کنترل بار-فرکانس ریز شبکه مبتنی بر مدل غیر خطی به‌کمک روش PID مرتبه کسری بهینه شده با الگوریتم ترکیبی HCRPSO-PS

فرهاد امیری[۱] علیرضا حاتمی[۲]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه بوعلی‌سینا- همدان- ایران

f.amiri94@basu.ac.ir

۲- استادیار- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه بوعلی‌سینا - همدان- ایران

hatamisharif@basu.ac.ir

چکیده: کنترل بار-فرکانس یکی از موضوعات مهم در بهره‌برداری و کنترل ریز شبکه‌هایی است که به صورت مستقل از شبکه اصلی بهره‌برداری می‌شوند. مقاله حاضر یک روش کنترل تناسبی-انتگرالی مشتقی مرتبه کسری (FOPID) برای کنترل بار-فرکانس ریز شبکه ارائه می‌دهد که پارامترهای کنترل کننده با الگوریتم ترکیبی ازدحام ذرات مبتنی بر دیوانگی (CRPSO) و الگوریتم جستجوی الگو (PS) بهینه شده است. ترکیب الگوریتم (CRPSO) -که برای جستجوی کلی استفاده می‌شود- و الگوریتم PS -که برای جستجوی محلی استفاده می‌شود- سبب افزایش سرعت همگرایی شده است. در مدل‌سازی ریز شبکه از مدلی غیر خطی – با در نظر گرفتن اثر پدیده‌هایی مانند اشباع، باند راکد و محدودیت تغییر نرخ توان استفاده شده است. مدل‌سازی در محیط MATLAB/SIMULINK انجام شده است و شبیه‌سازی برای اغتشاش‌های مختلفی مانند تغییر بار به صورت پله، تغییر در توان تولیدی منابع ریز شبکه همراه با عدم قطعیت پارامترهای ریز شبکه صورت گرفته است. نتایج بیانگر برتری روش کنترل پیشنهادی نسبت به روشهایی همچون FOPID بهینه شده با الگوریتم PSO، PID بهینه شده با الگوریتم PSO، PID فازی بلارنگ بهینه شده با الگوریتم تکاملی تفاضلی بهبود یافته (IDE)، و PI فازی بهینه شده با الگوریتم PSO است. همچنین مطالعات صورت گرفته نشان می‌دهد تأثیر پدیده‌های غیر خطی قابل ملاحظه است و سبب طولانی‌تر شدن زمان فرانشست، افزایش فراجهش و فروجهش تغییرات فرکانس نسبت به حالت خطی می‌شود.

واژه های کلیدی: ریز شبکه، کنترل فرکانس-بار، مدل غیرخطی، کنترل‌کننده مرتبه کسری، الگوریتم ترکیبی ازدحام ذرات مبتنی بر دیوانگی ذرات-جستجوی الگو

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۷/۰۱/۰۸

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۷/۰۷/۱۵

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۷/۰۸/۲۶

نام نویسنده‌ی مسئول : علیرضا حاتمی

نشانی نویسنده‌ی مسئول : ایران – همدان- خیابان مهدیه – چهارباغ شهید مصطفی احمدی روشن، دانشگاه بوعلی سینا، دانشکده مهندسی، گروه برق

۱-مقدمه

نگرانی‌های زیست محیطی، هزینه بالای احداث نیروگاه‌های جدید و توسعه شبکه‌های انتقال و فوق توزیع، سبب توسعه روزافزون منابع تولید پراکنده و ریز شبکه‌ها (MGs)[1] در صنعت برق شده است [۲-۱]. ریز شبکه‌ها ، شبکه‌های قدرت کوچکی هستند که در سطح ولتاژ فشار ضعیف کار می‌کنند و شامل انواع منابع تولید انرژی تجدیدپذیر و معمولی (با توان پایین) و بارهای قابل کنترل و یا غیر قابل کنترل هستند [۴-۳]. ریز شبکه‌ها را در دو حالت می‌توان بهره‌برداری کرد: در حالت اتصال به شبکه از طریق یکی از باس‌های شبکه توزیع و در حالت جدا از شبکه اصلی [۴-۳].

مسائل و مشکلات مرتبط با کنترل و بهره‌برداری از ریز شبکه‌ها در حالت جدا از شبکه اصلی، سبب پیدایش موضوعات تحقیقاتی متعددی شده است [۷-۵]. در صورت تغییر بار یا توان تولیدی منابع در ریز شبکه، اغتشاش توان ایجاد شده سبب تغییر در فرکانس می‌شود. به کمک روش‌های کنترلی بار-فرکانس (LFC)[2]، می‌توان اغتشاشات فرکانس را از نظر دامنه و مدت زمان نوسان در ریز شبکه‌ها میرا کرد.

مراجع متعددی به بررسی و ارائه روش‌های مختلف برای کنترل بار-فرکانس در ریز شبکه‌ها پرداخته‌اند [۲۷-۸]. در [۹-۸] از کنترل کننده‌های مبتنی بر کنترل تناسبی- انتگرالی (PI)[3] و کنترل‌کننده تناسبی- انتگرالی- مشتقی (PID)[4] استفاده شده است. در [۱۰] از الگوریتم ازدحام ذرات (PSO)[5] و در [۱۱] از الگوریتم رفتار اجتماعی عنکبوت (SSO)[6] برای بهینه‌کردن پارامترهای کنترل‌کننده PID در ریز شبکه استفاده شده است. در [۱۲] از الگوریتم جستجوی هارمونی (HS)[7] برای کنترل بار- فرکانس در ریز شبکه استفاده شده است. در [۱۳] از کنترل‌کننده فازی استفاده شده است که ضرایب آن با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات بهینه شده است. در [۱۴،۱۵] از کنترل‌کننده پیش‌بین مدل (MPC)[8] برای کنترل بار- فرکانس ریز شبکه استفاده شده است. در [۱۶] از کنترل‌کننده فازی برای کنترل بار- فرکانس ریز شبکه دو ناحیه‌ای استفاده شده است. در [۱۷] کنترل پیش‌بین دو سطحی، در [۱۸] کنترل پیش‌بین چندگانه و در [۱۹] روشی مبتنی بر کنترل پیش‌بین جهت کنترل هماهنگ پره‌های توربین بادی و خودروهای هیبرید الکتریکی به‌منظور کاهش نوسانات توان و فرکانس ریز شبکه ارائه شده است. در [۲۳-۲۰] اثر خوردروهای الکتریکی در کنترل بار-فرکانس با روشهای مختلف بررسی شده است. در [۲۴] از روش PID مبتنی بر زیگلر-نیکولز (ZN-PID)[9]، در [۲۵] از روش مبتنی بر PID مرتبه کسری، (FOPID)[10]، در [۲۶] از روش مبتنی بر PID فازی مرتبه کسری (Fuzzy-FOPID)[11] و در [۲۷] از روش PID مرتبه کسری بهینه شده با مدل جایگزین مبتنی بر فرایند گوسی[12] استفاده شده است.

عوامل متعددی در مدل منابع ریز شبکه‌ها وجود دارد که در مدل سیگنال کوچک در کنترل بار-فرکانس باید مدنظر قرار گیرد. از جمله عوامل مذکور می‌توان به غیر خطی بودن توان تولیدی برخی منابع تولید پراکنده (مانند توربین بادی و سلول خورشیدی) بر حسب ورودی، محدودیت نرخ تغییر توان در منابع تولید انرژی و ذخیره‌سازها، محدودیت میزان ذخیره انرژی در منابع ذخیره‌ساز و نیز پدیده اشباع و باند راکد در برخی منابع تولید انرژی اشاره کرد. در [۲۸] مدل غیر خطی توربین آبی، در [۳۱-۲۹] مدل غیر خطی دیزل ژنراتور، در [۳۲،۳۳] مدل غیر خطی سیستم باتری، در [۲۳-۲۰] مدل غیر خطی خودروی هیبرید الکتریکی، در [۲۴] و [۳۴] مدل غیر خطی پیل سوختی و الکترولایزر، در [۳۵] مدل غیر خطی سیستم فتوولتاییک، و در [۳۸-۳۶] اثر تأخیر زمانی سیستمهای مخابراتی بر کنترل- بار فرکانس بررسی شده است.

همانطور که ملاحظه می‌شود، در کارهای صورت گرفته، یا از مدل خطی برای بررسی کنترل بار- فرکانس استفاده شده است یا برخی پدیده‌های غیر خطی درنظر گرفته شده است.

در مقاله حاضر، انواع پدیده‌های غیر خطی در مدل دینامیکی ریز شبکه شامل اشباع در مدل دیزل ژنراتور، محدودیت نرخ تغییر توان در منابع انرژی، تأخیر زمانی و باند راکد در منابع ذخیره‌ساز انرژی، باند راکد در گاورنر دیزل ژنراتور و محدودیت توان برای منابع تولید پراکنده درنظر گرفته شده است. برای کنترل فرکانس، کنترل کننده مرتبه کسری پیشنهاد شده است تا در مواجهه با فرایندهای PID غیرخطی و دارای باند راکد عملکرد مناسبی داشته باشد و همچنین نسبت به تغییر پارامترهای سیستم عملکرد مقاومی از خود نشان دهد. مرتبه کسری با روش ترکیبی الگوریتم PIDپارامترهای کنترل کننده و الگوریتم جستجوی الگو (CRPSO)[13]ازدحام ذرات مبتنی دیوانگی). الگوریتم HCRPSO-PS-FOPID([15] تعیین شده است (PS)[14] ترکیبی پیشنهادی برای جستجوی کلی از روش الگوریتم ازدحام ذرات مبتنی بر دیوانگی و برای جستجوی محلی از الگوریتم جستجوی الگو بهره می‌برد؛ در نتیجه سرعت همگرایی و کیفیت پاسخ‌های بدست آمده بهبود می‌یابد. شبیه‌سازی ریز شبکه در محیط برای اغتشاش‌های مختلف شامل: MATLAB/SIMULINK تغییرات پله‌ای بار و همچنین تغییر در سرعت باد و تابش خورشید با در نظر گرفتن و بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترهای ریز PIشبکه صورت گرفته است. مقایسه نتایج بدست آمده با کنترل‌کننده فازی (که ضرایب آن توسط الگوریتم ازدحام ذرات بهینه شده است (که ضرایب آن با استفاده از PID و FOPID[۱۳]) ، کنترل‌کنندهای (که PIDالگوریتم ازدحام ذرات بهینه شده است) [۲۵]، کنترل‌کننده ضرایب آن با استفاده از الگوریتم تفاضلی بهبود یافته بهینه شده است) نشان می‌دهد که کنترل‌کننده پیشنهادی عملکرد مطلوبتری در میراسازی نوسانات دارد. همچنین تأثیر پدیده‌های غیر خطی منابع انرژی تجدیدپذیر سبب طولانی‌تر شدن زمان فرانشست و افزایش فراجهش و فروجهش تغییرات فرکانس نسبت به حالت خطی می‌شود

مقاله حاضر در بخش‌های زیر تدوین شده است: در بخش دوم به مدل‌سازی ریز شبکه، در بخش سوم به طراحی کنترل‌کننده، در بخش چهارم به شبیه‌سازی و نتایج و در بخش پنجم به نتیجه‌گیری پرداخته شده است.

