

دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۲/۲۸

پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۱۱/۲۵

کنترل فرکانس یک ریزشبکه جزیره‌ای با استفاده از کنترل هوشمند پاسخ‌گویی بار مبتنی بر منطق فازی و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

رضا قاسمی^۱، حمیدرضا محمدی^{۲*}، سید عباس طاهر^۳

^۱ کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

rezaghasemi136972@yahoo.com

^۲ استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

mohammadi@kashanu.ac.ir

^۳ استاد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

sataher@kashanu.ac.ir

چکیده: با افزایش نفوذ انرژی‌های تجدیدپذیر در سیستم‌های قدرت، مسئله کنترل فرکانس اهمیت بیشتری یافته و روش‌های کنترل متداول قادر به حفظ پایداری سیستم قدرت نیستند. در شبکه‌های هوشمند، پاسخ‌گویی بار به‌عنوان یک ابزار کنترل فرکانس، وابستگی شبکه به ذخیره چرخان و کنترل‌کننده‌های با هزینه بالا را کاهش می‌دهد. علاوه بر مزایای اقتصادی پاسخ‌گویی بار، میرایی تغییرات فرکانس با سرعت بالا از جمله ویژگی‌های مهم آن است. در این مقاله، کنترل فرکانس یک ریزشبکه جزیره‌ای با استفاده از کنترل هوشمند پاسخ‌گویی بار مبتنی بر منطق فازی و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات ارائه شده که قادر است به‌طور مداوم، تعادل بین تولید و تقاضا را با وجود تغییرات طبیعی و نامعین در توان خروجی منابع انرژی بادی و خورشیدی تأمین کند. در مقایسه با سایر کارهای انجام‌شده، استفاده از کنترل‌کننده پیشنهادی باعث بهبود مشخصات پاسخ‌گویی از جمله زمان نشست، میزان فراجش و فروجش شده و ضمن برطرف کردن محدودیت منابع ذخیره‌سازی انرژی، در کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از عملکرد دیزل ژنراتور مؤثر بوده است. با استفاده از نتایج شبیه‌سازی در یک ریزشبکه جزیره‌ای، عملکرد مطلوب کنترل‌کننده هوشمند پاسخ‌گویی بار در مقایسه با سایر روش‌های کنترلی متداول، به‌خوبی نشان داده شده است.

واژه‌های کلیدی: کنترل فرکانس، ریزشبکه، پاسخ‌گویی بار، منطق فازی، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات.

۱. مقدمه

منبع تولید پراکنده در برابر اختلالات شدید است. همچنین ریزشبکه AC را می‌توان توسط یک سوئیچ استاتیکی^۲ در نقطه اتصال مشترک^۳ به سطوح ولتاژ بالاتر متصل کرد. این سوئیچ برای ایزوله کردن ریزشبکه در مقابل اختلالات شدید و خطاها و همچنین برای عملیات تعمیر و نگهداری، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

منابع تولید پراکنده از ادوات الکترونیک قدرت برای اتصال به ریزشبکه استفاده می‌کنند. این ادوات الکترونیک قدرت بر اساس نحوه اتصال منبع تولید پراکنده به ریزشبکه به انواع مختلفی تقسیم می‌شوند که عبارت‌اند از: مبدل‌های AC/AC، AC/DC/AC، DC/AC.

برای افزایش قابلیت اطمینان در سیستم‌های قدرت متعارف، ریزشبکه باید عملکرد مناسبی در هر دو حالت متصل به شبکه و جزیره‌ای داشته باشد. در حالت متصل به شبکه، مسئولیت کنترل فرکانس به عهده شبکه اصلی بوده و ریزشبکه فقط توان اکتیو/راکتیو تزریقی به شبکه را کنترل می‌کند. اما در حالت جزیره‌ای کنترل فرکانس در مقدار نامی و وظیفه اصلی ریزشبکه است [۴-۶].

امروزه ریزشبکه‌ها به تجهیزاتی مجهز شده‌اند که امکان کنترل بهتر آن‌ها را فراهم کرده و برنامه‌ریزی برای ایجاد تعادل بین تولید و مصرف را امکان‌پذیر می‌سازد. در این میان بارهایی که انرژی گرمایی تولید می‌کنند و یا انرژی گرمایی محیط را می‌گیرند و باعث خنک شدن محیط می‌شوند مانند دستگاه‌های تهویه مطبوع، بارهای مناسبی برای استفاده در پاسخ‌گویی بار هستند. در واقع پاسخ‌گویی بار در شبکه‌های هوشمند شرایطی را ایجاد کرده است که به کمک آن می‌توان در موقعیت‌های مختلف مصرف را متناسب با آن موقعیت کنترل کرد. زمانی که پاسخ‌گویی بار به‌عنوان خدمات جانبی به‌جای ذخیره چرخان در سیستم قدرت استفاده می‌شود، اگر فرکانس سیستم افزایش یا کاهش یابد، کنترل‌کننده پاسخ‌گویی بار فرمان لازم را به بارهای پاسخ‌گو اعمال می‌کند تا در صورت نیاز بارها خاموش یا روشن شوند و بدین وسیله، تعادل بین تولید و تقاضا برقرار گردد. برای مثال در زمان

ایجاد تعادل بین تولید و تقاضا در زمان واقعی، برای حفظ عملکرد قابل اطمینان سیستم قدرت، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ زیرا هر انحرافی در این تعادل باعث تغییر در فرکانس سیستم قدرت می‌شود و هر انحرافی در فرکانس مستقیماً بر عملکرد و قابلیت اطمینان سیستم قدرت تأثیرگذار خواهد بود. اگر انحراف فرکانس از مقدار نامی آن بزرگ‌تر باشد، باعث ناپایداری سیستم قدرت خواهد شد. به‌طور سنتی، این تعادل با تغییر در میزان تولید و ذخایر چرخان در هر زمان که مورد نیاز باشد انجام می‌شود. این در حالی است که از لحاظ اقتصادی، ذخیره‌سازی انرژی بسیار پرهزینه است و دستگاه‌های ذخیره‌ساز انرژی بسیار گران هستند [۱]. به‌واسطه نفوذ رو به رشد منابع انرژی تجدیدپذیر در سیستم قدرت و به‌ویژه در ریزشبکه‌های جزیره‌ای، تغییرات بنیادی در قوانین مربوط به سیستم قدرت ایجاد شده است که این تغییرات باعث می‌شوند منابع تولید در کل سیستم پخش شوند. همین مسئله باعث می‌شود که میزان پیچیدگی و غیرخطی بودن شبکه‌های قدرت افزایش یابد. بر این اساس پاسخ‌گویی بار^۱ نقش مهمی در ارائه خدمات جانبی، ارائه برق با کیفیت بهتر به مشترکین و کاهش هزینه‌ها دارد و یک جایگزین مناسب و سازگار با محیط‌زیست به‌جای ذخایر چرخان معمولی است [۲ و ۳].

ریزشبکه AC از منابع تولید پراکنده مختلفی مانند منابع خورشیدی، توربین بادی، میکروتوربین و دستگاه‌های ذخیره‌ساز تشکیل شده است و ارتباط نزدیکی با بارهای داخلی دارد. بارهای مصرف‌کننده را می‌توان به دو دسته بارهای بحرانی و بارهای غیربحرانی تقسیم کرد. بارهای بحرانی همیشه توسط یک یا چند منبع تولید پراکنده تغذیه می‌شوند و نباید دچار قطعی گردند، درحالی‌که بارهای غیربحرانی ممکن است در هنگام وقوع یک اختلال شدید، قطع شوند. هر منبع تولید پراکنده، یک بریکر و یک کنترلر محلی دارد که توسط یک سیستم مدیریت انرژی اداره می‌شوند. بریکر برای ایزوله کردن

2. Static Switch (SS)

3. Point of Common Coupling (PCC)

1. Demand Response (DR)

به‌صورت زیر خواهد بود [۱۵]:

$$\Delta P_T - \Delta P_L + \Delta P_{DR} = 2H.S.\Delta f + D.\Delta f \quad (1)$$

به‌طوری که ΔP_T توان خروجی منابع تولید پراکنده، ΔP_L توان مصرفی بار، ΔP_{DR} توان حاصل از پاسخ‌گویی بار، $2H$ ضریب اینرسی، Δf تغییرات فرکانس و D ضریب میرایی هستند. در سیستم شکل (۱)، R معرف ضریب افتی گاورنر، T_g ثابت لختی گاورنر، T_t ثابت زمانی توربین، T_{in} ثابت زمانی اینورتر و $T_{1/c}$ ثابت زمانی تجهیزات ارتباطی هستند.

