

ارائه یک روش کنترلی جهت میراسازی نوسانات سیستم تک ماشینه متصل به شین بی‌نهایت با استفاده از خازن سری و روش کنترل غیرخطی IDA-PBC

وحید موسوی محب^۱، سید سجاد موسی پور^۲

^۱ دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان - خوراسگان، v.mousavimoheb58@gmail.com

^۲ دانشکده مهندسی، گروه برق، دانشگاه شهید چمران اهواز، s.moosapour@scu.ac.ir

چکیده - در این مقاله، مدل سازی و کنترل سیستم تک ماشینه متصل به شین بی نهایت (SMIB) با استفاده از خازن سری کنترل پذیر انجام گرفته است. در این راستا سیستم SMIB با استفاده از مدل غیرخطی شار-زوال که یک مدل مرتبه‌ی سوم محسوب می شود، در نظر گرفته شده است. همچنین، دینامیک محرک سیستم که همان CSC می باشد، به صورت یک سیستم مرتبه اول مدل شده است. هدف کنترلی تعیین یک تابع انرژی مناسب برای سیستم با استفاده از روش IDA-PBC می باشد تا پایداری مجانبی نقطه‌ی تعادل آن را تضمین نماید. همچنین، یک ساختار میراسازی با اتصالات درونی مناسب برای سیستم حلقه بسته، به گونه‌ای طراحی می شود که بتواند به خوبی نوسانات گذرا را مهار کند و پایداری سیستم را بهبود ببخشد. همچنین تخمین دامنه جذب برای سیستم حلقه بسته برای مدل پیشنهادی ارائه شده است.

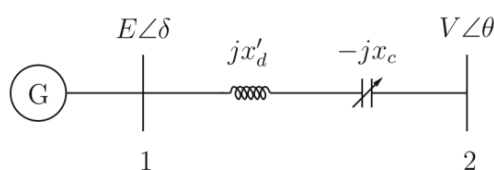
کلید واژه- سیستم تک ماشینه متصل به شین بی نهایت (SMIB)، روش IDA-PBC، خازن سری کنترل پذیر (CSC)، کنترل غیرخطی

۱- مقدمه

اخیرا استفاده از تئوری کنترل غیرخطی برای بهبود پایداری گذرای سیستم قدرت مورد بررسی قرار گرفته است. در [۱ و ۲] خطی سازی فیدبک برای کنترل سیستم‌های تک ماشینه، با استفاده از فیدبک خروجی و مشاهده گرهای حالت به کار رفته است. اما به دلیل غیرخطی بودن مساله، این روش قوی نیست. این مساله منجر شده که تکنیک کنترل مبتنی بر تابع انرژی برای این مساله ضرورت داشته باشد. استفاده از تابع انرژی برای استفاده در مباحث کنترلی در [۳] آمده است. در [۴] روش‌هایی براساس کنترلرهای تزریق میرایی که به کنترلرهای مشهور هستند، ارائه شده‌اند. در [۵]، کنترلرهای تزریق میرایی دینامیکی ارائه شده است. یک کنترلر مبتنی بر مشاهده گر در [۶] ارائه شده است

۲- فرمول بندی مسئله و استراتژی کنترلی

سیستم SMIB به همراه خازی سری نشان داده در شکل ۱ یک شین بی نهایت، یک سیستم قدرت بزرگ و با یک اینرسی بزرگ می باشد. این سیستم نوسان قابل توجهی در صورت رخ دادن شرایط گذرا از خود نشان نمی دهد. بنابراین می توان آن را به منظور دستیابی به عملکرد ژنراتور متصل شده به آن شین مبنا در نظر گرفت. شین داخلی ژنراتور از طریق راکتانس x'_d به شین بی نهایت متصل شده است. خازن سری توسط خازن متغیر $-jx_c$ معرفی شده است که بصورت سری با راکتانس x'_d در خط قرار می گیرد.



