

طراحی کنترلر مقاوم برای SVC جهت بهبود رفتار دینامیکی موتورهای القایی سه فاز تک قفسی در شرایط راه اندازی به کمک روش خاری تانوف

مهرداد عابدی
استاد

سید عباس طاهر
دانشجوی دکترا

دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دانشگاه تربیت مدرس

حسین سیفی
دانشیار

علی صدیق خاکی
دانشیار

دانشگاه تربیت مدرس

دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی

چکیده

یکی از عمومی ترین نوع اغتشاش در شبکه های قدرت نوسانات و تغییرات ولتاژ می باشد. بعضی از بارها نظیر موتورهای القایی بزرگ می توانند تغییرات سریع و زیادی را بر روی ولتاژ شبکه ایجاد نمایند، به ویژه آن که این بارها به سطح ولتاژ خیلی حساس می باشند. کنترل توان راکتیو می تواند به عنوان یک ابزار اساسی جهت مقابله با این نوع اغتشاش به کار رود. امروزه کنترل توان راکتیو به واسطه به وجود آمدن انواع جدیدی از SVC های قابل کنترل، توسعه و تکامل یافته است. در این مقاله به طراحی و بررسی کنترلر مقاوم برای SVC براساس روش خاری تانوف (Kharitonov) پرداخته می شود. نتایج ناشی از شبیه سازی بیانگر این مطلب است که کنترلر طراحی شده توسط روش مذکور علاوه بر بهبود سرعت گیری موتورها باتوجه به محدوده تغییرات پارامترهای سیستم، رفتار گذرای پاسخ سیستم را نیز در محدوده مطلوب قرار می دهد.

Robust Controller Design for SVC and its Application to Industrial Power Network Using Kharitonov Method

S. A. Taher
Ph.D Student

M. Abedi
Professor

Elect. Eng. Dept. Tarbiat Modares Univ.

Elect. Eng. Dept. Amirkabir Univ.

A. S. Khaki
Associate Professor

H. Seifi
Associate Professor

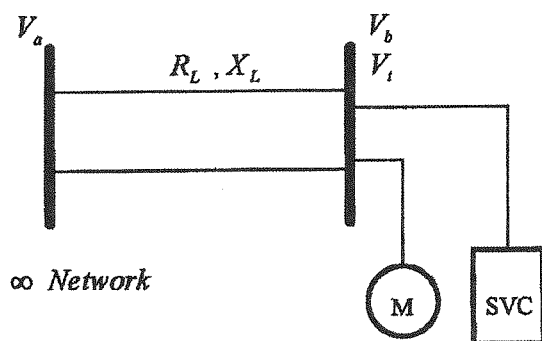
Elect. Eng. Dept. K. N. Toosi Univ.

Elect. Eng. Dept. Tarbiat Modares Univ.

Abstract

This paper deals with the robust controller design for static var compensator (SVC) in industrial power network using Kharitonov technique. The main focus of this paper is to evaluate the robust controller performance during single cage induction motors starting in a given industrial utilization.

موتورها نصب است. داده‌ها و پارامترهای این سیستم در مرجع [۷] آمده است.



شکل (۱) سیستم قدرت تحت مطالعه

۱-۲. مدلسازی موتورهای القایی سه فازه تک قفسی

برای شبیه‌سازی و مطالعه رفتار دینامیکی این ماشین‌ها در سیستم‌های قدرت از معادلات مربوطه در مختصات dq چرخان با سرعت سنکرون استفاده می‌شود [۸]. معادلات دینامیکی موتورها در حالت کار متعادل به صورت زیر می‌باشد [۸-۱۰]:

$$p [I] = \omega_b [X]^{-1} [V] - [F] [I] \quad (\omega_b: \text{سرعت مبنا})$$

$$p \left(\frac{\omega_r}{\omega_b} \right) = \frac{1}{2H} (T_e - T_L) \quad (\omega_r: \text{سرعت رتور})$$

$$p = \frac{d}{dt} \quad \text{که در آن:}$$

$$[V] = [V_q \quad V_d \quad 0 \quad 0]^t, \quad V_q = V_{qb}, \quad V_d = V_{db}$$

$$[I] = [i_{qs} \quad i_{ds} \quad i_{qr} \quad i_{dr}]^t$$

واژه‌های کلیدی

جبران ساز توان راکتیو (SVC)، کنترل مقاوم، پایدار، مقاوم، عملکرد مقاوم، قضیه خاری تانوف، مجموعه مقادیر، قضیه Edge، جدول Routh-Horowitz

مقدمه

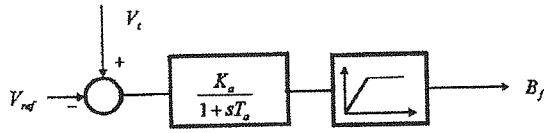
تغییرات و نوسانات ولتاژ از رایج‌ترین نوع اغتشاش در سیستم‌های قدرت می‌باشد. کنترل توان راکتیو ابزار مناسبی برای مقابله با این تغییرات است [۱-۲]. بعضی از بارها به ویژه موتورهای القایی سه فاز تغییرات سریع و قابل ملاحظه‌ای را به خصوص در لحظات اولیه راه‌اندازی بر ولتاژ شبکه اعمال نموده به ویژه آن‌که این بارها نسبت به سطح ولتاژ خیلی حساس می‌باشند. اغلب اوقات لازم است که از وسایل تثبیت‌کننده ولتاژ مانند SVC استفاده کرد [۳-۶]. اثر SVC‌های سنتی با کنترولر فیدبک جریان و یا بدون فیدبک جریان و همچنین با کنترولر بهینه LQR، جهت بهبود رفتار دینامیکی موتورهای القایی و جبران و تثبیت ولتاژ شین پایانه موتورها قبلاً مورد توجه قرار گرفته است [۷]. در این مقاله سعی بر آن است که کار نوینی در رابطه با طراحی کنترولر مقاوم با استفاده از روش خاری تانوف جهت بهبود رفتار موتورهای القایی در شبکه ارائه شود. در سیستم قدرت چون پارامترهای مختلف آن با نقطه کار تغییر می‌کند، لذا کنترولر مقاوم جهت دستیابی به عملکرد مقاوم و پایداری مقاوم در نظر گرفته شده است.

