

طراحی کنترل کننده فیدبک خروجی برای STATCOM برپایه میرایی نوسان‌های فرکانس

پایین با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی زنبوران عسل و بهینه‌سازی اجتماع ذرات

مسعود علی اکبر گلکار^۱، علی احمدیان^۲، جواد مدرسی^۳، امین صفری^۳

۱- استاد دانشکده برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - تهران - ایران

golkar@kntu.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد برق - قدرت، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - تهران - ایران

Ali.ahmadian1367@gmail.com

۳- مربی دانشکده فنی اهر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر - اهر - ایران

Asafari1650@yahoo.com

چکیده: امروزه با بزرگتر شدن مسائل و اهمیت یافتن سرعت رسیدن به پاسخ، از الگوریتم‌های جستجوی تصادفی به جای جستجوی همه جانبه فضای مساله، استقبال بیشتری می‌شود. در این مقاله، مقایسه عملکرد الگوریتم بهینه‌سازی زنبوران عسل (HBMO) و بهینه‌سازی اجتماع ذرات (PSO) در طراحی کنترل کننده فیدبک خروجی برای STATCOM با هدف میرایی نوسان‌های فرکانس پایین، ارائه شده است. مسأله طراحی در ناحیه وسیعی از شرایط عملکرد و تنظیمات سیستم به صورت یک مسأله بهینه‌سازی با تابع معیار چند منظوره تبدیل شده، با استفاده از هر دو الگوریتم HBMO و PSO حل می‌شود. کنترل کننده طوری تنظیم می‌شود تا مدهای الکترومکانیکی ناپایدار را به ناحیه مشخصی از صفحه مختلط انتقال دهد. تحلیل مقادیر ویژه و شبیه‌سازی غیر خطی زمانی تحت اغتشاشات مختلف، با استفاده از هر دو پارامتر کنترلی STATCOM (کنترل ولتاژ خازن و کنترل ولتاژ ترمینال) (جدول ۴)، کارایی کنترل کننده پیشنهادی را نشان می‌دهد. تحلیل نتایج نشان می‌دهد که طراحی کنترل کننده میرایی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی زنبوران عسل، در مقایسه با الگوریتم اجتماع ذرات در میرا کردن نوسان‌های فرکانس پایین عملکرد بهتری داشته، همچنین، طراحی کنترل کننده بر اساس کنترل ولتاژ خازن (پارامتر Φ) در مقایسه با کنترل ولتاژ ترمینال (پارامتر C) در میرا کردن نوسان‌های فرکانس پایین کارایی بهتری دارد و پایداری دینامیکی سیستم را افزایش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم بهینه‌سازی زنبوران عسل، الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات، پایداری دینامیکی سیستم قدرت، جبران ساز سنکرون استاتیکی، میرایی نوسان‌های توان.

۱- مقدمه

کارگیری روش‌های بهینه‌سازی فراکاوشی به طور گسترده‌ای مورد توجه واقع شد. وسعت کاربرد، سهولت استفاده و قابلیت رسیدن به پاسخ‌های نزدیک به مقدار بهینه، از جمله دلایل توجه روزافزون محققان به این روش‌هاست [۱]. اگرچه در گذشته، روش‌هایی مانند الگوریتم ژنتیک، سرد شدن تدریجی فلزات، باکتریال و روش‌های هوشمند دیگر، به صورت موفق برای حل مسائل بهینه‌سازی استفاده شده است، لیکن تحقیقات اخیر، نقص‌های عملکردی آنها را شناسایی کرده است. این تنزل شایستگی، بخصوص در توابع هدف پیچیده تر (مثلا تابعی که در آن پارامترهای بهینه شده وابستگی شدیدی به هم دارند) و همچنین، توابع با

در دهه‌های گذشته، با توجه به مشکلات ذاتی روش‌های بهینه‌سازی بر پایه گرادیان توابع، مانند گیر افتادن در نقاط بهینه محلی، افزایش پیچیدگی محاسبات و عدم قابلیت اعمال این روش‌ها به دسته خاصی از توابع، هدف به

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۰/۱۱/۱۸

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۱/۳/۲

نام نویسنده مسئول : علی احمدیان

نشانی نویسنده مسئول : ایران - تهران - پل سیدخندان

- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - دانشکده برق

تعداد پارامترهای بهینه شده بیشتر، ظاهر شدند. علاوه بر این، کاهش توانایی جستجو در نتیجه همگرایی نابهنگام، احتمال گیرافتادن در نقاط بهینه محلی این روش ها را افزایش داده است [۳ و ۲].

اخیراً، الگوریتم بهینه سازی زنبوران عسل^۱ (HBMO) و الگوریتم بهینه سازی اجتماع ذرات^۲ (PSO)، به علت قابلیت های منحصر به فرد، در میان روش های مختلف بهینه سازی، بیشتر مورد توجه قرار گرفته اند [۴ و ۵].

الگوریتم HBMO، بر اساس پروسه جفت گیری زنبوران عسل است که دارای قابلیت حل مسائل پیچیده و سرعت همگرایی بالایی بوده، قرار گرفتن آنها در نقاط محلی به مراتب از الگوریتم های دیگر کمتر است. الگوریتم بهینه سازی اجتماع ذرات، یک تکنیک بهینه سازی مبتنی بر قوانین احتمال است که به علت قابلیت بالا در حل مسائل پیچیده و توابع عددی مختلف رواج روز افزونی یافته است.

اولویت اصلی سیستم قدرت در زمان بهره برداری، امنیت و پایداری آن است و باید سیستم کنترلی اندازه فرکانس و ولتاژ را تحت هر اغتشاشی از قبیل افزایش ناگهانی بار، خارج شدن یک ژنراتور از مدار، یا قطع شدن یک خط انتقال که بر اثر عواملی، همچون: خطاهای انسانی، عیب فنی تجهیزات، بلاهای طبیعی و غیره پدید می آید، در سطوح ثابتی حفظ کنند. این وضعیت به علت قوانین جدید بازار برق، استرس های مضاعفی را برای بهره برداران ایجاد می کند [۶ و ۷]. نوسان های فرکانس خیلی پایین که در محدوده ۰/۲ تا ۳ هرتز است، از توسعه سیستم های قدرت بزرگ و اتصال آنها به هم پدید می آید. این نوسان ها به مدت طولانی در سیستم ادامه داشته، چنانچه میرایی کافی ایجاد نشود، دامنه این نوسان ها افزایش یافته، باعث جداسازی و ناپایداری سیستم می شود [۸]. استفاده از پایدارساز سیستم قدرت^۳ (PSS) برای میرا کردن نوسان ها و افزایش پایداری سیستم قدرت، به لحاظ فنی و اقتصادی مناسب است. لذا روش های مختلفی برای طراحی این پایدارسازها مطرح شده است [۹-۱۱]. با این وصف، این پایدارسازها، به دلیل منجر شدن به پیش فاز ضریب قدرت، دارای یک اشکال اساسی هستند که به از دست رفتن پایداری سیستم بر اثر اغتشاشات بزرگ، بویژه خطای سه فاز در ترمینال های ژنراتور منجر می شود [۱۲]. در سال های اخیر سیستم های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر^۴ (FACTS) به عنوان یکی از روش های مؤثر برای

بهبود عملکرد کنترل پذیری سیستم و محدودیت های انتقال توان مطرح شده است. با مدل سازی ولتاژ شین، شیفت فاز بین شین ها و راکتانس خط انتقال، کنترل کننده های FACTS می توانند باعث افزایش در انتقال توان در حالت دائمی گردند [۱۳]. این کنترل کننده ها برای کنترل حالت دائمی نرمال به یک سیستم قدرت اضافه می شوند، اما به علت پاسخ سریع آنها، همچنین می توانند برای بهبود پایداری سیستم قدرت با میرا کردن نوسان های فرکانس پایین به کار برده شوند [۱۴-۱۷]. جبران کننده سنکرون استاتیکی^۵ (STATCOM) یکی از اعضای ادوات FACTS است که به صورت موازی به سیستم وصل می شود. این کنترل کننده به علت ظرفیت جریان راکتیو بزرگتر، پاسخ سریعتر، کنترل پایداری بهتر، هارمونیک کمتر، اندازه کوچکتر و ... از نظر پایداری دینامیکی سیستم قدرت، مشخصات میرایی بهتری نسبت به جبران ساز وار استاتیکی^۶ (SVC) دارد [۱۸ و ۱۹].

