

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

فرهاد امیری،^{*} محمد حسن مرادی^۱

چکیده

تاریخ دریافت:
۱۳۹۵/۱۱/۲۶

تاریخ پذیرش:
۱۳۹۶/۱۰/۲۴

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

با افزایش تعداد ریز شبکه ها بر میزان پیچیدگی و غیر خطی بودن سیستم قدرت افزوده شده است و کنترل کننده های مرسوم کارایی مناسبی در بازه وسیعی از نقاط کار نشان نمی دهند. در این مقاله از کنترلر تناسبی-انتگرالی-مشتق گیر مرتبه کسری بهینه شده با الگوریتم ترکیبی گرگ خاکستری-جستجوی الگو برای کنترل فرکانس هر یک از مناطق ریز شبکه و نیز کنترل توان بین مناطق متصل به هم استفاده شده است به طوری که عدم قطعیت پارامترهای ریز شبکه ها در نظر گرفته شده است. کنترل کننده پیشنهادی در حلقه ثانویه هر یک ریز شبکه ها قرار داده شده است، عملکرد مناسب و مقاوم در برابر عدم قطعیت پارامترهای ریز شبکه ها 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 نظر کاهش زمان نشست، کاهش فراجهش و فروجهش در مقایسه با سایر کنترل کنندها به اثبات رسیده است.

۱. دانشجوی دکترا دانشکده مهندسی برق، دانشگاه بولی سینا
۲. استاد دانشگاه دانشگاه بولی سینا (تویینده مسئول)

f.amiri94@basu.ac.ir

mh_moradi@yahoo.co.uk

۱. مقدمه

بالافزایش 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 گزینه‌های جدید و مناسب به سیستم‌های قدرت مدرن معرفی شده‌اند، محمد حسن مرادی و همکاران به طراحی سیستم مدیریت انرژی در یک ریز شبکه با حضور واحدهای تجدیدپذیر پرداختند^[۲]. خوبان و همکاران به بررسی منابع تولید پراکنده پرداخته‌اند، 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 آن‌ها 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 و بارهای محلی به صورت مجتمع و یکپارچه، در سال ۱۹۹۸ توسعه موسسه^۱ (CERT) مفهوم ریز شبکه‌ها^۲ (MG) برای اولین بار در سیستم‌های قدرت مدرن معرفی گردید. بر اساس این معرفی، ریز شبکه‌ها، شبکه‌های قدرت کوچکی بوده که از چندین منبع تولید پراکنده و بارهای محلی تشکیل شده‌اند. ریز شبکه‌ها در حالت عادی به شبکه سراسری متصل بوده و در حالت اضطراری، بنا به رخداد اختشاش‌های سنگین از شبکه اصلی جدا شده و می‌توانند

1. Consortium for Electric Reliability Technology Solutions
2. Microgrid

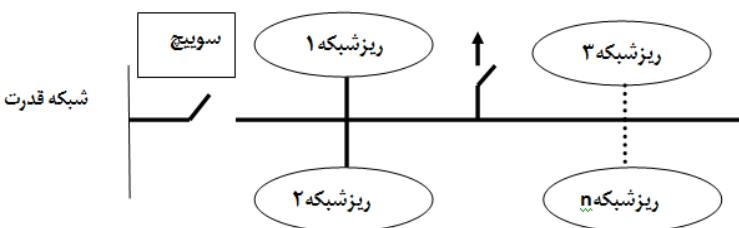
بارهای اساسی و مهم محلی را به تنها بی تقدیم کنند، [۲۶]. ورما و همکاران به بررسی افزایش تعداد ریزشبکه‌ها در سیستم قدرت پرداخته اند، که سبب تغییر قوانین در این سیستم‌ها شده و باعث می‌شوند که منابع تولید در کل سیستم پخش شوند. همین مسئله سبب می‌شود که بر میزان پیچیدگی و غیر خطی بودن شبکه‌های قدرت افزوده شده و در نتیجه پاسخ مناسب کنترل کننده‌های کلاسیک را مثل قبل شاهد نباشیم. کنترل کننده‌های تناسبی-انتگرالی بیشترین کاربرد را در سیستم قدرت دارا می‌باشند، چون که دارای ساختار ساده و مفروض به صرفه هستند و در سیستم قدرت به این کنترل کننده‌ها بیش از هر کنترل کننده دیگر اعتماد وجود دارد. اما مشکل این کنترل کننده‌ها این بوده که ضرایب کنترل کننده بر اساس شرایط کار نامی و نقطه کار سیستم توسط تکنسین‌ها برای یکبار تنظیم می‌شود. اما به دلیل وقوع اختشاش شرایط خطی سیستم عوض شود، مقادیر در نظر گرفته شده برای این کنترل کننده‌ها 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، [۷، ۲۵]. موفق به بررسی یکی از جدیدترین کنترل کننده به کار برد شده و مقاوم کنترل کننده 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 [۲۸، ۲۵، ۱۳]. بیورانی و همکاران از کنترل کننده 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 و همکاران به بررسی سیستم‌های ذخیره انرژی، نقش مهمی در پایداری فرکانسی و تعادل میان تولید و مصرف ریزشبکه‌ها ایفا می‌کنند، پرداختند [۱۵]. این سیستم‌ها در موقع کاهش بار شروع به ذخیره انرژی کرده و در موقعی 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 کنترل کننده‌ها بر اساس مشخصه افت فرکانس-توان هر یک از منابع تولید پراکنده تنظیم شده و بر روی ادوات الکترونیک قدرت آن‌ها اعمال شده‌اند [۳۲، ۱۷]. ال حمد و همکاران اثر تاخیر زمانی بر روی کنترل فرکانس-بار ریزشبکه را مورد بررسی قرار داده‌اند [۱۲].

