

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

فرهاد امیری<sup>۱</sup>، محمد حسن مرادی\*

### 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. کنترل کننده پیشنهادی در حلقه ثانویه هر یک از 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 نظر کاهش زمان نشست، کاهش فرآیند و فرجهش در مقایسه با سایر کنترل کننده‌ها به اثبات رسیده است.

### 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

f.amiri94@basu.ac.ir

mh\_moradi@yahoo.co.uk

۱. دانشجوی دکترا دانشکده مهندسی برق، دانشگاه بوعلی سینا

۲. استاد دانشگاه دانشگاه بوعلی سینا (نویسنده مسئول)

## ۱. مقدمه

بالفرازی 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 سرویس دهی 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 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 توسط موسسه<sup>۱</sup> (CERT) مفهوم ریزشبکه‌ها<sup>۲</sup> (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

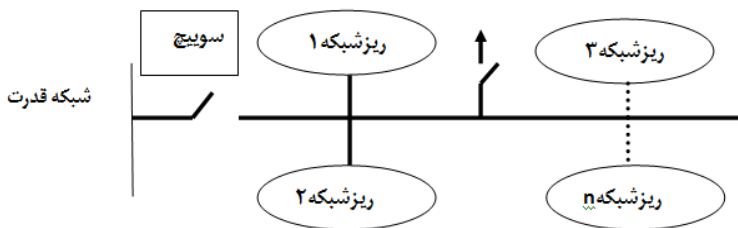
بارهای اساسی و مهم محلی را به تنهایی تغذیه کنند، [۲۶]. ورما و همکاران به بررسی افزایش تعداد ریزشکه‌ها در سیستم قدرت پرداخته اند، که سبب تغییر قوانین در این سیستم‌ها شده و باعث می‌شوند که منابع تولید در کل سیستم پخش شوند. همین مسئله سبب می‌شود که بر میزان پیچیدگی و غیر خطی بودن شبکه‌های قدرت افزوده شده و در نتیجه پاسخ مناسب کنترل‌کننده‌های کلاسیک را مثل قبل شاهد نباشیم. کنترل‌کننده‌های تناسبی-انتگرالی بیشترین کاربرد را در سیستم قدرت دارا می‌باشند، چون که دارای ساختار ساده و مقرون به صرفه 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 ریزشکه 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 ریزشکه پرداخته است [۱۹]. سینگ و همکاران به منظور کنترل فرکانس ریزشکه از کنترل ثانویه فرکانس بر روی مبدل منابع تولید پراکنده پرداختند [۲۸، ۱۳، ۲۵]. 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 ریزشکه 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 ریزشکه‌ها 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 ریزشکه ایزوله استفاده کرده اند [۲۹]. دهکردی و همکاران، جهت کنترل فرکانس از کنترل دروپ بر روی منابع تولید پراکنده موجود در ریزشکه 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 [۳۲، ۱۷]. ال حمد و همکاران اثر تاخیر زمانی بر روی کنترل فرکانس-بار ریزشکه را مورد بررسی قرار داده‌اند [۱۲].

چنگ و همکاران از کنترل کننده فازی به عنوان کنترل کننده ریزشبه استفاده کرده اند [۳، ۴]. در این پژوهش ها ریزشبه ایزوله در نظر گرفته شده است و از انتقال توان بین ریزشبه ها بحث نشده است. سرعت پاسخ در حالت نرمال ریزشبه در مقابل اغتشاشات بار و عدم قطعیت پارامترها در روش های قبلی خیلی مطلوب نیست. در این مقاله مدل ریزشبه ها کامل تر است و توان ریزشبه بیشتر شده است به این دلیل که به جای استفاده از دیزل ژنراتور از ژنراتور سنکرون استفاده و مدل سازی شده است و همچنین از کنترلر PID مرتبه کسری بهینه شده با الگوریتم ترکیبی جدید گرگ خاکستری-جستجو الگو (HGWO-PS) برای کنترل فرکانس ریزشبه ها و همچنین توان بین مناطق ریزشبه ها 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 فراجهدش و فروجهش و کاهش ریبیل و همچنین مقاوم بودن روش پیشنهادی نسبت به عدم قطعیت پارامترها است.

## ۲. مدل سازی اجزا

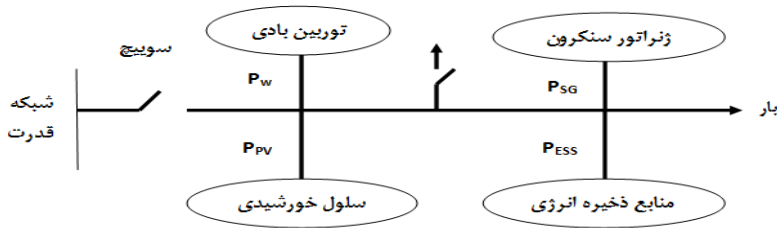
### بلوک دیاگرام ریزشبه چند منطقه ای

ریزشبه شامل توربین بادی، سلول خورشیدی، ژنراتور، منبع ذخیره انرژی و... می باشد. شکل (۱) نشان دهنده اتصال چند ریزشبه در حالت ایزوله می باشد.



شکل ۱. بلوک دیاگرام ریزشبه چند منطقه ای [۲]

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



شکل ۲. اجزای یک ریزشبکه [۲]

### ژنراتور سنکرون<sup>۱</sup> (SG)

ژنراتور سنکرون به طور مستقل برای تامین کسری از توان بار و تعادل بین تقاضا و مصرف کار می‌کند. در ریزشبکه‌های کوچک معمولاً 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  $K_g, K_T$  می‌باشد. تابع تبدیل توربین و گاورنر توسط رابطه‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است [۱۸].

