روشي مركب در كنترل ادوات FACTS جهت بهبود اولين نوسان حالت گذرا

سيد محمد عظيمي[۱] و سعيد افشارنيا[۲]*

[۱]دانش آموخته كارشناسي ارشد مهندسي برق - پرديس دانشكده‌هاي فني- دانشگاه تهران

[۲]استاديار دانشكده مهندسي برق و كامپيوتر- پرديس دانشكده هاي فني- دانشگاه تهران

(تاريخ دريافت ۸۵/۷/۲۶ ، تاريخ دريافت روايت اصلاح شده ۸۶/۷/۲۹ ، تاريخ تصويب ۸۶/۸/۶)

چكيده

در اين مقاله روشي مركب در كنترل ادوات FACTS جهت بهبود اولين نوسان پايداري گذرا پيشنهاد شده‌است. اين روش دو جزء كنترل پيوسته و ناپيوسته دارد. نخست با استفاده از ملاك پايداري لياپانوف يک سيگنال كنترلي جديد معرفي شده كه براساس آن مي‌توان مقدار لحظه‌اي جبران در مرحله كنترل پيوسته را تعيين نمود. در ادامه الگوي كنترلي مربوطه با هدف كاهش دامنه نوسانات حالت گذراي سرعت وتوان انتقالي، با كاهش سطح زير منحني‌هاي $P-\delta$ و حذف جهش‌هاي ناگهاني توان، با تغيير نحوه حركت بين اين منحني‌ها ارائه شده‌است. در نهايت دو عنصرSTATCOM وSVC از ادوات FACTS موازي و SSSC به عنوان عنصر FACTS سري انتخاب شده و براي سيستم تک ماشين به شين بينهايت كار شبيه سازي روش كنترلي مركب با حضور اين ادوات به صورت جداگانه صورت گرفته‌است. نتايج به دست آمده بيانگر بهبود عملكرد سيستم در مقايسه با روش‌هاي قبلي است.

واژه هاي كليدي: FACTS-كنترل پيوسته- لياپانوف-SVC-STATCOM-SSSC – حالت گذرا - اولين نوسان

مقدمه

امروزه به دليل وجود سوئيچ‌هاي الكترونيک قدرت با قابليت كنترل و سرعت بالا، تحول عظيمي در ادوات FACTS روي داده و حضور اين ادوات در سيستم‌هاي قدرت به عنوان عاملي در بهبود پايداري گذراي سيستم حين خطاهاي حالت گذرا به شمار مي‌رود[۱]. SVC و STATCOM از ادوات FACTS موازي و SSSC به عنوان عنصر FACTS سري از جمله ادواتی هستندكه كاربرد موثری در اين خصوص دارند[۵-۲]. روشهای مختلفی به منظور مطالعه ميرايی سيستم در حضور ادوات FACTS در مقالات مختلف آورده شده است [۹-۶].

از آنجايي كه پايداري گذرا از مسائل اساسي در يك سيستم بوده و پايداري در نوسان اول ملاكي براي پايدار بودن سيستم در نوسانات بعدي مي‌باشد، اكثراً جهت بررسي اين موضوع نوسان اول مورد توجه قرار مي‌گيرد. روش لياپانوف از جمله روشهايي است كه براي بررسي پايداري نوسان اول سيستم قدرت استفاده مي شود[۱۰]. روشهاي كنترلي بسياري نيز بعنوان كنترل ناپيوسته براي بهبود پايداري گذرا استفاده شده اند [۱۱].

يكي از روشهاي بهبود اولين نوسان در حالت گذرا، روش BBC(Bang Bang Control) است [۱۲]. اساس اين روش، كنترل سرعت در لحظه‌اي است كه توان در اولين نوسان به $\delta_{\max}$ و $\omega=0$ مي‌رسد و جبران‌كننده با حركت از وضعيت حداكثر جبران خازني (پيش‌فاز) به وضعيت حداكثر جبران سلفي (پس‌فاز) ، سطح زير منحني‌ها در نوسانات بازگشتي را كاهش و در نتيجه شدت ميرايي سيستم را افزايش مي‌دهد. البته اين مسأله در δهاي بزرگ‌تر (يعني نقاطي كه توان انتقالي در وضعيت سلفي از توان مكانيكي پشت ژنراتور كم‌تر است) سبب ناپايداري سيستم مي‌گردد. مرجع [۱۳] روشي براي حل اين مشكل ارائه نموده، كه خود منجر به بروز مسائلي نظير، جهش شديد توان، ايجاد تنش در محور ژنراتور و خروج واحد از شبكه مي‌شود. با پيشنهاد روشي جديد در اين تحقيق ،دامنه جهش ناگهاني توان در نقطه تغيير وضعيت از كنترل ناپيوسته به پيوسته را كاهش داده و با به كارگيري سيگنال جديد به‌دست‌آمده در مرحله كنترل پيوسته، دامنه نوسانات توان وسرعت را به شكل بسيار محسوسي در طول پريود حالت گذراكم نموده‌ايم. سيگنالهايي كه در حال حاضر در مرحله كنترل پيوسته ادوات FACTS به كار مي‌رود $k\omega, k\omega\sin(\delta)$ مي‌باشند[۱۴] ، كه ضريب k عددي ثابت و مثبت است. در ادامه با مدلسازي ادوات FACTS به صورت جرئي از ضريب ميرايي سيستم براي سه جبران‌كننده مورد مطالعه و انجام شبيه سازي‌ها، بهبود پاسخ حالت گذراي سيستم با الگوي كنترلي پيشنهادي تاييد و نتايج به دست آمده با تحقيقات قبلي

* نويسنده مسئول : تلفن : ۶۱۱۱۴۱۷۹ , فاكس : ۸۸۷۷۸۶۹۰ , Email:safshar@ut.ac.ir

مقايسه شده‌است. در مرحله اول شبيه‌سازيها روش کنترلي پيشنهادي و در بخش دوم سيگنال کنترلي پيشنهادي در فرايند کنترل پيوسته را با کارهاي قبلي مقايسه نموده‌ايم.

روش لياپانوف

روش دوم لياپانوف در بحث پايداري به تفصيل در مرجع [۱۴] بررسي شده‌است، دراين بخش اين روش براي سيستم غير خطي مرتبه دوم مورد مطالعه بررسي شده‌است. فرض کنيد معادله ديفرانسيل سيستم مورد مطالعه به صورت زير باشد:

$$\dot{X} = f(X,t), \rightarrow X = (x_1 = \delta, x_2 = \omega) \quad (۱)$$

که در آن X یک بردار حالت دو بعدي است.

تابع لياپانوف اين سيستم به صورت تابع اسکالر $V(X,t)$ تعريف شده‌است. در اين حالت شرط پايداري اين سيستم به روش دوم لياپانوف آن است که تابع V داراي مشتقات مرتبه اول پيوسته بوده و شرايط زير برآورده شود.

۱- $V(X,t)$ معين مثبت باشد ($V(X) > 0, V(0) = 0$).

