

# کنترل یکنوا هماهنگ مبتنی بر ساختار متغیر وسایل FACTS به منظور بهبود پایداری گذرای سیستم‌های قدرت

مهدی بیات مختاری  
دانشجوی دکتری

محسن پارسا مقدم  
استادیار

دانشکده مهندسی برق، دانشگاه تربیت مدرس

## چکیده

به طور کلی یک سیستم قدرت، مثال و نمونه‌ای از یک سیستم غیرخطی است که میزان غیرخطی بودن آن به دنبال یک اغتشاش شدید، تقویت شده و افزایش می‌یابد و لذا در چنین حالتی، استفاده از تکنیک‌ها و روش‌های کنترل خطی را با مانع مواجه می‌نماید. در این مقاله هدف این است که با ارائه روشی نوین و با استفاده از کنترل شیفت دهنده‌های استاتیکی فاز به صورت یکنوا هماهنگ<sup>(۱)</sup> و بر مبنای تئوری کنترل غیرخطی از نوع ساختار متغیر، پایداری گذرای سیستم قدرت بهبود یابد. نتایج شبیه‌سازی نیز، صحت این موضوع را نشان داده و تأیید می‌کند.

## *Variable Structure Based Uniformly Co-Ordinated Control of FACTS Devices for Power Systems Transient Stability Enhancement*

M. Parsa  
Assistant Professor

M. Bayatmokhtari  
Ph.D. Student

Electrical Engineering, Tarbiat Modares University

## Abstract

*Due to everincreasing stress on existing transmission networks, stability margin of power systems has considerably reduced. That is why Flexible AC Transmission Systems (FACTS) devices have recieved a great deal of attention in recent years. As a power system exhibits highly nonlinear characteristics, linear approaches may fail to perform satisfactorily to control FACTS devices. In this paper a new algorithm based on variable sructure strategy has been employed to control static phase shifters (as FACTS devices).*

*Uniformly co-ordinated control of these devices guarantees acceptable performance. Simulation results have been demonstrated to assess the algorithm performance.*

## Keywords

*FACTS, Static Phase Shifter, Variable Structure*

## واژه‌های کلیدی

شیفت دهنده استاتیکی فاز، FACTS، کنترل ساختار متغیر، پایداری گذرا.

### مقدمه

در سال‌های اخیر بنا بر دلایل متعدد که شاید بتوان عوامل اقتصادی، قیدها و محدودیت‌های زیست محیطی را اهم آنها برشمرد، مسأله بهره‌برداری از خطوط انتقال قدرت در سطوح انتقالی بالا افزایش یافته است. در چنین حالاتی، کران پایداری<sup>(۱)</sup> سیستم قدرت به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. اگر چه کنترل‌کننده‌های تحریک در بهبود پایداری سیستم‌های قدرت مؤثرند، اما نشان داده شده است که ممکن است پایداری سیستم به دنبال وقوع یک اغتشاش شدید و بزرگ<sup>(۲)</sup> حفظ نشود [۱]. امروزه و به ویژه در سال‌های اخیر در راستای توسعه و گسترش الکترونیک قدرت و تئوری کنترل غیرخطی، بحث کنترل ساختاری<sup>(۳)</sup> شبکه‌های قدرت مطرح گردیده است و موضوع سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف‌پذیر<sup>(۴)</sup> (FACTS) از جایگاه ویژه‌ای برخوردار می‌باشد.

در این میان استفاده از شیفت دهنده‌های استاتیکی فاز<sup>(۵)</sup> (SPS) به عنوان یکی از ابزارهای FACTS به منظور پایدار ساختن سیستم‌های قدرت حائز اهمیت است. یک شیفت دهنده استاتیکی فاز وسیله‌ای است که امکان تغییر زاویه فاز نسبی بین دو ولتاژ سیستم را فراهم نموده و لذا به کنترل قدرت حقیقی انتقالی بین دو سیستم کمک می‌کند. از طرف دیگر مشخصه مربوط به پاسخ سریع و سرعت بالای شیفت دهنده‌های استاتیکی فاز عاملی مهم در بکارگیری این وسیله به منظور بهبود پایداری گذراست [۲-۵].

روش‌های ارائه شده تاکنون بیشتر بر مبنای مدل‌های خطی تقریبی است، به طوری که کنترل اعمال شده به سیستم با بکارگیری تئوری کنترل خطی انجام می‌شود. بدیهی است که هنگام بروز خطاهای بزرگ، رفتار سیستم قدرت به شدت دستخوش تغییر می‌شود و در چنین شرایطی، کنترل‌کننده طراحی شده براساس مدل خطی تقریبی ممکن است پایداری کافی را تأمین نکند. از این رو، در سال‌های اخیر، توجه زیادی به کاربرد تئوری کنترل غیرخطی در بهبود پایداری سیستم‌های قدرت شده است [۶-۷].

