



کنترل هماهنگ SVC و TCSC جهت بهبود رفتار دینامیکی سیستم قدرت با اعمال کنترل کننده ترکیبی مد لغزشی فازی تطبیقی و بهینه

رضا قاضی^{*} - اسد عازمی^{**} - کاظم پوربدخشان^{***}

دانشگاه فردوسی مشهد

ایران

کلمات کلیدی: کنترل مد لغزشی فازی تطبیقی، فیدبک بهینه حالت (LQG)، جبران کننده خازن سری (TCSC)، جبران کننده استاتیکی توان راکتیو (SVC)، ابزار FACTS

چکیده:

که مزایای هر دو روش را در بر دارد طراحی شده است. مقاوم بودن کنترل کننده جدید در مقابل اغتشاشهای مختلف سیستم بررسی و مزیت روش کنترلی جدید نسبت به سایر کنترل کننده‌ها نشان داده شده است.

در این مقاله اعمال همزمان جبران کننده های SVC و TCSC و کنترل هماهنگ آنها جهت بهبود رفتار دینامیکی سیستم قدرت مورد مطالعه قرار گرفته است. کنترل کننده های مد لغزشی، مد لغزشی فازی، مد لغزشی فازی تطبیقی، بهینه، دیجیتال، PID و PID اضافی طراحی و پاسخ سیستم به هر یک از این کنترل کننده ها بررسی شده است. با توجه به پاسخ مطلوب روش کنترل مد لغزشی فازی تطبیقی در حالت گذرا و پاسخ مناسب کنترل کننده بهینه LQG در حالت دائمی ترکیب این دو کنترل کننده به عنوان کنترل کننده جدید

^{*} دانشیار دانشگاه فردوسی مشهد

^{**} استادیار دانشگاه فردوسی مشهد

^{***} کارشناس ارشد دانشگاه فردوسی مشهد

سطح تعریف شده لغزش که از پایداری مجانبی لیاپانوف برخوردار است، رسانده و سپس با استفاده از قانون لغزشی آن را به حالت تعادل می‌رساند. به این منظور برای سیستم زیر

$$\dot{x} = f(x) + b(x)u \quad (1)$$

قانون کنترلی زیر را انتخاب می‌کنیم [۷]

$$u = b(x)^{-1}[\ddot{u} - Q_s \operatorname{sgn}(s)] \quad (2)$$

که در آن \ddot{u} تخمین کنترل است. هر چند تعیین محدوده تغییرات Q_s امکان پذیر است ولی تعیین بهترین مقدار آن با سعی و خطا همراه می‌باشد. در صورتی که تعداد کنترل کننده‌ها و ورودی‌ها زیاد باشد این مقدار توأم با خطای زیادی خواهد بود. استفاده از این کنترل کننده برای سیستم قدرت به علت ماهیت غیر خطی آن با محدودیتهایی همراه است در صورتی که درجه سیستم پایین باشد می‌توان با توجه به روش بالا کنترل کننده غیر خطی را طراحی نمود [۱، ۲، ۳]، ولی با افزایش درجه سیستم با توجه به بالا رفتن خطا در تعیین Q_s عملاً بهینه سازی آن غیر ممکن می‌باشد.

یکی از جدیدترین پیشرفتهای صنعت برق استفاده از سیستمهای انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر است. این تجهیزات با سرعت کلید زنی زیاد به صورت ترکیب سری و موازی جهت کنترل پارامترهای سیستم و انعطاف پذیر کردن آن به منظور بهبود بهره برداری و حداکثر استفاده از امکانات بالقوه سیستم طراحی می‌شوند، از جمله کاربردهای این ابزار: کنترل ولتاژ، کنترل پخش بار، بهبود پایداری گذرا و دینامیکی، محدود کردن جریان و تغییر سطح اتصال کوتاه می‌باشد. جبران سازهای SVC و TCSC دو ابزار معروف FACTS هستند که بصورت موازی و سری در مدار قرار می‌گیرند و باعث افزایش میرایی سیستم قدرت می‌شوند

