فصلنامه علمی – ترویجی «نشریه انرژی ایران»
دوره ۲۰، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۶، صفحه ۷۸-۴۹

طراحی کنترل کننده تناسبی - انتگرالی- مشتق گیر مرتبه کسری برای ریزشبکه دو ناحیه‌ای با در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترها

[۱]فرهاد امیری، [۲]محمد حسن مرادی*

تاریخ دریافت:
۱۳۹۵/۱۱/۲۶

تاریخ پذیرش:
۱۳۹۶/۱۰/۲۴

کلمات کلیدی:
الگوریتم ترکیبی،
گرگ خاکستری،
جستجوی الگو،
ریزشبکه،
کنترل بار-فرکانس،
کنترل PID مرتبه کسری

چکیده

با افزایش تعداد ریزشبکه‌ها بر میزان پیچیدگی و غیرخطی بودن سیستم قدرت افزوده شده است و کنترل کننده‌های مرسوم کارایی مناسبی در بازه وسیعی از نقاط کار نشان نمی‌دهند. در این مقاله از کنترلر تناسبی-انتگرالی-مشتق‌گیر مرتبه کسری بهینه شده با الگوریتم ترکیبی گرگ خاکستری-جستجوی الگو برای کنترل فرکانس هر یک از مناطق ریزشبکه و نیز کنترل توان بین مناطق متصل به هم استفاده شده است به طوری که عدم قطعیت پارامترهای ریزشبکه‌ها در نظر گرفته شده است. کنترل‌کننده پیشنهادی در حلقه ثانویه هر یک ریزشبکه‌ها قرار داده شده است، عملکرد مناسب و مقاوم در برابر عدم قطعیت پارامترهای ریزشبکه‌ها در شبیه سازها نشان داده شده است و کنترل کننده پیشنهادی با کنترل کننده مرتبه کسری که پارامترهای توسط الگوریتم گرگ خاکستری و همچنین کنترل کننده PID مرسوم مقایسه شده است و عملکرد مناسب کنترل کننده پیشنهادی از نظرکاهش زمان نشست، کاهش فراجهش و فروجهش در مقایسه با سایر کنترل کنندها به اثبات رسیده است.

۱. دانشجوی دکترا دانشکده مهندسی برق، دانشگاه بوعلی سینا f.amiri94@basu.ac.ir
۲. استاد دانشگاه دانشگاه بوعلی سینا (نویسنده مسئول) mh_moradi@yahoo.co.uk

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-10]

۱. مقدمه

باافزایش روز افزون مصرف انرژی در جهان، سیستم‌های قدرت مرسوم با مسایلی همچون نگرانی‌های زیست محیطی، هزینه بالای احداث نیروگاه‌های جدید، محدودیت‌های موجود در احداث خطوط انتقال/توزیع و کمبود سوخت‌های فسیلی مواجه شده‌اند. به منظور غلبه بر این مشکلات، افزایش قابلیت اطمینان در سرویس‌دهی به مشتریان و کاستن تراکم و تلفات در خطوط توزیع و انتقال، منابع تولید پراکنده و تجدیدپذیر انرژی به عنوان گزینه‌ای جدید و مناسب به سیستم‌های قدرت مدرن معرفی شده‌اند، محمد حسن مرادی و همکاران به طراحی سیستم مدیریت انرژی در یک ریزشبکه با حضور واحدهای تجدیدپذیر پرداختند[۲]. خوبان و همکاران به بررسی منابع تولید پراکنده پرداخته اند، منابع تولید پراکنده منابعی برای تولید انرژی الکتریکی با توانی کمتر از ۱۰ مگاوات هستند که اغلب در سمت توزیع یا فوق توزیع به سیستم‌های قدرت مرسوم وصل شده و در تغذیه بارها به آن ها یاری می‌رسانند. انرژی اولیه در این منابع، منابع انرژی پاک و تجدیدپذیر همانند باد، خورشید گرمایی زمین می‌باشند که در ساختارهای توربین‌های بادی، سلول‌های خورشیدی، میکروتوربین‌های گازی، سلول‌های سوختی و ... به کمک سیستم قدرت می‌آیند،[۱۴]. مک گرور به بررسی مشکل از جمله نگهداری و محافظت منابع تولید پراکنده و نحوه مشارکت این منابع در تنظیم پارامترهای اساسی شبکه همچون فرکانس و ولتاژ و نحوه مبادله توان میان شبکه سراسری و منابع تولید پراکنده و ... پرداخته است. برای حل این مشکلات و در نظر گرفتن این منابع وبارهای محلی به صورت مجتمع و یکپارچه، در سال۱۹۹۸ توسط موسسه[1] (CERT) مفهوم ریزشبکه‌ها[2] (MG) برای اولین بار در سیستم‌های قدرت مدرن معرفی گردید. بر اساس این معرفی، ریزشبکه‌ها، شبکه‌های قدرت کوچکی بوده که از چندین منبع تولید پراکنده و بارهای محلی تشکیل شده‌اند. ریزشبکه‌ها در حالت عادی به شبکه سراسری متصل بوده و در حالت اضطراری، بنا به رخداد اغتشاش‌های سنگین از شبکه اصلی جدا شده و می‌توانند

1. Consortium for Electric Reliability Technology Solutions
2. Microgrid

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-10]

بارهای اساسی و مهم محلی را به تنهایی تغذیه کنند،[۲۶]. ورما و همکاران به بررسی افزایش تعداد ریزشبکه‌ها در سیستم قدرت پرداخته اند، که سبب تغییر قوانین در این سیستم‌ها شده و باعث می‌شوند که منابع تولید در کل سیستم پخش شوند. همین مسئله سبب می‌شود که بر میزان پیچیدگی و غیر خطی بودن شبکه‌های قدرت افزوده شده ودر نتیجه پاسخ مناسب کنترل‌کننده‌های کلاسیک را مثل قبل شاهد نباشیم. کنترل‌کنندهای تناسبی–انتگرالی بیشترین کاربرد را در سیستم قدرت دارا می‌باشند، چون که دارای ساختار ساده و مقرون‌به‌صرفه هستند و در سیستم قدرت به این کنترل‌کننده‌ها بیش از هر کنترل‌کننده دیگر اعتماد وجود دارد. اما مشکل این کنترل‌کننده‌ها این بوده که ضرایب کنترل‌کننده بر اساس شرایط کار نامی و نقطه کار سیستم توسط تکنسین‌ها برای یکبار تنظیم می‌شود. اما به دلیل وقوع اغتشاش شرایط خطی سیستم عوض شود، مقادیر در نظر گرفته شده برای این کنترل‌کننده‌ها از این به بعد مقادیر بهینه نخواهد بود و پاسخ مناسب قبل را نخواهد داشت،[۳۱]. گوررو و همکاران از دروپ کنترلر در ریزشبکه استفاده کرده اند،[۱۱]. داس و همکاران از روش الگوریتم ازدحام ذرات برای کنترل و روش زیگلر نیکولز فرکانس نیز استفاده کرده اند،[۲۵،۷]. موفق به بررسی یکی از جدیدترین کنترل‌کننده به کار برده شده و مقاوم کنترل‌کننده PID مرتبه کسری در ریزشبکه پرداخته است[۱۹]. سینگ و همکاران به منظور کنترل فرکانس ریزشبکه از کنترل ثانویه فرکانس بر روی مبدل منابع تولید پراکنده پرداختند[۲۵،۱۳،۲۸]. بیورانی و همکاران از کنترل‌کننده فازی که ضرایب آن با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات بهینه شده استفاده کرده اند[۵]. پتراس و همکاران ،کنترل ثانویه فرکانس ریزشبکه ایزوله بدون ژنراتور سنکرون بر روی مبدل منابع تولید پراکنده انجام دادند[۲۲]. خوبان وهمکاران به بررسی سیستم‌های ذخیره انرژی، نقش مهمی در پایداری فرکانسی و تعادل میان تولید و مصرف ریزشبکه‌ها ایفا می‌کنند، پرداختند[۱۵]. این سیستم‌ها در مواقع کاهش بار شروع به ذخیره انرژی کرده و در مواقعی که بار افزایش می‌یابد از انرژی ذخیره شده آن‌ها برای تامین بار می‌توان استفاده کرد. کردفول و همکاران از روش کنترل مقاوم برای کنترل فرکانس ریزشبکه ایزوله استفاده کرده اند[۲۹]. دهکردی و همکاران ، جهت کنترل فرکانس از کنترل دروپ بر روی منابع تولید پراکنده موجود در ریزشبکه استفاده کرده اند، این کنترل‌کننده‌ها بر اساس مشخصه افت فرکانس–توان هر یک از منابع تولید پراکنده تنظیم شده و بر روی ادوات الکترونیک قدرت آن‌ها اعمال شده‌اند[۱۷،۳۲]. ال حمد و همکاران اثر تاخیر زمانی بر روی کنترل فرکانس–بار ریزشبکه را مورد بررسی قرار داده‌اند[۱۲].

