

عملکرد حلقه بسته محرکه های موتور القایی - با بازیافت انرژی لغزش به ازای سیگنال های اغتشاش بار و ولتاژ شبکه

حسن براتی
فارغ التحصیل کارشناسی ارشد

جواد فیض
استاد

گروه مهندسی برق، دانشکده فنی، دانشگاه تبریز

چکیده

در این مقاله، از مدل محرکه های بازیافت انرژی لغزشی (SERD) در مشخصات چرخان سنکرون استفاده شده است. مطالعه سیستم کنترل حلقه باز این محرکه ها توسط مشخصات حالت پایدار نشان می دهد که بازیافت سیگنال های اغتشاش بار و ولتاژ شبکه، یک سیستم کنترل حلقه بسته محرکه ضرورت دارد. در این سیستم کنترل حلقه بسته از دو کنترل کننده PI پشت به پشت (back-to-back) برای کنترل جریان لینک DC و سرعت استفاده می شود. برای تخمین پارامترهای کنترل کننده ها براساس روش طراحی کلاسیک (مکان هندسی ریشه ها)، مدل گذرای غیرخطی محرکه حول نقطه کار حالت پایدار خطی شده است. با به دست آوردن توابع انتقال بین متغیرهای ورودی - خروجی مورد نظر و اعمال کنترل کننده ها، بلوک دیاگرام سیستم حلقه بسته تکمیل شده و سپس با اعمال سیگنال های اغتشاش، عملکرد حلقه بسته محرکه در حذف سیگنال خطای سرعت و تغییرات پیوسته زاویه آتش اینورتر نشان داده شده است.

Performance of Closed - loop Slip Energy Recovery Induction Motor Drives under Disturbance Signals of Load and Supply Voltage

J. Faiz
Professor

H. Barati
M. Sc. Graduate

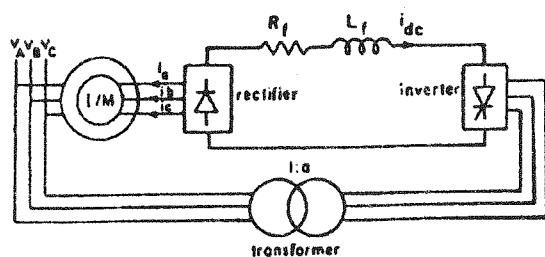
Department of Electrical Engineering
Faculty of Engineering, University of Tabriz

Abstract

A model of slip energy recovery drive (SERD) based on synchronous rotating reference frame is used in this paper. The most common problem of the slip recovery system is to stabilize the system under power system disturbances such as the change of source voltage. It is no loop control system in order to study the disturbance signals of the supply voltage. In the closed - loop control system, two back - to - back PI controllers are used to control dc link current and speed. In order to estimate parameters of the controllers using root locus technique , a non - linear transient model of drive is linearized around the steady - state operating point. By obtaining the transfer functions and applying the controllers, block diagram of the closed - loop system is completed; then by applying disturbance signals, performance of the closed - loop drive in eliminating speed error signal and continuous variations of the inverter firing angle are shown.

مقدمه

سنگرون پیش بینی شده اند. در این مدل از فرض های ساده کننده ای چون چشم پوشی از تأثیر همپوشانی یکسوساز و هارمونیک های تزریقی توسط یکسوساز/اینورتر، استفاده شده است. این فرض ها سبب پیدایش ۱۵٪ خطا در پیش بینی گشتاور الکترومغناطیسی و جریان لینک DC می شوند.



شکل (۱) شماتیک محرکه بازیافت انرژی لغزشی

در کاربردهایی که محرکه سرعت ثابت لازم است، عملکرد حلقه باز SERD رضایت بخش نیست، زیرا اغتشاش هایی چون گشتاور بار و ولتاژ شبکه، سرعت محرکه را تغییر می دهند. برای تثبیت سرعت، زاویه آتش اینورتر بایستی به طور پیوسته تغییر کند و این امر فقط با استفاده از کنترل حلقه بسته میسر است. مرجع [۵] عملکرد حلقه بسته SERD را با حذف ترانسفورمر بازگشت و نتایج تجربی مطالعه کرده است. در مرجع [۶] سیستم حلقه بسته SERD با بکارگیری روش خطی سازی مدل و آنالیز شده است و پاسخ سیستم به افزایش بار داده شده است.

