

## اثر SVC بر پایداری گذرای ژنراتورهای سنکرون در مدل دینامیک سیستم قدرت

حسین عبداللهی

e-mail: [abdollahi1314@yahoo.com](mailto:abdollahi1314@yahoo.com)

سعید جاذبی

e-mail: [saeed\\_3j@yahoo.com](mailto:saeed_3j@yahoo.com)

بخش مهندسی برق \_ دانشکده فنی \_ دانشگاه شهید باهنر کرمان

**چکیده :** در این مقاله اثر SVC (Static Var Compensator) به عنوان یک جبران کننده موازی بر پایداری مولفه های گذرای ژنراتورهای سنکرون و پایداری حالت گذرا در مدل دینامیک سیستم قدرت مورد بحث و بررسی قرار می گیرد. ناپایداری ایجاد شده در سیستم قدرت بر اثر عواملی همچون سوییچینگ بار (load switching)، بروز یک خطا (fault) یا وقوع یک اتصال کوتاه (short circuit) بصورت موقت بروی بخشی از سیستم قدرت بوجود می آید. مثلاً یک خطای موقتی ایجاد شده در سیستم می تواند منجر به نوسانی شدن برخی مولفه های ژنراتورها مانند ولتاژ و جریان پایانه ژنراتورها و گشتاور الکترومغناطیسی و افزایش بیش از حد زاویه بار شود و باعث می شود که ژنراتور از حالت سنکرون خارج شده و در انتقال توان وقفه ای حاصل شود. SVC یک جبران ساز ایستای توان راکتیو است که سریع عمل می کند آنگاه که بتواند نوسانات توان را میرا کرده و از عهده مشکلات ولتاژ که ناشی از کمبود توان راکتیو است برمی آید. در این مقاله از نرم افزار مطلب برای شبیه سازی سیستم قدرت و دسترسی به نتایج لازم استفاده می شود.

**کلمات کلیدی :** پایداری گذرا، SVC، FACTS

### ۱- مقدمه

امروزه پایداری گذرای ژنراتورها از اهمیت ویژه ای برخوردار است. بطور کلی پایداری گذرا یعنی قابلیت سیستم قدرت در حفظ همزمانی (synchronism) آن، آنگاه که تحت تاثیر یک اختلال گذرای شدید از قبیل بروز یک خطا بر روی تجهیزات خط انتقال، فقدان تولید و یا از دست دادن یک بار بزرگ قرار گیرد. پاسخ سیستم به چنین اختلالاتی گردش های بزرگ زوایای روتور ژنراتور، پخش بار قدرت، ولتاژهای شین و دیگر متغیرهای سیستم را درگیر می کند. اگر نتیجه تفکیک زاویه ای بین ماشین ها در سیستم در داخل ناحیه خاصی قرار گیرد، سیستم، همزمانی را حفظ می کند. از دست دادن همزمانی بدلیل ناپایداری گذرا اگر بوجود آید، معمولاً در عرض دو تا سه ثانیه، اختلال اولیه مشهود خواهد بود. در ناپایداری گذرا نوسانات الکترومکانیکی مشاهده می شوند. نوسانات الکترومکانیکی در بسیاری از سیستم های قدرت در تمام دنیا وجود

دارند. این نوسانات ممکن است برای یک تک ژنراتور یا یک نیروگاه، محلی باشند (نوسانات محلی (local oscillations))، یا ممکن است تعدادی ژنراتور را که به لحاظ جغرافیایی، بطور گسترده از یکدیگر فاصله دارند را درگیر کنند (نوسانات داخل ناحیه ای (inter-area oscillations)). نوسانات محلی اغلب زمانی رخ می دهند که یک اکسایتر (exciter) سریع بروی ژنراتور بکار گرفته شود و برای پایدار کردن این نوسانات، پایدارسازهای سیستم قدرت (Power System Stabilizers) بسط و توسعه پیدا کرده اند. نوسانات داخل ناحیه ای ممکن است بدین صورت ظاهر شوند که اثر بارگذاری سیستم ها در طول خطوط انتقال ضعیف، در سیستمی که این نوسانات را بوجود می آورد افزایش یابند. اگر این نوسانات کنترل نشوند ممکن است به یک وقفه کلی یا جزئی در انتقال توان بیانجامد [1]. دمپ کردن نوسانات الکترومکانیکی یک پیامد و موضوع مهم در عملکرد یک سیستم قدرت الکتریکی می باشد. کاربرد پایدارسازهای سیستم قدرت به عنوان یکی از اولین ادوات برای دمپ بیشتر نوسانات توان بوده است. بدلیل افزایش اثر بارگذاری خط انتقال در طول مسافت طولانی، این امکان وجود دارد که استفاده از پایدارسازهای سیستم قدرت قدیمی و مرسوم اثر دمپ کردن مناسب نوسانات توان را در مد داخل ناحیه ای فراهم نکند [2]. در این مقاله استفاده از SVC به عنوان یکی از ادوات FACTS (Flexible AC Transmission) برای دمپ کردن نوسانات داخل ناحیه ای پیشنهاد شده است.

