

کنترل مود لغزشی ولتاژ ترمینال ژنراتور سنکرون

محسن جوکار
mjoukar@nri.ac.ir

رضا قائمی
rghaemi@nri.ac.ir

پژوهشگاه نیرو - پژوهشکده برق
گروه الکترونیک صنعتی

واژه‌های کلیدی: ژنراتور سنکرون، ولتاژ ترمینال، خطی‌سازی فیدبک، سطح لغزش

خلاصه

این مقاله کنترل ولتاژ ترمینال ژنراتور سنکرون را مورد بررسی قرار می‌دهد. روشی که در این مقاله ارائه می‌شود براساس روش کنترل خطی‌سازی فیدبک می‌باشد و هدف اصلی این است که بر این اساس پایداری سیستم بهبود یابد و ولتاژ ترمینال تحت اغتشاشات با دامنه زیاد و خطای اتصال کوتاه کنترل شود.

علاوه بر این با توجه به اینکه روش خطی‌سازی فیدبک منوط به داشتن اطلاع از پارامترهای سیستم می‌باشد کنترل کننده خطی‌سازی فیدبک حالت لغزشی ارائه شده است. پاسخ سیستم در حالت اتصال کوتاه و همچنین تغییر ولتاژ مرجع مشاهده شده است.

مقدمه

در طول دهه گذشته ابعاد و پیچیدگی سیستمهای قدرت به صورت قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است. از این رو در

مواجهه با این سیستمها و بهره‌برداری از آنها آنچه که به صورت عمده مورد توجه قرار می‌گیرد پایداری ولتاژ می‌باشد. سیستمهای قدرت به صورت معمول به گونه‌ای طراحی می‌شوند که در ناحیه‌ای که رفتار سیستم خطی است عمل کنند. در مواقعی که اغتشاشات کوچک هستند، مدل خطی سیستم قدرت برای تحلیل پایداری و طراحی کنترل کننده مناسب می‌باشد. کنترل کننده‌های خطی نظیر PSS و AVR که به صورت عمده بر پایه الگوریتمهای کنترل کلاسیک استوار می‌باشند میراثی لازم برای اغتشاشات کوچک و همچنین پایداری مجانبی را برای این اغتشاشات منجر می‌شوند.

به ازای اغتشاشات با دامنه زیاد نقطه کار سیستم تغییر می‌کند و غیر خطی بودن سیستم اثر خود را نشان می‌دهد. تحت این شرایط کنترل کننده‌های خطی دیگر قادر نیستند پایداری مجانبی سیستم را تضمین کنند. در صورتی که سیستم دچار خطای بزرگی شود نقطه کار سیستم به صورت قابل

مدل ریاضی

مدلی که براساس آن کنترل کننده بنا شده مدل یک سیستم مرتبه پنجم ژنراتور سنکرون می باشد. در این سیستم ژنراتور به یک باس بی نهایت توسط یک خط انتقال با مقاومت R_e و سلف L_e متصل می باشد. در این مدل جریانها به عنوان متغیرهای حالت در نظر گرفته شده اند و بر مبنای مدل کلاسیک سه سیم پیچ استاتور و یک سیم پیچ میدان و دو سیم پیچ دمپر در نظر گرفته شده است. [۱۵]

به این ترتیب یک مدل مرتبه پنجم از مدل الکتریکی سیستم بدست خواهد آمد که بر آن تبدیل پارک کلاسیک اعمال شده است.

معادلات دینامیکی که به عنوان مدل ژنراتور سنکرون در نظر گرفته شده است عبارت است از :

$$\begin{bmatrix} L_d & 0 & -L_{md} & -L_{md} & 0 \\ 0 & L_q & 0 & 0 & -L_{md} \\ L_{md} & 0 & -L_{fd} & -L_{md} & 0 \\ L_{md} & 0 & -L_{md} & -L_{kd} & 0 \\ 0 & L_{mq} & 0 & 0 & -L_{kq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_d \\ \dot{i}_q \\ \dot{i}_{fd} \\ \dot{i}_{kd} \\ \dot{i}_{kq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s & \omega L_q & 0 & 0 & -\omega L_{mq} \\ -\omega L_d & -R_s & \omega L_{md} & \omega L_{kd} & 0 \\ 0 & 0 & R_{fd} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{kd} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{kq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{i}_d \\ \bar{i}_q \\ \bar{i}_{fd} \\ \bar{i}_{kd} \\ \bar{i}_{kq} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_{fd} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1-1)$$

