

کنترل بهینه فرکانس بار با استفاده از الگوریتم کلونی زنبورهای عسل در سیستم‌های قدرت تجدید ساختاریافته شامل SMES

سید عباس طاهر^{۱*}، سید مصطفی نصرت‌آبادی^۲، محمد رضا شبانی^۲

۱- دانشیار، گروه مهندسی برق- دانشکده مهندسی- دانشگاه کاشان- کاشان- ایران

۲- کارشناس ارشد، گروه مهندسی برق- دانشکده مهندسی- دانشگاه کاشان- کاشان- ایران

چکیده

در این مقاله با استفاده از الگوریتم تکاملی کلونی زنبورهای عسل (ABC) و براساس معیار انتگرال زمان- قدرمطلق خطا (ITAE) به طراحی کنترل‌کننده فرکانس بار (LFC) در سیستم‌های قدرت تجدید ساختار یافته با سیاست دوجانبه پرداخته شده است. در این راستا، در نظر گرفتن تابع هدف مناسب برای دست یافتن به عملکرد مقاوم مطلوب مهم است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد با بهره‌گیری از معیار ITAE که با وجود انحراف فرکانس و خطای کنترل ناحیه (ACE) است، پارامترهای کنترل بهینه برای سیستم قدرت با استفاده از روش ABC به آسانی به دست می‌آیند. کارآیی روش پیشنهادی بر روی یک سیستم قدرت چهار ناحیه‌ای تجدید ساختار یافته با سناریوهای قراردادی ممکن تحت تقاضای بار زیاد و اغتشاش‌های ناحیه‌ای نشان داده شده است. با ارزیابی نتایج مشاهده می‌شود که روش بهینه‌سازی پیشنهادی در محدوده وسیعی از تغییرات پارامترهای سیستم و تغییرات بار در حضور خاصیت غیرخطی بودن سیستم، عملکرد مقاوم خوبی داشته، بنابراین، می‌تواند در کنترل‌کننده‌های دیگر نیز استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: کنترل فرکانس بار (LFC)، SMES، سیستم قدرت تجدید ساختار یافته، الگوریتم کلونی زنبورهای عسل (ABC).

مقدمه

با توجه به آنالیزهای مختلف که در محیط بازار برق انجام می‌گیرد، کنترل فرکانس یکی از مهمترین خدمات جانبی این سیستم‌ها است. این عمل بین انرژی و فرکانس سیستم قدرت تعادل ایجاد می‌کند. رایجترین روش‌های استفاده شده به منظور انجام کنترل فرکانس، کنترل فرکانس بار^۱ (LFC) و پاسخ گاورنر ژنراتور (تنظیم فرکانس اولیه) است. هدف از LFC برقراری مجدد توانایی تنظیم فرکانس اولیه، برگرداندن فرکانس به مقدار نامی و مینیمم کردن فلوئید توان انتقالی بین ناحیه‌ای^۲ است. از بین مکانیزم‌های استفاده شده به منظور مدیریت کنترل فرکانس در بازارهای جانبی، قراردادهای دوطرفه یا پیشنهادهای دوطرفه برجسته‌تر هستند [۱]. در طول دهه گذشته، چندین سناریوی LFC به منظور تطبیق طرح‌های LFC سنتی با تغییر محیط در سیستم‌های قدرت که تحت تجدید ساختار قرار گرفته‌اند پیشنهاد شده است [۲-۴].

در یک سیستم قدرت تحت تجدید ساختار، هر ناحیه کنترلی انواع مختلفی از عدم قطعیت‌ها و اغتشاشات را شامل می‌شود که آنها ناشی از افزایش پیچیدگی، خطاهای مدل‌سازی و تغییر ساختار سیستم قدرت هستند. در نتیجه، یک کنترل‌کننده ثابت بر پایه تئوری سنتی نمی‌تواند استفاده شود، بلکه باید یک کنترل‌کننده انعطاف‌پذیر در اختیار باشد. در طول دو دهه گذشته به منظور طراحی کنترل‌کننده‌های اتوماتیک تولید با عملکرد بهتر به منظور تطبیق با تغییرات پارامترها، با استفاده از روش‌های مقاوم

غیرمتمرکز مختلف، کنترل بهینه و شبکه عصبی تلاش‌هایی انجام گرفته است [۵-۹].

الگوریتم کلونی زنبورهای عسل^۳ یک روش جستجو و بهینه‌سازی مقاوم است که با شرایط عملی مختلف سازگار است [۱۰-۱۳]. در این مطالعه یک روش بهینه‌سازی به منظور کنترل بر مبنای ABC برای حل مسأله LFC همراه با ذخیره انرژی مغناطیسی ابرسانا^۴ (SMES) در یک محیط تجدید ساختار یافته پیشنهاد شده است. برای غیرمتمرکز کردن سیستم، اتصال بین هر ناحیه کنترلی و بقیه سیستم همانند یک سیگنال اغتشاش جدید در نظر گرفته می‌شود. به منظور مینیمم نمودن اغتشاشات بار و رسیدن به سطح مطلوب عملکرد مقاوم در حضور عدم قطعیت و محدودیت‌های عملی در انجام کنترل، روش بهینه‌سازی ABC به منظور تنظیم پارامترهای کنترل برای مسأله LFC استفاده شده است. به منظور نشان دادن کارایی روش پیشنهاد شده، یک سیستم قدرت چهار ناحیه‌ای تجدید ساختار یافته تحت شرایط کاری مختلف شبیه‌سازی شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها با استفاده از روش بهینه‌سازی پیشنهادی به منظور نمایش عملکرد مقاوم در حضور واحد SMES در چهار ناحیه از سیستم قدرت ارائه شده است. در این مطالعه، واحد SMES تنها به منظور کاهش عدم تطابق آنی بین تولید و تقاضا استفاده شده است. آنالیزها نشان می‌دهد که روش کنترلی پیشنهادی با در نظر گرفتن واحد SMES به مقدار قابل توجهی عملکردهای دینامیکی سیستم، همانند زمان نشست^۵، جهش^۶ و پاسخ حالت ماندگار در مقابل عدم قطعیت پارامترها را برای محدوده وسیعی

ماکزیمم ولتاژ مدار برحسب کیلو ولت است. شارژ و دشارژ واحد SMES با تغییر زاویه تبدیل α کنترل می‌شود. اگر α کمتر از 90° درجه باشد کانورتر در حالت یکسوکنندگی (حالت شارژ) و اگر بزرگتر از 90° درجه باشد، در حالت اینورتر (حالت دشارژ) است. طی عملکرد LFC، E_d به طور پیوسته با استفاده از سیگنال ورودی به منطق کنترل SMES کنترل می‌شود. همان‌طور که در مراجع مختلف به آن اشاره گردیده است [۱۹-۱۴] جریان سلف بعد از اغتشاش در سیستم باید به مقدار نامی خود برگردد. بنابراین، به منظور بهبود بازیابی جریان به مقدار حالت ماندگار، انحراف جریان سلف به عنوان یک سیگنال فیدبک منفی در حلقه کنترلی SMES استفاده می‌شود. بر این اساس، ولتاژ خروجی کانورتر اعمالی به دو سر سلف و میزان تغییرات جریان سلف به صورت روابط (۲-۳) در نظر گرفته می‌شود.

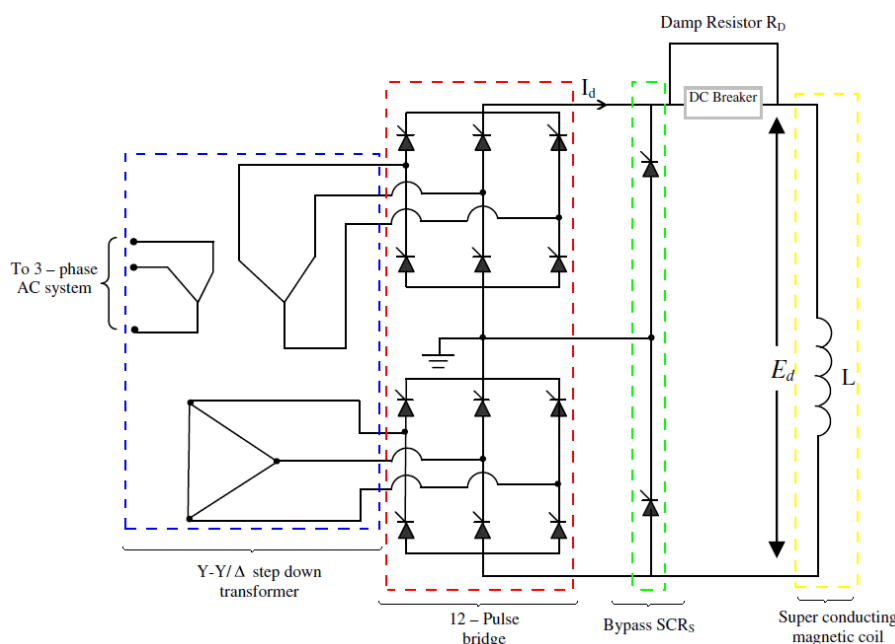
از بارهای درخواستی در ناحیه و نیز با وجود اغتشاش در هریک از نواحی حتی در حضور خاصیت غیرخطی سیستم، بهبود می‌بخشد.