## SVC ۲

SVC اساساً یک تولید کننده یا مصرف کننده توان راکتیو ایستایی است که بصورت موازی اتصال داده شده است که خروجی آن برای تغییر دادن جریان کاپاسیتیو یا اندکتیو تنظیم می شود، تا حدی که متغیرهای سیستم قدرت حفظ و یا کنترل شوند؛ بطور نمونه، متغیر کنترل شده ولتاژ شین SVC است [1]. در این مقاله SVC بصورت یک راکتانس متغیر با محدودیت ماکزیمم کاپاسیتیو و مینیمم اندکتیو جهت کنترل ولتاژ شین SVC در نظر گرفته می شود، با یک بلوک کنترل اضافی که تاخیر عملکرد SVC (T) در آن لحاظ می شود. همان طور که در شکل (۱) نشان داده شده است.

## SVC مدل ۳

SVC به عنوان وسیله ای جهت بهبود کیفیت توان، یک پیامد از فشار اقتصادی بروی سیستم های انرژی الکتریکی در سراسر دنیا است. از این رو فهم و درک قابل توجهی از ساختار کنترلی و رفتار دینامیکی SVC بسیار لازم و ضروری است تا بتوان سودمندگرایی مناسب یک جبران ساز را تعریف کرد، این هدف می تواند بوسیله شبیه سازی های رایانه ای که نقش مهمی را در طراحی و تجزیه و تحلیل SVC و دیگر دستگاه ها بازی می کنند، دست یافتنی باشد [3]. خصوصیات و مشخصه های SVC توسط The task force of CIGRE خلاصه شده است و مدل سازی آن را نیز The IEEE Special Stability Control Working Group ارائه کرده است. مدل SVC بصورت زیر است.

محدوده رنج کنترل  $(I_{min} \leq I_{svc} \leq I_{max}, V \geq V_{min})$ :

$$V = V_{ref} - X_{sl} * I_{svc} \quad (1)$$

محدودیت کاپاسیتیو  $(V < V_{min})$ :

$$B = B_{\max} \quad (2)$$

محدودیت اندکتیو ( $I_{svc} > I_{\max}$ ):

