

طراحی کنترل‌کننده فرکانس- PI^λ مبتنی بر الگوریتم تکامل تفاضلی فازی نوع ۲ بازه‌ای برای مدل غیرخطی ریزشبکه جزیره‌ای

فاطمه جمشیدی، مهسا واقفی

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

گروه مهندسی برق، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

چکیده

در این مقاله مدل غیرخطی ریزشبکه جزیره‌ای شامل اشباع، محدودکننده نرخ تغییر توان و تأخیر زمانی در نظر گرفته شده و برای کنترل فرکانس-باز آن کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی مرتبه کسری (PI^λ) به دلیل عملکرد انعطاف‌پذیر و مقاوم آن پیشنهاد گردیده است. از الگوریتم تکامل تفاضلی بهبود یافته با فازی (FDE) برای تعیین بهینه پارامترهای این کنترل‌کننده با هدف کمینه کردن میانگین مربعات تغییرات فرکانس، تلاش کنترلی و ترکیب وزنی هر دو استفاده شده است. به دلیل دشواری تعیین دقیق توابع عضویت سیستم فازی، فازی نوع دو بازه‌ای (IT2F) اعمال گردیده است. شاخص عددی ماکزیمم اندازه تغییرات فرکانس و دو شاخص عددی مغایر میانگین مربعات تغییرات فرکانس و میانگین مربعات تلاش کنترلی برای بررسی عملکرد سیستم کنترل شده، به کار رفته است. با افزایش و کاهش قابل ملاحظه‌ی پارامترهای سیستم ریزشبکه، حساسیت طرح کنترل پیشنهادی ارزیابی شده است. نتایج شبیه‌سازی موید عملکرد مطلوب و مقاوم کنترل‌کننده است.

Mathematics Subject Classification (2010): 62A86, Email: vaghefi@iaushiraz.ac.ir.

عبارات و کلمات کلیدی: الگوریتم تکامل تفاضلی بهبود یافته با فازی نوع ۲ بازه‌ای (IT2FDE)، کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی مرتبه کسری (PI^λ)، تغییرات فرکانس، مدل غیرخطی ریزشبکه جزیره‌ای.

۱۳۹۸ (انجمن سیستم‌های فازی ایران)

۱ سرآغاز

به دلیل استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در ریزشبه‌ها، از آنها برای افزایش قابلیت اطمینان سیستم‌های قدرت و بهبود مسایل اقتصادی و زیست محیطی در سیستم‌های قدرت استفاده می‌شود. منابع تولید پراکنده (DG)^۱، منابع اصلی توان در ریزشبه‌ها هستند که در سمت مصرف‌کننده واقعند و از آن جمله می‌توان ژنراتورهای با موتور دیزلی، میکروتوربین‌ها، پنل‌های خورشیدی، ژنراتورهای توربین بادی، ذخیره‌کننده‌های انرژی، پیل‌های سوختی و موتورهای پیستونی را نام برد. به دلیل اهمیت و افزایش ریزشبه‌ها، تحقیقات زیادی از دو دیدگاه عملی و پژوهشی صورت گرفته است [۷]. با حضور ریزشبه‌ها در کنار واحدهای تولیدکننده بزرگ، شاخص‌های اصلی سیستم همچون ولتاژ و فرکانس باید کنترل شوند. ریزشبه‌ها علاوه بر کارکرد مستقل، باید با شبکه اصلی نیز در ارتباط باشند. در حالت جدا شده از شبکه اصلی (جزیره‌ای) برای پاسخ به تداخلات بار و تنظیم توان اکتیو/فرکانس و تنظیم توان راکتیو/ولتاژ، حلقه‌های کنترلی مناسب در ریزشبه‌ها به کار می‌روند. روش‌های کنترل تک عامله، کنترل غیرمتمرکز و کنترل مرکزی، سه روش دستیابی به عملکرد و پایداری مطلوب است. در روش کنترل تک عامله یک DG قابل کنترل و بزرگ، بارها و پارامترهای ریزشبه‌ها را کنترل می‌کند. در روش کنترل غیرمتمرکز، هر DG یک کنترل‌کننده محلی دارد. در روش کنترل مرکزی، یک واحد کنترل مرکزی بارهای محلی و پارامترهای سیستم ریزشبه‌ها را کنترل می‌کند [۹]. کنترل بار-فرکانس به معنی حفظ فرکانس مانا با وجود اغتشاشات سنگین با حداقل تلفات در واحدهای تولید و بار است. برای بررسی رفتار دینامیکی ریزشبه‌ها می‌توان از مدل سیگنال کوچک تجهیزات مختلف استفاده کرد، اما در ریزشبه‌ها پدیده‌های زیادی هستند که ماهیت غیرخطی آنها در کنترل بار-فرکانس باید در نظر گرفته شود: از جمله غیرخطی بودن توان تولیدی برخی DG ها 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 پدیده اشباع در برخی منابع تولید انرژی. برخی مراجع برای کنترل بار-فرکانس سیستم‌های قدرت، پدیده‌های غیرخطی همانند تأخیر زمانی سیستم‌های ارتباطی، محدودیت تغییرات نرخ توان و پدیده اشباع را در نظر گرفته‌اند [۳]. در

