

## طراحی کنترلر تکمیلی برای SSSC با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری به منظور

### پایدارسازی دینامیکی سیستم قدرت

اسکندر قلی‌پور<sup>۱</sup> و محسن بصیری کجانی<sup>۲</sup>

۱- استادیار، مجتمع عالی آموزشی و پژوهشی صنعت آب و برق اصفهان (در حال حاضر، دانشکده مهندسی

برق- دانشگاه اصفهان)- اصفهان- ایران

e.gholipour@eng.ui.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق- دانشگاه اصفهان- اصفهان- ایران

moh3enbasiri@gmail.com

**چکیده:** بهبود پایداری دینامیکی سیستم قدرت با استفاده از کنترل کننده تکمیلی برای یک جبران کننده استاتیکی سنکرون سری (SSSC) به طور کامل در این مقاله مورد بحث قرار گرفته است. کنترل تکمیلی هنگام بروز اغتشاش بر عملکرد SSSC تأثیر گذاشته، باعث بهبود پایداری دینامیکی سیستم قدرت می‌شود. عملکرد مناسب کنترل تکمیلی به پارامترهای سیستم کنترل و سیگنال‌های ورودی کنترل کننده بستگی دارد. به منظور به دست آوردن پارامترهای بهینه سیستم کنترل، از الگوریتم رقابت استعماری استفاده شده است. همچنین، دو نوع سیگنال ورودی محلی و انتقال یافته از راه دور برای سیستم کنترل در نظر گرفته و تأثیر تأخیر در اندازه‌گیری و انتقال سیگنال، مطالعه شده است. در انتها نیز نتایج به دست آمده از این روش با نتایج حاصل از روش الگوریتم ژنتیک مقایسه شده‌اند.

**واژه‌های کلیدی:** الگوریتم رقابت استعماری، تأخیر در انتقال سیگنال، پایداری سیستم قدرت، جبران کننده استاتیکی سنکرون سری، نوسان‌های فرکانس پایین

### ۱- مقدمه

امروزه پایدارسازهای سیستم قدرت (PSSs<sup>۱</sup>) به طور گسترده به منظور میراسازی نوسان‌های فرکانس پایین استفاده می‌شوند اما در برخی شرایط به خصوص برای نوسان‌های بین ناحیه‌ای استفاده از این پایدارسازها نیز ممکن است میرایی کافی را برای سیستم نداشته باشند [۱،۲].

پیشرفت‌های اخیر در الکترونیک قدرت به استفاده از ادوات<sup>۲</sup> FACTS در سیستم قدرت منجر شده است. این تجهیزات قادر به کنترل سریع شبکه در شرایط مختلف بوده و این خصوصیت امکان استفاده از آنها برای بهبود پایداری سیستم قدرت را ممکن می‌سازد [۳]. جبران کننده استاتیکی سنکرون سری<sup>۳</sup> SSSC یکی از ادوات FACTS است که

با پیدایش سیستم‌های قدرت بزرگ و اتصال آنها به هم، نوسان‌های فرکانس پایین در رنج ۳-۰/۳ Hz در سیستم قدرت مشاهده شد. این نوسان‌های ممکن است پس از به وجود آمدن میرا شوند یا در سیستم باقی مانده، دامنه آنها زیاد شود و موجب ناپایداری سیستم شوند.

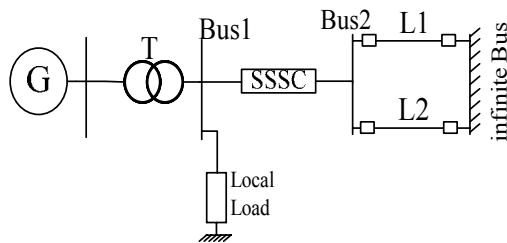
تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۱/۰۸/۲۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۰۲/۱۱

نام نویسنده مسئول: اسکندر قلی‌پور

نشانی نویسنده مسئول: ایران - اصفهان - خیابان هزار جریب - دانشگاه اصفهان - دانشکده برق

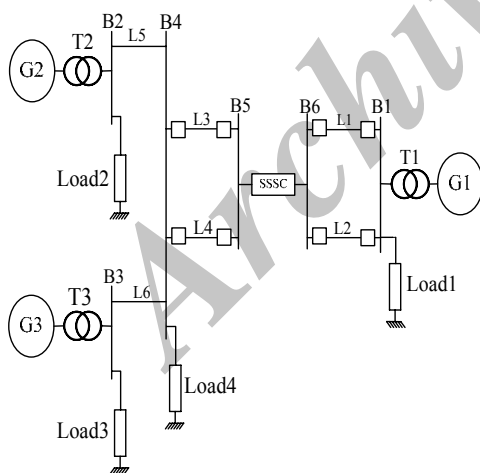
گاورنر و سیستم تحریک است. به منظور میراسازی نوسان‌های یک SSSC بین باس ۱ و ۲ نصب شده است.



شکل (۱): سیستم تک ماشین متصل به باس بی‌نهایت به همراه SSSC

## ۲-۲- سیستم قدرت چند ماشین

کنترلر تکمیلی SSSC برای سیستم چند ماشین شکل (۲) نیز در نظر گرفته شده است [۱۵]. این سیستم دارای سه ژنراتور بوده که ژنراتور ۱ در ناحیه اول و ژنراتورهای ۲ و ۳ در ناحیه دوم قرار دارند. تمامی اطلاعات مربوط به این سیستم در ضمیمه آورده شده است.



شکل (۲): سیستم قدرت سه ماشین تحت مطالعه

## ۲-۳- جبران کننده استاتیکی سنکرون سری

جبران کننده استاتیکی سنکرون سری یک مبدل منبع ولتاژ سنکرون است که به صورت سری در خط انتقال قرار گرفته و ولتاژ کنترل شده  $V_q$  را که عمود بر جریان خط

به صورت سری در خط قرار گرفته، می‌تواند شارش توان در سیستم قدرت را با تغییر مشخصه خود از خازنی به سلفی کنترل کند [۴].

در مقالات برای طراحی پایداریهای سیستم قدرت از روش‌های معمول مانند: جایابی قطب‌ها [۵]، جبران فاز [۶]، جبران مانده‌ها [۷] و همچنین روش‌های کنترل مدرن استفاده شده است. مشکلات این روش‌ها عبارتند از: حجم بالای محاسبات، سرعت همگرایی پایین و همچنین امکان متوقف شدن در مینیمم محلی که باعث می‌شود پاسخ به دست آمده بهینه نباشد. امروزه برای کاهش مشکلات روش‌های معمول طراحی، از روش‌های هوشمند در طراحی پایداریهای سیستم قدرت در سطح وسیعی استفاده می‌شود. این روش‌ها شامل بهینه‌سازی گروه ذرات [۸-۱۰]، الگوریتم ژنتیک [۱۱]، الگوریتم تکامل تفاضلی [۱۲]، منطق فازی [۱۳] و ... است.

