



طراحی کنترل کننده فازی برای TCSC جهت بهبود پایداری گذرای سیستم قدرت

دکتر حسن رستگار

مهندس علی اصغر قدیمی

دانشگاه صنعتی امیرکبیر-دانشکده مهندسی برق

تهران- خیابان حافظ-تلفن ۶۱۳۹۴۷۰- فاکس ۶۴۰۶۴۶۹

Email : Rastegar@cic.aku.ac.ir

کلمات کلیدی: FACTS، خازن سری کنترل شده با تایریستور، پایداری گذرا، کنترل کننده فازی

در این مقاله کاربرد یک TCSC کنترل شده با منطق فازی جهت بهبود حالت گذرای سیستم قدرت مورد توجه قرار می‌گیرد. در کنترل کننده فازی ارائه شده، تغییرات سرعت ژنراتور نسبت به سرعت سنکرون و شتاب آن بعنوان ورودی‌های کنترل کننده انتخاب شده‌اند و خروجی کنترل کننده بر روی راکتانس TCSC اثر گذاشته و با تغییر امپدانس سری باعث کنترل سیستم به نحو مطلوب می‌شود. نتایج شبیه‌سازی بر روی یک سیستم قدرت نمونه نشان می‌دهد که کنترل کننده فازی مورد استفاده، برای بهبود حالت گذرای سیستم مذکور بسیار مؤثر بوده و نسبت به طرح خطا در سیستم مقاوم می‌باشد.

در سالهای اخیر پیشرفتهای بدست آمده در تکنولوژی الکترونیک قدرت، باعث تحقق سیستمهای انتقال AC انعطاف پذیر یا FACTS (Flexible AC Transmission System) شده است. خازن سری کنترل شده با تایریستور، TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor) نیز یکی از ادوات FACTS می‌باشد که دارای مزایای زیادی نسبت به جبران‌سازهای مرسوم سری از جمله توانایی بهبود پایداری گذرا، از بین بردن SSR، میرا سازی نوسانات، توان، رفع خطا و ... می‌باشد. [1]

در خطوط انتقال طولیل مسئله پایداری مانع از بهره برداری بهینه از ظرفیت آنها می‌شود [۴]. در یک خط انتقال حداکثر توان قابل انتقال معمولاً با امپدانس سری خط محدود می‌شود. استفاده از جبران‌سازی با خازن سری باعث کاهش طول الکتریکی خط و در نتیجه افزایش قابلیت انتقال توان در خط می‌شود. جبران‌سازهای سری مرسوم شامل خازنهای ثابت یا با کلیدهای مکانیکی بودند. مشکل عمده این نوع جبران‌سازی با خازن ثابت مسئله بروز تشدید زیر سنکرون یا SSR (SubSynchronous Resonance) بود که دو بار در سالهای ۱۹۷۰ و ۱۹۷۱ باعث شکسته شدن محور ژنراتور یک نیروگاه در آمریکا شد. با ظهور جبران‌سازهای سری کنترل شده با عناصر الکترونیک قدرت این مشکل برطرف شد. از طرفی با توجه به سرعت این عناصر، کاربرد آنها در بهبود حالت‌های گذرا و دینامیکی سیستم علاوه بر استفاده در حالت مانا مورد توجه قرار گرفت.

همانطور که می‌دانیم یک ژنراتور در حالت ماندگار، بصورت همزمان با بقیه ژنراتورهای شبکه کار می‌کند و توان الکتریکی خروجی و توان مکانیکی ورودی آن در حال تعادل می‌باشند. بروز خطا در سیستم قدرت باعث برهم زدن تعادل توان می‌شود و این عدم تعادل توان باعث رانده شدن ژنراتور از حالت سنکرون به طرف ناپایداری می‌شود و ممکن است منجر به از دست رفتن حالت سنکرونیزم (Synchronism) شود.

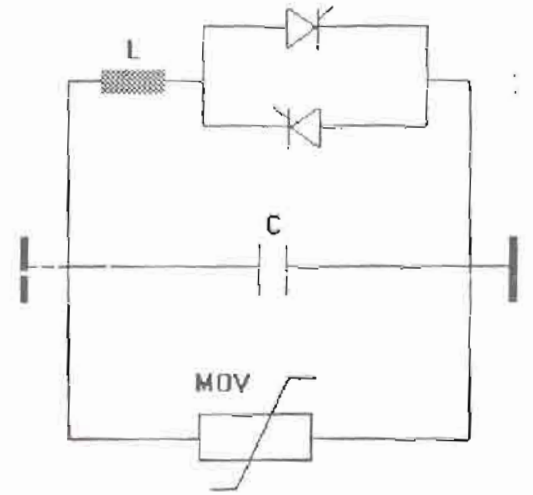
از دست رفتن سنکرونیزم معمولاً به دو دلیل اتفاق می‌افتد: یکی اینکه در نوسان اول زاویه توان