سیستم‌های قدرت جدید دارای مقیاسی بزرگ، پاسخ

غیرخطی و پیچیده‌اند و لذا قوانین کنترل متداولی که مبتنی بر مدل‌های خطی شده سیستم‌اند دچار محدودیت می‌باشند. یکی از راه‌های مناسب و مؤثر کنترل پایداری گذرای سیستم قدرت استفاده از شیفت دهنده‌های استاتیکی فاز می‌باشد و این مقاله بر آن است با مطرح کردن روشی جدید، استفاده یکنوا هماهنگ از شیفت دهنده‌های استاتیکی فاز (SPS) را برای تحقق بخشیدن به این هدف با بکارگیری کنترل غیرخطی ساختار متغیر ارائه کند.

ساختار مقاله به شرح زیر می‌باشد:

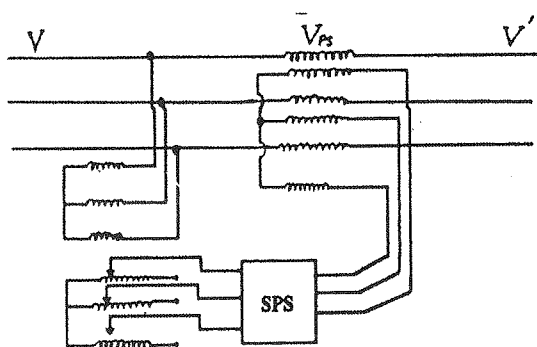
بخش اول به مقدمه اختصاص دارد که در آن ضمن مروری بر کارهای انجام شده و محدودیت آنها، هدف این نوشتار و ماهیت روش جدید به طور خلاصه بیان می‌گردد. در بخش دوم به تبیین کنترل ساختار متغیر و ویژگی‌های آن می‌پردازیم. بخش سوم به معرفی شیفت دهنده استاتیکی فاز و ساختار آن اختصاص دارد. در بخش چهارم مدلسازی و استراتژی کنترلی مربوط را در مورد یک شبکه قدرت چند ماشینه در حالت کلی و با لحاظ کردن شیفت دهنده‌های استاتیک فاز و روش کنترل ساختار متغیر در این شبکه بیان می‌کنیم و در بخش پنجم نتایج شبیه‌سازی را بر روی یک شبکه نمونه با این روش جدید ارائه می‌دهیم. بخش ششم به نتیجه‌گیری اشاره می‌کند و در بخش هفتم و هشتم که ضمایم هستند به ترتیب اطلاعات مربوط به شبکه مورد مطالعه و فهرست علائم اختصاری و متغیرها ارائه می‌گردند و در انتها نیز در بخش نهم فهرست، مراجع و منابع آورده خواهد شد.

## ۲- کنترل ساختار متغیر (VSC)<sup>(۶)</sup>

باتوجه به مقدمات بیان شده می‌توان چنین گفت که روش‌های کنترل غیرخطی برای کنترل سیستم‌های قدرت، با توجه به ماهیت و عملکرد غیرخطی آنها به مراتب از کارایی بالاتری نسبت به روش‌های کنترل خطی برخوردارند. یک روش نگرش به ماهیت غیرخطی متناظر با عملکرد سیستم قدرت در قالب کنترل ساختار متغیر می‌باشد. نشان داده می‌شود که با انتخاب قانون کنترلی، دینامیک سیستم VSC را می‌توان به پیروی از یک مسیر از پیش تعیین شده که از آن با نام صفحه کلیدزنی<sup>(۸)</sup> یاد می‌شود، مجبور ساخت [۸-۱۰]. مزیت استفاده از چنین روشی برای سیستم‌های غیرخطی

### ۳- شیفیت دهنده استاتیکی فاز (SPS)

شیفیت دهنده های استاتیکی فاز از جمله ابزارهای کنترل اضطراری در شبکه های قدرت به هم پیوسته می باشند. از جمله کاربردهای اصلی و اساسی این نوع شیفیت دهنده های فاز در کنترل پخش بار<sup>(۱۱)</sup> می باشد [۱۲-۱۳]. با وجود این، به نظر می رسد که مشخصه پاسخ سریع این وسایل، آنها را در بهبود پایداری گذرا نیز از کارآیی زیادی برخوردار سازد. پیکربندی<sup>(۱۲)</sup> و ساختار شیفیت دهنده استاتیکی فاز مطابق شکل ۲ است.