۲- مدلسازی سیستم تحت مطالعه

برای مطالعه رفتار سیستم قدرت باید عناصر تشکیل‌دهنده سیستم را مدل‌سازی نمود. شکل (۱) سیستم تحت مطالعه را نشان می‌دهد. در این سیستم گروهی از موتورهای القایی سه فازه تک قفسه‌ای (M) توسط خط انتقال از شبکه بی‌نهایت تغذیه می‌شوند. جبران ساز توان راکتیو (SVC) نیز در شین پایانه

بر سلف یا خازن موجود در SVC نیز باید در مختصات dq چرخان با سرعت سنکرون به صورت زیر نوشته شود [۱۰ و ۹ و ۵ و ۴].

$$[X] = \begin{bmatrix} X_1 & 0 & X_m & 0 \\ 0 & X_1 & 0 & X_m \\ X_m & 0 & X_2 & 0 \\ 0 & X_m & 0 & X_2 \end{bmatrix}, \quad \begin{matrix} X_1 = X_{11} + X_m \\ X_2 = X_{12} + X_m \end{matrix}$$

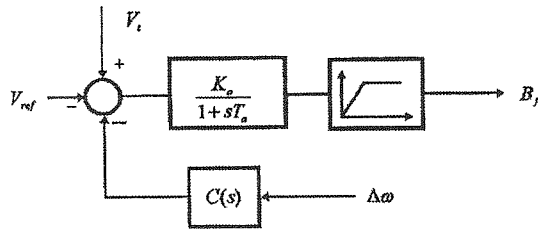


شکل (۲-ا) SVC سنتی با فیدبک ولتاژ [۱۰ و ۲]

$$[F] = \begin{bmatrix} R_s & \frac{\omega_s X_1}{\omega_b} & 0 & \frac{\omega_s X_m}{\omega_b} \\ -\frac{\omega_s X_1}{\omega_b} & R_s & -\frac{\omega_s X_m}{\omega_b} & 0 \\ 0 & \frac{\omega_r - \omega_s}{\omega_b} X_m & R_r & \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_b} X_2 \\ \frac{\omega_r - \omega_s}{\omega_b} X_m & 0 & \frac{\omega_r - \omega_s}{\omega_b} X_2 & R_r \end{bmatrix}$$

۲-۲- خطوط انتقال انرژی

در سیستم تحت مطالعه، خط انتقال انرژی به صورت خط کوتاه طراحی شده و معادله حاکم بر آن در مختصات dq چرخان تحت سرعت سنکرون به صورت زیر است [۹-۱۰]:

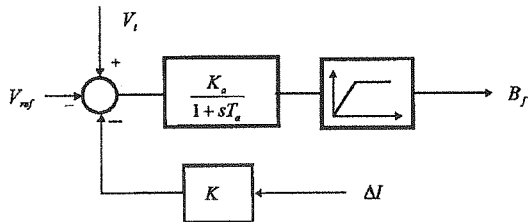


شکل (۲-ب) SVC سنتی با فیدبک ولتاژ همراه با کنترولر مقاوم طراحی شده با روش خاری تانوف

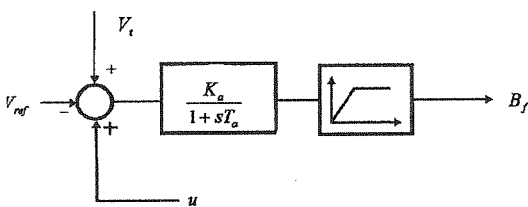
$$P \begin{bmatrix} i_{qL} \\ i_{dL} \end{bmatrix} = \frac{\omega_b}{X_L} \times \begin{bmatrix} V_{qL} \\ V_{dL} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{R_L \times \omega_b}{X_L} & -\omega_s \\ \omega_s & -\frac{R_L \times \omega_b}{X_L} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{qL} \\ i_{dL} \end{bmatrix}$$

که در آن:

$$V_{qL} = V_{qa} - V_{qb} \quad V_{dL} = V_{da} - V_{db}$$



شکل (۲-ج) SVC سنتی با فیدبک ولتاژ و فیدبک جریان [۹ و ۷]



شکل (۲-د) SVC سنتی با فیدبک ولتاژ همراه با کنترولر بهینه [۹ و ۷]

۲-۳- مدل SVC

مدل SVC سنتی با فیدبک ولتاژ به صورت شکل (۲-ا) جهت مطالعه در نظر گرفته شده است و هدف این مقاله طراحی کنترولر مقاوم C(s) برای آن است (شکل (۲-ب)). شکل های (۲-ج) و (۲-د) بلوک دیاگرام های SVC سنتی همراه با فیدبک جریان و یا همراه با کنترولر بهینه را نشان می دهند.

خروجی بلوک SVC زاویه آتش تریستورهای موجود در جبران ساز را تغییر داده و باعث تغییر سوسپتانس سلف یا خازن می شود. لذا سوسپتانس کلی شبکه تغییر کرده و باعث تغییر توان راکتیو می شود. معادلات حاکم

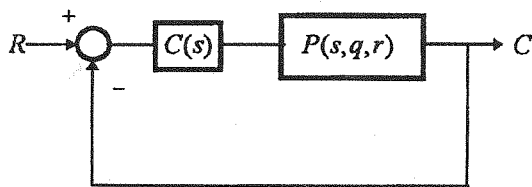
در واقع تابع تبدیل سیستم شکل (۱) توسط چند جمله ای های بازه ای (interval) در صورت و مخرج تابع $P(s, q, r)$ Overbound شده است.

