

## طراحی کنترلر مقاوم برای جبران سازی توان راکتیو در شبکه‌های صنعتی براساس روش $H^\infty$

مهرداد عابدی\*، سید عباس طاهر\*\*، علی خاکی صدیق\*\*\* و حسین سیفی\*\*\*

دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشگاه تربیت مدرس و دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی

(دریافت مقاله: ۱۳۷۵/۴/۱۲ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۷۶/۱۰/۲۲)

چکیده - در این مقاله به طراحی و ارزیابی کنترل کننده مقاوم برای جبران سازی توان راکتیو در شبکه‌های قدرت صنعتی شامل موتورهای القایی تک قفسه‌ای برای بهبود سطح ولتاژ ترمینال موتورهای پرداخته شده است. طراحی کنترل کننده با توجه به نامعینی موجود در مدلسازی شبکه صنعتی بر اساس نظریه  $H^\infty$  است. عملکرد کنترل کننده با شبیه سازی غیر خطی سیستم مورد مطالعه در حوزه زمان مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج حاصل از شبیه سازی نشان دهنده بهبود سطح ولتاژ شبکه با استفاده از کنترل کننده مقاوم در مقایسه با کنترل کننده بهینه LQR است.

### $H^\infty$ Controller Design for Static VAR Compensators in Industrial Networks

M. Abedi, S. A. Taher, A. K. Sedigh and H. Seifi

Amirkabir University, Tarbiat Modares University and K.N. Toosi University

**ABSTRACT-** This paper deals with the design and evaluation of a robust controller for static VAR compenstator (SVC) in remote industrial power systems to enhance the voltage profile for three-phase single cage induction motor (SCIM) loads. The controller design is based on  $H^\infty$  theory to deal with uncertainties arising in industrial network modelling .

The performance of the  $H^\infty$  controller has been evaluated extensively through non-linear time domain simulation. It is concluded that the robust controller (RSVC) enhances the voltage profile for SCIM loads compared with the optimal (OSVC) type which consists of optimal state feedback (LQR).

۱- مقدمه

مناسبی است [۱-۳]. بعضی از بارهای صنعتی مانند موتورهای القایی سه فاز تغییرات سریع و قابل ملاحظه‌ای را به‌خصوص در لحظات اولیه راه‌اندازی بر ولتاژ شبکه اعمال می‌کنند، به‌ویژه آنکه

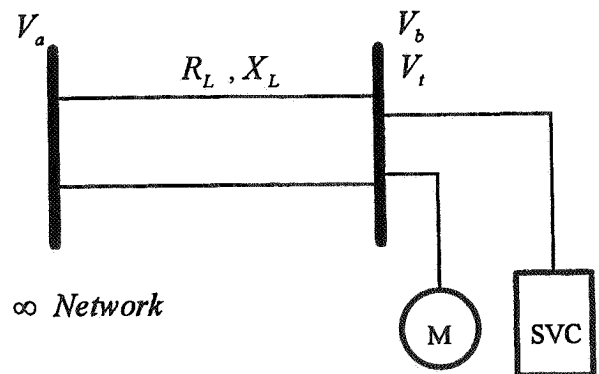
از رایجترین نوع اغتشاش در سیستم قدرت، نوسانات و تغییرات ولتاژ است. کنترل توان راکتیو برای مقابله با این تغییرات، ابزار

\* استاد      \*\* استادیار      \*\*\* دانشیار

راکتانس	X	زمان خارج شدن خط	t <sub>lo</sub>	سوسپتانس	B
فرکانس زاویه‌ای مبنا	ω <sub>b</sub>	زمان وقوع خطا	t <sub>sc</sub>	ثابت اینرسی	H
سرعت روتور	ω <sub>r</sub>	زمان رفع خطا	t <sub>c</sub>	جریان الکتریکی	i
سرعت سنکرون قاب	ω <sub>s</sub>	ثابت زمانی	T <sub>a</sub>	ضریب بهره	K <sub>a</sub>
مرجع dq	dq	گشتاور الکترومغناطیسی	T <sub>e</sub>	تعداد موتورها	N <sub>L</sub>
فلوی مغناطیسی	Ψ	گشتاور بار	T <sub>l</sub>	اپراتور مشتق زمانی	P
		ترانسپوز ماتریس	[ ] <sup>t</sup>	مقاومت اهمی	R
		ولتاژ	V	زمان راه اندازی	t <sub>st</sub>

## ۲- مدل‌سازی سیستم تحت مطالعه

سیستم تحت بررسی در این مقاله در شکل (۱) نشان داده شده است. در این سیستم تعدادی از موتورهای القایی تک قفسی سه فاز از طریق دو خط انتقال انرژی از شین بی‌نهایت تغذیه می‌شوند. SVC نیز در پایانه بارهای موتوری نصب شده است. پارامترهای شبکه مورد مطالعه در پیوست آورده شده است.