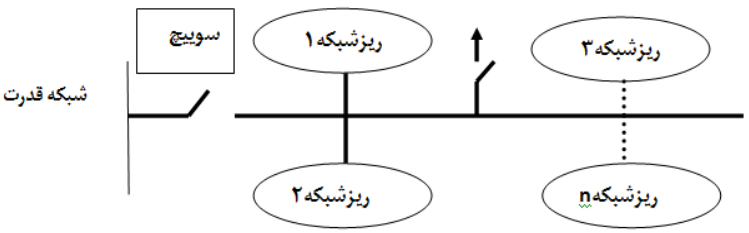
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-10]

چنگ و همکاران از کنترل‌کننده فازی به عنوان کنترل‌کننده ریزشبکه استفاده کرده اند[۳،۶،۴] . در این پژوهش‌ها ریزشبکه ایزوله در نظر گرفته شده است و از انتقال توان بین ریزشبکه‌ها بحث نشده است. سرعت پاسخ در حالت نرمال ریزشبکه در مقابل اغتشاشات بار و عدم قطعیت پارامترها در روش‌های قبلی خیلی مطلوب نیست. در این مقاله مدل ریزشبکه‌ها کامل‌تر است و توان ریزشبکه بیشتر شده است به این دلیل که به جای استفاده از دیزل‌ژنراتور از ژنراتور سنکرون استفاده و مدلسازی شده است و همچنین از کنترلر PID مرتبه کسری بهینه شده با الگوریتم ترکیبی جدید گرگ خاکستری-جستجو الگو(HGWO-PS) برای کنترل فرکانس ریزشبکه‌ها و همچنین توان بین مناطق ریزشبکه‌ها استفاده شده است. در این مقاله هر کنترل‌کننده نوآوری روش پیشنهادی این مقاله نسبت به روشهای مرسوم عملکرد مناسب در زمان نشست و کاهش فراجهش و فروجهش و کاهش ریپل و همچنین مقاوم بودن روش پیشنهادی نسبت به عدم قطعیت پارامترها است.

۲. مدلسازی اجزا

بلوک دیاگرام ریزشبکه چند منطقه‌ای

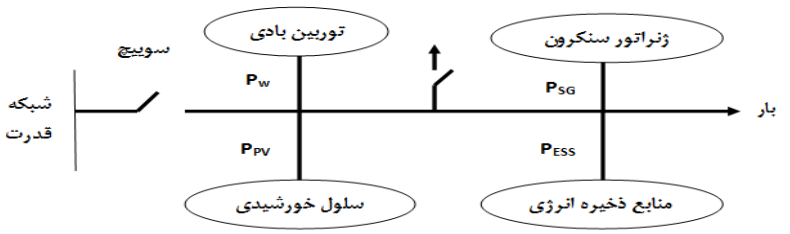
ریزشبکه شامل توربین بادی، سلول خورشیدی،ژنراتور،منبع‌ذخیره‌انرژی‌و... می‌باشد. شکل (۱) نشان دهنده‌اتصال‌چند ریزشبکه در حالت ایزوله‌می‌باشد.



شکل ۱. بلوک دیاگرام ریزشبکه چند منطقه‌ای [۲]

در شکل (۲) بلوک دیاگرام یک ریزشبکه را نشان می‌دهد، که می‌تواند هم به شبکه متصل باشد و هم جدا از شبکه باشد. برای کارکرد ریزشبکه در حالت مستقل باید توسط بریکر از شبکه اصلی جدا شود.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-10]



شکل ۲. اجزای یک ریزشبکه [۲]

ژنراتور سنکرون[1] (SG)

ژنراتور سنکرون به طور مستقل برای تامین کسری از توان بار و تعادل بین تقاضا و مصرف کار می‌کند. در ریزشبکه‌های کوچک معمولا از دیزل ژنراتور استفاده می‌شود، اما در ریزشبکه‌های بزرگ از ژنراتور سنکرون استفاده می‌شود. ژنراتور سنکرون در نظر گرفته شده در این مقاله شامل سیستم گاورنر و توربین K_T ,K_g می‌باشد. تابع تبدیل توربین و گاورنر توسط رابطه‌های ۱و۲ نشان داده شده است[۱۸].

$$G_G(s)=\frac{\Delta P_m(s)}{\Delta P_v(s)}=\frac{K_T}{1+sT_T} \quad (۱)$$

$$G_T(s)=\frac{\Delta P_m(s)}{\Delta P_v(s)}=\frac{K_T}{1+sT_T} \quad (۲)$$

T_T,T_g به ترتیب ثابت زمانی توربین و گاورنرهستند، K_T ,K_g نیز به ترتیب بهره گاورنر و توربین است، که یک در نظر گرفته شده است. در مدل در نظر گرفته شده برای ژنراتور سنکرون مشخصه سرعت R در نظر گرفته شده است. جزئیات مدل در شرح داده شده است[۳۰،۲۸].

1. Synchronous Generator

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-10]

توربین بادی[1](WT)

توربین بادی به وسیله معادلات ۳-۷ نشان داده می‌شود[۸،۲۷].

$$P_m = C_\rho P_w \quad (۳)$$

$$P_w = \frac{1}{2}\pi\rho R^2 V_w^3 \quad (۴)$$

$$C_\rho(\lambda,\beta) = c_1((c_2/\lambda_i) - c_3\beta - c_4)\exp(-c_5/\lambda_i) \quad (۵)$$

$$1/\lambda_i = \frac{1}{\lambda_i + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (۶)$$

$$\lambda = R_w / V_w \quad (۷)$$

در روابط (۳) تا (۷) که به ترتیب c_1, c_2, c_3, c_4, c_5 ضرایب ثابت هستند. (w) تـوان خروجـی تـوربین: P_m توان حقیقی توربین بادی: P_w ، (kg/m^3) چگالی هوا: ρ ضریب توان روتـور: c_ρ ، زاویـه تیغه زمین: β

(m/s)سرعت باد: V_w و (m)شعاع پرهای توربین بادی: R_w است

مدل توربین بادی به وسیله رابطه ۸ نشان داده شده است، که به وسیله یک گین k_{WTG} وثابت زمانی T_{WTG} نشان داده شده است[۱۶].

$$G_{WTG}(s) = \frac{k_{WTG}}{1 + sT_{WTG}} \quad (۸)$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-10]

سلول خورشیدی [۲](PV)

با اتصال سری و موازی سلول خورشیدی می‌توان به ولتاژ و جریان بیشتری دست پیدا کرد. توان خروجی سلول خورشیدی به وسیله رابطه ۹ نشان داده شده‌است[۸،۳۱].

$$P_{PV} = \eta S \varphi[1-.005(T_a+25)] \quad (۹)$$

در رابطه (۹) (kw/m^2) تابش خورشیدی: ϕ، (m^2) مساحت سلول خورشیدی: S، راندمان سلول خورشیدی: η و $(\deg.cel)$ دما محیط: T_a هستند. سلول خورشیدی وابسته به T_a و ϕ است. η و S ثابت هستند. در این مقاله ما دما محیط را ثابت در نظر گرفته‌ایم و P_{PV} به طور خطی ϕ تغییر می‌کند.

مدل سلول خورشیدی با رابطه ۱۰ نشان داده شده است، که k_{PV} گین و T_{PV} ثابت زمانی سلول خورشیدی است[۸،۳۱].

$$G_{PV}(s) = \frac{k_{PV}}{1+sT_{PV}} \quad (۱۰)$$

سیستم ذخیره انرژی [۱](ESS)

سیستم ذخیره انرژی نقش مهمی در صنعت برق و ریزشبکه دارد. با پیشرفت سریع در تکنولوژی الکترونیک قدرت، منابع ذخیره‌انرژی دارای قابلیت کنترل پذیری بهتروظرفیت بالاتر شده‌اند. تابع تبدیل سیستم‌ذخیره‌انرژی توسط رابطه ۱۱ نشان داده شده‌است[۲۶،۸].

$$G_{ESS}(s) = \frac{\Delta P_{ESS}}{\Delta F} = \frac{K_{ESS}}{1+sT_{ESS}} \quad (۱۱)$$

K_{ESS} گین T_{ESS} ثابت زمانی سیستم ذخیره انرژی هستند.

1. Energy Storage System

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-10]

انحراف توان و فرکانس

برای نگه داشتن ریزشبکه در یک کارکرد مانا توازن فرکانس–توان باید حفظ شود، که به وسیله کنترل اجزای مختلف ریزشبکه می‌توان به‌آن دست پیدا کرد. توان مبادله شده بـه ایـن وسـیله رابطـه ۱۲و۱۳ نشان داده شده است [۲۷،۲۶،۸].

$$P_s = P_{WTG} + P_{PV} + P_{SG} - P_{ESS} \quad (۱۲)$$

$$\Delta P = P_s - P_L \quad (۱۳)$$

در P_{WTG}:توان توربین بادی ، P_{PV} :توان سلول خورشیدی، P_L:تـوان ژنراتـور سـنکرون، P_{ESS} : تـوان سیستم ذخیره انرژی، P_L : مقدار بار، P_s: توان تولیدی و P_{SG}: توان ژانراتور سنکرون است.
در ریزشبکه اگر توان تغییر کند، انحراف فرکانس به وجود می‌آید. تغییرات فرکانس ریز شبکه به وسـیله رابطه ۱۴ نشان داده می‌شود[۲۶،۸].

$$\Delta F = \frac{\Delta P}{k_{SYS}} \quad (۱۴)$$

در رابطه (۱۴) ثابت فرکانس سیستم : k_{SYS}، تغییرات فرکانس ریزشبکه: ΔF وتغییرات تـوان: ΔP است. ولی در عمل یک تاخیر بین انحراف توان سیستم و انحراف فرکانس به وجود می‌آید، وبه صـورت رابطه ۱۵ نشان داده می‌شود[۸،۲۵].

$$G_{SYS}(s) = \frac{1}{k_{SYS}(1+sT_{SYS})} = \frac{1}{D+sM} \quad (۱۵)$$

در رابطه (۱۵)M : اینرسی جرم چرخان، D: ضریب میرایی است.

