



دانشگاه صنعتی سهند

DOR:

20.1001.1.23223146.1402.10.1.6.9

نشریه علمی-فصلنامه‌ای در مهندسی برق

دوره ۱۰ - شماره ۱

بهار و تابستان ۱۴۰۲

صفحات ۱۱۷ الی ۱۴۶

ISSN: 2322-3146

<http://journals.sut.ac.ir/jnsee>

بهبود پایداری فرکانسی سیستم قدرت در حضور توربین بادی با استفاده از کنترل کننده آبخاری بهینه شده

فرهاد امیری^۱، محمد حسن مرادی^۲

^۱پسا دکتري، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، f.amiri94@basu.ac.ir

^۲نویسنده مسئول، استاد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، mhmoradi@basu.ac.ir

چکیده

واژه‌های کلیدی

ذخیره ساز ابررسانا

کنترل کننده آبخاری

توربین بادی

الگوریتم جستجوی جغد توسعه یافته

مسئله کنترل فرکانس در سیستم قدرت اهمیت فراوانی دارد. حضور توربین بادی در سیستم قدرت، کنترل فرکانس را با چالش‌هایی روبرو می‌کند. به منظور بهبود کنترل فرکانس سیستم قدرت در حضور توربین بادی، در این مقاله، یک روش کنترلی جدید طراحی شده است. در این روش به کنترل هماهنگ سیستم کنترل فرکانس-بار و ذخیره ساز ابررسانا با استفاده از کنترل کننده آبخاری PD-FOPID پرداخته شده است. عضو PD در این نوع کنترل کننده به تغییرات فرکانس سیستم قدرت سریعتر پاسخ می‌دهد و همچنین عضو FOPID در برابر عدم قطعیت پارامترهای سیستم و اغتشاشات وارد بر آن عملکرد مطلوبی را دارا می‌باشد. در این مقاله به حل مشکل الگوریتم جستجوی جغد پرداخته شده است. با توجه به اینکه الگوریتم جستجوی جغد ممکن است در بهینه محلی گیر کند، در این مقاله راه حل‌هایی به منظور حل این مشکل ارائه شده است که الگوریتم جستجوی جغد توسعه یافته نامیده شده است و به منظور بهبود عملکرد کنترل کننده PD-FOPID از الگوریتم جستجوی جغد توسعه یافته برای تنظیم بهینه پارامترهای آن استفاده شده است. روش کنترلی پیشنهادی با چندین روش از جمله: کنترل هماهنگ سیستم کنترل فرکانس-بار و ذخیره ساز ابررسانا با استفاده از کنترل کننده مقاوم، کنترل هماهنگ سیستم کنترل فرکانس-بار و ذخیره ساز ابررسانا با استفاده از کنترل کننده PID بهینه شده با الگوریتم ازدحام پروانه، سیستم کنترل فرکانس-بار با استفاده از کنترل کننده PID بهینه شده با الگوریتم ازدحام پروانه با در نظر گرفتن ذخیره ساز ابررسانا و بدون در نظر گرفتن ذخیره ساز ابررسانا در چهار سناریو مقایسه شده است و نتایج نشان دهنده برتری عملکرد روش پیشنهادی در برابر سایر روش‌ها ذکر شده است. روش پیشنهادی در برابر اغتشاشات بار، اغتشاشات ناشی از توربین بادی و نیز عدم قطعیت مربوط به پارامترهای سیستم مقاوم است.



Sahand University
of Technology

DOR:

[20.1001.1.23223146.1402.10.1.6.9](https://doi.org/10.1001.1.23223146.1402.10.1.6.9)

Journal of Nonlinear
Systems in Electrical
Engineering

Vol.10, No.1

Spring and Summer 2023

ISSN: 2322 – 3146

<http://journals.sut.ac.ir/jnsee>

Improving the Frequency Stability of the Power System in the Presence of a Wind Turbine Using an Optimized Cascaded Controller

Farhad Amiri¹, Mohammad Hassan Moradi^{2,*}

¹ Post-doctoral, Department of Electrical Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran, f.amiri94@basu.ac.ir

² **Corresponding Author**, Professor, Department of Electrical Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran, mhmoradi@basu.ac.ir

ABSTRACT

Keywords

Superconducting magnetic
energy storage
Cascaded controller
Wind turbine
Developed owl search
Algorithmz

The issue of frequency control is very important in the power system. The presence of wind turbine in the power system makes frequency control challenging. In order to improve the frequency control of the power system in the presence of wind turbine, in this paper, a new control method is designed. In this method, the coordinated control of load-frequency control (LFC) system and superconducting magnetic energy storage (SMES) are discussed using the PD-FOPID cascade controller. The PD member in this type of controller responds to the frequency changes of the power system faster and also the FOPID member has a favorable performance against the uncertainty of the system parameters and disturbances. In this paper, the problem of owl search algorithm is solved considering that the owl search algorithm may get stuck in the local optimum. In this paper, solutions are presented to solve this problem of the owl search algorithm, which is called the developed owl search algorithm, and in order to improve the performance of the PD-FOPID controller, the developed owl search algorithm is used to optimally adjust its parameters. The proposed control method is compared with several methods including: Load frequency control (LFC) and superconducting magnetic energy storage (SMES) based on the robust controller, LFC and SMES based on the MSA-PID controller, LFC based on the MSA-PID controller with SMES and LFC based on the MSA-PID controller without SMES. The results show the superiority of the proposed method over the mentioned methods. The proposed method is resistant to load disturbances caused by wind turbines, and uncertainty related to system parameters.

۱-مقدمه

امروزه استفاده از توربین بادی در سیستم قدرت به دلیل افزایش نیاز به انرژی الکتریکی گسترش پیدا کرده است [۱]. توربین بادی به عنوان یک منبع برق پایدار دارای چندین مزیت در سیستم قدرت است از جمله [۲، ۳]: (۱) منبع انرژی فراوان: برای تولید برق، توربین بادی به منبع انرژی فراوان باد نیاز دارد که معمولاً در شبانه-روز موجود است (۲) کاهش آلودگی محیط زیست: به کار بردن توربین بادی به عنوان یک منبع تولید انرژی پاک، سبب کاهش آلودگی محیط زیست خواهد شد (۳) کاهش هزینه در تولید برق: هزینه تولید برق در توربین بادی نسبت به تولید برق با استفاده از سوخت‌های فسیلی کمتر می‌باشد (۴) افزایش قابلیت اطمینان: حضور توربین بادی در سیستم قدرت، سبب افزایش قابلیت اطمینان سیستم قدرت خواهد شد. حضور توربین بادی در سیستم قدرت علاوه بر مزایایی ذکر شده، دارای معایبی نیز می‌باشد که از جمله این معایب می‌توان به مبحث پیچیدگی کنترل فرکانس-بار سیستم قدرت اشاره نمود [۴-۶]. توربین بادی وابسته به باد است با توجه به اینکه باد طبیعت نوسانی دارد که سبب پیچیدگی عملکرد کنترل فرکانس-بار در سیستم قدرت خواهد شد [۷]. در سیستم قدرت، تعادل بین تولید و مصرف وجود دارد. در صورتی که اغتشاش باری در سیستم قدرت اتفاق بیفتد، حلقه کنترل اولیه وظیفه محدود کردن انحرافات فرکانس را خواهد داشت. اما برای بازگرداندن فرکانس به مقدار نامی از حلقه کنترل ثانویه (سیستم کنترل فرکانس-بار) استفاده خواهد شد [۸-۱۰]. به منظور بهبود پایداری فرکانسی در سیستم قدرت، سیستم کنترل فرکانس-بار از کنترل کننده‌های مختلفی بهره برده است [۴۵-۱۱].

کنترل کننده PID کلاسیک همچنان یکی از محبوبترین و پراستفاده ترین کنترل کننده‌ها در صنعت برق است که به دلیل سادگی، قابلیت استفاده آسان، عملکرد سریع و پایداری در کنترل فرکانس-بار سیستم قدرت هم کاربرد وسیعی دارد [۱۱-۲۵]. از کنترل کننده PID [۱۱، ۱۲]، کنترل کننده PID که پارامترهای آن با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری بهینه شده [۱۳]، کنترل کننده PID که پارامترهای آن با استفاده از الگوریتم بهینه سازی گروهی فیل‌ها بهینه شده [۱۵]، کنترل کننده PID که پارامترهای آن با استفاده از الگوریتم بهینه سازی مورچگان بهینه شده [۱۶]، کنترل کننده PID فازی [۱۷]، کنترل کننده PID فازی که پارامترهای آن با استفاده از الگوریتم بهینه سازی مبتنی بر یادگیری-آموزش بهینه شده [۱۸]، کنترل کننده PID فازی که پارامترهای آن با استفاده از الگوریتم تکاملی-تفاضلی بهینه شده [۱۹، ۲۰]، کنترل کننده PID فازی که پارامترهای آن با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات بهینه شده [۲۱]، کنترل کننده PID فازی که پارامترهای آن با استفاده از الگوریتم مورچگان بهینه شده [۲۲]، کنترل کننده PID فازی که پارامترهای آن با استفاده از الگوریتم کرم شب تاب-جستجوی الگو بهینه شده [۲۳]، کنترل کننده PID فازی که پارامترهای آن با استفاده از الگوریتم انفجار مین بهینه شده [۲۴] و کنترل کننده PID فازی که پارامترهای آن با استفاده از الگوریتم کرم شب تاب بهینه شده [۲۵] در سیستم کنترل فرکانس-بار مربوط به سیستم قدرت به منظور بهبود پایداری فرکانسی استفاده شده است. کنترل کننده PID در برابر اغتشاشات وارد بر سیستم قدرت و نیز عدم قطعیت پارامترهای مربوط به سیستم قدرت عملکرد موثری ندارد. کنترل کننده PID فازی در برابر اغتشاشات وارد بر سیستم قدرت تا حدی مقاوم است. اما در برابر عدم قطعیت مربوط به پارامترهای سیستم قدرت، عملکرد چندان مناسبی ندارد.

کنترل کننده FOPID نسبت به کنترل کننده PID دارای دو درجه آزادی می باشد که این دو درجه آزادی دارای مزایایی است (از جمله: ۱) دقت بیشتر (۲) پایداری بهتر (۳) عملکرد مقاوم در سیستمهای دارای اغتشاش و دارای عدم قطعیت پارامترها [۲۶]. با توجه به این مزایا، از کنترل کننده FOPID به طور گسترده در سیستم کنترل فرکانس-بار مربوط به سیستم قدرت به منظور بهبود پایداری فرکانسی استفاده شده است. از کنترل کننده FOPID [۲۹-۲۷]، کنترل کننده FOPID که پارامترهای آن با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری بهینه شده [۳۰]، کنترل کننده FOPID که پارامترهای آن با استفاده از الگوریتم سینوس-کسینوس بهینه شده [۳۲]، کنترل کننده FOPID که پارامترهای آن با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات بهینه شده [۳۳] و کنترل کننده FOPID که پارامترهای آن با استفاده از الگوریتم جستجوی عروس دریایی بهینه شده [۳۴] در سیستم کنترل فرکانس-بار مربوط به سیستم قدرت به منظور بهبود پایداری فرکانسی استفاده شده است. عملکرد کنترل کننده FOPID در برابر اغتشاشات و عدم قطعیت مربوط به پارامترهای سیستم مطلوب است اما در برابر اغتشاشات شدید عملکرد آن تحت تاثیر قرار می گیرد. کنترل کننده FOPID نسبت به کنترل کننده PID دارای دو درجه آزادی می باشد که این دو درجه آزادی دارای مزایایی است (از جمله: ۱) دقت بیشتر (۲) پایداری بهتر (۳) عملکرد مقاوم در سیستمهای دارای اغتشاش و دارای عدم قطعیت پارامترها [۲۶]. با توجه به این مزایا، از کنترل کننده FOPID به طور گسترده در سیستم کنترل فرکانس-بار مربوط به سیستم قدرت به منظور بهبود پایداری فرکانسی استفاده شده است. از کنترل کننده FOPID [۲۹-۲۷]، کنترل کننده FOPID که پارامترهای آن با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری بهینه شده [۳۰]، کنترل کننده FOPID که پارامترهای آن با استفاده از الگوریتم حرکت براونی گازها بهینه شده [۳۱]، کنترل کننده FOPID که پارامترهای آن با استفاده از الگوریتم سینوس-کسینوس بهینه شده [۳۲]، کنترل کننده FOPID که پارامترهای آن با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات بهینه شده [۳۳] و کنترل کننده FOPID که پارامترهای آن با استفاده از الگوریتم جستجوی عروس دریایی بهینه شده [۳۴] در سیستم کنترل فرکانس-بار مربوط به سیستم قدرت به منظور بهبود پایداری فرکانسی استفاده شده است. عملکرد کنترل کننده FOPID در برابر اغتشاشات و عدم قطعیت مربوط به پارامترهای سیستم مطلوب است اما در برابر اغتشاشات شدید عملکرد آن تحت تاثیر قرار می گیرد. سیستمهای ذخیره انرژی ابرسانا، در میدان مغناطیسی خود انرژی الکتریکی را ذخیره می کنند و در مواقع لزوم آن را آزاد می سازند. با توجه به عمر طولانی و ذخیره سازی بالا، ابرساناها، به عنوان یکی از اصلی ترین منابع بهبود پایداری فرکانس در کنار سیستم کنترل فرکانس-بار مربوط به سیستم قدرت به شمار می روند [۳۵]. در [۳۶]، به کنترل هماهنگ سیستم کنترل فرکانس-بار و ذخیره ساز ابرسانا با استفاده از کنترل کننده مقاوم H_2/H_∞ پرداخته شده است. با توجه به اینکه برای طراحی این کنترل کننده مقاوم، نیاز به دانستن مدل دقیق سیستم قدرت می باشد و در مدل سیستم قدرت ممکن است بعضی از اجزا مدل نشده باشند، بنابراین این کنترل کننده در سیستم واقعی ممکن است عملکرد مطلوب خود را از دست بدهد. در [۳۷]، به کنترل هماهنگ سیستم کنترل فرکانس-بار و ذخیره ساز ابرسانا با استفاده از کنترل کننده عصبی-فازی پرداخته شده است. کنترل کننده عصبی-فازی در برابر عدم قطعیت مربوط به پارامترهای سیستم قدرت عملکرد مطلوبی دارد اما در برابر اغتشاشات ناشی از بار وارد بر سیستم قدرت مقاوم نیست. در [۳۸]، به کنترل هماهنگ سیستم کنترل فرکانس-بار و ذخیره ساز ابرسانا با استفاده از کنترل کننده فازی نوع ۲ پرداخته شده است. این کنترل کننده نیز در برابر اغتشاشات شدید وارد بر سیستم قدرت مقاوم نیست. در [۳۹]، به کنترل هماهنگ سیستم

کنترل فرکانس-بار و ذخیره ساز ابررسانا با استفاده از کنترل کننده PID که پارامترهای آن با استفاده از الگوریتم تکاملی-تفاضلی بهینه شده، پرداخته شده است. این روش نیز در برابر اغتشاشات و عدم قطعیت پارامترهای سیستم قدرت مقاوم نیست. در [۴۰]، به کنترل هماهنگ سیستم کنترل فرکانس-بار و ذخیره ساز ابررسانا با استفاده از کنترل کننده PI که پارامترهای آن با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات بهینه شده، پرداخته شده است. در این روش توربین بادی هم در سیستم قدرت حضور دارد. وجود توربین بادی، عملکرد سیستم کنترل فرکانس-بار را با مشکل مواجه می کند (اغتشاشات شدید)، بنابراین کنترل کننده PI بهینه شده با الگوریتم ازدحام ذرات، در برابر این اغتشاشات شدید مقاوم نیست. در [۴۱]، به کنترل هماهنگ سیستم کنترل فرکانس-بار و ذخیره ساز ابررسانا با استفاده از کنترل کننده PID که پارامترهای آن با استفاده از الگوریتم ازدحام پروانه بهینه شده، پرداخته شده است. در این روش توربین بادی هم در سیستم قدرت حضور دارد. عملکرد این روش کنترلی در برابر اغتشاشات بار و اغتشاشات ناشی از توربین بادی مقاوم نیست. در [۴۲]، به کنترل هماهنگ سیستم کنترل فرکانس-بار و ذخیره ساز ابررسانا با استفاده از کنترل کننده مقاوم دینامیکی در حضور توربین بادی پرداخته شده است. این روش در برابر اغتشاشات توربین بادی و نیز عدم قطعیت مربوط به پارامترهای سیستم قدرت مقاوم است. اما این روش نیز دارای مشکلاتی است (از جمله: ۱) پیچیدگی روش کنترلی: به این دلیل پارامترهای زیادی برای تنظیم این کنترل کننده نیاز است و همچنین محاسبات سنگینی نیز دارد (۲) نیاز به داشتن مدل دقیق سیستم قدرت: در سیستم قدرت ممکن است بعضی پارامترها را نتوان مدل کرد و این موضوع عملکرد این روش کنترلی را تحت تاثیر قرار خواهد داد.