که در آن:

$\bar{i}_d(t)$ و $\bar{i}_q(t)$: جریانهای محورهای طولی و عرضی
 $V_d(t)$ و $V_q(t)$: ولتاژهای ترمینال محورهای طولی و عرضی

$\bar{i}_{fd}(t)$: جریان سیم پیچی تحریک

$V_{fd}(t)$: ولتاژ کنترل تحریک

$\bar{i}_{kd}(t)$ و $\bar{i}_{kq}(t)$: جریان سیم پیچهای دمپر در محورهای طولی و عرضی

R_s : مقاومت استاتور

R_{fd} : مقاومت میدان

R_{kd} و R_{kq} : مقاومت سیم پیچهای دمپر

ملاحظه ای تغییر خواهد کرد و از آنجایی که سیستم رفتار غیرخطی خود را آشکار می کند کنترل کننده های خطی تضمین کننده پایداری مجانبی نمی باشند. از این روی باید از کنترل کننده های غیرخطی که عملکرد آنها مستقل از نقطه کار است استفاده کرد.

در این مقاله ابتدا کنترل کننده غیرخطی مبتنی بر روش غیرخطی خطی سازی فیدبک به یک مدل کامل تک ورودی، تک خروجی سیستم قدرت اعمال می کنیم تا پایداری و میراثی سیستم را حتی تحت اغتشاشات بزرگ به دست آوریم. اعمال خطی سازی فیدبک به سیستم قدرت ابتدا در [۱] و سپس در [۲۳] مورد بررسی قرار گرفت. موضوع اصلی در آنها این بود که پایداری سیستم و میزان میراثی را با استفاده از کنترل تحریک افزایش دهند. سیستم تنها با توجه به ورودی تحریک خطی شده بود. مدل غیرخطی سیستم به مدل مرتبه سوم کاهش یافته است و در نتیجه دینامیک داخلی برای سیستم نمی ماند.

در [۴] روش خطی سازی فیدبک برای دستیابی پایداری گذرا و برای بدست آوردن جبران مطلوب پس از خطا به کار رفته است. مدلی که به کار رفته مدل مرتبه ۳ شامل مدل مرتبه یک ژنراتور و مدل خطی شده توربین می باشد.

در روشهای ارائه شده مشخص نشده است که اگر دینامیک دقیق سیستم در دست نباشد چگونه می توان پارامترهای کنترل کننده مبتنی بر روش خطی سازی فیدبک را مشخص کرد. از آنجایی که روش خطی سازی فیدبک مبتنی بر حذف قسمت های غیر خطی دینامیک می باشد داشتن مدل دقیق سیستم الزامی می نماید و در غیر این صورت رابطه بین ورودی تعریف شده در این روش با خروجی خطی نیست بلکه اختلاف مدل واقعی و مدل فرض شده در صورت اغتشاش خود را نشان می دهد.

در این مقاله با ارائه روش مقاوم کنترل مود لغزشی [۶] برای جبران نامعینی موجود در سیستم روشی برای کنترل ولتاژ ترمینال با استفاده از تحریک ارائه می شود که در آن نامعینی در سیستم تا یک کران بالای معین اغتشاشی در سیستم ایجاد نکند.

که در آن V^∞ مقدار rms ولتاژ باس δ زاویه قدرت ژنراتور و a زاویه فاز آن است. این نکته باید در نظر گرفته شود که کلیه متغیرها و پارامترها در روابط به صورت پریونیت بیان شده‌اند.