۳. طراحی کنترل‌کننده

۳.۱. کنترل‌کننده Fuzzy-PI

در سیستم‌های قدرت مرسوم، کنترل فرکانس اغلب با استفاده از کنترل‌کننده‌های PI رایج، که معمولاً بر اساس نقاط کار از پیش تعیین‌شده تنظیم شده‌اند، کار می‌کند. در صورت تغییر در نقطه کار، کنترل‌کننده‌های PI نمی‌توانند عملکرد مطلوب تعیین‌شده را داشته باشند. درحالی‌که اگر کنترل‌کننده PI بتواند به‌طور پیوسته تغییراتی را که در سیستم قدرت رخ می‌دهد پیگیری کند، همواره می‌توان به عملکردی بهینه دست یافت. می‌توان از منطق فازی به‌عنوان یک روش هوشمند مناسب برای تنظیم آنلاین پارامترهای کنترل‌کننده PI استفاده کرد. در این بخش، کنترل‌کننده PI مرسوم برای کنترل فرکانس، توسط روش معروف زیگلر-نیکولز تنظیم می‌شود. سپس یک کنترل‌کننده کاملاً فازی نیز طراحی خواهد شد. یک بررسی جامع روی روش‌های تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده‌های PI/PID مانند زیگلر-نیکولز در [۱۶] ارائه شده است. با استفاده از روش زیگلر-نیکولز، پارامترهای کنترل‌کننده PI را می‌توان به‌صورت جدول (۳) به دست آورد [۶].

جدول (۳): پارامترهای کنترل‌کننده PI با استفاده از روش زیگلر-نیکولز

پارامترهای کنترل‌کننده	مقادیر
K_P	۴/۰۹۵
K_I	۲۱/۸۴

جدول (۱): توان نامی واحدهای تولید پراکنده و بارهای متصل به آن‌ها

منابع تغذیه (kW)		بار (kW)	
توربین بادی (WTG)	۱۰۰	P_{L1}	۲۱۰
ماژول خورشیدی (PV panel)	۳۰		
پیل سوختی (FC)	۷۰		
دیزل ژنراتور (DEG)	۱۶۰	P_{L2}	۲۲۰
سیستم ذخیره‌ساز چرخ طیار (FESS)	۴۵		
سیستم ذخیره‌ساز باتری (BESS)	۴۵		

جدول (۲): مقادیر پارامترهای سیستم تحت مطالعه

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
D(Pu/Hz)	۰/۰۰۹	$T_g(s)$	۰/۱۱۲
2H(Pu s)	۰/۲۵۰۰۵	$T_t(s)$	۰/۲
$T_{FESS}(s)$	۰/۶۵	$T_{1/c}(s)$	۰/۰۰۴
$T_{BESS}(s)$	۰/۱۴۵	$T_{in}(s)$	۰/۰۴
$T_{FC}(s)$	۰/۲۶	R(Hz/Pu)	۳/۹

با اضافه شدن حلقه پاسخ‌گویی بار به حلقه کنترل بار فرکانس، کنترل سیستم را می‌توان بین دو حلقه کنترل پاسخ‌گویی بار و کنترل تکمیلی تقسیم کرد. سهم کنترل پاسخ‌گویی بار به میزان α است که $0 < \alpha < 1$ قرار دارد. هنگامی که $\alpha = 1$ است، یعنی تمام کنترل سیستم توسط کنترل پاسخ‌گویی بار انجام می‌گیرد. در این مقاله مقدار $\alpha = 0/9$ در نظر گرفته شده است؛ یعنی ۹۰٪ کنترل توسط کنترل‌کننده پاسخ‌گویی بار صورت می‌گیرد و ۱۰٪ کنترل توسط کنترل‌کننده تکمیلی انجام می‌شود. پس از انجام تجزیه و تحلیل روی میزان حساسیت α ، این نتیجه حاصل شده است که حساسیت سیستم نسبت به α ، زمانی که حلقه کنترل پاسخ‌گویی بار سهم بیشتری در کنترل فرکانس دارد کمتر است. برای مثال مقادیر مختلف α در [۱۴] بررسی شده است.

در این مدل با توجه به اینکه خطای سیگنال کوچک بررسی می‌شود، تمامی عناصر با توابع مرتبه اول تقریب زده شده‌اند. معادله سیستم قدرت با حضور پاسخ‌گویی بار

$$K_i = K_i^* + \Delta K_i, \begin{cases} K_2 > 0 & \Delta K_i = K_2 K_i^* C_i \\ K_2 < 0 & \Delta K_i = K_2 K_i^* \frac{C_i}{1 + C_i} \end{cases} \quad (3)$$

که در آن، مقادیر K_1 و K_2 توسط منطق فازی به دست می‌آیند و ضرایب C_p و C_i بازه تغییرات ماکزیمم و مینیمم پارامترها را تعیین می‌کند:

$$K_i \in \left[\frac{K_i}{C_i} K_i C_i \right] \text{ و } K_p \in \left[\frac{K_p}{C_p} K_p C_p \right]$$

K_p^* و K_i^* مقادیر نامی پارامترهای کنترل‌کننده PI هستند که در این مقاله مقدار بهینه آن‌ها توسط الگوریتم ازدحام ذرات از کمینه‌سازی $RMS(\Delta f) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \Delta f^2 dt}$ به دست آمده است.

۲.۳. کنترل‌کننده PSO-Fuzzy PI

عملکرد کنترل‌کننده Fuzzy-PI، به شدت به توابع عضویت وابسته است. بدون داشتن اطلاعات دقیق درباره سیستم، نمی‌توان به‌طور دقیق توابع عضویت را انتخاب کرد و کنترل‌کننده Fuzzy-PI طراحی شده دارای عملکرد بهینه در بازه گسترده‌ای از شرایط عملیاتی نخواهد بود. از این‌رو، در این قسمت از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای تنظیم آنلاین توابع عضویت استفاده شده است. اختلاف پایه‌ای الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات در مقایسه با سایر الگوریتم‌های ابتکاری، میزان سادگی در پیاده‌سازی است. با در نظر داشتن هدف الگوریتم که پیدا کردن نقطه اکسترمم (کمینه یا بیشینه) تابع هزینه است، در صورتی که تابع هزینه به‌طور مناسب انتخاب نشود، ممکن است الگوریتم در نقاط اکسترمم محلی متوقف شود. مقداردهی اولیه پارامترهای الگوریتم، بسیار مهم است؛ زیرا اگر این پارامترها به‌دقت انتخاب نشوند، ممکن است الگوریتم هیچ‌گاه به یک نقطه اکسترمم، همگرا نشود. پارامترهای مهم این الگوریتم، تعداد ذره‌ها، ابعاد ذره‌ها، فواصل سرعت ذره‌ها (V_{min}, V_{max}) ، C_1 و C_2 ، و فواصل مکانی ذره‌ها (X_{min}, X_{max}) هستند.

