# بهبود پايداري گذراي سيستمهاي قدرت با استفاده از استراتژی کنترل بهينه برروي جبران کننده سنکرون استاتیکی

رضا قاضي دانشيارگروه مهندسی برق دانشکده مهندسي، دانشگاه فردوسی مشهد
محمد هادي عسکري کارشناس ارشد گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسي، دانشگاه فردوسی مشهد
محمد حسين جاويدي دانشيارگروه مهندسی برق، دانشکده مهندسي، دانشگاه فردوسی مشهد

**چکیده**

ابزار FACTS[1] به دليل توانايي سريع کنترل توان اکتيو و راکتيو به عنوان جبران کننده هاي مدرن در بهبود شرايط گذرا و ديناميکي سيستمهاي قدرت نقش حائز اهميتي دارند. در اين مقاله به نقش يکي از انواع اين ابزار يعني جبران کننده سنکرون استاتیکی (STATCOM)[2] در بهبود پايداري گذرا پرداخته شده است. شيوه کنترلي به کار رفته جهت کنترل جبران کننده، کنترل بهينه است که به بهبود قابل ملاحظهاي منجر شده است. جهت نشان دادن نقش و کارائي سيستم کنترل پيشنهادي شبيهسازي بر روي سيستم تک ماشينه و چند ماشينه انجام گرفته و نتايج آن مورد تجزيه و تحليل قرار گرفته است. قابليت آن در مدهای عملکردی توليد توان اکتيو و راکتيو در ميزان بهبود پايداري مقايسه گرديدهاند که در تعيين ظرفيت با کمترين هزينه جبران کننده حائز اهميت است. ضمناً در سيستم چند ماشينه که جبران کننده در باس مياني نصب شده است، سيگنال کنترلي که دربرگيرنده متغيرهاي حالت سيستم است در باس جبران کننده در دسترس نمیباشد. در اين حالت نشان داده شده است که سيگنال کنترلي را میتوان از متغيرهاي الکتريکي باس جبران کننده که همارز متغيرهاي حالت میباشند به دست آورد، که از نظر فني و اقتصادي حائز اهميت است.

**کلمات کلیدی: پايداري گذرا، کنترل بهينه، جبران کننده سنکرون استاتیکی، STATCOM، ا بزار FACTS**

# Power System Transient Stability Improvement Using Optimal Control of Static Synchronous Compensator

R. Ghazi, M. H. Askari and M. H. Javidi
Dept. of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi Univ. of Mashhad

**Abstract**

The development and use of FACTS devices for power transmission system has led to the application of these controllers to improve the stability of power systems. This paper discusses the optimal control of static compensator (STATCOM) to improve transient stability. To demonstrate the ability of the proposed control strategy, it has been applied on a single machine and multi machine power systems. Different modes of operation of compensator regarding the modulation of active and reactive power has been considered. In multi machine system, since the control signal based on the state variable is not available at the compensator bus, the derivative of an electric quantity derived from local measurement has been utilized.

**Key words: Transient stability, Optimal control, Static synchronous compensator, STATCOM, FACTS Devices.**

---

1- Flexible AC Transmission System
2- Static Synchronous Compensator

## ۱- مقدمه

بحث پايداري گذراي سيستم قدرت هنگامي مطرح مي‌گردد كه سيستم دچار يك اغتشاش بزرگ گردد. در اين حالت سيستم از نقطه كـار دائمي خـود بـه مقدار زيادي دور شده و رفتار آن بـه صورتي غير خطي و پيچيده درخواهد آمد. اگر اغتشاش به‌اندازه كافي كوچك باشد، پس از طي حالت گذرا و ميرا شدن نوسانات، سيستم قدرت به نقطه تعادل دائمي پس از اغتشاش مي‌رسد. ولي چنانچه اغتشاش از حدي بزرگتر باشد، سيستم ناپايدار خواهد شد.

عموماً مطالعه پايداري گذرا محدود به اولين نوسان گذرا مي‌شود. يعني چنانچه ماشينهاي سيستم قدرت در اولين نوسان گذرا پايدار بمانند سيستم قدرت پايدار خواهد ماند [۱و۲].

يكـي از روشــهاي بهبــود پايــداري گــذرا اســتفاده از جبران‌كننده‌هاي توان راكتيو (SVC) است كه با جـذب و توليـد توان راكتيو و در نتيجه كنترل پارامترهاي مختلف سيستم نظيـر ولتاژ باس جبران‌كننده و سرعت ميتوانند در بهبود پايداري گـذرا مؤثر باشند. جهت افزايش كارائي آنهـا روشـهاي گونـاگوني بـراي كنترل SVC ارائه شده است [۳-۵].

STATCOM در مد عملكردی توان راكتيو مانند SVC با كنتـرل توان راكتيو قادر است پايداري گذرا را بهبود بخشد و هـر مقـدار توان راكتيو درخواستي (سلفي يا خازني) را با توجه به ظرفيت خود فراهم نمايد [۶و۷].

STATCOM قادر است مستقل از ولتاژ سيستم، جريان راكتيو كامل را ايجاد نمايد درحاليكه در SVC اين جريان خروجي با كاهش ولتاژ سيستم شديداً كاهش مي‌يابد. لذا اين خاصيت STATCOM در بهبـود پـايــداري گـذرا فوق‌العاده مؤثر است. به علاوه STATCOM با منبع فعال dc داراي توانايي تبادل توان اكتيو با سيستم مي‌باشد كه اين امر باعث افزايش قابليت اين عنصر در بهبود پايداري گذرا مي‌گردد، زيرا ارتباط قوي بين توان اكتيو و تغييرات زاويه گشتاور كه عامل ناپايداري است وجود دارد.

در زمينه كنترل STATCOM تاكنون روشهاي كنترل خطي و غيرخطي مختلفي جهت بهبود پايداري گذرا در مقالات متعدد ارائه گرديده است [۶-۸] كه هركدام از آنها با توجه به شرائط سيستم تحت مطالعه به شيوه خاصي به كنترل STATCOM و بهبود پايداري گذرا پرداخته‌اند.

به طور كلي مي توان گفت بـراي بهبـود پايـداري گـذرا دو روش وجود دارد:

**الف- روش غير مستقيم:** در اين روش با در نظر گرفتن كل سيستم و حل گام به گام معادلات حاكم بر سيستم، وضع پايداري سيستم بررسي و كنترلكننده‌هاي مناسب پيشنهاد مي‌گردد. تقريباً تمام كارهاي انجام شده بر روي STATCOM براي بهبود پايداري گذرا منحصر به اين شيوه مي‌باشد.

**ب- روش مستقيم:** در اين روش با استفاده از معيارهاي پايداري مخصوصاً تابع لياپانوف سعي در بهبود پايداري گذرا مي‌گردد. اين روش گرچه بر روي SVC اعمال شده است [۹] ولي بر روي STATCOM جهت بهبود پايداري گذرا مورد استفاده واقع نشده است.

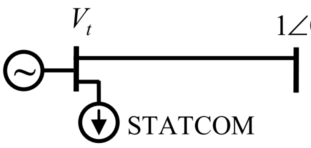
در اين مقاله با استفاده از ايده مطرح شده در مرجع [۹] و با استفاده از تابع لياپانوف كنترل‌كننده بهينه جهت STATCOM طراحـي شده است. با توجه به تفاوت در مدلسازي SVC كـه بـه صورت ادميتانس متغير مدل شده است و STATCOM كه در مقاله به صورت منبع جريان مدل شده است و همچنين قابليت متفاوت آنها در كنترل توان، شيوه كنترلي مناسب براي مدل موردنظر در مقاله حاضر توسعه داده شده است. از آنجاييكه در اين شيوه كنترلي، سيگنال كنترل بر متغيرهاي حالت سيستم ($\delta$و$\omega$) استوار است و در سيستم چند ماشينه موردمطالعه كه STATCOM در باس مياني نصب شده است و چنين متغيرهايي در دسترس نميباشند، نشان داده شده است كه چگونه ميتوان از مقادير الكتريكي قابل اندازهگيري در محل نصب جبران كننده استفاده كرد.

شيوه كنترلي حاصل بر روي سيـستم قـدرت تـک ماشـينه و چند ماشينه پياده شده است و نتايج شبيهسازي نـشان مـيدهـد كه اين شيوۀ كنترلی قادر است سيستم را به خوبي پايدار نمايد و جهت پايدار شدن سريعتر سيستم به جاي كنترلكننده پيوسته از كنترلكننده گسسته[1] استفاده شده است.