¹Distributed Generator

[۱۷] با در نظر گرفتن محدودیت تغییرات نرخ توان منابع ذخیره‌ساز، کنترل مقاوم H_∞ طراحی شده است. برای کنترل بار- فرکانس ریزش‌بکه با مدل غیرخطی در [۱۲] از کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی- مشتقی (PID) مرتبه کسری^۲ در [۱۳] از کنترل‌کننده PID که پارامترهای آن به روش فازی مرتبه کسری تعیین شده‌اند، در [۸] از روش مبتنی بر فازی نوع دو (T2F)^۳ و در [۲] از روش مبتنی بر مقاوم فازی بلادرنگ بهینه شده با الگوریتم تکاملی تفاضلی (DE)^۴ استفاده شده است. در [۸]، مدل غیرخطی دیزل ژنراتور و در [۱۲]، [۱۳] و [۲] مدل غیرخطی دیزل ژنراتور و محدودیت‌های غیرخطی ذخیره‌سازها در نظر گرفته شده‌اند. در سال‌های اخیر استفاده از الگوریتم‌های بهینه سازی فراابتکاری به دلیل سادگی مفاهیم، راحتی پیاده‌سازی، عدم نیاز به مشتق تابع، قابلیت گذر کردن از بهینه محلی و امکان استفاده در مسائل مختلف، در حل مسائل مهندسی محبوبیت یافته‌اند. کنترل‌کننده‌های فازی به‌طور گسترده، به‌ویژه زمانی که مدل سیستم موجود نباشد یا غیرخطی باشد، به‌کار گرفته می‌شوند. تحقیقات نشان می‌دهد که سیستم فازی نوع ۱ (T1F)^۵، در مدل‌سازی و کمینه کردن عدم قطعیت‌ها محدودیت دارد، چرا که درجه عضویت در توابع عضویت آن مقداری قطعی است. T2F در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. سیستم فازی نوع ۲ بازه‌ای (IT2F)^۶ حالت خاصی از T2F است که به‌سبب هزینه محاسباتی کاهش یافته‌اش، بیشتر استفاده می‌شود. درجه عضویت هر متغیر در TIFS یک عدد است، در حالی که در IT2F یک بازه است [۱۵]. در این مقاله، پدیده‌های غیرخطی مانند اشباع، محدودکننده نرخ تغییر توان و تأخیر زمانی در مدل دینامیکی ریزش‌بکه در نظر گرفته شده‌اند. برای کنترل فرکانس- بار، کنترل‌کننده تناسبی- انتگرالی مرتبه کسری (PI^λ) در نظر گرفته شده است. الگوریتم DE بهبود یافته با IT2F برای تعیین بهینه‌ی پارامترهای کنترل‌کننده با هدف بهبود سرعت همگرایی و کیفیت پاسخ‌های به‌دست آمده، استفاده شده است. T2F به‌دلیل توانایی مقابله با عدم قطعیت‌های سیستم جایگزین T1F شده و IT2F به‌دلیل کاهش قابل ملاحظه محاسبات انتخاب گردیده است. در ادامه در بخش دوم، سیستم ریزش‌بکه توصیف می‌گردد. در بخش سوم، کنترل‌کننده PI^λ مبتنی بر

^۲Proportional- Integral- Differential

^۳Type 2 Fuzzy

^۴Differential Evolution

^۵Type 1 Fuzzy

^۶Interval Type 2 Fuzzy

طراحی کنترل‌کننده فرکانس- بار^۸ PI-IT2FDE برای مدل غیرخطی ریزشبه جزیره‌ای — ۵۰

الگوریتم DE بهبود یافته با IT2F معرفی شده است. در بخش چهارم، کنترل‌کننده به ریزشبه آزمون اعمال و مقدار بهینه پارامترهای آن تعیین گردیده است. تحلیل حساسیت نیز صورت گرفته و نتایج با کنترل‌کننده‌های مشابه مقایسه شده است. در بخش آخر نتیجه‌گیری آمده است.

۲ توصیف سیستم

ریزشبه AC، اتصالی بین بار توزیع‌شده داخلی و منابع انرژی توزیع‌شده فشار ضعیف همانند توربین بادی، سلول خورشیدی و وسایل ذخیره‌کننده انرژی است. تغییرات پارامتری و تغییرات نقاط کار سیستم ریزشبه، به‌ویژه در حالت جزیره‌ای سریع است. توان تولیدی منابع تجدیدپذیر نیز متغیر است. از این رو طراحی کنترل‌کننده برای این سیستم ضروری است [۴]. فاصله میان عملگرها و سنسورها از اتاق کنترل، خطا در خطوط انتقالی و عملیات کنترلی و فیلترینگ باعث تأخیر زمانی می‌شوند که در آنالیز و طراحی کنترل‌کننده برای این سیستم‌ها باید مورد توجه قرار گیرند. در مسأله‌ی تضمین پایداری ریزشبه، حالت عملکرد جزیره‌ای از حالت عملکرد اتصال به شبکه مهم‌تر است. در حالت مانای سیستم قدرت، تولید و مصرف در تعادل هستند. اگر به‌دلیل رخداد اغتشاش این تعادل از بین برود، فرکانس از مقدار نامی دور می‌گردد. حلقه کنترلی اولیه، اولین حلقه کنترلی است که افت فرکانس را بعد از وقوع اغتشاش محدود می‌کند. این حلقه، افت فرکانس را محدود می‌کند، اما نمی‌تواند فرکانس را به مقدار نامی بازگرداند. حلقه کنترلی ثانویه فرکانس، برای بازگرداندن فرکانس به مقدار اولیه و جبران افت ماندگار ولتاژ و فرکانس استفاده می‌گردد. مدل دینامیکی سلول خورشیدی (PV)^۷، ژنراتور توربین بادی (WTG)^۸، دیزل ژنراتور (DEG)^۹، پیل سوختی (FC)^{۱۰}، چرخ طیار (FESS)^{۱۱} و باتری (BESS)^{۱۲} به‌شکل

⁷PhotoVoltaic

⁸Wind Turbine Generator

⁹Diesel Engine Generator

¹⁰Fuel Cell

¹¹Flywheel Energy Storage System

¹²Battery Energy Storage System

زیر است:

$$G(s) = \frac{K}{1 + sT} \quad (۱)$$

که T و K بهره و ثابت زمانی است [۱۱]. در مدل چرخ طیار و باتری، تأخیر زمانی، محدودکننده توان و محدودیت تغییرات توان تولیدی (GRC) ^{۱۳} و در مدل دیزل و پیل سوختی نیز، محدودکننده توان و GRC در نظر گرفته شده است که موجب غیرخطی شدن عملکرد آنها می‌گردد. برای حفظ ریزشبه در یک کارکرد مانا، توازن فرکانس-توان باید حفظ شود که با کنترل اجزای مختلف ریزشبه می‌توان به آن دست یافت. برآیند توان در ریزشبه به شکل زیر است:

$$\Delta P = P_{WTG} + P_{PV} + P_{DEG} + P_{FC} \pm P_{FESS} \pm P_{BESS} - P_L \quad (۲)$$

