



چهارمین کنفرانس ملی مهندسی برق ایران - دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجفآباد - ۸ و ۹ اسفند ۱۳۹۶

طراحی هماهنگ پایدارساز سیستم قدرت و پایدارساز مبتنی بر جبران‌ساز استاتیک سنکرون سری با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی شیرمورچه

امین عزیزی^(۱) - محمد رضا یوسفی*^(۲) - غضنفر شاهقلیان^(۳)

(۱) گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی برق، واحد نجفآباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجفآباد، ایران

aminazizi188@gmail.com, mr.yousefi@ieee.org,

shahgholian47_gh@yahoo.com

چکیده: گسترش مصرف کننده‌های انرژی الکتریکی در سیستم های قدرت باعث می گردد، سطح انرژی انتقالی در سیستم افزایش یابد، و بنابراین هرگونه ناخواسته از جمله اتصال کوتاه بر روی خط و یا خارج شدن یک خط باعث ایجاد نوسانات دینامیکی بزرگ و غیرقابل پیش‌بینی را در سیستم قدرت شود. در این مقاله جهت میراسازی نوسانات فرکانس پایین بین‌ناحیه‌ای و محلی که در رنج ۲-۰/۲ هرتز مشاهده شده است، از ادوات FACTS، استفاده شده و در ادامه از الگوریتم جدید بهینه‌سازی شیرمورچه (ALO) برای طراحی بهینه پارامترهای پایدارساز مبتنی بر سری (SSSC) و هماهنگی آن با پایدارساز سیستم قدرت PSS استفاده شده است. روش پیشنهادی بر روی سیستم استاندارد چهارماشینه دوناچه‌ای اعمال شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان دهنده افزایش پایداری سیستم قدرت در میراسازی نوسانات فرکانس پایین و افزایش ظرفیت انتقال خط با اعمال پایدارساز پیشنهادی شده است.

کلمات کلیدی: پایدارساز سیستم قدرت، سنکرون سری، نوسانات بین‌ناحیه‌ای، شیرمورچه

۱- مقدمه

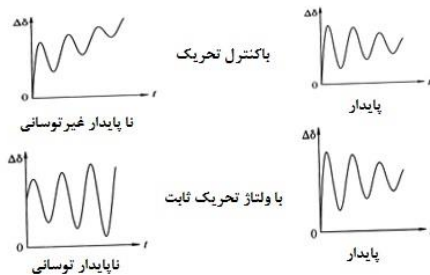
گسترش مصرف‌کننده‌های انرژی الکتریکی در سیستم‌های قدرت باعث می‌گردد که سطح انرژی انتقالی در سیستم افزایش یابد و کاربرد یک شبکه انتقال انرژی به‌هم‌پیوسته ضروری به‌نظر برسد. لذا سیستم قدرت تبدیل به شبکه‌ای عظیم و پیچیده شده است و از جهتی دیگر تأمین مؤثر بار، به معنی انتقال توان با کیفیت لازم و انتقال اقتصادی آن باعث افزایش پیچیدگی در سیستم شده است، در نتیجه این امر باعث می‌شود که سیستم در نقاط کاری آستانه و نهایی انتقال توان خود عمل کند. لذا محدوده پایداری کاهش می‌یابد و خطوط انتقال در حداکثر ظرفیت خود مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند [۱].

امروزه در اغلب سیستم های قدرت مدرن، برای افزایش میرایی و بالا بردن قابلیت پایداری دینامیکی سیستم از پایدارساز سیستم قدرت استفاده می‌شود. یک سیستم قدرت در صورتی پایدار است که واحدهای به‌هم‌پیوسته تولید در حالت سنکرون باقی بماند. اگر به هر دلیلی یک واحد تولیدی و یا مجموعه ای از این واحدها از حالت سنکرون خارج شوند آن قسمت از سیستم دچار ناپایداری می‌شود. به همین خاطر برای میراسازی این نوسانات از پایدارساز سیستم قدرت (PSS) و ادوات FACTS استفاده می‌شود [۲]، [۳].