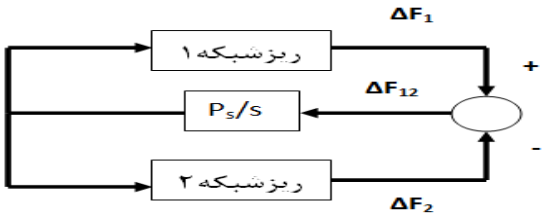
اتصال بین دو ریز شبکه

برای بالا بردن قابلیت اطمینان در تامین توان یک ریزشبکه ایزوله می‌تواند از طریق خـط ارتبـاطی بـه ریزشبکه‌های دیگر متصل شود. هر ریزشبکه به عنوان یک منطقه کنترل در نظر گرفته می‌شـود، خـط

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-10]

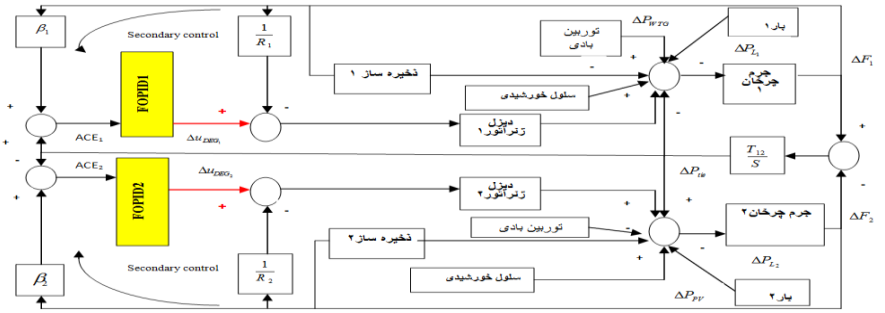
ارتباطی برای تبادل توان بین مناطق مختلف ریزشبکه استفاده می‌شود. اگر تعادل بین تولید توان و تقاضا در هر ریزشبکه به هم بخورد انحراف فرکانس به وجود می‌آید[۲۵].

در شکل (۳) اتصال بین دو ریزشبکه از طریق خط ارتباطی به هم متصل شده اند.



شکل ۳. اتصال دو ریزشبکه به هم [۲]

در شکل۴ بلوک دیاگرام خطی شده ریزشبکه دو منطقه‌ای رانشان می‌دهد. که هر ریزشبکه شامل توربین بادی، سلول خورشیدی، ژنراتور سنکرون، سیستم ذخیره ساز، بار و ... می‌باشد.



شکل ۴. مدل خطی دو ریزشبکه متصل به هم [۷،۲]

تغییرات توان خط ارتباطی توسط رابطه۱۶ نشان داده می‌شود[۲] .

$$\Delta P_{tie} = P_s\left(\int \Delta F_1 dt - \int \Delta F_2 dt\right) \qquad (۱۶)$$

با گرفتن تبدیل لاپلاس از معادله بالا رابطه۱۷ به دست می‌آید.

$$G_{tie} = \frac{\Delta P_{tie}(s)}{\Delta F(s)} = \frac{P_s}{S} \qquad (۱۷)$$

خطای کنترل تکمیلی (ACE) ریزشبکه iام به وسیله رابطه ۱۸ نشان داده می‌شود [۱].

$$ACE_i = \sum_{j=1}^{n} \Delta P_{ij} + B_i \Delta F_i \qquad (۱۸)$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-10]

B_i فاکتور بایاس ریزشبکه منطقه i و P_S توان خط ارتباطی است.

۳. الگوریتم پیشنهادی

کنترلر مرتبه کسری[1] (FOPID)

رایج ترین نوع کنترلر PID یعنی کنترلر $PI^{\lambda}D^{\mu}$ رایج ترین فرم یک کنترلر مرتبه کسری است. معادله۱۹ تابع تبدیل کنترل‌کننده PID مرتبه کسری را نشان می‌دهد که شامل یک بهره تناسبی، بهره انتگرال گیر که انتگرال گیر از مرتبه λ ویک بهره مشتق گیر که از مرتبه μ است ($\lambda,\mu>0$)[۲۲].

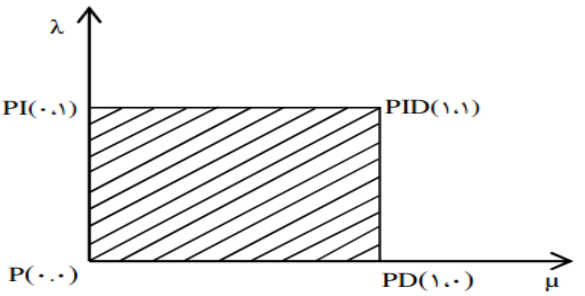
واضح است که با انتخاب $\lambda=1,\mu=1$ یک کنترل PID کلاسیک خواهیم داشت. انتخاب $\lambda=1,\mu=0$ و $\lambda=0,\mu=1$ به ترتیب متناظر با کنترلرهای PI و PD مرسوم هستند. همه‌ی این انواع کلاسیک از کنترلرهای PID ،موارد خاصی از کنترلر $PI^{\lambda}D^{\mu}$ (FOPID) داده شده رابطه ۱۹ هستند. کنترلر FOPID تعمیمی از کنترلر IOPID کلاسیک است و آن را از فرم نقطه به فرم صفحه توسعه می‌دهد. شکل (۵) یک کنترل کننده PID مرتبه کسری را نشان می‌دهد[۲۲،۱۹].

$$G_c(s)=K_P+\frac{K_I}{S^{\lambda}}+K_D S^{\mu} \qquad (۱۹)$$

یکی از مهمترین مزایای کنترلر $PI^{\lambda}D^{\mu}$، کنترل بهتر سیستم‌های دینامیکی مرتبه کسری است. مزیت دیگر آن این است که کنترلرهای $PI^{\lambda}D^{\mu}$ حساسیت کمتری به تغییر پارامترهای سیستم کنترل شده دارند که این به سبب داشتن دو درجه آزادی بیشتر برای تنظیم بهتر ویژگی‌های دینامیکی یک سیستم کنترل مرتبه کسر ی است [۲۲،۲۳].

1. Fractional order Proportional Integral Derivative

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-10]



شکل ۵. کنترلر مرتبه کسری[۲۵]

الگوریتم گرگ خاکستری[1] (GWO)

گرگ‌های خاکستری شکارچیانی هستند که اغلب به صورت گروهی زندگی می‌کنند و دسته‌بندی گروهی بسیار دقیقی دارند. گرگ α در صدر این دسته‌بندی، به عنوان رئیس گروه ایفای نقش می‌کند و بعد از او گرگهای w,δ,β در دسته‌های بعدی قرار می‌گیرند. هر کدام از این گرگ ها بر اساس این دسته‌بندی، وظایف مشخصی در گروه دارند. نکته جالب تر در مورد این گرگ ها، نحوه شکار کردن آن ها می‌باشد، به صورتی که بعد از ردگیری و دنبال کردن طعمه آن را محاصره کرده و بعد از خسته کردن طعمه به آن حمله‌ور می‌شوند. از این تکنیک شکار و دسته‌بندی گروهی گرگ‌های خاکستری به منظور طراحی GWO و انجام بهینه‌سازی استفاده شده‌است. در این الگوریتم بهینه‌سازی در هر تکرار بهترین جواب به عنوان α در نظر گرفته می‌شود و دومین و سومین از بهترین جواب‌هابه عنوان δ,β در نظر گرفته می‌شوند. بقیه جواب ها نیز به عنوان w در نظر گرفته می‌شود. فرض می‌شودکه δ,β,α بهترین دانش را در مورد محل بالقوه جواب بهینه دارند واز این رو، موقعیت دیگر عامل‌های جستجو(w) با توجه به موقعیت δ,β,α بر اساس فرمول بندی ۲۰ تا ۲۵ به‌روز می‌شوند[۱۸].

$$\vec{D}_{\alpha}=\left|\vec{C}_1.\vec{X}_{\alpha}(t)-\vec{X}(t)\right| \qquad (۲۰)$$

1. Gray Wolf Optimizer

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-10]

$$\vec{D}_{\beta} = \left| \vec{C}_2 . \vec{X}_{\beta}(t) - \vec{X}(t) \right| \quad (۲۱)$$

$$\vec{D}_{\delta} = \left| \vec{C}_3 . \vec{X}_{\delta}(t) - \vec{X}(t) \right| \quad (۲۲)$$

$$\vec{X}_1 = \vec{X}_{\alpha} - \vec{A}_1 (\vec{D}_{\alpha}) \quad (۲۳)$$

$$\vec{X}_2 = \vec{X}_{\beta} - \vec{A}_2 (\vec{D}_{\beta}) \quad (۲۴)$$

$$\vec{X}_3 = \vec{X}_{\delta} - \vec{A}_3 (\vec{D}_{\delta}) \quad (۲۵)$$

$$\vec{X}(t+1) = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3} \quad (۲۶)$$

که در آن t تکرار فعلی، $\vec{C}, \vec{A}$ بردارهای ضرایب و $\vec{X}$ موقعیت عامل جستجو را نشان می‌دهد. بردارهای $\vec{C}, \vec{A}$ به صورت رابطه ۲۷ و ۲۸محاسبه می‌شوند[۱۸].