۲- طراحی کنترل کننده غیر خطی مد لغزشی برای سیستم قدرت

روش کنترل مد لغزشی یکی از مهمترین روشهای کنترل غیر خطی می‌باشد که از مشخصه‌های بارز آن عدم حساسیت به تغییر پارامترها و دفع کامل اغتشاش و مقابله با عدم قطعیت است. این کنترل کننده ابتدا سیستم را از حالت اولیه با استفاده از قانون رسیدن به

۱-۲ کنترل کننده مد لغزشی فازی

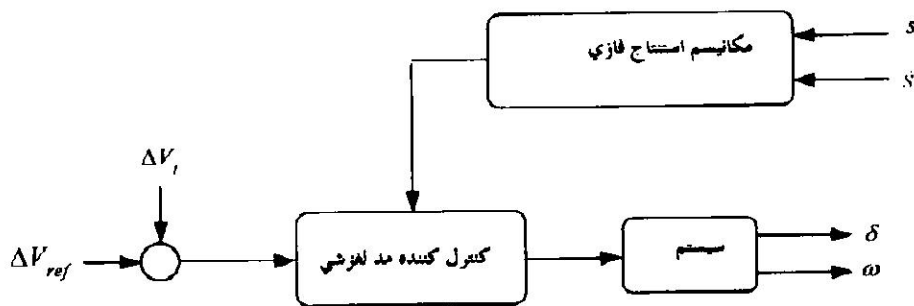
جهت تعیین مقدار بهینه Q_s در معادله (۲) و

*FACTS = Felexible AC Transmission Systems

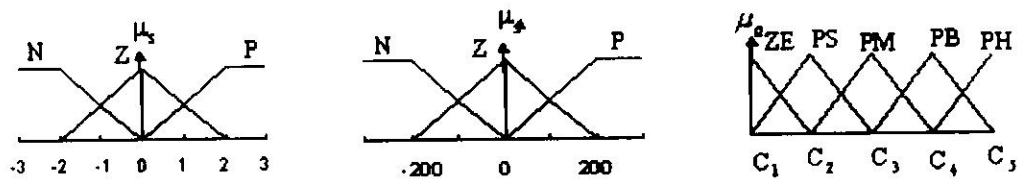
کاهش پدیده چترینگ از کنترل کننده مد لغزشی فازی استفاده می شود که در آن از یک مکانیزم استنتاج فازی و دو مجموعه فازی ورودی S و \dot{S} و به عبارتی سطح سوئیچ و مشتق آن، یک مجموعه خروجی Q_s استفاده شده که شمای آن در شکل ۱ نشان داده شده است. مجموعه های ورودی و خروجی در شکل ۲ نشان داده شده است.

قوانین فازی بکار گرفته طوری عمل می کنند که اگر مسیر حرکت از سطح لغزش دور باشد آن را به سطح نزدیک می نماید \dot{S} سرعت نزدیک یا دور شدن را نشان می دهد که در این قوانین از آن بخوبی استفاده شده است. قوانین عبارتند از:

IF {(S is P AND \dot{S} is P) OR (S is N AND \dot{S} is N)} THEN Q_s is PH
 IF {(S is P AND \dot{S} is Z) OR (S is N AND \dot{S} is Z)} THEN Q_s is PB
 IF {(S is P AND \dot{S} is N) OR (S is N AND \dot{S} is P)} THEN Q_s is PM
 IF {(S is Z AND \dot{S} is P) OR (S is Z AND \dot{S} is N)} THEN Q_s is PS
 IF (S is Z AND \dot{S} is Z) THEN Q_s is ZE



شکل ۱ بلوک دیاگرام سیستم کنترل مد لغزشی فازی



شکل ۲- مجموعه های فازی عضویت ورودیهای S و \dot{S} و خروجی Q_s

در این مقاله با توجه به قسمت قبلی که مقدار Q_s از قوانین فازی تعیین شد ملاحظه تعیین پایه های توابع عضویت می شود این متغیر یعنی C_i ها در پایداری و در بند مطلوب بودن جابجها بسیار مؤثر

۲-۲ کنترل کننده لغزشی فازی تطبیقی

روش کنترل لغزشی فازی در تعیین این پایه ها از روش سعی و خطا استفاده می شود ولی با توجه به تعریف کنترل کننده فازی تطبیقی می توان این پایه ها را با استفاده از قانون تطبیقی زیر تعیین نمود. [5]

$$u = C^T W(x) \quad (3)$$

$$\dot{C} = \gamma e^T S W(x)$$

S که در آن سطح لغزش e مقدار خطای سرعت روتور و γ یک عدد ثابت و W ارتفاع خروجیهای فازی می باشند.

