

# هماهنگی بهینه کنترل کننده‌های غیرخطی STATCOM و سیستم تحریک با حضور مشاهده‌گر غیرخطی مبتنی بر الگوریتم PSO

فهیمة افیشم<sup>۱</sup>، محمودرضا شاکرمی<sup>۲</sup> و اسماعیل رک رک<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناس ارشد دانشگاه لرستان، دانشکده فنی و مهندسی، [afrisham.f@lu.ac.ir](mailto:afrisham.f@lu.ac.ir)

<sup>۲</sup> استادیار دانشگاه لرستان، دانشکده فنی و مهندسی، [Shakarami.mr@lu.ac.ir](mailto:Shakarami.mr@lu.ac.ir)

<sup>۳</sup> استادیار دانشگاه لرستان، دانشکده فنی و مهندسی، [rokrok.e@lu.ac.ir](mailto:rokrok.e@lu.ac.ir)

چکیده - با توسعه سیستم‌های قدرت لازم است نگاه ویژه‌ای به پایداری دینامیکی با استفاده از ادوات انتقال AC قابل انعطاف (FACTS) و تحلیل‌های غیرخطی انجام گیرد. ادوات FACTS، اثرات قابل ملاحظه‌ای در کاهش اثر وقوع خطا در سیستم قدرت دارند. این مهم با فراهم نمودن منبعی کمکی برای تامین توان راکتیو صورت می‌گیرد. مشکل اصلی در تکنیک‌های کنترل خطی، ناحیه عملکرد کوچک است. تحلیل‌های غیرخطی این مشکل را برطرف می‌سازند. در این بین استفاده از مشاهده‌گر، ضرورت اندازه‌گیری تمامی متغیرهای حالت سیستم را رفع می‌نماید. در این مقاله از هماهنگی بهینه برای کنترل کننده‌های غیرخطی در سیستم تحریک و STATCOM استفاده شده است. از روش خطی‌سازی فیدبک و همچنین از الگوریتم اجتماع ذرات برای هماهنگی بهینه، بهره گرفته شده است. روش پیشنهادی بر روی سیستم قدرت تک‌ماشینه متصل به شین بی نهایت (SMIB) با حضور مشاهده‌گر سیستم تحریک، اعمال شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی، موثر بودن روش پیشنهادی در کاهش نوسانات سرعت ژنراتور به هنگام وقوع خطا را نشان می‌دهد. همچنین استفاده از پارامترهای بهینه شده، در بهبود رفتار مشاهده‌گر سیستم تحریک نیز موثر واقع شده است.

کلید واژه- تحریک غیرخطی، STATCOM غیرخطی، مشاهده‌گر غیرخطی تحریک، الگوریتم بهینه سازی PSO

می‌شود [۴]. ایده اصلی این روش تغییر جبری دینامیک یک سیستم غیرخطی به یک سیستم کاملاً خطی یا به صورت جزیی خطی می‌باشد به طوریکه میتوان تکنیک‌های کنترل خطی را میتوان اعمال نمود [۵]. در [۶] تاثیر نحوه انتخاب تابع خروجی در روش خطی‌سازی فیدبک برای سیستم تحریک، نشان داده شده است. در بخش اول خطی‌سازی زمانیکه انجام شده است که خروجی سیستم برابر زاویه رتور می‌باشد. با این فرض درجه وابستگی با مرتبه سیستم برابر شده و بنابراین سیستم به طور کامل خطی می‌شود. در بخش دوم، خروجی سیستم برابر سرعت ژنراتور در نظر گرفته شده و در نهایت محاسبات حاکی از برابری درجه وابستگی با مرتبه سیستم است. بنابراین خطی‌سازی جزیی انجام می‌گیرد. در [۷] کنترل غیرخطی سیستم تحریک برای سیستم‌های یک و چندماشینه، با استفاده از روش خطی‌سازی کامل فیدبک و با در نظر گرفتن زاویه رتور به عنوان خروجی سیستم انجام شده است. در [۸] از تکنیک خطی‌سازی فیدبک بهبود یافته، برای افزایش پایداری و تنظیم ولتاژ ژنراتور قدرت بهره گرفته شده است در این مراجع، تنها طراحی کنترل کننده‌های غیرخطی سیستم تحریک در نظر گرفته شده است این در حالی است که در سیستم‌های قدرت امروزی،

## ۱- مقدمه

در سال‌های اخیر تقاضای انرژی الکتریکی روز به روز در حال افزایش است. گسترش سیستم قدرت از لحاظ اقتصادی به صرفه نمی‌باشد لذا در سراسر جهان گسترش توانایی سیستم قدرت مبتنی بر کنترل کننده‌ها و ادوات انتقال AC قابل انعطاف FACTS مورد توجه قرار گرفته است [۹، ۱۰]. همچنین مشاهده‌گر امکان نظارت و کنترل موثر سیستم قدرت، بدون نیاز به اندازه‌گیری کلیه متغیرهای حالت را فراهم می‌نماید. هنگامی که اغتشاش و خطای بزرگی در سیستم رخ دهد، تکنیک‌های خطی مناسب تحلیل نمی‌باشند. زیرا مدل سیگنال کوچک حول نقطه کار معین، خطی‌سازی می‌شود. اختلال شدید باعث تنوع در نقاط عملکرد می‌گردد و در نتیجه کنترل کننده‌های خطی قادر به حفظ عملکرد مطلوب سیستم نمی‌باشند [۲].