۲- پایدارساز سیستم قدرت

پایداری سیستم قدرت، توانایی یک سیستم قدرت الکتریکی، برای یک شرایط کاری عادی، که در حالت

تعداد باقی بماند، و بعد بروز اغتشاش، حالت جدید متعادل قابل قبول به دست آورد [۴]



شکل (۱) طبیعت پاسخ اغتشاش کوچک [۴]

۵- مدل سازی ژنراتورها

در استخراج و نوشتن معادلات ماشین سنکرون فرضیات ذیل در نظر گرفته می‌شوند [5]:

(الف) توزیع سیم‌بندی استاتور در طول فاصله هوایی سینوسی فرض می‌شود. (ب) شیارهای استاتور به هنگام گردش روتور موجب تغییر قابل توجهی در اندوکتانس‌های روتور نمی‌شوند.

(ج) اثر پسماند مغناطیسی ناچیز فرض می‌شود.

(د) از اثر اشباع مغناطیسی صرف نظر می‌شود.

۵-۱- مدل کلاسیک

مدل کلاسیک بر مبنای فرضیات زیر بنا شده است [5]:

(الف) توان ورودی به ماشین ثابت است.

(ب) توان میراکنندگی یا گشتاور آسنکرون ناچیز در نظر گرفته می‌شود.

(ج) مدل ولتاژ ثابت پشت راکتانس گذرا برای ماشین‌های سنکرون معتبر باشد.

(د) زاویه مکانیکی روتور ماشین‌ها را با زاویه ولتاژ راکتانس گذرای آن‌ها بتوان منطبق فرض کرد.

به این ترتیب معادلات حرکت ماشین‌ها را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\dot{\delta}_i = \omega_i - \omega_s \quad i = 1, 2, \dots, ng \quad (1)$$

$$M_i \dot{\omega}_i = P_i - P_{ei} \quad i = 1, 2, \dots, ng \quad (2)$$

که در آن

$$P_i = P_{mi} - E_i G_{ii} \quad (3)$$

3- نوسانات فرکانس پایین^۱ (LFO)

نوسانات الکترومکانیکی بین ژنراتورهای سنکرون به هم پیوسته پدیده‌هایی هستند که به ذات سیستم قدرت برمی‌گردد (به تابع تبدیل سیستم و رفتار دینامیکی سیستم بستگی دارد). میراسازی این نوسانات از اهمیت فراوانی برخوردار است. این نوسانات طبیعتاً دارای فرکانس پایینی هستند و می‌توانند ویژگی‌های مختلفی داشته باشند [۴].

4- پایداری سیگنال کوچک

پایداری سیگنال کوچک توانایی سیستم برای حفظ حالت سنکرونیزه در اثر اغتشاش‌های کوچک را نشان می‌دهد.

عکس‌العمل سیستم در مقابل اغتشاش‌های کوچک، به عوامل چندی از جمله: نقطه کار اولیه، قدرت سیستم انتقال و نوع سیستم کنترل تحریک بستگی دارد. برای ژنراتوری که به طور شعاعی به یک سیستم قدرت بزرگ متصل است، ناپایداری در غیاب تنظیم‌کننده‌های خودکار ولتاژ^۲ (AVR) (یعنی با ولتاژ تحریک ثابت)، به علت کمبود گشتاور سنکرون کننده، اتفاق می‌افتد. این مسئله منجر به ناپایداری غیر نوسانی مطابق با شکل (۱) می‌شود [4]

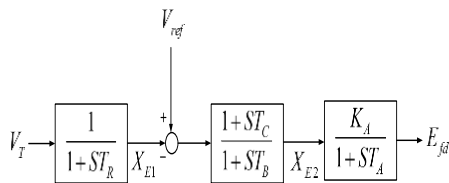
¹ Low frequency Oscillation

² Automatic Voltage Regulator

EMF استاتور مربوط به ولتاژ میدان d و q و راکتانس سنکرون محور d و q راکتانس گذرای محور d و q جریان محور d و q استاتور I_d, I_q توان الکتریکی خروجی ژنراتور سنکرون P_e ضریب میرایی D می باشد [5].