سیستم کنترلی SMES

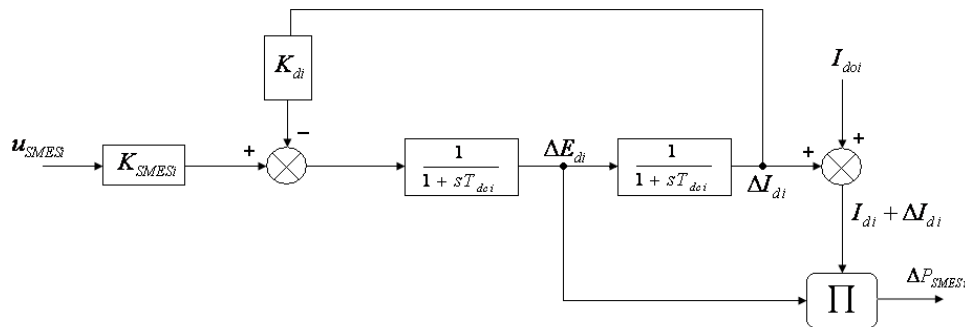
شماتیک یک واحد SMES کنترل شده توسط ترستور که در هر ناحیه کنترل سیستم قدرت در نظر گرفته شده به منظور کنترل فرکانس بار در شکل (۱) نشان داده شده است. زاویه آتش کانورتر، ولتاژ DC ظاهر شده در دو سر سلف را که به صورت پیوسته بین محدوده وسیعی از مقادیر مثبت و منفی تغییر می‌کند، کنترل می‌نماید. ولتاژ DC مذکور از رابطه (۱) به دست می‌آید [۱۴].

$$E_d = 2V_{d0} \cos \alpha - 2I_d R_c \quad (1)$$

که E_d ولتاژ DC اعمال شده به دو سر سلف برحسب کیلو ولت، α زاویه آتش برحسب درجه، I_d جریان داخل سلف برحسب کیلو آمپر، R_c مقاومت تبدیل معادل برحسب کیلو اهم و V_{dc0}



شکل (۱): دیاگرام مداری واحد SMES



شکل (۲): بلوک دیاگرام کنترلی واحد SMES

می‌شود. تغییرات توان حقیقی سلف واحد SMES بیان شده در حوزه زمان عبارتند از:

$$\Delta P_{SMES} = \Delta E_{di} I_{d0i} + \Delta I_{d0i} \Delta E_{di} \quad (5)$$

این مقدار توان برای انتقال از شبکه AC به DC مثبت در نظر گرفته شده است.

مدل LFC تعمیم یافته

در سیستم‌های قدرت تجدید ساختار یافته نیز اهداف کلی LFC مانند بازیابی فرکانس و تبادلات شبکه با مقادیر مطلوب برای هر ناحیه کنترلی کماکان پابرجاست. سیستم قدرت تجدید ساختار یافته شامل GENCOها، TRANSCOها و DISCOهاست. در ساختار جدید GENCOها ممکن است در عمل LFC مشارکت داشته و DISCOها برای عقد قرارداد با هر یک از GENCOها در ناحیه خود یا دیگر نواحی آزاد باشند. بنابراین، ترکیب‌های مختلفی از سناریوهای منعقد ممکن بین GENCOها و DISCOها وجود دارد. همه تبادلات باید توسط اپراتور مستقل سیستم^۷ (ISO) یا دیگر سازمان‌های مسؤول واضح و شفاف شده باشد. در این محیط جدید، مطلوب است که مدل جدیدی برای طرح

$$\Delta E_{di}(s) = \frac{K_{SMES}}{1+sT_{dci}} u_{SMES}(s) - \frac{K_{id}}{1+sT_{dci}} \Delta I_{di}(s) \quad (2)$$

$$\Delta I_{di}(s) = \frac{1}{sL_i} \Delta E_{di}(s) \quad (3)$$

سلف در ابتدا با اعمال یک ولتاژ کم به جریان نامی‌اش شارژ می‌شود. پس از آنکه جریان به مقدار نامی می‌رسد، با کاهش ولتاژ دو سر سلف به صفر ثابت باقی می‌ماند. بلوک دیاگرام کنترلی واحد SMES که در هر ناحیه کنترلی برای کاهش عدم تطابق آنی بین تولید و بار استفاده شده در شکل (۲) نشان داده شده است. $ACE_i (i=1,2,3,4)$ در هر ناحیه کنترلی به عنوان سیگنال ورودی کنترلی برای SMES در نظر گرفته شده است [۲۰].

$$ACE_i = B_i \Delta F_i + \Delta P_{tie,i} \quad (4)$$

مطلوب آن است که جریان سلف پس از اغتشاش در سیستم با حداکثر سرعت به مقدار نامی خود باز گردد. در این صورت واحد SMES می‌تواند به خوبی به اغتشاشات پی‌درپی پاسخ دهد. بنابراین جریان سلف، نمونه‌برداری شده به عنوان سیگنال فیدبک منفی در حلقه کنترل SMES به منظور بازگرداندن سریع جریان و سطح انرژی آن استفاده

LFC به منظور محاسبه تأثیر قراردادهای دنبال کردن

$$AGPM = \begin{bmatrix} AGPM_{11} & \cdots & AGPM_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ AGPM_{N1} & \cdots & AGPM_{NN} \end{bmatrix}$$

$$AGPM_{ij} = \begin{bmatrix} gpf_{(s_i+1)(z_j+1)} & \cdots & gpf_{(s_i+1)(z_j+m_j)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ gpf_{(s_i+n_i)(z_j+1)} & \cdots & gpf_{(s_i+n_i)(z_j+m_j)} \end{bmatrix}$$

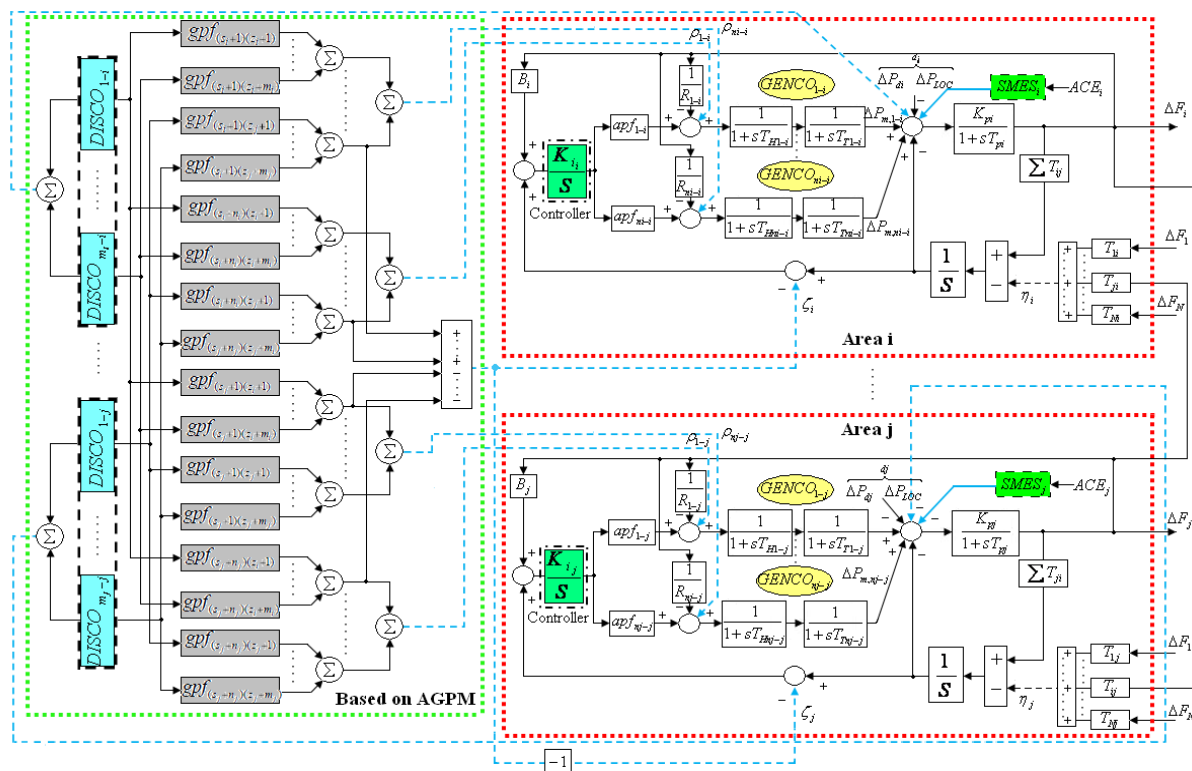
for $i, j = 1, \dots, N$ and

$$s_i = \sum_{K=1}^{i-1} n_i, z_j = \sum_{K=1}^{j-1} m_j \quad \text{and} \quad s_1 = z_1 = 0$$

که در آن، gpf_{ij} به صورت ضریب مشارکت تولید تعریف می‌گردد و ضریب مشارکت i امین GENCO را در کل نیاز بار j امین DISCO مبتنی بر قرارداد منعقد شده نشان می‌دهد. مجموع تمامی عناصر در هر ستون AGPM یک است.

بار^۸ (تعقیب بار یا ردیابی بار) بر دینامیک سیستم تعمیم داده شود. در این مطالعه، مبتنی بر ایده معرفی شده در [۲۱]، راه کار تعریف یک «ماتریس مشارکت تولید تکمیل شده (افزوده)»^۹ (AGPM) برای بیان قراردادهای ممکن متعاقب تشریح شده است. AGPM ضریب مشارکت یک GENCO در قرارداد دنبال کردن بار با یک DISCO را نشان می‌دهد.