۳- طراحی کنترولر مقاوم توسط روش خاری تانوف

در این قسمت هدف طراحی کنترولر PID مقاوم براساس روش خاری تانوف می باشد. تابع تبدیل $P(s, q, r)$ به دست آمده در قسمت قبل در واقع یک خانواده ای از توابع تبدیل سیستم می باشد، که می تواند به فرم بسته زیر بیان شود:

$$P(s, q, r) = \frac{\sum_{i=0}^m [q_i, q_i'] s^i}{s^n + \sum_{i=0}^{n-1} [r_i, r_i'] s^i}$$

طراحی انجام گرفته بر مبنای فیدبک واحد به صورت شکل (۲) می باشد. بر طبق قضیه خاری تانوف، کنترولر $C(s)$ ، سیستم را پایدار مقاوم می کند، اگر و فقط اگر شانزده تابع تبدیل به صورت زیر پایدار گردد [۱۳-۱۱]:



شکل (۳) بلوک دیاگرام سیستم کنترول

$$P_{i,j}(s) = \frac{N_i(s) \cdot N_c(s)}{D_j(s) \cdot D_c(s) + N_i(s) \cdot N_c(s)}, \quad i, j \in \{1, 2, 3, 4\}$$

$$C(s) = \frac{N_c(s)}{D_c(s)} = \frac{Ks + Z}{s + P}$$

که در آن N_i و D_j به صورت زیر می باشند:

$$N_1(s) = q_0 + q_1 s + q_2 s^2 + q_3 s^3 + q_4 s^4$$

$$N_2(s) = q_0 + q_1 s + q_2 s^2 + q_3 s^3 + q_4 s^4$$

$$N_3(s) = q_0 + q_1 s + q_2 s^2 + q_3 s^3 + q_4 s^4$$

$$p \begin{bmatrix} V_q \\ V_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_s \\ \omega_s & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_q \\ V_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\omega_b}{B_c} & 0 \\ 0 & \frac{\omega_b}{B_c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qc} \\ i_{dc} \end{bmatrix}$$

$$p \begin{bmatrix} i_{qf} \\ i_{df} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_s \\ \omega_s & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qf} \\ i_{df} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_b B_f & 0 \\ 0 & \omega_b B_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_q \\ V_d \end{bmatrix}$$

که در آن B_c و B_f به ترتیب سوسپتانس خازن و سلف موجود در جبران ساز می باشد و:

$$V_q = V_{qb} \quad V_d = V_{db}$$

۴-۴- خطی سازی سیستم تحت مطالعه

جهت مطالعه سیستم و طراحی کنترول کننده برای آن لازم است که سیستم حول نقطه کار خطی شود. با خطی کردن معادلات حاکم بر سیستم قدرت، می توان معادلات را به فرم حالت یا به فرم تابع تبدیل درآورد. محدوده نامعینی یا عدم قطعیت در مدل سیستم می تواند باتوجه به تغییرات نقطه کار که شامل تغییر بار مکانیکی و تعداد موتورها می باشد، به دست آید. تابع تبدیل سیستم $\left(\frac{\Delta \omega}{\Delta V}\right)$ باتوجه به نامعینی های مطرح شده و حذف دینامیک سریع سیستم به صورت زیر می باشد:

$$P(s, q, r) = \frac{q_4 s^4 + q_3 s^3 + q_2 s^2 + q_1 s + q_0}{s^6 + r_5 s^5 + r_4 s^4 + r_3 s^3 + r_2 s^2 + r_1 s + r_0}$$

که در آن q_i و r_i به صورت زیر می باشند [۹]:

$$119.56171/5 \leq q_0 \leq 222252225/6$$

$$14.17522/4 \leq q_1 \leq 292799149/1$$

$$3672365.0 \leq q_2 \leq 1.29477222/2$$

$$21751/2 \leq q_3 \leq 8871.0/1$$

$$256/62 \leq q_4 \leq 716/7$$

$$62978245251/6 \leq r_0 \leq 9.672596717/3$$

$$4985247.522/2 \leq r_1 \leq 71815672821/1$$

$$928224585/2 \leq r_2 \leq 1222856.05/8$$

$$215922.16/6 \leq r_3 \leq 452911.27/8$$

$$411215/2 \leq r_4 \leq 529868/6$$

$$2215/16 \leq r_5 \leq 2182/2$$

جدول (1) جدول Routh-Horowitz

s^7	1	K_5	K_3	K_1
s^6	K_6	K_4	K_2	K_0
s^5	A_1	A_2	A_3	0
s^4	A_4	A_5	K_0	0
s^3	A_6	A_7	0	0
s^2	A_8	K_0	0	0
s^1	A_9	0	0	0
s^0	K_0	0	0	0

که:

$$A_1 = \frac{K_5 K_6 - K_4}{K_6} \quad A_2 = \frac{K_3 K_6 - K_2}{K_6} \quad A_3 = \frac{K_1 K_6 - K_0}{K_6}$$

$$A_4 = \frac{A_1 K_4 - A_2}{K_6} \quad A_5 = \frac{A_1 K_2 - A_3 K_6}{A_1} \quad A_6 = \frac{A_2 A_4 - A_1 A_5}{A_4}$$

$$A_7 = \frac{A_3 A_4 - A_1 K_0}{A_4} \quad A_8 = \frac{A_5 A_6 - A_4 A_7}{A_6} \quad A_9 = \frac{A_7 A_8 - A_6 K_0}{A_8}$$

باتوجه به جدول های Routh-Horowitz به دست آمده، تابع تبدیل کنترولر به صورت زیر به دست می آید:

$$C(s) = 2 \frac{s + 288}{s + 10000}$$

ع - تحلیل پایداری سیستم به همراه کنترل کننده

در سیستم هایی که نامعینی ها از هم مستقل باشند، شرط لازم و کافی برای آن که سیستم پایدار مقاوم باشد، باید کنترولر شانزده plant خاری تانوف را پایدار نماید. همچنین می توان با استفاده از مفهوم مجموعه مقادیر (Value set) جهت تحلیل پایداری مقاوم استفاده نمود، به گونه ای که سیستم پایدار مقاوم است، اگر و فقط اگر صفر وارد مجموعه مقادیر نگردد $[0 \notin d_{CL}(j\omega, Q, R)]$. مجموعه مقادیر باتوجه به تغییرات پارامترهای مخرج تابع تبدیل حلقه بسته سیستم در هر فرکانس به دست آمده می آید. در شکل (۴) مجموعه مقادیر سیستم تحت مطالعه نشان