در یک منطقه جست‌وجوی n بعدی، مکان و سرعت ذره i ام در زمان t ، به ترتیب توسط بردارهای زیر نشان داده شده است

[۱۹]:

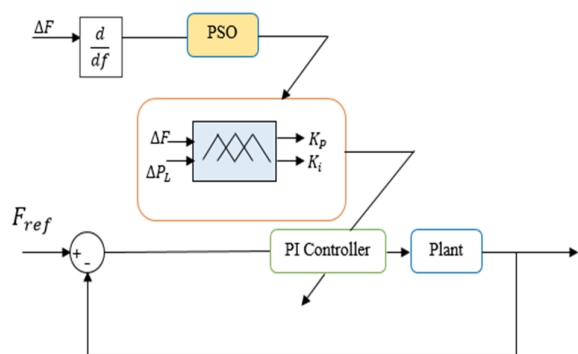
همان‌طور که پیش از این توضیح داده شد، به‌منظور دستیابی به عملکردی بهتر، از منطق فازی به‌عنوان یک روش هوشمند برای تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده PI استفاده شده است. یک سیستم فازی از ۴ بخش اصلی تشکیل شده که عبارت‌اند از: فازی‌سازی، مبانی دستوری فازی، سیستم استنتاج و غیرفازی‌سازی [۱۷]. کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی فازی^۱ (Fuzzy-PI)، از دو سطح تشکیل شده است: یک کنترل‌کننده PI مرسوم و یک واحد سیستم فازی. به‌منظور اعمال منطق فازی به سیستم ریزشبکه و تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده PI، از یک دسته قوانین فازی (شامل ۱۸ دستور) به‌منظور ارتباط دادن متغیرهای ورودی Δf (انحراف فرکانس) و ΔPL (اختلال بار)، به متغیرهای خروجی K_p (بهره تناسبی) و K_i (بهره انتگرالی) استفاده شده است. قوانین فازی اجراشده در جدول (۴) ارائه شده‌اند. در این قوانین فازی، تابع عضویت مربوط به متغیرهای ورودی و خروجی، به‌صورت منفی بزرگ (NL)، منفی متوسط (NM)، منفی کوچک (NS)، مثبت کوچک (PS)، مثبت متوسط (PM)، و مثبت بزرگ (PL) ترتیب یافته است. این قوانین، مطابق تابع عضویت مثلثی ترتیب‌بندی شده‌اند. بخش‌های پیشین هر قانون، با استفاده از تابع AND (با تفسیر مینیمم)، ایجاد شده و از سیستم استنتاج فازی ممدانی استفاده شده است.

جدول (۴): دسته قوانین فازی

ΔF ΔP_L	NL	NM	NS	PS	PM	PL
S	NL	NM	NS	PS	PS	PM
M	NL	NL	NM	PS	PM	PM
L	NL	NL	NL	PM	PM	PM

بهره تناسبی K_p و بهره انتگرالی K_i مطابق روابط زیر محاسبه می‌شود [۱۸]:

$$K_p = K_p^* + \Delta K_p, \begin{cases} K_1 > 0 & \Delta K_p = K_1 K_p^* C_p \\ K_1 < 0 & \Delta K_p = K_1 K_p^* \frac{C_p}{1 + C_p} \end{cases} \quad (2)$$



شکل (۲): سیستم حلقه بسته با کنترل کننده PSO-FUZZY PI

به‌طور کلی، الگوریتم PSO را می‌توان به ده مرحله زیر خلاصه کرد:

گام ۱. انتخاب پارامترهای الگوریتم، شامل V_{max} , V_{min} , N (تعداد ذره‌ها)، C_1 , C_2 , X_{min} , X_{max} و W (وزن اینرسی) که در این مطالعه مقدار 0.9 ثابت در نظر گرفته شده است.

گام ۲. مقداردهی اتفاقی به ذرات $(X_i(t), V_i(t))$.

گام ۳. مقداردهی اولیه بردار p_{best} برای همه ذرات با استفاده از مقادیر اولیه اتفاقی که در مرحله ۲ بردارهای مکان به دست آمده است.

گام ۴. به‌روزرسانی پارامترهای سیستم فازی با استفاده از بردار مکان ذره $X_i(t)$ و محاسبه مقدار تناسب برای هر ذره با استفاده از تابع هدف.

گام ۵. تعیین g_{best} با استفاده از مقادیر هدف ذره‌ها.

گام ۶. به‌روزرسانی کردن بردارهای سرعت و مکان ذره (X_i, V_i) طبق روابط (۸) و (۹).

گام ۷. به‌روزرسانی پارامترهای توابع عضویت سیستم فازی، با استفاده از بردار مکان هر ذره و محاسبه مقدار هدف برای هر ذره.

گام ۸. به‌روزرسانی p_{best} برای هر ذره.

گام ۹. به‌روزرسانی g_{best} .

اگر مقدار هدف $g_{best}(t+1)$ بهتر از مقدار هدف g_{best} بود، آنگاه:

$$g_{best} = g_{best}(t+1)$$

$$V_i(t) = [V_{i1}(t), V_{i2}(t), \dots, V_{in}(t)]^T \quad (4)$$

$$X_i(t) = [X_{i1}(t), X_{i2}(t), \dots, X_{in}(t)]^T \quad (5)$$

در هر زمان، ذره‌ها برابر با یک مقدار هدف هستند و بهترین مکان ذره‌ها (از آغاز تا به این لحظه) توسط الگوریتم ذخیره می‌شود. بهترین مکان برای یک ذره، در زمان t ، مکانی است که بهترین مقدار هدف را برای ذره ارائه دهد. بهترین مکان برای ذره i ام تا به لحظه t ، توسط رابطه زیر نشان داده می‌شود:

$$p_{best}(t) = [p_{best,i1}(t), p_{best,i2}(t), \dots, p_{best,in}(t)] \quad (6)$$

همچنین PSO، بهترین مکان را که توسط همه ذرات تا زمان t به دست آمده است، ذخیره می‌کند و می‌توان آن را با رابطه (۷) نشان داد.

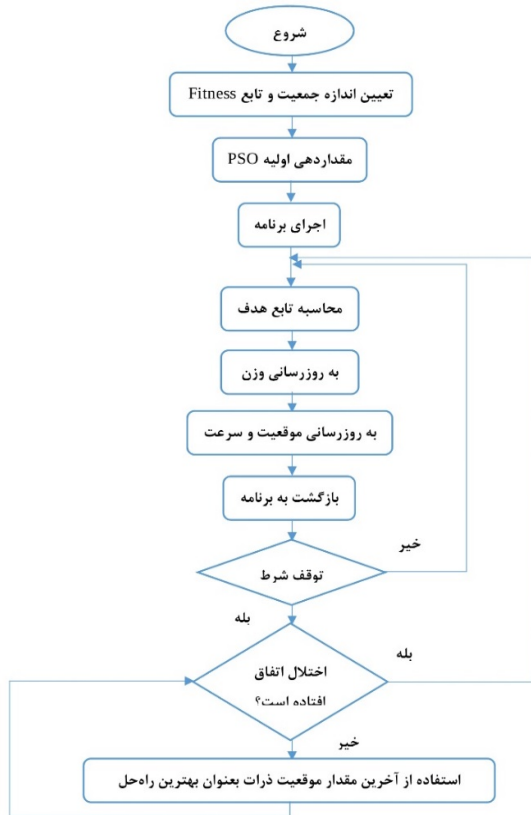
$$g_{best}(t) = [g_{best,1}(t), g_{best,2}(t), \dots, g_{best,n}(t)] \quad (7)$$

مکان و سرعت هر ذره در زمان $(t+1)$ ، از روابط (۸) و (۹) به دست می‌آیند. V_{ij} و X_{ij} به ترتیب عنصر i ام بردار سرعت V و بردار مکان X ، برای ذره i ام هستند [۱۹].