با در نظر گرفتن روابط (۱-۱) و (۲-۱) مدل ژنراتور سنکرون را می‌توان به صورت مدل فضای حالت بیان کرد:

$\dot{x} = F(X) + G(X)u$
که در آن $X = [i_d, i_q, i_{fd}, i_{kd}, i_{kq}]$ بردار حالت و $u = u_{fd}$ سیگنال کنترل ورودی یا همان ولتاژ تحریک می‌باشد. همچنین $F(x)$ و $G(x)$ را می‌توان به صورت زیر نشان داد

$$; F(x) = \begin{bmatrix} A_{11}x_1 + A_{12}x_3 + A_{13}\omega x_2 + A_{14}x_4 + A_{15}\omega x_5 + A_{16}\cos(\delta - a) \\ A_{21}\omega x_1 + A_{22}x_2 + A_{23}\omega x_3 + A_{24}\omega x_4 + A_{25}x_5 + A_{26}\sin(\delta - a) \\ A_{31}x_1 + A_{32}x_3 + A_{33}\omega x_2 + A_{34}x_4 + A_{35}\omega x_5 + A_{36}\cos(\delta - a) \\ A_{41}x_1 + A_{42}x_3 + A_{43}\omega x_2 + A_{44}x_4 + A_{45}\omega x_5 + A_{46}\cos(\delta - a) \\ A_{51}\omega x_1 + A_{52}x_2 + A_{53}\omega x_3 + A_{54}\omega x_4 + A_{55}x_5 + A_{56}\sin(\delta - a) \end{bmatrix} \quad G(x) = [g_1 \ 0 \ g_2 \ g_3 \ 0]^T \quad (3-1)$$

$$\begin{aligned} V_d &= (R_e + L_e A_{11})x_1 + L_e A_{12}x_3 + \\ &(L_e A_{13} - L_e)x_2\omega + L_e A_{14}x_4 + \\ &L_e A_{15}x_5\omega + (V^\infty + L_e A_{16})\cos(\delta - a) + L_e g_1 u \\ V_q &= (R_e + L_e A_{22})x_2 + (L_e A_{21} L_e) + \omega x_1 + \\ &L_e A_{23}\omega x_3 + L_e A_{24}\omega x_4 + L_e A_{25}x_5 + \\ &(L_e A_{26} - V^\infty)\sin(\delta - a) \end{aligned} \quad (5-1)$$

مشاهده می‌شود که ورودی کنترل ولتاژ تحریک $u = u_{fd}$ در رابطه V_d ظاهر می‌شود. از آنجایی که میزان اثر V_{fd} در V_d بسیار ناچیز است از آن صرف نظر می‌کنیم. در حقیقت این ارتباط در مدل‌های مرتبه پایین‌تر به طور کل ظاهر نمی‌شود.

برای اینکه کنترل کننده غیرخطی u را بدست بیاوریم مشتق اول y را محاسبه می‌نماییم.

$$\frac{dy}{dt} = \frac{dV_t}{dt} = \alpha(x) + \beta(x)u \quad (6-1)$$

L_d و L_q : اندوکتانس سلف در محورهای طولی و عرضی

L_{fd} : اندوکتانس سلفی روتور

L_{kd} و L_{kq} : اندوکتانس سلفی سیم‌پیچهای دمپر در محورهای طولی و عرضی

L_{md} و L_{mq} : اندوکتانس سلف مغناطیس کننده در

محورهای طولی و عرضی

از آنجایی که ژنراتور سنکرون به باس بی‌نهایت متصل است. ولتاژهای V_d و V_q در مختصات پارک را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = R_e \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + L_e \begin{bmatrix} \dot{i}_d \\ \dot{i}_q \end{bmatrix} - \omega L_e \begin{bmatrix} i_d \\ -i_q \end{bmatrix} + V^\infty \begin{bmatrix} \cos(\delta - a) \\ \sin(\delta - a) \end{bmatrix} \quad (2-1)$$

که در آن $i=1,5$ $j=1,6$ و A_{ij} و همچنین g_i , $i=1,3$ ثابت‌هایی هستند که به پارامترهای ژنراتور R_{kd} و R_{kq} و R_s و L_{md} و L_{fd} و L_{kq} و L_{kd} و L_q و L_d و L_{mq} و به پارامترهای بار R_e و L_e و V^∞ بستگی دارند.