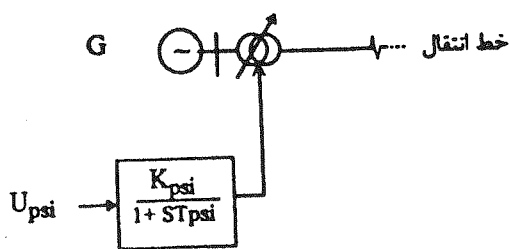


شکل (۲) پیکربندی و ساختار شیفیت دهنده استاتیکی فاز.

در این مطالعه، مدل SPS به صورت زیر در نظر گرفته شده است: [۱۴]

$$\phi(t) = \frac{1}{T_{ps}} [-\phi(t) + K_{ps} U_{ps}(t)] \quad (1)$$

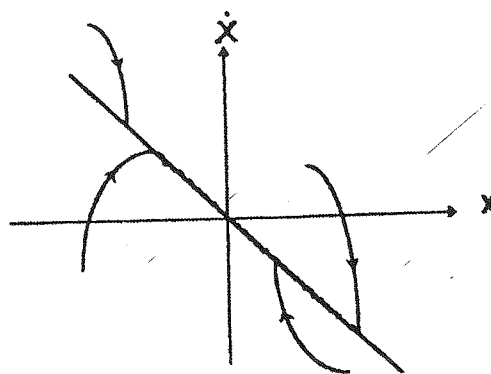
که در این رابطه،  $\phi(t)$ ،  $T_{ps}$ ،  $K_{ps}$  و  $U_{ps}$  به ترتیب مبین زاویه شیفیت فاز، ثابت زمانی، بهره (گین) و سیگنال ورودی به شیفیت دهنده استاتیکی فاز می باشند. با توجه به رابطه (۱) مدل سیستم کنترلی شیفیت دهنده استاتیکی فاز مطابق شکل (۳) خواهد بود.



شکل (۳) مدل سیستم کنترل SPS.

(همچون سیستم های قدرت) در امکان کنترل سیستم در یک حالت مطلوب و دلخواه، صرفنظر از عملکرد غیرخطی سیستم می باشد. برخلاف سایر سیستم های کنترلی، در VSC، ساختار ثابت نبوده و در طی فرآیند (پروسه) کنترلی تغییر می کند.

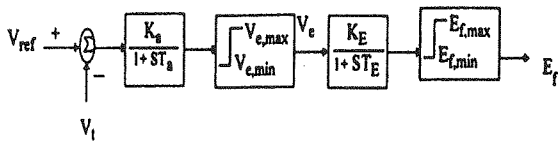
تغییرات در ساختار نسبت به یک سطح از پیش تعیین شده (سطح کلیدزنی) در فضای حالت سیستم ایجاد می شود. به بیانی دیگر، ساختار هنگامی که حالت، سطح کلیدزنی را قطع می کند، کلید زده می شود. ویژگی اساسی VSC در امکان به دست آوردن یک مود لغزشی<sup>(۱)</sup> است [۱۱]. هنگامی که حالت سیستم، سطح کلیدزنی را ترک می کند، کنترل کننده ساختار خود را تغییر می دهد به طوری که حالت سیستم، بالاچار مقید به حرکت به طرف سطح کلیدزنی باشد. به دنبال آن، حالت سیستم در طول این سطح و با حرکت نوسانی ظریفی به سمت نقطه تعادل<sup>(۱۰)</sup> پیش می رود که به این حرکت، مود لغزشی و یا رفتار لغزشی گفته می شود. شکل ۱ نشان دهنده این رفتار می باشد. حرکت لغزشی پایدار از طریق انتخاب سطح لغزشی صورت می پذیرد. پس از آنکه یک سطح لغزشی به دست آمد، مرحله دوم کار، تعیین قانون کنترلی است که مسیر حالت را به طرف سطح کلیدزنی هدایت نماید. حرکت اجباری حالات سیستم در طول سطح کلیدزنی از پیش تعیین شده، رفتاری را نتیجه می دهد که توسط پارامترهای طراحی و معادلات تعریف کننده سطح کلیدزنی تعریف می شوند. بنابراین، در مود لغزشی، دینامیک سیستم مستقل از پارامترهای سیستم و اغتشاشات خارجی خواهد بود و همین نکته بالاترین مزیت کنترل ساختار متغیر است که آن را از ارزش بسزایی بهره مند می گرداند.



شکل (۱) کنترل ساختار متغیر.

## ۴- مدل‌سازی سیستم و استراتژی کنترل

یک سیستم قدرت شامل  $N$  ژنراتور سنکرون را مطابق شکل ۴ در نظر می‌گیریم. در این صورت با لحاظ کردن مدل شیفت دهنده استاتیکی فاز مطابق رابطه (۱) و با فرض ناچیز بودن مقاومت اهمی خطوط انتقال، معادلات حاکم بر سیستم قدرت را می‌توان به صورت زیر نوشت:



شکل (۵) مدل AVR.