$$B = B_{\min} \quad (3)$$

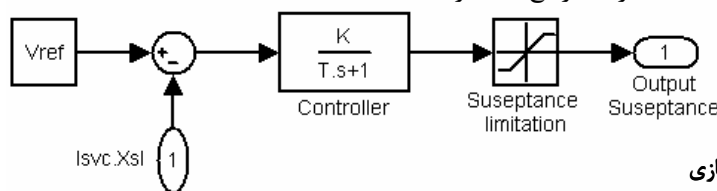
که در آنها

$V_{ref}$ : دامنه ولتاژ مرجع SVC

$X_{sl}$ : امپدانس مشخصه سیستم کنترل

$I_{svc}$ : جریان جبران SVC

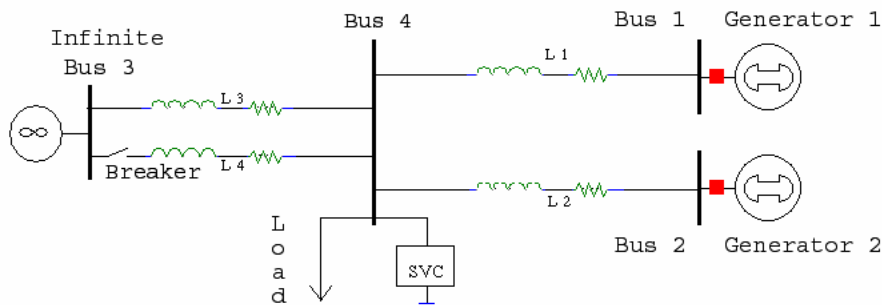
همان طور که در معادلات (۱) تا (۳) نشان داده شده است محدوده رنج کنترل SVC شبیه منبع ولتاژی با راکتانس داخلی عمل می‌کند و بیشتر محدودیت آن شبیه کاپاسیتور یا اندکتور تثبیت شده می‌باشد [4]. این مدل حالت پایدار SVC را بیان می‌کند. برای نشان دادن حالت گذرا از یک بلوک کنترلی اضافه که در آن تاخیر عملکرد SVC نیز لحاظ شده است استفاده می‌شود. یک نمونه از مدل SVC (مورد استفاده در مقاله) بصورت شکل (۱) می‌باشد که تاخیر عملکرد SVC (T) در آن منظور شده است. برای دسترسی به اطلاعات بیشتر به مرجع [5] مراجعه نمایید



شکل ۱: مدل SVC مورد استفاده در شبیه سازی

#### ۴\_ سیستم قدرت مورد آزمایش

سیستم قدرت تحت آزمایش مطابق شکل (۲) مجهز به دو ژنراتور سنکرون، چهار شین و چهار خط انتقال می‌باشد. خطوط  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  و  $L_4$  به ترتیب دارای امپدانس های  $0.004+j0.1$ ,  $0.004+j0.1$ ,  $0.008+j0.3$  و  $0.008+j0.3$  بر حسب پریونیت می باشند که خط  $L_4$  فقط در مورد ۴ بکار گرفته می شود. مقدار امپدانس بار در شین ۴ در مورد های ۲، ۳ و ۴ مقدار  $1.2-j0.6$  (pu) است ولی در مورد ۱ تغییرات بار توضیح داده شده است. مدل گذرای ژنراتور از اکسایتر و AVR بهره می‌برد که برای دسترسی به اطلاعات بیشتر به مرجع [6] مراجعه کنید. توان مبنا در سیستم ۱۰۰۰ MVA و ولتاژ مبنا ۱۰۰ KV انتخاب شده و مقادیر بر اساس آن ها پریونیت می شوند.



شکل ۲: سیستم قدرت تحت آزمایش

## ۵- شبیه سازی رایانه ای و نتایج

الف : سیگنال ورودی SVC ولتاژ شین ۴ (اندازه ولتاژ) و همچنین زاویه جریان این شین می باشد.

ب : تنظیم پارامترها

در همه موارد، حدود بالا و پایین سوسپتانس خروجی SVC، توسط یک محدود کننده بین 1- و 1 پر یونیت قرار گرفته است. با این کار مقدار توان راکتیو خروجی که توسط SVC به شبکه تزریق می شود را کنترل می کنیم. زمان تاخیر عملکرد SVC،  $T=0.05\text{sec}$  انتخاب شده و  $K=150$  در نظر می گیریم. مقادیر ولتاژ، جریان، توان و گشتاور بر حسب پر یونیت و زاویه بار نیز بر حسب رادیان می باشد

ج : در این گام چهار مورد را تحت آزمایش قرار می دهیم.

د : خط چهار همواره قطع بوده و فقط در مورد ۴ از آن استفاده می شود.

ه : افزایش پایداری ژنراتور ها، بهبود پروفیل ولتاژ، دمپ نوسانات توان و گشتاور الکترو مکانیکی از نتایج حاصل از اعمال SVC به شبیه سازی رایانه ای می باشد و مرز پایداری زاویه  $90^\circ$  یا  $1.57\text{ rad}$  می باشد .

ی : همه موارد طی ۱۵ ثانیه شبیه سازی شده و نتایج به شرح زیر است.

