

پیاده سازی کنترلر بهینه هوشمند بر مبنای تابع انرژی لیاپانوف عناصر موازی FACTS جهت بهبود پایداری گذرا

سعید اباذری^{۱*}، محمد صادق پیام^{۲،۳}

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: پذیرش مقاله:	
واژگان کلیدی: پایداری گذرا، SVC، ASVC، پایداری لیاپانوف، کنترلر بهینه، روش بهینه سازی جهش قورباغه به هم آمیخته (SFL).	در این مقاله به بهبود پایداری گذرا با بهره گیری از عناصر موازی انعطاف پذیر سیستم قدرت SVC و ASVC پرداخته شده است. روش کنترلی که در این راستا به کار گرفته شده است، مبتنی بر تئوری لیاپانوف و استفاده از تابع انرژی می باشد. روش کنترلی فوق میرایی سیستم را تضمین می نماید. با این حال به منظور بهبود سرعت میرایی از روش های بهینه سازی هوشمند استفاده شده است. در این راستا از روش بهینه سازی جدید جهش قورباغه به هم آمیخته (SFL) استفاده شده است. تابع هدف در نظر گرفته شده در این حالت به شکلی بوده که منجر به تسریع میرایی با توجه به قیود عملی حاکم بر مسئله می شود. عناصر موازی FACTS به کار رفته در یک سیستم تک ماشینه نمونه مدل سازی شده است. این مدل به شکلی در نظر گرفته شده است که امکان تغییر توپولوژی نیز در آن میسر باشد. نتایج شبیه سازی اثربخشی روش کنترلی بهینه پیشنهادی را نشان می دهد.

۱- مقدمه

یکی از مسائل مهم در بررسی سیستم های قدرت پایداری می باشد. در بین پایداری ها مسئله پایداری گذرا از اهمیت بیش تری برخوردار است چرا که مطالعه این پایداری، جزء پایداری های کوتاه مدت می باشد. زیرا که اغتشاش به کار رفته در این نوع پایداری اغتشاش شدید بوده، لذا استرس اعمال شده بر سیستم قدرت زیاد بوده و سیستم قدرت بعد از رفع اغتشاش از نقطه تعادل خود فاصله زیادی

می گیرد [۱]. برای رساندن این سیستم به شرایط تعادل نیازمند به استفاده از عناصری هستیم که بتواند به سرعت توان انتقالی را تغییر داده و با این کار میزان انرژی ذخیره شده را افزایش دهیم تا بتواند انرژی جنبشی اعمالی به سیستم را در اثر اختلال جبران نماید. عناصر انعطاف پذیر در سیستم های قدرت (FACTS^۲) علاوه بر این که می تواند توان انتقالی خطوط را تحت تاثیر قرار دهد. عناصر موازی FACTS از لحاظ ساختاری می تواند از عناصر پسو (SVC^۳) یا اکتیو (ASVC^۴) بهره گیرند [۲]. این عناصر می توانند با تزریق یا جذب توان

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: saeedabazari@yahoo.com و abazari@eng.sku.ac.ir

۱- استادیار، دانشکده فنی مهندسی، گروه برق، دانشگاه شهرکرد

۲- دانشجوی دکتری برق دانشگاه شهرکرد

۳- گروه مهندسی برق، واحد بروجن، دانشگاه آزاد اسلامی، بروجن، ایران. m_sadegh_payam@yahoo.com

²- Flexible AC Transmission Systems

³- Static Var Compensator

⁴- Advanced Static Var Compensator

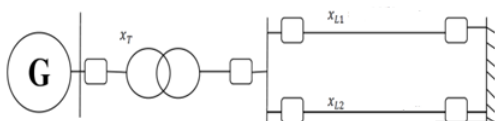
روش‌های بهینه‌سازی هوشمند متنوعی ارائه شده است [۱۱-۱۴]. در این بین روش بهینه‌سازی جدید جهش قورباغه (SFL^۴) از سرعت عملکرد و دقت بالاتری بهره‌مند است [۱۵-۱۸]. در این مقاله به طراحی سیستم کنترل ادوات موازی FACTS با هدف بهبود پایداری گذرا پرداخته شده است. این سیستم کنترلی بر مبنای تابع انرژی لیاپانوف و روش بهینه‌سازی هوشمند جهش قورباغه به هم آمیخته (SFL) می‌باشد. در قسمت دوم به نقش عناصر موازی FACTS در جهت بهبود پایداری گذرا پرداخته شده و در قسمت سوم نسبت طراحی کنترلر بر مبنای تئوری لیاپانوف و در قسمت چهارم به معرفی روش بهینه‌سازی SFL و طراحی کنترلر بهینه پرداخته می‌شود و در قسمت پنجم به پیاده‌سازی این عناصر و نتایج حاصله از آن پرداخته شده است. در قسمت ششم نتیجه‌گیری مقاله آورده شده است.

۲- مطالعه پایداری گذرا در سیستم قدرت و نقش عناصر موازی FACTS در جهت بهبود آن

برای بررسی پایداری گذرا سیستم قدرتی تک ماشینه را مطابق شکل ۱ در نظر گرفته‌ایم. معادله اساسی حاکم بر شبکه در حالت بررسی پایداری گذرا به صورت زیر می‌باشد:

$$\begin{aligned} \delta &= \omega - \omega_s \\ j\dot{\omega} &= P_m - P_e(\delta) \end{aligned} \quad (1)$$

که در این رابطه δ ، زاویه داخلی ماشین سنکرون، J ممان اینرسی ماشین سنکرون، P_m توان مکانیکی، ω_s سرعت زاویه‌ای در نقطه تعادل و $P_e(\delta)$ توان الکتریکی می‌باشد.



شکل ۱- سیستم قدرت تک ماشینه مورد مطالعه

راکتیو به شبکه بر روی توان انتقالی تاثیر بگذارند. اما مسئله مهم تنظیم مناسب این توان راکتیو است که می‌تواند در تسریع میرا نمودن دامنه نوسانات اثر نماید [۳]. در تنظیم توان راکتیو تزریقی یا جذب شده توسط عناصر FACTS با هدف بهبود پایداری گذرا، روش‌های کنترلی زیادی بر مبنای تئوری لیاپانوف مطرح شده است. در مرجع [۴] با به‌کارگیری روش‌های غیرخطی ناحیه پایداری را محاسبه کرده اما به مسئله بهینه‌سازی پرداخته نشده است. در مرجع [۵] از یک روش مبتنی بر تابع انرژی گذرا (TEF) جهت مطالعه پایداری گذرا بدون حضور عناصر FACTS استفاده شده است. در مرجع [۶] یک روش ریاضی برای محاسبه زمان بحرانی خطا بدون استفاده از عناصر FACTS پیشنهاد شده است. در مرجع [۷] یک روش کنترلی با هدف بهبود پایداری گذرا با بهره‌گیری از یکی از عناصر FACTS (UPFC^۲) پیشنهاد می‌شود. روش فوق تحلیلی بوده و کار بهینه‌سازی در آن انجام نشده است. روش‌های کنترلی بر مبنای تئوری لیاپانوف میرایی سیستم را تضمین می‌نماید، اما با تنظیم مناسب پارامترهای کنترلی سرعت میرایی را می‌توان افزایش داد. با توجه به ماهیت غیرخطی مسئله بهینه‌سازی، استفاده از روش‌های تحلیلی منجر به پیچیده شدن حل مسئله می‌گردد [۹و۸]. در مرجع [۱۰] به بررسی بهبود پایداری گذرا با استفاده از تابع انرژی گذرا (TEF) و با بهره‌گیری از IPFC^۳ به روش تحلیلی پرداخته شده است. اما در این مقاله تنظیم پارامترهای کنترل کننده به روش سعی و خطا انجام شده است. برای رفع مشکل پیچیده بودن روش‌های فوق، روش‌های بهینه‌سازی هوشمند پیشنهاد می‌گردد. در سال‌های اخیر