1- Bang - Bang

## ۲- سیستم تك‌ماشینه مورد مطالعه

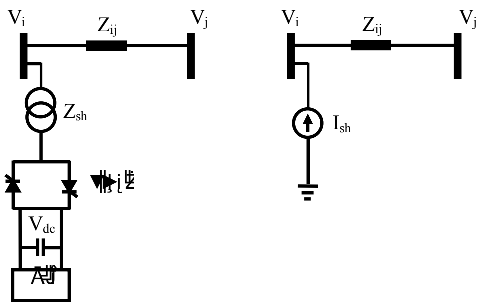
سیستم قدرت مورد مطالعه که در شکل (۱) نشان داده شده است، شامل یک ژنراتور سنکرون می‌باشد که از طریق یک خط انتقال به باس بي‌نهايت متصل شده است و جبران کننده سنکرون استاتیکی (STATCOM) در باس ژنراتور قرار گرفته است.




**شکل۱- سیستم قدرت تك‌ماشینه به‌همراه STATCOM**

## ۳-مدلسازي سیستم تك‌ماشینه

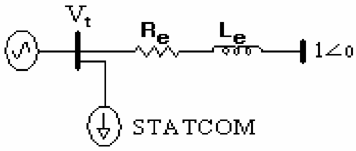
از نقطهنظر سیستمی، STATCOM را می‌توان به صورت يك منبع جريان موازی مطابق شكل (۲) در نظر گرفت زیرا در بخش اعظم ناحیه کاری، جريان آن مستقل از ولتاژ نقطه اتصال است. لذا پارامتر قابل کنترل آنرا می‌توان جريان آن فرض کرد. باتوجه به اینکه این پارامتردر توان انتقالی خط ظاهر می‌شود [۱۶و۱۷]، لذا مدل مناسبی برای مطالعه پایداری خواهد بود. STATCOM مي‌تواند با توجه به ظرفیت خود هر جرياني را كه سيستم كنترلي تعيين مي‌كند با تقريبي مناسب و در مدت زماني بسيار كوتاه توليد نمايد [۱۰].




**شکل۲- مدلسازي STATCOM**

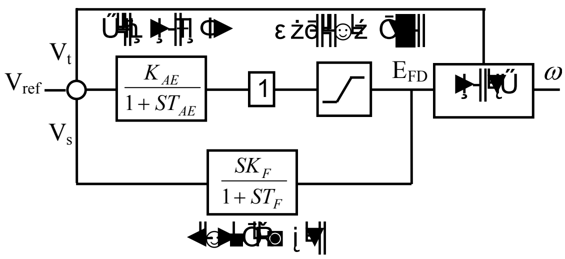
خط انتقال به صورت مدل (RL) در نظر گرفته مي‌شود كه متشكل از يك اندوكتانس و يك مقاومت مي‌باشد.

لذا مدل تكفاز سیستم قدرت (SMIB) با STATCOM به صورت شكل (۳) ميباشد.




**شکل۳- مدل سیستم قدرت تک ماشینه**

سیستم تحریک استاتیکی ماشین در شکل (۴) توسط بلوک دیاگرام در حوزه s نشان داده شده است [۱۵].




**شکل۴- مدل سیستم تحریک استاتیکی ماشین سنکرون**

رفتار دینامیکی غیر خطی ژنراتور سنکرون به وسیله تئوری دو محوری توصیف می‌شود که در آن ولتاژ گذراي استاتور محور d و q به صورت زير بيان مي‌گردد [۱۴]:

$$\begin{cases} \dot{E}'_d = [-E'_d - (X_q - X'_d) I_q] / T'_{qo} \\ \dot{E}'_q = [-E_{FD} - E'_q \, (X_d - X'_d) I_d] / T'_{do} \end{cases}$$

(۱)

که در آن $E_{FD}$ ولتاژ تحریک $T'_{do}$ و $T'_{qo}$ معرف ثابت زمانی گذرای محور d وq است.

ولتاژ ترمینال که ارتباط بین خط انتقال و ژ نراتور را بیان می‌کنند عبارتند از:

$$\begin{cases} V_d = E'_d - R_a I_d - X'_d I_q = -V_\infty Sin(\delta) + R_e I_d + \omega L_e I_q \\ V_q = E'_q - R_a I_q + X'_d I_d = -V_\infty Cos(\delta) + R_e I_q - \omega L_e I_d \\ V_t = (V_d^2 + V_q^2)^{1/2} \end{cases}$$

(۲)

براي چنين ماشيني معادله نوسان الكتريكي را مي‌توان به فرم زير نوشت :

$$\frac{2H}{\omega_S} \omega_{p.u}(t) \frac{d^2\delta(t)}{dt^2} + D\,\omega_{p.u}(t) \frac{d\delta(t)}{dt} = P_{mp.u}(t) - P_{ep.u}(t)$$

(۳)

که به صورت زیر ساده مي‌شود:

$$\begin{cases} \dfrac{2H}{\omega_S}\dfrac{d\omega(t)}{dt} = P_{mp.u}(t) - P_{ep.u}(t) - D\,\omega(t) \\ \dfrac{d\delta(t)}{dt} = \omega(t) - \omega_S \end{cases} \qquad (۴)$$

با ترکیب تجهیزات فوق مجموعهاي از معادلات دیفرانسیل غیرخطی به دست میآید. پارامترهای سیستم موردمطالعه در ضمیمه آمده است [۱۴].

## ۴-طراحي سیستم کنترل

براي چنین سیستم قدرتي که با معادلات (۴) توصیف گردیده، مي‌توان تابع لیاپانوفي تعریف نمود که از روي آن بتوان معیار خوبي براي بهبود پایداري گذراي سیستم قدرت تعیین‌نمود. این تابع انرژي به صورت زیر بیان مي‌گردد [۱۱]:

$$V(\delta,\omega) = \frac{HP_b}{\omega_S}(\omega-\omega_S)^2 - \left[P_m(\delta-\delta_S) + \frac{3V^2}{X}\left(Cos(\delta) - Cos(\delta_S)\right)\right] \qquad (۵)$$

در این رابطه $V(\delta,\omega)$ تابع انرژي لیاپانوف سیستم، $\frac{3V^2}{X}$ ماکزیمم توان الکتریکي قابل انتقال از خط در حالت بدون جبران‌سازي و $\delta_s$ معرف زاویه روتور در حالت ماندگار پس از رفع خطا مي باشد. در تعریف این تابع، جمله اول معرف انرژي جنبشي سیستم است و دومین جمله بیان کننده انرژي پتانسیل سیستم نسبت به نقطه تعادل ماندگار مي‌باشد.

از تابع انرژي سیستم در رابطه (۵) مشاهده مي شود که مقدار این تابع در نقطه تعادل پایدار نهایي برابر صفر است و هرچه متغیرهاي حالت $\delta$ و $\omega$ از مقادیر $\delta_S$ و $\omega_S$ در نقطه تعادل پایدار فاصله بگیرند تابع انرژي سیستم نیز به همان نسبت بزرگتر مي شود و نهایتاً در نقطه مرزی یعني در نقطه تعادل ناپایدار سیستم قدرت $\delta$ و $\omega$ از مقادیر ماندگار $\delta_S$ و $\omega_S$ بیشترین فاصله مجاز را دارند. لذا $V(\delta,\omega)$ در این نقطه بیشترین مقدار مجاز خود را دارا مي‌باشد. لذا مي‌توان یك مقدار مرزي براي $V(\delta,\omega)$ تعیین نمود که اگر مقدار تابع از آن مقدار بیشتر شود، سیستم قدرت به ناپایداري مي‌رسد.

بنابراین در بهبود پایداري سیستم، کنترل کننده اي مؤثر است که مقدار تابع انرژي را هر چه سریعتر به صفر برساند، چراکه به صفر رسیدن تابع لیاپانوف در حقیقت نشانگر رسیدن سیستم به وضع تعادل مي‌باشد. براي این منظور، کنترل‌کننده باید به گونه‌اي باشد که در هر لحظه شیبي منفي براي تابع انرژي فراهم نماید تا مقدار این تابع به طور مداوم کاهش یافته و به مقدار نهایي صفر برسد. جهت تحقق چنین کنترل کننده‌اي، نخست مشتق تابع $V(\delta,\omega)$ را نسبت به زمان محاسبه مي‌کنیم این مشتق‌گیري را مي‌توان به صورت زیر انجام داد [۹] :

$$\dot{V} = \frac{dV}{dt} = \frac{\partial V}{\partial \delta}\cdot\frac{d\delta}{dt} + \frac{\partial V}{\partial \omega}\cdot\frac{d\omega}{dt} \qquad (۶)$$

با توجه به معادله (۵) داریم:

$$\frac{\partial V}{\partial \delta} = -\left[P_m - \frac{3V^2}{X}Sin(\delta)\right] \qquad (۷)$$

$$\frac{\partial V}{\partial \omega} = \frac{2HP_b}{\omega_S}(\omega-\omega_S) \qquad (۸)$$

