID دارای رفتار غیرخطی است و بنابراین این توانایی را دارد که با نامعینی‌ها و غیرخطی‌گری

در کنترل کننده فازی و با توجه به تعداد توابع تعلق ورودی و خروجی، ۴۹ قانون داریم که در جدول ۲ آورده شده‌اند. دو نمونه از این قوانین براساس جدول مذکور به صورت زیر می‌توانند نوشته شوند:

Rule<sup>1</sup>: if r<sub>1</sub> is PL and r<sub>2</sub> is NL THEN u<sub>f</sub> is ZR  
 Rule<sup>20</sup>: if r<sub>1</sub> is PS and r<sub>2</sub> is PM THEN u<sub>f</sub> is PL



شکل (۶): صفحه قوانین تعریف شده برای سیستم فازی  
 Fig. (6): Rule surface of the fuzzy controller

Table (2): Fuzzy controller rule base

جدول (۲): قوانین تعریف شده برای کنترل کننده فازی

r <sub>2</sub> \ r <sub>1</sub>	NL	NM	NS	ZR	PS	PM	PL
PL	ZR	PS	PM	PL	PL	PL	PL
PM	NS	ZR	PS	PM	PL	PL	PL
PS	NM	NS	ZR	PS	PM	PL	PL
ZR	NL	NM	NS	ZR	PS	PM	PL
NS	NL	NL	NM	NS	ZR	PS	PM
NM	NL	NL	NL	NM	NS	ZR	PS
NL	NL	NL	NL	NL	NM	NS	ZR

Table (3): Nominal power for the micro grid system [7]

جدول (۳): توان‌های نامی سیستم ریزشبهه مورد مطالعه [۷]

توان نامی (کیلووات)		بارها (کیلووات)
توربین بادی	۱۰۰	P <sub>L1</sub> =۱۱۰
خورشیدی	۳۰	
پیل سوختی	۷۰	
دیزل ژنراتور	۱۶۰	P <sub>L2</sub> =۱۰۰
چرخ‌طیار	۴۵	
سیستم باتری	۴۵	

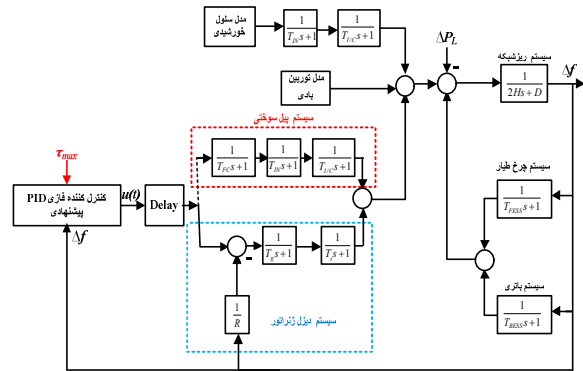
در ادامه کارائی کنترل کننده فازی PID خودتنظیم پیشنهادی به ازای تأخیر زمانی‌ها و شرایط مختلف سیستم ریزشبهه اشاره شده مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

حالت ۱: تأخیر زمانی متغیر با زمان که مقدار کوچکی است در ورودی سیستم ریزشبهه مطابق با شکل ۴ و به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\tau(t) = 0.5 + 0.5 \sin(t) \quad (۶)$$

که در آن  $\tau_{max}$  برابر با ۱ ثانیه می‌باشد. همچنین فرض می‌شود که توان‌های نامی برای هر یک از تولیدات پراکنده و بارها به صورت جدول ۳ است [۷].

خروجی از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات استفاده شده است [۷]. با تعریف انتگرال مجذور خطای سیستم ( $J = \int_0^\infty \Delta f^2(t) dt$ ) به عنوان تابع هدف، در نهایت مقادیر  $K_1=0.5$ ,  $\alpha=2$ ,  $c_1=0.3$  و  $c_2=2.3$  به دست آمده است. لازم به ذکر است که مقادیر اولیه پارامترهای  $K_2$  و  $\beta$  به ترتیب با  $c_1$  و  $c_2$  شروع شده و در طول شبیه‌سازی و بر اساس روابط (۴) و (۵) به‌روزرسانی می‌شوند.