امروز کنترل کننده های آبخاری عملکرد مطلوبتری را برای کنترل سیستم نسبت به کنترل کننده های تک مانند PID و FOPID فراهم می کنند. از کنترل کننده های آبخاری به منظور بهبود پایداری فرکانسی در سیستم قدرت استفاده شده است [۴۵]-[۴۳]. در [۴۳]، از کنترل کننده آبخاری FOPI-FOPD که پارامترهای آن با استفاده از الگوریتم جستجوی سنجاقک بهینه شده، به منظور بهبود پایداری فرکانس در سیستم قدرت استفاده شده است. در [۴۴]، از کنترل کننده آبخاری PI-TID که پارامترهای آن با استفاده از الگوریتم بهینه سازی هرج و مرج پروانه تنظیم شده، به منظور بهبود پایداری فرکانس در سیستم قدرت بکار برده شده است. امروز کنترل کننده های آبخاری عملکرد مطلوبتری را برای کنترل سیستم نسبت به کنترل کننده های تک مانند PID و FOPID فراهم می کنند. از کنترل کننده های آبخاری به منظور بهبود پایداری فرکانسی در سیستم قدرت استفاده شده است [۴۵]-[۴۳]. در [۴۳]، از کنترل کننده آبخاری FOPI-FOPD که پارامترهای آن با استفاده از الگوریتم جستجوی سنجاقک بهینه شده، به منظور بهبود پایداری فرکانس در سیستم قدرت استفاده شده است. در [۴۴]، از کنترل کننده آبخاری PI-TID که پارامترهای آن با استفاده از الگوریتم بهینه سازی لشر گوریلها تنظیم شده، به منظور بهبود پایداری فرکانس در سیستم قدرت بکار برده شده است. در [۴۵]، از کنترل کننده آبخاری PI-FOPID که پارامترهای آن با استفاده از تکنیک بهینه سازی لشر گوریلها تنظیم شده، به منظور بهبود پایداری فرکانسی در سیستم قدرت بکار برده شده است.

در این مقاله، یک روش جدید به اسم کنترل کننده آبخاری PD-FOPID به منظور کنترل هماهنگ سیستم کنترل فرکانس-بار و ذخیره ساز ابررسانا در سیستم قدرت با حضور توربین بادی ارائه شده است. همچنین در این مقاله به حل مسئله گیر افتادن الگوریتم جستجوی جغد در بهینه سازی های محلی پرداخته شده است که الگوریتم جستجوی جغد توسعه یافته نامیده شده است. پارامترهای کنترل کننده آبخاری PD-FOPID با استفاده از الگوریتم جستجوی جغد توسعه یافته بهینه شده است. دلیل طراحی

کنترل کننده آبخاری PD-FOPID نسبت به سایر کنترل کننده‌های آبخاری مانند PI-FOPID در ساختار سیستم قدرت این است که کنترل کننده ذکر شده با داشتن عضو PD به تغییرات فرکانس سیستم قدرت در حضور توربین بادی به صورت دقیق‌تر و سریع‌تر واکنش نشان می‌دهد که سبب بهبود پایداری فرکانسی سیستم قدرت می‌شود و در برابر اغتشاشات بار، اغتشاشات توربین بادی و عدم قطعیت مربوط به پارامترهای مربوط به سیستم قدرت مقاوم خواهد بود. از الگوریتم جستجوی جغد توسعه یافته به منظور بهینه سازی پارامترهای کنترل کننده آبخاری در ساختار سیستم قدرت استفاده شده است. این الگوریتم نسبت به سایر الگوریتمهای فراابتکاری مانند الگوریتم کلونی زنبور عسل، الگوریتم ازدحام ذرات، الگوریتم ازدحام پروانه و الگوریتم لشکر گوریلها دارای چندین مزیت است از جمله: (۱) مقاوم بودن در برابر عدم قطعیت مربوط به تابع هدف (۲) تعداد کمتر پارامتر کنترلی (۳) بهینه سازی جهانی [۴۶]. به طور کلی نوآوری‌های مقاله در ادامه خلاصه شده است:

در این مقاله، یک روش جدید به اسم کنترل کننده آبخاری PD-FOPID به منظور کنترل هماهنگ سیستم کنترل فرکانس- بار و ذخیره ساز ابرسانا در سیستم قدرت با حضور توربین بادی ارائه شده است. همچنین در این مقاله به حل مسئله گیر افتادن الگوریتم جستجوی جغد در بهینه‌سازی‌های محلی پرداخته شده است که الگوریتم جستجوی جغد توسعه یافته نامیده شده است. پارامترهای کنترل کننده آبخاری PD-FOPID با استفاده از الگوریتم جستجوی جغد توسعه یافته بهینه شده است. دلیل طراحی کنترل کننده آبخاری PD-FOPID نسبت به سایر کنترل کننده‌های آبخاری مانند PI-FOPID در ساختار سیستم قدرت این است که کنترل کننده ذکر شده با داشتن عضو PD به تغییرات فرکانس سیستم قدرت در حضور توربین بادی به صورت دقیق‌تر و سریع‌تر واکنش نشان می‌دهد که سبب بهبود پایداری فرکانسی سیستم قدرت می‌شود و در برابر اغتشاشات بار، اغتشاشات توربین بادی و عدم قطعیت مربوط به پارامترهای مربوط به سیستم قدرت مقاوم خواهد بود. از الگوریتم جستجوی جغد توسعه یافته به منظور بهینه سازی پارامترهای کنترل کننده آبخاری در ساختار سیستم قدرت استفاده شده است. این الگوریتم نسبت به سایر الگوریتمهای فراابتکاری مانند الگوریتم کلونی زنبور عسل، الگوریتم ازدحام ذرات، الگوریتم ازدحام پروانه و الگوریتم لشکر گوریلها دارای چندین مزیت است از جمله: (۱) مقاوم بودن در برابر عدم قطعیت مربوط به تابع هدف (۲) تعداد کمتر پارامتر کنترلی (۳) بهینه سازی جهانی [۴۶]. به طور کلی نوآوری‌های مقاله در ادامه خلاصه شده است:

(۱) طراحی کنترل کننده جدید آبخاری PD-FOPID به منظور عملکرد مقاوم در برابر اغتشاشات و عدم قطعیت مربوط به پارامترهای سیستم

(۲) بهبود پاسخ فرکانسی در سیستم قدرت در حضور توربین بادی با استفاده از کنترل کننده آبخاری PD-FOPID

(۳) حل مسئله گیر کردن الگوریتم جستجوی جغد در بهینه محلی (الگوریتم جستجوی جغد توسعه یافته)

(۴) بهینه کردن پارامترهای کنترل کننده پیشنهادی (PD-FOPID) به وسیله الگوریتم جستجوی جغد توسعه یافته که قبلاً در مبحث سیستم قدرت به کار برده نشده است.

(۵) تست عملکرد الگوریتم پیشنهادی نسبت به الگوریتمهای کلونی زنبور عسل، ازدحام ذرات، ازدحام پروانه و لشکر گوریلها در بهینه کردن پارامترهای کنترل کننده PD-FOPID با در نظر گرفتن تابع هدف انتگرال مربعات خطا^۱

(۶) تست عملکرد کنترل کننده پیشنهادی به منظور بهبود عملکرد کنترل هماهنگ سیستم کنترل فرکانس- بار و ذخیره ساز ابرسانا در برابر اغتشاشات و عدم قطعیت پارامترهای مربوط به سیستم قدرت.

¹ The integral of squared-error

ادامه مقاله شامل به چندین بخش دسته بندی شده است: در بخش ۲ به بیان سیستم قدرت مورد مطالعه پرداخته شده است. در بخش ۳ به طراحی کنترل کننده پیشنهادی به منظور کنترل هماهنگ سیستم کنترل فرکانس-بار و ذخیره ساز ابررسانا پرداخته شده است. در بخش ۴ به نتایج شبیه سازی و بحث پرداخته شده است. در بخش ۵، نتیجه گیری بیان شده است.

۲-سیستم قدرت مورد مطالعه

در این بخش به بیان سیستم قدرت مورد مطالعه و نیز معادلات فضای حالت سیستم قدرت مورد مطالعه پرداخته شده است.

۲-۱-ساختار سیستم قدرت مورد مطالعه

ساختار سیستم قدرت با در نظر گرفتن توربین بادی در شکل (۱) نشان داده شده است [۴۰-۴۲]. سیستم قدرت مورد مطالعه شامل نیروگاه برق-آبی^۱، نیروگاه بخار^۲، نیروگاه گازی^۳، چندین توربین بادی^۴ و سیستم ذخیره ساز ابررسانا و بار است [۴۰-۴۲]. توان کل تولیدی سیستم قدرت مورد مطالعه ۳۸۰۰۰ MW است در حالی که پیک بار ۲۹۰۰۰ MW است [۴۰-۴۲]. در شکل (۲)، مدل دینامیکی سیستم قدرت با حضور توربین بادی نشان داده شده است، مدل در نظر گرفته شده یک مدل مرتبه اول (کاهش مرتبه یافته) است که برای آنالیز پایداری فرکانسی سیستم قدرت مطلوب است. مدل توربین بادی نشان داده شده در شکل (۲-الف) در [۴۰-۴۲] به طور کامل شرح شده است. مطابق شکل (۲-الف)، از کنترل کننده آبخاری PD-FOPID که پارامترهای آن با استفاده از الگوریتم جستجوی جغد توسعه یافته بهینه شده (روش پیشنهادی) برای کنترل هماهنگ سیستم کنترل فرکانس-بار و ذخیره ساز ابررسانا استفاده شده است که این روش به منظور بهبود پایداری فرکانسی سیستم قدرت در حضور توربین بادی طراحی شده است. توربین بادی طبیعت نوسانی دارد و وابسته به سرعت باد است. با توجه به تعریف محدودیت نرخ تولید^۵، دقت مدل دینامیکی تعریف شده برای سیستم قدرت افزایش پیدا کرده است [۴۰-۴۲]. محدودیت نرخ تولید برای نیروگاه بخار 0.2 pu MW/min، برای نیروگاه گازی 0.1 pu MW/min و برای نیروگاه برق-آبی 0.5 pu MW/min است [۴۰-۴۲]. در شکل (۲-ب)، مدل توربین بادی برای کنترل فرکانس در سیستم قدرت نشان داده شده است که در این مدل سرعت باد در نوسانات سرعت تصادفی ضرب می شود و از بلوک نویز سفید در متلب برای تخمین نوسانات توان خروجی استفاده شده است.

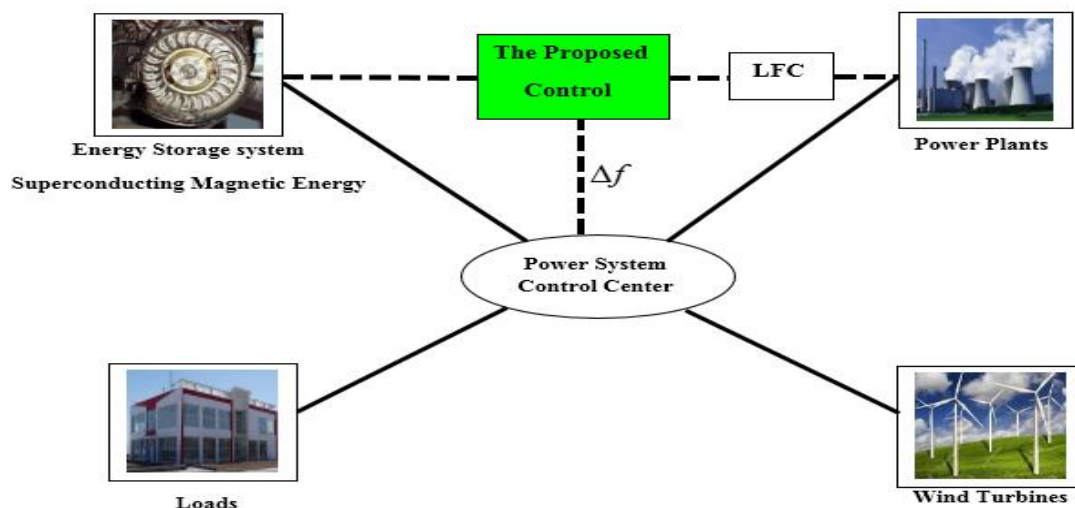
¹ hydropower plants

² non-reheat power plants

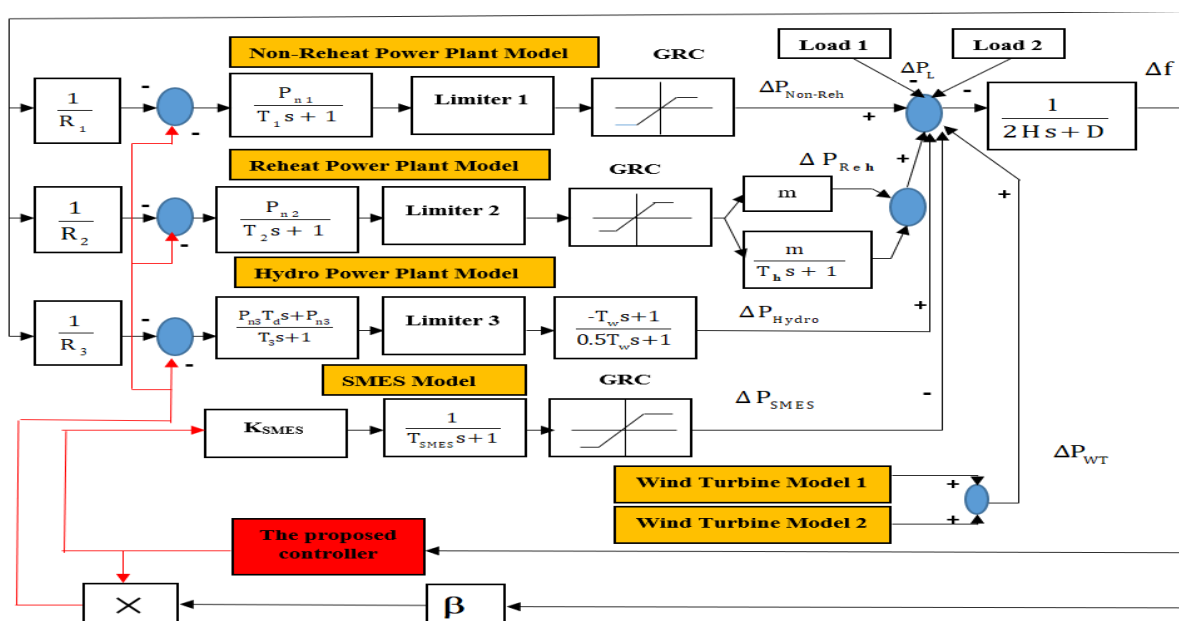
³ reheat power plants

⁴ wind turbines

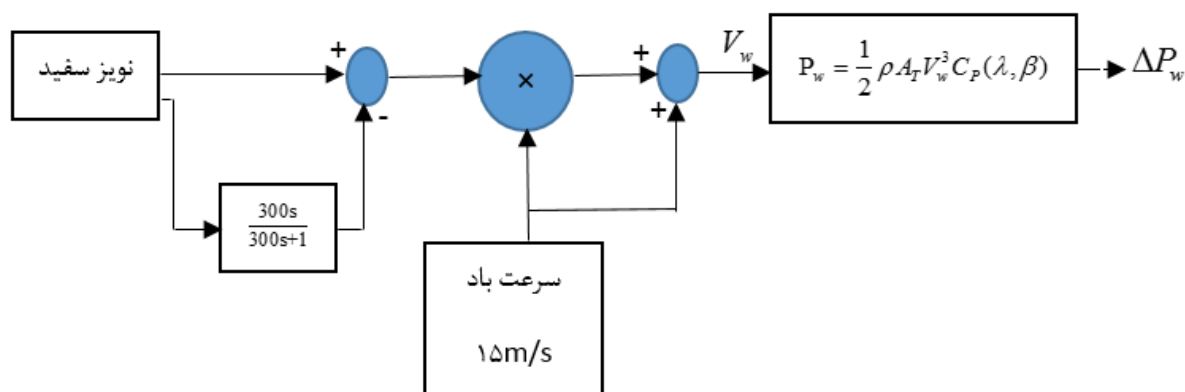
⁵ Generation rate limitations



شکل ۱- ساختار سیستم قدرت با در نظر گرفتن توربین بادی [۴۰-۴۲]



