

کنترل فرکانس-بار ریزشبهه دو ناحیه‌ای به وسیله کنترل کننده پیش‌بین مدل بهینه‌شده

محمد حسن مرادی^۱ فرهاد امیری^۲

۱- استاد- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه بوعلی سینا- همدان- ایران

mh_moradi@yahoo.co.uk

۲- دانشجوی دکتری- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه بوعلی سینا - همدان- ایران

f.amiri94@basu.ac.ir

چکیده: کنترل بار-فرکانس در ریزشبهه ایزوله بسیار مهم است، با اغتشاش بار، فرکانس ریزشبهه نوسان پیدا می‌کند و این نوسان باید توسط سیستم کنترل بار-فرکانس (کنترل ثانویه) میرا گردد. در این مقاله تعداد کنترل کننده‌ها مورد استفاده برای منابع ذخیره انرژی موجود در ریزشبهه کاهش پیدا کرده است (پیچیدگی کمتر) و از کنترل پیش‌بین مدل (MPC) که پارامترهای وزن آن با استفاده از الگوریتم ترکیبی جدید ازدحام ذرات مبتنی بر دیوانگی-جستجوی الگو بهینه شده (HCRPSO-PS)، برای کنترل بار-فرکانس در ریزشبهه دو ناحیه‌ای استفاده شده است. نتایج کنترل کننده پیشنهادی، در چند سناریو مختلف و با در نظر گرفتن تغییرات بار و منابع تولید پراکنده ریزشبهه با روش‌های مانند کنترل کننده PID بهینه شده با الگوریتم رفتار اجتماعی عنکبوت (SSO) و کنترل کننده پیش‌بین مدل که پارامترهای وزن آن با الگوریتم ازدحام ذرات مبتنی بر دیوانگی (CRPSO) (برای نشان دادن کارایی الگوریتم ترکیبی جدید)، مقایسه شده است و موثر بودن روش پیشنهادی از لحاظ سرعت پاسخ و کاهش فراجش و فرجهش، کنترل کننده کمتر (پیچیدگی کمتر) نشان داده شده است. شبیه‌سازی با استفاده از نرم افزار متلب انجام شده است.

واژه‌های کلیدی: کنترل بار-فرکانس، ریزشبهه دو ناحیه‌ای، کنترل پیش‌بین مدل بهینه‌شده، کاهش تعداد کنترل کننده‌ها، منابع ذخیره انرژی، ازدحام ذرات مبتنی بر دیوانگی-جستجوی الگو

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.19.1.125

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۸/۰۷/۱۰

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۹/۰۸/۲۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۱/۲۷

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر محمد حسن مرادی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - همدان - میدان پژوهش - دانشگاه بوعلی سینا - دانشکده‌ی برق

۱- مقدمه

مزایای منابع انرژی تجدیدپذیر سبب افزایش استفاده از آنها در صنعت برق و گسترش روزافزون ریزشبهه‌ها شده است. ریزشبهه‌ها، شبکه‌های قدرت کوچکی هستند - که در سطح ولتاژ متوسط/فشار ضعیف کار می‌کنند و مشتمل بر منابع انرژی تجدیدپذیر، منابع انرژی سنتی، ذخیره‌سازهای انرژی و بارهای کوچک محلی هستند [۱]. ریزشبهه‌ها می‌توانند در حالت اتصال به شبکه اصلی یا جدا از آن بهره‌برداری شوند. ریزشبهه‌ها می‌توانند به صورت یک ناحیه‌ای بهره‌برداری شوند یا اینکه ریزشبهه‌های موجود در یک ناحیه جغرافیایی می‌توانند از طریق خطوط ارتباطی به تبادل توان بپردازند و ریزشبهه‌های چند ناحیه‌ای ایجاد شود. 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 ریز شبکه 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 فرکانس-بار استفاده می‌شود [۳-۱].

توربین بادی و سلول خورشیدی از جمله منابع تولید پراکنده هستند که در ریزشبهه به کار گرفته می‌شوند. وجود این منابع مزایای زیادی به همراه دارد اما آنها کنترل ریزشبهه را با چالش مواجهه می‌کنند [۴]. با توجه به طبیعت نوسانی توربین بادی و سلول خورشیدی، توان تولیدی این منابع انرژی تجدید پذیر متغیر است. توان تولیدی منابع انرژی تجدید پذیر و نیز اغتشاشات بار سبب به هم خوردن تعادل در ریزشبهه جزیره‌ای می‌شود و سبب به وجود آمدن انحرافات بزرگ فرکانس در ریزشبهه جزیره ای می‌شود [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 [۳-۱]. استراتژی کنترل فرکانس در ریزشبهه جزیره‌ای از دو حلقه کنترلی استفاده می‌کند: (۱) حلقه کنترل اولیه (۲) حلقه کنترل ثانویه. حلقه کنترل اولیه وظیفه محدود کردن انحراف فرکانس بعد از به وجود آمدن اغتشاشات را بر عهده دارد. اگر چه حلقه کنترل اولیه انحرافات فرکانس را محدود می‌کند اما در باز گرداندن فرکانس به مقدار نامی ناتوان است بنابراین از یک حلقه کنترلی دیگر به نام کنترل ثانویه فرکانس استفاده می‌شود تا فرکانس را به مقدار نامی بازگرداند [۴-۶]. حلقه کنترل اولیه معمولاً بر روی دیزل ژنراتور قرار می‌گیرد اما حلقه کنترل ثانویه از کنترل کننده‌های مختلفی برای کنترل سیستم فرکانس-بار استفاده می‌کند. عملکرد کنترل کننده‌های مورد استفاده در حلقه کنترل ثانویه بسیار مهم است [۴-۶].

در ارتباط با کنترل فرکانس-بار در ریزشبهه‌ها تحقیقات گسترده‌ای انجام شده است. روش‌های کنترلی فرکانس-بار در ریزشبهه‌ها را می‌توان به دو دسته کلی تقسیم کرد. ریز شبکه‌های تک ناحیه‌ای که عمده تحقیقات صورت گرفته در این زمینه است [۲۷-۷]. ریزشبهه‌های دو یا چند ناحیه‌ای که تحقیقاتی در این زمینه صورت گرفته است [۲۴-۲۸].

کنترل کننده‌های متعددی مانند PI معمولی [۷، ۸]، PID معمولی [۹]، PID مبتنی بر تعیین ضرائب با روش زیگلر- نیکولز [۱۰]، PID مبتنی بر الگوریتم ژنتیک [۱۱]، PI مبتنی بر PSO [۱۲]، PID مبتنی بر جغرافیای زیستی^۲ (BIO) [۱۳]، PI/PID مبتنی بر (F-O)^۴ [۱۵]، PID مبتنی بر مرتبه کسری^۴ (QOH) [۱۴]، fuzzy-PID مبتنی بر مرتبه کسری [۱۶]، PI مبتنی بر منطق فازی نوع ۲ در ترکیب با الگوریتم بهبود یافته جستجوی هارمونی [۱۷، ۱۸]، برای کنترل فرکانس-بار در ریز شبکه‌ها ارائه شده است. همچنین از روش‌های کنترل مقاوم مبتنی بر کنترل اچ-بینهایت (H_∞) [۲۱-۱۹]. کنترل فازی PSO مبتنی بر فازی [۲۲]، از کنترل مبتنی بر الگوریتم یادگیری عاطفی مغز^۵ (HBEL) [۲۳]، برای کنترل فرکانس-بار در ریزشبهه استفاده شده است. در [۲۴]، یک استراتژی کنترلی هوشمند برای کنترل فرکانس در ریزشبهه استفاده شده است. در [۲۵]، کنترل هماهنگ خودرو برقی و منابع انرژی تجدید پذیر برای کنترل فرکانس در ریزشبهه استفاده شده است. در [۲۶، ۲۷]، کنترل مقاوم برای سیستم کنترل فرکانس در ریزشبهه طراحی شده است.

مسئله کنترل فرکانس-بار در ریزشبهه‌های چند منطقه‌ای بسیار مهم است زیرا سیستم کنترل فرکانس-بار علاوه بر وظیفه کنترل فرکانس، وظیفه کنترل نوسانات بین ریزشبهه‌ها را نیز بر عهده دارد [۲۴-۲۸].

در [۲۸]، اثر تاخیر زمانی سیستم‌های مخابراتی بر پایداری کنترل بار-فرکانس در یک سیستم مشتمل بر ریزشبهه چند ناحیه‌ای بررسی شده است. در [۲۹]، استراتژی کنترل نظارت ثالثیه برای کنترل فرکانس-بار در یک سیستم مشتمل بر ریز شبکه چند ناحیه ای ارائه شده است. در [۳۰]، کنترل مبتنی بر PID فازی در یک سیستم سه ناحیه‌ای کوچک آبی برای کنترل فرکانس-بار ارائه شده است. در [۳۱]، اثر خطوط ارتباطی و سوپر خارنرها بر کنترل فرکانس-بار در ریز شبکه چند ناحیه‌ای بررسی شده است. در [۳۲]، اثر ذخیره‌سازها بر کنترل فرکانس-بار در ریز شبکه چند ناحیه‌ای بررسی شده است. در [۳۳]، کنترل فرکانس-بار در ریز شبکه چند ناحیه‌ای به کمک کنترل PID فازی تنظیم شده با روش ناگای ارائه شده است. در [۳۴]، یک استراتژی کنترل ترکیبی (کنترل کننده فازی PD و کنترل کننده PI-PD) برای سیستم کنترل فرکانس-بار در ریزشبهه جزیره‌ای چند ناحیه‌ای استفاده شده است. در [۳۵]، از کنترل کننده PIFOD برای کنترل فرکانس-بار ریزشبهه جزیره‌ای چند ناحیه‌ای استفاده شده است. در [۳۶]، کنترل بار-فرکانس در یک ریز شبکه دوناحیه‌ای با

مطالعات عددی در محیط سیمولینک مطلب در حالت‌های مختلف انجام شده است. مقایسه نتایج بدست آمده با نتایج روش بهینه‌سازی شده با عنکبوت اجتماعی [۳۶] و کنترل کننده پیش‌بین مدل که پارامترهای وزن آن با الگوریتم ازدحام ذرات مبتنی بر دیوانگی (CRPSO) (برای نشان دادن کارایی الگوریتم ترکیبی جدید)، مقایسه شده است که نشان دهنده بهبود پاسخ از نظر شاخص‌هایی همچون سرعت پاسخ، کاهش فراجهش و فروجهش، کاهش پیچیدگی به علت استفاده از کنترل کننده کمتر است، نتایج نشانگر برتری روش پیشنهادی است. مقاله شامل مدل و اجزای ریزشبهه‌های مورد مطالعه، معادلات حالت ریزشبهه ناحیه اول و دوم، طراحی کنترل کننده پیش‌بین مدل برای ریزشبهه دو ناحیه‌ای، شبیه‌سازی و نتایج است.