مدل های دینامیکی مختلفی برای STATCOM برای طراحی کنترل کننده مناسب، برای کنترل پخش بار، ولتاژ و میرایی نوسان ها ارائه شده است [۱۹]. وانگ در [۱۴] مدل خطی هفرون-فلپس سیستم قدرت همراه با STATCOM و کاربردهای آن را در تحلیل میرایی نوسان ها بیان کرده است. با استفاده از این مدل، کنترل کننده های متفاوتی به روش های مختلف ارائه شده است [۲۰-۲۳].

در این مقاله مسأله طراحی کنترل کننده مؤثر برای STATCOM به عنوان یک مسأله بهینه سازی در نظر گرفته شده است و از هر دو الگوریتم HBMO و PSO برای به دست آوردن پارامترهای بهینه شده استفاده شده است. کنترل کننده طوری تنظیم می شود که مدهای الکترومکانیکی ناپایدار را به ناحیه مشخصی از صفحه مختلط انتقال دهد. کارایی کنترل کننده پیشنهادی به وسیله مطالعات مقادیر ویژه و شبیه سازی غیر خطی برای میرایی نوسان های فرکانس پایین تحت شرایط کاری مختلف بررسی شده است. بررسی نتایج به دست آمده نشان می دهد که طراحی کنترل کننده میرایی با استفاده از الگوریتم HBMO در مقایسه با الگوریتم PSO در میرا کردن نوسان های فرکانس پایین عملکرد بهتری داشته، همچنین طراحی کنترل کننده بر اساس کنترل ولتاژ خازن (پارامتر ϕ) در مقایسه با کنترل ولتاژ ترمینال (پارامتر C) در میرا کردن

زنبور عسل مذکر با یک ملکه به طور احتمالی با استفاده از تابع احتمالاتی نورد به صورت زیر جفت گیری می کند:

$$\text{Prob}(D, Q) = \exp(-\Delta(f) / s(t)) \quad (1)$$

به طوری که $\text{Prob}(D, Q)$ احتمال اضافه کردن اسپرم زنبور مذکر D به کیسه ملکه Q است (احتمال جفت‌گیری موفق). $\Delta(f)$ اختلاف بین تابع شایستگی ملکه و زنبور نر و $S(t)$ سرعت ملکه در زمان t است. پس از هر انتقال در فضا، سرعت و انرژی ملکه مطابق معادلات زیر کاهش می‌یابد:

$$s(t+1) = \alpha \times s(t) \quad (2)$$

$$E(t+1) = E(t) - \gamma \quad (3)$$

در روابط (۲) و (۳) α فاکتوری است که بین صفر تا یک تغییر می‌کند (برای کاهش سرعت ملکه) و γ ضریبی بین [۰-۱] است که مقدار انرژی کاهش پس از هر جفت‌گیری است.

در ابتدا سرعت ملکه به طور اتفاقی تولید می‌شود. در شروع جفت‌گیری پروازی، نرهایی که به وسیله ملکه انتخاب می‌شوند، به طور تصادفی در معادله (۱) تولید می‌یابند. اگر جفت‌گیری با موفقیت انجام شد، ذخیره اسپرم نر در کیسه ملکه رخ خواهد داد. با استفاده از ترکیب ژنوتایپ‌های نرها و ملکه، نوزاد جدیدی شکل می‌گیرد که می‌تواند با کمک کارگران رشد یابد. یکی از تفاوت‌های عمده الگوریتم HBMO از الگوریتم‌های قدیمی تکاملی این است که ذخیره اسپرم‌های مختلف نرها در کیسه ملکه به این علت است که ملکه از آنها برای ایجاد محلول جدید برای با قابلیت‌ترین نوزاد استفاده می‌کند.

برای به کارگیری الگوریتم HBMO گام‌های زیر در نظر گرفته می‌شود:

گام اول: تعریف داده‌های ورودی

گام دوم: تولید جمعیت اولیه

گام سوم: محاسبه مقدار تابع هدف

گام چهارم: دسته‌بندی جمعیت اولیه مطابق مقادیر تابع هدف

گام پنجم: انتخاب ملکه؛ زنבורی که شایستگی بیشتری نسبت به بقیه دارد، به عنوان ملکه در نظر گرفته می‌شود.

گام ششم: تولید تصادفی سرعت ملکه

گام هفتم: انتخاب جمعیت اولیه زنبوران مذکر

نوسان‌های فرکانس پایین کارایی بهتری دارد و پایداری دینامیکی سیستم را افزایش می‌دهد.

در بخش دوم این مقاله، الگوریتم‌های بهینه‌سازی زنبوران عسل و اجتماع ذرات فرمول بندی و مطرح می‌شود. در بخش سوم، مدل غیر خطی سیستم قدرت تک ماشینه متصل شده به شین بینهایت ارائه و در بخش چهارم مدل خطی شده این سیستم مطرح می‌شود. در بخش پنجم سیستم کنترل STATCOM و در بخش ششم، طراحی کنترل کننده مقاوم با استفاده از الگوریتم‌های پیشنهادی بیان می‌شود. نهایتاً برای ارزیابی مقاوم بودن کنترل کننده، آنالیز مقادیر ویژه و شبیه‌سازی غیر خطی زمانی به ازای سناریوی اعمالی در بخش هفت ارائه می‌شود که نتایج حاصل از آن، مؤثر بودن کنترل کننده پیشنهادی را تایید می‌کند و نتیجه‌گیری از مطالب ارائه شده نیز در بخش هشت این نوشتار انجام می‌گیرد.