کنترل سیستم خطی با معادلات حالت (1) و تابع معیار (4) ماتریس فیدبک حالت بهینه G را به صورت زیر در نظر می گیریم.

$$G = R^{-1} B^T P \quad (5)$$

P از حل معادله ریکاتی بدست می آید.

$$A^T P + PA - PBR^{-1} B^T P + Q = 0 \quad (6)$$

پس از حل معادله ریکاتی (6) و بدست آوردن P، قانون کنترل بهینه بصورت زیر بدست می آید.

$$u = -GX \quad (7)$$

برای حل معادله ریکاتی از تابع lqr از نرم افزار MATLAB استفاده شده است. به این ترتیب سیستم جدید به صورت زیر خواهد بود.

$$A_1 = A - BG \quad (8)$$

۴-۲ کنترل کننده ترکیبی شامل کنترلر بهینه و مد لغزشی فازی تطبیقی

همانطور که در قسمتهای قبل ذکر شد به خاطر گریز از مسئله چترینگ در کنترل کننده لغزشی خطای حالت دائم را پذیرفتیم و به کنترل کننده لغزشی فازی و سپس برای بهبود وضعیت کاری این کنترل کننده به طرف کنترل کننده لغزشی فازی تطبیقی کشیده شدیم. با توجه به شبیه سازیهای انجام شده ملاحظه می شود سیستم در پاسخ به کنترل کننده مد

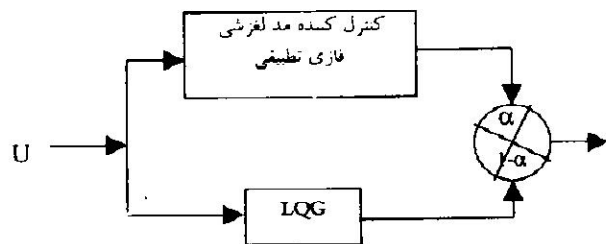
۳-۲ کنترل بهینه

برای بررسی عملکرد کنترل کننده های طراحی شده لازم است با یکی از کنترل کننده های پایه از جمله کنترل کننده بهینه مقایسه شود. در مبحث کنترل بهینه عملکرد سیستم با تابع معیار زیر ارزشیابی می شود:

$$J = \int_0^{\infty} (X^T(t) Q X(t) + u^T(t) R u(t)) dt \quad (4)$$

هدف از حل مسئله کنترل بهینه تعیین کنترل مناسبی است که باعث شود سیستم (1) مسیر قابل قبولی را تعقیب نموده و تابع معیار فوق را کمینه نماید. معیارهای انتخاب تابع معیار به عوامل فیزیکی سیستم بستگی دارد. در سیستم های قدرت مسئله مورد نظر کمینه کردن تابع انرژی سیستم می باشد. لذا تابع معیار، تابعی درجه دو از بردار حالت و کنترل انتخاب می شود. برای بدست آوردن قانون

لغزشی فازی تطبیقی دارای پاسخ حالت گذرای مناسبی است ولی از رفتار حالت دائمی خوبی برخوردار نیست [۷]. همچنین شبیه سازی‌های بعمل آمده نشان می‌دهند کنترل کننده LQG از نظر حالت دائمی بهترین پاسخ را دارد. لذا در این قسمت با توجه به [۶] کنترل کننده ترکیبی جدیدی پیشنهاد شد. در این روش کنترل از ضریب ثابت α برای استفاده بهینه از دو کنترل کننده LQG و لغزشی فازی تطبیقی استفاده می‌شود. شمای این کنترل کننده در شکل ۳ نشان داده شده است. در اینجا سیگنال خروجی کنترل کننده‌ها در بهره‌های α و $1-\alpha$ ضرب می‌شود. α مقادیر بین صفر و یک را به خود اختصاص می‌دهد.