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

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

$T_g, T_T$  به ترتیب ثابت زمانی توربین و گاورنر هستند،  $K_g, K_T$  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<sup>۱</sup> (WT)

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

$$P_m = C_\rho P_w \quad (۳)$$

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

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

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

$$\lambda = R_w / V_w \quad (۷)$$

در روابط (۳) تا (۷) که به ترتیب  $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5$  ضرایب ثابت هستند. توان خروجی توربین:  $P_m$  توان حقیقی توربین بادی:  $P_w$ ، چگالی هوا:  $\rho$  ضریب توان روتور:  $c_\rho$ ، زاویه تیغه زمین:  $\beta$

(m/s) سرعت باد:  $V_w$  و (m) شعاع پره‌های 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<sup>۲</sup> (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].

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

در رابطه (۹)  $(kw / m^2)$  تابش خورشیدی:  $\phi$ ،  $(m^2)$  مساحت سلول خورشیدی:  $S$ ، راندمان سلول خورشیدی:  $\eta$  و  $(deg.cel)$  دما محیط:  $T_a$  هستند. سلول خورشیدی وابسته به  $T_a$  و  $\phi$  است.  $\eta$  و  $S$  ثابت هستند. در این مقاله ما دما محیط را ثابت در نظر گرفته‌ایم و  $P_{PV}$  به طور خطی  $\phi$  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<sup>۱</sup> (ESS)

سیستم ذخیره انرژی نقش مهمی در صنعت برق و ریزشکه 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].

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

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

## انحراف توان و فرکانس

برای نگه داشتن ریزشبه در یک کارکرد مانا توازن فرکانس-توان باید حفظ شود، که به وسیله کنترل اجزای مختلف ریزشبه 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  $P_{WTG}$ : توان توربین بادی،  $P_{PV}$ : توان سلول خورشیدی،  $P_L$ : توان ژنراتور سنکرون،  $P_{ESS}$ : توان سیستم ذخیره انرژی،  $P_L$ : مقدار بار،  $P_s$ : توان تولیدی و  $P_{SG}$ : توان ژنراتور سنکرون است. در ریزشبه اگر توان تغییر کند، انحراف فرکانس به وجود می‌آید. تغییرات فرکانس ریزشبه 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 ریزشبه:  $\Delta F$  و تغییرات توان:  $\Delta P$  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].

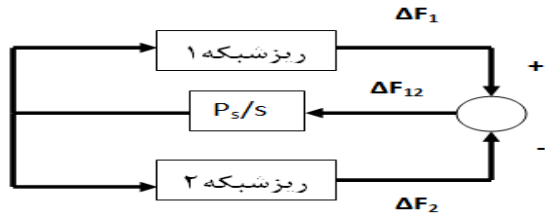
$$G_{SYS}(s) = \frac{1}{k_{SYS}(1+sT_{SYS})} = \frac{1}{D+sM} \quad (15)$$

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

## اتصال بین دو ریزشبه

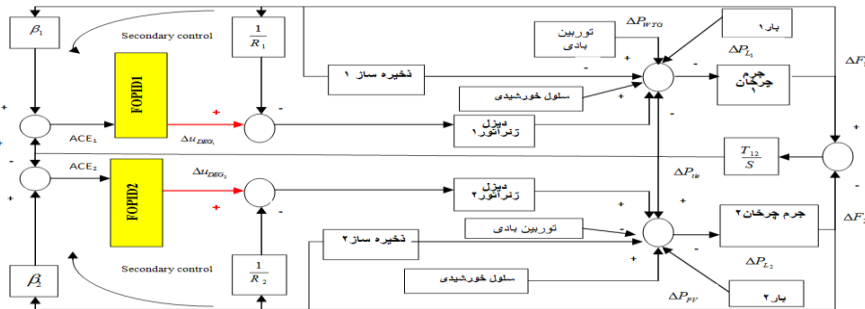
برای بالا بردن قابلیت اطمینان در تامین توان یک ریزشبه ایزوله می‌تواند از طریق خط ارتباطی به ریزشبه‌های دیگر متصل شود. هر ریزشبه به عنوان یک منطقه کنترل در نظر گرفته می‌شود، خط

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 شکل ۴ بلوک دیاگرام خطی شده ریزشبکه دو منطقه‌ای را نشان 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 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) ریزشبکه نام 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 ریزشکه منطقه  $i$  و  $P_s$  توان خط ارتباطی است.

### ۳. الگوریتم پیشنهادی

#### کنترلر مرتبه کسری<sup>۱</sup> (FOPID)

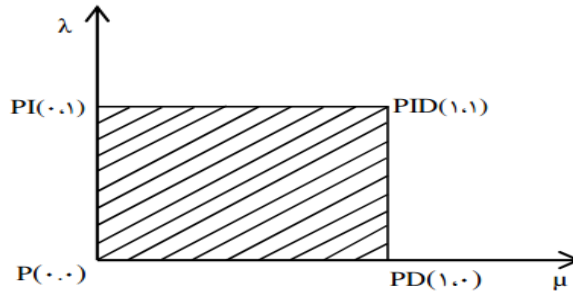
رایج ترین نوع کنترلر PID یعنی کنترلر  $PI^\lambda D^\mu$  رایج ترین فرم یک کنترلر مرتبه کسری است. معادله ۱۹ تابع تبدیل کنترل کننده PID مرتبه کسری را نشان می دهد که شامل یک بهره تناسبی، بهره انتگرال گیر که انتگرال گیر از مرتبه  $\lambda$  و یک بهره مشتق گیر که از مرتبه  $\mu$  است  $(\lambda, \mu > 0)$  [۲۲].