### ۵-۱- مورد ۱

این مورد سوئیچینگ بار در سیستم قدرت مورد آزمایش را نشان می دهد. باری به اندازه  $1.2-j0.6$  در شین ۴ موجود است. در زمان  $t=5\text{sec}$  این بار به  $2.4-j1.2$  افزایش می یابد و تا پایان شبیه سازی ثابت می ماند. در این حالت SVC تاثیر زیادی بر روی ولتاژ پایانه و توان خروجی ژنراتورها نداشته است. مزیت SVC در این حالت بهبود زاویه بار در ژنراتور ۲ می باشد. در شرایطی که SVC در شبکه وجود ندارد، ژنراتور ۲ تا نزدیکی مرز ناپایداری پیش می رود ولی با اعمال SVC زاویه بار پیش چندان نی ندارد.

### ۵-۲- مورد ۲

این مورد خطای اعمالی به شین ۴ را مورد بررسی قرار می دهد که در  $t=5\text{sec}$  شبیه سازی خطایی معادل  $4+j4$  آمپر (pu) به شین اعمال شده و پس از  $0.3\text{sec}$  رفع می شود. همانطور که در شکل های (۴\_الف)، (۴\_ب)، (۵\_الف) و (۵\_ب) ملاحظه می شود، نوسانات ولتاژ پایانه، جریان و توان خروجی ژنراتورها دمپ شده و منجر به بهبود پروفیل ولتاژ نیز می شود. پیش زاویه بار کاملاً مهار شده و در نتیجه افزایش پایداری ژنراتور ها را در پی خواهد داشت. گشتاور الکترو مکانیکی هم به نحو مطلوبی از حالت نوسانی کامل در آمده و پس از گذشت حدود  $10\text{sec}$  به حالت مطلوب می رسد.

### ۵-۳- مورد ۳

موقعیت عملکرد در این مورد از این قرار است :

خطایی سخت در وسط  $L_1$  در زمان  $t=5\text{sec}$  رخ داده و پس از گذشت  $0.3\text{sec}$  رفع می شود و توسط Recloser خط به حالت عادی باز می گردد. همانگونه که در شکل های (۶\_الف)، (۶\_ب)، (۷\_الف) و (۷\_ب) مشهود است در سیستم بدون SVC ولتاژ نوسانی شده و سیستم ناپایدار است. اضافه کردن SVC پیش زاویه بار به حدی کاهش داده که سیستم به مرز پایداری نزدیک شده است، همچنین نوسانات جریان و توان ژنراتور ها را که نشان دهنده ناپایداری سیستم است دمپ کرده و به حالت پایداری رسانده است و نهایتاً منجر به بهبود پروفیل ولتاژ در تمام سیستم می شود. افزودن SVC نوسانات گشتاور الکترو مکانیکی ژنراتور های سنکرون را بعد از وقوع این خطا نیز دمپ خواهد کرد.

#### ۴-۵\_مورد ۴

در ابتدای شبیه سازی خط چهارم به سیستم افزوده می شود. این خط مجهز به یک Breaker است. با اعمال خطایی سخت در زمان  $t=5\text{sec}$ ، در وسط این خط و گذشت  $0.2\text{sec}$  خط قطع شده و سیستم با یک خط بین شین های ۳ و ۴ به کار خود ادامه می دهد. با توجه به شکل های (۸\_الف)، (۸\_ب)، (۹\_الف) و (۹\_ب) ملاحظه می شود، نوسانات ولتاژ پایانه ژنراتورها در این مورد کاملاً دمپ شده و نوسانات جریان و توان تحویلی ژنراتورها نیز به نحو مطلوبی مهار می شود. اعمال SVC ژنراتورها را به حالت پایدار رسانده و نوسانات گشتاور الکترو مکانیکی در آن ها را دمپ کرده است.