۲- مدل و اجزای ریزشبهه‌های مورد مطالعه:

۲-۱- مدل ریزشبهه دو ناحیه‌ای

بلوک دیگرام ریزشبهه دو ناحیه‌ای در شکل (۱) نشان داده شده است که از طریق خط ارتباطی به ریزشبهه ناحیه (۱) به ریزشبهه ناحیه (۲) متصل شده است. ریزشبهه ناحیه (۱) شامل توربین بادی^۸ (WTG)، دیزل ژنراتور^۹ (DEG₁)، و ذخیره‌ساز انرژی سوپر مغناطیس^{۱۰} (SMES) و ریزشبهه ناحیه (۲) شامل دیزل ژنراتور^{۱۱} (DEG₂)، سلول خورشیدی^{۱۲} (PV) و باتری^{۱۳} (BESS) است. سلول خورشیدی و توربین بادی منابع اصلی برای تامین بار هستند که در نقطه کار حداکثر توان بهره‌برداری می‌شوند؛ اما به علت متغیر بودن توان خروجی آنها، دیزل ژنراتور به عنوان منبع توان پشتیبان برای پاسخ‌گویی به تغییرات بار عمل می‌کند. منابع ذخیره‌ساز انرژی باتری (BESS) و ذخیره‌ساز انرژی سوپر مغناطیس (SMES) مازاد توان تولیدی/کمیود توان بار را در کوتاه مدت جبران می‌کنند [۳۴-۲۸]. در ادامه مدل دینامیکی هر یک از منابع ریزشبهه بررسی شده است.

۲-۲- توربین بادی (WTG)

توان گرفته شده از توربین بادی (P_{WT}) از رابطه (۱) محاسبه می‌شود. در این مقاله از پنج توربین بادی متصل به ظرفیت کلی ۴۲۵۰ kW در سرعت نامی در ریزشبهه ناحیه یک قرار داده شده است. تابع تبدیل عملکرد دینامیکی توربین بادی توسط رابطه (۲) نشان داده شده است [۳۶-۳۲].

$$P_{WT} = \frac{1}{2} C_p(\beta, \lambda) \cdot \rho A V_w^3 \quad (1)$$

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

در رابطه (۱)، ρ : چگالی هوا، A : سطح جاروب شده توسط پره روتور، V_w : سرعت باد و $C_p(\beta, \lambda)$: ضریب عملکرد توربین که

روش PID بهینه‌سازی شده با عنکبوت اجتماعی^۶ (SSO) ارائه شده است.

در تعدادی از روش‌های مطرح شده در این مقاله، منابع ذخیره انرژی به عنوان منابع غیر قابل کنترل در نظر گرفته شده‌اند. در تعدادی دیگر از روش‌های مطرح شده در این مقاله، از کنترل کننده‌های مجزایی برای کنترل منابع ذخیره انرژی مانند باتری، چرخ طیار و ذخیره ساز ابر رسانا استفاده شده است، که منجر به افزایش کنترل کننده‌های ریزشبهه و نیز پیچیدگی‌های بیشتر می‌شود. در تعدادی دیگر از روش‌های مطرح شده برای کنترل فرکانس-بار در ریزشبهه‌های چند ناحیه‌ای در این مقاله، عملکرد مناسبی در برابر اغتشاشات و عدم قطعیت پارامترهای سیستم ندارند. بنابراین نیاز به روش کنترلی مناسبی است که در برابر اغتشاش‌های وارد بر سیستم و در برابر عدم قطعیت وارد بر سیستم مقاوم باشد. یکی از کنترل کننده‌های که کاربرد وسیعی نیز در صنعت دارد، کنترل کننده پیش‌بین مدل است، این روش کنترلی در برابر اغتشاشات و عدم قطعیت پارامترهای سیستم مقاوم است. این نوع کنترل کننده توانایی پیش‌بینی رخداد‌های آینده را دارد. در [۳۷]، از روش (P&O) برای ردیابی بیشینه انرژی به وسیله کنترل کننده پیش‌بین مدل به منظور بهبود عملکرد دینامیکی یک سیستم استفاده شده است. در [۳۸]، از کنترل کننده پیش‌بین مدل برای بهبود عملکرد انتقال توان بی سیم استفاده شده است. در [۳۹]، به تجزیه و تحلیل مدل زمان واقعی کنترل کننده پیش‌بین مدل برای به کار بردن به عنوان کنترل کننده شارش توان در راه آهن پرداخته شده است. در [۴۰]، از کنترل کننده پیش‌بین مدل برای ردیابی یک سیگنال هدف استفاده شده است. در [۴۱]، از کنترل کننده پیش‌بین مدل برای بهبود پایداری و کاهش نوسانات ولتاژ DC در سیستم قدرت استفاده شده است. یکی از مهم‌ترین فاکتورهای کنترل کننده پیش‌بین مدل، پارامترهای وزن است که تنظیم بهینه آنها باعث می‌شود که کنترل کننده پیش‌بین مدل در برابر اغتشاشات ریزشبهه و همچنین عدم قطعیت پارامترهای ریزشبهه نقش موثری را ایفا کند.

نوآوری‌های این مقاله شامل دو بخش است: (۱) کاهش کنترل کننده‌های مورد استفاده برای سیستم‌های ذخیره انرژی مانند باتری، چرخ طیار و ذخیره سازی انرژی ابر رسانا (پیچیدگی کمتر) (۲) کنترل فرکانس-بار در ریزشبهه دو ناحیه ای مبتنی بر کنترل کننده پیش بین مدل که پارامترهای وزن آن پارامترهای وزن آن با استفاده از الگوریتم ترکیبی جدید ازدحام ذرات مبتنی بر دیوانگی-جستجوی الگو بهینه شده^۷ (HCRPSO-PS) است. هر ناحیه ریزشبهه مشتمل بر دیزل ژنراتور، توربین بادی، فتولتائیک (سلول خورشیدی) و انواع مختلف سیستم‌های ذخیره انرژی تشکیل شده است. تابع هدف به صورت انتگرال زمان در قدم مطلق خطای ناحیه یک و دو ریزشبهه انتخاب شده است. انحراف فرکانس ناحیه یک و دو و همچنین توان خط ارتباطی میرا می‌شود. برای اثبات کارایی روش پیشنهادی،

۲-۴- دیزل ژنراتور (DEG)

بلوک دیاگرام دیزل ژنراتور و گاورنر در شکل (۲) نشان داده شده است که شامل حلقه کنترلی دروپ R است. یک تاخیر مرتبه اول برای سیستم محرک شیر و موتور دیزل با ثابت زمانی T_V و T_E به ترتیب نشان داده شده است. Δu_{DEG} سیگنال کنترلی سیستم فرکانس- بار و ΔF انحراف فرکانس است و ΔX_g موقعیت شیر است. هر دیزل ژنراتور دارای محدوده ۵۰۰ KVA است [۲۰-۱۵].

۲-۵- ذخیره‌ساز انرژی سوپر مغناطیسی (SMES)

سیم‌پیچ، انرژی الکتریکی در میدان مغناطیسی را ذخیره می‌کند و به وسیله رابطه (۶) نشان داده شده است. توان ذخیره ساز انرژی سوپر مغناطیسی توسط رابطه (۷) نشان داده شده است. مدل ذخیره ساز به صورت تاخیر مرتبه اول به وسیله رابطه (۸) نشان داده شده است [۲۰-۱۵].

$$E = \frac{1}{2}LI^2 \quad (6)$$

$$P = \frac{\partial E}{\partial t} = LI \frac{\partial I}{\partial t} = VI \quad (7)$$

$$G_{SMES} = \frac{k_L}{T_L S + 1} \quad (8)$$

به شرایط محیطی و نحوه ساخت توربین بستگی دارد. در رابطه (۲)، T_{WT} , k_{WT} به ترتیب بهره وثابت زمانی توربین بادی است.