واضح است که با انتخاب  $\lambda=1, \mu=1$  یک کنترلر PID کلاسیک خواهیم داشت. انتخاب  $\lambda=1, \mu=0$  و  $\lambda=0, \mu=1$  به ترتیب متناظر با کنترلرهای PI و PD مرسوم هستند. همه ی 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 می دهد. شکل (۵) یک کنترلر کننده PID مرتبه کسری را نشان می دهد [۲۲، ۱۹].

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

یکی از مهمترین مزایای کنترلر  $PI^\lambda D^\mu$ ، کنترلر بهتر سیستم های 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 ویژگی های دینامیکی یک سیستم کنترل مرتبه کسری است [۲۲، ۲۳].

1. Fractional order Proportional Integral Derivative



شکل ۵. کنترلر مرتبه کسری [۲۵]

### الگوریتم گرگ خاکستری<sup>۱</sup> (GWO)

گرگ‌های خاکستری شکارچینی هستند که اغلب به صورت گروهی زندگی می‌کنند و دسته‌بندی گروهی بسیار دقیقی دارند. گرگ  $\alpha$  در صدر این دسته‌بندی، به عنوان رئیس گروه ایفای نقش می‌کند و بعد از او گرگ‌های  $\beta, \delta, w$  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 شده‌است. در این الگوریتم بهینه‌سازی در هر تکرار بهترین جواب به عنوان  $\alpha$  در نظر گرفته می‌شود و دومین و سومین از بهترین جواب‌ها به عنوان  $\beta, \delta$  در نظر گرفته می‌شوند. بقیه جواب‌ها نیز به عنوان  $w$  در نظر گرفته می‌شود. فرض می‌شود که  $\delta, \beta, \alpha$  بهترین دانش را در مورد محل بالقوه جواب بهینه دارند و از این رو، موقعیت دیگر عامل‌های جستجو ( $w$ ) با توجه به موقعیت  $\delta, \beta, \alpha$  بر اساس فرمول بندی ۲۰ تا ۲۵ به‌روز 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].

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

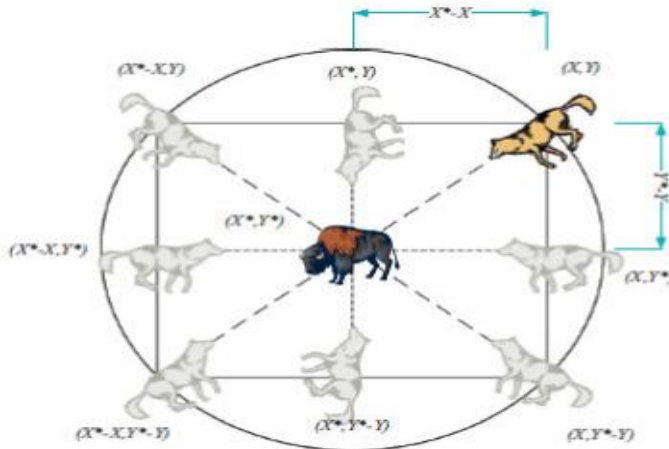
$$\vec{C} = 2\vec{r}_2 \quad (28)$$

که در آن مولفه  $\vec{a}$  در طول تکرارها از ۲ به صفر کاهش می‌یابد و  $\vec{r}_1, \vec{r}_2$  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

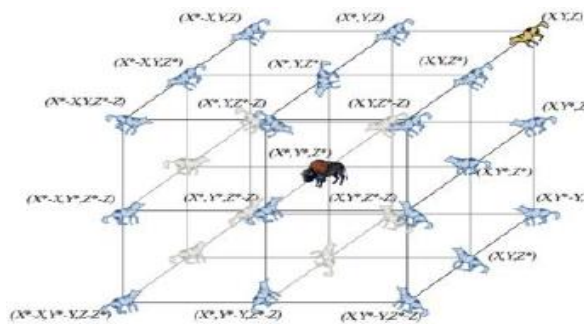
سلسله مراتبی گرگ‌های خاکستری از بالا به پایین را نشان می‌دهد، که سلطه آنها از بالا به پایین کاهش می‌یابد. در شکل (۷-الف) نمودار مکان دو بعدی یک گرگ خاکستری که در مکان  $(x, y)$  قرار دارد می‌تواند موقعیت خود را با توجه به موقعیت  $(x^*, y^*)$  عوض کند. شکل (۷-ب) نمودار سه بعدی یک گرگ خاکستری را نشان می‌دهد. بردار تصادفی  $\Gamma_1$  و  $\Gamma_2$  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 دوبعدی و موقعیت بعدی احتمالی آنها [۱۲]



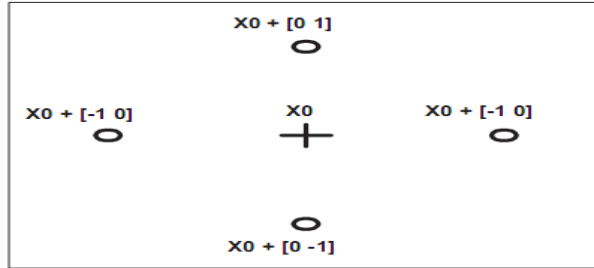
شکل ۷-ب. نمودار مکان سه بعدی و موقعیت بعدی احتمالی آنها [۱۲]