۲- توضیح الگوریتم بهینه‌سازی زنبوران

عسل و الگوریتم اجتماع ذرات

۲-۱- الگوریتم بهینه‌سازی زنبوران عسل

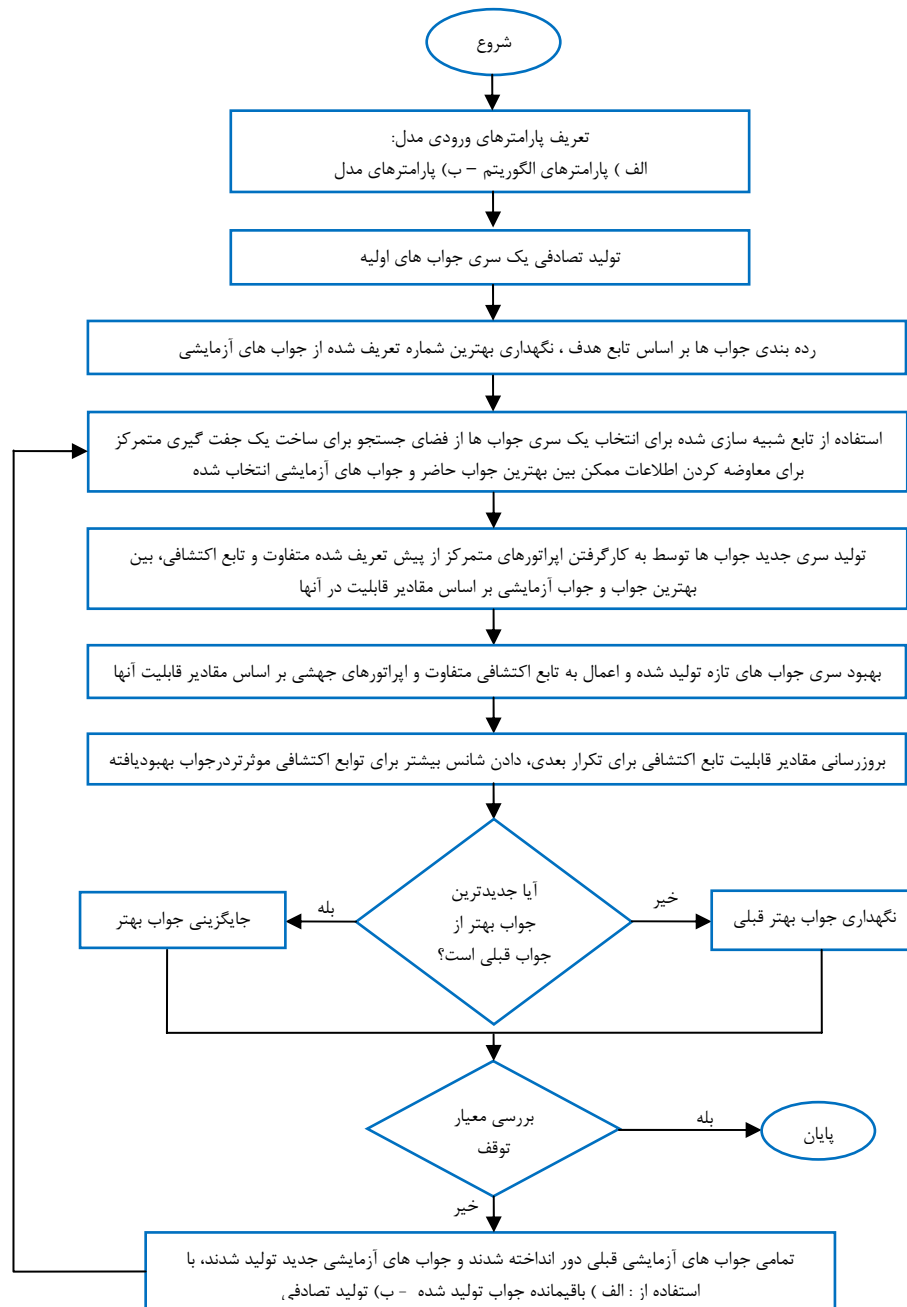
زنبور عسل حشره‌ای اجتماعی است که به عنوان یک عضو، فقط در داخل این اجتماع می‌تواند زنده بماند. فعالیت زنبور عسل بسیاری از ویژگی‌هایی مثل کار گروهی و ارتباط با همدیگر را نشان می‌دهد. در زندگی اجتماعی زنبور عسل معمولاً یک زنبور تخم‌گذار واحد (ملکه) وجود دارد که طول عمر آن از تمامی زنبورهای دیگر بیشتر است و معمولاً بسته به فصل حدود ۶۰۰۰۰ کارگر یا بیشتر دارد. طول عمر زنبور ملکه در حدود ۵ یا ۶ سال است، در حالی که بقیه زنبورها، مخصوصاً زنبوران کارگر طول عمرشان به یک سال هم نمی‌رسد. زنبوران نر پس از عمل جفت‌گیری می‌میرند [۴ و ۲۴].

تلقیح با مرگ تدریجی زنبورهای نر پایان می‌یابد و به وسیله آن، ملکه‌ها علامت جفت‌گیری دریافت می‌کنند. در فرآیند جفت‌گیری هر زنبور نر فقط یک بار می‌تواند شرکت کند، اما این در حالی است که ملکه‌ها چندین بار می‌توانند جفت‌گیری کنند. این ویژگی‌ها، جفت‌گیری زنبوران عسل را در میان سایر حشرات بسیار جالب کرده است.

بیان ریاضی الگوریتم بهینه‌سازی زنبوران عسل

گام هشتم: تولید ماتریس کیسه اسپرم ملکه در جفت گیری پروازی
 گام نهم: فرآیند تخم گذاری زنبورها
 گام دهم: تغذیه نوزادان انتخاب شده و ملکه به وسیله زنبوران کارگر با ماده ژلی
 گام یازدهم: محاسبه مقدار تابع هدف برای مجموعه جواب ایجاد شده

گام دوازدهم: بررسی معیار توقف الگوریتم یا پایان یافتن تعداد تکرار.
 در پایان الگوریتم، اگر معیار توقف رضایت بخش باشد، ملکه موجود به عنوان پاسخ نهایی انتخاب می شود. در غیر این صورت، به گام سوم بازگشته، تمامی مراحل قبل تکرار می شود تا به معیار همگرایی رسیده شود. روندنمای محاسباتی الگوریتم HBMO به صورت کامل در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱): فلوجارت الگوریتم HBMO

۲-۲- الگوریتم بهینه سازی اجتماع ذرات

الگوریتم بهینه سازی اجتماع ذرات یک تکنیک بهینه سازی مبتنی بر قوانین احتمال است که به علت قابلیت بالا در حل مسایل پیچیده و توابع عددی مختلف رواج روزافزونی یافته است. این الگوریتم به جای الهام گرفتن از مکانیزم‌های تکاملی، از رفتار اجتماعی جانداران، مانند دسته های پرندگان و ماهیان متاثر بوده است. رفتار اعضای تشکیل دهنده یک دسته، مبتنی بر یک سری قوانین مانند هماهنگی سرعت با نزدیکترین همسایه و همچنین شتاب گیری بر حسب فاصله است [۲۵]. به طور کلی، مشخصه اصلی ذرات هوشمند سازگاری، تنوع در پاسخ، نزدیکی، کیفیت و پایداری هستند. در هر مرحله از حرکت دسته، مکان هر ذره یا فرد با دو مقدار بهترین مشخص می شود. در این الگوریتم هر عضو گروه که یک ذره نامیده می شود، دارای یک مقدار شایستگی است که در تابع هدف تعیین می شود. نخستین مقدار بهترین جواب از لحاظ برازندگی است که تاکنون برای هر ذره به طور مجزا به دست آمده و دیگری بهترین مقداری است که تاکنون توسط تمام ذرات در میان کل ذرات، به دست آمده است. تخصیص جواب ها میان بهترین مقادیر فردی و گروهی تامین کننده تنوع در پاسخ است. همچنین، در مرجع [۲۶] بیان شده، که در مسایل بهینه سازی که غیرخطی و مشتق ناپذیر و یا دارای ابعاد زیادی هستند PSO توانمند بوده، بسیاری از مشکلات الگوریتم ژنتیک را ندارد، زیرا در PSO اطلاعات بین تمامی ذرات به اشتراک گذاشته می شود و نرخ همگرایی سریعتری نسبت به الگوریتم ژنتیک دارد.

در این روش با تنظیم مسیر حرکت جمعیت ذرات در فضای مسأله بر پایه اطلاعات مربوط به بهترین شایستگی قبلی مربوط به هر ذره و بهترین شایستگی قبلی مربوط به

همسایگان هر ذره، عمل جستجو را در فضای مسأله انجام می دهد.

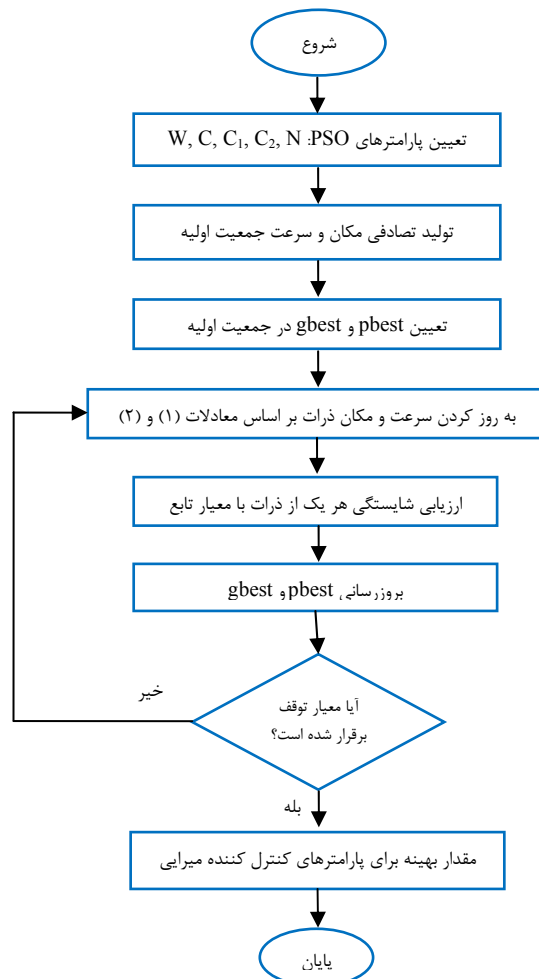
PSO با یک جمعیت تصادفی از ذرات در فضای D بعدی شروع می شود. ذره λ م با بردار $X_i = (X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{iD})$ نمایش داده می شود. مقدار ارزیابی تابع معیار برای هر ذره (pbest) در بردار $P_i = (P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{iD})$ ذخیره می شود. بهترین مقدار گروه (gbest) توسط یک ذره در جمعیت حاصل می شود. در PSO سرعت هر ذره در هر مرحله متناسب با مقدار pbest و gbest مطابق معادله (۱) تغییر می کند. سرعت ذره λ م با بردار $V_i = (V_{i1}, V_{i2}, \dots, V_{iD})$ نمایش داده می شود. موقعیت و سرعت ذره λ م مطابق با معادله (۲) مقداردهی می شود [۱۸].