در بخش دوم این مقاله سیستم قدرت تحت مطالعه معرفی شده است. ساختار سیستم کنترل در قسمت سوم شرح داده شده و شرح مختصری از الگوریتم رقابت استعماری در بخش چهارم آورده شده است. در بخش پنجم طراحی و بهینه‌سازی پارامترهای کنترل به همراه نتایج شبیه‌سازی برای سیستم تک ماشین و چند ماشین آورده شده است. در انتها نیز نتایج این پژوهش ارائه شده است.

## ۲- سیستم تحت مطالعه

### ۲-۱- سیستم تک ماشین متصل به باس بینهایت

در ابتدا به منظور بهینه کردن پارامترهای SSSC، سیستم تک ماشین متصل به باس بینهایت در نظر گرفته شده (شکل ۱) [۱۴، ۱۵] و تمامی اطلاعات مربوط به این سیستم در ضمیمه آورده شده است. این سیستم از یک ژنراتور که توسط ترانسفورماتور و دو خط موازی به باس بینهایت متصل شده، تشکیل شده است. ژنراتور این سیستم مجهز به

### ۳-۲- سیگنال ورودی

تکنولوژی اندازه‌گیری ناحیه گسترده که بر اساس واحدهای اندازه‌گیری فازور ( $PMU^5$ ) است، وسیله‌ای است که به منظور جمع‌آوری اطلاعات دقیق سیستم‌های قدرت به صورت آنلاین استفاده می‌شود. نظارت، حفاظت و کنترل گسترده ( $WAMPAC^6$ ) به معنی جمع‌آوری اطلاعات سیستم از نقاط مختلف و انتقال آنها به نقطه‌ای خاص برای جلوگیری از انتشار یک اغتشاش در سیستم است. تکنولوژی اندازه‌گیری همزمان ( $SMT^7$ ) که مبتنی بر  $GPS^8$  است، از مهمترین اجزای  $WAMPAC$  است. انتظار می‌رود سیستم‌های قدرتی که از تکنولوژی  $WAMPAC$  استفاده می‌کنند، قابلیت اطمینان بیشتری داشته باشند و از خاموشی‌های سراسری جلوگیری کنند [۱۷].

در طراحی سیستم کنترلی برای  $SSSC$  انتخاب سیگنال ورودی مناسب، اهمیت زیادی دارد [۱۸]. هر دو نوع سیگنال محلی و سیگنال انتقال یافته از راه دور می‌تواند برای سیستم کنترل استفاده شود. سیگنال محلی گرچه اندازه‌گیری آن به سهولت انجام می‌پذیرد، ولی ممکن است حاوی مدهای نوسانی سیستم نباشد، لذا در مقایسه با سیگنال انتقال یافته از راه دور به طور کامل رؤیت‌پذیر و کنترل‌پذیر نیست [۱۹].

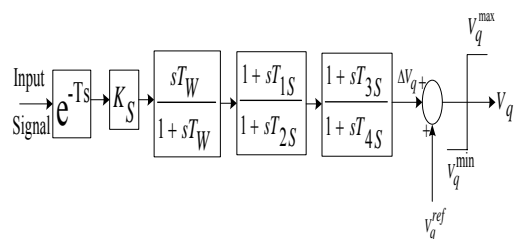
برای سیگنال محلی توان اکتیو خط، توان راکتیو خط، اندازه جریان خط و اندازه ولتاژ باسباری که  $SSSC$  در آن نصب شده است، از کاندیداهای سیگنال محلی هستند [۲۰]. برای سیگنال انتقال یافته از راه دور، زاویه روتور و تغییرات سرعت ژنراتور می‌توانند کاندید سیگنال ورودی باشند [۲۱]. در این مقاله از توان اکتیو خطی که  $SSSC$  در آن نصب شده، به عنوان سیگنال ورودی محلی و از تغییرات سرعت ژنراتور در سیستم تک ماشینه ( $\Delta\omega_G$ ) و تغییرات سرعت ژنراتورها در دو ناحیه یک و دو برای سیستم چند ماشینه ( $\Delta\omega_{G2} - \Delta\omega_{G1}$ ) به عنوان سیگنال ورودی انتقال یافته از راه دور استفاده شده است [۲۲]. برای سیگنال محلی تأخیری معادل  $15\text{ ms}$  در اندازه‌گیری سنسور در نظر گرفته شده است.

است، به خط تزریق می‌کند و به این طریق امپدانس خط را جبران می‌کند. راکتانس مجازی که از طریق تزریق ولتاژ  $V_q$  به خط اعمال می‌شود، با توجه به سیستم کنترل می‌تواند سلفی یا خازنی باشد و  $SSSC$  از این طریق بر شارش توان در خط تأثیر می‌گذارد. تغییرات  $V_q$  توسط یک  $VSC^*$  که در ثانویه ترانسفورماتور قرار دارد، ایجاد می‌شود.

### ۳- سیستم کنترل

#### ۳-۱- ساختار کنترل

سیستم کنترل نشان داده شده در شکل (۳) به عنوان سیستم کنترل تکمیلی برای  $SSSC$  در نظر گرفته شده است. این سیستم شامل یک بلوک تأخیر، بهره ( $K_S$ )،  $Washout$  و دو طبقه  $Lead-Lag$  است. بلوک تأخیر مربوط به تأخیر در انتقال سیگنال ورودی است. برای سیگنال‌های ورودی محلی، تأخیر در اندازه‌گیری سنسورها و برای سیگنال‌های انتقال یافته از راه دور علاوه بر تأخیر در اندازه‌گیری سنسورها، تأخیر در انتقال سیگنال نیز در نظر گرفته شده است. بلوک  $Washout$  یک فیلتر بالا گذر بوده که باعث می‌شود سیستم کنترلی سیگنال‌های مربوط به فرکانس نامی سیستم را بدون تغییر عبور داده و لذا بر عملکرد حالت دائمی سیستم تأثیر نگذارد. ثابت زمانی بلوک  $Washout$  معمولاً در رنج ۲۰-۱ قرار دارد [۱۶]. دو طبقه  $Lead-Lag$  جبران فاز مورد نیاز را در سیستم فراهم می‌کند. در شکل ۳،  $V_q^{ref}$  بیان کننده مرجع ولتاژ در حالت دائمی است. در این مقاله فرض شده است که هنگام وقوع اغتشاش در سیستم  $V_q^{ref}$  ثابت بوده و از طریق تزریق ولتاژ  $\Delta V_q$  به  $SSSC$  جبران مورد نیاز به دست می‌آید.