### الگوریتم جستجو الگو<sup>۱</sup> (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  $\nu=1$  که آن را اندازه‌گیری می‌نامند بردار الگو یا بردار جهت‌دار ساخته می‌شود به وسیله  $[1 \ 0]$ ،  $[0 \ 1]$ ،  $[-1 \ 0]$ ،  $[0 \ -1]$  بردارهای جهت‌دار به  $X_0$  اضافه می‌شوند و سپس نقاط مش‌مطابق به صورت  $[1 \ 0]+X_0$ ،  $[0 \ 1]+X_0$ ،  $[-1 \ 0]+X_0$ ،  $[0 \ -1]+X_0$  مطابق شکل (۸) در می‌آیند الگوریتم تابع هدف را در نقاط مش‌مطابق 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 مش‌مطابق تابع هدف کوچکتری داشته باشند نمونه‌گیری موفق‌آمیز 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  $2[1 \ 0]+X_1$ ،  $2[0 \ 1]+X_1$ ،  $2[-1 \ 0]+X_1$ ،  $2[0 \ -1]+X_1$  و این پروسه تکرار می‌شود تا تکرارها تمام شود حال اگر در یک تکرار خاص هیچ یک از نقاط مش‌مطابق تابع هدف کمتر از مقدار نقطه در آن تکرار نداشته باشد رای‌گیری (نمونه‌گیری) ناموفق

#### 1. Pattern Search

بوده و نقاط فعلی در تکرار بعدی استفاده می‌شوند. همچنین در تکرار بعدی اندازه شبکه در  $0.5$  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<sup>۱</sup>

ابتدا تابع هدف به وسیله معادله ۲۹ نشان داده می‌شود. قیود مسئله نیز به وسیله رابطه ۳۰ تا ۳۴ نشان داده می‌شود.

$$\min J = \int_0^t t [|\Delta f_1| + |\Delta f_2| + |\Delta P_{ie}|] dt \quad (29)$$

در رابطه (۲۹) تغییرات فرکانس ریز شبکه ۱:  $\Delta f_1$ ، تغییرات فرکانس ریز شبکه ۲:  $\Delta f_2$ ، تغییرات توان خط ارتباطی:  $\Delta P_{ie}$ ، تابع هدف:  $J$  و زمان شبیه‌سازی:  $t$  است.

قیود بهینه سازی:

$$Kp_{\min} \leq Kp \leq Kp_{\max} \quad (30)$$

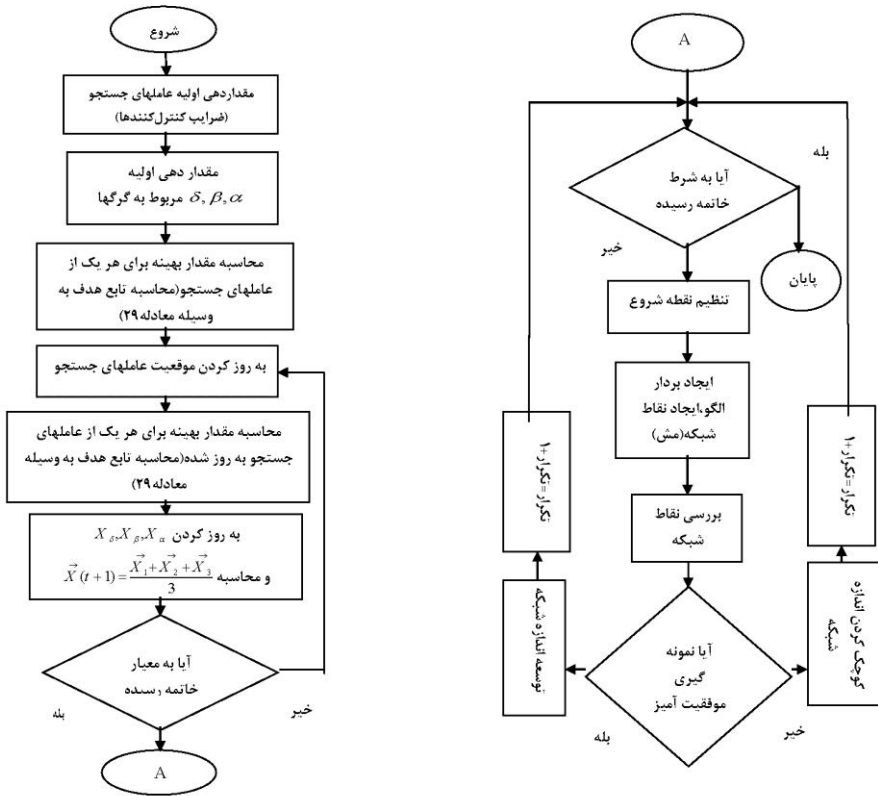
$$Ki_{\min} \leq Ki \leq Ki_{\max} \quad (31)$$

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

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

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

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 کنترلی 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 جدید گرگ خاکستری-جستجوی الگو<sup>۱</sup> (HGWO-PS) ضرایب آنها بهینه می‌شود. سیگنال کنترلی هر یک از ریز شبکه‌ها توسط رابطه ۳۴ و ۳۵ به دست می‌آید.