شکل ۱- سیستم تحت مطالعه

## ۱-۲ مدل‌سازی موتورهای القایی تک قفسی سه فاز

برای شبیه سازی این‌گونه موتورها از قاب مرجع dq که با سرعت سنکرون می‌چرخد، استفاده شده است. معادله‌های لازم در شبیه سازی این موتورها به صورت زیرند [۱۲]:

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{\omega_s \Psi_{ds}}{\omega_b} + \frac{1}{\omega_b} P \Psi_{qs} \quad (1)$$

$$V_{ds} = R_s i_{ds} - \frac{\omega_s \Psi_{qs}}{\omega_b} + \frac{1}{\omega_b} P \Psi_{ds} \quad (2)$$

$$\dot{\omega} = R_r i_{qr} + \left( \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_b} \right) \Psi_{dr} + \frac{1}{\omega_b} P \Psi_{qr} \quad (3)$$

$$\dot{\omega} = R_r i_{dr} + \left( \frac{\omega_r - \omega_s}{\omega_b} \right) \Psi_{qr} + \frac{1}{\omega_b} P \Psi_{dr} \quad (4)$$

$$p \left( \frac{\omega_r}{\omega_b} \right) = \frac{1}{\gamma H} (T_e - T_l) \quad (5)$$

$$T_e = X_m (I_{qs} I_{dr} - I_{ds} I_{qr}) \quad (6)$$

$$P = \frac{d}{dt}$$

این بارها به سطح ولتاژ خیلی حساس‌اند و غالباً لازم است که از وسایل تثبیت‌کننده ولتاژ مانند SVC استفاده کرد [۴-۷]. اثر SVC‌های سستی، SVC با کنترل‌کننده بهینه [۸]، SVC با کنترل‌کننده بر اساس نظریه پس‌خور کمی (QFT)، نظریه خاری تانوف [۹]، SVC با کنترل‌کننده بر اساس روش LQG/LTR [۱۰] و SVC با کنترل‌کننده بر اساس الگوریتم ژنتیکی [۱۱] قبلاً مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله کار نوینی که در رابطه با طراحی کنترل‌کننده  $H^\infty$  است، برای بهبود رفتار دینامیکی موتورهای القایی در شبکه ارائه می‌شود. در سیستم قدرت مورد مطالعه به علت متغیر بودن بار مکانیکی و تعداد موتورهای راه‌اندازی و مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند، مدل‌سازی دقیق آن میسر نبوده و همچنین پارامترهای مختلف آن با نقطه کار تغییر می‌کند. لذا کنترل‌کننده مقاوم  $H^\infty$  برای دستیابی به عملکرد مقاوم و پایداری مقاوم در نظر گرفته شده است.

$$p \begin{bmatrix} \dot{i}_{fq} \\ \dot{i}_{fd} \end{bmatrix} = [D_1] \begin{bmatrix} \dot{i}_{fq} \\ \dot{i}_{fd} \end{bmatrix} + [D_2] \begin{bmatrix} v_{fq} \\ v_{fd} \end{bmatrix} \quad (9)$$

که در آن:

$$[D_1] = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_s \\ \omega_s & 0 \end{bmatrix}, [D_2] = \text{diag} \left[ \frac{\omega_b}{B_c} \quad \frac{\omega_b}{B_c} \right]$$

$$[D_3] = \text{diag} [\omega_b B_f \quad \omega_b B_f]$$

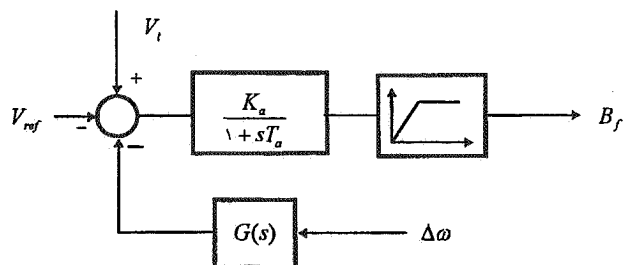
دو سر خازن است. همچنین  $\dot{i}_{fq}$  و  $v_{fd}$  و  $\dot{i}_{fd}$  و  $v_{fq}$  مؤلفه های dq جریان عبوری از سلف و ولتاژ دوسر سلف است.

### ۲-۴ خطی سازی سیستم

برای طراحی کنترل کننده، لازم است که سیستم حول نقطه کار خطی شود. با خطی کردن معادله های حاکم بر سیستم تحت مطالعه، می توان معادله ها را به شکل فضای حالت یا تابع تبدیل در آورد. در سیستم مذکور با توجه به حضور تعداد ۶۰ موتور الکتریکی همراه با بار مکانیکی خطی سازی انجام گرفته است. محدوده عدم قطعیت در مدل سیستم می تواند با توجه به تغییرات نقطه کار که شامل تغییر بار مکانیکی، تعداد موتورها و تغییر امپدانس خط انتقال است، به دست آید.

### ۳- اصول طراحی کنترل کننده $H^\infty$

نظریه کنترل مقاوم در ارتباط با طراحی کنترل کننده برای سیستم های دینامیکی است که نامعینی در مدلشان وجود دارد. یک کنترل کننده مقاوم است اگر بتواند با توجه به دسته ای از نامعینی های موجود در مدل سیستم، پایداری و عملکرد مناسب سیستم حلقه بسته را تأمین کند. به عبارت دیگر اگر کنترل کننده ای بتواند خانواده ای از مدل های سیستم که با توجه به نامعینی موجود در سیستم به دست می آید، پایدار کرده و عملکرد مناسب سیستم حلقه بسته را تأمین کند، آن کنترل کننده مقاوم است. در سیستم های قدرت صنعتی، منبع اصلی نامعینی در مدل، ناشی از تغییر شرایط



شکل ۲- نمودار بلوکی SVC

### ۲-۲ مدل خط انتقال انرژی

خط انتقال انرژی به صورت خط کوتاه مدل شده و برای شبیه سازی آن باید از معادله های ولتاژ - جریان در قاب مرجع dq چرخان با سرعت سنکرون استفاده شود. معادله حاکم بر خط انتقال به صورت زیر است [۵]:

$$P[i_q \ i_d]^t = \frac{\omega_b}{X_l} [\Delta v_q \ \Delta v_d]^t + [C][i_q \ i_d]^t \quad (v)$$

