

طراحی کنترل کننده مقاوم برای TCSC با روش تئوری پسخور کمی غیرخطی

اصغر اکبری فرود*

استادیار مهندسی برق، دانشگاه سمنان

*سمنان، کدپستی ۳۵۱۳۱۹۱۱۱

aakbari@semnan.ac.ir

(دریافت مقاله: دی ۱۳۸۶، پذیرش مقاله: خرداد ۱۳۸۷)

چکیده - یکی از روشهای جبرانسازی سری خطوط انتقال، استفاده از TCSC است. TCSC علاوه بر افزایش ظرفیت خطوط انتقال، می‌تواند در پایداری گذرا، میرایی نوسانات سیگنال کوچک و حتی پایداری ولتاژ اثر مثبت داشته باشد. برای بهبود عملکرد این وسیله، کنترل‌کننده‌های مختلفی طراحی شده است. بیشتر این کنترل‌کننده‌ها معمولاً در بهبود یکی از قابلیت‌های TCSC مؤثر هستند. در این مقاله، با استفاده از تئوری پسخور کمی غیرخطی^۱، کنترل‌کننده مقاومی برای TCSC طراحی شده که در بهبود عملکرد این وسیله در دو زمینه پایداری گذرا و میرایی نوسانات سیگنال کوچک، مؤثر است.

کلید واژگان: TCSC، تئوری پسخور کمی غیرخطی، پایداری گذرا، پایداری سیگنال کوچک.

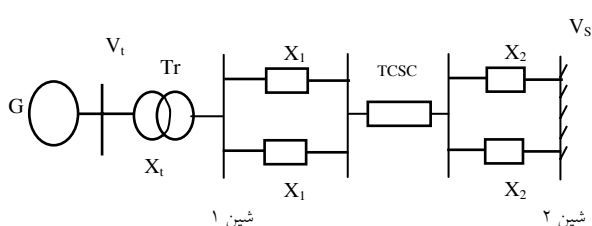
۱ - مقدمه

جبران‌ساز سری کنترل شده تریستوری (TCSC)^۲ یکی از ادوات FACTS^۳ است که به منظور بهبود پایداری گذرا و سیگنال کوچک و همچنین افزایش ظرفیت انتقال و کنترل توان عبوری از خطوط می‌تواند به کار گرفته شود [۱]. تحقیقات متعددی در زمینه ارائه الگوریتم‌ها و طراحی کنترل‌کننده‌هایی برای افزایش نقش TCSC برای عملکرد مطلوب هر یک از کاربردهای مزبور، انجام شده است. در اغلب این تحقیقات، کاربردهای TCSC را مستقل از هم در نظر گرفته و سعی در بهبود عملکرد یکی از کاربردهای TCSC، به صورت مستقل از

بقیه دارند. بیشترین این مقاله‌ها در زمینه ارائه الگوریتم‌ها و طراحی کنترل‌کننده‌هایی برای افزایش نقش TCSC در میرایی نوسانات سیگنال کوچک (محلی و بین ناحیه‌ای) می‌باشند [۲-۶]. برخی هم کنترل‌کننده‌هایی را برای بهبود پایداری گذرا پیشنهاد کرده‌اند [۷]. الگوریتم‌ها و کنترل‌کننده‌هایی که تنها بر بهبود یکی از قابلیت‌های TCSC مؤثرند، از کفایت لازم برخوردار نیستند و فقط برخی از مقالات، الگوریتم‌ها و کنترل‌کننده‌هایی را پیشنهاد کرده‌اند که عملکرد TCSC را در چند زمینه کاربردی، بهبود داده است. در [۸] با استفاده از H_{∞} ، کنترل‌کننده مقاومی برای TCSC طراحی شده که در بهبود پایداری گذرا و افزایش میرایی نوسانات و همچنین افزایش ظرفیت تبادل، نقش مثبتی دارد. با توجه به غیر همزمانی نیاز به قابلیت‌های TCSC، در تحقیقی دیگر، نوعی کنترل‌کننده سلسله

1. Nonlinear QFT
2. Thyristor-Controlled Series Compensator
3. Flexible AC Transmission Systems

بزرگی که با شین بی نهایت تخمین زده شده، متصل است. در ادامه این فصل، تشریح خواهیم کرد که کنترل کننده طراحی شده برای این سیستم، به صورت غیرمتمرکز بوده و از اندازه گیری های محلی استفاده می کند. همچنین دارای این ویژگی است که تمامی نامعینی های تأثیرگذار بر عملکرد TCSC، از سوی ژنراتور و شبکه را مدنظر قرار دهد. در این مقاله، مدل دینامیکی ژنراتور، همراه با کنترل تحریک در نظر گرفته شده است.



شکل ۱ سیستم تک ماشینی متصل به شین بی نهایت جبران سازی شده با TCSC در میانه راه

معادلات مکانیکی این سیستم:

$$\dot{\delta}(t) = \Delta\omega(t) \quad (1)$$

$$\Delta\dot{\omega}(t) = \frac{-D}{2H} \Delta\omega(t) + \frac{\omega_0}{2H} (P_m - P_e(t)) \quad (2)$$

$$P_e(t) = \frac{V_s E_q(t)}{X_{ds}} \sin \delta(t) \quad (3)$$

که در آن:

$$E_q(t) : \text{EMF در محور } q \text{ ژنراتور}$$

$$X_{ds} = X_t + X_d + \frac{1}{\gamma}(X_1 + X_2) - X_{TCSC}(t)$$

$$X_t : \text{راکتانس ترانسفورماتور}$$

$$X_d : \text{راکتانس محور } d \text{ ژنراتور}$$

$$V_s : \text{ولتاژ شین بی نهایت}$$

در بیشتر مطالعات پایداری، مدلی که برای TCSC در

نظر گرفته می شود، مطابق شکل ۲ است [۱].