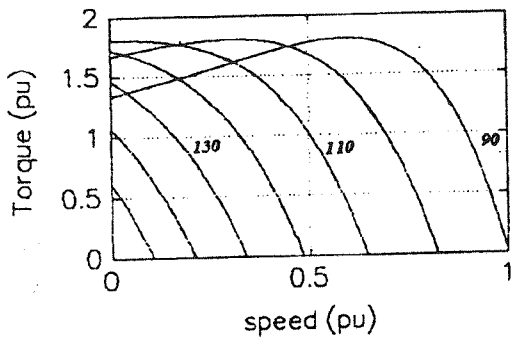
در مقاله حاضر با بهره گیری از نظریه ارائه شده در مرجع [۶]، از مختصات چرخان سنگرون استفاده شده است و با اعمال روش سیگنال کوچک اغتشاش، معادلات غیرخطی حاکم بر سیستم حول نقطه کار حالت پایدار خطی شده و توابع انتقال بین متغیرهای ورودی - خروجی مورد نظر استنتاج گردیده است. با بکار بردن کنترل کننده های PI مناسب، پاسخ حلقه بسته سیستم به تغییر بار و اعوجاج ولتاژ شبکه نشان داده شده است.

۲- مدل SERD در مختصات چرخان سنگرون

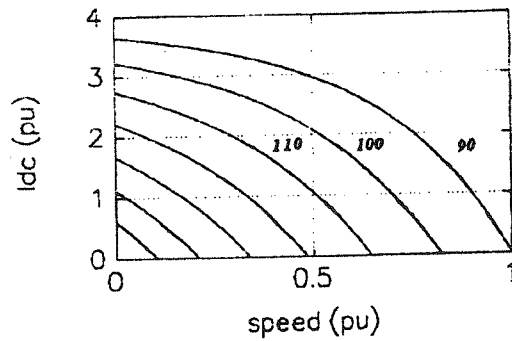
با ترکیب مدل ماشین القایی در مختصات سنگرون (برحسب pu) [۷] با مدار محرک (یکسو ساز، فیلتر و

ماشین های الکتریکی به خصوص نوع القایی، قسمت اعظم بارهای صنعتی را تشکیل می دهند. در گذشته که کاربردهایی از قبیل خطوط نورد فولاد پیشرفته، هواکش ها و پمپ ها نیاز به کنترل دقیق سرعت، در محدوده وسیعی داشت، از ماشین های DC استفاده می شد. پایین بودن هزینه های اولیه و نگهداری موتورهای القایی مهمترین مزیت در مقایسه با ماشین های DC بوده و مشکلات مربوط به کنترل آنها در قدرت های بالا وجود ندارد. به دلیل بالا بودن مقادیر نامی و هزینه المان های کنترل کننده، کنترل موتورهای القایی قفس سنجایی قدرت بالا از سمت استاتور مطلوب نیست. در چند دهه اخیر نظریه استفاده از موتورهای القایی روتور سیم پیچی، به جای ماشین های DC پیشنهاد شده است. در این حالت موتور را می توان از سمت روتور به وسیله المان های با قدرت نامی و هزینه پایین کنترل کرد. به علاوه توان لغزشی که به توان مکانیکی تبدیل نمی شود را می توان به شبکه اصلی برگشت داد. این محرکه ها مشخصه هایی کاملاً شبیه ماشین های DC داشته و مدار کنترل آنها ساده است و با کنترل توان لغزش می توانند در حالت های موتور و ژنراتوری به کار روند.

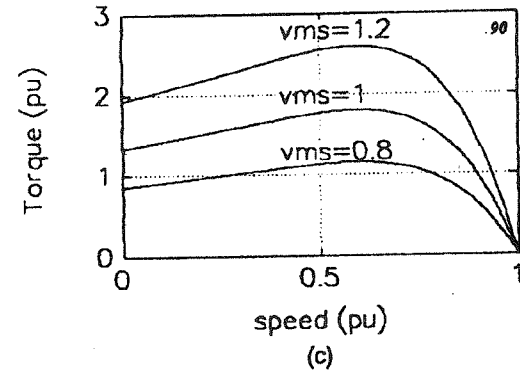
در مدار روتور محرکه های بازیافت انرژی لغزشی از دو طبقه لینک DC پشت سر هم (cascade) استفاده می شود (شکل ۱). ولتاژهای سه فاز روتور توسط یک پل دیودی سه فاز یک سو شده و جریان خروجی پل با یک فیلتر صاف می گردد و سپس با بکارگیری یک اینورتر با کموتاسیون خط، به انرژی ac تبدیل شده و از طریق یک ترانسفورمر به منبع برگشت داده می شود. نسبت دورهای ترانسفورمر به محدوده کنترل سرعت مورد نیاز و نسبت دورهای مؤثر استاتور به روتور بستگی دارد. اگر مقدار متوسط ولتاژ ورودی اینورتر (V_i) مساوی صفر باشد، آنگاه سرعت موتور ماکزیمم خواهد بود. افزایش V_i سبب کاهش سرعت موتور می شود، لذا با تغییر زاویه آتش اینورتر سرعت موتور قابل تنظیم است. در مراجع [۱ و ۲]، SERD در مختصات مرجع هیبرید (dq abc) مدل شده و عملکرد حالت پایدار و نیز گذرای تغییر بار پیش بینی شده است. روش راه اندازی و مسدول SERD در طی راه اندازی در مرجع [۳] ارائه شده است. در مرجع [۴] مشخصات حالت پایدار SERD با استفاده از مختصات چرخان