که در آن:

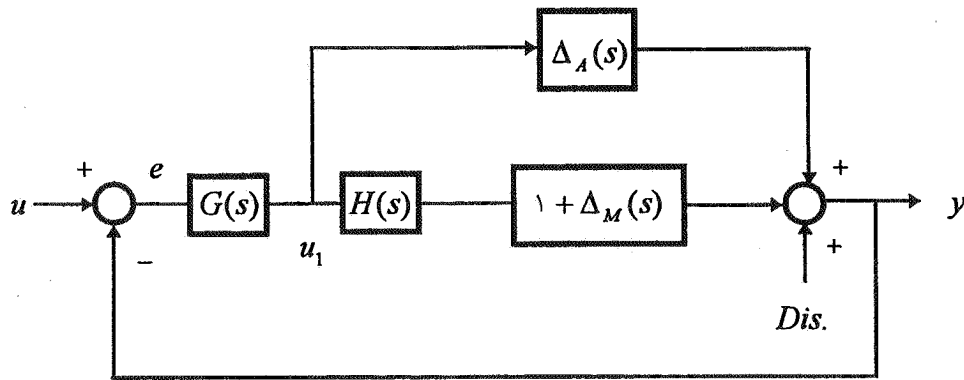
$$[C] = \begin{bmatrix} \frac{-R_l \omega_b}{X_l} & -\omega_s \\ \omega_s & \frac{-R_l \omega_b}{X_l} \end{bmatrix}$$

بین ابتدا و انتهای خط انتقال در محورهای dq است.  $\Delta v_q$  و  $\Delta v_d$  جریان عبوری از خط انتقال و تفاضل ولتاژ

### ۲-۳ مدل SVC

نمودار بلوکی SVC در شکل (۲) آورده شده است. SVC در نظر گرفته شده از نوع خازن ثابت و سلف متغیر (TCR/FC) است. خروجی SVC زاویه آتش ترستورهای موجود در جبران ساز را تغییر داده و باعث تغییر سوسپتانس سلف می شود. لذا سوسپتانس کلی شبکه تغییر کرده و باعث جبران توان راکتیو می شود. معادله های حاکم بر خازن و سلف SVC در قاب مرجع dq چرخان با سرعت سنکرون به صورت زیر است [۵]:

$$p \begin{bmatrix} v_{cq} \\ v_{cd} \end{bmatrix} = [D_1] \begin{bmatrix} v_{cq} \\ v_{cd} \end{bmatrix} + [D_2] \begin{bmatrix} \dot{i}_{cq} \\ \dot{i}_{cd} \end{bmatrix} \quad (8)$$



شکل ۳- سیستم همراه با نامعینی و کنترلر

که در آن  $W_1^{-1}(j\omega)$  با توجه به دامنه خطای قابل قبول در حضور اغتشاش تعریف می شود. به گونه مشابه برای تضمین پایداری در حضور نامعینیهای  $\Delta_M$  و  $\Delta_A$  باید رابطه های زیر برقرار شوند:

$$\text{Max } |R(j\omega)| \leq |W_1^{-1}(j\omega)| \quad \forall \omega \in \mathbb{R} \quad (14)$$

$$\text{Max } |T(j\omega)| \leq |W_1^{-1}(j\omega)| \quad \forall \omega \in \mathbb{R} \quad (15)$$

در نتیجه برای طراحی کنترل کننده  $H^\infty$  باید به طور همزمان رابطه زیر برقرار باشد:

$$\left\| \begin{array}{l} W_1(j\omega) \cdot S(j\omega) \\ W_2(j\omega) \cdot R(j\omega) \\ W_3(j\omega) \cdot T(j\omega) \end{array} \right\|_\infty \leq 1 \quad (16)$$

معمولاً در اکثر موارد اثر عدم قطعیت در مدل پلانت را به صورت ضرب شونده در نظر می گیرند، لذا داریم:

$$\left\| \begin{array}{l} W_1(j\omega) \cdot S(j\omega) \\ W_3(j\omega) \cdot T(j\omega) \end{array} \right\|_\infty \leq 1 \quad (17)$$

با توجه به شکل (۴) که در رابطه با پلانت تعمیم یافته است، تابع تبدیل  $Y_1$  به  $u_1$  عبارت است از:

$$T_{Y_1 u_1}(s) = \begin{bmatrix} W_1(s) S(s) \\ W_3(s) T(s) \end{bmatrix} \quad (18)$$

یا به عبارتی برای داشتن کنترلر  $H^\infty$  باید رابطه زیر برقرار باشد:

کاری و متغیر بودن تعداد موتورهایی است که راه اندازی می شوند. نامعینیها معمولاً بر اساس باندی بر روی دامنه پاسخ فرکانسی سیستم نامی بیان می شوند. چنین باندی می تواند به صورت جمع شونده و یا ضرب شونده باشد. در این مقاله، نامعینی به شکل ضرب شونده مورد بررسی قرار گرفته است. در فرمولبندی مسئله برای طراحی کنترل کننده  $H^\infty$  [۱۳-۱۸]، شکل (۳) را در نظر گرفته که در آن تابع تبدیل کنترل کننده،  $H(s)$  تابع تبدیل پلانت،  $\Delta_A(s)$  عدم قطعیت جمع شونده و  $\Delta_M(s)$  عدم قطعیت ضرب شونده است. توابع تبدیل  $R(s), S(s)$  و  $T(s)$  در حالتی که  $\Delta_M(s)$  و  $\Delta_A(s)$  برابر صفر باشند به صورت زیر است:

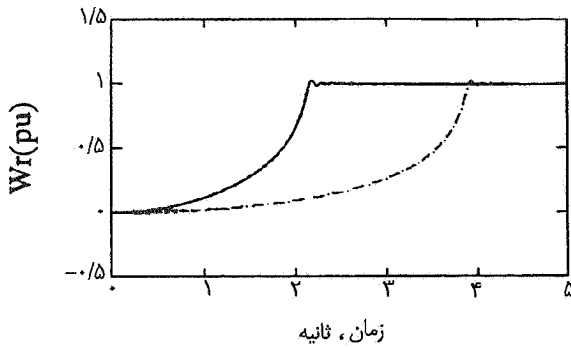
$$S(s) = \frac{e}{u} = \frac{1}{1 + G(s)H(s)} \quad (10)$$

$$R(s) = \frac{u_1}{u} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} = G(s) \cdot S(s) \quad (11)$$

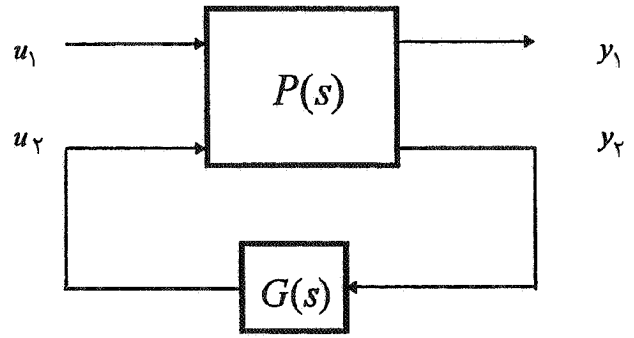
$$T(s) = \frac{y}{u} = \frac{G(s)H(s)}{1 + G(s)H(s)} = 1 - S(s) \quad (12)$$

عملکرد سیستم در رابطه با توابع وزنی متناظر با توابع  $S(s), R(s)$  و  $T(s)$  است.  $S(s)$  تابع تبدیل حلقه بسته از اغتشاش به خروجی پلانت است. برای حداقل کردن اثر اغتشاش در خروجی سیستم باید رابطه زیر برقرار باشد:

$$\text{Max } |S(j\omega)| \leq |W_1^{-1}(j\omega)| \quad \forall \omega \in \mathbb{R} \quad (13)$$



شکل ۵- سرعت گیری موتورها در سیستم اول در حالت راه اندازی  
( $N_L=60$ , CSV $C_{-}$ , OSVC $_{-}$ , RSVC $_{-}$ )



شکل ۴- پلانت تعمیم یافته

$$\|T_{y_1 u_1}(s)\|_{\infty} \leq 1 \quad (19)$$

که در آن  $H_e(s)$  تابع تبدیل پلانت نامی است. برای هر نوع از ساختار سیستم و یا تغییر شرایط کاری، چنین  $\Delta H_{max}(s)$  نماینده بدترین نامعینی در سیستم است. این باند بالا در انتخاب توابع وزنی برای طراحی کنترلر مقاوم استفاده می شود.

### ۲-۳ انتخاب توابع وزنی

در مرجع [۲۰] نشان داده شده است، هنگامی که از الگوریتم  $H^{\infty}$  استفاده می شود، یک کنترلر به دست می آید که صفرهاش شامل قطبهای پایدار حلقه باز سیستم و قطبهای آن شامل قطبهای غالب (بحرانی) پلانت، در به دست آوردن کنترلر قطب و صفری حذف نمی شود. تابع وزنی  $W_3(s)$  برای عملکرد رضایتبخش سیستم حلقه بسته در فرکانسهای بالا به کار برده می شود. این تابع وزنی به علت تقریب در مدلسازی سیستم واقعی لازم است. بنابراین  $W_3(s)$  یک فیلتر بالاگذر انتخاب می شود.

برای انتخاب توابع وزنی باید توجه داشت که فرکانس قطع صفر دسی بل پاسخ فرکانسی  $W_1^{-1}(s)$  باید به اندازه کافی پایتین از فرکانس قطع صفر دسی بل پاسخ فرکانسی  $W_3^{-1}(s)$  باشد، تا ملزومات طراحی برآورده شود. با توجه به مطالب مذکور توابع وزنی به صورت زیر انتخاب شده اند:

$$W_1^{-1}(s) = \gamma^{-1} \frac{150(s^2 + 21s + 110)}{s^2 + 80s + 6400} \quad (22)$$

$$W_3^{-1}(s) = \frac{8000}{s^2 + 60s + 900} \quad (23)$$

کنترلر  $G(s)$  را باید به گونه ای بیابیم که  $S$  را در فرکانسهای کم و  $T$  را در فرکانسهای بالا کاهش دهد.