کنترل کننده‌های غیرخطی پایداری گذرا را در سیستم قدرت افزایش داده و به طور موثر به مساله کنترل عملی می‌پردازند [۳]. خطی‌سازی فیدبک یکی از تکنیک‌های کنترل غیرخطی است که از نظریه مشتقگیر هندسی استفاده می‌نماید و به طور گسترده برای طراحی کنترل غیرخطی استفاده

بینهایت (SMIB) اعمال شده است. نتایج شبیه‌سازی در محیط سیمولینک متلب نشان می‌دهد که هماهنگی بهینه پارامترهای کنترل‌کننده‌های غیرخطی، باعث افزایش کارایی آنها در کاهش نوسانات سرعت ژنراتور، به هنگام وقوع خطا می‌شود. همچنین نتایج شبیه‌سازی نشان از عملکرد مناسب‌تر مشاهده‌گر غیرخطی سیستم تحریک، با استفاده از کنترل‌کننده‌های بهینه غیرخطی است.

## ۲- مدل سازی سیستم

### ۲-۱- مدل سازی سیستم قدرت تک‌ماشینه

مدل کامل ریاضی سیستم تک ماشین (SMIB) به شرح زیر نوشته شود که در آن  $\delta$  زاویه توان ژنراتور،  $\omega$  سرعت روتور نسبت به مرجع سنکرون،  $\omega_0$  سرعت سنکرون ژنراتور،  $H$  ثابت اینرسی ژنراتور،  $P_M$  قدرت مکانیکی ورودی به ژنراتور است که ثابت فرض می‌شود و  $D$  ثابت میرایی ژنراتور است [۱۶].  $E'_q$  ولتاژ گذرا محور عرضی ژنراتور و  $E_f$  ولتاژ معادل در سیم پیچ تحریک است. سیستم‌های قدرت حتی در ساده‌ترین شکل، رفتارهای غیرخطی از خود نمایش می‌دهند.

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

$$\dot{\omega} = -\frac{D}{2H}(\omega - \omega_0) + \frac{\omega_0}{2H}P_m - \frac{\omega_0}{2H}\frac{V_s E'_q}{X_{d\Sigma}} \quad (2)$$

$$\dot{E}'_q = -\frac{1}{T_d'}E'_q + \frac{1}{T_{d0}}\frac{X_d - X_d'}{X_{d\Sigma}}V_s \cos \delta + \frac{1}{T_{d0}}E_f \quad (3)$$

### ۲-۲- مدل جبران ساز استاتیکی سنکرون

جبران ساز استاتیکی سنکرون (STATCOM) یک منبع تبدیل ولتاژ می‌باشد که ولتاژ DC ورودی را به منظور جبران نیاز توان راکتیو سیستم به ولتاژ AC خروجی تبدیل می‌نماید. ساختار STATCOM شش پالس در شکل (۱) نشان داده شده است. STATCOM از طریق یک فیلتر و یک ترانسفورماتور به شبکه قدرت متصل شده است و خازن، منبع ذخیره ساز انرژی می‌باشد [۹].

در شکل (۱)،  $R$  تلفات اینورتر و ترانسفورماتور،  $L$  اندوکتانس معادل ترانسفورماتور،  $i_a$ ،  $i_b$  و  $i_c$  جریان‌های AC جبران ساز استاتیکی می‌باشد.  $V_a$ ،  $V_b$  و  $V_c$  ولتاژهای خط و  $e_a$  و  $e_b$  و  $e_c$  ولتاژ خروجی اینورتر هستند [۱۵].

ادوات FACTS در کنار کنترل‌کننده‌های سیستم تحریک، نقش مهمی در پایداری سیستم قدرت ایفا می‌نمایند [۹]. یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین ادوات FACTS، جبران ساز استاتیکی سنکرون (STATCOM) می‌باشد در مورد STATCOM، تکنیک غیرخطی با استفاده از روش خطی سازی فیدبک در [۱۰] تحلیل شده است. در مرجع اخیر شبیه‌سازی‌ها، تحت انواع مختلفی از اغتشاش در سیستم تک ماشین با روش خطی سازی فیدبک و با حضور AVR، سیستم تحریک و PSS تنها برای STATCOM غیرخطی انجام شده است. در [۱۱] طراحی کنترل غیرخطی برای STATCOM با در نظر گرفتن یک بار موتور القایی با توان اکتیو و راکتیو معین بررسی شده و نتایج با تحلیل خطی در مورد کنترلرهای STATCOM مقایسه شده است. در [۱۲] با استفاده از الگوریتم‌های زنبورعسل و ژنتیک، عملکرد STATCOM و پایداری سیستم قدرت (PSS) جهت کاهش نوسانات و انحراف سرعت ژنراتور، به صورت هماهنگ بهینه شده است. با این وجود هماهنگ سازی با استفاده از مدل خطی مورد هدف بوده است. در [۱۳] بهره کنترل‌کننده‌های PI مربوط به STATCOM غیرخطی با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک و اجتماع ذرات با تابع یک و دو هدفه بهینه شده است، حال آنکه تاثیر این بهینه سازی با حضور سیستم تحریک بررسی نشده است.