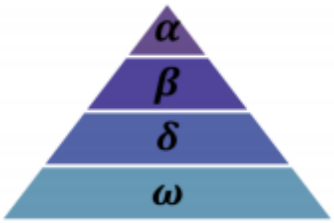
$$\vec{A} = 2\vec{\alpha}.\vec{r}_1 - \vec{a} \quad (۲۷)$$

$$\vec{C} = 2\vec{r}_2 \quad (۲۸)$$

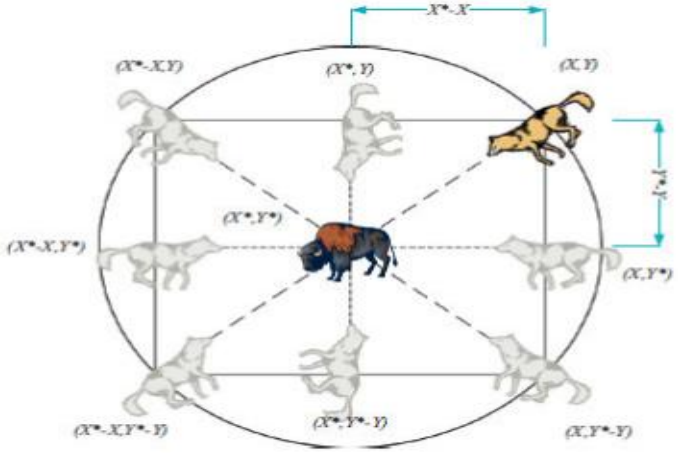
که در آن مولفه $\vec{a}$ در طول تکرارها از۲ به صفر کاهش می‌یابد و $\vec{r}_2, \vec{r}_1$ بردارهای تصادفی در بازه [0,1] هستند. به این ترتیب $\vec{A}$ مقدار تصادفی در بازه [-2,2] خواهد بود، برای مقادیر $|A| < 1$ و $C < 1$ عامل‌های جستجو به سمت جواب بهینه همگرا می‌شوند. در حالی که $|A| > 1$ و $C > 1$ واگرایی عامل‌های جستجو و کاوش سراسری را مدل می‌کند. این کار برای جلوگیری از حاصل شدن جواب بهینه محلی است. در نهایت هم با بهینه کردن تابع الگوریتم به پایان می‌رسد. در شکل (۶) ساختار

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-10]

سلسله مراتبی گرگ‌های خاکستری از بالا به پایین را نشان می‌دهد، که سلطه آنها از بالا به پایین کاهش می‌یابد. در شکل (۷-الف) نمودار مکان دو بعدی یک گرگ خاکستری که در مکان (x,y) قرار دارد می‌تواند موقعیت خود را با توجه به موقعیت (x^*,y^*) عوض کند. شکل (۷-ب) نمودار سه بعدی یک گرگ خاکستری را نشان می‌دهد. بردار تصادفی r_1 و r_2 به گرگ ها اجازه دستیابی به هر موقعیتی مابین نقاط داده شده در این شکل را می‌دهد. بنابراین یک گرگ خاکستری می‌تواند موقعیت خود را در داخل فضایی که طعمه در بر گرفته به صورت تصادفی و با استفاده از معادلات (۲۰-۲۵) تغییر دهد[۱۲].

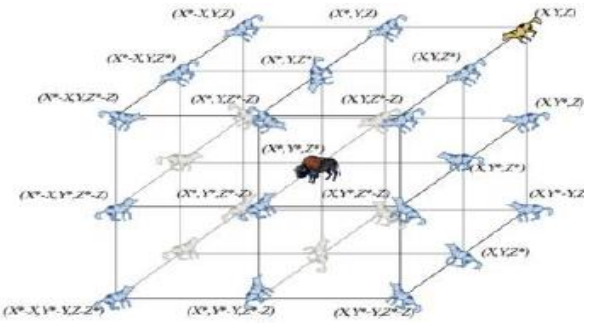


شکل ۶. سلسله مراتب گرگهای خاکستری [۱۲]



شکل۷-الف. نمودار مکان دوبعدی و موقعیت بعدی احتمالی آنها[۱۲]

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-10]



شکل۷-ب. نمودار مکان سه بعدی و موقعیت بعدی احتمالی آنها[۱۲]

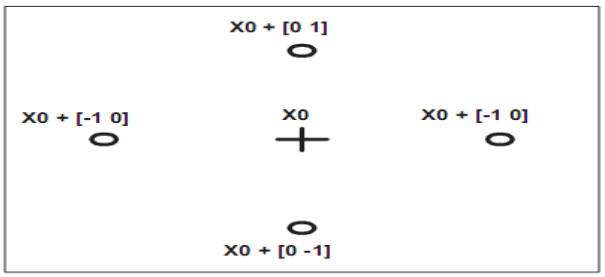
الگوریتم جستجو الگو[1] (PS)

الگوریتم جستجوی الگو (جستجوی محلی) از یک الگوریتم تکاملی مناسب برای حل یک مسئله بهینه‌سازی متفاوت که در خارج از محدوده روش‌های بهینه‌سازی استاندارد هست گرفته شده است. الگوریتم جستجوی الگو از نقطه X_0 که به عنوان نقطه شروع توسط الگوریتم GWO داده می‌شود شروع می‌کند. در اولین تکرار با مقدار عددی=۱ که آن را اندازه مش می‌نامند بردار الگو یا بردار جهت‌دار ساخته می‌شود به وسیله [1 0] ، [0 1]، [-1 0]، [0 -1] بردارهای جهت دار به X_0 اضافه می‌شوند و سپس نقاط مش مطابق به صورت X_0+[1 0] ، X_0+[0 1]، X_0+[-1 0]، X_0+[0 -1] مطابق شکل (۸) در می‌آیند الگوریتم تابع هدف را در نقاط مش حساب می‌کند. این الگوریتم از نقاط شبکه با محاسبه مقدار هدف نمونه‌گیری می‌کند تا یکی از آن ها را که مقدار تابع هدف آن از مقدار تابع هدف X_0 کوچکتر است پیدا کند و وقتی که تعدادی از نقاط مش تابع هدف کوچکتری داشته باشند نمونه گیری موفق آمیز بوده مجموعه این نقاط معادل X_1 است. بعد از نمونه‌گیری گام تکرار الگوریتم به دو می‌رود و اندازه شبکه (مش) در ۲ ضرب می‌شود.که به آن فاکتور توسعه یا انبساط می‌گویند بنابراین در تکرار دوم نقاط مش به صورت X_1+2[1 0]، X_1 + 2[0 1] ، X_1+2[-1 0]، X_1+2[0 -1] و این پروسه تکرار می‌شود تا تکرارها تمام شود حال اگر دریک تکرار خاص هیچ یک از نقاط مش مقدار تابع هدف کمتر از مقدار نقطه در آن تکرار نداشته باشد رای‌گیری (نمونه‌گیری) ناموفق

1. Pattern Search

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-10]

بوده و نقاط فعلی در تکرار بعدی استفاده می‌شوند. همچنین در تکرار بعدی اندازه شبکه در ۰/۵ ضـرب می‌شود که به آن فاکتور انقباض می‌گویند به طوری که اندازه مش در تکرار بعـدی کـوچکتر مـی‌شـود واین فرآیند ادامه می‌یابد تا وقتی که تکرارها متوقف شود[۲۷]. فلوچارت الگوریتم ترکیبی پیشنهادی در (۹) آمده است.



شکل ۸. نقاط مش و بردار الگو [۳۱]

بهینه کردن کنترل‌کننده PID مرتبه کسری با الگوریتم گرگ خاکستری[1]

ابتدا تابع هدف به وسیله معادله۲۹ نشان داده می‌شود . قیود مسئله نیز به وسیله رابطـه۳۰ تـا۳۴ نشـان داده می‌شود.

$$\min J = \int_0^t t[|\Delta f_1| + |\Delta f_2| + |\Delta P_{tie}|]dt \qquad (۲۹)$$

در رابطه (۲۹) تغییرات فرکانس ریزشبکه۱: Δf_1، تغییرات فرکانس ریزشبکه۲: Δf_2، تغییرات توان خـط ارتباطی: ΔP_{tie} ، تابع هدف: J و زمان شبیه‌سازی:t است.

قیود بهینه سازی:

$$Kp_{\min} \le Kp \le Kp_{\max} \qquad (۳۰)$$

$$Ki_{\min} \le Ki \le Ki_{\max} \qquad (۳۱)$$

1. Hybrid Gray wolf-Pattern search

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-10]