در انتخاب توابع وزنی  $W_1$  و  $W_3$  باید دقت کرد. به گونه ای که  $W_1$  شامل فیلتر پایین گذر و قطبهای غالب پلانت نیز حدوداً قطبهای آن باشد. همچنین  $W_3$  شامل فیلتر بالاگذر و قطبهای غالب پلانت نیز حدوداً صفراهای آن باشد و شرط لازم زیر برقرار شود [۱۶-۱۸]:

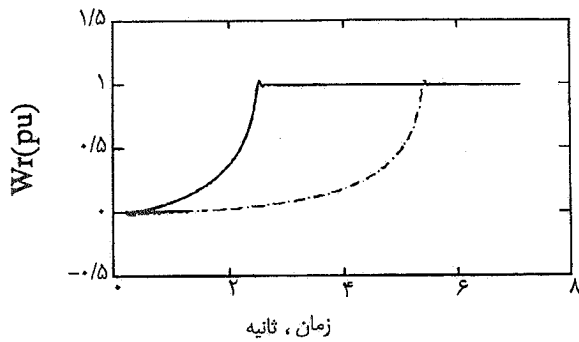
$$\text{Max} |W_1^{-1}(j\omega)| + \text{Max} |W_3^{-1}(j\omega)| > 1 \quad \forall \omega \in \mathbb{R} \quad (20)$$

برای طراحی کنترلر در این روش دو معادله ریکاتی باید حل شده که با استفاده از  $M$  فایل های متلب می توان این کار را انجام داد [۱۹].

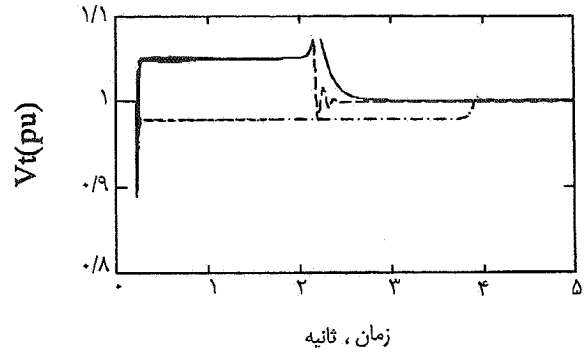
### ۱-۳ مدل نامعینی

چنانکه قبلاً اشاره شد، مشخصه شبکه های صنعتی با شرایط کاری مختلف سیستم تغییر می کند. چنین رفتار غیر خطی می تواند توسط مدل نامعینی مدل شود. با در نظر گرفتن نامعینی به صورت ضربدری، خطای مدلسازی ( $\Delta H(s)$ ) توسط رسم پاسخ فرکانسی سیستم تحت شرایط کاری مختلف تخمین زده می شود، که در نتیجه یک باند که نماینده بزرگترین نامعینی در مدل سیستم است، می تواند به صورت زیر انتخاب شود:

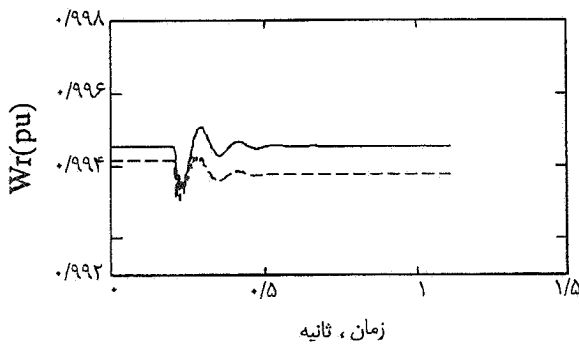
$$\Delta H_{max}(s) \geq \text{Max} |\Delta H(s)| = \text{Max} \left| \frac{H(s) - H_0(s)}{H_0(s)} \right| \quad (21)$$



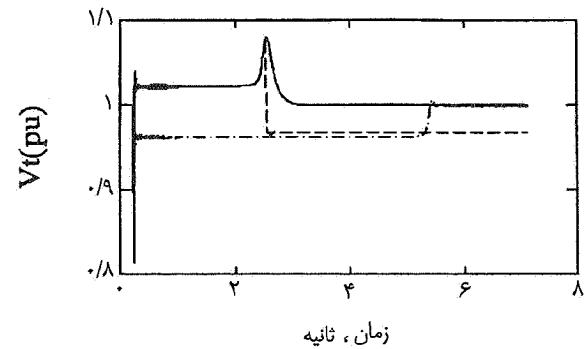
شکل ۷- سرعت گیری موتورها در سیستم دوم در حالت راه اندازی  
( $N_L=100$ , CSVC--, OSVC\_, RSVC\_)



شکل ۶- ولتاژ ترمینال در سیستم اول در حالت راه اندازی  
( $N_L=60$ , CSVC--, OSVC\_, RSVC\_)



شکل ۹- تغییرات سرعت موتورها در سیستم اول در حالت قطع خط  
( $N_L=60$ , CSVC--, OSVC\_, RSVC\_)



شکل ۸- ولتاژ ترمینال در سیستم دوم در حالت راه اندازی  
( $N_L=100$ , CSVC--, OSVC\_, RSVC\_)

مطالعه که معادله‌های آن به صورت غیر خطی اند، در حوزه زمان شبیه سازی شده است. این شبیه سازی در سه حالت، سرعت گیری موتورها، خارج شدن خط از مدار و اتصال کوتاه سه فاز، با استفاده از نرم افزار متلب انجام گرفته است. نتایج شامل شبیه سازی سیستم با SVC سنتی بدون کنترل کننده اضافی (CSVC)، با SVC بهینه (OSVC) و با SVC مقاوم (RSVC) است. بهره پس خور حالت بهینه [۸] در نظر گرفته شده در شبیه سازی به صورت زیر است:

$$K = [0/69, -1/03, -0/93, 6/08, 3/49, 5/95, 3/34, -0/307]$$

#### حالت اول - سرعت گیری موتورها

در این حالت دو سیستم قدرت یکی شامل  $(N_L=60)$  و دیگری شامل ۱۰۰ موتور الکتریکی یکسان در نظر گرفته شده که در زمان  $t_{st}=0$  موتورها به طور همزمان راه اندازی شده‌اند. شکل‌های (۵) تا (۸)