و در ضمن داریم:

$$\frac{d\delta(t)}{dt} = \omega(t) - \omega_S \qquad (۹)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega_S}{2HP_b}(P_m - P_e) \qquad (۱۰)$$

$$P_e = \frac{3V^2}{X}Sin(\delta) + \frac{3V}{2}\left(\mathrm{Re}(I_{STATCOM})Cos(\delta) - \mathrm{Im}(I_{STATCOM})Sin(\delta)\right) \qquad (۱۱)$$

که پس از ساده‌سازي به صورت زیر در مي‌آید:

$$\dot{V} = -\frac{3V}{2}(\omega-\omega_S)\left(I_d Cos(\delta) + I_q Sin(\delta)\right) \qquad (۱۲)$$

سیستم کنترل جبران‌کننده باید سیستم را به‌نحوي کنترل نماید که مشتق تابع لیاپانوف در هر لحظه منفي باشد تا تابع انرژي کل

سيستم يك نزول دائمي داشته باشد. اين كنترل، به‌اين صورت قابل پياده‌سازي است كه در هر لحظه علامت $I_{STATCOM}$ باعلامت $(\omega-\omega_S)(I_d Cos(\delta)+I_q Sin(\delta))$ يكسان باشد و به اين ترتيب كنترل بهينه سيگنال كنترلي به دست مي‌آيد [۹و۱۲].

در اينجا به اثبات بهينه بودن آن با استفاده از روش هميلتونين پرداخته مي شود. تابع هميلتونين سيستم ارائه شده با معادلات (۷) و (۸) و تابع انرژي (۵) به صورت زير تعريف مي‌گردد:

$$H_a=\frac{\omega_s}{2H}\left[P_m-\frac{3V^2}{X}Sin(\delta)\right]\psi_1 -\frac{\omega_s}{2H}.\frac{3V}{2}\left[I_d Cos(\delta)+I_q Sin(\delta)\right]\psi_1+(\omega-\omega_s)\psi_2 \quad (۱۳)$$

كه $\psi_1$ و $\psi_2$ ضرايب لاگرانژ مي‌باشند كه در روابط زير صدق مي‌كنند:

$$\dot{\psi}_1=-\frac{\partial H_a}{\partial\omega}=\psi_2 \quad (۱۴)$$

$$\dot{\psi}_2=-\frac{\partial H_a}{\partial\delta}=\frac{\omega_s}{2H}\begin{bmatrix}\frac{-3V^2}{X}Cos(\delta)\\ -\frac{3V}{2}\left(-I_d Sin(\delta)+I_q Cos(\delta)\right)\end{bmatrix}\psi_1 \quad (۱۵)$$

براي روش هميلتونين بايد شرائط مرزي زير محقق گردد:
($\delta=\delta_s$ و $\omega=\omega_s$ و $I_{STATCOM}=0$).

$$\psi_1(\omega=0)=\frac{-\partial V}{\partial\omega}\Big|_{for\ \omega=0}$$

$$\psi_2(\delta=\delta_s\ ,\ I_{STATCOM}=0)=\frac{-\partial V}{\partial\delta}\Big|_{for\ \delta=0} \quad (۱۶)$$

بنابراين با استفاده از معادلات (۵) و (۶) و با در نظر گرفتن شرائط مرزي خواهيم داشت:

$$\psi_1(\omega=0)=0$$
$$\psi_2(\delta=\delta_s\ ,\ I_{STATCOM}=0)=0 \quad (۱۷)$$

با توجه دقيقتر به فرمول (۱۴) و (۱۵) مي‌توانيم مقادير $\psi_1$ و $\psi_2$ را به صورت زير بيان كنيم:

$$\psi_1(t)=\frac{2H}{\omega_s}(\omega-\omega_s) \quad (۱۸)$$

$$\psi_2(t)=P_m-\frac{3V^2}{X}Sin(\delta)-\frac{3V}{2}\left[I_d\ Cos(\delta)+I_q\ Sin(\delta)\right] \quad (۱۹)$$

مي‌توان به‌راحتي ديد كه $\psi_1$ و $\psi_2$ در شرائط مرزي (۱۵) صدق مي‌كنند و بنابراين كنترل بهينه $I_{STATCOM}$ از ماكزيمم كردن تابع هميلتونين (معادله ۱۱) تعيين مي‌گردد.

$I_{STATCOM}$ (توابع $I_d$ و $I_q$ ) در قسمت دوم معادله (۱۱) وجود دارد و بنابراين تابع $H_a$ وقتي ماكزيمم است كه تابع:

$$\phi(\delta,\omega)=-\frac{\omega_s}{2H}.\frac{3V}{2}\left[I_d\ Cos(\delta)+I_q\ Sin(\delta)\right]\psi_1 =-\frac{3V}{2}\left[I_d\ Cos(\delta)+I_q\ Sin(\delta)\right](\omega-\omega_s) \quad (۲۰)$$

منفي و ماكزيمم باشد كه اين نتيجه درست مشابه نتيجه پاياني كنترا كننده مشتق شده از تابع لياپانوف مي‌باشد.

براي پيدا كردن كنترلكننده بر روي STATCOM مي توان شرائط زير را در نظر گرفت:

### ۴-۱- STATCOM تنها قادر به توليد توان راكتيو است

كنترلكننده STATCOM به صورت زير مي‌باشد:

$$I_{STATCOM}=K(\omega-\omega_S)Sin\delta \quad (۲۱)$$

با در نظر گرفتن حدود ماكزيمم و مينيمم مجاز براي $I_{STATCOM}$ كه از ظرفيت آن به دست مى‌آيد، مي‌توان استراتژي كنترلي را به صورت زير نوشت:

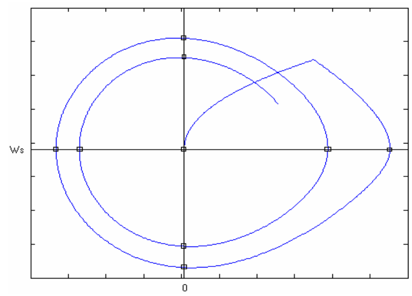
$$I_{STATCOM}=\begin{cases}I_{MAX} & ,I_{MAX}\le I_{STATCOM}\\ K(\omega-\omega_S)Sin(\delta), & I_{MIN}\le I_{STATCOM}\le I_{MAX}\\ I_{MIN} & ,I_{MIN}\ge I_{STATCOM}\end{cases} \quad (۲۲)$$

سيستم تعيين جريان $I_{STATCOM}$ كه به صورت رابطه (۲۲) بيان مي‌گردد تضمين مي‌كند كه شيب تابع انرژي منفي شده و سيستم سريعتر از حالت بدون جبران به حالت تعادل برسد.

مي‌توان به جاي سيستم کنترلي پيوسته سيستم کنترل ديگري نيز در نظر گرفت که نه تنها منفي بودن مشتق تابع انرژي را تضمين مي‌کند بلکه اين مشتق را در هر لحظه در کمترين حد ممکن نگه مي‌دارد. به اين ترتيب سيستم با سرعت بيشتري به نقطه کار پايدار خود خواهد رسيد. چنين کنترلي طي معادله ۲۳ در زير معرفي شده است:

$$I_{STATCOM}=\begin{Bmatrix} I_{MAX} & , & I_{STATCOM}\geq 0 \\ I_{MIN} & , & I_{STATCOM}<0 \end{Bmatrix} \qquad (۲۳)$$

با کاربرد اين کنترل کننده مسير فضاي حالت سيستم جهت رسيدن به نقطه نهايي يا نقطه $(\omega_S , \delta_S)$ مسافت کوتاهتري را طي خواهد نمود. البته سيستم هميشه نمي‌تواند به نقطه تعادل پايدار برسد. در صورتيکه تابع انرژي لياپانوف از مرز پايداري فراتر رود سيستم از حالت تعادل خارج شده، ناپايدار مي‌شود.




**شکل ۵- مسير نمونه فضاي حالت**

سيستم کنترلي که با معادله ۲۳ بيان مي‌گردد اصطلاحاً کنترل گسسته ناميده مي‌شود. در اين شيوه کنترل، سيستم بين دو حالت حدي تغيير وضعيت مي‌دهد. اين دو حالت حدي عبارتند از:

- حالت خازني ماکزيمم.
- حالت سلفي ماکزيمم.