$$V_{ij}(t+1) = W \cdot V_{ij}(t) + C_1 \cdot rand1_{ij} \cdot (p_{best,ij}(t) - X_{ij}(t)) + C_2 \cdot rand2_{ij} \cdot (g_{best,ij}(t) - X_{ij}(t)) \quad (8)$$

$$X_{ij}(t+1) = X_{ij}(t) + V_{ij}(t+1) \quad (9)$$

در اینجا $i = 1, 2, \dots, n$ شاخص ذره، X_{ij} بعد از مکان ذره i ام، V_{ij} بعد از سرعت ذره i ام، $p_{best,ij}$ بعد از بهترین مکانی که تا به حال توسط همه ذرات به دست آمده است، W وزن اینرسی، $rand1_{ij}$ و $rand2_{ij}$ دو عدد اتفاقی در بازه $[0, 1]$ ، C_1 و C_2 ضرایب آموزش و t زمان یا تکرار هستند. چهارچوب کنترلی کلی برای تنظیم آنلاین توابع عضویت برای قوانین فازی، مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل (۴): فلوچارت الگوریتم PSO برای تنظیم آنلاین توابع عضویت

۳.۳. کنترل کننده مبتنی بر پاسخ گویی بار هوشمند

همان طور که توضیح داده شد، کنترل پاسخ گویی بار باعث بهبود پایداری فرکانسی سیستم می شود که برای درک بهتر این قضیه، روابط مربوط به خطای حالت ماندگار و پایداری سیستم در حضور پاسخ گویی بار بررسی شده است:

با استفاده از رابطه (۱) می توان رابطه انحراف فرکانس را

به صورت زیر نوشت:

$$\Delta f(s) = \frac{1}{2H \cdot s + D} [\Delta P_T(s) - \Delta P_L(s) + G(s)\Delta P_{DR}(s)] \quad (10)$$

$$\Delta P_T(s) = H(s) \cdot [\Delta P_S(s) - \frac{1}{R} \Delta f(s)] \quad (11)$$

$$H(s) = \frac{1}{(1 + sT_g) + (1 + sT_t)} \quad (12)$$

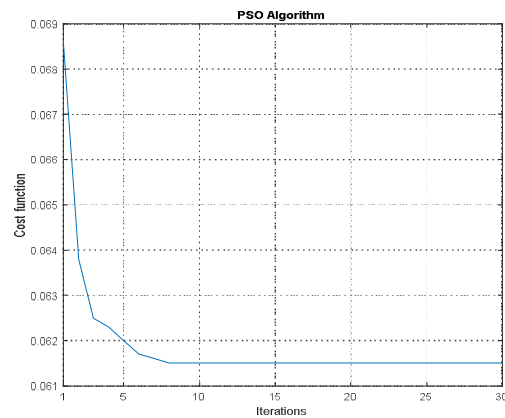
در این روابط، ΔP_S توان تولیدی منابع تجدیدپذیر است.

حال با جایگذاری روابط (۱۱) و (۱۲) در رابطه انحراف

فرکانس و با توجه به رابطه خطای حالت ماندگار:

گام ۱۰. اگر شرایط توقف مهیا شد، الگوریتم متوقف خواهد شد و مقادیر پارامترهای بهینه به دست خواهند آمد، در غیر این صورت، برگرد به مرحله ۶.

شرایط توقف در این الگوریتم می تواند شامل تعداد تکرار مشخص، زمان، عدم بهبود جواب ها و همگرایی جواب ها باشد. از آنجایی که همگرایی سریع از ویژگی های الگوریتم PSO می باشد، در این کنترل کننده از روش همگرایی جواب ها به عنوان شرط توقف استفاده شده است. عملکرد آن به این صورت است که اگر در چند تکرار متوالی تغییری در مقدار هزینه بهترین ذره ایجاد نگردد آنگاه الگوریتم پایان می یابد، در غیر این صورت همان طور که گفته شد، به مرحله محاسبه تابع هدف باز می گردد. به منظور نمایش سرعت همگرایی الگوریتم PSO در مسئله مورد نظر، منحنی تابع هزینه در شکل (۳) نمایش داده شده است. همان گونه که در این شکل مشاهده می شود، در گام هشتم پاسخ همگرا شده و از آن پس تابع هزینه بدون تغییر مانده است.



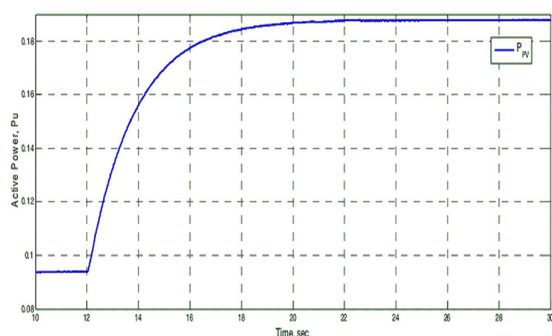
شکل (۳): ارزیابی سرعت همگرایی الگوریتم PSO در مسئله مورد نظر

فلوچارت الگوریتم PSO برای تنظیم آنلاین توابع عضویت

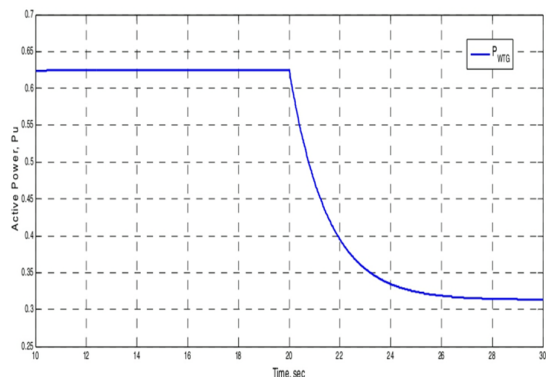
قوانین فازی در شکل (۴) نشان داده شده است.

۱.۴. بررسی روش کنترل هوشمند فرکانس ریزشبه‌جزیره در

حضور منابع متغیر باد و خورشید و پاسخ‌گویی بار PI در اولین شبیه‌سازی منبع انرژی بادی با توان خروجی (pu) ۰/۶۲۵ و منبع انرژی خورشیدی با توان خروجی (pu) ۰/۰۹۳۷۵ در لحظه $t=0$ به سیستم ریزشبه‌جزیره متصل می‌شوند. بازه زمانی $0 < t < 24s$ مقدار توان خروجی منبع خورشیدی افزایش می‌یابد، درحالی‌که توان خروجی توربین بادی در بازه $20s < t < 27s$ از مقدار (pu) ۰/۶۲۵ به مقدار (pu) ۰/۳۱۲۵ کاهش می‌یابد که در شکل (۵) نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل (۵): تغییرات توان خروجی منابع تجدیدپذیر؛ الف. منبع

خورشیدی، ب. توربین بادی

پارامترهای سیستم مطابق جدول (۲) بوده و در این حالت مشاهده می‌شود که کنترل‌کننده PI معمولی قادر به کنترل سیستم نخواهد بود و سیستم ناپایدار می‌شود. حال برای بهبود عملکرد سیستم در این شرایط با استفاده از کنترل هوشمند

$$\Delta f_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} S. \Delta f(s) \quad (13)$$

حالت ماندگار انحراف فرکانس به صورت زیر به دست می‌آید:

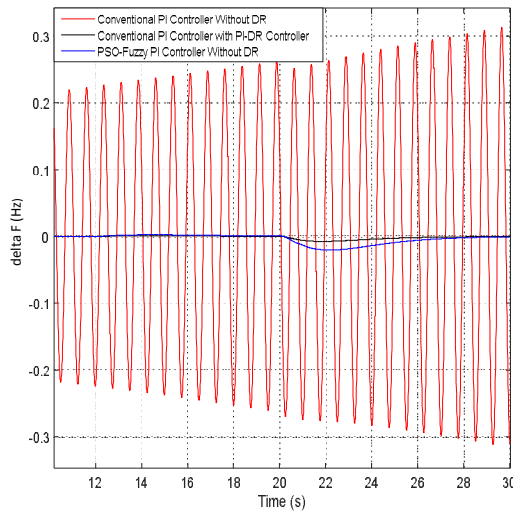
$$\Delta f_{ss} = \frac{\Delta P_{s,ss} + \Delta P_{DR,ss} - \Delta P_L}{D + \frac{1}{R}} \quad (14)$$