۲-۳- سلول خورشیدی (PV)

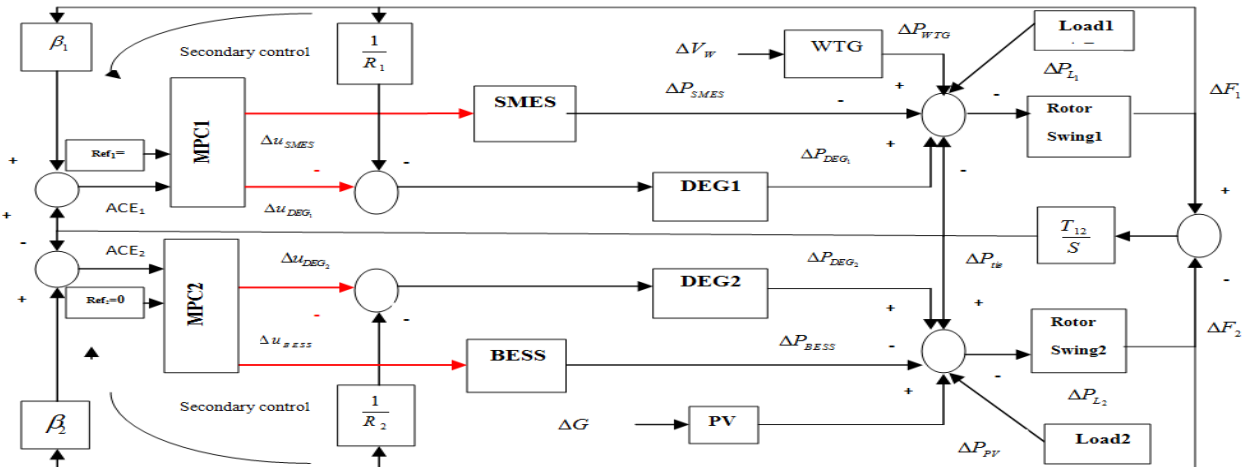
توان سلول خورشیدی وابسته به سطح تابش خورشید و دما است. اگر دمای محیط در ۲۵ درجه ثابت باشد P_{solar} با G (تابش) خطی تغییر می‌کند. ماکزیمم نقطه توان (MPPT)¹⁴ ماکزیمم توان خروجی می‌دهد. توان سلول خورشیدی به وسیله رابطه (۳) محاسبه می‌شود و توان سلول خورشیدی ناشی از تغییر تابش خورشید و دما در رابطه (۴) محاسبه می‌شود. در این مقاله ماکزیمم توان ۰/۹۸ درصد فرض شده است. هر سلول خورشیدی در دارای توان ۲۰۰ KW است. پنج سلول خورشیدی در ریزش شبکه ناحیه (۲) به هم متصل شده‌اند و توان KW ۱۰۰۰ را تحویل می‌دهند. تابع تبدیل عملکرد دینامیکی سلول خورشیدی توسط رابطه (۵) نشان داده شده است [۳۶-۳۲].

$$P_{solar} = P_{PV} \times \frac{G}{G_{STC}} (1 + k_t (T_a + 0.0256 \times G - T_{STC})) \times \eta_{MPPT} \quad (3)$$

$$\Delta P_{solar} = \frac{P_{PV}}{G_{STC}} (\Delta G + k_t (\Delta G \times T_a + G \times \Delta T_a + 0.0512 \times G \times \Delta G - T_{STC} \times \Delta G)) \times \eta_{MPPT} \quad (4)$$

$$G_{PV} = \frac{k_{PV}}{T_{PV} S + 1} \quad (5)$$

در روابط (۳) و (۴)، P_{solar} : توان سلول خورشیدی (فتوولتائیک)، P_{PV} : توان سلول خورشیدی در شرایط تست (STC)، G : تابش خورشید، G_{STC} : تابش خورشید در شرایط تست (STC)، k_t : ثابت دمایی، T_a : دمای محیط، T_{STC} : دمای محیط در شرایط تست (STC)، η_{MPPT} : بازده سلول خورشیدی است. T_{PV} , k_{PV} به ترتیب بهره و ثابت زمانی سلول خورشیدی هستند.



شکل (۱): بلوک دیاگرام ریزش شبکه دو ناحیه‌ای [۲۸-۳۴]

بر اساس شکل (۱) ابتدا معادلات ریزشبه ناحیه یک مطابق رابطه (۱۱) تا (۱۵) بدست آورده شده است. با توجه به اینکه اجزای ریزشبه در هر منطقه با هم متفاوت است، بنابراین برای هر کنترل کننده پیش بین در هر منطقه معادلات حالت متفاوتی دارد.

$$\dot{\Delta P}_{SMES} = \frac{k_L}{T_L} \times \Delta u_{SMES} - \frac{\Delta P_{SMES}}{T_L} \quad (11)$$

$$\dot{\Delta X}_{g1} = \frac{-\Delta u_{DEG1}}{T_{V1}} - \frac{\Delta F_1}{R_1 T_{V1}} - \frac{\Delta X_{g1}}{T_{V1}} \quad (12)$$

$$\dot{\Delta P}_{DEG1} = \frac{k_{E1}}{T_{E1}} \times \Delta X_{g1} - \frac{\Delta P_{DEG1}}{T_{E1}} \quad (13)$$

$$\dot{\Delta P}_{he} = (\Delta F_1 - \Delta F_2) \times T_{12} \quad (14)$$

$$\dot{\Delta F_1} = \frac{k_{P1}}{T_{P1}} (\Delta P_{WTG} - \Delta P_{L1} - \Delta P_{SMES} + \Delta P_{deg1} - \Delta P_{he}) - \frac{\Delta F_1}{T_{P1}} \quad (15)$$

بنابراین معادلات حالت ریزشبه ناحیه اول مطابق رابطه (۱۶) است.

$$\begin{bmatrix} \dot{\Delta F_1} \\ \dot{\Delta P}_{DEG1} \\ \dot{\Delta X}_{g1} \\ \dot{\Delta P}_{SMES} \\ \dot{\Delta P}_{he} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_{P1}} & \frac{k_{P1}}{T_{P1}} & 0 & -\frac{k_{P1}}{T_{P1}} & -\frac{k_{P1}}{T_{P1}} \\ 0 & -\frac{1}{T_{E1}} & \frac{k_{E1}}{T_{E1}} & 0 & 0 \\ -\frac{1}{R_1 T_{V1}} & 0 & -\frac{1}{T_{V1}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_L} & 0 \\ T_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta F_1 \\ \Delta P_{DEG1} \\ \Delta X_{g1} \\ \Delta P_{SMES} \\ \Delta P_{he} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_{P1}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_{DEG1} \\ \Delta u_{SMES} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{k_{P1}}{T_{P1}} & \frac{k_{P1}}{T_{P1}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -T_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{L1} \\ \Delta P_{WTG} \\ \Delta F_2 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$y = ACE_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta F_1 \\ \Delta P_{deg1} \\ \Delta X_{g1} \\ \Delta P_{SMES} \\ \Delta P_{he} \end{bmatrix}$$

۲-۳- معادلات حالت ریزشبه ناحیه دوم:

بر اساس شکل (۱) معادلات ریزشبه ناحیه دوم مطابق رابطه (۱۷) تا (۲۲) بدست آورده شده است.

$$\dot{\Delta P}_{BESS} = \frac{k_B}{T_B} \times \Delta u_{BESS} - \frac{\Delta P_{BESS}}{T_B} \quad (17)$$

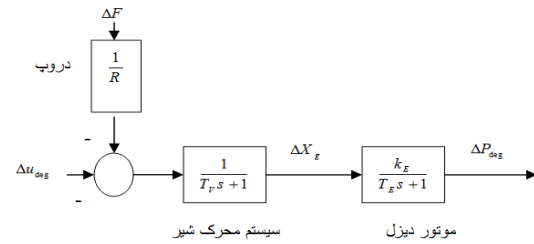
$$\dot{\Delta X}_{g2} = \frac{-\Delta u_{DEG2}}{T_{V2}} - \frac{\Delta F_2}{R_2 T_{V2}} - \frac{\Delta X_{g2}}{T_{V2}} \quad (18)$$

$$\dot{\Delta P}_{DEG2} = \frac{k_{E2}}{T_{E2}} \times \Delta X_{g2} - \frac{\Delta P_{DEG2}}{T_{E2}} \quad (19)$$

$$\dot{\Delta P}_{he} = (\Delta F_1 - \Delta F_2) \times T_{12} \quad (20)$$

$$\dot{\Delta F_2} = \frac{k_{P2}}{T_{P2}} (\Delta P_{PV} - \Delta P_{L2} - \Delta P_{BESS} + \Delta P_{DEG2} + \Delta P_{he}) - \frac{\Delta F_2}{T_{P2}} \quad (21)$$

بنابراین معادلات حالت ریزشبه ناحیه دوم مطابق رابطه (۲۲) است.



شکل (۲): بلوک دیاگرام دیزل ژنراتور [۳۲-۳۴]

در روابط (۶)-(۸)، E: انرژی ذخیره شده در سیم پیچ، L: اندوکتانس سیم پیچ، I: جریان DC سیم پیچ، V: ولتاژ سیم پیچ، P: توان ذخیره‌ساز، k_L: بهره ذخیره ساز و T_L: ثابت زمانی ذخیره ساز است.