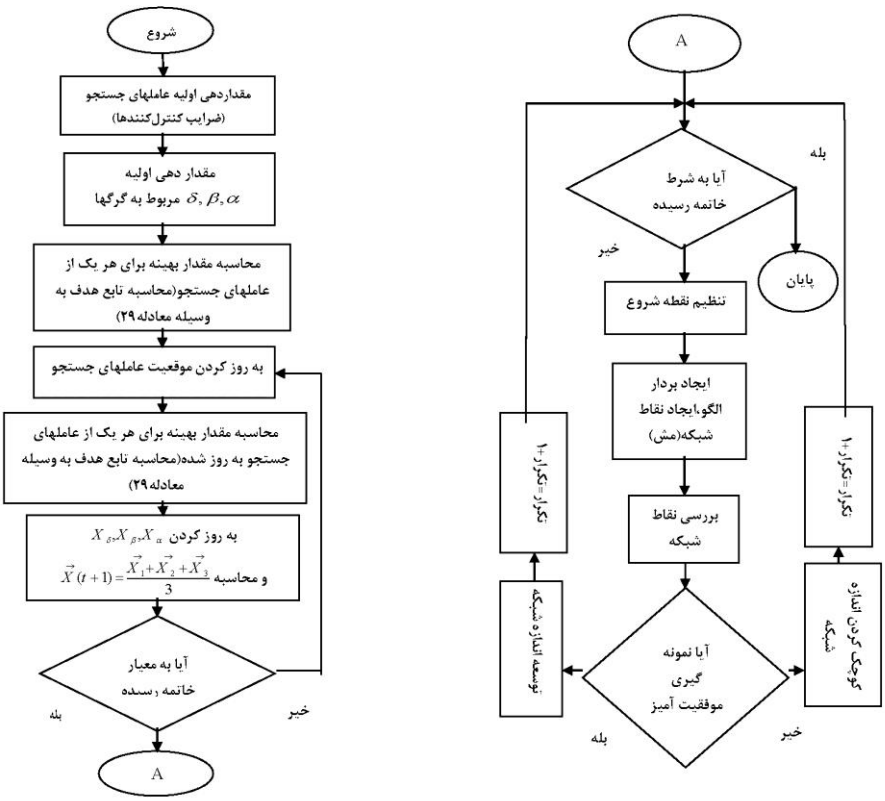
$$Kd_{\min} \le Kd \le Kd_{\max} \quad (۳۲)$$

$$0 \le \lambda \le 1 \quad (۳۳)$$

$$0 \le \mu \le 1 \quad (۳۴)$$

بهینه کردن ضرایب کنترلر PID مرتبه کسری با استفاده از الگوریتم ترکیبی گـرگ خاکسـتری-جستجوی الگوHGWO-PS در مسئله LFC مطابق با فلوچارت شکل (۹) انجام شـده اسـت. شـکل (۱۰) ساختار کنترلی دو ریز شبکه را نشان می‌دهد، که در هر ریز شبکه از کنترلر PID مرتبه کسری به عنوان کنترل‌کننده استفاده شده و با اسـتفاده از الگـوریتم ترکیبـی جدیـدگرگ خاکسـتری-جسـتجوی الگو[۱](HGWO-PS) ضرایب آنها بهینه می‌شود. سیگنال کنترلری هر یک از ریزشبکه‌ها توسط رابطه ۳۴ و۳۵ به دست می‌آید.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-10]



شکل۹. فلوچارت الگوریتم ترکیبی جدید پیشنهادی **HGWO-PS**

$$U_1 = (K_{p1} + \frac{K_{i1}}{S^{\lambda 1}} + K_{d1} S^{\mu 1})(ACE1) \quad (۳۵)$$

$$U_2 = (K_{p2} + \frac{K_{i2}}{S^{\lambda 2}} + K_{d2} S^{\mu 2})(ACE2) \quad (۳۶)$$

U1 سیگنال کنترلی ریزشبکه اول می‌باشد و $U2$ سیگنال کنترلی ریزشبکه دوم می‌باشد. $ACE2, ACE1$ به ترتیب نیز خطای کنترل تکمیلی ریزشبکه اول و ریزشبکه دوم هستند.

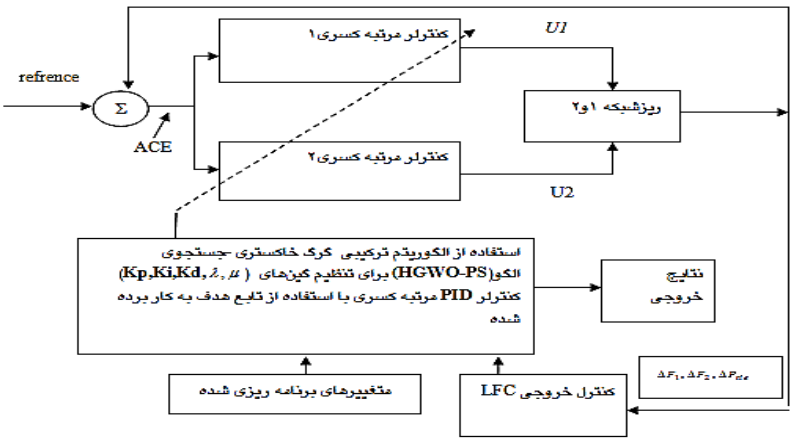
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-10]

٤. شبیه‌سازی و نتایج

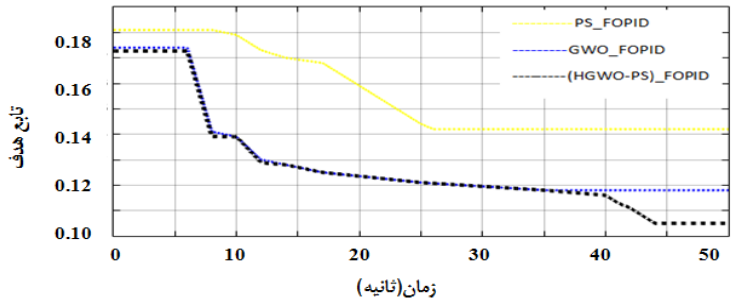
شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار متلب انجام شده است. مقادیر در نظر گرفته شده برای پارامترهای دو ریزشبکه توسط جدول۱ نشان داده شده است، مدت زمان اجرای شبیه سازی ۲۰ ثانیه است. تعداد اولیه جمعیت گرگ‌های خاکستری ۳۰ می‌باشد. فرآیند بهینه سازی در ۵۰ تکرار برای الگوریتم PS، GWO، HGWO-PS انجام داده‌ایم. در الگوریتم PS و الگوریتم GWO مطابق شکل (۱۱) همگرایی در ۳۰–۳۵ تکرار حاصل شده است. بنابراین برای الگوریتم ترکیبی جدید پیشنهادی ماکزیمم تعداد تکرار را در ۵۰ تکرار قرار می‌دهیم. در الگوریتم ترکیبی پیشنهادی جدید برای حل مسئله از GWO در ۴۰ تکرار استفاده می‌کنیم و از الگوریتم PS برای به دست آوردن بهترین راه حل در ۱۰ تکرار آخر استفاده می‌شود. برای الگوریتم PS فاکتور توسعه ۲ ، فاکتور کوچک کردن (انقباض) ۰/۵، ماکزیمم تعداد تکرار ۱۰ در نظر گرفته شده است. محدوده در نظر گرفته شده برای پارامترهای دو کنترلر PID مرتبه کسری و الگوریتم استفاده شده در جدول ۲ آورده شده است. ضریب سنکرونیزم بین دو ریزشبکهPs=۱.۵ pu می‌باشد.

سناریو۱: توان توربین بادی و سلول خورشیدی در ریزشبکه۱به ترتیب ۰.۴pu و ۰.۲pu می باشد، و در ریزشبکه ۲ نیز به ترتیب ۰.۳pu و ۰.۲pu است. بار در هر دو ریزشبکه ۰.۷pu است. در طول شبیه سازی بار ریزشبکه اول از ۰.۷pu به ۰.۸ pu در t=0 تغییر شکل ۱۲ تغییرات فرکانس ریزشبکه ۱ با تغییر بار را نشان می‌دهد که کنترل کننده PID مرتبه کسری بهینه شده با الگوریتم ترکیبی HGWO-PS (گرگ خاکستری–جستجوی الگو) نسبت به کنترل کننده PID مرتبه کسری بهینه شده با الگوریتم گرگ خاکستری و نیز کنترل کننده PID که ضرایب آن توسط روش زیگلر– نیکولز به دست آمده دارای سرعت پاسخ بهتر، ریپل کمتر و در نتیجه عملکرد مطلوب تر در برابر اغتشاشات بار می‌باشد. شکل۱۳ نیز تغییرات فرکانس ریزشبکه ۲را نشان می‌دهد.

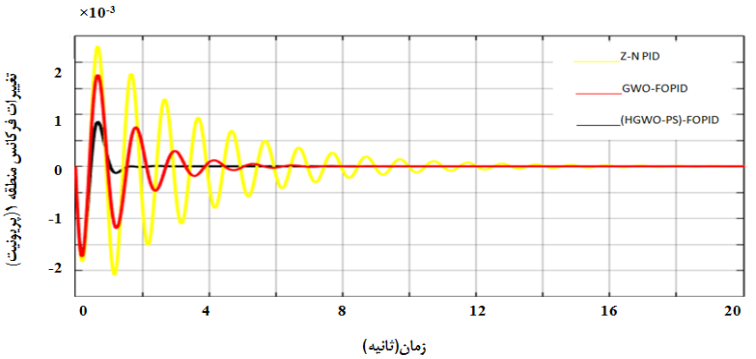
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-10]



شکل ۱۰. ساختار کنترلی دو ریز شبکه

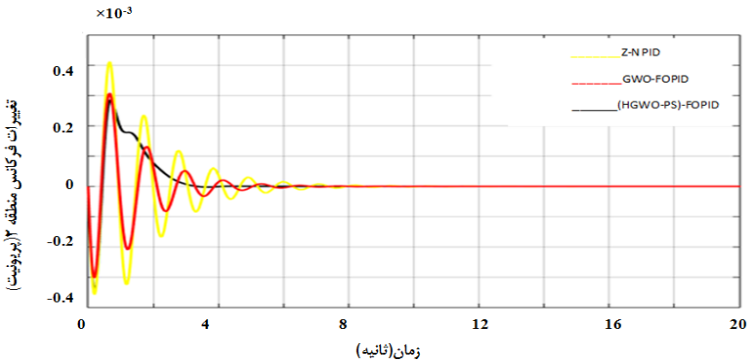


شکل۱۱. همگرایی الگوریتم‌های مختلف در حل مسئله



شکل۱۲. تغییرات فرکانس ریزشبکه۱

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-10]