۲-مدل‌سازی ریز شبکه

ریز شبکه مورد مطالعه شامل منابع تولید پراکنده از جمله مولد فتوولتائیک، دیزل ژنراتور، توربین بادی، پیل سوختی، الکترولایزر و منابع ذخیره انرژی مانند باتری و چرخ طیار است. در ادامه مدل دینامیکی تجهیزات مذکور ارائه می‌شود.

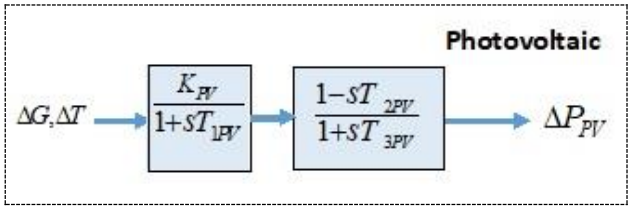
۲-۱- مولد فتوولتائیک (PV)[16]

توان مولد فتوولتائیک (P_{PV}) وابسته به شدت تابش خورشید (G) و دمای محیط (T) است. با تغییر شدت تابش خورشید (ΔG) و تغییر دما (ΔT) توان مولد فتوولتائیک تغییر می‌کند. روابط (۱) و (۲) توان مولد فتوولتائیک و تغییرات آن را نشان می‌دهند [۲۵]. در روابط مذکور، η_{PV}: بازده حداکثر مولد، و S: مساحت سلول خورشیدی است. در مطالعات انجام شده، $S = 4084\ \mathrm{m}^2$ G=1000w/m^2، $\eta_{PV} = 10\%$ و $T = 25\ ^\circ\mathrm{C}$ در نظر گرفته شده است.

$$P_{PV} = \eta_{PV} SG[1-0.005(T+25)] \quad (۱)$$

$$\Delta P_{PV} = \eta_{PV} S\left([1-0.005(T+25)]\Delta G + 0.005 G \Delta T\right) \quad (۲)$$

شکل (۱) مدل دینامیکی یک مولد فتوولتائیک را نشان می‌دهد که شامل عملکرد دینامیکی سلول خورشیدی، فیلتر و اینورتر است. پارامترهای مدل شامل K_{PV} ضریب بهره و $T_{1PV}, T_{2PV}, T_{3PV}$: ثابت زمانی‌های مختلف همگی مقادیری غیر منفی هستند [۳۴].



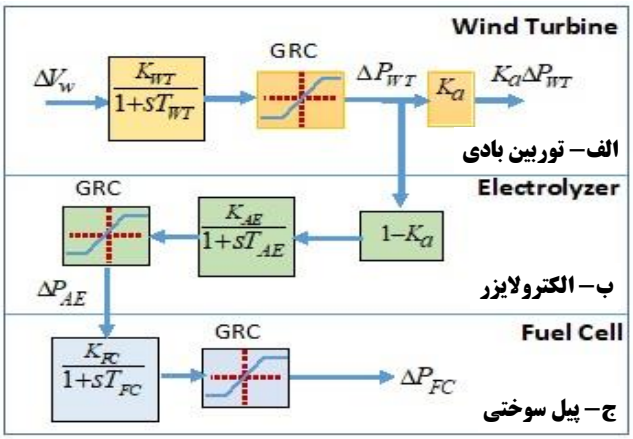
شکل (۱): مدل دینامیکی مولد فتوولتائیک (شامل سلول خورشیدی، فیلتر، و اینورتر)

۲-۲-توربین بادی (WT)[17]

توان گرفته شده از توربین بادی (P_{WT}) از رابطه (۳) محاسبه می‌شود [۲۴].

$$P_{WT} = \frac{1}{2} C_P(\beta,\lambda).\rho A V_W^3 \quad (۳)$$

در رابطه فوق، ρ: چگالی هوا، A: سطح جاروب شده توسط پره روتور، V_W: سرعت باد، و $C_P(\beta,\lambda)$: ضریب عملکرد توربین است که به شرایط محیطی و نحوه ساخت توربین بستگی دارد. مدل دینامیکی توربین بادی در شکل (۲-الف) نشان داده شده است. همانطور که در شکل (۲-الف) ملاحظه می‌شود تابع تبدیل عملکرد دینامیکی توربین بادی درجه یک است که در آن K_{WT} و T_{WT} به‌ترتیب بهره و ثابت زمانی توربین بادی است. با توجه به اینکه هر توربین برای نرخ مشخصی از تغییرات سرعت باد طراحی شده است و همچنین تغییرات ضریب عملکرد توربین روی منحنی‌های مشخصی صورت می‌گیرد؛ بلوک GRC در شکل (۲-الف)، محدودیت نرخ افزایش/کاهش نرخ توان توربین بادی را مدل می‌کند. در مطالعات انجام شده، $\left|\Delta \dot{P}_{WT}\right| \le 0.15\, pu/\sec$ در نظر گرفته شده است [۳۵]. همچنین در شکل (۲-ب) مدل دینامیکی الکترولایزر و در شکل (۲-ج) مدل دینامیکی پیل سوختی نشان داده شده است.



شکل (۲): مدل دینامیکی توربین بادی، الکترولایزر، و پیل سوختی

۲-۳-الکترولایزر (AE)[18] و پیل سوختی (FC)[19]

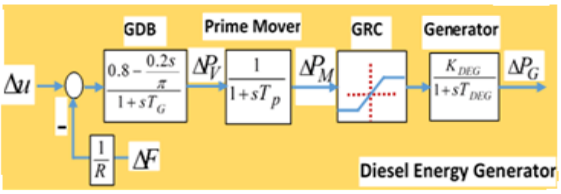
بخشی از توان تولید شده توربین بادی ($(1-K_a)\Delta P_{WT}$) به الکترولایزر داده می‌شود تا هیدروژن مورد نیاز برای پیل سوختی را فراهم کند. شکل (۳) مدل دینامیکی الکترولایزر را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود مدل دینامیکی مذکور شامل تابع تبدیل درجه یک و یک بلوک GRC است. پارامترهای K_{AE} و T_{AE} به‌ترتیب بهره و ثابت زمانی الکترولایزر است. همچنین بلوک GRC محدودیت نرخ تغییرات توان الکترولایزر را مدل می‌کند [۳۱].

پیل سوختی از هیدروژن تولیدی توسط الکترولایزر، انرژی الکتریکی تولید میکند. مدل دینامکی پیل سوختی در شکل (۴) نشان داده شده است؛ مدل مذکور مشتمل بر یک تابع تبدیل درجه یک و یک بلوک GRC است. پارامترهای K_{FC} و T_{FC} به‌ترتیب بهره و ثابت زمانی پیل سوختی است و بلوک GRC نیز محدودیت نرخ تغییرات

توان پیل سوختی را مدل می‌کند. حداکثر مقدار نرخ تغییر توان پیل سوختی برابر $\Delta \dot{P}_{FC} = 0.15 \text{pu/sec}$ در نظر گرفته شده است [۲۴]. در مطالعات انجام شده، $|\Delta \dot{P}_{AE}| \le 0.1 \text{ pu/sec}$ و $|\Delta \dot{P}_{FC}| \le 0.10 \text{ pu/sec}$ در نظر گرفته شده است.

۲-۴-دیزل ژنراتور[20] (DEG)

در ریز شبکه‌ها که به‌صورت جدا از شبکه اصلی بهره‌برداری می‌شوند، دیزل ژنراتور نقش عمده‌ای در برقراری تعادل توان در ریز شبکه برعهده دارد. شکل (۳) مدل دینامیکی دیزل ژنراتور را نشان می‌دهد [۲۹]. همانطور که ملاحظه می‌شود با اعمال سیگنال کنترلی $\Delta u - \frac{\Delta F}{R}$ به دیزل ژنراتور، هنگام کاهش فرکانس/ افزایش فرکانس، دیزل ژنراتور توان تولیدی خود را افزایش/ کاهش می‌دهد. در شکل (۳)، Δu سیگنال خروجی کنترل کننده، ΔF تغییرات فرکانس ریز شبکه و R ضریب افتی گاورنر است.



شکل (۳): مدل دینامیکی دیزل ژنراتور

عملکرد بلوک‌های مختلف شکل (۳) به شرح زیر است.

الف- بلوک GDB: بیانگر عملکرد گاورنر با باند راکد بوده که تا محدوده مشخصی از تغییر فرکانس عمل نمی‌کند؛ اثر غیر خطی پس‌زنی باند راکد، تمایل به ایجاد نوسان‌های ماندگار سینوسی با دوره تناوب دو ثانیه است [۱۱]. در تابع تبدیل گاورنر، T_G ثابت زمانی گاورنر است و سیگنال خروجی آن ΔP_V است که سبب تغییر توان ورودی به محرک اولیه می‌شود.

ب- بلوک Prime Mover: بیانگر عملکرد دینامیکی محرک اولیه است. در این بلوک، T_P ثابت زمانی محرک اولیه است و سیگنال خروجی آن ΔP_M است که بیانگر تغییرات توان مکانیکی است. حداکثر تغییرات نرخ افزایش و یا کاهش توان در محرک اولیه، مقداری مشخص و محدود است؛ برای این منظور در شکل (۳) سیگنال خروجی بلوک محرک اولیه به GRC اعمال شده است. در شبیه‌سازی‌های صورت گرفته، حداکثر مقدار $|\Delta \dot{P}_M| \le 0.15 \text{ pu/sec}$ در نظر گرفته شده است.

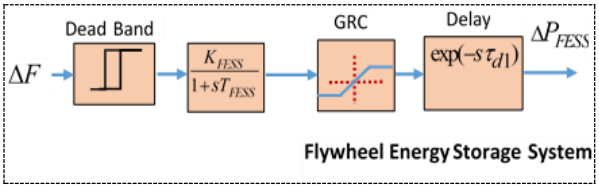
ج- بلوک Generator: بیانگر عملکرد دینامیکی ژنرانور سنکرون متصل به محرک اولیه است که با تابع تبدیل درجه یک مدل شده است.

در این بلوک، پارامترهای K_{DEG} و T_{DEG} به ترتیب ثابت زمانی و بهره ژنراتور است.