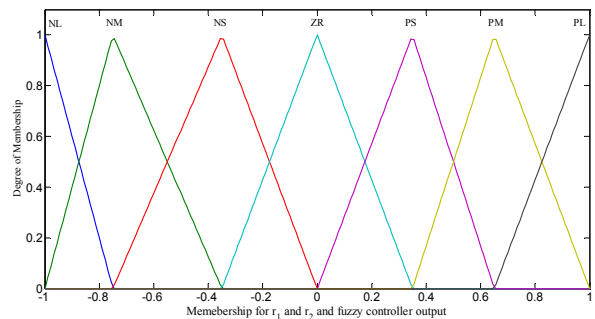


شکل (۴): مدل سیستم ریزشبهه مورد مطالعه در شبیه‌سازی‌ها [۷]  
 Fig. (4): Considered micro grid system model for the simulations [7]

Table (1): Micro grid system parameters

جدول (۱): پارامترهای سیستم ریزشبهه [۷]

پارامتر	تعریف	مقدار
D (pu/Hz)	ضریب میرایی	۰/۰۱۵
H (pu s)	ثابت اینرسی	۰/۰۸۳
T <sub>FESS</sub> (s)	ثابت زمانی چرخ‌طیار	۰/۱
T <sub>BESS</sub> (s)	ثابت زمانی باتری	۰/۱
T <sub>FC</sub> (s)	ثابت زمانی پیل سوختی	۰/۲۶
T <sub>g</sub> (s)	ثابت زمانی ژنراتور	۰/۰۸
T <sub>t</sub> (s)	ثابت زمانی توربین	۰/۴
T <sub>IC</sub> (s)	ثابت زمانی وسیله ارتباطی	۰/۰۰۴
T <sub>IN</sub> (s)	ثابت زمانی اینورتر	۰/۰۴
R (Hz/pu)	ضریب افتادگی	۰/۰۱۵



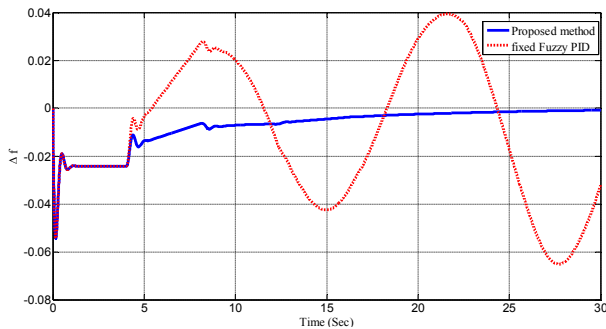
شکل (۵): توابع تعلق برای ورودی‌ها و خروجی سیستم فازی  
 Fig. (5): Fuzzy membership functions for the inputs and output

تغییرات فرکانس به ازای کنترل کننده پیشنهادی و همچنین اعمال کنترل کننده فازی PID ساختار ثابت در شکل (۸) نشان داده شده است. با توجه به پاسخ این کنترل کننده مشخص است که با افزایش تاخیر زمانی، کنترل کننده ساختار ثابت شروع به نوسان کرده و حالت گذرای آن دارای نوسانات بیشتری می باشد. در مقابل، کنترل کننده فازی PID پیشنهادی بعد از یک حالت گذرا، بر اغتشاش و تاخیر زمانی یاد شده فائق آمده و خطای حالت ماندگار از بین رفته است.

حالت سوم: در این حالت همان شرایط گفته شده در حالت اول و دوم برای توان نامی تولیدات پراکنده در نظر گرفته می شود و مقدار  $P_{L2}$  برابر با ۲۰۰ کیلووات در نظر گرفته می شود. همچنین، تاخیر زمانی با مقدار بزرگ در ورودی سیستم به صورت زیر فرض می شود:

$$\tau(t) = 3.5 + 0.5\sin(t) \quad (۸)$$

که در آن  $\tau_{max}$  برابر با ۴ ثانیه می باشد. تغییرات فرکانس با در نظر گرفتن شرایط مذکور و همچنین به ازای اعمال کنترل کننده های گفته شده در شکل (۹) نشان داده شده است.