شکل ۲- الف: مدل دینامیکی سیستم قدرت با حضور توربین بادی [۴۰-۴۲]



شکل ۲- ب: مدل توربین بادی برای کنترل فرکانس [۴۰-۴۲]

۲-۲- معادلات فضای حالت سیستم قدرت مورد مطالعه

برای طراحی کنترل کننده پیشنهادی به منظور کنترل هماهنگ سیستم کنترل فرکانس-بار و ذخیره ساز ابررسانا، معادلات فضای حالت سیستم قدرت به وسیله روابط (۱) و (۲) نشان داده شده است. بر طبق روابط (۱) و (۲)، تغییرات فرکانس سیستم قدرت، $\Delta P_{Non-Reh}$: تغییرات توان نیروگاه گازی، ΔP_{g2} : تغییرات توان تولیدی گاورنر ۲، ΔP_{g3} : تغییرات توان تولیدی گاورنر ۳، ΔP_{Hydro} : تغییرات توان تولیدی نیروگاه برق-آبی، ΔP_L : تغییرات بار و ΔP_{SMES} : تغییرات توان تولیدی سیستم ذخیره انرژی مغناطیسی ابررسانا است. پارامترهای سیستم قدرت مورد مطالعه در جدول (۱) نشان داده شده اند [۴۰-۴۲].

$$\begin{bmatrix} \dot{\Delta f} \\ \dot{\Delta P_{Non-Reh}} \\ \dot{\Delta P_{Reh}} \\ \dot{\Delta P_{g2}} \\ \dot{\Delta P_{Hydro}} \\ \dot{\Delta P_{g3}} \\ \dot{\Delta P_{WT}} \\ \dot{\Delta P_{SMES}} \end{bmatrix} = \frac{2m}{T_h} \begin{bmatrix} -\frac{D}{2H} & \frac{1}{2H} & \frac{1}{2H} & 0 & \frac{1}{2H} & 0 & \frac{1}{2H} & \frac{1}{2H} \\ -\frac{P_{n1}}{T_1 R_1} & -\frac{1}{T_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{m P_{n2}}{T_2 R_2} & 0 & -\frac{1}{T_h} & (\frac{2m}{T_h} - \frac{m}{T_2}) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{P_{n2}}{T_2 R_2} & 0 & 0 & -\frac{1}{T_2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ (\frac{-T_d P_{n3} D}{T_3 R_3 H} + \frac{2P_{n3}}{T_3 R_3}) & (\frac{T_d P_{n3}}{T_3 R_3 H}) & (\frac{T_d P_{n3}}{T_3 R_3 H}) & 0 & (\frac{T_d P_{n3}}{T_3 R_3 H} - \frac{2}{T_w}) & (\frac{2}{T_w} + \frac{2}{T_3}) & 0 & 0 \\ (\frac{T_d P_{n3} D}{2T_3 R_3 H} - \frac{P_{n3}}{T_3 R_3}) & (\frac{-T_d P_{n3}}{2T_3 R_3 H}) & (\frac{-T_d P_{n3}}{2T_3 R_3 H}) & 0 & (\frac{-T_d P_{n3}}{2T_3 R_3 H}) & -\frac{1}{T_3} & 0 & 0 \\ -\frac{D_i}{T_{SMES}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{WT}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{SMES}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta f \\ \Delta P_{Non-Reh} \\ \Delta P_{Reh} \\ \Delta P_{g2} \\ \Delta P_{Hydro} \\ \Delta P_{g3} \\ \Delta P_{WT} \\ \Delta P_{SMES} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{P_{n1}}{T_1} \\ -\frac{m P_{n2}}{T_2} \\ -\frac{P_{n2}}{T_2} \\ \frac{2P_{n3}}{T_3} \\ -\frac{P_{n3}}{T_3} \\ 0 \\ -\frac{K_{SMES}}{T_{SMES}} \end{bmatrix} [u] \quad (1)$$

$$+ \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{2H} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -\frac{T_d P_{n3}}{T_3 R_3 H} \\ 0 & \frac{T_d P_{n3}}{2T_3 R_3 H} \\ -\frac{1}{T_{WT}} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{wi} \\ \Delta P_L \end{bmatrix}$$

$$y = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} \Delta f \\ \Delta P_{Non-reh} \\ \Delta P_{Reh} \\ \Delta P_{g2} \\ \Delta P_{Hydro} \\ \Delta P_{g3} \\ \Delta P_{WT} \\ \Delta P_{SMES} \end{bmatrix} \quad (2)$$

جدول ۱- پارامترهای مربوط به سیستم قدرت [۴۰-۴۲]

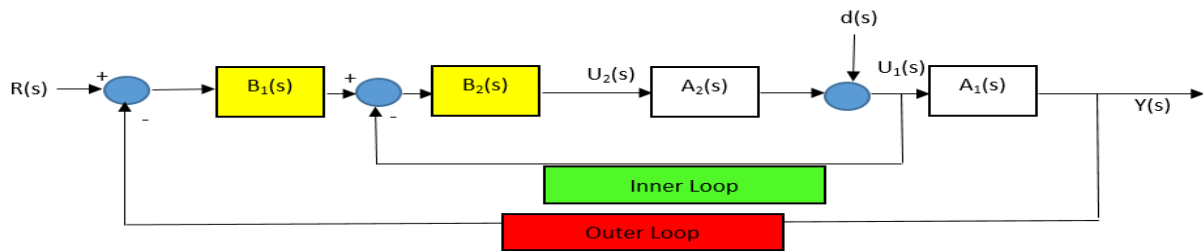
پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
R_1	2.5	m	0.5
R_2	2.5	T_d	5
R_3	1	T_1	0.4
β	1	T_2	0.4
T_w	1	T_3	90
T_h	6	H	5.7096
P_{n1}	0.2529	P_{n3}	0.1364
P_{n2}	0.6107	$P_{w,1}$	750KW
$P_{w,2}$	3000KW	D	0.028

۳- طراحی کنترل کننده پیشنهادی به منظور کنترل هماهنگ سیستم کنترل فرکانس-بار و ذخیره ساز ابررسانا

در این بخش به بررسی ساختار کنترل کننده پیشنهادی، بررسی الگوریتم جغد توسعه یافته و طراحی کنترل کننده پیشنهادی با استفاده از الگوریتم جغد توسعه یافته پرداخته شده است.

۳-۱- کنترل کننده پیشنهادی

کنترل کننده آنباشی PD-FOPID به منظور بهبود پایداری فرکانسی در سیستم قدرت با حضور توربین بادی و همچنین کاهش انحرافات فرکانس در برابر اغتشاشات بار، اغتشاشات توربین بادی و عدم قطعیت مربوط به پارامترهای سیستم قدرت طراحی شده است. کنترل کننده پیشنهادی دارای دو کنترل کننده PD و FOPID است که خروجی کنترل کننده PD، مرجع کنترل کننده FOPID را تعیین می کند. در کنترل کننده پیشنهادی، کنترل کننده PD به عنوان کنترل کننده اصلی یا اولیه یا خارجی شناخته می شود و کنترل کننده FOPID به عنوان کنترل کننده داخلی یا ثانویه یا فرعی شناخته خواهد شد. در شکل (۳)، ساختار کنترل کننده پیشنهادی PD-FOPID به منظور کنترل هماهنگ سیستم کنترل فرکانس-بار و ذخیره ساز ابررسانا نشان داده شده است. مطابق شکل (۳)، تابع انتقال حلقه داخلی به وسیله رابطه (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳- ساختار کنترل کننده پیشنهادی PD-FOPID به منظور کنترل هماهنگ سیستم کنترل فرکانس بار و ذخیره ساز ابرسانا

$$Y_2(s) = A_2(s)U_2(s) \quad (۳)$$

در رابطه (۳)، $A_2(s)$ نشان $B_2(s) = K_{P2} + K_I s^{-\lambda} + K_{d2} s^\mu$ نشان دهنده تابع انتقال فرایند داخلی و $U_2(s)$ نشان دهنده سیگنال وارد شده به فرایند داخلی می باشد. کنترل کننده اولیه (PD) در لایه خارجی انحرافات فرکانس را کم می کند. تابع انتقال حلقه خارجی به وسیله رابطه (۴) نشان داده شده است.

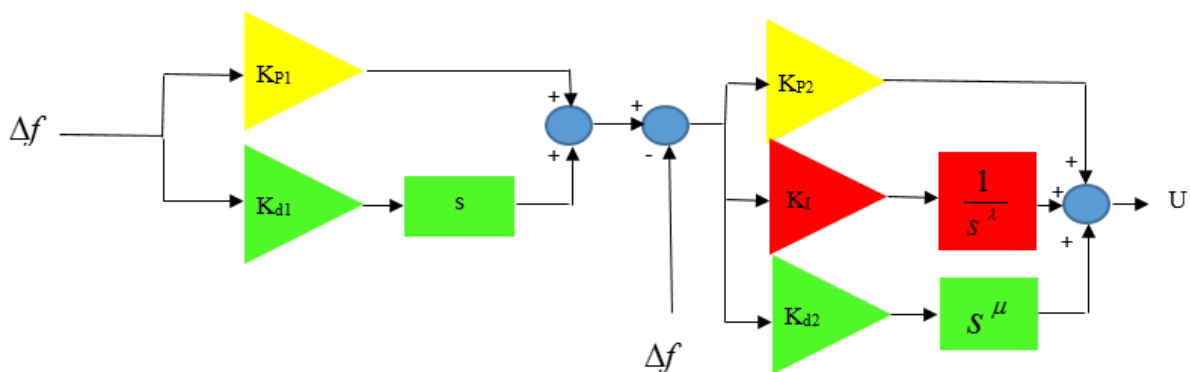
$$Y(s) = A_1(s)U_1(s) \quad (۴)$$

در رابطه (۴)، $A_1(s)$ نشان دهنده تابع انتقال فرایند خارجی و $U_1(s)$ نشان دهنده سیگنال وارد شده به فرایند خارجی می باشد. مطابق شکل (۳)، کنترل کننده FOPID در لایه داخلی با $B_2(s)$ نشان داده شده است و کنترل کننده PD در لایه خارجی با $B_1(s)$ نشان داده شده است. تابع انتقال کنترل کننده های PD و کنترل کننده FOPID به وسیله روابط (۵) و (۶) نشان داده شده است.

$$B_1(s) = K_{P1} + K_{d1} s \quad (۵)$$

$$B_2(s) = K_{P2} + K_I s^{-\lambda} + K_{d2} s^\mu \quad (۶)$$

در شکل (۴)، ساختار داخلی کنترل کننده پیشنهادی به طور کامل نشان داده شده است.



شکل ۴- ساختار داخلی کنترل کننده پیشنهادی

پارامترهای کنترل کننده پیشنهادی PD-FOPID به وسیله مینیم کردن تابع هدف (انتگرال مربعات خطا) با استفاده از الگوریتم جغد توسعه یافته بدست آمده است. تابع هدف (انتگرال مربعات خطا) به وسیله رابطه (۷) نشان داده شده است. قیود توابع هدف به وسیله رابطه (۸) نشان داده شده است.

$$ISE = \int_0^{t_s} (\Delta f)^2 dt \quad (7)$$

$$\begin{aligned} K_{P1,min} &\leq K_{P1} \leq K_{P1,max} \\ K_{d1,min} &\leq K_{d1} \leq K_{d1,max} \\ K_{P2,min} &\leq K_{P2} \leq K_{P2,max} \\ K_{I,min} &\leq K_I \leq K_{I,max} \\ K_{d2,min} &\leq K_{d2} \leq K_{d2,max} \\ \lambda_{min} &\leq \lambda \leq \lambda_{max} \\ \mu_{min} &\leq \mu \leq \mu_{max} \end{aligned} \quad (8)$$

۳-۲- الگوریتم جغد توسعه یافته

الگوریتم جستجوی جغد توسعه یافته یکی از جدیدترین الگوریتمهای فراابتکاری است که نسبت به الگوریتمهایی مانند الگوریتمهای کلونی زنبور عسل، ازدحام ذرات، ازدحام پروانه و لشکر گوریلها دارای چندین مزیت است از جمله: (۱) جستجوی کارآمد: از رفتار جستجوی جغدان استفاده می کند که امکان جستجوی کارآمد در فضای جستجو را فراهم می کند. این الگوریتم برای توازن بین جستجو و بهره برداری طراحی شده است، که امکان همگرایی سریع به راه حل های بهینه را فراهم می کند. (۲) بهینه سازی جهانی: یک الگوریتم بهینه سازی جهانی است، به این معنی که قادر است به دنبال بهینه جهانی باشد و در معرض گیر افتادن در بهینه های محلی نباشد. این ویژگی، الگوریتم جستجوی جغد توسعه یافته را برای حل مسائل بهینه سازی پیچیده با چندین قله مناسب می کند. (۳) مقاوم بودن: در برابر نویز و عدم قطعیت در تابع هدف مقاوم دارد. این الگوریتم قادر است با محیط های نویزی و پویا سازگاری داشته باشد، که آن را برای کاربردهای واقعی که تابع هدف ممکن است در طول زمان تغییر کند، مناسب می کند. (۴) تعداد پارامترهای کنترلی کمتر: نسبت به سایر الگوریتم های بهینه سازی تعداد پارامترهای کنترلی کمتری خواهد داشت که فرآیند تنظیم را ساده می کند. این امر باعث کاهش بار محاسباتی و سهولت پیاده سازی و استفاده آن در حوزه های مختلف می شود. (۵) سرعت همگرایی سریع: این الگوریتم سرعت همگرایی سریع خود را در بسیاری از مسائل بهینه سازی نشان داده است. این الگوریتم قادر است به سرعت به راه حل های نزدیک به بهینه همگرا شود، که زمان محاسباتی مورد نیاز برای یافتن راه حل های خوب را کاهش می دهد. [۴۶-۴۸].