¹ - Transient Energy Function

² - Unified Power Flow Controller

³ - Interline Power Flow Controller

⁴ - Shuffled Frog Leaping

$$V(\delta, \omega) = \frac{1}{2}j(\omega - \omega_s)^2 - P_m(\delta - \delta_s) - \frac{V^2}{X}(\cos(\delta) - \cos(\delta_s)) \quad (3)$$

که در این رابطه (ω_s و δ_s) نقطه تعادل سیستم پس از رفع خطا می‌باشد. در این رابطه ترم اول معرف تابع انرژی جنبشی و ترم دوم و سوم نمایانگر انرژی پتانسیل سیستم می‌باشد. مشتق تابع لیپانوف بر حسب زمان مطابق رابطه ۴ می‌باشد:

$$\dot{V}(\delta, \omega) = j\dot{\omega}(\omega - \omega_s) - P_m \cdot \dot{\delta} + \frac{V^2}{X}(\sin(\delta))(\omega - \omega_s) \quad (4)$$

با جای گذاری $\dot{\omega}$ از رابطه ۱ در رابطه (۴) داریم:

$$\dot{V}(\delta, \omega) = -P_e(\delta)(\omega - \omega_s) + \frac{V^2}{X}(\sin(\delta))(\omega - \omega_s) \quad (5)$$

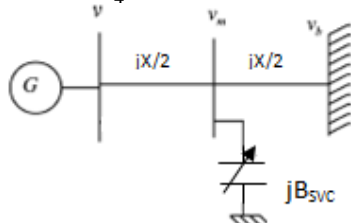
که با فرض آنکه $E' = V = 1 p.u$ در نظر گرفته شود و بدون در نظر گرفتن هیچ کنترلی بر روی توان انتقالی، برابر صفر می‌شود. و شرط لازم برای پایداری تحقق می‌یابد. اما هنوز شرط کافی فراهم نمی‌باشد. اما با وجود جبران‌ساز می‌توان تابع فوق را معین منفی نمود و در نتیجه شرط کافی پایداری لیپانوف نیز تحقق می‌یابد.

۳-۱-۳ تحقق شرط پایداری لیپانوف برای SVC

معمولا برای مطالعه پایداری گذرا، SVC را به صورت یک سوسپتانس متغیر مطابق شکل (۲) مدل می‌نمایند. معمولا محل SVC را در محلی که امیدانس کل نصف گردیده قرار می‌دهند. زیرا در این صورت بیشترین تاثیر را بر روی توان انتقالی دارد [۸].

در این حالت توان انتقالی را می‌توان به صورت رابطه (۶) بیان نمود:

$$P_e(\delta) = \frac{E'V}{X(1 - \frac{X \cdot B_{SVC}}{4})} \sin(\delta) \quad (6)$$



شکل ۲- نمایش سیستم قدرت همراه SVC

با توجه به محدودیت توان راکتیو تزریقی یا جذب شده توسط SVC که به صورت رابطه (۷) بیان می‌گردد، می‌توان مقدار سوسپتانس SVC را تغییر داد.

در مطالعه پایداری گذرا معمولا فرضیاتی در نظر گرفته می‌شود که این فرضیات به ساده شدن مسئله بدون از دست رفتن اطلاعات کلی منجر می‌گردد. همچنین جواب حاصل از این فرضیات بدترین شرایط را برای سیستم محقق می‌سازد. بنابراین اگر کنترل کننده‌ای بتواند در این حالت سیستم را پایدار کند مسلما در عمل نیز پایدار است. این فرضیات به قرار زیر است:

- ۱- توان مکانیکی را ثابت فرض می‌کنیم.
- ۲- ماشین سنکرون را قطب صاف در نظر می‌گیریم.
- ۳- دامنه ولتاژ داخلی ماشین را در حالت گذرا (E') ثابت فرض می‌کنیم.

در رابطه (۱) تنها عامل قابل کنترل $P_e(\delta)$ می‌باشد. رابطه ریاضی $P_e(\delta)$ به صورت زیر می‌باشد:

$$P_e(\delta) = \frac{E'V}{X} \sin(\delta) \quad (2)$$

که در این رابطه V ولتاژ باس بی‌نهایت و X راکتانس کل از ولتاژ داخلی ماشین تا باس بی‌نهایت می‌باشد.

برای مطالعه پایداری گذرا بدترین شرایط که بروز یکی اختلال شدید نظیر اتصال کوتاه و محل بروز این اتصال کوتاه بر روی شین زرناتور در نظر گرفته شده که این اتصال کوتاه بعد از مدت زمانی برطرف گردید. عناصر SVC و ASVC با طراحی کنترل مناسب در زمان بعد از رفع خطا موثر بوده و توان الکتریکی منتقل شده ($P_e(\delta)$) را چنان تغییر می‌دهد که در جهت بهبود پایداری گذرا و میرا شدن دامنه نوسانات تلاش نماید.

۳- طراحی کنترل کننده بهینه بر مبنای

تئوری لیپانوف

یکی از معیارهای تحقق پایداری در سیستم‌های قدرت استفاده از تابع لیپانوف می‌باشد. در این راستا هر گاه تابع معین مثبتی وجود داشته باشد که مشتق زمانی آن معین منفی باشد. در این صورت سیستم به سمت پایداری حرکت نموده است. تابع انرژی گذرا (TEF)، یکی از توابعی است که می‌تواند دارای خواص فوق باشد. این تابع انرژی دارای تعبیر فیزیکی بوده و حاصل جمع انرژی جنبشی و پتانسیل سیستم می‌باشد. که این تابع را می‌توان به صورت رابطه (۳) بیان نمود [۸]:

البته در تعیین مقدار I_{ASVC} بایستی محدودیت توان راکتیو جبران ساز را نیز در نظر گرفت که این محدودیت به صورت رابطه (۱۴) بیان می شود:

$$Q_{min} \leq Q_{ASVC} = I_{SVC} \cdot V_{SVC} \leq Q_{max} \quad (14)$$

نکته اساسی در روابط (۱۳) و (۱۴) تعیین مقدار بهینه K است. همان طور که در این بخش ملاحظه شد تعیین مقدار k هم در مورد تابع کنترل SVC (رابطه ۱۰) و هم در مورد تابع کنترل $ASVC$ (رابطه ۱۳) نقش اساسی را ایفا می نماید. بنابراین هدف اصلی در این بخش تعیین مقدار بهینه k می باشد. مسلماً یک برنامه ریزی جهت بهینه سازی همواره دارای یک تابع هدف و قیود حاکم بر سیستم می باشد. حل تحلیلی مسئله فوق با توجه به روابط غیرخطی نظیر رابطه (۱) همچنین در نظر گرفتن یک تابع معیار غیرخطی کاری سخت و زمان بر است. امروزه با پیدایش روش های بهینه سازی هوشمند می توان بر حل ساده مسئله فوق اقدام نمود. با توجه به تعدد روش های بهینه سازی انتخاب یک روش بهینه سازی مناسب نیز خود نیاز به درک عمیقی از نوع مسئله دارد. که در بخش بعد به معرفی این روش بهینه سازی می پردازیم.