#### ۶\_نتیجه گیری و پیشنهادات

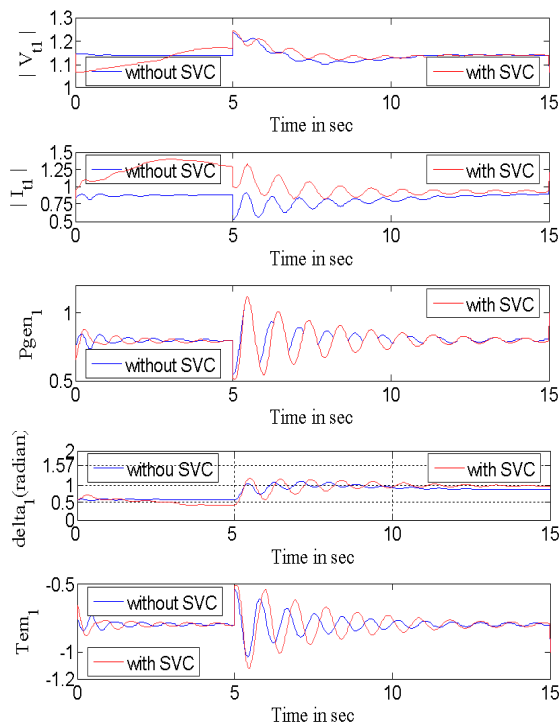
براساس شبیه سازی های انجام شده قابلیت های SVC را می توان بصورت زیر خلاصه کرد .  
SVC در سیستم های قدرت برای ازدیاد کارایی بطرق مختلفی مورد استفاده قرار می گیرد:  
۱- برای رگوله کردن ولتاژ ۲- بهبود پایداری گذرا ۳- ازدیاد ظرفیت انتقال توان ۴- کاهش موقتی ازدیاد ولتاژ ۵- میرایی هر چه بیشتر نوسانات توان ۶- جبران بار ۷- کاهش هزینه تمام سیستم

جایگذاری SVC در محل مطلوب یکی از مهمترین مسایلی است که در استفاده بهینه از SVC مورد توجه بسیار قرار می گیرد. در سیستم چهار باسه استفاده شده در شبیه سازی، SVC را در شین ۴ قرار دادیم و نتایج مطلوبی حاصل شد. برای شبکه های گسترده جایگذاری SVC در محل مناسب باعث کاهش هزینه های اقتصادی و همچنین پاسخگویی بهینه سیستم به اختلالات هم در حالت گذرا و هم در حالت ماندگار می شود. مسئله جایگذاری SVC در سیستم قدرت را می توان با روش های Soft computing مانند: Fuzzy Logic، Ant Colony، Neural Networks، Genetic Algorithm و ... حل کرد .

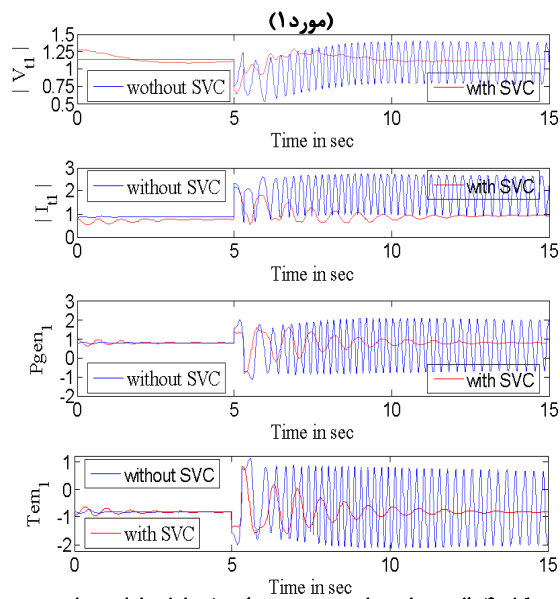
همچنین طراحی کنترل کننده های کامل تر برای کنترل عملکرد بهینه SVC می تواند یکی از مسایلی باشد که در آینده مورد پژوهش قرار می گیرد. یکی دیگر از مسایل قابل پژوهش، بررسی تاثیر هماهنگی و همکاری بین SVC و ادوات مختلف قابل استفاده در سیستم قدرت از جمله ادوات FACTS، PST، UPFC، ULTC و ... می باشد .

#### ۷\_سپاسگذاری و تشکر

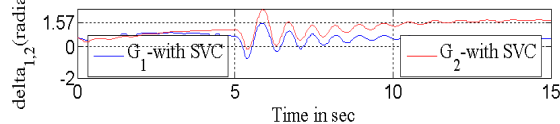
در پایان با سپاس و تشکر فراوان از استاد عزیز و گرامی خانم دکتر ملیحه مغفوری استادیار دانشگاه شهید باهنر کرمان که راهنمایی های ایشان همواره حلال مشکلات ما در رسیدن به اهدافمان بود. ایشان در حین تهیه مقاله ما را همراهی کرده و از هیچ کوششی دریغ نکردند .



