

با وجود اینکه روش تابع انرژی یک روش استاندارد برای ارزیابی پایداری دینامیکی شبکه است ولی استفاده از آن در شرایطی که سیستم به اندازه کافی بزرگ بوده و شامل ادوات FACTS می‌گردد، به دلیل ایجاد معادلات دیفرانسیل با درجه بالا، بسیار پیچیده خواهد بود. تکنیک تحلیل حساسیت مسیر^۱ (TS) می‌تواند در ارزیابی پایداری گذرا در سیستم‌های قدرت در شرایط‌های عملکردی مختلف نقش موثری داشته باشد. این شرایط مختلف می‌تواند مکان قرار گیری TCSC یا پارامترهای کنترلر TCSC باشد. از طرفی در تعیین پارامترهای کنترلر TCSC می‌توان از روش‌های بهینه سازی نظیر الگوریتم ژنتیک استفاده نمود که در این فصل به این مسائل پرداخته می‌شود.

۳-۱ استفاده از تکنیک حساسیت مسیر در جابایی TCSC

به طور کلی یک سیستم چند ماشینه را می‌توان با معادلات زیر مدل سازی نمود:

$$\dot{x} = f(x, y, \alpha), \quad x(t_0) = x_0$$

$$0 = g(x, y, \alpha), \quad y(t_0) = y_0$$

که در آن x نشان دهنده بردار متغیرهای حالت سیستم، y بردار متغیرهای جبری و α نشان دهنده بردار پارامترهای سیستم می‌باشد. حساسیت مسیر چنین سیستمی می‌تواند از طریق تغییر در پارامترهای سیستم، شرایط اولیه سیستم، و یا درجه سیستم محاسبه شود. اما در این گزارش تنها تمرکز خودمان را بر روی تغییر پارامترهای سیستم معطوف می‌کنیم. با ایجاد آشفتگی در پارامترهای سیستم معادلات مسیر حالت سیستم به صورت زیر نوشته می‌گردند:

$$\dot{w}_1 = \left[\frac{\partial f}{\partial x} \right] w_1 + \left[\frac{\partial f}{\partial y} \right] w_2 + \left[\frac{\partial f}{\partial \alpha} \right], \quad w_1(t_0) = 0$$

$$0 = \left[\frac{\partial g}{\partial x} \right] w_1 + \left[\frac{\partial g}{\partial y} \right] w_2 + \left[\frac{\partial g}{\partial \alpha} \right], \quad w_2(t_0) = 0$$

که در آن $w_1 = \frac{\partial x}{\partial \alpha}$ و $w_2 = \frac{\partial y}{\partial \alpha}$ نشانگر میزان حساسیت می‌باشند و با حل معادلات بالا می‌توان آن‌ها را بدست آورد. نکته دیگر این است که اگر پارامتر سیستم را به صورت اسکالر در نظر بگیریم از رابطه (۳-۱) به سادگی می‌توان حساسیت متغیر x را نسبت به پارامتر α به صورت تقریبی محاسبه نمود.

1. Trajectory Sensitivity

$$Sens = \frac{x_2 - x_1}{\alpha_2 - \alpha_1} = \frac{\Delta x}{\Delta \alpha} \quad (۱-۳)$$

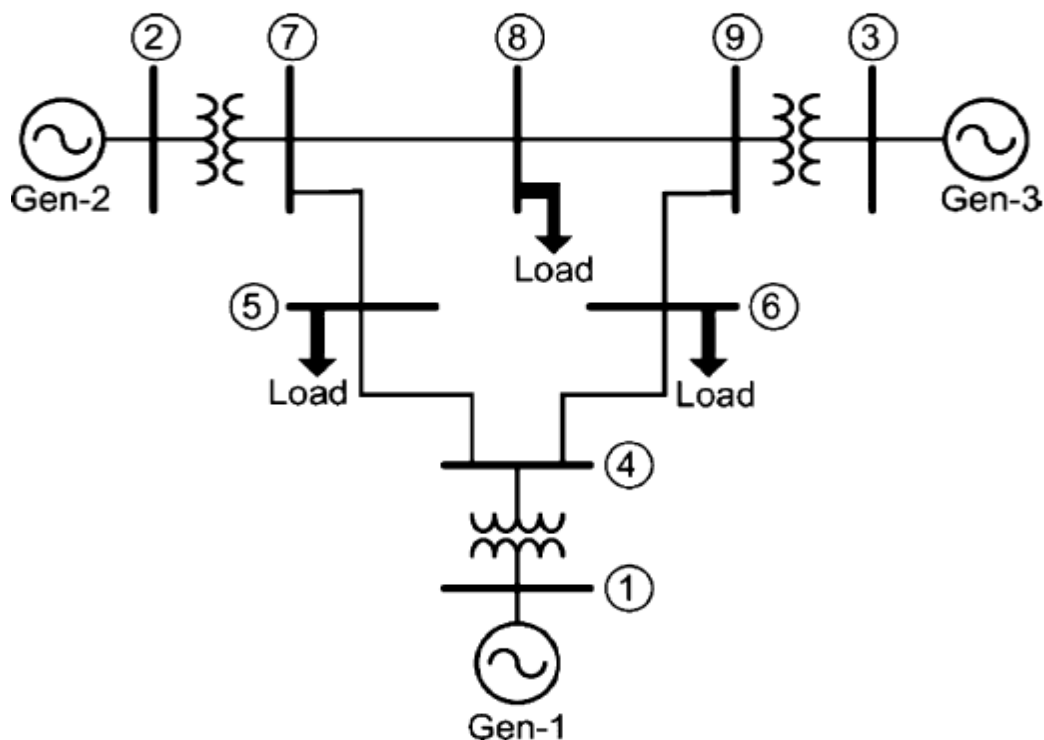
اما پس از حل معادلات حساسیت مسیر سیستم پارامتر جدید به نام اتا (η) تعریف می‌گردد که از رابطه (۳-۳) محاسبه می‌گردد. در رابطه (۲-۳) متغیر S_N تعریف شده است که با تغییرات متغیرهای زاویه توان و سرعت زاویه‌ای ماشین‌های سیستم نسبت به ماشین مرجع η در ارتباط است و با توجه به آن مقدار اتا از رابطه (۳-۳) بدست می‌آید.

$$S_N = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left[\left(\frac{\partial \delta_i}{\partial \alpha} - \frac{\partial \delta_j}{\partial \alpha} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta \omega_{r_i}}{\partial \alpha} \right)^2 \right]} \quad (۲-۳)$$

$$\eta = \frac{1}{\max(S_N)} \quad (۳-۳)$$

همانطور که از رابطه (۲-۳) مشخص است مقدار η به شدت به تغییرات زاویه توان و سرعت زاویه‌ای ماشین‌های سیستم نسبت به ماشین مرجع وابسته می‌باشد و از آنجایی که تغییرات متغیرهای زاویه توان و سرعت زاویه‌ای به شدت در پایداری گذرای سیستم موثر می‌باشند. و هنگامی که سیستم به سمت ناپایداری پیش می‌رود نوسان در TS در مقادیر بزرگتر S_N به چشم می‌خورد که متناظر با مقادیر کوچکتر η است. η در واقع فاصله از ناپایداری را مشخص می‌کند و مقدار ایده‌آل برای η در نقطه ناپایداری صفر است. حال می‌خواهیم با استفاده از این روش تأثیر موقعیت TCSC را در مقدار η بسنجیم. به همین منظور یک سیستم با ۹ شین با ۳ ژنراتور را مطابق شکل (۳-۱) در نظر می‌گیریم. در این سیستم یک خطای سه فاز متقارن با مدت زمان ۰/۱۵ در سه شین ۵، ۶، ۸ در نظر می‌گیریم و تأثیر حضور TCSC را روی هریک از خطوط با بدست آوردن ضریب حساسیت η بررسی می‌کنیم.

در این جا باید به این نکته توجه شود که خطای شبیه سازی شده از نوع خود پاکسازی می‌باشد، به این معنا که پس از وقوع خطا بدون ایزوله کردن خط خطادار خطا پاکسازی می‌گردد و تغییر ساختاری در شبکه ایجاد نمی‌شود.



شکل (۱-۳): نقشه تک خطی سیستم ۹ شین مورد مطالعه

در جدول (۱-۳) مقدار η به ازای قرار دادن TCSC به صورت حلقه باز و بدون کنترلر، در خطوط مختلف آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در هنگام وقوع خطا در شین‌های ۸ و ۵ بالاترین ضریب η هنگامی است که TCSC در خط ۶-۹ قرار داشته باشد و به همین روای در هنگام وقوع خطا در شین ۶ بالاترین ضریب η هنگامی است که TCSC در خط ۵-۷ قرار داشته باشد.

جدول (۱-۳): تغییرات η با توجه به تغییر مکان TCSC

Fault near bus	TCSC in line					
	4-5	5-7	4-6	6-9	7-8	8-9
5	0.6827	1.1081	1.0411	1.1363	0.9953	1.0065
6	1.0743	1.2423	0.6850	1.0727	0.9493	0.9603
8	1.0464	1.0346	1.0331	1.0795	1.0626	0.9462

بنابراین بهترین مکان از نقطه نظر پایداری این دو خط می‌باشند که باید عوامل اقتصادی و ... نیز برای انتخاب یکی از این دو خط مورد بررسی قرار گیرد تا بهترین مکان برای نصب TCSC انتخاب گردد.

روش دیگری که برای مکان یابی نصب استفاده می‌گردد به این صورت می‌باشد که با شبیه سازی وقوع خطا روی شین‌های متفاوت و قرار دادن TCSC در مکان‌های متفاوت CCT را برای هریک اندازه‌گیری کرده و حالتی که کمترین CCT را دارا می‌باشد به عنوان بحرانی ترین حالت در نظر گرفته شده و TCSC در آن جا نصب می‌گردد. جدول (۲-۳) مربوط به حالت‌های مختلف نصب TCSC می‌باشد که برای هریک CCT اندازه‌گیری شده است و همانطور که مشاهده می‌شود بحرانی ترین حالت مربوط به ۵-۷ در وقوع خطا در باس ۷ می‌باشد. باید به این نکته توجه شود که در این روش خطای شبیه‌سازی شده از نوع خود پاکسازی نمی‌باشد و خطا با قطع خط خطا دار پاکسازی می‌گردد [۵].

جدول (۲-۳): CCT برای موقعیت‌های مختلف TCSC

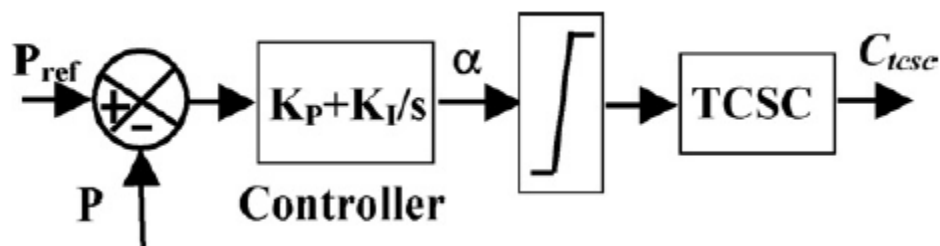
Faulted Bus No.	Bus to bus No. of line to be removed		CCT
	From	To	Sec.
4	4	5	0.3
4	4	6	0.3
5	5	4	0.35
5	5	7	0.31
6	6	4	0.44
6	6	9	0.38
7	7	5	0.16
7	7	8	0.18
8	8	7	0.25
8	8	9	0.3
9	9	6	0.21
9	9	8	0.23

۲-۳ پارامترهای کنترلر TCSC

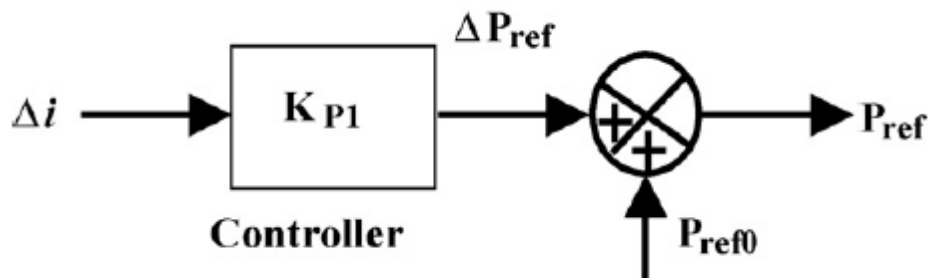
پس از پیدا کردن مکان بهینه TCSC باید به دنبال روش‌های تنظیم پارامترهای کنترلر TCSC باشیم تا با تنظیم مناسب آن‌ها بتوانیم پایداری گذرا را بهبود بخشیم. در این بخش برای تنظیم پارامترهای کنترلر TCSC از دو روش با دو تابع هدف متفاوت و همچنین دو کنترلر متفاوت PI و Lag-Lead استفاده شده است و پس از ارائه هر روش نتایج شبیه‌سازی را در هنگام وقوع خطای سه فاز متقارن در سیستم شکل (۳-۱) بررسی می‌گردد.

۱-۲-۳ کنترلر PI

شکل (۳-۳) بلوک دیاگرام کنترلر PI به کارگرفته شده جهت کنترل زاویه آتش TCSC را نشان می‌دهد. همانطور که از بلوک دیاگرام کنترلر مشخص می‌باشد توان انتقالی خط با توان مرجع (P_{Ref}) مقایسه شده و سیگنال خطا به یک کنترلر PI با تابع تبدیل $K_P + \frac{K_I}{s}$ داده می‌شود. سپس خروجی کنترلر PI به یک محدود ساز داده می‌شود تا زاویه آتش را در محدوده خازنی امپدانس موثر TCSC نگه دارد. در مواردی که خطا با قطع کردن خط خطا دار پاکسازی می‌شود خود توان مرجع نیز نیاز به یک کنترلر دارد تا همواره با توجه به ساختار سیستم، توان مرجع مناسبی به عنوان ورودی به ساختار کنترلی داده شود. بلوک دیاگرام این کنترلر کمکی در شکل (۳-۴) نشان داده شده است [۶].

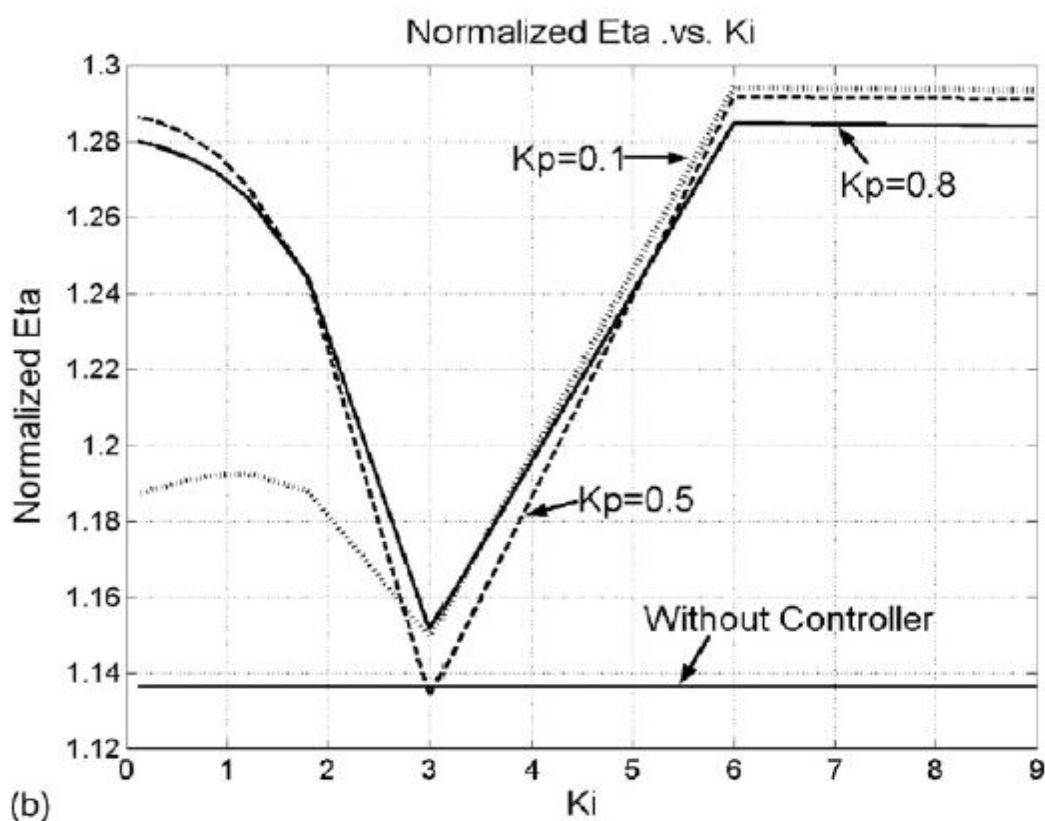


شکل (۳-۳): ساختار کنترلر PI برای TCSC



شکل (۳-۴): ساختار کنترلر توان مرجع (P_{Ref})

نمودار شکل (۳-۵) تغییرات ضریب حساسیت η را نسب به تغییرات پارامترهای کنترلر PI نشان می‌دهد. از طرفی با استفاده از بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک و با تعریف تابع هدف η می‌توان مقدار پارامترهای کنترلر PI را بگونه‌ای بدست آورد تا بهترین شرایط برای پایداری گذرا ایجاد گردد. نتایج این بهینه‌سازی در جدول (۳-۳) آورده شده است. مشاهده می‌شود که با ضرایب $K_P=0.8$ و $K_I=9$ ضریب حساسیت η بیشترین مقدار خود را دارد که این نشان دهنده افزایش پایداری گذرا با استفاده از این پارامترها می‌باشد.

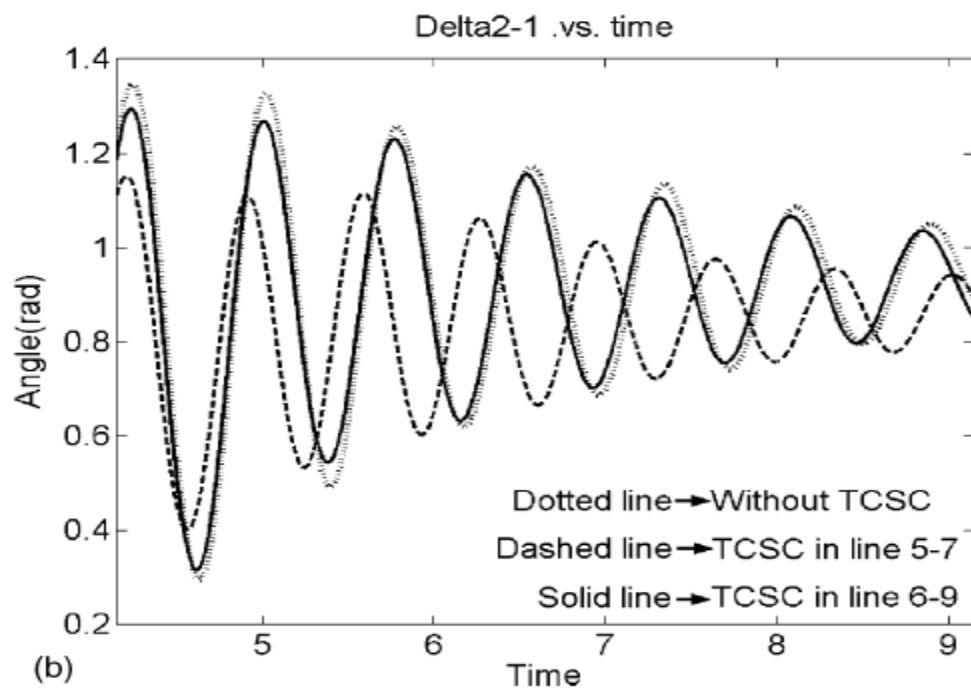


شکل (۳-۵): تغییرات ضریب حساسیت η نسبت به K_I در K_P های متفاوت

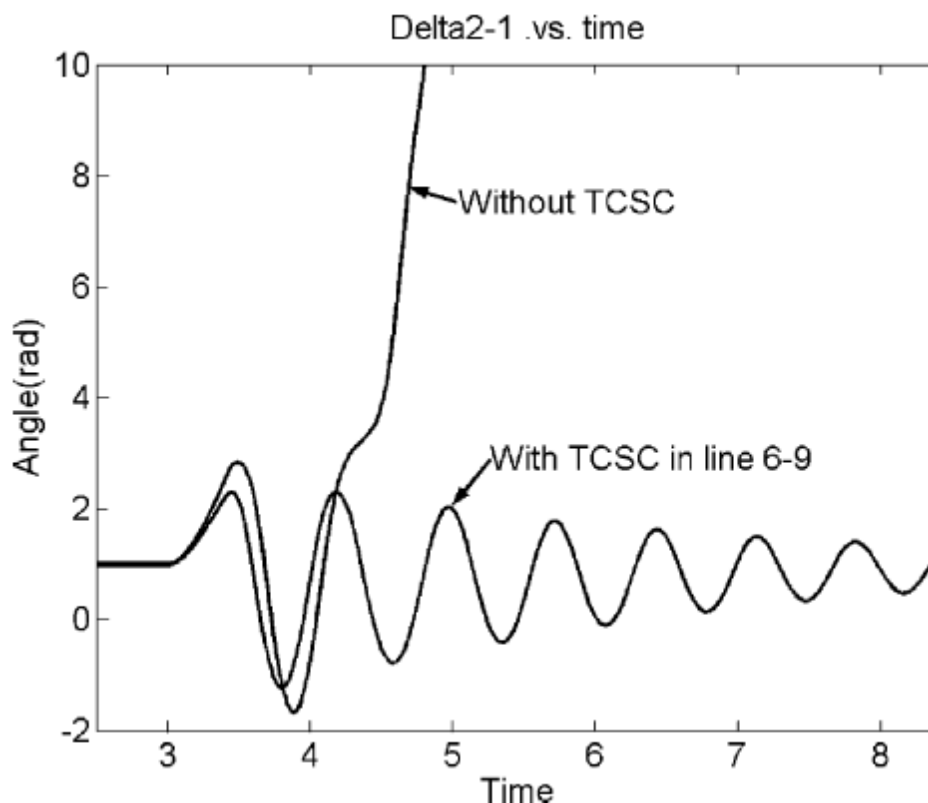
شکل (۳-۶) نمودار تغییرات زاویه توان را پس از وقوع خطا در سه حالت بدون حضور TCSC، نصب TCSC در خط ۵-۷، نصب TCSC در خط ۶-۹، با پارامترهای بهینه‌سازی شده را نشان می‌دهد و همانطور که مشاهده می‌شود و پیش‌بینی هم می‌شد حضور TCSC در خط ۵-۷، به علت بالاتر بودن ضریب حساسیت باعث افزایش بیشتر پایداری شد.

جدول (۳-۳): نتایج بهینه سازی پارامترهای کنترلر به ازای خطا در شین‌های متفاوت

TCSC in line	Self-clearing fault		
	Fault bus	(K_P, K_I)	η
5-7	5	0.8, 9.00	1.6357
	6	0.8, 9.00	1.7225
	8	0.5, 1.80	1.0906
6-9	5	0.1, 6.00	1.2944
	6	0.8, 9.00	1.3001
	8	0.8, 1.80	1.1583



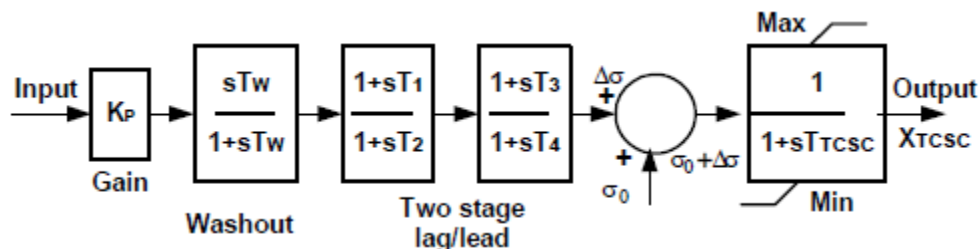
شکل (۳-۶): نمودار تغییرات زاویه توان $(\delta_2 - \delta_1)$ در سه حالت با پارامترهای بهینه شده کنترلرها



شکل (۳-۶): نمودار تغییرات زاویه توان ($\delta_2 - \delta_1$) در دو حالت بدون TCSC و با حضور TCSC در خط ۶-۹ و با پارامترهای بهینه شده کنترلرها با زمان پاکسازی بیش از CCT

۲-۲-۳ کنترلر Lead-Lag

مطابق شکل (۳-۷) یک ساختار معمولی Lead-Lag بعنوان کنترل کننده TCSC انتخاب شده است. بلوک تقویت کننده، بلوک شوینده سیگنال و دو پله Lead-Lag اجزای سیستم کنترل کننده را تشکیل می‌دهند. بلوک جبران‌ساز فاز، فاز پیش‌فاز را تدارک می‌بیند تا زاویه پس فاز بین ورودی و خروجی را جبران کند. بلوک شوینده، به صورت یک فیلتر بالا گذر با ثابت زمانی T_w به اندازه کافی بزرگ، به سیگنال‌ها اجازه می‌دهد تا با نوسانات همراه شده و بدون تغییر عبور نمایند. در این کنترلر ثابت‌های زمانی $T_1=T_3$ و $T_2=T_4$ می‌باشد. ورودی این کنترلر اختلاف سرعت زاویه‌ای ماشین‌ها نسبت به ماشین مرجع می‌باشد و خروجی آن تغییرات زاویه هدایت ترستورها می‌باشد که باید به TCSC اعمال گردد. این کنترلر با تعریف تابع هدف J که به صورت رابطه (۳-۴) تعریف می‌شود. می‌توان پارامترهای کنترلر را بهینه نمود [۲].



شکل (۷-۳): بلوک دیاگرام کنترلر Lead-Lag مربوط به TCSC

$$J = \sum \int_0^{t_1} [\Delta\omega_2(t, x) - \Delta\omega_1(t, x)]^2 dt \quad (۴-۳)$$

در رابطه (۴-۳)، $\Delta\omega_1 = (t, x)$ ، $\Delta\omega_2 = (t, x)$ نشانگر تغییرات سرعت نسبی ماشین‌های یک و دو به ازای مجموعه پارامترهای کنترلر (X) می‌باشند. هدف این بهینه‌سازی که با استفاده از الگوریتم ژنتیک استفاده می‌گردد، کمینه سازی تابع هدف به منظور بهبود زمان نشست و اورشوت و در نتیجه بهبود پایداری گذرا می‌باشد. محدودیت پارامترهای کنترلی به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$K_{PT}^{min} \leq K_P \leq K_P^{max}$$

$$T_1^{min} \leq T_1 \leq T_1^{max}$$

$$T_2^{min} \leq T_2 \leq T_2^{max}$$

◀ الگوریتم ژنتیک

یکی از الگوریتم‌های مورد استفاده برای بهینه سازی، الگوریتم ژنتیک است. این الگوریتم روشی برای بهینه‌سازی مسائل محدود و نامحدود بوده و براساس فلسفه انتخاب اصلح در طبیعت بنا شده است. در این الگوریتم بصورت تکراری جمعیتی از راه‌حل‌ها اصلاح می‌شود. در هر مرحله تعدادی از افراد را از جمعیت کنونی و بصورت تصادفی انتخاب می‌کند تا والدینی برای فرزندان مرحله بعد باشند. در نسل‌های متوالی، جمعیت به سوی راه حل بهینه پیش می‌رود. الگوریتم با تولید یک جمعیت اولیه تصادفی شروع می‌شود. سپس رشته‌ای از جمعیت‌های جدید را بوجود می‌آورد.

از این الگوریتم برای بهینه‌سازی پارامترهای کنترلر TCSC استفاده شده است. به همین منظور یک ست کامل از پارامترهای تنظیم کنترلر تعریف و بعنوان یک فرد در نظر گرفته می‌شود. با اختصاص مقادیر اولیه متفاوت، تعداد افراد جمعیت در حدی که مدنظر است انتخاب می‌شود سپس با این مقادیر تابع هدف J محاسبه می‌گردد. پارامترهای استفاده شده در این الگوریتم برای بهینه‌سازی پارامترها و نتایج بهینه سازی در جداول (۳-۴) و (۳-۵) آورده شده است [۲].

جدول (۳-۴): پارامترهای استفاده شده در الگوریتم ژنتیک

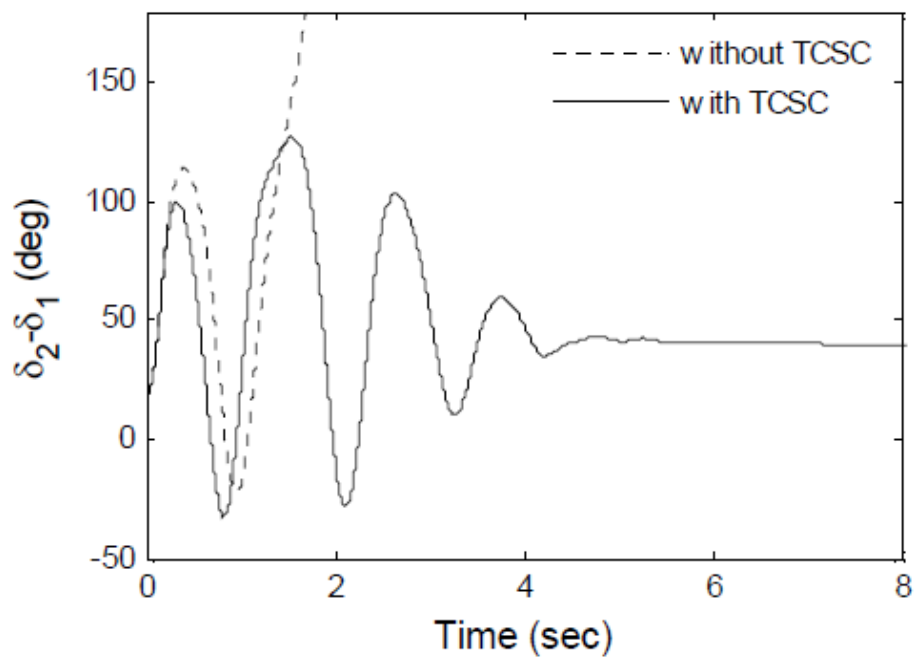
Parameter	Value/Type
Maximum generations	100
Population size	50
Type of selection	Normal geometric [0 0.08]
Type of crossover	Arithmetic [2]
Type of mutation	Nonuniform [2 100 3]
Termination method	Maximum generation

جدول (۳-۵): پارامترهای بهینه شده بدست آمده و محدوده پارامترها

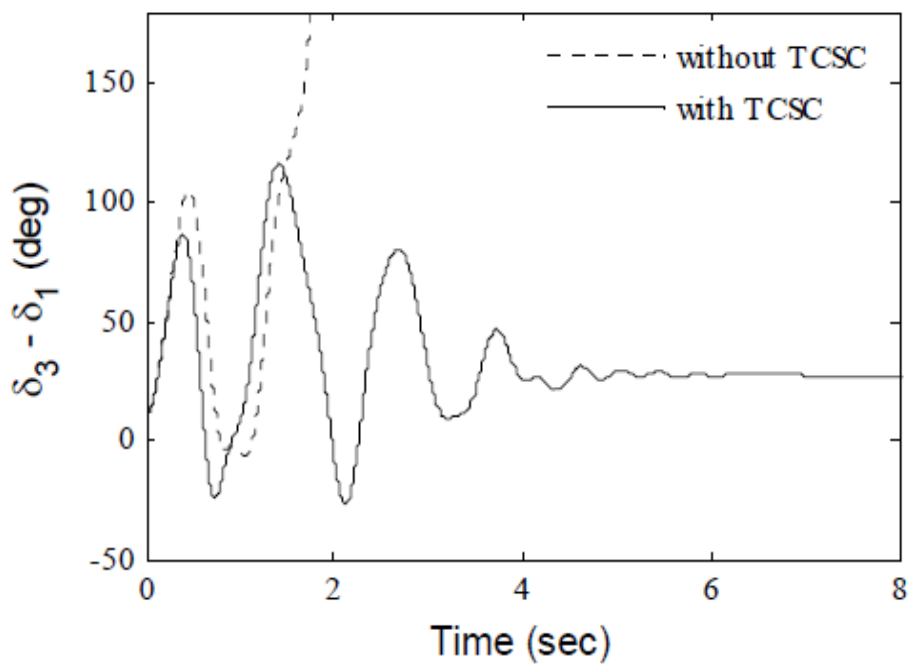
Parameters	Gain	Time constants	
	K_P	T_1	T_2
Minimum range	10	0.01	0.01
Maximum range	70	0.5	0.5
Obtained parameters	30.539	0.3861	0.1719

حال با استفاده از کنترلر طراحی شده می‌توانیم به بررسی وضعیت پایداری گذرای سیستم با وجود کنترلر با پارامترهای بهینه‌شده، می‌پردازیم.

◀ شبیه سازی خطا در باس ۷ با زمان پاکسازی حداکثر ۰/۱۵۲ ثانیه

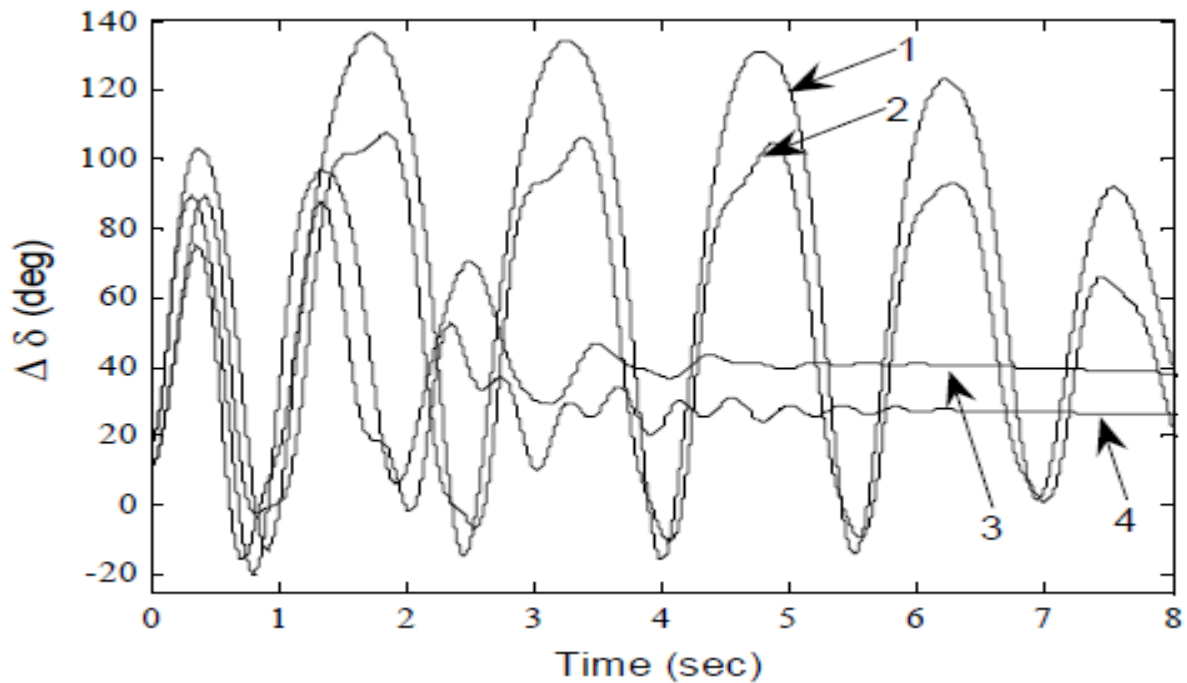


شکل (۸-۳): نمودار زوایای نسبی ماشین های ۱۲



شکل (۹-۳): نمودار زوایای نسبی ماشین های ۱۳

◀ شبیه سازی خطا در باس ۷ با زمان پاکسازی ۰/۱۳۴ ثانیه



1: $\delta_2 - \delta_1$; 2: $\delta_3 - \delta_1$:without TCSC controller

3: $\delta_2 - \delta_1$; 4: $\delta_3 - \delta_1$:with TCSC controller

شکل (۳-۱۰): نمودار زوایای نسبی ماشین‌ها

۳-۳ جمع بندی

جایابی بهینه کنترلر و بهینه‌سازی پارامترهای آن یکی از مهم‌ترین گام‌های طراحی TCSC می‌باشد که در این فصل برخی از روش‌های آن مورد بررسی قرار گرفت. همانطور که از نتایج بهینه‌سازی مشاهده می‌گردد با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی پارامترهای پایداری گذرا از جمله زمان نشست و اورشوت زاویه و سرعت زاویه‌ای روتورهای ماشین‌ها به نحو قابل قبولی بهبود پیدا کرد و در شرایطی که زمان پاکسازی خطا بزرگتر از CCT باشد باعث می‌شود که سیستم حالت سنکرونیزم خود را حفظ نماید.