

## میرا کردن نوسانات زیرسنگرون با استفاده از STATCOM

اتابک مشهدی کشتیان  
دانشجوی کارشناسی ارشد کنترل  
دانشکده مهندسی برق دانشگاه تبریز  
atabak\_mashhadi@ee.iust.ac.ir

مجید ولی زاده  
دانشجوی کارشناسی ارشد قدرت  
دانشکده مهندسی برق دانشگاه تبریز  
[majidpdf@yahoo.com](mailto:majidpdf@yahoo.com)

**چکیده:** در این مقاله میرا کردن نوسانات پیچشی در سیستمهای انتقال جبران شده سری خازنی مورد بررسی قرار می گیرد. خازنهای جبران ساز سری در خط انتقال باعث پدیده نوسانات زیر سنگرون (SSR) می شوند. در مقالات مختلف روشهای متعددی برای پیشگیری از SSR بیان شده است. امروزه استفاده از ادوات FACTS مانند STATCOM به منظور بهبود توان انتقالی در شبکه، پایداری ولتاژ و میرا کردن نوسانات توان بیشتر شده است. در این مقاله میرا کردن نوسانات زیر سنگرون با استفاده از STATCOM قرار گرفته در وسط خط انتقال مورد بررسی قرار می گیرد.

**کلمات کلیدی:** نوسانات زیر سنگرون، STATCOM، پایداری

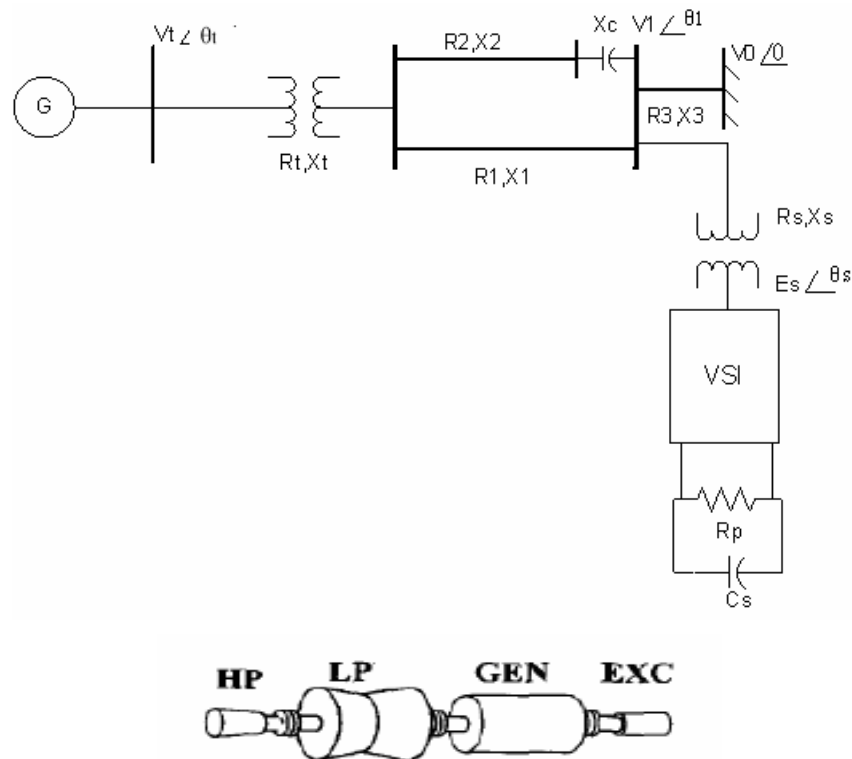
۱- **مقدمه:** امروزه یکی از مسائل مهم در سیستمهای قدرت بهره برداری اقتصادی از سیستم قدرت است. یکی از بخش های مهم سیستم قدرت انتقال می باشد که حجم زیادی از توان را، از بخش تولید به بخش توزیع می رساند. لذا ما باید بتوانیم از حداکثر توان قابل انتقال خطوط استفاده نمائیم. یکی از عوامل محدود کننده حداکثر توان انتقالی خطوط، راکتانس خطوط است. به منظور کاهش راکتانس خطوط انتقال از خازنهای سری در خط استفاده شده که بدین ترتیب راکتانس خط کاهش یافته و در نتیجه توان انتقالی خط افزایش می یابد. اما قرار دادن خازن سری در خط انتقال باعث به وجود آمدن پدیده SSR می شود. تعدادی از روشهای جلوگیری از بروز SSR در مقالات ارائه شده است [۱-۳]