$$N_4(s) = q_0 + q_1 s + q_2 s^2 + q_3 s^3 + q_4 s^4$$

$$D_1(s) = r_0 + r_1 s + r_2 s^2 + r_3 s^3 + r_4 s^4 + r_5 s^5 + r_6 s^6$$

$$D_2(s) = r_0 + r_1 s + r_2 s^2 + r_3 s^3 + r_4 s^4 + r_5 s^5 + r_6 s^6$$

$$D_3(s) = r_0 + r_1 s + r_2 s^2 + r_3 s^3 + r_4 s^4 + r_5 s^5 + r_6 s^6$$

$$D_4(s) = r_0 + r_1 s + r_2 s^2 + r_3 s^3 + r_4 s^4 + r_5 s^5 + r_6 s^6$$

برای به دست آوردن پارامترهای کنترولر ابتدا باید تابع تبدیل حلقه بسته سیستم را به دست آورد. سپس با استفاده از جدول Routh-Horowitz مقادیر P, Z, K به گونه ای که عناصر ستون اول جدول مذکور همواره مثبت باشد، به دست می آیند. تابع تبدیل حلقه بسته سیستم به صورت زیر می باشد:

$$P_{CL} = \frac{N_{CL}(s, q)}{D_{CL}(s, q, r)}$$

$$N_{CL}(s, q) = K(s + Z) \cdot N(s, q)$$

$$D_{CL}(s, q, r) = K(s + Z) \cdot N(s, q) + (s + P) \cdot D(s, r)$$

$$D_{CL}(s, q, r) = s^7 + (r_5 + Pr_6) s^6 + [r_4 + Pr_5 + Kq_4] s^5 + [r_3 + Pr_4 + K(q_3 + Zq_4)] s^4 + [r_2 + Pr_3 + K(q_2 + Zq_3)] s^3 + [r_1 + Pr_2 + K(q_1 + Zq_2)] s^2 + [r_0 + Pr_1 + K(q_0 + Zq_1)] s + (Pr_0 + KZq_0)$$

$$D_{CL}(s, q, r) = s^7 + K_6 s^6 + K_5 s^5 + K_4 s^4 + K_3 s^3 + K_2 s^2 + K_1 s + K_0$$

جدول Routh - Horowitz را برای شانزده تابع $D_{CL}(s, q, r)$ باتوجه به مقادیر r_i و q_i به صورت زیر تشکیل داده و مقادیر پارامترهای کنترولر باتوجه به اینکه ستون اول جداول باید مثبت باشد، به دست می آید. این امکان وجود دارد که کنترولر به دست آمده منحصر به فرد نباشد. در واقع تعداد زیادی کنترولر یافت شود که ستون اول جداول مذکور را مثبت نماید. لذا جهت انتخاب کنترولر مطلوب می توان باتوجه به عملکرد درخواستی از پاسخ سیستم، به گونه ای که سیستم دارای عملکرد مقاوم نیز باشد، آن را به دست آورد.

داده شده است، همانطور که مشاهده می شود، صفر وارد مجموعه مقادیر نشده است. حال اگر در سیستم نامعینی ها به طور مستقل از هم نباشند، می توان از قضیه Edge استفاده نمود، به گونه ای که صفر فقط و فقط از طریق Edge ها می تواند وارد مجموعه مقادیر گردد. به عبارت دیگر P_{cl} پایدار مقاوم است، اگر و فقط اگر برای هر جفت نقطه Extreme، q^1 و q^2 ، چند جمله ای $\lambda \in [0, 1]$ ، $P_{12}(S, \lambda) = \lambda D_{cl}(s, q^1) + (1 - \lambda) D_{cl}(s, q^2)$ پایدار باشد [۱۲-۱۱]. اهمیت قضیه Edge در این است که برای بررسی پایداری مقاوم در سیستمی با عدم قطعیت های فراوان (مستقل و وابسته)، کافی است سیستمی را با یک عدم قطعیت λ بررسی نماییم. با توجه به اینکه در سیستم مورد مطالعه نامعینی ها از هم مستقل نمی باشند، برای تحلیل پایداری مقاوم از قضیه Edge استفاده می نماییم. بر طبق قضیه مذکور برای دو نقطه Extreme، مقادیر حقیقی و موهومی چند جمله ای $P_{12}(S, \lambda)$ با توجه به اینکه $\lambda \in [0, 1]$ باشد، در هر فرکانس آنها را به دست آورده در نمودار رسم می نماییم. اگر صفر شامل نمودار نگردد، سیستم پایدار مقاوم است. در شکل های (۵ تا ۷) برای نمونه در شش نقطه مجموعه مقادیر $P_{12}(S, \lambda)$ ، $P_{34}(S, \lambda)$ ، $P_{56}(S, \lambda)$ رسم شده است. همانطور که مشاهده می شود، صفر وارد مجموعه مقادیر نشده است. اگر برای نقاط دیگر هم مجموعه مقادیر را رسم نماییم، باز مشاهده می شود که صفر وارد مجموعه مقادیر آنها نیز نمی شود. لذا سیستم به همراه کنترل کننده پایدار مقاوم می باشد.

۵- بررسی نتایج شبیه سازی

در این قسمت نتایج ناشی از شبیه سازی غیرخطی شبکه مورد مطالعه، در حالت های مختلف مورد بررسی و ارزیابی قرار می گیرد. پارامترهای شبکه مورد مطالعه در [۹] آمده است:

در شکل های (۸) و (۹) سرعت گیری و ولتاژ ترمینال برای تعداد ۶۰ موتور سه فازه یکسان با SVC شکل (۲-ا) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، زمان سرعت گیری موتورها در حدود ۴ ثانیه می باشد. همچنین در شکل های (۱۰) و (۱۱) سرعت گیری و ولتاژ ترمینال برای همان تعداد موتور و لپکن با SVC شکل (۲-ب) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، موتورها در این حالت مقداری زودتر سرعت می گیرند.

در شکل های (۱۲) تا (۱۴) سرعت گیری، ولتاژ ترمینال و خروجی کنترولر برای تعداد ۶۰ موتور با جبران ساز بهینه (شکل ۶-۲) را نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، موتورها در حدود ۲ ثانیه سرعت گرفته اند. این کنترولر در نقطه کار طراحی شده، مورد شبیه سازی قرار گرفته است [۷]. همچنین در شکل های (۱۵) تا (۱۷) نیز سرعت گیری، ولتاژ ترمینال و خروجی کنترولر برای همان تعداد موتور ولی با SVC به همراه کنترولر PID مقاوم شکل (۲-ب) نشان داده شده است. موتورها در این حالت هم در حدود ۲ ثانیه سرعت گرفته اند.