(a)



(b)



(c)

شکل (۲) پیش بینی عملکرد حالت پایدار SERD

پاسخ حلقه باز SERD به سیگنال های اغتشاش را می توان از مدل گذرای محرکه در مختصات چرخان سنکرون حول نقطه کار حالت پایدار به دست آورد. عملکرد گذرای SERD را از حل معادلات (۱-۴) به دست آورد. این معادلات در فرم فضای حالت استاندارد نیستند و بنابر این جهت حل آنها از روش های عددی، به ساده سازی هایی نیاز هست. فرم فضای حالت معادلات مذکور در مرجع [۶] داده شده است. متغیرهای حالت $(s, i'_{qr}, i'_{qs}, i_{qs}, i_{qs}^e)$ و ورودی ها $V_{ms} \cos \alpha$ می باشند. تأثیر سیگنال های اغتشاش روی عملکرد حالت پایدار یک SERD سه فاز $(V) 280$ ، $(kW) 2/5$ ، $(A) 8/1$ و

اینورتر)، مدل SERD در مختصات چرخان سنکرون حاصل می شود. در این حالت تأثیر امپدانس مختلط موتور القایی روی همپوشانی یکسوساز و نیز هارمونیک های تزریق شده توسط یکسوساز/اینورتر چشم پوشی شده است. در این مدل مقادیر متوسط ولتاژ ورودی اینورتر، و ولتاژ خروجی یکسوساز در نظر گرفته شده اند. معادلات حاکم بر SERD در مختصات چرخان سنکرون به صورت زیر می باشند [۴]:

$$\begin{bmatrix} V_{qs}^e \\ V_{ds}^e \\ -V_{ms} \cos(\alpha) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{qr} + \frac{X_m}{\theta_1} p & X_m & \frac{X_m}{\theta_1} p \\ -X_m & i_{ds} + \frac{X_m}{\theta_1} p & -X_m \\ \frac{X_m}{\theta_1} p & s X_m & i_r + R_r + \frac{1}{\theta_1} (i_r + X_r p) \\ -s X_m & \frac{X_m}{\theta_1} p & -s' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs}^e \\ i_{ds}^e \\ i_{qr}^e \end{bmatrix} \quad (1)$$

گشتاور الکترومغناطیسی بر حسب pu:

$$T_e = -X_m i_{ds}^e i_{qr}^e \quad (2)$$

$$V_{ms}^2 = (V_{ds}^e)^2 + (V_{qs}^e)^2 \quad (3)$$

$$T_e = 2H.P. \left(\frac{\omega_r}{\omega_b} \right) + T_1 \quad (4)$$

H ثابت اینرسی برحسب ثانیه است. مدل حالت پایدار SERD را می توان از معادلات (۱) تا (۲) با فرض $p=0$ به دست آورد. با استفاده از مشخصات و پارامترهای داده شده در مرجع [۵]، می توان عملکرد حالت پایدار محرکه را همانند نشان داده شده در شکل (۲) پیش بینی کرد. شکل های a-۲ و b-۲، به ترتیب گشتاور الکترومغناطیسی و جریان لینک DC را برحسب سرعت بازای زوایای آتش مختلف نشان می دهند. گشتاور الکترومغناطیسی تقریباً متناسب با جریان لینک DC است [۸].

شکل (۲-۳) مشخصه گشتاور-سرعت SERD را بازای مقادیر مختلف ولتاژ نشان می دهد. برای یک گشتاور بار ثابت، تغییر ولتاژ شبکه از مقدار نامی سبب تغییر سرعت موتور می شود.