#### ۳-۳ طراحی کنترل کننده $H^\infty$

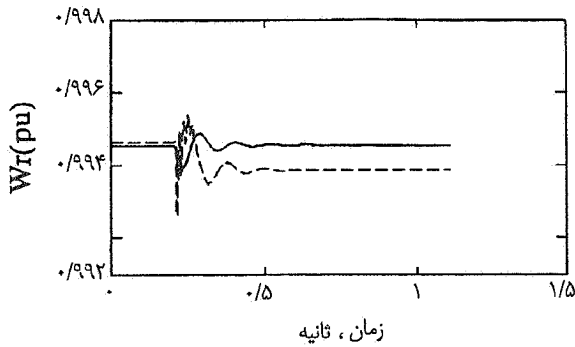
با استفاده از نرم افزار متلب [۱۹]، کنترل کننده  $H^\infty$  که اهداف طراحی را ارضا کند، با  $\gamma=2/6$  طراحی شده است. مرتبه کنترل کننده به دست آمده یازده است. برای سهولت در پیاده سازی کنترل کننده، با استفاده از تکنیکهای کاهش مرتبه مدل، مرتبه کنترل کننده به صورت مرتبه دو زیر به دست آمده است:

$$G(s) = 42/8 \frac{s+42/7}{(s+1/1)(s+33)} \quad (24)$$

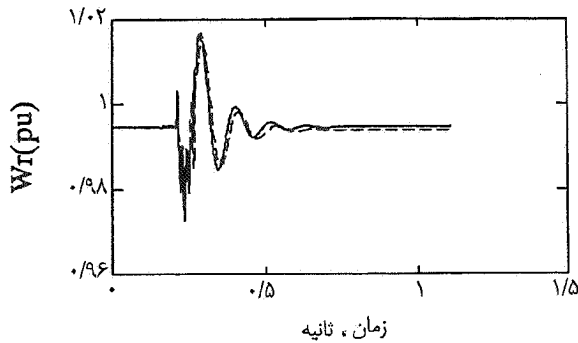
کنترل کننده طراحی شده، اهداف طراحی که شامل پایداری مقاوم و عملکرد مقاوم است را برآورده می‌کند.

#### ۴- بررسی نتایج شبیه سازی

برای بررسی عملکرد کنترل کننده طراحی شده، سیستم مورد



شکل ۱۱- تغییرات سرعت موتورها در سیستم دوم در حالت قطع خط  
( $N_L=100$ , CSVC--, OSVC\_, RSVC\_)



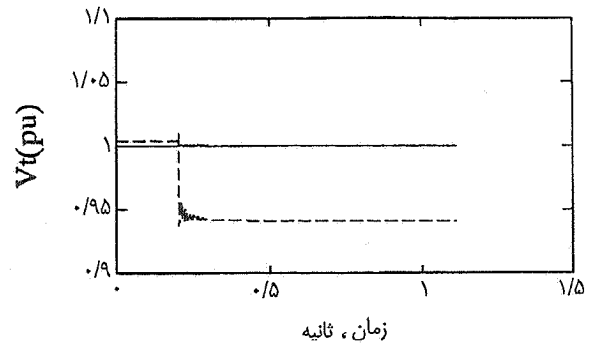
شکل ۱۳- تغییرات سرعت موتورها در سیستم اول  
در حالت اتصال کوتاه  
( $N_L=60$ , CSVC--, OSVC\_, RSVC\_)

یکی از خطوط موازی رفع شده است. شکل‌های (۱۳) تا (۱۶) تغییرات سرعت هر موتور و ولتاژ ترمینال موتورها را در دو سیستم مذکور نشان می‌دهد.

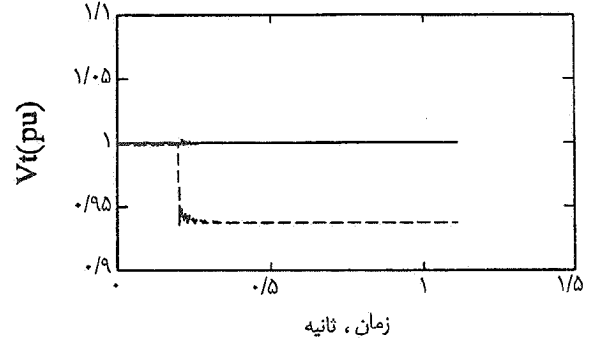
#### ۵- نتیجه گیری

در این مقاله طراحی کنترل کننده مقاوم بر اساس نظریه  $H^\infty$  برای کاربرد در SVC برای شبکه های صنعتی ارائه شده است. عملکرد جبران ساز مقاوم در مقایسه با جبران ساز سنتی و بهینه توان راکتیو توسط شبیه سازی غیر خطی در حوزه زمان ارزیابی شده است. با توجه به مطالب ذکر شده در بخشهای قبل، به طور خلاصه موضوعات زیر مورد توجه قرار گرفته است:

- ۱- بیان مشخصه های غیر خطی شبکه قدرت صنعتی توسط مدل نامعینی.
- ۲- انتخاب توابع وزنی مناسب بر اساس اهداف سیستم کنترل.