چنگ و همکاران از کنترل کننده فازی به عنوان کنترل کننده ریز شبکه استفاده کرده اند [۴۵, ۳]. در این پژوهش‌ها ریز شبکه ایزووله در نظر گرفته شده است و از انتقال توان بین ریز شبکه‌ها بحث نشده است. سرعت پاسخ در حالت نرمال ریز شبکه در مقابل اغتشاشات بار و عدم قطعیت پارامترها در روش‌های قبلی خیلی مطلوب نیست. در این مقاله مدل ریز شبکه‌ها کامل‌تر است و توان ریز شبکه بیشتر شده است به این دلیل که به جای استفاده از دیزل ژنراتور از ژنراتور سنکرون استفاده و مدل‌سازی شده است و همچنین از کنترل PID مرتبه کسری بهینه شده با الگوریتم ترکیبی جدید گرگ خاکستری-جستجو (HGWO-PS) برای کنترل فرکانس ریز شبکه‌ها و همچنین توان بین مناطق ریز شبکه‌ها استفاده شده است. در این مقاله هر کنترل کننده نوآوری روش پیشنهادی این مقاله نسبت به روش‌های مرسوم عملکرد مناسب در زمان نشست و کاهش فراجهش و فرووجهش و کاهش ریپل و همچنین مقاوم بودن روش پیشنهادی نسبت به عدم قطعیت پارامترها است.

۲. مدل‌سازی اجزا

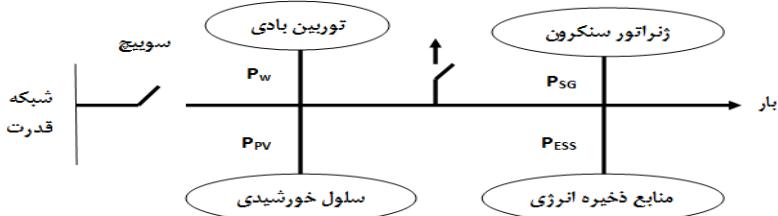
بلوک دیاگرام ریز شبکه چند منطقه‌ای

ریز شبکه شامل توربین بادی، سلول خورشیدی، ژنراتور، منبع ذخیره انرژی و... می‌باشد. شکل (۱) نشان دهنده اتصال چند ریز شبکه در حالت ایزووله می‌باشد.



شکل ۱. بلوک دیاگرام ریز شبکه چند منطقه‌ای [۲]

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



شکل ۲. اجزای یک ریز شبکه [۲]

ژنراتور سنکرون^۱ (SG)

ژنراتور سنکرون به طور مستقل برای تامین کسری از توان بار و تعادل بین تقاضا و مصرف کار می‌کند. در ریز شبکه‌های کوچک معمولاً از دیزل ژنراتور استفاده می‌شود، اما در ریز شبکه‌های بزرگ از ژنراتور سنکرون استفاده می‌شود. ژنراتور سنکرون در نظر گرفته شده در این مقاله شامل سیستم گاورنر و توربین K_T می‌باشد.تابع تبدیل توربین و گاورنر توسط رابطه‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است.[۱۸]

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

$$G_T(s) = \frac{\Delta P_m(s)}{\Delta P_v(s)} = \frac{K_T}{1 + sT_T} \quad (2)$$

T_g به ترتیب ثابت زمانی توربین و گاورنر هستند، K_T 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.[۲۸، ۳۰].

1. Synchronous Generator

توربین بادی^۱ (WT)

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

$$P_m = C_\rho P_w \quad (۳)$$

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

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

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

$$\lambda = R_w / V_w \quad (۷)$$

در روابط (۳) تا (۷) که به ترتیب $c_{1,2,3,4,5}$ ضرایب ثابت هستند. (w) توان خروجی توربین:

P_m توان حقیقی توربین بادی: ρ چگالی (kg/m³)، R_w ضریب توان روتور: c_ρ ، زاویه

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} و ثابت زمانی T_{WTG} نشان داده شده است [۱۶].

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

سلول خورشیدی^۳ (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 شده است [۸، ۳۱].

$$P_{PV} = \eta S \phi [1 - .005(T_a + 25)] \quad (9)$$

در رابطه (۹) تابش خورشیدی: ϕ ، (m^۳) 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].

$$G_{PV}(s) = \frac{k_{PV}}{1 + sT_{PV}} \quad (10)$$

سیستم ذخیره انرژی^۱ (ESS)

سیستم ذخیره انرژی نقش مهمی در صنعت برق و ریز شبکه دارد. با پیشرفت سریع در تکنولوژی الکترونیک قدرت، منابع ذخیره انرژی دارای قابلیت کنترل پذیری بهتر و ظرفیت بالاتر شده‌اند.تابع تبدیل سیستم ذخیره انرژی توسط رابطه ۱۱ نشان داده شده است [۲۶، ۸].

$$G_{ESS}(s) = \frac{\Delta P_{ESS}}{\Delta F} = \frac{K_{ESS}}{1 + sT_{ESS}} \quad (11)$$

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

انحراف توان و فرکانس

برای نگه داشتن ریز شبکه در یک کارکرد مانا توان این فرکانس-توان باید حفظ شود، که به وسیله کنترل اجزای مختلف ریز شبکه می‌توان به آن دست پیدا کرد. توان مبادله شده به این وسیله رابطه ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است [۲۷، ۲۶، ۸].

$$P_s = P_{WTG} + P_{PV} + P_{SG} - P_{ESS} \quad (12)$$

$$\Delta P = P_s - P_L \quad (13)$$

در رابطه (۱۳) P_{WTG} : توان توربین بادی، P_{PV} : توان سلول خورشیدی، P_L : توان ژنراتور سنکرون، P_{ESS} : توان سیستم ذخیره انرژی، P_S : مقدار بار، P_{SG} : توان تولیدی و P_{ESS} : توان ژنراتور سنکرون است. در ریز شبکه اگر توان تغییر کند، انحراف فرکانس به وجود می‌آید. تغییرات فرکانس ریز شبکه به وسیله رابطه ۱۴ نشان داده می‌شود [۲۶، ۸].

$$\Delta F = \frac{\Delta P}{k_{SYS}} \quad (14)$$

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

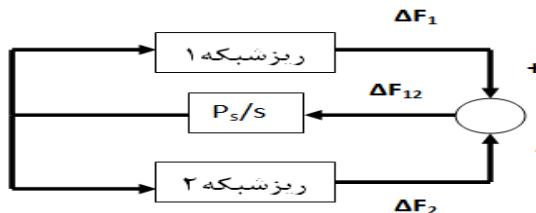
$$G_{SYS}(s) = \frac{1}{k_{SYS}(1+sT_{SYS})} = \frac{1}{D+sM} \quad (15)$$