۴- معرفی روش بهینه سازی SFL و طراحی کنترلر بهینه

۴-۱- الگوریتم جهش قورباغه های

به هم آمیخته

الگوریتم جستجوی جهش قورباغه های به هم آمیخته یک الگوریتم جستجوی فرا ابتکاری جدید مبتنی بر جمعیت اولیه از خانواده الگوریتم های ممتیک می باشد که از تکامل طبیعی گروهی از قورباغه ها زمانی که بدنال محل با بیشترین ذخیره غذایی در دسترس می گردند، الهام گرفته شده است [۱۵]. در این الگوریتم، جمعیت اولیه قورباغه ها (جواب های ممکن برای مسئله) به گروه های مختلفی تقسیم می شوند. نحوه کار به این صورت است که، ابتدا در هر کدام از ممپلکس ها قورباغه های با بدترین و بهترین میزان شایستگی مشخص می شوند که به ترتیب با X_{worst} یا X_w و X_{best} یا X_b نشان داده می شوند. همچنین قورباغه ای که دارای بهترین مقدار شایستگی در میان کل جمعیت است نیز مشخص شده و

$$Q_{min} \leq Q_{SVC} = V^2_{SVC} \cdot B_{SVC} \leq Q_{max} \quad (7)$$

با جای گذاری رابطه (۶) در رابطه (۵) داریم:

$$\dot{V}(\delta, \omega) = -\frac{V^2}{X}(\omega - \omega_s) \left(\frac{1}{1 - \frac{X \cdot B_{SVC}}{4}} - 1 \right) (\sin(\delta)) \quad (8)$$

با انتخاب ترم دوم معادله (۸) به صورت رابطه زیر می توان شرط کافی پایداری لیاپانوف را محقق نمود.

$$\left(\frac{1}{1 - \frac{X \cdot B_{SVC}}{4}} - 1 \right) \triangleq K(\omega - \omega_s) \sin(\delta) \quad (9)$$

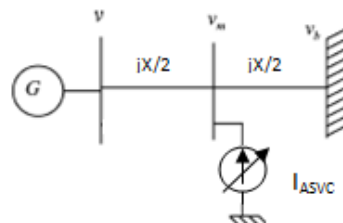
در رابطه فوق با انتخاب K به صورت یک مقدار مثبت، رابطه (۸) معین منفی می شود که تضمین کننده پایداری است. همچنین از رابطه (۹) می توان مقدار B_{SVC} یعنی سیگنال کنترلی را به صورت زیر معین نمود.

$$B_{SVC} = \frac{4K(\omega - \omega_s) \sin(\delta)}{X(1 + K(\omega - \omega_s) \sin(\delta))} \quad (10)$$

نکته مهم در طراحی کنترل کننده تعیین مقدار بهینه K می باشد که در بخش چهارم مقاله انجام می گیرد.

۳-۲- تحقق شرط پایداری لیاپانوف برای $ASVC$:

مدلی که برای مطالعه پایداری گذرای سیستم قدرت به همراه $ASVC$ در نظر گرفته می شود، به صورت یک منبع جریان موازی متغیر می باشد که در وسط امپدانس کل از دید ژنراتور قرار گرفته است [۸]. در شکل ۳ این مدل نمایش داده شده است.



شکل ۳- نمایش سیستم قدرت تک ماشینه به همراه $ASVC$

در این حالت توان انتقالی را می توان به صورت رابطه (۱۱) نمایش داد [۸].

$$P_e(\delta, I_{ASVC}) = \frac{V^2}{X} \sin(\delta) + V I_{ASVC} \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) \quad (11)$$

با جای گذاری رابطه (۱۱) در رابطه (۵) داریم:

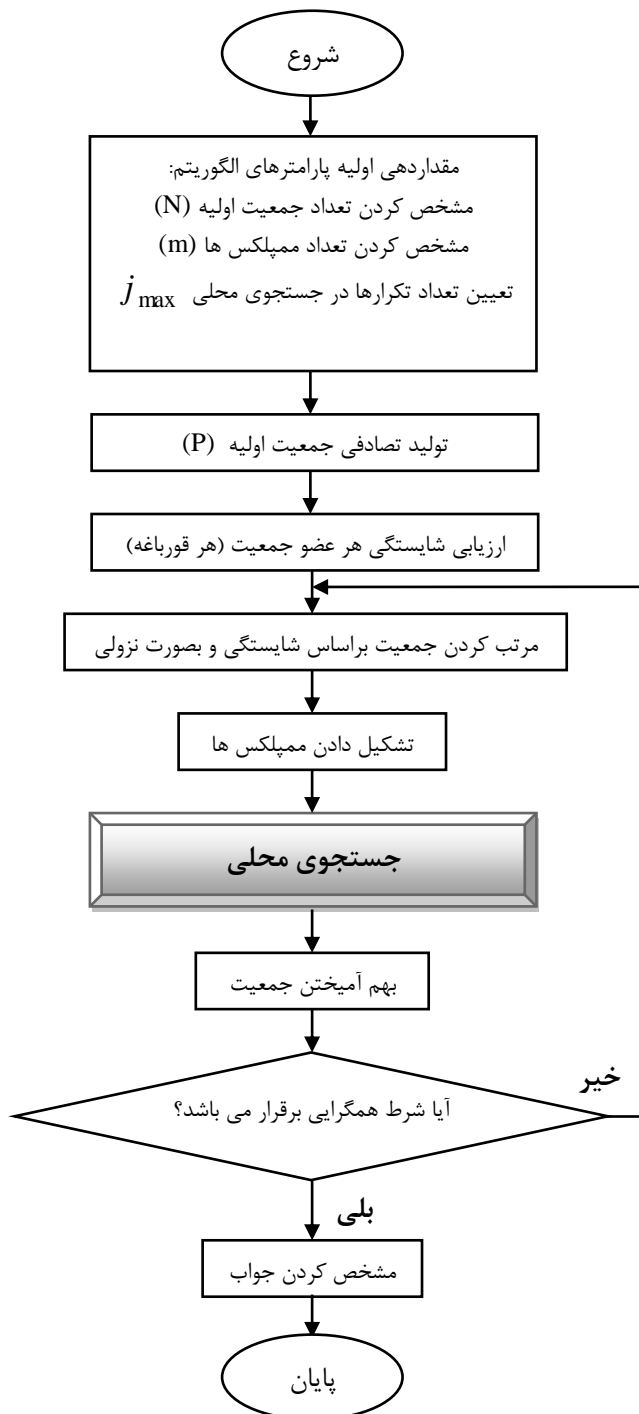
$$\dot{V}(\delta, \omega) = (\omega - \omega_s) \left(-V I_{ASVC} \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) \right) \quad (12)$$

برای تحقق شروط پایداری لیاپانوف می توان I_{ASVC} را به صورت رابطه (۱۳) در نظر گرفت.

$$I_{ASVC} = K(\omega - \omega_s) \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) \quad (13)$$

$$\min: \int_{t_c}^{t_{end}} (|\delta - \delta_s| + |\omega - \omega_s|) dt \quad (17)$$

در این رابطه δ_s و ω_s به ترتیب زاویه و سرعت زاویه‌ای در نقطه تعادل سیستم می‌باشند. مقادیر t_c و t_{end} به ترتیب برابر لحظه رفع خطا و زمانی است که سیستم به میرایی مناسب رسیده است (پارامترهای سیستم در بازه ۹۵ درصد مقادیر حالت تعادل رسیده باشند).



شکل ۴- فلوچارت جستجوی الگوریتم SFL

با X_{global} یا X_g نمایش داده می‌شود. در ادامه، در طی فرآیند تکامل ممپلکس‌ها، در هر ممپلکس یا زیرگروه، موقعیت بدترین قورباغه (X_{worst}) به سمت موقعیت بهترین قورباغه (X_{best}) حرکت می‌کند. موقعیت جدید قورباغه بدتر با استفاده از قانون پرش قورباغه در الگوریتم استاندارد SFL، به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\text{Position change (D)} = r \times (X_b - X_w) \quad (15)$$

$$X_w(\text{new}) = X_w + D, (\|D\| < D_{\max}) \quad (16)$$

در روابطه فوق، r یک عدد تصادفی یکنواخت بین صفر و یک است و D_{\max} حداکثر مقدار تغییرات مجاز در موقعیت قورباغه در یک پرش می‌باشد. چنانچه این تغییر موقعیت، قورباغه‌ای با شایستگی بهتر تولید کرد، این قورباغه جای‌گزین قورباغه بدتر (X_w) می‌گردد. در غیر این صورت، محاسبات انجام شده با استفاده از روابط (۱۵) و (۱۶) و با جای‌گزینی بهینه فرامحلی (X_g) به جای بهینه محلی (X_{best}) تکرار می‌شوند. در صورتی که بازهم بهبودی در جواب حاصل نگردد، X_w حذف شده و یک راه حل جدید به صورت تصادفی جای‌گزین آن می‌گردد. این سیر تکاملی تا زمانی که به تکرار معینی که از قبل مشخص شده، برسد ادامه می‌یابد. معمولاً شرط پایان در جستجوی محلی بین ۵ تا ۲۰ تکرار (بسته به مسئله) در نظر گرفته می‌شود [۱۸]. به منظور درک بهتر، فلوچارت الگوریتم SFL و نحوه انجام محاسبات در فرآیند جستجوی در شکل ۴، نشان داده شده اند. در این شکل، J_{\max} نشان دهنده تعداد تکرارها در فرآیند جستجو می‌باشد.