شکل ۱: شبکه SMIB

$$\dot{x}_1 = \frac{1}{T_{dc}} \{-x_1 + x_{1*} + u\} \quad (3)$$

که در آن T_{dc} ثابت زمانی محرک دینامیکی و u ورودی به محرک می باشد.

۲-۱- مدل درجه سوم شار-زوال سیستم SMIB همراه خازن سری

سیستم کنترلی در اینجا شامل دو زیر سیستم می باشد: یکی سیستم SMIB و دیگری دینامیک محرک (خازن سری) است. سیستم SMIB را با استفاده از مدل درجه سوم کلاسیک (۲) معرفی می شود. متغیرهای حالت سیستم $x_1 = \delta$ ، $x = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T$ و $x_4 = x_1, x_3 = E, x_2 = \omega$ در نظر گرفته می شوند. سیستم کنترل بصورت زیر می باشد:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{M} \left(P_m - D x_2 - \frac{V x_3 \sin(x_1)}{x_4} \right) \\ \dot{x}_3 = \frac{1}{T_{d0}} \left(E_{fd} - V \cos(x_1) + \frac{x_d}{x_4} (V \cos(x_1) - x_3) \right) \\ \dot{x}_4 = \frac{1}{T_{d0}} (-x_4 + x_{4*} + u) \end{cases} \quad (4)$$

که داریم:

$$x_{4*} = \frac{V x_3 \sin(x_{1*})}{P_m} - \frac{x_d (V \cos(x_{1*}) - x_{3*})}{E_{fd} - V \cos(x_{1*})} \quad (5)$$

بازای یک مقدار x_{1*} و x_{3*} داده شده، راکتانس موثر خط در تعادل عملیاتی می باشد. می توان معادله (۳) را بصورت زیر بازنویسی کرد.

همچنین، δ زاویه روتور و ω سرعت تغییرات زاویه روتور در مقایسه با مبنای چرخان سنکرونیزه ژنراتور می باشد. بعلاوه E, x_d, T_{d0} و E_{fd} به ترتیب راکتانس سنکرونیزه محور d ولتاژ راکتانس گذرا بر روی محور q ، ثابت زمانی گذرای حلقه باز محور d و ولتاژ تحریک ژنراتور که ثابت در نظر گرفته شده است می باشند. همچنین $D > 0, M > 0, P_m$ و P_G به ترتیب ثابت میرایی، ثابت ممان اینرسی، توان مکانیکی ورودی و توان تزریقی به سیستم معرفی می شوند.

از آنجایی که شین ۲ به عنوان شین بی نهایت معرفی شده است؛ لذا ولتاژ V ثابت می باشد. همچنین زاویه θ ثابت و برابر صفر در نظر گرفته می شود. اگر راکتانس موثر بین شین های ۱ و ۲ با x_1 معرفی گردد، بنابراین ناحیه عملکرد بصورت زیر معرفی می شود:

$$\mathcal{D} = \left\{ (\delta, \omega, E, x_1) \mid 0 \leq \delta \leq \frac{\pi}{2} - d_1, \right. \\ \left. E > d_2, x_1 > d_3 \right\} \quad (1)$$

که در آن $d_1 > 0, d_2 > 0$ و $d_3 > 0$ مقادیر کوچکی می باشند. مدل درجه سوم شار-زوال بطور گسترده در سیستم قدرت مورد استفاده قرار می گیرد و بصورت زیر تعریف می گردد.

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega \\ \dot{\omega} = \frac{1}{M} \left(P_m - D \omega - \frac{E V \sin(\delta)}{x_1} \right) \\ \dot{E} = \frac{1}{T_{d0}} \left(E_{fd} - V \cos(\delta) + \frac{x_d}{x_1} (V \cos(\delta) - E) \right) \end{cases} \quad (2)$$