همچنین در [۷] ابتدا سیستم تک ماشین متصل به شین بی‌نهایت با انتخاب تابع خروجی مناسب به صورت کامل خطی شده و سپس با استفاده از بهره مشاهده‌گر خطی، بهره مشاهده‌گر غیرخطی محاسبه شده است. در [۱۴] کاربرد مشاهده‌گر لویینبرگ برای برآوردن حالت غیرقابل اندازه‌گیری یک سیستم قدرت SMIB ارائه شده است که در آن استفاده از مشاهده‌گر حالت ضروری است. مشاهده‌گر حالت قادر است متغیرهای حالتی از سیستم قدرت را مشخص نماید که قابل اندازه‌گیری نمی‌باشند و یا اندازه‌گیری آنها مشکل و پرهزینه می‌باشد [۱۵].

در این مقاله جهت برطرف نمودن مشکلات کنترل‌کننده‌های خطی، از روش خطی سازی فیدبک برای هردو سیستم تحریک و STATCOM غیرخطی بهره گرفته شده و جهت افزایش عملکرد و هماهنگی کنترل‌کننده‌های غیرخطی، از روش بهینه‌سازی استفاده شده است. در این روش پارامترهای کنترل‌کننده‌های غیرخطی مربوط به سیستم تحریک و STATCOM با استفاده از الگوریتم اجتماع ذرات، به صورت بهینه هماهنگ شده‌اند. همچنین اثر مشاهده‌گر غیرخطی سیستم تحریک، بر رفتار سیستم بررسی شده است. روش پیشنهادی بر روی سیستم قدرت تک ماشین متصل به شین

### ۳- خطی سازی فیدبک مدل سیستم

#### ۳-۱- خطی سازی فیدبک سیستم قدرت تک ماشین

مدل ریاضی سیستم تک ماشین که در بخش مدل سازی معرفی شد، به فرم معادلات (۱۰) نیز قابل نمایش است. در [۱۷] برای سیستم تک ماشین، خروجی به صورت  $y = \delta - \delta_0$  انتخاب شده، در نتیجه سیستم به صورت دقیق و مرتبه کامل، خطی می شود.

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u$$

$$x = \begin{bmatrix} \delta \\ \omega \\ E'_q \end{bmatrix}, g(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{T_{do}} \end{bmatrix}, u = E_f$$

$$f(x) = \begin{bmatrix} \omega - \omega_0 \\ -\frac{D}{2H}(\omega - \omega_0) + \frac{\omega_0}{2H}P_m - \frac{\omega_0}{2H}\frac{V_s E'_q}{X'_{d\Sigma}} \sin \delta \\ -\frac{1}{T'_d}E'_q + \frac{1}{T_{do}}\frac{X_d - X'_d}{X'_{d\Sigma}}V_s \cos \delta \end{bmatrix} \quad (10)$$

که در آن،  $u$  ورودی کنترلی سیستم تحریک می باشد و از رابطه (۱۱) محاسبه می شود. علاوه بر این پارامترهای  $k_1$  و  $k_2$  و  $k_3$  با استفاده از روش بهینه سازی مشخص می گردند.

$$u = -1/T_{do} \times E'_q + \frac{k_1 \Delta \delta + \left( k_2 - \frac{\omega_0}{2H} \frac{V_s E'_q}{X'_{d\Sigma}} \cos \delta \right) \Delta \omega + (k_3 - \frac{D}{2H}) \Delta \dot{\omega}}{\frac{\omega_0}{2H} \frac{V_s}{X'_{d\Sigma}} \sin \delta \frac{1}{T_{do}}} \quad (11)$$

#### ۳-۲- خطی سازی فیدبک STATCOM

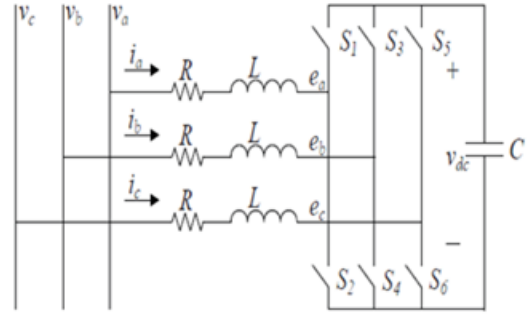
مدل ریاضی برای سیستم STATCOM، به صورت معادلات (۱۲) نیز قابل توصیف می باشد. این شیوه بیان معادلات جهت تحلیل غیرخطی مناسب تر است [۱۸].