۶- مدل سازی سیستم تحریک

مدل سیستم تحریک مورد استفاده در این مقاله مدل استاندارد IEEE AC4A می باشد، بلوک دیاگرام سیستم تحریک در شکل (۳-۲) نشان داده شده است [۲۸].



شکل (۳) بلوک دیاگرام سیستم تحریک [6].

معادلات دینامیکی سیستم تحریک به صورت روابط زیر به دست می آید.

$$\dot{E}_{fdi} = \frac{K_{Ai}}{T_{Ai}} X_{E2i} - \frac{1}{T_{Ai}} E_{fdi} \quad (11)$$

$$\dot{X}_{E1i} = \frac{1}{T_{Ri}} V_{Ti} - \frac{1}{T_{Ri}} X_{E1i} \quad (12)$$

$$\dot{X}_{E2i} = \frac{1}{T_{Bi}} \left(\frac{T_{Ci}}{T_{Ri}} - 1 \right) X_{E1i} - \frac{1}{T_{Bi}} X_{E2i} + \frac{T_{Ci}}{T_{Bi} T_{Ri}} V_{Ti} + \frac{1}{T_{Bi}} V_{refi} \quad (13)$$

که V_{Ti} ولتاژ ترمینال نام ژنراتور سنکرون و V_{refi} ولتاژ مرجع و K_{Ai} دامنه و T_{Ai} ثابت زمانی (کنسنتیم) تحریک می باشد. سیستم تحریک یک منبع جریان مستقیم برای سیم پیچی میدان ماشین سنکرون است، که جریان و ولتاژ میدان سیم پیچ تحریک را کنترل می کند.

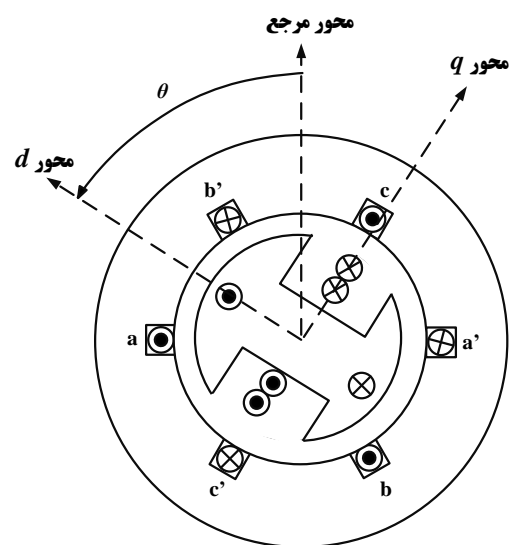
$$P_{ei} = \quad (4)$$

$$\sum_{j=1, j \neq i}^{ng} [C_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) + D_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)]$$

$$C_{ij} = E_i E_j B_{ij} \quad \text{و} \quad D_{ij} = E_i E_j G_{ij} \quad (5)$$

۵-۲- مدل دو محوری

ژنراتورهایی که مجهز به سیستم تحریک در نظر گرفته می شوند، باید به صورت دو محوری مدل شوند. معادلات دینامیکی و جبری ژنراتور سنکرون مدل دو محوری که در شکل (۲) نشان داده شده است به صورت روابط زیر در نظر گرفته شده است [5]:



شکل (۲) دیاگرام ژنراتور سنکرون دو محوری [5].

$$\dot{\delta}_i = \omega_i - \omega_s \quad (6)$$

$$\dot{\omega}_i = \frac{\omega_s}{2H_i} (T_{mi} - P_{ei} - D_i(\omega_i - \omega_s)) \quad (7)$$

$$\dot{E}'_{qi} = \frac{1}{\tau_{d0i}} (E_{fdi} - E'_{qi} + (X_{di} - X'_{di}) I_{di}) \quad (8)$$