اکثر تحقیقات در زمینه میرا کردن نوسانات پیچشی صورت گرفته است. در این مقاله مدل ریاضی STATCOM بدست آمده و تاثیر قراردادن STATCOM در وسط خط انتقال برای میرا کردن SSR و نوسانات پیچشی مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- مدل سیستم قدرت

برای تحلیل پدیده SSR به دانستن جزئیات مدل کردن همه سیستم الکتریکی شامل ماشین سنکرون، شبکه AC، مدارات STATCOM، سیستم تحریک و سیستم مکانیکی نیاز می‌باشد. معیار سنجش نتایج در این مقاله، دومین مدل معیار IEEE برای مطالعه SSR است [۳] که در شکل ۱ آورده شده است.

در مطالعه پدیده SSR در بعضی موارد سیستم تحریک در نظر گرفته نمی‌شود، که در آن صورت ولتاژ میدان ثابت فرض می‌شود. اما در این مدل SSR که در مرجع [۲] هم مورد استفاده قرار گرفته، سیستم تحریک نیز در نظر گرفته شده است.



شکل ۱ یک نمونه سیستم قدرت به همراه سیستم جرم و فنر نیروگاه

مدل دینامیکی سیستم داده شده در شکل ۱ شامل معادلات نوسانات الکترو مکانیکی ژنراتور، رابطه بین شار-ولتاژ-جریان در مدارات مختلف، سیستم تحریک، خطوط انتقال، خازنهای سری خط و سیستم جرم و فنر مربوط به شفت ژنراتور را می‌توان بصورت معادلات فضای حالت زیر نوشت:

$$P \begin{bmatrix} \Delta \dot{X} \\ Z_1 \end{bmatrix} = Q[\Delta X] + R[U] \quad (1)$$

که اجزای ماتریس P، ضرایبی از مشتقات حالت، متغیرهای حالت و متغیرهای خروجی هستند. اجزای ماتریس Q ضرایبی از متغیرهای حالت هستند و اجزای ماتریس R شامل ضرایبی از اجزای کنترلی هستند.

### ۳- تحلیل مدل سیستم قدرت

تحلیل براساس شرایط زیر انجام می‌شود که در عمل نیز شرایطی مشابه آنرا داریم.

- ژنراتور 0.9 به سیستم توان می‌دهد.

- از دینامیک گاورنر صرف‌نظر شده و توان مکانیکی ورودی به توربین ثابت فرض شده است.

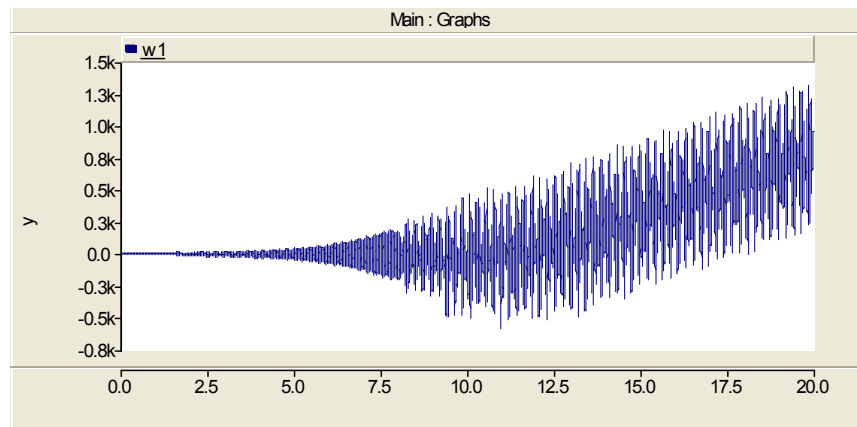
### ۳-۱- تحلیل سیستم قدرت بدون داشتن هرگونه سیستم کنترلی

در این مطالعه در یک نقطه کاری مشخص، سطح جبرانسازی خازن سری خط بصورت پله‌ای تغییر می‌کند و اجزای ماتریس‌های  $R, Q, P$  محاسبه شده و معادله (۱) را می‌توان بصورت زیر نوشت:

$$\begin{aligned}\dot{X} &= AX + BU \\ Z_1 &= CX + DU\end{aligned}\quad (2)$$

مقادیر ویژه ماتریس  $A$  را بدست می‌آوریم و از روی مقادیر ویژه مربوط به هر مود پیچشی می‌توان پایدار بودن و یا ناپایداری آن مود مورد نظر را برای دو سطح جبرانسازی ۳۲ درصد و ۵۲ درصد مشخص نمود که این درصدهای جبرانسازی طبق معیار دوم مقادیر ویژه IEEE می‌باشند.