در اینجا مفروض است خازن کنترل پذیر در مقدار از پیش تعریف شده حلقه باز x_{c*} و همچنین $x_l \equiv x_{l*}$ که در آن $x_{l*} > 0$ که راکتانس خط در تعادل مورد نظر می باشد. دو معادله اول از مجموعه معادلات سه گانه بالا معادلات مشهور درجه دوم نوسان را نشان می دهد که مدل دینامیکی روتور SMIB را بدست می دهد. سومین معادله اثر شار می باشد. خازن سری به عنوان یک محرک استفاده می شود و معادله دینامیکی آن، با استفاده از مدل درجه اول زیر بیان می شود:

$$J(x) = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{M} & 0 \\ -\frac{1}{M} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$R(x) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{D}{M^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{x_d - x_{4*}}{T_{d0}} \end{bmatrix}$$

که در آن $J(x) = -J^T(x)$ ماتریس ساختار اتصالی و $R(x) = R^T(x) \geq 0$ ماتریس میرایی می باشد. از ماتریس میرایی واضح است که پراکندگی در مختصات x_2 و x_3 که به ترتیب با $\frac{D}{M^2}$ و $\frac{x_d - x_{4*}}{T_{d0}}$ بدست می آیند وجود دارد. عموماً به دلیل ثابت زمانی بزرگ T_{d0} ، تغییرات در x_3 ناچیز است. اگر چه پراکندگی در x_2 بطور قابل چشمپوشی کوچک است، و بنابراین برای بهبود عملکرد گذرا سیستم SMIB در پراکندگی حاصل از مختصات x_2 از آن صرف نظر می کنیم. این مهم زمانی بدست می آید که میرایی اضافی به دینامیک خازن سری افزود و سپس ترمی شامل اتصال بین x_2 و خازن سری قائل شد. همچنین بطور همزمان معادله انرژی مناسبی به دینامیک حلقه بسته اطلاق می کنیم که در آن صورت سیستم حلقه بسته در x_* پایدار است.

۲-۲- کنترل کننده ترکیبی برای مدل درجه سه به همراه خازن سری کنترل پذیر با استفاده از IDA-PBC

در این بخش مدل کلاسیک فلو-زوال مدل SMIB به همراه خازن سری به منظور طراحی یک قانون کنترلی پایدارساز در نظر گرفته می شود. هدف کنترلی، مجانب سازی پایدار x_* و تخصیص میرایی و ساختار اتصالی برای سیستم حلقه بسته می باشد. سیستم زیر برای تابع انرژی دینامیکی حلقه بسته سیستم پیشنهاد می شود.

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u$$

$$= \begin{bmatrix} x_2 \\ \frac{1}{M} \left(P_m - Dx_2 - \frac{Vx_3 \sin(x_1)}{x_4} \right) \\ \frac{1}{T_{d0}} \left(E_{fd} - V \cos(x_1) + \frac{x_d}{x_4} (V \cos(x_1) - x_3) \right) \\ \frac{1}{T_{dc}} (-x_4 + x_{4*}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{T_{dc}} \end{bmatrix} u \quad (6)$$

سیستم حلقه باز معادله (۴) با $x_4 \equiv x_{4*}$ ، $u \equiv 0$ و بنابراین $\dot{x}_4 \equiv 0$ فرم زیر را به خود می گیرد:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{M} \left(P_m - Dx_2 - \frac{Vx_3 \sin(x_1)}{x_{4*}} \right) \\ \dot{x}_3 = \frac{1}{T_{d0}} \left(E_{fd} - V \cos(x_1) + \frac{x_d}{x_{4*}} (V \cos(x_1) - x_3) \right) \end{cases} \quad (7)$$

پیگیری این بحث نشان می دهد که دو نقطه تعادل حلقه که در آن $\bar{x} = (\bar{x}_1, 0, \bar{x}_3, x_{4*})$ که با مختصات \bar{x}_1 و \bar{x}_3 پاسخ معادلات زیر می باشند.

$$\begin{cases} P_m - \frac{V\bar{x}_3 \sin(\bar{x}_1)}{x_{4*}} = 0 \\ E_{fd} - V \cos(\bar{x}_1) + \frac{x_d}{x_{4*}} (V \cos(\bar{x}_1) - \bar{x}_3) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

