



ریزشبکه روی کشتی: کنترل فرکانس-بار ریزشبکه با در نظر گرفتن انرژی امواج دریا به وسیله کنترل کننده پیش بین مدل بهینه شده فرهاد امیری^{۱*}، محمد حسن مرادی^۲

۱- دانشجوی دکترا، مهندسی برق، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

۲- استاد، مهندسی برق، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

* همدان، ۶۵۱۳۱-۶۵۱۶۵، f.amiri94@basu.ac.ir

چکیده:

کنترل بار-فرکانس یکی از موضوعات مهم در کنترل ریز شبکه‌هایی است که به صورت مستقل از شبکه اصلی بهره‌برداری می‌شوند. در این مقاله به مسئله کنترل بار-فرکانس در ریز شبکه روی کشتی پرداخته شده است: منابعی مانند باتری و چرخ طیار به عنوان منابع کنترل پذیر در مسئله کنترل بار فرکانس در نظر گرفته شده اند و از کنترل کننده پیش بین مدل به عنوان کنترل کننده برای طراحی سیستم کنترل بار-فرکانس به کار برده شده است. پارامترهای وزن کنترل کننده پیش بین مدل که نقش اساسی در تعیین عملکرد این کنترل کننده دارند به وسیله الگوریتم ازدحام ذرات مبتنی بر دیوانگی بهینه شده است. استفاده از الگوریتم پیشنهادی سبب افزایش سرعت همگرایی شده است. نتایج کنترل کننده پیشنهادی، در چند سناریو مختلف و با در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترها با کنترل کننده‌های تناسبی-انتگرالی فازی نوع یک و دو چند هدفه بهینه شده با الگوریتم سیاه چاله، کنترل کننده تناسبی-انتگرالی فازی و کنترل کننده تناسبی-انتگرالی زیگلر-نیکولز مقایسه شده است. موثر بودن روش پیشنهادی از لحاظ سرعت پاسخ و کاهش فراجش و فروجهش و مقاوم در برابر عدم قطعیت پارامترها نشان داده شده است. کنترل کننده پیشنهادی سرعت پاسخ سریعتری نسبت به سایر روشهای کنترلی مرسوم داشته است و تقریباً سرعت پاسخ به نوسانات را ۷٪ بهبود یافته است، همچنین کنترل کننده پیشنهادی در کاهش فراجش و کاهش فروجهش عملکرد بهتری داشته است و از لحاظ کاهش فراجش و کاهش فروجهش نوسانات نزدیک به ۵٪ بهبود داشته است. شبیه‌سازی در نرم افزار متلب (سیمولینک) انجام شده است.

کلیدواژگان: ریزشبکه روی کشتی، کنترل پیش بین، منابع ذخیره انرژی، الگوریتم ازدحام ذرات مبتنی بر دیوانگی، کنترل بار-فرکانس

Microgrid on the ship: load Frequency- control of the microgrid, taking into account the Sea Wave energy by the optimized model predictive controller

Farhad Amiri^{1*}, Mohammad Hassan Moradi²

1- Dept. of Electrical Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

2- Dept. of Electrical Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

* P.O.B. 6516565131 Hamedan, Iran, f.amiri94@basu.ac.ir

Received: 2 January 2020

Accepted: 7 June 2020

Abstract:

Load-frequency control is among the important concerns in controlling microgrids, which are operated independently of the main grid. In this paper, load-frequency control in microgrids on ships is studied. Resources such as batteries and flywheels are considered controllable resources in load-frequency control. Besides, the model predictive control is used as the controller to design a load-frequency control system. The model predictive control weight parameters, which play a substantial role in determining the performance of this controller, are optimized using the craziness-based particle swarm optimization algorithm. The proposed algorithm accelerates convergence. The results of the proposed controller are



compared under several different scenarios considering the uncertainty of parameters using Multi-Objective Fuzzy Type 1 PI and Multi-Objective interval Fuzzy Type 2 PI controllers, which are optimized by the black hole algorithm, the fuzzy proportional integral controllers, and Ziegler–Nichols proportional integral controllers. The effectiveness of the proposed method with regard to the response speed, the decrease in overshoot and undershoot, and robustness against the parameter uncertainties is indicated. The proposed controller responds faster than the other conventional control methods and accelerates the process of responding to oscillations by 7%. In addition, the proposed controller performs better in reducing overshoot and reducing undershoot and it shows a 5% improvement with regard to the decrease in overshoot and undershoot in the oscillations. Simulations are also carried out in MATLAB (Simulink).

Keywords: Microgrid on the Ship, model predictive control, Energy Saving Resources, Craziiness-based particle swarm optimization, Load frequency control



جستجوی هارمونی [۱۴،۱۵] برای کنترل بار-فرکانس در ریزشبکه‌ها ارائه شده است. همچنین از روش‌های کنترل مقاوم مبتنی بر کنترل اچ-بینهایت [۱۶-۱۸]، کنترل فازی مبتنی بر الگوریتم ازدحام ذرات [۱۹]، از کنترل مبتنی بر الگوریتم یادگیری عاطفی مغز^۵ [۲۰]، برای کنترل بار-فرکانس در ریزشبکه استفاده شده است. در [۲۱] اثر تأخیر زمانی سیستم‌های مخابراتی بر پایداری کنترل بار-فرکانس در یک سیستم مشتمل بر ریزشبکه چند ناحیه‌ای بررسی شده است. در [۲۲] استراتژی کنترل نظارت ثالثیه برای کنترل بار-فرکانس در یک سیستم مشتمل بر ریزشبکه چند ناحیه‌ای ارائه شده است. در [۲۳] کنترل مبتنی بر کنترل کننده تناسبی-انتگرالی فازی در یک سیستم سه ناحیه‌ای کوچک آبی برای کنترل بار-فرکانس ارائه شده است. در [۲۴] اثر خطوط ارتباطی و سوپر خارنها بر کنترل بار-فرکانس در ریزشبکه چند ناحیه‌ای بررسی شده است. در [۲۵] اثر ذخیره سازها بر کنترل بار-فرکانس در ریزشبکه چند ناحیه‌ای بررسی شده است. در [۲۶] کنترل بار-فرکانس در ریزشبکه چند ناحیه‌ای به کمک کنترل کننده تناسبی-انتگرالی فازی تنظیم شده با روش ناگای ارائه شده است. در [۲۷] کنترل بار-فرکانس در یک ریزشبکه دو ناحیه‌ای با روش کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتتگیر بهینه‌سازی شده با عنکبوت اجتماعی^۶ ارائه شده است. در [۲۸] به بررسی کنترل بار-فرکانس ریزشبکه ایزوله بر روی کشتی به وسیله کنترل کننده تناسبی-انتگرالی فازی نوع یک و دو چند هدفه که به وسیله الگوریتم سیاه چاله آنلاین بهینه شده است. ریزشبکه مورد مطالعه در [۲۸] با ریزشبکه‌های مورد مطالعه در [۲۷-۴] متفاوت است زیرا در این ریزشبکه علاوه بر منابع انرژی تجدیدپذیری مانند توربین بادی و سلول خورشیدی از منبع انرژی تجدیدپذیر دیگری مانند مبدل انرژی امواج دریا استفاده می‌کند، به کار بردن این نوع منبع انرژی تجدیدپذیر به علت طبیعت نوسانی زیاد (امواج نو سانی) کار سیستم کنترل بار-فرکانس را مشکل می‌کند. در مورد این ریزشبکه‌ها تحقیقاتی کمی صورت گرفته است. در [۲۸] با در نظر گرفتن مبدل انرژی امواج دریا به طراحی سیستم کنترل بار-فرکانس برای این ریزشبکه پرداخته شده است. روشهای به کار برده شده در [۲۸] کنترل کننده تناسبی-انتگرالی فازی چند هدفه که توسط الگوریتم سیاه چاله آنلاین، بهینه شده^۷ و کنترل کننده تناسبی-انتگرالی فازی نوع دو که توسط الگوریتم سیاه چاله آنلاین، بهینه شده^۸ هستند که در مقابل اغتشاشات بار و منابع تولید پراکنده خیلی مقاوم نیستند و همچنین روشهای کنترلی به کار برده شده برای [۲۷-۴] برای این نوع ریزشبکه (ریزشبکه با در نظر گرفتن انرژی امواج دریا) عملکرد مطلوبی ندارند.