خطی‌سازی سیستم

روش خطی سازی فیدبک یکی از روشهای پر کاربرد برای کنترل غیرخطی سیستمهای غیرخطی است. از آنجایی که هدف کنترل ولتاژ ترمینال با استفاده از ولتاژ d تحریک می‌باشد خروجی سیستم را ولتاژ ترمینال V_t خواهد بود:

$$y = V(t) = \sqrt{V_d^2 + V_q^2} \quad (4-1)$$

با در نظر گرفتن روابط (۱-۱) و (۲-۱) V_d و V_q را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\|A_{vd}A_{vd}^T - \hat{A}_{vd}\hat{A}_{vd}^T\| \leq M_{vd}$$

$$\|A_{vq}A_{vq}^T - \hat{A}_{vq}\hat{A}_{vq}^T\| \leq M_{vq}$$

$$\|C_{vd}A_{vd}^T - \hat{C}_{vd}\hat{A}_{vd}^T\| \leq M_{cd}$$

$$\|C_{vq}A_{vq}^T - \hat{C}_{vq}\hat{A}_{vq}^T\| \leq M_{cq}$$

$$\alpha_{\min}\hat{\beta}(x) < \beta(x) < \alpha_{\max}\hat{\beta}(x)$$

خواهیم داشت:

$$\|\alpha(x) - \hat{\alpha}(x)\| \leq$$

$$\frac{1}{V_t}(X^T(M_{vd} + M_{vq})F(x) + (M_{cd} + M_{cq}))\|F(x)\| \\ = B(x)$$

کنترل کننده حالت لغزشی

سطح لغزش را به صورت زیر در نظر می گیریم:

$$\delta(x) = (V_t - V_{td}) + C \int_0^t (V_t - V_{td})dt$$

که در آن C ثابت بزرگتر از صفر و ولتاژ ترمینال مطلوب می باشد.

تابع لیاپانف V(x) را به صورت زیر تعریف می کنیم:

$$V(x) = \frac{1}{2}\delta^2(x)$$

در نتیجه با توجه به رابط (۶-۱) خواهیم داشت:

$$\dot{V}(x) = \delta(x)\dot{\delta}(x) = \delta(x)(\alpha(x) + \beta(x)u)$$

اگر u را به صورت زیر تعریف کنیم:

$$u = -\frac{1}{\hat{\beta}(x)} \left[-\hat{\alpha}(x) - K \frac{\delta(x)}{\|\delta(x)\|} - C(V_t - V_{td}) \right]$$

در نتیجه رابطه (۴-۱) به صورت زیر خواهد بود.

$$\dot{V}(x) = \delta(x)(\alpha(x) - \frac{\beta}{\hat{\beta}(x)} \left[-\hat{\alpha}(x) - K \frac{\delta(x)}{\|\delta(x)\|} \right]) =$$

$$\delta(x) \left[(1 - \frac{\beta(x)}{\hat{\beta}(x)})\delta(x) + \frac{\beta(x)}{\hat{\beta}(x)}(\delta(x) - \hat{\delta}(x)) \right] - K\|\delta(x)\|$$

با توجه به رابطه (۳-۱) خواهیم داشت:

$$\dot{V}(x) \leq \delta(x)[(1 - \alpha_{\min})\|\alpha(x)\| + \alpha_{\max}B(x)] - K\|\delta(x)\|$$

به این ترتیب اگر K را به صورت زیر داشته باشیم:

$$K \geq \eta + (1 - \alpha_{\min})\|\alpha(x)\| + \alpha_{\max}B(x) \quad \eta > 0$$

که در آن:

$$\alpha(x) = \frac{\partial V_t}{\partial x} F(x) = \frac{1}{2V_t} \left[2V_d \frac{\partial V_d}{\partial x} + 2V_q \frac{\partial V_q}{\partial x} \right] \cdot F(x)$$

$$M(x) = \frac{\partial V_t}{\partial x} G(x) = \frac{1}{2V_t} \left[2V_d \frac{\partial V_d}{\partial x} + 2V_q \frac{\partial V_q}{\partial x} \right] \cdot G(x)$$