۲-۶- باتری (BESS)

باتری، انرژی الکتریکی در قالب واکنش شیمیایی و در فرم DC ذخیره می‌کند و نیازمند شارژ و اینورتر برای مبادله انرژی به شکل AC می‌باشد. در این مقاله باتری نوع اکسیداسیونی به علت ویژگی‌های 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 به صورت یک تاخیر مرتبه اول در رابطه (۹) نشان داده شده است [۳۲-۳۴]. در رابطه (۹)، k_B، T_B به ترتیب بهره و ثابت زمانی باتری هستند.

$$G_{BESS} = \frac{k_B}{T_B s + 1} \quad (9)$$

۲-۷- انحراف فرکانس و توان

برای نگه داشتن ریزشبه در یک کارکرد مانا توازن فرکانس-توان باید حفظ شود، که به وسیله کنترل اجزای مختلف ریزشبه می‌توان به آن دست پیدا کرد. در ریزشبه اگر توان تغییر کند انحراف فرکانس به وجود می‌آید. رابطه نوسانات فرکانس با توان را به صورت تاخیر مرتبه اول توسط رابطه (۱۰) نشان داده می‌شود [۱۷-۱۴].

k_p و T_p به ترتیب بهره و ثابت زمانی سیستم جرم چرخان در نظر گرفته شده‌اند.

$$\frac{k_p}{T_p s + 1} \quad (10)$$

۳- معادلات حالت ریزشبه ناحیه اول و دوم:

۳-۱- معادلات حالت ریزشبه ناحیه یک:

لحظه $k+j$ ؛ $r(k+j)$: خروجی مرجع در افق کنترل در لحظه $k+j$ ؛
 $u(k-1)$: سیگنال کنترلی محاسبه شده برای زمان $k-1$ ؛
 W_u, W_y به ترتیب ماتریس وزن ورودی و خروجی است.

۴-۲- طراحی کنترل کننده برای ریزشبهه اول و

دوم:

تغییر در توان تولیدی منابع و بار در هر ریز شبکه، سبب تغییر در فرکانس و توان خط ارتباطی بین دو ریزشبهه می‌شود. معادلات حالت برای هر دو کنترل کننده پیش بین مدل مطابق رابطه (۲۵) نشان داده می‌شود.

$$\begin{aligned} \dot{X}_i &= A_i X_i + B_i U_i + D_i W_i \quad i=1,2 \\ Y_i &= C_i X_i \end{aligned} \quad (25)$$

در رابطه (۲۵)، $X_{i=1,2}$: بردار متغیرهای حالت برای کنترل کننده پیش‌بین مدل اول و دوم؛ $A_{i=1,2}$: ماتریس فضای حالت کنترل کننده پیش‌بین مدل اول و دوم؛ $U_{i=1,2}$: بردار خروجی کنترلی کنترل کننده پیش‌بین مدل اول و دوم؛ $B_{i=1,2}$: ماتریس ضرائب کنترل کننده پیش‌بین مدل اول و دوم؛ $W_{i=1,2}$: بردار اغتشاش (ورودی غیر قابل کنترل) کنترل کننده پیش‌بین مدل اول و دوم؛ و D : ماتریس ضرائب اغتشاش کنترل کننده پیش‌بین مدل اول و دوم می‌باشد. رابطه (۲۶) و رابطه (۲۷) به ترتیب خطای کنترلی تکمیلی ریزشبهه ناحیه یک و ناحیه دوم را نشان می‌دهد. توسط رابطه (۱۶) و (۲۲) به ترتیب معادلات حالت برای کنترل کننده پیش بین مدل ریزشبهه ناحیه اول و دوم نوشته شده است.

$$ACE_1 = \beta_1 \Delta F_1 + \Delta P_{tie} \quad (26)$$

$$ACE_2 = \beta_2 \Delta F_2 - \Delta P_{tie} \quad (27)$$

در روابط (۲۶) و (۲۷)، ACE_1 : خطای کنترلی تکمیلی ناحیه اول، ACE_2 : خطای کنترلی تکمیلی ناحیه دوم، β_2, β_1 : فرکانس بایاس ناحیه اول و دوم و ΔP_{tie} : تغییرات توان خط ارتباطی است.

۴-۳- تنظیم پارامترهای وزن MPC با استفاده از

الگوریتم ترکیبی جدید ازدحام ذرات مبتنی بر

دیوانگی-جستجوی الگو (HCRPSO-PS)

۴-۳-۱- توابع هدف و قیود مسئله

پارامترهای وزنی موثرترین پارامتر قابل تنظیم در کنترل کننده MPC است و تاثیر بسیار زیادی در پاسخ سیستم دارد. بنابراین در این مقاله پارامترهای وزن MPC به وسیله الگوریتم ترکیبی جدید

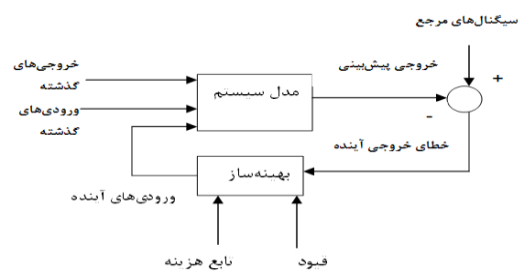
$$\begin{bmatrix} \dot{\Delta F}_1 \\ \dot{\Delta P_{DEG2}} \\ \dot{\Delta X_{f2}} \\ \dot{\Delta P_{BESS}} \\ \dot{\Delta P_{tie}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1/T_{p2} & k_{f2}/T_{p2} & 0 & -k_{f2}/T_{p2} & k_{f2}/T_{p2} \\ 0 & -1/T_{e2} & k_{e2}/T_{e2} & 0 & 0 \\ -1/R_2 T_{v2} & 0 & -1/T_{v2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1/T_b & 0 \\ -T_{l2} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta F_1 \\ \Delta P_{DEG2} \\ \Delta X_{f2} \\ \Delta P_{BESS} \\ \Delta P_{tie} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1/T_{v2} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta M_{DEG2} \\ \Delta M_{BESS} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{f2}/T_{p2} & k_{f2}/T_{p2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -T_{l2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{l2} \\ \Delta P_{pv} \\ \Delta F_1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$y = [B_1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad -1] \begin{bmatrix} \Delta F_1 \\ \Delta P_{DEG2} \\ \Delta X_{f2} \\ \Delta P_{BESS} \\ \Delta P_{tie} \end{bmatrix}$$

۴- طراحی کنترل کننده پیش بین مدل برای ریزشبهه دو ناحیه‌ای:

۴-۱- کنترل کننده پیش بین مدل 15 (MPC):

ساختار کلی کنترل کننده پیش‌بین در شکل (۳) نشان داده شده است. همانطور که در شکل (۳) ملاحظه می‌شود، در کنترل کننده مذکور، با استفاده از مدلی از سیستم، رفتار آینده آن پیش‌بینی و کنترل می‌شود. در این کنترل کننده، با حداقل کردن یک تابع هزینه، سیگنال کنترلی بدست می‌آید. مقادیر سیگنال کنترلی در افق کنترل طوری تعیین می‌شوند 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 سیگنال‌های کنترلی در نظر گرفته می‌شود، حداقل شود. رابطه (۲۳) تابع هزینه و رابطه (۲۴) قیودی اعمالی روی سیگنال‌های کنترلی و خروجی را نشان می‌دهد [۴۲-۴۵].



شکل (۳): ساختار کلی کنترل کننده پیش‌بین [۴۲-۴۵].

$$J(N_1, N_2, N_u) = \min_{\sum_{j=N_1}^{N_2} [y(k+j) - r(k+j)]^T} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} & W_y [y(k+j) - r(k+j)] + \sum_{k=0}^{N_u} [u(k) - u(k-1)]^T \\ & W_u [u(k) - u(k-1)] \\ & u_{\min} \leq u(k) \leq u_{\max} \\ & y_{\min} \leq y(k) \leq y_{\max} \end{aligned} \quad (24)$$

در روابط (۲۳) و (۲۴)، $J(N_1, N_2, N_u)$: تابع هزینه‌ای است که باید حداقل شود؛ N_1 : افق پایین پیش‌بینی؛ N_2 : افق بالای پیش‌بینی؛ N_u : افق کنترل؛ $y(k+j)$: مقدار سیگنال خروجی در

۱۲-۱- انجام مراحل ۱-۸ الی ۱-۱۰ تا رسیدن تعداد تکرارها به مقدرا
ماکزیمم.

۱۳-۱- تعیین پاسخ بهینه

۵- شبیه سازی

۵-۱- پارامترهای ریزش شبکه

در جدول (۱) پارامترهای ریزش شبکه دو ناحیه‌ای نشان داده شده
است. جدول (۲) نیز پارامترهای کنترل کننده‌های MPC نشان داده
شده است.

۵-۲- بهینه‌سازی مسئله

بهینه‌سازی پارامترهای وزن کنترل کننده‌های MPC با استفاده
الگوریتم ترکیبی (HCRPSO-PS) انجام شده است. ابتدا تغییری در
بار ریزش شبکه ناحیه (۱) مطابق داده‌های جدول (۱) و جدول (۲) به
اندازه $\Delta P_L(pu) = 0/03pu$ در $t=0$ اتفاق می‌افتد. فرآیند بهینه‌سازی
در ۵۰ تکرار برای الگوریتم CRPSO و الگوریتم PS انجام شده است.
همگرایی برای الگوریتم CRPSO و الگوریتم PS مطابق شکل (۴) در
۳۰ تا ۳۲ تکرار انجام شده است. بنابراین ما بیشترین مقدار تکرار را
برای الگوریتم ترکیبی (HCRPSO-PS) را ۵۰ قرار می‌دهیم. از
الگوریتم CRPSO برای ۳۰ تکرار و از الگوریتم PS برای
جستجوی محلی استفاده شده است. پارامترهای کنترل کننده‌های
MPC (پارامترهای وزن) از همگرایی الگوریتم ترکیبی (HCRPSO-
PS) دارای مقادیر $W_{y1}=0.6104, W_{y2}=0.0567$ و $W_{u1}=0.4532, W_{u2}=0.0814$ است.