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

اتصال بین دو ریز شبکه

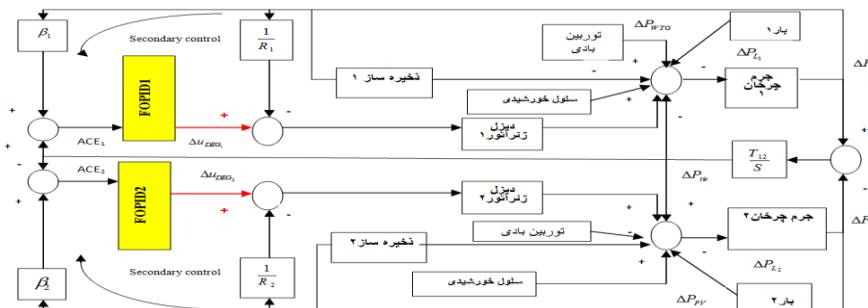
برای بالا بردن قابلیت اطمینان در تامین توان یک ریز شبکه ایزووله می‌تواند از طریق خط ارتباطی به ریز شبکه‌های دیگر متصل شود. هر ریز شبکه به عنوان یک منطقه کنترل در نظر گرفته می‌شود، خط

ارتباطی برای تبادل توان بین مناطق مختلف ریز شبکه استفاده می‌شود. اگر تعادل بین تولید توان و تقاضا در هر ریز شبکه به هم بخورد انحراف فرکانس به وجود می‌آید [۲۵]. در شکل (۳) اتصال بین دو ریز شبکه از طریق خط ارتباطی به هم متصل شده است.



شکل ۳. اتصال دو ریز شبکه به هم [۲]

در شکل ۴ بلوك دیاگرام خطی شده ریز شبکه دو منطقه‌ای رانشان می‌دهد. که هر ریز شبکه شامل توربین بادی، سلول خورشیدی، زنر انور سنکرون، سیستم ذخیره ساز، بار و ... می‌باشد.



شکل ۴. مدل خطی دو ریز شبکه متصل به هم [۷۰.۲]

تغییرات توان خط ارتباطی توسط رابطه ۱۶ نشان داده می‌شود [۲].

$$\Delta P_{tie} = P_s \left(\int \Delta F_1 dt - \int \Delta F_2 dt \right) \quad (16)$$

با گرفتن تبدیل لاپلاس از معادله بالا رابطه ۱۷ به دست می‌آید.

$$G_{tie} = \frac{\Delta P_{tie}(s)}{\Delta F(s)} = \frac{P_s}{S} \quad (17)$$

خطای کنترل تکمیلی (ACE) ریز شبکه آم به وسیله رابطه ۱۸ نشان داده می‌شود [۱].

$$ACE_i = \sum_{j=1}^n \Delta P_{ij} + B_i \Delta F_i \quad (18)$$

B_i فاکتور بایاس ریز شبکه منطقه ۱ و P_s توان خط ارتباطی است.

۳. الگوریتم پیشنهادی

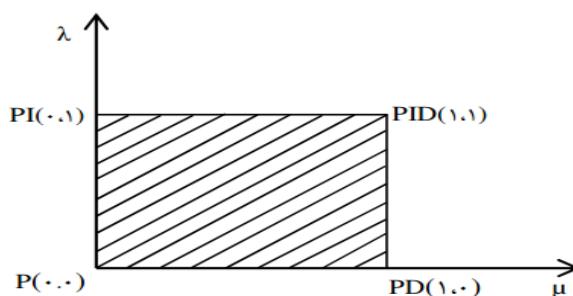
کنترل مرتبه کسری^۱ (FOPID)^۱

رایج ترین نوع کنترلر PID یعنی کنترلر $PI^{\lambda}D^{\mu}$ رایج ترین فرم یک کنترلر مرتبه کسری است. معادله ۱۹ تابع تبدیل کننده PID مرتبه کسری را نشان می‌دهد که شامل یک بهره تناسبی، بهره انтگرال گیر که انتگرال گیر از مرتبه λ و یک 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 $\lambda = 0, \mu = 1$ و $\lambda = 1, \mu = 0$ 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]

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_I}{s^\lambda} + K_D s^\mu \quad (19)$$

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 کسری است.^[۲۲, ۲۳]

1. Fractional order Proportional Integral Derivative



شکل ۵. کنترلر مرتبه کسری [۲۵]

الگوریتم گرگ خاکستری^۱ (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 β, δ, γ در دسته‌های بعدی قرار می‌گیرند. هر کدام از این گرگ‌ها بر اساس این دسته‌بندی، وظایف مشخصی در گروه دارند. نکته جالب تر در مورد این گرگ‌ها، نحوه شکار کردن آن‌ها 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 شده است. در این الگوریتم بهینه‌سازی در هر تکرار بهترین جواب به عنوان α در نظر گرفته می‌شود و دومین و سومین از بهترین جواب‌های به عنوان β, γ در نظر گرفته می‌شوند. بقیه جواب‌ها نیز به عنوان γ در نظر گرفته می‌شود. فرض می‌شود که α, β, γ در بهترین دانش را در مورد محل بالقوه جواب بهینه دارند و این روند، موقعیت دیگر عامل‌های جستجو (w) با توجه به موقعیت α, β, γ بر اساس فرمول بندی ۲۰ تا ۲۵ به روز می‌شوند [۱۸].

$$\vec{D}_\alpha = \left| \vec{C}_1 \cdot \vec{X}_\alpha(t) - \vec{X}(t) \right| \quad (20)$$

1. Gray Wolf Optimizer

$$\vec{D}_\beta = \left| \vec{C}_2 \cdot \vec{X}_\beta(t) - \vec{X}(t) \right| \quad (21)$$

$$\vec{D}_\delta = \left| \vec{C}_3 \cdot \vec{X}_\delta(t) - \vec{X}(t) \right| \quad (22)$$

$$\vec{X}_1 = \vec{X}_\alpha - \vec{A}_1(\vec{D}_\alpha) \quad (23)$$

$$\vec{X}_2 = \vec{X}_\beta - \vec{A}_2(\vec{D}_\beta) \quad (24)$$

$$\vec{X}_3 = \vec{X}_\delta - \vec{A}_3(\vec{D}_\delta) \quad (25)$$

$$\vec{X}(t+1) = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3} \quad (26)$$

که در آن t تکرار فعلی، \vec{C}, \vec{A} بردارهای ضرایب و \vec{X} موقعیت عامل جستجو را نشان می‌دهد.