در اینجا اختلاف سرعت بین قسمت‌های HP و GEN بدون استفاده از STATCOM برای جبرانسازی ۵۲ درصد با شبیه سازی PSCAD بصورت زیر است.



شکل ۲ اختلاف سرعت بین قسمت‌های HP و GEN در حالت تشدید برای جبرانسازی ۵۲ درصد بدون استفاده از STATCOM می‌باشد

دیده می‌شود که در این حالت سیستم ناپایدار شده و مقدار ویژه این حالت همانطور که در جدول ۱ آورده شده مقداری مثبت است که نشان دهنده ناپایداری سیستم است. اطلاعات مربوط به مودهای مختلف سیستم در جدول ۱ آورده شده است. دیده می‌شود که مود ۱ در جبرانسازی ۵۲ درصد و مود ۲ در جبرانسازی ۳۲ درصد ناپایدار هستند. درصد جبرانسازی بصورت نسبت  $X_C/X_L$  تعریف می‌شود.

جدول ۱ مقادیر ویژه سیستم بدون داشتن کنترل کننده

mode	درصد جبرانسازی	
	32%	52%
0	-0.158±j 8.24	-0.264±j 8.49
1	-0.016±j 155.33	0.54±j 155.24
2	0.01±j 203.46	-0.042±j 203.46
3	-0.049±j 321.18	-0.049±j 321.18
ele	-14.34±j 203.06	-14.05±j 155.12

#### ۴- میرا کردن SSR با استفاده از STATCOM

همانطور که گفته شد STATCOM یکی از ادوات FACTS می باشد. در ادامه نشان داده می شود که اگر STATCOM را در وسط خط انتقال قرار دهیم و از سیگنال کنترلی محاسبه کننده ولتاژ داخلی که در قسمت بعدی توزیع داده خواهد شد برای کنترل آن استفاده شود، می تواند در میرا کردن پدیده SSR نقش موثری داشته باشد.

#### ۴-۱- مدل ریاضی STATCOM

مدل فضای حالت STATCOM در دستگاه D-Q را می توان بصورت زیر نوشت، باید توجه شود که سیستم پریونیت انتخاب شده برای مدل مداری STATCOM مشابه سیستم در حالت استراحت است.

$$\begin{bmatrix} I_{sq} \\ I_{sd} \\ V_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{X_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{X_s} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{sq} \\ E_{sd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\omega_0(\frac{R_s}{X_s}) & -\omega_0 & \omega_0(\frac{K \cos(\theta_s)}{K_s}) \\ \omega_0 & -\omega_0(\frac{R_s}{X_s}) & \omega_0(\frac{K \sin(\theta_s)}{K_s}) \\ -\frac{K \cos(\theta_s)}{C_s} & -\frac{K \sin(\theta_s)}{C_s} & \frac{1}{R_p C_s} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_{sq} \\ I_{sd} \\ V_{dc} \end{bmatrix} \quad (3)$$

که  $\omega_0 = 1 p.u.$ ، برای اینورتر ۱۲ پالسی  $K = 2\sqrt{6\pi}$  و همچنین داریم:

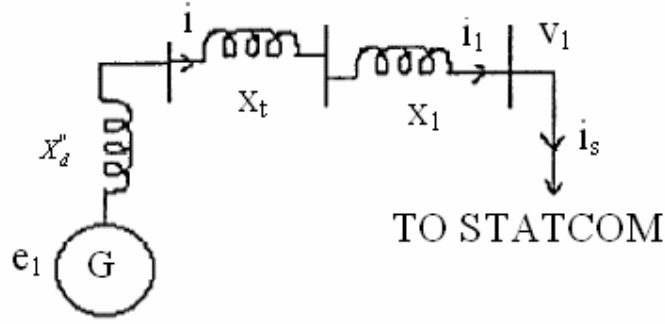
$$\begin{aligned} V_1^2 &= V_{1q}^2 + V_{1d}^2 \\ \theta_1 &= \tan^{-1}\left(\frac{V_{1d}}{V_{1q}}\right) \\ \theta_s &= \theta_1 + \theta_d \end{aligned} \quad (4)$$

که اختلاف زاویه فاز  $\theta_d$  زاویه بین  $E_s$  و  $V_1$  است. مقاومت  $R_p$  موازی با خازن  $C_s$  در مدار STATCOM نشان دهنده تلفات خازن است.