یکی از نقاط تعادل پایدار که با نام x_* مشخص می شود؛ در حالیکه دیگری نقطه تعادل ناپایدار است که با نام x_u مشخص می گردد. بعلاوه معادله (۵) می تواند توسط port-Hamiltonian بازنویسی شود؛ لذا معادله انرژی بصورت زیر نوشته می شود:

$$H(x) = -P_m x_1 + \frac{Mx_2^2}{2} - \frac{Vx_3 \cos(x_1)}{x_{4*}} - \frac{E_{fd} x_3}{x_d - x_{4*}} + \frac{x_d x_3^2}{2x_{4*} (x_d - x_{4*})} \quad (9)$$

همچنین:

$$\dot{x} = (J(x) - R(x)) \frac{\partial H}{\partial x} \quad (10)$$

که در آن:

۱۳۹۴-۲۰ آبان ماه ۱۳۹۴ - دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)

$$u(x) = (g^+(x)g(x))^{-1} g^T(x) \cdot \left((J_d(x) - R_d(x)) \frac{\partial H_d}{\partial x} - f(x) \right) \quad (15)$$

$$u_e(x) = \frac{T_{dc} x_d (x_3 - V \cos(x_1)) (x_d x_3 - x_{4*} E_{fd} - (x_d - x_{4*}) V \cos(x_1))}{T_{d_0} x_4 x_{4*} (x_d - x_{4*})} - \frac{T_{dc} V x_3 x_2 \sin(x_1)}{x_4 x_{4*}}$$

$$u_d(x) = -T_{dc} \gamma_4(x) (x_4 - x_{4*})$$

$$H_d(x) = -P_m x_1 + \frac{M x_2^2}{2} - \frac{V x_3 \cos(x_1)}{x_{4*}} + \frac{x_d x_3^2}{2 x_{4*} (x_d - x_3^2)} - \frac{E_{fd} x_3}{x_d - x_{4*}} + \frac{(x_4 - x_{4*})^2}{2} \quad (12)$$

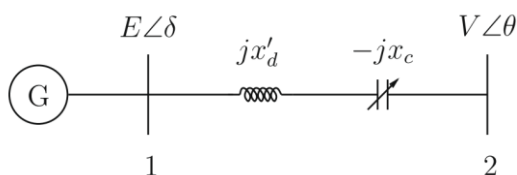
این تابع دارای مینیمم محلی در x_{4*} می باشد. بعلاوه این تابع در همسایگی بعضی x_* برای تمامی $d_2 > \frac{V(x_d - x_{4*})}{x_d d_1}$ برای x_{4*} و d_1 داده شده مثبت است.

در مرحله بعد ماتریس مناسب اتصال داخلی $J_d(x)$ و ماتریس میرایی $R_d(x)$ انتخاب می شود.

۳- شبیه سازی

۳-۱- شبکه تک ماشینه متصل به شین بی نهایت

در شکل زیر، سیستم SMIB نشان داده شده است..



شکل ۲: شبکه SMIB

در سیستم نشان داده شده خازن سری نیز بصورت نشان داده شده در خط قرار می گیرد. در اینجا پارامترهای شبیه سازی را بر اساس

مقادیر موجود در منبع [۷] بکار گرفته شده است: $M = \frac{8}{100\pi}$

$T_{dc} = 0.02 s$ و $V = 1 pu$ ، $P_m = 1.1 pu$ ، $D = \frac{0.4}{100\pi}$ ،

مقادیر شبیه سازی بالا واقع بینانه می باشد. ضریب $\frac{D}{M}$ بسیار

کوچک می باشد که نشان از میرایی مکانیکی ضعیف در ژنراتور سنکرون می باشد. بعلاوه، خازن سری دارای ثابت زمانی در بازه

۱۵-۲۰ میلی ثانیه می باشد. مابقی مقادیر در واحد پریونیت داده شده است. برای ارزیابی عملکرد قانون کنترلی پیشنهادی، خطایی