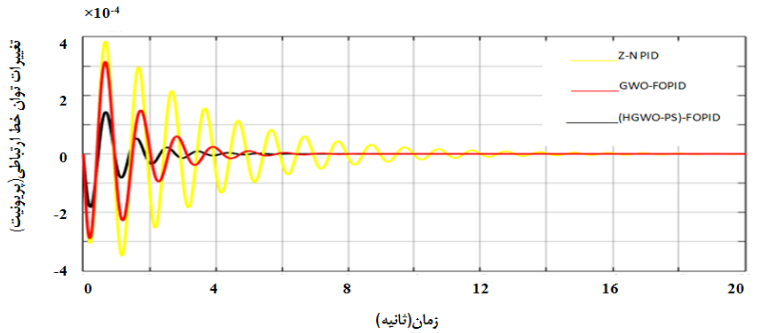
شکل۱۳. تغییرات فرکانس ریزشبکه ۲

جدول۱. مشخصات دو ریزشبکه[۲]

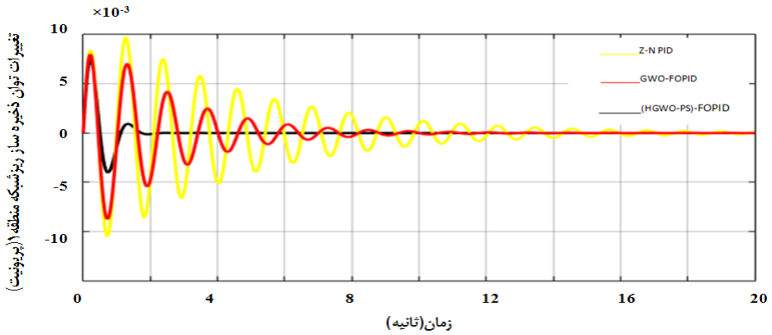
پارامتر	تعریف	ریزشبکه۱	ریزشبکه ۲
R(pu)	مشخصه سرعت	./۰۵	۰/۰۴
Tg(s)	ثابت‌زمانی گاورنر	./۱	./۱
Tt(s)	ثابت زمانی توربین	۰/۴	۰/۴
Tpv(s)	ثابت زمانی سلول خورشیدی	۱/۵	۱/۴
Tess(s)	ثابت زمانی سیستم ذخیره	./۱	./۱
Kess	بهره سیستم ذخیره	-۱۰	-۸
B(pu)	فاکتور بایاس	۱۰	۱۲/۵
M(pu)	ثابت اینرسی	۰/۸	./۷
D(pu)	ثابت میرایی	۰/۰۲	۰/۰۳
Ki	بهره‌انتگرال گیر	۵	۷

شکل ۱۴ تغییرات توان خط ارتباطی بین دو ریز شبکه را نشان می‌دهد. شکل۱۵ و۱۶ به ترتیب تغییرات توان ذخیره‌سازهای ریزشبکه ۱و۲ با تغییر بار ریزشبکه ۱ از۰.۷ puبه۰.۸ pu در t=0 می‌باشد، که در تمامی این شکل‌ها روش پیشنهادی نسبت به بقیه روش‌ها دارای عملکردی مطلوب تر می‌باشد. در ادامه کارایی روش پیشنهادی در مقابل تغییر پارامترها دو ریز شبکه مورد بررسی قرار گرفته است.

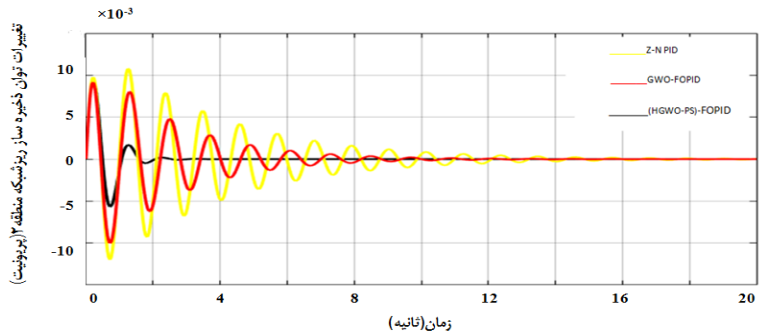
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-10]



شکل۱۴. تغییرات توان خط ارتباطی بین دو ریزشبکه



شکل۱۵. تغییرات توان ذخیره ساز ریزشبکه۱



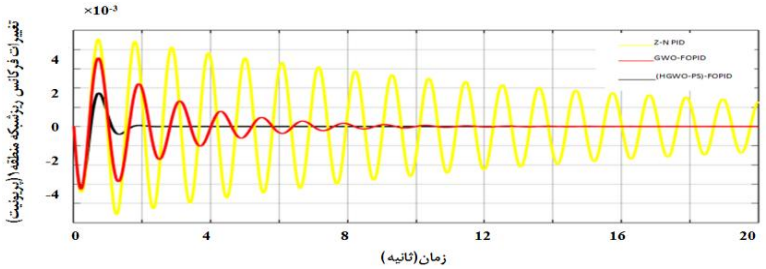
شکل۱۶. تغییرات توان ذخیره ساز ریزشبکه۲

مطابق شکل (۱۲) تا شکل (۱۶) که تغییرات فرکانس مناطق (۱ و۲) و تغییرات توان خط ارتباطی و تغییرات توان ذخیره ساز ریزشبکه ناحیه ۱ و ۲ بر اثر تغییر بار در منابع تولید پراکنده ریزشبکه اول بر اساس کنترل کننده‌های متفاوت و کنترل کننده‌های پیشنهادی (کنترل کننده FOPID مرتبه کسری

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-10]

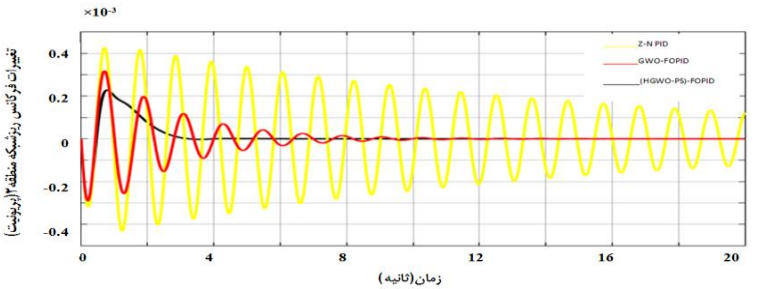
که پارامترهای آن توسط الگوریتم ترکیبی گرگ خاکستری –جستجوی الگو بهینه شده) را نشان می‌دهد. در شکل (۱۲) بر اثر تغییر توان منابع تولید پراکنده فرکانس ناحیه ۱ افت کرده و توسط کنترل کننده پیشنهادی که عملکرد موثری تری در کنترل خطای تکمیلی داشته و تغییرات را کنترل کرده و در زمان کمتری و ریپل کمتری توانسته میرا شود در شکل (۱۳) بر اثر تغییر توان منابع تولید پراکنده فرکانس ناحیه ۲ افزایش یافته و توسط کنترل کننده پیشنهادی که عملکرد موثری تری در کنترل خطای تکمیلی داشته و تغییرات را کنترل کرده و در زمان کمتری و ریپل کمتری توانسته میرا شود و همچنین فراجهش و فروجهش نیز کاهش پیدا کرده است. در شکل (۱۴) تغییرات توان خط ارتباطی بین دو ریزشبکه که ابتدا افت کرده است و سپس توسط کنترل کننده پیشنهادی در زمان کمتر، ریپل کمتر، زمان فراجهش و فروجهش کمتر میرا شده است. شکل (۱۵) و (۱۶) به ترتیب تغییرات توان ذخیره ساز منطقه (۱) و (۲) که ابتدا افزایش یافته و در زمان کمتر، ریپل کمتر و زمان فراجهش و فروجهش کمتری میرا شده است.

سناریو۲: شکل۱۷ تغییرات فرکانس ریزشبکه با درنظر گرفتن این که بار ریزشبکه اول از ۷pu/. به ۸pu/. در زمان$t=0$ تغییر می‌کند و با در نظر گرفتن عدم قطعیت پارمترها برای دو ریزشبکه به میزان ۲۰/. درصد افزایش شبیه‌سازی شده است، مشاهده می‌شود که الگوریتم ترکیبی HGWO-PS (گرگ خاکستری–جستجوی الگو) در بهینه کردن کنترلر PID مرتبه کسری دارای پاسخ مطلوب تری نسبت به دو روش دیگر می‌باشد. شکل‌های ۱۸و۱۹و۲۰و۲۱ به ترتیب تغییرات فرکانس ریزشبکه ۲، تغییرات توان خط ارتباطی بین دو ریزشبکه، تغییرات توان ذخیره ساز ریزشبکه۱، تغییرات توان ذخیره ساز ریزشبکه۲ را نشان می‌دهند، همان طور که از شکل‌ها مشخص است، استفاده از روش پیشنهادی دارای عملکرد مطلوب تری نسبت به روش‌های دیگر می‌باشد.