۲- $\dot{V}(X,t)$ معين منفي باشد ($\dot{V}(X) < 0, \dot{V}(0) = 0$).

به منظور دست‌يابي به سيگنال‌هاي کنترلي در روش لياپانوف، ابتدا تابع $V(X,t)$ تعيين و سپس با اعمال شرايط فوق سيگنال‌هاي مطلوب جهت پايداري سيستم انتخاب مي‌شود. اگر δ, ω متغيرهاي حالت سيستم با شرايط اوليه $\delta = \delta_S, \omega = 0$ باشند، تابع لياپانوف براي سيستم تک ماشين به شين بينهايت به صورت زير تعريف مي‌شود.

$$V(\delta,\omega) = \left\{\frac{1}{2}M\omega^2\right\} + \{-P_m(\delta-\delta_S) - P_{max}(\cos\delta - \cos\delta_S)\} \quad (۲)$$

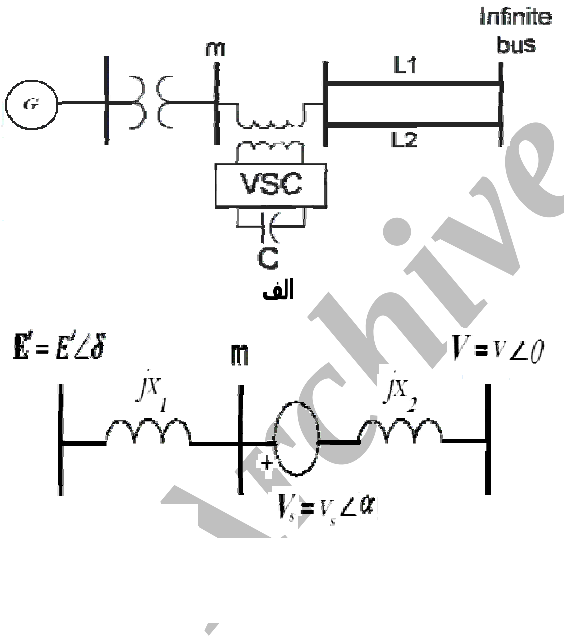
که در آن M ثابت اينرسي ، δ زاويه روتور ژنراتور، P_m توان مکانيکي پشت ژنراتور و ω تغييرات سرعت نسبت به قاب مرجع است. تابع $V(\delta,t)$ را به صورت مجموع دو تابع انرژي جنبشي و پتانسيل مطابق (رابطه۲) نوشته و به منظور بررسي شرط پايداري لياپانوف از تابع مذکور (رابطه۲) نسبت به متغير زمان مشتق‌گرفته و $\dot{V}$ را مطابق (رابطه۳) بدست مي‌آوريم:[۴].

$$\dot{V} = -P_e\omega - D\omega^2 + P_{max}\omega\sin\delta \quad (۳)$$

که در آن D ضريب ميرايي، P_{max} بيشينه توان انتقالي بدون جبران کننده و P_e توان انتقالي با حضور جبران کننده است. رابطه فوق بر اساس شرط لياپانوف محاسبه شده است. بنابراين براي بررسي شرط پايداري هر جبران کننده کافيست رابطه توان الکتريکي انتقالي در معادله (۳) جايگزين گردد.

تعيين سيگنال کنترلي پيوسته پيشنهادي با شرط لياپانوف

با توجه به انجام شبيه‌سازيها براي سه عنصر انتخابي از ادوات FACTS، سيگنال کنترلي را براي SSSC محاسبه و به بقيه ادوات مورد مطالعه تعميم مي‌دهيم .
سيستم تك ماشين به شين بي‌نهايت (مطابق شکل ۱-الف) را به گونه‌اي در نظر بگيريد که در آن راکتانس حالت گذراي ژنراتور، ترانس و راکتانس خط مجموعاً با x_1 و راکتانس خطهاي L_1 و L_2 با x_2 مدل شده و $E'_q \angle\delta$ ولتاژ پشت راکتانس گذرا ژنراتور بوده و $V\angle 0$ ولتاژ انتهاي خط (شين بي‌نهايت) باشد.



شکل۱: سيستم تک ماشين به شين بينهايت، الف) دياگرام تک خط و ب) مدار معادل.

با توجه به مراجع [۱۵-۱۴]، اگر P_{eo} توان انتقالي بوسيله خط، بدون حضور SSSC باشد، آنگاه ΔP_{e0} افزايش توان انتقالي ناشي از حضور SSSC به صورت زير تعريف مي‌شود:

$$\Delta P_{e0} = CV_sP_{e0} \quad (۴)$$

كه در آن

$$P_{e0} = (E'_q V / X)\sin\delta$$

(۵)

$V_s\angle\alpha$ ولتاژي است كه SSSC به صورت سري به خط تزريق مي كند، V ولتاژ شين بينهايت و ضريب C طبق [۱۴] از رابطه زير محاسبه مي‌شود:

$$C = \frac{1}{\sqrt{(E'_q)^2 + V^2 - 2E'_q V\cos\delta}}$$

(۶)

بنابراين توان كلي به صورت زير خواهد بود:

$$P_e = P_{eo} + \Delta P_{eo}$$

(۷)

با جايگزيني معادله (۷) در معادله (۳) رابطه زير به دست مي‌آيد:

$$\dot{V} = -D\omega^2 - V_S C P_{\max}\omega\sin\delta$$

(۸)

با توجه به رابطه بالا جمله اول همواره منفي بوده، بنابراين براي اثبات شرط پايداري كافيست V_S به گونه‌اي تعيين شود كه مشتق زماني تابع لياپانوف همواره منفي باشد [۱۶]. در اين حالت سيگنال پيشنهادي به صورت زير معرفي مي‌شود.

$$V_S = \frac{K\omega}{\sin\delta}$$

(۹)

با جايگزيني آن در رابطه مشتق زماني تابع لياپانوف رابطه زير به دست مي‌آيد:

$$\dot{V} = -D\omega^2 - KCP_{\max}\omega^2 = -(D + KCP_{\max})\omega^2$$

(۱۰)

لذا اثر اين جبران كننده به صورت ضريب ميرايي اضافي با جمله زير تعريف مي‌شود:

$$D_{SSSC}^{Add} = KCP_{\max}$$

(۱۱)

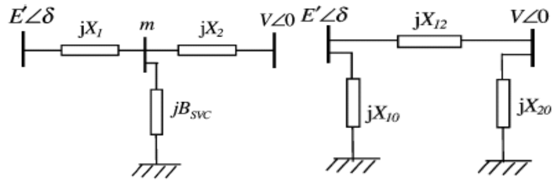
رابطه (۹) همان سيگنال پيشنهادي است كه با توجه به شبيه‌سازي‌هاي انجام شده بهبود پاسخ‌های ارائه شده توسط آن، نسبت به سيگنال‌هاي $k\omega$ و $k\omega\sin\delta$ موجود در مراجع [۱۴-۱۳] نشان داده شده‌است.