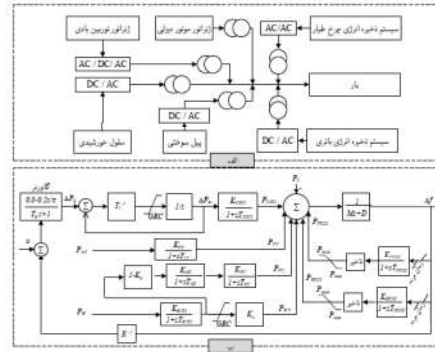
که تفاضل مجموع توان تولیدی ریزشبه و توان بار، P_L ، است. بهم خوردن تعادل توان در ریزشبه، مطابق تابع تبدیل زیر باعث انحراف فرکانس می‌شود:

$$G_{DG}(s) = \frac{\Delta f}{\Delta P} = \frac{1}{D + sM} \quad (۳)$$

که D ، ثابت میرایی و M ، ثابت اینرسی است [۴]. در شکل ۱، (الف) نمای کلی سیستم آزمون این مقاله و (ب) مدل پاسخ فرکانسی آن را نشان می‌دهد.

¹³Generation Rate Constraint

طراحی کنترل‌کننده فرکانس- بار^{PI^λ}-IT2FDE برای مدل غیرخطی ریزشکه جزیره‌ای — ۵۲



شکل ۱: (الف) نمای کلی (ب) مدل پاسخ فرکانسی ریزشکه آزمون این مقاله

۳ طراحی کنترل‌کننده^{PI^λ} مبتنی بر الگوریتم DE بهبود یافته با

IT2F

مفهوم کنترل‌کننده مرتبه کسری با معادلات دیفرانسیل از طریق حسابان کسری سروکار دارد. حسابان کسری بر مبنای تعریف رایمان لیوول به صورت زیر است:

$${}_a D_t^\alpha f(t) = \frac{1}{\Gamma(n-\alpha)} \frac{d^n}{dt^n} \int_a^t (t-\tau)^{n-\alpha-1} f(\tau) d\tau \quad (4)$$

که n ، عدد صحیح است و $n-1 < \alpha < n$ و $x > 0$ ، تابع اوایلر $\Gamma(x) = \int_0^\infty e^{-t} t^{(x-1)} dt$ ، λ ، هر عدد گاما است. کنترل‌کننده فرکانس- بار این مقاله، ^{PI^λ} است که مرتبه انتگرال‌گیری، λ ، هر عدد حقیقی مثبت می‌تواند باشد. تابع تبدیل این کنترل‌کننده به شکل زیر است:

$$G_C(s) = K_p + \frac{K_I}{s^\lambda} \quad (5)$$

این کنترل‌کننده ۳ پارامتر تنظیم دارد: بهره تناسبی، K_p ، بهره انتگرالی، K_I و مرتبه‌ی انتگرال‌گیر

کسری، λ . با توجه به نامحدود بودن عملگرهای مرتبه کسری، در پیاده‌سازی کنترل‌کننده‌های مرتبه کسری از تقریب‌های مرتبه صحیح استفاده می‌گردد. روش تقریب استالوپ، یکی از این تقریب‌هاست. این توزیع بازگشتی از فیلتر مرتبه $2n + 1$ استفاده می‌کند تا المان مرتبه کسری s^α را در باند فرکانسی $[\omega_l, \omega_h]$ تقریب بزند:

$$s^\alpha = \omega_h^\alpha \prod_{k=-N}^N \frac{s + \omega_l \left(\frac{\omega_h}{\omega_l}\right)^{\frac{k+N+\frac{1+\alpha}{2N+1}}{2N+1}}}{s + \omega_l \left(\frac{\omega_h}{\omega_l}\right)^{\frac{k+N+\frac{1-\alpha}{2N+1}}{2N+1}}}, \quad 0 < \alpha < 1 \quad (6)$$

تقریب بالا در فرکانس $\frac{rad}{sec}$ ۱، بهره ۱ دارد. انتخاب N در عملکرد تقریب بسیار مهم است. هرچه مقدار N کوچک‌تر باشد، تقریب ساده‌تر و پیاده‌سازی سخت افزاری آسان‌تر خواهد بود؛ اما به دلیل شکل‌گیری ریپل در پاسخ، دامنه و فاز عملکرد تقریب خراب می‌شود. با افزایش مقدار N ، این ریپل‌ها از بین می‌روند، اما تقریب دشوار و پیاده‌سازی سخت افزاری پیچیده‌تر می‌شود [۱]. برای انتخاب بهینه پارامترهای کنترل‌کننده PI^λ ، در این مقاله از الگوریتم DE فازی [۱۶] استفاده و سیستم IT2F جایگزین T1F [۱۶] شده است. مراحل الگوریتم DE فازی در زیر آمده است:

۱. بردار جواب تصادفی با توزیع یکنواخت برای نسل اول ($G = 1$) تولید می‌گردد. i مین بردار جواب در نسل G ام، x_i^G ، ژن نامیده و به صورت $x_i^G = [x_{i,1}^G \quad x_{i,2}^G \quad \dots \quad x_{i,d}^G]$ ، $i = 1, 2, \dots, n$ ، تعداد اعضای جمعیت و d ، تعداد متغیرهای تصمیم است.

۲. تنوع جمعیت از رابطه $diversity(G) = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{ii=i+1}^n \left| \frac{x_i^G - x_{ii}^G}{H-L} \right|}{2d(n-1)n}$ به دست می‌آید که

H و L کران پایین و بالای هر کروموزوم (درایه‌ی ژن یا متغیر تصمیم) است. سیستم فازی از روی تنوع جمعیت و شماره نسل، G ، فاکتور جهش، F ، را تعیین می‌کند.