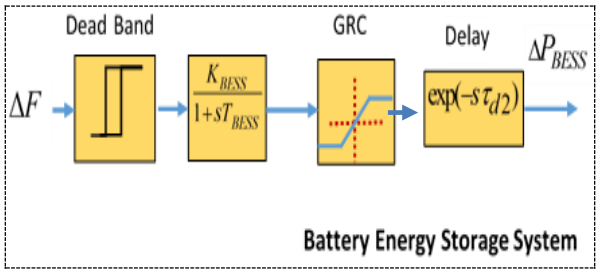
۲-۵-چرخ طیار[21] (FESS) و باتری[22] (BESS)

در چرخ طیار انرژی الکتریکی به صورت انرژی جنبشی و در باتری به صورت شیمیایی ذخیره می‌شود. شکل‌های (۴) و (۵) به‌ترتیب عملکرد دینامیکی چرخ طیار و باتری را نشان می‌دهند. بلوک باند راکد (Dead Band) سبب عدم مشارکت چرخ طیار و باتری در پاسخ به تغییرات فرکانس‌های کمتر از مقدار مشخصی می‌شود؛ در نتیجه باعث جلوگیری فرسودگی زودرس آنها می‌شود. شکل (۶) نحوه عملکرد باند راکد را در تغییرات مختلف فرکانس نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود مقادیر آستانه تغییرات فرکانس برای عملکرد چرخ طیار و باتری و همچنین مقادیر بالا و پایین مربوطه می‌تواند متفاوت باشد [۳۲].

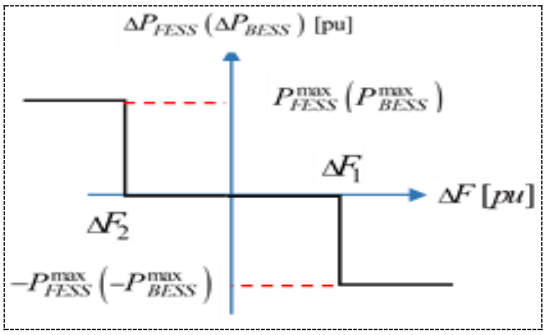
در شکل (۴)، پارامترهای K_{FESS} و T_{FESS} به‌ترتیب بهره وثابت زمانی چرخ طیار و در شکل (۵)، K_{BESS} و T_{BESS} به‌ترتیب بهره و ثابت زمانی باتری را نشان می‌دهند. بلوک GRC در شکل (۴) و (۵) محدودیتهای عملی نرخ افزایش/کاهش توان در چرخ طیار و نیز نرخ شارژ/دشارژ باتری را مدل می‌کند. بلوک Delay، تاخیر زمانی عملکرد چرخ طیار در شکل (۴) و باتری در شکل (۵) را در پاسخ به تغییرات فرکانس را مدل می‌کند. در شبیه‌سازی‌های صورت گرفته، مقدار $|\Delta \dot{P}_{FESS}| \le 0.9 \text{ pu/sec}$ و $|\Delta \dot{P}_{BESS}| \le 0.20 \text{ pu/sec}$ و $\Delta F_1 = -\Delta F_2 = 0.01 \text{ pu}$ و $\tau_{d1} = \tau_{d2} = 20 \text{ msec}$ در نظر گرفته شده‌اند.



شکل (۴): مدل دینامیکی چرخ طیار



شکل (۵): مدل دینامیکی باتری



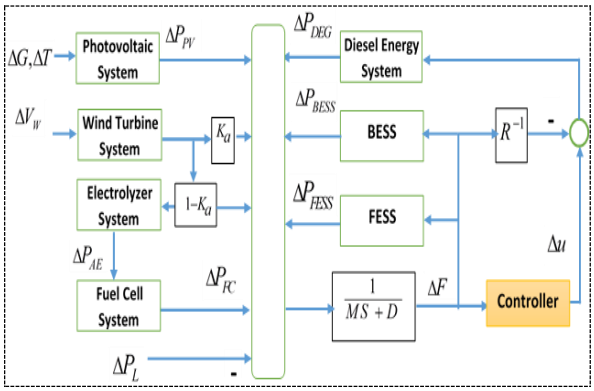
شکل (۶): نحوه عملکرد باند راکد در حالت ماندگار

۲-۶-انحراف فرکانس وتوان در ریز شبکه

برای بهره‌برداری از ریز شبکه در حالت مانا، لازم است تعادل توان در ریز شبکه در حالت‌های مختلف حفظ شود. رابطه (۴) تعادل توان در ریز شبکه را نشان می‌دهد که در آن ΔP_L تغییرات مقدار بار و ΔP تغییرات خالص توان در ریز شبکه است.

$$\Delta P = K_a \Delta P_{WTG} + \Delta P_{PV} + \Delta P_{DEG} + \Delta P_{FC} + \Delta P_{FESS} + \Delta P_{BESS} - \Delta P_L \qquad (۴)$$

با بهم خوردن تعادل توان در ریز شبکه، انحراف فرکانس ایجاد می‌شود. دینامیک ریز شبکه در پاسخ به تغییرات توان، تابع تبدیل درجه یک است که در شکل (۷) نشان داده شده است. در شکل مذکور، پارامتر D ثابت میرایی و M ثابت اینرسی است [۲۳].



شکل (۷): نمای کلی ریز شبکه

۳-طراحی کنترل کننده

۳-۱- معرفی کنترل کننده PID مرتبه کسری (FOPID)

رابطه (۵) تابع تبدیل کنترل‌کننده PID مرتبه کسری را نشان می‌دهد که شامل بهره تناسبی (K_P) و بهره انتگرال‌گیر (K_I) و بهره مشتق‌گیر (K_D) است و انتگرال‌گیر از مرتبه λ و مشتق‌گیر از مرتبه μ است [۴۰].

$$\begin{cases} G_c(s) = K_P + \dfrac{K_I}{S^{\lambda}} + K_D S^{\mu} \\ 0 \le \lambda, \mu \le 1 \end{cases} \qquad (۵)$$

همانطور که ملاحظه می‌شود کنترل کننده‌های مرتبه کسری $PI^{\lambda}D^{\mu}$ به‌سبب انتخاب مقادیر (λ, μ)، دارای دو درجه آزادی بیشتر نسبت به کنترل کننده PID معمولی است. این ویژگی سبب شده است که کنترل کننده‌های PID مرتبه کسری نسبت به PID معمولی حساسیت کمتری نسبت به تغییر پارامترهای سیستم کنترل داشته باشد و در مواجهه با پدیده‌های غیر خطی عملکرد بهتری ارائه دهد [۴۰].

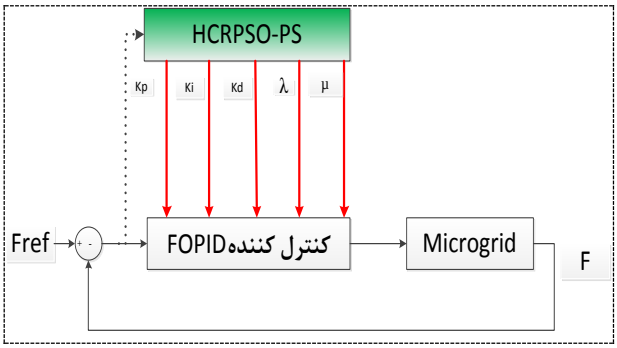
۳-۲- تنظیم پارامترهای کنترل کننده FOPID با الگوریتم ترکیبی HCRPSO-PS

همانطور که در شکل (۷) ملاحظه می‌شود؛ ورودی کنترل کننده بار-فرکانس، تغییرات فرکانس ΔF و خروجی آن سیگنال کنترلی Δu است که با اعمال آن به دیزل ژنراتور، تغییرات فرکانس از نظر دامنه و مدت زمان میرا می‌شود. پارامترهای کنترل کننده FOPID طوری تعیین می‌شود تا خطای حالت ماندگار، زمان نشست و حداکثر فراجهش تغییرات فرکانس حداقل شود. برای این منظور، تابع هدف رابطه (۶) در نظر گرفته شده است که عملکرد مناسبی در کاهش فراجهش و فرو جهش و زمان نشست از خود نشان می دهد [۴۱].

$$\begin{cases} \min J = \int_0^T t^2 (\Delta f)^2 dt \\ K_i^{\min} \le K_i \le K_i^{\max} \\ K_P^{\min} \le K_P \le K_P^{\max} \\ K_d^{\min} \le K_d \le K_d^{\max} \\ 0 \le \lambda, \mu \le 1 \end{cases} \qquad (۶)$$

در رابطه (۶)، J تابع هدف، Δf انحراف فرکانس، $K^{\min}$ حداقل مقدار مجاز بهره، $K^{\max}$ حداکثر مجاز بهره و T مدت زمان شبیه‌سازی است.

روش‌های مختلفی برای تعیین پارامترهای کنترل کننده وجود دارد. در مقاله حاضر برای تعیین پارامترهای کنترل کننده از الگوریتم ترکیبی ازدحام ذرات مبتنی بر دیوانگی (CRPSO) (برای جستجوی کلی) و الگوریتم جستجوی الگو (PS) (برای جستجوی محلی) استفاده شده است. شکل (۸) طرح کلی کنترل کننده و نحوه تعیین پارامترهای آن با الگوریتم ترکیبی HCRPSO-PS را نشان می‌دهد. در ادامه الگوریتم ترکیبی مورد استفاده شرح داده می‌شود.