**۴-۲- STATCOM تنها قادر به توليد توان اکتيو است**

در اين حالت کنترلکننده STATCOM به صورت زيرمي‌باشد:

$$I_{STATCOM}=K(\omega-\omega_S)Cos\delta \qquad (۲۴)$$

بـا در نظـر گـرفتن حـدود مـاکزيمم و مينـيمم مجـاز بـراي STATCOM و حداکثر ظرفيت باتري، مي توان استراتژي کنترلي را به صورت زير نوشت:

$$I_{STATCOM}=\begin{Bmatrix} I_{MAX} & , I_{MAX}\leq I_{STATCOM} \\ K(\omega-\omega_S)Cos(\delta) & , I_{MIN}\leq I_{STATCOM}\leq I_{MAX} \\ I_{MIN} & , I_{MIN}\geq I_{STATCOM} \end{Bmatrix}$$

(۲۵)

و

$$I_{STATCOM}=\begin{Bmatrix} I_{MAX} & , & I_{STATCOM}\geq 0 \\ I_{MIN} & , & I_{STATCOM}<0 \end{Bmatrix} \qquad (۲۶)$$

**۴-۳- STATCOM قادر به توليد و جذب همزمان توان اکتيو و راکتيو است**

در ايـن حالت سيـستم کنترلي STATCOM براساس معادله (۱۲) به شيوه زير تعيين مي‌گردد:

$$(\omega-\omega_S)\left(I_d\,Cos(\delta)+I_q\,Sin(\delta)\right)\geq 0 \qquad (۲۷)$$

$$\begin{cases} \omega\geq\omega_S & \Rightarrow I_d/I_q\geq -\tan(\delta) \\ \omega<\omega_S & \Rightarrow I_d/I_q< -\tan(\delta) \end{cases} \qquad (۲۸)$$

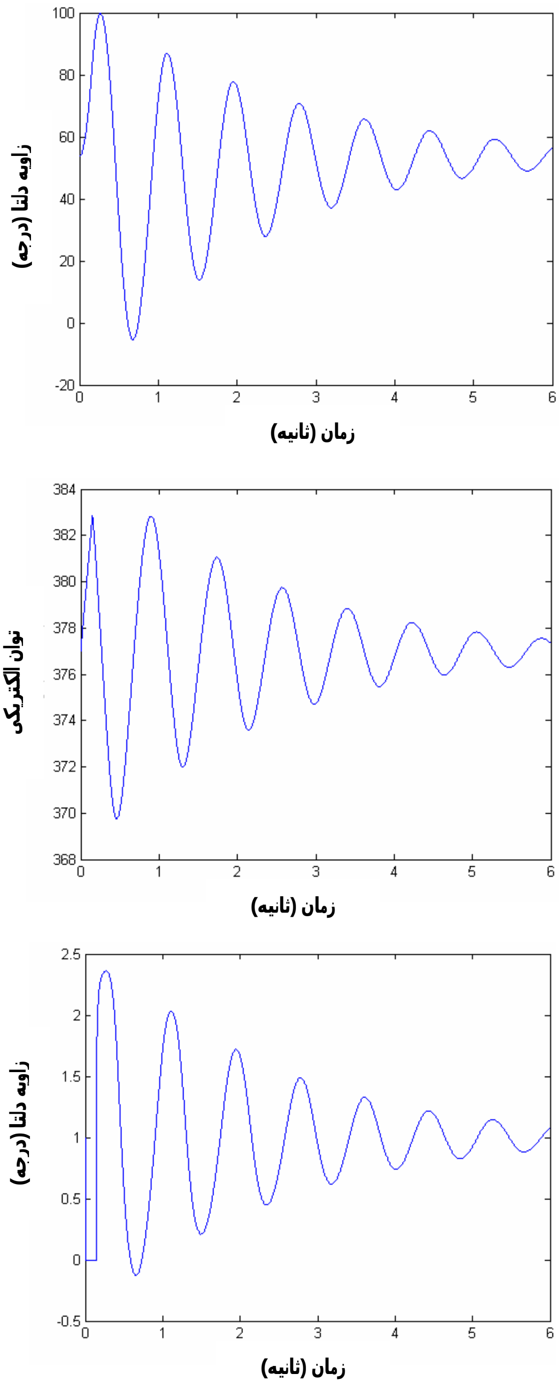
با توجه به ظرفيت STATCOM در توليد توان اکتيـو و راکتيـو و همچنين بـا در نظـر گـرفتن معادلـه (۲۸) مـي‌تـوان از حـداکثر ظرفيت STATCOM جهت بهبود پايداري گذرا استفاده نمود.

**۵- نتايج شبيه‌سازي سيستم تك‌ماشينه**

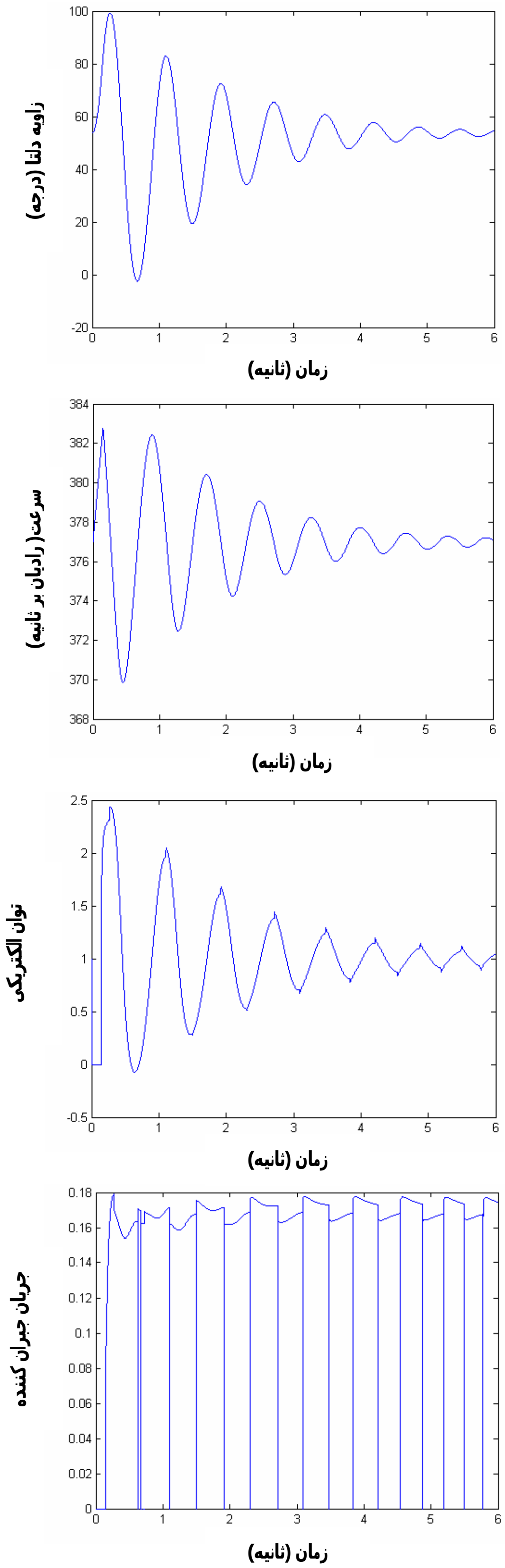
يـك خطاي سـه‌فاز در بـاس ژنـراتور بـا مدت زمان مشخص (۱۵۰ ميلي ثانيه) به سيستم اعمال گرديد و عملکرد سيستم و چگونگي تغيير زاويه روتور، سرعت و توان الکتريکي ماشين و عملکرد STATCOM مورد بررسي قرار گرفت. اين نتايج معيارهاي خوبي براي مشاهده اثر مثبت اين کنترل کننده در بهبود پايداري گذراي شبکه مي‌باشند.

نتايج اين شبيه‌سازي براي حالتهاي بدون جبران کننده و با حضور جبران کننده در شرايط عملکرد STATCOM در مدهاي کنتـرل تـوان راکتيـو، توان اکتيـو و کـامل بـه ترتيب در اشکال (۶و ۷) و (۸ و۹) نشان داده شده است.