شکل (۳): سیستم کنترل تکمیلی برای  $SSSC$

Subject to:

$$K_s^{\min} \leq K_s \leq K_s^{\max} \quad (۵)$$

$$T_{1S}^{\min} \leq T_{1S} \leq T_{1S}^{\max} \quad (۶)$$

$$T_{2S}^{\min} \leq T_{2S} \leq T_{2S}^{\max} \quad (۷)$$

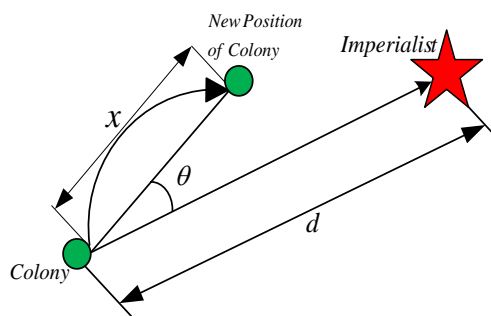
$$T_{3S}^{\min} \leq T_{3S} \leq T_{3S}^{\max} \quad (۸)$$

$$T_{4S}^{\min} \leq T_{4S} \leq T_{4S}^{\max} \quad (۹)$$

برای بهینه کردن این مسأله روش‌های مختلف بهینه‌سازی (از جمله روش‌های هوشمند) استفاده شده است. در این مقاله با کمک الگوریتم رقابت استعماری مسأله بهینه‌سازی حل و نتایج با بهترین روش‌های قبلی مقایسه شده است. در قسمت بعد شرح مختصری از این الگوریتم آورده شده است.

#### ۵- الگوریتم رقابت استعماری

الگوریتم رقابت استعماری [۲۳] یکی از روش‌های بهینه‌سازی است که از رقابت‌های سیاسی الهام گرفته شده است. شبیه الگوریتم‌های تکاملی دیگر، این الگوریتم نیز با یک جمعیت اولیه شروع به کار می‌کند. هر عضو از این جمعیت یک کشور نام دارد. تعدادی از بهترین کشورها (کشورها با کمترین هزینه) به عنوان امپراتور و بقیه آنها به عنوان کلونی این کشورها انتخاب می‌شوند. تمامی کلونی‌ها بر اساس قدرت امپراتورها بین آنها تقسیم می‌شوند. قدرت هر امپراتور متناسب با عکس هزینه آن است. بعد از تقسیم تمام کلونی‌ها بین امپراتورها و تشکیل امپراتوری‌های اولیه، کلونی‌ها شروع به حرکت به سمت امپراتورها می‌کنند. این حرکت مدل کننده سیاست جذب<sup>۹</sup> است. شکل (۴) نشان دهنده حرکت یک کلونی به سمت امپراتور است.



شکل (۴): حرکت کلونی به سمت امپراتور

#### ۴- محاسبه پارامترها

در این بخش روش محاسبه بهره کنترلر ( $K_S$ ) و ثابت زمانی‌های ( $T_{1S}, T_{2S}, T_{3S}, T_{4S}$ ) بررسی و تحلیل قرار می‌شوند. برای به دست آوردن مقدار بهینه این پنج متغیر باید تابع هدف مناسب و قیود مربوطه تعریف شده و با الگوریتم‌های بهینه‌سازی مسأله را حل نمود.

به منظور مقایسه نتایج شبیه‌سازی در روش پیشنهادی و روش‌های قبلی در این مقاله نیز  $T_W = 10$  فرض شده است [۱۵].

در سیستم کنترل تکمیلی در حالت دائمی  $\Delta V_q$  صفر بوده و  $V_q^{\text{ref}}$  ثابت است. در حالت گذرا  $V_q$  به فرم زیر تعیین می‌شود:

$$V_q = V_q^{\text{ref}} + \Delta V_q \quad (۱)$$

نوسان‌های فرکانس پایین که در سیستم به وجود می‌آیند، در زاویه روتور، سرعت ژنراتور و توان عبوری از خط ظاهر می‌شوند. مینیمم کردن همه یا یکی از این موارد می‌تواند به عنوان تابع هدف انتخاب شود. در این مقاله برای سیستم تک ماشینه تابع هدف به شکل زیر انتخاب شده است [۱۴]:

$$J = \int_{t=0}^{t=t_{\text{sim}}} |\Delta \omega| \cdot t \cdot dt \quad (۲)$$

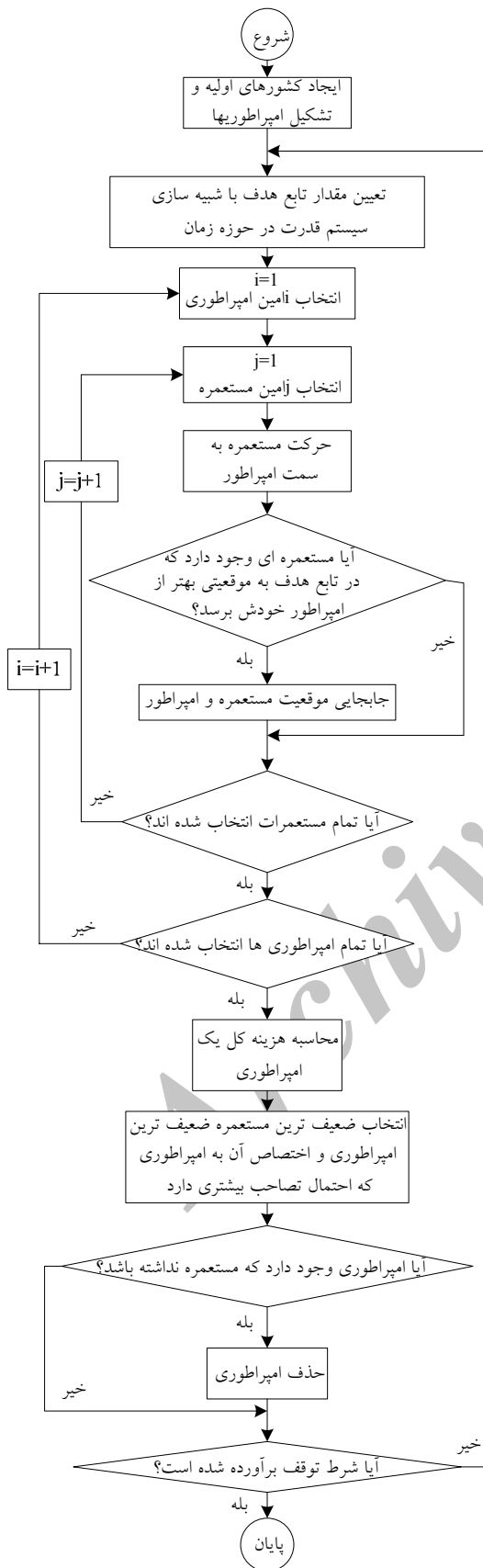
در این معادله  $t_{\text{sim}}$  زمان شبیه‌سازی و  $\Delta \omega$  تغییرات سرعت است.