شکل (۸): نمای کلی کنترل کننده بار-فرکانس ریز شبکه

۳-۲-۱-الگوریتم بهینه‌سازی CRPSO و الگوریتم جستجوی الگو

الگوریتم بهینه‌سازی CRPSO

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، روشی مبتنی بر جستجوی تصادفی است که از حرکت دسته جمعی پرندگان الهام گرفته شده است. هر ذره به عنوان یک پاسخ ممکن در فضای جستجوی چند بعدی می‌تواند حرکت کند. برای هر ذره i، $x_i(nc)$، بهترین موقعیت خود $P_i^{best}(nc)$ و همچنین بهترین موقعیت ذرات گروه $g^{best}(nc)$ تا تکرار nc مشخص است و هر ذره موقعیت خود را در هر تکرار بر اساس دو پارامتر مذکور تنظیم می‌کند. موقعیت ذره $x_i(nc)$ بر اساس موقعیت قبلی و سرعت در تکرار فعلی $V_i(nc)$ از رابطه (۷) تعیین می‌شود[۴۲].

$$x_i(nc) = x_i(nc-1) + V_i(nc) \qquad (۷)$$

در الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات کلاسیک، هر یک از ذرات در فضای جستجو در جهت مشخصی حرکت می‌کنند؛ در حالی‌که در الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات مبتنی بر دیوانگی برای بهبود پاسخ، با افزودن جملاتی به $V_i(nc)$ جهت حرکت ذرات با احتمال مشخصی به‌صورت ناگهانی تغییر می‌کند (رابطه (۸)) و در نتیجه جستجو در فضای گسترده‌تر و متنوع‌تری برای یافتن پاسخ بهینه صورت می‌گیرد. در الگوریتم مذکور، سرعت ذرات از روابط (۸) الی (۱۲) بدست می‌آیند[۴۲].

$$\begin{aligned} V_i(nc) = {} & r_2 \cdot sign(r_3) \cdot V_i(nc-1) + c_1 \cdot r_1 \cdot \left(P_i^{best}(nc-1) - x_i(nc-1)\right) \\ & \cdot (1-r_2) + (1-r_2) \cdot c_2 \times (1-r_1) \cdot \left(g_{best}(nc-1) - x_i(nc-1)\right) \end{aligned} \qquad (۸)$$

$$sign(r_3) = \begin{cases} -1 & r_3 \le 0.05 \\ 1 & r_3 \succ 0.05 \end{cases} \qquad (۹)$$

$$V_i(nc) = V_i(nc) + P_r(r_4) \cdot sign(r_4) \cdot v_i^{craz} \qquad (۱۰)$$

$$P_r(r_4) = \begin{cases} 1 & r_4 \le P_r \\ 0 & r_4 > P_r \end{cases} \qquad (۱۱)$$

$$sign(r_4) = \begin{cases} 1 & r_4 \le 0.5 \\ -1 & r_4 \succ 0.5 \end{cases} \qquad (۱۲)$$

در روابط فوق، c_1, c_2: ضرایب یادگیری، $r_1, r_2, r_3, r_4, v_i^{craz}$: اعداد تصادفی مستقل که از بازه [۰ ۱] انتخاب می‌شوند، و p_r: احتمال دیوانگی ذرات است. الگوریتم برای $nc = 1,2,...,Nc$ تکرار می‌شود[۴۲].

الگوریتم جستجوی الگو

الگوریتم جستجوی الگو، دارای مفهوم ساده‌ای است و به سادگی برای مسائل بهینه‌سازی مختلف قابل اعمال است؛ از نظر محاسباتی الگوریتمی کاراست و دارای عملکرد تکاملی مناسبی برای یافتن پاسخ‌های محلی است. عملیات جستجو، از نقطه $x(0)$ شروع می‌شود که به عنوان نقطه شروع، توسط الگوریتم CRPSO تولید شده است. در اولین تکرار، اندازه مش $\Delta(0) = 1$ انتخاب می‌شود. در تکرار np، $np = 1,2,...,Np$، تعدای نقطه حول $x(np)$ -که نقاط مش نامیده می‌شوند- مطابق رابطه زیر ایجاد می‌شود[۴۳].

$$M(np) = \{m_i(np) \in R^n \,|\, m_i(np) = x(np) + \Delta(np) \cdot d_i,\ i = 1,2,...,r\} \qquad (۱۳)$$

در رابطه فوق d_i بردار یکه در راستاهای مختلف در فضای R^n و n تعداد ابعاد پاسخ مسئله است. برای مثال، در مسائل دو بعدی نقاط مش $x(np)+[0\ -1], x(np)+[-1\ 0], x(np)+[0\ 1], x(np)+[1\ 0]$ تشکیل می‌شود. نقاط بدست آمده توسط تابع هدف ارزیابی می‌شوند؛ در صورتیکه یکی از نقاط مش سبب بهبود پاسخ شود $J(m_i(np)) \prec J(x(np)),\ \text{for } i = i^*$، نقطه مذکور به عنوان نقطه شروع تکرار بعدی انتخاب می‌شود. برای تکرارهای بعدی اندازه مش از رابطه زیر بدست می‌آید[۴۳].

$$\Delta(l+1) = \begin{cases} \theta_1 \times \Delta(l) & \text{if } J(m_i) \le J(x(l)),\ m_i \in M(l) \\ \theta_2 \times \Delta(l) & \text{otherwise} \end{cases} \qquad (۱۴)$$

در رابطه فوق، $\theta_1 \succ 1$ فاکتور انبساط و $\theta_2 \prec 1$ فاکتور انقباض است. فرایند محاسبات، هنگامی‌که تعداد تکرارها به مقدار حداکثر خود برسد $(np = Np)$، متوقف می شود. در واقع با اجرای الگوریتم جستجوی الگو، توالی از پاسخهای $\{x(0), x(1), ..., x(Np)\}$ تولید می‌شود؛ به‌طوریکه تابع هدف روی نقاط مذکور اکیدا نزولی است $J(x(np)) \le J(x(np-1))$[۴۳].

۳-۲-۲-اجرای الگوریتم ترکیبی HCRPSO-PS

مراحل اجرای الگوریتم ترکیبی به شرح زیر است. لازم بذکر است پارامترهای الگوریتم –که در ادامه داده شده است- با روش سعی و خطا و با توجه به اجرای متعدد الگوریتم در حالت‌های مختلف تعیین شده‌اند.

۱- اجرای الگوریتم CRPSO

۱-۱- مقدار دهی اولیه: انتخاب جمعیت ذرات: (۱۰۰ عدد)، ماکزیمم تعداد تکرار (۴۰)، c_1=۱/۹۵ ، c_2=۲/۰۵ ، P_r=۰/۳ .

۱-۲- تولید جمعیت اولیه ذرات به‌صورت تصادفی با توجه به $\{K_p,K_d,K_i\}\in[0\ \ 10],\ \{\lambda,\mu\}\in[0\ \ 1]$، هر ذره شامل پنج متغیر $\{K_p,K_d,K_i,\lambda,\mu\}$ است.

۱-۳- ارزیابی تابع هدف برای هر ذره، محاسبه $(P^{best}(nc))$ برای هر ذره و $(g^{best}(nc))$ برای گروه ذرات.

۱-۴- محاسبه سرعت ذرات و تعیین موقعیت جدید آنها با توجه به روابط (۸) تا (۱۲).

۱-۵- انجام مراحل ۱-۳ و ۱-۴ تا اینکه تعداد تکرارها به مقدرا ماکزیمم برسد.

۱-۶ – تعیین ذره بهینه

۲- اجرای الگوریتم PS

۲-۱- شروع الگوریتم با ذره تعیین شده در مرحله ۱-۶

۲-۱- مقدار دهی اولیه: ماکزیمم تعداد تکرار (۱۰)، $\theta_1=2$، $\theta_2=0.5$.

۲-۲- ایجاد نقاط مش با توجه به رابطه (۱۳)

۲-۳- ارزیابی تابع هدف در نقاط مش تولید شده در مرحله

۲-۴- جایگزینی نقطه موجود با یکی از نقاط مش و یا عدم تغییر نقطه موجود با توجه به مراحل ۲-۲ و ۲-۳ و تعیین اندازه مش.

۲-۵- انجام مراحل ۲-۲ الی ۲-۴ تا رسیدن تعداد تکرارها به مقدرا ماکزیمم.

۲-۶ – تعیین پاسخ بهینه.

در شکل (۹) فلوچارت الگوریتم ترکیبیHCRPSO-PS برای حل مسئله نشان داده شده است.

شکل (۱۰) روند همگرایی الگوریتم ترکیبی را –در یکی از سناریوهای مطالعه شده- نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود در ۵۰ تکرار همگرایی حاصل شده است.

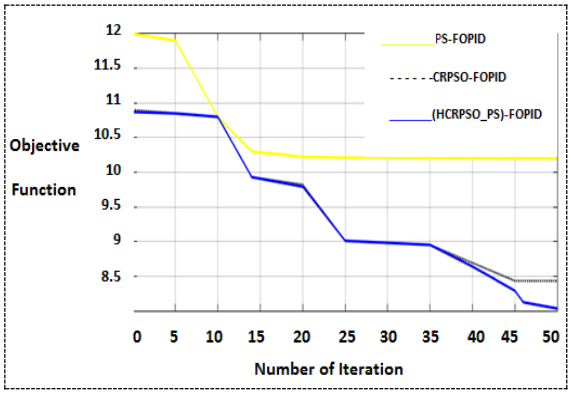
۴-شبیه‌سازی و نتایج

۴-۱-معرفی ریز شبکه

شکل (۸) نمای کلی ریز شبکه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. پارامترهای ریز شبکه در جدول (۱) نشان داده شده است. برخی پارامترهای مذکور از [۱۳]، [۳۴] و [۴۴-۴۵] اخذ شده‌اند. شبیه‌سازی ریز شبکه در محیط MATLAB/SIMULINK صورت گرفته است. برای بررسی روش پیشنهادی، شبیه‌سازی ریز شبکه در حالت‌های مختلفی انجام شده است.

جدول (۱): اطلاعات و پارامترهای ریز شبکه مورد مطالعه

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
K_{PV}	۱/۸	T_{AE} (s)	۰/۵	K_{FESS}	-۰/۱
T_{1PV} (s)	۱	K_{FC}	۰/۰۱	T_{FESS} (s)	۰/۱
T_{2PV} (s)	۵	T_{FC} (s)	۴	K_{BESS}	-۰/۰۰۳
T_{3PV} (s)	۱۰۰	R (Hz/pu)	۳	T_{BESS} (s)	۰/۱
K_{WT}	۱	T_G (s)	۰/۳	D (Hz/pu)	۰/۰۳
T_{WT} (s)	۱/۵	T_P (s)	۰/۳	M (pu sec)	۰/۴
Ka	۰/۶	K_{DEG}	۰/۰۰۳		
K_{AE}	۰/۰۰۲	T_{DEG} (s)	۲		