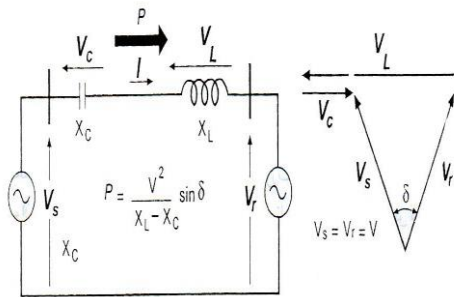
$$\dot{E}'_{di} = \frac{1}{\tau_{q0i}} (-E'_{di} + (X_{qi} - X'_{qi}) I_{qi}) \quad (9)$$

$$P_{ei} = (I_{di} E'_{di} + I_{qi} E'_{qi}) + (X'_{qi} - X'_{di}) I_{di} I_{qi} \quad (10)$$

که در این معادلات

τ_{d0}, τ_{q0} ثابت زمانی گذرای محور d و q EMF استاتور مربوط به مؤلفه گذرای شار روتور

۷-مدل سازی پایدار



شکل (۴) سیستم ابتدایی دو ماشینه با یک خط جبران سازی شده با خازن سری و دیگرام فازوری [8].

دیگرام فازوری به روشنی نشان می‌دهد که در یک جریان خط معین، ولتاژ روی خازن سری دارای پلاریته مخالف، راکتانس سری خط را وادار به افزایش به اندازه مقدار ولتاژ خازن می‌کند. بنابراین، جبران سازی خازنی سری با افزایش ولتاژ روی امپدانس خط انتقال کار می‌کند، که این امر به نوبه خود جریان خط مربوطه و توان انتقال یافته را افزایش می‌دهد. بنابراین نتیجه می‌شود که همان انتقال توان حالت ماندگار را می‌توان ایجاد کرد

۹-الگوریتم بهینه سازی شیرمورچه

الگوریتم ALO از مکانیزم شکار شیرمورچه در طبیعت تقلید می‌کند پنج گام اصلی شکار طعمه عبارتند از راه رفتن تصادفی مورچه‌ها، ساختن تله، به دام انداختن مورچه‌ها در تله، گرفتن طعمه و بازسازی تله. الگوریتم پیشنهاد شده در سه مرحله محک زده شد. [7]

الگوریتم ALO تعریف شده است. به طوری که تابع سه تایی که بهینه کلی را برای مسائل بهینه سازی تخمین می‌زند به شرح زیر است:

$$ALO(A, B, C) \quad (17)$$

که در آن A یک تابع است که حل اولیه تصادفی را تولید می‌کند، B جمعیت اولیه ارائه شده توسط تابع A را دستکاری می‌کند و C نتایج را وقتی که معیارهای موجود برآورده شد، جواب‌های درست را

پایدارساز سستم قدرت (PSS) و پایدارساز نوسانات توان (POD) با اعمال سیگنال مکمل مناسب به سیستم تحریک و کنترل کمکی ادوات FACTS قادر خواهند بود که پایداری دینامیکی سیستم را به نحو مطلوبی بهبود بخشد. درواقع پایدارساز با مدوله کردن تحریک ژنراتور، یک مؤلفه گشتاور الکتریکی میراکننده جهت میرایی نوسانات به وجود می‌آورد. این شیوه از آنجا اهمیت بالایی می‌یابد، که هزینه اجرایی آن نسبت به سایر روش‌های دیگر پایین است. ایده اصلی در طراحی پایدارساز سیستم قدرت، افزایش میرایی مد الکترومکانیکی ژنراتورها می‌باشد [7]

معادلات دینامیکی پایدارساز با توجه به بلوک دیگرام شکل (۳-۳) به صورت زیر به دست می‌آید.

$$\dot{X}_{POD1} = -\frac{1}{T_W} X_{POD1} + K_{POD} \frac{1}{120\pi} \dot{\omega}_{ij} \quad (14)$$

$$\dot{X}_{POD2} = -\frac{1}{T_2} X_{POD2} + \frac{1}{T_2} X_{POD1} + \frac{T_1}{T_2} \dot{X}_{POD1} \quad (15)$$