در قسمت انتهایی خط انتقال در زمان $t = 1 s$ برای مدت ۰،۱ ثانیه رخ می دهد.

$$J_d(x) = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{M} & 0 & 0 \\ -\frac{1}{M} & 0 & 0 & J_{d_{24}} \\ 0 & 0 & 0 & J_{d_{34}} \\ 0 & -J_{d_{24}} & -J_{d_{34}} & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_d(x) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{D}{M^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{x_d - x_{4*}}{T_{d_0}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_{d_0}} + \gamma_4(x) \end{bmatrix} \quad (13)$$

که در آن $J_{d_{24}} = \frac{V x_3 \sin(x_1)}{M x_4 x_{4*}}$ و

$J_{d_{34}} = \frac{x_d (x_3 - V \cos(x_1))}{M x_4 x_{4*}}$ است. ماتریس J_d به منظور

ایجاد ارتباط بین سیستم SMIB و دینامیک خازن سری کنترل پذیر می باشد. همانند مدل معادله نوسان، میرایی در مختصات x_4 معرفی می گردد.

با انجام محاسبات سر راست، می توان نشان داد که سیستم

حلقه بسته (۲۷) با H_d ، J_d و R_d که با معادلات (۸) و (۹) داده شده اند، معادله زیر را ارضاء می کند:

$$g^+(x) \left(f(x) - (J_d(x) - R_d(x)) \frac{\partial H_d}{\partial x} \right) = 0 \quad (14)$$

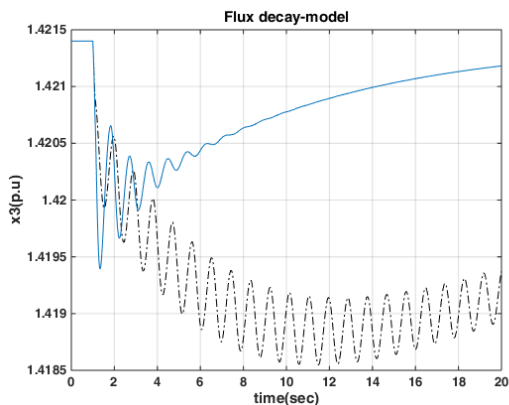
سپس با استفاده از معادله زیر می توان $u(x)$ به عنوان

قانون کنترلی که شامل دو ترم انرژی می باشد را بدست آورد:

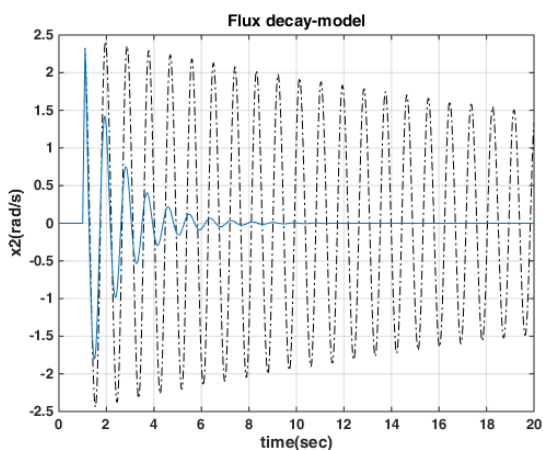
۲-۳ مدل شار-زوال

برای مدل شار-زوال مفروض است: $0.6 \leq x_4 \leq 1.0$ ،
 $T_{d0} = 10 \text{ s}$ ، $E_{fd} = 1.5 \text{ pu}$ ، $x_d = 0.95$
 عملیاتی $x_* = (0.7179, 0, 1.4214, 0.85)$ پارامتر تنظیم
 کننده γ_4 می باشد. متغیرهای حالت بصورت زیر طبق آنچه که
 در پیشتر گفته شده بود، تعریف می شود:

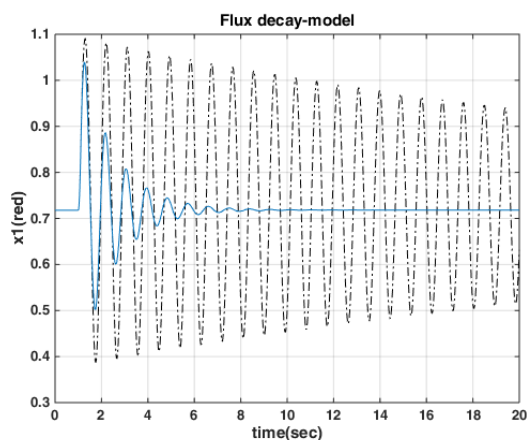
$$\begin{cases} x_1 = \delta \\ x_2 = \omega \\ x_3 = E \\ x_4 = x_f \end{cases} \quad (16)$$



شکل ۴: پاسخ مدل شار-زوال: تغییرات ولتاژ نسبت به زمان

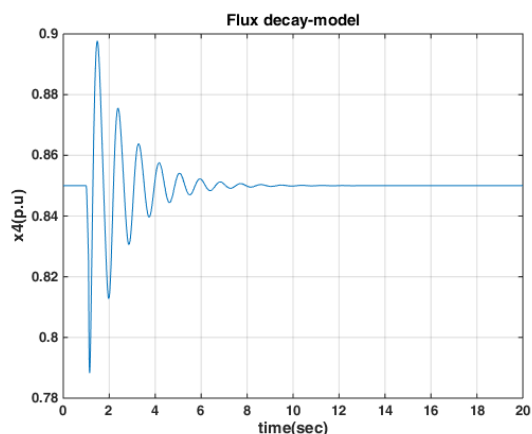


شکل ۵: پاسخ مدل شار-زوال: تغییرات سرعت زاویه ای نسبت به زمان



شکل ۶: پاسخ مدل شار-زوال: تغییرات دلتا نسبت به زمان

پاسخ گذرای مدل شار-زوال در شکل‌های ۲ تا ۵ نشان داده شده
 است. پاسخ حلقه باز، با نمودار نقطه چین مشخص شده است که
 نشان از نوسان زیاد در x_1 و x_2 ناشی از میرایی مکانیکی ضعیف
 می باشد. از طرف دیگر، ولتاژ ژنراتور جواب کندی را ناشی از ثابت
 زمانی بزرگ نشان می دهد. جواب حلقه بسته با $\gamma_4 = 0$ بوسیله
 نمودارهای تو پر نشان داده شده است.



شکل ۳: پاسخ مدل شار-زوال: تغییرات اندوکتانس خط نسبت به زمان

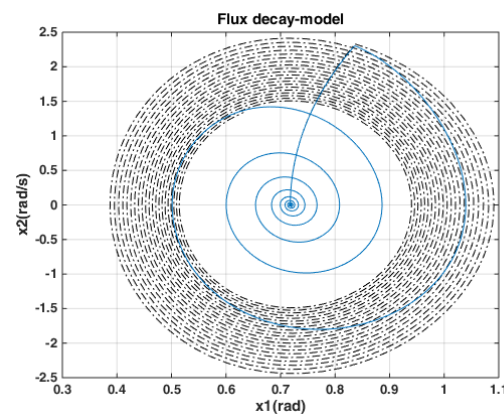
۴- نتیجه گیری

در این مقاله، نتایج کنترل پسیو سیستم SMIB بر روی مسئله پایداری ارائه شده است. سیستم SMIB با استفاده از مدل غیر خطی درجه سوم شار-زوال نشان داده شده است. خازنی سری به عنوان یک محرک با سیستم SMIB که با یک سیستم درجه یک مدل شده، استفاده شد. در اینجا از مبانی IDA-PBC برای تخصیص تابع انرژی مناسب $H_d(x)$ برای سیستم حلقه بسته استفاده شده است. با این تابع انرژی، سیستم حلقه بسته از نظر مجانبی پایدار در نقطه عملیاتی پایدار می‌شود. همچنین، تخمین ناحیه جذب برای سیستم حلقه بسته داده شده است. روش پیشنهادی یک استراتژی کنترلی غیر خطی است و بنابراین در ناحیه بزرگتری نسبت به کنترل کننده خطی قابل استفاده است. علاوه بر این، روش پیشنهادی از یک خازن سری کنترل کننده پذیر به عنوان محرک استفاده می‌کند و بنابراین نسبت به کنترل کننده تحریکی دارای سرعت و اطمینان بیشتری است.