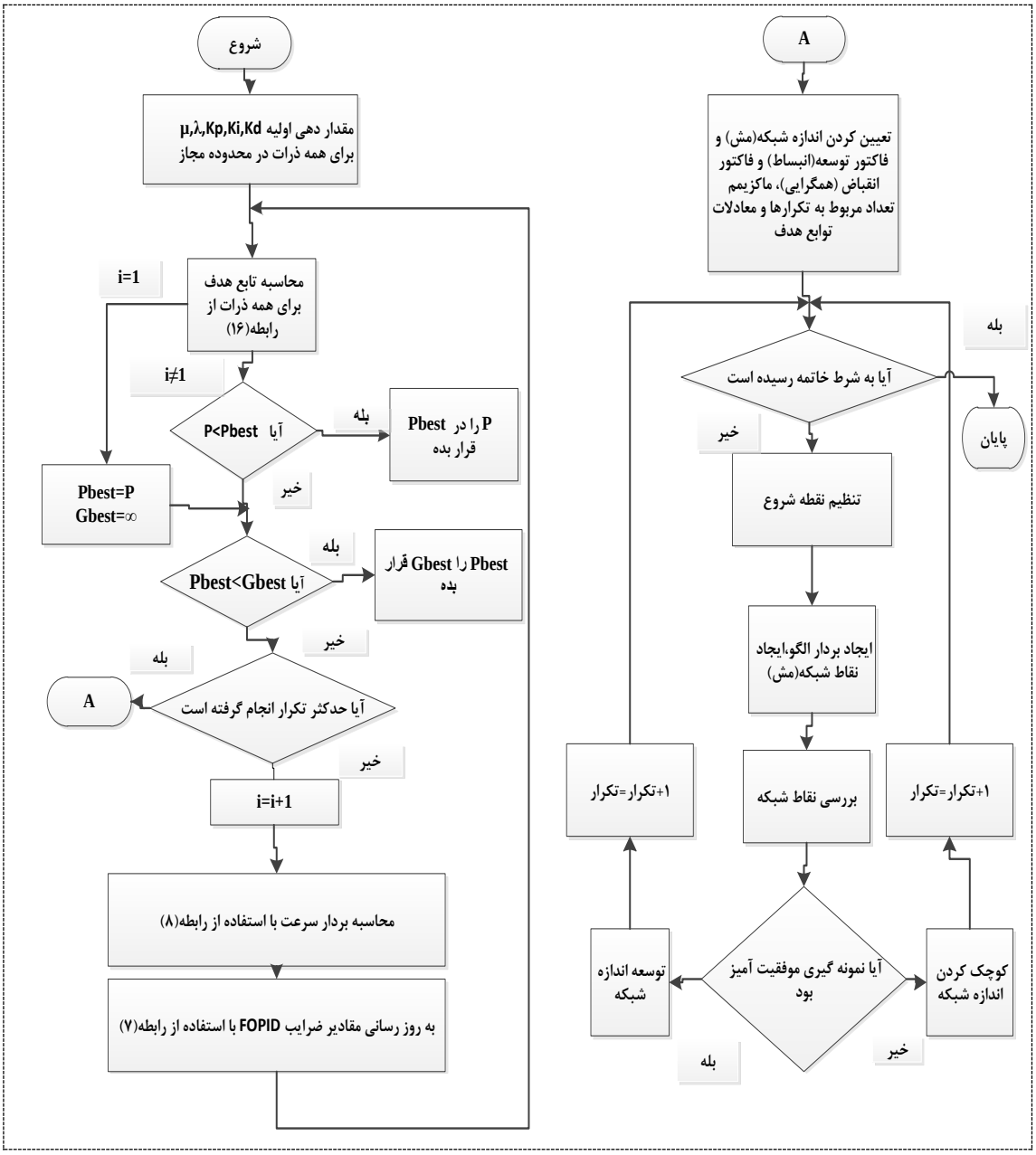


شکل (۱۰): روند همگرایی الگوریتم‌های مختلف برای حل مسئله

سناریو ۱-ب: در این سناریو اغتشاش شماره یک به ریز شبکه اعمال شده است و عملکرد کنترل کننده پیشنهادی HCRPSO-PS-FOPID با در نظر گرفتن مدل غیرخطی ریز شبکه، کنترل کننده پیشنهادی HCRPSO-PS-FOPID با در نظر گرفتن مدل خطی ریز شبکه (با صرفنظر از همه عوامل غیر خطی موجود در مدل ریز شبکه) با و کنترل کننده PSO-Fuzzy-PI [۱۳] با در نظر گرفتن مدل خطی ریز شبکه بررسی شده است. نتایج عملکرد کنترل کننده‌ها در شکل (۱۴) رسم شده است.

سناریو ۱-الف: شکل (۱۳) به مقایسه عملکرد کنترل کننده HCRPSO-PS-FOPID، کنترل کننده HCRPSO –FOPID و کنترل بلادرنگ فازی PID بهینه شده با الگوریتم بهبود یافته تکامل تفاضلی (IDE-OFPID) [۴۵] در پاسخ به اغتشاش شماره ۱ می‌پردازد. در این شبیه‌سازی، ریز شبکه با مدل دینامیکی غیر خطی لحاظ شده است. از آنجا که هدف، مقایسه بین عملکرد کنترل کننده‌های مختلف است، از برخی پدیده‌های غیر خطی که در [۴۶] نظر گرفته نشده‌اند، صرفنظر شده است.

در این سناریو، افزایش بار پله‌ای مطابق شکل (۱۱) (اغتشاش شماره ۱) و شکل (۱۲) (اغتشاش شماره ۲) به ریز شبکه اعمال می‌شود. تغییرات فرکانس ریز شبکه به اغتشاش‌های شماره ۱ و ۲ به ترتیب در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) و (۱۵) برای حالت‌های مختلفی به شرح زیر رسم شده است.

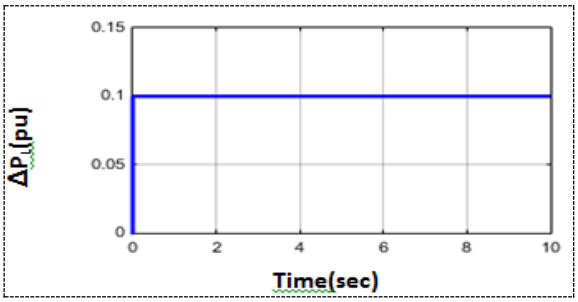


شکل (۹): فلوچارت الگوریتم ترکیبیHCRPSO-PS

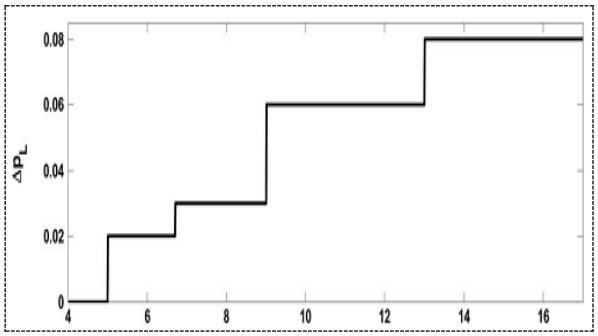
۴-۲- سناریو ۱

سناریو ۱-ج: همانند سناریو ۱-ب است جز اینکه اغتشاش شماره ۲ به ریز شبکه اعمال شده است. نتایج عملکرد کنترل کننده‌ها در شکل (۱۵) در پاسخ به اغتشاش شماره ۲ رسم شده است.

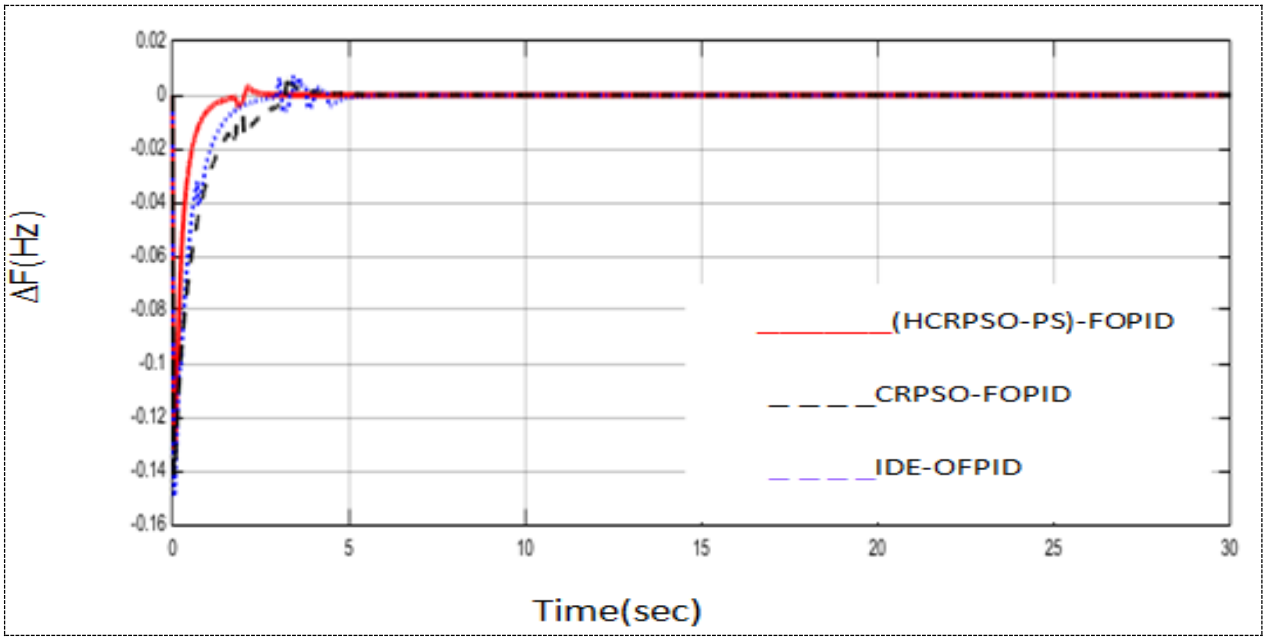
با مقایسه عملکرد کنترل کننده‌ها ملاحظه می‌شود درهر سه سناریو کنترل کننده پیشنهادی HCRPSO-PS-FOPID عملکرد بهتری در مواجه با اغتشاش شماره ۱ و ۲ در هر دو مدل خطی و غیر خطی ریز شبکه در مقایسه به کنترل کننده‌های PSO-Fuzzy-PI و IDE-OFPID از خود نشان می‌دهد. به‌علاوه ۱) پدیده‌های غیر خطی اثر قابل ملاحظه‌ای در تغییرات فرکانس برجای می‌گذارند و سبب افزایش قابل ملاحظه فروجهش و زمان نشست نسبت به حالت خطی می‌شوند؛



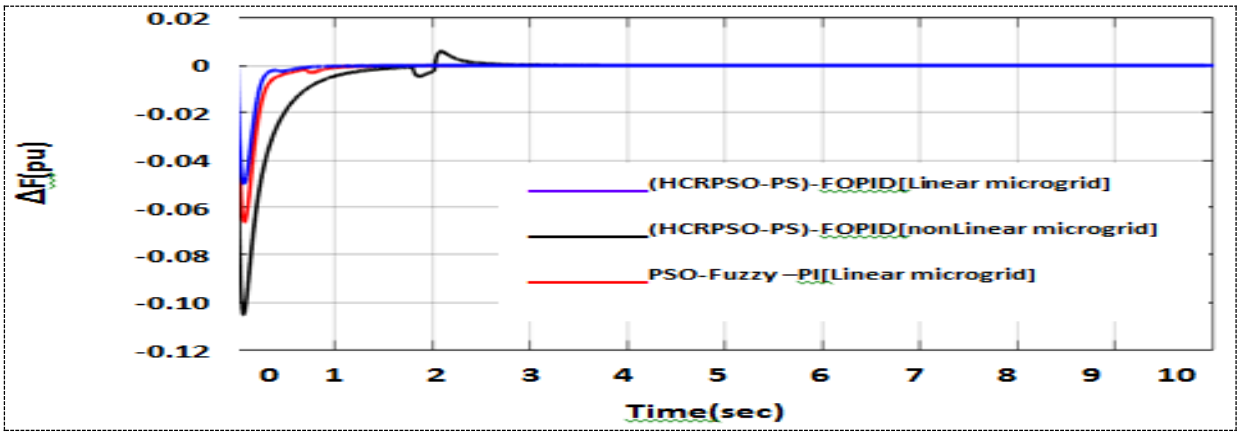
شکل (۱۱): تغییرات بار ریز شبکه (اغتشاش شماره ۱)