با توجه به رابطه (۱۴)، انحراف فرکانس صفر نخواهد بود مگر اینکه کنترل‌های تکمیلی و کنترل پاسخ‌گویی بار وجود داشته باشند. همچنین حلقه کنترل پاسخ‌گویی بار درجه آزادی بیشتری را برای تنظیم فرکانس سیستم می‌دهد. وضعیتی را که هیچ‌گونه کنترل پاسخ‌گویی بار در دسترس نیست در نظر بگیرید. خطای حالت ماندگار انحراف فرکانس صفر خواهد شد اگر $\Delta P_{s,ss} = \Delta P_L$ به این معنی که کنترل تکمیلی باید ذخیره چرخان یا غیرچرخان کافی هنگام بروز اختلال داشته باشد. حال با اضافه شدن کنترل پاسخ‌گویی بار می‌توان سهم کنترل رابین دو حلقه کنترل بر اساس هزینه‌های زمان واقعی آن‌ها در بازار برق تقسیم کرد [۱۴]. با توجه به تحقیقات گذشته، کنترل‌کننده‌های پاسخ‌گویی بار که استفاده شده‌اند کنترل‌کننده‌های PI معمولی بودند و پاسخ بهتری نسبت به کنترل سیستم توسط کنترل‌کننده‌های تکمیلی هوشمند داشته‌اند، اما همان طور که گفته شد کنترل‌کننده PI در برابر عدم قطعیت‌های سیستم، عملکرد ضعیفی دارد. به همین منظور برای بهبود کارایی سیستم کنترل فرکانس در برابر اغتشاشات وارده و ضمناً کاهش وابستگی ریزشبه‌جزیره به ذخایر چرخان و ذخیره‌سازهای انرژی، در این مقاله روش کنترل هوشمند مبتنی بر منطق فازی و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات مطابق شکل (۲) به کنترل‌کننده پاسخ‌گویی بار اعمال شده و یک مقایسه کلی بین انواع کنترل‌کننده‌ها و مزیت‌های هرکدام انجام پذیرفته و نتایج در بخش بعد نشان داده شده‌اند.

۴. بررسی نتایج شبیه‌سازی

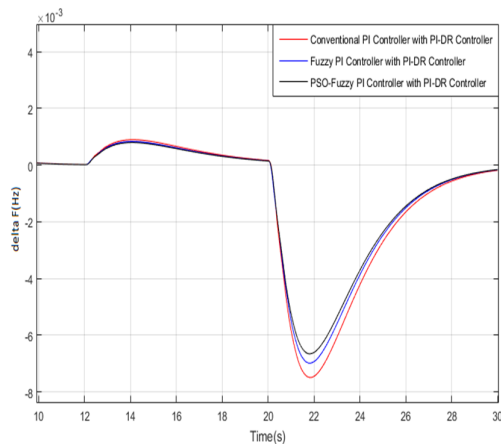
در این بخش، ریزشبه‌جزیره AC تحت مطالعه در شرایط مختلف، اعم از حضور و عدم حضور پاسخ‌گویی بار و به‌ازای کنترل‌کننده‌های مختلف شبیه‌سازی شده و نتایج ارائه شده‌اند.

فازی پارامترهای کنترل کننده PI را تنظیم کرده و مشاهده می شود که با وجود فروجهش و فراججهش زیاد پاسخ، که در اثر وجود منابع متغیر در سیستم به وجود آمده اند، سیستم در نهایت پایدار می شود. سپس برای بهبود بیشتر پاسخ سیستم، تنظیم توابع عضویت سیستم فازی توسط الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات انجام شده است. تغییرات فرکانس سیستم به ازای کنترل کننده های بیان شده در شکل (۶) نشان داده شده اند.

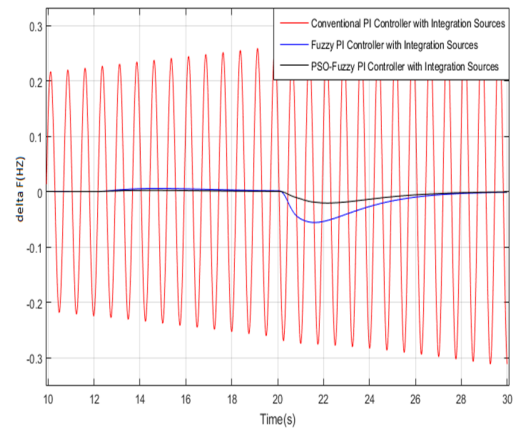


شکل (۷): تغییرات فرکانس سیستم در حضور منابع متغیر: کنترل کننده تکمیلی PI بدون پاسخ گویی بار، کنترل کننده تکمیلی PSO-Fuzzy بدون پاسخ گویی بار و کنترل کننده تکمیلی PI با کنترل پاسخ گویی بار (کنترل کننده PI)

برای بهبود زمان نشست و میزان فراججهش و فروجهش پاسخ، علاوه بر اعمال کنترل پاسخ گویی بار، تنظیم کنترل کننده تکمیلی که ۱۰٪ از کنترل سیستم را به عهده دارد نیز توسط منطق فازی و الگوریتم PSO انجام می شود. نتایج شبیه سازی در این حالت در شکل (۸) نشان داده شده است.



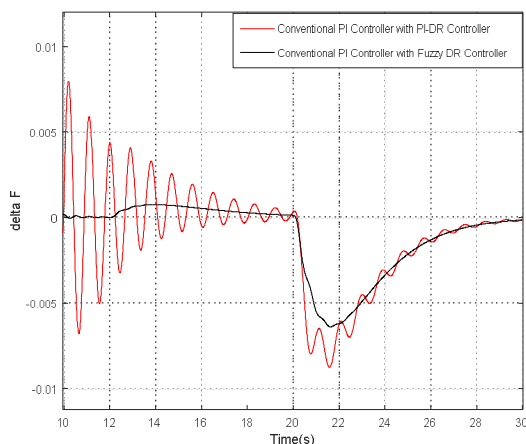
شکل (۸): تغییرات فرکانس با اعمال کنترل کننده تکمیلی PI، Fuzzy-PI و PSO-Fuzzy PI با کنترل پاسخ گویی بار (کنترل کننده PI)



شکل (۶): تغییرات فرکانس در حضور منابع متغیر با کنترل کننده PI، Fuzzy-PI و PSO-Fuzzy PI

در ادامه برای بررسی تأثیر کنترل کننده پاسخ گویی بار، سیستم کنترل فرکانس تکمیلی با کنترل کننده PI در نظر گرفته شده و کنترل کننده پاسخ گویی بار به آن اضافه شده است. در شکل (۷) نتایج شبیه سازی برای هر دو حالت بدون پاسخ گویی بار و با حضور پاسخ گویی بار ارائه شده اند. در ضمن، برای مقایسه بهتر، نتایج حاصل از اعمال کنترل کننده PSO-Fuzzy بدون پاسخ گویی بار نیز در شکل (۷) ارائه شده است.

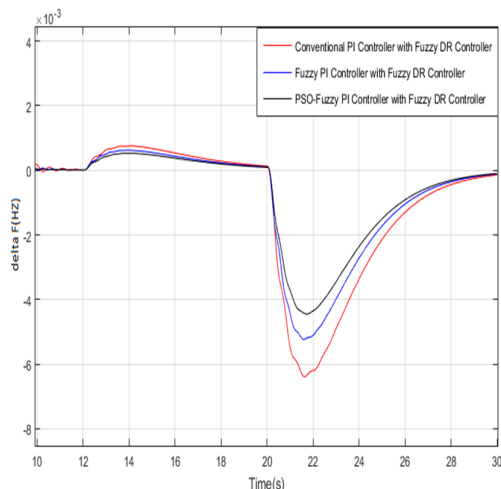
همان طور که از شکل (۷) قابل مشاهده است، هنگامی که کنترل پاسخ گویی بار مورد استفاده قرار می گیرد و ۹۰٪ کنترل سیستم توسط کنترل پاسخ گویی بار و ۱۰٪ توسط کنترل تکمیلی انجام می شود، سیستم پایدار شده و حتی میزان فراججهش و فروجهش پاسخ و زمان نشست نسبت به حالتی که ۱۰۰٪ کنترل توسط کنترل کننده تکمیلی PSO-Fuzzy انجام می شود، بهبود می یابد.