مراتبی برای TCSC پیشنهاد شده [۹] که در آن سعی شده است تا داخل عملکرد بخشهای مختلف این کنترل کننده سلسله مراتبی، به حداقل برسد.

در این مقاله با استفاده از تئوری پسخور کمی غیرخطی [۱۰]، کنترل کننده مقاومی برای TCSC پیشنهاد شده و در طراحی این کنترل کننده، انواع نامعینی های ناشی از شبکه، ژنراتور و خود TCSC در نظر گرفته شده است. کنترل کننده پیشنهادی سعی می کند که با وجود انواع نامعینی ها، مشخصه های پاسخ زمانی یکی از متغیرهای مهم حالت سیستم را که زاویه (δ) است، در محدوده های مطلوب حفظ کند؛ بنابراین هم در بهبود پایداری گذرا و هم در پایداری سیگنال کوچک (میرایی مدهای بحرانی) مؤثر است که دو زمینه مهم کاربردی TCSC به شمار می روند. مقایسه عملکرد کنترل کننده پیشنهادی این مقاله با کنترل کننده معرفی شده در [۸] (که به منظور بهبود پایداری گذرا و میرایی نوسانات، طراحی شده)، نشانگر عملکرد بهتر کنترل کننده پیشنهادی ما است. کنترل کننده مقاوم پیشنهادی، کنترل کننده ای خطی بوده و بنابر این پیاده سازی آن نسبت به کنترل کننده های غیرخطی [۸، ۱۱] ساده تر است. این کنترل کننده به صورت غیرمتمرکز^۱ بوده و از اندازه گیری های محلی استفاده می کند.

در بخش دوم مقاله، مدل سازی ریاضی بیان و در بخش سوم الگوریتم پیشنهادی ارائه شده است. در بخش چهارم، طراحی کنترل کننده مقاوم برای یک مثال نمونه و نتایج عددی ارائه و در پایان نتیجه گیری آورده شده است.

۲- مدل سازی ریاضی

سیستمی را به صورت شکل ۱ در نظر می گیریم. در این سیستم، ژنراتور از طریق ترانسفورماتور و دو خط انتقال موازی که TCSC در میانه راه به آن اضافه شده، به شبکه

1. Decentralized

رابطه (۴) با استفاده از روابط (۱) و (۲) حاصل می‌شود.

$$\ddot{\delta}(t) = \Delta\dot{\omega}(t) = \frac{-D}{2H}\Delta\omega(t) + \frac{\omega_0}{2H}(P_m - P_e(t)) \quad (4)$$

با جایگذاری از رابطه (۳) در رابطه (۴)، رابطه (۵) حاصل می‌شود:

$$\ddot{\delta}(t) = \Delta\dot{\omega}(t) = \frac{-D}{\sqrt{2}H}\Delta\omega(t) + \frac{\omega_0}{\sqrt{2}H}\left(P_m - \frac{V_s E_q(t)}{X_{ds}} \sin \delta(t)\right) \quad (5)$$

روابط حاکم بر امیدانس‌های سیستم عبارتند از:

$$X_{ds} = X_t + X_d + \frac{1}{\gamma}(X_1 + X_r) - X_{TCSC}(t) = X_t - X_{TCSC}(t) \quad (6)$$

$$X_r = X_t + X_d + \frac{1}{\gamma}(X_1 + X_r) \quad (7)$$

باجایگذاری از رابطه (۶) و (۱) در رابطه (۵)، رابطه (۸) حاصل می‌شود:

$$\ddot{\delta}(t) = \frac{-D}{\sqrt{2}H}\dot{\delta}(t) + \frac{\omega_0}{\sqrt{2}H}P_m - \frac{\omega_0 V_s E_q(t) \sin \delta(t)}{\sqrt{2}HX_{ds}} \left(\frac{1}{X_t - X_{TCSC}(t)} \right) \quad (8)$$

رابطه (۸) به شکل زیر بازنویسی می‌شود.

$$\ddot{\delta}(t) = A\dot{\delta} + B - \frac{C(t)}{X_t - X_{TCSC}(t)} \quad (9)$$

که در آن:

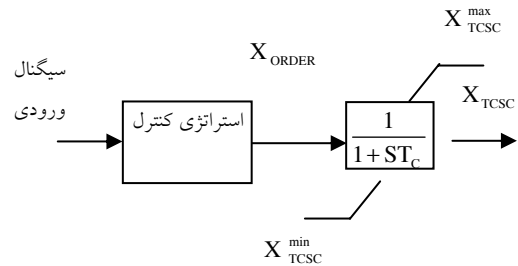
$$B = \frac{\omega_0}{\sqrt{2}H}P_m, \quad A = \frac{-D}{\sqrt{2}H}$$

$$C(t) = \frac{\omega_0 V_s E_q(t) \sin \delta(t)}{\sqrt{2}HX_{ds}}$$

رابطه (۱۰) با استفاده از رابطه (۹) حاصل می‌شود:

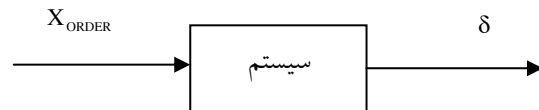
$$X_t \ddot{\delta}(t) - X_t A \dot{\delta}(t) + (-\ddot{\delta}(t) + A \dot{\delta}(t)) X_{TCSC}(t) = B(X_t - X_{TCSC}(t)) - C(t) \quad (10)$$