مفهوم ریزشبکه در سال ۱۹۹۸ معرفی شد، که ترکیبی از منابع انرژی نو، ذخیره‌سازها، سیستم ارتباطی، بارها و کنترل کننده است، که معمولاً در سمت توزیع سیستم قدرت جای می‌گیرد و می‌تواند به سیستم قدرت متصل شود یا از آن جدا باشد، که در حالت متصل به شبکه ریزشبکه یک تزریق کننده توان حقیقی و راکتیو است، ولی در حالت ایزوله مسئول تامین بارهای محلی و مشخصه فرکانس و ولتاژ در مقدار نامی است. بنابراین در ریزشبکه وظیفه سیستم کنترل اتوماتیک به دلیل اغتشاش در منابع تولید توان ریزشبکه و اغتشاشات بار اساسی‌تر است. ریزشبکه در حالت ماندگار در تعادل میان تولید و مصرف به سر می‌برد و چنانچه بنا به رخداد اغتشاشی این تعادل از بین برود، فرکانس از مقدار نامی دور خواهد شد. و اگر نوسانات فرکانس سیستم کنترل نشود، می‌تواند خسارات زیادی در برداشته باشد [۱]. اگر اغتشاشی در ریزشبکه روی دهد و سبب بر هم خوردن تعادل میان تولید و مصرف شود، فرکانس نوسان می‌کند. برای مثال اگر بار به ناگاه اضافه شود، فرکانس از مقدار نامی افت خواهد کرد که اگر کنترل نشود شاهد ناپایداری فرکانس خواهیم بود. حلقه کنترلی اولیه، اولین حلقه کنترلی بوده که به محدود کردن افت فرکانس بعد از اتفاق افتادن اغتشاش اقدام می‌نماید [۲]. حلقه کنترلی اولیه، فرکانس افت کرده را محدود می‌کند اما در برگرداندن فرکانس به مقدار نامی ناتوان بوده و از این رو حلقه تعاملی دیگری با نام کنترل ثانویه فرکانس نیز استفاده می‌شود [۲]. حلقه کنترل ثانویه توسط سیستم کنترل بار-فرکانس یا سیستم کنترل بار-فرکانس^۱ کنترل می‌شود. در حلقه کنترل ثانویه از کنترل کننده‌های متفاوتی استفاده می‌شود. به علت طبیعت تصادفی وزش باد و تابش خورشید، توان تولیدی منابع انرژی تجدیدپذیر متغیر است. تغییرات تصادفی توان تولیدی منابع انرژی تجدیدپذیر و همچنین تغییرات بار می‌تواند سبب عدم تعادل و در نتیجه سبب انحراف قابل توجه در فرکانس ریزشبکه-در حالت جدا از شبکه شود [۲]. برای میرا کردن نوسانات توان و فرکانس، بازگرداندن فرکانس به مقدار نامی و همچنین بازگرداندن توان خط ارتباطی به مقدار تنظیم شده، از استراتژی‌های کنترلی بار-فرکانس استفاده می‌شود [۲-۴]. در ارتباط با کنترل بار-فرکانس در ریزشبکه‌ها تحقیقات گسترده‌ای انجام شده است. روش‌های کنترلی بار-فرکانس در ریزشبکه‌ها در [۲۷-۴] آورده شده است. کنترل کننده‌های متعددی مانند تناسبی-انتگرالی معمولی [۴،۵]، کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتتگیر معمولی [۶]، کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتتگیر مبتنی بر تعیین ضرائب با روش زیگلر-نیکولز [۷]، کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتتگیر مبتنی بر الگوریتم ژنتیک [۸]، کنترل کننده تناسبی-انتگرالی مبتنی بر الگوریتم ازدحام ذرات^۲ [۹]، کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتتگیر مبتنی بر جغرافیای زیستی^۳ [۱۰]، کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتتگیر مبتنی بر الگوریتم کواسی^۴ [۱۱]، کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتتگیر مبتنی بر مرتبه کسری [۱۲]، کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتتگیر فازی مبتنی بر مرتبه کسری [۱۳]، کنترل کننده تناسبی-انتگرالی مبتنی بر منطق فازی نوع ۲ در ترکیب با الگوریتم بهبود یافته

۱. Load Frequency Control (LFC)

۲. Particle Swarm Optimization (PSO)

۳. Biogeography-based (BIO)

۴. quasi-oppositional harmony search algorithm (QOH)

۵. Human brain emotional learning (HBEL)

۶. Social-spider optimizer (SSO)

۷. Multi-Objective Fuzzy PI (MOFPI)

۸. Multi-Objective interval Fuzzy Type2 PI (MOIT2FPI)

$$P_{WT} = \frac{1}{\rho} C_p(\beta, \sigma) \rho A V_W^3 \quad (1)$$

$$G_{WT} = \frac{k_{WT}}{T_{WT} S + 1} \quad (2)$$

۲-۲- سلول خورشیدی

سلول خور شیدی انرژی خور شیدی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند [۴-۵]. توان سلول خورشیدی وابسته به دما و تابش است. مدل دینامیکی سلول خور شیدی به همراه مدل اینورتر به وسیله رابطه‌های (۳) و (۴) نشان داده شده است [۴-۵]. مدل اینورتر و سلول خور شیدی به صورت یک تابع تبدیل مرتبه اول در نظر گرفته شده است.

$$\frac{1}{T_{CS} + 1} \quad (3)$$

$$\frac{1}{T_{PV} S + 1} \quad (4)$$

۲-۴- مبدل انرژی امواج دریا:

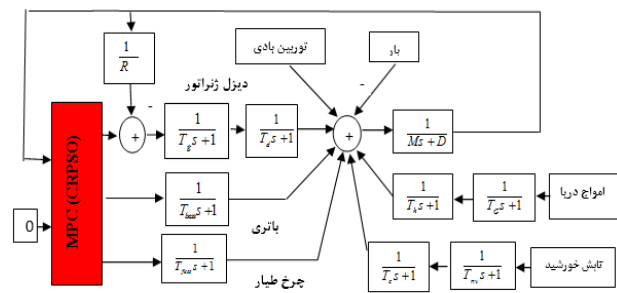
انرژی امواج دریا به عنوان یک منبع تولید پراکنده در نظر گرفته می‌شود. تبدیل انرژی امواج دریا به انرژی توسط مبدل امواج دریا انجام می‌گیرد. در این مطالعه انرژی امواج دریا به عنوان یک منبع تجدید پذیر در نظر گرفته شده است. در این مقاله تابع تبدیل مبدل امواج برای کشتی به عنوان یک تاخیر مرتبه اول در نظر گرفته می‌شود [۲۸]. مدل اینورتر و مبدل امواج دریا به صورت یک تابع تبدیل مرتبه اول در نظر گرفته شده است. مدل دینامیکی انرژی امواج دریا به همراه مدل اینورتر به وسیله رابطه‌های (۵) و (۶) نشان داده شده است [۲۸]. علت در نظر گرفتن مدل دینامیکی مرتبه اول برای منابع سادگی و کافی بودن آن ثابت زمانی و بهره برای نشان دادن دینامیک سیستم ریزشبه می‌باشد. البته می‌توان از مدل‌هایی با مرتبه بیشتر نیز استفاده نمود

$$\frac{1}{T_{CS} + 1} \quad (5)$$

$$\frac{1}{T_{hS} + 1} \quad (6)$$

۲-۵- مدل دیزل ژنراتور:

بلوک دیاگرام دیزل ژنراتور و گاورنر در شکل (۳) نشان داده شده است [۶].



شکل ۱ مدل دینامیکی ریزشبه روی کشتی سیار برای مسئله کنترل بار - فرکانس [۱۹، ۲۸، ۲۹، ۳۰، ۳۱]

۱. Photo voltaic (PV)
۲. Wind Turbine(WT)
۳. Sea Wave energy(SWE)
۴. Diesel Generator(DG)
۵. Flywheel Energy Storage System(FESS)
۶. Battery Energy Storage System(BESS)
۷. Wave Energy Converter(WEC)

بنابراین لازم است روش کنترلی طراحی شود که بتوان عملکرد موثر و قوی در برابر اغتشاشات بار و منابع تولید پراکنده و همچنین عدم قطعیت پارامترها داشته باشد. در این مقاله برای سیستم کنترل بار-فرکانس ریز شبکه روی کشتی سیار از کنترل کننده پیش بین مدل بهینه شده استفاده شده است. روش پیش‌سپه‌گذاری مبتنی بر کنترل پیش‌بین مدل - که پارامترهای وزن آن با روش الگوریتم ازدحام ذرات مبتنی بر دیوانگی بهینه شده پیشنهاد شده است. که این الگوریتم پیشنهادی سرعت و عملکرد مناسبی در پیدا کردن جواب نسبت سایر الگوریتمها دارد. ریز شبکه مشتمل بر دیزل ژنراتور، توربین بادی، فتوولتائیک (سلول خور شیدی)، انرژی امواج دریا و انواع مختلف سیستمهای ذخیره انرژی تشکیل شده است. با انتخاب تابع هدف به صورت انتگرال قدرمطلق انحرافات فرکانس ریز شبکه روی کشتی سیار انتخاب شده است. برای اثبات کارایی روش پیشنهادی، مطالعات عددی در محیط سیمولینک متلب در حالت‌های مختلف انجام شده است. مقایسه نتایج بدست آمده کنترل کننده پیشنهادی با کنترل کننده تناسبی-انتگرالی فازی چند هدفه که توسط الگوریتم سیاه چاله آنالین، بهینه شده، کنترل کننده تناسبی-انتگرالی فازی نوع دو که توسط الگوریتم سیاه چاله آنالین، بهینه شده، کنترل کننده تناسبی-انتگرالی فازی و کنترل کننده تناسبی-انتگرالی زیگلر-نیکولز نشان دهنده بهبود پاسخ از نظر شاخصهایی همچون سرعت پاسخ، کاهش فرجهش و فروجهش و مقاوم در برابر عدم قطعیت پارامترها، توسط سیستم کنترل بار-فرکانس، نتایج نشانگر برتری روش پیشنهادی است. مقاله شامل مدل و اجزای ریزشبه روی کشتی، طراحی کنترل کننده پیش بین مدل برای ریزشبه سیار روی کشتی، شبیه‌سازی و نتایج است.