۵-۳- سناریوهای مختلف

شبیه‌سازی در چهار سناریو انجام شده است. در سناریو اول تنها
تغییرات بار در ریزش شبکه ناحیه اول در نظر گرفته شده است، در سناریو
دوم تغییر در توان منابع تولید پراکنده (توربین بادی) ریزش شبکه ناحیه
اول اتفاق افتاده است. در سناریو سوم به بررسی تغییرات بار در
ریزش شبکه اول و تغییرات توان در منابع تولید پراکنده ریزش شبکه ناحیه
دوم به طور همزمان اتفاق افتاده است. در سناریو چهارم به بررسی
تغییرات توان در منابع تولید پراکنده و ریزش شبکه ناحیه اول و دوم و
تغییر در بار به طور همزمان با استفاده از داده‌های واقعی پرداخته شده
است.

جدول (۱): مقادیر ریزش شبکه دو ناحیه‌ای [۲۹-۳۶]

مقدار	تابع تبدیل	اجزای ریزش شبکه
$k_{WTG}=1$ $T_{WTG}=1.5$	$\frac{k_{WTG}}{T_{WTG}s+1}$	توربین بادی
$k_{PV}=1$ $T_{PV}=0.03$	$\frac{k_{PV}}{T_{PV}s+1}$	سلول خورشیدی
$k_L=0.98$ $T_L=0.03$	$\frac{k_L}{T_Ls+1}$	ذخیره ساز انرژی مغناطیسی

HCRPSO-PS بهینه می‌شود از الگوریتم CRPSO به دلیل عملکرد
موثر و کارآمد این الگوریتم در بهینه سازی موثر و سرعت آن استفاده
شده است [۴۶]. همچنین از الگوریتم جستجوی الگو (PS) به دلیل
عملکرد مناسب در جستجوی محلی استفاده شده است [۴۷]. تابع
هدف به وسیله رابطه (۲۸) و قیود آن توسط رابطه (۲۹) نشان داده
شده است. از الگوریتم ازدحام ذرات مبتنی بر دیوانگی (CRPSO) برای
جستجوی کلی و از الگوریتم جستجوی الگو (PS) برای جستجوی
محلی استفاده می‌شود. بهینه سازی به منظور کاهش زمان نشست،
کاهش نوسان و کاهش فراجش صورت گرفته است.

$$\min ITAE_{MPC} = \int_0^T t(|ACE_1| dt + \int_0^T |ACE_2| dt \quad (28)$$

$$W_{yi, \min} \leq W_{yi} \leq W_{yi, \max} \quad (29)$$

$$W_{ui, \min} \leq W_{ui} \leq W_{ui, \max}$$

به ترتیب بیشینه و کمینه پارامتر وزن
ورودی کنترل کننده MPC هستند، $W_{ui, \min}, W_{ui, \max}$ به ترتیب
بیشترین و کمترین پارامتر وزن خروجی هستند. که مقدار $i=1,2$ برای
ریزش شبکه ناحیه اول و دوم است.

۴-۳-۲- مراحل اجرای الگوریتم برای تعیین پارامترهای

وزن کنترل کننده‌های پیش‌بین مدل MPC

اجرای الگوریتم CRPSO:

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

تعداد تکرار (۳۰)، $c_1=1/95$ ، $c_2=2/05$ ، $P_r=0/3$.

۲-۱- تولید جمعیت اولیه ذرات به صورت تصادفی با توجه به
 $\{W_{ui}, W_{yi}\} \in [0, 1]$ هر ذره شامل چهار

متغیر $\{W_{u1}, W_{y1}, W_{u2}, W_{y2}\}$ است.

۳-۱- ارزیابی تابع هدف برای هر ذره، محاسبه $(P^{best}(nc))$ برای هر
ذره و $(g^{best}(nc))$ برای گروه ذرات.

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

۵-۱- انجام مراحل ۱-۳ و ۱-۴ تا اینکه تعداد تکرارها به مقدرا
ماکزیمم برسد

۶-۱- تعیین ذره بهینه

اجرای الگوریتم PS

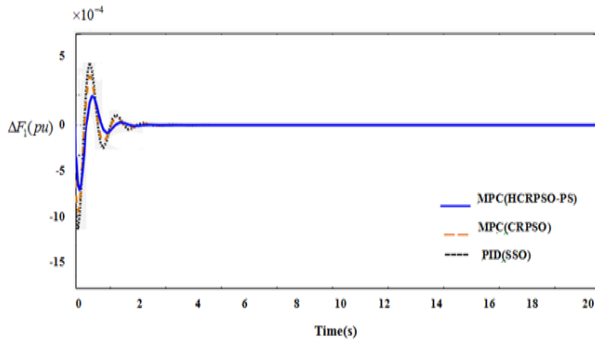
۷-۱- شروع الگوریتم با ذره تعیین شده در مرحله ۶-۱.

۸-۱- مقدار دهی اولیه: ماکزیمم تعداد تکرار (۲۰)، $\theta_1=2$ ، $\theta_2=0.5$.

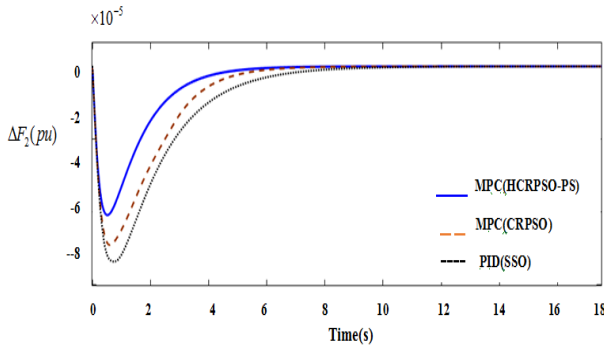
۹-۱- ایجاد نقاط مش

۱۰-۱- ارزیابی تابع هدف در نقاط مش تولید شده در مرحله

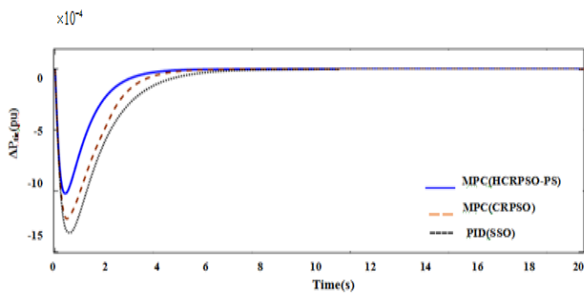
۱۱-۱- جایگزینی نقطه موجود با یکی از نقاط مش و یا عدم تغییر
نقطه موجود با توجه به مراحل (۸-۱) و (۹-۱) و تعیین اندازه مش.



شکل (۵): تغییرات فرکانس ریزشبه ناحیه (۱) سناریو ۱



شکل (۶): تغییرات فرکانس ریزشبه ناحیه (۲) سناریو ۱



شکل (۷): تغییرات توان ارتباطی بین دو ریزشبه سناریو ۱

۵-۳-۲- سناریو ۲

در این سناریو تغییرات در توربین بادی و بار در ریزشبه ناحیه اول اتفاق افتاده است. در $t=0s$ تغییرات بار $\Delta P_{L1}(pu) = 0/05pu$ و در $t=10s$ تغییر در سرعت توربین بادی به میزان $\Delta V_{wi} = 2(\frac{m}{s})$ و $t=15s$ تغییر در سرعت توربین بادی $\Delta V_{wi} = -2(\frac{m}{s})$ اتفاق افتاده است [۳۶]. شکل‌های (۸)، (۹) و (۱۰) به ترتیب تغییرات فرکانس ریزشبه اول، تغییرات فرکانس ریزشبه دوم و تغییرات توان ارتباطی (پاسخ سیستم به تغییرات بار) بر اساس کنترل کننده‌های مختلف نشان داده شده است.

باتری	$\frac{k_B}{T_B s + 1}$	$k_B = 1.8$ $T_B = 1$
سیستم محرک شیر	$\frac{1}{T_V s + 1}$	$T_V = 0.05$
موتور دیزل	$\frac{k_E}{T_E s + 1}$	$k_E = 1, T_E = 0.5$
فرکانس بایاس	β_1, β_2	$\beta_1 = \beta_2 = 21$
دروپ	R_1, R_2	$R_1, R_2 = 0.05$
سنکرونیزم	$\frac{T_{12}}{S}$	$T_{12} = 1.4\pi$
جرم چرخان	$\frac{k_{p1}}{T_{p1} s + 1}$	$k_{p1} = k_{p2} = 1$ $T_{p1} = T_{p2} = 3$

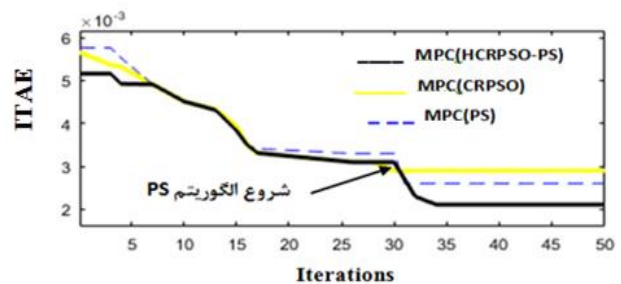
جدول (۲): پارامترهای الگوریتم ترکیبی و کنترل کننده‌های