$$\dot{x} = f(x) + g_1(x)u_1 + g_2(x)u_2 =$$

$$\begin{bmatrix} -\frac{R}{L}x_1, \omega x_2, \frac{V_s}{L} \\ -\omega x_1, -\frac{R}{L}x_2, 0 \\ 0, 0, 0 \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} -\frac{x_3}{L} \\ 0 \\ -\frac{x_1}{C} \end{bmatrix} u_1 + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{x_3}{L} \\ -\frac{x_2}{C} \end{bmatrix} u_2$$

$$y = \begin{bmatrix} h_1(x) \\ h_2(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (12)$$



شکل (۱) ساختار جبران ساز استاتیکی

با استفاده از اعمال روابطه الکتریکی در شکل فوق، معادلات دیفرانسیل مدار آن را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\dot{i}_a = -\frac{R}{L}i_a + \frac{1}{L}(V_a - e_a)$$

$$\dot{i}_b = -\frac{R}{L}i_b + \frac{1}{L}(V_b - e_b)$$

$$\dot{i}_c = -\frac{R}{L}i_c + \frac{1}{L}(V_c - e_c) \quad (4)$$

از آنجا که سیستم به عنوان یک سیستم متعادل سه فاز در نظر گرفته شده، می توان آن را به قالب dq تبدیل نمود:

$$\dot{I}_d = -\frac{R}{L}I_d + \omega I_q + \frac{1}{L}(V_d - E_q)$$

$$\dot{I}_q = -\frac{R}{L}I_q - \omega I_d + \frac{1}{L}(V_q - E_d) \quad (5)$$

معادلات مربوط به طرف AC و DC می تواند به صورت زیر نوشته شود که در آن  $V_{dc}$  ولتاژ دو سر خازن،  $M$  شاخص مدولاسیون و  $\alpha$  زاویه آتش است.  $M$  و  $\alpha$  متغیرهای کنترل STATCOM هستند.

$$E_d = MV_{dc} \sin \alpha \quad (6)$$

$$E_q = MV_{dc} \cos \alpha$$

معادلات توازن توان و فرم ساده شده آن، به فرم زیر می باشد

$$C = \frac{3}{2C_{dc}} \quad (7)$$

$$p = V_{dc} C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} \quad (8)$$

$$\dot{V}_{dc} = \frac{1}{C} (M \cos \alpha I_d + M \sin \alpha I_q)$$

فرم نهایی معادلات STATCOM به صورت زیر می باشد:

$$\dot{I}_d = -\frac{R}{L}I_d + \omega I_q + \frac{1}{L}(V_d - MV_{dc} \cos \alpha)$$

$$\dot{I}_q = -\frac{R}{L}I_q - \omega I_d + \frac{1}{L}(V_q - MV_{dc} \sin \alpha)$$

$$\dot{V}_{dc} = \frac{1}{C} (M \cos \alpha I_d + M \sin \alpha I_q) \quad (9)$$

کامل به فرم معادله (۱۷) می‌باشد. که در آن،  $E_f = u$  است و بنابراین روش تعیین پارامترهای کنترلی غیرخطی برای سیستم تحریک، در عملکرد مشاهده‌گر نیز مفید می‌باشد.

$$\begin{bmatrix} \hat{\delta} \\ \hat{\omega} \\ \hat{E}_q' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\omega} - \omega_0 \\ -\frac{D}{2H}(\hat{\omega} - \omega_0) + \frac{\omega_0}{2H}P_m - \frac{\omega_0}{2H}\frac{V_s \hat{E}_q'}{X_{d\Sigma}} \sin \hat{\delta} \\ -\frac{1}{T_d'}\hat{E}_q' + \frac{1}{T_{do}}\frac{X_d - X_{d\Sigma}}{X_{d\Sigma}}V_s \cos \hat{\delta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{T_{do}} \end{bmatrix} E_f + \begin{bmatrix} 2 \\ 2 \\ \frac{X_{d\Sigma}}{V_s \sin \delta_0} \left( \frac{V_s \hat{E}_q'}{X_{d\Sigma}} \cos \hat{\delta} - D - 2H \right) \end{bmatrix} (\delta - \hat{\delta}) \quad (17)$$

#### ۴- الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات

##### ۴-۱- مقدمه‌ای بر الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات

الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات (PSO) با تقلید از پرواز پرندگان، ماهی‌ها و تبادل اطلاعات میان آنها ابداع شده است [۱۹]. در الگوریتم PSO هر راه حل، تنها یک پرنده در فضای جستجو است و عضو نامیده می‌شود. تمام پرندگان یک مقدار شایستگی دارند که توسط تابع شایستگی ارزیابی می‌گردد. علاوه بر این هر پرنده  $i$  دارای یک موقعیت در فضای  $D$  بعدی مسئله است که در تکرار  $t$ ام، با یک بردار به صورت زیر نمایش داده می‌شود.