۳. برای هر بردار x_i^G ، سه بردار تصادفی $x_{r_1}^G$ ، $x_{r_2}^G$ و $x_{r_3}^G$ انتخاب و بردار جهش

طراحی کنترل‌کننده فرکانس- بار PI^{λ} -IT2FDE برای مدل غیرخطی ریزشکه جزیره‌ای — ۵۴

$$v_i^G = x_{r_1}^G + F(x_{r_2}^G - x_{r_3}^G), r_1 \neq r_2 \neq r_3 \neq i \text{ تولید می‌شود.}$$

۴. عملگر ترکیب، از روی بردار جهش، v_i^G ، و بردار والد، x_i^G ، — بردار آزمایش

$$u_{j,i}^G = \begin{cases} v_{j,i}^G & \text{if } r_i \leq C_r \text{ or } j = J_r \\ x_{j,i}^G & \text{otherwise} \end{cases}$$

$j = 1, 2, \dots, d$ را تولید می‌کند

که r_i عددی تصادفی بین ۰ و ۱ است و J_r تضمین می‌کند $u_i^G \neq x_i^G$.

۵. عملگر انتخاب از میان بردار والد و بردار آزمایش، بهترین را برمی‌گزیند به شکل

$$x_i^{G+1} = \begin{cases} u_i^G & \text{if } f(u_i^G) \leq f(x_i^G) \\ x_i^G & \text{otherwise} \end{cases}$$

۶. اگر شرط خاتمه برآورده نشده باشد، به مرحله ۳ باز می‌گردد.

۷. پایان.

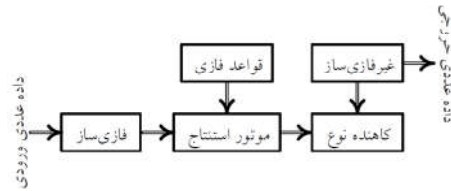
علیرغم کاربرد و توانایی بالای TIF، در شرایطی که عدم قطعیت زیادی وجود دارد، این سیستم قادر به مدل‌سازی و کمینه‌سازی تأثیر عدم قطعیت نیست، چرا که درجه عضویت در توابع عضویت آن مقداری مطلق است. T2F، با توابع عضویتی تعریف می‌شود که خود فازی هستند و نسبت به TIF پارامترهای بیشتری دارند. در نتیجه پتانسیل بهبود عملکرد T2F در مقایسه با TIF بیشتر است. IT2FS حالت خاصی از T2F است که به سبب هزینه محاسباتی کاهش یافته‌اش بسیار استفاده می‌شود [۱۰]. درجه عضویت هر متغیر در TIF یک عدد است، در حالی که درجه عضویت T2F یک بازه است که از بالا و پایین به دو TIF محدود می‌شود. تابع عضویت بالایی، UMF^{۱۴} و تابع عضویت پایینی، LMF^{۱۵} و فضای میان این دو ردپای عدم قطعیت، FOU^{۱۶} خوانده می‌شود. شماتیک دیاگرام IT2F در شکل ۳ آمده است که مشابه TIF است با این تفاوت که حداقل یکی از مجموعه‌های فازی، مجموعه T2F است. از این رو در خروجی موتور استنتاج IT2F،

¹⁴Upper Membership Function

¹⁵Lower Membership Function

¹⁶Footprint Of Uncertainty

کاهنده نوع لازم است تا آنها را قبل از غیرفازی‌سازی به TIF تبدیل نماید. اگر قانون n ام



شکل ۲: نحوه عملکرد T2F [۱۰]

مجموعه قوانین IT2F به شکل زیر باشد:

$$\text{if } x_1 \text{ is } \tilde{X}_1^n \text{ and } \dots \text{ and } x_L \text{ is } \tilde{X}_L^n \text{ Then } Y \text{ is } Y^n. \quad (7)$$

که $Y^n = [y^n, \bar{y}^n]$ یک بازه IT2F، مجموعه \tilde{X}_k^n ، $k = 1, \dots, L$ ، $n = 1, 2, \dots, N$ است که می‌توان آن را مرکز ثقل قسمت نتیجه IT2F در نظر گرفت. با فرض اینکه بردار ورودی $x' = (x'_1, x'_2, \dots, x'_L)$ باشد، محاسبات نمونه در یک IT2F شامل مراحل زیر است [۵]:

۱. محاسبه درجه عضویت هر x'_k روی هر \tilde{X}_k^n یعنی $[\mu_{\underline{\tilde{X}}_k^n}(x'_i), \mu_{\bar{\tilde{X}}_k^n}(x'_i)]$.

۲. محاسبه بازه آتش قانون n ام، یعنی $\omega_n = [\underline{\omega}_n, \bar{\omega}_n]$ که

$$\underline{\omega}_n = \mu_{\underline{\tilde{X}}_1^n}(x'_1) \times \dots \times \mu_{\underline{\tilde{X}}_L^n}(x'_L)$$

$$\bar{\omega}_n = \mu_{\bar{\tilde{X}}_1^n}(x'_1) \times \dots \times \mu_{\bar{\tilde{X}}_L^n}(x'_L)$$

(به جای ضرب از مینیمم می‌توان استفاده کرد).

۳. انجام کاهش نوع، برای ترکیب بازه آتش قوانین مختلف و غیرفازی‌سازی و محاسبه

خروجی. روش‌های مختلفی برای این قسمت وجود دارد که متداول‌ترین آن KMA^{۱۷}

¹⁷Karnik- Mendel algorithm

است که در برخی از مسائل از جمله مسأله مورد بررسی این مقاله، در حلقه نامحدود گیر می‌افتد. از این رو در اینجا از روش EIASC¹⁸ استفاده شده است که در [۱۵]، مراحل آن به شرح زیر آمده است:

(آ) محاسبه y_l و l :

۱- x_n , ($n = 1, 2, \dots, N$) به‌طور افزایشی مرتب و با همان نام، نامگذاری می‌شود

به‌طوری که $x_1 < x_2 < \dots < x_N$ و ω_n ها نیز به همان ترتیب مرتب می‌گردند.