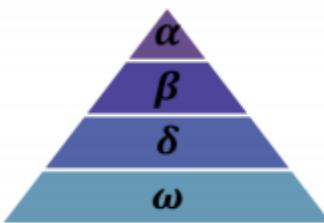
بردارهای \vec{C}, \vec{A} به صورت رابطه ۲۷ و ۲۸ محاسبه می‌شوند [۱۸].

$$\vec{A} = 2\vec{\alpha} \cdot \vec{r}_1 - \vec{a} \quad (27)$$

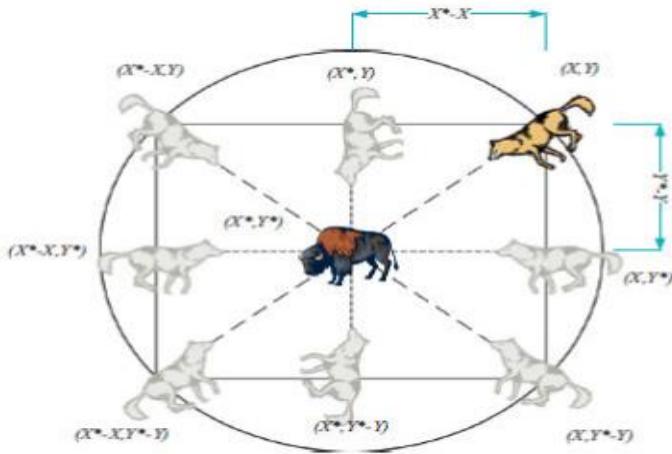
$$\vec{C} = 2\vec{r}_2 \quad (28)$$

که در آن مولفه \vec{a} در طول تکرارها از ۳ 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 کردنتابع الگوریتم به پایان می‌رسد. در شکل (۶) ساختار

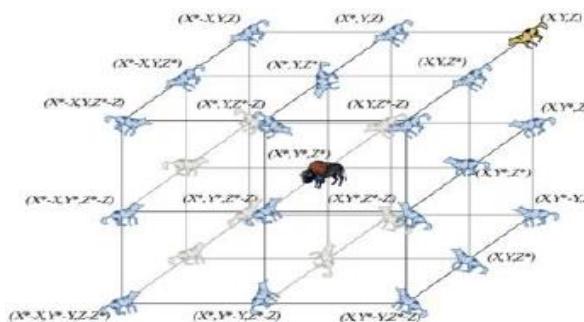
سلسله مراتبی گرگ‌های خاکستری از بالا به پایین را نشان می‌دهد، که سلطه آنها از بالا به پایین کاهش می‌یابد. در شکل (۷-الف) نمودار مکان دو بعدی یک گرگ خاکستری که در مکان (x,y) قرار دارد می‌تواند موقعیت خود را با توجه به موقعیت (x^*,y^*) عوض کند. شکل (۷-ب) نمودار سه بعدی یک گرگ خاکستری را نشان می‌دهد. بردار تصادفی r_1 و r_2 به گرگ‌ها 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]



شکل ۷-الف. نمودار مکان دو بعدی و موقعیت بعدی احتمالی آنها [۱۲]



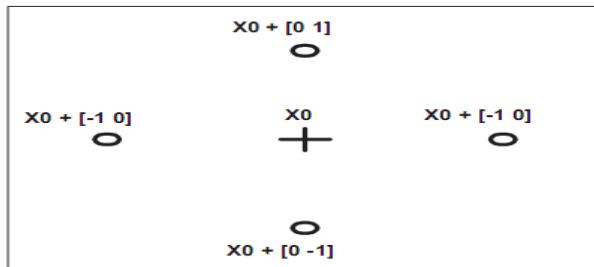
شکل ۷-ب. نمودار مکان سه بعدی و موقعیت بعدی احتمالی آنها [۱۲]

الگوریتم جستجو الگو^۱ (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 $=1$ 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 $[1\ 0]+X_0, [0\ 1]+X_0, [-1\ 0]+X_0, [0\ -1]+X_0$ مطابق شکل (۸) در می‌آید الگوریتم تابع هدف را در نقاط مش حساب می‌کند. این الگوریتم از نقاط شبکه با محاسبه مقدار هدف نمونه‌گیری می‌کند تا یکی از آن‌ها 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 نمونه‌گیری موفق آمیز بوده مجموعه این نقاط معادل X_1 است. بعد از نمونه‌گیری گام تکرار الگوریتم به دو مرحله شبکه (مش) در ۲ ضرب می‌شود. که به آن فاکتور توسعه یا انبساط می‌گویند بنابراین در تکرار دوم نقاط مش به صورت $2[1\ 0]+X_1, 2[0\ 1]+X_1, 2[-1\ 0]+X_1, 2[0\ -1]+X_1$ و این پرسه تکرار می‌شود تا تکرارها تمام شود حال اگر در یک تکرار خاص هیچ یک از نقاط مش مقدار تابع هدف کمتر از مقدار نقطه در آن تکرار نداشته باشد رای گیری (نمونه‌گیری) ناموفق

1. Pattern Search

بوده و نقاط فعلی در تکرار بعدی استفاده می‌شوند. همچنین در تکرار بعدی اندازه شبکه در $5/0$ ضرب می‌شود که به آن فاکتور انقباض می‌گویند به طوری که اندازه مش در تکرار بعدی کوچکتر می‌شود و این 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 کنترل کننده PID مرتبه کسری با الگوریتم گرگ خاکستری^۱

ابتدا تابع هدف به وسیله معادله ۲۹ نشان داده می‌شود. قیود مسئله نیز به وسیله رابطه ۳۰ نشان داده می‌شود.

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

در رابطه (۲۹) تغییرات فرکانس ریزشبکه ۱: Δf_1 ، تغییرات فرکانس ریزشبکه ۲: Δf_2 ، تغییرات توان خط ارتباطی: ΔP_{te} ، تابع هدف: J و زمان شبیه‌سازی: t است.