۲-۲- مدل و اجزای ریزشبه روی کشتی

۲-۱- مدل ریزشبه روی کشتی

ریز شبکه روی کشتی سیار در شکل (۱) بر اساس طرح کنترلی LFC نشان داده شده است. ریز شبکه روی کشتی شامل سلول خور شیدی^۱، توربین بادی^۲، مبدل انرژی امواج دریا^۳، دیزل ژنراتور^۴، چرخ طیار^۵ و باتری^۶ است. سلول خور شیدی و توربین بادی منابع اصلی و مبدل انرژی امواج دریا برای تامین بار هستند، اما به علت متغییر بودن توان خروجی آنها، دیزل ژنراتور به عنوان منبع توان پشتیبان برای پاسخ‌گویی به تغییرات بار عمل می‌کند. منابع ذخیره‌ساز انرژی باتری و ذخیره‌ساز چرخ طیار مازاد توان تولیدی کمبود توان بار را در کوتاه مدت جبران می‌کنند [۲۸-۲۳]. در ادامه مدل دینامیکی هر یک از منابع ریز شبکه سیار روی کشتی پرداخته شده است. نمایی از ریزشبه روی کشتی در شکل (۲) نشان داده شده است. شکل (۲) ریزشبه سیار کشتی شامل منابع تولید انرژی مانند توربین بادی، سلول خورشیدی، مبدل انرژی امواج دریا، دیزل ژنراتور و منابع ذخیره انرژی مانند باتری که به وسیله مبدل‌های اینورتر به ریزشبه سیار متصل هستند.

۲-۲- توربین بادی:

توربین بادی به توربینی گفته می‌شود که برای تبدیل انرژی جنبشی باد به انرژی مکانیکی به کار می‌رود. توان توربین بادی (P_{WT}) از رابطه (۱) محاسبه می‌شود [۷-۹]. مدل دینامیکی توربین بادی به صورت تابع تبدیل مرتبه اول در نظر گرفته شده است که به وسیله رابطه (۲) نشان داده شده است.



سیستم و انحراف فرکانس به وجود می آید. مدل جرم چرخان ریزشبه سیار روی کشتی در رابطه (۱۰) نشان داده شده است. در رابطه (۱۰) رابطه بین توان ریزشبه و تغییرات فرکانس را نشان می دهد، که توان ریزشبه بر حسب رابطه (۱۱) نشان داده شده است. طبق رابطه (۱۱) توان ریزشبه برابر با مجموع توان تولیدی که توسط منابع تولید پراکنده و منابع ذخیره انرژی که از توان مصرفی بار کم شده است. رابطه (۱۲) توان تولیدی ریزشبه را نشان می دهد [۲۸،۷].

$$\frac{1}{Ms+D} = \frac{\Delta f}{\Delta P} \quad (10)$$

$$\Delta P = \Delta P_s - \Delta P_L \quad (11)$$

$$\Delta P_s = \Delta P_{dg} + \Delta P_{fess} + \Delta P_{bess} + \Delta P_{swe} + \Delta P_{pv} \quad (12)$$

۳- طراحی کنترل کننده پیش بین مدل بهینه شده با الگوریتم ازدحام ذرات مبتنی بر دیوانگی برای ریزشبه روی کشتی سیار:

۳-۱- معادلات حالت ریزشبه:

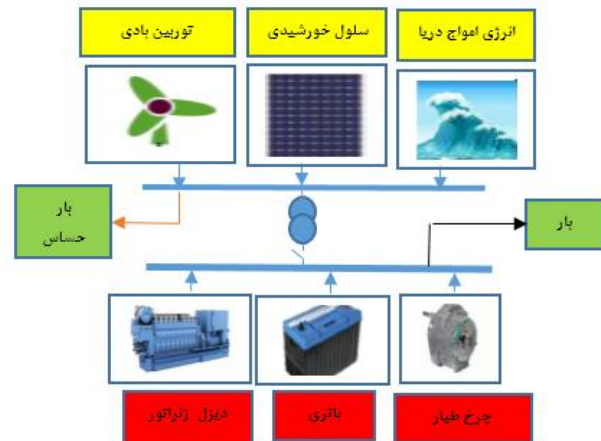
فرم معادلات حالت بر اساس رابطه (۱۳) نوشته شده است، و بر اساس آن معادلات حالت ریزشبه روی کشتی مطابق رابطه (۱۴) و (۱۵) بدست آمده است.

$$\dot{X} = AX + BU + DW, Y = CX \quad (13)$$

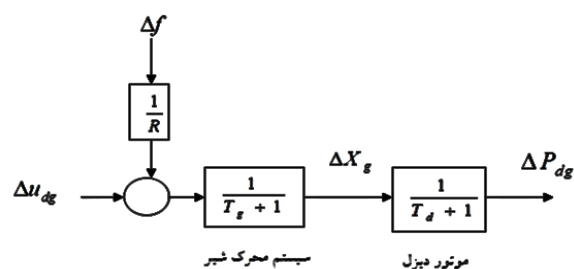
۳-۲- کنترل کننده پیش بین مدل:

ساختار کلی کنترل کننده پیش بین در شکل (۴) نشان داده شده است. همانطور که در شکل (۴) ملاحظه می شود، در کنترل کننده مذکور، با استفاده از مدلی از سیستم، رفتار آینده آن پیش بینی و کنترل می شود. در این کنترل کننده، با حداقل کردن یک تابع هزینه، سیگنال کنترلی بدست می آید. مقادیر سیگنال کنترلی در افق کنترل طوری تعیین می شوند که خروجی سیستم در آینده بر روی افق معین، مسیر مرجع تعیین شده را دنبال کند. برای این منظور باید تابع هزینه، که عموماً به صورت مربع انحراف متغیرهای کنترل شونده از مقدار مطلوب و مجموع مربعات سیگنال های کنترلی در نظر گرفته می شود، حداقل شود. رابطه (۱۶) تابع هزینه و رابطه (۱۷) قیودی اعمالی روی سیگنال های کنترلی و خروجی را نشان می دهد [۲۹].

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{X}_g \\ \Delta \dot{P}_{dg} \\ \Delta \dot{P}_{fess} \\ \Delta \dot{P}_{bess} \\ \Delta \dot{f} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-1}{T_g} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{RT_g} \\ \frac{1}{T_a} & \frac{-1}{T_a} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{T_{fess}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{T_{bess}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{M} & \frac{1}{M} & \frac{1}{M} & \frac{-D}{M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_g \\ \Delta P_{dg} \\ \Delta P_{fess} \\ \Delta P_{bess} \\ \Delta f \end{bmatrix} \quad (14)$$



شکل ۲ مدل واقعی ریزشبه روی کشتی سیار [۲۸]



شکل ۳ مدل دینامیکی دیزل ژنراتور [۶]

۲-۲- مدل باتری:

منبعی از انرژی پتانسیل الکتریکی است که در درون آن با انجام واکنش های شیمیایی، انرژی شیمیایی به انرژی الکتریکی تبدیل می شود، این انرژی در قطب های باتری قابل دریافت است. در این مقاله باتری نوع اکسیداسیونی به علت ویژگی های آن از جمله ظرفیت بالاتر، واکنش سریع و کاهش دشارژ در زمانی که آماده به کار است، استفاده شده است. مدل باتری و اینورتر متصل به ریزشبه که به صورت یک تاخیر مرتبه اول در رابطه (۷) نشان داده شده است [۱۲].

$$\frac{1}{T_{bess}S+1} \quad (7)$$

۲-۷- چرخ طیار:

در چرخ طیار انرژی ذخیره شده به صورت انرژی جنبشی ذخیره شده است، که رابطه (۸) انرژی جنبشی تعریف شده است [۲۸،۱۲].

$$K_E = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (8)$$

مدل دینامیکی چرخ طیار به صورت تابع تبدیل مرتبه اول در رابطه (۹) نشان داده شده است [۲۸،۱۲].

$$\frac{1}{T_{fess}S+1} \quad (9)$$

۲-۸- مدل جرم چرخان ریزشبه روی کشتی:

برای نگه داشتن ریزشبه روی کشتی در یک کارکرد مانا توازن فرکانس-توان باید حفظ شود، در ریزشبه روی کشتی اگر توان تغییر کند انحراف فرکانس به وجود می آید. ولی در عمل یک تاخیر بین انحراف توان



$$\text{sign}(r_f) = \begin{cases} -1 & r_f \leq 0.05 \\ 1 & r_f > 0.05 \end{cases} \quad (21)$$

$$x_i^{k+1} = v_i^{k+1} + P_r(r_f) \text{sign}(r_f) v_i^{\text{craziness}} \quad (22)$$

$$P_r(r_f) = \begin{cases} 1 & r_f \leq P_{\text{craz}} \\ 0 & r_f > P_{\text{craz}} \end{cases} \quad (23)$$

$$\text{sign}(r_f) = \begin{cases} 1 & r_f \leq 0.5 \\ -1 & r_f < P_{\text{craz}} \end{cases} \quad (24)$$

۳-۴- تنظیم پارامترهای وزن کنترل پیش بین مدل با استفاده از الگوریتم

ازدحام ذرات مبتنی بر دیوانگی

پارامترهای وزنی موثرترین پارامتر قابل تنظیم در کنترل کننده پیش بین مدل است. و تاثیر بسیار زیادی در پاسخ سیستم دارد. بنابراین در این مقاله پارامترهای وزن کنترل کننده پیش بین مدل به وسیله الگوریتم ازدحام ذرات مبتنی بر دیوانگی می‌شود. از الگوریتم ازدحام ذرات مبتنی بر دیوانگی به دلیل عملکرد موثر و کارآمد این الگوریتم در بهینه سازی موثر و سرعت آن نسبت به سایر الگوریتم‌ها استفاده شده است. تابع هدف برای تنظیم پارامترهای وزن کنترل کننده پیش بین مدل مربوط به سیستم کنترل بار-فرکانس برای ریزشکه روی کشتی به وسیله رابطه (۲۵) و قیود آن توسط رابطه (۲۶) نشان داده شده است. هدف بهینه سازی مینیمم کردن خطای قدر مطلق تغییرات فرکانس ریزشکه است.

$$\min IAE_{MPC} = \int_0^{\infty} |df| dt \quad (25)$$

$$\begin{cases} W_{yi, \min} \leq W_{yi} \leq W_{yi, \max} \\ W_{ui, \min} \leq W_{ui} \leq W_{ui, \max} \end{cases} \quad (26)$$

۳-۵- مراحل بهینه سازی پارامتر وزن کنترل کننده پیش بین مدل برای

کنترل بار-فرکانس ریزشکه روی کشتی:

اجرای الگوریتم :

۱-۱- مقدار دهی اولیه: انتخاب جمعیت ذرات: (۱۰۰ عدد)،

ماکزیمم تعداد تکرار (۱۰۰)، $c_1=1/90$ ، $c_2=2/10$ ، $P_r=0/3$.