سطرها و ستون‌های ماتریس AGPM به ترتیب معادل با تعداد کل GENCOها و DISCOها در کل سیستم قدرت هستند. با فرض آنکه تعداد GENCOها و DISCOها در ناحیه i در یک سیستم قدرت بزرگ با N ناحیه کنترلی به ترتیب n_i و m_i باشد، لذا ساختار AGPM بصورت زیر است:



شکل (۳): طرح LFC تعمیم یافته در سیستم قدرت تجدید ساختاریافته

$$d_i = \Delta P_{Lo\dot{a}} + \Delta P_{di}, \quad \Delta P_{Lo\dot{a}} = \sum_{i=1}^m \Delta P_{Lfi}, \quad (v)$$

در قرارداد منعقد با آن را در حالت ماندگار دنبال نماید [۲۲].

الگوریتم ABC به منظور بهینه‌سازی بررسی اجمالی الگوریتم

مطالعه برخی از سیستم‌های طبیعی مانند کلونی حشرات اجتماعی نشان می‌دهد که یک سری ارگانیسم‌های ساده خارجی قابلیت تولید سیستم‌هایی را دارند که به کمک برهم کنش‌های پویا قابلیت انجام اعمال بسیار پیچیده را دارند. گروه زنبورها به خاطر استقلال داخل کلونی، عملکرد توزیع شده و سیستم درون سازمانی، یکی از بهترین کلونی‌ها برای حل جامع مسائل پیچیده است که با عدم قطعیت مواجه هستند می‌باشد. الگوریتم کلونی زنبورهای عسل (ABC) الگوریتم شبیه‌سازی رفتار جستجوی غذای گروه‌های زنبور عسل است [۲۳-۲۵]. یک کلونی زنبور عسل می‌تواند در مسافت زیاد و نیز در جهت‌های گوناگون پخش شود تا از منابع غذایی بهره‌برداری کند. قطعات (مکانهای) گلدار با مقادیر زیادی شهد یا گرده که با تلاش کم، قابل بهره‌برداری است، به وسیله تعداد زیادی زنبور بازدید می‌شوند به طوری که بخشهایی از زمین که شهد یا گرده کمی دارند، تعداد کمتری زنبور را جذب می‌کنند. جمعیت زنبورهای عسل در الگوریتم ABC شامل سه نوع زنبورهای کارگر، زنبورهای ناظر و زنبورهای دیده‌بان است. پروسه جستجوی غذای یک کلونی به وسیله زنبورهای دیده‌بان آغاز می‌شود که برای جستجوی گلزارهای با شهد زیاد فرستاده می‌شوند. این زنبورها به صورت تصادفی از گلزاری به گلزار دیگری می-

روند. در طول فصل برداشت محصول، کلونی با آماده نگه‌داشتن تعدادی از جمعیت به عنوان دیده‌بان به جستجوی خود ادامه می‌دهد. هنگامی که جستجوی گلزارها به اتمام رسید، هر زنبور دیده‌بان بالای گلزاری که اندوخته کیفی مطمئنی از شهد و گرده دارد، قرار گرفته، با انجام حرکاتی خاص به دیگر زنبورها اطلاع رسانی می‌کند. در واقع، زنبور دیده‌بان با این حرکات موزون خود فاصله و جهت قطعه گلزار نسبت به کندو و کیفیت آن را به زنبورهای دیگر اطلاع می‌دهد. زنبورهای کارگر مسئول بهره‌برداری از منابع شهد کشف شده از قبل هستند. همچنین دادن اطلاعات در مورد کیفیت مکان منبع غذایی که در حال بهره‌برداری است، به دیگر زنبورهای منتظر در کندو (زنبورهای ناظر) از وظایف آنهاست. زنبورهای ناظر در کندو منتظر می‌مانند و برای بهره‌برداری از یک منبع غذایی تصمیم می‌گیرند که این موضوع به اطلاعات رسیده توسط زنبورهای کارگر بستگی دارد. به این ترتیب، زنبورهای کارگر به‌سوی گلزارهایی می‌روند که شهد بیشتری دارند. زمانی که همه زنبورها به سمت گلزار مشابهی بروند، مجدداً به صورت تصادفی و بنابر اطلاع‌رسانی زنبورها با حرکات خاص، پیرامون گلزار پخش می‌شوند تا با این کار نه تنها بهترین گلزار، بلکه بهترین گل‌های داخل آن انتخاب شوند.

با توجه به مقدمه بیان شده، گام‌های اصلی این الگوریتم که این رفتارها را شبیه‌سازی می‌کند، عبارت است از:

گام ۱: مقداردهی اولیه موقعیت‌های منبع غذایی.

بهرتر را به کار می‌گیرد. در سومین گام از الگوریتم، یک زنبور ناظر منبع غذایی را با احتمال معرفی شده در (۱۵) انتخاب می‌کند و منبع جدیدی در مکان منبع غذایی انتخاب شده با استفاده از (۱۴) تولید می‌کند. مشابه عمل زنبور کارگر در اینجا نیز منبع بهتر برای بهره‌برداری انتخاب می‌گردد.

$$p_i = \frac{fit_i}{\sum_{j=1}^{SN} fit_j} \quad (15)$$

که fit_i برازندگی جواب x_i است. پس از اینکه همه ناظرها در منابع توزیع شدند، منابع آزمون می‌شوند که آیا آنها رها می‌شوند یا خیر. اگر تعداد دفعاتی که یک منبع نمی‌تواند بهبود یابد، بیشتر از یک حد از قبل تعیین شده باشد، تصمیم بر این می‌شود که منبع تخلیه گردد. زنبور کارگر در رابطه با منبع تخلیه شده به عنوان یک دیده‌بان عمل می‌کند و یک جستجوی تصادفی را در محدوده مسأله به وسیله رابطه (۱۶) انجام می‌دهد [۲۶].

$$x_{ij} = x_j^{\min} + (x_j^{\max} - x_j^{\min}) * rand \quad (16)$$

الگوریتم ABC

در الگوریتم ABC پس از مقداردهی اولیه جمعیت زنبورها توسط مکان‌های تصادفی، زنبورها بر طبق شایستگی مکان‌هایشان رتبه‌بندی می‌شوند. در ابتدا تعداد e از مکان‌ها به عنوان مکان‌های برگزیده دسته بندی و تعداد nep از زنبورها به این مکان‌های برگزیده فرستاده می‌شوند. این زنبورها مکان‌های جدیدی در همسایگی مکان‌های برگزیده تولید می‌کنند. پس از فرستادن زنبورها به مکان‌های برگزیده، همسایه مکان‌های تابعه (مکان‌های انتخاب

گام ۲: هر زنبور کارگر منبع غذایی جدیدی در مکان منبع غذایی خودش تولید می‌کند، به طوری که از منبع بهتر استفاده می‌نماید.

گام ۳: هر زنبور ناظر یک منبع را با توجه به کیفیت راه حل آن انتخاب کرده، به طوری که یک منبع غذایی جدیدی را در مکان‌های غذایی معینی تولید می‌نماید و از میان آنها منبع بهتر را استفاده می‌کند.

گام ۴: منبعی که باید کنار گذاشته شود، تعیین شده، زنبورهای کارگر آن را به عنوان دیده‌بان برای جستجوی منابع جدید تخصیص می‌کند.

گام ۵: بهترین منبع غذایی پیدا شده تا این مرحله حفظ می‌شود.

گام ۶: تا هنگام برآورده شدن معیار توقف، گام‌های ۲ تا ۵ تکرار می‌شوند.

در اولین گام از الگوریتم، جواب‌های $x_i (i=1, \dots, SN)$ به طور تصادفی در محدوده پارامتری تولید می‌شوند (SN تعداد منابع غذایی است). در دومین گام از الگوریتم، برای هر زنبور کارگر، که تعدادشان برابر با نیمی از تعداد منابع غذایی است، منبع جدیدی توسط معادله (۱۴) تولید می‌شود:

$$v_{ij} = x_{ij} + \phi_{ij}(x_{ij} - x_{kj}) \quad (14)$$

که ϕ_{ij} یک عدد تصادفی حقیقی به طور یکنواخت توزیع شده در محدوده $[-1, 1]$ است، k شاخص جواب به صورت تصادفی انتخاب شده از جمعیت بوده $(k = \text{int}(\text{rand} * SN) + 1)$ و $j=1, \dots, D$ و D بعد مسأله است. پس از تولید v_i ، این جواب جدید با جواب x_i مقایسه شده، زنبور کارگر منبع

شده، $(m-e)$ بسته به شایستگی‌شان جستجو می‌شوند. تعداد زنبورهای فرستاده شده به مکان‌های منتخب nsp است. زنبورهای باقی‌مانده $(n-m)$ به عنوان دیده-بان دسته‌بندی می‌شوند و اجازه جستجوی تصادفی رفتار را می‌دهند. به‌طور کلی، این الگوریتم هفت پارامتر کنترلی را نیاز دارد که عبارتند از: تعداد زنبورهای دیده‌بان (n) ، تعداد مکان‌های منتخب خارج از n مکان بازدید شده (m) ، تعداد بهترین مکان‌ها خارج از m مکان انتخاب شده (e) ، تعداد زنبورهای تازه به کار گرفته شده برای بهترین مکان‌های e (nep) ، تعداد زنبورهای تازه به کار گرفته شده برای دیگر $(m-e)$ از محل انتخابی (nsp) ، اندازه اولیه قطعه‌های مکانی (ngh) و ماکزیمم تعداد تکرار. به‌طور خلاصه، گام‌های اصلی الگوریتم کلونی زنبورهای عسل به صورت زیر است [۲۷]:

گام ۱: مقداردهی اولیه جمعیت با جواب‌های تصادفی؛

گام ۲: ارزیابی شایستگی جمعیت؛

گام ۳: تکرار؛

گام ۴: انتخاب مکان‌ها برای جستجوی در همسایگی؛

گام ۵: بکارگیری زنبورهای جدید برای مکان‌های انتخاب شده (زنبورهای بیشتر برای بهترین از بین e مکان) و ارزیابی شایستگی‌ها؛

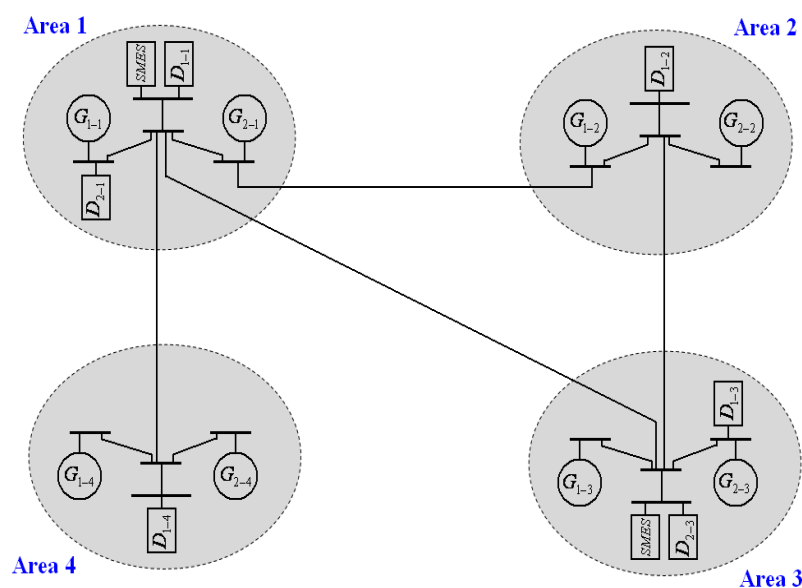
گام ۶: انتخاب زنبور شایسته از هر قطعه؛

گام ۷: اختصاص زنبورهای باقی‌مانده برای بازرسی تصادفی و ارزشیابی شایستگی آنها؛

گام ۸: تکرار تا هنگام برآورده شدن معیار توقف.

سیستم مورد مطالعه

به منظور نشان دادن قابلیت روش پیشنهاد شده یک سیستم قدرت با چهار ناحیه شامل دو واحد SMES در ناحیه‌های ۱ و ۲ که در شکل (۵) نشان داده شده، مدنظر قرار گرفته است.



شکل (۵): شماتیک سیستم قدرت چهار ناحیه‌ای

۵- تنظیم محدودیت منطقی بر روی سیگنال کنترل از نظر تغییر سرعت و دامنه. در ادامه، به شبیه‌سازی بر روی سیستم در نظر گرفته شده برای رسیدن به اهداف بالا برای هر چهار ناحیه کنترلی پرداخته شده است.

نتایج شبیه‌سازی

به منظور ارزیابی عملکرد روش بهینه‌سازی پیشنهادی، شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار MATLAB تحت شرایط عملیاتی مختلف بر مبنای معیار ITAE انجام شده است؛ به طوری که شاخص عملکرد در پروسه بهینه‌سازی به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} Per.Ind. = & \int_0^{T_s} t(K_1 \times B_1 \times |\Delta F_1(t)| + K_2 \times B_2 \times |\Delta F_2(t)| \\ & + K_3 \times B_3 \times |\Delta F_3(t)| + K_4 \times B_4 \times |\Delta F_4(t)|) dt \\ & + \int_0^{T_s} t(B_1 \times |ACE_1(t)| + B_2 \times |ACE_2(t)| \\ & + B_3 \times |ACE_3(t)| + B_4 \times |ACE_4(t)|) dt \end{aligned}$$

مقادیر پارامترهای الگوریتم ABC عبارتند از: $n=484$, $e=5$, $m=15$, $nep=25$, $nsp=25$, $ngh=3$; ماکزیمم تعداد تکرار برابر ۵۰ در نظر گرفته شده است. پس از بهینه‌سازی شاخص عملکرد، پارامترهای بهینه سیستم در جدول (۱) آورده شده است. برای بررسی نتایج شبیه‌سازی و کارایی روش پیشنهاد شده، سه سناریو در نظر گرفته شده که در ادامه به آنها پرداخته می‌شود.

فرض می‌شود که هر ناحیه کنترلی شامل دو GENCO و دو DISCO است؛ به جز ناحیه دوم و چهارم که یک DISCO دارند. پارامترهای سیستم تحت مطالعه در ضمیمه آورده شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها و آنالیز مقادیر ویژه نشان می‌دهند که عملکرد سیستم حلقه باز بیش از سایر پارامترها به تغییرات T_{pi} ، K_{pi} و T_{ij} حساس هستند. بنابراین به منظور نشان دادن توانایی روش پیشنهادی، عدم قطعیت برای این پارامترها در نظر گرفته شده است [۲۸]. بنابراین برای سیستم در نظر گرفته شده، هدف، تنظیم فرکانس ناحیه با در نظر گرفتن پایداری و عملکرد مقاوم در حضور عدم قطعیت مشخص، تغییرات بار و در نظر گرفتن قراردادهای مختلف بوده، به طوری که:

- ۱- داشتن پایداری و عملکرد مقاوم برای کل سیستم قدرت و هر ناحیه کنترل در حضور ۵۰ درصد عدم قطعیت برای T_{pi} ، K_{pi} و T_{ij} ؛
- ۲- مینیمم کردن آثار اغتشاشات معرفی شده جدید بر روی سیگنال‌های خروجی مطابق با قراردادهای ممکن در نظر گرفته شده؛
- ۳- داشتن خطای حالت ماندگار صفر و قابلیت ردیابی خوب برای تقاضای بار و حذف اغتشاشات؛
- ۴- داشتن جهش و زمان نشست قابل قبول بر روی سیگنال انحراف فرکانس در هر ناحیه کنترلی؛

جدول (۱): پارامترهای بهینه شده توسط الگوریتم ABC

	Area 1	Area 2	Area 3	Area 4
K	0.00001	0.00002	0.00002	0.00001
B	0.20731	0.00021	0.19019	0.00011

سناریوی ۱

به منظور بررسی عملکرد روش پیشنهادی، شبیه‌سازی تحت شرایط زیر در سیستم قدرت انجام شده است.

$$d_1 = 0.625, d_2 = 0.09, d_3 = 0.14, d_4 = 0.11 \text{ (puMW)}$$

نتایج شبیه‌سازی سیستم براساس پارامترهای داده شده در بخش ضمیمه در شکل‌های (۶) و (۷) نشان داده شده‌اند. با استفاده از روش پیشنهادی و در نظر گرفتن واحد SMES، انحراف‌های فرکانس تمام نواحی به سرعت به مقدار صفر و فلوی توان بین ناحیه‌ای (Tie-Line) به مقدار مشخص که توسط معادله (۱۰) بیان می‌گردد، همگرا می‌شود.

$$\Delta P_{tie,1,sch} = -0.031, \quad \Delta P_{tie,2,sch} = 0.027,$$

$$\Delta P_{tie,3,sch} = -0.016, \quad \Delta P_{tie,4,sch} = 0.02$$

سناریوی ۲

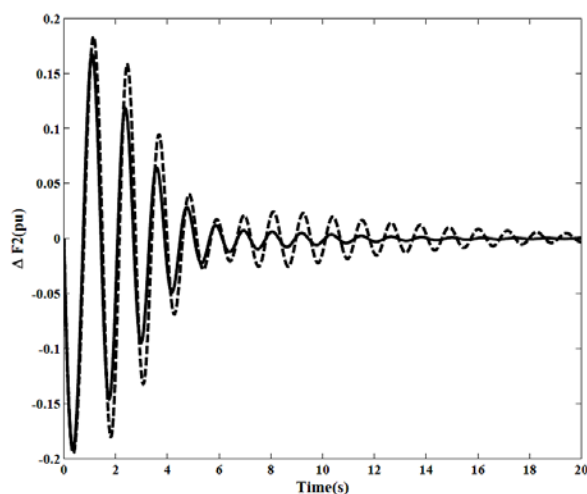
در این سناریو، عملکرد حلقه بسته در حضور هر دو تقاضای بار قراردادی و در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها شبیه‌سازی انجام شده است. فرض می‌شود که یک پله بار بزرگ (مگاوات) به وسیله DISCO به صورت زیر تقاضا شده است:

$$\Delta P_{L1-1} = 100, \quad \Delta P_{L2-1} = 50, \quad \Delta P_{L1-2} = 100$$