قیود بهینه سازی:

$$Kp_{\min} \leq Kp \leq Kp_{\max} \quad (۳۰)$$

$$Ki_{\min} \leq Ki \leq Ki_{\max} \quad (۳۱)$$

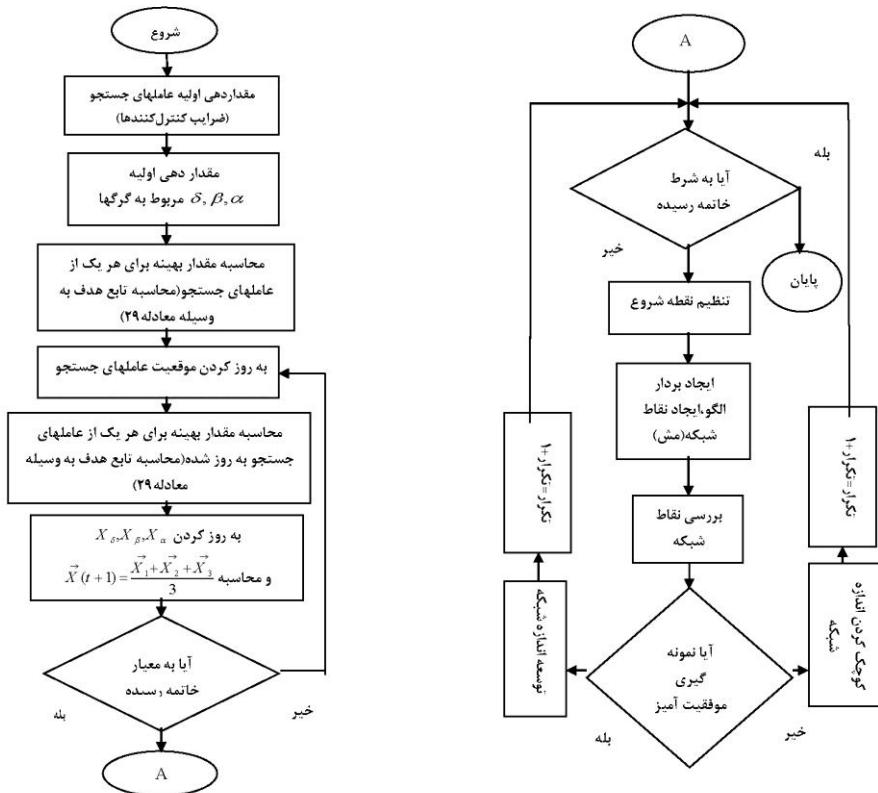
1. Hybrid Gray wolf-Pattern search

$$Kd_{\min} \leq Kd \leq Kd_{\max} \quad (32)$$

$$0 \leq \lambda \leq 1 \quad (33)$$

$$0 \leq \mu \leq 1 \quad (34)$$

بهینه کردن ضرایب کنترلر PID مرتبه کسری با استفاده از الگوریتم ترکیبی گرگ خاکستری-جستجوی الگو HGWO-PS در مسئله LFC مطابق با فلوچارت شکل (۹) انجام شده است. شکل (۱۰) ساختار کنترلری دو ریز شبکه را نشان می‌دهد، که در هر ریز شبکه از کنترلر PID مرتبه کسری به عنوان کنترل کننده استفاده شده و با استفاده از الگوریتم ترکیبی جدیدگرگ خاکستری-جستجوی الگو^۱ (HGWO-PS) ضرایب آنها بهینه می‌شود. سیگنال کنترلری هر یک از ریز شبکه‌ها توسط رابطه ۳۴ و ۳۵ به دست می‌آید.



شکل ۹. فلوچارت الگوریتم ترکیبی جدید پیشنهادی HGWO-PS

$$U_1 = (K_{p1} + \frac{K_{i1}}{S^{\lambda 1}} + K_{d1} S^{\mu 1}) (ACE1) \quad (35)$$

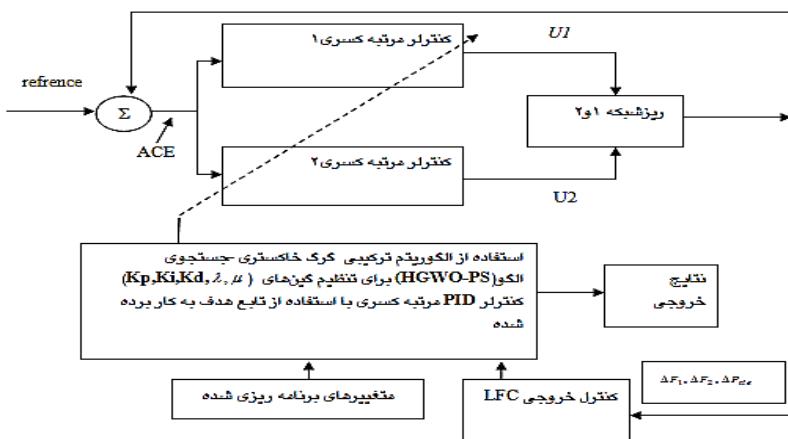
$$U_2 = (K_{p2} + \frac{K_{i2}}{S^{\lambda 2}} + K_{d2} S^{\mu 2}) (ACE2) \quad (36)$$

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

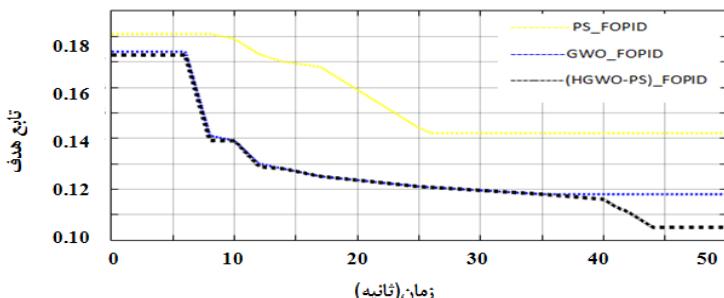
۴. شبیه‌سازی و نتایج

شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار مطلب انجام شده است. مقادیر در نظر گرفته شده برای پارامترهای دو ریز شبکه توسط جدول ۱ 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، GWO انجام داده ایم. در الگوریتم PS و الگوریتم GWO مطابق شکل (۱۱) همگرایی در ۳۵-۳۰ تکرار حاصل شده است. بنابراین برای الگوریتم ترکیبی جدید پیشنهادی ماکریمیم تعداد تکرار را در ۵۰ تکرار قرار می‌دهیم. در الگوریتم ترکیبی پیشنهادی جدید برای حل مسئله از 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، ماکریمیم 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 ریز شبکه $Ps=1.5\text{ pu}$ می‌باشد.