A و B کمیت‌هایی مستقل از زمان و C کمیتی وابسته به زمان است که بیشتر نامعینی‌های ناشی از ژنراتور را در خود دارد. با مشتق‌گیری از رابطه (۱۰)، رابطه (۱۱) حاصل می‌شود:



شکل ۲ مدل TCSC در مطالعات دینامیکی همراه با تابع کنترلی آن

به منظور طراحی کنترل‌کننده مقاوم برای TCSC طوری که بتواند علی‌رغم وجود نامعینی‌های مختلف، در عملکرد این وسیله در بهبود پایداری زاویه‌ای (پایداری گذرا و پایداری سیگنال کوچک)، مؤثر باشد، به مدل SISO به صورت شکل ۳ از سیستم مورد نیاز است. در این مدل، ورودی X_{TCSC} و خروجی زاویه (δ) است. در این صورت می‌توان با کنترل X_{TCSC} یعنی تعیین مناسب X_{ORDER} ، بر وضعیت δ تأثیر گذاشت و باعث بهبود پایداری شد. همچنین اگر بتوان کنترل‌کننده مقاومی برای این سیستم طراحی کرد، بدین معنا است که در برابر عدم قطعیت‌های مدل شده در طراحی کنترل‌کننده، δ با تعیین مناسب X_{ORDER} ، به طور مطلوب کنترل خواهد شد. این به معنای بهبود پایداری است. ذکر یک نکته نیز در اینجا لازم است و آن اینکه، حلقه کنترل دیگری نیز در نیروگاه وجود دارد که بر زاویه رتور ژنراتور مؤثر است و آن حلقه کنترل بار و فرکانس^۱ (LFC) است که بر شیرهای بخار اعمال می‌شود و کنترل توان مکانیکی ورودی به ژنراتور را بر عهده دارد. در این مطالعه، توان مکانیکی ورودی ژنراتور، ثابت در نظر گرفته شده است.



شکل ۳ مدل SISO سیستم

1. Load Frequency Control

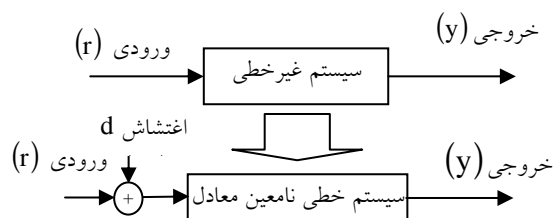
رابطه (۱۷) از رابطه (۱۶) به دست می آید: (۱۱)

$$X_{ORDER}(t) = -\frac{T_C}{B} \left(X \ddot{\delta}(t) - X \cdot A \dot{\delta}(t) + \frac{X \cdot \dot{\delta}(t)}{T_C} - \frac{X \cdot A \dot{\delta}(t)}{T_C} \right) \left(-\frac{B X}{T_C} + \frac{C(t)}{T_C} + E \right) \quad (17)$$

رابطه (۱۷) رابطه ای غیرخطی است که ارتباط بین X_{ORDER} و δ را برقرار می کند.

۳- الگوریتم پیشنهادی

تنوری پسخور کمی یکی از روشهای طراحی کنترل کننده های مقاوم است که توانایی بالایی در مدل سازی نامعینی های پارامتری دارد [۱۰] و [۱۲]. به منظور طراحی کنترل کننده مقاوم برای سیستم غیرخطی، یکی از روشها، روش دوم هورویتز است [۱۰]. در این روش، سیستم غیرخطی نامعین، به دو بخش غیرخطی و خطی نامعین تقسیم می شود. بخش غیرخطی، به صورت اغتشاش در ورودی و بخش خطی، به صورت یک سیستم خطی تغییر ناپذیر با زمان مدل می شود (شکل ۴).



شکل ۴ روش دوم هورویتز

با توجه به توضیحات فوق، بخشهای غیرخطی رابطه (۱۷) به صورت اغتشاش در ورودی در نظر گرفته می شوند. با اندکی محاسبات ریاضی، رابطه (۱۷) به رابطه (۱۸) تبدیل می شود:

$$X_{ORDER}(t) + d(t) = \frac{-T_C X}{B} \ddot{\delta}(t) + \left(\frac{T_C A X}{B} - X \right) \dot{\delta}(t) + \frac{X \cdot A}{B} \dot{\delta}(t) \quad (18)$$

$$X \ddot{\delta}(t) - X \cdot A \dot{\delta}(t) + (A \dot{\delta}(t) - \ddot{\delta}(t)) X_{TCSC}(t) + (A \dot{\delta}(t) - \ddot{\delta}(t)) \dot{X}_{TCSC}(t) = -B \dot{X}_{TCSC}(t) - \dot{C}(t) \quad (12)$$

عملکرد TCSC و توابع کنترلی آن به صورت شکل (۲) قابل بیان است.

تابع TCSC در رابطه (۱۲) درج شده است.

$$\dot{X}_{TCSC}(t) = \frac{1}{T_C} (X_{ORDER}(t) - X_{TCSC}(t)) \quad (12)$$

با جایگذاری (۱۲) در (۱۱)، رابطه (۱۳) به دست می آید:

$$X \ddot{\delta}(t) - X \cdot A \dot{\delta}(t) + (A \dot{\delta}(t) - \ddot{\delta}(t)) X_{TCSC}(t) + \frac{(A \dot{\delta}(t) - \ddot{\delta}(t)) X_{ORDER}(t)}{T_C} - \frac{(A \dot{\delta}(t) - \ddot{\delta}(t)) X_{TCSC}(t)}{T_C} = -\frac{B}{T_C} (X_{ORDER}(t) - X_{TCSC}(t)) - \dot{C}(t) \quad (13)$$