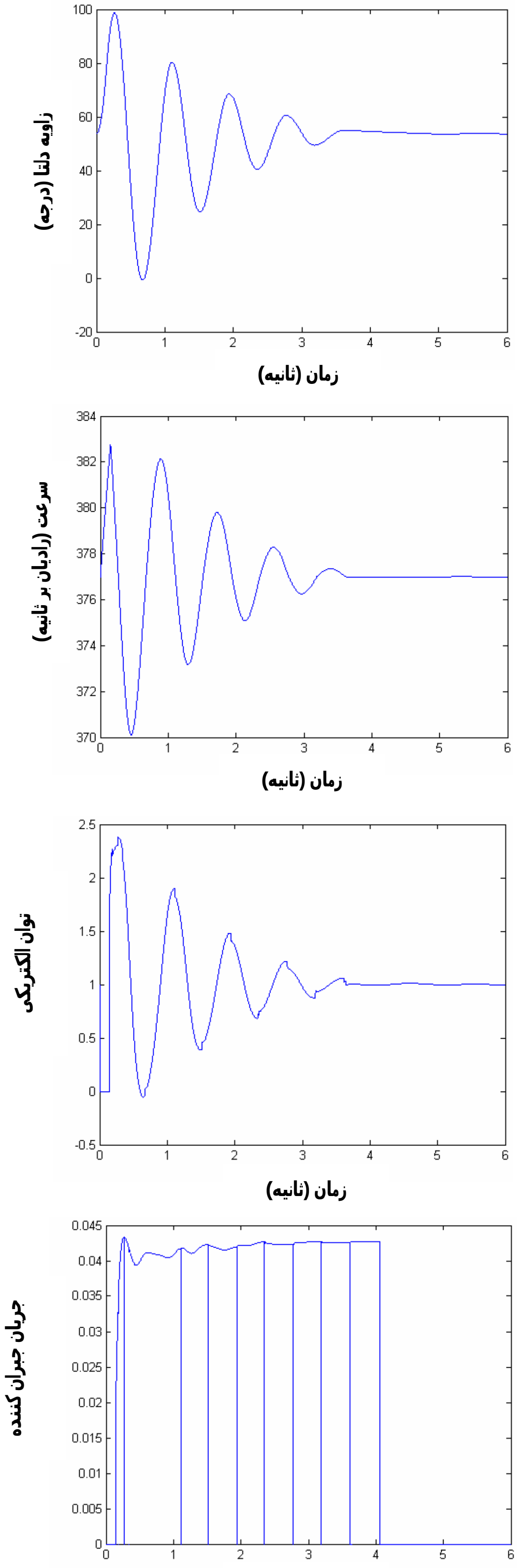
جهت بررسی اثر جبران کننده در بهبود پایداری و مقایسه مدهای مختلف کنترلی افزایش زمان بحرانی رفع خطای سیستم به عنوان معیاری برای افزایش پایداری گذرا در نظر گرفتهایم. این زمان برای سیستم مورد مطالعه بدون جبران کننده ۲۳۷ میلیثانیه است.



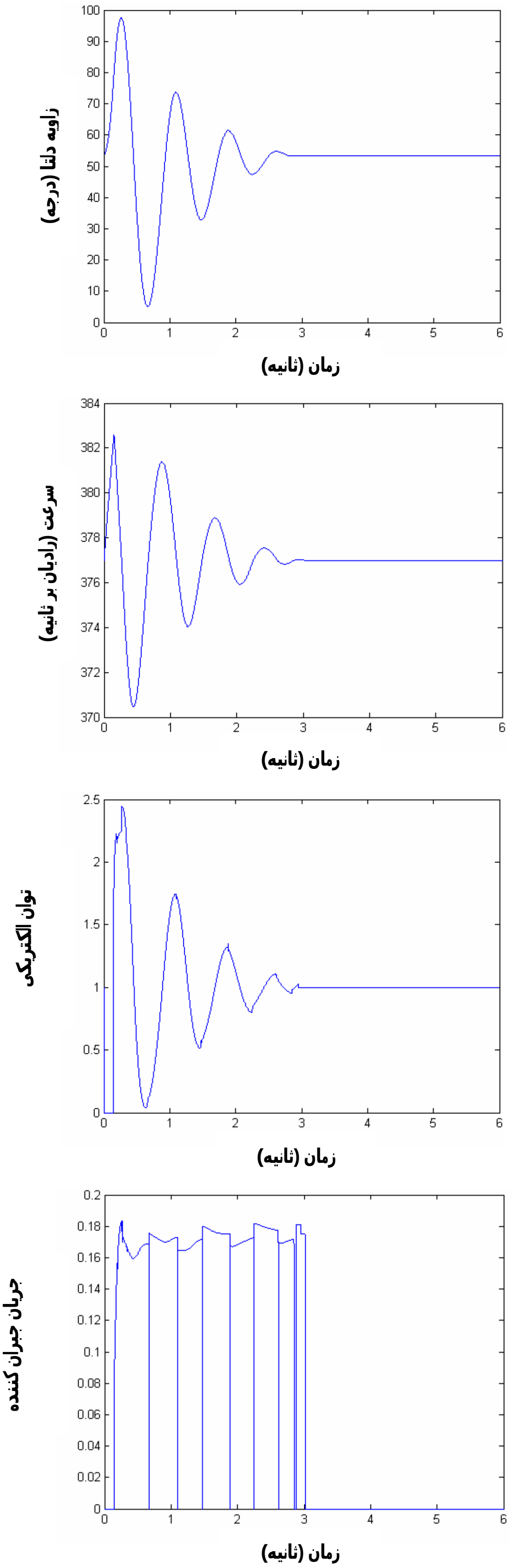

**شکل ۶- سیستم در حالت بدون جبران**




**شکل ۷- سیستم در جبران‌سازي توان راکتیو در رژیم کنترلي *گسسته***



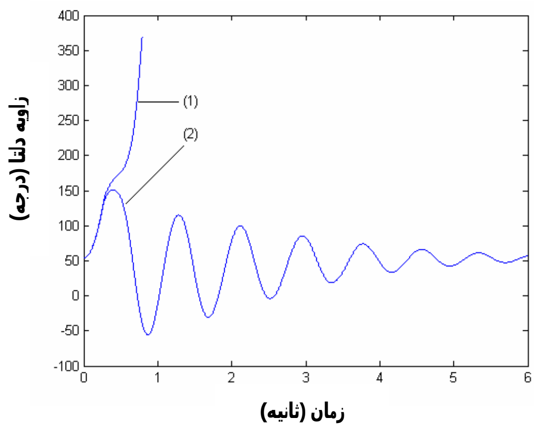

**شکل ۸- سیستم ... ن اکتیو در رژیم کنترلي گسسته**




**شکل ۹- سیستم در جبران‌سازي توأم در رژیم کنترلي گسسته**

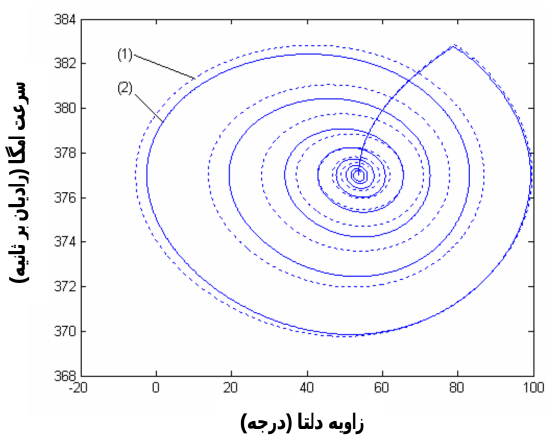
همانطور كه مشاهده مي‌گردد در حالت بدون جبران سيستم پس از ۱۵ ثانيه پايدار شده و حداكثر تا زاويه ۹۹/۶۹ درجه نوسان خواهد كرد و زمان بحراني رفع خطا ۲۳۷ ميلي ثانيه مي باشد. اين سيستم با جبران توان راكتيو تا زاويه ۹۹/۲۸ درجه نوسان خواهد داشت و در ثانيه ۶ به پايداري مي‌رسد و زمان بحراني رفع خطا ۲۵۱ ميلي ثانيه مي باشد و نيز در جبران توان اكتيو تا زاويه ۹۸/۷۴ درجه نوسان داشته و در ثانيه ۴/۵ پايدار خواهد شد و زمان بحراني رفع خطا در اين حالت ۲۶۰ميلي ثانيه مي‌باشد. به همين صورت ملاحظه ميشود كه در جبران‌سازي توأم وضعيت بسيار بهتر شده و در ثانيه ۳ به پايداري رسيده و حداكثر تا زاويه ۹۷/۴۵ درجه نوسان خواهد داشت و زمان بحراني رفع خطا ۲۶۴ ميلي ثانيه مي‌شود.

همچنين جهت نشان دادن اثر جبران كننده در بهبود پایداری گذرا یک خطای سه فاز در باس ژنراتور به مدت ۲۴۰ میلی‌ثانیه اعمال گردید ، تغییر زاویه روتور همراه با مسیر فضای حالت در شکل (۱۰ و ۱۱) نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود كه كنترلكننده بر روی نوسان اول اثر مثبت دارد. سيستم بدون كنترلكننده ناپايدار است اما با كنترلكننده ر گسسته زاويه تا ۱۵۱/۵ درجه افزايش می‌يابد بدون اينكه ناپايدار شود. زمان بحراني رفع خطا در اين حالت ۲۵۱ ميلی ثانيه است.