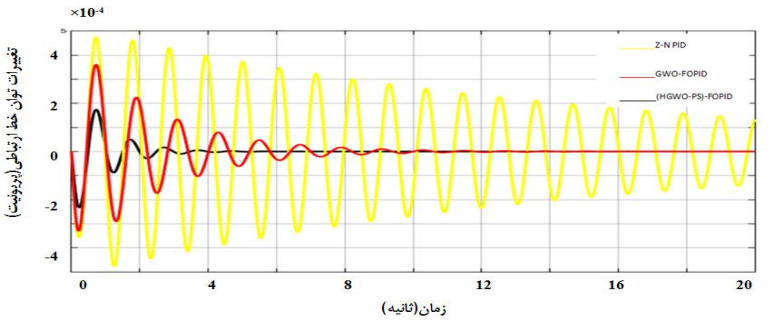


شکل۱۷. تغییرات فرکانس ریزشبکه۱

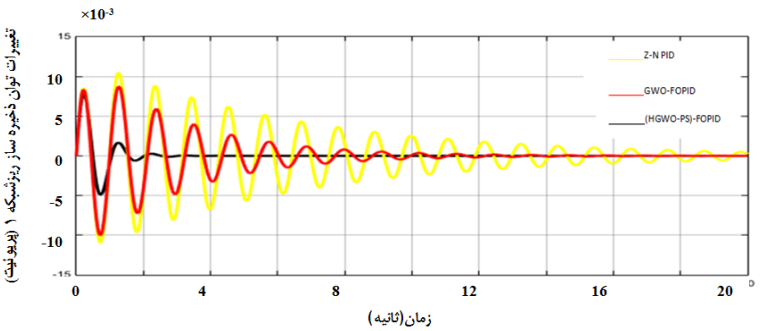
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-10]



شکل۱۸. تغییرات فرکانس ریزشبکه۲

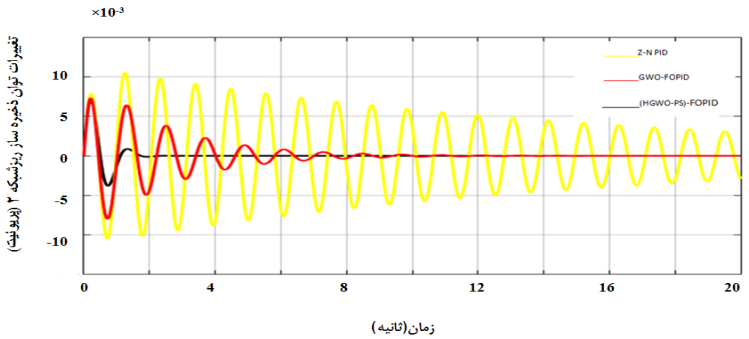


شکل۱۹. تغییرات توان خط ارتباطی بین دو ریزشبکه



شکل۲۰. تغییرات توان ذخیره ساز ریزشبکه۱

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-10]



شکل۲۱. تغییرات توان ذخیره ساز ریزشبکه۲

مطابق شکل (۱۷) تا شکل (۲۱) که تغییرات فرکانس مناطق (۱و۲) و تغییرات توان خط ارتباطی و تغییرات توان ذخیره ساز ریزشبکه ناحیه ۱ و۲ بر اثر تغییر بار در منابع تولید پراکنده ریزشبکه اول بر اساس کنترل کنندهای متفاوت و کنترل کنندهای پیشنهادی (کنترل کننده FOPID مرتبه کسری که پارامترهای آن توسط الگوریتم ترکیبی گرگ خاکستری –جستجوی الگو بهینه شده) و با در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترها را نشان می‌دهد. در شکل (۱۷) بر اثر تغییر توان منابع تولید پراکنده فرکانس ناحیه ۱ افت کرده و توسط کنترل کننده پیشنهادی که عملکرد موثری تری در کنترل خطای تکمیلی داشته و تغییرات را کنترل کرده و در زمان کمتری و ریپل کمتری توانسته میرا شود در شکل (۱۸) بر اثر تغییر توان منابع تولید پراکنده فرکانس ناحیه ۲ افزایش یافته و توسط کنترل کننده پیشنهادی که عملکرد موثری تری در کنترل خطای تکمیلی داشته و تغییرات را کنترل کرده و در زمان کمتری و ریپل کمتری توانسته میرا شود و همچنین فراجهش و فروجهش نیز کاهش پیدا کرده است. در شکل (۱۹) تغییرات توان خط ارتباطی بین دو ریزشبکه که ابتدا افت کرده است و سپس توسط کنترل کننده پیشنهادی در زمان کمتر، ریپل کمتر، زمان فراجهش و فروجهش کمتر میرا شده است. شکل(۲۰) و (۲۱) به ترتیب تغییرات توان ذخیره ساز منطقه (۱) و(۲) که ابتدا افزایش یافته و در زمان کمتر، ریپل کمتر و زمان فراجهش و فروجهش کمتری میرا شده است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-10]

جدول۲. پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی

n_p(اندازه جمعیت)	30
Kp1,2	[0,10]
Ki1,2	[0,10]
Ki1,2	[0,10]
λ	[0,1]
μ	[0,1]

جدول ۳ و۴ مربوط ضرایب کنترل کننده PID مرتبه کسری با استفاده از الگوریتم‌های مختلف مربوط به سناریو۱ را نشان می‌دهد، که با توجه به نتایج عملکرد کنترل کننده پیشنهادی یعنی کنترل کننده FOPID بهینه شده با الگوریتم ترکیبی گرگ خاکستری –جستجوی الگو نسبت به کنترل کننده FOPID بهینه شده با الگوریتم گرگ خاکستری و کنترل کننده PID که ضرایب آن با استفاده از روش زیگلر–نیکولز به دست آمده است از لحاظ سرعت پاسخ، زمان نشست، کاهش ریپل و کاهش فراجهش و فروجهش دارای عملکرد مطلوب تری می‌باشد.

جدول۳. ضرایب کنترلرهای دو ریزشبکه با استفاده از الگوریتم‌های مختلف مربوط به سناریو۱

روش‌های استفاده شده	پارامترهای کنترلر ریزشبکه۱					پارامترهای کنترل ریزشبکه۲					زمان نشست(ثانیه)			تابع هدف
	KP1	Ki1	Kd1	$\lambda 1$	$\mu 1$	KP2	Ki2	Kd2	$\lambda 2$	$\mu 2$	Δf 1	Δf 2	$\Delta Ptie$	(j)
(GWO_PS)-FOPID	۱/۸۲۱	۱/۵۳۲	۱/۳۱۲	۰/۹۹۸	۰/۹۶۱	۰/۹۲۵	۳/۴۷۲	۱/۸۱۰	۰/۷۶۲	/۸۶۱	۱/۸	۲/۵	۶/۰۵	/۱۰۵
GWO-FOPID	۱/۶۲۵	۲/۷۴۴	۱/۰۰۸	۰/۹۶۵	۰/۹۴۱	۱/۱۰۶	۲/۹۵۱	۱/۷۶۲	۰/۸۶۹	/۸۷۱	۶/۲۳	۶/۲۱	۷/۳	/۱۵۲
Z-N PID	----	۵	----	----	----	----	۷	----	----	----	۱۴/۳	۱۴/۱	۱۵/۸	---

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-10]

جدول۴. ادامه پارامترهای مربوط به جدول۳(سناریو۱)

نوع الگوریتم	Δf 1		Δf 2		$\Delta Ptie$	
	فراجهش	فروجهش	فراجهش	فروجهش	فراجهش	فروجهش
GWO_PS-FOPID	۰/۰۰۰۸	−۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۰۲۱	−۰/۰۰۰۲۹	۰/۰۰۰۱۵	−۰/۰۰۰۱۷
GWO-FOPID	۰/۰۰۱۷	−۰/۰۰۱۷	۰/۰۰۰۳۱	−۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۳۲	−۰/۰۰۰۲۹
Z-N PID	۰/۰۰۲۲	−۰/۰۰۲۱	۰/۰۰۰۴۲	−۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۰۳۸	−۰/۰۰۰۳۹

جدول۵. ضرایب کنترلرهای دو ریزشبکه با استفاده از الگوریتم‌های مختلف مربوط به سناریو۲

تابع هدف	زمان نشست(ثانیه)			پارامترهای کنترل ریزشبکه۲					پارامترهای کنترلر ریزشبکه۱					روشهای استفاده شده
(**j**)	$\Delta Ptie$	Δf 2	Δf 1	$\mu 2$	$\lambda 2$	Kd2	Ki2	KP2	$\mu 1$	$\lambda 1$	Kd1	Ki1	KP1	
/۱۲۹	۶/۱۲	۳	۲/۱	/۷۷۳	۰/۸۵۲	۱/۷۵۴	۳/۱۷۲	۰/۹۳۱	۰/۹۱۱	۰/۹۶۵	۱/۵۱۲	۱/۵۴۶	۱/۸۳۵	GWO_PS-FOPID
/۱۶۴	۱۲/۳	۱۱/۵	۱۰/۶	/۹۷۷	۰/۶۳۹	۱/۷۶۲	۲/۲۱۹	۱/۱۰۹	۰/۸۹۶	۰/۸۶۵	۱/۲۱۱	۲/۸۸۴	۱/۴۱۳	GWO-FOPID
---	---	---	---	---	---	---	۷	---	---	---	---	۵	---	Z-N PID

جدول۶. ادامه پارامترهای مربوط به جدول۵(سناریو۲)

نوع الگوریتم	Δf 1		Δf 2		$\Delta Ptie$	
	فراجهش	فروجهش	فراجهش	فروجهش	فراجهش	فروجهش
GWO_PS-FOPID	۰/۰۰۰۸۳	−۰/۰۰۱۶۵	۰/۰۰۰۲۳	−۰/۰۰۰۲۹	۰/۰۰۰۱۸	−۰/۰۰۰۲۲
GWO-FOPID	۰/۰۰۱۷۵	−۰/۰۰۱۷	۰/۰۰۰۳۳	−۰/۰۰۰۲۹	۰/۰۰۰۳۶	−۰/۰۰۰۳۳
Z-N PID	۰/۰۰۲۶	−۰/۰۰۲۴	۰/۰۰۰۴۲	−۰/۰۰۰۴۴	۰/۰۰۰۴۸	−۰/۰۰۰۴۸

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-10]

جدول ۵ و۶ مربوط ضرایب کنترل کننده PID مرتبه کسری با استفاده از الگوریتم‌های مختلف مربوط به سناریو۲ را نشان می‌دهد که مربوط به عدم قطعیت پارامترها است، که با توجه به نتایج عملکرد کنترل کننده پیشنهادی یعنی کنترل کننده FOPID بهینه شده با الگوریتم ترکیبی گرگ خاکستری –جستجوی الگو نسبت به کنترل کننده FOPID بهینه شده با الگوریتم گرگ خاکستری و کنترل کننده PID که ضرایب آن با استفاده از روش زیگلر–نیکولز به دست آمده است از لحاظ سرعت پاسخ، زمان نشست، کاهش ریپل و کاهش فراجهش و فروجهش دارای عملکرد مطلوب تری می‌باشد.