شکل (۹): تغییرات فرکانس با اعمال تغییر پارامترها، کنترل‌کننده تکمیلی PI با کنترل پاسخ‌گویی بار (کنترل‌کننده PI و Fuzzy-PI)

۳.۴ کنترل‌کننده پاسخ‌گویی بار هوشمند

در این مرحله، برای بهبود بیشتر پاسخ، کنترل تکمیلی نیز توسط منطق فازی و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات تنظیم شده و نتایج در شکل (۱۰) نشان داده شده است.



شکل (۱۰): تغییرات فرکانس با اعمال کنترل‌کننده تکمیلی Fuzzy-PI، Fuzzy-PI و PSO-Fuzzy PI با کنترل پاسخ‌گویی بار (کنترل‌کننده فازی)

همان‌طور که گفته شد، عملکرد کنترل‌کننده Fuzzy-PI به‌شدت وابسته به توابع عضویت است. بدون داشتن اطلاعات دقیق درباره سیستم، نمی‌توان به‌طور دقیق توابع عضویت را انتخاب کرد و کنترل‌کننده Fuzzy-PI طراحی شده، دارای عملکرد بهینه در بازه گسترده‌ای از شرایط عملیاتی نیست. از این‌رو، در این قسمت برای بهبود پاسخ از نظر زمان نشست و میزان فرجهش و

همان‌طور که مشاهده می‌شود، زمان نشست و میزان فرجهش و فروجهش پاسخ کمی بهبود می‌یابد و این موضوع به این دلیل است که کنترل تکمیلی تنها ۱۰٪ از کنترل سیستم را به عهده دارد و تأثیر چندانی در بهبود پاسخ سیستم ندارد.

۲.۴ بررسی میزان حساسیت و مقاومت سیستم در برابر

تغییرات پارامترهای سیستم

پیش‌تر بیان شد که به دلیل وابستگی شدید ضرایب کنترل‌کننده PI به پارامترهای سیستم، در اثر ایجاد تغییر یا اختلال در سیستم عملکرد مناسبی نخواهد داشت. در سیستم مورد مطالعه اگر کنترل‌کننده پاسخ‌گویی بار یک کنترل‌کننده PI معمولی در نظر گرفته شود، با تغییر پارامترهای سیستم مطابق جدول (۵)، به‌رغم وجود کنترل پاسخ‌گویی بار، فرکانس سیستم دچار نوسانات شدیدی می‌شود. بر این اساس از منطق فازی برای کاهش میزان وابستگی کنترل‌کننده PI به پارامترهای سیستم و در جهت کاهش نوسانات فرکانس در شرایط تغییر شدید پارامترها و همچنین بهبود بیش از پیش پاسخ، استفاده شده و به‌منظور مقایسه با حالت قبل، نتایج شبیه‌سازی در شکل (۹) نشان داده شده است.

جدول (۵): میزان تغییرات پارامترهای سیستم

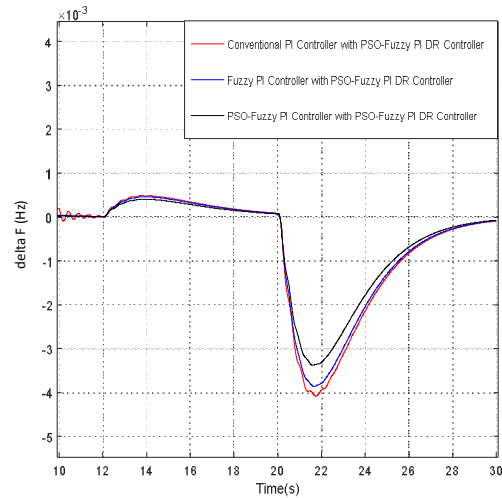
پارامتر	میزان تغییرات	پارامتر	میزان تغییرات
D(Pu/Hz)	-۵۵%	$T_g(s)$	+۵۰%
2H(Pu s)	+۶۰%	$T_t(s)$	-۵۰%
$T_{Fess}(s)$	+۶۵%	$T_{Bess}(s)$	+۵۵%
R(Hz/Pu)	-۶۰%		

همان‌طور که از شکل (۹) قابل مشاهده است، کنترل‌کننده پاسخ‌گویی بار فازی با وجود تغییرات شدید پارامترهای سیستم، عملکرد بسیار خوبی داشته و علاوه بر برطرف کردن نوسانات سیستم میزان فرجهش و فروجهش سیستم را نیز بهبود بخشیده است.

جدول (۶): مقادیر فراجهش و فروجهش پاسخ به‌ازای اعمال انواع مختلف کنترل‌کننده‌ها		
فروجهش (Hz)	فراجهش (Hz)	کنترل‌کننده
$-7/49 \times 10^{-3}$	$8/97 \times 10^{-4}$	کنترل‌کننده تکمیلی: PI معمولی کنترل‌کننده پاسخ‌گویی باز: PI معمولی
$-6/98 \times 10^{-3}$	$8/35 \times 10^{-4}$	کنترل‌کننده تکمیلی: PI فازی کنترل‌کننده پاسخ‌گویی باز: PI معمولی
$-6/65 \times 10^{-3}$	$7/95 \times 10^{-4}$	کنترل‌کننده تکمیلی: PIPSO-Fuzzy کنترل‌کننده پاسخ‌گویی باز: PI معمولی
$-6/38 \times 10^{-3}$	$7/58 \times 10^{-4}$	کنترل‌کننده تکمیلی: PI معمولی کنترل‌کننده پاسخ‌گویی باز: PI فازی
$-5/23 \times 10^{-3}$	$6/22 \times 10^{-4}$	کنترل‌کننده تکمیلی: PI فازی کنترل‌کننده پاسخ‌گویی باز: PI فازی
$-4/45 \times 10^{-3}$	$5/25 \times 10^{-4}$	کنترل‌کننده تکمیلی: PIPSO-Fuzzy کنترل‌کننده پاسخ‌گویی باز: PI فازی
$-4/1 \times 10^{-3}$	$4/87 \times 10^{-4}$	کنترل‌کننده تکمیلی: PI معمولی کنترل‌کننده پاسخ‌گویی باز: PSO-Fuzzy PI
$-3/9 \times 10^{-3}$	$4/6 \times 10^{-4}$	کنترل‌کننده تکمیلی: PI فازی کنترل‌کننده پاسخ‌گویی باز: PIPSO-Fuzzy
$-3/4 \times 10^{-3}$	$4/6 \times 10^{-4}$	کنترل‌کننده تکمیلی: PIPSO-Fuzzy کنترل‌کننده پاسخ‌گویی باز: PIPSO-Fuzzy

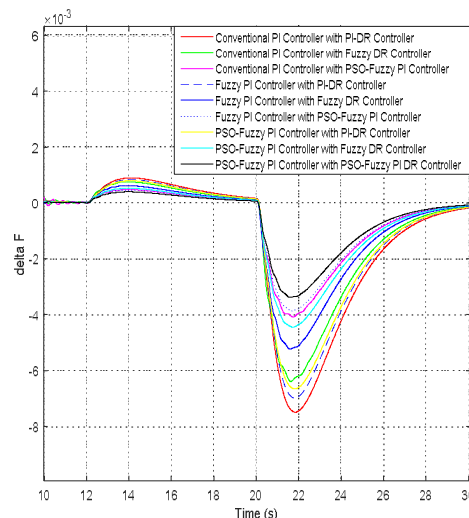
همان‌طور که مشاهده می‌شود، در شرایط تغییر ناگهانی بار و یا تولید، با به‌کارگیری کنترل‌کننده PSO-Fuzzy PI برای هر دو کنترل‌کننده، سیستم کنترل فرکانس پاسخ بهتری هم از نظر زمان نشست و هم میزان فراجهش و فروجهش پاسخ ارائه می‌کند. در جدول (۶) مشاهده می‌شود که در حالت اعمال کنترل‌کننده PSO-Fuzzy PI میزان فراجهش و فروجهش پاسخ کاهش یافته و در نتیجه در مقایسه با حالت اعمال کنترل‌کننده PI معمولی، مشخصات پاسخ گذرا بهبود یافته است.