مراجع

- [1] X. Wang, Y. Chen, G. Han, C. Song, "Nonlinear dynamic analysis of a single-machine infinite-bus power system", *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 39, No. 10-11, pp. 2951-2961, 2015.
- [2] M. Ghandhari, G. Andersson, and I.A. Hiskens, "Control Lyapunov functions for controllable series devices". *Power Systems, IEEE Transactions on*, Vol. 16, No. 4, pp. 689-694, 2001.
- [3] D. Langarica-Córdoba, R. Ortega, D. Casagrande, "Transient stabilization of multimachine power systems: Towards a global decentralized solution", *European Journal of Control*, Available online 30 September 2015.
- [4] P. Zhao, W. Yao, J. Wen, L. Jiang, "Shaorong Wang, Shijie Cheng, Improved synergetic excitation control for transient stability enhancement and voltage regulation of power systems", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 68, pp. 44-51, 2015.
- [5] T. Shen, et al. "Adaptive L 2 disturbance attenuation of Hamiltonian systems with parametric perturbation and application to power systems. in Decision and Control", *Proceedings of the 39th IEEE Conference on*. 2000. IEEE.
- [6] R. Ortega, and P. Stefanov, "A passivation approach to power systems stabilization" 1998.
- [7] M. Ghandhari, G. Andersson, I.A. Hiskens, "Control Lyapunov functions for controllable series devices". *IEEE Trans Power Syst* Vol. 16, No. 4, pp. 689-694, 2010.
- [8] M. Ghandhari, "Control Lyapunov functions: a control strategy for damping of power oscillations in large power systems". Ph.D. thesis, KTH, Bonn, Germany; 2000.

نوسان در x_1 و x_2 در عرض تقریباً ۲ ثانیه میرا می‌شوند. پاسخ x_3 همچنین بهبود یافته است. از آنجاییکه ثابت زمانی T_{dc} خازن سری به اندازه کافی کوچک می‌باشد، میرایی ذاتی که با $\frac{1}{T_{dc}}$ بدست می‌آید در دینامیک خازن سری موجود است. بنابراین نیازی به هیچ میرایی اضافی خارجی γ_4 نمی‌باشد. میرایی ذاتی در دینامیک خازن سری، توسط ترم اتصال درونی به سیستم SMIB منتقل می‌شود. توجه شود که مقادیر ورودی از محدودیت های اشباع گذر نمی‌کند. شکل زیر نمای فازی پاسخ را نشان می‌دهد.



شکل ۷: پاسخ مدل شار-زوال: تغییرات سرعت زاویه ای نسبت به دلتا

مدل شار-زوال شامل مدل معادله نوسان همراه با اثر شار-زوال بر روی ولتاژ تولیدی است. مدل معادله نوسان دینامیک روتور ژنراتور سنکرون را توصیف می‌کند. بنابراین می‌تواند در کنترل ترکیبی برای پایداری زاویه روتور استفاده شود. ولتاژ ترمینال ژنراتور می‌تواند بدون خطای دقت، ثابت در نظر گرفته شود. در [۸ و ۷] روشی مبتنی بر روش تابع کنترلی لیاپانف پیشنهاد شده است. در آنجا نشان داده شده است که مشتق زمانی تابع انرژی سیستم حلقه بسته می‌تواند با استفاده از یک CSD در سیستم قدرت منفی تر شود. روش کنترلی پیشنهادی، زمانیکه پاسخ حلقه بسته را بوسیله: الف) انتخاب تابع انرژی مناسب و ب) ساختار میرا کننده و یک ماتریس اتصالات مناسب آزادی بیشتری را باعث می‌شود.