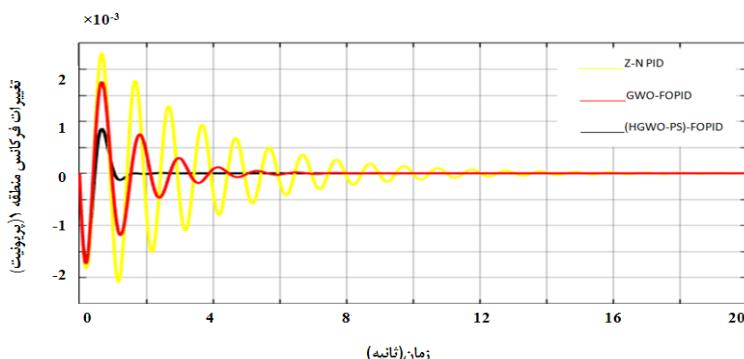
سناریو ۱: توان توربین بادی و سلول خورشیدی در ریز شبکه ۱ به ترتیب 4 pu و 2 pu می‌باشد، و در ریز شبکه ۲ نیز به ترتیب 3 pu و 2 pu است. بار در هر دو ریز شبکه 7 pu است. در طول شبیه سازی بار ریز شبکه اول از 0.8 pu به 0.8 pu در $t=0$ تغییر شکل ۱۲ تغییرات فرکانس ریز شبکه ۱ با تغییر بار HGWO-PS را نشان می‌دهد که کنترل کننده PID مرتبه کسری بهینه شده با الگوریتم ترکیبی (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. شکل ۱۳ نیز تغییرات فرکانس ریز شبکه ۲ را نشان می‌دهد.



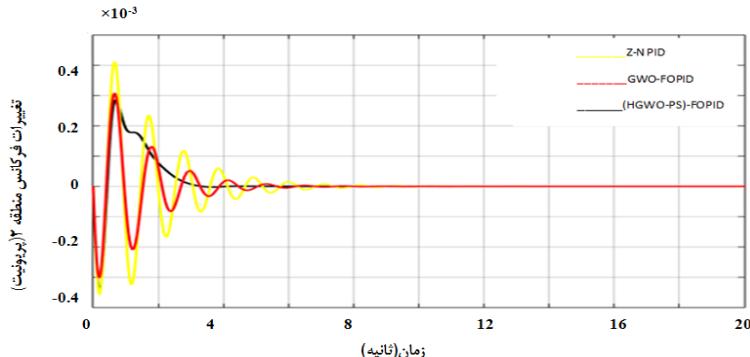
شکل ۱۰. ساختار کنترلی دو ریز شبکه



شکل ۱۱. همگرایی الگوریتم‌های مختلف در حل مسئله



شکل ۱۲. تغییرات فرکانس ریز شبکه ۱

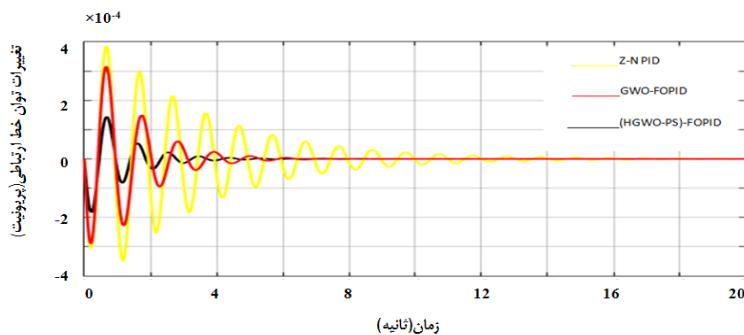


شکل ۱۳. تغییرات فرکانس ریز شبکه ۲

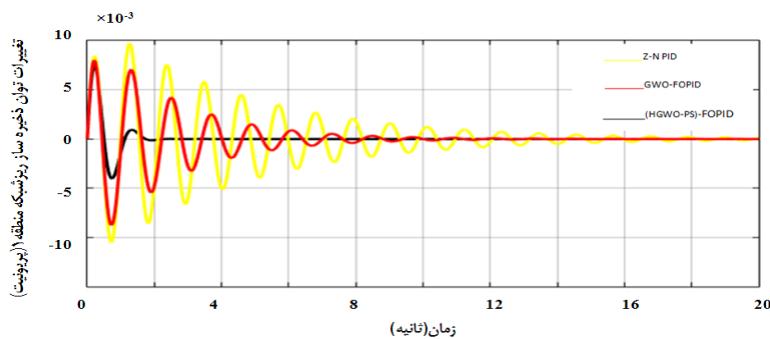
جدول ۱. مشخصات دو ریز شبکه [۲]

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

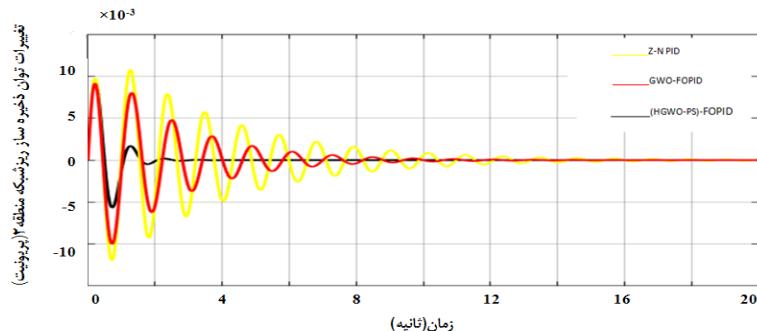
شکل ۱۴ تغییرات توان خط ارتباطی بین دو ریز شبکه را نشان می‌دهد. شکل ۱۵ و ۱۶ به ترتیب تغییرات توان ذخیره‌سازهای ریز شبکه ۱ و ۲ با تغییر بار ریز شبکه ۱ از pu=۰.۷ در t=0 می‌باشد، که در تمامی این شکل‌ها روش پیشنهادی نسبت به بقیه روش‌ها دارای عملکردی مطلوب‌تر می‌باشد. در ادامه کارایی روش پیشنهادی در مقابل تغییر پارامترها دو ریز شبکه مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۱۴. تغییرات توان خط ارتباطی بین دو ریزشبکه