۲- $a = \sum_{n=1}^N x_n \omega_n$, $b = \sum_{n=1}^N \omega_n$, $y_l = x_N$ و $l = 0$. مقداردهی اولیه می‌شود.

۳- قرار داده می‌شود $l = l + 1$, $a = a + x_l (\bar{\omega}_l - \underline{\omega}_l)$, $b = b + \bar{\omega}_l - \underline{\omega}_l$ و

$$c = \frac{a}{b}$$

۴- اگر $c \geq y_l$, آنگاه $y_l = c$ مقداردهی می‌شود و به مرحله ۳ بازمی‌گردد.

۵- قرار داده می‌شود $l = l - 1$.

۶- پایان.

(ب) محاسبه y_r و r :

۱- \bar{x}_n , ($n = 1, 2, \dots, N$) به‌طور افزایشی مرتب و با همان نام، نامگذاری می‌شود

به‌طوری که $\bar{x}_1 < \bar{x}_2 < \dots < \bar{x}_N$ و ω_n ها نیز به همان ترتیب مرتب می‌گردند.

۲- $a = \sum_{n=1}^N \bar{x}_n \omega_n$, $b = \sum_{n=1}^N \omega_n$, $y_r = \bar{x}_1$ و $r = N$. مقداردهی اولیه می‌شود.

۳- قرار داده می‌شود $r = r - 1$, $a = a + \bar{x}_r (\bar{\omega}_r - \underline{\omega}_r)$, $b = b + \bar{\omega}_r - \underline{\omega}_r$ و

$$c = \frac{a}{b}$$

۴- اگر $c \geq y_r$, آنگاه $y_r = c$ مقداردهی می‌شود و به مرحله ۳ بازمی‌گردد.

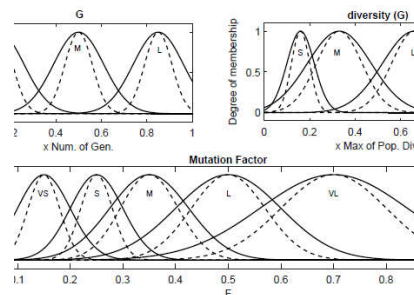
¹⁸Enhanced Iterative Algorithm with Stop Condition

۵- قرار داده می‌شود $r = r + 1$.

۶- پایان.

(پ) محاسبه‌ی خروجی $y = \frac{y_l + y_r}{4}$.

در نسل‌های ابتدایی الگوریتم DE برای یافتن حدود تقریبی جواب، بهتر است F بزرگ باشد. با افزایش شماره‌ی نسل، برای یافتن جواب بهینه‌ی مطلق و تسریع همگرایی بهتر است F کوچک باشد. هرچه فاصله نسبی اعضای جمعیت از یکدیگر (تنوع جمعیت) کمتر باشد F کوچک‌تر، بهتر است و برعکس. در الگوریتم DE بهبود یافته با IT2F، سیستم فازی دو ورودی دارد: شماره‌ی نسل و تنوع جمعیت که هر یک سه تابع عضویت گاوسی S، M و L دارد. خروجی سیستم فازی فاکتور جهش است که پنج تابع عضویت گاوسی VS، S، M، L و VL دارد. شکل ۴ این توابع عضویت فازی را نشان می‌دهد. قوانین فازی در جدول ۱ آمده است.



شکل ۳: توابع عضویت ورودی‌ها و خروجی سیستم فازی

۴ شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

در این بخش کنترل‌کننده PI^{λ} برای مدل غیرخطی ریزش‌بکه آزمون شکل ۱ طراحی و پارامترهای آن با الگوریتم DE بهبود یافته با IT2F بهینه می‌شود. عملکرد کنترل‌کننده پیشنهادی به صورت

جدول ۱: قوانین فازی الگوریتم DE فازی

تنوع جمعیت			خروجی: فاکتور جهش	
L	M	S		
VL	L	M	S	شماره نسل
L	M	S	M	
M	L	VS	L	

کیفی و کمی ارزیابی می‌گردد. مقاوم بودن عملکرد کنترل‌کننده‌ها با در نظر گرفتن تغییر در پارامترهای مدل، ارزیابی می‌گردد. پارامترهای سیستم آزمون این مقاله که مشابه [۱۴] است، در جدول ۲ آمده است. نمایش فضای حالت این سیستم به شکل زیر است:

$$\dot{X} = AX + \Gamma \begin{bmatrix} P_W(t) \\ P_{sol}(t) \end{bmatrix} + B_{\Delta f} \Delta f(t) + B_u u(t - \tau_{controller}) \quad (۸)$$

که در آن

$$\Gamma = \left[\text{diag} \left(\left[\frac{K_{WTG}}{T_{WTG}} \quad \frac{K_{PV}}{T_{PV}} \right] \right) \quad 0_{2 \times 4} \right]^T$$

$$B_{\Delta f} = \left[0_{1 \times 3} \quad \frac{-K_{DEG}}{RT_{DEG}} \quad \frac{K_{FESS}}{T_{FESS}} \quad \frac{K_{BESS}}{B_{BESS}} \right]^T$$

$$B_u = \left[0_{1 \times 2} \quad \frac{K_{FC}}{T_{FC}} \quad \frac{K_{DEG}}{T_{DEG}} \quad 0_{1 \times 2} \right]^T$$

$$X = \left[P_{WTG} \quad P_{PV} \quad P_{FC} \quad P_{DEG} \quad P_{FESS} \quad P_{BESS} \right]^T$$

$$A = \text{diag} \left(\left[\frac{-1}{T_{WTG}} \quad \frac{-1}{T_{PV}} \quad \frac{-1}{T_{FC}} \quad \frac{-1}{T_{DEG}} \quad \frac{-1}{T_{FESS}} \quad \frac{-1}{T_{BESS}} \right] \right)$$