با استفاده از رابطه (۱۰)، رابطه (۱۴) به دست می آید:

$$-(A \dot{\delta}(t) - \ddot{\delta}(t)) X_{TCSC}(t) = X \ddot{\delta}(t) - X \cdot A \dot{\delta}(t) - B X_{TCSC}(t) + C(t) \quad (14)$$

با جایگذاری (۱۴) در (۱۳) و با اندکی محاسبات ریاضی، رابطه (۱۵) به دست می آید:

$$X \ddot{\delta}(t) - X \cdot A \dot{\delta}(t) + (A \dot{\delta}(t) - \ddot{\delta}(t)) X_{TCSC}(t) + \frac{X \cdot \dot{\delta}(t)}{T_C} - \frac{X \cdot A \dot{\delta}(t)}{T_C} - \frac{B X}{T_C} + \frac{C(t)}{T_C} + \frac{(A \dot{\delta}(t) - \ddot{\delta}(t)) X_{ORDER}(t)}{T_C} = -\frac{B X_{ORDER}(t)}{T_C} - \dot{C}(t) \quad (15)$$

رابطه (۱۵)، به صورت رابطه (۱۶) تغییر می یابد.

$$X \ddot{\delta}(t) - X \cdot A \dot{\delta}(t) + \frac{X \cdot \dot{\delta}(t)}{T_C} - \frac{X \cdot A \dot{\delta}(t)}{T_C} - \frac{B X}{T_C} + \frac{C(t)}{T_C} + E = \frac{B X_{ORDER}(t)}{T_C} \quad (16)$$

که در آن:

$$E = (A \dot{\delta}(t) - \ddot{\delta}(t)) X_{TCSC}(t) + \frac{(A \dot{\delta}(t) - \ddot{\delta}(t)) X_{ORDER}(t)}{T_C} + \dot{C}(t)$$

که در آن:

$$d(t) = \frac{C(t)}{B} + \frac{T_C E(t)}{B} - X.$$

رابطه (۱۸) به صورت رابطه (۱۹) قابل بیان است:

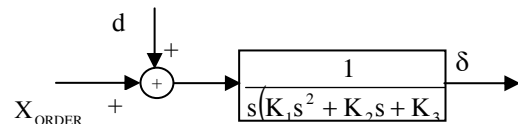
$$X_{ORDER}(s) + d(s) = s(K_1 s^2 + K_2 s + K_3) \delta(s) \quad (19)$$

که:

$$K_1 = \frac{-T_C X.}{B}, \quad K_2 = \left(\frac{T_C A X. - X.}{B} \right)$$

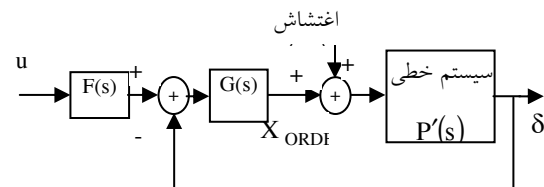
$$K_3 = \frac{X. A}{B}$$

رابطه (۱۹) به صورت شکل (۵) قابل نمایش است.



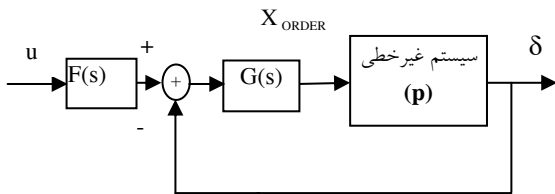
شکل ۵ نمایش ارتباط بین δ و X_{ORDER}

اکنون با استفاده از QFT می‌توان برای این سیستم، کنترل‌کننده مقاوم مناسبی را طراحی کرد (شکل ۶).



شکل ۶ سیستم خطی معادل همراه با کنترل‌کننده مقاوم طراحی شده با QFT

در شکل ۶، $G(s)$ کنترل‌کننده و $F(s)$ پیش‌فیلتر است. کنترل‌کننده و پیش‌فیلتر طراحی شده برای سیستم خطی، در سیستم غیرخطی اولیه (سیستم واقعی) نیز عملکردی یکسان خواهند داشت (شکل ۷).



شکل ۷ سیستم غیرخطی اولیه (سیستم واقعی) همراه با کنترل مقاوم طراحی شده با QFT

در ضرایب نامعین K_1 تا K_3 و همچنین نامعینی‌های نهفته در اغتشاش ورودی، می‌توان عدم قطعیت‌هایی را به شرح زیر منظور کرد:

- عدم قطعیت‌های موجود در برخی از پارامترهای ژنراتور (مانند H و D) که بر اثر خطا در شناسایی پارامترها یا فرضیات ساده‌کننده در مدلسازی ایجاد شده (در عبارتهای A ، B و C رابطه (۹)).

- عدم قطعیت در ثابت زمانی T_C (در ضرایب K_1 تا K_3 رابطه (۱۹))

- نامعینی‌های ناشی از اغتشاش‌های مختلف.

- اغتشاش‌های ایجاد شده در شبکه، به صورت دو پدیده ظاهر می‌شود، تغییر ولتاژ که اغلب به صورت کاهش ولتاژ است و تغییر در راکتانس. محدوده تغییرات این دو کمیت را در ضرایب نامعین بیان شده می‌توان منظور کرد (در عبارت C رابطه (۹)).

- نامعینی‌های ناشی از تغییر در نقطه کار ژنراتور.

- تغییر نقطه کار سیستم نیز می‌تواند یکی دیگر از نامعینی‌های سیستم باشد. تغییر در توان تولیدی واحد (تغییر در مقدار P_m) را نیز می‌توان در ضرایب نامعین فوق منظور کرد. به این ترتیب با تغییر نقطه کار، به تغییر پارامترهای کنترل‌کننده نیاز نیست و کنترل‌کننده مقاوم طراحی شده، برای تمامی شرایط بهره‌برداری قابل استفاده خواهد بود (در عبارت B رابطه (۹)).