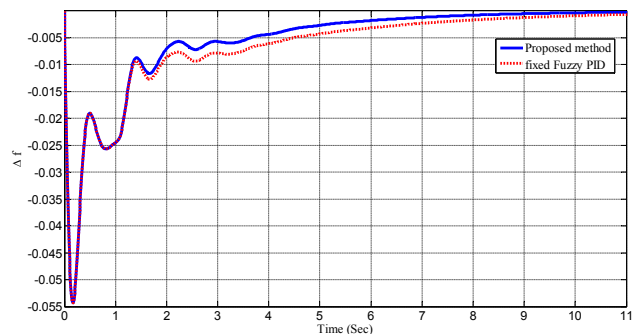
شکل (۹): تغییرات فرکانس به ازای اعمال کنترل کننده های فازی PID پیشنهادی و ساختار ثابت برای حالت سوم

Fig. (9): Frequency deviation for the proposed controller and the fixed structure controller for the case 3

با وجود تاخیر زمانی در ورودی سیستم ریزشکه، اگر ضرایب کنترل کننده به صورت مناسب تنظیم نشوند، ناپایداری امری اجتناب ناپذیر می باشد. بنابراین و با توجه به پاسخ این کنترل کننده مشخص است که با افزایش تاخیر زمانی در ورودی سیستم، کنترل کننده فازی PID ساختار ثابت شروع به نوسان کرده و به سمت ناپایداری می رود. در مقابل، پارامترهای کنترل کننده فازی PID پیشنهادی براساس روابط (۴) و (۵) به روزرسانی می شوند و این عمل توانایی این کنترل کننده را در مواجهه با تاخیر زمانی بالا برده است. بنابراین، کنترل کننده پیشنهادی بعد از یک حالت گذرا، بر اغتشاش و تاخیر زمانی یاد شده فائق آمده و خطای حالت ماندگار در حدود زمان ۱۵ ثانیه از بین رفته است. همان طور که قبلاً نیز بیان شد، تاثیر دادن تاخیر زمانی در ضرایب مقیاس ورودی- خروجی کنترل کننده فازی PID پیشنهادی از دلایل رفتار مناسب این کنترل کننده است. همچنین، خروجی کنترل کننده فازی ( $u_f$ ) و سیگنال کنترل نهایی ( $u$ ) برای کنترل کننده پیشنهادی در شکل نشان داده شده است که خروجی کنترل کننده فازی

تغییرات فرکانس با در نظر گرفتن شرایط گفته شده و همچنین به ازای اعمال کنترل کننده های فازی PID پیشنهادی و ساختار ثابت در شکل (۷) نشان داده شده است.

از پاسخ به دست آمده برای تغییرات فرکانس در نواحی مشخص است که کنترل کننده فازی PID خودتنظیم رفتار مناسبی نسبت به کنترل کننده ساختار ثابت دارد. از مهم ترین دلایل رفتار مناسب کنترل کننده پیشنهادی این است که در آن تاخیر زمانی در ساختار کنترل کننده فازی PID و تنظیم ضرایب مقیاس ورودی- خروجی اثر داده شده و بنابراین، این کنترل کننده توانسته است در مقابل تاخیر زمانی و بار درخواستی ایستادگی کرده و با سرعت بهتری تغییرات فرکانس را به صفر برساند.



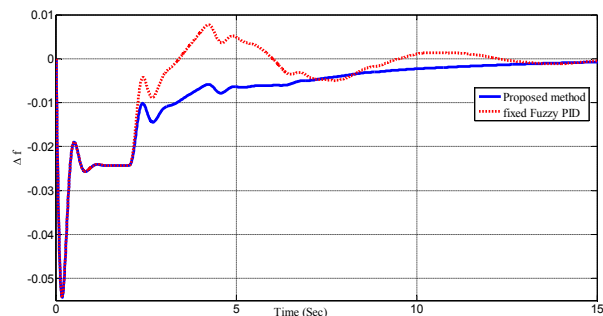
شکل (۷): تغییرات فرکانس به ازای اعمال کنترل کننده های فازی PID پیشنهادی و ساختار ثابت برای حالت اول