شکل ۱۵. تغییرات توان ذخیره ساز ریزشبکه

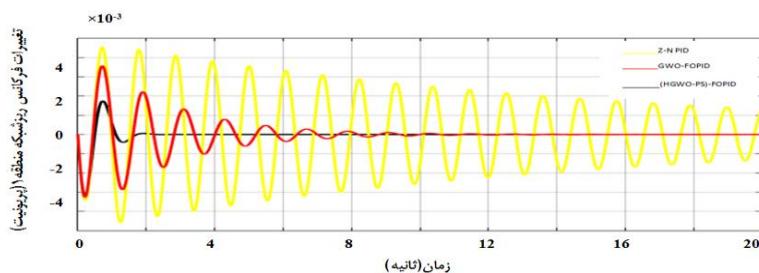


شکل ۱۶. تغییرات توان ذخیره ساز ریزشبکه

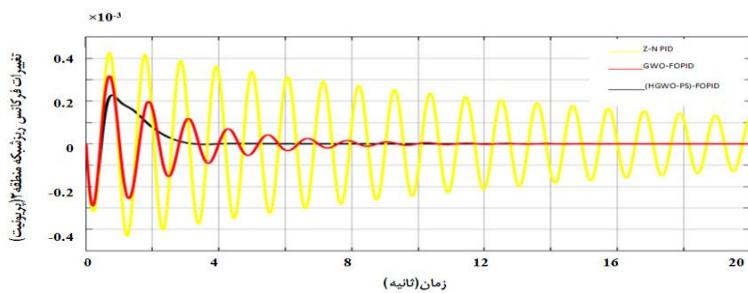
مطابق شکل (۱۲) تا شکل (۱۶) که تغییرات فرکانس مناطق (۱ و ۲) و تغییرات توان خط ارتباطی و تغییرات توان ذخیره ساز ریزشبکه ناحیه ۱ و ۲ بر اثر تغییر بار در منابع تولید پراکنده ریزشبکه اول بر اساس کنترل کننده‌های متفاوت و کنترل کننده‌های پیشنهادی (کنترل کننده FOPID مرتبه کسری

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 کمتر 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 کمتر و ریپل کمتری توانسته میرا شود و همچنین فرجهش 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 فرجهش 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 فرجهش و فروجهش کمتری میرا شده است.

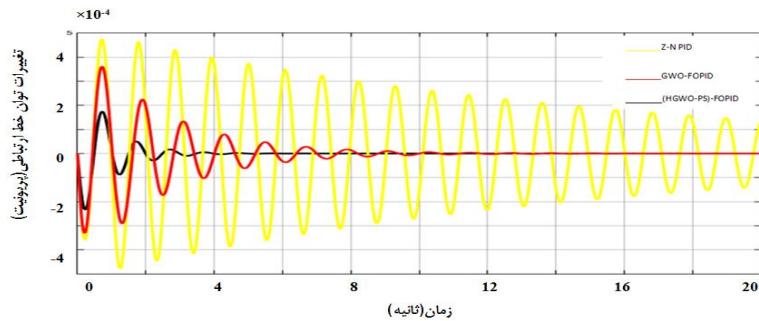
سناریو ۲: شکل ۱۷ تغییرات فرکانس ریزشبکه با درنظر گرفتن این که بار ریزشبکه اول از pu به A/pu . در زمان $t=0$ تغییر می‌کند و با در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترها برای دو ریزشبکه به میزان ۲۰٪. درصد افزایش شیوه‌سازی شده است، مشاهده می‌شود که الگوریتم ترکیبی HGWO-PS (گرگ خاکستری-جستجوی الگو) در بهینه کردن کنترل PID مرتبه کسری دارای پاسخ مطلوب تری نسبت به دو روش دیگر می‌باشد. شکل‌های ۱۸ و ۱۹ و ۲۰ و ۲۱ به ترتیب تغییرات فرکانس ریزشبکه ۲، تغییرات توان خط ارتباطی بین دو ریزشبکه، تغییرات توان ذخیره ساز ریزشبکه ۱، تغییرات توان ذخیره ساز ریزشبکه ۲ را نشان می‌دهند، همان طور که از شکل‌ها مشخص است، استفاده از روش پیشنهادی دارای عملکرد مطلوب تری نسبت به روش‌های دیگر می‌باشد.



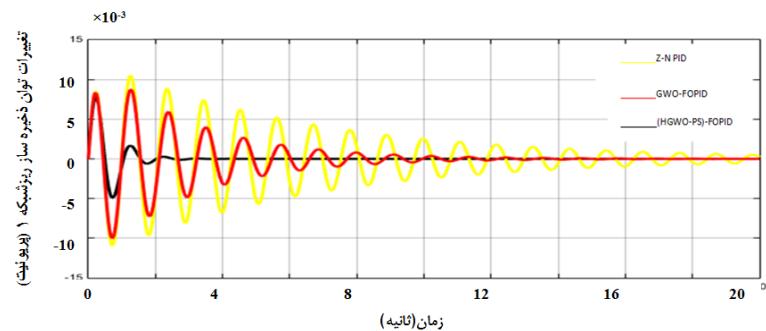
شکل ۱۷. تغییرات فرکانس ریزشبکه ۱



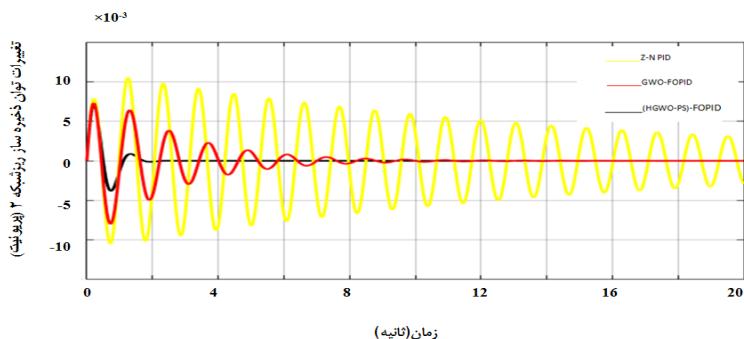
شکل ۱۸. تغییرات فرکانس ریز شبکه ۲



شکل ۱۹. تغییرات توان خط ارتباطی بین دو ریز شبکه



شکل ۲۰. تغییرات توان ذخیره ساز ریز شبکه ۱



شکل ۲۱. تغییرات توان ذخیره ساز ریزشبکه ۲

مطابق شکل (۱۷) تا شکل (۲۱) که تغییرات فرکانس مناطق (۱و۲) 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 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 کمتر میرا شده است.