مانند سایر الگوریتم های فراابتکاری، الگوریتم جستجوی جغد به صورت تصادفی عمل می کند و با انتخاب تصادفی جمعیت، اجرای الگوریتم را آغاز می کند. جمعیت در این الگوریتم نشان دهنده موقعیت جغدها بین درختان جنگل به عنوان فضای جستجو است. با توجه به اینکه تعداد جغدها n و فضای جستجوی بعدی d در نظر گرفته می شود، مکان تصادفی جغدها در یک ماتریس $n \times d$ به صورت رابطه (۹) نشان داده می شود [۴۶-۴۸].

$$O = \begin{bmatrix} O_{1,1} & \dots & O_{1,d} \\ \vdots & & \vdots \\ O_{n,1} & \dots & O_{n,d} \end{bmatrix}_{n \times d} \quad (9)$$

در رابطه (۹)، عنصر ماتریس $O_{i,j}$ پارامتر λ ام (بعد) جغد λ ام را تعریف می کند. برای ایجاد یک وضعیت اولیه توزیع یکنواخت، از رابطه (۱۰) استفاده شده است [۴۶-۴۸]:

$$o_i = o_l + (o_l + o_u) \times U(0,1) \quad (10)$$

در رابطه (۱۰)، $U(0,1)$ یک عدد صحیح تصادفی و یکنواخت است که بین [۰ تا ۱] قرار دارد و O_l و O_u مرزهای بالا و پایین جغد λ ام در بعد λ ام است.

هزینه موقعیت جغدها در جنگل با استفاده از یک تابع هزینه تعیین می شود و به صورت رابطه (۱۱) نشان داده شده است [۴۶-۴۸].

$$f = \begin{bmatrix} f_1([o_{1,1}, o_{1,2}, \dots, o_{1,d}]) \\ \vdots \\ f_n([o_{n,1}, o_{n,2}, \dots, o_{n,d}]) \end{bmatrix} \quad (11)$$

هزینه موقعیت جغد به شدت صداهایی که از طریق گوش دریافت می شود، وابسته است. در این حالت، جغدی که بیشترین شدت صدا را دریافت می کند، به عنوان بهترین جغد شناخته می شود زیرا بهترین جغد، نزدیکتر به هدف است. داده های مقدار شدت نرمالیز شده جغد λ ام برای بروز رسانی موقعیت استفاده می شود و از رابطه (۱۲) بدست خواهد آمد [۴۶-۴۸].

$$\begin{cases} I_i = \frac{f_i - w}{b - w} \\ b = \max_{m \in 1, \dots, n} f_m \\ w = \min_{m \in 1, \dots, n} f_m \end{cases} \quad (12)$$

اطلاعات فاصله طعمه برای هر جغد از طریق رابطه (۱۳) بدست آمده است [۴۶-۴۸].

$$D_i = \sqrt{\sum_i (o_i - L)^2} \quad (۱۳)$$

در رابطه (۱۳)، L نشان دهنده موقعیتهای طعمه است که با استفاده از مناسبترین جغد بدست می آیند. الگوریتم جستجوی جغد فرض می کند که یک طعمه در جنگل وجود دارد (بهینه سازی جهانی). در طول شکار، جغدها به آرامی به سمت طعمه پرواز می کنند. شدت تغییر برای جغد Δm به صورت رابطه (۱۴) نشان داده شده است [۴۶-۴۸].

$$C_i = \frac{I_i}{D_i^2} + R_n \quad (۱۴)$$

در رابطه (۱۴)، D_i^2 بجای $4\pi D_i^2$ استفاده می شود و R_n صدای تصادفی است که مدل را عملی تر نشان دهد. با تغییر موقعیت طعمه، جغدها باید بی صدا به سمت طعمه حرکت کنند. در این الگوریتم، تغییر موقعیت طعمه بر اساس احتمال به دست می آید و بنابراین موقعیت های جدید جغدها نسبت به موقعیت های طعمه با مکانیسم به روز رسانی موقعیت به وسیله رابطه (۱۵) نشان داده شده است.

$$o_i^{t+1} = \begin{cases} o_i^t + \beta \times C_i \times |\alpha L - o_i^t|, & p_{pm} < 0.5 \\ o_i^t - \beta \times C_i \times |\alpha L - o_i^t|, & p_{pm} > 0.5 \end{cases} \quad (۱۵)$$

در رابطه (۱۵)، p_{pm} احتمال تغییر موقعیت طعمه را نشان می دهد، α و β یک عدد تصادفی توزیع شده یکنواخت را نشان می دهند که به ترتیب بین ۰ تا ۰.۵ و ۰ تا ۱.۹ هستند. الگوریتم جستجوی جغد تنها یک متغیر (β) دارد که باعث اطمینان بیشتر آن نسبت به سایر الگوریتم ها شده است. الگوریتم جستجوی جغد، یکی از جدیدترین الگوریتم های بهینه سازی است ولی گاهی اوقات در بهینه محلی گیر می کند. این نقص، باعث ارائه راه حل هایی با همگرایی زود هنگام می شود. به منظور بهبود عملکرد الگوریتم جستجوی جغد توسعه یافته و رفع مشکل گیر افتادن در بهینه محلی تغییرات در این الگوریتم انجام شده است. اخیراً، با گسترش تأثیرات دینامیک غیرخطی در مدل سازی، استفاده از نظریه آشوب گسترش یافته است. بهینه سازی یکی از حوزه هایی است که می تواند تحت تأثیر نظریه آشوب قرار گیرد. در الگوریتم جستجوی جغد استاندارد، متغیر β تنها مقدار تصادفی در این الگوریتم است. استفاده از متغیر β در هر تکرار باعث همگرایی زود هنگام می شود. برای جلوگیری از همگرایی زود هنگام سیستم، از یک روش آشوبی به نام نگاشت سینگر استفاده می شود. این روش از متغیر ناشناخته β به عنوان یک معادله منظم به صورت رابطه (۱۶) استفاده می کند.

$$\beta_{i+1} = 1.07(7.9\beta_i - 23.3\beta_i^2 + 28.7\beta_i^3 - 13.3\beta_i^4) \quad (۱۶)$$

یک روش دیگر برای بهبود همگرایی زود هنگام در الگوریتم جستجوی جغد، استفاده از پرواز لووی است. پیمایش تصادفی یک بخش کلیدی از این رویکرد برای مدیریت مناسب جستجوی محلی است. این روش به وسیله روابط (۱۷) تا (۱۹) نشان داده شده است.

$$Le(w) \approx w^{-1-\tau} \quad (۱۷)$$

$$w = \frac{A}{|B|^{\frac{1}{\tau}}} \quad (18)$$

$$\sigma^2 = \left\{ \frac{\Gamma(1+\tau)}{\Gamma((1+\tau)/2)} \frac{\sin(\pi\tau/2)}{2^{(1+\tau)/2}} \right\}^{\frac{2}{\tau}} \quad (19)$$

در روابط (۱۷) تا (۱۹)، τ نشان‌دهنده شاخص LV است که در بازه $[0, 2]$ قرار دارد، $A \approx N(0, \sigma^2)$ ، $B \approx N(0, \sigma^2)$ ، w نشان‌دهنده اندازه گام و $\Gamma(0)$ تابع گاما را توصیف می‌کند، $\frac{A}{B} \approx N(0, \sigma^2)$ تعریف می‌کند که نمونه‌های تولید شده از یک توزیع گاوسی که میانگین آن صفر و واریانس آن σ^2 است. بر اساس روابط گفته شده، مکان جدید جغدها با استفاده از رابطه (۲۰) بدست آمده است.

$$o_i^{t+1} = \begin{cases} o_i^t + \beta \times C_i \times |\alpha L - o_i^t| \times Le(\delta), & p_{pm} < 0.5 \\ o_i^t - \beta \times C_i \times |\alpha L - o_i^t| \times Le(\delta), & p_{pm} > 0.5 \end{cases} \quad (20)$$

۳-۳- طراحی کنترل کننده پیشنهادی با استفاده از الگوریتم جستجوی جغد توسعه یافته

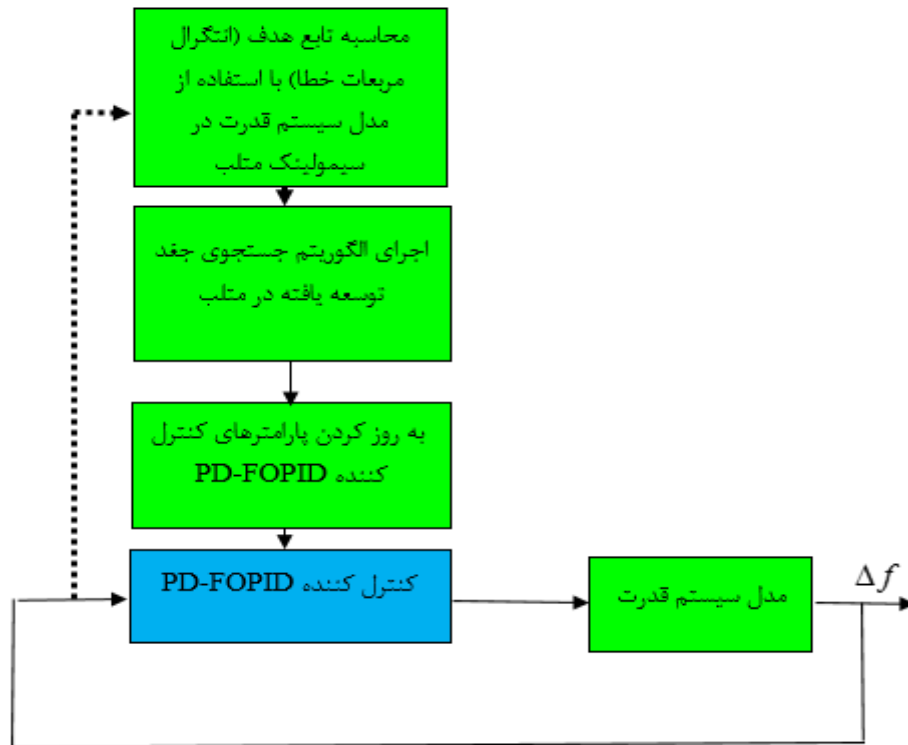
بهینه کردن پارامترهای کنترل کننده PD-FOPID به منظور کنترل هماهنگ سیستم کنترل فرکانس-بار و ذخیره ساز ابررسانا شامل چندین مرحله زیر است:

- (۱) تعریف تابع هدف: ابتدا تابع هدف برای این مسئله مطابق رابطه (۷) تعریف شده است.
- (۲) تعریف محدودیت‌ها: برای بهینه سازی پارامترهای کنترل کننده PD-FOPID، محدودیت‌های در نظر گرفته برای این کنترل کننده مطابق رابطه (۸) تعریف شده است.
- (۳) تولید جمعیت اولیه: در این مرحله، یک جمعیت اولیه از جغدها تولید می‌شود. هر جغد در این جمعیت یک مقدار تصادفی برای هر پارامتر کنترل کننده PD-FOPID دارد.
- (۴) ارزیابی جمعیت: جمعیت اولیه بر اساس تابع هدف ارزیابی می‌شود. برای هر جغد، مقدار تابع هدف محاسبه می‌شود.
- (۵) انتخاب جغدهای برتر: جغدهایی که دارای بهترین مقادیر تابع هدف هستند، برای نسل بعدی انتخاب می‌شوند.
- (۶) تولید جغدهای جدید: در این مرحله، جغدهای جدید برای نسل بعدی تولید می‌شوند. این تولید می‌تواند با استفاده از عملیات مانند جمع و تفریق جغدهای برتر یا با استفاده از عملیات تصادفی انجام شود.
- (۷) ارزیابی جمعیت جدید: جمعیت جدید بر اساس تابع هدف ارزیابی می‌شود.

۸) تکرار مراحل ۵ تا ۷: مراحل ۵ تا ۷ زمانی که شرایط خاتمه معینی (مانند تعداد تکرارها یا دستیابی به مقدار مطلوب تابع هدف) برآورده شود، تکرار می‌شوند.

۹) انتخاب بهترین جغد: پس از پایان تکرارها، جغدی که دارای بهترین مقدار تابع هدف است، به عنوان پاسخ بهینه انتخاب می‌شود. این جغد مقادیر بهینه برای پارامترهای کنترل کننده PD-FOPID را نشان می‌دهد.

در شکل (۵)، روند بهینه کردن پارامترهای کنترل کننده PD-FOPID به منظور کنترل هماهنگ سیستم کنترل فرکانس-بار و ذخیره ساز ابرسانا با استفاده از الگوریتم جستجوی جغد توسعه یافته نشان داده شده است.



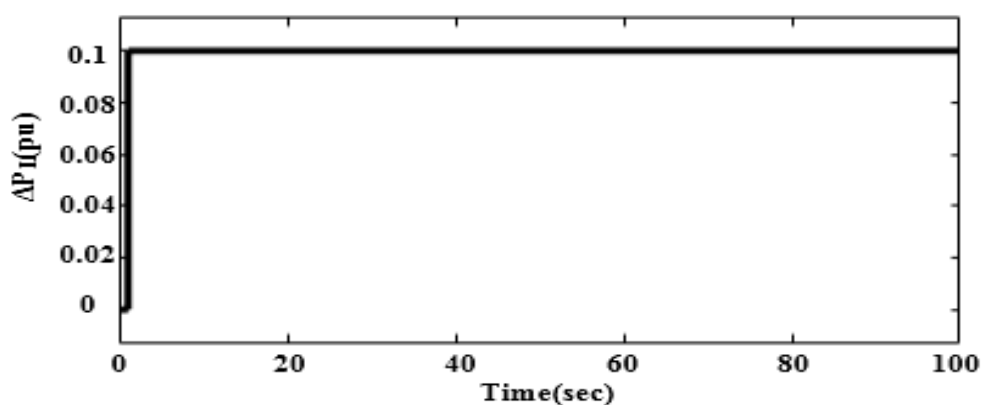
شکل ۵- روند بهینه کردن پارامترهای کنترل کننده PD-FOPID

۴- نتایج شبیه سازی و بحث

در این بخش، سیستم مورد مطالعه در حضور توربین بادی تحت ۴ سناریو مختلف تست شده است. سناریو (۱) شامل دو بخش است: بخش اول به منظور ارزیابی عملکرد و همگرایی الگوریتم جستجوی جغد توسعه یافته در بهینه کردن پارامترهای کنترل کننده PD-FOPID و مقایسه این الگوریتم با الگوریتمهای کلونی زنبور عسل، ازدحام ذرات، ازدحام پروانه و لشکر گوریلها پرداخته شده است. در بخش دوم نیز، کنترل کننده پیشنهادی با چندین روش از جمله کنترل هماهنگ سیستم کنترل فرکانس-بار و ذخیره ساز ابرسانا با استفاده از کنترل کننده مقاوم، کنترل هماهنگ سیستم کنترل فرکانس-بار و ذخیره ساز ابرسانا با استفاده از کنترل کننده PID بهینه شده با الگوریتم ازدحام پروانه، سیستم کنترل فرکانس-بار با استفاده از کنترل کننده PID بهینه شده با الگوریتم ازدحام پروانه با در نظر گرفتن ذخیره ساز ابرسانا و بدون در نظر گرفتن ذخیره ساز ابرسانا تحت اغتشاش بار و اغتشاش توربین بادی مقایسه شده است. در سناریو (۲) به مقایسه روش پیشنهادی با سایر روشها (کنترل هماهنگ سیستم کنترل فرکانس-بار و ذخیره ساز ابرسانا با استفاده از کنترل کننده مقاوم، کنترل هماهنگ سیستم کنترل فرکانس-بار و ذخیره ساز ابرسانا با استفاده از

کنترل کننده PID بهینه شده با الگوریتم ازدحام پروانه، سیستم کنترل فرکانس-بار با استفاده از کنترل کننده PID بهینه شده با الگوریتم ازدحام پروانه با در نظر گرفتن ذخیره ساز ابرسانا و بدون در نظر گرفتن ذخیره ساز ابرسانا) به منظور چگونگی عملکرد در برابر اغتشاشات بار و اغتشاشات توربین بادی پرداخته شده است. در سناریوهای (۳) و (۴) نیز به مقایسه عملکرد روش پیشنهادی با سایر روشهای ذکر شده در برابر اغتشاشات بار، اغتشاشات منابع انرژی تجدیدپذیر (توربین بادی) و عدم قطعیت پارامترهای سیستم قدرت، پرداخته شده است.