با توجه به اینکه قسمت مکانیکی ژنراتور توسط گاورنر کنترل

می شود که این کنترل منجر به کنترل δ و ω می شود از

آنجایی که قسمت مکانیکی دارای دینامیک کند می باشد لذا

می توان فرض کرد که تغییرات δ و ω به میزان قابل قبولی

کندتر از تغییرات متغیرهای حالت بردار X می باشد بر این

اساس می توان در رابطه (۵-۱) δ و ω را ثابت فرض کرد به

این ترتیب خواهیم داشت:

$$V_d = A_{vd}^T X + C_{vd}$$

$$V_q = A_{vq}^T X + C_{vq}$$

که در آن:

$$A_{vd}^T = [R_e + L_e A_{11} \quad (L_e A_{13} - L_e)\omega \quad L_e A_{12} \quad L_e A_{14} \quad L_e A_{15}\omega]$$

$$C_{vd} = (V^\infty + L_e A_{16} \cos(\delta - a))$$

$$A_{vq}^T = [(L_e A_{21} + L_e)\omega \quad (R_e + L_e A_{22}) \quad L_e A_{23}\omega \quad L_e A_{24}\omega \quad L_e A_{25}]$$

$$C_{vq} = (L_e A_{26} - V^\infty) \sin(\delta - a)$$

به این ترتیب خواهیم داشت:

$$\alpha(x) = \frac{1}{V_t} [A_{vd}^T X + C_{vd}]A_{vd} + [A_{vq}^T X + C_{vq}]A_{vq} \cdot F(x)$$

$$= \frac{1}{V_t} (X^T (A_{vd}A_{vd}^T + A_{vq}A_{vq}^T)F(x) + (C_{vd}A_{vd}^T + C_{vq}A_{vq}^T)F(x))$$

و

$$\beta(x) = \frac{1}{V_t} [A_{vd}^T X + C_{vd}]A_{vd} + [A_{vq}^T X + C_{vq}]A_{vq} \cdot G$$

$$= \frac{1}{V_t} (X^T (A_{vd}A_{vd}^T + A_{vq}A_{vq}^T)G + (C_{vd}A_{vd}^T + C_{vq}A_{vq}^T)G)$$

با فرض وجود نامعین در سیستم می توان فرض کرد به

جای مقادیر واقعی A_{ij} در مدل فضای حالت و R_e و L_e

در مدل خط مقادیر تخمینی آنها یعنی \hat{A}_{ij} و \hat{R}_e و \hat{L}_e را

در اختیار داریم. در نتیجه مقادیر تخمینی A_{vd} ، A_{vq} ، C_{vd}

و C_{vq} را به صورت \hat{A}_{vd} ، \hat{A}_{vq} ، \hat{C}_{vd} ، \hat{C}_{vq} خواهیم

داشت در نتیجه $\alpha(x)$ را به صورت $\hat{\alpha}(x)$ و $\beta(x)$ را به

صورت $\hat{\beta}(x)$ داریم. اگر فرض شود:

نتیجه گیری

در این مقاله کنترل غیرخطی تحریک یک سیستم تک ماشینه متصل به شین بی نهایت مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله با استفاده از روش خطی سازی فیدبک برای مدل مرتبه پنج الکتریکی کنترل کننده غیرخطی بر پایه روش کنترل حالت لغزش طراحی شده است. با توجه به روش مقاوم کنترل حالت لغزشی نامعینی هر تغییری در پارامترهای سیستم و یا ω و δ توسط کنترل کننده جبران می شود. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که پاسخ سیستم (ولتاژ ترمینال) نسبت به ورودی با وجود نامعینی در پارامترهای ژنراتور بسیار خوب و قابل قبول می باشد.

$\dot{V}(x)$ منفی معین خواهد بود و در نتیجه سطح لغزش صفر خواهد شد. به این ترتیب V_t ، V_{td} را تحت دینامیک مرتبه اول با ثابت زمانی C تعقیب خواهد کرد.

نتایج شبیه سازی

عملکرد کنترل کننده ارائه شده بر روی مدل مرتبه ۷ یک سیستم تک ثانیه متصل به شین بی نهایت شده است. پارامترهای سیستم به صورت پریونیت به صورت زیر می باشد.

$$P_n = 100e6VA, V_{L-L} = 13800(V_{rms}), f_n (Hz) = 50Hz$$

راکتانسها (بصورت پریونیت)

$$X_d = 1.822; X_{d'} = 0.2129; X_{d''} = 0.162; X_q = 1.71;$$

$$X_{q''} = 0.162; X_L = 0.075$$

ثابت زمانی ها (برحسب ثانیه)

$$T_{do'} = 6 - 1; T_{do''} = 0.0252; T_{qo'} = 0.86; T_{qo''} = 0.05$$

$$R_s = 1. \text{Se-}3 \text{ (مقاومت استاتور)}$$

$$V^\infty = 1; a = 90; R_e = 5.6566e - 2 \text{ohm}; L_e = 6.5668e - 4 \text{ H}$$

پارامترهای بکار رفته در کنترل کننده ۱۰٪ نسبت به مقادیر مدل بیان شده دارای اختلاف می باشند.