تابع هدف برای سیستم چند ماشینه نیز به صورت زیر در نظر گرفته شده است [۱۴]:

$$J = \int_{t=0}^{t=t_{\text{sim}}} (|\Delta \omega_2 - \Delta \omega_3|) \cdot t \cdot dt + (|\Delta \omega_2 - \Delta \omega_1|) \cdot t \cdot dt \quad (۳)$$

در این معادله  $\Delta \omega_1$ ،  $\Delta \omega_2$  و  $\Delta \omega_3$  تغییرات سرعت ژنراتورهای  $G_1$ ،  $G_2$  و  $G_3$  در سیستم چند ماشینه و  $t_{\text{sim}}$  زمان شبیه‌سازی است. قیود مسأله محدودده تغییرات پارامترهای SSSC است. بنابراین، مسأله طراحی سیستم کنترل به شکل یک مسأله بهینه‌سازی به فرم زیر خواهد بود:

$$\text{Minimize } J \quad (۴)$$



شکل (۵): فلوچارت الگوریتم رقابت استعماری

در این حرکت  $\theta$  و  $x$  اعداد دلخواه با توزیع یکنواخت بوده و  $d$  فاصله بین امپراتور و کلونی است.

$$x \sim U(0, \beta \times d) \quad (10)$$

$$\theta \sim U(-\gamma, \gamma) \quad (11)$$

$\beta$  و  $\gamma$  اعداد دلخواه بوده که فضای جستجوی کلونی اطراف امپراتور را تعیین می‌کنند. در این مقاله  $\beta$  و  $\gamma$  به ترتیب ۲ و  $\pi/4$  انتخاب شده‌اند [۲۳].

رقابت استعماری بین امپراتوری‌ها به صورت افزایش یا کاهش قدرت امپراتورها شکل می‌گیرد. هر امپراتوری که در این رقابت نتواند قدرت خود را افزایش دهد یا قدرت آن کاهش یابد، از بین خواهد رفت. از بین رفتن امپراتوری‌های ضعیف و افزایش قدرت امپراتوری‌های قوی تا آنجا ادامه پیدا می‌کند که یک امپراتوری باقی بماند. در این حالت بقیه کشورها کلونی این امپراتور بوده و الگوریتم پایان پذیرفته است. شکل ۵ فلوچارت الگوریتم رقابت استعماری را نشان می‌دهد.

## ۶- نتایج شبیه‌سازی

### ۶-۱- سیستم تک ماشینه

عملکرد سیستم کنترل در ابتدا برای سیستم تک ماشینه معرفی شده در قسمت دوم (مقاله و ضمیمه) بررسی شده است. برای شبیه‌سازی این سیستم از نرم‌افزار MATLAB/SimPowerSystem استفاده شده است. ابتدا در  $t = 1$  s یک خطای ۳ فاز به مدت سه سیکل در وسط یکی از خطوط موازی که باس ۲ را به باس بینهایت متصل می‌کند، اعمال می‌شود. این خطا با قطع خط برطرف می‌شود. خط پس از سه سیکل مجدداً وصل شده و سیستم به حالت اولیه بر می‌گردد. برای به دست آوردن مقدار بهینه پنج پارامتر سیستم کنترل، پارامترهای الگوریتم رقابت استعماری مطابق جدول (۱) انتخاب شده‌اند.

جدول (۱): پارامترهای الگوریتم رقابت استعماری

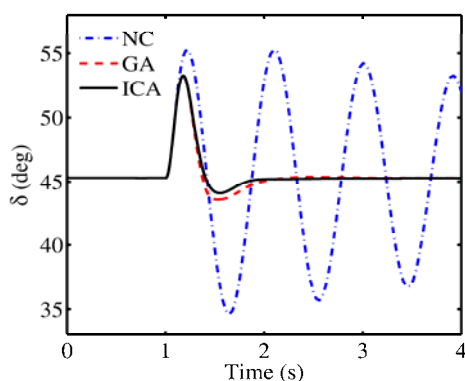
تعداد کشورهای اولیه	تعداد امپراتوریهای اولیه	تعداد ماکزیمم تکرار	$\beta$	$\gamma$
۱۰۰	۱۰	۲۰	۲	$\pi/4$

جدول (۲): پارامترهای سیستم کنترل تکمیلی SSSC برای

سیستم تک ماشینه		محل	راه دور
پارامترهای کنترل	سیگنال ورودی		
	$K_S$	۰/۰۰۵۱	۵۳/۹۶
	$T_{1S}$	۰/۰۱۰	۰/۳۰۳۴
	$T_{2S}$	۰/۶۲۲۷	۰/۴۵۸۰
	$T_{3S}$	۰/۵۶۸۰	۰/۷۹۱۳
	$T_{4S}$	۰/۹۱۰	۰/۳۷۸۱

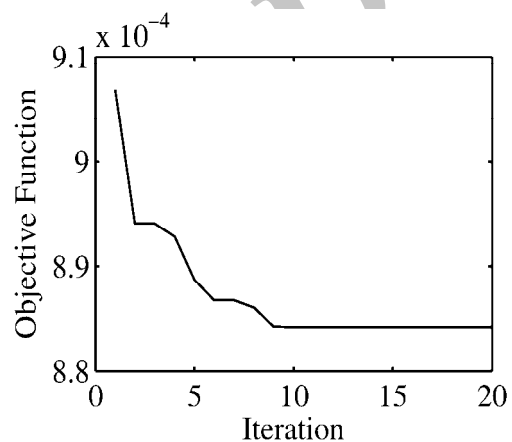
### ۶-۱-۱- بررسی تغییرات بار

برای بررسی عملکرد سیستم کنترل در برابر تغییرات بار، سه بار مختلف (جدول ۳) در نظر گرفته شده است. نتایج الگوریتم ژنتیک نیز در شکل‌های زیر نشان داده شده است [۱۵]. در ابتدا ورودی انتقال یافته از راه دور با  $50 \text{ ms}$  تأخیر به عنوان ورودی سیستم کنترل در نظر گرفته شده و تغییرات زاویه توان ( $\delta$ ) برای سه بار مختلف در شکل‌های (۸)، (۹) و (۱۰) نشان داده شده است. در این شکل‌ها تغییرات زاویه توان بدون سیستم کنترلی با علامت اختصاری (NC)، برای سیستم کنترلی که پارامترهای آن با الگوریتم ژنتیک و الگوریتم رقابت استعماری بهینه شده است، به ترتیب با علامت اختصاری (GA) و (ICA) نشان داده شده‌اند.