Fig. (7): Frequency deviation for the proposed controller and the fixed structure controller for the case 1

حالت دوم: در این قسمت سعی بر آن است که میزان کارایی کنترل کننده طراحی شده را به ازای افزایش ۱۰۰ درصدی در تاخیر زمانی مورد بررسی قرار دهیم. برای همین منظور، تاخیر زمانی زیر در ورودی سیستم ریزشکه جهت کنترل بار- فرکانس در نظر گرفته می شود:

$$\tau(t) = 1 + \sin(t) \quad (۷)$$

که در آن  $\tau_{max}$  برابر با ۲ ثانیه می باشد. همچنین فرض می شود که توان های نامی برای هر یک از تولیدات پراکنده و بارها به صورت جدول ۳ باشد.



شکل (۸): تغییرات فرکانس به ازای اعمال کنترل کننده های فازی PID پیشنهادی و ساختار ثابت برای حالت دوم

Fig. (8): Frequency deviation for the proposed controller and the fixed structure controller for the case 2

مرجع [۶] و کنترل کننده فازی P-PID بهینه شده با الگوریتم جستجوی گرانشی<sup>۵</sup> (FP-PIDGSA) ارائه شده در مرجع [۲۰] در جدول ۴ آورده شده است.

Table (4): Obtained RMSE using the considered controllers  
جدول (۴): مقادیر RMSE به دست آمده از عملکرد کنترل کننده‌ها

	کنترل کننده پیشنهادی	کنترل کننده فازی PID ساختار ثابت	کنترل کننده SHBEL مرجع [۶]	کنترل کننده FP-PIDGSA مرجع [۲۰]
حالت ۱	۰/۰۰۶۴	۰/۰۰۶۹	۰/۰۰۶۸	۰/۰۰۶۷
حالت ۲	۰/۰۰۸۳	۰/۰۰۹۸	۰/۰۰۹۲	۰/۰۰۹۰
حالت ۳	۰/۰۲۶۲	ناپایدار	ناپایدار	ناپایدار
حالت ۴	۰/۰۲۸۴	ناپایدار	ناپایدار	ناپایدار

با توجه به مقادیر به دست آمده RMSE برای حالت‌های مختلف شبیه‌سازی (تأخیر زمانی‌های مختلف)، مشخص است که کنترل کننده فازی PID خودتنظیم پیشنهادی دارای عملکرد بهتری نسبت به سه کنترل کننده گفته شده بوده و در تأخیر زمانی‌های بالاتر این کنترل کننده‌ها ناپایدار شده‌اند.

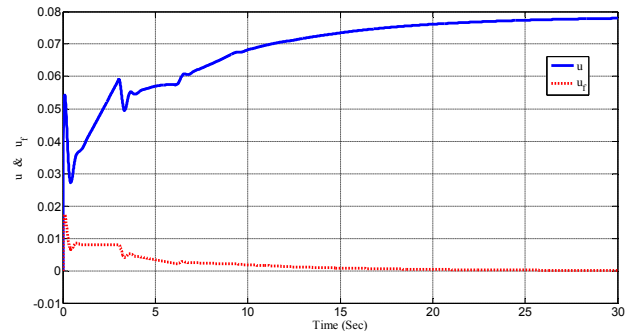
#### ۵- نتیجه‌گیری

جهت کنترل بار- فرکانس در سیستم ریزشبهکه تأخیردار که از منابع تولیدات پراکنده نظیر انرژی خورشیدی، دیزل ژنراتور، پیل سوختی و انرژی بادی و همچنین از منابع ذخیره‌کننده انرژی نظیر باتری و سیستم چرخ‌طیار بهره می‌برد، کنترل کننده فازی PID خودتنظیم طراحی گردید. در ساختار کنترلی طراحی شده، کنترل کننده فازی توانایی مقابله با غیرخطی‌گری و نامعینی‌های سیستم را داشته و قسمت خودتنظیم جهت مقابله با تأخیر زمانی متغیر با زمان طراحی شده است. الگوریتم طراحی شده در قسمت خودتنظیم تنها به ماکزیمم مقدار تأخیر وابسته بوده و با تنظیم برخط ضرایب مقیاس ورودی و خروجی، پایداری سیستم را بهبود داده و همچنین مطابق با شبیه‌سازی‌ها باعث افزایش کارایی سیستم حلقه بسته شده است. به ازای شبیه‌سازی‌هایی بر روی یک سیستم ریزشبهکه جدا شده از شبکه و همچنین به ازای تأخیر زمانی‌های مختلف کارایی روش پیشنهادی نشان داده شده است.