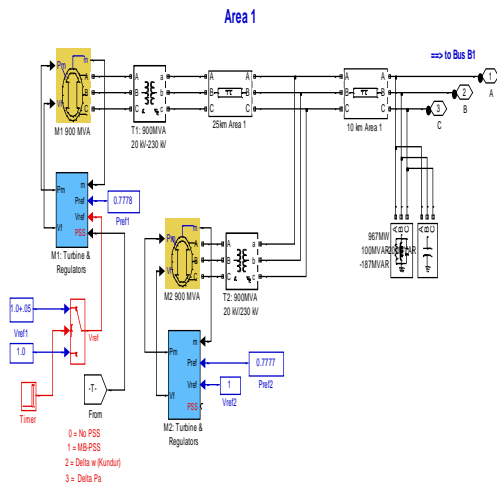
$$\dot{X}_{POD3} = -\frac{1}{T_4} X_{POD2} + \frac{1}{T_4} X_{POD1} + \frac{T_3}{T_4} \dot{X}_{POD2} \quad (16)$$

که $T_4, \dots, T_1 > 0$ پارامترهای پایدارساز می‌باشند که باید به صورت بهینه تنظیم شوند و K_{POD} بهره POD است، که می‌تواند مقدار ثابت و بهینه داشته باشد

۸-مدل سازی SSSC

. اصول اولیه عملکرد SSSC را می‌توان با مراجعه به روش متداول جبران سازی خازنی سری و دیگرام فازوری ولتاژ که در شکل (۴) نشان داده شده، توضیح داد [8].

متلب

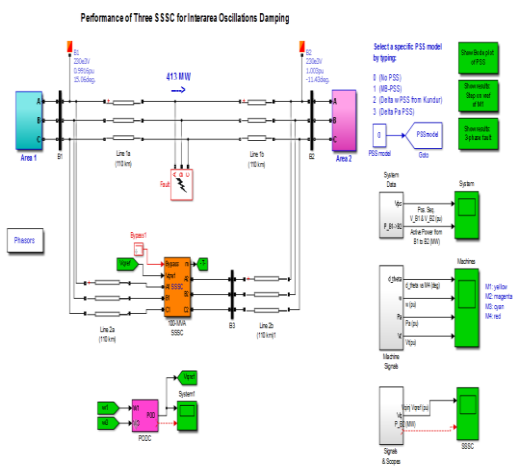


شکل (۶) نمای داخلی ناحیه ۱ و ۲ سیستم مورد مطالعه

۱۱- شبیه‌سازی سیستم قدرت چهار ماشینه دو

ناحیه‌ای در حضور SSSC

یکی دیگر از روش‌های میراسازی نوسانات بین ناحیه‌ای استفاده از ادوات FACTS می‌باشد. ادوات FACTS علاوه بر کاربردشان در سیستم‌های قدرت توانایی بهبود پایداری دینامیکی سیستم قدرت می‌شوند. به همین خاطر در این مقاله از SSSC برای میراسازی نوسانات فرکانس پایین و بهبود پایداری دینامیکی سیستم قدرت استفاده شده است. با توجه به ساختار SSSC می‌توان گفت که توانایی تزریق توان راکتیو به سیستم قدرت و حفظ پایداری را دارد. نحوه نصب SSSC در سیستم قدرت مورد مطالعه در شکل (۷) نشان داده شده است.



بازمی‌گرداند. توابع A, B, C و به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\emptyset \xrightarrow{A} \{M_{Ant}, M_{OA}, M_{Antlion}, M_{OAL}\} \quad (18)$$