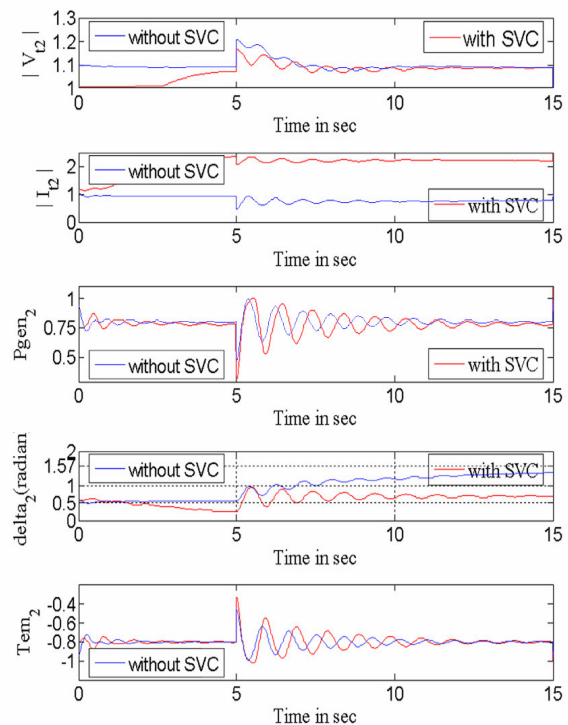
شکل ۳\_الف: مولفه های خروجی ژنراتور ۲ شامل ولتاژ، جریان، توان، زاویه بار و گشتاور در حالت وجود SVC و عدم وجود آن



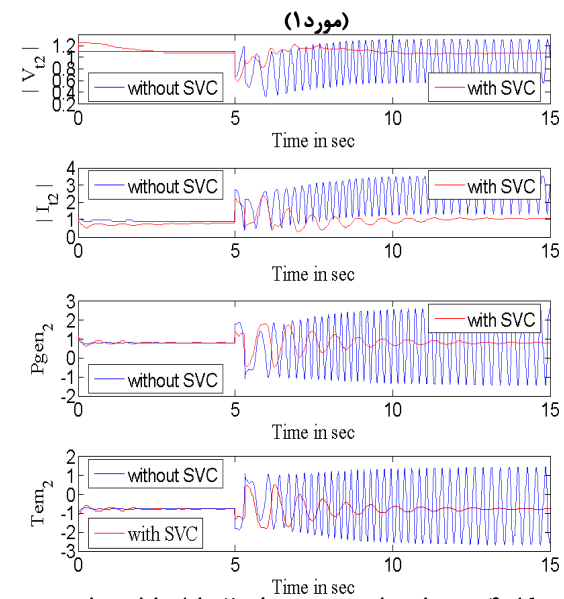
شکل ۳\_ب: مولفه های خروجی ژنراتور ۲ شامل ولتاژ، جریان، توان، و گشتاور در حالت وجود SVC و عدم وجود آن (مورد ۱)



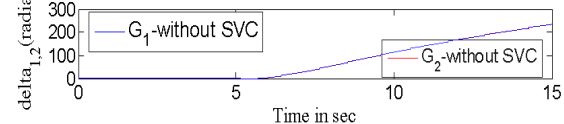
شکل ۳\_ج: مولفه های خروجی ژنراتور ۱ شامل ولتاژ، جریان، توان، و گشتاور در حالت وجود SVC و عدم وجود آن (مورد ۲)



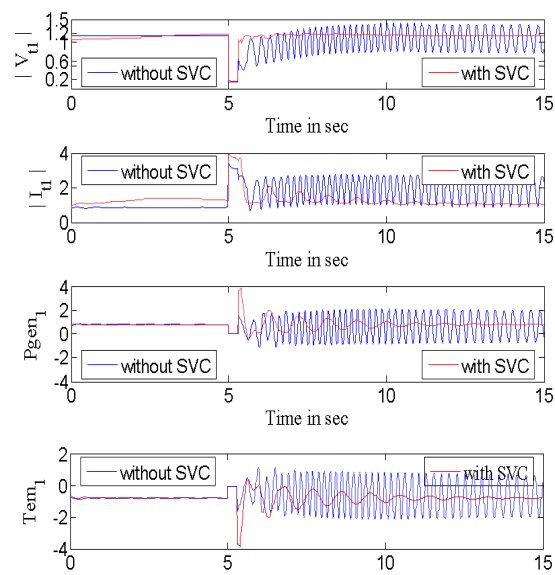
شکل ۴\_الف: مولفه های خروجی ژنراتور ۲ شامل ولتاژ، جریان، توان، زاویه بار و گشتاور در حالت وجود SVC و عدم وجود آن