#### پی‌نوشت:

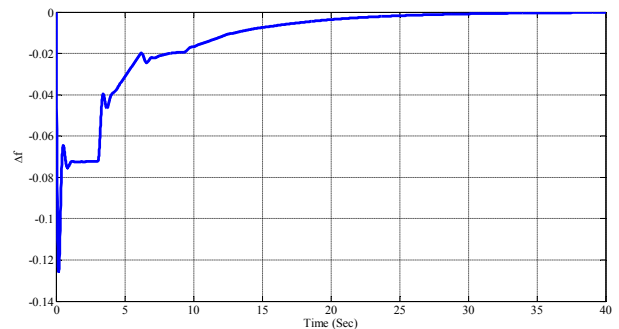
1. Micro grid
2. Generalized
3. Flywheel
4. Self-tuning human brain emotional learning (SHBEL)
5. Fuzzy P-PID optimized using gravitational search algorithm (FP-PID GSA)

بعد از گذشت زمان ۱۵ ثانیه (همزمان با به صفر رسیدن تغییرات فرکانس) به صفر رسیده است و سیگنال کنترلی نهایی با توجه به وجود قسمت انتگرال‌گیر در ساختار کنترل کننده در نهایت عدد ثابتی شده است.



شکل (۱۰): خروجی کنترل کننده فازی و سیگنال کنترلی نهایی  
Fig. (10): Fuzzy controller output and the main control signal

حالت چهارم: جهت مطالعه تاثیر ورود/ خروج منابع تولیدپراکنده و میزان مقاومت روش پیشنهادی در مقابل تغییرات پارامترها، رفتار سیستم به ازای عدم تولید توان توسط توربین بادی و همچنین تغییر در ثابت زمانی پیل سوختی (تغییر به مقدار  $TFC=0.36$ ) شبیه‌سازی شده و در شکل ۱۱ آورده شده است (بقیه شرایط همانند حالت سوم می‌باشند).



شکل (۱۱): تغییرات فرکانس به ازای اعمال کنترل کننده پیشنهادی در حالت خروج توربین بادی از شبکه و تغییرات در پارامتر سیستم

Fig. (11): Frequency deviation for the proposed controller in the case of system parameter variations and when the wind turbine is not in the system

همان‌طور که از پاسخ تغییرات فرکانس در شکل ۱۱ مشخص است، علیرغم شرایط گفته شده در ریزشبهکه، کنترل کننده پیشنهادی توانسته است تغییرات فرکانس را با کیفیت قابل قبولی به صفر برساند.

هرچند که به ازای خروج توربین بادی از شبکه (که توان نامی آن ۱۰۰ کیلووات بود) و البته تغییرات پارامتری در سیستم، فروجهش و همچنین زمان نشست سیستم نسبت به حالت سوم افزایش یافته و تغییرات فرکانس در ثانیه ۲۵ به صفر رسیده است. همچنین، مجدور مربعات خطا (RMSE) برای حالت‌های مختلف و به ازای اعمال کنترل کننده پیشنهادی، کنترل کننده فازی PID ساختار ثابت، کنترل کننده خود تنظیم مبتنی بر یادگیری عاطفی مغز انسان<sup>۴</sup> (SHBEL) ارائه شده در