۲-۱- تولید جمعیت اولیه ذرات به صورت تصادفی با توجه به

$$\{W_{ui}, W_{yi}\} \in [0, 1]$$

۳-۱- ارزیابی تابع هدف برای هر ذره به وسیله رابطه (۲۵)،

محاسبه P_{Best} برای هر ذره و g_{Best} برای گروه ذرات.

۴-۱- محاسبه سرعت ذرات و تعیین موقعیت جدید آنها توسط

$$\text{روابط (۲۰) و (۲۲)}$$

۵-۱- انجام مراحل ۱-۳ و ۴-۱ تا اینکه تعداد تکرارها به مقدار

ماکزیمم برسد

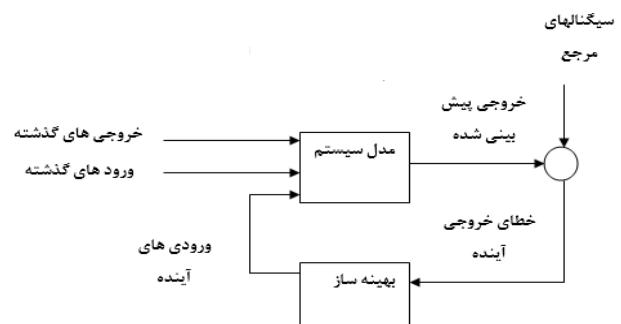
۶-۱- تعیین ذره بهینه

۴- شبیه سازی:

در جدول (۱) پارامترهای ریزشکه در روی کشتی و نیز پارامترهای کنترل کننده های پیش بین مدل نشان داده شده است. بهینه سازی پارامترهای وزن کنترل کننده های پیش بین مدل با استفاده الگوریتم ازدحام ذرات مبتنی بر دیوانگی انجام شده است. ابتدا تغییری در بار ریزشکه روی کشتی مطابق داده های جدول (۱) به اندازه بار به اندازه 0.03 پریونیت در زمان صفر ثانیه اتفاق می افتد. فرآیند بهینه سازی در ۱۰۰ تکرار برای الگوریتم ازدحام ذرات مبتنی بر دیوانگی انجام شده است. همگرایی مسئله برای الگوریتم ازدحام ذرات مبتنی بر دیوانگی مطابق شکل (۵) در ۳۰ تا ۳۳ تکرار انجام شده است. پارامترهای کنترل کننده پیش بین مدل (پارامترهای وزن) از همگرایی الگوریتم ازدحام ذرات مبتنی بر دیوانگی دارای مقادیر زیر است.

$$+ \begin{bmatrix} \frac{1}{T_g} & \cdot & \cdot \\ \cdot & \frac{1}{T_{fess}} & \cdot \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_{bess}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_{dg} \\ \Delta u_{fess} \\ \Delta u_{bess} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cdot \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} [\Delta P_{WT} + \Delta P_{swe} + \Delta P_{pv} - \Delta P_l] + \begin{bmatrix} \Delta X_g \\ \Delta P_{dg} \\ \Delta P_{fess} \\ \Delta P_{bess} \\ \Delta f \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$y = [0 \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad 1]$$



شکل ۴ ساختار کلی کنترل کننده پیش بین [۲۹،۳۲]

$$j(N_y, N_r, N_u) = \min \sum_{j=N_1}^{N_r} ([y(k+j) - r(k+j)]^T W_y [y(k+j) - r(k+j)] + ([u(k) - u(k-1)]^T W_u [u(k) - u(k-1)])) \quad (16)$$

$$u_{\min} \leq u(k) \leq u_{\max}, y_{\min} \leq y(k) \leq y_{\max} \quad (17)$$

۳-۳- الگوریتم ازدحام ذرات مبتنی بر دیوانگی:

الگوریتم ازدحام ذرات اولین بار توسط کندی و ابر هارت با الهام از حرکت دسته جمعی پرندگان معرفی گردید که یک مدل تکاملی محاسباتی و تکنیک جستجوی تصادفی بر اساس هوش ازدحام است که موقعیت و سرعت هر ذره توسط روابط (۱۸) و (۱۹) به روز می شود [۳۳].

$$v_i^{k+1} = v_i^k + c_1 r_1 (P_{Best} - x_i^k) + c_2 r_2 (g_{Best} - x_i^k) \quad (18)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (19)$$

الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات: در این الگوریتم با تغییر توسط رابطه (۲۰) و (۲۱) معادلات سرعت به روز رسانی می شود و قابلیت جستجوی کلی افزایش می یابد. و با اعمال دیوانگی بر الگوریتم ازدحام ذرات موقعیت ذره توسط روابط (۲۲)، (۲۳) و (۲۴) به روز رسانی می شوند.

$$v_i^{k+1} = r_f \text{sign}(r_f) v_i^k + (1 - r_f) c_1 r_1 (P_{Best} - x_i^k) + (1 - r_f) c_2 (1 - r_1) (g_{Best} - x_i^k) \quad (20)$$



سناریو(۲): در این سناریو اغتشاش بار مطابق شکل (۶) با عدم قطعیت پارامتر اینرسی (+۳۰٪) در نظر گرفته شده است. تغییرات منابع تولید پراکنده در ریزشبه روی کشتی در نظر گرفته نشده است. بر اساس شکل (۱) و دادهای جدول (۱) شبیه سازی انجام شده است. شکل (۸) پاسخ فرکانسی ریزشبه به اغتشاشات بار و به عدم قطعیت پارامترها را نشان می دهد. طبق شکل (۸) پاسخ فرکانسی روش پیشنهادی از نظر سرعت پاسخ به اغتشاشات بار وارد به ریزشبه و عدم قطعیت پارامترهای ریزشبه بعد از ۵,۹۸ ثانیه میرا شده است، در حالی که کنترل کننده تناسبی-انتگرالی فازی نوع دو چند هدفه بهینه شده با الگوریتم سیاه چاله بعد از ۱۴,۴۴ ثانیه میرا شده است و کنترل کننده تناسبی-انتگرالی چند هدفه بهینه شده با الگوریتم سیاه چاله در مدت زمان ۲۰ ثانیه میرا نشده است. از نظر حداکثر فروجهش روش پیشنهادی دارای مقدار ۰,۰۵۱- هرتز و از نظر حداکثر فراجهش دارای مقدار ۰,۰۶۳- هرتز است، روش کنترل کننده تناسبی-انتگرالی فازی نوع دو چند هدفه بهینه شده با الگوریتم سیاه چاله [۲۸] از نظر حداکثر فروجهش دارای مقدار ۰,۰۷۶- هرتز و از نظر حداکثر فراجهش دارای مقدار ۰,۰۹۵- هرتز است و کنترل کننده تناسبی-انتگرالی چند هدفه بهینه شده با الگوریتم سیاه چاله [۲۸] از نظر حداکثر فروجهش دارای مقدار ۰,۰۹۱- هرتز و از نظر حداکثر فراجهش دارای مقدار ۰,۱۴۸- هرتز است. همانطور که از نتایج شبیه سازی مشخص است، که کنترل کننده پیش بین مدل بهینه شده با الگوریتم ازدحام ذرات مبتنی بر دیوانگی دارای عملکرد مطلوبی در مقابل اغتشاشات بار و عدم قطعیت پارامترها نسبت به سایر روشهای کنترلی ذکر شده می باشد.