پیش‌بین مدل

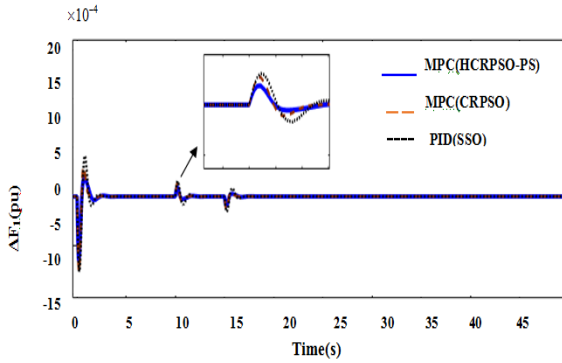
پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
$N_2(mpc_1)$	۵	فاکتور انبساط (PS)	۲
$N_u(mpc_{1,2})$	۳	فاکتور انبساط (PS)	۰/۵
$T(mpc_{1,2})$	۰/۱	ماکزیمم تعداد تخمین معادلات (PS)	۲۰
$N_2(mpc_2)$	۵	ماکزیمم تعداد تکرار (PS)	۲۰

۵-۳-۱- سناریو ۱

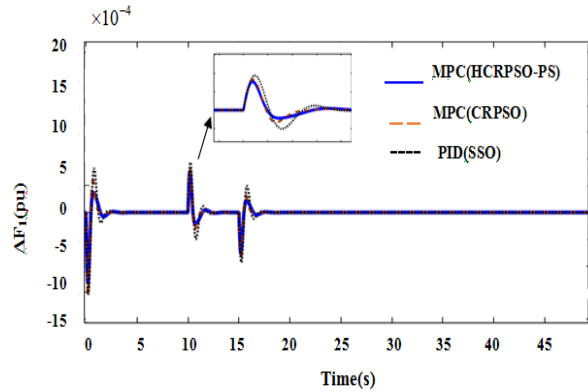
در این سناریو تغییرات منابع تولید توان در هر دو ریزشبه در نظر گرفته نشده و فقط تغییرات بار در ریزشبه اول در نظر گرفته شده است. بر اساس شکل (۱) و داده‌های جدول (۱) و جدول (۲) شبیه‌سازی انجام شده است. تغییرات در بار ریزشبه اول $\Delta P_{L1}(pu) = 0/05pu$ در لحظه $t=0$ اتفاق افتاده است. شکل‌های (۵)، (۶) و (۷) به ترتیب تغییرات فرکانس ریزشبه اول، تغییرات فرکانس ریزشبه دوم و تغییرات توان خط ارتباطی بر اساس کنترل کننده‌های مختلف نشان داده شده است.



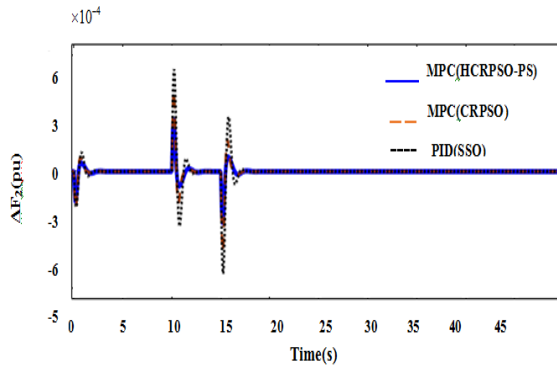
شکل (۴): همگرایی الگوریتم‌های مختلف برای حل مسئله



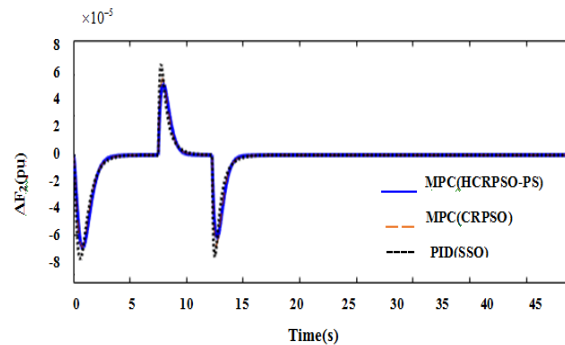
شکل (۱۱): تغییرات فرکانس ریزشبه ناحیه (۱) سناریو ۳



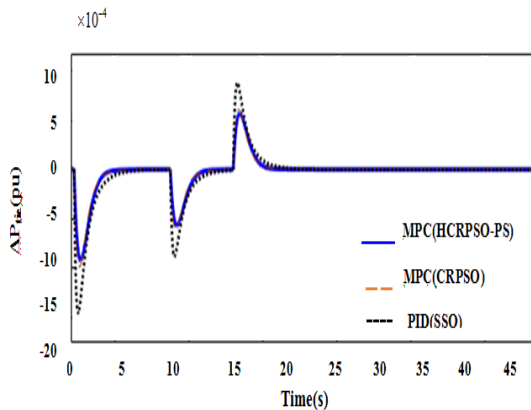
شکل (۸): تغییرات فرکانس ریزشبه ناحیه (۱) سناریو ۲



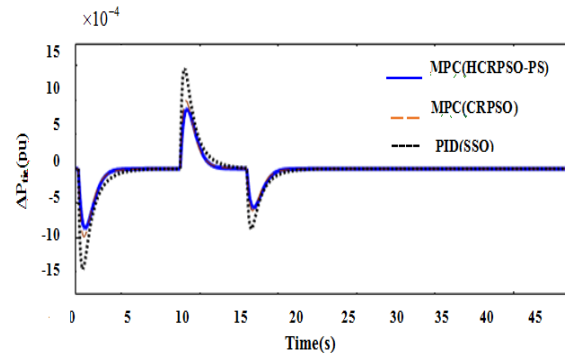
شکل (۱۲): تغییرات فرکانس ریزشبه ناحیه (۲)، سناریو ۳



شکل (۹): تغییرات فرکانس ریزشبه ناحیه (۲) سناریو ۲



شکل (۱۳): تغییرات توان ارتباطی بین دو ریزشبه، سناریو ۳



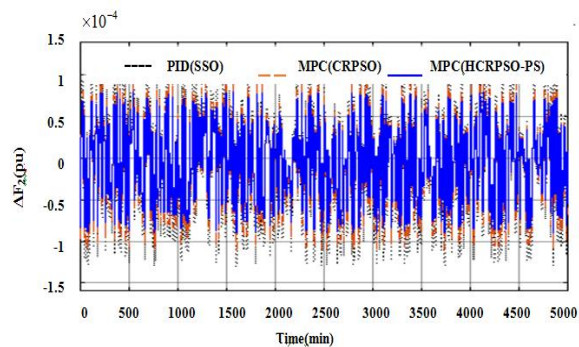
شکل (۱۰): تغییرات توان ارتباطی بین دو ریزشبه سناریو ۲

۴-۳-۵- سناریو ۴

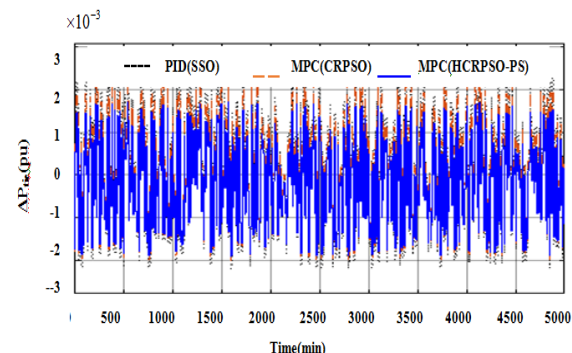
برای تجزیه و تحلیل روی سیستم واقعی، شکل‌های (۱۴)، (۱۵) و (۱۶) به ترتیب سرعت باد، تابش خورشید و تغییرات دما در چهار روز از ۱۱ تا ۱۴ مارس ۲۰۱۵ در سایت واقعی اندازه‌گیری شده است [۳۶]. باری مطابق شکل (۱۷) به میزان $\pm 0.05 pu$ به صورت رندوم در مدت ۵۰۰۰ دقیقه به ریزشبه منطقه (۱) اعمال می‌شود. شکل‌های (۱۸)، (۱۹) و (۲۰) به ترتیب تغییرات فرکانس ریزشبه ناحیه اول و دوم و تغییرات توان خط ارتباطی با استفاده کنترل‌کننده‌های مختلف مختلف نشان داده شده است. نتایج سناریو (۱) تا (۴) در جدول (۳) و (۴) نشان داده شده است.

۵-۳-۳- سناریو ۳

در این سناریو تغییرات در توان سلول خورشیدی (ناحیه دوم) و تغییرات بار در ریزشبه ناحیه اول اتفاق افتاده است. در $t=0s$ تغییرات بار $\Delta P_L (pu) = 0/05 pu$ و در $t=10s$ تغییر در تابش مربوط به سلول خورشیدی به میزان $\Delta G_2 = 400(\frac{W}{m^2})$ و $t=15s$ ، تغییر در تابش مربوط به سلول خورشیدی $\Delta G_2 = -400(\frac{W}{m^2})$ اتفاق افتاده است. شکل‌های (۱۱)، (۱۲) و (۱۳) به ترتیب تغییرات فرکانس ریزشبه اول، تغییرات فرکانس ریزشبه دوم و تغییرات توان خط ارتباطی (پاسخ سیستم به تغییرات بار) نشان داده شده است.