$$X_i^t = (x_{i1}^t, x_{i2}^t, \dots, x_{iD}^t) \quad (18)$$

همچنین این پرنده سرعتی دارد که پرواز پرنده را هدایت می‌کند و در تکرار  $t$ ام با رابطه (۱۹) نشان داده می‌شود:

$$V_i^t = (v_{i1}^t, v_{i2}^t, \dots, v_{iD}^t) \quad (19)$$

این پرنده نیز در هر تکرار یک حافظه از بهترین موقعیت قبلی خودش را دارد که با بردار  $P$  نشان داده می‌شود:

$$P_i^t = (p_{i1}^t, p_{i2}^t, \dots, p_{iD}^t) \quad (20)$$

در هر تکرار، هر عضو با در نظر داشتن دو مقدار بهترین به روزرسانی می‌شود. اولین به‌روزرسانی مربوط به بهترین راه حلی

که در آن  $X$  و  $U$  به ترتیب متغیرهای حالت و ورودی کنترلی می‌باشند.

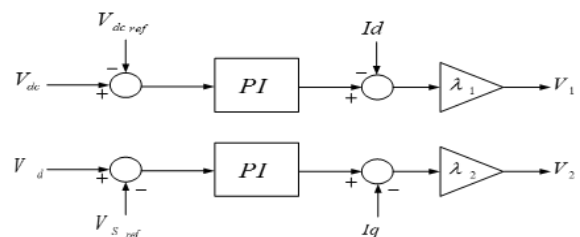
$$X = \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ V_{dc} \end{bmatrix}, U = \begin{bmatrix} M \cos \alpha \\ M \sin \alpha \end{bmatrix} \quad (13)$$

بنابراین قانون کنترل غیرخطی به صورت زیر قابل استفاده

است:

$$U(t) = \begin{bmatrix} -\frac{L}{x_3}(V_1 + \frac{R}{L}x_1 + \omega x_2 - \frac{V_s}{L}) \\ -\frac{L}{x_3}(V_2 + \omega x_1 + \frac{R}{L}x_2) \end{bmatrix} \quad (14)$$

$V_1$  و  $V_2$  رفرنس‌های خروجی می‌باشند. برای محاسبه آنها از بلوک دیاگرام کنترلی شکل (۲) استفاده شده است. با استفاده از روش بهینه‌سازی، پارامترهای  $\lambda_1, \lambda_2$  و همچنین ضرایب کنترل‌کننده‌های PI، تعیین می‌شوند. پس از آن با مشخص شدن  $U$ ، متغیرهای کنترلی STATCOM ( $M$  و  $\alpha$ ) مشخص می‌گردند.



شکل (۲) کنترل‌کننده‌های رفرنس‌های خروجی

##### ۳-۳- خطی‌سازی فیدبک در طراحی مشاهده‌گر غیرخطی سیستم تحریک

فرم کلی مشاهده‌گر غیرخطی در رابطه (۱۵) نشان داده شده است [۷].

$$\dot{\hat{X}} = f(\hat{x}) + g(\hat{x})u + l(\hat{x})(y - h(\hat{x})) \quad (15)$$

که در آن  $L$  بهره غیرخطی است. بهره غیرخطی به صورت زیرقابل محاسبه می‌باشد.  $G$  بهره خطی و  $J_\Phi$  ماتریس ژاکوبین است:

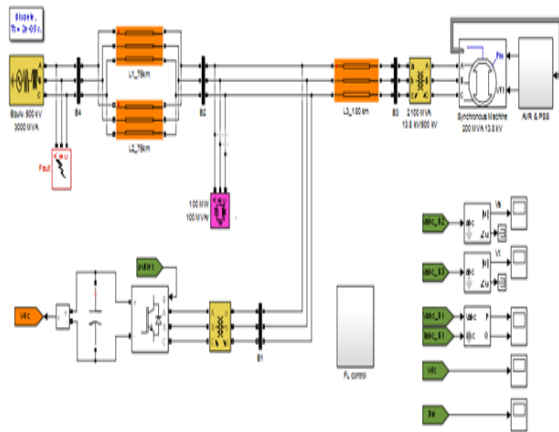
$$l(\hat{x}) = (J_\Phi(\hat{x}))^{-1}G \quad (16)$$

رابطه اخیر نشان می‌دهد در صورتی که سیستم به طور کامل خطی شده باشد، با استفاده از بهره مشاهده‌گر خطی می‌توان، بهره مشاهده‌گر غیرخطی را مشخص نمود.