**شكل۱۰-منحني تغييرات δ براي زمان خطاي ۲۴۰ ميلي ثانيه در حالات: ۱- بدون كنترل ۲- با كنترل گسسته**

حال به بررسي چگونگي تأثير STATCOM بر سيستم چندماشينه مي‌پردازيم.

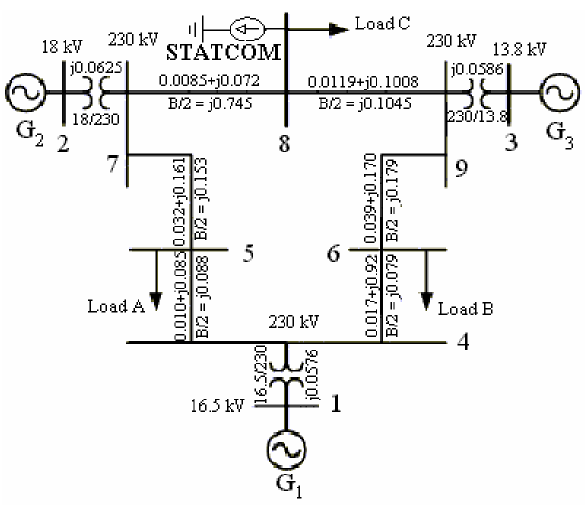



**شكل۱۱- مسير فضاي حالت**

**۱- سيستم بدون جبران‌كننده ۲- سيستم با كنترلر گسسته**

## ۶-سيستم چند ماشينه مورد مطالعه

جهت بررسي نقش جبران كننده در سيستم چند ماشينه سيستم ۳ ماشينه IEEE را مطابق شكل (۱۲) در نظر مي‌گيريم [۱۴] و واحد STATCOM را در باس مياني ۸ قرار می‌دهيم.




**شكل ۱۲- سيستم ۳ ماشينه IEEE**

پارامترهاي سيستم تحت مطالعه و پخش بار اوليه آن در ضميمه آمده است.

لازم به ذكر است تمام مواردي كه در مورد سيستم تك‌ماشينه در خصوص مدل ماشين و معادله نوسان و غيره بيان شده است در اين بخش نيز برقرار مي‌باشد و از نتايج ذكر شده در اين قسمت استفاده خواهد شد.

STATCOM همچنان قادر است با توجه به ظرفيت خود هر جريان سينوسي دلخواه را توليد نمايد.

## ۷-طراحي سيستم كنترل

### ۷-۱- طراحي مدار كنترل‌كننده با استفاده از خصوصيات باس جبران‌كننده

در اين بخش كنترل بهينه با استفاده از روش مستقيم لياپانوف كه در بخش ۴ به طور مفصل بحث گرديده است، بيان مي‌گردد. استراتژي كنترل بيان شده به يك سيگنال كنترل براساس متغيرهاي حالت در باس جبران‌كننده نياز دارد، در صورتيكه جبران كننده در باس مياني نصب شده باشد اين متغيرها در دسترس نميباشند در اين شرايط همانطوريكه در مرجع [۹] براي SVC نشان داده شده است اين سيگنال مي‌تواند از كميت الكتريكي قابل اندازه‌گيري در محل به دست آيد كه نحوه ارتباط آنها در زير نشان داده شده است:

### ۷-۲- تعيين شرائط مقدار الكتريكي

اگر كميت الكتريكي قابل اندازهگيري در باس جبران كننده q در نظر گرفته شود و سيگنال به صورت زير بيان گردد:

$$signal = K_R \frac{d\,q}{d\,t} \qquad (۲۹)$$

مشتق زماني هر مقدار $q$ مي‌تواند به شكل زير بيان شود.

$$\frac{d\,q}{d\,t} = \frac{\partial\,q}{\partial\,\delta}\cdot\frac{d\,\delta}{d\,t} + \frac{\partial\,q}{\partial\,I_{STATCOM}}\cdot\frac{d\,I_{STATCOM}}{d\,t} = \frac{\partial\,q}{\partial\,\delta}\cdot\omega + \frac{\partial\,q}{\partial\,I_{STATCOM}}\cdot\frac{d\,I_{STATCOM}}{d\,t} \qquad (۳۰)$$

اگر كميت انتخابي طوري باشد كه شرط زير برآورده شود،

$$\left|\frac{\partial\,q}{\partial\,\delta}\right| >> \left|\frac{\partial\,q}{\partial\,I_{STATCOM}}\right| \qquad (۳۱)$$

در اينصورت چون جزء اول در معادله (۳۰) بر جزء دوم غالب ميگـردد رفتـار ديناميـكي سيگنـال (۲۹) بيشتر به سرعت روتور ($\omega$) بستگي خواهد داشت، يعني:

$$\frac{d\,q}{d\,t} \cong \frac{\partial\,q}{\partial\,\delta}\cdot\frac{d\,\delta}{d\,t} = \frac{\partial\,q}{\partial\,\delta}\cdot\omega \qquad (۳۲)$$

اگر شرط (۳۱) برقرار باشد سيگنال (۲۹) براساس معادله (۳۲) مي‌تواند به صورت زير بيان گردد:

$$signal = K_R\omega \;\; \partial\,q/\partial\,\delta \qquad (۳۳)$$

كه اين عبارت تابعي از زاويه توان و پارامترهاي سيستم مي‌باشد. بعد از تركيب معادله (۳۳) با معادله (۲۱) ملاحظه مي‌شود اگر در معادله (۲۹) مقدار $q$ انتخاب شده شرط زير را برآورده سازد هم‌ارز سيگنال كنترل بهينه معادله (۲۱)، كه از تابع لياپانوف استنتاج شده‌است، مي‌باشد:

$$\frac{\partial\,q}{\partial\,\delta} = C_q \;Sin(\delta) \qquad (۳۴)$$

كه $C_q$ می تواند هر مقدار ثابت غیر صفر باشد.

### ۷-۳- انتخاب پارامتر الكتريكي

در اينجا براي شبكه نمونه دو ماشينه شكل (۱۳) ميتوان از مجذور جريان ورودي به باس جبران كننده استفاده كرد، يعني:

$$q_I(t) = +\left|I_A\right|^2 + \left|I_B\right|^2 \qquad (۳۵)$$

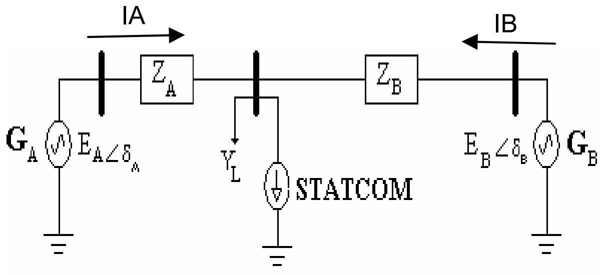
براي سهولت اثبات اگر سيگنال كنترل به صورت زير در نظر گرفته شود، داريم:

$$signal_I = K_R \frac{d}{d\,t}\left[+\left|I_A\right|^2\right] \qquad (۳۶)$$

براي شبكه نمونه پارامتر مذكور به صورت زير نوشته مي‌شود.

$$q_I(t) = +|I_A|^2 = I_A I_A^* = B_{AA}^2 |E_A|^2 + B_{AB}^2 |E_B|^2 + 2B_{AA}B_{AB}|E_A||E_B|Cos(\delta) \quad (۳۷)$$

که $B_{AA}$ و $B_{BB}$ سوسپتانس معادل به دست آمده از تبدیل ستاره - مثلث شکل (۱۳) مي‌باشد.




**شکل۱۳- شبکه نمونه دوماشینه**

و مشتق جزیي آن مي‌شود:

$$\frac{\partial q_I}{\partial \delta} = +\frac{\partial |I_A|^2}{\partial \delta} = -2B_{AA}B_{AB}|E_A||E_B|Sin(\delta) \quad (۳۸)$$

ملاحظه میشود که با این انتخاب، سیگنال کنترلي که به دست میآید متناسب با سیگنال کنترل بهینه $Sin\,\delta$ است. جهت اطلاعات دقیقتر میتوان به مراجع [۹و۱۳] مراجعه کرد.

بدین‌ترتیب سیگنال کنترل به صورت زیر مي‌باشد:

$$signal = K_R \frac{d}{dt}\left[|I_A|^2 + |I_B|^2\right] \quad (۳۹)$$

با توجه به معادله (۳۹) مشخص مي‌گردد که نقاط سوئیچینگ با تغییر علامت $K_R \frac{d}{dt}\left[|I_A|^2 + |I_B|^2\right]$ اتفاق مي‌افتد و با درنظر گرفتن کنترلکننده گسسته خواهیم داشت:

$$I_{STATCOM} = \begin{cases} I_{MAX} \;, & K_R \frac{d}{dt}\left[|I_A|^2 + |I_B|^2\right] \geq 0 \\ I_{MIN} \;, & K_R \frac{d}{dt}\left[|I_A|^2 + |I_B|^2\right] < 0 \end{cases} \quad (۴۰)$$

## ۸-نتایج شبیه‌سازي سیستم چند ماشینه

براي مطالعه پایداري گذرای سیستم شکل (۱۲) فرض مي‌شود که در خط واقع بین باسهاي ۵ و ۷ و نزدیك به باس ۷ اتصال کوتاهي رخ مي‌دهد و پس از ۸۳ میلی ثانیه کلیدهاي دو سر خط مذکور، خط را از مدار خارج مي‌کنند.