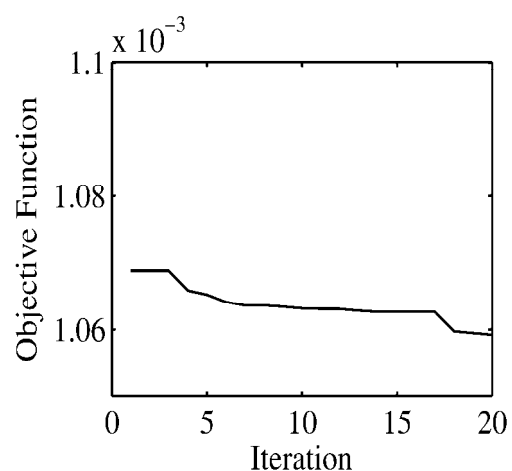


شکل (۸): تغییرات زاویه توان در هنگام اتصال کوتاه سه فاز برای سیستم تک ماشینه با بار نامی

پارامترهای بهینه شده سیستم کنترلی در جدول (۲) آورده شده است. مقادیر این پارامترها با توجه به محدوده تغییرات متغیرهاست که این محدوده مطابق مرجع ۱۲ انتخاب شده است. شکل‌های (۶) و (۷) تغییرات تابع هدف را به ترتیب برای سیگنال ورودی محلی و انتقال یافته از راه دور نشان می‌دهند. از این دو شکل مشاهده می‌شود که تابع هدف برای سیستم کنترل با ورودی محلی و انتقال یافته از راه دور به ترتیب پس از ۹ و ۱۸ تکرار همگرا شده است.



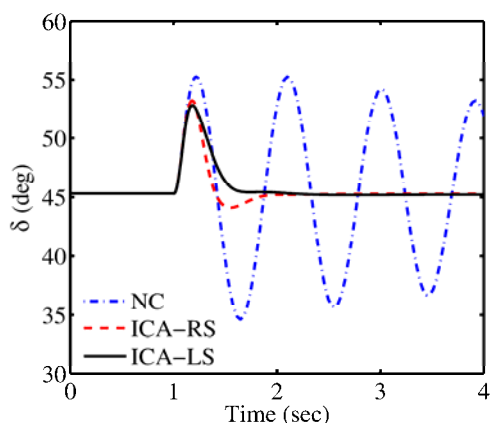
شکل (۶): تغییرات تابع هدف برای کنترلر با ورودی محلی برای سیستم تک ماشینه



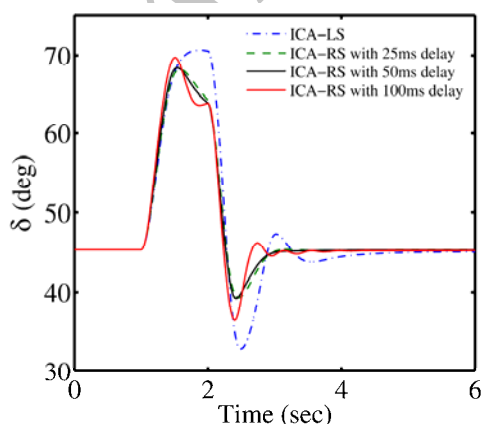
شکل (۷): تغییرات تابع هدف برای کنترلر با ورودی انتقال یافته از راه دور برای سیستم تک ماشینه

(۱۱) نشان می‌دهد برای اغتشاشی که سیستم کنترلی برای آن طراحی شده، هر دو سیگنال ورودی پاسخ نسبتاً شبیه به هم از نظر ماکزیمم فراجهدش و زمان نشست دارند.

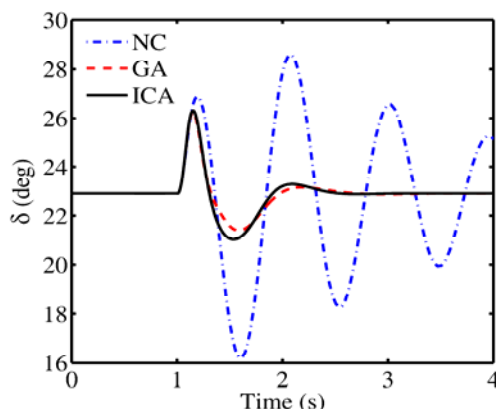
به منظور بررسی تأثیر سیگنال ورودی یک اغتشاش دیگر در نظر گرفته شده است. یکی از خطوط ارتباطی بین باس ۲ و باس بینهایت در  $t = 1$  s قطع و پس از ۱ ثانیه مجدداً وصل می‌شود. پاسخ سیستم برای این اغتشاش در شکل (۱۲) نشان داده شده است. شکل (۱۲) همچنین پاسخ سیستم به ورودی انتقال یافته از راه دور وقتی که تغییر در تأخیر در انتقال سیگنال ورودی وجود دارد را نیز نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که سیستم کنترلی با ورودی انتقال یافته از راه دور پاسخ بهتری نسبت به ورودی محلی دارد.



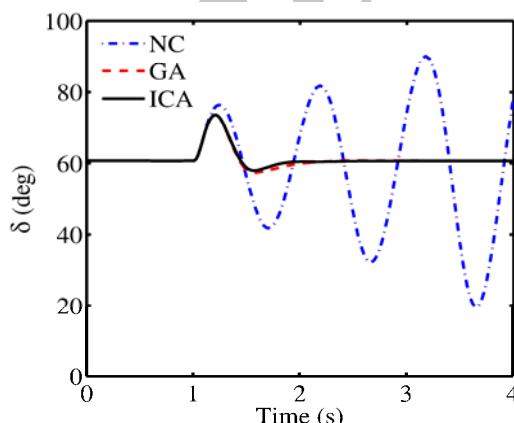
شکل (۱۱): تغییرات زاویه توان برای هر دو سیگنال محلی و سیگنال انتقال یافته از راه دور برای حالتی که سیستم کنترلی برای آن طراحی شده است (اتصال کوتاه سه فاز)



شکل (۱۲): تغییرات زاویه توان برای حالتی که سیستم کنترلی برای آن طراحی نشده است (قطع یکی از خطوط بین باس ۲ و باس بینهایت در  $t = 1$  s و وصل مجدد خط پس از ۱ ثانیه)



شکل (۹): تغییرات زاویه توان در هنگام اتصال کوتاه سه فاز برای سیستم تک ماشینه با بار سبک



شکل (۱۰): تغییرات زاویه توان در هنگام اتصال کوتاه سه فاز برای سیستم تک ماشینه با بار سنگین