برای سیستم قدرت تک ماشینه، مشاهده‌گر غیرخطی مرتبه

## ۵- شبیه سازی

سیستم مورد بررسی در شکل (۳)، دارای یک منبع توان ۵۰۰ کیلوولت با قدرت ۳۰۰۰ مگاوار و در طرف دیگر یک ماشین سنکرون ۱۳.۸ کیلوولت باتوان ۲۰۰ مگاوار می باشد. این دو منبع توسط خط انتقالی با طول ۱۸۰ کیلومتر و دو خط انتقال موازی با طول ۷۵ کیلومتر به هم متصل گشته اند. خطای سه فاز اتصال کوتاه در ترمینال ژنراتور سنکرون، در ثانیه دوم اتفاق می افتد و بعد از ۲۰۰ میلی ثانیه رفع می شود. در مطالعه انجام شده، STATCOM بین باس های ۳ و ۲ قرار گرفته است.

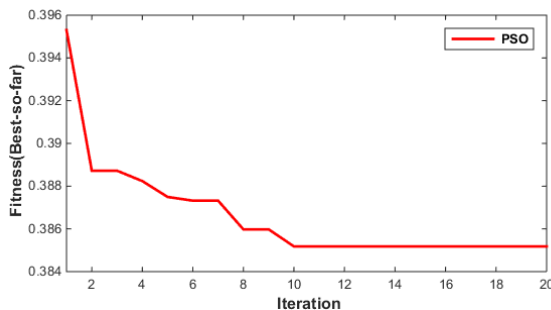


شکل (۳) سیستم مورد مطالعه

نتایج حاصل از بهینه سازی در جدول (۱) و همگرایی الگوریتم در شکل (۴) نشان داده شده است.

$K1$	$K2$	$K3$	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$Kp_1$	$Ki_1$	$Kp_2$	$Ki_2$
1	0.01	0.01	946.13	1807.15	6	200	20	2000

جدول (۱) نتایج بهینه سازی



شکل (۴) همگرایی الگوریتم PSO

است که پرنده تا کنون آن را تجربه کرده است. این مقدار را اصطلاحاً  $P_{best}$  می نامند. دومین به روزرسانی، بهترین موقعیتی است که تاکنون در جمعیت به دست آمده است. این مقدار  $G_{best}$  نامیده می شود. زمانی که یک عضو، بخشی از جمعیت را به عنوان توپولوژی همسایگانش در نظر می گیرد؛ بهترین مقدار، یک بهترین محلی است و  $L_{best}$  نامیده می شود. در ادامه موقعیت و سرعت هر عضو توسط روابط زیر به روزرسانی می شوند:

$$V_i(t+1) = \omega V_i(t) + c_1 r_1 (P_i(t) - X_i(t)) + c_2 r_2 (G(t) - X_i(t)) \quad (21)$$

$$X_i(t+1) = X_i(t) + V_i(t+1) \quad (22)$$

در فرمول های فوق  $t$  بیانگر شماره تکرار و متغیرهای  $C_1$  و  $C_2$  فاکتورهای یادگیری هستند. که میزان جابجایی یک پرنده را در یکبار تکرار کنترل می کند.  $r_1$  و  $r_2$  دو عدد تصادفی یکنواخت و  $w$  یک وزن جبری است. در این الگوریتم، استاندارد جمعیت با پاسخ های تصادفی مقدار دهی اولیه می شود و تا رسیدن به شرط خاتمه، مقادیر  $P_{best}$  و  $G_{best}$  ها، سرعت و موقعیت نیز به ترتیب به روزرسانی می شوند.

## ۴-۲- مساله بهینه سازی و تابع هدف

در این طرح جهت هماهنگی بهینه کنترل کننده های غیرخطی STATCOM و سیستم تحریک، از الگوریتم PSO استفاده شده است. بدین جهت تابع هدف، میزان انحراف تغییرات سرعت می باشد و پارامترهای بهینه طوری انتخاب می شوند که این تابع، دارای مقدار مینیمم شود [۱۳]. مدت زمان اجرا و  $\Delta\omega$  تغییرات سرعت ژنراتور می باشد.

$$F = \int_0^{T_{sim}} t \cdot |\Delta\omega| \cdot dt \quad (23)$$

در مسئله بهینه سازی، پارامترهای کنترلی  $K1$ ،  $K2$  و  $K3$  مربوط به سیستم تحریک و سایر پارامترها، مربوط به کنترل کننده های STATCOM می باشند.