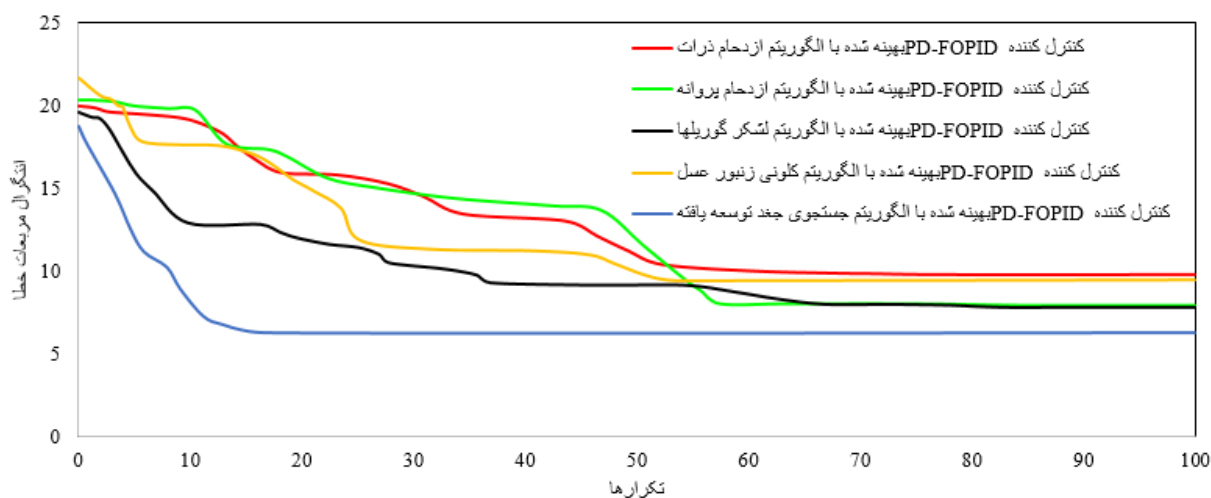
سناریو (۱): در این سناریو به سیستم قدرت مورد مطالعه (شکل (۲))، اغتشاش باری به مقدار $\Delta P_L = 0.1 \text{ pu}$ در $t = 1 \text{ s}$ مطابق شکل (۶) وارد شده است. پارامترهای اولیه مربوط به الگوریتم جستجوی جغد توسعه یافته و کنترل کننده آبخاری PD-FOPID در جدول (۲) نشان داده شده است. در شکل (۷)، همگرایی الگوریتمهای جستجوی جغد توسعه یافته، کلونی زنبور عسل، ازدحام ذرات، ازدحام پروانه و لشکر گوریلها در بهینه کردن پارامترهای کنترل کننده PD-FOPID با در نظر گرفتن انتگرال مربعات خطا به عنوان تابع هدف نشان داده شده است. مطابق شکل (۷)، الگوریتم جستجوی جغد توسعه یافته همگرایی سریعتری دارد و مقدار انتگرال مربعات خطا برای الگوریتمهای جستجوی جغد توسعه یافته، لشکر گوریلها، ازدحام پروانه، کلونی زنبور عسل و ازدحام ذرات به ترتیب برابر 6.9×10^{-6} ، 9.1×10^{-6} ، 9.2×10^{-6} ، 10×10^{-6} ، 10.1×10^{-6} است. در جدول (۳)، مقدار پارامترهای بهینه شده کنترل کننده PD-FOPID با در نظر گرفتن تابع هدف (انتگرال مربعات خطا) برای الگوریتم جستجوی جغد توسعه یافته، لشکر گوریلها، ازدحام پروانه، کلونی زنبور عسل و ازدحام ذرات نشان داده شده است. مطابق شکل (۷) و جدول (۳)، از الگوریتم جستجوی جغد توسعه یافته برای بهینه سازی پارامترهای کنترل کننده PD-FOPID استفاده خواهد شد. در این سناریو، اغتشاشات بار و اغتشاشات توربین بادی مطابق شکل (۸) به سیستم قدرت اعمال شده اند. در شکل های (۹-الف، ۹-ب و ۹-ج)، پاسخ فرکانسی سیستم قدرت به اغتشاشات بار و توربین بادی نشان داده شده است. مطابق شکل های مذکور، بیشینه انحراف فرکانس و زمان نشست بر اساس کنترل هماهنگ سیستم کنترل فرکانس-بار و ذخیره ساز ابرسانا مبتنی بر کنترل کننده پیشنهادی (کنترل کننده PD-FOPID بهینه شده با استفاده از الگوریتم جستجوی جغد توسعه یافته) به ترتیب برابر 0.0009 هرتز و 4.2 ثانیه می باشد. بیشینه انحراف فرکانس و زمان نشست بر اساس کنترل هماهنگ سیستم کنترل فرکانس-بار و ذخیره ساز ابرسانا مبتنی بر کنترل کننده مقاوم به ترتیب برابر 0.0018 هرتز و 5 ثانیه می باشد. بیشینه انحراف فرکانس و زمان نشست بر اساس کنترل هماهنگ سیستم کنترل فرکانس-بار و ذخیره ساز ابرسانا مبتنی بر کنترل کننده PID بهینه شده با الگوریتم ازدحام پروانه به ترتیب برابر 0.0173 هرتز و 19 ثانیه می باشد. بیشینه انحراف فرکانس و زمان نشست بر اساس سیستم کنترل فرکانس-بار با استفاده از کنترل کننده PID بهینه شده با الگوریتم ازدحام پروانه در نظر گرفتن ذخیره ساز ابرسانا به ترتیب برابر 0.021 هرتز و 38 ثانیه می باشد. بیشینه انحراف فرکانس و زمان نشست بر اساس سیستم کنترل فرکانس-بار با استفاده از کنترل کننده PID بهینه شده با الگوریتم ازدحام پروانه بدون در نظر گرفتن ذخیره ساز ابرسانا به ترتیب برابر 0.0476 هرتز و 90 ثانیه می باشد. مطابق نتایج این سناریو، کنترل کننده پیشنهادی در کاهش انحرافات سیستم قدرت نسبت به سایر کنترل کننده های مذکور مطلوبتر عمل کرده است و زمان نشست انحرافات فرکانس ناشی از اغتشاشات وارد بر سیستم قدرت را نیز کاهش داده است.



شکل ۶- اغتشاش بار اعمال شده به سیستم قدرت [۴۱]

جدول ۲- پارامترهای اولیه مربوط به الگوریتم جستجوی جغد بهبود یافته و کنترل کننده آبهاری PD-FOPID

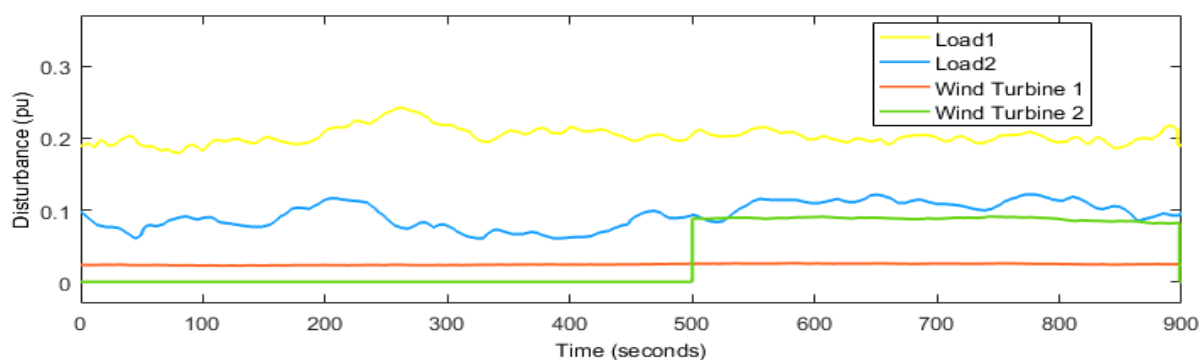
مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
0	$K_{P1,min}, K_{d1,min}, K_{P2,min}, K_{I,min}, K_{d2,min}$	100	جمعیت جغدها
100	$K_{P1,max}, K_{d1,max}, K_{P2,max}, K_{I,max}, K_{d2,max}$	[0,1000]	محدوده جنگل برای ظرفیت
0	λ_{min}, μ_{min}	1	α
1	λ_{max}, μ_{max}	100	تکرارها



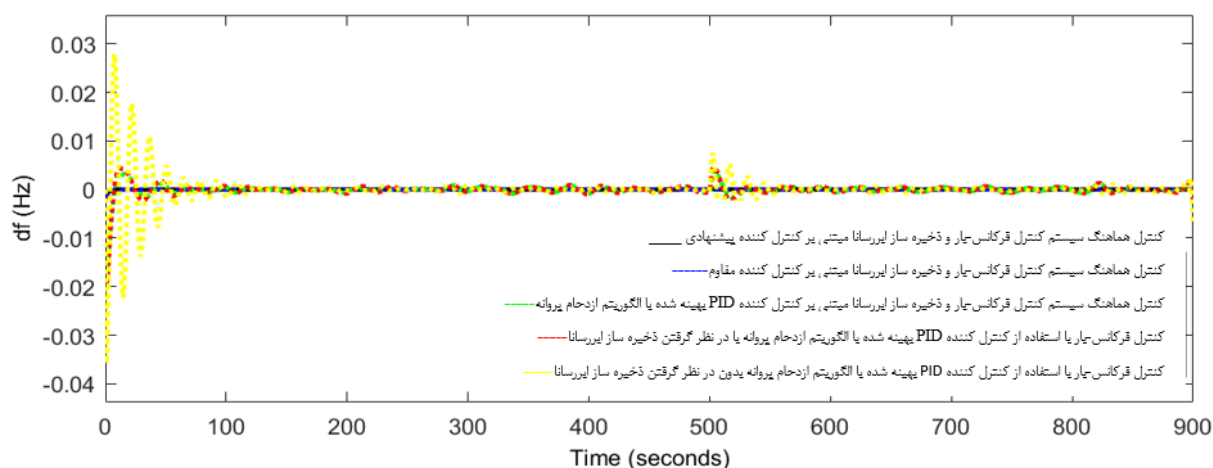
شکل ۷- همگرایی الگوریتمهای جستجوی جغد توسعه یافته، لشکر گوریلها، ازدحام پروانه، کلونی زنبور عسل و ازدحام ذرات در بهینه کردن پارامترهای کنترل کننده PD-FOPID

جدول ۳- مقدار پارامترهای بهینه شده کنترل کننده PD-FOPID با استفاده از الگوریتمهای مختلف

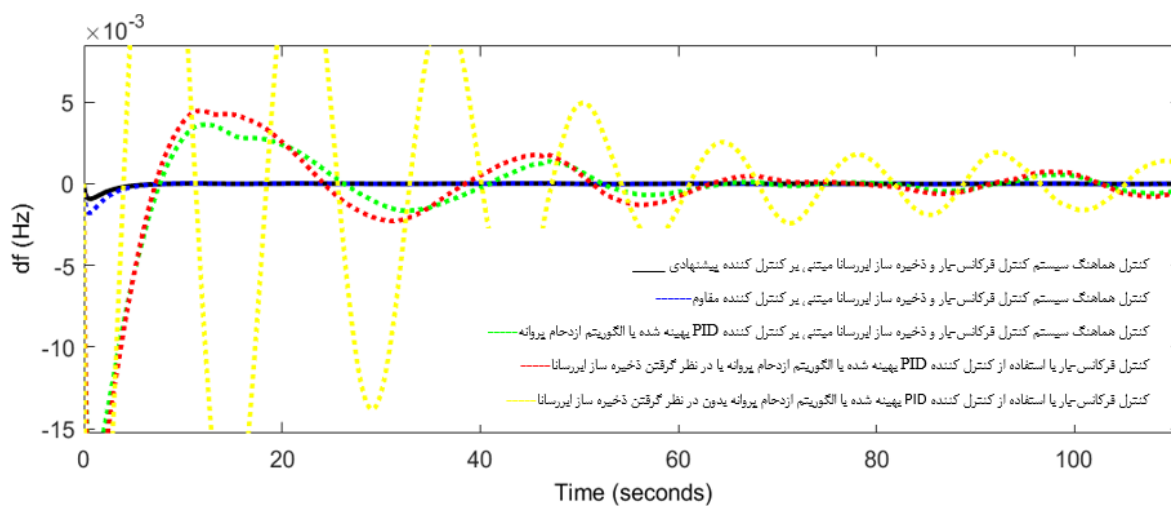
کنترل کننده ها	K_{P1}	K_{d1}	K_{P2}	K_I	K_{d2}	λ	μ	ISE
کنترل کننده PD-FOPID بهینه شده با الگوریتم جستجوی جغد توسعه یافته	92.21	87.85	99.01	93.01	84.32	0.58	0.72	6.9×10^{-6}
کنترل کننده PD-FOPID بهینه شده با الگوریتم لشکر گوریلها	84.77	82.41	91.29	85.56	81.08	0.38	0.41	9.1×10^{-6}
کنترل کننده PD-FOPID بهینه شده با الگوریتم ازدحام پروانه	87.51	89.13	96.66	92.15	73.22	0.44	0.42	9.2×10^{-6}
کنترل کننده PD-FOPID بهینه شده با الگوریتم کلونی زنبور عسل	71.55	93.42	88.75	79.39	75.41	0.46	0.37	10×10^{-6}
کنترل کننده PD-FOPID بهینه شده با الگوریتم ازدحام ذرات	69.88	83.82	71.58	78.28	72.66	0.43	0.51	10.1×10^{-6}



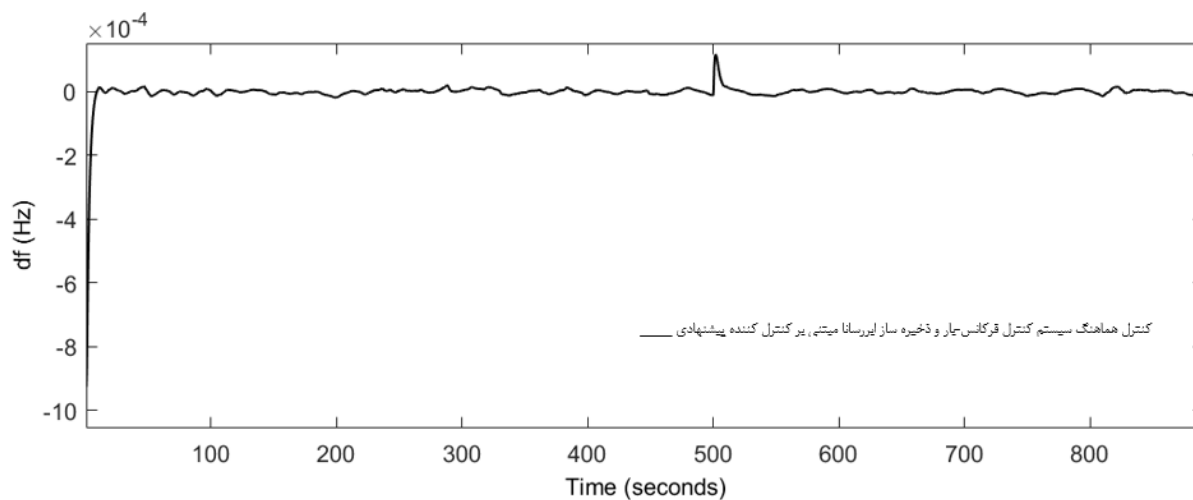
شکل ۸- اغتشاشات بار و توربین بادی اعمال شده به سیستم قدرت، سناریو (۱) [۴۱]