۴-۲- طراحی کنترلر بهینه با روش پیشنهادی

یک برنامه ریزی بهینه مستلزم یک تابع معیار مناسب می‌باشد. با توجه به آن که هدف اصلی در این مسئله افزایش سرعت میرایی سیستم می‌باشد، تابع هدف را به صورت رابطه (۱۷) در نظر می‌گیریم.

شکل‌های ۵ و ۶ در حالت بدون جبران‌ساز، با جبران‌ساز و با ضریب k معادله (۱۰) به صورت اختیاری و k محاسبه شده توسط طراحی کنترل کننده بهینه هوشمند در می‌یابیم که سیستم میرایی با لحاظ کردن مسئله بهینه دارای پاسخ بهتری می‌باشد. در این حالت مقدار k بهینه برابر ۰/۱۹۹۸ می‌باشد. به علاوه در شکل ۷ نمایش سیگنال کنترلی ادمیتانس معادل SVC در حالت k بهینه با توجه به قید مربوط به توان راکتیو تزریقی یا جذب شده (± 1 پرینیت بر مبنای $100MVA$) آورده شده است.

قدم دوم مربوط به حالتی است که زمان رفع خطا را ۱۰ درصد بیش تر از زمان بحرانی در نظر گرفته به عبارت دیگر زمان اتصال کوتاه سه فاز بر روی شین ژنراتور برابر با ۱۵۷ میلی ثانیه در نظر گرفته شده است. شکل های ۸ و ۹ در حالت بدون جبران‌ساز، با جبران‌ساز و با ضریب k معادله (۱۰) به صورت اختیاری و k محاسبه شده توسط طراحی کنترل کننده بهینه هوشمند در می‌یابیم که سیستم میرایی با لحاظ کردن مسئله بهینه دارای پاسخ بهتری می‌باشد. در این حالت مقدار k بهینه برابر ۰/۱۱ می‌باشد. سیستم بدون کنترل ناپایدار است اما کنترل کننده اعمالی نه تنها سیستم را پایدار نموده بلکه این عمل را با توجه به حداقل زمان میرایی انجام داده است. به علاوه در شکل ۱۰ نمایش سیگنال کنترلی ادمیتانس معادل SVC در حالت k بهینه با توجه به قید مربوط به توان راکتیو تزریقی یا جذب شده (± 1 پرینیت بر مبنای $100MVA$) آورده شده است.

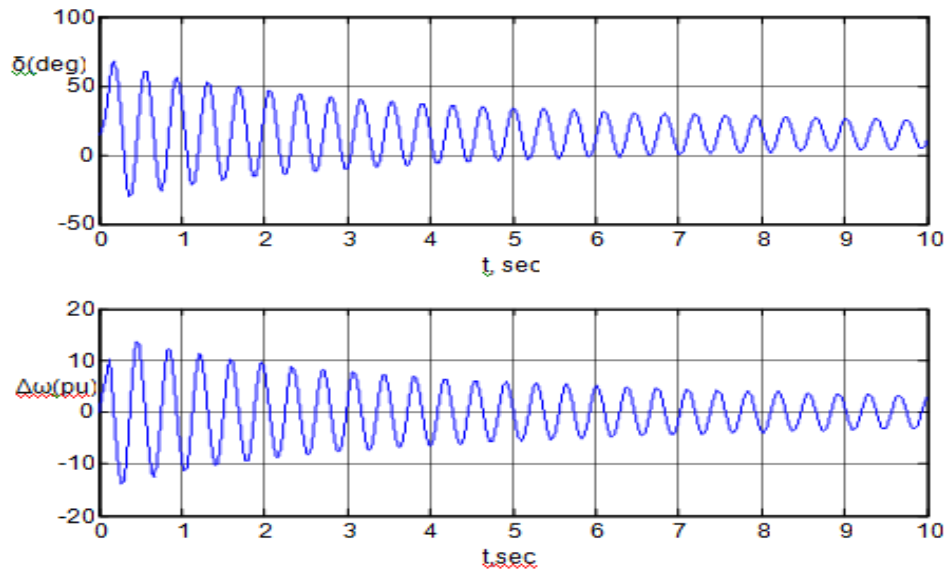
در این مسئله هدف تعیین مقدار K بهینه در روابط (۱۰) و (۱۳) می‌باشد. هر عضو جمعیت (قورباغه) بیان‌گر یک مقدار متناظر با K می‌باشد. تعداد جمعیت اولیه یا N برابر ۵۰ فرض می‌شود. نکته دیگر در این برنامه ریزی لحاظ نمودن قیود (۷) و (۱۴) می‌باشد. البته لازم به ذکر است روش فوق مبتنی بر دو مسئله بهینه‌سازی یکی برای SVC و دیگری برای ASVC می‌باشد.

۵- نتایج شبیه‌سازی

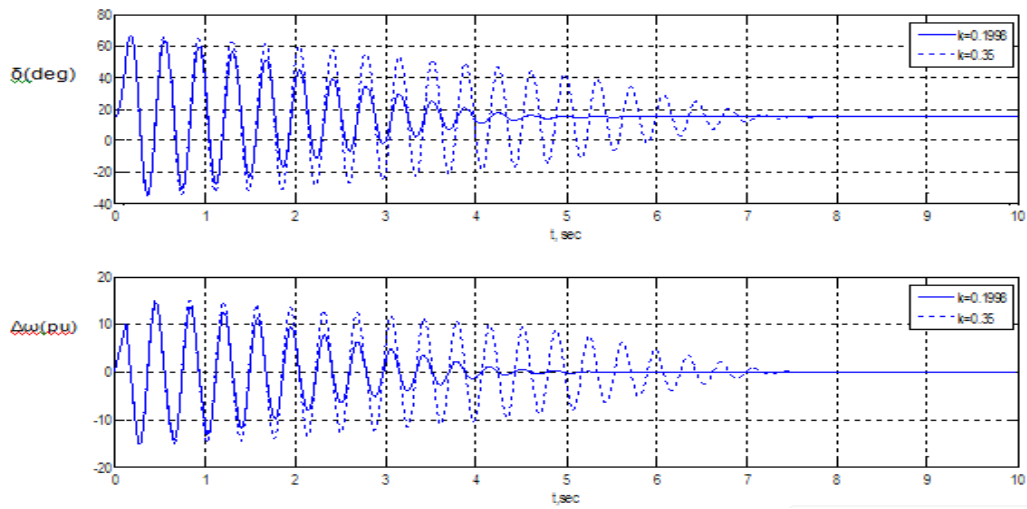
در این قسمت مسئله را به سه قسمت کلی تقسیم نموده‌ایم. یکی مطالعه بهبود پایداری گذرای سیستم قدرت با SVC. قسمت دوم، بهبود پایداری گذرای سیستم قدرت با ASVC و قسمت سوم، مقایسه بین دو قسمت قبل می‌باشد.