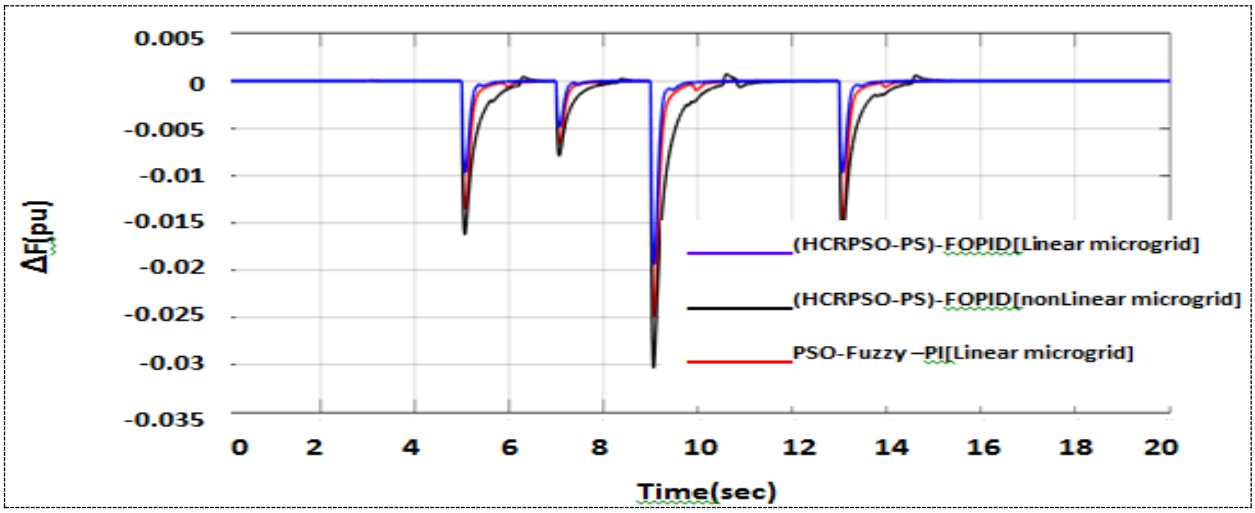
شکل (۱۲): تغییرات بار ریز شبکه (اغتشاش شماره ۲)



شکل (۱۳): تغییرات فرکانس ریز شبکه به اغتشاش ۱ در سناریو ۱-الف



شکل (۱۴): تغییرات فرکانس ریز شبکه به اغتشاش ۱ در سناریو ۱ در مدل غیرخطی و خطی



شکل (۱۵): تغییرات فرکانس ریز شبکه به اغتشاش ۲ در سناریو ۱

۴-۳- سناریو ۲

مطالعات انجام شده در این سناریو در چند زیربخش انجام شده است.

سناریو ۲-الف: اغتشاشات وارد شده به ریز شبکه بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترهای ریز شبکه

در این بخش همزمان اغتشاشاتی شامل الف- اغتشاش شماره ۱، ب- اغتشاش ناشی از تغییر توان توربین بادی (اغتشاش شماره ۳) که در شکل (۱۶) نشان داده شده است[۲۵]؛ و ج- اغتشاش ناشی از تغییر توان مولد سلول خورشیدی (اغتشاش شماره ۴) که در شکل (۱۷) نشان داده شده است، به ریز شبکه اعمال می‌شود [۲۵]. برای اینکه بتوان عملکرد روش کنترلی پیشنهادی را نسبت به دیگر روش‌ها مقایسه کرد، از مدل خطی ریز شبکه استفاده شده است. شکل (۱۸) تغییرات فرکانس ریز شبکه را به اغتشاشات وارده در سه حالت نشان می‌دهد؛ حالت الف- کنترل کننده پیشنهادی FOPID-HCRPSO-PS؛ ب- کنترل کننده FOPID-PSO [۲۵]، ج- کنترل کننده PID-PSO [۲۵]. همانطور که در شکل (۱۸) ملاحظه می‌شود، کنترل کننده پیشنهادی نسبت به دیگر کنترل کننده عملکرد مطلوبتری (از نظر حداکثر فراجهش و فروجهش) ارائه می‌دهد.

سناریو ۲-ب: اغتشاشات وارد شده به ریز شبکه با در نظر گرفتن عدم قطعیت (ثابت اینرسی M به میزان ۵۰ ٪ افزایش)

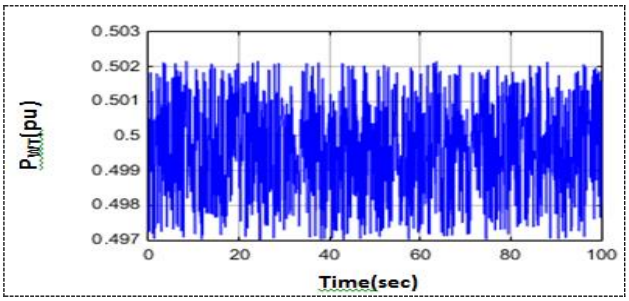
هدف از این بخش بررسی عملکرد کنترل کننده پیشنهادی در برابر عدم قطعیت پارامترها و مقایسه آن با دیگر کنترل کننده‌ها است. شرایط این بخش همانند سناریو ۲-الف است اما پارامتر M (ثابت اینرسی) می‌تواند تا ۵۰ ٪ افزایش یابد. شکل (۱۹) تغییرات فرکانس ریز شبکه را به اغتشاشات وارده برای سه کنترل کننده ذکر شده در سناریو ۲-الف نشان می‌دهد؛ همانطور که در شکل (۱۹) نیز ملاحظه می‌شود، کنترل کننده پیشنهادی نسبت به دیگر کنترل کننده عملکرد مطلوبتری ارائه می‌دهد.

سناریو ۲-ج: اغتشاشات وارد شده به ریز شبکه با در نظر گرفتن عدم قطعیت (ثابت اینرسی M به میزان ۵۰ ٪ کاهش)

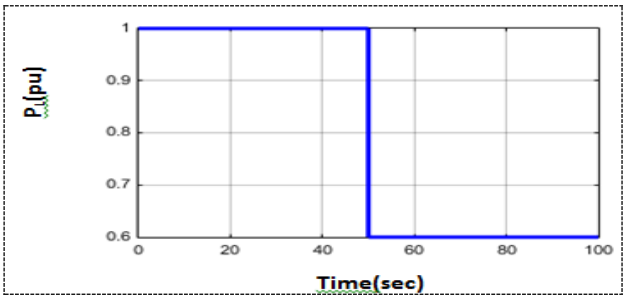
شرایط ریز شبکه در این بخش همانند سناریو ۲-ب است جز اینکه پارامتر M دارای عدم قطعیت است و می‌تواند تا ۵۰٪ کاهش یابد نتایج عملکرد کنترل کننده‌ها در شکل (۲۰) رسم شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، در این سناریو نیز کنترل کننده پیشنهادی نسبت به دیگر کنترل کننده عملکرد مطلوبتری ارائه می‌دهد.

سناریو ۲-د: اغتشاشات وارد شده به ریز شبکه با در نظر گرفتن عدم قطعیت (میزان ۵۰ ٪ افزایش تمام پارامترهای ریز شبکه)

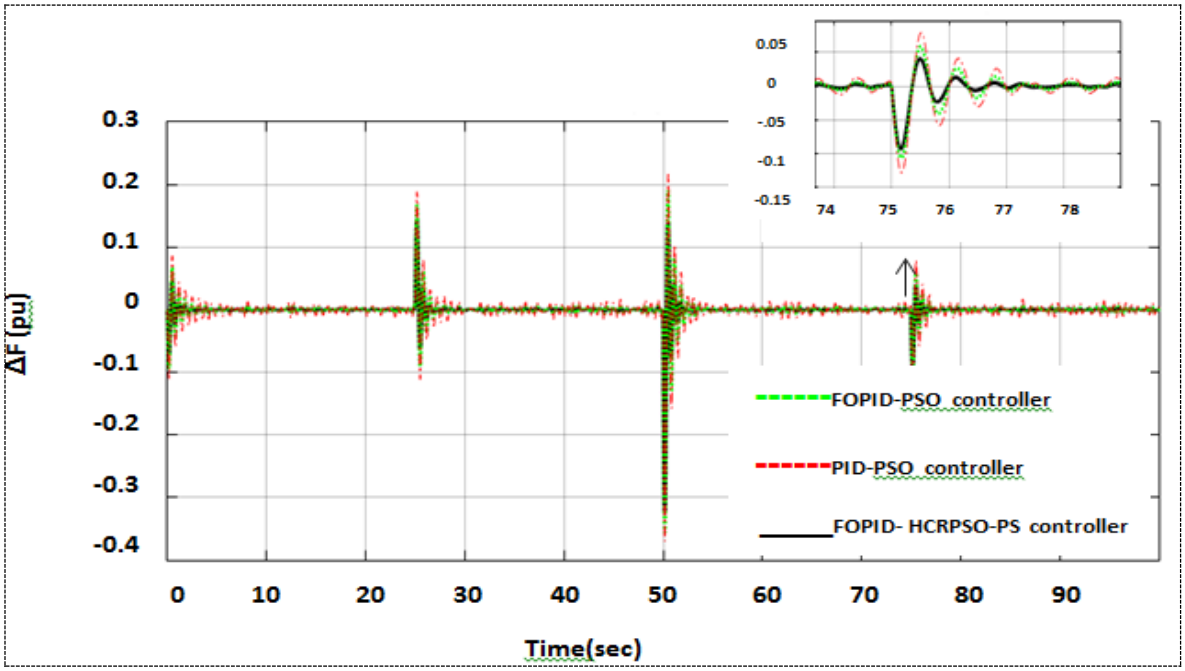
شرایط ریز شبکه در این بخش همانند سناریو ۲-ب است جز اینکه در این بخش فرض می‌شود همه پارامترهای ریز شبکه دارای عدم قطعیت هستند و می‌توانند تا ۵۰ ٪ افزایش یابند.. شکل (۲۱) تغییرات فرکانس ریز شبکه را به اغتشاشات وارده در سه حالت نشان می‌دهد؛ حالت الف- کنترل کننده پیشنهادی FOPID-HCRPSO-PS؛ ب- کنترل کننده FOPID-PSO [۲۵]، ج- کنترل کننده PID-PSO [۲۵]. همانطور که ملاحظه می‌شود، در این حالت نیز، کنترل کننده پیشنهادی نسبت به دیگر کنترل کننده عملکرد مطلوبتری ارائه می‌دهد.