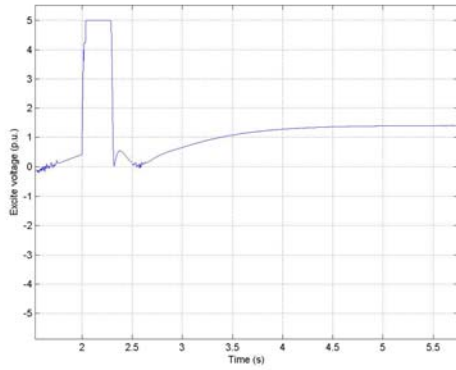
پایداری بیشتر با شبیه سازی اتصال کوتاه سه فاز به مدت ۱۰۰ ms ثابت شده است. شکل (۱) ولتاژ ترمینال را پس از اتصال کوتاه نشان می دهد. این شکل پایداری بسیار مطلوب ایجاد شده توسط کنترل کننده غیرخطی را نشان می دهد. شکل (۲) ولتاژ کنترل تحریک را به ازای این تغییرات نشان می دهد.

شکل (۳) توان حقیقی و شکل (۴) توان راکتیو تحویلی توسط ژنراتور را نشان می دهد.

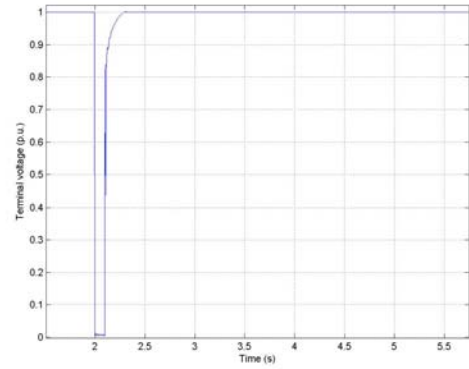
شکل (۵) ولتاژ ترمینال را به ازای تغییر در مقدار مرجع نشان می دهد. پاسخ بسیار مطلوب ولتاژ ترمینال خروجی در این شکل مشخص است.

شکل (۶) ولتاژ تحریک و شکل های ۷ و ۸ به ترتیب توان حقیقی و موهومی را در این حالت نشان می دهند.

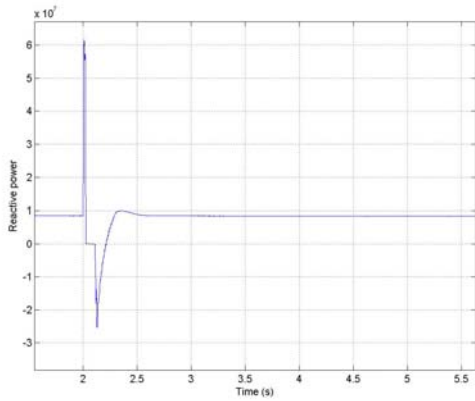
لازم به ذکر است برای کنترل توان از گاورنر با کنترل کننده متداول PI استفاده شده است.



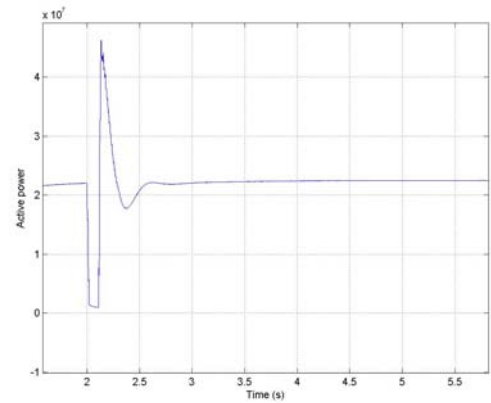
شکل (۲): ولتاژ تحریک به ازای خطای اتصال کوتاه