فروجهش هم کنترل‌کننده تکمیلی و هم کنترل‌کننده پاسخ‌گویی بار توسط منطق فازی و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (برای تنظیم آنلاین توابع عضویت) تنظیم شده‌اند. نتایج شبیه‌سازی در این حالت در شکل (۱۱) نشان داده شده است.



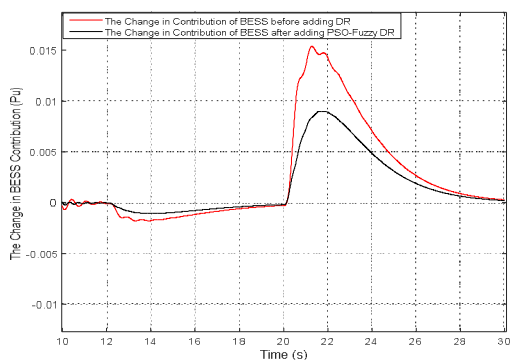
شکل (۱۱): تغییرات فرکانس با اعمال کنترل‌کننده تکمیلی PI-Fuzzy و PSO-Fuzzy PI با کنترل پاسخ‌گویی بار (کنترل‌کننده PSO-Fuzzy PI)

در نهایت، به‌منظور مقایسه انواع کنترل‌کننده‌ها برای کنترل‌کننده تکمیلی و کنترل پاسخ‌گویی بار، نحوه تغییرات فرکانس سیستم به‌ازای اعمال انواع مختلف کنترل‌کننده‌ها در شکل (۱۲) ارائه شده است. همچنین برای بررسی دقیق‌تر، مقادیر میزان فراجهش و فروجهش سیستم به‌ازای اعمال تمامی روش‌های کنترلی استفاده‌شده در این مقاله در جدول (۶) ارائه شده‌اند.

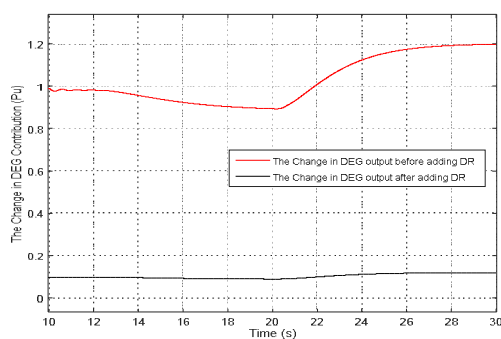


شکل (۱۲): تغییرات فرکانس به‌ازای اعمال انواع مختلف کنترل‌کننده‌ها

می‌یابد اما در زمانی که به دلیل کاهش توان تولیدی منابع بادی، توان مصرفی بارها بیشتر از مجموع توان تولیدی منابع می‌شود، توان خروجی دیزل ژنراتور حتی از مقدار نامی آن نیز فراتر رفته و این موضوع می‌تواند باعث آسیب رساندن به دیزل ژنراتور شود. با اضافه شدن پاسخ‌گویی بار به سیستم مشاهده می‌شود که در کل توان خروجی دیزل ژنراتور نسبت به حالت بدون پاسخ‌گویی بار کاهش می‌یابد و این امر باعث کاهش وابستگی به ذخایر چرخان و همچنین کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری دیزل ژنراتور می‌شود. با کاهش توان تولیدی دیزل ژنراتور بر اساس جدول (۷) مشاهده می‌شود که میزان مصرف سوخت دیزل ژنراتور نیز کاهش یافته و این موضوع باعث کاهش آلودگی زیست‌محیطی و کاهش هزینه‌های اقتصادی می‌گردد.



الف



ب

شکل (۱۳): تغییر در سهم باتری و دیزل ژنراتور قبل و بعد از حضور پاسخ‌گویی بار؛ الف. سهم باتری، ب. سهم دیزل ژنراتور

۴.۴. بررسی وابستگی سیستم به منابع ذخیره‌سازی در

حضور پاسخ‌گویی بار

ذخیره انرژی در سیستم قدرت و استفاده از آن در زمان دیگر با هدف بهبود عملکرد سیستم صورت می‌پذیرد. انرژی الکتریکی برخلاف سایر منابع انرژی، مانند انرژی موجود در انواع سوخت، به محض تولید باید استفاده شود. همچنین نوسانات و پیش‌بینی‌ناپذیر بودن توان تولیدی منابع تجدیدپذیر و همچنین اینرسی پایین ریزشبه‌ها، می‌توانند باعث شوند با کوچک‌ترین اغتشاش پایداری ریزشبه به خطر بیفتد. بنابراین برای غلبه بر این مسائل، حضور منابع ذخیره‌کننده انرژی مانند باتری‌ها و چرخ طیار ضروری خواهد بود. از کاربردهای کلیدی ذخیره‌سازها می‌توان به کنترل فرکانس، تنظیم پخش بار، مدیریت نوسانات و همچنین حفظ سطح ولتاژ سیستم اشاره کرد.

در این بخش، تأثیر پاسخ‌گویی بار در تغییر میزان سهم منابع ذخیره‌سازی و دیزل ژنراتور در برقراری تعادل بین بار و تولید و در نتیجه، تنظیم فرکانس مورد بررسی قرار گرفته و نتایج در شکل (۱۳) نشان داده شده‌اند.

در $t=12s$ به دلیل افزایش توان خروجی منبع خورشیدی، میزان توان تولیدی افزایش یافته و بنابراین باتری در حالت شارژ قرار می‌گیرد. حال زمانی که توان خروجی توربین بادی در $t=20s$ کاهش می‌یابد، باتری به منظور جبران عدم تطابق بار و تولید در وضعیت دشارژ قرار می‌گیرد. همان‌طور که در شکل (الف-۱۳) نشان داده شده است، پس از اضافه کردن پاسخ‌گویی بار به سیستم، از آنجایی که پاسخ‌گویی بار توانایی زیادی در ایجاد سریع تعادل بین بار و تولید را دارد، وابستگی به ظرفیت باتری کاهش می‌یابد و همچنین بر اساس عمق دشارژ باتری میزان دشارژ باتری کمتر از حد پیک آن خواهد بود؛ این امر باعث افزایش عمر باتری و کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری می‌شود که این موضوع می‌تواند در حل مسئله محدودیت موجود در ظرفیت ذخیره‌سازی کمک کند.