#### ۴-۲- محاسبه ولتاژ داخلی (CIV)

برای بدست آوردن سیگنال CIV بصورت زیر عمل می‌کنیم:

ابتدا مدل سیستم داده شده در شکل ۱ را به صورت شکل ۲ ساده می‌نمائیم و فقط قسمت بین ژنراتور و باس STATCOM در نظر گرفته شده است. از اثر شارژ خازنی خطوط و مقاومت های استاتور ژنراتور و خطوط انتقال صرفنظر می‌کنیم. ژنراتور بصورت یک منبع ولتاژ  $e_1$  در پشت راکتانس زیرگذرای  $X_d''$  مدل شده است.



شکل ۲ مدل ساده شده شبکه

$$e_1 = v_1 + \frac{X_1}{\omega_0} p i_1 + \left[ \frac{X_d'' + X_t}{\omega_0} \right] p i \quad (5)$$

$$e_{1d} = v_{1d} + \frac{X_1}{\omega_0} p i_{1d} + \left( \frac{X_d'' + X_t}{\omega_0} \right) p i_d + \left( \frac{\omega}{\omega_0} X_1 \right) i_{q1} + \frac{\omega}{\omega_0} (X_d'' + X_t) i_q \quad (6)$$

$$e_{1q} = v_{1q} + \left( \frac{X_1}{\omega_0} \right) p i_{1q} + \left( \frac{X_d'' + X_t}{\omega_0} \right) p i_d - \left[ \frac{\omega}{\omega_0} X_1 \right] i_{1d} - \left[ \frac{\omega}{\omega_0} (X_d'' + X_t) \right] i_d \quad (7)$$

که  $e_{1d}$ ,  $e_{1q}$  اجزای D,Q مربوط به ولتاژ داخلی  $e_1$  هستند.

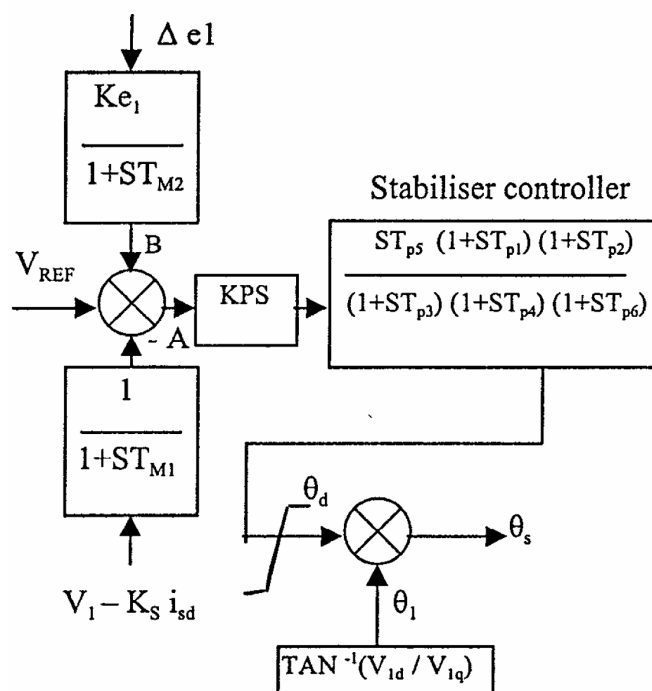
برای فرمولهای فضای حالت از مدل شبکه، معادله‌های  $p i_d, p i_q, p i_{1d}, p i_{1q}, v_{1d}, v_{1q}$  را بدست آورده و جای آنها در فرمولها قرار می‌دهیم نحوه محاسبه سیگنال ولتاژ داخلی بصورت زیر است:

$$e_1^2 = e_{1q}^2 + e_{1d}^2 \quad (8)$$

$$\Delta e_1 = \left( \frac{e_{1q}}{e_1} \right) \Delta e_{1q} + \left( \frac{e_{1d}}{e_1} \right) \Delta e_{1d} \quad (9)$$

#### ۴-۳- کنترل کننده پایدار ساز

STATCOM توسط سیگنال CIV و یک کنترل کننده پایدار ساز طبق شکل ۳ کنترل می‌شود.