شکل ۱۰- ولتاژ ترمینال در سیستم اول در حالت قطع خط  
( $N_L=60$ , CSVC--, OSVC\_, RSVC\_)



شکل ۱۲- ولتاژ ترمینال در سیستم دوم در حالت قطع خط  
( $N_L=100$ , CSVC--, OSVC\_, RSVC\_)

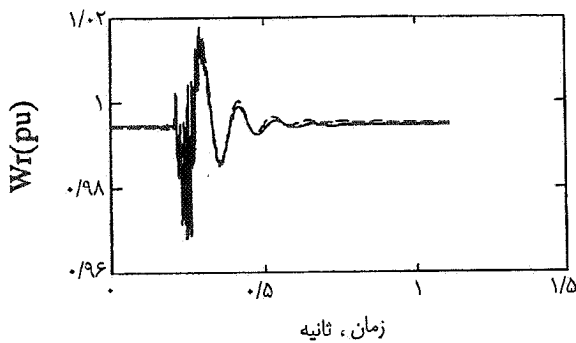
تغییرات سرعت هر موتور و ولتاژ ترمینال موتورها را در دو سیستم مذکور نشان می‌دهد.

#### حالت دوم - خارج شدن خط از مدار

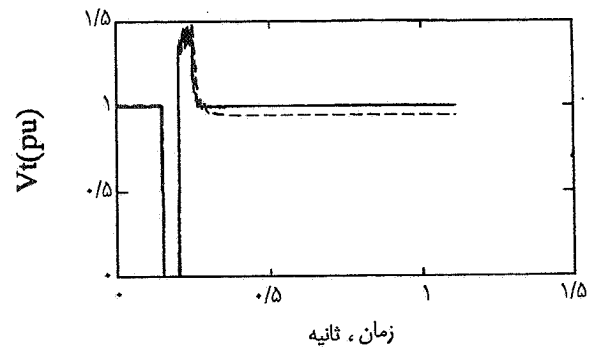
در این حالت نیز دو سیستم قدرت یکی شامل ۶۰ و دیگری شامل ۱۰۰ موتور الکتریکی یکسان در نظر گرفته شده، که در زمان  $t_{10} = 0.2 \text{ sec}$  بلافاصله یکی از خطوط از مدار خارج شده است. شکل‌های (۹) تا (۱۲) تغییرات سرعت هر موتور و ولتاژ ترمینال موتورها را در دو سیستم مذکور نشان می‌دهد.

#### حالت سوم - اتصال کوتاه سه فاز

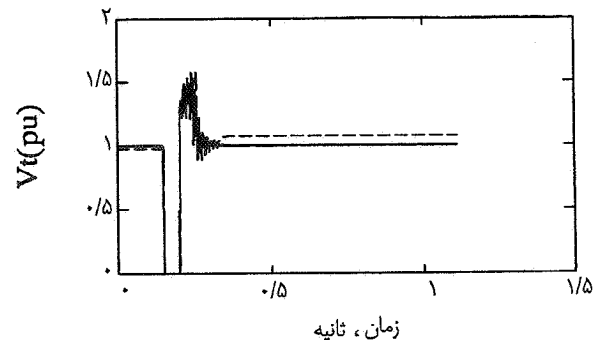
در این حالت نیز دو سیستم قدرت یکی شامل ۶۰ و دیگری شامل ۱۰۰ موتور الکتریکی یکسان در نظر گرفته شده است. در این دو سیستم در زمان  $t_{sc} = 0.12 \text{ sec}$  اتصال کوتاه سه فاز روی ترمینال موتورها اتفاق افتاده و در زمان  $t_c = 0.2 \text{ sec}$  اتصال کوتاه با قطع



شکل ۱۵- تغییرات سرعت موتورها در سیستم دوم در حالت اتصال کوتاه  
( $N_L=100$ , CSVC-., OSVC\_, RSVC\_)



شکل ۱۴- ولتاژ ترمینال در سیستم اول در حالت اتصال کوتاه  
( $N_L=60$ , CSVC-., OSVC\_, RSVC\_)



شکل ۱۶- ولتاژ ترمینال در سیستم دوم در حالت اتصال کوتاه  
( $N_L=100$ , CSVC-., OSVC\_, RSVC\_)

در محدوده نامعینهای در نظر گرفته شده در طراحی، هنگامی که از کنترل کننده  $H^\infty$  استفاده شود، سطح ولتاژ ترمینال موتورها بهبود می‌یابد. همچنین سرعت گیری موتورها نیز سریعتر انجام می‌گیرد. استفاده از این کنترل کننده علاوه بر بهبود عملکرد دینامیکی و گذرای سیستم، اثر اغتشاشات اعمالی به سیستم نیز به خوبی از پاسخ سیستم حذف خواهد شد. کنترل کننده طراحی شده دارای ساختار ساده و ثابتی بوده که به راحتی قابل ساخت است. این کنترل کننده برای پس‌خور فقط احتیاج به اندازه گیری سیگنال سرعت دارد. در مقایسه بین SVC های در نظر گرفته شده، SVC مقاوم نسبت به تغییرات پارامترهای خط انتقال، تغییر تعداد موتورها و تغییر شرایط کاری موتورها دارای مقاومت بیشتری نسبت به SVC سنتی و بهینه است.

۳- ارزیابی طراحی انجام گرفته توسط شبیه سازی غیر خطی سیستم تحت شرایط کاری مختلف.