جدول (۳): بارهای مختلف در نظر گرفته شده برای سیستم تک ماشینه

تغییرات بار	$P_e$ (pu)	$\delta_0$ (deg)
نامی	۰/۷۵	۴۵/۳
سبک	۰/۴	۲۲/۹
سنگین	۱	۶۰/۷

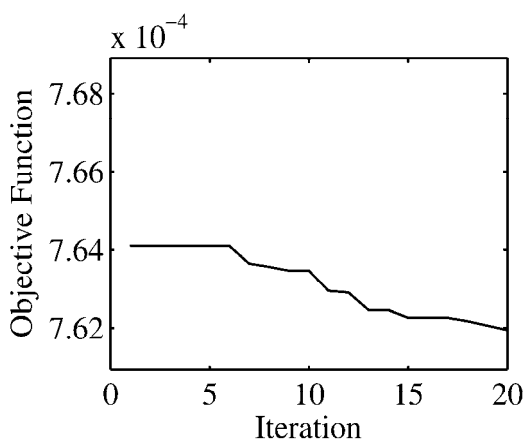
### ۶-۱-۲- مقایسه بین سیگنال محلی و سیگنال

#### انتقال یافته از راه دور

پاسخ سیستم به سیگنال محلی و سیگنال انتقال یافته از راه دور، برای اغتشاشی که سیستم کنترلی برای آن طراحی شده، در شکل (۱۱) نشان داده شده است. در این شکل پاسخ سیستم با ورودی محلی با علامت اختصاری (ICA-) و پاسخ سیستم با ورودی انتقال یافته از راه دور با علامت اختصاری (ICA-RS) نشان داده شده است. شکل

### ۲-۶- سیستم قدرت چند ماشینه

عملکرد سیستم کنترل برای چند ماشینه معرفی شده در قسمت دوم (مقاله و ضمیمه) بررسی شده است. روش بیان شده برای سیستم تک ماشینه بر روی سیستم چند ماشینه برای بهینه‌سازی پارامترهای سیستم کنترل تکمیلی SSSC نیز اعمال شده است. پارامترهای بهینه شده سیستم کنترلی پس از ۲۰ تکرار در جدول (۴) آورده شده است. شکل‌های (۱۳) و (۱۴) تغییرات تابع هدف را نشان می‌دهند. همان طور که از این دو شکل مشاهده می‌شود، تابع هدف برای سیستم کنترل با ورودی محلی پس از ۹ تکرار و برای سیستم کنترل با ورودی انتقال یافته از راه دور پس از ۱۹ تکرار همگرا شده است.



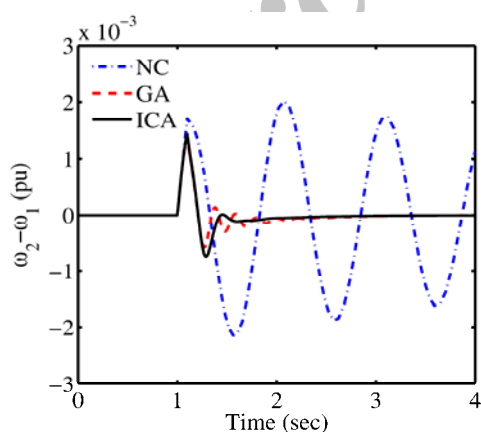
شکل (۱۴): تغییرات تابع هدف برای کنترلر با ورودی انتقال یافته از راه دور برای سیستم چند ماشینه

### ۲-۶-۱- مقایسه نتایج شبیه‌سازی با الگوریتم ژنتیک

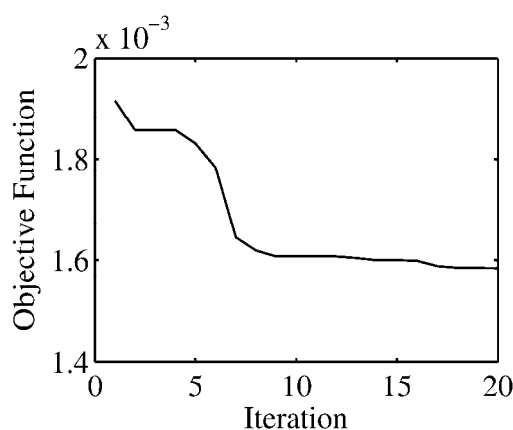
برای محاسبه تابع هدف یک خطای ۳ فاز در یکی از خط‌هایی که باس ۱ را به باس ۶ وصل می‌کند (نزدیک باس ۶) در  $t = 1$  s اعمال می‌شود. خطی که خطا روی آن اتفاق افتاده، پس از  $100$  ms قطع شده است. در ابتدا ورودی انتقال یافته از راه دور با  $50$  ms تأخیر به عنوان ورودی کنترلر در نظر گرفته شده است. تغییرات مد ناحیه‌ای و بین ناحیه‌ای برای این اغتشاش در شکل‌های (۱۵) و (۱۶) نشان داده شده است.

جدول (۴): پارامترهای سیستم کنترل تکمیلی SSSC برای سیستم سه ماشینه

پارامترهای کنترل	سیگنال ورودی	محلی	راه دور
	$K_S$	۰/۰۰۵۵	۱۹۸/۵
$T_{1S}$	۰/۵۴۵۵	۰/۰۹۶۴	
$T_{2S}$	۰/۷۴۵۸	۰/۸۳۲۹	
$T_{3S}$	۰/۰۲۰	۰/۸۱۲۷	
$T_{4S}$	۰/۶۶۵۲	۰/۱۱۹۴	

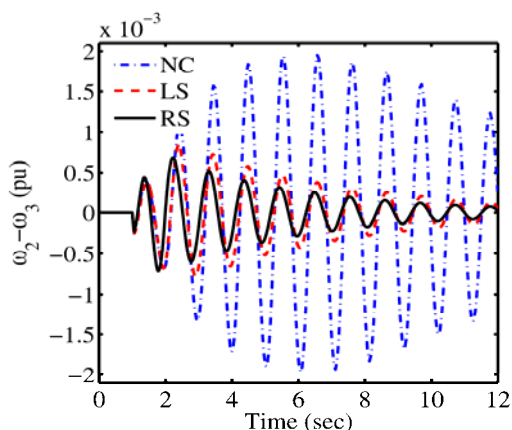


شکل (۱۵): تغییرات مد بین ناحیه‌ای برای اتصال کوتاه سه فاز (حالتی که کنترلر برای آن طراحی شده است)

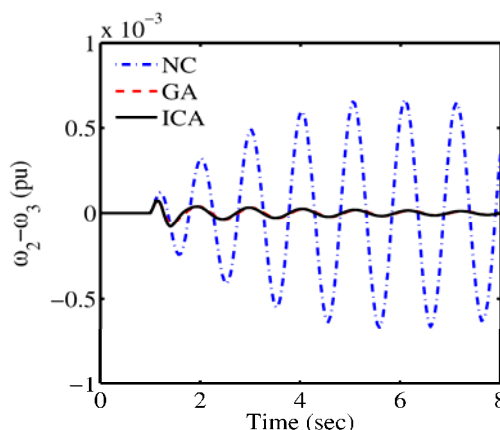


شکل (۱۳): تغییرات تابع هدف برای کنترلر با ورودی محلی برای سیستم چند ماشینه





شکل (۱۸): تغییرات مد ناحیه‌ای برای قطع بار (حالی که کنترلر برای آن طراحی نشده‌است)