الف) شبیه‌سازی سیستم قدرت به همراه SVC مبتنی بر طراحی کنترلر بهینه هوشمند در جهت بهبود پایداری گذرا:

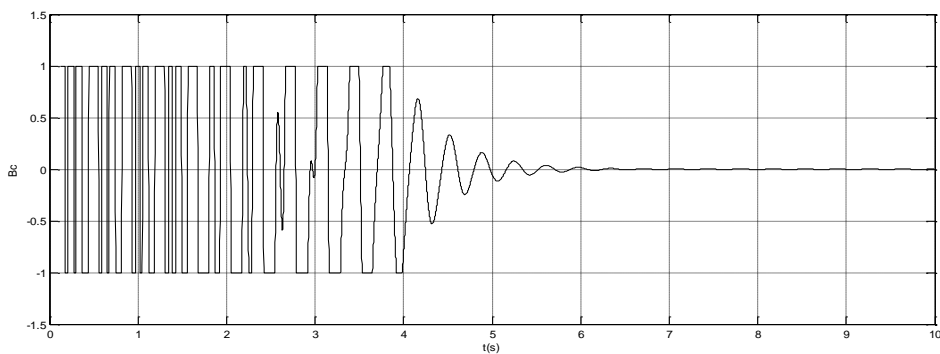
سیستم قدرت شکل ۱ به همراه عنصر موازی SVC که پارامترهای آن در پیوست آمده است. در این مطالعه در قدم اول زمان اتصال کوتاه سه فاز را در ترمینال ژنراتور را برابر با ۱۳۰ میلی ثانیه در نظر می‌گیریم که این زمان نسبت به زمان بحرانی محاسبه شده کم‌تر است (زمان بحرانی برابر ۱۴۳ میلی ثانیه است). هدف از آوردن این قسمت آن است که حتی در زمانی که سیستم پایدار می‌باشد باز هم جبران‌ساز با حداقل زمان ممکن در میرا نمودن سریع نوسانات کمک نموده است. با مقایسه



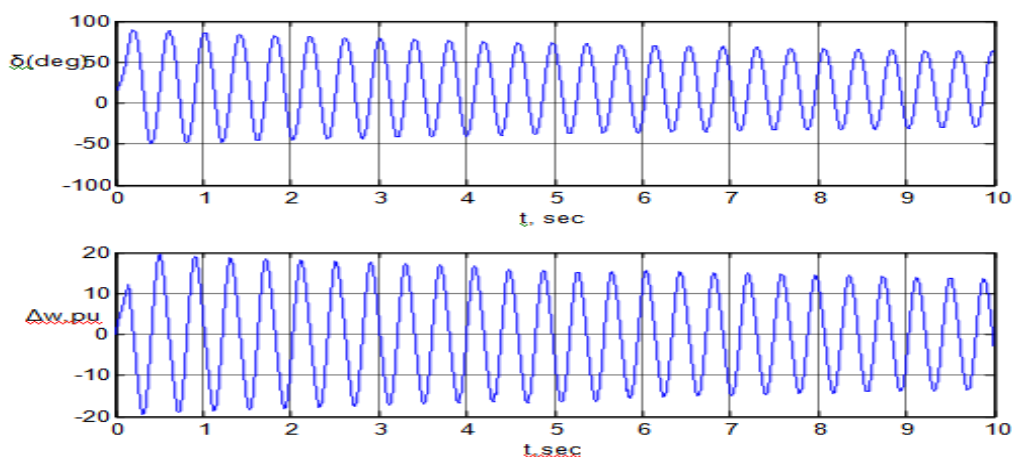
شکل ۵- نمایش زاویه الکتریکی و تغییرات زاویه الکتریکی در حالت بدون جبران (زمان رفع خطا ۱۳۰ میلی ثانیه)



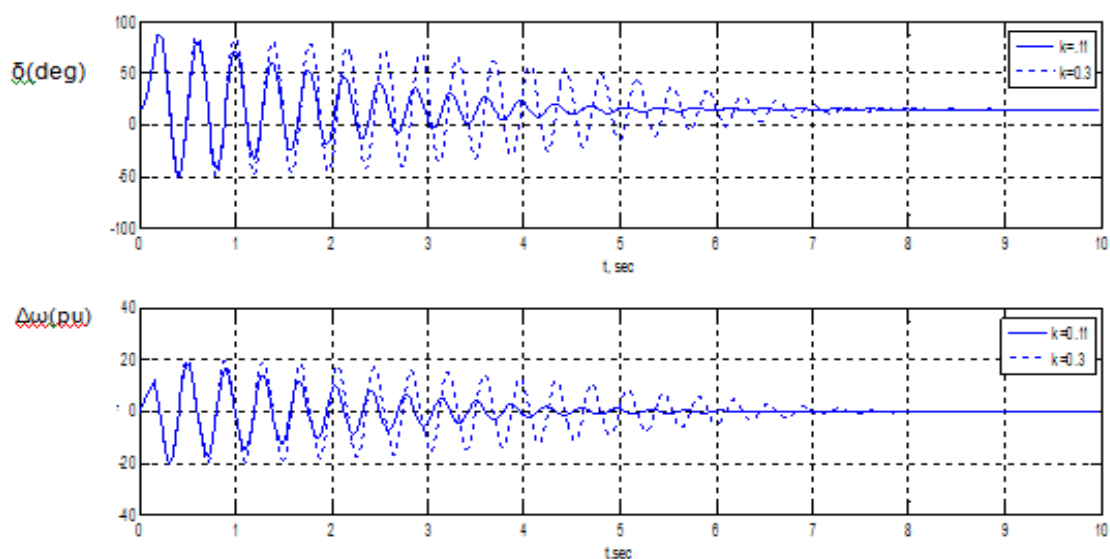
شکل ۶- نمایش زاویه الکتریکی و تغییرات زاویه الکتریکی در حضور SVC با کنترل کننده (زمان رفع خطا ۱۳۰ میلی ثانیه)



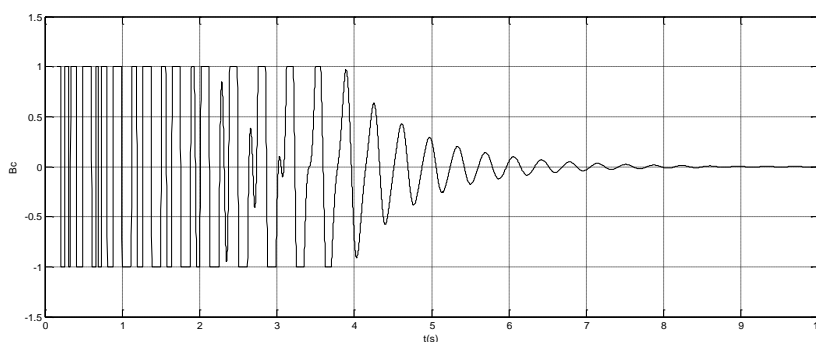
شکل ۷- نمایش رفتار سیگنال کنترلی بهینه B_{SVC} (زمان رفع خطا برابر ۱۳۰ میلی ثانیه)



شکل ۸- نمایش زاویه الکتریکی و تغییرات زاویه الکتریکی در حالت بدون جبران (زمان رفع خطا ۱۵۷ میلی ثانیه)



شکل ۹- نمایش زاویه الکتریکی و تغییرات زاویه الکتریکی در حضور SVC با کنترل کننده (زمان رفع خطا ۱۵۷ میلی ثانیه)



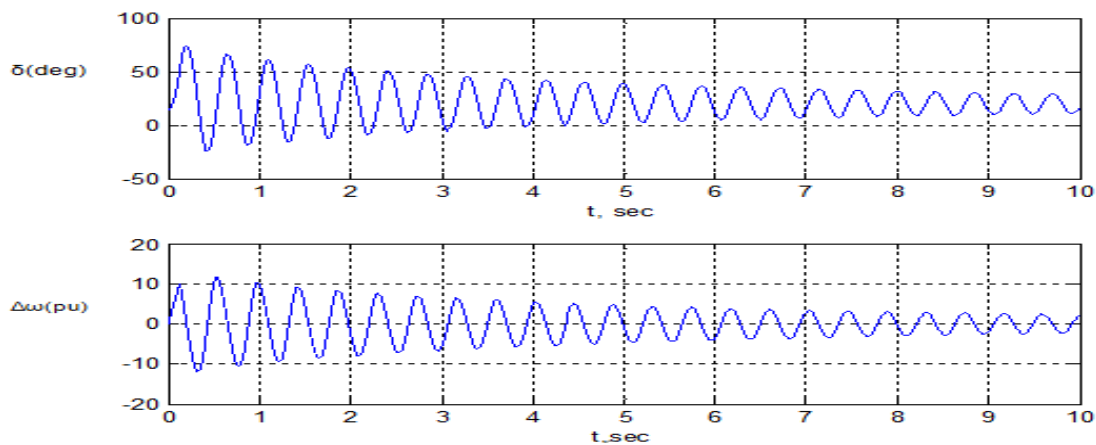
شکل ۱۰- نمایش رفتار سیگنال کنترلی بهینه Bsvc (زمان رفع خطا برابر ۱۵۷ میلی ثانیه)