در شکل های (۱۸) تا (۲۲) سرعت گیری، ولتاژ ترمینال و خروجی کنترولر برای تعداد ۱۰ موتور با SVC همراه با کنترولر در دو حالت کنترولر بهینه فیدبک حالت و کنترولر PID مقاوم نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، در حالتی که از کنترولر بهینه استفاده شود، موتورها در حدود ۲ ثانیه سرعت گرفته و لپکن اگر از کنترولر PID مقاوم استفاده شود، در زمانی کمتر از ۲ ثانیه موتورها سرعت می گیرند.

در شکل های (۲۴) تا (۲۹) سرعت گیری، ولتاژ ترمینال و خروجی کنترولر برای تعداد ۱۰۰ موتور با SVC همراه با کنترولر بهینه فیدبک حالت و کنترولر PID مقاوم نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، در دو حالت موتورها در حدود ۲/۲ ثانیه سرعت می گیرند.

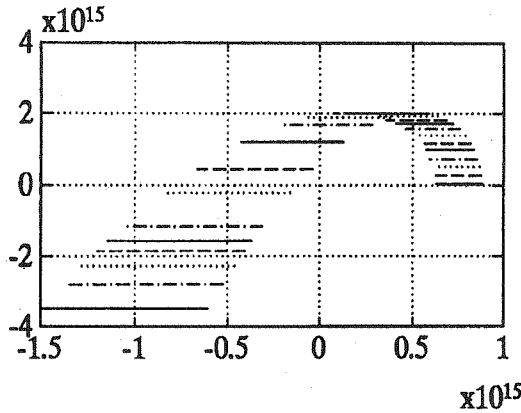
در مرجع [۷] عملکرد SVC با کنترولر فیدبک جریان و با کنترولر بهینه فیدبک حالت مورد بررسی قرار گرفت. در این بررسی عملکرد کنترولر بهینه به مراتب بهتر از کنترولر فیدبک جریان بود. در این مقاله هدف ما طراحی و بررسی عملکرد کنترولر PID مقاوم بوده، که در ضمن از لحاظ عملکرد مقایسه ای نیز با کنترولر بهینه فیدبک حالت انجام گرفته است.

همانطور که ذکر شد، کنترولر بهینه در شرایط کاری $n = 60$ (تعداد موتور) طراحی شده و در تمامی حالات از آن بهره گرفته شده است. در شرایط کاری $n = 60$ استفاده از دو کنترولر بهینه و مقاوم در سرعت گیری موتورها نقش تقریباً یکسانی را دارند، همچنین در حالتی که $n = 100$ باشد، نیز دو کنترولر نقش تقریباً یکسانی دارند. اما در حالتی که $n = 10$ باشد، استفاده از کنترولر مقاوم باعث می شود که موتورها سریعتر سرعت بگیرند. این تفاوت ناشی از مقاوم بودن کنترولر PID طراحی

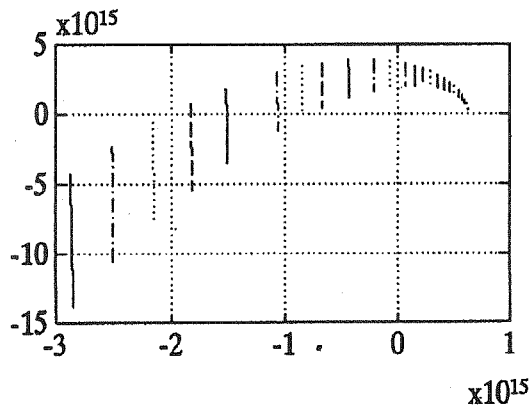
شده توسط روش خاری تانوف می باشد، که یکی از اهداف ما در طراحی انجام گرفته، داشتن عملکرد مقاوم به گونه ای که کنترلر مذکور بتواند موتورها را در زمانی کمتر از 2.5 ثانیه به سرعت نامی اشان برساند. همچنین برای حالت مذکور میزان تلاش کنترلی (خروجی کنترلر) در حالتی که از کنترلر PID مقاوم استفاده شود، کمتر از کنترل بهینه می باشد.

۶- نتیجه گیری

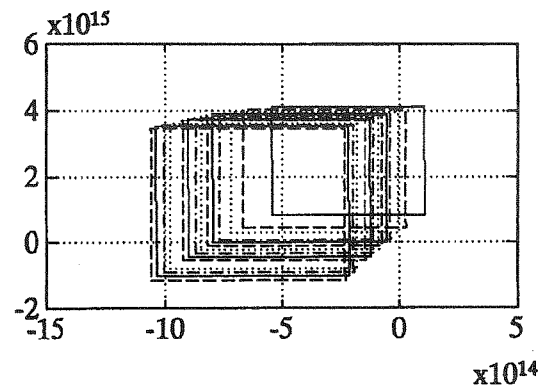
در محدوده طراحی انجام گرفته، سرعت گیری موتورها در حالتی که از کنترلر PID مقاوم در جبران ساز استفاده شود، در زمانی کمتر از 2.5 ثانیه انجام خواهد گرفت. کنترلر طراحی شده دارای ساختار ثابت و ساده ای می باشد که به راحتی قابل ساخت می باشد. کنترلر طراحی شده جهت فیدبک فقط احتیاج به اندازه گیری سیگنال سرعت دارد.