و تغییرات فرکانس در رابطه زیر صدق می‌کند:

$$\Delta \dot{f}(t) = CZ - P_L \quad (۹)$$

که در آن

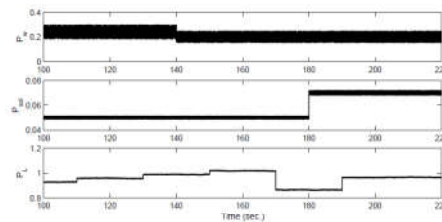
$$Z = \begin{bmatrix} P_{WTG}(t) & P_{PV}(t) & UU & \Delta f(t) \end{bmatrix}$$

$$UU = Sat(GRC(U))$$

$$U = \begin{bmatrix} P_{FC}(t) & P_{DEG}(t) & P_{FESS}(t - \tau_F) & P_{BESS}(t - \tau_B) \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} \frac{1}{M} & \frac{1}{M} & \frac{1}{M} & \frac{1}{M} & \frac{1}{M} & \frac{1}{M} & \frac{-D}{M} \end{bmatrix}$$

ورودی‌های خارجی غیر قابل کنترل این مقاله یعنی توان باد، P_W ، توان گرمایی خورشید، P_{sol} ، و بار متغیر، P_L ، در شکل ۵ نمایش داده شده و مدل و پارامترهای آن از [۶] گرفته شده است.



شکل ۴: ورودی توان باد، خورشید و بار

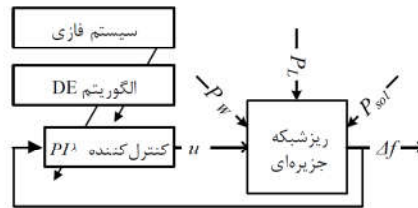
به منظور دستیابی به کنترل مطلوب تغییرات فرکانس ریزشبه جزیره‌ای، مقادیر بهینه پارامترهای کنترل کننده PI^λ یعنی K_p ، K_I و λ با الگوریتم DE بهبود یافته با IT2F تعیین گردیده است. شکل ۵، پیکربندی ریزشبه کنترل شده با این کنترل کننده را نشان می‌دهد. عملکرد مطلوب، آن است که توازن و مصالحه مناسب میان انحرافات فرکانس Δf و تلاش کنترلی u برقرار باشد. این دو هدف در حالت کلی مغایر هستند و کاهش یکی، باعث افزایش دیگری می‌گردد. برای ارزیابی عملکرد کنترل کننده طراحی شده دو معیار کمی $F_{\Delta f}$ و F_u به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$F_{\Delta f}(X) = \text{mean}(\Delta f^2), F_u(X) = \text{mean}(u^2) \quad (10)$$

طراحی کنترل‌کننده فرکانس- بار λ PI-IT2FDE برای مدل غیرخطی ریزشکه جزیره‌ای — ۶۰

جدول ۲: مقدار پارامترهای سیستم مورد بررسی

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
R	$3 \frac{Hz}{p.u.}$	K_w	۱
$K_{FESS} = K_{BESS}$	۱	T_w	۱/۵s
$T_{FESS} = T_{BESS}$	۰/۱s	T_{IN}	۰/۰۴s
$Max(P_{FESS}) = Max(P_{BESS})$	۰/۱۱	T_{IN}	۰/۰۰۴s
$Max(P_{FC})$	۰/۴۸	K_{FC}	۱
$Max(P_{DEG})$	۰/۴۵	T_{FC}	۰/۲۶s
$Max(\dot{P}_{FESS}) = Max(\dot{P}_{BESS})$	۰/۰۵	T_G	۰/۰۸s
$Max(\dot{P}_{FC})$	۱	T_T	۰/۴s
$Max(\dot{P}_{DEG})$	۰/۵	D	۰/۰۱۵ $\frac{p.u.}{Hz}$
		H	$\frac{1}{14} p.u. \times s$



شکل ۵: پیکربندی ریزشکه کنترل شده با طرح کنترل پیشنهادی

که در آن $X = [K_P \ K_I \ \lambda]$ ، بردار متغیرهای تصمیم است. در این مقاله، چهار کنترل‌کننده طراحی شده است:

(آ) کنترل‌کننده PI^λ که پارامترهای آن با الگوریتم DE بهبود یافته با IT2F و با انتخاب تابع هدف زیر که در آن ضرایب وزنی ثابت α_1 و α_2 با سعی و خطا انتخاب می‌گردند، بهینه شده اند (IT2FDE)- $PI - J$:

$$J = \alpha_1 F_{\Delta f}(X) + \alpha_2 F_u(X) \quad (11)$$

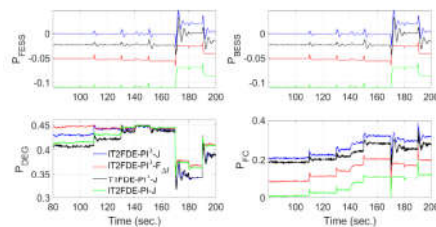
(ب) کنترل‌کننده PI^λ که پارامترهای آن با الگوریتم DE بهبود یافته با TIF و با انتخاب تابع

هدف J بهینه شده‌اند (T1FDE- $PI^\lambda - J$).

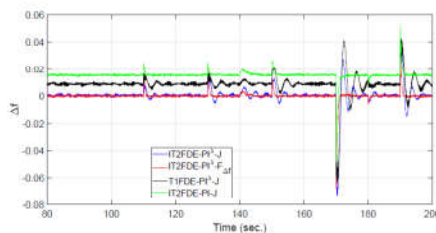
(ج) کنترل‌کننده PI^λ که پارامترهای آن با الگوریتم DE بهبود یافته با IT2F و با انتخاب تابع هدف $F_{\Delta f}$ بهینه شده‌اند (IT2FDE- $PI^\lambda - F_{\Delta f}$).