$$0.1 \leq k_1 \leq 4$$

$$0.01 \leq k_2 \leq 5$$

$$0.01 \leq k_3 \leq 5$$

$$1 \leq \lambda_1 \leq 2000$$

$$1 \leq \lambda_2 \leq 6000$$

$$0.01 \leq k_{p1} \leq 6$$

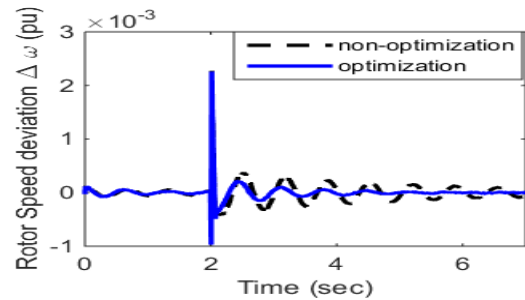
$$1 \leq k_{i1} \leq 200$$

$$0.1 \leq k_{p2} \leq 20$$

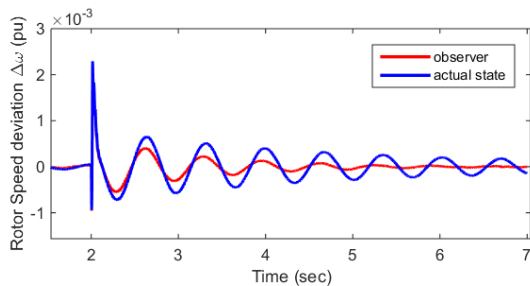
$$1 \leq k_{i2} \leq 2000$$

## ۱-۵- هماهنگ سازی سیستم تحریک و STATCOM با کنترل کننده های غیرخطی بهینه

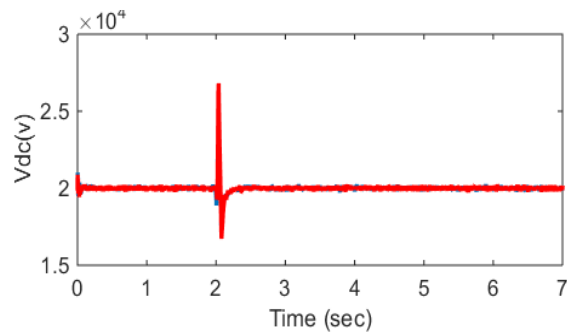
کنترل کننده های غیرخطی سیستم تحریک و STATCOM در محیط سیمولینک متلب شبیه سازی شده اند. خطای سه فاز اتصال کوتاه، در ترمینال ژنراتور سنکرون در ثانیه دوم اتفاق می افتد و بعد از ۲۰۰ میلی ثانیه رفع می شود. نتایج شبیه سازی با استفاده از پارامترهای بهینه به دست آمده از الگوریتم PSO، در شکل های زیر نشان داده شده اند.



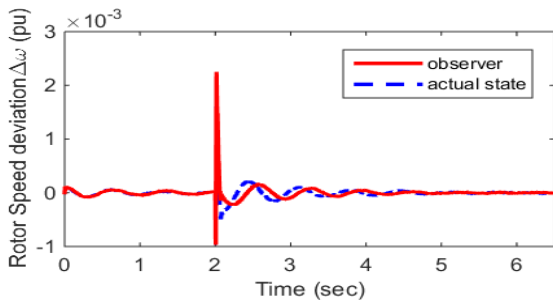
شکل (۵) تغییرات سرعت ژنراتور



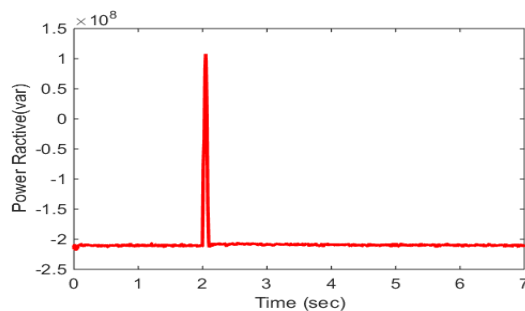
شکل (۸) تغییرات سرعت ژنراتور (بدون بهینه سازی)



شکل (۶) ولتاژ خازن STATCOM



شکل (۹) تغییرات سرعت ژنراتور (با بهینه سازی)



شکل (۷) توان راکتیو STATCOM

شکل های (۸) و (۹)، تغییرات سرعت ژنراتور، با و بدون بهینه سازی می باشند. مقادیر واقعی تغییرات سرعت ژنراتور و خروجی مشاهده گر مقایسه شده اند. پارامترهای بهینه سبب شده، مشاهده گر در ردیابی تغییرات سرعت ژنراتور عملکردی مناسب داشته و اختلاف کمتری بین مقادیر واقعی و خروجی مشاهده گر وجود داشته باشد. تفاوت کوچک در افزایش اعتماد به خروجی مشاهده گر، به جای اندازه گیری واقعی سرعت ژنراتور، موثر است.

## ۶- نتیجه گیری

در این مقاله به کمک الگوریتم PSO و تکنیک خطی سازی فیدبک، کنترل کننده های غیرخطی مربوط به سیستم تحریک و STATCOM به صورت بهینه، هماهنگ شده اند. همچنین تاثیر جانبی این بهینه سازی بر روی مشاهده گر سیستم تحریک نیز بررسی شده است. بهینه سازی با هدف کاهش انحرافات تغییرات سرعت ژنراتور انجام گرفته است. نتایج حاکی از تاثیر مطلوب

با توجه به شکل های (۵)، (۶) و (۷)، بهینه سازی پارامترهای کنترلی با کاهش انحرافات تغییرات سرعت همراه بوده است. STATCOM در زمان وقوع خطا، توان راکتیو مورد نیاز سیستم را تامین می نماید و ولتاژ DC خازن پس از رفع خطا، به مقدار اولیه خود باز می گردد.