یعنی توپولوژی سیستم بعد از رفع خطا تغییر می کند و بدون تردید نقطه تعادل و زمان بحرانی رفع خطا تغییر یافته است. که این زمان بحرانی رفع خطا برابر ۱۳۳ میلی

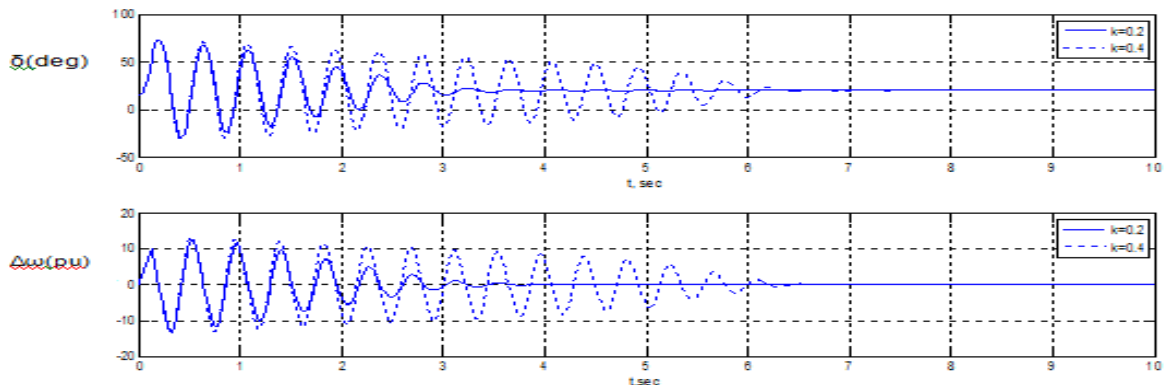
در قدم سوم، همان مطالعات فوق را انجام داده، فقط اتصال کوتاه بر روی خط $L2$ نزدیک باس ۲ در نظر گرفته می شود. اما بعد از رفع خطا خط $L2$ را قطع نموده ایم.

طراحی شده هوشمند کارا بوده و توانسته میرایی سیستم را با سرعت بالاتری بهبود بخشد. همچنین با تغییر توپولوژی سیستم به نقطه تعادل جدید رسیده است. به علاوه در شکل ۱۳ سیگنال کنترلی ادمیتانس معادل SVC با k بهینه و محدودیت توان راکتیو تزریقی یا جذب شده (± 1) پریونیت بر مبنای $100MVA$ آورده شده است.

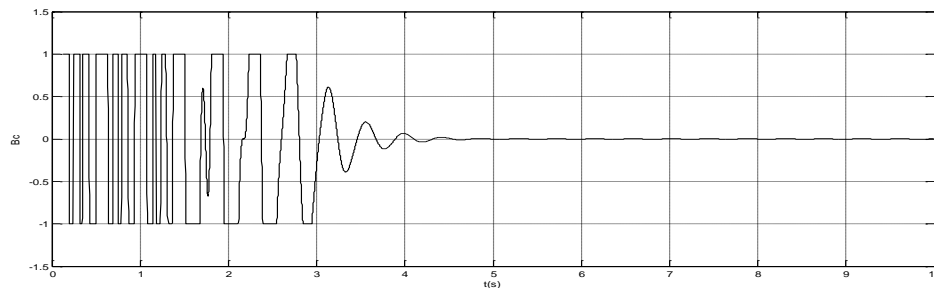
ثانیه می باشد. در این حالت زمان رفع خطا را ۱۰ درصد کم تر از زمان بحرانی این قسمت در نظر گرفته می شود. شکل های ۱۱ و ۱۲ نتایج شبیه سازی را در سه حالت بدون جبران ساز، با جبران ساز و با ضریب k معادله (۱۰) به صورت اختیاری و k محاسبه شده توسط طراحی کنترل کننده بهینه (برابر ۰/۲) آورده شده است. با توجه به این شکل ها در می یابیم که با تغییر توپولوژی سیستم کنترلر



شکل ۱۱- نمایش زاویه الکتریکی و تغییرات زاویه الکتریکی در حالت تغییر توپولوژی و بدون جبران (زمان رفع خطا ۱۲۰ میلی ثانیه)



شکل ۱۲- نمایش زاویه الکتریکی و تغییرات زاویه الکتریکی در حضور SVC با کنترل کننده و با تغییر توپولوژی (زمان رفع خطا ۱۲۰ میلی ثانیه)

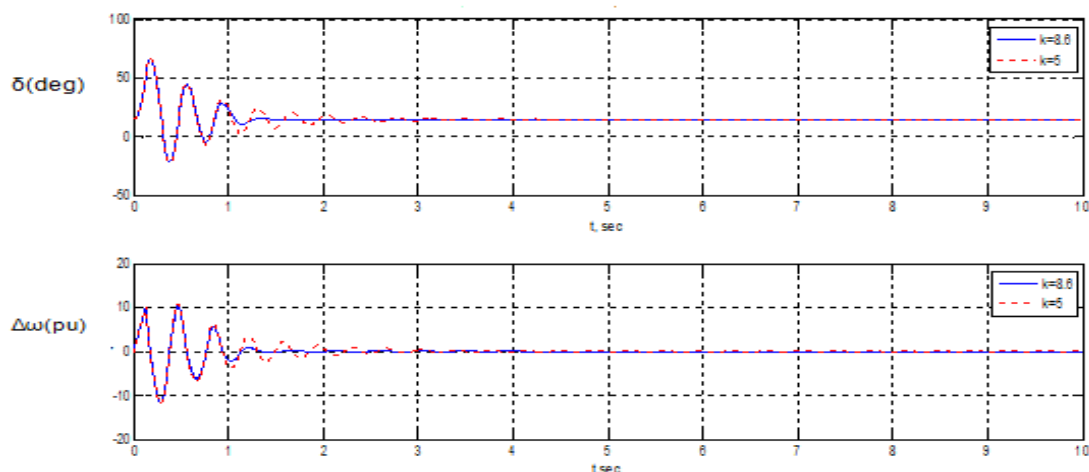


شکل ۱۳- نمایش رفتار سیگنال کنترلی بهینه SVC در حالت تغییر توپولوژی (زمان رفع خطا برابر ۱۲۰ میلی ثانیه)

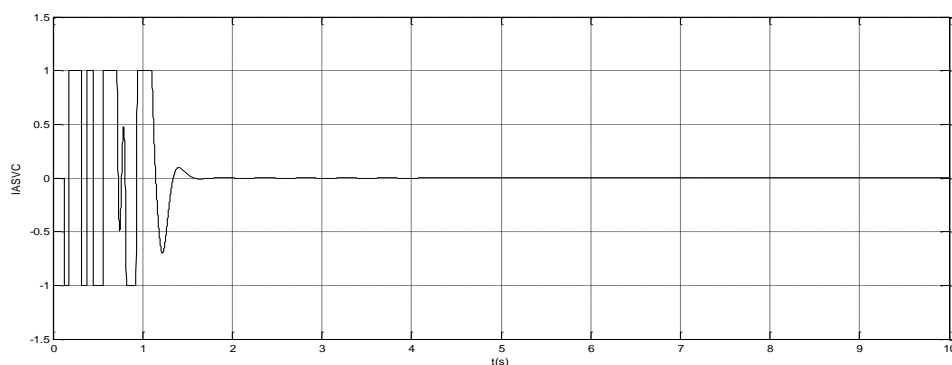
حالت تغییر توپولوژی و همچنین در حالت‌های در نظر گرفته شده کم‌تر از زمان بحرانی رفع اختلال و بیش‌تر از زمان بحرانی رفع خطا دارای عملکرد مناسب با حداقل زمان میرایی می‌باشد. به‌علاوه سیگنال کنترلی جریان $ASVC$ دارای محدودیت (± 1) پریونیت بر مبنای $ASVC$ (100MVA) می‌باشد. البته لازم به ذکر است که سناریوی دوم در [۸] به روش تحلیلی پیاده‌سازی شده است که نتایج آن تقریباً مشابه نتایج این مقاله می‌باشد. که از ذکر مجدد آن خودداری نموده ایم. اما در مرجع [۸] و همچنین در مرجع [۱۰] مطالعه سیستم در حالت تغییر توپولوژی انجام نشده است.