معادلات مربوط به SPS نیز همراه با سایر معادلات به صورت زیر لحاظ می‌گردند:

$$V'_d = V_d - V_{ps} V_q \quad (۹)$$

$$V'_q = V_q + V_{ps} V_d \quad (۱۰)$$

$$I_d = I'_d + V_{ps} I'_q \quad (۱۱)$$

$$I_q = I'_q - V_{ps} I'_d \quad (۱۲)$$

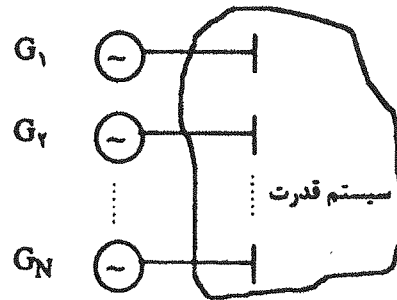
که در این روابط،  $V_{ps}$  میزان تزریق ولتاژی برحسب (p.u.) می‌باشد که با انجام سوئیچینگ قابل کنترل است. باتوجه به مجموعه روابط اشاره شده در قبل می‌توان برای سیستم قدرت مورد نظر نوشت:

$$[\dot{X}] = [A][X] + [L][g(z)] + [B][U] \quad (۱۳)$$

که در این رابطه داریم:

$$[X] = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix}, [A] = \begin{bmatrix} 0_N & I_N & 0_N \\ 0_N & -\frac{1}{\pi f_0} H^{-1} D & 0_N \\ 0_N & 0_N & \perp_{ps} \end{bmatrix}$$

$$[B] = \begin{bmatrix} 0_N \\ I_N \\ 0_N \end{bmatrix}, [L] = \begin{bmatrix} 0_{n,m} \\ -\frac{1}{\pi f_0} H^{-1} \\ 0_{n,m} \end{bmatrix}$$



شکل (۴) سیستم قدرت چند ماشینه.

$$\frac{H_i}{\pi f_0} \ddot{\delta}_i + D_i \dot{\delta}_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N E_i E_j b_{ij} \sin[(\delta_i - \phi_i) - (\delta_j - \phi_j)] - P_{mech_i} = 0 \quad (۲)$$

$$\phi_i + \frac{1}{T_{psi}} \phi = \frac{K_{psi}}{T_{psi}} U_{psi} \quad (۳)$$

$$\dot{\delta}_i = \omega_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, N) \quad (۴)$$

برای هر یک از ژنراتورها مدل مرتبه سوم ماشین سنکرون مطابق روابط زیر در نظر گرفته می‌شود: [۱۷-۱۵].

$$E'_q = V_q + R_a I_q - X'_d I_d \quad (۵)$$

$$E'_d = V_d + R_a I_d + X'_q I_q \quad (۶)$$

$$\dot{E}'_q = [E_f + (X_d - X'_d) I_d - E'_q] / T'_{do} \quad (۷)$$

$$\dot{E}'_d = [- (X_q - X'_q) I_q - E'_d] / T'_{qo} \quad (۸)$$

مدل تنظیم کننده اتوماتیک ولتاژ (AVR) نیز به صورت شکل ۵ می‌باشد: [۱۷-۱۵]

بدین ترتیب کنترل لغزشی معادل به صورت زیر به دست می‌آید:

$$U = (C^T B)^{-1} (C^T AX + C^T Lg) \quad (16)$$

که برای محاسبه  $(C^T B)^{-1}$  از روش شبه معکوس راست <sup>(۱۳)</sup> استفاده می‌شود [۲۰].

شرط لازم و کافی برای آنکه قانون کنترلی مزبور مسیر حالت سیستم را به سمت سطح کلیدزنی سوق داده و شرط مود لغزشی را برآورد سازد آن است که داشته باشیم: [۲۱ و ۱۱].

$$SS < 0 \quad (17)$$

با استفاده از این شرط، رابطه زیر نتیجه می‌شود:

$$(C^T X) (C^T AX + C^T Lg + C^T BU) < 0 \quad (18)$$

این بدان معناست که:

$$\begin{cases} C^T AX + C^T Lg + C^T BU^{(u)} < 0 \text{ با شرط } S > 0 \\ C^T AX + C^T Lg + C^T BU^{(l)} > 0 \text{ با شرط } S < 0 \end{cases} \quad (19)$$

و به بیانی دیگر:

$$\begin{cases} U^{(u)} < -(C^T B)^{-1} (C^T AX + C^T Lg) \\ U^{(l)} > -(C^T B)^{-1} (C^T AX + C^T Lg) \end{cases} \quad (20)$$

$U^{(u)}$  و  $U^{(l)}$  را به ترتیب به عنوان کنترل بالا و پایین صفحه کلیدزنی تعریف می‌کنیم.