شکل (۱۹): تغییرات فرکانس ناحیه (۲)، سناریو (۴)



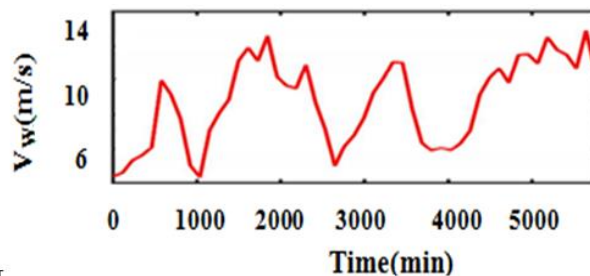
شکل (۲۰): تغییرات توان خط ارتباطی، سناریو (۴)

۴-۵- بحث:

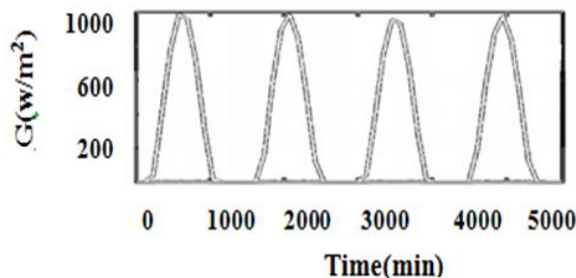
بر اساس سناریو (۱) تا (۴) و جدول (۳) و (۴)، کنترل کننده پیشنهادی (MPC(HCRPSO-PS)) نسبت کنترل کننده (MPC(CRPSO)) (برای مقایسه با کارایی الگوریتم ترکیبی پیشنهادی) و همچنین نتایج [۳۶] (PID-SSO) دارای عملکرد مطلوبی از نظر سرعت پاسخ، کاهش فراجش و فروجهش و پیچیدگی کمتر (کنترل کننده کمتر) می‌باشد.

۶- نتیجه‌گیری

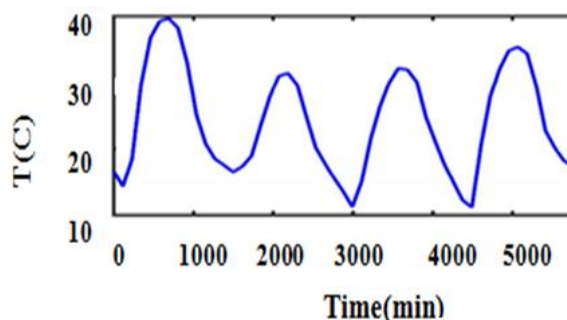
در این مقاله از کنترل پیش‌بین مدل (MPC) که پارامترهای وزن آن با استفاده از الگوریتم ترکیبی جدید ازدحام ذرات مبتنی بر دیوانگی-جستجوی الگو بهینه شده (HCRPSO-PS)، برای کنترل فرکانس-بار در ریزش شبکه دو ناحیه‌ای استفاده شد و همچنین تعداد کنترل کننده‌ها مورد استفاده برای منابع ذخیره انرژی در ریزش شبکه با استفاده از روش کنترل کننده پیشنهادی کاهش پیدا کرده است (پیچیدگی کمتر). بر طبق نتایج کنترل کننده پیشنهادی و مقایسه آن با کنترل کننده‌های مختلف، موثر بودن روش پیشنهادی کنترل کننده کمتر (پیچیدگی کمتر) و عملکرد از لحاظ سرعت پاسخ و کاهش فراجش و فروجهش نشان داده شد.



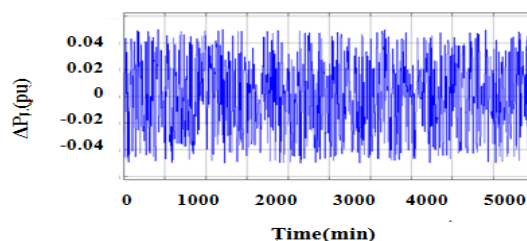
شکل (۱۴): تغییرات سرعت باد [۳۶]



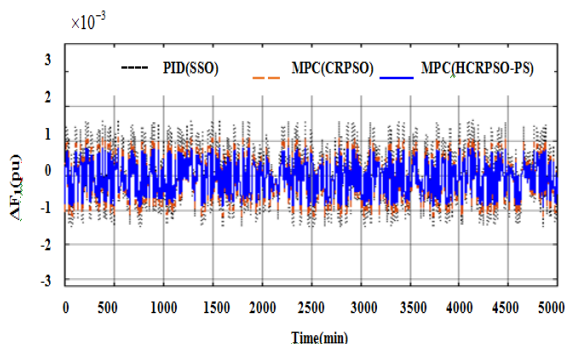
شکل (۱۵): تابش خورشید [۳۶]



شکل (۱۶): دما اندازه گیری شده [۳۶]



شکل (۱۷): منحنی تغییرات بار [۳۶]



شکل (۱۸): تغییرات فرکانس ناحیه (۱)، سناریو (۴)

جدول (۳): بیشینه فرجهش، بیشینه فروجهش و زمان نشست انحرافات فرکانس در سناریو (۱) و سناریو (۲) با استفاده از کنترل کننده‌های مختلف

متغیر		سناریو (۱)			سناریو (۲)		
		Δf_1 (pu)	Δf_2 (pu)	ΔP_{tie} (pu)	Δf_1 (pu)	Δf_2 (pu)	ΔP_{tie} (pu)
SSO based PID [36]	بیشینه فرجهش	4.8399×10^{-4}	1.0052×10^{-6}	1.224×10^{-6}	5.9823×10^{-4}	6.9265×10^{-6}	1.4705×10^{-3}
	بیشینه فروجهش	1.4029×10^{-3}	8.1718×10^{-5}	1.4864×10^{-3}	1.4024×10^{-3}	8.1718×10^{-5}	1.4864×10^{-3}
	زمان نشست (ثانیه)	1.837	8.0874	8.3622	7.5054	8.7993	7.9533
CRPSO based MPC	بیشینه فرجهش	4.232×10^{-4}	0.5322×10^{-6}	0.7311×10^{-6}	5.1240×10^{-4}	4.8332×10^{-5}	0.8644×10^{-6}
	بیشینه فروجهش	1.4201×10^{-3}	7.8213×10^{-5}	1.4138×10^{-3}	1.2835×10^{-3}	7.2366×10^{-5}	1.2665×10^{-3}
	زمان نشست (ثانیه)	1.799	6.9325	6.8135	5.9823	6.6516	6.0021
HGWO-PS- based MPC	بیشینه فرجهش	3.6268×10^{-4}	0.4688×10^{-6}	0.6981×10^{-6}	4.3242×10^{-4}	3.9201×10^{-5}	1.0205×10^{-3}
	بیشینه فروجهش	0.7838×10^{-3}	6.2138×10^{-5}	1.1183×10^{-3}	0.7225×10^{-3}	6.0130×10^{-5}	1.1276×10^{-3}
	زمان نشست (ثانیه)	1.7321	5.6819	5.2177	3.9455	5.3664	4.5916

جدول (۴): بیشینه فرجهش، بیشینه فروجهش و زمان نشست انحرافات فرکانس در سناریو (۳) و سناریو (۴) با استفاده از کنترل کننده‌های مختلف

متغیر		سناریو (۳)			سناریو (۴)		
		Δf_1 (pu)	Δf_2 (pu)	ΔP_{tie} (pu)	Δf_1 (pu)	Δf_2 (pu)	ΔP_{tie} (pu)
SSO based PID [36]	بیشینه فرجهش	4.8399×10^{-4}	6.4411×10^{-4}	8.7243×10^{-4}	1.6249×10^{-3}	1.0362×10^{-4}	2.0672×10^{-3}
	بیشینه فروجهش	1.4024×10^{-3}	6.5908×10^{-4}	1.4864×10^{-3}	1.5899×10^{-3}	1.2689×10^{-4}	2.5613×10^{-3}
	زمان نشست (ثانیه)	5.5888	9.5850	15.4379	-	-	-
CRPSO based MPC	بیشینه فرجهش	3.8817×10^{-4}	5.8777×10^{-4}	7.7613×10^{-4}	0.9984×10^{-3}	0.75213×10^{-4}	1.3889×10^{-3}
	بیشینه فروجهش	1.3218×10^{-3}	5.5998×10^{-4}	1.2887×10^{-3}	0.7399×10^{-3}	0.4938×10^{-4}	1.1165×10^{-3}
	زمان نشست (ثانیه)	3.9712	5.6367	9.0028	-	-	-
HCRPSO-PS- based MPC	بیشینه فرجهش	3.2633×10^{-4}	3.0955×10^{-4}	6.6333×10^{-4}	1.6149×10^{-3}	1.0354×10^{-4}	2.0599×10^{-3}
	بیشینه فروجهش	0.6776×10^{-3}	3.0546×10^{-4}	1.0866×10^{-3}	1.4999×10^{-3}	1.2433×10^{-4}	2.4877×10^{-3}
	زمان نشست (ثانیه)	4.7666×10^{-4}	6.2911×10^{-4}	8.5443×10^{-4}	-	-	-

[2] Fazli, M., & Hejazi, M. A., "Novel Hierarchical Control of VSI-based Microgrids Against Large-Signal Disturbances", Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, Vol. 15, No. 4, pp. 103-113, 2019.

[3] Amiri, F., & Hatami, A., "Nonlinear Load frequency control of isolated microgrid using fractional order PID based on hybrid craziness-based particle swarm

مراجعه

[1] Batmani, Y., & Najafi, S., "Integrated Primary Controller Design in AC Microgrids Using Optimal Tracking Control Technique", Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, Vol. 16, No. 1, pp. 65-76, 2019.