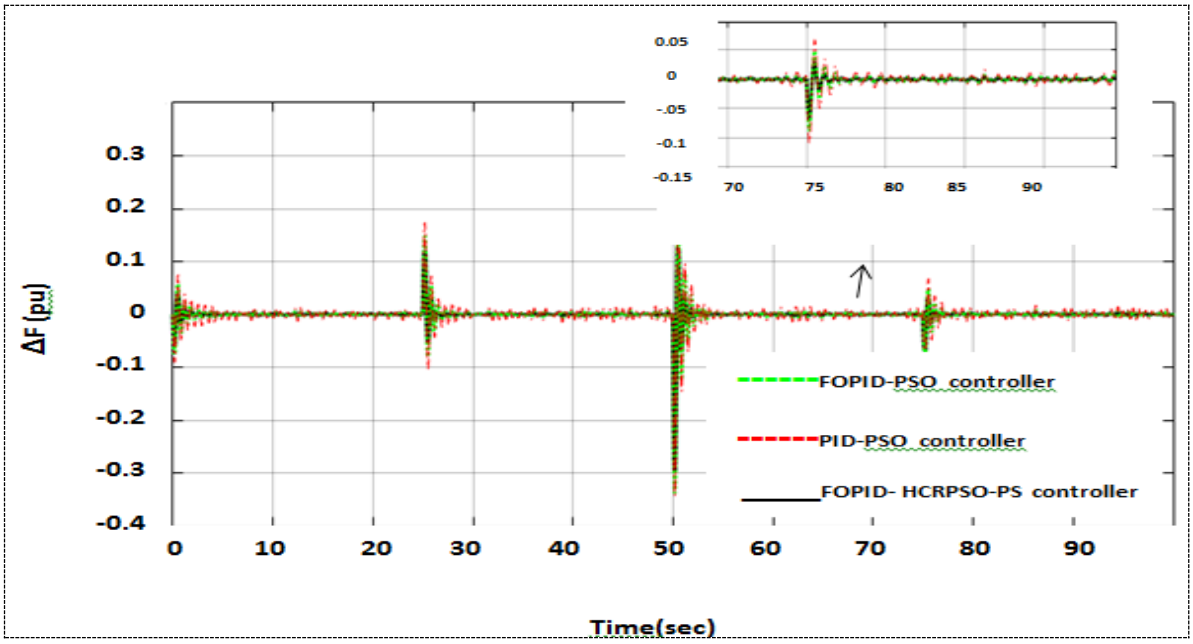
شکل (۱۶): تغیر توان توربین بادی (اغتشاش شماره ۳)



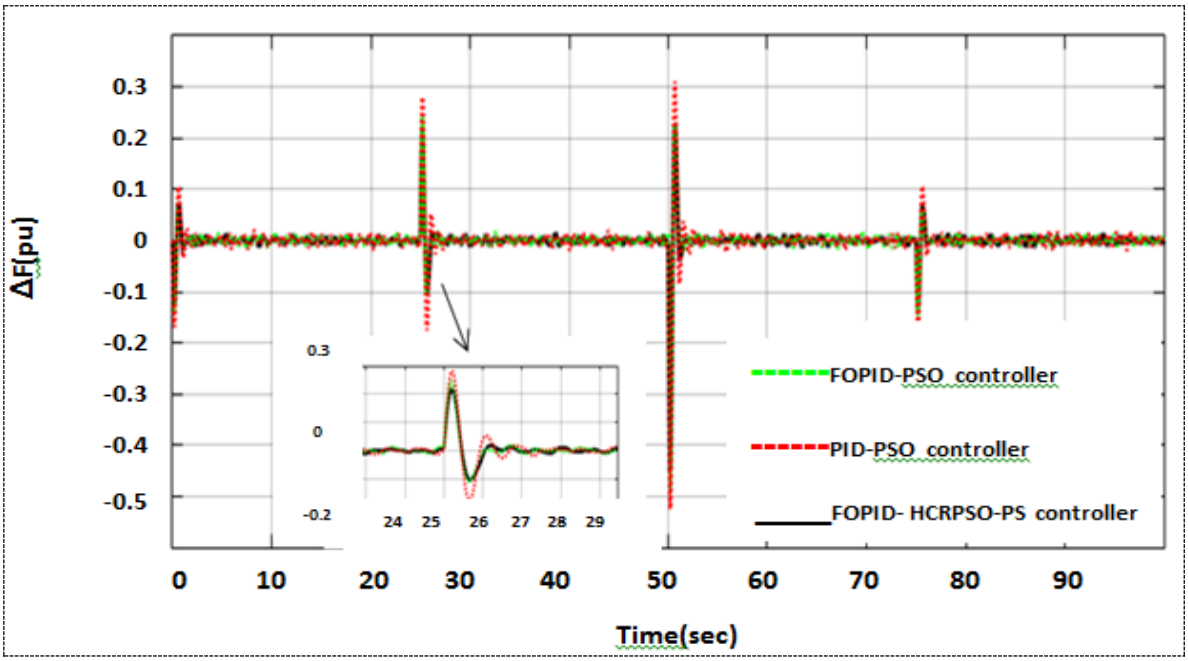
شکل (۱۷): تغییر توان مولد سلول خورشیدی (اغتشاش شماره ۴)



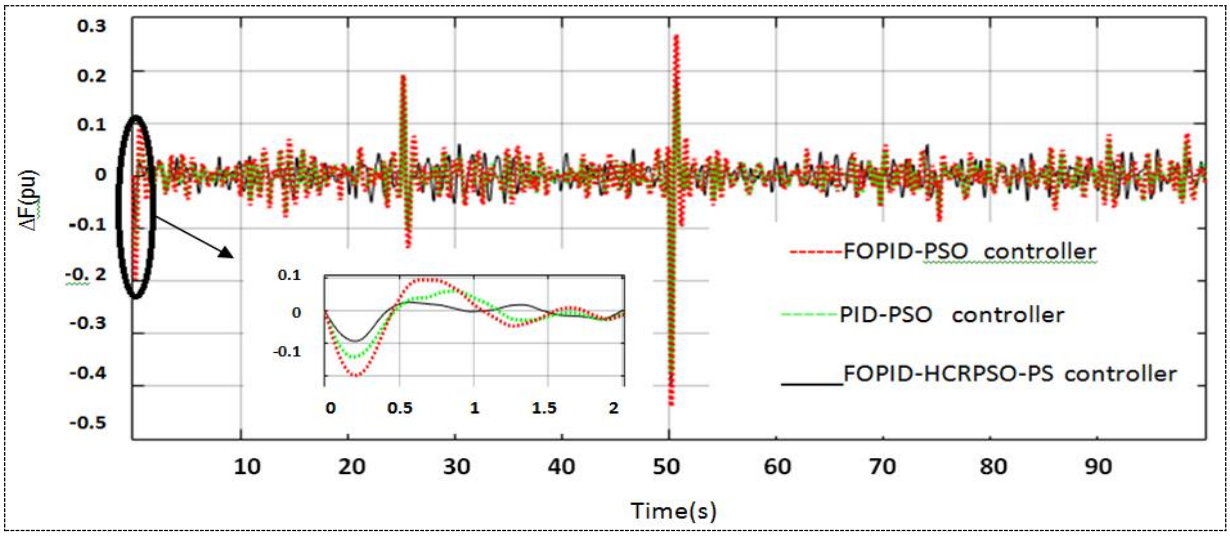
شکل (۱۸): تغییرات فرکانس ریز شبکه در سناریو ۲-الف



شکل (۱۹): تغییرات فرکانس ریز شبکه در سناریو ۲-ب



شکل (۲۰): تغییرات فرکانس ریز شبکه در سناربو ۲-ج



شکل (۲۱): تغییرات فرکانس ریز شبکه در سناریو ۲-د

۵-نتیجه گیری

در این مقاله کنترل بار- فرکانس توسط کنترل کننده PID مرتبه کسری (FOPID) برای یک ریز شبکه مبتنی بر مدل غیر خطی پیشنهاد شده است که پارامترهای آن با استفاده از الگوریتم ترکیبی ازدحام ذرات مبتنی بر دیوانگی (CRPSO) و نیز الگوریتم جستجوی الگو (PS) تعیین شده است. مدل غیر خطی با درنظر گرفتن عواملی همچون اشباع، تأخیر زمانی، باندهای راکد عملکردی و محدودیت نرخ تغییرات توان بدست آمده است. الگوریتم ترکیبی پیشنهادی از بهینه‌سازی مبتنی بر دیوانگی برای جستجوی کلی و از الگوریتم جستجوی الگو برای جستجوی محلی بهره برده است. شبیه‌سازی و مطالعات عددی در سناریوهای مختلفی از قبیل تغییر بار سیستم و اغتشاش‌های توان تولیدی منابع انرژی تجدیدپذیر با در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترهای ریز شبکه در محیط MATLAB/SIMULINK صورت گرفته است. نتایج بیانگر برتری روش کنترلی پیشنهادی نسبت بر روش‌های کنترلی FOPID-PSO، PID-PSO، IDE-OFPID، و PI-PSO fuzzy است. همچنین مطالعات صورت گرفته بیانگر تأثیر قابل ملاحظه پدیده‌های غیر خطی مدل دینامیکی ریز شبکه بر تغییرات فرکانس است.

مراجع

[1] Fazli, M., & Hejazi, M. A., "Novel Hierarchical Control of VSI-based Microgrids Against Large-Signal Disturbances", Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, Vol. 15, No. 4, pp. 103-113, 2019.

[2] Batmani, Y., & Najafi, S., "Integrated Primary Controller Design in AC Microgrids Using Optimal Tracking Control Technique", Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, Vol. 16, No. 1, pp. 65-76, 2019.

[3] Menhaj, M. B., & Karrari, M., "A Smart Fuzzy Controller for Microgrid Frequency Improvement Using PSO Algorithm Considernig Nonlinear Conditions", Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, Vol. 15, No. 3, pp. 71-81, 2018.

[4] Khodadoost Arani, A. A., B Gharehpetian, G., & Zaker, B., "Modeling and Simulation of Flywheel Energy Storage System as V/f Reference in Islanded Microgrid", Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, Vol. 13, No. 3, pp. 11-18, 2016.

[5] Hatziargyriou N., Asano H., Iravani R., "Microgrids Marnay C. ", IEEE Power Energy Mag., Vol. 5, no.4, pp. 78–94, 2007.

[6] Bevrani H., and Hiyama T., Intelligent Automatic Generation Control, New York: CRC, Apr. 2011.

[7] Gil, N.J. and Lopes, J.P., "Hierarchical Frequency Control Scheme for Islanded Multi-Microgrids Operation", IEEE Power Tech, Lausanne, pp. 473-478, 2007.