اکنون باید کنترل را چنان انتخاب کرد که از یک طرف قادر باشد، مسیر سیستم را به سطح کلیدزنی هدایت کرده و در عین حال شرط کافی برای وجود و رسیدن به مود لغزشی را برآورده سازد. کنترلی به صورت زیر در نظر می‌گیریم به طوری که شرایط (۲۰) برقرار باشند:

$$U = U_0 \text{sign}(S) \quad (21)$$

باتوجه به مطالب ذکر شده شمای کار مطابق شکل ۶ خواهد بود. حسن این روش آن است که در آن شیفیت دهنده‌های استاتیکی فاز دارای عملکرد یکنوا هماهنگ می‌باشند.

$$[U] = \begin{bmatrix} u_{ps1} \\ u_{ps2} \\ \vdots \\ u_{psN} \end{bmatrix}, x-1 = \begin{bmatrix} \delta_1 - \delta_1^s \\ \delta_2 - \delta_2^s \\ \vdots \\ \delta_N - \delta_N^s \end{bmatrix}, x-2 = \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \vdots \\ \omega_N \end{bmatrix} = \frac{d}{dt}(x-1)$$

$$x-3 = \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \vdots \\ \phi_N \end{bmatrix}, [g(z)] = \begin{bmatrix} g_1(z_1) \\ g_2(z_2) \\ \vdots \\ g_m(z_m) \end{bmatrix}, Z_k = (\delta_i - \delta_i^s - \phi_i) - (\delta_j - \delta_j^s - \phi_j)$$

$$\delta_{ij}^s \frac{\Delta}{\Delta} \delta_i^s - \delta_j^s, g_k(z_k) \frac{\Delta}{\Delta} E_i E_j b_{ij} [\sin(z_k + \delta_{ij}^s) - \sin \delta_{ij}^s]$$

$$K = N(i-1) - \frac{1}{2}(i+1) + j \quad (1 \leq i < j \leq N)$$

$$H \frac{\Delta}{\Delta} \text{diag}(H_i), D \frac{\Delta}{\Delta} \text{diag}(D_i), \perp_{ps} \frac{\Delta}{\Delta} \text{diag}\left(\frac{1}{T_{psi}}\right) \quad (i=1, 2, \dots, N)$$

$$n = 3N, m = \frac{N}{2}(N-1), I_N = N \text{ ماتریس واحد مرتبه}$$

حال به طرح کنترل کننده ساختار متغیر برای سیستم فوق می‌پردازیم. باتوجه به توضیحات ارائه شده در بخش ۲، حالت سیستم مجبور است که مسیری مشخص را که توسط سطح کلیدزنی (لغزشی) در فضای حالت سیستم تعیین می‌شود، دنبال کند. فرض می‌کنیم این سطح به صورت زیر باشد: [۱۸-۱۹]

$$S = C^T [X] \quad (14)$$

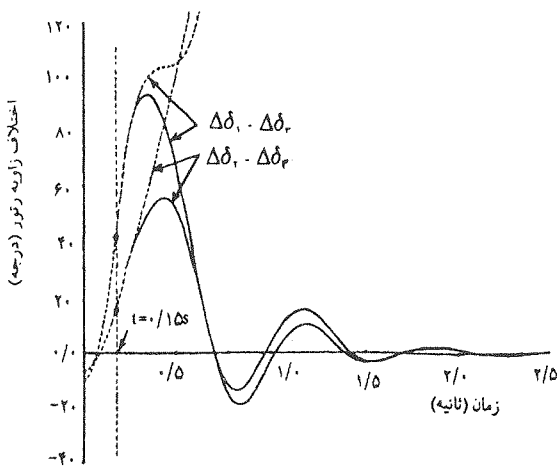
که  $C$  برداری با درایه های ثابت است. در این صورت معادله مبین مود لغزشی متناظر به شکل زیر خواهد بود:

$$\dot{S} = C^T [\dot{X}] \quad (15)$$

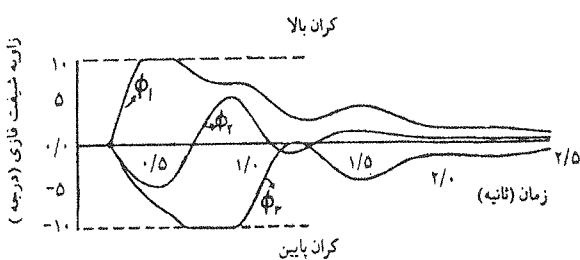
شکل ۸ پاسخ‌های زمانی مربوط به تغییرات متغیرهای زاویه رتور ژنراتورها را نشان می‌دهد. بدین منظور، میزان تغییرات زاویه رتور ژنراتورهای  $G_1$  و  $G_2$  نسبت به ژنراتور  $G_3$  یعنی  $(\Delta\delta_1 - \Delta\delta_3)$  و  $(\Delta\delta_2 - \Delta\delta_3)$  در نظر گرفته شده‌اند.