۵. نتیجه گیری

در این مقاله ابتدا مروری بر دلایل ظهور تولیدکننده‌های پراکنده و ریزمنابع در سیستم قدرت مدرن شد. و در ادامه ساختار ریزشبکه چند منطقه‌ای مورد بحث قرار گرفت که موضوع انتقال توان بین دو ریزشبکه موضوعی جدید است. همچنین در این مقاله تلاش شده که مشکلات کنترل‌کننده‌های مرسوم برطرف شود. همان گونه که از شبیه سازها مشخص است کنترلرPID مرتبه کسری بهینه شده با الگوریتم ترکیبی HGWO-PS(گرگ خاکستری–جستجو) الگو در مقایسه با سایر کنترل‌کننده‌های مرسوم در مقایسه با سایر کنترل‌کننده‌های مرسوم دارای عملکرد مطلوب تر نسبت به اغتشاشات وارد بر ریزشبکه و دارای توانمندی بیشتری نسبت به تغییر پارامترهای ریزشبکه است. در ادامه کار می‌توان مدل اجزای ریزشبکه را به صورت غیر خطی در نظر گرفت و پژوهشهای مورد نظر را بر روی آن مدل انجام داد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-10]

منابع

[۱] سیفی، حسین و محمد حسن مرادی (۱۳۹۴)،"طراحی سیستم مدیریت انرژی در یک ریزشبکه با حضور واحدهای تجدیدپذیر،"، دوره۱۸، شماره۳.

[۲] مرادی، محمد حسن و علی خندانی (۱۳۹۴)، "ارزیابی اقتصادی برای یک ریزشبکه مستقل شامل منابع انرژی پراکنده با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان"، نشریه انرژی ایران، دوره۱۵، شماره۲.

[3] Abedinia O., Amjadi N., Ghasemi A. and H. Shayeghi (2013),"Multi-stage fuzzy load frequency control based on Multi objective harmony search algorithm in deregulated environment,"journal of operation and Aautomation in Power Engineering,vol. 1,no.1,pp.63-73.

[4] Azadani H.N. and R. Torkzade (2013),"Design of GA optimizes fuzzy logic-based PID controller for the two area non-reheat thermal power system,"13th Iranian Conference on fuzzy Systems(IFSC),pp.1-6.

[5] Bevrani H, Feizi MR, Ataee S. (2016), Robust Frequency Control in anIslanded Microgrid: and-Synthesis Approaches. IEEE Transactionson Smart Grid.

[6] Chang C.S., Fu W. and F.Wen (2007),"load frequency control using genetic-algorithm based fuzzy gain scheduling of PI controllers,"Electric Machines & Power systems, vol.26,no.1,pp.39-52.

[7] Das D.C., Roy A.K. and N.Sinha (2011), "PSO based frequency controller for wind- solar-diesel hybrid energy generation /energy storage system," in Proceedings of the IEEE International Conference on Energy, Automation and Signal, pp.1-6.

[8] Dong jing Lee and Li Wang (2008),"Small-signal stability analysis of an autonomous hybrid renewable energy power generation /energy storage system part-I:Time-domain simulations,"IEEE Trans. Energy conversion, vol.23, no.1, pp.311-320.

[9] El-Fergany A. A. and M. A. El-Hameed (2017), "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, 2 16.

[10] Frack P.F., Pedro E., Watanabe E.H., Doncker R.W. and S. Hanno (2014), "Control strategy design for frequency control in automous smart microgrids,"Procedings of the 5th IEEE International Symposium on power Electronics for Distributed Generation Systems, pp .1-8.

[11] Guerrero J.M., Vasquez J.C., Matas J., de Vicuna L.G., and M. Castilla (2011), "Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids-a general approach toward standardization," IEEE Trans. On Industrial Electronics, vol.58, no.1, pp.158-172.

[12] Gupta E. and A. saxena (2015), "Robust generation control strategy based on grey wolf optimizer", j.Electr.Syst, vol.11, pp1548-1559.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-10]

[13] kangarlu M.f. and M.A. Pahlavani (2014),"Cascaded multilevel converter based superconducting magnetic energy Storage system for frequency control,"Energy, vol.70,pp.504-513.
[14] Khooban MH., Niknam T., Blaabjerg F., Davari P. and T. Dragicevic (2016), Arobust adaptive load frequency control for micro-grids. ISAtransactions.
[15] Khooban, Taher Niknam, Mokhtar Shasadeghi, Tomislav Dragicevic, Frede Blaabjerg (2018), "Load Frequency Control in Microgrid Based on a Stochastic Noninteger Controller," IEEE Transactions on Sustainable Energy , vol.9,no.1 .pp. 853-861.
[16] Lee D.J. and L. Wang (2008),"Small-Signal Stability Analysis of an autonomous hybrid renewable energy power generation /energy storage system part-I:Time-domain simulations,"IEEE Trans. Energy conversion, vol.23, no.1, pp.311-320.
[17] Mahdian Dehkordi N., Sadati N. and M. Hamzeh (2018), "Robust tuning of transient droop gains based on Kharitonov's stability theorem in droop – controlled microgrids," IET Generation, Transmission & Distribution, vol.12, pp.3495-3501.
[18] Mirjalili S., M.Mirjalili S. and A. Lewis (2014), greywolf optimizer, Adv. Eng, softw. vol.69 pp.46-61.
[19] Muwaffaq IA. (2010), load frequency control and automatic generation control using fractional-order controllers.Electr Eng: 357-68.
[20] Nageswara Rao R. and P. Rama Krishna Reddy (2011), "PSO based tuning of PID controller for a load frequency control in two area power system", IJERA. ISSN: 2248-9622.2011, Vol. 1, Issue 3, pp. 1499–1505.
[21] Othman AK, Ahmad AN, AlSharidah ME, Almekhaizim HA. (2013), A hybrid real coded genetic Algorithm-pattern search approach for selective harmonic elimination of PWM AC/AC voltage controller.Int J Electr Power Energy Syst;44: 123-33.
[22] Petras I., Podlubny I. and P. Oleary (2002), "Analogue Realization of fractional Order controllers ,"fakulta BERG,TU Kosice.
[23] Podlubny I. "Fractional-order systems and $PI^{\lambda}D^{\mu}$ -controllers (1999),"IEEE Transactions on Automatic Control, 44(1): 208-214.
[24] Puttgen H. and Mac gregor (2003),"Distributed generation:semantic type the down of a new era?,"IEEE Trans.on power and Energy,vol.1,no.1,pp22-29.
[25] Ray P.K., Mohanty S.R., and N. Kishor (2011),"Proportional integral controller based small-signal analysis of hybrid distributed generation systems,"Energy Conversion and management,vol.52,no.4.pp.1943-1954.
[26] Saadat H. (1999), " Power System Analysis", New York, USA:McGraw-Hill.
[27] Senjyu T., Nakaji T., Uezato K. and T. Funabashi (2005), "A hybrid system using alternative energy facilities in isolated island,"IEEE Trans.Energy Conversion ,vol.20,no.2,pp.406-414.
[28] Singh K., Singh C. and N.K. yadav (2013),"Load frequency control in microgrid,"International journal in Computer and Communication Technology,vol 2,no.9 ,pp.680-684.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-10]

[29] Thongchart Kerdphol, Fathin Saifur Rahman, Yasunori Mitani, Masayuki Watanabe, Sinan Küfeoğlu (2018), "RobustVirtual Inertia Control of an Islanded Microgrid Considering High Penetration of Renewable Energy," IEEE Journals & Magazines, vol.6,no.2, pp.625-636.

[30] Vachirasricirikul S. and Ngmroo I. "Robust LFC in a smart grid with wind power peneration by coordinated V2G control and frequency controller,"IEEE Transaction on Smart Grid,vol.5,no.1,pp.371-380,2014.

[31] Verma A.K., Gooi H.B., Ukil A., Tummuru N.R. and S.K. Kollimalla (2016), "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.

[32] Yao Sun, Guangze Shi, Xing Li , Wenbin Yuan, Mei Su ; Hua Han, Xiaochao Hou (2018), "An f-P/Q Droop Control in Cascaded-Type Microgrid," IEEE Transactions on Power Systems, vol.33, no.1,pp1136-1138.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-10]