شکل ۹-الف: پاسخ فرکانسی سیستم قدرت به اغتشاشات بار و توربین بادی، سناریو (۱)

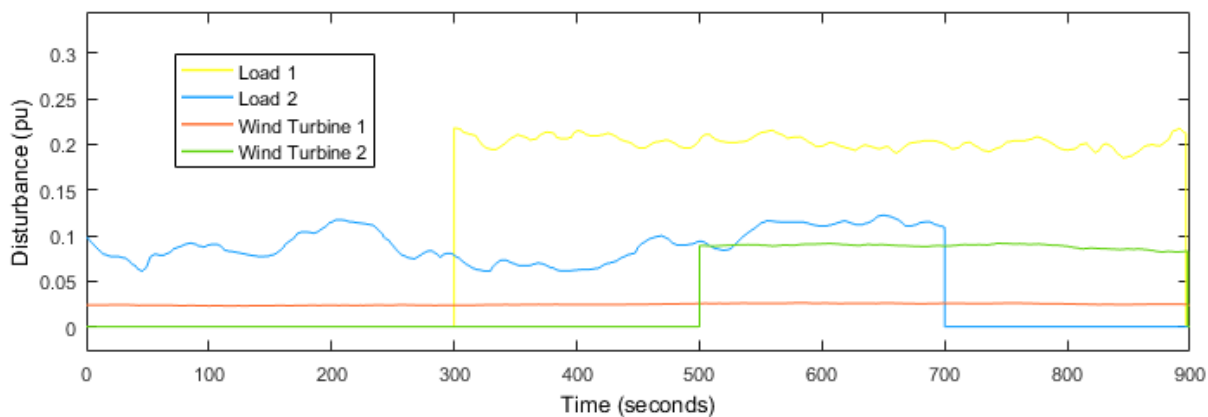


شکل ۹-ب: پاسخ فرکانسی سیستم قدرت به اغتشاشات بار و توربین بادی، سناریو (۱)

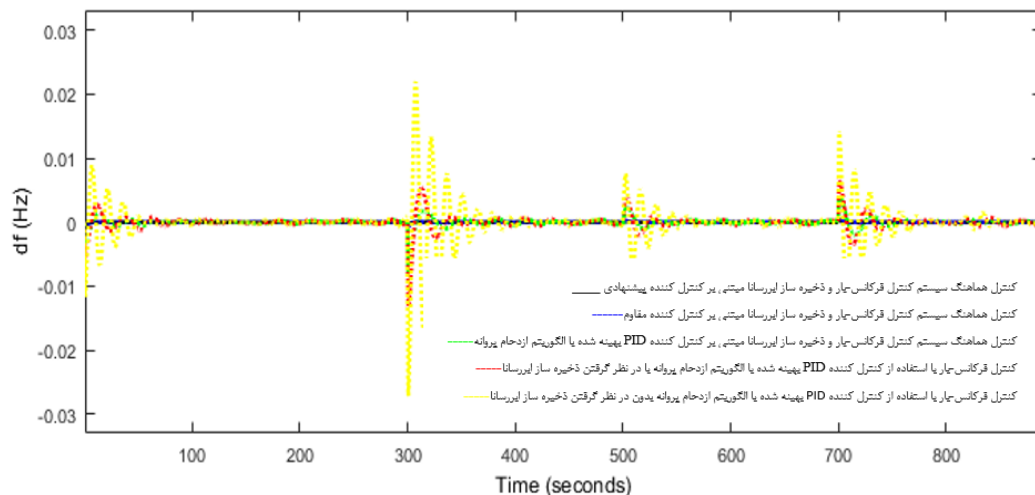


شکل ۹-ج: پاسخ فرکانسی سیستم قدرت به اغتشاشات بار و توربین بادی، سناریو (۱)

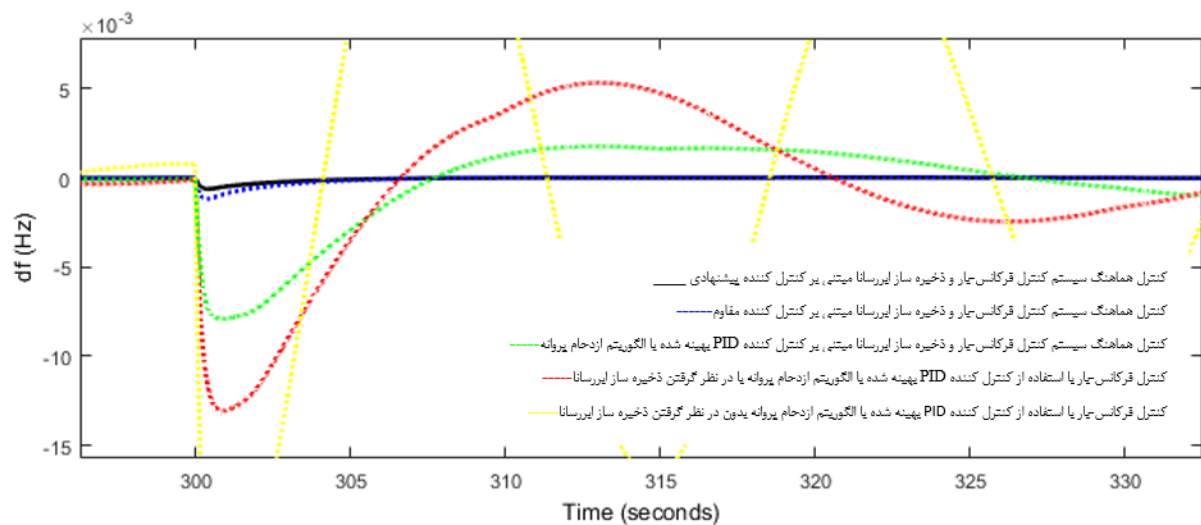
سناریو (۲): در این سناریو، اغتشاشات بار و اغتشاشات توربین بادی مطابق شکل (۱۰) به سیستم قدرت اعمال شده‌اند. در شکل های (۱۱-الف، ۱۱-ب و ۱۱-ج)، پاسخ فرکانسی سیستم قدرت به اغتشاشات بار و توربین بادی نشان داده شده است. مطابق شکل های (۱۱-الف، ۱۱-ب و ۱۱-ج)، بیشینه انحراف فرکانس و زمان نشست بر اساس کنترل هماهنگ سیستم کنترل فرکانس-بار و ذخیره ساز ابرسانا مبتنی بر کنترل کننده پیشنهادی (کنترل کننده PD-FOPID بهینه شده با استفاده از الگوریتم جستجوی جغد توسعه یافته) به ترتیب برابر ۰/۰۰۰۷ هرتز و ۳/۵۵ ثانیه می‌باشد. بیشینه انحراف فرکانس و زمان نشست بر اساس کنترل هماهنگ سیستم کنترل فرکانس-بار و ذخیره ساز ابرسانا مبتنی بر کنترل کننده PID بهینه شده با الگوریتم ازدحام پروانه به ترتیب برابر ۰/۰۰۸۱ هرتز و ۲۱ ثانیه می‌باشد. بیشینه انحراف فرکانس و زمان نشست بر اساس سیستم کنترل فرکانس-بار با استفاده از کنترل کننده PID بهینه شده با الگوریتم ازدحام پروانه با در نظر گرفتن ذخیره ساز ابرسانا به ترتیب برابر ۰/۰۱۲۹ هرتز و ۳۷ ثانیه می‌باشد. بیشینه انحراف فرکانس و زمان نشست بر اساس سیستم کنترل فرکانس-بار با استفاده از کنترل کننده PID بهینه شده با الگوریتم ازدحام پروانه بدون در نظر گرفتن ذخیره ساز ابرسانا به ترتیب برابر ۰/۰۲۵۶ هرتز و ۴۵ ثانیه می‌باشد. مطابق نتایج سناریو (۲)، کنترل کننده پیشنهادی در کاهش انحرافات سیستم قدرت نسبت به سایر کنترل کننده‌های مذکور مطلوبتر عملکرد کرده است و زمان نشست انحرافات فرکانس ناشی از اغتشاشات وارد بر سیستم قدرت را نیز کاهش داده است.



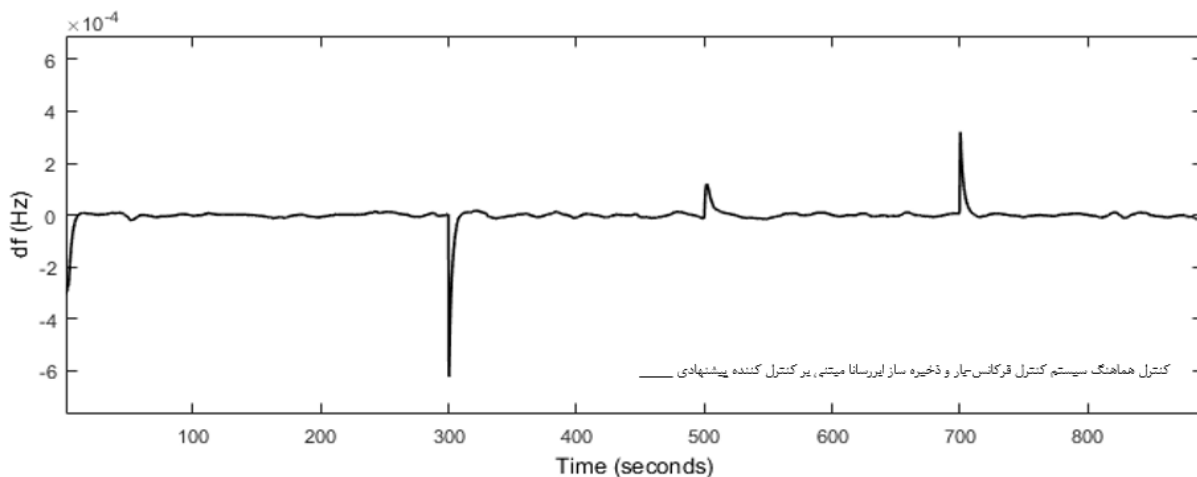
شکل ۱۰- اغتشاشات بار و توربین بادی اعمال شده به سیستم قدرت، سناریو (۲) [۴۱]



شکل ۱۱-الف: پاسخ فرکانسی سیستم قدرت به اغتشاشات بار و توربین بادی، سناریو (۲)



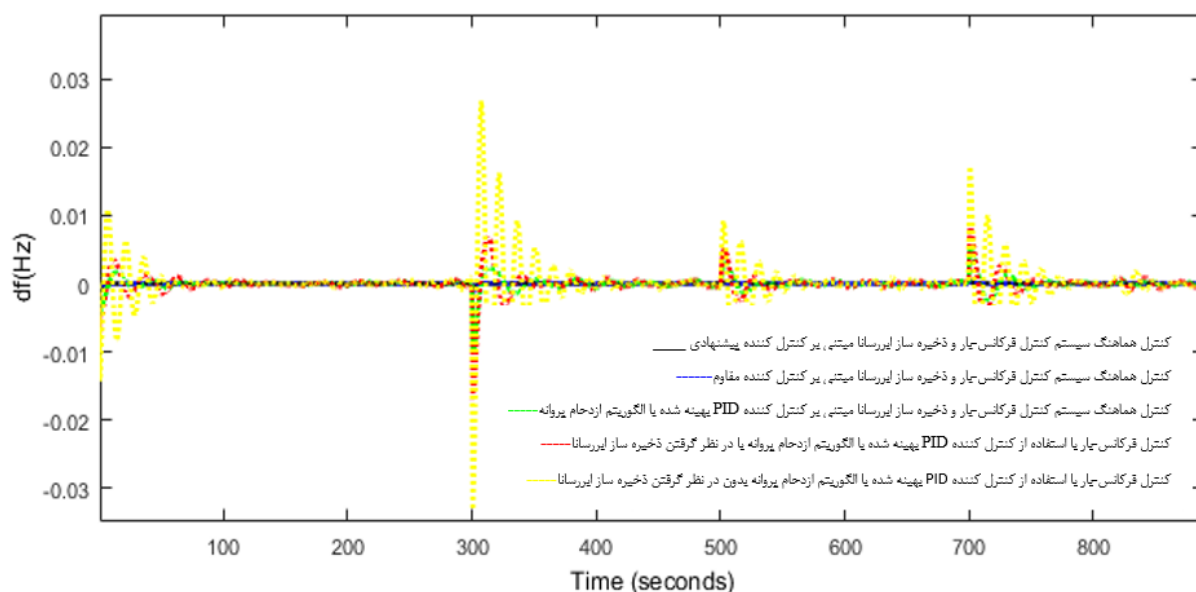
شکل ۱۱-ب: پاسخ فرکانسی سیستم قدرت به اغتشاشات بار و توربین بادی، سناریو (۲)



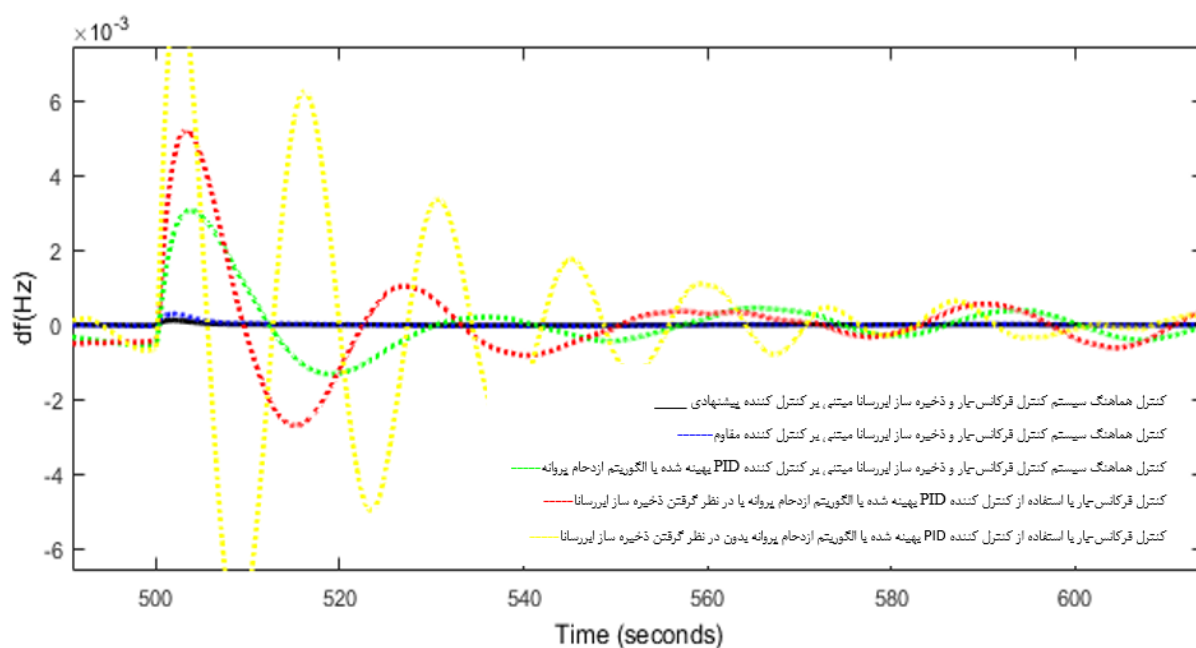
شکل ۱۱-ج: پاسخ فرکانسی سیستم قدرت به اغتشاشات بار و توربین بادی، سناریو (۲)