شکل ۹. فلوجارت الگوریتم ترکیبی جدید پیشنهادی HGWO-PS

$$U_1 = (K_{p1} + \frac{K_{i1}}{S} + K_{d1}S^{\mu1})(ACE1) \quad (35)$$

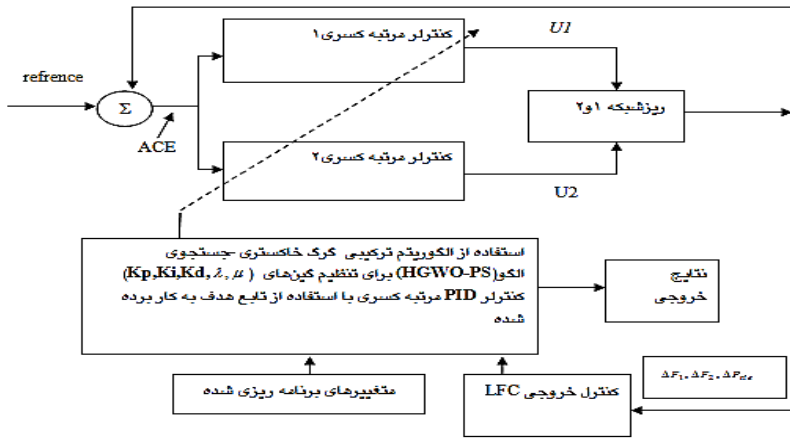
$$U_2 = (K_{p2} + \frac{K_{i2}}{S} + K_{d2}S^{\mu2})(ACE2) \quad (36)$$

$U_1$  سیگنال کنترلی ریزشبهه اول می باشد و  $U_2$  سیگنال کنترلی ریزشبهه دوم می باشد.  $ACE1, ACE2$  به ترتیب نیز خطای کنترل تکمیلی ریزشبهه اول و ریزشبهه دوم هستند.

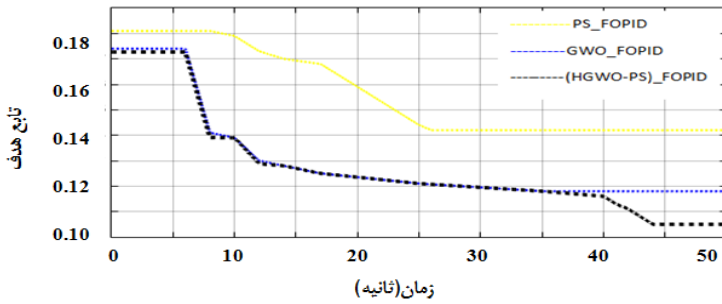
#### ۴. شبیه‌سازی و نتایج

شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار متلب انجام شده است. مقادیر در نظر گرفته شده برای پارامترهای دو ریزش‌بکه توسط جدول ۱ نشان داده شده است، مدت زمان اجرای شبیه‌سازی ۲۰ ثانیه است. تعداد اولیه جمعیت گرگ‌های خاکستری ۳۰ می‌باشد. فرآیند بهینه‌سازی 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 سنکرونیسم بین دو ریزش‌بکه  $P_s = 1.5 \text{ pu}$  می‌باشد.

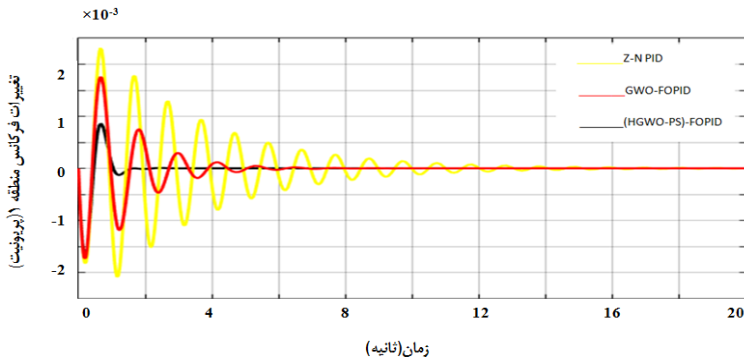
سناریو ۱: توان توربین بادی و سلول خورشیدی در ریزش‌بکه ۱ به ترتیب ۰.۴pu و ۰.۲pu می‌باشد، و در ریزش‌بکه ۲ نیز به ترتیب ۰.۳pu و ۰.۲pu است. بار در هر دو ریزش‌بکه ۰.۷pu است. در طول شبیه‌سازی بار ریزش‌بکه اول از ۰.۷pu به ۰.۸pu در  $t=0$  تغییر شکل ۱۲ تغییرات فرکانس ریزش‌بکه ۱ با تغییر بار را نشان می‌دهد که 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. شکل ۱۳ نیز تغییرات فرکانس ریزش‌بکه ۲ را نشان می‌دهد.