روش كنترل مركب پيشنهادي

براي سيستم تک ماشين به شين بينهايت مطابق شكل (۲) معادلات كنترلي هر جبران‌كننده به صورت جداگانه محاسبه مي‌شود. البته از روش‌هاي كنترل مركب بيشتر براي ادوات موازي استفاده مي‌شود [۷ و۱۲].

الف) روش كنترل مركب پيشنهادي بر روي SVC

مي‌توان SVC را با يك سوسپتانس موازي B_{SVC} مدل كرد. همان طور كه در شكل (۲- ب) نشان داده شده‌است [۱۷] و با تبديل مدل T به π مي‌توان راكتانس انتقالي X_{12} در شكل (۲- الف) را به صورت زير محاسبه نمود.



ب الف

شكل۲ الف: مدلT ب :مدل π **.**

كه در آن

$$X_{12} = X_1 + X_2 - B_{SVC} X_1 X_2$$

(۱۲)

و

$$P_e = \frac{E'V}{X_{12}}\sin\delta$$

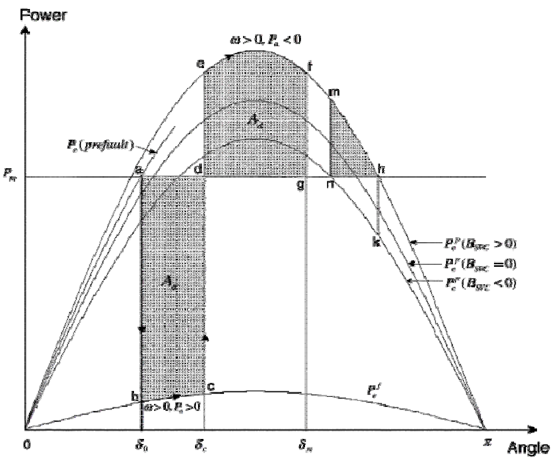
(۱۳)

Pe توان الكتريكي خروجي، P_m توان مكانيكي پشت ژنراتور و $P_a = P_m - P_e$ توان شتاب دهنده است.

براي حالت ماندگار در (نقطه a در شكل (۳)) خطاي اتصال كوتاه سه فاز به زمين رخ مي‌دهد. در اين وضعيت روي منحني P_e^f (منحني توان انتقالي پس از رخداد خطا)، $P_a = P_m - P_e > 0, \omega > 0$ مثبت بوده و δ تا لحظه t_c ، زمان رسيدن به δ_c افزايش مي‌يابد.

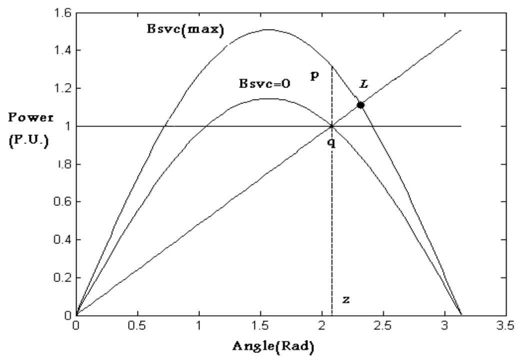
پس از برطرف شدن خطا در ناحيه پس از خطا(P_e^p) ، $B_{svc}^{\max}$ خازني وارد مدار شده و موقعيت روي نمودار $P-\delta$ از نقطه c بهe تغيير مي‌كند.

با مثبت بودن ω و منفي بودن P_a به علت بيشتر بودن توان الكتريكي نسبت به توان مكانيكي، δ نيز تا نقطه f افزايش مي‌يابد. در اين لحظه $\delta = \delta_{\max}$ و ω صفر شده و لحظه بازگشت در اولين نوسان فرا مي‌رسد. زيرا دو سطح (سطح شتاب گيرنده) A_d و (سطح شتاب دهنده) A_a با هم برابر شده و انرژي جنبشي ذخيره شده در محور ژنراتور آزاد مي‌گردد[۱، ۶].



شکل۳ : منحني نوسانات توان بر حسب افزايش زاويه.

روش کنترلي BBC بلافاصله پس ازصفرشدن سرعت وکاهش زاويه روتور جهت کم کردن سطح زير منحني، از سوسپتانس خازني به وضعيت سلفي سوئيچ خواهدکرد. اين کار باعث کاهش سطح زير منحني $P-\delta$ در نوسانات بازگشتي مي شود. البته عيب اين روش بلااستفاده باقي ماندن ناحيه mnhm مي باشد، زيرا اگر سيستم به اين ناحيه وارد شود و سرعت برابر صفر گردد با سوئيچ از وضعيت خازني به وضعيت سلفي و کاهش توان الکتريکي از توان مکانيکي در اين ناحيه سيستم دچار ناپايداري مي گردد.



شکل۴: منحني‌هاي $P-\delta$ به ازاي $B_{SVC}=0$ و B_{SVC}^{max} همراه خط $P=m\delta$.

در اين روش نقطه‌اي به نام L مطابق شکل(۴) بر منحني $P-\delta$ مشخص شده و فرض مي‌شود در اولين نوسان سيستم وارد ناحيه mnhm شود، اگر در اولين نوسان وارد اين ناحيه نگردد روش کنترل، همانند روش فوق خواهد بود، در غير اينصورت سوسپتانس را در مقدار حد اکثر خازني‌اش نگاه داشته تا در بازگشت عمل سوئيچ زني در نقطه L انجام گيرد. اين نقطه محل تقاطع خط $P=m\delta$ مي باشد که از مبدأ و محل تقاطع منحني $B_{SVC}=0$ با P_m(نقطه q) گذشته در نقطه L منحني B_{SVC}^{max} را قطع مي‌کند، آنگاه با حرکت بر روي خط $P=m\delta$ از نقطه L به سمت نقطه q حرکت کرده و از اين نقطه کنترل پيوسته اعمال مي شود. اين روش هم سطح زير منحني $P-\delta$ در نوسانات بازگشتي را کاهش مي دهد، هم شدت نوسانات توان، سرعت و زاويه روتور را در نقاط سوئيچ زني کم مي‌کند.

با توجه به شکل(۴):

$$m=\frac{qz}{oz} \qquad (14)$$

که در آن m شيب خط گذرا از مبدأ و نقاط q و L است. آنگاه B_{SVC} لحظه‌اي به صورت زير محاسبه مي‌شود:

$$m\delta=\left(\frac{E'V}{X_1+X_2-B_{SVC}X_1X_2}\right)\sin\delta \qquad (15)$$

با حل معادلات ديناميکي با روش رانك کوتا [۱۸] در هر لحظه ω,δ محاسبه مي‌شوند.