$$v_{id} = \omega v_{id} + c_1 \cdot rand() \times (P_{id} - x_{id}) + c_2 \cdot rand() \times (P_{gd} - x_{id}) \quad (4)$$

$$x_{id} = x_{id} + c \cdot v_{id} \quad (5)$$

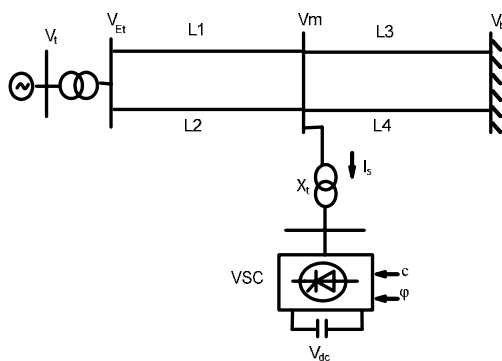
$$w = \frac{w_{\max} - w_{\min}}{iter_max} \cdot iteration \quad (6)$$

در روابط بالا، P_{gd} و P_{id} به ترتیب مقدار pbest و gbest است. همگرایی مسأله به پارامترهای PSO مانند w, c_1, c_2 وابسته است. مقادیر c_1 و c_2 را معمولاً برابر و در بازه $0.5 - 0.9$ در نظر می گیرند. w نشانگر وزنی اینرسی برای سرعت گیری ذرات بوده، به طور خطی از مقدار 0.9 تا 0.4 در طول اجرا تغییر می کند. روند نمای الگوریتم پیشنهادی برای تنظیم پارامترهای کنترل کننده در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل (۲): فلوجارت الگوریتم PSO

تولید می کند. اختلاف ولتاژ بین ولتاژ STATCOM و ولتاژ AC، تبادل توان اکتیو و راکتیو بین STATCOM و سیستم قدرت را ایجاد می کند که به وسیله تنظیم کردن دامنه V_0 و فاز ϕ می تواند کنترل شود [۱۴].



شکل (۳): سیستم تک ماشینه متصل شده به شین بینهایت همراه STATCOM با

۳- مدل سازی سیستم قدرت

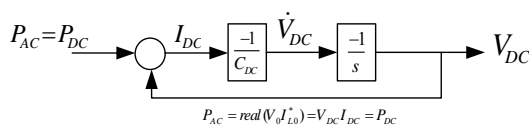
یک سیستم قدرت تک ماشینه متصل شده به شین بی نهایت (SMIB)^v همراه با STATCOM در شکل (۳) نشان داده شده است. ماشین سنکرون توان را از طریق یک خط انتقال دوبل و یک STATCOM منتقل می کند. اطلاعات سیستم در پیوست انتهایی آورده شده است. سیستم شامل یک ترانسفورماتور با یک راکتانس نشی، یک مبدل منبع ولتاژ سه فاز مبتنی بر ترستورهای خاموش شونده از طریق گیت[^] (GTO)، و یک خازن DC است. مبدل منبع ولتاژ، یک منبع ولتاژ AC قابل کنترل $v_o(t) = V_0 \sin(\omega t - \phi)$ پشت یک راکتانس نشی

دینامیک ولتاژ خازن:

با توجه به اینکه دینامیک ولتاژ خازن تاثیر زیادی بر سیستم قدرت دارد، بنابراین اثر آن باید در مدل سازی در نظر گرفته شود. اگر کانورتر بدون تلفات فرض شود، توان اکتیو مبادله شده سیستم با کانورتر برابر با توانی است که خازن با کانورتر مبادله می کند. ($P_{DC}=P_{AC}$). با توجه به این رابطه و رابطه بین ولتاژ و جریان خازن می توان به رابطه زیر دست یافت:

$$\dot{V}_{dc} = \frac{I_{dc}}{C_{dc}} = \frac{c}{C_{dc}} (I_{Lod} \cos \varphi + I_{Loq} \sin \varphi) \quad (9)$$

C_{dc} ظرفیت خازن DC و I_{dc} جریان خازنی و همچنین \dot{I}_{Loq} و \dot{I}_{Lod} به ترتیب مولفه d و q جریان STATCOM هستند. در شکل (۵) مدل دینامیکی ولتاژ خازن DC به صورت بلوک دیاگرام نشان داده شده است.



شکل (۵): مدل دینامیکی ولتاژ خازن DC

دینامیک سیستم تحریک و ژنراتور به وسیله یک مدل سه سطحی به صورت زیر بیان می شود [۱۴ و ۲۰]:

$$\dot{\delta} = \omega_0 (\omega - 1) \quad (10)$$

$$\dot{\omega} = (P_m - P_e - D\Delta\omega) / M \quad (11)$$

$$\dot{E}'_q = (-E_q + E_{fd}) / T'_{do} \quad (12)$$

$$\dot{E}'_{fd} = (-E_{fd} + K_a (V_{ref} - V_t)) / T_a \quad (13)$$

۴- مدل خطی شده سیستم قدرت

یک مدل دینامیکی خطی با استفاده از خطی سازی مدل غیر خطی حول یک نقطه کار به دست می آید. برای محاسبه ضرایب مدل خطی شده سیستم، مقادیر ولتاژ شین و جریان خطوط را باید بر مبنای متغیرهای حالت محاسبه نمود تا با خطی سازی روابط بتوان ضرایب مدل را برای یک کار معین استخراج نمود. جریان خروجی از ژنراتور در مرجع $d-q$ به صورت زیر محاسبه می شود:

۳-۱- مدل سازی دینامیکی STATCOM

با توجه به مدل دینامیکی ارائه شده در [۱۴]، یک مدل ساده و مفید برای مطالعات دینامیکی ارائه شده است. بخش های مختلف مدل سازی دینامیکی STATCOM به صورت زیر است:

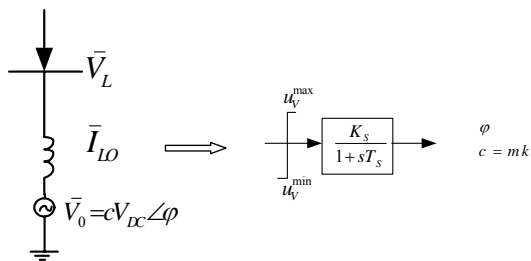
کانورتر منبع ولتاژ:

به علت سرعت بالای سوئیچینگ و صرف نظر کردن از حالت های گذرا می توان از یک تابع انتقال با ثابت زمانی Tw برای بیان دینامیک کانورتر استفاده کرد. برای ترانسفورماتور کاهنده از یک راکتانس سلفی با امپدانس X_{SDT} استفاده می شود. در اینجا فرض شده کانورتر از روش کنترل مدولاسیون عرض پالس (PWM) برای سوئیچ زنی GTO ها استفاده می کند. با توجه به شکل (۴) کانورتر منبع ولتاژ قادر است یک ولتاژ AC قابل کنترل را با دامنه و زاویه دلخواه طبق رابطه (۸) تولید کند:

$$\bar{I}_{Lo} = I_{Lod} + jI_{Loq} \quad (7)$$

$$V_o = cV_{dc} (\cos \varphi + j \sin \varphi) = cV_{dc} \angle \varphi \quad (8)$$

در مبدل PWM، $c = mk$ است که k نسبت ولتاژ مؤثر AC به DC است که به ساختار مبدل وابسته است. m نسبت مدولاسیون است که توسط PWM تعریف می شود و همچنین \dot{I}_{Loq} و \dot{I}_{Lod} به ترتیب مؤلفه d و q جریان STATCOM هستند. V_{dc} ولتاژ خازن و زاویه φ ، زاویه تعریف شده به وسیله PWM است. اندازه و فاز V_0 می تواند به ترتیب توسط c و φ کنترل شود. با تنظیم ولتاژ V_0 ، می توان توان اکتیو و راکتیو مبادله شده بین STATCOM و سیستم قدرت را کنترل نمود.