معیار پایداري در سیستم چند ماشینه واگرا نبودن زاویه ژنراتورها نسبت به یکدیگر مي‌باشد، هرچند که ممکن است زوایـاي ژنراتـورها نسبت به حالت اولیه متغیر باشند. با توجـه به این معیار به بررسي پایداري گذراي سیستم چند ماشینه شکل (۱۲) مي‌پردازیم.

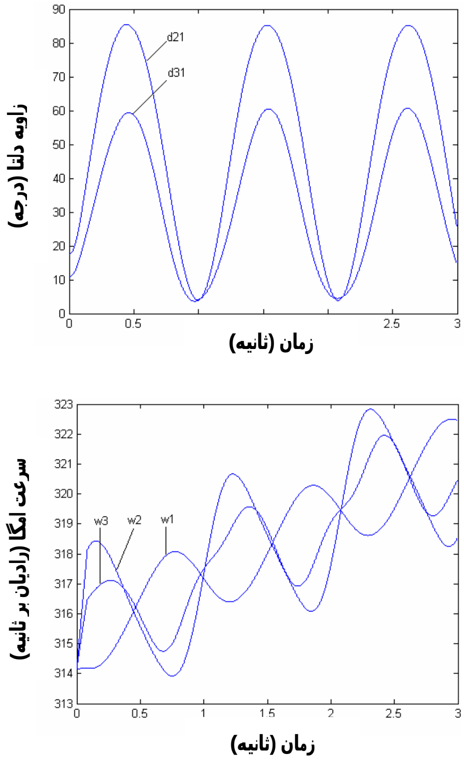
نتایج شبیه‌سازي به صورت زیر خواهد بود:

پاسخ سیستم در حالت بدون STATCOM در شکل (۱۴) نشان داده شده است. از آنجائیکه سیستم قدرت فاقدهر نوع جبران کننده دیگري است و در ژنراتورها نیز هیچ دمپري تعبیه نگردیده است، سیستم داراي نوسانات دائمي خواهد بود. اشکال (۱۶،۱۵و ۱۷) نشان میدهند که به کمک جبران کننده میتوان ضمن میرا کردن نوسانات، زمان بحراني رفع خطا را افزایش و مقدار نوسان اول را کاهش داد و در نتیجه پایداري سیستم را بهبود بخشید. در خصوص افزایش زمان بحرانی میتوان گفت زمان بحراني رفع خطا براي این سیستم در حالت بدون جبران ۱۶۱ میلی ثانیه مي‌باشد. در حالت جبران توان راکتیو زمان بحراني به ۱۷۲ میلی ثانیه افزایش مي‌یابد و چنانچه مشاهده مي‌شود سیستم به سمت پایداري پیش مي‌رود.

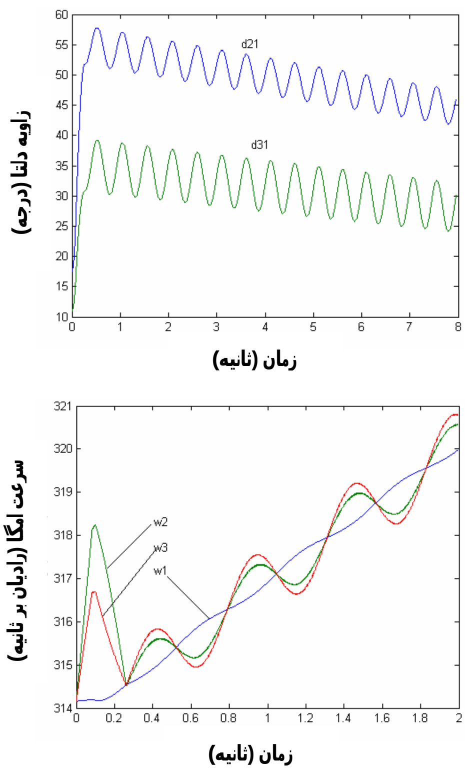
در حالت جبران توان اکتیو زمان بحراني رفع خطا به ۱۸۱ میلی‌ثانیه افزایش مي‌یابد و در این حالت نیز چنانچه مشاهده مي‌شود سیستم با سرعت بیشتري به سمت پایداري پیش مي‌رود.

زمان بحراني رفع خطا در جبران توأم توان اکتیو و راکتیو ۱۸۹ میلی ثانیه مي‌شود.

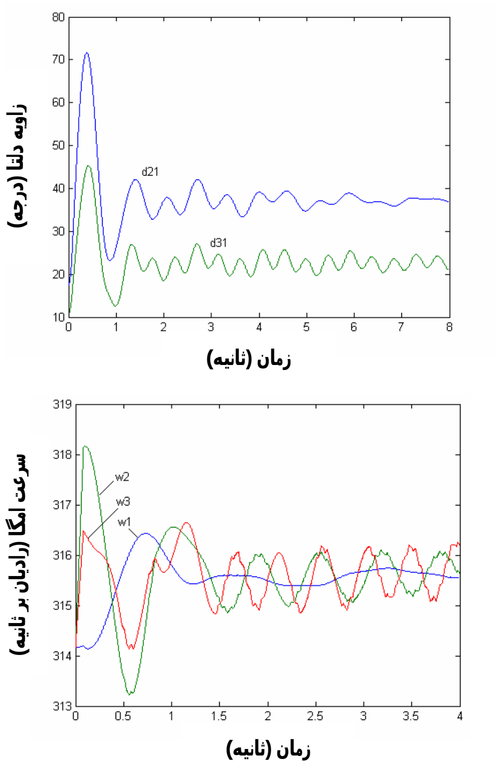
با توجه به مطالب فوق و پاسخهاي سیستم ملاحظه مي‌گردد وقتي STATCOM در مد کنترل توام توان اکتیو و راکتیو کار مي کند بهترین و بیشترین تأثیر را بر سیستم مي‌گذارد.



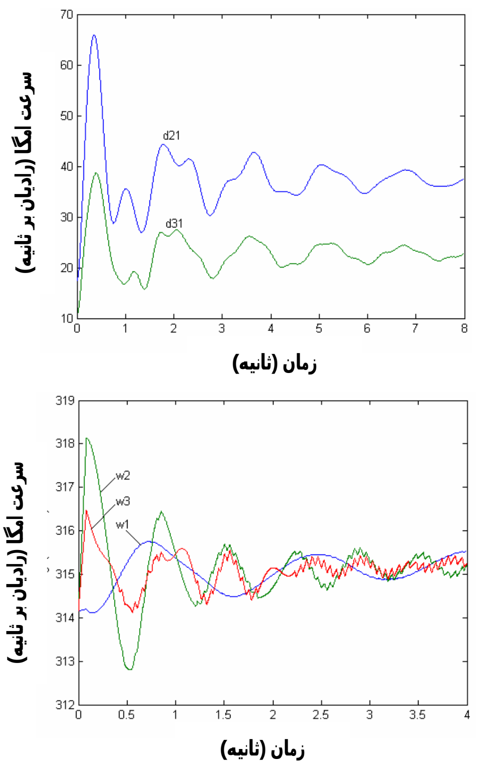

**شکل ۱۴- تغییرات زاویه روتور ژنراتورها و سرعت زاویه‌اي آنها نسبت به یکدیگر در حالت بدون جبران**




**شکل ۱۵- تغییرات زاویه روتور ژنراتورها و سرعت زاویه‌اي آنها نسبت به یکدیگر در جبران توان راکتیو**




**شکل ۱۶- تغییرات زاویه روتور ژنراتورها و سرعت زاویه‌اي آنها نسبت به یکدیگر در حالت جبران توان اکتیو**




**شکل ۱۷- تغییرات زاویه روتور ژنراتورها و سرعت زاویه‌اي آنها نسبت به یکدیگر در جبران توأم**

## ۹- نتیجه‌گیري

در اين مقاله به تـأثير STATCOM تحـت اسـتراتژي كنتـرل بهينه و بـا سـيگنال كنترلـي گسـسته و در مـدهاي عمـلكـردي مختلف در بهبود پايداري گذرا پرداخته شد. اين مطالعه بـر روي سيستم تك ماشينه و چند ماشينه به كمـك شـبيه‌سازي انجـام گرفت و نتايج نشان داد كه جبران كننده در مد تركيبي (كنتـرل همزمان توان اكتيو و راكتيو) قادر است به بهترين وجـه پايـداري سيستم را بهبود دهد. اين بهبود به صورت كاهش دامنـه نوسـان اول، افزايش زمان بحراني رفع خطا و ميرا شدن سريع تر نوسانات قابـل ملاحظـه اسـت. همچنـين نـشان داده شـد وقتـي كهSTATCOM در بـاس ميـاني نـصب اسـت مـيتـوان سـيگنال كنترلي را كه شامل متغيرهاي حالـت سيـستم اسـت و در بـاس مياني موجود نمي‌باشد، از متغيرهاي الكتريكي باس جبران كننده كه همارز متغيرهاي حالت است، به دست آورد.