با محاسبه B_{SVC} لحظه‌اي از رابطه (۱۵) مقدار لحظه‌اي سوسپتانس روي مسيرLq به صورت زير خواهد بود:

$$B_{SVC}=\frac{X_1+X_2}{X_1\ X_2}-\frac{E'V}{X_1\ X_2 m\delta}\sin(\delta) \qquad (16)$$

الگوي کنترلي پيشنهادي براي SVCبه صورت زير است:

در صورت عدم ورود به ناحيه mnhm روش کنترلي همان روش BBC است، اما در صورت طولاني شدن زمان رفع خطا و ورود به اين ناحيه، براي رسيدن به نقطهL در نوسان بازگشتي، مقدار سوسپتانس در B_{SVC}^{max} حفظ مي‌شود، سپس از L تا q مقدار سوسپتانس مطابق رابطه (۱۶) تغيير خواهد کرد و از نقطه q به بعد مقدار لحظه‌اي جبران از رابطه (۹) محاسبه مي‌شود.

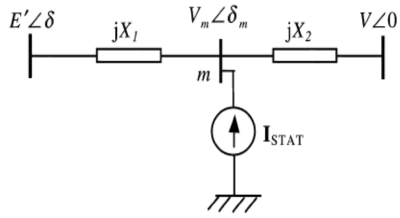
$$B_{SVC}=\begin{cases} B_{SVC}^{max}: & \text{تا زمانيکه به نقطه L نرسيده ايم} \\ \dfrac{X_1+X_2}{X_1X_2}-\dfrac{E'V\sin\delta}{X_1X_2m\delta}: & \text{روي مسير Lq} \\ \dfrac{k\omega}{\sin\delta}: & \text{در مرحله کنترل پيوسته} \end{cases} \qquad (17)$$

رابطه بالا مقدار سوسپتانس را در هر لحظه تعيين مي‌کند. در روش ارائه شده در مرجع [۱۳] سيستم به جاي حرکت روي مسير Lq پس از رسيدن به نقطه p در اولين

بازگشت، مطابق شكل(۴)، به نقطه q حركت كرده و در مرحله كنترل پيوسته از سيگنال $k\omega$ به جاى سيگنال معرفى شده استفاده مى‌نمايد، كه اين الگو براى SSSC و STATCOM نيز در شبيه سازي ها جهت مقايسه به كار رفته است.

ب) روش كنترل مركب پيشنهادي بر روي STATCOM

مي‌توان اين عنصر را به صورت يك منبع جريان موازي مطابق شكل (۵) نشان داد. از آنجايي كه اين جبران كننده با شبكه فقط تبادل توان راكتيو دارد، جريان تزريقي بوسيله STATCOM به شبكه بر ولتاژ ترمينالهاي خروجي عمود مي‌باشد.



شكل ۵ : مدار معادل سيستم با STATCOM.

$V_m\angle\delta_m$ ولتاژ شين m، $E'\angle\delta$ ولتاژ سر ژنراتور و $V\angle 0$ ولتاژ شين بينهايت مي‌باشد.

$$I_{STAT} = I_{STAT}\, e^{j(\delta_m - 90^\circ)} \tag{۱۸}$$

به علت كشيده شدن جريان پس‌فاز در حالت سلفي Q(توان راكتيو) جذب مي شود، جهت I_{STAT} برعكس شده و با $-I_{STAT}$-جايگزين مي گردد [۱۷].

در شين m با مساوي هم قرار دادن توان اكتيو ورودي به شين و توان اكتيو خروجي از آن، زاويه ولتاژ شين m به صورت زير بدست مي‌آيد.

$$\delta_m = tg^{-1}\left(\frac{E' X_2 Sin\delta}{VX_1 + E' X_2 Cos\delta}\right) \tag{۱۹}$$

براي محاسبه ولتاژ شين m با فرض عدم وجود هيچ عنصر مصرف كننده توان راكتيو در اين گره مجموع توان راكتيو ورودي به اين نقطه را با توان راكتيو خروجي برابر قرار داده و ولتاژ شين m به صورت زير به دست مي‌آيد.

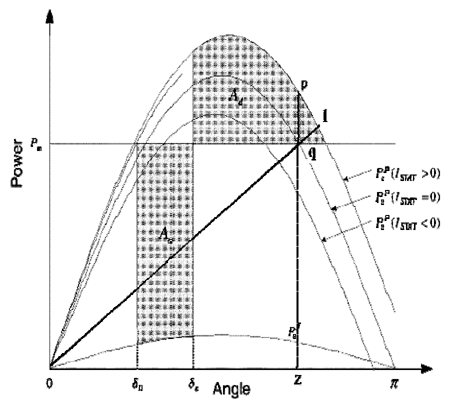
$$V_m = \frac{E' X_2 Cos(\delta - \delta_m) + VX_1 Cos\delta_m + X_1 X_2 I_{STAT}}{X_1 + X2} \tag{۲۰}$$

توان الكتريكي خروجي ماشين نيز به صورت زير مي‌باشد:

$$P_e = \frac{E' V_m}{X_1} Sin(\delta - \delta_m) \tag{۲۱}$$

با توجه به شكل(۶) براي به دست آوردن مقدار لحظه‌اي جريان STATCOM روي مسير Lq معادله (۲۱) را با خط $P = m\delta$ قطع داده و با جايگزيني V_m از معادله (۲۰) در (۲۱) مقدار I_{STAT} روي مسير Lq به صورت زيرمحاسبه مي شود.

$$I_{STAT} = \frac{m(X_1 + X_2) - E' V \sin\delta}{X_2 E' \sin(\delta - \delta_m)} \tag{۲۲}$$



شكل۶ : منحني نوسانات توان بر حسب زاويه روتور به ازاي مقادير مختلف جريان STATCOM .

الگوي كنترلي كاملاً مشابه SVC است فقط مقدار I_{STAT} روي مسير Lq رابطه‌اي متفاوت از SVC دارد كه معادله كنترلي آن به صورت زير تعريف مي‌شود.

$$I_{STAT} = \begin{cases} I_{STAT}^{\max} : & \text{تا زمانيكه به نقطه L نرسيده ايم} \\ \dfrac{m(X_1 + X_2)\delta - E' V \sin\delta}{X_2 E' \sin(\delta - \delta_m)} & \text{روي مسير Lq} \\ \dfrac{k\omega}{\sin\delta} & \text{در مرحله كنترل پيوسته} \end{cases} \tag{۲۳}$$

در اين بخش رابطه پيشنهادي براي كنترل STATCOM بيان شداست و همانطور كه منحني‌هاي $P-\delta$ نشان مي دهند، روش بالا به دليل افزايش سطح زير منحني نوسانات در زاويه حداكثر، باعث بهتر شدن عملكرد اين عنصر مي‌شود.

ج) روش كنترل مركب پيشنهادي بر رويSSSC

اين جبران كننده مطابق شكل (۱-الف) به صورت يک منبع ولتاژ سري در وسط خط مدل مي‌شود، كه ولتاژ

آن هميشه بر جريان خط عمود بوده و با شبكه فقط تبادل توان راكتيو دارد.