شکل (۴): مدل دینامیکی کانورتر

$$\Delta E'_q = K_4 \Delta \delta + K_3 \Delta E'_q + K_{qdc} \Delta v_{dc} + K_{qc} \Delta c + K_{q\phi} \Delta \phi \quad (25)$$

$$\Delta V_t = K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta E'_q + K_{vdc} \Delta v_{dc} + K_{vc} \Delta c + K_{v\phi} \Delta \phi \quad (26)$$

که در آن: $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6, K_7, K_8, K_9, K_{qu}, K_{vu}$ ثابت های خطی سازی هستند. مدل فضای حالت سیستم به صورت زیر به دست می آید:

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (27)$$

که در آن: x بردار حالت و u بردار کنترل و A و B به صورت زیر هستند:

$$x = \begin{bmatrix} \Delta \delta & \Delta \omega & \Delta E'_q & \Delta E_{fd} & \Delta v_{dc} \end{bmatrix}^T ;$$

$$u = \begin{bmatrix} \Delta c & \Delta \phi \end{bmatrix}^T$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & w_0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_1}{M} & 0 & -\frac{K_2}{M} & 0 & -\frac{K_{pdc}}{M} \\ -\frac{K_4}{T'_{do}} & 0 & -\frac{K_3}{T'_{do}} & -\frac{1}{T'_{do}} & -\frac{K_{qdc}}{T'_{do}} \\ -\frac{K_A K_5}{T_A} & 0 & -\frac{K_A K_6}{T_A} & -\frac{1}{T_A} & -\frac{K_A K_{vdc}}{T_A} \\ K_7 & 0 & K_8 & 0 & -K_9 \end{bmatrix} ;$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\frac{K_{pc}}{M} & -\frac{K_{p\phi}}{M} \\ -\frac{K_{qc}}{T'_{do}} & -\frac{K_{q\phi}}{T'_{do}} \\ -\frac{K_A K_{vc}}{T_A} & -\frac{K_A K_{v\phi}}{T_A} \\ K_{dc} & K_{d\phi} \end{bmatrix}$$

بلوک دیاگرام مدل دینامیکی خطی شده سیستم قدرت تک ماشینه متصل شده به شین بی نهایت همراه با STATCOM در شکل (۶) نشان داده شده است:

$$I_{td} = \frac{(1 + \frac{X_{LB}}{X_{SDT}})e'_q - \frac{X_{LB}}{X_{SDT}}mV_{dc} \sin \varphi - V_b \cos \varphi}{X_{tL} + X_{LB} + \frac{X_{tL}}{X_{LB}} + (1 + \frac{X_{LB}}{X_{SDT}})x'_d} \quad (14)$$

$$I_{tq} = \frac{\frac{X_{LB}}{X_{SDT}}mV_{dc} \cos \varphi + V_b \sin \varphi}{X_{tL} + X_{LB} + \frac{X_{tL}}{X_{LB}} + (1 + \frac{X_{LB}}{X_{SDT}})x_q} \quad (15)$$

با توجه به معادلات (۱۴) و (۱۵) جریان تزریقی به STATCOM بر اساس متغیرهای حالت سیستم به صورت زیر محاسبه می شود:

$$I_{Lod} = \frac{e'_q - (x'_d + X_{tL})I_{tLq} - mV_{dc} \sin \varphi}{X_{SDT}} \quad (16)$$

$$I_{Loq} = \frac{mV_{dc} \cos \varphi - (x'_d + X_{tL})I_{tLq}}{X_{SDT}} \quad (17)$$

که در آن:

$$X_{tL} = X_T + \frac{X_L}{2}; \quad X_{LB} = \frac{X_L}{2} \quad (18)$$

X_T, X'_d و x_q به ترتیب راکتانس خط انتقال، راکتانس گذرای محور d و راکتانس محور q هستند.

مدل خطی سیستم قدرت نشان داده شده در شکل (۳)، به صورت زیر به دست می آید:

$$\Delta \dot{\delta} = \omega_0 \Delta \omega \quad (19)$$

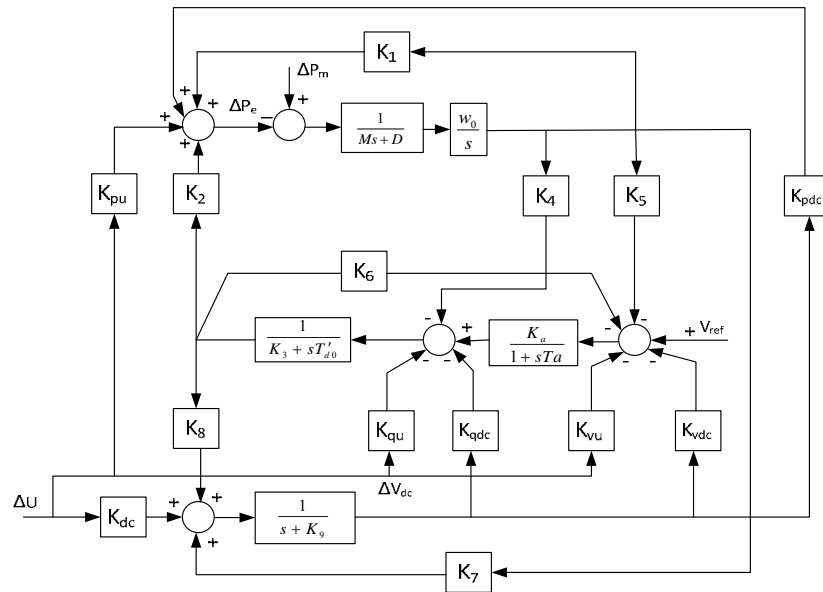
$$\Delta \dot{\omega} = (-\Delta P_e - D \Delta \omega) / M \quad (20)$$

$$\Delta \dot{E}' = (-\Delta E_q + \Delta E_{fd}) / T'_{do} \quad (21)$$

$$\Delta \dot{E}_{fd} = (K_A (\Delta v_{ref} - \Delta v) - \Delta E_{fd}) / T_A \quad (22)$$

$$\Delta \dot{v}_{dc} = K_7 \Delta \delta + K_8 \Delta E'_q - K_9 \Delta v_{dc} + K_{dc} \Delta c + K_{d\phi} \Delta \phi \quad (23)$$

$$\Delta P_e = K_1 \Delta \delta + K_2 \Delta E'_q + K_{pdc} \Delta v_{dc} + K_{pc} \Delta c + K_{p\phi} \Delta \phi \quad (24)$$



شکل (۶): مدل هفرون فلیپس سیستم تک ماشینه متصل شده به شین بی‌نهایت همراه با STATCOM

غیر مستقیم از طریق کنترل کردن ولتاژ خازن DC کنترل شود که آن هم به نوبه خود با زاویه ولتاژ خروجی کنترل می‌شود. این شیوه کنترل، کنترل بر پایه پارامتر φ نامیده می‌شود. در روشی دیگر جریان رکتیو مستقیماً با مکانیزم کنترل ولتاژ داخلی (PWM) کنترل می‌شود. (در این حالت ولتاژ DC با کنترل زاویه فاز ثابت نگه داشته می‌شود.) این شیوه، روش کنترل بر پایه پارامتر C نامیده می‌شود.

مدل هفرون فلیپس سیستم تک ماشینه متصل شده به شین بی‌نهایت همراه با STATCOM، از طریق خطی سازی سیستم قدرت غیر خطی حول نقطه کار مشخص به دست می‌آید. ضرایب این مدل از معادلات خطی شده و اطلاعات منحصر به فرد هر سیستم به دست می‌آید.