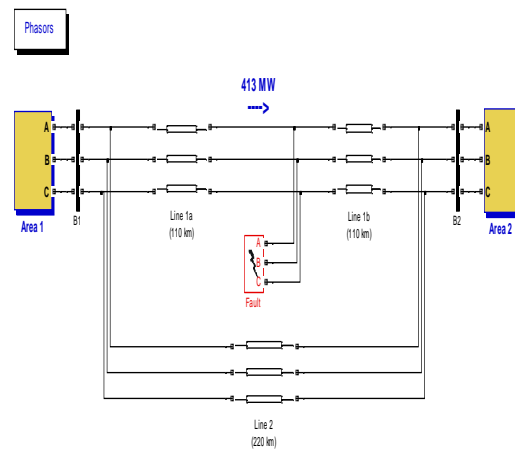
$$\{M_{Ant}, M_{Antlion}\} \xrightarrow{B} \{M_{Ant}, M_{Antlion}\} \quad (19)$$

$$\{M_{Ant}, M_{Antlion}\} \xrightarrow{C} \{true, false\} \quad (20)$$

که $M_{Antlion}$ ماتریس موقعیت مورچه‌ها است، شامل موقعیت شیرمورچه‌ها است، M_{OA} شامل برازندگی مربوط به مورچه‌ها است و M_{OAL} شامل برازندگی مربوط به شیرمورچه‌ها است. [8].

10- معرفی سیستم چهار ماشینه جهت بررسی نوسانات محلی و بین ناحیه‌ای

به دلیل این‌که اصلی‌ترین هدف این تحقیق، مطالعه در مورد میراسازی نوسانات فرکانس پایین می‌باشد، لذا سیستمی که انتخاب می‌شود بایستی دارای چندین ماشین و چندین ناحیه باشد. به همین جهت در این مطالعه از سیستم استاندارد چهار ماشینه سه ناحیه‌ای استفاده شده است [۴]. ساختار کلی این سیستم در نرم‌افزار متلب در شکل (۵) نشان داده شده است. همچنین مدل شبیه‌سازی شده ژنراتورهای سنکرون ناحیه ۱ و بار متصل به شین در این ناحیه در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل (۵) شماتیک کلی از سیستم مورد مطالعه پیاده‌سازی شده در نرم‌افزار

شکل (۷) سیستم مورد مطالعه همراه با حضور POD اعمال شده به SSSC

حالت	ITSE	ITAE
بدون POD و PSS	۰/۲۷۹	۵۱/۲۸۳۳
بدون POD و PSS با	۰/۰۰۰۶۷۶۹۲	۰/۸۸۶۸۹
با POD و PSS بدون	۰/۰۰۰۱۴۶۱۸	۰/۶۸۰۹۲
با POD و PSS با	۰/۰۰۰۱۰۳۹۷	۰/۳۷۳۴

۱۲- نتایج شبیه سازی

در این مقاله ابتدا برای بررسی نوسانات بین ناحیه‌ای و استفاده از ساختار پیشنهادی جهت میراسازی این نوسانات، سیستم اصلاح شده استاندارد چهار ماشینه کندور معرفی گردید. نتایج شبیه‌سازی بر روی این سیستم برای نشان دادن نوسانات بین ناحیه‌ای با جزئیات و به‌طور دقیق مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در ادامه جهت مقایسه سناریوهای پیشنهادی از شاخص ارزشیابی استفاده شده است. این شاخص‌ها به صورت $ITSE^3$ و $ITAE^4$ در نظر گرفته شده است [36]. نتایج شبیه‌سازی در این حالت با در نظر گرفتن اثر کنترلر میراساز مبتنی بر SSSC نشان داد که در حالتی که هیچ کنترل‌کننده میراسازی به SSSC اضافه نشده بود، پس از برطرف شدن خطا سیستم کاملاً ناپایدار می‌شود. اما با اضافه کردن کنترلر میراساز روی حلقه کنترلی توان راکتیو، بعد از برطرف شدن خطا، نوسانات سیستم با سرعت مناسبی میرا شده‌اند و سیستم بعد از چند ثانیه به حالت عادی خود برگشته است. نتایج شبیه‌سازی برای حالتی که PSSها نیز به صورت بهینه تنظیم شده‌اند، باعث افزایش میرایی مود بین ناحیه‌ای و پایداری سیستم شده است.