در اين جبران‌كننده نيز الگوي كنترلي كاملاً مشابه STATCOM و SVC مي‌باشد، فقط بايد مقدار لحظه‌اي V_Sرا روي مسيرLq محاسبه نمود كه از برابر قرار دادن رابطه(۷) با $P = m\delta$ معادله زير به دست مي آيد:

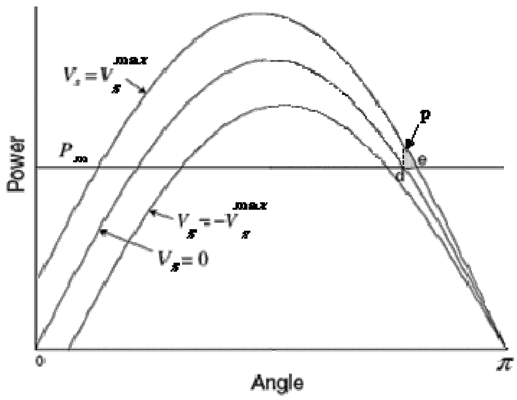
$$V_S = \frac{m\delta - P_{e0}}{C\ P_{e0}} \qquad (۲۴)$$

الگوي كنترلي براي SSSC بعد از ورود به ناحيه ناپايـداري به شكل زير خواهد بود.

$$V_{SSSC} = \begin{cases} V_{SSSC}^{\max} : & \text{تا زمانيكه به نقطهLنرسيده ايم} \\ \dfrac{m\delta - P_{e0}}{CP_{e0}} : & \text{روي مسيرLq} \\ \dfrac{k\omega}{\sin\delta} : & \text{در مرحله كنترل پيوسته} \end{cases} \qquad (۲۵)$$

اگر مطابق شكل (۷) منحني‌هاي $P-\delta$ براي SSSC رسم شود به دليل فشردگي اين منحنـي‌هـا در انتهـا (دلتاهـاي نزديـك بـه دلتـاي حـد پايـداري)، سـطح سـايه خورده(شكل_۷ ناحيه pde)، كه مبنـاي كـاهش نوسـانات بازگشتي است به شدت كاهش مي يابد [۱۴و۱۷].

نتيجه، آنكه اثـر روش پيشـنهادي روي SSSC كـم تـر از SVC و STATCOM مي باشد.



شكل۷: منحني‌هاي نوسان توان بر حسب زاويه روتور با حضور SSSC .

شبيه سازي‌ها

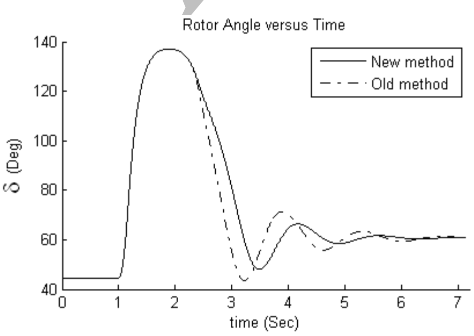
در اين بخش سيستم شكل (۲۲) را در نظر گرفته و فرض مي‌شود سيستم درحالت مانا در حال كار كردن باشد. در لحظه t_0 خطاي حالت گذراي سه فاز به زمين در ميانه خط L_3 رخ مي دهد، پس از گذشت زمان t_C با عملكرد بريكرها در دو سمت خط L_3، اين خط از مدار خارج مي شود. البته مشخصات سيستم تحت مطالعه در پيوست موجود مي باشد.

به اين نكته بايد توجه داشت كه جبران‌كننده در هنگام رخ داد خطا در مدار نيست و بلا فاصله پس از رفع خطا در حالت post fault با از مدار خارج شدن خط آسيب ديده، وارد مدار شده و نقش خود را در كاهش دامنه نوسانات ايفا مي‌نمايد، از جمله دلايل اين امر افت شديد توان در هنگام بروز خطا مي‌باشد، زيرا افت توان در حدي است كه با جبران‌كننده‌ها نمي‌توان آن را جبران نمود، از طرفي وجود جريانهاي اتصال كوتاه شديد مي‌تواند به جبران كننده آسيب وارد نمايد.

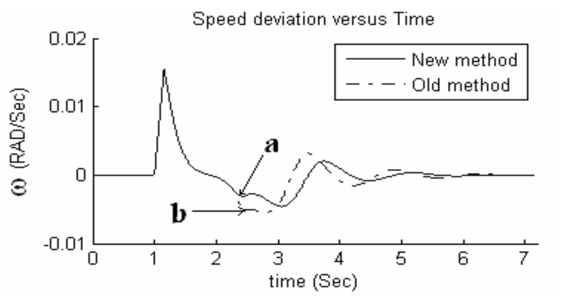
در اين مرحله، روش ارائه شده در مرجع [۱۳]، كه بر اساس روشهاي كنترل پيوسته و ناپيوسته مي‌باشد، شبيه سازي شده ونتايج آن با روش ارائه شده در اين مقاله مقايسه مي‌گردد و نشان داده مي‌شود كه چگونه با اين تكنيك مي‌توان دامنه نوسانات حالت گذرا را كاهش داد. در منحني‌هاي زير، كنترل بر اساس روش ارائه شده در مرجع [۱۳] با عنوان روش پيشين[۱] و روش پيشنهادي با عنوان روش جديد[۲] نامگذاري شده است.

الف) شبيه سازي SVC

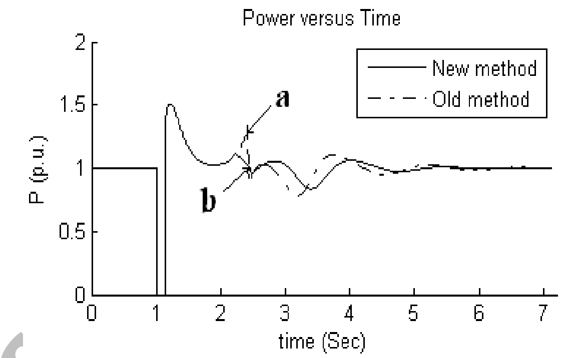
در اين شبيه سازي مينيمم مقدار سوسپتانس سلفي $-\frac{1}{2}$ برابر بيشينه مقدار سوسپتانس خازني در نظر گرفته و زمان بحراني رفع خطا ۱۵۵ms و k=۰/۳ مي باشد. در شبيه‌سازي‌هاي انجام شده بر خلاف تحقيقات قبلي كه اثر ضريب ميرايي را صفر در نظر مي‌گرفتند. ضريب D=۰/۰۵ نيز وارد معادلات ديناميكي شده است.



شكل ۸: نوسانات زاويه روتور بر حسب زمان با SVC .



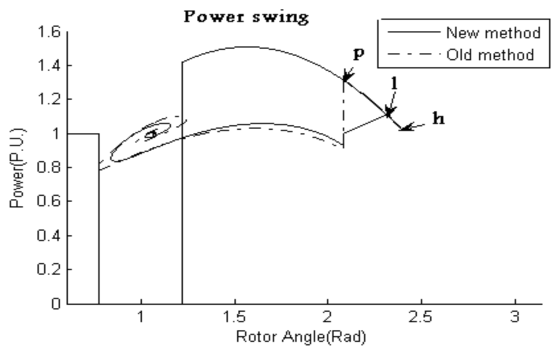
شكل ۹: نوسانات ω بر حسب زمان با SVC .