بر طبق توضیحات بخش ۳، برای آنکه کنترل کننده مقاوم طراحی شده، در کلیه نقاط کاری سیستم عملکرد مؤثری داشته باشد و با تغییر نقطه کار، نیازی به تغییر پارامترهای کنترل کننده نباشد، اثر تغییرات نقطه کار نیز در تعیین حدود ضرایب نامعین مدل SISO در نظر گرفته شده است. حدود تغییرات نقطه کار از رابطه (۲۲) تبعیت می کند:

$$0.2 \leq P_m \leq 1 \quad (p.u.) \quad (22)$$

یکی دیگر از عوامل ایجاد کننده نامعینی ها که باعث اختلال در عملکرد کنترل کننده های سنتی می شود، اغتشاش ها است. همانگونه که در بخش ۳ بیان شد، اثر این اغتشاش ها، تغییر در ولتاژ و همچنین راکتانس شبکه است. حدود نامعینی ناشی از تغییرات امیدانس در رابطه (۲۳) آورده شده است:

$$0.2 \leq X_1 + X_2 \leq 0.3 \quad (p.u.) \quad (23)$$

اغتشاشات، بر ولتاژ سیستم نیز اثر می گذارند. تغییرات ولتاژ بر طبق رابطه (۹) در ضریب C تأثیرگذار است و بنابر این، نامعینی ناشی از آن، در اغتشاش ورودی یعنی d در نظر گرفته می شود (رابطه (۱۸)). از آنجاکه کنترل کننده مقاوم طراحی شده، به گونه ای عمل خواهد کرد که اثر اغتشاش در ورودی را به سرعت میرا کند، بنابر این اثرات ناشی از تغییرات ولتاژ سیستم، به سرعت از بین خواهد رفت.

با توجه به نامعینی های فوق، محدوده تغییرات ضرایب K_1 ، K_2 و K_3 (ضرایب رابطه (۱۹)) به شرح زیر تعیین می شود:

$$-0.01 \leq K_1 \leq -0.0027 \quad (24)$$

$$-0.22 \leq K_2 \leq -0.046$$

$$-0.12 \leq K_3 \leq -0.025$$

در شکل ۷ ورودی سیستم (u)، می تواند مرجع زاویه (δ_{ref}) باشد. این بدان معنا است که بهره بردار شبکه با توجه به توانی که می خواهد از این خط جاری شود، زاویه بین ولتاژ دو شین ابتدا و انتهای خط را تعیین کند (رابطه (۲۰)).

$$u = \delta_{ref} = \text{Arcsin}\left(\frac{X_c}{P}\right) \quad (20)$$

رابطه (۲۰) با فرض ولتاژ یک پریونیت برای شین ابتدا و انتهای خط نوشته شده است.

۴- طراحی کنترل کننده مقاوم برای مثال نمونه و نتایج عددی

۴-۱- طراحی کنترل کننده مقاوم برای مثال نمونه

در این قسمت، با استفاده از الگوریتم ارائه شده در بخش ۳، کنترل کننده مقاوم برای سیستم نمونه، طراحی می شود. پارامترهای این سیستم (شکل ۱) به شرح زیر است:

$$X_1 = 0.12 \quad (p.u.) \quad H = 4 \quad (s) \quad T'_{d0} = 8$$

$$X'_d = 0.3 \quad (p.u.) \quad X_1 + X_2 = 0.25 \quad (p.u.)$$

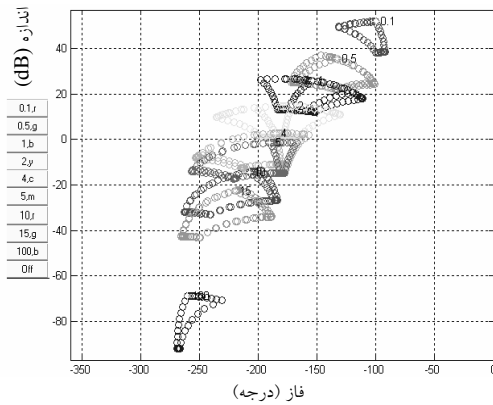
$$D = 4/5 \quad (p.u.) \quad T_C = 0.06 \quad (s)$$

$$X_q = 1/76 \quad (p.u.) \quad \omega_0 = 314/16 \quad (\text{rad/s})$$

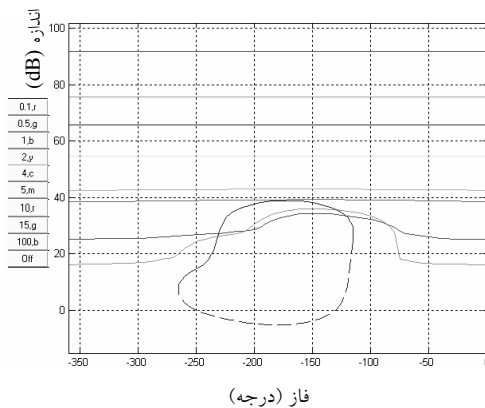
$$X_d = 1/81 \quad (p.u.)$$

با توجه به آنکه در تعیین و شناسایی پارامترهای ماشین، خطا وجود دارد، هدف، طراحی کنترل کننده مقاومی است که اثر این قبیل نامعینی ها را کاهش دهد. محدوده نامعینی پارامترهای مختلف ژنراتور و همچنین TCSC مثال نمونه، در رابطه (۲۱) ارائه شده است:

$$\left\{ \begin{array}{l} 1/76 \leq X_d \leq 1/96 \\ 3/5 \leq H \leq 4/5 \\ 4 \leq D \leq 5 \\ 0.075 \leq T_C \leq 0.045 \end{array} \right. \quad (21)$$