$$ITSE = \int_0^{t_{sim}} t. (\Delta \omega_{13}^2) dt \quad (21)$$

$$ITAE = \int_0^{t_{sim}} t. (|\Delta \omega_{13}|) dt \quad (22)$$

جدول (۱) نتایج شاخص ارزیابی با روش الگوریتم ALO

۱۳- نتیجه گیری و پیشنهادات

نوسانات در سیستم‌های قدرت به دلیل وجود اغتشاشاتی از قبیل خطای اتصال کوتاه سه فاز به زمین، نوسانات توان- زاویه، رخ می‌دهند، که میرا کردن این نوسانات برای بالا بردن قابلیت سیستم امری مهم است. روش میراسازی به وسیله کنترل‌کننده‌ها یکی از اصلی‌ترین و بهترین روش‌ها برای مقابله با نوسانات سیستم می‌باشد. با پیشرفت‌های اخیر در صنعت الکترونیک قدرت و پیدایش سیستم‌های انتقال AC انعطاف پذیر (FACTS) محققین بسیاری در زمینه بررسی قابلیت‌های انواع مختلف این ادوات در میراسازی نوسانات سیستم مطالعاتی انجام داده‌اند. مقالات متعددی در این راستا منتشر شده و توانایی این ادوات انعطاف پذیر را در میراسازی نوسانات فرکانس پایین و زیرسکرون در سیستم قدرت بخصوص با ژنراتور سنکرون نشان داده شد اما با وجود این که ادوات FACTS قابلیت بسیار بالایی در میرا سازی نوسانات توان و بهبود پایداری سیستم قدرت دارند

³ Integral of Time multiplied Square of Error

⁴ Integral of Time multiplied Absolute value of Error

[6]P. W. Sauer and A. Pai, *Power System Dynamics and Stability*. Stipes Publishing L.L.C., 2006.

[6]P. M. Anderson and A. A. Fouad, *Power System Control and Stability*. Wiley India Pvt. Limited, 2008.

[8]H. Shayeghi, H. A. Shayanfar, A. Safari, and R. Aghmasheh, "A robust PSSs design using PSO in a multi-machine environment," **Energy Convers. Manag.**, vol. 51, no. 4, pp. 696–702, Apr. 2010.

. همچنین استفاده از داده‌های PMU با در نظر گرفتن تأخیر زمانی به عنوان سیگنال کنترلی ادوات مختلف نیز موضوع جدیدی است پیشنهادهای زیر را می‌توان برای کارهای آینده ارائه نمود:

- طراحی کنترل‌کننده میرا ساز فازی مقاوم در برابر عدم قطعیت‌های موجود در سیستم قدرت، جهت میراسازی نوسانات سیستم.

- استفاده از سیستم‌های انرژی تجدید پذیر برای بهبود پایداری گذرا و میراسازی نوسانات زیر سنکرون و فرکانس پایین.

- طراحی کنترل‌کننده میرا ساز مبتنی بر هوش مصنوعی جهت جبران اثر تأخیر زمانی موجود در سیگنال‌های سراسری و طراحی پایدارساز برای میراسازی نوسانات

14-مراجع

[1] L.Khan and K. L. Lo, "Hybrid micro-GA based FLCs for TCSC and UPFC in a multi-machine environment," **Electr. Power Syst. Res.**, vol. 76, no. 9–10, pp. 832–843, Jun. 2006.

[2] A. Feliachi, "Stabilization of inter-area oscillation modes through excitation systems," **IEEE Trans. Power Syst.**, vol. 9, no. 1, pp. 494–502, 1994.

[3] E. V. Larsen, J. J. Sanchez-Gasca, and J. H. Chow, "Concepts for design of FACTS controllers to damp power swings," **IEEE Trans. Power Syst.**, vol. 10, no. 2, pp. 948–956, May 1995.

[4] P. Kundur, N. J. Balu, and M. G. Lauby, *Power system stability and control*. McGraw-Hill, 1994.

[5]S. R. Khuntia and S. Panda, "ANFIS approach for SSSC controller design for the improvement of transient stability performance," **Math. Comput. Model.**, vol. 57, no. 1–2, pp. 289–300, Jan. 2013