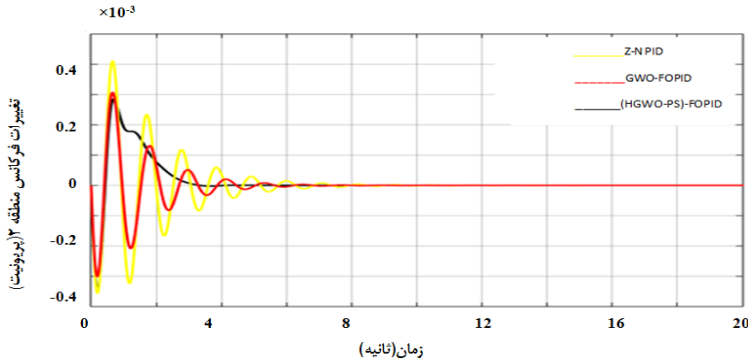
شکل ۱۰. ساختار کنترلی دو ریز شبکه



شکل ۱۱. همگرایی الگوریتم‌های مختلف در حل مسئله



شکل ۱۲. تغییرات فرکانس ریز شبکه ۱

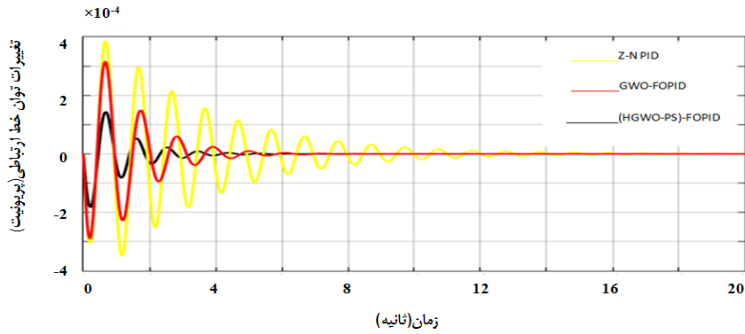


شکل ۱۳. تغییرات فرکانس ریزشبهه ۲

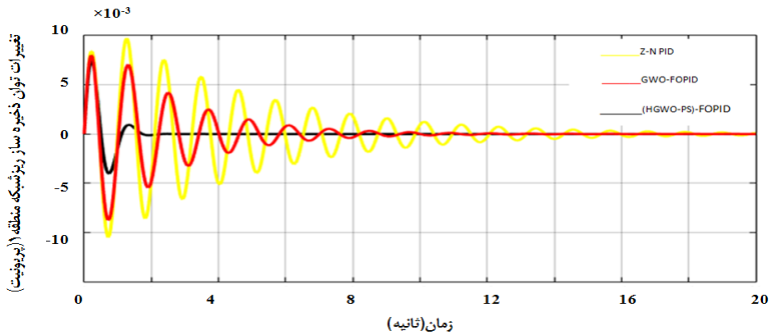
جدول ۱. مشخصات دو ریزشبهه [۲]

| پارامتر | تعریف                   | ریزشبهه ۱ | ریزشبهه ۲ |
|---------|-------------------------|-----------|-----------|
| R(pu)   | مشخصه سرعت              | ۰/۰۵      | ۰/۰۴      |
| Tg(s)   | ثابت زمانی گاورنر       | ۰/۱       | ۰/۱       |
| 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  | ۰/۱       | ۰/۱       |
| Kess    | بهره سیستم ذخیره        | -۱۰       | -۸        |
| B(pu)   | فاکتور بایاس            | ۱۰        | ۱۲/۵      |
| M(pu)   | ثابت اینرسی             | ۰/۸       | ۰/۷       |
| D(pu)   | ثابت میرایی             | ۰/۰۲      | ۰/۰۳      |
| Ki      | بهره انتگرال گیر        | ۵         | ۷         |

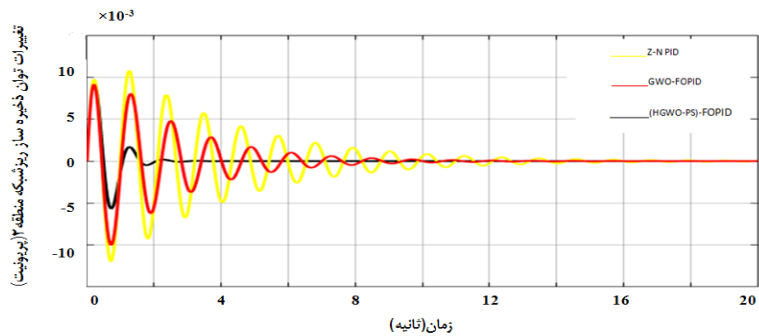
شکل ۱۴ تغییرات توان خط ارتباطی بین دو ریز شبکه را نشان می‌دهد. شکل ۱۵ و ۱۶ به ترتیب تغییرات توان ذخیره‌سازهای ریزشبهه ۱ و ۲ با تغییر بار ریزشبهه ۱ از ۰.۷ pu به ۰.۸ pu در  $t=0$  می‌باشد، که در تمامی این شکل‌ها روش پیشنهادی نسبت به بقیه روش‌ها دارای عملکردی مطلوب‌تر می‌باشد. در ادامه کارایی روش پیشنهادی در مقابل تغییر پارامترها دو ریز شبکه مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۱۴. تغییرات توان خط ارتباطی بین دو ریز شبکه