[8] Katiraei, F., Iravani, M.R. and Lehn, P.W., "Small-Signal Dynamic Model of a Micro-Grid Including Conventional and Electronically Interfaced Distributed Resources" IET generation, transmission & distribution, Vol. 1, No. 3, pp.369-378, 2007.

[9] Ray, P.K., Mohanty, S.R. and Kishor, N., "Proportional–Integral Controller Based Small-Signal Analysis of Hybrid Distributed Generation Systems", Energy Conversion and Management, Vol. 52, No. 4, pp.1943-1954, 2011.

[10] Pandey, S.K., Mohanty, S.R., Kishor, N. and Catalão, J.P., "Frequency Regulation in Hybrid Power Systems Using Particle Swarm Optimization and Linear Matrix Inequalities Based Robust Controller Design", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 63, pp. 887–900, 2014.

[11] El-Fergany, A.A. and El-Hameed, M.A., "Efficient Frequency Controllers For Autonomous Two-Area Hybrid Microgrid System Using Social-Spider Optimiser", IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 11, No. 3, pp. 637-648, 2017.

[12] Shankar, G. and Mukherjee, V., "Load Frequency Control of an Autonomous Hybrid Power System by Quasi-Oppositional Harmony Search Algorithm", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 78, pp. 715–734, 2016.

[13] Amiri, F., & Afshar, S. "Load Frequency Control Via Adaptive Fuzzy PID Controller In An Isolated Microgrid", 2017 International Power System Conference (PSC). PP. 1-7, 2017.

[14] Parisio, A., Rikos, E., Tzamalis, G. and Glielmo, L., "Use Of Model Predictive Control for Experimental Microgrid Optimization", Applied Energy. Vol. 115, pp. 37-46, 2014.

[15] Verma, A.K., Gooi, H.B., Ukil, A., Tummuru, N.R. and Kollimalla, S.K., "Microgrid Frequency Stabilization Using Model Predictive Controller", 2016 IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exposition-Latin America (PES T&D-LA), Morelia, pp. 1-6, 2016.

[16] Shayeghi, H., Shayanfar, H.A. and Esmaeili, M., "NSGAII-Based Fuzzy PID Controller for Load Frequency Control of Multi-Microgrids", International Conf. on Advances on Applied Cognitive Computing, Los Vegas, Nevada, 2017, pp-64-69.

[17] Cominesi, S.R., Farina, M., Giulioni, L., Picasso, B. and Scattolini, R., "A Two-Layer Stochastic Model Predictive Control Scheme For Microgrids", IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol 26, No. 1, pp.1-13, 2018.

[18] Pahasa, J. and Ngamroo, I., "PHEVs Bidirectional Charging/Discharging And Soc Control For Microgrid Frequency Stabilization Using Multiple MPC", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 6, No. 2, pp. 526-533, March 2015.

[19] Pahasa, J. and Ngamroo, I., "Coordinated Control of Wind Turbine Blade Pitch Angle and PHEVs Using MPCs for Load Frequency Control of Microgrid", IEEE Systems Journal, vol. 10, no. 1, pp. 97-105, March 2016

[20] Khooban, M. H., Niknam, T., Blaabjerg, F., Davari, P., and Dragicevic, T., "A New Load Frequency Control Strategy for Micro-Grids with Considering Electrical Vehicles", Electric Power Systems Research, Vol. 143, pp.585-598, 2017.

[21] Khooban, M. H., Niknam, T., Blaabjerg, F., Davari, P., and Dragicevic, T., "A Robust Adaptive Load Frequency Control for Micro-Grids", ISA transactions, Vol. 65, pp. 220-229, 2016.

[22] Khooban, M.H., "Secondary Load Frequency Control of Time-Delay Stand-Alone Microgrids with Electric Vehicles", to be appeared in IEEE Transactions on Industrial Electronics, DOI: 10.1109/TIE.2017.2784385.

[23] Khooban, M. H., Niknam, T., Blaabjerg, F., Davari, P., and Dragicevic, T., "Load Frequency Control in Microgrids Based on a Stochastic Non-Integer Controller", to be appeared in IEEE Transactions on Sustainable Energy, doi: 10.1109/TSTE.2017.2763607.

[24] Mallesham, G., Mishra, S. and Jha, A.N., "Ziegler-Nichols Based Controller Parameters Tuning For Load Frequency Control In a Microgrid", International Conference on Energy, Automation, and Signal, Odisha, pp. 1–8, 28-30 Dec. 2011.

[25] Pan, I. and Das, S., "Fractional Order AGC for Distributed Energy Resources Using Robust Optimization", IEEE Trans.Smart Grid, Vol.7, No.5, pp.2175-2186, Sept.2015.

[26] Pan, I. and Das, S.", Fractional Order Fuzzy Control of Hybrid Power System with Renewable Generation Using Choatic PSO", ISA Trans, vol. 62, pp.19-29. Mar 2015.

[27] Pan, I. and Das, S., "Kriging Based Surrogate Modeling for Fractional Order Control of Microgrids", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 6, No. 1, pp. 36-44, Jan. 2015.

[28] Scherer, L.G. and de Camargo, R.F., "Control of Micro Hydro Power Stations Using Nonlinear Model of Hydraulic Turbine Applied on Microgrid Systems", XI Brazilian Power Electronics Conference, Praiamar, pp. 812-818, 2011.

[29] N. Azadani, C. Canizares and K. Bhattacharya, "Modeling and Stability Analysis Of Distributed Generation", 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego, CA, pp. 1-8, 2012.

[30] Khooban, M.H., Dragičević, T., Blaabjerg, F. and Delimar, M., "Shipboard Microgrids: A Novel Approach to Load Frequency Control", to be appeared in IEEE Transactions on Sustainable Energy, DOI: 10.1109/TSTE.2017.2763605.

[31] Şerban, I. and Marinescu, C., "Aggregate Load-Frequency Control of a Wind-Hydro Autonomous Microgrid", Renewable Energy, Vol. 36, No. 12, pp.3345-3354, 2011.

[32] Yongli, Z.H.U., Chengxi, L.I.U., Bin, W.A.N.G. and Kai, S.U.N., "Damping Control for a Target Oscillation Mode Using Battery Energy Storage", Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, pp.1-13, 2018, DOI: 10.1007/s40565-017-0371-3.

[33] Senjyu, T., Nakaji, T., Uezato, K. and Funabashi, T., "A Hybrid Power System Using Alternative Energy Facilites in Isolated Island", IEEE Transactions on energy conversion, Vol. 20, No. 2, pp.406-414, 2005.

[34] Abd-Elazim, S.M. and Ali, E.S., "Load Frequency Controller Design of A Two-Area System Composing of PV Grid and Thermal Generator via Firefly Algorithm", Neural Computing and Applications, pp.1-10, 2016.

[35] Marzband, M., Sumper, A., Gomis-Bellmunt, O., Pezzini, P. and Chindris, M., "Frequency Control of Isolated Wind and Diesel Hybrid Microgrid Power System by Using Fuzzy Logic Controllers and PID Controllers", 11th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation (EPQU), pp. 1-6, 2011.

[36] Liu, S., Wang, X. and Liu, P.X., "Impact of Communication Delays on Secondary Frequency Control in an Islanded Microgrid", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 62, no. 4, pp.2021-2031, 2015.

[37] Cai, H. and Hu G., "Distributed Nonlinear Hierarchical Control of AC Microgrid Via Unreliable Communication", to be appeared in IEEE Transactions on Smart Grid, doi: 10.1109/TSG.2016.2612544.

[38] Yang, J., Zeng, Z., Tang, Y., Yan, J., He, H. and Wu, Y., "Load Frequency Control in Isolated Micro-Grids with Electrical Vehicles Based on Multivariable Generalized Predictive Theory", Energies, Vol. 8, No. 3, pp.2145-2164, 2015.

[39] Mishra, S., Mallesham, G. and Jha, A.N., "Design of Controller and Communication for Frequency Regulation of a Smart Microgrid", IET Renewable Power Generation", vol. 6, no. 4, pp.248-258, 2012.

[40] Amiri, F., & Moradi, M. H., "Designing a Fractional Order PID Controller for a Two-Area Micro-Grid under Uncertainty of Parameters", Iranian Journal of Energy, Vol. 20, No. 4, pp. 49-78, 2018.

[41] Worapradya, K., Pratishthananda, S., "Fuzzy supervisory PI controllers for a binary distillation column using hierarchical genetic algorithms", 2004 IEEE Region 10 Conference TENCON 2004, Vol. 4, pp. 463-466, 2004.

[42] K. Mistry and R. Roy, "CRPSO based optimal placement of multi-distributed generation in radial distribution system," 2012 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon), Kota Kinabalu, pp. 852-857, 2012

[43] Lewis, R.M., and Torczon, V., "Pattern Search Algorithms for Bound Constrained Minimization", SIAM Journal on Optimization, Vol. 9, No. 4, pp.1082-1099, 1999

[44] Dutta, A., and Debbarma S., "Frequency Regulation in Deregulated Market Using Vehicle-to-Grid Services in Residential Distribution Network", to be appeared in IEEE Systems Journal, doi: 10.1109/JSYST.2017.2743779.

[45] Amiri, F., Hatami, A. "A model predictive control method for load-frequency control in islanded microgrids", Computational Intelligence in Electrical Engineering, Vol. 8, No. 1, pp. 9-24, 2017. doi: 10.22108/isee.2017.21604

[۴۶] حسین شایقی، حمزه آریان پور،"طراحی مقاوم کنترل‌کننده فازی PID بلادرنگ مبتنی بر الگوریتم بهبود یافته تکاملی تفاضلی برای کنترل فرکانس ریز شبکه جزیره‌ای با در نظر گرفتن عوامل غیر خطی و عدم قطعیت‌ها"، نشریه مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۶، صص ۲۴۱-۲۵۶، تبریز، ۱۳۹۵.

1. Microgrid source (MGs)
2. Load frequency control (LFC)
3. Proportional integral (PI)
4. Proportional integral differential (PID)
5. Particle swarm optimization (PSO)
6. Social-spider optimization (SSO)
7. Harmony search (HS)
8. Model predictive control (MPC)
9. Ziegler Nichols based PID (ZN-PID)
10. Fractional order based PID (FOPID)
11. Fuzzy control based fractional order PID (Fuzzy FCPID)
12- Kriging Based Surrogate Fractional Order PID
13- Craziness-based particle swarm optimization (CRPSO)
14. Pattern search (PS)
15. Fractional order PID based on CRPSO and PS
16. Photovoltaic (PV)
17. Wind Turbine (WT)
18. Aqua electrolyzer (AE)
19. Fuel Cell (FC)
20. Diesel Energy Generator (DEG)
21. Flywheel energy storage system (FESS)
22. Battery energy storage system (BESS)