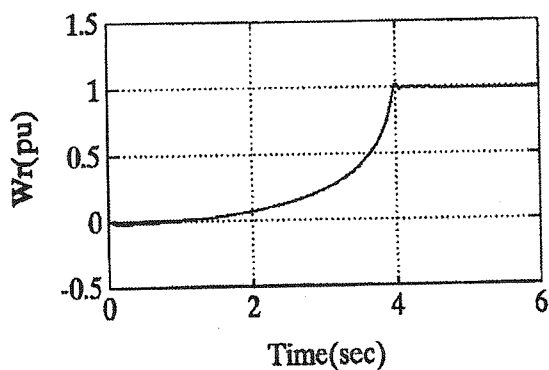
شکل (۶) مجموعه مقادیر $P_{34}(s)$



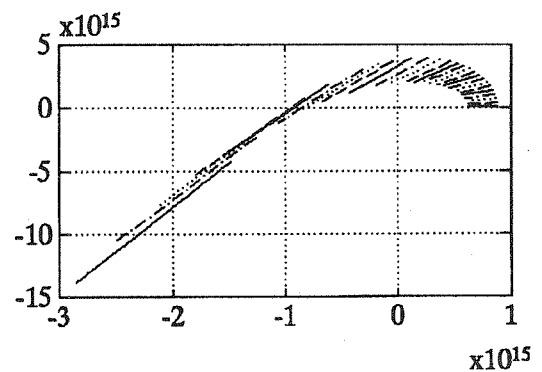
شکل (۷) مجموعه مقادیر $P_{56}(s)$



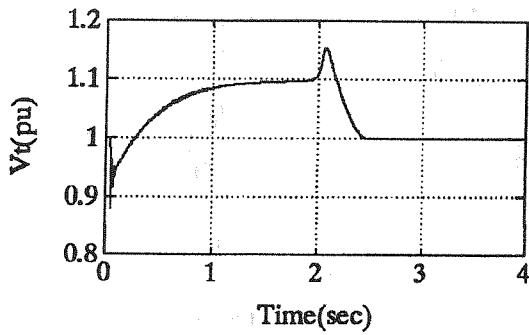
شکل (۸) مجموعه مقادیر چند جمله ای حلقه بسته سیستم



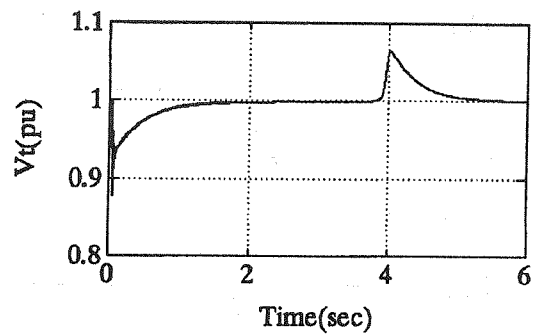
شکل (۹) سرعت گیری موتورها با SVC
سنی حاوی فیدبک ولتاژ ($n = 60$)



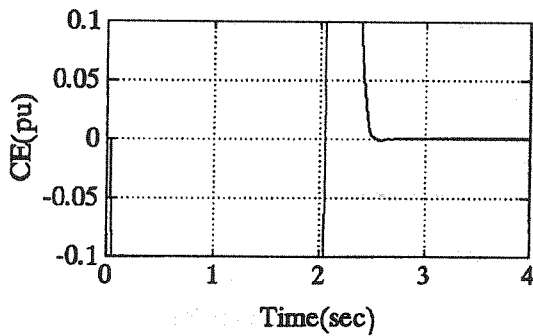
شکل (۱۰) مجموعه مقادیر $P_{12}(s)$



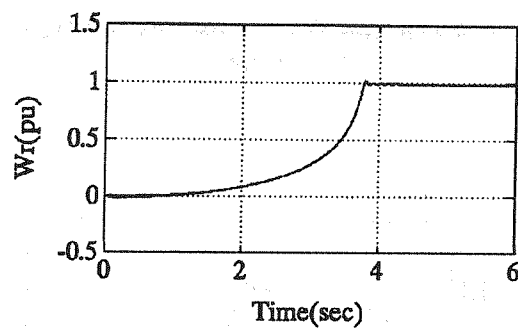
شکل (۱۳) ولتاژ ترمینال موتورها برای شکل ۱۲ (n = 60)



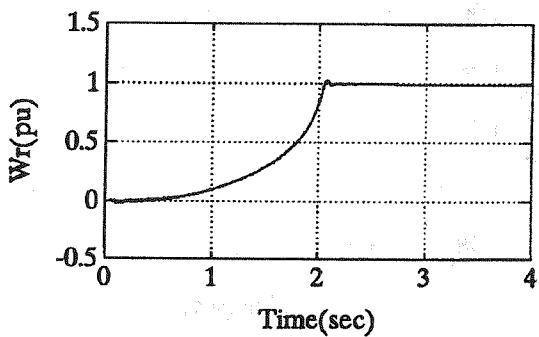
شکل (۹) ولتاژ ترمینال موتورها با SVC
سنجی حاوی فیدبک ولتاژ (n = 60)



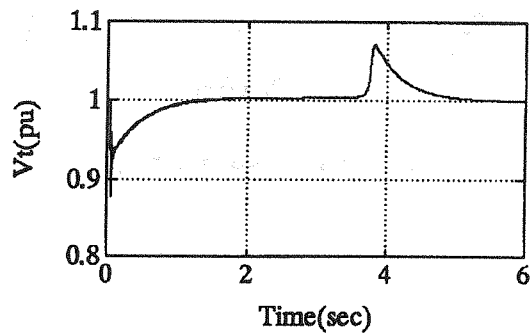
شکل (۱۲) خروجی کنترل کننده بهینه در حالت شکل ۱۲ (n = 60)



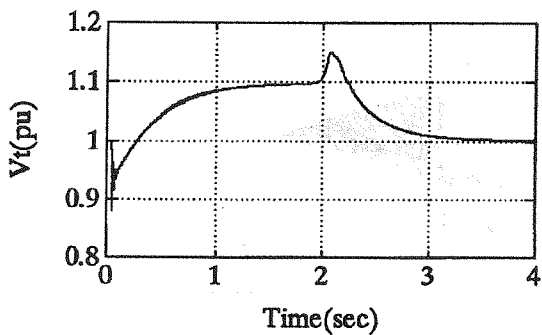
شکل (۱۰) سرعت گیری موتورها با SVC
سنجی حاوی فیدبک ولتاژ و جریان (n = 60)



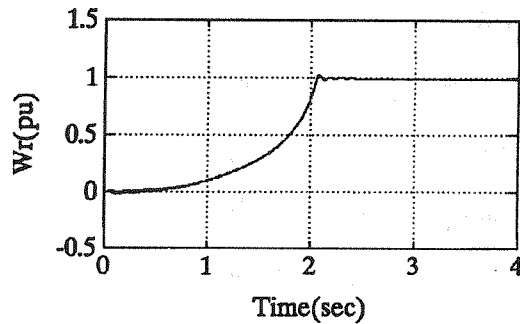
شکل (۱۵) سرعت گیری موتور با SVC سنجی حاوی فیدبک ولتاژ و
کنترلر PID مقاوم (n = 60)