جدول ۲. پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی

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

جدول ۳ و ۴ مربوط ضرایب کنترل کننده PID مرتبه کسری با استفاده از الگوریتم‌های مختلف مربوط به سناریو ۱ 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.

جدول ۳. ضرایب کنترلرهای دو ریزشبکه با استفاده از الگوریتم‌های مختلف مربوط به سناریو ۱

روش‌های استفاده شده	پارامترهای کنترل ریزشبکه ۱						پارامترهای کنترل ریزشبکه ۲						زمان نشست(ثانیه)	تابع هدف (j)
	KP1	Ki1	Kd1	$\lambda 1$	$\mu 1$	KP2	Ki2	Kd2	$\lambda 2$	$\mu 2$	$\Delta f 1$	$\Delta f 2$	ΔP_{tie}	
(GWO_PS)-FOPID	۱/۸۲۱	۱/۵۲۲	۱/۳۱۲	۰/۹۹۸	۰/۹۶۱	۰/۹۲۵	۳/۴۷۲	۱/۸۱۰	۰/۷۶۲	۰/۸۶۱	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	۰/۸۷۱	۶/۲۳	۶/۲۱	۷/۳	/۱۵۲
Z-N PID	---	۵	---	---	---	---	۷	---	---	---	۱۴/۳	۱۴/۱	۱۵/۸	---

جدول ۴. ادامه پارامترهای مربوط به جدول ۳(سناریو ۱)

نوع الگوریتم	$\Delta f 1$		$\Delta f 2$		ΔP_{tie}	
	فروجehش	فراجهش	فروجehش	فراجهش	فروجehش	فراجهش
GWO_PS-FOPID	۰/۰۰۰۸	-۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۰۲۱	-۰/۰۰۰۲۹	۰/۰۰۰۱۵	-۰/۰۰۰۱۷
GWO-FOPID	۰/۰۰۱۷	-۰/۰۰۱۷	۰/۰۰۰۳۱	-۰/۰۰۰۰۳	۰/۰۰۰۳۲	-۰/۰۰۰۲۹
Z-N PID	۰/۰۰۲۲	-۰/۰۰۲۱	۰/۰۰۰۴۲	-۰/۰۰۰۰۴	۰/۰۰۰۳۸	-۰/۰۰۰۳۹

جدول ۵. ضرایب کنترلرهای دو ریزشبکه با استفاده از الگوریتمهای مختلف مربوط به سناریو ۲

ردیف	هدف	زمان نشست(ثانیه)	پارامترهای کنترل ریزشبکه ۱										پارامترهای کنترل ریزشبکه ۲		
			KP1	Ki1	Kd1	$\lambda 1$	$\mu 1$	KP2	Ki2	Kd2	$\lambda 2$	$\mu 2$	$\Delta f 1$	$\Delta f 2$	ΔP_{tie}
شده															(j)
GWO_PS-FOPID	۱/۸۳۵	۱/۵۴۶	۱/۵۱۲	۰/۹۶۵	۰/۹۱۱	۰/۹۳۱	۳/۱۷۲	۱/۷۵۴	۰/۸۵۲	۰/۷۷۳	۲/۱	۳	۶/۱۲	/۱۲۹	
GWO-FOPID	۱/۴۱۳	۲/۸۸۴	۱/۲۱۱	۰/۸۶۵	۰/۸۹۶	۱/۱۰۹	۲/۲۱۹	۱/۷۶۲	۰/۶۳۹	۰/۹۷۷	۱۰/۶	۱۱/۵	۱۲/۳	/۱۶۴	
Z-N PID	----	۵	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	

جدول ۶. ادامه پارامترهای مربوط به جدول ۵(سناریو ۲)

نوع الگوریتم	$\Delta f 1$		$\Delta f 2$		ΔP_{tie}	
	فروجehش	فراجهش	فروجehش	فراجهش	فروجehش	فراجهش
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	۰/۰۰۰۲۶	-۰/۰۰۰۲۴	۰/۰۰۰۴۲	-۰/۰۰۰۴۴	۰/۰۰۰۴۸	-۰/۰۰۰۴۸

جدول ۵ و ۶ مربوط ضرایب کنترل کننده PID مرتبه کسری با استفاده از الگوریتم‌های مختلف مربوط به سناریو ۲ 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 معرفی بر دلایل ظهور تولیدکننده‌ای 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 کنترل کننده‌های مرسوم برطرف شود. همان گونه که از شبیه سازها مشخص است کنترلر PID مرتبه کسری بهینه شده با الگوریتم ترکیبی HGWO-PS(گرگ خاکستری-جستجو) الگو در مقایسه با سایر کنترل کننده‌های مرسوم در مقایسه با سایر کنترل کننده‌های 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.

منابع

- [۱] سیفی، حسین و محمد حسن مرادی (۱۳۹۴)، "طراحی سیستم مدیریت انرژی در یک ریز شبکه با حضور واحدهای تجدیدپذیر"، دوره ۱۸، شماره ۳.
- [۲] مرادی، محمد حسن و علی خندانی (۱۳۹۴)، "ارزیابی اقتصادی برای یک ریز شبکه مستقل شامل منابع انرژی پراکنده با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان"، نشریه انرژی ایران، دوره ۱۵، شماره ۲.
- [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 Automation 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, Ataei 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 autonomous smart microgrids,"Proceedings 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.

- [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]Senju 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.

-
- [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.