۵- سیستم کنترل STATCOM

کنترل کننده میرایی نوسان‌های توان برای ایجاد یک گشتاور الکتریکی برای مقابله با انحراف سرعت طراحی می‌شود. در روش جریان فاز، انحراف سرعت به عنوان ورودی کنترل کننده میرایی در نظر گرفته می‌شود. مقدار V_0 و زاویه ولتاژ خروجی φ ، دو پارامتر داخلی هستند که از طریق آن می‌توان توان حقیقی و رکتیوی که کانونرتر با سیستم AC مبادله می‌کند، تعیین نمود. اگر کانونرتر محدود به مبادله توان رکتیو باشد، آنگاه ورودی مرجع به کنترل داخلی، توان رکتیو مورد نیاز است و با توجه به آن کنترل داخلی مقدار و زاویه فاز ولتاژ خروجی کانونرتر را استنتاج می‌کند تا با سوئیچ زنی، ولتاژ DC مورد نیاز را برای خازن DC برقرار نماید، زیرا مقدار ولتاژ خروجی AC مستقیماً متناسب با ولتاژ خازن DC است. به علت این تناسب، جریان رکتیو خروجی، در یک رویکرد می‌تواند به طور

۵-۱- کنترل کننده میرایی فیدبک خروجی

یک سیستم قدرت را می‌توان توسط مدل فضای حالت زمان ثابت خطی به صورت زیر بیان کرد:

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (28)$$

$$y = Cx \quad (29)$$

در معادلات بالا، x ، y و u به ترتیب بردارهای ورودی، بردار خروجی و بردار حالت خطی شده سیستم است. ضرایب A ، B و C ماتریس‌های ثابت هستند که به نقطه کار سیستم بستگی دارند. مقادیر ویژه ماتریس حالت A ، مدهای سیستم هستند که پایداری سیستم را بر اثر اغتشاشات کوچک تعیین می‌کنند. اگر قسمت حقیقی همه مقادیر ویژه،

اینکه، انتخاب بهره های فیدبک خروجی برای STATCOM به عنوان یک کنترل کننده میرایی، یک مسأله بهینه سازی پیچیده است، از این رو، برای افزایش میرایی سیستم برای مدهای الکترومکانیکی، یک تابع هدف چند منظوره بر اساس مقادیر ویژه در نظر گرفته شده است که شامل دو تابع هدف مجزاست که با نسبت وزنی مناسب یک تابع هدف مرکب را تشکیل می دهد. برای به دست آوردن مقادیر بهینه برای تابع هدف، از هر دو الگوریتم HBMO و PSO استفاده شده است. تابع هدف چند منظوره با نسبت وزنی مناسب به صورت زیر در نظر گرفته می شود:

$$J_1 = \sum_{j=1}^{NP} \sum_{\sigma_i \geq \sigma_0} (\sigma_0 - \sigma_i)^2, \quad (33)$$

$$J_2 = \sum_{j=1}^{NP} \sum_{\xi_i \leq \xi_0} (\xi_0 - \xi_i)^2,$$

$$J = J_1 + aJ_2$$

σ_{ij} و ξ_{ij} قسمت حقیقی و نسبت میرایی مقدار ویژه λ_m در نقطه کاری λ_m است. مقدار α برابر با ۱۰ و NP نیز برابر با تعداد نقاط کار مورد نظر در مسأله بهینه سازی است. با در نظر گرفتن J_1 مقادیر ویژه غالب به سمت چپ خط $s = \sigma_0$ مطابق با شکل ۷ (الف) در صفحه مختلط انتقال داده شده است که این کار باعث تامین پایداری نسبی در سیستم می شود. به طور مشابه، اگر تابع هدف J_2 مورد نظر باشد ماکزیمم فراجش مقادیر ویژه محدود شده، مقادیر ویژه به ناحیه مشخص شده در شکل ۷ (ب) انتقال داده می شود. تابع هدف چند منظوره J هم مقادیر ویژه سیستم را به ناحیه مشخص شده در ناحیه نشان داده شده در شکل ۷ (ج) انتقال می دهد.

منفی باشد، سیستم پایدار است. یک کنترل کننده فیدبک خروجی ساختار زیر را دارد:

$$u = -Gy \quad (30)$$

با جای گذاری معادله (۳۰) در معادله (۲۸)، معادله حالت زیر به دست می آید:

$$\dot{x} = A_C x \quad (31)$$

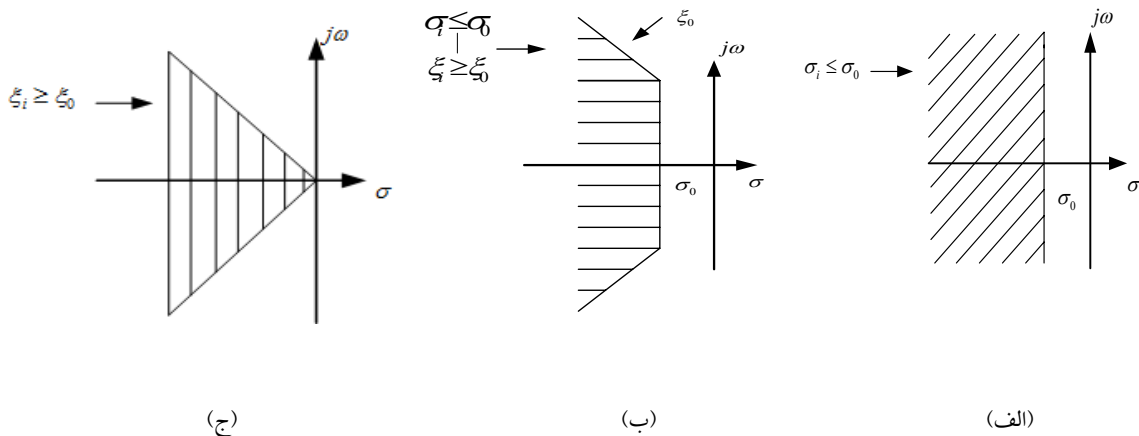
در رابطه (۳۱) A_C ماتریس حالت حلقه بسته است که به صورت زیر است:

$$A_C = A - BGC \quad (32)$$

فقط متغیرهای $\Delta\omega$ ، ΔP_e و ΔV_t در دسترس هستند که به عنوان سیگنال ورودی هر یک از کنترل کننده ها است. بنابراین، پیاده سازی کنترل کننده پیشنهادی، امکان پذیرتر است. با انتخاب مناسب بهره G مقادیر ویژه ماتریس حلقه بسته A_C به سمت چپ صفحه مختلط انتقال می یابد و عملکرد مطلوب کنترل کننده به دست می آید.

۶- طراحی کنترل کننده STATCOM با استفاده از روش های هوشمند پیشنهادی

در روش پیشنهادی، پارامترهای کنترل کننده STATCOM به صورت بهینه برای پایداری دینامیکی کل سیستم، تنظیم می شود. هر دو پارامتر کنترل STATCOM (کنترل ولتاژ خازن (φ) و کنترل ولتاژ ترمینال (C)) می تواند برای ایجاد گشتاور میرایی مدل سازی شود. با توجه به



شکل (۷): نواحی مشخص شده برای توابع هدف

مسأله طراحی به عنوان مسأله بهینه سازی مقید فرمول

بندی می شود که قيود آن به صورت زیر است:

$$T_{1min} \leq T_1 \leq T_{1max}$$

$$T_{2min} \leq T_2 \leq T_{2max}$$

$$T_{3min} \leq T_3 \leq T_{3max}$$

روش پیشنهادی از تکنیک HBMO و PSO برای حل

مسأله بهینه سازی استفاده کرده تا مجموعه بهینه از پارامترهای کنترل کننده به دست آید. تابع هدف داده شده در معادله (۳۳) در شرایط عملکرد مختلف صورت می گیرد. شرایط عملکرد مورد نظر در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول (۱): شرایط عملکرد بر حسب پریونیت

شرایط عملکرد	P	Q	X _L
شرایط نامی	۰/۸	۰/۲	۰/۳
شرایط سبک	۰/۲	۰/۰۱	۰/۳
شرایط سنگین	۱/۲	۰/۴	۰/۳

برای عملکرد بهتر HBMO، تعداد ملکه، زنبوران نر، کارگران، اندازه کیسه اسپرم و حداکثر تعداد پروسه جفت‌گیری به ترتیب ۱، ۱۰۰، ۱۰۰۰، ۵۰، ۳۰ و برای عملکرد بهتر PSO، تعداد ذرات، اندازه ذره، تعداد تکرار، C₁، C₂، C به ترتیب برابر ۲۰، ۳، ۵۰، ۲، ۲ و ۱ انتخاب می‌شوند. همچنین میزان w به صورت خطی از ۰/۹ تا ۰/۴ کاهش پیدا می‌کند [۲۴ و ۱۵]. در فرآیند بهینه سازی الگوریتم های پیشنهادی چندین بار اجرا شده، سپس مجموعه مقادیر بهینه انتخاب می‌شوند. مقادیر نهایی پارامترهای بهینه شده تابع هدف J در جدول (۲) داده شده است.