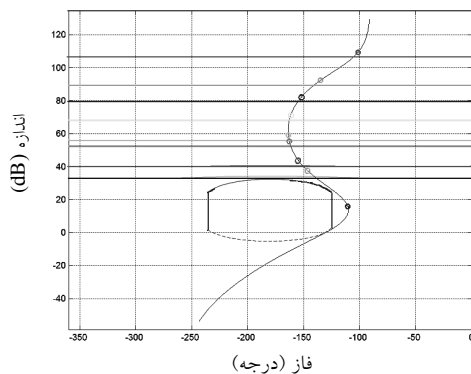


شکل ۸ تمپلت‌ها



شکل ۹ تلاقی باندها

در شکل ۱۰ شکل دادن به کنترل‌کننده مقاوم برای سیستم نامی $(G_0(j\omega))$ ترسیم شده است. کنترل‌کننده مقاوم طراحی شده بر طبق رابطه (۲۸) است.



شکل ۱۰ طراحی کنترل‌کننده در دیاگرام نیکولز

هدف، طراحی کنترل‌کننده و پیش‌فیلتر مناسبی است که بتواند ورودی پله را ردیابی کند و شرایط زیر را داشته باشد:

الف) پایداری مقاوم^۱

ب) حدود مقاوم^۲ (بر طبق رابطه (۲۵)):

$$\left| \frac{P(j\omega)G(j\omega)}{1 + P(j\omega)G(j\omega)} \right| \leq 1.2 \quad (25)$$

ج) ردیابی مقاوم^۳ (بر طبق رابطه (۲۶))

$$B \leq F(j\omega) \frac{P(j\omega)G(j\omega)}{1 + P(j\omega)G(j\omega)} \leq A \quad (26)$$

که در آن:

$$A = \frac{0.16584(j\omega + 30)}{(j\omega)^2 + 4(j\omega) + 19.752}$$

$$B = \frac{120}{(j\omega)^2 + 17(j\omega) + 852(j\omega) + 1200}$$

د) حذف اغتشاش در ورودی:

$$\frac{Y(j\omega)}{d(j\omega)} < 0.01 \quad (27)$$

ذکر یک نکته در اینجا لازم است و آن این است که ضرایب K_1 ، K_p و K_r بر طبق رابطه (۲۴)، هر سه اعدادی منفی هستند و بنابراین این از یک منفی در تابع تبدیل رابطه (۱۹) فاکتور گرفته شده و به صورت یک بهره برابر ۱- در بلوک کنترلی شکل ۸ قرار داده شده است.

برای طراحی کنترل‌کننده و پیش‌فیلتر ابتدا تمپلت‌ها تشکیل شده است. در شکل ۸ تمپلت‌ها در بازه فرکانسی ۰/۱ تا ۱۰۰ هرترز نشان داده شده است. در شکل ۹ نیز تلاقی تمامی باندها ترسیم شده است. در تلاقی تمامی باندها، در هر فرکانسی، باندهی که زودتر از بقیه ایجاد محدودیت می‌کند، به عنوان حد غالب در آن فرکانس در نظر گرفته می‌شود.

1. Robust Stability
2. Robust Margins
3. Robust Tracking

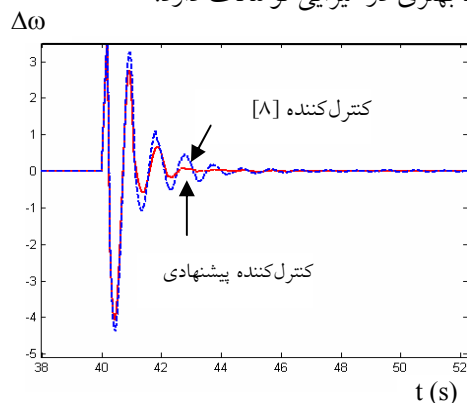
کنترل کننده ارائه شده در [۸] مقایسه شده است. لازم است ذکر شود که کنترل کننده ارائه شده در [۸]، نوعی کنترل کننده مقاوم است که با استفاده از روش H_{∞} طراحی شده و همانگونه که در مقدمه بیان شد، در بهبود توأم پایداری گذرا و سیگنال کوچک مؤثر است. کنترل کننده ارائه شده در [۸] در رابطه (۳۰) آورده شده است.

$$X_{TCSC} = \frac{\frac{\omega_c}{H} E'_q V_s \sin(\delta)}{k_r(\delta - \delta_0) + k_v(\omega - \omega_0) + \frac{\omega_c}{H} P_e} - \left(X_t + \frac{X_v}{\gamma} + \frac{X_r}{\gamma} + X'_d \right) \quad (30)$$

لازم است توضیح دهیم که حد بالا و پایین X_{TCSC} در شکل ۲، به ترتیب برابر $0/15$ و $-0/1$ قرار داده شده است.