شکل ۳ مدل کنترل کننده STATCOM

کنترل کننده پایدارساز شامل عبارتهایی برای حذف افست حالت ماندگار و همچنین تامین پیش فازی و پس فازی مورد نیاز شبکه است. از مدل کنترل کننده STATCOM داریم:

$$\frac{\theta_d}{V_{ref} + B - A} = \frac{K_{PS} ST_{P5} (1 + ST_{P1}) (1 + ST_{P2})}{(1 + ST_{P3}) (1 + ST_{P4}) (1 + ST_{P6})} \quad (10)$$

با ساده سازی داریم:

$$\frac{\theta_d}{V_{ref} + B - A} = \frac{K_{PS} T_{C6} (S^3 T_{C1} + S^2 T_{C2} + ST_{C3})}{S^3 + S^2 T_{C4} + ST_{C5} + T_{C6}} \quad (11)$$

$$T_{C1} = (T_{P1} \times T_{P2} \times T_{P5})$$

$$T_{C2} = (T_{P1} \times T_{P5}) + (T_{P2} \times T_{P5})$$

$$T_{C3} = T_{P5}$$

$$T_{C4} = \frac{1}{T_{P3}} + \frac{1}{T_{P4}} + \frac{1}{T_{P6}}$$

$$T_{C5} = \frac{1}{(T_{P4} \times T_{P6})} + \frac{1}{(T_{P3} \times T_{P6})} + \frac{1}{(T_{P3} \times T_{P4})}$$

$$T_{C6} = \frac{1}{(T_{P3} \times T_{P4} \times T_{P6})}$$

از معادله (۱۱) طبق معادلات حالت که STATCOM را برای تحلیل اغتشاشات کوچک تحلیل می نمایند بدست می آید:

$$P\Delta S_1 = (\Delta V_{ref} + \Delta B - \Delta A) - T_{C4}\Delta S_1 - T_{C5}\Delta S_2 - T_{C6}\Delta S_3 \quad (12)$$

$$P\Delta S_2 = \Delta S_1 \quad (13)$$

$$P\Delta S_3 = \Delta S_2 \quad (14)$$

$$\Delta \theta_d = K_{PS} T_{C6} [T_{C1}(\Delta V_{ref} + \Delta B - \Delta A) + (T_{C2} - T_{C1}T_{C4})\Delta S_1 + (T_{C3} - T_{C1}T_{C5})\Delta S_2 - (T_{C1}T_{C6})\Delta S_3] \quad (15)$$

بعد از خطی سازی معادلات بردار حالت STATCOM و کنترل کننده آن بصورت زیر است:

$$X_S = (\Delta I_{sd}, \Delta I_{sq}, \Delta V_{dc}, \Delta A, \Delta B, \Delta S_1, \Delta S_2, \Delta S_3)^T \quad (16)$$

#### ۴-۴- تحلیل سیستم قدرت دارای STATCOM کنترل شده با کنترل کننده ولتاژ

وظیفه اصلی STATCOM رگوله کردن ولتاژ خط انتقال در نقطه ایست که به آن متصل است. هنگامی که STATCOM را فقط با کنترل کننده ولتاژ کنترل نمائیم در آن صورت مقادیر ویژه متناظر با مودهای پیچشی برای جبران سازی های ۳۲ درصد و ۵۲ درصد مثبت شده و باعث ناپایداری سیستم می شود که نتایج این قسمت در جدول ۲ آورده شده است. لذا دیده می شود که روش کنترل ولتاژ برای STATCOM به تنهایی نمی تواند بطور موثر مودهای ناپایدار را میرا نماید، بنابراین به یک سیگنال کنترل دیگر نیاز داریم و آن سیگنال CIV است.

جدول ۲ مقادیر ویژه طبق معیار دوم IEEE برای سیستم کنترلی بدون سیگنال CIV

mode	درصد جبران سازی	
	32%	52%
0	-0.874±j 7.076	-0.967±j 7.515
1	0.004±j 154.67	-0.304±j 154.81
2	-0.128±j 203.46	-0.067±j 203.42
3	-0.051±j 321.19	-0.051±j 321.19
ele	-29.29±j 184.06	-16.8±j 140.06