جدول (۲): پارامترهای بهینه شده کنترل کننده

پارامترهای کنترل کننده	نوع کنترل کننده			
	الگوریتم HBMO		الگوریتم PSO	
	φ	C	φ	C
G1	۱۲۹/۲۲	۱۸۴/۲۷	۱۱۸/۴۴	۱۹۵/۶۹
G2	۱/۰۴۱۳	۲/۹۱۲۷	۱/۴۶۳۳	۲/۹۷۲۱
G3	۲/۳۳۲۱	۳/۷۶۴۳	۱/۶۷۹۶	۱/۷۲۴۹

۷- نتایج شبیه سازی

به منظور نشان دادن موثر بودن و مقاوم بودن کنترل کننده پیشنهادی، در مقابله با اغتشاشات شدید و میرایی نوسان‌های حاصل از آن، سیستم قدرت با استفاده از مدل سازی مطرح شده، در نرم افزار MATLAB شبیه سازی شده است. برای اطمینان از نتایج به دست آمده، این شبیه سازی به دو روش آنالیز مقادیر ویژه و شبیه سازی غیر خطی زمانی، به صورت زیر ارزیابی شده است.

۷-۱- آنالیز مقادیر ویژه

مدهای الکترومکانیکی برای تمامی شرایط کاری، با و بدون کنترل کننده پیشنهادی به صورت جدول (۳) به دست آمد. زمانی که کنترل کننده متصل نیست، برخی مدهای ناپایدار دیده می‌شود. (هایلایت شده در جدول ۳). مدهای ناپایدار با تکنیک های پیشنهادی برای کنترل کننده میرایی STATCOM، به صورت قابل قبولی بهبود داده شد؛ طوری که تمامی مدهای الکترومکانیکی به طور مناسب پایدار شدند.

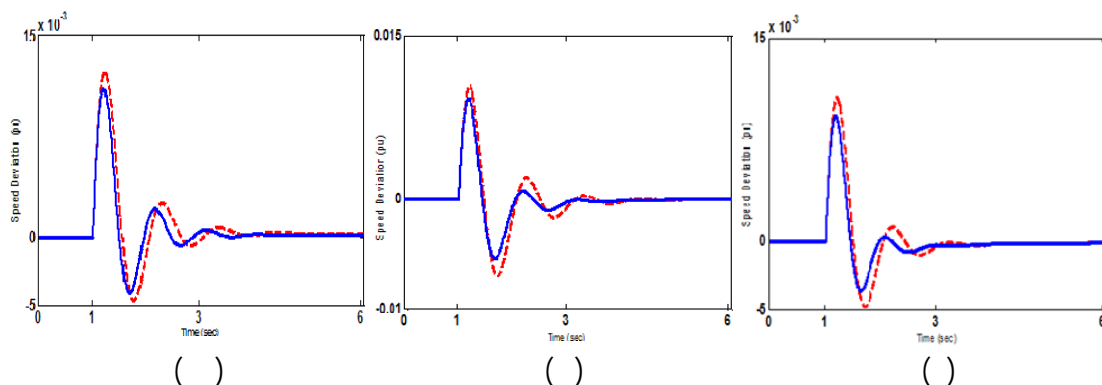
جدول (۳): مقادیر ویژه سیستم

سنگین	سبک	نامی	نوع کنترل کننده
0.5261 ± i5.7321, -0.0803, -91.8564, -8.3923, -3.1627, -2.3147	0.0923 ± i3.7293, -0.1515, -56.3723, -6.8139, -1.8138, -1.9327	0.2178 ± i3.1726, -0.0516, -73.2763, -4.2693, -2.7138, -3.0287	بدون کنترل کننده
-3.931 ± i11.65, -0.703, -3.154, -1.418, -123.37, -0.2194	-2.912 ± i4.317, -0.7802, -2.231, -6.912, -119.75, -0.2034	-3.532 ± i4.926, -0.719, -3.165, -1.391, -123.436, -0.1793	C (HBMO algorithm)
-6.148 ± i3.634, -0.9615, -2.534 ± i3.5408, -0.5403, -3.128, -1.2539	-3.427 ± i5.839, -0.5236, -6.517 ± 4.109, -2.854, -0.9819, -95.154	-6.823 ± i3.153, -0.726, -2.324 ± i4.1134, -1.5133, -2.3632, -1.1509	Φ (HBMO algorithm)
-3.931 ± i11.65, -0.703, -3.154, -1.418, -123.37, -0.2194	-2.912 ± i4.317, -0.7802, -2.231, -6.912, -119.75, -0.2034	-3.532 ± i4.926, -0.719, -3.165, -1.391, -123.436, -0.1793	C (PSO algorithm)
-5.636 ± i3.527, -0.7243, -3.261 ± i4.5238, -0.6002, -4.126, -1.1139	-3.427 ± i5.839, -0.5236, -6.517 ± 4.109, -2.854, -0.9819, -95.154	-6.823 ± i3.153, -0.726, -2.324 ± i4.114, -1.513, -2.36, -1.1509	Φ (PSO algorithm)

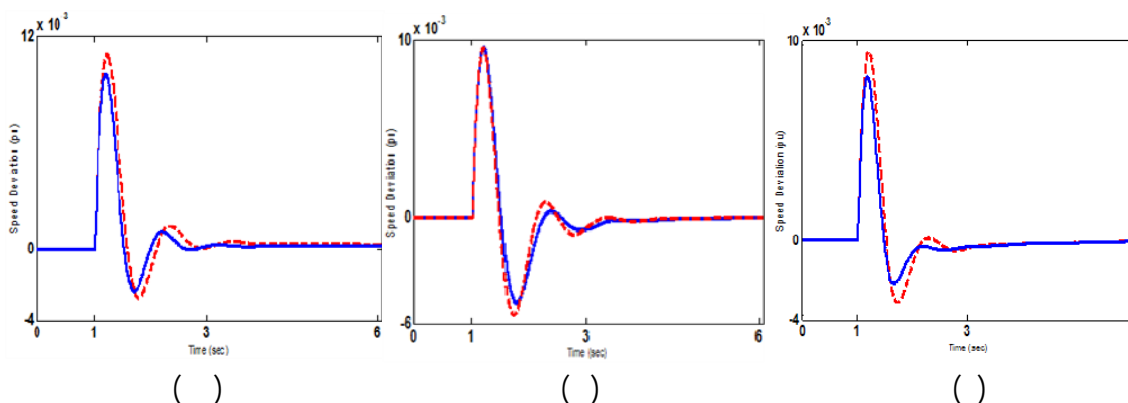
۷-۲- شبیه سازی غیرخطی زمانی

به منظور نشان دادن کارایی مدل پیشنهادی، با تنظیم پارامترهای کنترل کننده به روش ارائه شده در این مقاله، نتایج شبیه سازی برای یک خطای سه فاز شش سیکل در لحظه $t=1$ ثانیه در وسط یکی از خطوط انتقال بررسی شده

است. خطا بدون قطع خط رفع می شود. پاسخ سیستم در این اغتشاش در شکل های (۸) و (۹) نشان داده شده است. مشاهده نتایج نشان می دهد کنترل کننده پیشنهادی به ازای اغتشاش اعمال شده دارای کارایی است.