همانگونه که ملاحظه می‌شود این سیستم بدون کنترل ناپایدار است و می‌توان آن را با استفاده از روش ارائه شده تحت شرایط گذرا به خوبی پایدار کرد.

در شکل ۹ نیز تغییرات زوایای شیفیت دهنده‌های استاتیکی فاز با در نظر گرفتن محدودیت فیزیکی در زاویه شیفیت فازی  $(|\phi_i| \leq 10^\circ, i = 1, 2, 3)$  نشان داده شده است.

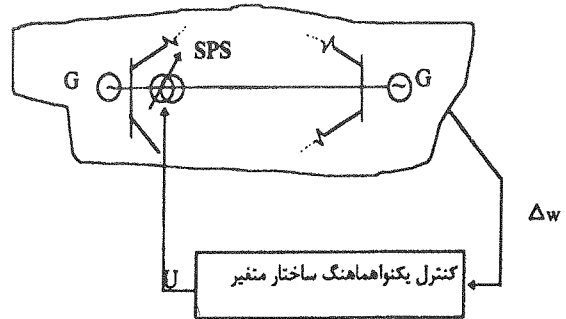


شکل (۸) پاسخ زمانی مربوط به تغییرات زوایای رتور ژنراتورها.



شکل (۹) تغییرات زوایای شیفیت دهنده‌های استاتیکی فاز.

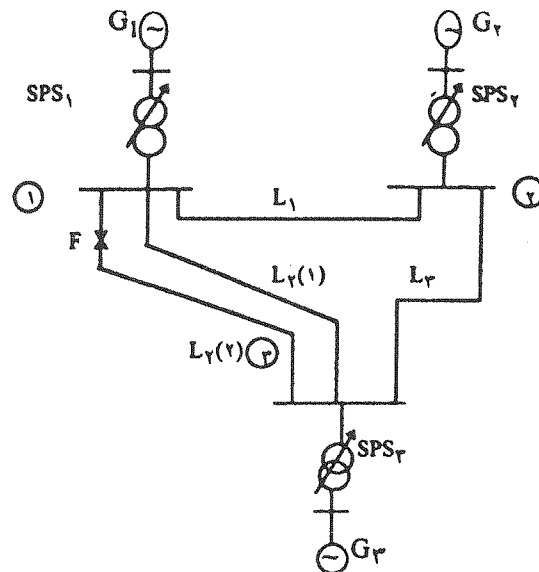
در شکل ۱۰ نیز سیگنال کنترلی در شرایط بروز خطا نشان داده شده است و همانگونه که مشاهده می‌گردد عمل کنترل در مدت زمانی کمتر از یک ثانیه انجام می‌شود.



شکل (۶) کنترل یکنوا هماهنگ ساختار متغیر سیستم قدرت.

## ۵- مطالعات شبیه‌سازی

در این بخش نتایج حاصل از آزمایش روش پیشنهادی بر روی یک شبکه نمونه ارائه شده است. مدل سیستم شامل سه ژنراتور و سیستم کنترل شیفیت دهنده استاتیکی فاز، مطابق شکل ۷ می‌باشد.



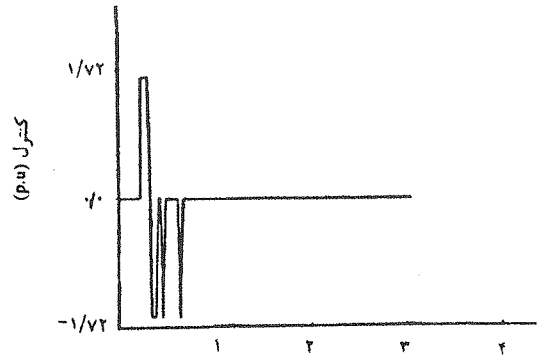
شکل (۷) شبکه مورد مطالعه.

کلیه اطلاعات مربوط به این شبکه در بخش ۷ (ضمیمه الف) آورده شده است.

چنانکه در شکل مشاهده می‌شود در هر یک از شین‌های ژنراتور و در محل اتصال خط انتقال یک شیفیت دهنده استاتیکی فاز در نظر گرفته شده است. برای شبیه‌سازی در حوزه زمان فرض شده است یک خطای سه فاز به زمین در نقطه F واقع در نزدیکی شین (۱) واقع شود و خطی که در آن خطا رخ داده است پس از گذشت مدت زمان ۰/۱۵ ثانیه جدا می‌گردد.