- control for micro-grids", *ISA transactions*, Vol. 65, pp. 220-229, 2016.
- [18] Khooban, M. H., Niknam, T., Blaabjerg, F., Davari, P., and Dragicevic, T., "A new load frequency control strategy for micro-grids with considering electrical vehicles", *Electric Power Systems Research*, Vol. 143, pp. 585-598, 2017.
- [19] Singh, V. P., Mohanty, S. R., Kishor, N., & Ray, P. K., "Robust H-infinity load frequency control in hybrid distributed generation system", *International journal of electrical power & energy systems*, Vol. 46, pp. 294-305, 2013.
- [20] Bevrani, H., Feizi, M. R., & Ataei, S., "Robust Frequency Control in an Islanded Microgrid: H_{∞} and μ -Synthesis Approaches", *IEEE transactions on smart grid*, Vol. 7, No. 2, pp. 706-717, 2015.
- [21] Azizi, S. M., & Khajehoddin, S. A. (2016, April). Robust load frequency control in islanded microgrid systems using μ -synthesis and DK iteration. In 2016 Annual IEEE Systems Conference (SysCon) (pp. 1-8). IEEE.
- [22] Bevrani, H., Habibi, F., Babahajyani, P., Watanabe, M., & Mitani, Y., "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, 2012.
- [23] Khalghani, M. R., Khooban, M. H., Mahboubi-Moghaddam, E., Vafamand, N., & Goodarzi, M., "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.
- [24] Mu, C., Zhang, Y., Jia, H., & He, H., "Energy-storage-based intelligent frequency control of microgrid with stochastic model uncertainties", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 11, No. 2, pp. 1748-1758, 2019.
- [25] Jampeethong, P., & Khomfoi, S., "Coordinated Control of Electric Vehicles and Renewable Energy Sources for Frequency Regulation in Microgrids", *IEEE Access*, Vol. 8, pp. 141967-141976, 2020.
- [26] Amiri, F., & Moradi, M. H., "Coordinated Control of LFC and SMES in the Power System Using a New Robust Controller", *Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering*, pp. 1912-1912, 2021.
- [27] Amiri, F., & Moradi, M. H., "Designing a Fractional Order PID Controller for a Two-Area Micro-Grid under Uncertainty of Parameters", *Iranian journal of energy*, Vol. 20, No. 4, pp. 49-78, 2018.
- [28] Singh, V. P., Kishor, N., & Samuel, P., "Communication time delay estimation for load frequency control in two-area power system", *Ad Hoc Networks*, Vol. 41, pp. 69-85, 2016.
- [29] Tedesco, F., & Casavola, A., "Fault-tolerant distributed load/frequency coordination strategies for multi-area power microgrids", *IFAC-PapersOnLine*, Vol. 48, No. 21, pp. 54-59, 2015.
- [30] Fan, R., Zhao, J., Pan, B., Chen, N., Wang, T., & Ma, H., "Automatic generation control of three-area small hydro system based on fuzzy PID control", In 2014 International Conference on Power System Technology (pp. 2522-2528). IEEE. 2014.
- [31] Ray, P., Mohanty, S., & Kishor, N., "Small-signal analysis of autonomous hybrid distributed generation systems in presence of ultracapacitor and tie-line optimization and pattern search", *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*, vol. 17, no. 2, pp. 135-148, 2020.
- [4] 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.
- [5] Amiri, F., & Hatami, A., "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.
- [6] Amiri, F., & Moradi, M., "Designing a new robust control for virtual inertia control in the microgrid with regard to virtual damping", *Journal of Electrical and Computer Engineering Innovations (JECIEI)*, Vol. 8, No. 1, pp. 53-70, 2019.
- [7] Dhanalakshmi, R., Palaniswami, S., "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.
- [8] Amiri, F., & Hatami, A., "Load Frequency Control Via Adaptive Fuzzy PID Controller In An Isolated Microgrid", In 32nd international power system conference, 2017, October.
- [9] Kumar, B., & Bhongade, S., "Load disturbance rejection based PID controller for frequency regulation of a microgrid", In 2016 Biennial international conference on power and energy systems: Towards sustainable energy (PESTSE), pp. 1-6. IEEE.
- [10] Malleham, G., Mishra, S., & Jha, A. N., "Ziegler-Nichols based controller parameters tuning for load frequency control in a microgrid", In 2011 International Conference on Energy, Automation and Signal (pp. 1-8). IEEE, 2011.
- [11] Das, D. C., Roy, A. K., & Sinha, N., "GA based frequency controller for solar thermal-diesel-wind hybrid energy generation/energy storage system", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 43, No. 1, pp. 262-279, 2012.
- [12] Das, D. C., Roy, A. K., & Sinha, N., " PSO based frequency controller for wind-solar-diesel hybrid energy generation/energy storage system", In 2011 International Conference on Energy, Automation and Signal (pp. 1-6). IEEE, 2011.
- [13] Kumar, R. H., & Ushakumari, S., "Biogeography based tuning of PID controllers for Load Frequency Control in microgrid", In 2014 International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies [ICCPCT-2014] (pp. 797-802). IEEE, 2014.
- [14] Shankar, G., & Mukherjee, V., "Load frequency control of an autonomous hybrid power system by quasi-oppositional harmony search algorithm", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 78, pp. 715-734, 2016.
- [15] Pan, I., & Das, S., "Fractional order AGC for distributed energy resources using robust optimization", *IEEE transactions on smart grid*, Vol. 7, No. 5, pp. 2175-2186, 2015.
- [16] Pan, I., & Das, S., "Fractional order fuzzy control of hybrid power system with renewable generation using chaotic PSO", *ISA transactions*, Vol. 62, pp. 19-29, 2016.
- [17] Khooban, M. H., Niknam, T., Blaabjerg, F., Davari, P., & Dragicevic, T., "A robust adaptive load frequency

- high-quality performance of ac machines using model predictive control", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 34, No. 1, pp. 794-800, 2018.
- [46] Pal, P. S., Kar, R., Mandal, D., & Ghoshal, S. P., "Wiener Model Based System Identification Based on CRPSO Algorithm", In 2017 IEEE 7th International Advance Computing Conference (IACC) (pp. 817-821). IEEE, 2017.
- [47] Markić, I., Stula, M., & Zorić, M. (2019, June). String pattern searching algorithm based on characters indices. In 2019 4th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech) (pp. 1-4). IEEE.
- operation", *Journal of Electrical engineering*, Vol. 61, No. 4), pp. 205-214, 2010.
- [32] Messinis et al., "A multi-microgrid laboratory infrastructure for smart grid applications", *MedPower 2014*, Athens, pp. 1-6, 2014.
- [33] 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.
- [34] Gheisarnejad, M., & Khooban, M. H., "Secondary load frequency control for multi-microgrids: HiL real-time simulation", *Soft Computing*, Vol. 23, No. 14, pp. 5785-5798, 2019.
- [35] Latif, A., Das, D. C., Barik, A. K., & Ranjan, S., "Illustration of demand response supported co-ordinated system performance evaluation of YSGA optimized dual stage PIFOD-(1+ PI) controller employed with wind-tidal-biodiesel based independent two-area interconnected microgrid system", *IET Renewable Power Generation*, Vol. 14, No. 6, pp. 1074-1086, 2020.
- [36] 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.
- [37] Liu, S., Mai, R., Zhou, L., Li, Y., Hu, J., He, Z., ... & Wang, S., "Dynamic Improvement of Inductive Power Transfer Systems With Maximum Energy Efficiency Tracking Using Model Predictive Control: Analysis and Experimental Verification", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 35, No. 12, pp. 12752-12764, 2020.
- [38] Zhou, Z., Zhang, L., Liu, Z., Chen, Q., Long, R., & Su, H., "Model Predictive Control for the Receiving-Side DC-DC Converter of Dynamic Wireless Power Transfer", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 35, No. 9, pp. 8985-8997, 2020.
- [39] Kaleybar, H. J., Kojabadi, H. M., Foadelli, F., Brenna, M., & Blaabjerg, F., "Model analysis and real-time implementation of model predictive control for railway power flow controller", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 109, pp. 290-306, 2019.
- [40] Köhler, J., Müller, M. A., & Allgöwer, F., "A nonlinear tracking model predictive control scheme for dynamic target signals", *Automatica*, Vol. 118, 109030, 2020.
- [41] Naseri, F., Farjah, E., Kazemi, Z., Schaltz, E., Ghanbari, T., & Schanen, J. L., "Dynamic stabilization of DC traction systems using a super capacitor-based active stabilizer with model predictive control", *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, Vol. 6, No. 1, pp. 228-240, 2020.
- [42] Xu, W., Elmorshedy, M. F., Liu, Y., Islam, M. R., & Allam, S. M., "Finite-set model predictive control based thrust maximization of linear induction motors used in linear metros", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 68, No. 6, pp. 5443-5458, 2019.
- [43] Moradi, M. H., & Amiri, F., "Virtual inertia control in islanded microgrid by using robust model predictive control (RMPC) with considering the time delay", *Soft Computing*, vol. 25, no. 8, pp. 6653-6663, 2021.
- [44] Dragičević, T., "Model predictive control of power converters for robust and fast operation of AC microgrids", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 33, No. 7, pp. 6304-6317, 2017.
- [45] Norambuena, M., Rodriguez, J., Zhang, Z., Wang, F., Garcia, C., & Kennel, R., "A very simple strategy for

زیر نویس ها

- ¹ Particle Swarm Optimization (PSO)
² Biogeography-based(BIO)
³ quasi-oppositional harmony search algorithm(QOH)
⁴ Fractional order(FO)
⁵ Human brain emotional learning(HBEL)
⁶ Social-spider optimizer (SSO)
⁷ Hybrid Craziness-based Particle Swarm Optimization (CRPSO) and Pattern Search (PS)
⁸ Wind Turbine Generator (WTG)
⁹ Diesel Engine Generator1 (DEG₁)
¹⁰ Super Magnetic Energy Storage(SMES)
¹¹ Diesel Engine Generator2 (DEG₂)
¹² Photo voltaic (PV)
¹³ Battery Energy Storage System(BESS)
¹⁴ Maximum Power Point Tracker(MPPT)
¹⁵ Model Predictive Controller(MPC)