شكل ۱۰: نوسانات توان بر حسب زمان باSVC .

در منحني‌هاي بالا جهش بين نقاط a,b با اعمال روش كنترلي جديد به شدت كاهش پيدا كرده‌است، اين جهش كه به سبب تغيير وضعيت سريع از كنترل ناپيوسته به پيوسته مي‌باشد، با به كارگيري روش پيشنهادي به شدت كاهش يافته و شكل هاي (۹) و (۱۰) به وضوح بهبود پاسخ‌ها را در منحني نوسانات توان وسرعت نشان مي‌دهند.

همانطور كه نتايج شبيه سازيها نشان مي‌دهند با استفاده از روش پيشنهادي كه مبتني بر حركت روي مسير Lq در نوسانات بازگشتي مي‌باشد، دامنه نوسانات سيستم نسبت به حالت قبل خود كاهش بيشتري پيدا مي‌كند، كه در منحني‌ها به صورت پر رنگ و تحت عنوان روش جديد مشخص شده است.

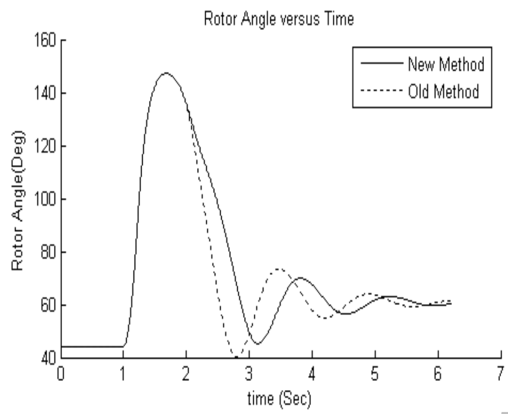


شكل ۱۱: نوسانات توان بر حسب زاويه روتور با SVC .

البته اثر بهبود عملكرد سيستم در نقطه تغيير وضعيت از كنترل ناپيوسته به كنترل پيوسته به دليل حركت نرم بر روي مسير Lq به جاي مسير *pq* كاملاً مشهود است .

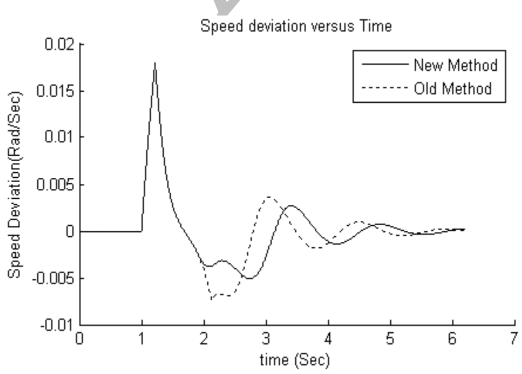
ب) شبيه سازي STATCOM

در اين بخش از شبيه سازي بيشينه جريان STATCOM در حالت سلفي منفي مقدار حد اكثر خازني در نظر گرفته شده و مقدارآن ۱پريونيت مي‌باشد، در ضمن زمان بحراني رفع خطاms ۲۱۸ زمان شروع خطا $t_0 = 1\sec$ و k=۰/۳ در نظر گرفته‌شده و ضريب ميرايي ۰/۰۵ است.

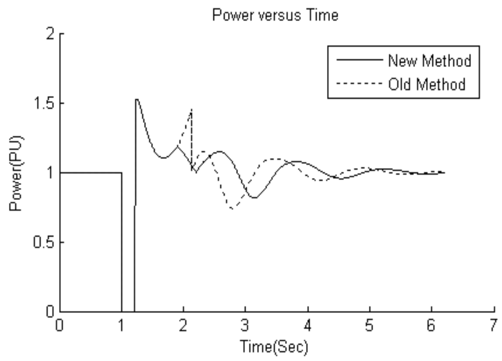


شكل ۱۲:نوسانات زاويه روتور بر حسب زمان باSTATCOM .

در شكل (۱۲) منحني تو پر كه بر اساس روش كنترلي پيشنهادي مي‌باشد به خوبي نشان مي‌دهد كه دامنه نوسانات زاويه روتور كاهش پيدا كرده‌است، ميزان اختلاف بين روش پيشنهادي با روش قبلي در شكل بالا بسيار محسوس است و دليل آن سطح بيشتر زير منحني‌هاي توان زاويه در STATCOM مي‌باشد كه البته اين امر در سمت دلتاهاي بزرگتر محسوستر است.

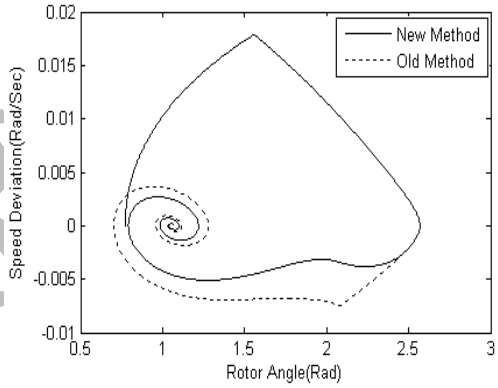


شكل ۱۳: نوسانات ω بر حسب زمان با STATCOM .



شكل۱۴:نوسانات توان بر حسب زمان باSTATCOM .

در شكل (۱۴) كاهش شديد توان در محل تغيير وضعيت ديده مي‌شود، و مي‌توان گفت بيشترين كاهش توان در اين نقطه مي‌باشد.



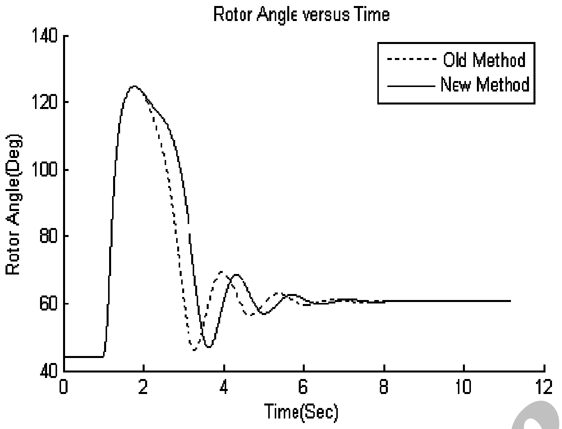
شكل ۱۵: نوسانات تغييرات سرعت بر حسب زاويه روتور با STATCOM .

در شكل (۱۵) كاهش دامنه نوسانات امگا بر حسب دلتا كاملاً مشهود است و سيستم با اعمال روش كنترلي پيشنهادي با نوسانات كمتري به سمت حالت ماندگار حركت مي‌كند. همانطور كه شبيه سازيها نشان مي‌دهند كاهش دامنه نوسانات زاويه روتور، تغييرات سرعت وتوان كاملاً مشهود است، البته روش پيشنهادي در اين مقاله بيشترين اثر را در STATCOM دارد كه دليل آن سطح بيشتر زير منحني‌هاي نوساني توان مي‌باشد.