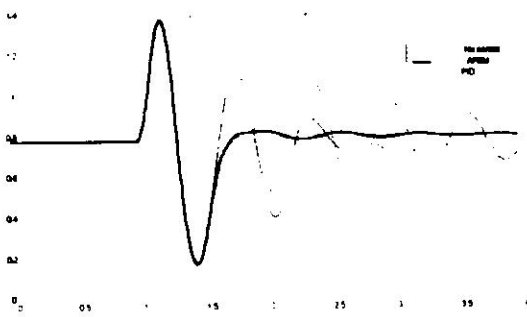
شکل ۳ شمای کنترل کننده ترکیبی

پروسه تعیین α به گونه‌ای است که در حالت گذرا، کنترل کننده لغزشی فازی تطبیقی در مدار بوده و یا به عبارتی $\alpha=1$ است. پس از گذشتن از حالت گذرا و نزدیک شدن به حالت ماندگار α به سمت صفر میل می‌کند و کنترل کننده LQG وارد مدار می‌شود و حالت ماندگار را تصحیح می‌کند. شبیه سازی‌های بعمل آمده نشان می‌دهند کنترل کننده جدید

دارای پاسخهای بسیار مناسبتری از کنترل کننده‌های دیگر می‌باشد و در مقابل اغتشاشهای سیستم نیز بطور مؤثری مقاوم است. در این روش از مزایای دو کنترل کننده لغزشی فازی تطبیقی و LQG به طور همزمان استفاده شده است.

۲- نتایج شبیه سازی

سیستم مورد مطالعه عبارت است از یک ژنراتور سنکرون، TCSC، SVC، خط انتقال متصل به باس بی نهایت که دیاگرام، مدل و معادلات آنها در ضمیمه مقاله و داده های سیستم در مرجع [۴] آمده است. نتایج شبیه سازی حاصل از اعمال کنترل کننده های VSC، AFSM با کنترل کننده PID در شکل ۴ و ۵ نشان داده شده است که به ترتیب مربوط به پاسخ سرعت زاویه روتور در مقابل اتصال کوتاه ۱۰۰ میلی ثانیه در باس بی نهایت است.



شکل ۴- سرعت روتور

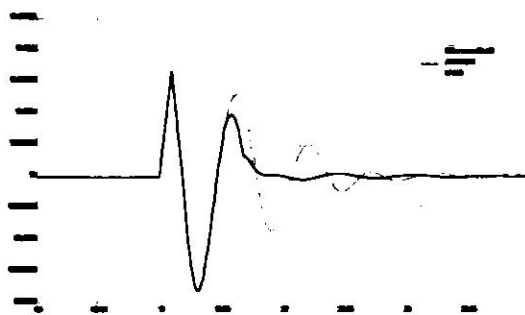
زمان نشست: مدت زمانی است که درصد تغییرات متغیر به کمتر از ۲٪ حالت ماندگار رسیده است.

جدول ۱- مقایسه کنترل کننده‌های مختلف برای خطا روی باس بی‌نهایت (برای متغیر δ)

بالازدگی (%)	زمان نشست (s)	کنترل کننده
۷۵/۶۶	۶	بدون کنترل
۷۵/۶	۱/۵	PID
۵۶	۱/۶	PID اضافی
۵۷/۵	۱	LQG
۵۷	۰/۸	دیجیتال
۷۶	۱/۵	ساختار متغیر
۷۶	-/۷	ساختار متغیر فازی
۵۹	۰/۶	ساختاری متغیر فازی تطبیقی
۵۶	۰/۶	ساختار متغیر فازی تطبیقی بهینه

۳- نتیجه‌گیری

در این مقاله نقش جبران کننده‌های استاتیکی توان راکتیو SVC و سری TCSC و استفاده همزمان این دو جبران ساز در بهبود حالت گذرای سیستم مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله کنترل کننده‌های PID، بهینه، دیجیتال، ساختار متغیر و ساختار متغیر فازی و ساختار متغیر فازی تطبیقی برای کنترل SVC و TCSC جهت افزایش میرایی نوسانات الکترو مکانیکی سیستم قدرت طراحی شد. بدلیل فابل قبول نبودن حالت ماندگار سیستم در