## References

1. A. Kaur, J. Kaushal, P. Basak, "A review on microgrid central controller", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 55, pp. 338-345, March 2016.
2. I. Sadegh-Khani, "Analysis of hybrid reference frame limiting strategy performance in the presence of secondary control of inverter based islanded microgrids", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, Vol. 9, No. 33, pp. 3-14, Jan. 2018.
3. W. Gu, Z. Wu, R. Bo, W. Liu, G. Zhou, W. Chen, Z. Wu, "Modeling, planning and optimal energy management of combined cooling, heating and power microgrid: A review", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 54, pp. 26-37, Jan. 2014.
4. D.E. Olivares, A. Mehrizi-Sani, A.H. Etemadi, C.A. Cañizares, R. Iravani, M. Kazerani, A.H. Hajimiragha, O. Gomis-Bellmunt, M. Saeedifard, R. Palma-Behnke, "Trends in microgrid control", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 5, No. 4, pp. 1905-1919, July 2014.
5. H. Lotfi, A. Khodaei, "AC versus DC microgrid planning", *IEEE Trans. on Smart Grid*, Vol. 8, No. 1, pp. 296-304, Jan. 2017.
6. M.R. Khalghani, M.H. Khooban, E. Mahboubi-Moghaddam, N. Vafamand, M. Goodarzi, "A self-tuning load frequency control strategy for microgrids: Human brain emotional learning", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 75, pp. 311-319, Feb. 2016.
7. H. Bevrani, F. Habibi, P. Babahajyani, M. Watanabe, Y. Mitani, "Intelligent frequency control in an AC microgrid: Online PSO-based fuzzy tuning approach", *IEEE Trans. on Smart Grid*, Vol. 3, No. 4, pp. 1935-1944, Dec. 2012.
8. M.H. Khooban, T. Niknam, F. Blaabjerg, P. Davari, T. Dragicevic, "A robust adaptive load frequency control for micro-grids", *ISA Trans.*, Vol. 65, pp. 220-229, Nov. 2016.
9. M.H. Khooban, T. Niknam, F. Blaabjerg, T. Dragičević, "A new load frequency control strategy for micro-grids with considering electrical vehicles", *Electric Power Systems Research*, Vol. 143, pp. 585-598, Feb. 2017.
10. M.H. Khooban, T. Niknam, M. Shasadeghi, T. Dragicevic, F. Blaabjerg, "Load frequency control in microgrids based on a stochastic non-integer controller", *IEEE Trans. on Sustainable Energy*, Vol. 9, No. 2, April 2018.
11. F. Amiri, A. Hatami, "A model predictive control method for load-frequency control in islanded microgrids", *Computational Intelligence in Electrical Engineering*, Vol. 8, No. 1, pp. 9-24, Sum. 2017.
12. F. Jamshidi, M.M. Ghanbarian, "Robust frequency control of islanded microgrids: ICA-based FFOPID control approach", *Computational Intelligence in Electrical Engineering*, Vol. 8, No. 1, pp. 51-62, Sum. 2017.
13. J.P. Richard, "Time-delay systems: an overview of some recent advances and open problems", *Automatica*, Vol. 39, No. 10, pp. 1667-1694, Oct. 2003.
14. H.D. Choi, C.K. Ahn, P. Shi, L. Wu, M.T. Lim, "Dynamic output-feedback dissipative control for T-S fuzzy systems with time-varying input delay and output constraints", *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*, Vol. 25, No. 3, pp. 511-526, June 2017.
15. 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, June 2016.
16. E. Çam, I. Kocaarslan, "A fuzzy gain scheduling PI controller application for an interconnected electrical power system", *Electric Power Systems Research*, vol. 73, No. 3, pp. 267-274, March 2005.
17. Y. Arya, 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, Mar. 2016.
18. E. Yeşil, M. Güzelkaya, I. Eksin, "Self tuning fuzzy PID type load and frequency controller", *Energy Conversion and Management*, Vol. 45, No. 3, pp. 377-390, Feb. 2004.
19. J. Ziegler, N. Nichols, "Optimum settings for automatic controllers", *Journal of dynamic systems, measurement, and control*, Vol. 115, pp. 220-222, June 1993.
20. H. Shayeghi, A. Ghasemi, "Improvement of frequency fluctuations in microgrids using an optimized fuzzy P-PID controller by modified multi objective gravitational search algorithm", *Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering*, Vol.12, No. 4, pp.241-256, 2016.