(First Swing)، گشاور شتاب دهنده باعث خارج شدن ژنراتور از حالت سنکرونیزم شود و دیگری اینکه علی‌رغم بازگشت سیستم بعد از نوسان اول، بعلت نبودن میرایی کافی، سیستم پس از چند نوسان از حالت سنکرون خارج شود. بنابراین هر کنترل‌کننده‌ای که برای بهبود حالت گذرا طراحی می‌شود باید بتواند علاوه بر بهبود پایداری در نوسان اول، میراسازی نوسانات را نیز انجام دهد. تاکنون استراتژی‌های مختلفی مختلفی از جمله PID، کنترل Bang-Bang، کنترل بهینه خطی (Linear Optimal Control)، و... برای این امر طراحی شده‌اند. امروزه کنترل‌کننده‌های فازی یا FLC (Fuzzy Logic Controllers) بعنوان انتخاب مناسبی جهت کنترل سیستم‌های غیر خطی مطرح شده‌اند و جایگزین مناسبی برای روش‌های کلاسیک کنترل قلمداد می‌شوند. مزیت اصلی FLC آن است که استراتژی کنترل، توسط یک سری قوانین که رفتار کنترل‌کننده را با استفاده از عبارات کلامی توصیف می‌کند، تبیین می‌گردد [۴]. توسعه و تکامل FLC نیز آسان و بکارگیری آن ساده می‌باشد. کنترل فازی در کاربردهای صنعتی غیر خطی زیادی با موفقیت بکار گرفته شده است [2]. در این مقاله یک کنترل‌کننده فازی برای TCSC طراحی شده است و اثر آن در بهبود حالت گذرای یک سیستم نمونه بررسی و شبیه‌سازی شده است.

۲- مشخصات TCSC

ساختار یک TCSC شامل ترکیب موازی یک خازن ثابت و یک راکتور کنترل شده با تایریستور (Thyristor Controlled Reactor)

می‌باشد که بصورت سری با خط انتقال قرار می‌گیرد (شکل (۱)). این ترکیب امکان کنترل امپدانس سری خط در رنج وسیعی را می‌دهد.



شکل (۱): ساختمان یک TCSC

بانکهای خازنی در هر فاز بر روی یک صفحه قرار داده می‌شوند تا ایزولاسیون آن با زمین مطمئن باشد. شیرها (valves) شامل یک رشته از کلیدهای سری در قدرت بالا می‌باشند. سلف بکار برده شده از نوع هسته هوایی می‌باشد. برای جلوگیری از اضافه ولتاژ در حالت گذرا یک ورستیسور اکسید فلزی یا MOV (Metal-Oxide Varistor) بر روی خازن نصب می‌شود.

با تغییر زاویه هدایت تایریستورها، نسبت ولتاژ به جریان هارمونیک اول سلف یعنی راکتانس مؤثر آن تغییر کرده و راکتانس حاصل از موازی شدن آن با خازن ثابت همانند یک خازن متغییر عمل خواهد کرد. با در نظر گرفتن هارمونیک اول

جریان، می‌توان نشان داد که سوسپتانس TCR از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$B_L(\sigma) = \frac{\sigma - \sin \sigma}{\pi X_L} \quad (1)$$

در اینجا σ زاویه هدایت تایریستورها و X_L راکتانس سلف در فرکانس موج ولتاژ اعمال شده می‌باشد. راکتانس معادل حاصل از موازی شدن $B_L(\sigma)$ با خازن جبران‌ساز سری برابر است با:

$$X_{eqTCSC} = \frac{\pi X_L X_C}{\pi X_L - (\sigma - \sin \sigma) X_C} \quad (2)$$

برای داشتن تغییرات پیوسته راکتانس جبران‌سازی، از ترکیب سری دو یا چند بانک TCSC استفاده می‌کنیم. به کمک TCSC چندتایی می‌توان راکتانس معادل را بطور پیوسته بین دو حد (ماکزیمم خازنی و سلفی) تغییر داد [3].