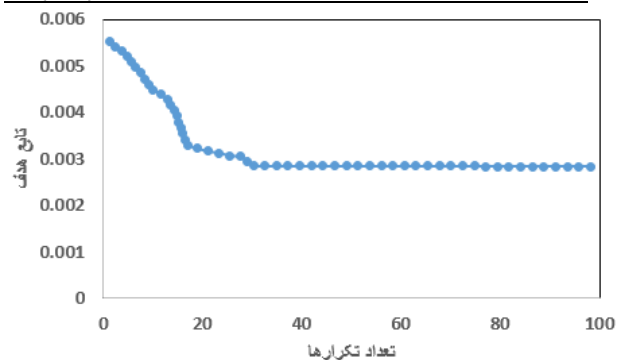
سناریو(۳): در این سناریو تغییرات منابع تولید پراکنده در ریزشبه روی کشتی در نظر گرفته نشده است اغتشاشات بار به صورت قطار پالسی به ریزشبه روی کشتی اعمال شده است. بر اساس شکل (۱) و دادهای جدول (۱) شبیه سازی انجام شده است. اغتشاشات بار به ریزشبه روی کشتی مطابق شکل (۹) اعمال شده است. در شکل (۱۰) پاسخ فرکانسی ریزشبه روی کشتی به اغتشاشات بار نشان داده شده است. طبق شکل (۱۰) پاسخ فرکانسی روش پیشنهادی از نظر سرعت پاسخ به اغتشاشات بار به صورت قطار پالسی وارد به ریزشبه بعد از ۳,۶۴ ثانیه میرا شده است، در حالی که کنترل کننده تناسبی-انتگرالی فازی نوع دو چند هدفه بهینه شده با الگوریتم سیاه چاله بعد از ۶,۸۵ ثانیه میرا شده است و کنترل کننده تناسبی-انتگرالی چند هدفه بهینه شده با الگوریتم سیاه چاله در مدت زمان ۸,۲۷ ثانیه میرا شده است. از نظر حداکثر فروجهش روش پیشنهادی دارای مقدار ۰,۰۱۲- هرتز و از نظر حداکثر فراجهش دارای مقدار ۰,۰۱۱- هرتز است، روش کنترل کننده تناسبی-انتگرالی فازی نوع دو چند هدفه بهینه شده با الگوریتم سیاه چاله از نظر حداکثر فروجهش دارای مقدار ۰,۰۳۱- هرتز و از نظر حداکثر فراجهش دارای مقدار ۰,۰۳۱- هرتز است. همانطور که از نتایج شبیه سازی مشخص است، که کنترل کننده پیش بین مدل بهینه شده با الگوریتم ازدحام ذرات مبتنی بر دیوانگی نسبت کنترل کننده تناسبی-انتگرالی چند هدفه بهینه شده با الگوریتم سیاه چاله [۲۸] و کنترل کننده تناسبی-انتگرالی فازی نوع دو چند هدفه بهینه شده با الگوریتم سیاه چاله [۲۸] مقایسه شده است و دارای عملکرد مطلوبی از نظر سرعت پاسخ، کاهش فراجهش و فروجهش می باشد.

سناریو(۴): در این سناریو تغییرات منابع تولید پراکنده در ریزشبه روی کشتی در نظر گرفته شده است. اغتشاشات بار به صورت قطار ضربه در

$$W_y = 0.07322, W_u = 0.0892$$

جدول ۱ پارامترهای ریزشبه روی کشتی [۱۹,۲۸,۲۹,۳۰,۳۱]

علائم	مقدار	علائم	مقدار
T_g	2s	T_{fess}	0.1s
T_d	1s	T_{bess}	0.1s
R	3(pu Mw/second)	T_c	0.5s
T_G	0.5s	T_{pv}	4s
T_h	4s	C_p	0.195
D	0.012(pu/Hz)	ρ_A	1.225Km/m ³
M	0.2(pu s)	N_1	0
N_2	5	N_u	2
T(MPC)	0.1		



شکل ۵ همگرایی مسئله برای الگوریتم ازدحام ذرات مبتنی بر دیوانگی

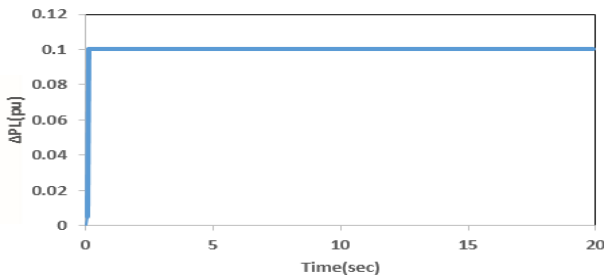
سناریو(۱): در این سناریو تغییرات منابع تولید پراکنده در ریزشبه روی کشتی در نظر گرفته نشده است و فقط اغتشاشات بار به صورت تابع پله مطابق شکل (۶) به ریزشبه روی کشتی اعمال شده است. بر اساس شکل (۱) و دادهای جدول (۱) شبیه سازی انجام شده است. اغتشاشات بار به ریزشبه روی کشتی مطابق شکل (۶) اعمال شده است. در شکل (۷) پاسخ فرکانسی ریزشبه روی کشتی به اغتشاشات بار نشان داده شده است. طبق شکل (۷) پاسخ فرکانسی روش پیشنهادی از نظر سرعت پاسخ به اغتشاشات بار وارد به ریزشبه بعد از ۴,۸۶ ثانیه میرا شده است، در حالی که کنترل کننده تناسبی-انتگرالی فازی نوع دو چند هدفه بهینه شده با الگوریتم سیاه چاله بعد از ۶,۲۵ ثانیه میرا شده است و کنترل کننده تناسبی-انتگرالی چند هدفه بهینه شده با الگوریتم سیاه چاله در مدت زمان ۹,۸۵ ثانیه میرا شده است. از نظر حداکثر فروجهش روش پیشنهادی دارای مقدار ۰,۰۰۵- هرتز و از نظر حداکثر فراجهش دارای مقدار ۰,۰۶۱- هرتز است، روش کنترل کننده تناسبی-انتگرالی فازی نوع دو چند هدفه بهینه شده با الگوریتم سیاه چاله از نظر حداکثر فروجهش دارای مقدار ۰,۰۷۱- هرتز و از نظر حداکثر فراجهش دارای مقدار ۰,۰۹۲- هرتز است و کنترل کننده تناسبی-انتگرالی چند هدفه بهینه شده با الگوریتم سیاه چاله از نظر حداکثر فروجهش دارای مقدار ۰,۰۹۳- هرتز و از نظر حداکثر فراجهش دارای مقدار ۰,۱۱۳- هرتز است. همانطور که از نتایج شبیه سازی مشخص است، که کنترل کننده پیش بین مدل بهینه شده با الگوریتم ازدحام ذرات مبتنی بر دیوانگی نسبت کنترل کننده تناسبی-انتگرالی چند هدفه بهینه شده با الگوریتم سیاه چاله [۲۸] و کنترل کننده تناسبی-انتگرالی فازی نوع دو چند هدفه بهینه شده با الگوریتم سیاه چاله [۲۸] مقایسه شده است و دارای عملکرد مطلوبی از نظر سرعت پاسخ، کاهش فراجهش و فروجهش می باشد.



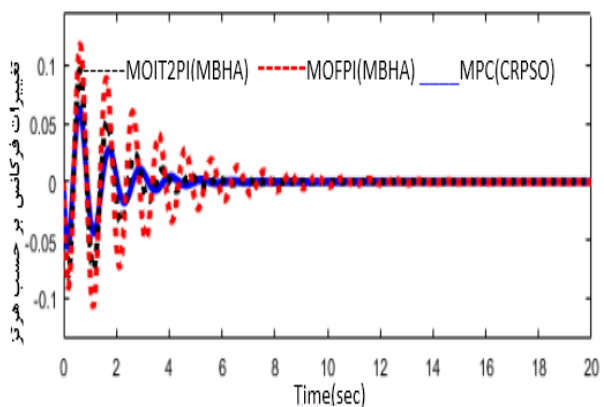
تناسبی-انتگرالی فازی دارای حداکثر فروجهش ۰.۰۱۵- و حداکثر فراجهش ۰.۰۰۴+ است. کنترل کننده تناسبی-انتگرالی زیگلر-نیکولز دارای حداکثر فروجهش ۰.۰۱۷- و حداکثر فراجهش ۰.۰۱۴+ است. با توجه به نتایج عملکرد کنترل کننده پیشنهادی از لحاظ سرعت پاسخ و کاهش فراجهش و فروجهش نسبت به کنترل کننده‌های مورد استفاده در [۱۹] مطلوبتر است.

۵-نتیجه گیری

در این مقاله از کنترل پیش‌بین مدل که پارامترهای وزن آن با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات مبتنی بر دیوانگی بهینه شده، برای کنترل بار-فرکانس در ریز شبکه روی کشتی استفاده شد. از الگوریتم ازدحام ذرات مبتنی برای بهینه کردن پارامترهای کنترل کننده پیش بین مدل به دلیل سرعت همگرایی مناسب استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی در سناریوهای مختلف و مقایسه کنترل کننده پیشنهادی با سایر روش‌های مورد استفاده در زمینه کنترل بار-فرکانس نشان داده شده که کنترل کننده پیشنهادی سرعت پاسخ سریعتری نسبت به سایر روش‌های کنترلی مرسوم داشته است و تقریباً سرعت پاسخ به نوسانات را ۷٪ بهبود بخشیده است، همچنین کنترل کننده پیشنهادی در کاهش فراجهش و کاهش فروجهش عملکرد بهتری داشته است و از لحاظ کاهش فراجهش و کاهش فروجهش نوسانات نزدیک به ۵٪ بهبود داشته است.