آزمایش اول

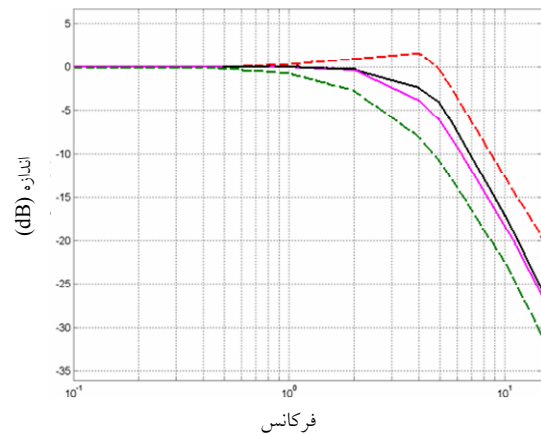
در آزمایش اول، نقطه کار برابر است با $P = 0/5$ (p.u.) و $V_t = 1/0.32$ (p.u.). اتصال کوتاهی در شین شماره ۲ در ثانیه چهارم اتفاق می افتد و بعد از مدت $0/2$ ثانیه برطرف می شود. تغییرات زمانی سه کمیت $\Delta\omega$ ، δ و P_e در شکل های ۱۲ تا ۱۴ نشان داده شده است. همانگونه که از شکلها مشخص است، کنترل کننده مقاوم پیشنهادی این مقاله، نسبت به کنترل کننده مقاوم پیشنهادی در [۸]، عملکرد بهتری در میرایی نوسانات دارد.



شکل ۱۲ تغییرات زمانی $\Delta\omega$ در بار $0/5$ پریونیت

$$G(s) = \frac{0.9110(s^3 + 671s^2 + 21079s + 211796/8)}{s^3 + 5555/4s^2 + 8580300s + 241760000} \quad (28)$$

در شکل ۱۱، نحوه تعیین تابع پیش فیلتر برای این مثال نمونه نشان داده شده است. تابع پیش فیلتر طراحی شده، بر طبق رابطه (۲۹) است.



شکل ۱۱ طراحی تابع پیش فیلتر $(F(j\omega))$

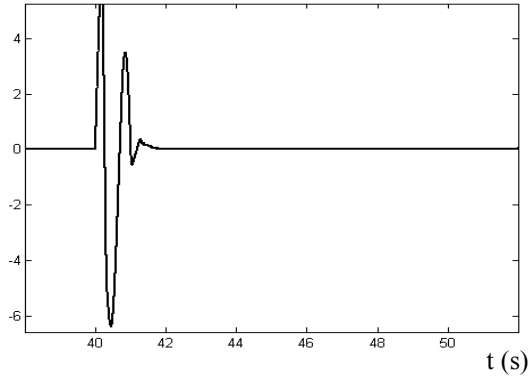
$$F(s) = \frac{1}{0.005337s^3 + 0.92388s^2 + 0.4354s + 1/0} \quad (29)$$

۴-۲- نتایج عددی

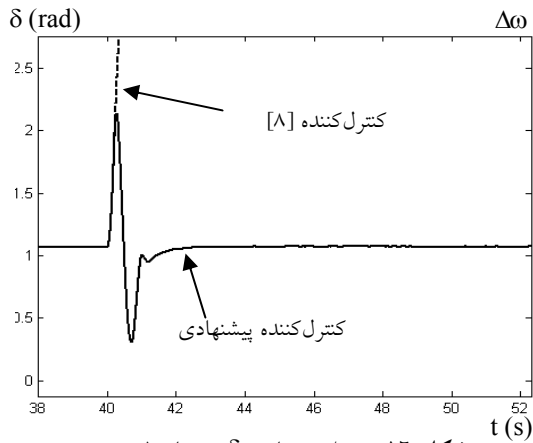
دو آزمایش انجام شد تا عملکرد کنترل کننده مقاوم پیشنهادی برای TCSC، در بهبود پایداری گذرا و پایداری سیگنال کوچک ارزیابی شود. همچنین با این دو آزمایش، عملکرد این کنترل کننده در برابر نامعینی های مختلف، اعم بر تغییرات شبکه (که بر اثر اتصال کوتاه به وجود می آید) و تغییر در نقطه کار، مشخص می شود.

همانگونه که در بخشهای پیش گفته شد، یکی از نقاط قوت الگوریتم پیشنهادی آن است که کنترل کننده ای را طراحی می کند که برای بهبود توأم پایداری گذرا و سیگنال کوچک مناسب است؛ لذا برای اثبات این ادعا، در این دو آزمایش عملکرد کنترل کننده پیشنهادی این مقاله، با

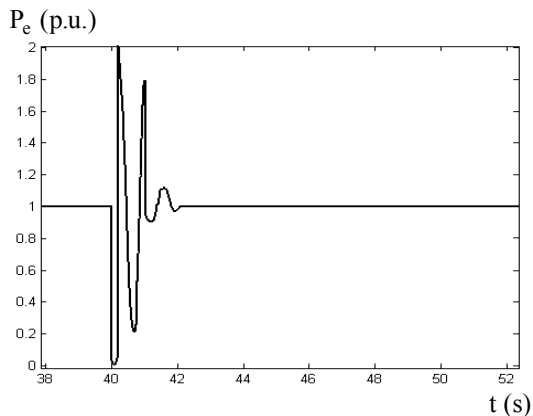
لازم است توضیح دهیم که با توجه به ناپایداری سیستم در زمان استفاده از کنترل کننده پیشنهادی [۸]، در شکل‌های ۱۵ و ۱۷ تغییرات دو کمیت $\Delta\omega$ و P_e فقط به‌زای استفاده از کنترل کننده مقاوم پیشنهادی، ترسیم شده است.