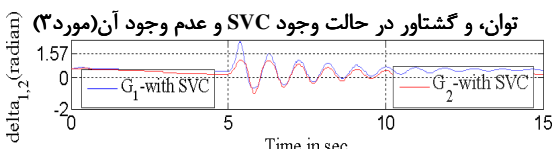
شکل ۴\_ب: مولفه های خروجی ژنراتور ۲ شامل ولتاژ، جریان، توان، و گشتاور در حالت وجود SVC و عدم وجود آن (مورد ۱)



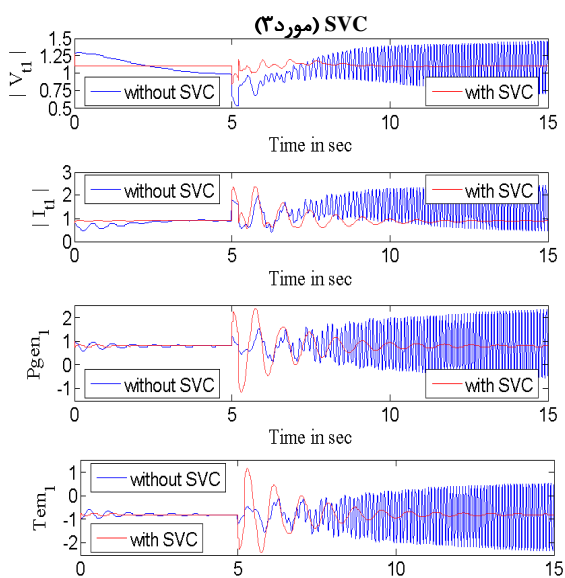
شکل ۴\_ج: مولفه های خروجی ژنراتور ۲ شامل ولتاژ، جریان، توان، و گشتاور در حالت وجود SVC و عدم وجود آن (مورد ۲)



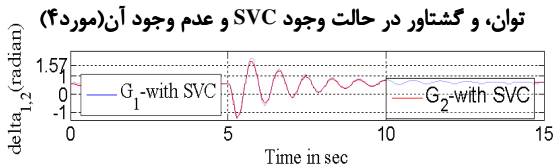
شکل ۶-الف: مولفه های خروجی ژنراتور ۱ شامل ولتاژ، جریان، توان، و گشتاور در حالت وجود SVC و عدم وجود آن (مورد ۳)



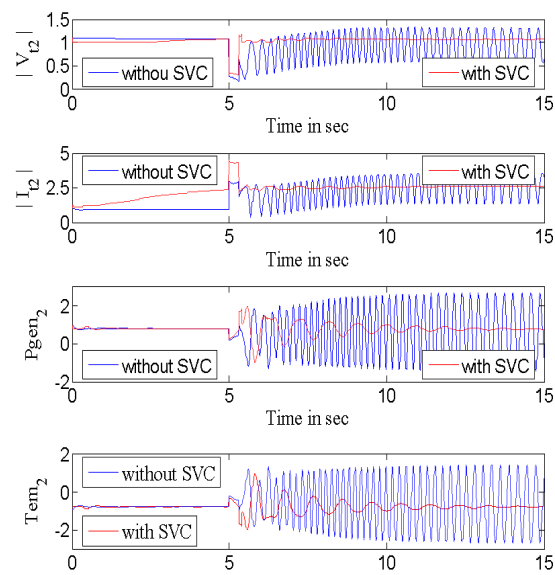
شکل ۷-الف: زاویه بار ژنراتور های ۱ و ۲ در حالت وجود SVC (مورد ۳)