شکل (۱۶): تغییرات مد ناحیه‌ای برای اتصال کوتاه سه فاز (حالی که کنترلر برای آن طراحی شده‌است)

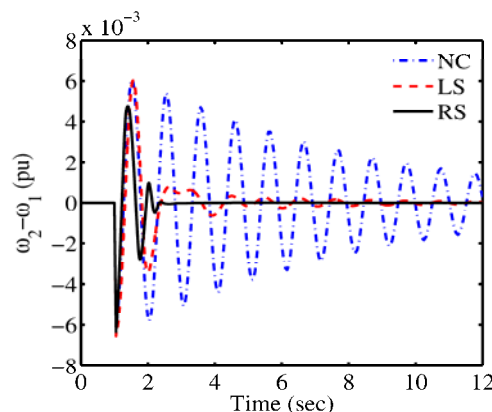
## ۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله به منظور بهبود عملکرد SSSC در میراسازی نوسان‌های فرکانس پایین سیستم قدرت از کنترل تکمیلی برای آن استفاده شد. با این کنترل تکمیلی نوسان‌های سیستم قدرت که بر اثر اغتشاشات تحریک می‌شوند، به میزان درخور توجهی میرا شدند. عملکرد سیستم کنترل تکمیلی وابسته به پارامترهای کنترلر و سیگنال ورودی آن است. پارامترهای سیستم کنترل پیشنهادی برای هر دو سیستم قدرت تک ماشینه و چند ماشینه با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری بهینه‌سازی شد. همچنین، عملکرد سیستم کنترل با ورودی محلی و ورودی انتقال یافته از راه دور ارزیابی و مشاهده شد که ورودی انتقال یافته از راه دور برای اغتشاشی که سیستم کنترل برای آن طراحی نشده است، پاسخ بهتری نسبت به ورودی محلی دارد. همچنین، عملکرد سیستم کنترل با تغییر در تأخیر انتقال سیگنال بررسی و مشاهده شد که کنترلر با تغییر در تأخیر انتقال سیگنال نیز پاسخ مناسبی دارد. همچنین، نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که الگوریتم رقابت استعماری پاسخ‌های بهتری نسبت به ژنتیک الگوریتم دارد.

## ۶-۲-۲- مقایسه بین سیگنال محلی و سیگنال

### انتقال یافته از راه دور

برای مقایسه اثر سیگنال محلی و سیگنال انتقال یافته از راه دور بر عملکرد سیستم کنترلی، بار نزدیک باس ۱ را برای ۵۰ ms قطع کرده‌ایم. پاسخ سیستم به این اغتشاش در شکل‌های (۱۷) و (۱۸) نشان داده شده‌اند. این شکل‌ها نشان می‌دهند که سیستم کنترلی برای حالی که کنترلر برای آن طراحی نشده است نیز عملکرد خوبی دارد. همچنین، کنترلر با سیگنال انتقال یافته از راه دور پاسخ بهتری نسبت به حالی دارد که از سیگنال محلی به عنوان ورودی استفاده شود.



شکل (۱۷): تغییرات مد بین ناحیه‌ای برای قطع بار (حالی که کنترلر برای آن طراحی نشده است)

$0/3864 \Omega/\text{km}$ ,  $L1 = 0/9337 \times 10^{-3} \text{ H/km}$ ,  $L0 = 4/1264 \times 10^{-3} \text{ H/km}$ ,  $C1 = 12/74 \times 10^{-9} \text{ F/km}$ ,  $C0 = 7/751 \times 10^{-9} \text{ F/km}$ ,  $L1 = L2 = L3 = L4 = 175 \text{ km}$ ,  $L5 = 50 \text{ km}$ ,  $L6 = 100 \text{ km}$ .

خطوط انتقال

3-Ph,  $R1 = 0/02546 \Omega/\text{km}$ ,  $R0 = 0/3864 \Omega/\text{km}$ ,  $L1 = 0/9337 \times 10^{-3} \text{ H/km}$ ,  $L0 = 4/1264 \times 10^{-3} \text{ H/km}$ ,  $C1 = 12/74 \times 10^{-9} \text{ F/km}$ ,  $C0 = 7/751 \times 10^{-9} \text{ F/km}$ ,  $L1 = L2 = L3 = L4 = 175 \text{ km}$ ,  $L5 = 50 \text{ km}$ ,  $L6 = 100 \text{ km}$ .

بارها

Load1 = 7500MW+1500 MVAR, Load2 = Load3 = 25 MW, Load4 = 250 MW.

### مراجع

- [1] Y.N. Yu, Electric power system dynamics, Academic press, 1983.
- [2] R.A. Ramos, "Stability analysis of power systems considering AVR and PSS output limiters", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 31, No. 4, pp. 153-159, 2009.
- [3] N.G Hingorani, L. Gyugyi, Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission systems, IEEE Press, New York, 2000.
- [4] R. Mihalic, I. Papic, "Static synchronous series compensator—a mean for dynamic power flow control in electric power systems", Electric Power Systems Research, Vol. 45, No. 1, pp. 65-72, 1998.
- [5] M. Nambu, Y. Ohsawa, "Development of an advanced power system stabilizer using a strict linearization approach", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, No. 2, pp. 813-818, 1996.
- [6] E.V. Larsen, D.A. Swann, "Applying Power System Stabilizers Part II: Performance Objectives and Tuning Concepts", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 100, No. 6, pp. 3025-3033, 1981.
- [7] M.E. Aboul-Ela, A.A. Sallam, J.D. McCalley, A.A. Fouad, "Damping controller design for power system oscillations

### ضمایم

تمامی اطلاعات زیر پرینت هستند؛ مگر اینکه واحد دیگری روبروی آنها نوشته شده باشد.

سیستم تک ماشینه

ژنراتور

$S_B = 2100 \text{ MVA}$ ,  $H = 3/7 \text{ s}$ ,  $V_B = 13/8 \text{ kV}$ ,  $f = 60 \text{ Hz}$ ,  $R_S = 2/8544 \times 10^{-3}$ ,  $X_d = 1/305$ ,  $X'_d = 0/296$ ,  $X''_d = 0/252$ ,  $X_q = 0/474$ ,  $X'_q = 0/243$ ,  $X''_q = 0/18$ ,  $T'_d = 1/01 \text{ s}$ ,  $T''_d = 0/053 \text{ s}$ ,  $T''_{q0} = 0/1 \text{ s}$ .