شکل (۸): پاسخ دینامیکی سیستم برای $\Delta\omega$ در شرایط بارگذاری: (الف) نامی، (ب) سبک، (ج) سنگین: یکپارچه HBMO بر پایه پارامتر C و خط چین PSO بر پایه پارامتر C



شکل (۹): پاسخ دینامیکی سیستم برای $\Delta\omega$ در شرایط بارگذاری: (الف) نامی، (ب) سبک، (ج) سنگین: یکپارچه HBMO بر پایه پارامتر ϕ و خط چین PSO بر پایه پارامتر ϕ

۸- نتیجه گیری

در این مقاله، یک مقایسه بین الگوریتم بهینه سازی زنبوران عسل و بهینه سازی اجتماع ذرات به صورت موفق برای طراحی کنترل کننده میرایی برای STATCOM انجام و همچنین، مسأله بهینه سازی پارامترهای قیود دار و تابع هدف چند منظوره به منظور بهبود عملکرد سیستم در یک اغتشاش پیشنهاد داده شد. کارایی روش پیشنهادی برای

بهبود عملکرد پایداری گذرا در یک سیستم قدرت نمونه تحت اغتشاش شدید به ازای اعمال سناریوی اعمالی، تشریح گردید. نتایج تحلیل مقادیر ویژه و شبیه سازی غیرخطی زمانی نشان می دهد که طراحی کنترل کننده به روش پیشنهادی کارایی بالایی در میرا کردن نوسان‌های فرکانس پایین دارد. نتایج نشان می دهد عملکرد الگوریتم بهینه‌سازی زنبوران عسل در مقایسه با بهینه سازی اجتماع ذرات بهتر بوده، همچنین، طراحی کنترل کننده بر اساس

- stability”, IEEE Trans. PWRs 4 ,1989, (No. 2) pp. 614-626.
- [12] Keri A.J.F., Lombard X., Edris A.A., “Unified power flow controller: modeling and analysis”, IEEE Trans. On Power Systems, 1999, Vol. 14, No. 2, pp. 648-654.
- [13] Sachowski J. and Bialek J. W., "State variable control of shunt FACTS devices using phasor measurements", Electric Power Systems Research, 2008, Vol. 78, pp. 39-48,.
- [14] Wang H. F., "Phillips-Heffron model of power systems installed with STATCOM and applications", IEE Proc. on Generation Transmission and Distribution, 1999, Vol. 146, No. 5, pp. 521-527.
- [15] S. Panda, N. P. Padhay, “Optimal location and controller design of STATCOM for power system stability improvement using PSO”, Journal of the Franklin Institute 345, 2008, pp.166–181.
- [16] A. E. Leon, J. A. Solsona, M. I. Valla, “Comparison among nonlinear excitation control strategies used for damping power system oscillations”, Energy Conversion and Management 53, 2012, pp.55–67.
- [17] L. Gu, J. Wang, “Nonlinear coordinated control design of excitation and STATCOM of power systems”, Electric Power Systems Research 77, 2007, pp. 788–796.
- [18] Morris S., Dash P. K. and Basu K. P., "A fuzzy variable structure controller for STATCOM", Electric Power Systems Research, 2003, Vol. 65, pp. 23-34.
- [19] Hingorani N.G. and Gyugyi L., “Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission systems”, Wiley-IEEE Press, 1999.
- [20] Abido M.A., "Analysis and assessment of STATCOM based damping stabilizers for power system stability enhancement", Electric Power Systems Research, 2005, Vol. 73, pp. 177-185.
- [21] Golkar M.A., Zarringhalami M., “Coordinated Design of PSS and STATCOM parameters for power system stability improvement using genetic algorithm”, Iranian Journal of electrical and computer engineering, 2009, vol.8, (No.2), pp. 80-88
- [22] Padiyar K.R., Parkash V.S., “Tuning and performance evaluation of damping controller for a STATCOM”, Int.J.Electric. Power Energy Syst. 25, 2003, pp.659-666.
- [23] Rahim A. H. M. A. and Kandlawala M. F., "Robust STATCOM voltage controller design using loop shaping technique", Electric Power Systems Research, 2004, Vol. 68, pp. 61-74.
- کنترل ولتاژ خازن (پارامتر ϕ) کارایی بهتری نسبت به کنترل ولتاژ ترمینال (پارامتر C) دارد.
- ### مراجع
- [1] Haddad O.B., Afshar A., Marino M.A., “Honey bee mating optimization (HBMO) algorithm, A new Heuristic approach for water resources optimization”, water resources management, 2006; 20: pp. 661-680.
- [2] D. B. Fogel, Evolutionary Computation: Toward a New Philosophy of Machine Intelligence, 2 ed. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2000.
- [3] Kuo C., “A Novel Coding Scheme for Practical Economic Dispatch by Modified Particle Swarm Approach”, IEEE Trans. On power system, VOL. 23, NO. 4, NOVEMBER 2008.
- [4] Afshar A., Haddad B., Marino M.A., Adams B.J., “Honey bee mating optimization (HBMO) algorithm for optimal reservoir operation” Journal of franklin Institute, 2007; 344: pp. 452- 462.
- [5] R. C. Eberhart and Y. Shi, “Comparison between genetic algorithms and particle swarm optimization,” in IEEE Int. Conf. Evolutionary Computation, May 1998, pp. 611–616.
- [6] Al-Awami A.T., Abdel-Magid Y.L., Abido M.A., “A particle-swarm-based approach of power system stability enhancement with unified power flow controller”, Electric Power and Energy Systems, 2007, Vol. 29, pp. 251 – 259.
- [7] Anderson P.M., Fouad A.A., “Power System Control and Stability”, Ames, IA: Iowa State University .Press ,1977.
- [8] Noroozian M., Anderson G., “ Damping of power system oscillations by use of controllable components”, IEEE Trans. PWRD 9, 1994, (No.4) pp. 2046-2054.
- [9] Abido M.A, “Robust design of multimachine power system stabilizers using simulated annealing”. IEEE Trans. On energy conversion, 2000, vol. 15, No. 3, pp. 297-304.
- [10] Chun liu, Ryuichi Yokoyama, oru Koyanagi, Kwang Y. Lee, “PSS design for damping of inter-area power oscillations by coherency-based equivalent model”, electrical power and energy systems, 2004, pp:535-544
- [11] Kundur P., Klein M., Rogers G.J., zywno M.S., “Application of power system stabilizers for enhancement of overall system

- Energy Conversion and Management, Vol. 50, pp. 2554-2561, 2009. [24] T. Niknam, H. D. Mojarrad, H. Zeinoddini. M., B. B. Firouzi, "A new honey bee mating optimization algorithm for non-smooth economic dispatch", Energy 36, 2011, pp. 896-908.
- زیرنویس‌ها
1. Honey Bee Mating Optimization
 2. Particle Swarme Optimization
 3. Power System Stabilizer
 4. Flexible Alternative Current Transmission System
 5. Synchronous Static Compansator
 6. Static Var Compansator
 7. Single Machine Infinite Bus
 8. Gate-turn-off thyristor
 9. Pulse with modulation
- [25] S. L. Ho, S. Yang, G. Ni, E. W. C. Lo and H. C. Wong, A particle swarm optimization based method for multiobjective design optimizations, IEEE Trans on Magnetics, vol. 41, no. 5, pp. 1756-1759, 2005.
- [26] H. Shayeghi, H.A. Shayanfar, S. Jalilzadeh and A. Safari, Design of output feedback UPFC controllers for damping of electromechanical oscillations using PSO,

جدول (۴): مقادیر پارامترهای سیستم

Generator	$M=8\text{MJ/MV}_t$	$T'_{do} = 5.044$	$X_d = 1\text{pu}$
	$X_q = 0.6\text{p.u}$	$X'_d = 0.3\text{pu}$	$D=0$
Excitation system		$K_a = 50$	$T_a = 0.05\text{s}$
Transformers		$X_r = 0.1\text{pu}$	$X_{SDT} = 0.1\text{pu}$
Transmission line		$X_q = 0.4\text{pu}$	
DC link parameter		$V_{DC} = 1\text{pu}$	$C_{dc} = 1\text{pu}$
STATCOM parameter		$C = 0.25$	$\varphi = 52^\circ$
		$K_s = 1$	$T_s = 0.05$