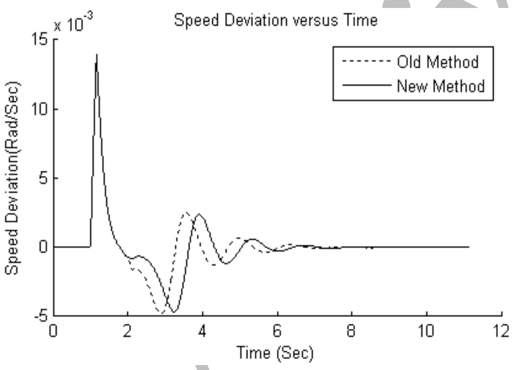
ج) شبيه سازيSSSC

همانطور كه مي‌دانيم اين جبران‌كننده به صورت منبع ولتاژ كنترل شونده مطابق شكل (۲۲) در وسط خط قرار گرفته و با تزريق ولتاژ عمود بر جريان خط با شبكه تبادل توان راكتيو انجام داده و علاوه بر تثبيت سطح ولتاژ، توان اكتيو عبوري از سيستم را تنظيم مي نمايد.

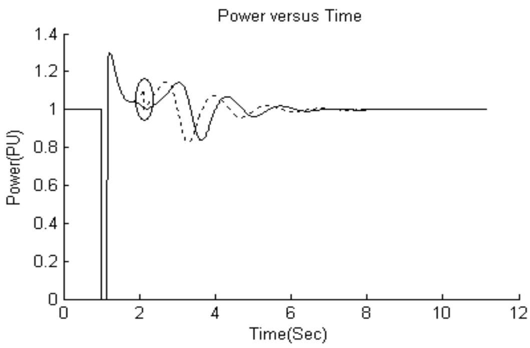
فرض مي‌شود، سيستم در حالت ماندگار در حال كار كردن باشد و خطاي اتصال كوتاه سه فاز به زمين در لحظه t_0=۱ sec در ميانه خط L_3 رخ دهد آنگاه بريكرهاي دو سوي اين خط پس از t_C =162msec كه زمان رفع خطا مي باشد اين خط را از مدار خارج كنند، در زير نتايج شبيه سازي در شرايط فوق براي SSSC با روش كنترلي ناپيوسته و پيوسته ارايه شده در مرجع [۱۳].و روش پيشنهادي در اين مقاله به دست آورده و نتايج مقايسه مى‌شوند، نكته قابل توجه آن است كه اثر كاهش سطح زير منحني‌هاي $P-\delta$ در نوسانات بازگشتي كه اساس روش پيشنهادي است نسبت به STATCOM و SVC تأثير كمتري بر ميرايي نوسانات دارد.



شكل۱۶: نوسانات زاويه روتور بر حسب زمان باSSSC .



شكل۱۷: نوسانات ω بر حسب زمان باSSSC .



شكل۱۸: نوسانات توان بر حسب زمان با SSSC .

علت اين مهم با رجوع به شکل (۷) کاملاً مشهود است. مقدار حداکثر ولتاژ تزريقي برابر با $V_{SSSC}^{\max}=0.2\,pu$ در حالت پيشفازو $-0.2\,pu$ در حالت پسفاز مي‌باشد.

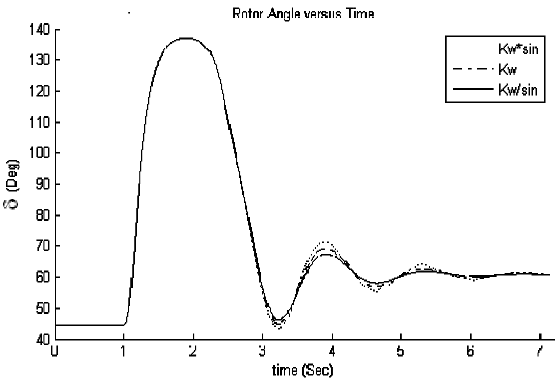
همانطور که در منحني‌هاي شکل(۱۸) مشهوداست، کاهش دامنه نوسانات با روش پيشنهادي نسبت به حالتهاي قبل بسيار کمتر است، در ناحيه تغيير وضعيت مشاهده مي‌شود که جهش توان به سبب وضعيت منحني‌هاي توان زاويه بسيار اندک است.

مقايسه سيگنال‌هاي کنترلي پيوسته بايکديگر

(مقايسه روشها در مرحله کنترل پيوسته)

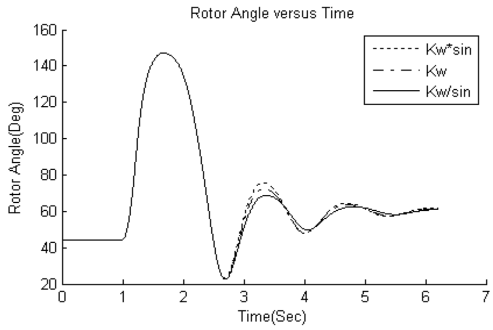
در اين بخش از مقاله سيگنال پيشنهادي به عنوان رابطه تعيين کننده ميزان جبران در مرحله کنترل پيوسته با دو سيگنال $k\omega$ ارائه شده در مراجع [۱۳و۱۴] و $k\omega\sin\delta$ که در مرجع [۱۴] مورد بررسي قرار گرفته، مقايسه مي‌گردد.

براي اين منظور منحني دلتا بر حسب زمان را براي سه عنصر مورد مطالعه، به ازاي سه سيگنال کنترلي رسم نموده و نشان مي‌دهيم که سيگنال پيشنهادي بهترين پاسخ را مي‌دهد. در اين بخش از شبيه سازيها ضريب ميرايي را جهت بررسي اثر k صفر فرض کرده و براي پايدار ماندن سيستم ضريب k را اندکي افزايش داده ايم.

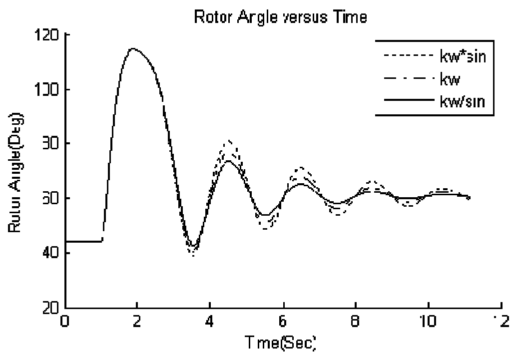


شکل۱۹: نوسانات دلتا بر حسب زمان درSVC به ازاي $B_{svc}^{\max}=1pu$ و سيگنال‌هاي کنترلي متفاوت.

شکلهاي (۱۹)، (۲۰) و (۲۱) به ترتيب کاهش دامنه نوسانات زاويه روتور را بر حسب زمان با اعمال سيگنال کنترلي پيشنهادي نشان مي‌دهند، سيگنال‌هاي $k\omega$ و $k\omega\sin\delta$ به ترتيب در درجه دوم وسوم اهميت قرار دارند. پـــس با استناد به منحني‌ها مي‌توان گفت سيگنال $\frac{K\omega}{\sin\delta}$ بهترين اثر را در ميرا نمودن نوسانات دارد.