شکل ۵- زاویه روتور

کنترل کننده PID با ضرایب ثابت با استفاده از روش تخصیص مقادیر ویژه مدل خطی طراحی شده است. کنترل کننده بهینه LQG برای سیستم مورد مطالعه با استفاده از مدل خطی سیستم و بر اساس روش شیفت بهینه قطب‌های غالب سیستم طراحی شد. نتایج شبیه سازی مربوط به این کنترل کننده هابرای سیستم مورد مطالعه در مقابل انواع اختلالات مانند اتصال کوتاه، تغییر بار، تغییر ولتاژ مرجع و تغییر گشتاور ورودی و همچنین وارد کردن عدم قطعیت‌هایی در مدل سیستم در مرجع [۷] که مربوط به نویسندگان مقاله است، به تفصیل آمده است. جهت اختصار و برای مقایسه کنترل کننده‌ها، جدول زیر که مربوط به خطای سه فاز روی باس بی‌نهایت به مدت ۱۰۰ میلی ثانیه می باشد در این مقاله آمده است. نمادها و تعاریف این جدول عبارتند از :

درصد بالازدگی : درصد بالازدگی متغیر مورد نظر نسبت به حالت ماندگار

معادله‌های ژنراتور سنکرون همراه سیستم تحریک :

$$\begin{aligned} \delta &= (w-1)w_b \\ \dot{w} &= (T_m - T_e - DT_D) / M \\ \dot{E}'_d &= (-E'_d - (X_q - X'_q)I_q) / T'_{do} \\ \dot{E}'_q &= [E_{fd} - E'_q + (X_d - X'_d)I_d] / T'_{do} \\ T_e &= E'_d I_d + E'_q I_q - (X'_q - X'_d) I_d I_q \end{aligned}$$

که در آن

زاویه ژنراتور	δ
گشتاور مکانیکی ژنراتور	T_m
ولتاژ القایی ژنراتور در جهت محور d	E'_d
ولتاژ القایی ژنراتور در جهت محور y	E'_q
ولتاژ ترمینال	V_t

کنترل کننده لغزشی فازی تطبیقی، این کنترل کننده را بوسیله یک روش جدید فازی با کنترل کننده LQG ترکیب شد که نتایج شبیه سازی مطلوب بود و مقاوم بودن این کنترل کننده پیشنهادی را تأیید می‌نمایند

۵- مراجع اصلی:

1. Wang Y. "Variable structure FACTS Controllers for Power system transient stability" IEEE Power systems, vol. 7, No 1, PP 307-313. 1992
2. Matthews, G.P. "Toward a feasible bus". IEEE Auto. Cont. Vol. 31, No 12, 1159-1163, 1986
3. Chan, W.C. "An optimal variable structure for Power system stabilization". IEEE PAS Vol. 102, No. 6, PP 1738-1745, 1983.
4. Chin, Hsing Chen, et al, "Damping of generator oscillations using an adaptive static var compensator, IEEE, Power systems vol. 7, No 2, May 1992.
5. Lin F.J. et al "Adaptive fuzzy sliding mode control for PM synchronous servo motor drive" IEE Proc. Control theory, vol. 145, no. 1, pp 63-67, 1998.
6. Barrero, F. et al "Speed control of induction motors using a novel fuzzy sliding mode structure" IEEE trans. vol. pp 1073-1078, 1999.

کاظم پوربخشان کنترل هماهنگ جبران کننده سری و موازی جهت بهبود رفتار دینامیکی سیستم قدرت با اعمال کنترل کننده ساختار متغیر فازی تطبیقی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد ۱۳۷۹.