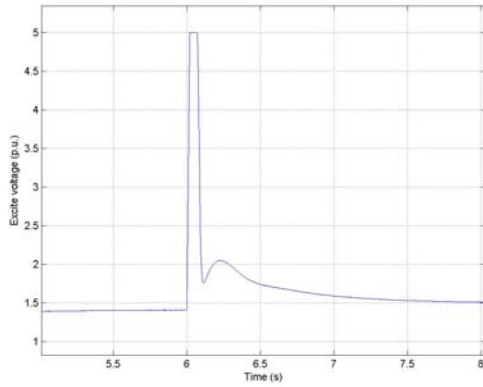
شکل (۱): ولتاژ ترمینال به ازای حالت اتصال کوتاه



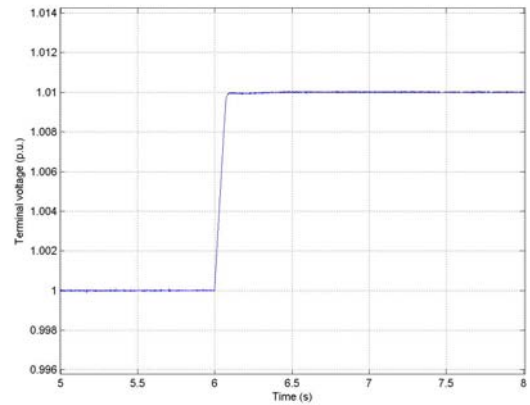
شکل (۴): توان موهمی به ازای خطای اتصال کوتاه



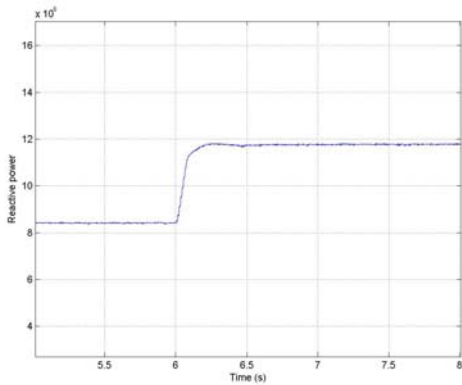
شکل (۳): توان حقیقی به ازای خطای اتصال کوتاه



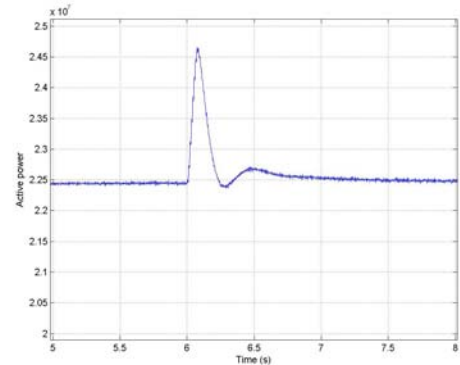
شکل (۶): ولتاژ تحریک به ازای تغییر در ولتاژ مرجع



شکل (۵): ولتاژ ترمینال به ازای تغییر ولتاژ مرجع



شکل (۸): توان موهمی به ازای تغییر در ولتاژ مرجع



شکل (۷): توان حقیقی به ازای تغییر در ولتاژ مرجع

مراجع

- [1] Marino, R., "An Example of a Nonlinear Regulator", IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. Ac-29, No. 3, March 1984.
- [2] Chapman, J.w., Ilic, M.D., King, C.A, Eng., L., and Kaufman, H., "Stabilizing a Multimachine Power System Via Decentralized feedback Linearizing Excitation Control", IEEE Trans. on Power systems, Vol. 8, No. 3, August 1993
- [3] Mielczarsk, w., and Zajaczkowski, A.M., "Multivariable Nonlinear Controller for a Synchronous Generator", Optimal Control Application and Methods, Vol.15, 49-65,1994
- [4] Zhu, G., Dessaint, L.A., and Akhrif, O., "On the Damping of Local Mode Oscillations by Time-Scale Decomposition", in preparation
- [5] Kundur, P., "Power System Stability and Control", McGraw-Hill Inc., 1994
- [6] Jean-Jacques Slotine, Weiping Li, "Applied Nonlinear Control", Printice Hall, 1990