#### مراجع

- Hauth, R. L., Miske, S. A., and Nozari, F., "The Role and Benefits of Static VAR Systems in High Voltage System Applications," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-101, No. 10, pp. 3761-3770, 1982.
- Ohyama, T., Yamashita, K., Maeda, T., Suzuki, H., and Mine, S., "Effective Application of SVC to Damp Oscillations," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-104, NO. 6, pp. 1405-1410, 1985.
- Hammad, A. E., "Analysis of Power System Stability Enhancement by Static VAR Compensators," *IEEE Trans.*, Vol. PWR-1, No. 4, pp. 222-227, 1986.
- Mahmoud, A. A., Ortmeyer, T. H., and Harley, R. G., "Effects of Reactive Compensation on Induction Motor Dynamic Performance," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-99, No. 3, pp. 841-846, 1980.
- Hammad, A. E., and EL-Sadek, M. Z., "Prevention of Transient Voltage Instabilities due to Induction Motor Loads by Static VAR Compensators," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 4, No. 3, pp. 1182-1190, 1989.
- El-Sadek, M. Z., "Static VAR Compensators for Reducing Energy losses in large Industrial loads,"



*Electric Power Systems Research*, No. 22, pp. 121-133, 1991.

7. Tan, O. T., Paap, G. C., and Kolluru, M. S., "Thyristor- Controlled Voltage Regulators for Critical Induction Motor loads During Voltage disturbances," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 8, No. 1, pp. 100-106, 1993.

۸- طاهر، س.ع.، عابدی، م.، صدیق، ع.خ.، و سیفی، ح.، "طراحی جبران ساز توان راکتیو بهینه برای بهبود رفتار دینامیکی بارهای موتور،" مجموعه مقالات دهمین کنفرانس بین المللی برق، ص ۴۴-۵۴، آبان ۱۳۷۳.

۹- طاهر، س.ع.، عابدی، م.، صدیق، ع.خ. و سیفی، ح.، "طراحی کنترلر مقاوم برای SVC برای بهبود رفتار دینامیکی موتورهای القایی سه فاز تک قفسه‌ای در شرایط راه اندازی به کمک روشهای QFT و خاری تانوف،" مجموعه مقالات چهارمین کنفرانس مهندسی برق ایران، ص ۴۵۲-۴۵۹، اردیبهشت ۱۳۷۵.

۱۰- طاهر، س.ع.، عابدی، م.، صدیق، ع.خ. و سیفی، ح.، "طراحی کنترلر مقاوم برای جبران سازی توان راکتیو در شبکه‌های صنعتی بر اساس روش LQG/LTR،" مجموعه مقالات یازدهمین کنفرانس بین المللی برق، ص ۳۰۸-۳۱۷، آبان ۱۳۷۵.

11. Ju, P., Handschin, E., and Reyer, F., "Genetic Algorithm Aided Controller Design with Application to SVC," *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 143, No. 3, pp. 258-262, 1996.

12. Krause, P. C., *Analysis of Electric Machinery*, McGraw-Hill, New York, 1986.

13. Doyle, J. C., Francis, B. A., and Tannenbaum, A.

R., *Feedback Control Theory*, Macmillan, New York, 1992.

14. Dorato, P., Fortuna, L., and Muscato, G., *Robust Control for Unstructured Perturbations: an Introduction*, Lecture Notes in Control and Information Sciences, Springer-Verlag, Berlin, Vol. 168, 1992.

15. Lin, C. F., *Advanced Control System Design*, Prentice Hall, 1994.

16. Hirata, T., Koizumi, S., and Takahashi, R., "H<sup>∞</sup> Control of Railroad Vehicle Active Suspension," *Automatica*, Vol. 31, No. 1, pp. 13-24, 1995.

17. Klein, M., Le, L. X., Rogers, G. J., Farrokhpay, S., and Balu, N. J., "H<sup>∞</sup> Damping Controller Design in Large Power Systems," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 10, No. 1, pp. 158-166, 1995.

18. Zhao, Q., and Jiang, J., "Robust Controller Design for Generator Excitation Systems," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 10, No. 2, pp. 201-209, 1995.

19. Chiang, R. Y., and Sofonov, M. G., *Robust Control Toolbox*, Matlab User's Guide, The Math Works Inc., 1992.

20. Sefton, J., and Glover, K., "Pole/Zero Cancellation in the General H<sup>∞</sup> Problem with Reference to two Block Design," *Systems and Control Letters*, No. 14, pp. 295-306, 1990.

#### پیوست

پارامترهای شبکه مورد مطالعه به شرح زیرند:

$$R_s = 2/47 \text{ pu}$$

$$X_{ls} = X_{lr} = 11/4 \text{ pu}$$

$$X_m = 510/6 \text{ pu}$$

$$R_r = 1/77 \text{ pu}$$

$$H = 0/0022 \text{ sec}$$

$$T_l = 0/003 \text{ pu}$$

$$f = 60 \text{ HZ}$$

$$R_l = 0/02 \text{ pu}$$

$$X_l = 0/0628 \text{ pu}$$

$$B_c = 5/25 \text{ pu}$$

$$B_{f0} = 5 \text{ pu}$$

$$K_a = 80$$

$$T_a = 0/05 \text{ sec}$$

$$\omega_b = \omega_s = 377 \text{ rad/s}$$

$$B_{fmax} = 6 \text{ pu}$$

$$B_{fmin} = 0 \text{ pu}$$