## ۶- نتیجه گیری

در این مقاله، روشی مؤثر و نوین به منظور بهبود پایداری گذرای سیستم‌های قدرت چندماشینه با استفاده از کنترل یکنوا هماهنگ شیفت دهنده‌های استاتیکی فاز به عنوان یکی از ابزارهای FACTS و به کمک استراتژی ساختار متغیر بیان گردید. استراتژی کنترل ارائه شده در این نوشتار علاوه بر لحاظ داشتن عوامل غیرخطی، از نظر تحقق پذیری<sup>(۱۳)</sup> نیز دارای ساختار ساده‌ای است که خود این امر کاهش هزینه اقتصادی را در مرحله ساخت به دنبال خواهد داشت. نتایج حاصل، عملکرد مؤثر این روش را در بهبود پایداری گذرا نشان می‌دهد.



شکل (۱۰) سیگنال کنترلی.

۷-۱ = پارامترهای ژنراتورها (p.u)

	$X_d$	$X_q$	$X'_d$	$X'_q$	$T'_{d0}$	$T'_{q0}$	H	D
$G_1$	۱/۸۰	۱/۶۵	۰/۳۴	۰/۲۵	۶/۵۰	۰/۶۰	۲/۶۰	۰/۰۱۳۴
$G_2$	۱/۸۰	۱/۶۵	۰/۳۴	۰/۲۵	۶/۵۰	۰/۶۰	۲/۶۰	۰/۰۱۳۴
$G_3$	۱/۸۰	۱/۶۵	۰/۳۴	۰/۲۵	۶/۵۰	۰/۶۰	۲/۶۰	۰/۰۱۳۴

۷-۴ = پارامترهای خطوط انتقال

Line	From Bus #	To Bus #	Impedance
$L_1$	۱	۲	$j \cdot 0.5$
$L_2$	۱	۳	$j \cdot 2.0$
$L_2$	۱	۳	$j \cdot 2.0$
$L_3$	۲	۳	$j \cdot 0.75$

۷-۲ = پارامترهای AVR

	$G_1$	$G_2$	$G_3$
$K_a$	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱
$T_a$	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱
$K_E$	۵/۶۰	۵/۶۰	۵/۶۰
$T_E$	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱

## فهرست علائم

FACTS : سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر  
 VSC : کنترل ساختار متغیر  
 SPS : شیفت دهنده‌های استاتیکی فاز  
 AVR : تنظیم کننده اتوماتیک ولتاژ  
 $U_{ps}$  : سیگنال کنترلی ورود به شیفت دهنده استاتیکی فاز  
 $K_{ps}$  : گین (بهره) شیفت دهنده استاتیکی فاز  
 $T_{ps}$  : ثابت زمانی شیفت دهنده استاتیکی فاز  
 $\phi$  : زاویه شیفت فازی  
 H : ثابت اینرسی ژنراتور سنکرون

۷-۳ = پارامترهای SPS

	$SPS_1$	$SPS_2$	$SPS_3$
$K_{ps}$	۰/۳۰	۰/۳۰	۰/۳۰
$T_{ps}$	۰/۱۰	۰/۱۰	۰/۱۰
$X_{sps}$	$j \cdot 0.5$	$j \cdot 0.5$	$j \cdot 0.5$

:S	سطح لغزش	:D	ضریب میرایی
:U	کنترل لغزشی معادل	$\delta$	زاویه رتور
:U <sub>0</sub>	دامنه سیگنال کنترل لغزشی معادل	:E	ولتاژ شین ژنراتور
:f <sub>0</sub>	فرکانس نامی شبکه	b <sub>ij</sub>	سوسپتانس خط انتقال بین شین های i و j
		:P <sub>mech</sub>	قدرت مکانیکی
		: $\omega$	سرعت رتور