سناریو (۳): در این سناریو، اغتشاشات بار و اغتشاشات توربین بادی مطابق شکل (۱۰) به سیستم قدرت اعمال شده‌اند. در این سناریو عدم قطعیت خفیف مربوط به پارامترهای سیستم در اینرسی سیستم ($H = -25\%$) در نظر گرفته شده است. در شکل‌های (۱۲-الف، ۱۲-ب و ۱۲-ج)، پاسخ فرکانسی سیستم قدرت به اغتشاشات بار، اغتشاشات توربین بادی و عدم قطعیت خفیف مربوط به پارامترهای سیستم نشان داده شده است. مطابق شکل‌های (۱۲-الف، ۱۲-ب و ۱۲-ج)، بیشینه انحراف فرکانس و زمان نشست بر اساس کنترل هماهنگ سیستم کنترل فرکانس-بار و ذخیره ساز ابرسانا مبتنی بر کنترل کننده پیشنهادی (کنترل کننده PD-FOPID بهینه شده با استفاده از الگوریتم جستجوی جغد توسعه یافته) به ترتیب برابر 0.00075 هرتز و 3.76 ثانیه می باشد. بیشینه انحراف فرکانس و زمان نشست بر اساس کنترل هماهنگ سیستم کنترل فرکانس-بار و ذخیره ساز ابرسانا مبتنی بر کنترل کننده مقاوم به ترتیب برابر 0.00163 هرتز و 4.49 ثانیه می باشد. بیشینه انحراف فرکانس و زمان نشست بر اساس کنترل هماهنگ سیستم کنترل فرکانس-بار و ذخیره ساز ابرسانا مبتنی بر کنترل کننده PID بهینه شده با الگوریتم ازدحام پروانه به ترتیب برابر 0.0106 هرتز و 24 ثانیه می باشد. بیشینه انحراف فرکانس و زمان نشست بر اساس سیستم کنترل فرکانس-بار با استفاده از کنترل کننده PID بهینه شده

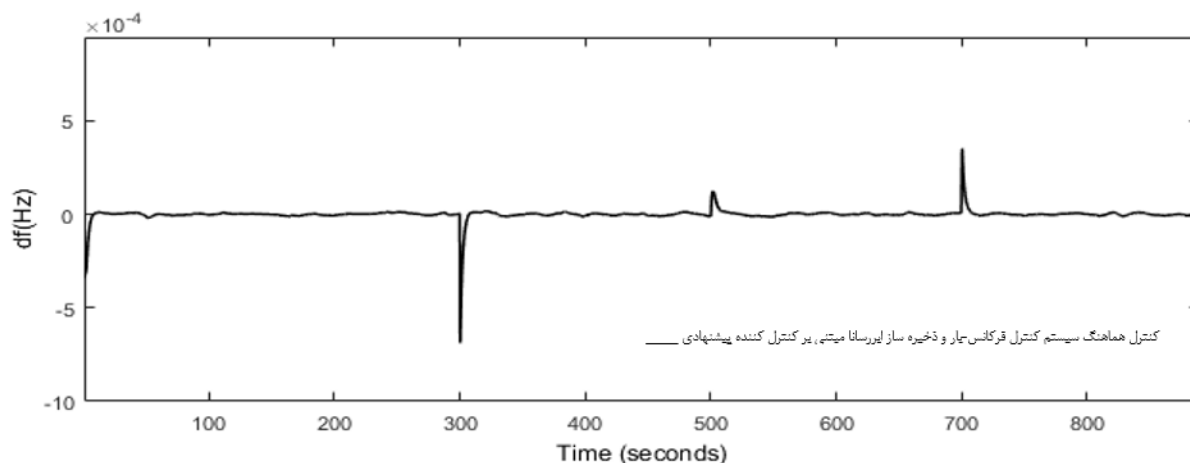
با الگوریتم ازدحام پروانه با در نظر گرفتن ذخیره ساز ابررسانا به ترتیب برابر 0.017 هرتز و 42 ثانیه می باشد. بیشینه انحراف فرکانس و زمان نشست بر اساس سیستم کنترل فرکانس-بار با استفاده از کنترل کننده PID بهینه شده با الگوریتم ازدحام پروانه بدون در نظر گرفتن ذخیره ساز ابررسانا به ترتیب برابر 0.0336 هرتز و 48 ثانیه می باشد. مطابق نتایج سناریو (۳)، کنترل کننده پیشنهادی در کاهش انحرافات سیستم قدرت نسبت به سایر کنترل کننده های مذکور مطلوبتر عملکرد کرده است و زمان نشست انحرافات فرکانس ناشی از اغتشاشات وارد بر سیستم قدرت را کاهش داده است و در برابر عدم قطعیت خفیف مربوط به پارامترهای سیستم مقاوم است.



شکل ۱۲-الف: پاسخ فرکانسی سیستم قدرت به اغتشاشات بار و توربین بادی، سناریو (۳)

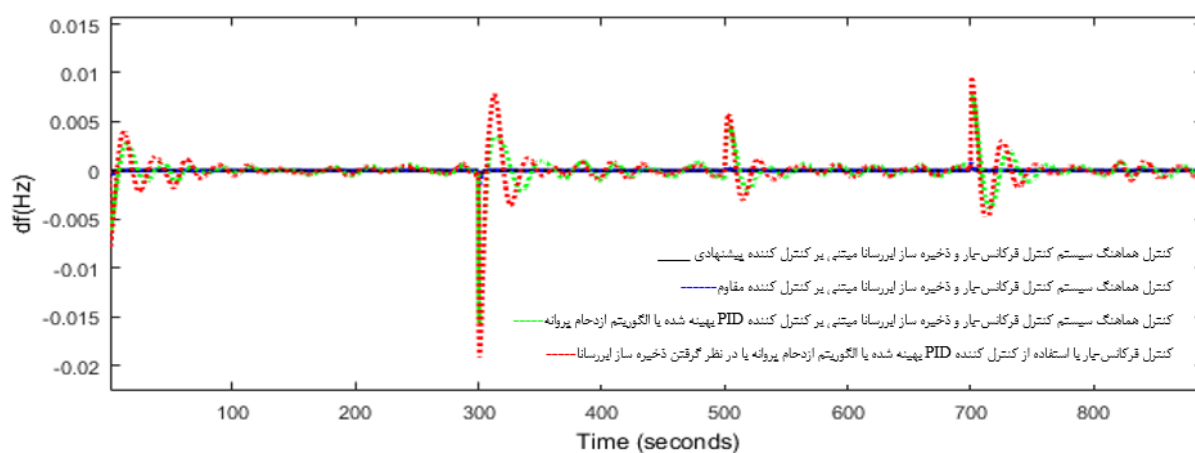


شکل ۱۲-ب: پاسخ فرکانسی سیستم قدرت به اغتشاشات بار و توربین بادی، سناریو (۳)

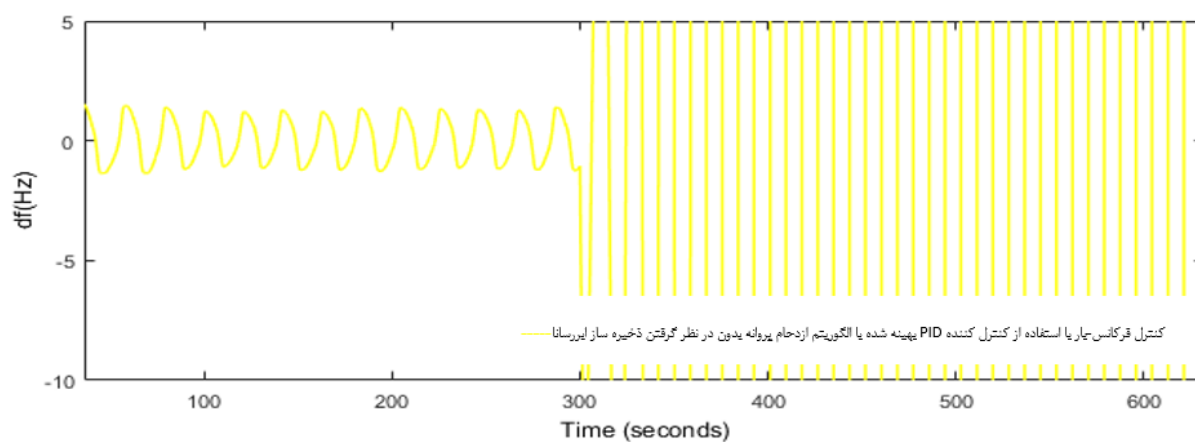


شکل ۱۲-ج: پاسخ فرکانسی سیستم قدرت به اغتشاشات بار و توربین بادی، سناریو (۳)

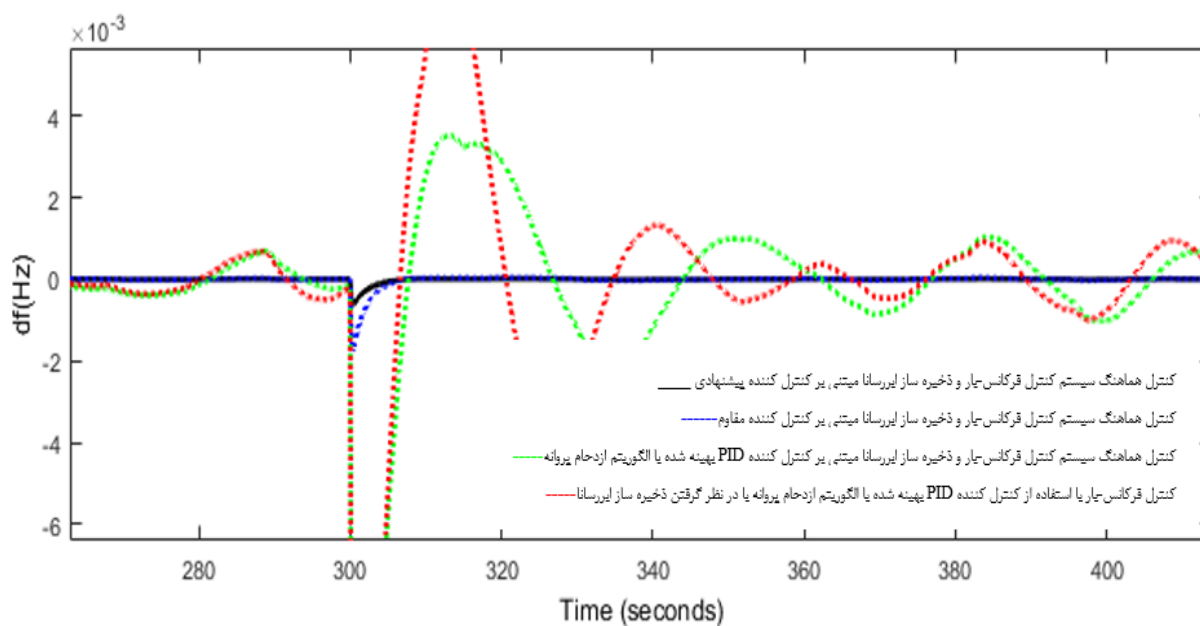
سناریو (۴): در این سناریو، اغتشاشات بار و توربین بادی مطابق شکل (۱۰) به سیستم قدرت اعمال شده اند. در این سناریو عدم قطعیت شدید مربوط به پارامترهای سیستم (اینرسی سیستم $(H = -50\%)$) در نظر گرفته شده است. در شکل های (۱۳-الف، ۱۳-ب، ۱۳-ج و ۱۳-د)، پاسخ فرکانسی سیستم قدرت به اغتشاشات بار، اغتشاشات توربین بادی و عدم قطعیت شدید مربوط به پارامترهای سیستم نشان داده شده است. مطابق شکل های (۱۳-الف، ۱۳-ب، ۱۳-ج و ۱۳-د)، بیشینه انحراف فرکانس و زمان نشست بر اساس کنترل هماهنگ سیستم کنترل فرکانس-بار و ذخیره ساز ابرسانا مبتنی بر کنترل کننده پیشنهادی (کنترل کننده PD-FOPID بهینه شده با استفاده از الگوریتم جستجوی جغد توسعه یافته) به ترتیب برابر 0.00079 هرتز و 3.93 ثانیه می باشد. بیشینه انحراف فرکانس و زمان نشست بر اساس کنترل هماهنگ سیستم کنترل فرکانس-بار و ذخیره ساز ابرسانا مبتنی بر کنترل کننده مقاوم به ترتیب برابر 0.00172 هرتز و 4.58 ثانیه می باشد. بیشینه انحراف فرکانس و زمان نشست بر اساس کنترل هماهنگ سیستم کنترل فرکانس-بار و ذخیره ساز ابرسانا مبتنی بر کنترل کننده PID بهینه شده با الگوریتم ازدحام پروانه به ترتیب برابر 0.0157 هرتز و 25 ثانیه می باشد. بیشینه انحراف فرکانس و زمان نشست بر اساس سیستم کنترل فرکانس-بار با استفاده از کنترل کننده PID بهینه شده با الگوریتم ازدحام پروانه با در نظر گرفتن ذخیره ساز ابرسانا به ترتیب برابر 0.0197 هرتز و 46 ثانیه می باشد. مطابق شکل (۱۳-ب)، پاسخ فرکانسی سیستم قدرت بر اساس سیستم کنترل فرکانس-بار با استفاده از کنترل کننده PID بهینه شده با الگوریتم ازدحام پروانه بدون در نظر گرفتن ذخیره ساز ابرسانا ناپایدار شده و این روش کنترلی توانایی حفظ پایداری فرکانسی سیستم قدرت را در برابر عدم قطعیت شدید مربوط به پارامترهای سیستم ندارد. مطابق نتایج سناریو (۴)، کنترل کننده پیشنهادی در کاهش انحرافات سیستم قدرت نسبت به سایر کنترل کننده های مذکور مطلوبتر عملکرد کرده است و زمان نشست انحرافات فرکانس ناشی از اغتشاشات وارد بر سیستم قدرت را کاهش داده است و در برابر عدم قطعیت شدید مربوط به پارامترهای سیستم را نیز مقاوم است. در جدول (۴)، نتایج عملکرد روش های مختلف کنترلی برای ۴ سناریو نشان داده شده است.