(د) کنترل‌کننده PI^λ که پارامترهای آن با الگوریتم DE بهبود یافته با IT2F و با انتخاب تابع هدف J ، بهینه شده‌اند (IT2FDE- $PI^\lambda - J$).

در شکل ۶، ۷ و ۸ به ترتیب شکل موج توان اجزای مختلف تشکیل دهنده، انحراف فرکانس و تلاش کنترلی ریزشکه کنترل شده با چهار کنترل‌کننده‌ی (الف) تا (د) با یکدیگر مقایسه گردیده است. شکل ۶، نشان می‌دهد که توان اجزای تشکیل دهنده ریزشکه

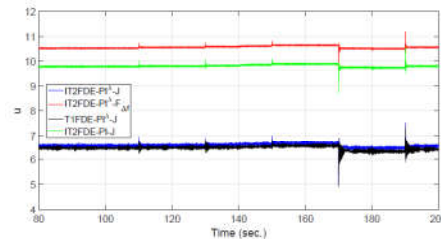


شکل ۶: مقایسه توان اجزای تشکیل دهنده ریزشکه برحسب وات



شکل ۷: مقایسه انحراف فرکانس

کنترل شده با کنترل‌کننده $(IT2FDE-PI^\lambda - J)$ ، در مجموع نوسانات کمتری دارد. با بررسی شکل ۷ و ۸ دیده می‌شود که تغییرات فرکانس ریزشکه کنترل شده با کنترل‌کننده $IT2FDE-PI^\lambda - F_{\Delta f}$ کمترین مقدار را دارد و با توجه به مغایر بودن دو هدف کاهش



شکل ۸: مقایسه تلاش کنترلی

خطای تعقیب و تلاش کنترلی، تلاش کنترلی آن بیشترین مقدار را دارد. با انتخاب تابع هدف J ، کنترل‌کننده J - PI^λ -IT2FDE مصالحه خوبی میان دو هدف کاهش خطای تعقیب و تلاش کنترلی برقرار نموده است. میزان کاهش تغییرات فرکانس، در مقایسه با افزایش تلاش کنترلی قابل ملاحظه است و به عملکرد قابل قبولی دست یافته است. همچنین با استفاده از IT2F در مقایسه با T1F، عملکرد الگوریتم DE در تعیین بهینه پارامترهای کنترل‌کننده بهبود قابل ملاحظه‌ای یافته است. عملکرد کنترل‌کننده PI^λ در مقایسه با کنترل‌کننده PI به‌طور چشم‌گیری بهتر است.

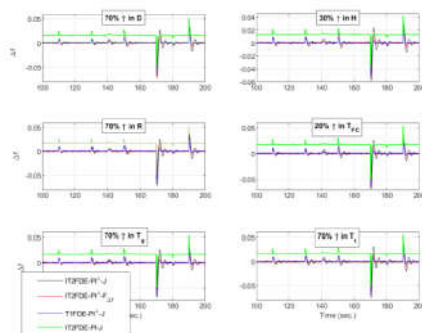
عملکرد کنترل‌کننده‌های طراحی شده با شاخص‌های کمی $\max(|\Delta f|)$ ، $F_{\Delta f}$ و F_u در جدول ۳ با یکدیگر مقایسه گردیده است. نتایج نشان می‌دهد $\max(|\Delta f|)$ که همان بیشینه مقدار اندازه تغییرات فرکانس و بیانگر فراجهدش یا فروجهدش است، برای کنترل‌کننده‌های مختلف، تفاوت قابل ملاحظه‌ای ندارد. معیار کمی $F_{\Delta f}$ برای کنترل‌کننده PI^λ -IT2FDE کمترین مقدار و شاخص عددی F_u بیشترین مقدار را دارد. معیار عددی J برای کنترل‌کننده J - PI^λ -IT2FDE دارای کمترین مقدار است و مصالحه مناسبی میان دو شاخص F_u و $F_{\Delta f}$ وجود دارد. معیارهای کمی $F_{\Delta f}$ و J با استفاده از IT2F در مقایسه با T1F، عملکرد الگوریتم DE در تعیین بهینه پارامترهای کنترل‌کننده PI^λ کاهش زیادی یافته است. معیارهای کمی $F_{\Delta f}$ و J برای کنترل‌کننده PI^λ در مقایسه با کنترل‌کننده PI به‌طور چشم‌گیری کمتر است.

جدول ۳: مقایسه عملکرد کنترل‌کننده‌ها

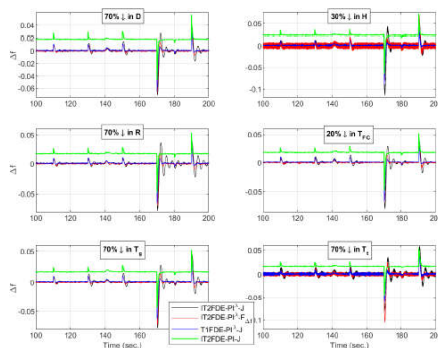
J	$\max(\Delta f)$	F_u	$F_{\Delta f} \times 10^{-5}$	شاخص
۲/۰۱	۰/۰۷	۴۳/۱۳	۵/۰۵	IT2FDE- $PI^\lambda - J$
۲/۹۶	۰/۰۶۸	۱۱۱/۵۸	۱/۲۱	IT2FDE- $PI^\lambda - F_{\Delta f}$
۳/۵۲	۰/۰۶۵	۴۱/۶۸	۱۳/۲	T1FDE- $PI^\lambda - J$
۷/۰۴	۰/۰۵۳	۹۶/۲۸	۲۴/۸	IT2FDE- $PI - J$

۱.۴ تحلیل حساسیت

در این بخش، انحراف فرکانس ریزشبه کنترل شده با کنترل‌کننده‌های (آ) تا (د) تحت تغییرات افزایشی و کاهش‌ی پارامترهای ریزشبه‌ی تحت کنترل مقایسه شده است. تغییرات فرکانس ریزشبه کنترل شده با کنترل‌کننده‌های (آ) تا (د) به‌ازای افزایش و کاهش پارامترهای سیستم شامل $D, H, R, T_{FC}, T_g, T_t$ به ترتیب در شکل ۹ و ۱۰ آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با وجود تغییر چشم‌گیر پارامترهای سیستم، کیفیت عملکرد کنترل‌کننده‌ها تغییری نکرده است که بیانگر عملکرد مقاوم کنترل‌کننده PI^λ دارد.