## مراجع

[1] Bose A., "Application of direct methods transient stability analysis of power systems," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-105, no. 7, pp .1629-1636, July ,1984 .

[2] Y. Wang, L. Xie, D.J. Hill, and R.H. Middleton, "Robust nonlinear controller design for transient stability enhancement of power system," Proceedings of the 31 st IEEE Conference on Decision and Control, Tucson, Arizon, 1992, pp . 1117-1122.

[3] E.V. Larsen and J.H. Chow, "SVC control design for system dynamic perfomance," proceedings of Special Symposium, 1987, pp.36-52.

[4] L. Gyugyi, "Power electronics in electric utilities:static var compensators," Proceedings of IEEE, vol. 76, no. 4, pp. 483-494, April1988.

[5] P. Cholley, J. Lacoste and M. Tritignon, "Dynamic shunt compensation performance for transient stability enhancement," Stockholm Power Tech. Proceedings on Power Electronics, June 1995, pp. 77-82.

[6] Y.Ni & L. Snider, "STATCOM Power Frequency Model with VSC Charging Dynamics and its Application in the Power System Stability Analysis," APSCOM-97, Hong Kong, Nov. 1997.

[7] C.A. Canizares, E. Uzunovic, J. Reeve and B.K. Johnson, "Transient Stability Models of Shunt and Series Static Synchronous Compensators," IEEE Trans. Power Drivery December 1998.

[8] E. Uzunovic, C.A. Canizares, and J. Reeve, "Transient Stability Models of Unified Power Flow Coutrollers and Control Comparisons," IEEE Trans. Power Delivery November 1999.

[9] J. Machowski and D. Nelles, "Power system transient stability enhancement by optimal control of static VAR compensators," Electrical Power and Energy Systems, vol. 14, no. 6, pp. 411-421, December1992.

[10] W. Freitas and A. Morelato, "A Generalised Curren Injection Approach for Modeling of FACTS in Power System Dynamic Simulation," AC-DC Power Transmission, 28-30 November 2001,Conference Publication No.458 IEE 2001.

[11] M.A. Pai, "Energy Function Analysis for Power System Stability," Kluwer Academic Publisher, 1989.

[12] D E Kirk, Optimal Control. An introduction Prentice Hall, 1970.

[13] Ilar F "Innovations in the detection of power swings in electrical networks," Brown Boveri No. 68, pp87-93. 1981,

[14] P. M. Anderson and A.A. Fouad, "Power system control and stability," Iowa State Univ., Ames, Iowa, 1977.

[15] IEEE Committee, "First benchmark model for computer simulation of subsynchronous resonance," IEEE Trans. Vol. PAS-96, 1977.

[16] D. Povh et al. "Load flow control in high voltage power system using FACTS controllers," CIGRE, Jan. 1996.

[17] E. Larsen et al. "Benefits of GTO based compensation systems for electric utility applications," IEEE Trans. on Power Delivery, 7, (4), pp. 2056-2063, 1992.

**ضمیمه**

**جدول ۱- پارامترهای ماشین، خط انتقال و سیستم تحریک [10]**
**و جبران کننده سنکرون استاتیکی**
**مقدار مبنا = 100 MVA**

| پارامتر | نماد | اندازه |
|---|---|---|
| ولتاژ باس بینهایت | V | ۱ |
| راکتانس گذراي محور d | $X'_d$ | ۰/۲۴۵ |
| مقاومت استاتور | $R_a$ | ۰/۰۰۱۰۹۶ |
| راکتانس سنکرون محور d | $X_d$ | ۱/۷ |
| راکتانس سنکرون محور q | $X_q$ | ۱/۶۴ |
| ثابت زماني گذراي مدار باز محور d | $T'_{dO}$ | ۵/۹ |
| ثابت زماني گذرای مدار باز محور q | $T'_{qO}$ | ۰/۰۷۵ |
| مقاومت خط | $R_e$ | ۰/۰۲ |
| اندوکتانس خط | Le | ۰/۴ |
| ثابت اينرسي | H | ۲/۳۷ |
| سرعت زاويه‌اي سنکرون | $\omega_S$ | ۱۲۰π |
| توان مکانيکي ماشين | $P_m$ | ۱ |
| ضريب ميرايي | D | ۰/۰۰۵ |
| بهرهٔ رگولاتور | $K_{AE}$ | ۴۰۰ |
| ثابت زمانی رگولاتور | $T_{AE}$ | ۰/۰ ۵ |
| بهرهٔ ترانسفورمر پایدارساز | $K_F$ | ۰/۰ ۲۵ |
| ثابت زمانی ترانسفورمر پایدارساز | $T_F$ | ۱ |
| ظرفیت راکتیو STATCOM | $Q_{STATCOM}$ | ۰/۲ |
| ظرفیت اکتیو STATCOM | $P_{STATCOM}$ | ۰/۰۵ |

**جدول۲- اطلاعات سیستم چند ماشینه**

| ژنراتور | ۱ | ۲ | ۳ |
|---|---|---|---|
| مقدار نامی MVA | ۲۴۷/۵ | ۱۹۲ | ۱۲۸ |
| KV | ۱۶/۵ | ۱۸ | ۱۳/۸ |
| $X_d$ | ۰/۱۴۶۰ | ۰/۸۹۵۸ | ۱/۳۱۲۵ |
| $X'_d$ | ۰/۰۶۰۸ | ۰/۱۱۹۸ | ۰/۱۸۱۳ |
| $Xq$ | ۰/۰۹۶۹ | ۰/۸۶۴۵ | ۱/۲۵۷۸ |
| $X'q$ | ۰/۰۹۶۹ | ۰/۱۹۶۹ | ۰/۲۵ |
| $X_l$ | ۰/۰۳۳۶ | ۰/۰۵۲۱ | ۰/۰۷۴۲ |
| (پراکندگی) | ۸/۹۶ | ۶/۰۰ | ۵/۸۹ |
| $T'_{dO}$ | ۰ | ۰/۵۳۵ | ۶/۰۰ |
| $T'_{qO}$ | ۲۳۶۴ | ۶۴۰ | ۳۰۱ |
| انرژی ذخیره شده MW.s (در سرعت نامی) | | | |

**جدول۳- پخش بار سیستم چند ماشینه**

| شمارة باس | نوع | M | زاویه | $P_g$ | $Q_g$ | $P_I$ | $Q_I$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۱ | ۱/۰۴ | ۰ | ۰/۶۷۸۹۰۸ | -۰/۷۱۳۷۵۲ | ۰ | ۰ |
| ۲ | ۳ | ۱/۰۲۵ | ۹/۴۴۵۷۱۸ | ۱/۶۳ | -۰/۶۰۴۵۹۲ | ۰ | ۰ |
| ۳ | ۳ | ۱/۰۲۵ | ۴/۳۸۴۱۶۳ | ۰/۸۵ | -۰/۸۳۵۱۸۸ | ۰ | ۰ |
| ۴ | ۲ | ۱/۰۸۰۱۸۵ | -۱/۹۹۴۸۵۹ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ |
| ۵ | ۲ | ۱/۱۰۰۸۸۱ | -۳/۶۶۶۸۸۹ | ۰ | ۰ | ۱/۲۶۱ | -۰/۵۰۴۴ |
| ۶ | ۲ | ۱/۰۹۸۷۵۴ | -۳/۵۷۵۸۸۶ | ۰ | ۰ | ۰/۸۷۷۷ | -۰/۲۹۲۶ |
| ۷ | ۲ | ۱/۰۶۶۵۰۷ | ۴/۰۹۸۴۳۱ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ |
| ۸ | ۲ | ۱/۰۷۴۲۹۱ | ۱/۴۵۳۲۱۸ | ۰ | ۰ | ۰/۹۶۹ | -۰/۳۳۹۱ |
| ۹ | ۲ | ۱/۰۷۴۱۰۴ | ۱/۷۷۷۷۹۱ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ |