

در این فصل جهت سادگی کار، بررسی تأثیر حضور TCSC بر سیستم الکترومکانیکی در یک سیستم تک ماشینه و با استفاده از روش تابع انرژی صورت می‌پذیرد. به همین منظور ابتدا یک مقدمه ای از مدل‌های ریاضی سیستم و معادلات مرتبط با آن بیان می‌گردد سپس به بررسی تأثیر TCSC در این معادلات و تأثیر پارامترهای مختلف آن در پایداری گذرا پرداخته می‌شود.

۲-۱ تحلیل پایداری گذرا در سیستم‌های قدرت

ساده‌ترین روش برای بررسی پایداری گذرا، روش قدم به قدم حل معادله دیفرانسیل است. در این روش، معادلات حالت قبل از خطا، حین خطا و پس از خطای سیستم با یک روش عددی مناسب حل می‌شوند و تغییرات زوایای بار واحدهای مختلف به دست می‌آیند. اگر تمام زوایای بار پایدار باشند، سیستم پایدار است.

یکی از مهمترین عواملی که در بحث پایداری گذرا تعریف می‌شود، زمان رفع خطای بحرانی^۱ (CCT) می‌باشد، زمانی که اگر رله‌ها در آن عمل نکنند سیستم حالت سنکرونیزم خود را از دست می‌دهد. زمان رفع خطای بحرانی از دو جهت مهم می‌باشد. الف: در تنظیم زمان عملکرد رله‌ها پس از خطا ب: در تعیین اندیس امنیت^۲ سیستم که همان فاصله زمانی بین زمان عملکرد رله‌ها و زمان بحرانی رفع خطا می‌باشد. با روش قدم به قدم حل معادلات دیفرانسیل سیستم نمی‌توان این عامل را مستقیماً محاسبه نمود.

روش اصولی‌ای که در این فصل بررسی می‌گردد تعیین پایداری سیستم‌های قدرت و زمان بحرانی به کمک تابع لیاپانوف می‌باشد. روش تابع انرژی یک روش مستقیم جهت تعیین پایداری سیستم‌های قدرت است. در این روش ابتدا انرژی بحرانی^۳ سیستم محاسبه می‌شود و با استفاده از آن، زمان رفع خطای بحرانی به دست می‌آید [۳].

۲-۱-۱ مدل سیستم تک ماشینه برای بررسی پایداری گذرا

اولین قدم در مطالعه یک سیستم قدرت تعریف مدل مناسب برای آن است. همانطور که در فصل مقدمه بیان شد در مطالعه حالت گذرای سیستم قدرت برخلاف مطالعات حالت دینامیکی به علت وقوع اغتشاش بزرگ، از مدل‌های

1. Critical Clearing Time

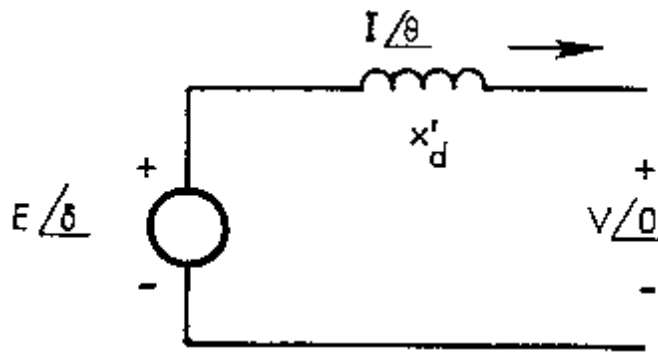
2. Security Index

3. Critical Energy

غیر خطی استفاده می‌گردد. در این جا نیز از یک تک ماشینه با فرضیات زیر جهت مدل سازی استفاده گردیده است:

۱- ژنراتور سنکرون با مدل درجه ۲ (فقط معادلات بخش مکانیکی روتور)

۲- ژنراتور، ثطب صاف می‌باشد ($JX = JX_d = JX_q$)



شکل (۱-۲): یک مدل ساده برای بخش الکتریکی ماشین سنکرون در مطالعات پایداری گذرا

با توجه به معادلات نوسان داریم:

$$P_m - \frac{EV_B}{X} \sin \delta = J \frac{d^2 \delta}{dt^2} + B \frac{d\delta}{dt} \quad (۱-۲)$$

در مطالعات پایداری گذرا، به دلیل کوچک بودن ضریب اصطحکاک، برای سادگی محاسبات، معمولاً از مقدار اصطحکاک صرف نظر می‌کنند. ($B \approx 0$). اما برای استفاده از قضیه لیاپانوف باید از مدل بدون ورودی استفاده کرد. در همین راستا در مدل بالا تغییر متغیری داده می‌شود تا سیستم را به سیستم بدون ورودی تبدیل نمود [۳].

$$x_1 = \delta - \delta^s \quad (۲-۲)$$

$$P_m - P_e^s = 0 \quad (۳-۲)$$

با توجه به روابط (۱-۲) تا (۳-۲) داریم:

$$J \frac{d^2 x_1}{dt^2} = P_{Max} [\sin \delta^s - \sin(\delta^s + x_1)] \quad (۴-۲)$$

$$f(x_1) = P_{Max} [\sin \delta^s - \sin(\delta^s + x_1)] \quad (۵-۲)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_2 &= \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 &= -\frac{1}{j} f(x_1) \end{aligned} \right\} \quad (2-6)$$

۲-۱-۲ قضیه لیپانوف

قضیه لیپانوف بیان می‌دارد که اگر برای یک سیستم بدون ورودی تابع مثبت معین $V(x)$ را بتوان تعریف کرد به طوریکه مشتق آن نسبت به زمان، منفی نیمه معین باشد، سیستم پایدار است.

تعریف - $V(x)$ را مثبت معین می‌گویند هرگاه:

$$V(0)=0$$

$$V(x) > 0 \quad \forall x \neq 0$$

به همین صورت توابع منفی معین و منفی نیمه معین تعریف می‌شوند.

روش های مختلفی برای محاسبه تابع لیپانوف وجود دارد که در اینجا از روش انتگرال اول برای این منظور استفاده می‌گردد به این صورت که اگر سیستمی با معادلات زیر تعریف گردد:

$$\dot{x}_1 = f_1(x)$$

.

.

$$\dot{x}_n = f_n(x)$$

شرط لازم برای استفاده از این روش این است:

$$\sum_{i=1}^n \frac{\partial f_i}{\partial x} = 0 \quad (2-7)$$

حال با استفاده از روش بالا سعی می‌کنیم برای یک سیستم تک ماشینه با مدل بیان شده در بخش قبل تابع لیپانوف را تعریف کنیم که به صورت رابطه (۲-۸) نوشته می‌شود.

$$V(x) = \frac{1}{2} J x_2^2 + \int_0^{x_1} f(u) du \quad (2-8)$$

اگر مقادیر متغیرهای حالت سیستم تک ماشین را در رابطه بالا وارد نماییم در نهایت به رابطه (۹-۲) می‌رسیم.

$$V(x) = \frac{1}{2}J\omega^2 - P_{max}[\cos \alpha - \cos \delta^s] - (\delta - \delta^s)P_{max} \sin \delta^s \quad (9-2)$$

در رابطه بالا جمله اول انرژی جنبشی روتور، نسبت به نقطه تعادل است. جمله دوم انرژی پتانسیل ذخیره شده در میدان مغناطیسی و جمله سوم انرژی پتانسیل ذخیره شده در روتور می‌باشد [۳].

۲-۲ تأثیر TCSC در تابع لیپانوف برای سیستم تک ماشین

برای اینکه اثر TCSC را روی سیستم مشخص کنیم لازم است معادلات حالت سیستم را بار دیگر و این بار با حضور TCSC بازنویسی نماییم در همین راستا معادلات سیستم به شکل زیر در می‌آیند:

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega} \\ \dot{\sigma} \\ \dot{x}_{CSC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{D}{M} & -\frac{1}{M} & -\frac{K_{xp}}{M} \\ 1 & 0 & 0 \\ \frac{K_{CSC}}{T_{CSC}} & 0 & -\frac{1}{T_{CSC}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega \\ f(\sigma) \\ x_{CSC} \end{bmatrix}$$

همانطور که مشاهده می‌شود در حضور TCSC یک متغیر حالت جدید به سیستم اضافه می‌شود که به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$x_{CSC} = X_{CSC} - X_{CSC}^0 \quad (10-2)$$

$$\dot{x}_{CSC} = \frac{1}{T_{CSC}} [-x_{CSC} + K_{CSC}\omega] \quad (11-2)$$

در معادلات بالا T_{CSC} نشانگر ثابت زمانی TCSC می‌باشد و K_{CSC} نشانگر ضریب جبرانسازی می‌باشد. حال با استفاده از روش انتگرال اول که در بخش قبلی بیان شد بار دیگر تابع لیپانوف سیستم را محاسبه می‌نماییم.

$$V(x) = \frac{1}{2}M\omega^2 + \int_0^\sigma f(\tau)d\tau + \frac{1}{2} \frac{T_{CSC}}{K_{CSC}} K_{xp} x_{CSC}^2 \quad (12-2)$$

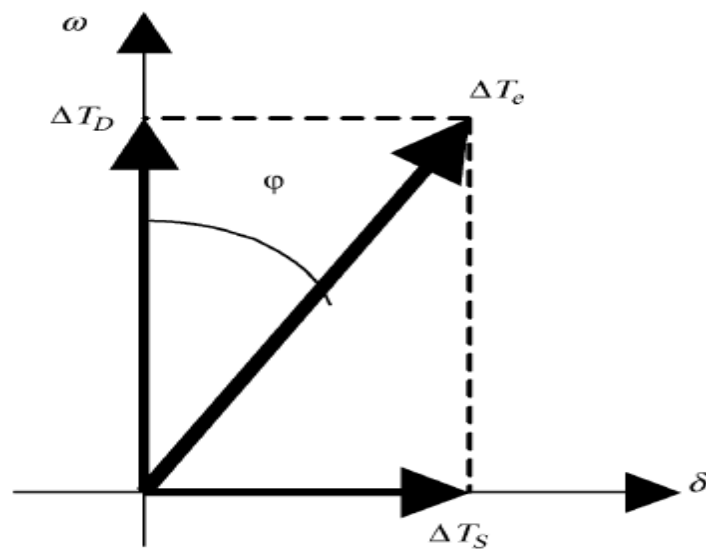
همانطور که مشاهده می‌شود به تابع لیاپانوف سیستم یک ترم اضافه گشته است که نشان دهنده افزایش انرژی پتانسیل سیستم می‌باشد. در رابطه (۱۲-۲) K_{xp} نشان دهنده تغییرات توان الکتریکی نسبت به تغییرات راکتانس موثر TCSC در نقطه تعادل می‌باشد و با رابطه زیر نشان داده می‌شود.

$$K_{xp} = \left. \frac{\partial P_e}{\partial X_{CSC}} \right|_{x^0} = k_x E^0 V \sin \delta^0 \quad (13-2)$$

حال به بررسی تأثیر پارامتر ثابت زمانی TCSC بر پایداری گذرای سیستم پرداخته می‌شود در همین راستا راکتانس موثر TCSC را به صورت رابطه (۱۴-۲) در نظر می‌گیریم که در آن φ زاویه تأخیر TCSC می‌باشد که رابطه مستقیمی با ثابت زمانی TCSC دارد.

$$X_{CSC} = K/\varphi\omega \quad (14-2)$$

همانطور که در شکل (۲-۲) مشاهده می‌شود در حضور TCSC گشتاور الکتریکی به دو گشتاور سنکرون کننده و گشتاور میراکننده تقسیم می‌گردد. همانطور که مشاهده می‌شود در صورت صفر بودن ثابت زمانی گشتاور سنکرون کننده برابر صفر می‌باشد و از طرفی دیگر در صورتی که زاویه تأخیر برابر ۹۰ درجه باشد گشتاور میراکننده برابر صفر خواهد شد.



شکل (۲-۲): گشتاور الکتریکی و مولفه‌های سنکرون کننده و میرا کننده آن

با توجه به توضیحات بالا در عمل می‌توان با تنظیم مقادیر پارامترهای TCSC بین گشتاور میراکننده و گشتاور سنکرون کننده مصالحه‌ای ایجاد نمود که موجب بهبود پایداری گذرای سیستم گردد [۴].

۳-۲ شبیه سازی تأثیر TCSC در افزایش پایداری سیستم تک ماشین

شکل (۳-۲) و (۴-۲) تأثیر حضور TCSC در یک سیستم تک ماشین با مشخصات زیر را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود در شکل (۳-۲) و بدون حضور TCSC سیستم سنکرونیزم خود را از دست می‌دهد و ناپایدار می‌شود ولی با توجه به شکل (۴-۲)، با حضور TCSC سیستم پس از مدتی میرا می‌شود. همچنین در شکل (۲-۴) تأثیر ثابت زمانی TCSC نیز نشان داده شده است که با کاهش ثابت زمانی TCSC اورشوت و زمان نشست سیستم پس از خطا کاهش می‌یابد [۴].

مشخصات سیستم:

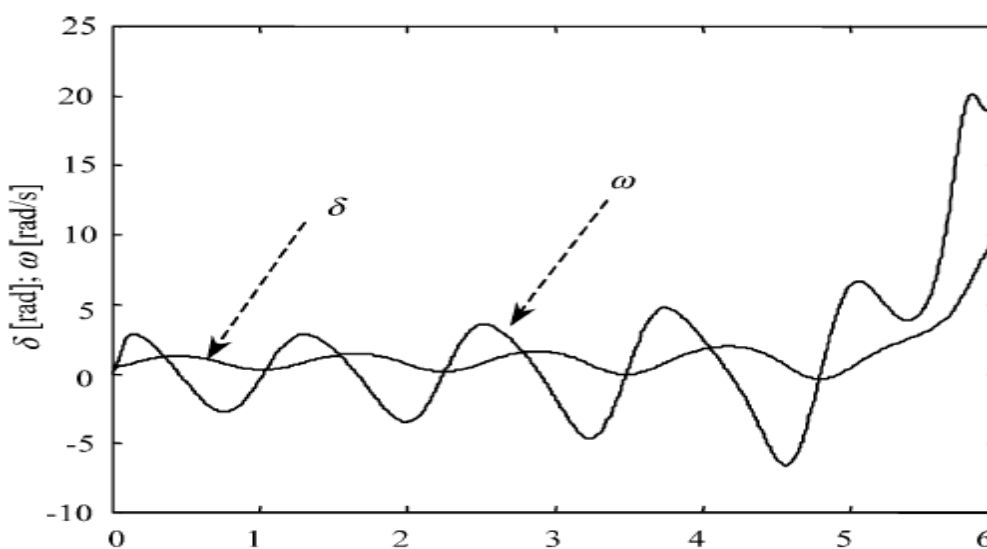
$$X_d = 0.7244 \text{ pu}; \quad X_q = X_d \quad M = 0.0545 \text{ s}^2 \quad D = 0.0055 \text{ s};$$

$$X'_d = 0.1328 \text{ pu}; \quad K_R = 30; \quad T_R = 0.06 \text{ s}; \quad X_e = 0.4 \text{ pu};$$

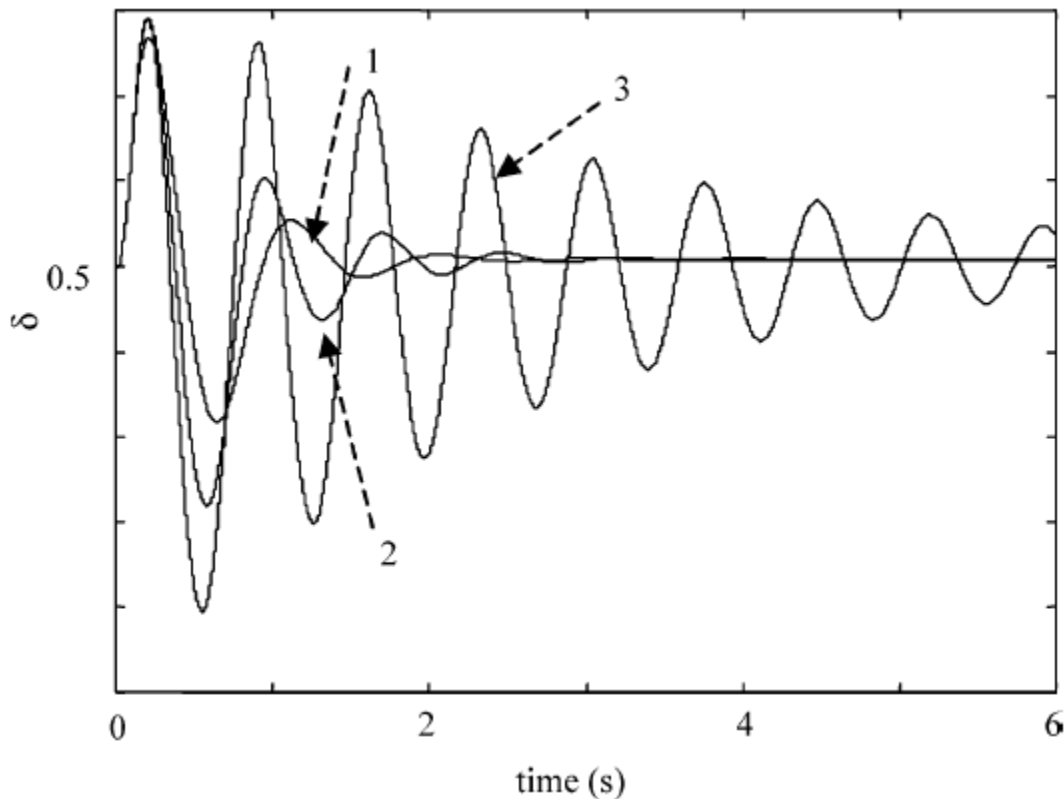
$$T_{CSC} = 0.1 \text{ s} \quad K_{CSC} = 0.05 \quad X_0^{CSC} = 0.2 \text{ pu} \quad P_e^0 = 1.5; \quad V = 0.9950 \text{ pu}; \quad V_T^0 = 1.0.$$

مشخصات خطا:

خطای اتصال کوتاه سه فاز متقارن با زمان پاکسازی ۰/۱ ثانیه



شکل (۳-۲): نمودار زاویه توان و سرعت زاویه ای ماشین پس از خطا بدون وجود TCSC



شکل (۴-۲): نمودار زاویه توان ماشین پس از خطا با وجود TCSC، ۱: $T_{CSC}=0.001s$ و ۲: $T_{CSC}=0.01s$ و ۳: $T_{CSC}=0.9030s$

۴-۲ جمع بندی

همانطور که در این فصل بررسی گردید با افزودن TCSC به یک شبکه با یک ماشین انریجی پتانسیل ذخیره شده در شبکه افزایش خواهد یافت که این امر ناشی از تقسیم گشتاور الکتریکی ماشین به دو مولفه گشتاور میرا کننده و سنکرون کننده است که گشتاور سنکرون کننده نقش بسیار مهمی را در افزایش این انرژی بازی می کند و از طرفی دیگر با افزایش گشتاور میراکننده زمان نشست پارامتر زاویه ولتاژ (δ)، که یکی از مهمترین پارامترهای ایجاد پایداری در سیستم قدرت می باشد، را کاهش می دهد. در فصل بعدی گزارش به بررسی تأثیر پارامترهای کنترلر TCSC در پایداری گذرا و همچنین جایابی مناسب آن پرداخته می شود.