شکل ۶ اغتشاشات بار ریز شبکه روی کشتی سناریو (۱) [۲۹]



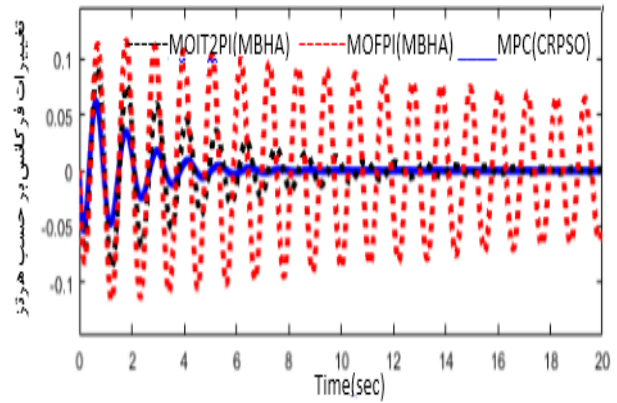
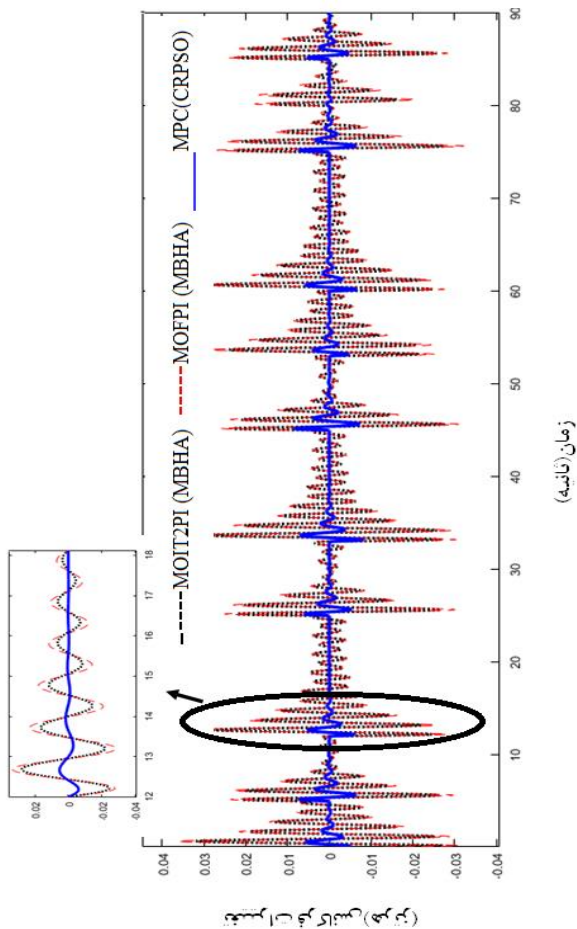
شکل ۷ پاسخ فرکانسی ریز شبکه به اغتشاشات بار

ریزشبکه روی کشتی در نظر گرفته نشده است. بر اساس شکل (۱) و داده‌های جدول (۱) شبیه‌سازی انجام شده است. اغتشاشات منابع تولید پراکنده (توربین بادی، سلول خورشیدی، امواج دریا) به ریز شبکه روی کشتی مطابق شکل (۱۱) الف، ۱۱-ب، ۱۱-ج اعمال شده است. در شکل (۱۲) پاسخ فرکانسی ریز شبکه روی کشتی به اغتشاشات منابع تولید پراکنده نشان داده شده است. همانطور که از نتایج شبیه‌سازی مشخص است، که کنترل کننده پیش بین مدل بهینه شده با الگوریتم ازدحام ذرات مبتنی بر دیوانگی نسبت کنترل کننده تناسبی-انتگرالی چند هدفه بهینه شده با الگوریتم سیاه چاله و کنترل کننده تناسبی-انتگرالی فازی نوع دو چند هدفه بهینه شده با الگوریتم سیاه چاله مقایسه شده است و دارای عملکرد مطلوبی از نظر سرعت پاسخ، کاهش فراجهش و فروجهش می‌باشد.

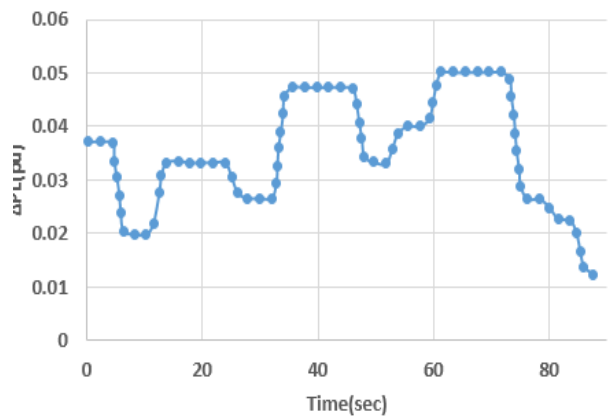
سناریو (۵): در این سناریو تغییرات منابع تولید پراکنده در ریز شبکه روی کشتی در نظر گرفته نشده است و فقط اغتشاشات بار در ریز شبکه روی کشتی با در نظر گرفتن عدم قطعیت (تغییر پارامترها) در نظر گرفته شده است. بر اساس شکل (۱) و داده‌های جدول (۱) و جدول (۲) که نشان دهنده تغییرات پارامترها است، شبیه‌سازی انجام شده است. اغتشاشات بار به ریز شبکه روی کشتی مطابق شکل (۹) با در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترها اعمال شده است. در شکل (۱۳) پاسخ فرکانسی ریز شبکه روی کشتی به اغتشاشات بار نشان داده شده است. طبق شکل (۱۳) پاسخ فرکانسی روش پیشنهادی از نظر سرعت پاسخ به اغتشاشات بار به صورت قطار پالسی وارد به ریز شبکه بعد از ۳.۸۵ ثانیه میرا شده است، در حالی که کنترل کننده تناسبی-انتگرالی فازی نوع دو چند هدفه بهینه شده با الگوریتم سیاه چاله و کنترل کننده تناسبی-انتگرالی چند هدفه بهینه شده با الگوریتم سیاه چاله توانایی میرا کردن نوسانات قبل از شروع اغتشاش بعدی را نداشته‌اند. از نظر حداکثر فروجهش روش پیشنهادی دارای مقدار ۰.۰۱۰- هرتز و از نظر حداکثر فراجهش دارای مقدار ۰.۰۰۹+ هرتز است، روش کنترل کننده تناسبی-انتگرالی فازی نوع دو چند هدفه بهینه شده با الگوریتم سیاه چاله از نظر حداکثر فروجهش دارای مقدار ۰.۰۳۵- هرتز و از نظر حداکثر فراجهش دارای مقدار ۰.۰۲۶+ هرتز است و کنترل کننده تناسبی-انتگرالی چند هدفه بهینه شده با الگوریتم سیاه چاله از نظر حداکثر فروجهش دارای مقدار ۰.۰۳۸- هرتز و از نظر حداکثر فراجهش دارای مقدار ۰.۰۴۰+ هرتز است. همانطور که از نتایج شبیه‌سازی مشخص است، که کنترل کننده پیش بین مدل بهینه شده با الگوریتم ازدحام ذرات مبتنی بر دیوانگی نسبت کنترل کننده تناسبی-انتگرالی چند هدفه بهینه شده با الگوریتم سیاه چاله و کنترل کننده تناسبی-انتگرالی فازی نوع دو چند هدفه بهینه شده با الگوریتم سیاه چاله مقایسه شده است و دارای عملکرد مطلوبی از نظر سرعت پاسخ، کاهش فراجهش و فروجهش در برابر عدم قطعیت پارامترها می‌باشد.

سناریو (۶): در این سناریو مطابق شکل (۱۴) اغتشاشات بار به صورت چند پله به ریز شبکه وارد شده است. پاسخ فرکانسی ریز شبکه توسط کنترل کننده‌های مختلف در شکل (۱۵) نشان داده شده است. در این سناریو کنترل کننده پیشنهادی با روش‌های کنترلی در [۱۹] (کنترل کننده تناسبی-انتگرالی فازی، کنترل کننده تناسبی-انتگرالی زیگلر-نیکولز) مقایسه شده است. زمان میرا شدن نوسانات با استفاده از کنترل کننده پیشنهادی بعد از ۲.۱۱ ثانیه میرا شده است، در حالی که کنترل کننده تناسبی-انتگرالی فازی نوسانات را بعد از زمان ۲.۸۷ ثانیه و کنترل کننده تناسبی-انتگرالی زیگلر-نیکولز بعد از مدت زمان ۶.۵۴ ثانیه میرا می‌کند. حداکثر فروجهش کنترل کننده پیشنهادی ۰.۰۱- و حداکثر فراجهش مقدار ۰.۰۰۳+ است، کنترل کننده



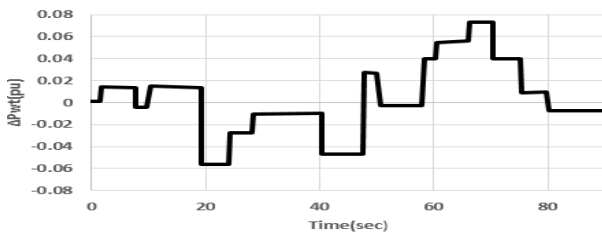


شکل ۸ پاسخ فرکانسی ریزشبه به اغتشاشات بار با در نظر گرفتن عدم قطعیت

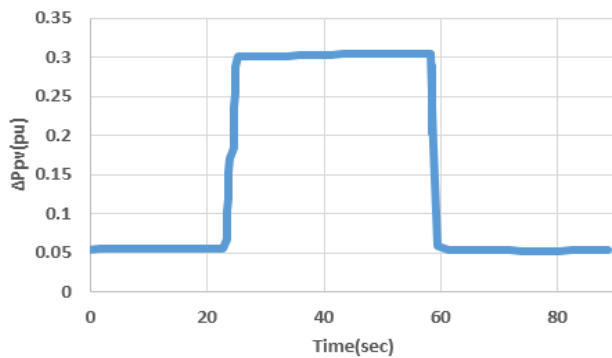


شکل ۱۰ پاسخ فرکانسی ریزشبه به اغتشاشات بار سناریو (۳)

شکل ۹ اغتشاشات بار به صورت قطار پالسی وارد به ریزشبه [۲۸]