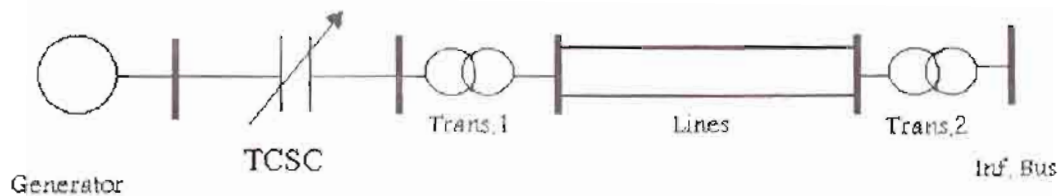
۳- سیستم مورد مطالعه

شکل (۲) یک سیستم تک ماشینه-شین برنهایت شامل TCSC را که در این مقاله مورد مطالعه قرار گرفته است، نشان می‌دهد. TCSC در پست خروجی نیروگاه نصب شده و با یک خازن متغییر نمایش داده شده است. معادلات حاکم بر این سیستم برای بررسی حالت گذرا به شرح زیر است:

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega_0 \Delta\omega \quad (3)$$

$$\frac{d\Delta\omega}{dt} = \frac{1}{2H} (Tm - Te - k_n \Delta\omega) \quad (4)$$

که در اینجا δ زاویه روتور ژنراتور، $\Delta\omega$ انحراف سرعت روتور نسبت به سرعت سنکرون، H ثابت لختی ژنراتور، Tm گشتاور



شکل (۲) - سیستم تک ماشینه- شین بی نهایت مورد مطالعه

ورودی FLC را که توسط ضرائب بهره ورودی تنظیم شده‌اند، به مقادیر فازی تبدیل می‌کند. موتور محرک منطق فازی با استفاده از قوانین فازی موجود، عملکرد کنترلی مناسب را استخراج می‌کند. سپس سیگنال کنترلی فازی توسط واحد غیر فازی کننده به مقداری صریح جهت اعمال به سیستم تبدیل می‌شود. [۴]

برای طراحی کنترل کننده فازی مورد نظر باید مراحل زیر را انجام دهیم:

۱-۴) تعیین اهداف کنترل:

در اینجا هدف ما از کنترل TCSC بهبود حالت گذرا و جلوگیری از ناپایداری ژنراتور می‌باشد.

۲-۴) انتخاب ورودیهای کنترل کننده:

در کنترل کننده های کلاسیک TCSC با فیدبک گیری از سرعت ژنراتور، زاویه توان، توان انتقالی یا پارامترهای دیگر و مقایسه با مرجع مناسب، با تغییر راکتانس TCSC عمل کنترل انجام می‌شود. در اینجا برای کنترل کننده فازی TCSC از سرعت ژنراتور که مهمترین پارامتر برای تشخیص پایداری است نمونه برداری می‌کنیم.

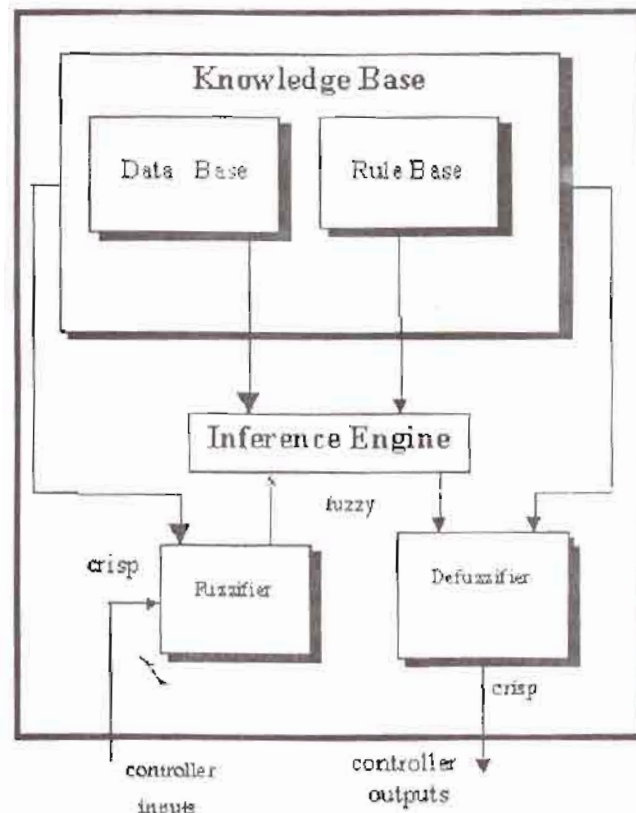
مکانیکی ورودی به ژنراتور، گشتاور الکتریکی خروجی از ژنراتور، ضریب میرایی و $\omega_0 = 2\pi f_0$ میباشند. با در نظر گرفتن E' بعنوان ولتاژ داخلی ماشین در حالت گذرا و V بعنوان ولتاژ شین بی نهایت، توان الکتریکی خروجی ژنراتور به صورت زیر است:

$$P_e = \frac{E'V}{X_{eq} + X_{eqTCSC}} \sin \delta \quad (5)$$

که X_{eq} راکتانس معادل خطوط انتقال و ترانسفورماتورها و X_{eqTCSC} راکتانس معادل TCSC می‌باشد که با توجه به استراتژی کنترلی مورد استفاده در حالت‌های کاری مختلف سیستم بدست می‌آید. پارامترهای سیستم شبیه‌سازی شده در این مقاله در ضمیمه آورده شده است.

۴- کنترل کننده فازی TCSC

ترکیب اصلی یک FLC استفاده شده در این مقاله می‌تواند با چهار جزء اصلی مانند شکل (۳) نمایش داده شود [۴]: واحد فازی کننده (Fuzzifier)، پایگاه دانش (Knowledge base)، موتور محرک (Inference engine) و واحد غیر فازی کننده (Defuzzifier). واحد فازی کننده با استفاده از توابع عضویت نرمال، مقادیر صریح

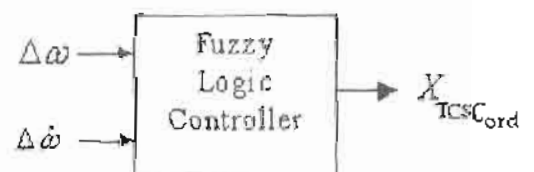


شکل (۳): دیاگرام شماتیک کنترل کننده فازی

۳-۴) تعیین مجموعه عبارات متغیرهای ورودی و توابع عضویت:

با توجه به محدوده قابل تغییر متغیرهای ورودی، در اینجا برای سرعت و شتاب از پنج متغیر زیبایی منفی بزرگ (NB)، منفی کوچک (NS)، صفر (ZE)، مثبت کوچک (PS) و مثبت بزرگ (PB) که هر یک معرف یک عدد فازی هستند استفاده کرده‌ایم. توابع عضویت متغیرهای ورودی بصورت گوسی و تابع عضویت متغیر خروجی را بصورت مثلثی در نظر گرفته‌ایم.

در اولین کنترل کننده فازی ارائه شده، فقط از سرعت جهت بهبود عملکرد سیستم استفاده شد ولی در شبیه‌سازی مشاهده شد که عملکرد کلی سیستم بهبود بخشیده می‌شود ولی زمان قرار سیستم زیاد است. بنابراین از سیگنال تغییرات سرعت نسبت به زمان (شتاب) نیز جهت تهیه سیگنال کنترلی و بهبود عملکرد سیستم استفاده نموده‌ایم (شکل (۴)).



شکل (۴): دیاگرام شماتیک کنترل کننده فازی TCSC

۴-۴) انتخاب فاکتور مقیاس (Scaling Factor):

در اینجا تمامی توابع عضویت در فاصله [۱و-] نرمال‌سازی شده‌اند و فاکتورهای مقیاس مناسب با استفاده از شبیه‌سازی‌های مکرر برای داشتن بهترین پاسخ محاسبه شده‌اند.

۴-۵) تعیین قواعد کنترلی و پایگاه قواعد:

در اینجا با داشتن پنج تابع عضویت برای ورودی‌ها، پایگاه قواعد دارای ۲۵ قاعده کنترلی است. اگر تعداد عبارات و توابع عضویت بیشتر شوند دقت بهتر می‌شود. با شبیه‌سازی سیستم با ۷ عبارات و ۴۹ قاعده تفاوت محسوسی با حالت ۵ عبارتی مشاهده نشد و برای اینکه زمان تصمیم‌گیری کمتر شود از همان کنترل‌کننده با ۵ عبارت در ورودی‌ها استفاده می‌کنیم.

قواعد کنترلی با استفاده از اطلاعات فیزیکی در مورد سیستم یا دانش فرد خبره بدست آیند. جدول (۱) قواعد کنترلی استفاده شده در مورد کنترل‌کننده TCSC را نشان می‌دهد.

تغیبات سرعت	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	NB	NB	NB	NS	NS
NS	NB	NB	NS	NS	NS
ZE	NB	NS	ZE	PS	PB
PS	PS	PS	PS	PB	PB
PB	PS	PS	PB	PB	PB

جدول (۱): مجموعه قوانین کنترلی

این جدول بر این اساس کلی تشکیل شده است که با کم شدن سرعت ژنراتور از سرعت سنکرون، باید توان کشیده شده از آن کم شود و بنابراین TCSC باید راکتانسی بصورت سلفی وارد مدار کند. و بر عکس در صورت زیاد شدن سرعت ژنراتور از سرعت سنکرون، باید با وارد کردن ظرفیت خازنی و کم کردن اهدانس سری، توان بیشتری از ژنراتور بکشیم تا سرعت آن افت کند.

۴-۶) انتخاب روش غیرفازی کردن:

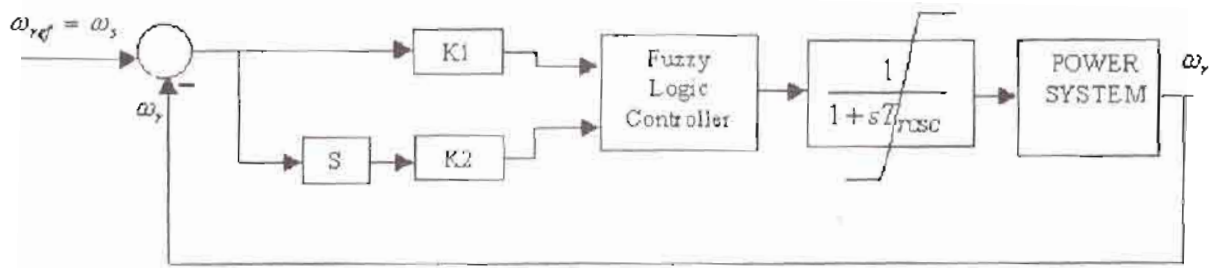
چون تعداد تقسیمات متغیرهای ورودی جهت کاهش قواعد کم در نظر گرفته شده است، باید از روشی استفاده کنیم که از یکنواختی کافی برخوردار باشد. در اینجا روش Centeroid بعنوان غیر فازی‌کننده استفاده شده است.

۵- شبیه‌سازی

با توجه به توضیحات ارائه شده در قسمتهای قبل سیستم مطابق شکل (۵) و با شرایط زیر شبیه‌سازی شده است:

الف - در حالت‌های مختلف جبران‌سازی، مدار قدرت TCSC بعد از دریافت سیگنال فرمان بانرخهای مختلفی به مقدار حالت ماندگار خودش می‌رسد (حداقل ۲-۱ سیکل و حداکثر ۱۰-۸ سیکل [۱]). بنابراین TCSC می‌تواند بعنوان یک المان پرفاز درجه یک در نظر گرفته شود که ثابت زمانی آن T_{TCSC} می‌باشد. در اینجا $T_{TCSC} = 20 \text{ ms}$ در نظر گرفته شده است.

ب- حد بالایی و پایینی جبران‌سازی به ترتیب ۷۵٪ (خازنی) و ۲۵٪ (سلفی) می‌باشد.



شکل (۵): بلوک دیاگرام شماییک سیستم شبیه سازی شده

سیستم قدرت پیشنهاد شد. کنترل کننده فوق برای بدترین نوع خطا طراحی شده و سپس با شبیه سازی توانایی آن در سایر خطاها مشاهده شد. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که کنترل کننده فازی طراحی شده می تواند بطور مؤثر پایداری گذرا را بهبود بخشیده و به سرعت نوسانات توان، سرعت و زاویه روتور را میرا سازد. در بیشتر مواقع رسیدن به مقدار نهایی بدون نوسان انجام می شود و مهمتر اینکه کنترل کننده نسبت به تغییر نوع و موقعیت خطا مقاوم می باشد. مقایسه نتایج با نتایج مرجع [۵] نشان دهنده بهتر بودن کنترل کننده فازی نسبت به کنترل کننده کلاسیک می باشد.

۶- مراجع

[1] : "FACTS- powerful systems for flexible power transmission" , "ABB Review 5/1999 PP 8-12

[2] : Xiaobo Tan ,Luyuan Tong,Naiyao Zhang..., "A Fuzzy Control Scheme for Thyristor Controlled Series Compensation in Transient of Power System" . Power system Technology, 1998, Vol. 1, PP. 441-445

ج- مقادیر Scaling Factors برای بدترین نوع خطا (روی شین ژنراتور) و جهت داشتن پاسخ مناسب تنظیم شده اند و بجا دور شدن محل خطا از ژنراتور وضعیت بهتر می شود. مقدار فاکتور تصحیح برای سرعت و شتاب به ترتیب ۲۹۰ و ۱۰ در نظر گرفته شده است.

د- خطاهای مختلفی در سیستم رخ داده و به روشهای مختلف رفع می شود. نتایج شبیه سازی در حالت های مختلف در شکل های (۶) تا (۹) آمده است. در شکل (۶) پاسخ سیستم به خطای اتصال کوتاه سه فاز در شین فرستنده در دو حالت سیستم بدون وجود TCSC (منحنی خط چین) و با وجود TCSC فازی (منحنی توپر) رسم شده است. دیده می شود که سیستم با وجود TCSC فازی بطور مناسبی پایدار می ماند. خطاهای دیگری نیز شبیه سازی شده اند که در شکل های (۷) و (۸) و (۹) آمده است.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله یک کنترل کننده مبتنی بر منطق فازی برای TCSC جهت بهبود پایداری گذرای

[3] : Larsen E. V., Clarke K., Miske S. A., Urbanek J., "Characteristics and rating considerations of Thyristor Controlled Series Compensation", IEEE transaction on power delivery , Vol.9, No.2, April 1994, PP 992-1000

[۴] حسن رستگار، مهرداد عابدی، محمد باقر منهاج، سید حمید فتحی "بهبود رفتار دینامیکی بارهای موتوری سنکرون به کمک جبران ساز توان راکتیو فازی"، مجموعه مقالات ششمین کنفرانس مهندسی برق ایران، اردیبهشت ۷۷، تهران

[۵] بهروز میرافضل، مهدی احسان، قدیر رادمان " بکار گیری جبران کننده سری کنترل شده با ترستور (TCSC) در بهبود پایداری گذرا" مجموعه مقالات ششمین کنفرانس مهندسی برق ایران، اردیبهشت ۷۷، تهران

ضمیمه :

پارامترهای سیستم شبیه سازی شده

- ژنراتور :

$$S = 2250MVA, H = 5 \text{ sec}, f = 60 \text{ HZ}$$

$$\text{in pu} : X_d = 1.81, X_q = 1.76$$

$$X'_d = 0.3, X'_q = 0.65$$

$$X''_d = 0.23, X''_q = 0.25$$

$$X_l = 0.15, R_a = 0.003$$

$$T'_{do} = 8 \text{ sec}, T'_{qo} = 1 \text{ sec}$$

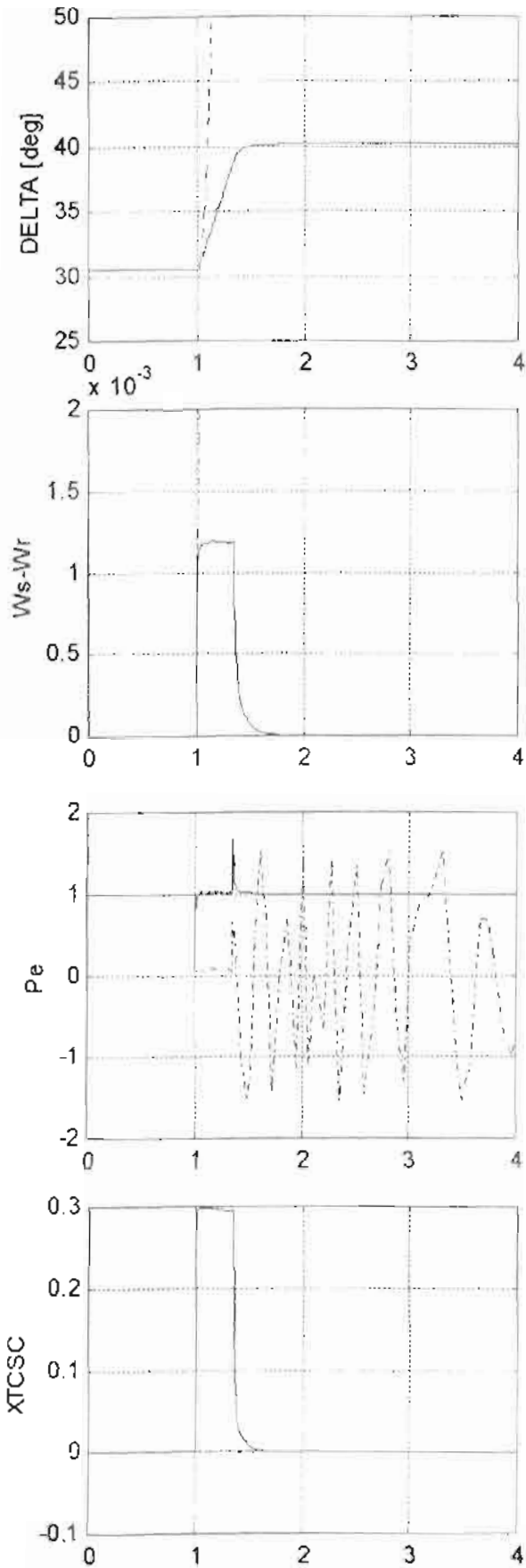
$$T''_{do} = 0.03 \text{ sec}, T''_{qo} = 0.07 \text{ sec}$$

- خط انتقال :

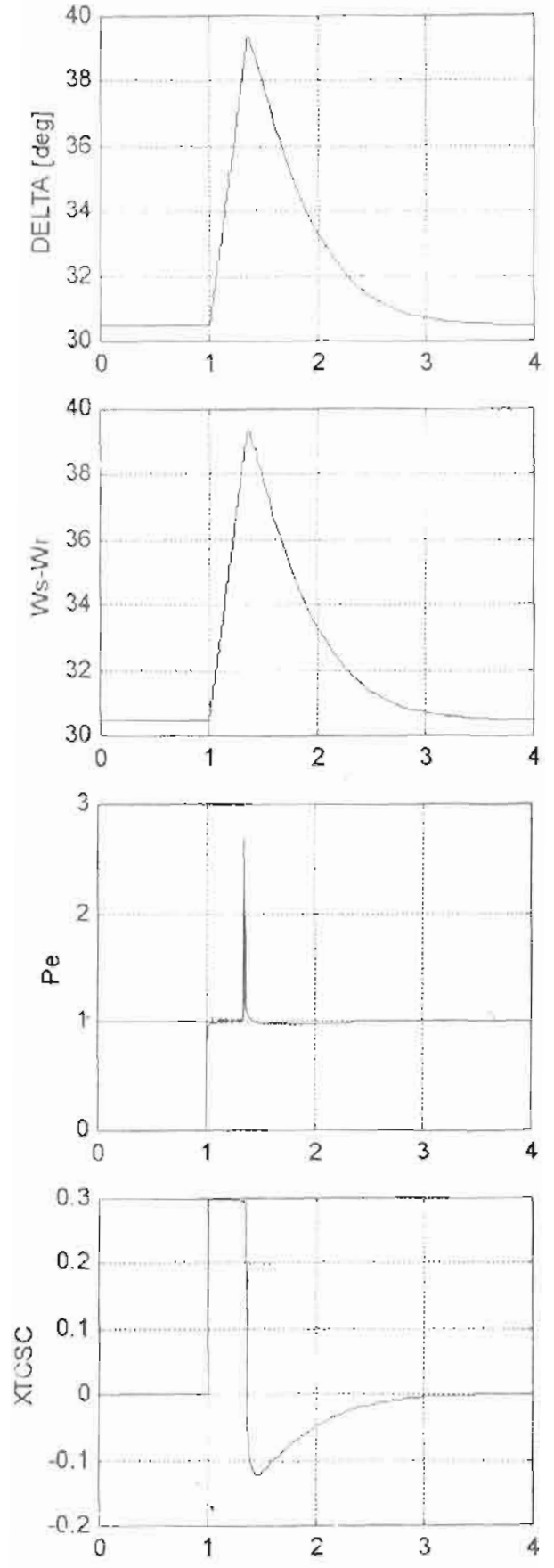
$$X = 0.3 \text{ pu}$$

- ترانسفورماتور :