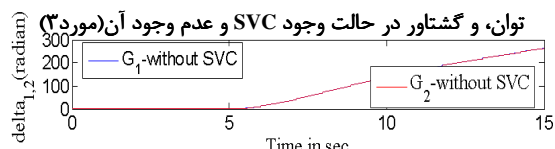
شکل ۸-الف: مولفه های خروجی ژنراتور ۱ شامل ولتاژ، جریان، توان، و گشتاور در حالت وجود SVC و عدم وجود آن (مورد ۴)



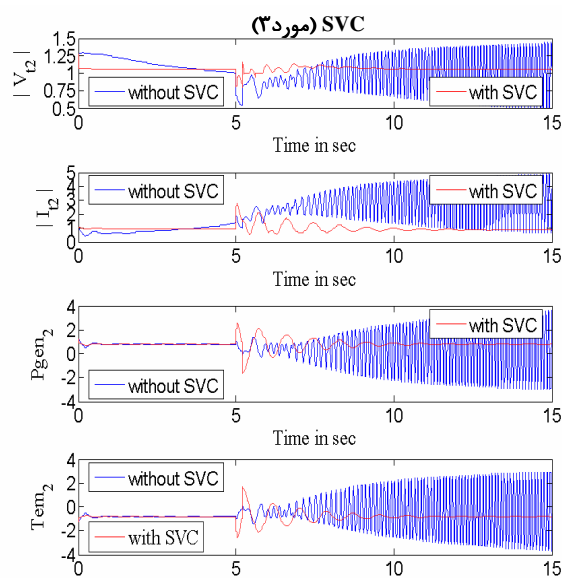
شکل ۹-الف: زاویه بار ژنراتور های ۱ و ۲ در حالت وجود SVC (مورد ۴)



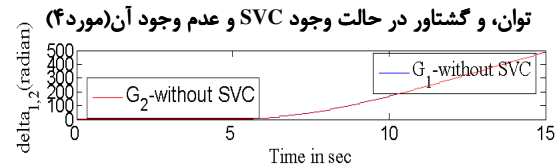
شکل ۶-ب: مولفه های خروجی ژنراتور ۲ شامل ولتاژ، جریان، توان، و گشتاور در حالت وجود SVC و عدم وجود آن (مورد ۳)



شکل ۷-ب: زاویه بار ژنراتور های ۱ و ۲ در حالت عدم وجود SVC (مورد ۳)



شکل ۸-الف: مولفه های خروجی ژنراتور ۲ شامل ولتاژ، جریان، توان، و گشتاور در حالت وجود SVC و عدم وجود آن (مورد ۴)



شکل ۹-ب: زاویه بار ژنراتور های ۱ و ۲ در حالت عدم وجود SVC (مورد ۴)

**[1] Comparison of PSS, SVC, and STATCOM controllers for damping power system oscillations**

Mithulananthan, N.; Canizares, C.A.; Reeve, J.; Rogers, G.J.;  
Power Systems, IEEE Transactions on  
Volume 18, Issue 2, May 2003 Page(s):786 - 792

**[2] A Robust Control Strategy For Shunt and Series Reactive Compensators To Damp Electromechanical Oscillations**

Mojtaba Norozian, Senior Member, IEEE, Mehrdad Ghandhari, Student Member, IEEE,  
Goran Andersson, Fellow, IEEE, J. Gronquist, Member, IEEE, and I. Hiskens, Senior Member, IEEE  
IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 16, NO. 4, OCTOBER 2001

**[3] The Dynamic Modeling Of Static Var System In Power System Blockset**

E. G. Nepomuceno, O. M. Neto, P. C. A. Leão and E. M. A. M. Mendes  
FUNREI - Federal Institution of High Education of São João del Rei, BRAZIL

**[4] Coordination of an SVC with a ULTC Reserving Compensation Margin for emergency Control**

Kwang M. Son, *Member, IEEE*, Kyeong S. Moon, Song K. Lee, *Member, IEEE*, and Jong K. Park, *Senior Member, IEEE*  
IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 15, NO. 4, OCTOBER 2000

**[5] Static Var Compensator Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation**

IEEE Special Stability Controls Working Group  
System Dynamic Performance Subcommittee  
Power System Engineering Committee  
IEEE Transactions on power systems, Vol.9 , No.1 February 1994

**[6] Single-machine infinite bus system**

Rusejla Sadikovic  
Internal report  
Zurich, 07.07.2003