بار باس ۱

Local load = 250 MW.

ترانسفورماتور

$S_{nom} = 2100 \text{ MVA}$ ,  $f = 60 \text{ Hz}$ ,  $D1/Yg$ ,  $13.8/500 \text{ kV}$ ,  $R1 = R2 = 0/002$ ,  $L1 = 0$ ,  $L2 = 0/12$ ,  $R_m = 500$ ,  $L_m = 500$ .

خطوط انتقال

3-Ph,  $f = 60 \text{ Hz}$ ,  $L1 = L2 = 300 \text{ km}$ ,  $R1 = 0/02546 \Omega/\text{km}$ ,  $R0 = 0/3864 \Omega/\text{km}$ ,  $L1 = 0/9337 \times 10^{-3} \text{ H/km}$ ,  $L0 = 4/1264 \times 10^{-3} \text{ H/km}$ ,  $C1 = 12/74 \times 10^{-9} \text{ F/km}$ ,  $C0 = 7/751 \times 10^{-9} \text{ F/km}$ .

جبران کننده استاتیکی سنکرون سری (SSSC)

$S_{nom} = 100 \text{ MVA}$ ,  $V_{nom} = 500 \text{ kV}$ ,  $f = 60 \text{ Hz}$ ,  $V_{qref} = 3$  (ماکزیمم نرخ تغییرات مرجع ولتاژ و لثاژ),  $R = 0/00533$ ,  $L = 0/16$ ,  $V_{DC} = 40 \text{ kV}$ ,  $C_{DC} = 375 \times 10^{-6} \text{ F}$ ,  $K_P = 0/00375$ ,  $K_i = 0/1875$ ,  $K_P = 0/1 \times 10^{-3}$ ,  $K_i = 20 \times 10^{-3}$ ,  $V_q = \pm 0/2$ .

سیستم چند ماشینه

ژنراتورها

$S_{B1} = 4200 \text{ MVA}$ ,  $S_{B2} = S_{B3} = 2100 \text{ MVA}$ ,  $V_B = 13/8 \text{ kV}$ ,  $f = 60 \text{ Hz}$ ,  $X_d = 1/305$ ,  $X'_d = 0/296$ ,  $X''_d = 0/252$ ,  $X_q = 0/474$ ,  $X'_q = 0/243$ ,  $X''_q = 0/18$ ,  $T'_d = 1/01 \text{ s}$ ,  $T''_d = 0/053 \text{ s}$ ,  $T''_{q0} = 0/1 \text{ s}$ ,  $R_S = 2/8544 \times 10^{-3}$ ,  $H = 3/7 \text{ s}$ .

ترانسفورماتورها

$S_{B1} = 4200 \text{ MVA}$ ,  $S_{B2} = S_{B3} = 2100 \text{ MVA}$ , 3-Ph,  $R1 = 0/02546 \Omega/\text{km}$ ,  $R0 =$

- Regulski, V. Madani, J. Fitch, S. Skok, M.M. Begovic, A. Phadke, "Wide-Area Monitoring, Protection, and Control of Future Electric Power Networks", Proceedings of the IEEE, Vol. 99, No. 1, pp. 80-93, 2011.
- [18] F. Milano, M. Anghel, "Impact of time delay on power system stability", IEEE Transactions on Circuits and Systems, Vol. 59, No. 4, pp. 889-900, 2012.
- [19] A. Hashmani, I. Erlich, "Mode selective damping of power system electromechanical oscillations for large power systems using supplementary remote signals", Electrical Power and Energy Systems, Vol. 42, No. 1, pp. 605-613, 2012.
- [20] Y. Li, C. Rehtanz, S. Ruberg, L. Luo, Y. Cao. "Assessment and choice of input signals for multiple HVDC and FACTS wide-area damping controller", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 27, No. 4, pp. 1969-1977, 2012.
- [21] A.D. Del Rosso, C.A. Canizares, V.M. Dona, "A study of TCSC controller design for power system stability improvement", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18, No. 4, pp. 1487-1496, 2003.
- [22] Y. Chang, Z. Xu, "A novel SVC supplementary controller based on wide area signals", Electric Power Systems Research, Vol. 77, No. 12, pp. 1569-1574, 2007.
- [23] E. Atashpaz-Gargari, C. Lucas, "Imperialist Competitive Algorithm: An algorithm for optimization inspired by imperialistic competition", IEEE Congress on Evolutionary Computation, 2007.
- using global signals", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, No. 2, pp. 767-773, 1996.
- [8] S. Panda, N.P. Padhy, "Comparison of particle swarm optimization and genetic algorithm for FACTS-based controller design", Applied Soft Computing, Vol. 8, No. 4, pp. 1418-1427, 2008.
- [9] S. Panda, N.P. Padhy, R.N. Patel, "Power system stability improvement by PSO optimized SSSC based damping controller", Electric Power Components and Systems, Vol. 35, No. 5, pp. 468-490, 2008.
- [10] S. Panda, N.P. Padhy, "Optimal location and controller design of STATCOM using particle swarm optimization", Journal of the Franklin Institute, Vol. 345, pp. 166-181, 2008.
- [11] M.A. Abido, "Analysis and assessment of STATCOM-based damping stabilizers for power system stability enhancement", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 73, pp. 177-185, 2005.
- [12] S. Panda, "Differential evolutionary algorithm for TCSC-based controller design", Simulation Modelling Practice and Theory, Vol. 17, No. 10, pp. 1618-1634, 2009.
- [13] B.P. Padhy, S.C. Srivastava, N.K. Verma, "Robust wide-area TS fuzzy output feedback controller for enhancement of stability in multimachine power system", IEEE Systems Journal, Vol. 6, No. 3, pp. 426-435, 2012.
- [14] S. Panda, "Differential evolution algorithm for SSSC-based damping controller design considering time delay", Journal of the Franklin Institute, Vol. 348, No. 8, pp. 1903-1926, 2011.
- [15] S. Panda, "Design and analysis of SSSC-based supplementary damping controller", Simulation Modelling Practice and Theory, Vol. 18, No. 9, pp. 1199-1213, 2010.
- [16] P. Kundur, Power system stability and control, McGraw-Hill, USA 1994.
- [17] V. Terzija, G. Valverde, D. Cai, P.

زیر نویس‌ها

<sup>1</sup> Power system stabilizers

<sup>2</sup> Flexible AC Transmission System

<sup>3</sup> Static synchronous series compensator

<sup>4</sup> Voltage-sourced converter

<sup>5</sup> Phasor measurement unit

<sup>6</sup> Wide-area monitoring, protection, and control

<sup>7</sup> Synchronized measurement technology

<sup>8</sup> Global positioning system

<sup>9</sup> assimilation policy

Archive of SID