#### ۴-۵- تحلیل سیستم قدرت توسط STATCOM کنترل شده با کنترل کننده ولتاژ و سیگنال CIV

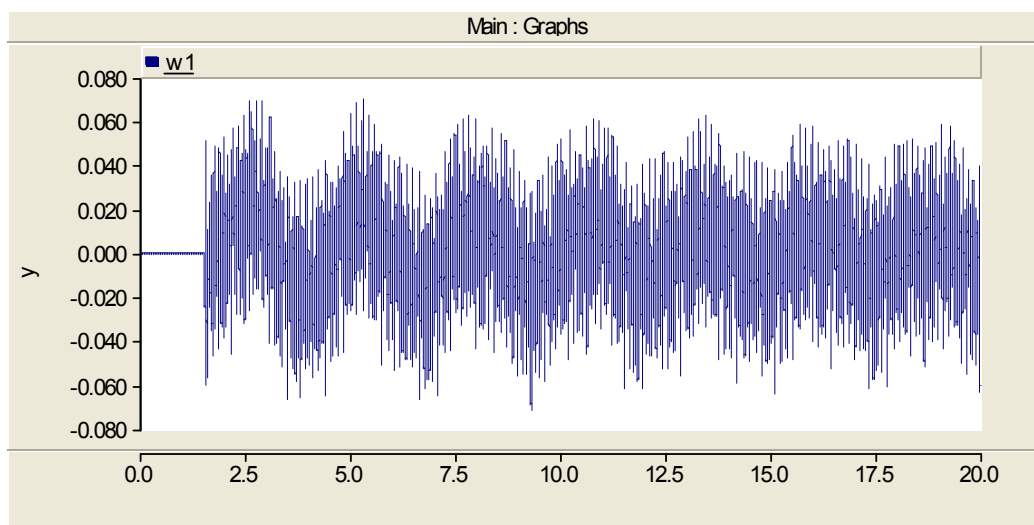
برای STATCOM کنترل شده با کنترل کننده ولتاژ و سیگنال CIV، مقادیر ویژه مودهای پیچشی و الکتریکی در ۳۲ درصد و ۵۲ درصد جبران سازی در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳ مقادیر ویژه سیستم طبق دومین معیار IEEE با سیگنال کمکی CIV

mode	درصد جبرانسازی	
	32%	52%
0	-0.633±j 7.148	-0.729±j 7.501
1	-0.031±j 154.66	-0.318±j 154.84
2	-0.128±j 203.46	-0.068±j 203.42
3	-0.051±j 321.19	-0.051±j 321.19
ele	-29.54±j 183.6	-16.82±j 139.64

از جدول ۳ دیده می‌شود که:

- مودهای ۱ و ۲ که در موارد قبلی ناپایدار بودند در این حالت پایدار شده‌اند.
  - سایر مودها هم پایدار هستند.
- که در اینجا برای مقایسه همان جبرانسازی ۵۲ را در حالت با STATCOM کنترل شده با سیگنال CIV برای مدت ۲۰ شبیه سازی شده است.



شکل ۴ اختلاف سرعت قسمت HP و GEN برحسب رادیان بر ثانیه برای سیستم کنترل شده توسط STATCOM با سیگنال CIV

## ۵- نتیجه گیری

روشهای میرا کردن نوسانات پیچشی طبق معیار دوم IEEE در این مقاله مورد بررسی قرارگرفت و از روش مقادیر ویژه برای این منظور استفاده شد. تحلیل سیستم الکترومکانیکی نشان داد که دو مود نوسانات پیچشی، یعنی مودهای ۱ و ۲



ناپایدار بودند. اما هنگامی که از STATCOM کنترل شده توسط سیگنال CIV بدست آمده از ولتاژ باس STATCOM و جریان خط استفاده کردیم همه مودها پایدار شدند. بنابراین STATCOM می تواند با تثبیت ولتاژ محل اتصال خود به شبکه، در میرا کردن نوسانات زیر سنکرون بسیار موثر باشد.

#### ۶- مراجع

- [1] IEEE Committee report. 'A Bibliography for the Study of Synchronous Resonance between Rotating Machine and Power System.' IEEE-PAS 95, No 1 Jan/Feb. 1976, p 216-218.
- [2] IEEE Committee report, 'Computer representation of excitation system', ibid, Vol. PAS-87, No. 6 June 1968, p 1460-1464.
- [3] IEEE SSR working group 'Second benchmark model for computer simulation of synchronous resonance' IEEE Transactions on Power Apparatus and system PAS-104, No. 5, May 1985, p 1057-1066.
- [4] S.V. Jayaram Kumar et. Al., 'Damping Of Sub Synchronous Transient Torque Oscillations Using STATCOM' IE(I), Journal, Vol. 80, Nov. 1999, p. 104-109.