- [16] Lu Q, Sun Y, Mei S. Nonlinear control systems and power system dynamics. London: Kluwer Academic Publisher; 2001.
- [17] T. Lahdhiri and A. T. Alouani, "Nonlinear stabilizing controller for a single machine infinite-bus power system," in The 4th IEEE Conference on Control Applications, Sept. 1995, pp. 1014–1019.
- [18] M.A. Mahmud, H.R. Pota, M.J. Hossain. Nonlinear DSTATCOM controller design for distribution network with distributed generation to enhance voltage stability. In: Electrical Power and Energy Systems 53 (2013) 974–979
- [19] Kennedy J, Eberhart R.C. "Particle Swarm Optimization" IEEE International Conference on Neural Networks, Perth, Australia, 1995, vol. IV, pp. 1942–1948.

بهینه‌سازی، بر کاهش انحراف تغییرات سرعت است. علاوه بر این، STATCOM توان راکتیو مورد نیاز سیستم به هنگام وقوع خطا را به خوبی تامین می‌نماید. همچنین ردیابی تغییرات سرعت ژنراتور توسط مشاهده‌گر با پارامترهای بهینه، نمونه‌ای دیگر از بهبود رفتار سیستم است. استفاده از سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی و همچنین افزایش توابع هدف با در نظر گرفتن کاهش انحراف ولتاژ خازن از مقدار مرجع آن، می‌تواند موضوع پژوهش‌های آینده قرار گیرد.

## مراجع

- [1] Q. Lu, Y.Z. Sun, Electric Power System Nonlinear Control, Science Press, Beijing, China, 1992.
- [2] M. A. Mahmud, M. J. Hossain, and H. R. Pota, "Effect of large dynamic loads on interconnected power systems with power oscillation damping controller (PODC)," in 20th Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), Dec. 2010, pp. 1–6.
- [3] C. Sun, Z. Zhao, Y. Sun, and Q. Lu, "Design of nonlinear robust excitation control for multimachine power systems," IEE Proc Generation, Transmission and Distribution, vol. 143, no. 3, pp. 253–257, May 1996.
- [4] E. H. Okongwu, W. J. Wilson, and J. H. Anderson, "Optimal state feedback control of a microalternator using an observer," IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-97, no. 2, pp. 594–602, Mar./Apr. 1978.
- [5] Khalil HK. Nonlinear systems. New York: Prentice-Hall; 1996.
- [6] M. A. Mahmud, M. J. Hossain, selection of output function in nonlinear feedback linearizing excitation control for power system, 2011 Australian Control Conference
- [7] M.A. Mahmud, H.R. Pota, M.J. Hossain. Full-order nonlinear observer-based excitation controller design for interconnected power systems via exact linearization approach. In: Electrical Power and Energy Systems 41 (2012) 54–62
- [8] Kenné G, Goma R, Nkwawo H, Lamnabhi-Lagarigue F, Arzandé A, Vannier JC. An improved direct feedback linearization technique for transient stability enhancement and voltage regulation of power generators. Int J Electr Power Energy Syst 2010;32(7):809–16.
- [9] HINGORANI, N. G. YUGYI, L. : Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems, Wiley-IEEE Press, 1999.
- [10] J.E. Slotine and W. Li, Applied Nonlinear Control, Prentice-Hall International Editions, pp. 207, 1991.
- [11] Shubhanshu Dash, B.K. Panigrahi, nonlinear control of statcom for stabilization of synchronous generator, Engineering Modeling 16(2003)
- [12] Amin Safari, Ali Ahmadian, Masoud Aliakbar Golkar, Comparison Of Honey Bee Mating Optimization and Genetic Algorithm for Coordinate Design of PSS and STATCOM Based on Damping of POWER SYSTEM OSCILLATION, Journal of ELECTRICAL ENGINEERING, VOL. 64, NO. 3, 2013, 133–142
- [13] Farokhnia N, Fathi SH, Khoraminia RR, Hosseini SH. Optimization of pi coefficients in DSTATCOM nonlinear controller for regulating DC voltage using genetic algorithm. In: 4th IEEE conference on industrial electronics and applications, May 2009. p. 2291–6.
- [14] E. H. Okongwu, W. J. Wilson, and J. H. Anderson, "Optimal state feedback control of a microalternator using an observer," IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-97, no. 2, pp. 594–602, Mar./Apr. 1978.
- [15] Ogata K. Modern control engineering. 5th ed. New York: Prentice-Hall; 2010