در شکل (ب-۱۳) مشاهده می‌شود که در زمان افزایش توان تولیدی منبع خورشیدی، توان خروجی دیزل ژنراتور کاهش

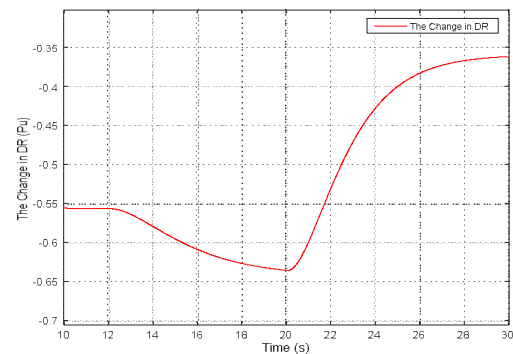
۵. نتیجه گیری

در این مقاله، کنترل فرکانس یک ریزشبکه AC جزیره‌ای با استفاده از کنترل هوشمند پاسخ‌گویی بار مورد بررسی قرار گرفت و در خصوص تأثیر انتخاب نوع کنترل‌کننده پاسخ‌گویی بار و کنترل‌کننده تکمیلی، روی پاسخ زمانی سیستم بحث شد. ملاحظه شد که با استفاده از پاسخ‌گویی بار می‌توان عملکرد پایدار ریزشبکه AC را به‌رغم وجود عدم قطعیت در توان تولیدی منابع انرژی بادی و خورشیدی، تضمین نموده و مشکلات مربوط به واحدهای ذخیره‌سازی انرژی و سهم مشارکت دیزل ژنراتور در کنترل فرکانس ریزشبکه AC را بهبود داد. در نهایت با استفاده از نتایج شبیه‌سازی نشان داده شد که در شرایط تغییر ناگهانی بار و یا تولید با استفاده از کنترل‌کننده PSO-Fuzzy PI برای هر دو کنترل‌کننده، سیستم کنترل فرکانس پاسخ بهتری هم از نظر زمان نشست و هم میزان فرجهش و فروجهش پاسخ ارائه می‌کند. در واقع با استفاده از کنترل پاسخ‌گویی بار و تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده مربوطه و کنترل‌کننده تکمیلی با استفاده از منطق فازی و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، با وجود تغییرات زیاد نقطه کار، سیستم پایدار بوده و زمان نشست و میزان فرجهش و فروجهش پاسخ به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. همچنین با اضافه شدن پاسخ‌گویی بار به سیستم مشاهده شد که توان خروجی دیزل ژنراتور و میزان شارژ و دشارژ باتری کاهش می‌یابد. این امر باعث کاهش آلودگی زیست‌محیطی، کاهش وابستگی به ذخایر چرخان و کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری دیزل ژنراتور می‌شود.

جدول (۷): میزان مصرف سوخت دیزل ژنراتور

توان تولیدی دیزل ژنراتور (kW)	۲۵٪ بار (Lit/hr)	۵۰٪ بار (Lit/hr)	۷۵٪ بار (Lit/hr)	۱۰۰٪ بار (Lit/hr)
۲۰	۲	۳	۵	۶
۳۰	۵	۷	۹	۱۱
۴۰	۶	۹	۱۲	۱۵
۶۰	۷	۱۱	۱۴	۱۸

در شکل (۱۴) تغییرات توان مربوط به عملکرد کنترل‌کننده پاسخ‌گویی بار نشان داده شده است. در شرایط تولید مازاد یعنی در زمان $t=12s$ ، بارهای کنترل‌پذیر که شامل سیستم‌های تهویه مطبوع، آبگرمکن‌های برقی و خودروهای هیبریدی می‌باشند و خاموش بوده‌اند روشن می‌شوند. همچنین در $t=20s$ که میزان تولید کاهش می‌یابد بارهای کنترل‌پذیر که روشن بوده‌اند، برای ایجاد تعادل بین تولید و مصرف پایداری فرکانس، خاموش می‌شوند.



شکل (۱۴): تغییرات توان مربوط به عملکرد کنترل‌کننده پاسخ‌گویی بار

مراجع

- [1] Chowdhury, S., Chowdhury, S. P. and Crossley, P., "Microgrids and Active Distribution Networks", The Institution of Engineering and Technology, London, UK, 2009.
- [2] Pourmousavi, S. A. and Nehrir, M. H., "Real-Time Central Demand Response for Primary Frequency Regulation in Microgrids", IEEE Trans. Smart Grid, Vol. 3, No. 4, pp. 1988-1996, 2012.
- [3] Saikia, L. C., Nanda, J. and Mishra, S., "Performance comparison of several classical controllers in AGC for multi-area interconnected thermal system", Int. J. Electr. Power & Energy Syst, Vol. 33, No. 3, pp. 394-401, 2011.
- [4] Singh Parmar, K. P., Majhi, S. and Kothari, D. P., "Automatic generation control of an interconnected hydrothermal power system", 2010 Annual IEEE India Conference (INDICON), Kolkata, India, 2010.
- [5] Hatziaegyriou, N., Asano, H., Iravani, R. and Marnay, C., "Microgrids: An Overview of Ongoing Research, Development, and Demonstration Projects", IEEE Power Energy Mag., Vol. 5, No. 4, pp. 78-94, 2007.
- [6] Bevrani, H., Habibi, F., Babahajyani, P., Watanabe, M. and Mitani, Y., "Intelligent Frequency Control in an AC

- شماره ۳۱، ص ۱۰-۱، پاییز ۱۳۹۱.
- [۱۳] شایقی، حسین و آریان‌پور، حمزه، «طراحی مقاوم کنترل‌کننده فازی PID بلادرنگ مبتنی بر الگوریتم بهبود یافته تکامل تفاضلی برای کنترل فرکانس ریزشبکه جزیره‌ای با در نظر گرفتن عوامل غیرخطی و عدم قطعیت‌ها»، مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۶، شماره ۳، ص ۲۴۱-۲۵۶، پاییز ۱۳۹۵.
- [14] Pourmousavi, S. A. and Nahrir, M. H., "Introducing Dynamic Demand Response in the LFC Model", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 29, No. 4, pp. 1562-1572, 2014.
- [15] Kundur, A. P., "Power system Stability and Control", McGraw-Hill, New York, USA, 1994.
- [16] Bevrani, H., Ghosh, A. and Ledwich, G., "Renewable energy sources and frequency regulation: Survey and new perspectives", IET Renew. Power Gener., Vol. 4, No. 5, pp. 438-457, 2010.
- [17] Zadeh, A., "Fuzzy sets", Information and Control, Vol. 8, No. 3, pp. 338-353, 1965.
- [18] Mendel, J. M. and Mouzouris, G. C., "Designing fuzzy logic systems", IEEE Trans. Circuits Syst. II, Analog Digit. Signal Process, Vol. 44, No. 11, pp. 885-895, Nov. 1997.
- [19] Kennedy, J. and Eberhart, R. C., "Particle swarm optimization", Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks, Perth, WA, Australia, 1995.
- microgrid: On line PSO based-fuzzy tuning approach*", IEEE Trans. Smart Grid, Vol. 3, No. 4, pp. 1935-1944, Dec. 2012.
- [7] Mohsenian-Rad, A. H. and Leon-Garcia, A., "Optimal residential load control with price prediction in real-time electricity pricing environments", IEEE Trans. Smart Grid, Vol. 1, No. 2, pp. 120-133, Sep. 2010.
- [8] Dos, D. C., "Demand response strategy for frequency control of a parabolic dish solar thermal diesel based microgrid", 2017 International Conference on Intelligent Sustainable Systems (ICISS), Palladam, India, 2017.
- [9] Al Yammahi, H. and Ai-Hinai, A., "Intelligent frequency control using optimal tuning and demand response in an AC microgrid", 2015 International Conference on Solar Energy and Building (ICSoEB), Sousse, Tunisia, 2015.
- [10] Bevrani, H., Feizi, M.R. and Ataee, S., "Robust Frequency Control in an Islanded Microgrid: H_∞ and μ -Synthesis Approaches", IEEE Trans. Smart Grid, Vol. 7, No. 2, pp. 706-717, Mar. 2016.
- [۱۱] جمشیدی، فاطمه، امامزاده‌ای، سیده لیلی و قنبریان، محمدمهدی، «کنترل فرکانس ریزشبکه جزیره‌ای با کنترلگر تناسبی-انتگرالی تنظیم شده با منطق فازی و الگوریتم ازدحام ذرات»، مجله علمی-پژوهشی رایانش نرم و فناوری اطلاعات، جلد ۶، شماره ۱، بهار ۱۳۹۶.
- [۱۲] حبیبی، فرشید، بیورانی، حسن و مشتاق، جمال، «کاربرد شبکه‌های عصبی مصنوعی در طراحی یک کنترل‌کننده هوشمند فرکانس برای یک ریزشبکه جزیره‌ای»، مهندسی برق و مهندسی کامپیوتر ایران، جلد ۱۰،