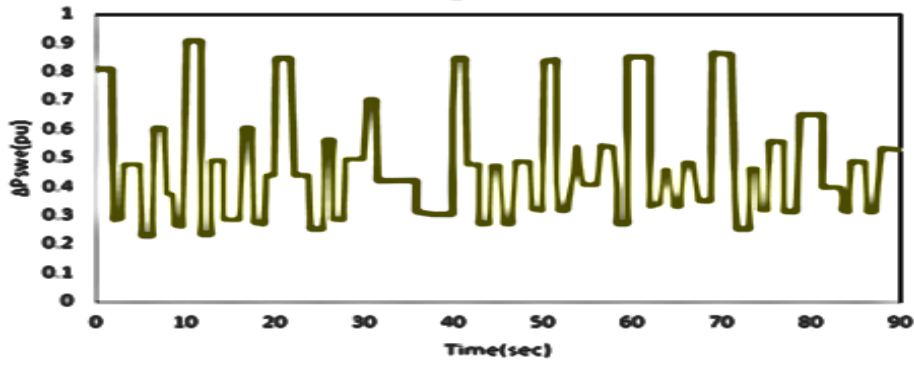
شکل ۱۱-الف تغییرات توان توربین بادی [۲۹-۳۱]



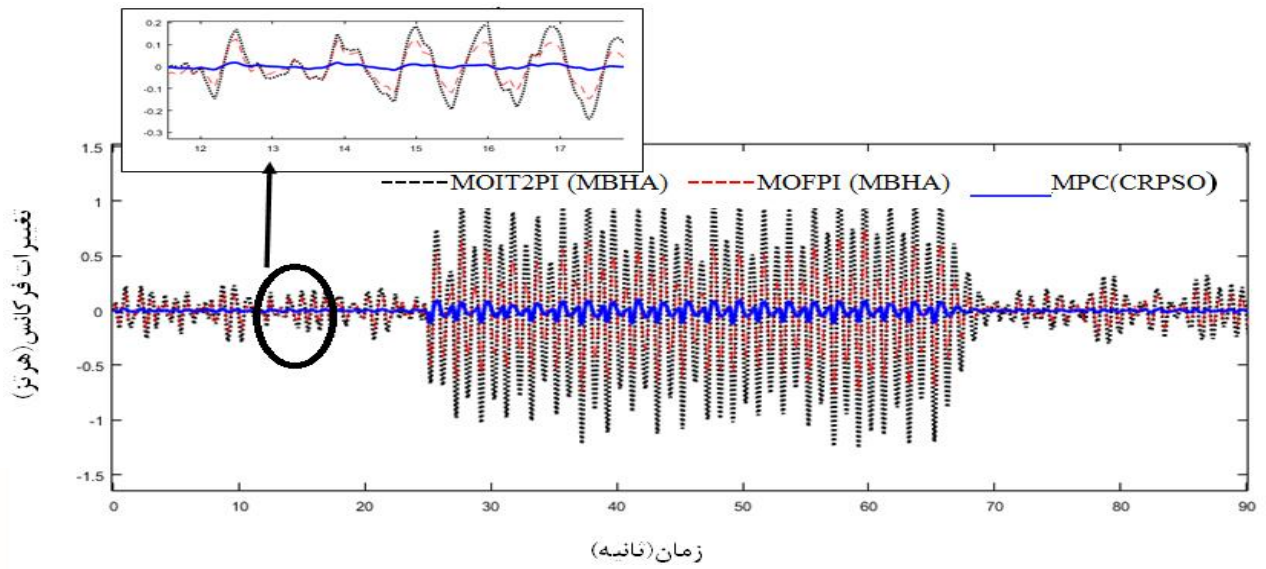
شکل ۱۱-ب تغییرات توان سلول خورشیدی [۲۹-۳۱]

جدول ۲ تغییرات پارامترهای ریزشبه [۱۹،۲۸،۲۹،۳۰]

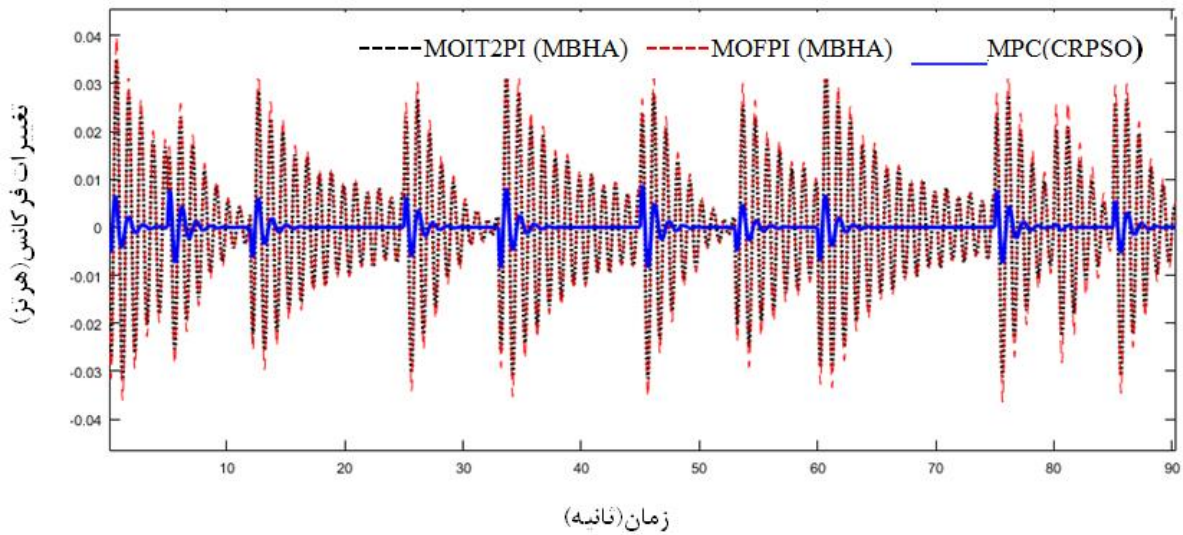
پارامترها	محدوده تغییرات
R	+35%
D	-25%
M	+45%
T_e	-30%
T_g	+10%
T_{fess}	-25%
T_{bess}	+35%



شکل ۱۱- ج تغییرات توان مبدل امواج دریا

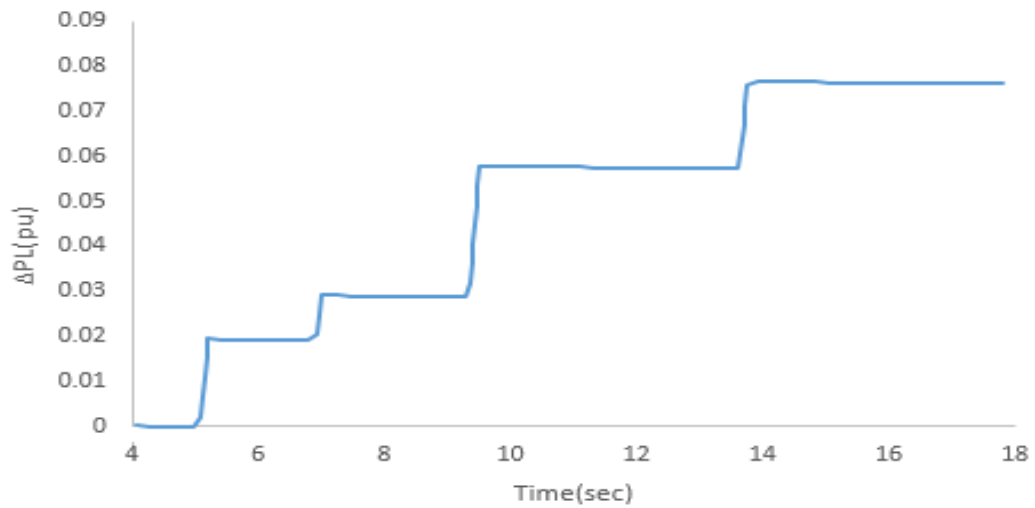


شکل ۱۲ پاسخ فرکانسی ریزشکبه به اغتشاشات بار سناریو (۴)

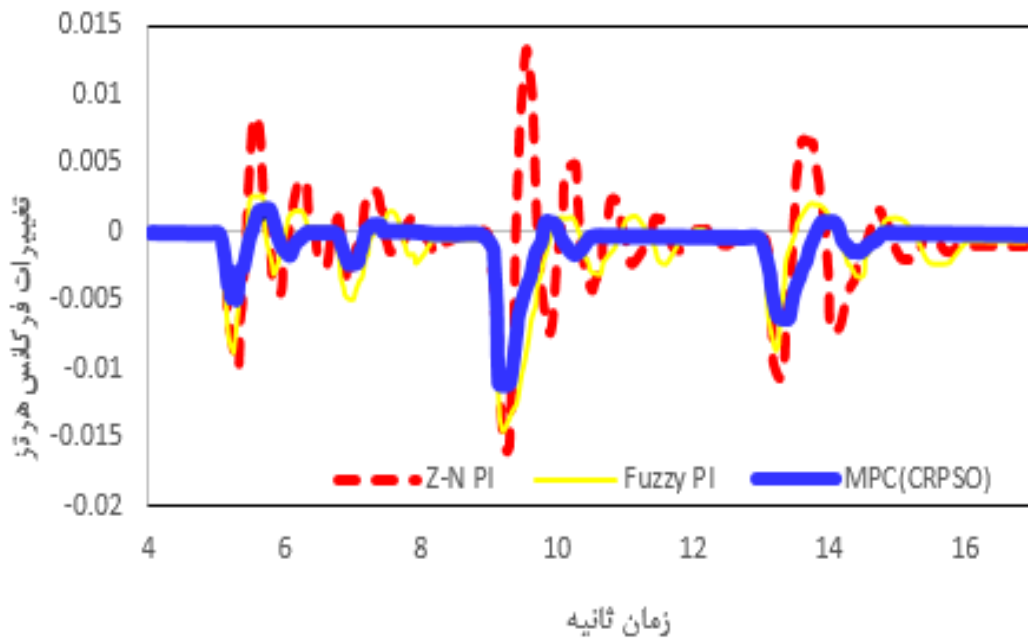


شکل ۱۳ پاسخ فرکانسی ریزشکبه به اغتشاشات بار سناریو (۵)