شکل ۱۵. تغییرات توان ذخیره ساز ریز شبکه ۱

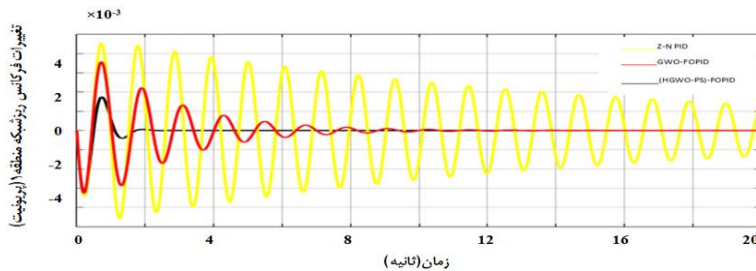


شکل ۱۶. تغییرات توان ذخیره ساز ریز شبکه ۲

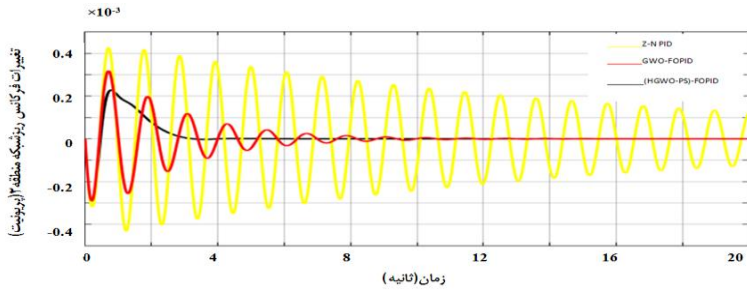
مطابق شکل (۱۲) تا شکل (۱۶) که تغییرات فرکانس مناطق (۱ و ۲) و تغییرات توان خط ارتباطی و تغییرات توان ذخیره ساز ریز شبکه ناحیه ۱ و ۲ بر اثر تغییر بار در منابع تولید پراکنده ریز شبکه اول بر اساس کنترل کننده‌های متفاوت و کنترل کننده‌های پیشنهادی (کنترل کننده FOPID مرتبه کسری

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 کمتری و ریبیل 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 ریبیل کمتری توانسته میرا شود و همچنین فراجش و فروجش نیز کاهش پیدا کرده است. در شکل (۱۴) تغییرات توان خط ارتباطی بین دو ریزشبه که ابتدا افت کرده است و سپس توسط کنترل کننده پیشنهادی در زمان کمتر، ریبیل کمتر، زمان فراجش و فروجش 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، ریبیل کمتر و زمان فراجش و فروجش کمتری میرا شده است.

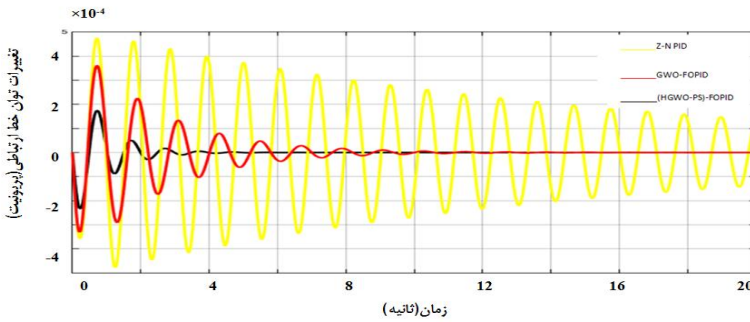
سناریو ۲؛ شکل ۱۷ تغییرات فرکانس ریزشبه با در نظر گرفتن این که بار ریزشبه اول از  $7pu$ ، به  $8pu$ ، در زمان  $t=0$  تغییر می‌کند و با در نظر گرفتن عدم قطعیت پارمترها برای دو ریزشبه که به میزان  $20\%$  درصد افزایش شبیه‌سازی شده است، مشاهده می‌شود که الگوریتم ترکیبی HGWO-PS (گرگ خاکستری-جستجوی الگو) در بهینه کردن کنترلر PID مرتبه کسری دارای پاسخ مطلوب تری نسبت به دو روش دیگر می‌باشد. شکل‌های ۱۸ و ۱۹ و ۲۰ و ۲۱ به ترتیب تغییرات فرکانس ریزشبه ۲، تغییرات توان خط ارتباطی بین دو ریزشبه، تغییرات توان ذخیره ساز ریزشبه ۲ را نشان می‌دهند، همان طور که از شکل‌ها مشخص است، استفاده از روش پیشنهادی دارای عملکرد مطلوب تری نسبت به روش‌های دیگر می‌باشد.