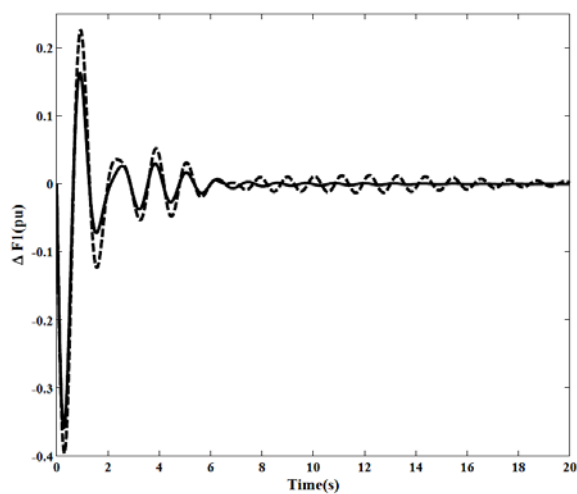
$$\Delta P_{L1-3} = 80, \quad \Delta P_{L2-3} = 60, \quad \Delta P_{L1-4} = 100$$

همچنین قرارداد دوطرفه و مشترک بین DISCOها و AGPMهای در دسترس براساس ماتریس زیر در نظر گرفته شده است:

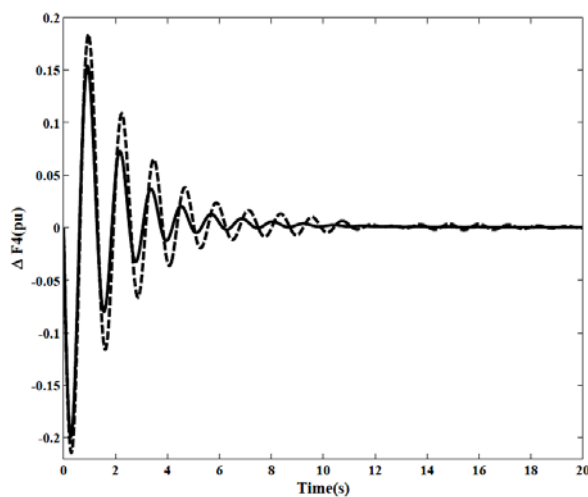
$$AGPM^T = \begin{bmatrix} 0.4 & 0 & 0.4 & 0 & 0.2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0 & 0.4 & 0 & 0 & 0 & 0.4 \\ 0 & 0 & 0.4 & 0 & 0 & 0.6 & 0 & 0 \\ 0 & 0.4 & 0 & 0.2 & 0.4 & 0 & 0 & 0 \\ 0.8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix}$$



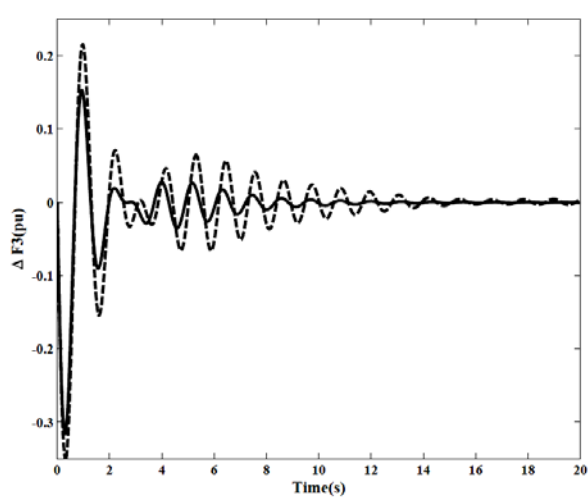
(ب)



(الف)

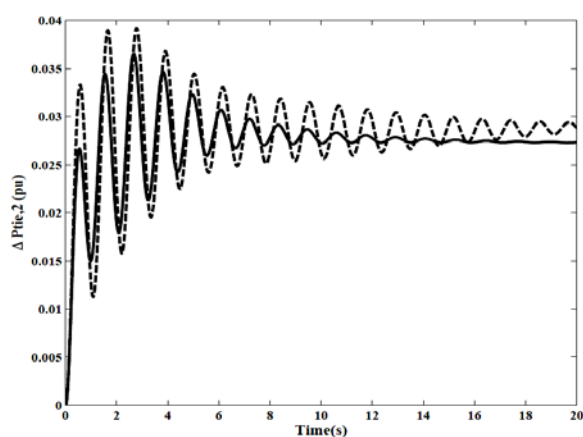


(د)

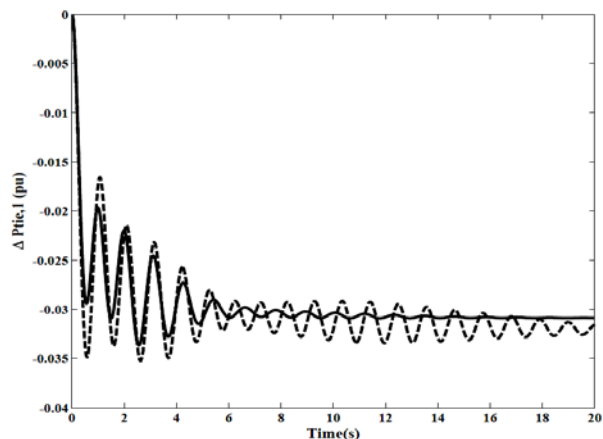


(ج)

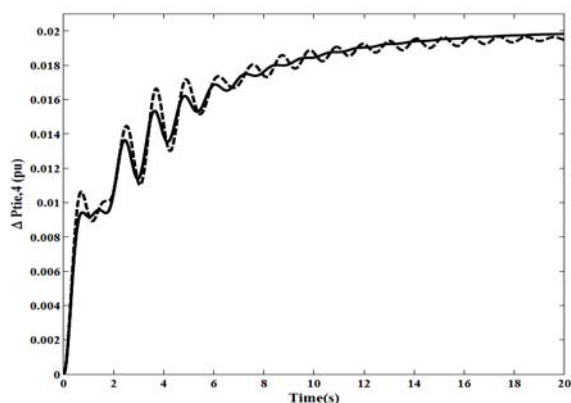
شکل (۶): نتایج شبیه‌سازی سناریوی ۱: تغییرات فرکانس (الف) ناحیه ۱ (ب) ناحیه ۲ (ج) ناحیه ۳ (د) ناحیه ۴ (خط‌ممتد روش بهینه با ABC و خط‌چین روش سنتی)



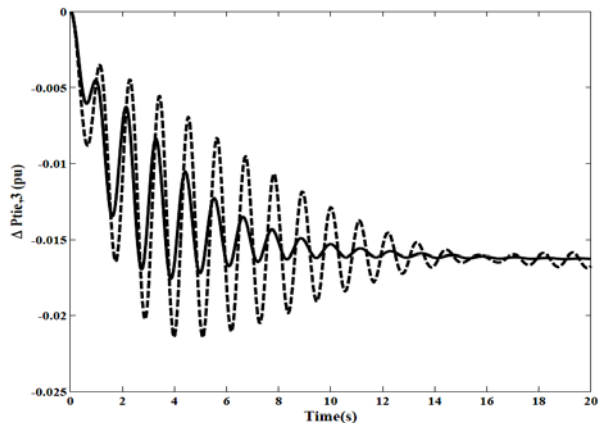
(ب)



(الف)



(د)



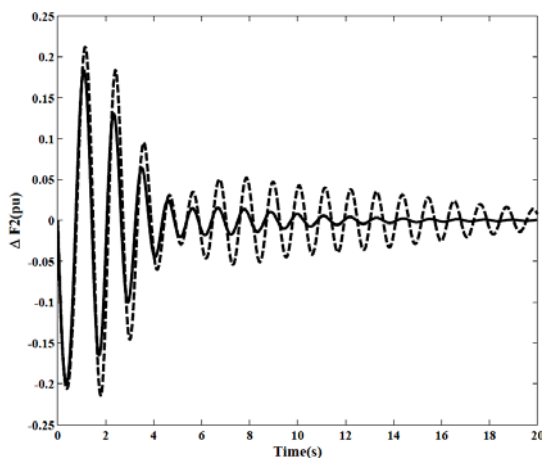
(ج)

شکل (۷): نتایج شبیه‌سازی سناریوی ۱: تغییرات توان Tie-Line (الف) ناحیه ۱ (ب) ناحیه ۲ (ج) ناحیه ۳ (د) ناحیه ۴ (خط‌ممتد روش بهینه با ABC و خط‌چین روش سنتی)

محلی (pu MW) در همه نواحی به صورت زیر است:

$$\Delta P_{Loc,1} = 0.25, \Delta P_{Loc,2} = 0.16, \\ \Delta P_{Loc,3} = 0.14, \Delta P_{Loc,4} = 0.1$$

هدف از این سناریو سنجش تأثیر روش بهینه-سازی پیشنهادی در مقابل عدم قطعیت‌ها و اغتشاش بار بزرگ است. نتایج شبیه‌سازی سیستم قدرت در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) با در نظر گرفتن واحد SMES نشان داده شده است. با استفاده از روش ABC پیشنهادی و در نظر گرفتن SMES نوسان فرکانس به سرعت از بین می‌رود و فلوی توان Tie-Line در حالت ماندگار به سمت مقدار مشخص بدست آمده از معادله (۱۰) میل می‌کند. با AGPM مشابه سناریوی (۱) و نیز با بار خارج از قرارداد ناحیه برآورده شده توسط GENCOها در نواحی مشابه، فلوی توان Tie-Line مشابه سناریوی (۱) در حالت ماندگار به مقدار فلوی مشخص شده خواهد رسید. بار خارج از قرارداد DISCOها در نواحی اول و سوم در حالت ماندگار مطابق با ضرایب شراکت ACE بوسیله GENCOها در این نواحی برآورده می‌شود.