شکل ۹: مقایسه تغییرات فرکانس ریزشبه کنترل شده تحت افزایش پارامترهای سیستم



شکل ۱۰: مقایسه تغییرات فرکانس ریزشکه کنترل شده تحت کاهش پارامترهای سیستم

۵ نتیجه‌گیری

در این مقاله، طراحی کنترل‌کننده PID مرتبه کسری برای مدل دینامیکی ریزشکه جزیره‌ای با در نظر گرفتن تأخیر زمانی سیستم‌های ارتباطی، محدودیت تغییرات نرخ توان و پدیده اشباع بررسی شد. الگوریتم فراابتکاری تکامل تفاضلی جهت تعیین بهینه‌ی پارامترهای کنترل‌کننده به کار رفت و برای بهبود عملکرد این الگوریتم منطق فازی نوع ۲ بازه‌ای استفاده شد. عملکرد کنترل‌کننده پیشنهادی با کنترل‌کننده‌های مشابه مقایسه گردید. شاخص‌های کمی مبتنی بر تغییرات فرکانس و تلاش کنترلی برای ارزیابی عملکرد ریزشکه کنترل شده معرفی شد. شبیه‌سازی در محیط MATLAB صورت گرفت. به منظور بررسی عملکرد مقاوم کنترل‌کننده‌ها، عملکرد آن با افزایش و کاهش قابل ملاحظه‌ی پارامترهای سیستم ریزشکه ارزیابی گردید. نتایج عملکرد مطلوب و مقاوم کنترل‌کننده PID فازی نوع ۲ بازه‌ای مبتنی بر الگوریتم تکامل تفاضلی فازی نوع ۲ بازه‌ای را نشان می‌دهد.

مراجع

- [۱] جمشیدی، ف.، قنبریان، م. م. (۱۳۹۶) طراحی کنترل‌کننده PID مرتبه کسری فازی بهینه‌شده با الگوریتم رقابت استعماری به منظور کنترل مقاوم فرکانس ریزشکه جزیره‌ای. مجله هوش

محاسباتی در مهندسی برق، دوره ۸، شماره ۱، صص ۵۱ تا ۶۲.

[۲] شایقی، ح.، آریان پور، ح. (۱۳۹۵) طراحی مقاوم کنترل‌کننده فازی PID بلادرنگ مبتنی بر الگوریتم بهبودیافته تکامل تفاضلی برای کنترل فرکانس ریزش شبکه جزیره ای با در نظر گرفتن عوامل غیرخطی و عدم قطعیت ها. مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، شماره ۴۶، دوره ۳، صص ۲۴۱ تا ۲۵۶.

- [3] Ahmadi, A., Aldeen, M. (2017) Robust overlapping load frequency output feedback control of multi-area interconnected power systems. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, **89**, 156-172.
- [4] Bevrani, H., Habibi, F., Babahajyani, P., Watanabe, M., Mitani, Y. (2012) Intelligent frequency control in an AC microgrid: online PSO-based fuzzy tuning approach. *IEEE Transactions on Smart Grid*, **3** (4), 1935-1944.
- [5] Chen, Y., Wang, D., Ning, W. (2015) Studies on centroid type-reduction algorithms for general type-2 fuzzy logic systems. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control (IJICIC)*, **11** (6), 1987-2000.
- [6] Gnana Swathika, O.V., Hemamalini, S. (2012) GA based frequency controller for solar thermal–diesel–wind hybrid energy generation/energy storage system. *Electrical Power and Energy Systems*, **43**, 262–279.
- [7] Gnana Swathika, O.V., Hemamalini, S. (2016) Review on microgrid and its protection strategies. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, **6** (4), 1574-1587.

- [8] Khooban, M. H., Niknam, T., Blaabjerg, F., Dragičević, T. (2017) A new load frequency control strategy for micro-grids with considering electrical vehicles. *Electric Power Systems Research*, **143**, 585-598.
- [9] Lotfi, H., Khodaei, A. (2017) AC versus DC microgrid planning. *IEEE Transactions on Smart Grid*, **8** (1), 296-304.
- [10] Mendel, J. M., Liu, X. (2013) Simplified interval type-2 fuzzy logic systems. *IEEE Transaction on Fuzzy Systems*, **21**(6), 1056-1069.
- [11] Lotfi, H., Khodaei, A. (2017) Observer-based load frequency control for island microgrid with photovoltaic power. *International Journal of Photoenergy*, <https://doi.org/10.1155/2017/2851436>.
- [12] Pan, I., Das, S. (2016) Fractional order AGC for distributed energy resources using robust optimization. *IEEE Transactions on Smart Grid*, **7**, 2175-2186.
- [13] Pan, I., Das, S. (2016) Fractional order fuzzy control of hybrid power system with renewable generation using chaotic PSO. *ISA transactions*, **29**, 19-29.
- [14] Pan, I., Das, S. (2015) Kriging Based Surrogate Modeling for Fractional Order Control of Microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, **6**(1), 36-44
- [15] Runkler, T., Coupland, S., John, R. (2017) Interval type-2 fuzzy decision making. *International Journal of Approximate Reasoning*, **80**, 217-224.
- [16] Salehpour, M., Jamali, A., Bagheri, A. and Nariman-zadeh, N. (2017) A new adaptive differential evolution optimization algorithm based on fuzzy inference system. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, **20**(2), 587-597.

- [17] Singh, V. P., Mohanty, S. R., Kish, N. (2013) Robust H_{∞} load frequency control in hybrid distributed generation system. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, **46**, 294-305.