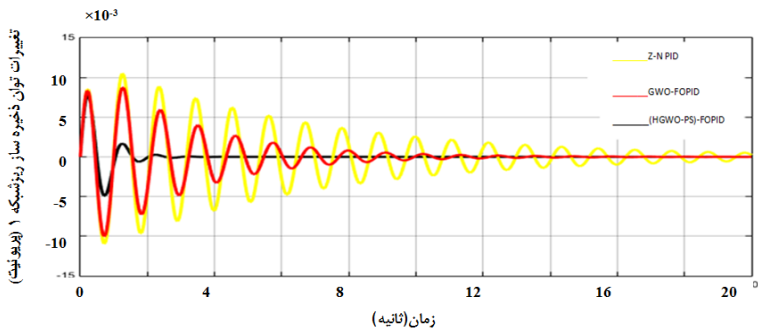
شکل ۱۷. تغییرات فرکانس ریزشبه ۱



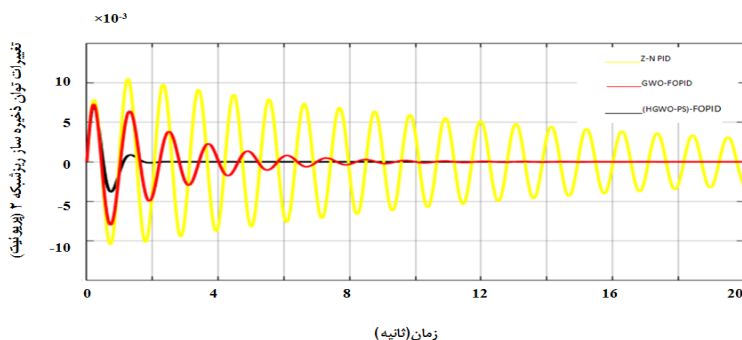
شکل ۱۸. تغییرات فرکانس ریزشکه ۲



شکل ۱۹. تغییرات توان خط ارتباطی بین دو ریزشکه



شکل ۲۰. تغییرات توان ذخیره ساز ریزشکه ۱



شکل ۲۱. تغییرات توان ذخیره ساز ریزشبهک ۲

مطابق شکل (۱۷) تا شکل (۲۱) که تغییرات فرکانس مناطق (۲۰۱) و تغییرات توان خط ارتباطی و تغییرات توان ذخیره ساز ریزشبهک ناحیه ۱ و ۲ بر اثر تغییر بار در منابع تولید پراکنده ریزشبهک 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 ریبیل 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 ریبیل کمتری توانسته میرا شود و همچنین فراجاهش و فروجهش نیز کاهش پیدا کرده است. در شکل (۱۹) تغییرات توان خط ارتباطی بین دو ریزشبهک که ابتدا افت کرده است و سپس توسط کنترل کننده پیشنهادی در زمان کمتر، ریبیل کمتر، زمان فراجاهش 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، ریبیل کمتر و زمان فراجاهش و فروجهش کمتری میرا شده است.

جدول ۲. پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی

| $n_p$ (اندازه جمعیت) | 30     |
|----------------------|--------|
| Kp1,2                | [0,10] |
| Ki1,2                | [0,10] |
| Ki1,2                | [0,10] |
| $\lambda$            | [0,1]  |
| $\mu$                | [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 فرجهش و فروجهش دارای عملکرد مطلوب تری می‌باشد.

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

| روش‌های استفاده شده | پارامترهای کنترلر ریزشبه ۱ |       |       |             |         | پارامترهای کنترلر ریزشبه ۲ |       |       |             |         | زمان نشست(ثانیه) |              |                  | تابع هدف |
|---------------------|----------------------------|-------|-------|-------------|---------|----------------------------|-------|-------|-------------|---------|------------------|--------------|------------------|----------|
|                     | KP1                        | Ki1   | Kd1   | $\lambda 1$ | $\mu 1$ | KP2                        | Ki2   | Kd2   | $\lambda 2$ | $\mu 2$ | $\Delta f 1$     | $\Delta f 2$ | $\Delta P_{tie}$ | (j)      |
| (GWO_PS)-FOPID      | ۱/۸۲۱                      | ۱/۵۳۲ | ۱/۳۱۲ | ۰/۹۹۸       | ۰/۹۶۱   | ۰/۹۲۵                      | ۳/۴۷۲ | ۱/۸۱۰ | ۰/۷۶۲       | ۱/۸۶۱   | ۱/۸              | ۲/۵          | ۶/۰۵             | ۱/۰۵     |
| GWO-FOPID           | ۱/۶۲۵                      | ۲/۷۴۴ | ۱/۰۰۸ | ۰/۹۶۵       | ۰/۹۴۱   | ۱/۱۰۶                      | ۲/۹۵۱ | ۱/۷۶۲ | ۰/۸۶۹       | ۱/۸۷۱   | ۶/۲۳             | ۶/۲۱         | ۷/۳              | ۱/۵۲     |
| Z-N PID             | ----                       | ۵     | ----  | ----        | ----    | ----                       | ۷     | ----  | ----        | ----    | ۱۴/۳             | ۱۴/۱         | ۱۵/۸             | ---      |

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

| نوع الگوریتم | $\Delta f 1$ |         | $\Delta f 2$ |          | $\Delta P_{tie}$ |          |
|--------------|--------------|---------|--------------|----------|------------------|----------|
|              | فراجش        | فروجش   | فراجش        | فروجش    | فراجش            | فروجش    |
| 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 ریزشبهه با استفاده از الگوریتم‌های مختلف مربوط به سناریو ۲

| هدف          | پارامترهای کنترلر ریزشبهه ۱ |       |       |       |             |         | پارامترهای کنترلر ریزشبهه ۲ |       |       |             |         |              | زمان نشست (ثانیه) |                  | تابع |
|--------------|-----------------------------|-------|-------|-------|-------------|---------|-----------------------------|-------|-------|-------------|---------|--------------|-------------------|------------------|------|
|              | روشهای استفاده شده          | KP1   | Ki1   | Kd1   | $\lambda 1$ | $\mu 1$ | KP2                         | Ki2   | Kd2   | $\lambda 2$ | $\mu 2$ | $\Delta f 1$ | $\Delta f 2$      | $\Delta P_{tie}$ |      |
| 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              | ۱/۲۹             |      |
| 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              | ۱/۶۴             |      |
| Z-N PID      | ---                         | ۵     | ---   | ---   | ---         | ---     | ۷                           | ---   | ---   | ---         | ---     | ---          | ---               | ---              |      |

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

| نوع الگوریتم | $\Delta f 1$ |          | $\Delta f 2$ |          | $\Delta P_{tie}$ |          |
|--------------|--------------|----------|--------------|----------|------------------|----------|
|              | فراجش        | فروجش    | فراجش        | فروجش    | فراجش            | فروجش    |
| 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 |

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 فراجهدش 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 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 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.

## منابع

- [۱] سیفی، حسین و محمد حسن مرادی (۱۳۹۴)، "طراحی سیستم مدیریت انرژی در یک ریزشبکه با حضور واحدهای تجدیدپذیر"، دوره ۱۸، شماره ۳.
- [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، 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, Atae S. (2016), Robust Frequency Control in an Isolated Microgrid: and-Synthesis Approaches. IEEE Transactions on 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, pp. 1548-1559.

- [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] 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.

- [29] Thongchart Kerdphol, Fathin Saifur Rahman, Yasunori Mitani, Masayuki Watanabe, Sinan Küfeoğlu (2018), "Robust Virtual 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 generation 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.