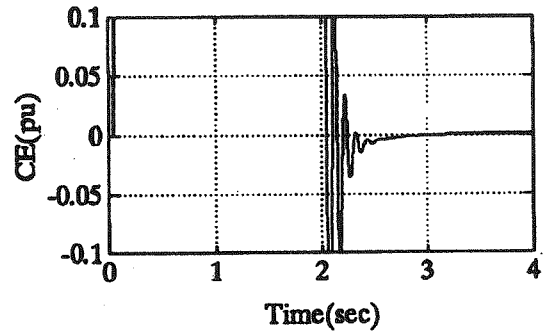
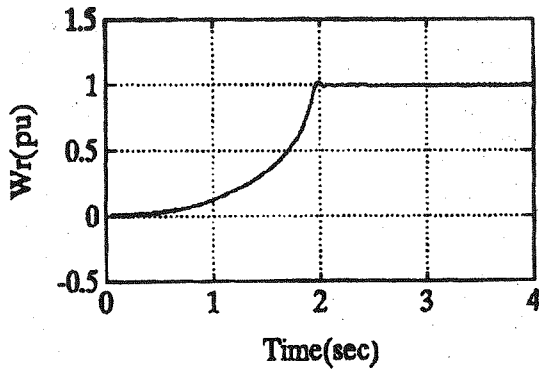
شکل (۱۱) ولتاژ ترمینال موتورها برای شکل ۱۰



شکل (۱۶) ولتاژ ترمینال موتورها برای شکل ۱۵ (n = 60)

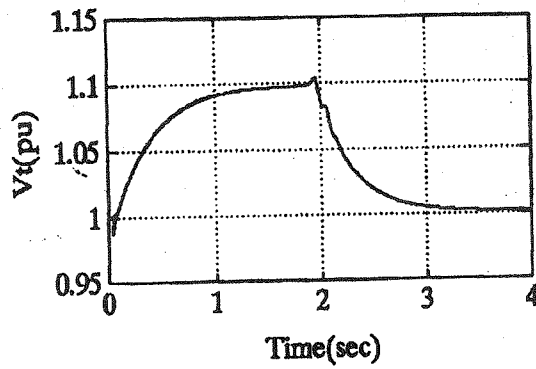
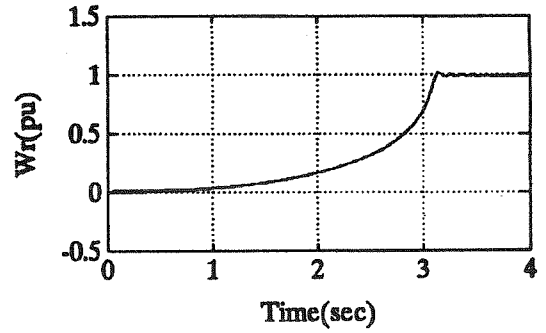


شکل (۱۲) سرعت گیری موتورها با SVC
سنجی حاوی فیدبک ولتاژ و کنترلر بهینه (n = 60)

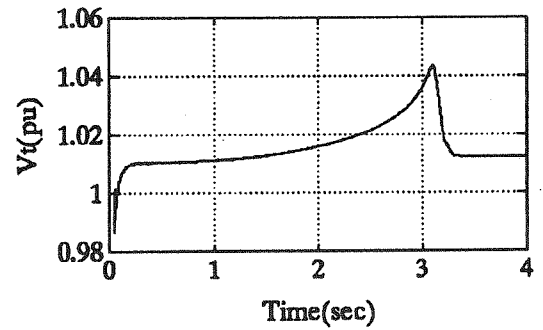


شکل (۱۷) خروجی کنترولر مقاوم در حالت شکل ۱۵ (n = ۶۰)

شکل (۲۱) سرعت گیری موتور ها با SVC سنتی همراه با کنترولر PID مقاوم (n = ۱۰)

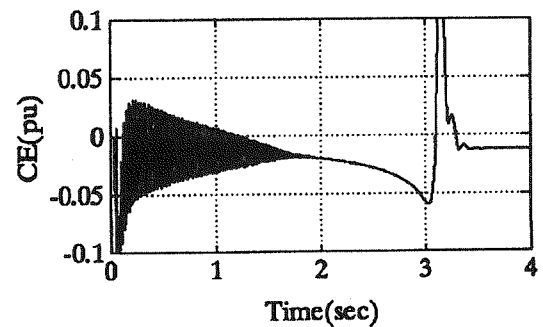
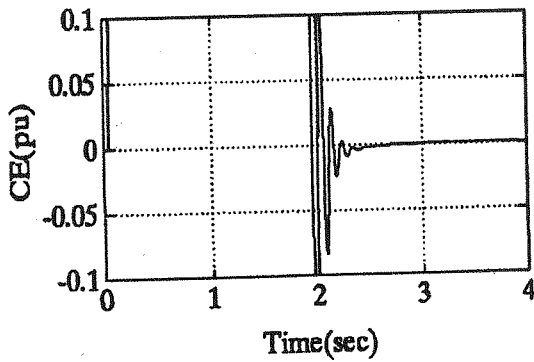


شکل (۱۸) سرعت گیری موتور ها با SVC سنتی حاوی فیدبک ولتاژ و کنترولر بهینه (n = ۱۰)



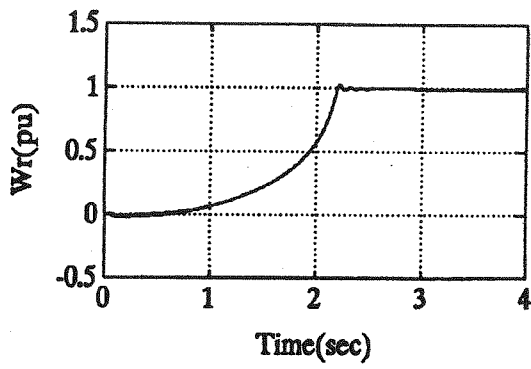
شکل (۲۲) ولتاژ ترمینال موتورها در حالت شکل ۲۱