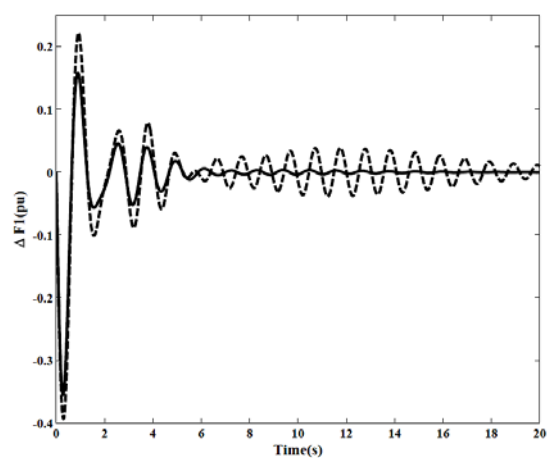


(ب)

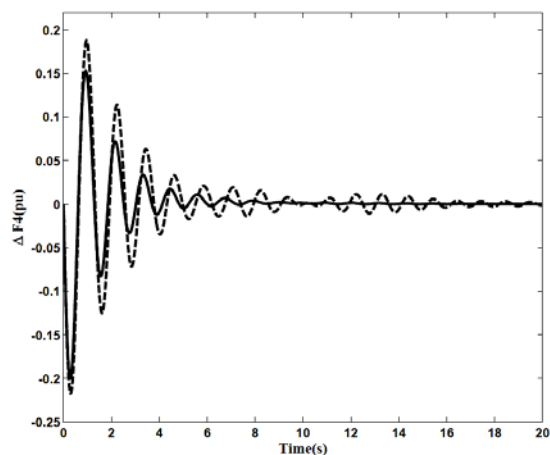
تمام GENCOها در وظیفه LFC شریک هستند. یک GENCO در ناحیه ۴ تنها برای انجام LFC در ناحیه‌اش شرکت دارد، در حالی که بقیه GENCOها تغییرات بار در ناحیه خود و دیگر ناحیه‌ها را دنبال می‌کنند. پاسخ سیستم قدرت به ۵۰ درصد افزایش در پارامترهای T_{ij} و T_{pi} ، K_{pi} با وجود واحد SMES در شکل‌های (۸) و (۹) به ترتیب آورده شده است. با استفاده از روش پیشنهادی با ۵ سیکل و ۳ تکرار و با در نظر گرفتن واحد SMES انحراف فرکانس تمام نواحی سریع به صفر میل می‌کنند و فلوی توان Tie-Line به درستی به مقدار مشخص در سناریوی قبلی همگرا می‌شود.

سناریوی ۳

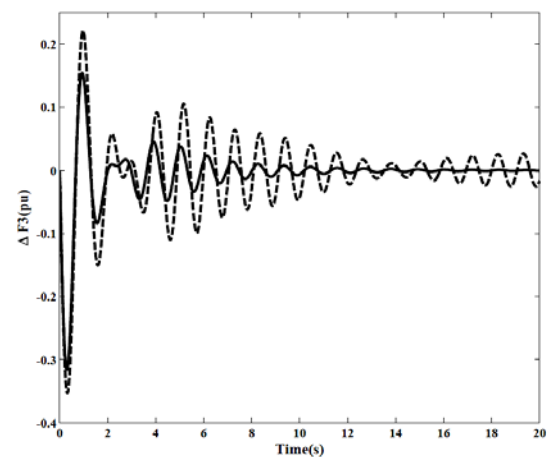
در این سناریو، فرض شده یک DISCO از میزان تقاضای مشخص شده در قرارداد تجاوز نموده است. این توان اضافی به عنوان بار محلی ناحیه (بار خارج از قرارداد) مدل می‌شود. با در نظر گرفتن مجدد شرایط سناریو (۱) و نیز علاوه بر تقاضای بار قراردادی مشخص، ۵۰ درصد کاهش در پارامترهای نامعین به عنوان یک بار بزرگ خارج از قرارداد در نظر گرفته شده است. با استفاده از معادله (۷) کل بار



(الف)

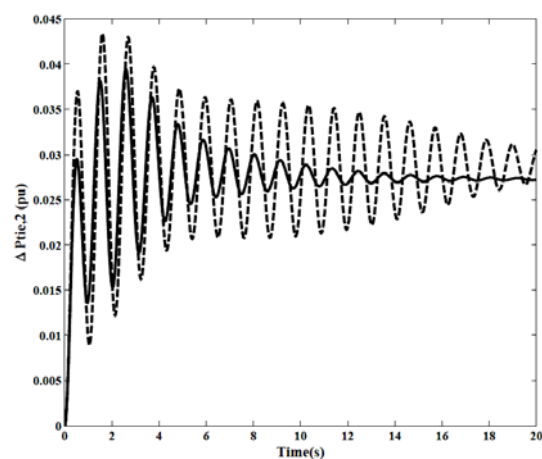


(د)

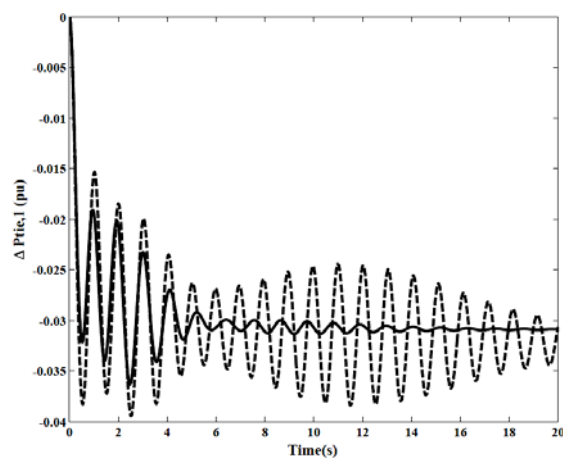


(ج)

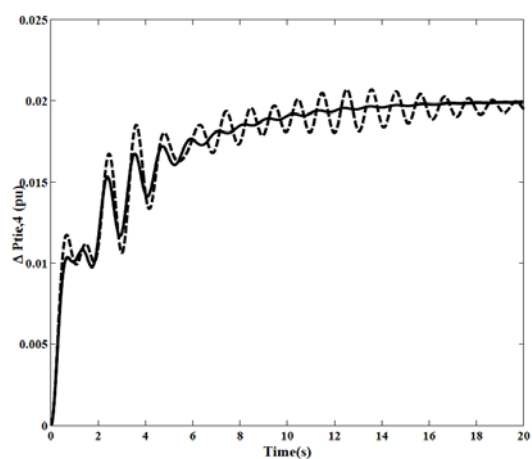
شکل (۸): نتایج شبیه‌سازی سناریوی ۲: تغییرات فرکانس (الف) ناحیه ۱ (ب) ناحیه ۲ (ج) ناحیه ۳ (د) ناحیه ۴ (خط‌ممتد روش بهینه با ABC و خط‌چین روش سنتی)



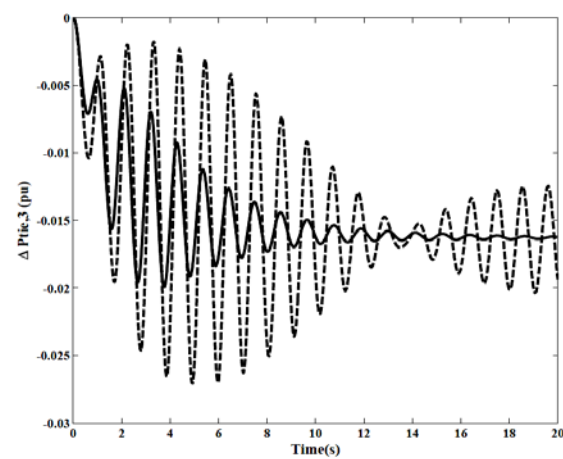
(ب)



(الف)

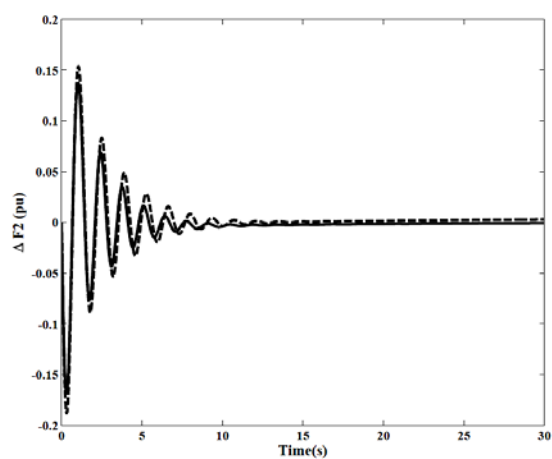


(د)

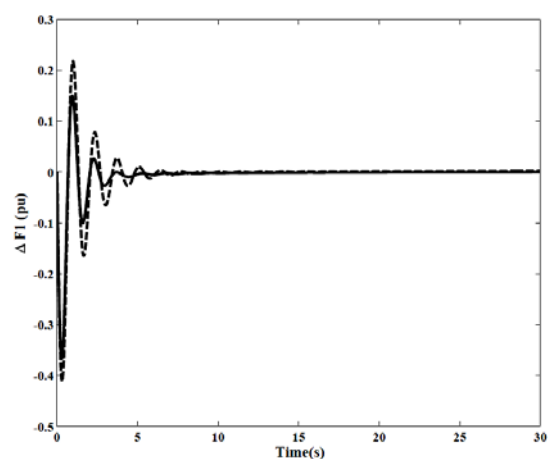


(ج)