### زیر نویس ها

1 - Uniformly Co-ordinated	مؤلفه محور q ولتاژ ژنراتور (گذرا)	:E' <sub>q</sub>
2- Stability Margin	مؤلفه محور d ولتاژ ژنراتور (گذرا)	:E' <sub>d</sub>
3- Sever	مؤلفه محور q ولتاژ شین	:V <sub>q</sub>
4- Structural	مؤلفه محور d ولتاژ شین	:V <sub>d</sub>
5- flexible AC Transmission Systems	مؤلفه محور q جریان	:I <sub>q</sub>
6- Static Phase Shifter	مؤلفه محور d جریان	I <sub>d</sub>
7- Variable Structure control	ولتاژ تحریک ژنراتور	:E <sub>r</sub>
8- Switching Plane	راکتانس محور q ژنراتور	:X <sub>q</sub>
9- Sliding Mode	راکتانس محور d ژنراتور	:X <sub>d</sub>
10- Equilibrium Point	راکتانس گذرای محور q ژنراتور	:X' <sub>q</sub>
11- Power Flow control	راکتانس گذرای محور d ژنراتور	:X' <sub>d</sub>
12- Configuration	ثابت زمانی گذرای مدار باز محور d	:T' <sub>do</sub>
13- Right Pseudo-inverse	ثابت زمانی گذرای مدار باز محور q	:T' <sub>qo</sub>
14- Realization	ولتاژ تزریقی	:V <sub>ps</sub>

### مراجع

- [1] Y. Wang, D.J. Hill, "Transient Stability Enhancement And Voltage Regulation of Power Systmes", IEEE Trans. on Power Systems, No. 8, 1993.
- [2] Edris A.A., "Enhancement of First Swing Stability Using A High Speed Phase Shifter", IEEE Trans. on Power Systems, No. 6, 1991.
- [3] K. Xing, G. Kusic, "Application of Thyristor Controlled Phase Shifters To Minimize Real Power Losses", IEEE Trans. on Energy Conversion, No. 4, 1988.
- [4] K. Xing G. Kusic, "Damping of Subsynchronous Resonance By Phase Shifters", IEEE, Trans. on Energy Conversion, No. 4, 1989.
- [5] R. M. Mature and r.S. Basati, "A Thyristor Controlled static phase shifter for AC power transmission", IEEE, Trans-PAS-100, 1981.
- [6] Jianmin Zhao, "Structural Control of Electric Power Networks For Transient Stability," IEEE Trans. on Power systems, Vol. 9, No. 3, Aug. 1994.
- [7] Chada lavada, Vamsi, Vital. Vijey, "Transient Stability Assessment for Network Topology Changes", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 9, No. 3, Aug 1994.
- [8] R. A. Decarlo, S. H. Zak, "Variable Structure Control of Non-linear Multivariable Systems", A tutorial, Proc. of the IEEE, Vol. 76, 1988.
- [9] P. A. Cook, "Nonlinear Dynamical Systems", Prentice-Hall international (U.K) Ltd., 1986.
- [10] U. Itkis, "Control Systems of Variable Structure", John Wiley, Chichester, 1976.
- [11] Vadim I. Utkin, "Sliding Mode Control Design Principles and Applications", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 40, 100-1 Feb 1993.
- [12] A. m. Sharaf and R. Doraiswami, "Stabilizing On AC Link Using Static Phase Shifters", IEEE, Trans-PAS-120, 1983.



- مدرس، مرکز نشر. ۱۳۷۶.
- [13] M. R. Iravani, P.L. Dandeno, "Applications of Static Phase Shifters in Power Systems", IEEE, Trans. on Power Systems, No. 9, July 1994.
- [14] Yoke Lin Tan and Youyi Wang. "Transient Stability Improvement of Power Systems Using Nonlinear Excitation, Phase Shifter and Adaptive Control Law," IEEE Catalogue, No. 92TH8130, 1995.
- [15] P, M. Anderson and A.A. Fouad, Power System Control And Stability, Ames, IA: Iowa State University, Press 1982.
- [16] J. Arrillaga and C. P. Arnold, "Computer Analysis of Power Systems" , John Wiley & Sons Ltd., 1990.
- [۱۷] کندور، پرابها شانکار، پایداری و کنترل سیستم‌های قدرت، ترجمه دکتر حسین سیفی و دکتر علی خاکی صدیق، چاپ اول، دانشگاه تربیت مدرس، مرکز نشر. ۱۳۷۶.
- [18] Gamal m. Aly and Wahied G. Ali, "Digital Design of Variable Structure Control Systems," int. J. Systems SCI., Vol. 21, No. 8, 1990.
- [19] M. E. Aggoune, F. Boudjema and et. al, "Design of Variable Structure Voltage Regulator Using Pole Assignment Technique.", IEEE Trans . on Automatic Control., Vol. 39, no. 10, Oct 1994.
- [۲۰] اوگاتا، کاتسوهیکو، سیستم‌های کنترل دیجیتال، جلد دوم، ترجمه دکتر پرویز جبه دار مارالانی و دکتر علی خاکی صدیق، چاپ اول، مؤسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران، مهرماه ۱۳۷۳.
- [21] Edward Y.Y.Ho, Paresh C. Sen, "Control Dynamics of Speed Drive Systems Using Sliding Mode Controllers with Integral Compensation." IEEE trans. on Industry Application, Vol. 27, No. 5, Sep/Oct 1991.