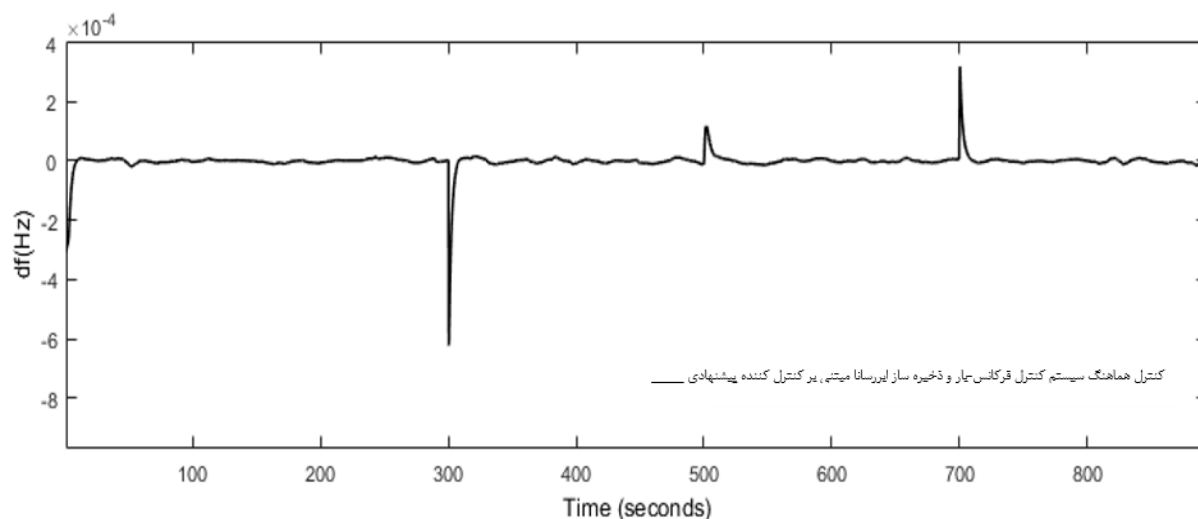
شکل ۱۳-الف: پاسخ فرکانسی سیستم قدرت به اغتشاشات بار و توربین بادی، سناریو (۴)



شکل ۱۳-ب: پاسخ فرکانسی سیستم قدرت به اغتشاشات بار و توربین بادی، سناریو (۴)



شکل ۱۳-ج: پاسخ فرکانسی سیستم قدرت به اغتشاشات بار و توربین بادی، سناریو (۴)



شکل ۱۳-د: پاسخ فرکانسی سیستم قدرت به اغتشاشات بار و توربین بادی، سناریو (۴)

جدول ۴- نتایج عملکرد روش‌های مختلف کنترلی برای ۴ سناریو

کنترل کننده	سناریو ۱	سناریو ۲	سناریو ۳	سناریو ۴	
کنترل هماهنگ سیستم کنترل فرکانس-بار و ذخیره ساز ابررسانا مبتنی بر کنترل کننده پیشنهادی (کنترل کننده PD-FOPID بهینه شده با استفاده از الگوریتم جستجوی جغد توسعه یافته)	بیشینه فراجهش (هرتز)	0.0001	0.00035	0.00037	0.00038
	بیشینه فروجهش (هرتز)	0.0009	0.0007	0.00075	0.00079
	زمان نشست (ثانیه)	4.2	3.55	3.76	3.93
کنترل هماهنگ سیستم کنترل فرکانس-بار و ذخیره ساز ابررسانا مبتنی بر کنترل کننده مقاوم	بیشینه فراجهش (هرتز)	0.0004	0.0008	0.0009	0.0010
	بیشینه فروجهش (هرتز)	0.0018	0.0015	0.00163	0.00172
	زمان نشست (ثانیه)	5	4.46	4.49	4.49
کنترل هماهنگ سیستم کنترل فرکانس-بار و ذخیره ساز ابررسانا مبتنی بر کنترل کننده بهینه شده با الگوریتم ازدحام پروانه PID	بیشینه فراجهش (هرتز)	0.0042	0.0034	0.005	0.009
	بیشینه فروجهش (هرتز)	0.0173	0.0081	0.0106	0.0157
	زمان نشست (ثانیه)	19	21	24	25
سیستم کنترل فرکانس-بار با استفاده از کنترل بهینه شده با الگوریتم ازدحام PID کننده پروانه با در نظر گرفتن ذخیره ساز ابررسانا	بیشینه فراجهش (هرتز)	0.0064	0.0058	0.012	0.014
	بیشینه فروجهش (هرتز)	0.021	0.0129	0.0170	0.0197
	زمان نشست (ثانیه)	38	37	42	46
سیستم کنترل فرکانس-بار با استفاده از کنترل بهینه شده با الگوریتم ازدحام PID کننده پروانه بدون در نظر گرفتن ذخیره ساز ابررسانا	بیشینه فراجهش (هرتز)	0.0476	0.023	0.0367	---
	بیشینه فروجهش (هرتز)	0.0466	0.0256	0.0336	---
	زمان نشست (ثانیه)	90	45	48	---

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، یک روش کنترلی جدید و مقاوم برای کنترل هماهنگ سیستم کنترل فرکانس-بار و ذخیره ساز ابررسانا با استفاده از کنترل کننده آبخاری PD-FOPID طراحی شده است همچنین به حل مشکل الگوریتم جستجوی جغد پرداخته شده است. با توجه به اینکه الگوریتم جستجوی جغد ممکن است در بهینه محلی گیر کند. در این مقاله راه حل هایی به منظور حل این مشکل الگوریتم جستجوی جغد ارائه شده است که الگوریتم جستجوی جغد توسعه یافته نامیده شده است و به منظور بهبود عملکرد کنترل کننده PD-FOPID از الگوریتم جستجوی جغد توسعه یافته برای تنظیم بهینه پارامترهای آن استفاده شده است. روش پیشنهادی با چندین روش ارائه شده در زمینه کنترل فرکانس سیستم قدرت در حضور توربین بادی مقایسه گردید و سبب بهبود پاسخ فرکانسی سیستم قدرت در حضور توربین بادی شده است. روش پیشنهادی توانسته ماکزیمم انحراف فرکانس و زمان نشست مربوط به انحراف فرکانس سیستم قدرت در حضور اغتشاشات بار و اغتشاشات توربین بادی به ترتیب به میزان ۵۰٪ و ۱۷٪ نسبت به سایر روشهای کنترل ارائه شده در این زمینه بهبود دهد. همچنین روش پیشنهادی توانسته ماکزیمم انحراف فرکانس و زمان نشست مربوط به انحراف فرکانس سیستم قدرت در حضور اغتشاشات بار، اغتشاشات توربین بادی و عدم قطعیت خفیف مربوط به پارامترهای سیستم به ترتیب به میزان ۴۵٪ و ۱۸٪ نسبت به سایر روشهای کنترل ارائه شده در این زمینه بهبود دهد.

مراجع:

1. Amiri, F., & Hatami, A. (2023). Load frequency control for two-area hybrid microgrids using model predictive control optimized by grey wolf-pattern search algorithm. *Soft Computing*, 1-17.
2. Amiri, F., & Moradi, M. H. (2023). Improvement of Frequency stability in the power system considering wind turbine and time delay. *Journal of Renewable Energy and Environment*, 10(1), 9-18.
3. Amiri, F., & Moradi, M. H. (2023). Design of a new control method for dynamic control of the two-area microgrid. *Soft Computing*, 27(10), 6727-6747.
4. Moradi, M. H., & Amiri, F. (2020). Improving the stability of the power system based on static synchronous series compensation equipped with robust model predictive control. *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*
5. Moradi, M. H., & Amiri, F. (2021). Load frequency control in a two area microgrid by optimized model predictive controller. *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*, 19(1).
6. Amiri, F., & Moradi, M. H. (2023). A new control strategy for controlling isolated microgrid. *Engineering and Energy Management*, 10(4), 60-73.
7. Amiri, F., & Hatami, A. (2017, October). Load Frequency Control Via Adaptive Fuzzy PID Controller In An Isolated Microgrid. In 32nd international power system conference.
8. Amiri, F., & moradi, M. H. (2020). Designing a new robust control method for AC servo motor. *Journal of Nonlinear Systems in Electrical Engineering*, 7(1), 55-80.
9. El-Bahay, M. H., Lotfy, M. E., & El-Hameed, M. A. (2023). Effective participation of wind turbines in frequency control of a two-area power system using coot optimization. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 8(1), 1-15.
10. Shanmugam, L., Palanimuthu, K., & Joo, Y. H. (2023). Decentralized Sampled-Data Control for Stochastic Disturbance in Interconnected Power Systems With PMSG-Based Wind Turbines. *IEEE Transactions on Cybernetics*.
11. Tan, W. (2009). Tuning of PID load frequency controller for power systems. *Energy Conversion and Management*, 50(6), 1465-1472.
12. Khodabakhshian, A., & Hooshmand, R. (2010). A new PID controller design for automatic generation control of hydro power systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 32(5), 375-382.
13. Shabani, H., Vahidi, B., & Ebrahimpour, M. (2013). A robust PID controller based on imperialist competitive algorithm for load-frequency control of power systems. *ISA transactions*, 52(1), 88-95.
14. Bahgaat, N. K., El-Sayed, M. I., Hassan, M. M., & Bendary, F. A. (2015). Load frequency control in power system via improving PID controller based on particle swarm optimization and ANFIS techniques. In *Research Methods: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications* (pp. 462-481). IGI Global.
15. Sambariya, D. K., & Fagna, R. (2017, July). A novel Elephant Herding Optimization based PID controller design for Load frequency control in power system. In 2017 International Conference on Computer, Communications and Electronics (Comptelix) (pp. 595-600). IEEE.
16. Bernard, M., & Musilek, P. (2017, October). Ant-based optimal tuning of PID controllers for load frequency control in power systems. In 2017 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC) (pp. 1-6). IEEE.

17. Osinski, C., Leandro, G. V., & da Costa Oliveira, G. H. (2019). Fuzzy PID controller design for LFC in electric power systems. *IEEE Latin America Transactions*, 17(01), 147-154.
18. Sahu, B. K., Pati, T. K., Nayak, J. R., Panda, S., & Kar, S. K. (2016). A novel hybrid LUS-TLBO optimized fuzzy-PID controller for load frequency control of multi-source power system. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 74, 58-69.
19. Sahu, R. K., Sekhar, G. C., & Panda, S. (2015). DE optimized fuzzy PID controller with derivative filter for LFC of multi source power system in deregulated environment. *Ain Shams Engineering Journal*, 6(2), 511-530.
20. Sahu, R. K., Panda, S., & Yegireddy, N. K. (2014). A novel hybrid DEPS optimized fuzzy PI/PID controller for load frequency control of multi-area interconnected power systems. *Journal of Process Control*, 24(10), 1596-1608.
21. Joshi, M., Sharma, G., Bokoro, P. N., & Krishnan, N. (2022). A fuzzy-PSO-PID with UPFC-RFB solution for an LFC of an interlinked hydro power system. *Energies*, 15(13), 4847.
22. Chen, G., Li, Z., Zhang, Z., & Li, S. (2019). An improved ACO algorithm optimized fuzzy PID controller for load frequency control in multi area interconnected power systems. *IEEE Access*, 8, 6429-6447.
23. Sahu, R. K., Panda, S., & Pradhan, P. C. (2015). Design and analysis of hybrid firefly algorithm-pattern search based fuzzy PID controller for LFC of multi area power systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 69, 200-212.
24. Fathy, A., Kassem, A. M., & Abdelaziz, A. Y. (2020). Optimal design of fuzzy PID controller for deregulated LFC of multi-area power system via mine blast algorithm. *Neural Computing and Applications*, 32, 4531-4551.
25. Sekhar, G. C., Sahu, R. K., Baliarsingh, A. K., & Panda, S. (2016). Load frequency control of power system under deregulated environment using optimal firefly algorithm. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 74, 195-211.
26. Amiri, F., & Moradi, M. H. (2018). Designing a fractional order PID controller for a two-area micro-grid under uncertainty of parameters. *Iranian journal of energy*, 20(4), 49-78.
27. Sondhi, S., & Hote, Y. V. (2014). Fractional order PID controller for load frequency control. *Energy Conversion and management*, 85, 343-353.
28. Lamba, R., Singla, S. K., & Sondhi, S. (2019). Design of fractional order PID controller for load frequency control in perturbed two area interconnected system. *Electric Power Components and Systems*, 47(11-12), 998-1011. Lamba, R., Singla, S. K., & Sondhi, S. (2019). Design of fractional order PID controller for load frequency control in perturbed two area interconnected system. *Electric Power Components and Systems*, 47(11-12), 998-1011.
29. Amiri, F., & Moradi, M. (2020). Designing a new robust control for virtual inertia control in the microgrid with regard to virtual damping. *Journal of Electrical and Computer Engineering Innovations (JECEI)*, 8(1), 53-70.
30. Shahbazi, M., & Amiri, F. (2019, December). Designing a Neuro-Fuzzy controller with CRPSO and RLSE algorithms to control voltage and frequency in an isolated microgrid. In 2019 international power system conference (PSC) (pp. 588-594). IEEE.
31. Moradi, M. H., & Amiri, F. (2021). Virtual inertia control in islanded microgrid by using robust model predictive control (RMPC) with considering the time delay. *Soft Computing*, 25, 6653-6663.
32. Babaei, F., & Safari, A. (2020). SCA based fractional-order PID controller considering delayed EV aggregators. *Journal of Operation and Automation in Power Engineering*, 8(1), 75-85.

33. Amiri, F., Eskandari, M., & Moradi, M. H. (2023). Virtual Inertia Control in Autonomous Microgrids via a Cascaded Controller for Battery Energy Storage Optimized by Firefly Algorithm and a Comparison Study with GA, PSO, ABC, and GWO. *Energies*, 16(18), 6611.
34. Amiri, F., & Moradi, M. H. (2021). Designing of the controller for shipboard microgrid based on linear matrix inequality. *Journal of Applied Research in Electrical Engineering*, 1(2), 175-185.
35. Zaid, S. A., Kassem, A. M., Alatwi, A. M., Albalawi, H., AbdelMeguid, H., & Elemery, A. (2023). Optimal Control of an Autonomous Microgrid Integrated with Super Magnetic Energy Storage Using an Artificial Bee Colony Algorithm. *Sustainability*, 15(11), 8827.
36. Shayeghi, H., Jalili, A., & Shayanfar, H. A. (2008). A robust mixed H_2/H_∞ based LFC of a deregulated power system including SMES. *Energy Conversion and Management*, 49(10), 2656-2668.
37. Pappachen, A., & Fathima, A. P. (2016). Load frequency control in deregulated power system integrated with SMES–TCPS combination using ANFIS controller. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 82, 519-534.
38. [38] Sudha, K. R., & Santhi, R. V. (2012). Load frequency control of an interconnected reheat thermal system using type-2 fuzzy system including SMES units. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 43(1), 1383-1392.
39. Biswal, A., Dwivedi, P., & Bose, S. (2022). DE optimized IPIDF controller for management frequency in a networked power system with SMES and HVDC link. *Frontiers in Energy Research*, 10, 1102898.
40. Magdy, G., Shabib, G., Elbaset, A. A., & Mitani, Y. (2018). Optimized coordinated control of LFC and SMES to enhance frequency stability of a real multi-source power system considering high renewable energy penetration. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 3(1), 1-15.
41. Magdy, G., Mohamed, E. A., Shabib, G., Elbaset, A. A., & Mitani, Y. (2018). SMES based a new PID controller for frequency stability of a real hybrid power system considering high wind power penetration. *IET Renewable Power Generation*, 12(11), 1304-1313.
42. Amiri, F., & Moradi, M. H. (2021). Coordinated Control of LFC and SMES in the Power System Using a New Robust Controller. *Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering*, 17(4).
43. Çelik, E. (2021). Design of new fractional order PI–fractional order PD cascade controller through dragonfly search algorithm for advanced load frequency control of power systems. *Soft Computing*, 25(2), 1193-1217.
44. Bhuyan, M., Das, D. C., Barik, A. K., & Sahoo, S. C. (2022). Performance assessment of novel solar thermal-based dual hybrid microgrid system using CBOA optimized cascaded PI-TID controller. *IETE Journal of Research*, 1-18.
45. Ali, M., Kotb, H., Aboras, K. M., & Abbasy, N. H. (2021). Design of cascaded pi-fractional order PID controller for improving the frequency response of hybrid microgrid system using gorilla troops optimizer. *IEEE Access*, 9, 150715-150732.
46. del Río, A. H., Aranguren, I., Oliva, D., Elaziz, M. A., & Cuevas, E. (2021). Efficient image segmentation through 2D histograms and an improved owl search algorithm. *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*, 12, 131-150.
47. Jain, M., Maurya, S., Rani, A., & Singh, V. (2018). Owl search algorithm: a novel nature-inspired heuristic paradigm for global optimization. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 34(3), 1573-1582.
48. El-Ashmawi, W. H., Abd Elminaam, D. S., Nabil, A. M., & Eldesouky, E. (2020). A chaotic owl search algorithm based bilateral negotiation model. *Ain Shams Engineering Journal*, 11(4), 1163-1178.