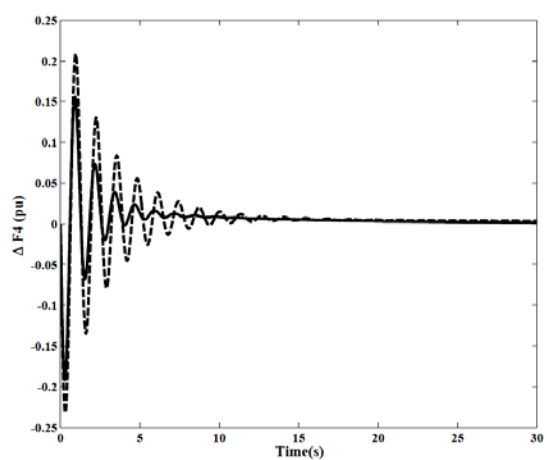
شکل (۹): نتایج شبیه‌سازی سناریوی ۲: تغییرات توان Tie-Line (الف) ناحیه ۱ (ب) ناحیه ۲ (ج) ناحیه ۳ (د) ناحیه ۴ (خط‌ممتد روش بهینه با ABC و خط‌چین روش سنتی)



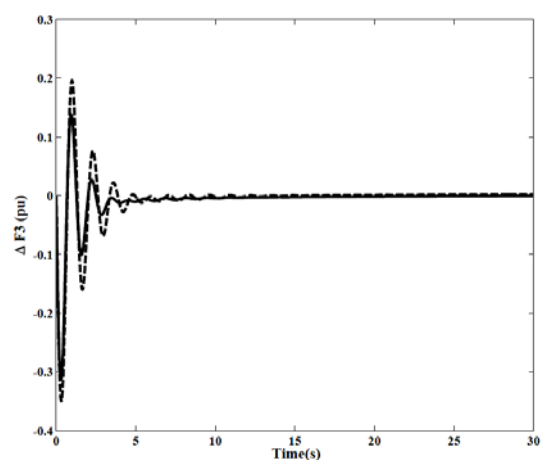
(ب)



(الف)

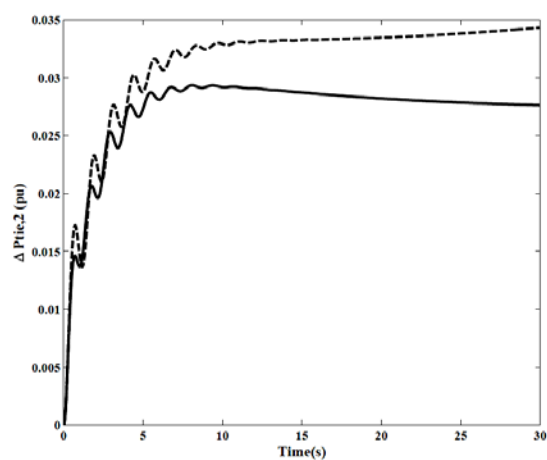


(د)

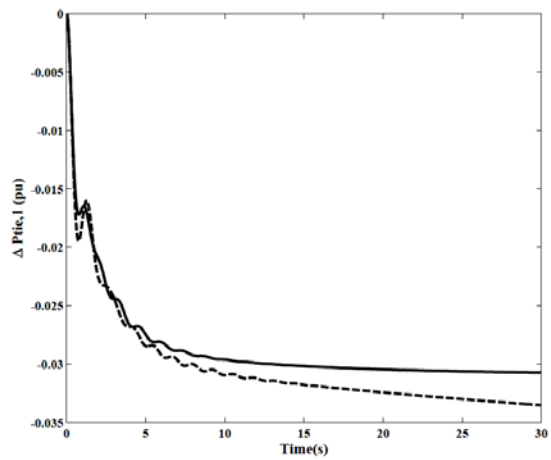


(ج)

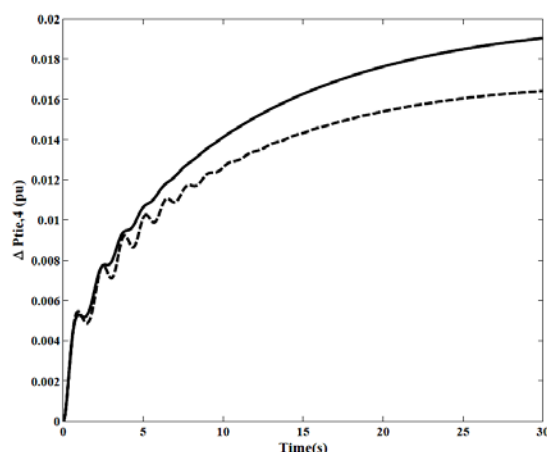
شکل (۱۰): نتایج شبیه‌سازی سناریوی ۳: تغییرات فرکانس (الف) ناحیه ۱ (ب) ناحیه ۲ (ج) ناحیه ۳ (د) ناحیه ۴ (خط‌ممتد روش بهینه با ABC و خط‌چین روش سنتی)



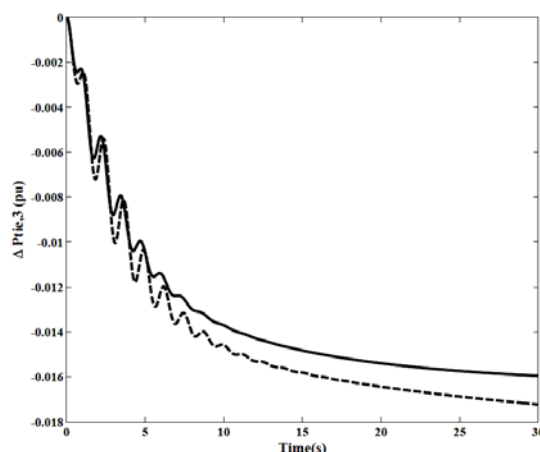
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل (۱۱): نتایج شبیه‌سازی سناریوی ۳: تغییرات توان Tie-Line (الف) ناحیه ۱ (ب) ناحیه ۲ (ج) ناحیه ۳ (د) ناحیه ۴ (خط‌ممتد روش بهینه با ABC و خط‌چین روش سنتی)

نتیجه‌گیری

برای بررسی کارایی روش بهینه‌سازی پیشنهادی، بر روی یک سیستم قدرت چهار ناحیه‌ای شبیه‌سازی انجام گرفته و نتایج با کنترل‌کننده‌های سنتی تحت قراردادهای منعقد با تغییر بارهای مختلف در حضور عدم قطعیت‌های مدل شده مقایسه شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که روش بهینه‌سازی پیشنهادی در سیستم تحت مطالعه عملکردهای فرکانسی سیستم از قبیل: تنظیم فرکانس، دنبال نمودن تغییرات بار و میرایی اغتشاشات به طور قابل توجه برای محدوده وسیعی از پارامترهای سیستم و تغییرات بار ناحیه بهبود بخشیده است. بنابراین، با توجه به نتایج حاصله از شبیه‌سازی‌ها بخوبی می‌توان با بهره‌گیری از روش پیشنهادی، کنترل فرکانس و تبادل توان بین نواحی طبق قراردادهای منعقد با وجود عدم قطعیت را انجام داد، که این امر باعث بهبود کیفیت انرژی الکتریکی و افزایش قابلیت اطمینان آن می‌شود.

در این مقاله یک روش بهینه‌سازی پارامترهای کنترل‌کننده به منظور کنترل فرکانس بار در محیط الکتریکی رقابتی با استفاده از مدل LFC تعمیم یافته با توجه به حضور واحدهای SMES پیشنهاد شده است. در این سیستم هر ناحیه کنترلی شامل انواع مختلف عدم قطعیت‌ها و اغتشاشات است که این مسایل به علت پیچیدگی زیاد و تغییر ساختار سیستم قدرت است. برای بهینه‌سازی پارامترهای سیستم LFC از روش بهینه‌سازی الگوریتم ABC به منظور به دست آوردن کنترل‌کننده بهینه استفاده شده است. با وجود عدم قطعیت‌ها که ناشی از محدودیت‌های عملی موجود در مسأله است، برای داشتن پایداری و عملکرد مقاوم در بهینه‌سازی از الگوریتم پیشنهادی استفاده شده است، که با استفاده از آن، دسته‌ای از کنترل‌کننده‌های با ساختار ساده که سهولت می‌توان از آنها استفاده نمود، به دست می‌آیند.

ضمایم

الف) اطلاعات سیستم

در جداول (الف-۱) و (الف-۲) پارامترهای سیستم قدرت آورده شده است ($MVA_{base}=1000$).