شکل (۱۹) ولتاژ ترمینال موتورها برای حالت شکل ۱۸

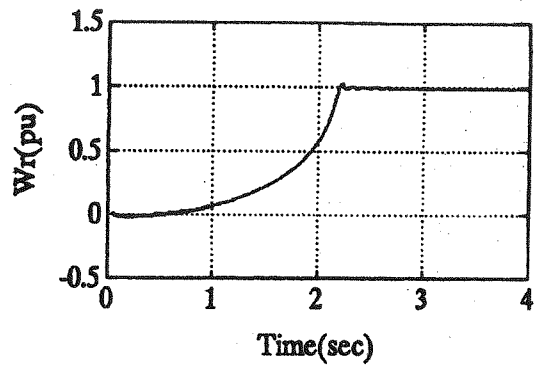


شکل (۲۳) خروجی کنترولر در حالت شکل ۲۱

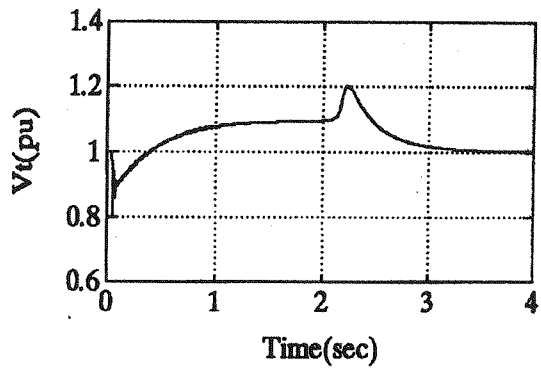
شکل (۲۰) خروجی کنترل کننده بهینه در حالت شکل ۱۸



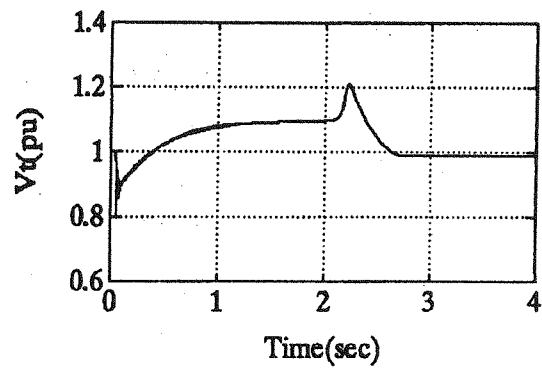
شکل (۲۷) سرعت گیری موتور ها با SVC همراه با کنترلر مقاوم
($n = 100$)



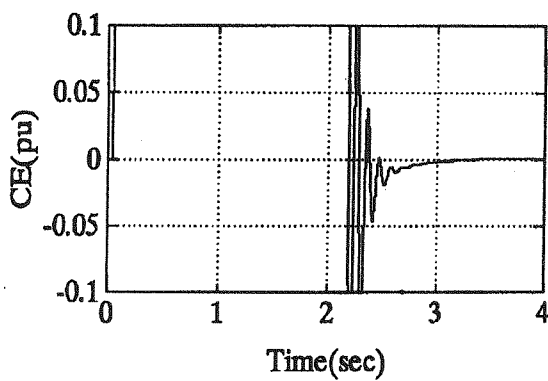
شکل (۲۲) سرعت گیری موتور ها در حالت SVC همراه با کنترلر پهنه
($n = 100$)



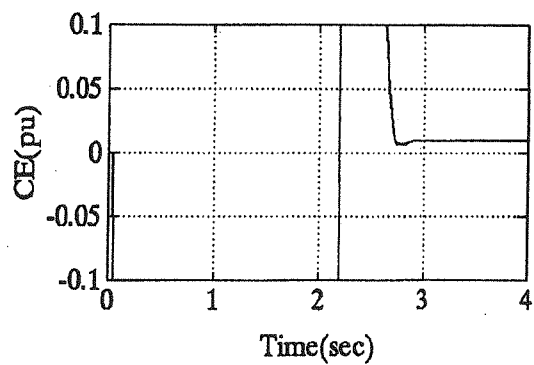
شکل (۲۸) ولتاژ ترمینال موتورها برای حالت شکل ۲۷



شکل (۲۵) ولتاژ ترمینال موتورها در حالت شکل ۲۲



شکل (۲۹) خروجی کنترلر مقاوم در حالت شکل ۲۷



شکل (۲۶) خروجی کنترلر در حالت شکل ۲۲

- [1] Miller T. J.E. "Reactive Power Control in Electric System", John Willey & Sons, NewYork 1984.
- [2] Ohyama T., et al, "Effective Application of SVC Damp Oscillation", IEEE Trans. on PAS Vol. 104, No. 6. June 1985.
- [3] Mahmoud A.A., etal, "Effecive of Reactive Compensation on Induction Motor Dynamic Performance", IEEE Trans. on PAS, Vol.99, No. 3, May/June 1988.
- [4] Hammad A. E. Sadek M. Z., "Prevention of Transient Voltage Instabilities due to Induction Motor Loads by SVC", IEEE Trans. on Power Systems Vol. 4, No. 3, Aug. 1989.
- [5] El-Sadek M. Z. ,"SVC for reducing Energy Losses in Large Industrial Loads" Electric Power System Research, 22 (1991), PP. 121-133.
- [6] Tan O. T. et al, "Thyristor-Controlled Voltage Regulators for Critical Induction Motor Loads During Voltage Disturbances", IEEE Trans. on Energy Conversion Vol. 8. No. 1, March 1993.
- [7] سید عباس طاهر - مهرداد عابدی - علی خاکی صدیق - حسین سیفی، طراحی جبران ساز توان راکتیو بهینه جهت بهبود رفتار دینامیکی بارهای موتوری؛ - کنفرانس برق ایران - توانیر ۱۳۷۴
- [8] Kranus C. "Analysis of Electric Machinery", McGraw-Hill, 1986.
- [9] سید عباس طاهر - گزارش پیشرفت کار رساله دکترا دانشگاه تربیت مدرس.
- [10] Abedi M., Sayad Poor B., "The Effect of SVC on Enhancement of Remote Industrial Loads", Proceeding of PSC. 95, Russia, 1995.
- [11] Barmish B. R. Kan H.I., "A Survey of Extreme Point Results for Robustness of Control Systems" Automatica, Vol. 29, No. 1, 1993.
- [12] Abate M., et al, "Application of Some New Tools to Robust Stability Analysis of Spark Ignition Engines: A Case Study", IEEE Trans. on Control System Technology, Vol. 2, No. 1, March 1994.
- [13] Barmish B.R., "New Tools for Robustness of Linear Systems", Macmillan Publishing Compa-