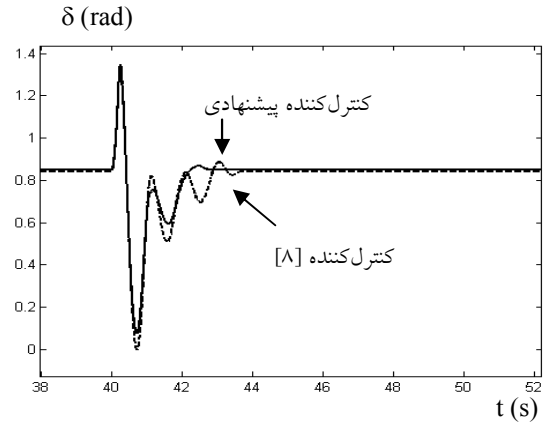
شکل ۱۵ تغییرات زمانی $\Delta\omega$ در بار ۱ پریونیت



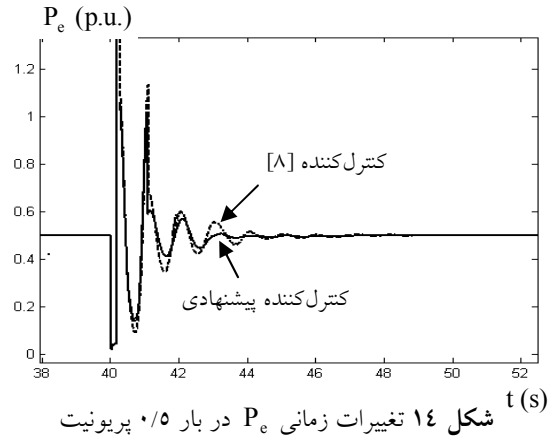
شکل ۱۶ تغییرات زمانی δ در بار ۱ پریونیت



شکل ۱۷ تغییرات زمانی P_e در بار یک پریونیت



شکل ۱۳ تغییرات زمانی δ در بار ۰/۵ پریونیت



شکل ۱۴ تغییرات زمانی P_e در بار ۰/۵ پریونیت

آزمایش دوم

در آزمایش دوم، نقطه کار برابر است با $P=1/0$ (p.u.) و $V_t=1/0.49$ (p.u.). اتصال کوتاهی در شین شماره ۲ در ثانیه چهارم اتفاق می‌افتد و بعد از مدت ۰/۲ ثانیه برطرف می‌شود. تغییرات زمانی سه کمیت δ ، $\Delta\omega$ و P_e در شکل‌های ۱۵ تا ۱۷ نشان داده شده است. همانگونه که از شکلها مشخص است، کنترل کننده مقاوم پیشنهادی در [۸]، در این شرایط قادر به حفظ پایداری نیست؛ حال آنکه کنترل کننده مقاوم پیشنهادی این مقاله، سیستم را به حالت پایدار برمی‌گرداند و این نشانگر عملکرد بهتر کنترل کننده پیشنهادی، در بهبود پایداری گذرای سیستم است.

oscillations”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, 1998, pp. 428-434.

- [5] Y. Y. Hsu and T. S. Luor, “Damping of power system oscillations using adaptive thyristor-controlled series compensators tuned by artificial neural networks”, IEE, Proc-Generation, Transmission and Distribution, Vol. 146, No. 6, 1999, pp. 137-142.
- [6] B. Chaudhuri and B. C. Pal, “Robust damping of multiple swing modes employing global stabilizing signals with a TCSC”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, 2004, pp. 499-506.
- [7] X. Z. Dai, D. He, L. L. Fan, N. H. Li and H. Chen, “Improved ANN α th-order inverse TCSC controller for enhancing power system transient stability”, IEE, Proc-Generation, Transmission and Distribution, Vol. 146, No. 6, 1999, pp. 550-556.
- [8] S. Meli, J. Chen, Q. Lu, y. H. Song, M. Goto and A. yokoyama, “Nonlinear multitarget H_{∞} controller for thyristor-controlled series compensation”, IEE, Proc-Generation, Transmission and Distribution, Vol. 148, No. 6, 2001, pp. 557-561.
- [9] A. D. D. Rosso, C. A. Canizares and V. M. Dona, “A study of TCSC controller design for power system stability improvement”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18, 2003, pp. 1487-1496.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله با استفاده از تئوری پسخور کمی غیرخطی، کنترل‌کننده مقاومی برای TCSC طراحی شده که در بهبود عملکرد TCSC در حفظ پایداری گذرا و پایداری سیگنال کوچک سیستم، مؤثر است. این کنترل‌کننده، کنترل‌کننده‌ای خطی است و از اندازه‌گیری‌های محلی استفاده می‌کند. عملکرد این کنترل‌کننده با کنترل‌کننده مقاومی که با استفاده از روش H_{∞} طراحی شده و در بهبود پایداری گذرا و سیگنال کوچک، مؤثر است، مقایسه شده و نتایج، بیانگر عملکرد بهتر کنترل‌کننده پیشنهادی است.

۶- منابع

- [1] Y. H. Song and A. T. Johns, Flexible ac transmission systems (FACTS), IEE, London, UK, 1999.
- [2] X. R. Chen, N. C. Pahalawaththa, U. D. Annakkage and C. S. Kumble, “Design of decentralized output feedback TCSC damping controlled by simulated annealing”, IEE, Proc-Generation, Transmission and Distribution, Vol. 145, No. 5, 1998, pp. 553-558.
- [3] N. yang, Q. Liu and J. D. Mccalley, “TCSC controller design for damping interarea oscillation”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, 1998, pp. 1304-1310.
- [4] J. J. Sanchez-Gasca “Coordinated control of two FACTS devices for damping interarea

- [12] I. M Horowitz and Y. K. Liao
“Quantitative Non-Linear Compensation
for Saturating Unstable Uncertain Plants”,
Int. J. Control, Proc, Vol. 44, No. 4, pp.
1137-1146, 1986.
- [10] Oded Yaniv, Quntitative Feedback
Design of Linear and Nonlinear Control
Systems, Kluwer Academic Publications,
Norwell, Massachusetts, 1999.
- [11] D. Jiang and X.Lei, “A nonlinear TCSC
control strategy for power system stability
enhancement”, Proceeding of 5th
international conference on advanced in
power system control, Hong Kong, 2000,
pp. 576-581.