ب) شبیه‌سازی سیستم قدرت به‌همراه $ASVC$ مبتنی بر طراحی کنترلر بهینه هوشمند در جهت بهبود پایداری گذرا:

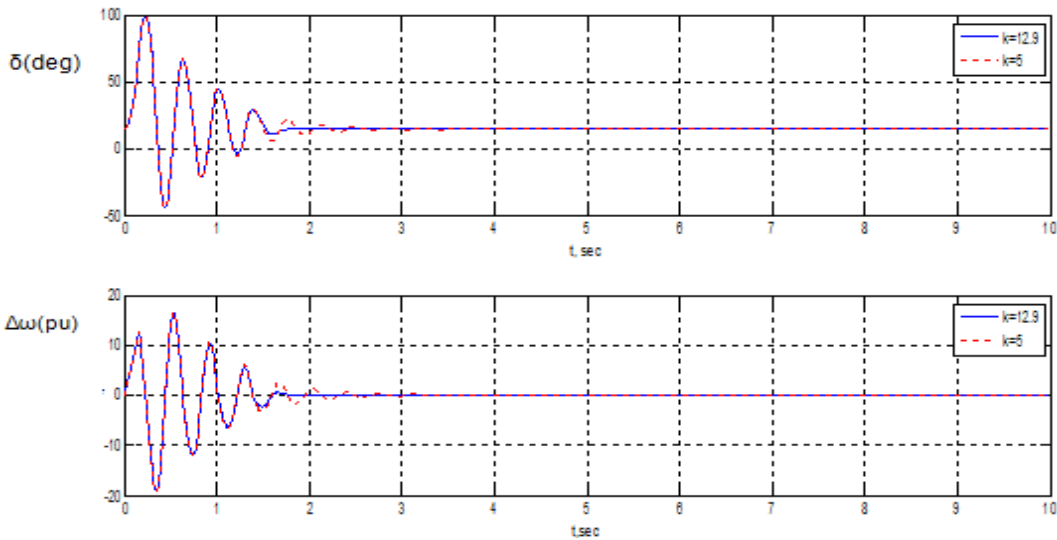
در این مطالعه به‌جای SVC ، $ASVC$ در نظر گرفته می‌شود. و سناریوهای مورد بحث همان سناریوهای مورد بحث در مورد SVC بوده که k مورد نظر در رابطه (۱۳) را یک‌بار به‌صورت اختیاری و یک بار دیگر توسط طراحی کنترل کننده بهینه هوشمند محاسبه می‌کنیم. نتایج حاصل از این سناریوها در شکل‌های ۱۴ تا ۱۹ آورده شده است. با ملاحظه این شکل‌ها در می‌یابیم که کنترل کننده بهینه چه در حالت بدون تغییر توپولوژی و چه در



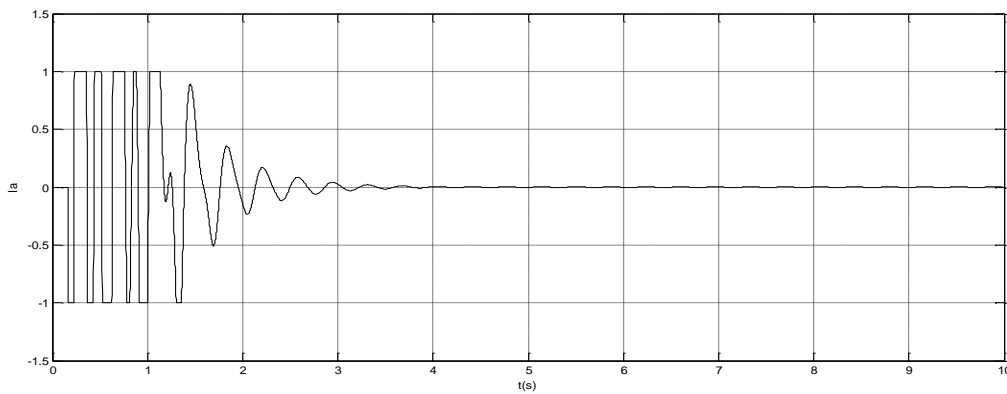
شکل ۱۴- نمایش زاویه الکتریکی و تغییرات زاویه الکتریکی در حضور $ASVC$ با کنترل کننده (زمان رفع خطا ۱۳۰ میلی ثانیه و k بهینه برابر ۸/۶)



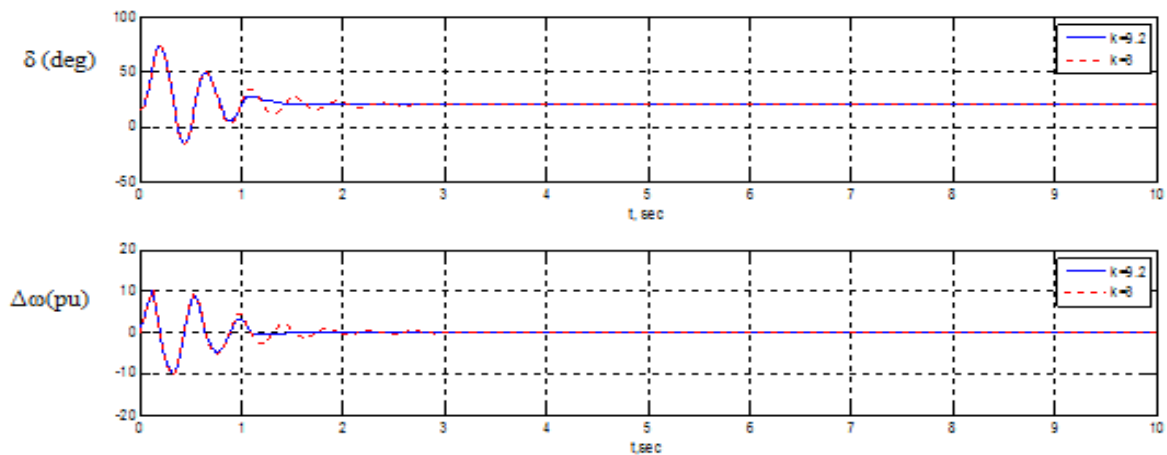
شکل ۱۵- نمایش رفتار سیگنال کنترلی بهینه $IASVC$ (زمان رفع خطا برابر ۱۳۰ میلی ثانیه)



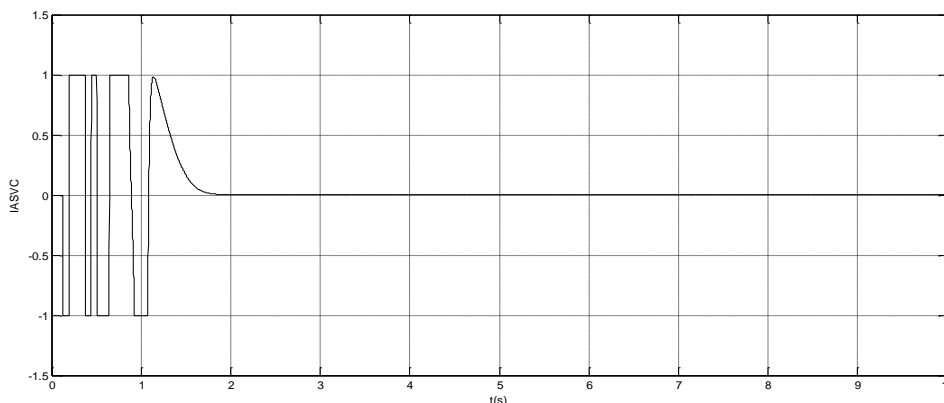
شکل ۱۶- نمایش زاویه الکتریکی و تغییرات زاویه الکتریکی در حضور ASVC با کنترل کننده (زمان رفع خطا ۱۵۷ میلی ثانیه و مقدار k بهینه برابر ۱۲/۹)