ضمیمه: سیستم مورد مطالعه.

$$B_r(\alpha) = \frac{2\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha}{2\pi X_r} \quad 0 \leq \alpha \leq \pi$$

$$B_s = B_c - B_{l(\alpha)}$$

ولتاژ مرجع V_{ref}

SVC سوسپتانس خازنی B_c

ثابت زمانی سیستم آتش تریستورها T_r

ولتاژ سیگنال کنترل SVC U

معادله خط انتقال و جبران کننده خازن سری (TCSC):

$$V_q = V_b \cos \delta - X_l I_{ld}$$

راکتانس لحظه‌ای TCSC X_c

راکتانس خط انتقال X_e

ولتاژ باس بی نهایت V_b

$$V_d = -V_b \sin \delta - X_l I_{ld}$$

$$X_l = X_e - X_c$$

و با در نظر گرفتن هارمونیک اول جریان،

می‌توان رابطه بین سوسپتانس TCSC و زاویه

آتش تریستور را بدست آورد.

اینرسی آرمیچر M

راکتانس حالت دائم در جهت محور d X_d

راکتانس حالت دائم در جهت محور q X_q

مولفه جریان در جهت محور d I_d

مولفه جریان در جهت محور q I_q

سرعت محور ژنراتور ω

کشتاور الکتریکی ژنراتور T_e

ولتاژ ترمینال ژنراتور در جهت محور d V_d

ولتاژ ترمینال ژنراتور در جهت محور y V_q

سرعت پایه ω_b

مقاومت اهمی آرمیچر R_a

راکتانس حالت گذرا در جهت محور d X'_d

راکتانس حالت گذرا در جهت محور q X'_q

ثابت زمانی مواد باز گذرا محور d I'_{do}

ثابت زمانی مواد باز گذرا محور q I'_{qo}

مدل جبران کننده استاتیکی توان راکتیو (SVC) در

مختصات d و q:

$$\dot{B}_s = \frac{B_s - B_{sm}}{T_r} + \frac{k_r (V_{ref} - V_l)}{T_r} + \frac{k_r U}{T_r}$$

B_s سوسپتانس کل SVC

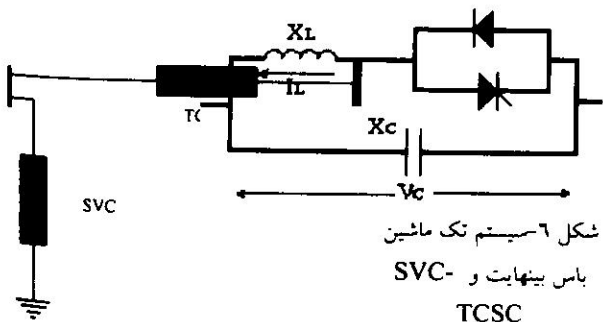
$B_{l(\alpha)}$ سوسپتانس لحظه‌ای سیم پیچ SVC

B_{l0} سوسپتانس ابتدایی سیم پیچ SVC

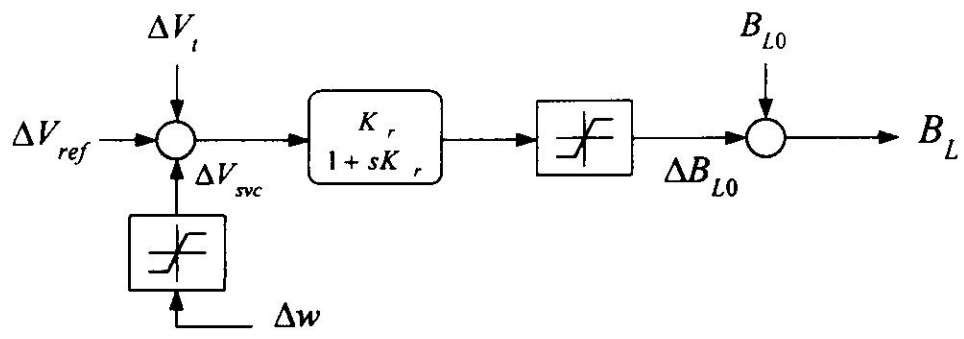
X_r امپدانس ترانس SVC

k_r بهره سیستم آتش تریستورها

α زاویه آتش تریستورها



شکل ۷- ساختار مشترک SVC و TCSC



شکل ۸- مدل اساسی IEEE SVC [۴]