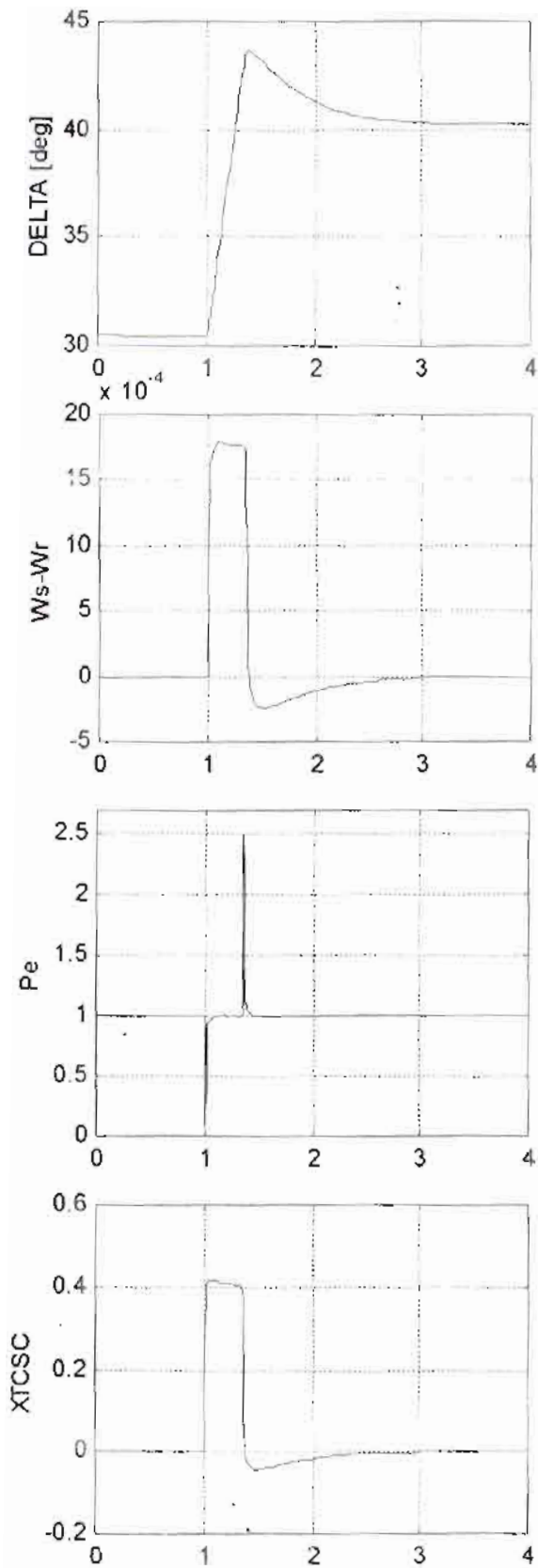
$$X_t = 0.1 \text{ pu}$$



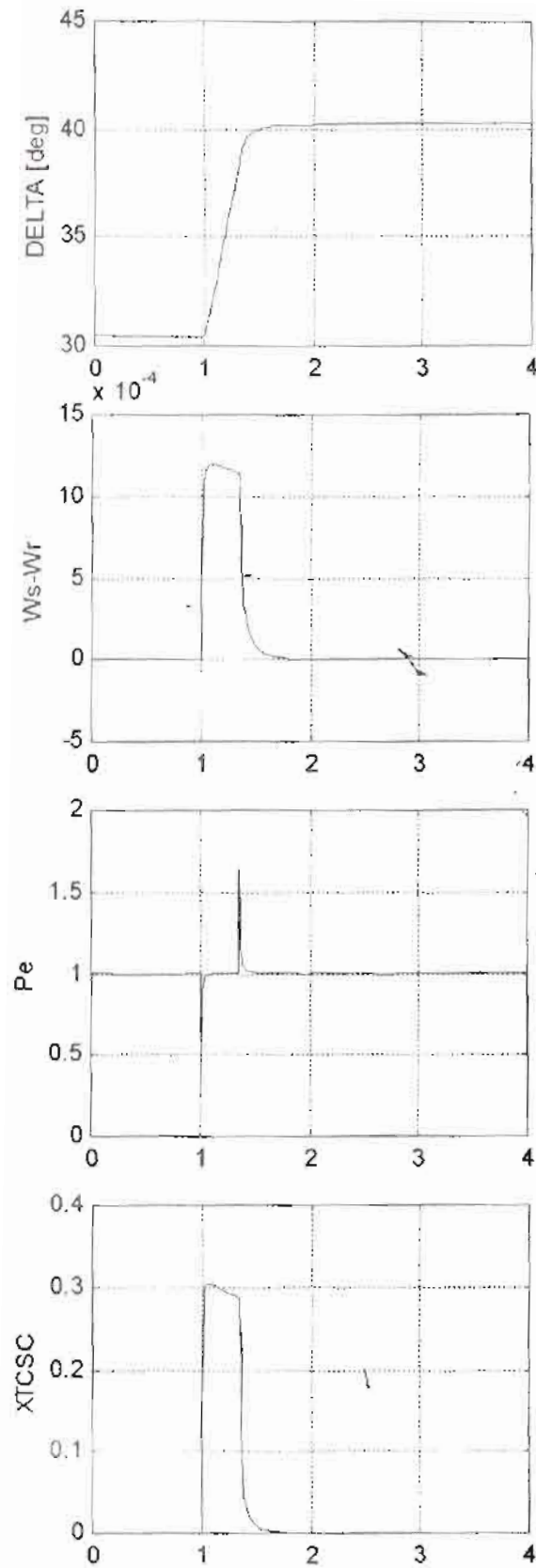
شکل (۶): اتصال کوتاه سه فاز در بیس فرستنده و رفع خطا پس از ۲۵۰ میلی ثانیه با باز شدن خطا در دو حالت وجود و عدم وجود TCSC



شکل (۷): اتصال کوتاه سه فاز در بیس فرستنده و رفع خودبخود خطا پس از ۳۵۰ میلی ثانیه



شکل (۸): اتصال کوتاه سه فاز در باس گیرنده و رفع خطا پس از ۳۵۰ میلی ثانیه با باز شدن یکی از خطوط



شکل (۹): خطای سه فاز در وسط یکی از خطوط و باز شدن خط پس از ۳۵۰ میلی ثانیه