شکل ۱۴ اغتشاشات وارد بر ریزشبکه [۱۹،۲۹]



شکل ۱۵ پاسخ فرکانسی ریزش شبکه (سناریو ۶)

A	سطح جاروب شده تو
V_W	سرعت باد
$C_p(\beta, \sigma)$	ضریب عملکرد توربین
T_c	ثابت زمانی مربوط به اینورتر سلول خورشیدی
T_{pv}	ثابت زمانی سلول خورشیدی
T_G	ثابت زمانی اینورتر مبدل امواج دریا
T_h	ثابت زمانی مبدل امواج دریا
k_{WT}	بهره توربین بادی
T_{WT}	ثابت زمانی توربین بادی
R	حلقه کنترلی دروپ
T_g	ثابت زمانی سیستم محرک شیر
T_d	ثابت زمانی موتور دیزلی
Δu_s	سیگنال کنترلی سیستم بار-فرکانس
ΔF	انحراف فرکانس سیستم
ΔX	موقعیت شیر
T_{bess}	ثابت زمانی باتری
I	ممان اینرسی چرخ طیار زیر شبکه
	زیر نویس ها
W	سرعت زاویه ای
T_{fess}	ثابت زمانی چرخ طیار
M	ثابت اینرسی
D	ثابت میرایی
X	بردار متغیرهای حالت برای کنترل کننده پیش بین مدل
U	بردار خروجی کنترلی کنترل کننده پیش بین مدل
B	ماتریس ضرائب کنترل کننده پیش بین مدل
W	بردار اغتشاش
D	ماتریس ضرائب اغتشاش
$j(N_1, N_2, N_u)$	تابع هزینه
N_1	افق پیش بین پایینی
N_2	افق پیش بین بالایی
N_u	افق کنترل
$y(k+j)$	مقدار سیگنال خروجی
$r(k+j)$	خروجی مرجع
$u(k-1)$	سیگنال کنترلی
W_y	ماتریس وزن ورودی
W_u	ماتریس وزن خروجی
ΔP_s	توان تولیدی ریزش شبکه

۶-مراجع

- [1] M. Shahbazi, & F. Amiri. 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, 2019.
- [2] N, Pandey, S. Kishor, N. A literature survey on load-frequency control for conventional and distribution generation power systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 25, pp. 318-334, 2013.
- [3] F. Tedesco, A. Casavola, Fault-tolerant distributed load/frequency coordination strategies for multi-area power microgrids, *IFAC-PapersOnLine*, Vol. 48, pp. 54-59, Jan.2015.
- [4] R. Dhanalakshmi, Load frequency control of wind diesel hydro hybrid power system using conventional PI controller, *European J. Scient. Res.*, Vol. 60, No. 4, pp. 630-641, 2011.
- [5] D. I. Makrygiorgou and A. T. Alexandridis, Nonlinear modeling, control and stability analysis of a hybrid ac/dc distributed generation system, *2017 25th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*, Valletta, 2017, pp. 768-773.
- [6] B. Kumar and S. Bhongade, Load Disturbance Rejection based PID controller for frequency regulation of a microgrid, *2016 Biennial International Conference on Power and Energy Systems: Towards Sustainable Energy (PESTSE)*, Bangalore, pp. 1-6, 2016,
- [7] G. Mallesham, S. Mishra and A. N. Jha, Ziegler-Nichols based controller parameters tuning for load frequency control in a microgrid, *2011 International Conference on Energy, Automation and Signal*, Bhubaneswar, Odisha, 2011, pp. 1-8.
- [8] D. Das, A. Roy, N. Sinha, GA based frequency controller for solar thermal diesel-wind hybrid energy generation/energy storage system, *Int J Electr Power Energy*, Vol. 43, no. 1, pp. 262-79, Syst 2012.
- [9] D. C. Das, A. K. Roy and N. Sinha, PSO based frequency controller for wind-solar-diesel hybrid energy generation/energy storage system, *2011 International Conference on Energy, Automation and Signal*, Bhubaneswar, Odisha, pp. 1-6, 2011



- [24] P. Ray, S. Mohanty, and N. Kishor, Small-signal analysis of autonomous hybrid distributed generation systems in presence of ultracapacitor and tie-line operation, *Journal of Electrical engineering*, Vol. 61, No. 4, pp.205-214, 2014.
- [25] G. Messinis, et al., A multi-microgrid laboratory infrastructure for smart grid applications, *MedPower Athens*, pp. 1-6, 2014.
- [26] H. Shayeghi, H. A. Shayanfar and M. Esmaili, NSGAII-Based Fuzzy PID Controller for Load Frequency Control of Multi-Microgrids, *International Conf. on Advances on Applied Cognitive Computing, Los Vegas, Nevada*, pp-64-69, 2017.
- [27] A. A. El-Fergany and M. A.El-Hameed, 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, 2017.
- [28] M. H. Khooban, T. Dragicevic, F. Blaabjerg, & M. Delimar, Shipboard microgrids: A novel approach to load frequency control, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol. 9, No. 2, pp. 843-852, 2018.
- [29] F. Amiri, A. Hatami. A model predictive control method for load-frequency control in islanded microgrids. *Computational Intelligence in Electrical Engineering*, Vol. 8, no.1, pp. 9-24, 2017 doi: 10.22108/isee.2017.21604.
- [30] F. Amiri, M. H. Moradi. Designing a Fractional Order PID Controller for a Two-Area Micro-Grid under Uncertainty of Parameters. *IJE*, Vol. 20, no.4, pp: 49-78, 2018.
- [31] F. Amiri, A. Hatami. Nonlinear Load frequency control of isolated microgrid using fractional order PID based on hybrid craziness-based particle swarm optimization and pattern search. *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*, Vol. 17, no. 2, 2018.
- [32] M. H. Moradi, F. Amiri. 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*, 2020
- [33] P. Bhatt, R. Roy, and S.P. Ghoshal. Dynamic participation of doubly fed induction generator in automatic generation control. *Renewable Energy*, Vol. 36, pp. 1203-12, 2011.
- [10] R. H. Kumar and S. Ushakumari, Biogeography based tuning of PID controllers for Load Frequency Control in microgrid, *2014 International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies [ICCPCT-2014]*, Nagercoil, pp. 797-802, 2014.
- [11] A. Kumar and G. Shankar, Quasi-oppositional harmony search algorithm based optimal dynamic load frequency control of a hybrid tidal-diesel power generation system, *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 12, No. 5, pp. 1099-1108, 2018.
- [12] I. Pan and S. Das, Fractional Order AGC for Distributed Energy Resources Using Robust Optimization, *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 7, No. 5, pp. 2175-2186, Sept. 2016.
- [13] I. Pan and D. Saptarshi, Fractional order fuzzy control of hybrid power system with renewable generation using chaotic PSO, *ISA transactions*, Vol. 62, pp. 19-29, 2016.
- [14] F. Amiri, & A. Hatami. Load Frequency Control Via Adaptive Fuzzy PID Controller In An Isolated Microgrid. In *32nd international power system conference*, 2017.
- [15] M. H. Khooban, T. Niknam, F. Blaabjerg, P. Davari and T. Dragicevic A new load frequency control strategy for micro-grids with considering electrical vehicles, *Electric Power Systems Research*, Vol. 143, pp. 585-598, 2017.
- [16] V.P. Singh, , S.R. Mohanty, N. Kishor, , P.K. Ray, Robust H-infinity load frequency control in hybrid distributed generation system, *Int J. Electr. Power Energy Syst*, Vol. 46, pp. 294-305, 2013.
- [17] H. Bevrani, M. R. Feizi, , and S. Atae, , Robust Frequency Control in an Islanded Microgrid: H-infinity and μ -synthesis Approaches, *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 7, no. 2, pp. 706-717, March 2016.
- [18] F. Amiri, M. H. Moradi. A New Control Strategy for Controlling Isolated Microgrid, *Energy Engineering & Management*, 2020.
- [19] H., Bevrani, F., Habibi, P., Babahajyani, M., Watanabe, and Y., Mitani, Intelligent frequency control in an ac microgrid: online pso-based fuzzy tuning approach, *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 3, No. 4, pp. 1935-1944, Dec. 2012.
- [20] M. Khalghani, M. Khooban, M. Moghaddam, V. Navid, and Mohammad, G. A self-tuning load frequency control strategy for microgrids: Human brain emotional learning, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 75, pp. 311-319, 2016.
- [21] P. Singh, N. Kishor, and S. Paulson, Communication time delay estimation for load frequency control in two-area power system, *Ad Hoc Networks*, Vol. 41, pp. 69-85, 2016.
- [22] F. Tedesco, and A. Casavola, Fault-tolerant distributed load/frequency coordination strategies for multi-area power microgrids, *IFAC-PapersOnLine*, Vol. 48, No.21, pp.54-59, 2015.
- [23] R. Fan, J. Zhao, B. Pan, N. Chen, T. Wang, and H. Ma, Automatic generation control of three-area small hydro system based on fuzzy PID control, *International Conference on Power System Technology*, Chengdu, pp. 2522-2528, 2014.