شکل ۱۷- نمایش رفتار سیگنال کنترلی بهینه IASVC (زمان رفع خطا برابر ۱۵۷ میلی ثانیه)



شکل ۱۸- نمایش زاویه الکتریکی و تغییرات زاویه الکتریکی در حضور ASVC با کنترل کننده و با تغییر توپولوژی (زمان رفع خطا ۱۲۰ میلی ثانیه و مقدار k بهینه برابر ۹/۲)



شکل ۱۹- نمایش رفتار سیگنال کنترلی بهینه I_{SVC} با تغییر توپولوژی و k بهینه (زمان رفع خطا برابر ۱۲۰ میلی ثانیه)

در این مقاله، بهبود پایداری گذرا در سیستم‌های قدرت توسط عناصر موازی انعطاف‌پذیر (FACTS) با بهره‌گیری از تابع انرژی لیاپانوف انجام شد. در این‌جا، مسئله اساسی کنترل بهینه توان راکتیو جذب شده یا گرفته می‌باشد که این امر با روش‌های تحلیلی پیچیده و روابط آن مستلزم حل توابع غیرخطی می‌باشد. کنترل پیشنهادی در این مقاله با بهره‌گیری از الگوریتم بهینه هوشمند SFL میرایی سیستم را در حداقل زمان با توجه به محدودیت‌های موجود و حتی با تغییر توپولوژی تحقق داده است. شبیه‌سازی‌های انجام شده، این امر را اثبات می‌نماید. همچنین کنترل کننده پیشنهادی برتری $ASVC$ را نسبت به SVC در سرعت میرایی نشان می‌دهد. اما مقایسه اقتصادی بین این دو عنصر $FACTS$ نشان می‌دهد که قیمت تمام شده $ASVC$ به مراتب بیش‌تر از SVC است.

پیوست:

مشخصات سیستم تست تک ماشینه

$$\begin{aligned} P_m &= 1 \text{ p.u} \\ E' &= 1.18 \text{ p.u} \\ f &= 50 \text{ p.u} \\ V_{inf} &= 1 \text{ p.u} \\ X_d &= 0.12 \text{ p.u} \\ X_T &= 0.08 \text{ p.u} \\ X_{l1} &= X_{l2} = 0.2 \text{ p.u} \\ H &= 2 \text{ s} \\ S_{base} &= 100 \text{ MVA} \end{aligned}$$

ج) مقایسه عملکرد SVC و $ASVC$

در این قسمت یک مقایسه اجمالی بین این دو عنصر موازی انجام شده است. از لحاظ سرعت میرایی در شکل‌های بالا $ASVC$ بسیار بهتر از SVC عمل می‌نماید. اکنون بنا داریم که یک مقایسه اقتصادی بین این دو عنصر انجام دهیم. روابط (۱۸) و (۱۹) هزینه تمام شده این دو عنصر را نشان می‌دهند [۱۹].

$$C_{SVC} = 0.0003S^2 - 0.3051S + 127.38 \text{ US\$/KVAR} \quad (18)$$

$$C_{ASVC} = 0.0001S^2 - 0.15S + 144 \text{ US\$/KVAR} \quad (19)$$

که در این روابط متغیر S مقدار نامی توان راکتیو و C هزینه تمام شده عنصر $FACTS$ می‌باشد. جدول (۱) هزینه تمام شده عناصر $FACTS$ ، $MVAR$ ۱۰۰ مورد استفاده در سیستم تست این مقاله را نشان می‌دهد. این جدول نشان می‌دهد که هزینه تمام شده $ASVC$ بیش‌تر از هزینه SVC است.

جدول ۱- مقایسه هزینه تمام شده SVC و $ASVC$

عنصر $FACTS$	هزینه تمام شده (US\$)
SVC	۹۹۸۷۰
$ASVC$	۱۳۰۰۰۰

۶- نتیجه‌گیری

مراجع:

- [1] Kundur, P. (1994). "Power System Stability and Control". McGraw-Hill, Inc.
- [2] Hingorani, N. G., Gyugyi, L. (1999). "Understanding FACTS: Concepts and technology of flexible ac transmission systems". IEEE Press.
- [3] Song, Y. H., Johns, A. T. (1999). "Flexible AC Transmission Systems (FACTS)". London, UK: IEE Press.
- [4] Anghel, M., Milano, F. Papachristodoulou, A. (2013). "Algorithmic Construction of Lyapunov Functions for Power System Stability Analysis". Circuits and Systems I: Regular Papers, IEEE Transactions on, Vol. 60, PP. 2533 – 2546.
- [5] Athay, T., Podmore, R., Virmani, S. (1979). "A Practical Method for the Direct Analysis of Transient Stability". IEEE Trans, PP. 573-584.
- [6] Kakimoto, N., Hayashi, M. (1981). "Transient Stability Analysis of Multimachine Power System by Lyapunov's Direct Method". Proc. 20th IEEE Conf. on Decision and Control, PP. 1-7.
- [7] Azbe, V., Mihalic, R. (2005). "Application of The Direct Lyapunov Method for Optimum Control of UPFC". IEEE Power Tech, Russia, PP. 1-6.
- [8] Abazari, S., Mahdavi, J., Mokhtari, M., Ehsan M. (2003). "Transient Stability Improvement by Using Advanced Static Var Compensators". The International Journal For Electric Power Componets and Systems, Taylor & Francis Group, Vol. 131, PP. 321-334.
- [9] Abazari, S., Mahdavi, J., Zolghadri, M., Ehsan M. (2006). "A Rule –Based Advances Static Var Compensator Control Scheme for Transient Stability Improvement". The International Journal of Science and Tecnology & Technology, Scientia Iranica, PP. 101-109.
- [10] Azbe, V., Mihalic, R. (2008). "The Control Strategy for an IPFC Based on the Energy Function". IEEE TRANS. ON POWER SYSTEMS, VOL. 23, NO. 4, PP. 1662-1669.
- [11] Whei-Min, L., Yuh-Sheng, S. (1996). "Genetic algorithms: concepts and applications". IEEE Transactions on Industrial electronics, Vol. 43, No. 5, PP. 519-533.
- [12] Zhang, C., Zhang, J., Gu, X. (2007). "The Application of Hybrid Genetic Particle Swarm Optimization Algorithm in the Distribution Network Reconfigurations Multi-Objective Optimization". International Conference on Natural Computation, PP. 455 – 459.
- [13] Yao, X., Liu, Y., Lin, G. (1999). "Evolutionary Programming Made Faster". IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 2, PP. 82-102.
- [14] Ghosh, V. (2004). "Evolutionary Algorithms for Multi-Criterion Optimization: A Survey". International Journal of Computing & Information Sciences, Vol. 2, No. 1, PP. 38-57.
- [15] Bijami, E., Askari J., Farsangi M.M. (2012). "Design of stabilizing signals for power system damping using generalized predictive control optimized by a new hybrid shuffled frog leaping algorithm". Generation, Transmission & Distribution, IET , Vol. 6, Issue 10, PP. 1036 – 1045.
- [16] Ebrahimi, J., Hosseini, S. H., Gharehpetian, G. B. (2011). "Design of stabilising signals for power system damping using generalised predictive control optimized by a new hybrid shuffled frog leaping algorithm". Power Systems, IEEE Trans, Vol. 26, PP. 573-581.
- [17] Huynh, T. H. (2008). "A modified shuffled frog leaping algorithm for optimal tuning of multivariable PID controllers". Fifth IEEE International Conference on Industrial Technology, Chengdu, PP. 21-24.
- [18] Zhang, X., Hu, X., Gui, G., Wang, Y., Niu Y. (2008). "An improved shuffled frog leaping algorithm with cognitive behavior". Proceeding of 7th World Congress on Intelligent Control and Automation, PP. 1-8.
- [19] Baghaee, H. R., Jannati M. (2008). "Improvement of Voltage Stability and Reduce Power System Losses by Optimal GA-based Allocation of Multi-type FACTS Devices". Eleventh International conference on Electrical and Electronic Equipment, OPTIM, PP. 209– 214.