جدول (الف-۱): پارامترهای GENCOs

GENCOs _{k-i} (k in area i)	Rate (MW)	T _T (s)	T _H (s)	R (Hz/pu)	apf
GENCO ₁₋₁	800	0.36	0.06	2.4	0.5
GENCO ₂₋₁	1000	0.42	0.07	3.3	0.5
GENCO ₁₋₂	1100	0.44	0.06	2.5	0.6
GENCO ₂₋₂	1200	0.40	0.08	2.4	0.4
GENCO ₁₋₃	1000	0.36	0.07	3	0.5
GENCO ₂₋₃	1000	0.40	0.08	2.4	0.5
GENCO ₁₋₄	900	0.38	0.085	2	0.5
GENCO ₂₋₄	1000	0.40	0.08	2.4	0.5

جدول (الف-۲): پارامترهای ناحیه کترلی

Area	K _p (Hz/pu)	T _p (s)	B (pu/Hz)	K	T _{ij} (pu/Hz)
1	120	10	0.0425	0.63	T ₁₂ = 0.219
2	112.5	10	0.0385	1.15	T ₁₃ = 0.245
3	125	10	0.0359	0.89	T ₁₄ = 0.109
4	115	10	0.0425	0.29	T ₂₃ = 0.175

ب) اطلاعات SMES

$$L = 2.65 H$$

$$T_{dc} = 0.03 s$$

$$K_{SMES} = 100 kV / unit MW$$

$$K_{di} = 0.2 kV/kA$$

$$I_{do} = 4.5 kA$$

ج) علائم و اختصارات

فرکانس ناحیه	F
توان انتقالی Tie-Line شبکه	ΔP_{tie}
توان توربین	P_T
موقعیت شیر گاورنر	P_V
نقطه تنظیم گاورنر	P_C
خطای کنترلی ناحیه	ACE
ضریب مشارکت	α
انحراف از مقدار نامی	Δ
گین معادل زیر سیستم	K_p
ثابت زمانی معادل زیر سیستم	T_p
ثابت زمانی توربین	T_T
ثابت زمانی گاورنر	T_H
بایاس فرکانس	B
ضریب هماهنگی Tie-Line بین دو ناحیه i و j	T_{ij}
اغتشاش بار ناحیه	P_d
تقاضای قراردادی ژامین DISCO در ناحیه i	P_{lj-i}
تقاضای خارج از قرارداد ژامین DISCO در ناحیه i	P_{ULj-i}
تولید توان ژامین GENCO در ناحیه i	$P_{m,j-i}$
کل تقاضای محلی	P_{LOC}
رابط ناحیه	η
انحراف توان انتقالی Tie-Line از توان برنامه‌ریزی شده $(\Delta P_{tie,sch})$	ζ
جریان سلف واحد SMES	I_d
ولتاژ اعمال شده به سلف در واحد SMES	E_d
بهره حلقه کنترلی SMES	K_{SMES}
بهره برای فیدبک ΔI_d در واحد SMES	K_{id}
ثابت زمانی کانورتر واحد SMES	T_{dc}
سیگنال کنترلی واحد SMES	u_{SMES}

- of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 1, No. 2, pp. 116-122, 2008.
- [11] Karaboga, N., "A New Design Method Based on Artificial Bee Colony Algorithm for Digital IIR Filters", Journal of the Franklin Institute, Vol. 346, No. 4, pp. 328-348, 2009.
- [12] Singh, A., "An Artificial Bee Colony Algorithm for The Leaf-Constrained Minimum Spanning Tree Problem", Applied Soft Computing, Vol. 9, No. 2, pp. 625-631, 2009.
- [13] Venkata Rao, R. and Pawar, P.J., "Parameter Optimization of A Multi-Pass Milling Process Using Non-Traditional Optimization Algorithm", Applied Soft Computing, Vol. 10, No. 2, pp. 445-456, 2010.
- [14] Tripathy, S.C., Balasubramania, R., and Chanramohanan-Nair, P.S., "Effect of Superconducting Magnetic Energy Storage on Automatic Generation Control Considering Governor Dead Band and Boiler Dynamics", IEEE Trans Power System, Vol. 3, No. 7, pp. 1266-1273, 1992.
- [15] Tripathy, S.C., Kalantar, M. and Balasubramanian, R., "Dynamics and Stability of Wind and Diesel Turbine Generators with Superconducting Magnetic Energy Storage Unit on an Isolated Power System", IEEE Trans Energy Conversion, Vol. 6, No. 4, pp. 579-585, 1991.
- [16] Banerjee, S., Chatterjee, J.K., and Tripathy, S.C., "Application of Magnetic Energy Storage Unit as Load Frequency Stabilizer", IEEE Trans Energy Conversion, Vol. 5, No. 1, pp. 46-51, 1990.
- [17] Demirenen A. and Yesil, E., "Automatic Generation Control With Fuzzy Logic Controllers In The Power System Including SMES Units", Elect Power Energy System, Vol. 26, No. 4, pp. 291-305, 2004.
- [18] Banerjee, S., Chatterjee, J.K., and Tripathy, S.C., "Application of Magnetic Energy Storage Unit as Continuous VAR Controller," IEEE Trans Energy Conversion, Vol. 5, No. 1, pp. 39-45, 1990.
- [19] Abraham, R.J., Das, D. and Patra, A., "Automatic Generation Control of An Interconnected Hydrothermal Power System Considering Superconducting Magnetic Energy Storage", Elect Power
- [1] Raineri, R., Rios, S. and Schiele, D., "Technical and Economic Aspects of Ancillary Services Markets in the Electric Power Industry", an international comparison, Energy Policy, Vol. 34, No. 13, pp. 1540-1555, 2006.
- [2] Christie, R.D. and Bose, A., "Load Frequency Control Issues In Power System Operations after Deregulation", IEEE Trans. Power System, Vol. 11, No. 3, pp. 1191-1200, 1996.
- [3] Kumar, J., Hoe, N.G. and Sheble, G., "LFC Simulator for Price-Based Operation Part I: Modeling", IEEE Trans. Power System, Vol. 12, No. 2, pp. 527-532, 1997.
- [4] Donde, V., Pai, A. and Hiskens, I.A., "Simulation and Optimization in a LFC System after Deregulation", IEEE Trans. Power System Vol. 16, No. 3, pp. 481-489, 2001.
- [5] Lim, K.Y., Wang, Y. and Zhou, R., "Robust Decentralized Load Frequency Control of Multi-Area Power Systems", IEE Proc. Gener. Transm. Distrib., Vol. 143, No. 5, pp. 377-386, 1996.
- [6] Kazemi, M.H., Karrari, M. and Menhaj, M.B., "Decentralized Robust Adaptive Output Feedback Controller for Power System Load Frequency Control", Electr. Eng. Vol. 84, No. 2, pp. 75-83, 2002.
- [7] Feliachi, A., "Optimal Decentralized Load Frequency Control", IEEE Trans. Power System, Vol. 2, No. 2, pp. 379-384, 1987.
- [8] Liaw, C.M. and Chao, K.H., "On the Design of an Optimal Automatic Generation Controller for Interconnected Power Systems", Int. Journal Control, Vol. 58, No. 1, pp. 113-127, 1993.
- [9] Zeynelgil, H.L., Demirenen, A. and Sengor, N.S., "The Application of ANN Technique to Automatic Generation Control for Multi-Area Power System", Elect. Power Energy System, Vol. 24, No. 5, pp. 354-345, 2002.
- [10] Srinivasa Rao, R., Narasimham, S.V.L. and ramalingaraju, M., "Optimization of Distribution Network Configuration for Loss Reduction Using Artificial Bee Colony Algorithm", International Journal

Management, Vol. 49, No. 10, pp. 2656–2668, 2008.

زیر نویس‌ها

1. Load Frequency Control
2. Tie-Line
3. Artificial Bee Colony
4. Superconducting Magnetic Energy Storage
5. Settling Time
6. Overshoot
7. Independent System Operator
8. Load Following Contract
9. Augmented Generation Participation Matrix

Energy System, Vol. 29, No. 8, pp. 271–279, 2007.

- [20] Sheikh, M.R.I., Muyeen, S.M., Takahashi, R., Murata, T. and Tamura, J., “Improvement of Load Frequency Control with Fuzzy Gain Scheduled SMES Unit Considering Governor Dead-Band and GRC”, 5th International Conference on Electrical and Computer Engineering. ICECE 2008, pp. 20-22, December 2008.
- [21] Bevrani, H., Mitani Y. and Tsuji, K., “Robust Decentralized AGC in a Restructured Power System”, Energy Conversion Management, Vol. 45, No. 15-16, pp. 2297–2312, 2004.
- [22] Shayeghi, H., Shayanfar, H.A. and Malik, O.P., “Robust Decentralized Neural Networks Based LFC in a Deregulated Power System”, Electric Power System Research, Vol. 77, No. 3-4, pp. 241–251, 2007.
- [23] Karaboga, D., “An Idea Based on Honey Bee Swarm for Numerical Optimization”, Technical Report TR06, Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department, 2005.
- [24] Karaboga, D. and Akay, B., “A Comparative Study of Artificial Bee Colony Algorithm”, Applied Mathematics and Computation, Vol. 214, No. 1, pp. 108-132, 2009.
- [25] Karaboga, D. and Basturk, B., “Advances in Soft Computing: Foundations of Fuzzy Logic and Soft Computing”, Vol. 4529/2007 of LNCS, pp. 789–798. Springer-Verlag, 2007.
- [26] Karaboga, D. and Akay, B., “Artificial Bee Colony (ABC), Harmony Search and Bees Algorithms on Numerical Optimization”, Proceedings of IPROMS 2009 Innovative Production Machines and System Virtual Conference, Cardiff UK, 2009.
- [27] Pham, D.T., Ghanbarzadeh, A., Koc, E., Otri, S., Rahim, S., and Zaidi, M., “The Bees Algorithm - A Novel Tool For Complex Optimization Problems”, Proceedings of IPROMS 2006 Conference, pp. 454-461, 2006.
- [28] Shayeghi, H., Jalili, A. and Shayanfar, H.A., “A robust mixed H₂/H_∞ based LFC of a deregulated power system including SMES”, Energy Conversion and