شکل۲۰: نوسانات زاويه روتور بر حسب زمان باSTATCOM به ازاي سيگنال‌هاي کنترلي متفاوت .



شکل۲۱: نوسانات زاويه روتور بر حسب زمان باSSSC به ازاي سيگنال‌هاي کنترلي متفاوت .

نتيجه گيري

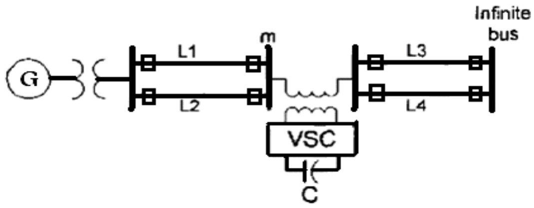
در اين مقاله يک روش کنترلي مرکب براي ادوات FACTS ارائه شد، که با توجه به تحقيقات قبلي دو ويژگي عمده را به همراه دارد، اولين مزيت اين روش، کاهش دامنه نوسانات سيستم است که به دليل سيگنال کنترلي معرفي شده در بخش کنترل پيوسته مي‌باشد و دومين برتري آن کاهش جهش ناگهاني توان و سرعت در محل تغيير وضعيت از کنترل ناپيوسته به پيوسته بوده که دليل آن، الگوي کنترلي پيشنهادي است. همچنين نشان داده-شد که روش کنترلي مرکب در جبران کننده‌هاي متفاوت پاسخهاي متفاوتي بوجودمي‌آورد، که علت آن را مي‌توان در منحني‌هاي $P-\delta$ جستجو کرد. با توجه به ادوات FACTS انتخاب شده بهترين پاسخ را STATCOM داشت.

مزيت برجسته اين روش نسبت به روشهاي ارائه شده قبلي علاوه بر کاهش دامنه نوسانات، کاهش جهش توان در محل تغيير وضعيت بين کنترل ناپيوسته و پيوسته

مي باشد كه مي‌تواند از بروز مشكلات فراواني از قبيل خروج واحد از شبكه يا آسيب ديدن محور ژنراتور جلوگیری نماید. در ضمن براي شبيه‌سازي، جبران‌كننده‌ها را به صورت جملاتي در ضريب ميرايي مدل نموديم كه مي‌تواند در تحقيقات بعدي مورد استفاده واقع گردد.

پيوست

سيستم مورد مطالعه با جبران كننده



شکل۲۲: دياگرام سيستم تک ماشين به شين بينهايت با حضور SSSC .

مشخصات ژنراتور

H=۵s, f=۶۰Hz, $X_d^{/}$ =۰/۳pu, M=H/(۳/۱۴ × f)

ژنراتور توان ۱pu را در ولتاژ ترمينال Vt=۱pu به شين بينهايت با ولتاژ۰/۹۵ پريونيت تحويل مي دهد.
دامنــه و زاويــه ولتــاژ داخلــي ژنراتوربــه ترتيــب ۱/۲۰۶۵ پريونيت و۴۴/۲۶ درجه خواهد شد.

مشخصات ترانسفورماتور

Xt=۰/۱ pu

راکتانس هر يک از خطوط انتقال

X1=۰/۴ Pu(L1, L2, L3, L4)

مراجع

1 - Gyugyi, L. (1989). "Solid-state control of AC power transmission." *International Symposium on Electric Energy Conversion in Power Systems*, Capri, Italy, (Paper No. T-IP.4).

2 - Wang, X., Dai, S.-Z. and Ooi, B.-T. (1991). "A series capacitive reactance compensator based on voltage source PWM converter." *IEEE-IAS Annual Meeting*, September/October, PP. 918–924.

3 - Sen, K.K. (1998). "SSSC—static synchronous series compensator: theory, modeling and applications." *IEEE Trans. Power Delivery*. Vol. 13, No. 1, January, PP. 241–246.

4 - Schauder, C., Gernhardt, M., Stacey, E., Lemak, T., Gyugyi, L., Cease, T. W. and Edris, A. (1997). "Operation of ±100MVAr TVA STATCON." *IEEE Trans. Power Deliv.*, Vol. 12, No. 4, October, PP.1805–1811.

5 - Sen, K. K. (1999). "STATCOM—STATic synchronous COMpensator: theory, modeling, and applications." *IEEE Power Engineering Society 1999 Winter Meeting*, Vol. 2, 31 January–4 February, PP. 1177–1183.

6 - Noroozian, M., Ghandhari, M., Andersson, G., Gronquist, J. and Hiskens, I. (2001). "A robust control strategy for shunt and series reactive compensators to damp electromechanical oscillations." *IEEE Trans.*, PD 16 No. 4, PP.812–817.

7 - Angquist, L., Lundin, B. and Samuelsson, J. (1993). "Power oscillation damping using controlled reactive power compensation—a comparison between series and shunt approaches." *IEEE Trans.*, PS 8, No. 2, PP. 687–695.

8 - Haque, M.H. (2004). "Use of energy function to evaluate the additional damping provided by a STATCOM." *Electric Power Syst. Res.*, Vol. 72, No. 2, PP.195–202.

9 - Nooroozian, M. and Andersson, G. (1994). "Damping of power system oscillations by use of controllable components." *IEEE Trans.*, PD. 9, No. 4, PP. 2046–2054.

10 - Pai, M. A. (1981). *Power System Stability—Analysis by the Direct Method of Lyapunov*, Vol. 3, North-Holland Systems and Control Series, NY.

11- IEEE Committee Report, (1978). "A description of discrete supplementary controls for stability." *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, Vol. 97, No. 1, PP.149–165.

12 - Zhou, E. Z. (1993). "Application of Static VAr compensators to increase power system damping." *IEEE Trans. Power Syst, Vol.*8, PP.655-661.

13 - Haque, M. H. (2004). "Improvement of First swing stability limit by utilizing full benefit of shunt FACTS device." *IEEE Trans. Power Sys.*, Vol. 19, No. 4.

14 - Kumkratug, P. and Haque, M. H. (2003). "Improving of stability region and damping of a power system by using SSSC." *Proc. of the IEEE PES GM* 2003, 13-19 July, Toronto, Canada.

15 - Pai, M. A. (1981). *Energy function analysis for power system stability*, Kluwer Academic Publishers.

16 - Ghandhari, M., Andersson, G. and Hiskens, I.A. (2001). "Control Lyapunov functions for series devices." *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 16, PP.689-694.

17 - Hingorani, N. G. and Gyugyi, L. (1999). *Understanding FACTS :Concepts and Technology of Flexible ac Transmission Systems*, New York, IEEE press.

18 - Kundur, P. (1994). *Power System Stability and Control*, Chapter 13, McGraw-Hill.

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1 - Old Method
2 - New Method