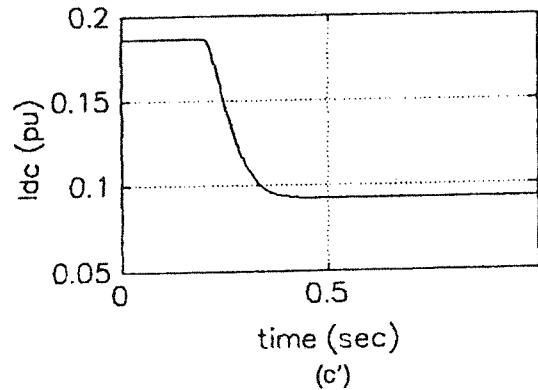
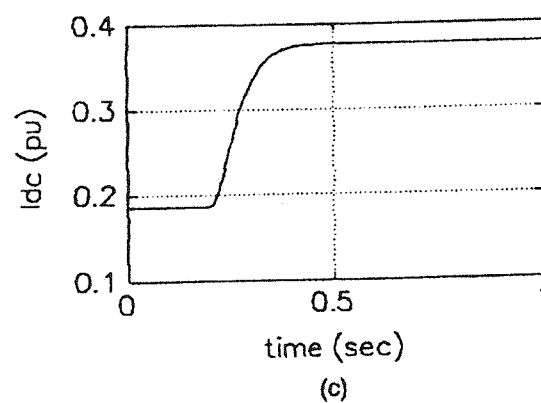
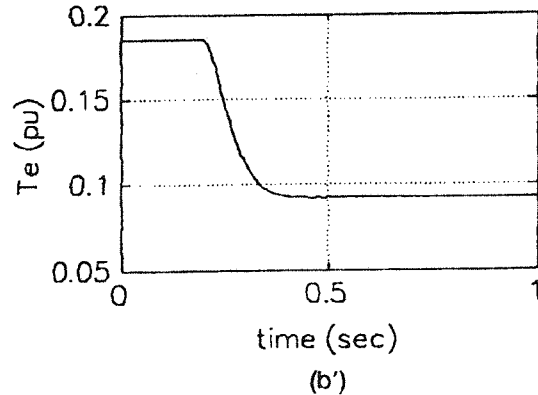
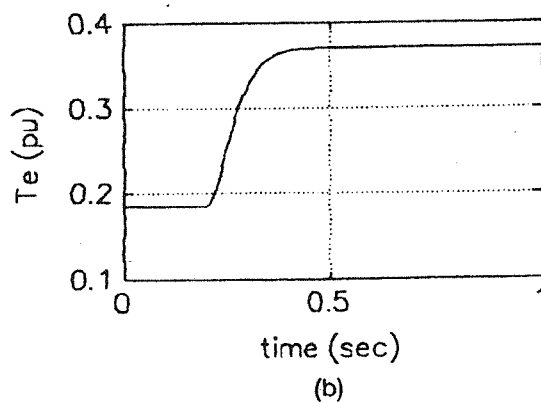
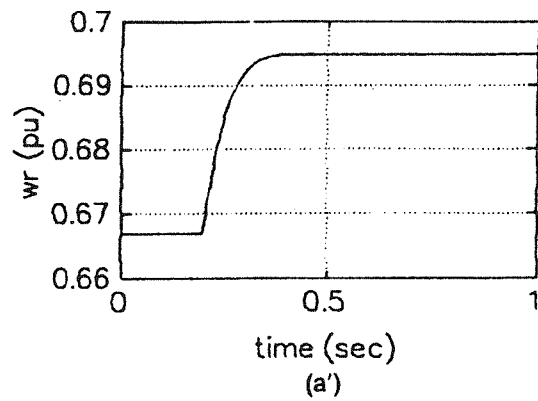
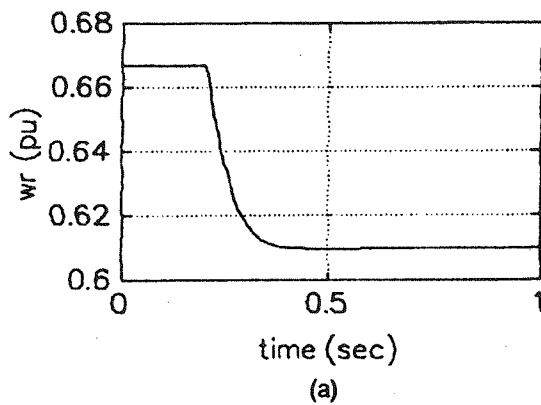
نقطه کار فوق را می توان از مدل حالت یا مدل گذرا با شرایط اولیه متغیرهای حالت صفر به دست آورد. تحت شرایط فوق عملکرد حالت پایدار حلقه باز سیستم بازن سیکنال های اغتشاش مطالعه شده است.

۱-۲- پاسخ حلقه باز SERD به تغییر پله ای گشتاور بار و ولتاژ شبکه

عملکرد حلقه باز SERD ناشی از افزایش ۱۰۰٪ (از ۰/۱۸۵ pu به ۰/۲۷ pu) و کاهش ۵۰٪ (از ۰/۱۸۵ pu

(Hz) ۵۰، با یک ماشین القایی ۴ قطبی با حلقه های لغزان که دارای پارامترهای زیرند (برحسب pu) مطالعه شده است [۶]: $r_s = 0.23$, $X_{ss} = X_r' = 0.814$, $X_m = 0.738$, $r_r' = 0.46$, $R_f' = 0.342$, $X_f' = 2.089$, $H = 115$ (s). نسبت دور مؤثر روتور به استاتور ۰/۴ است. موتور گشتاور بار ۰/۱۸۵ (pu) را با زاویه آتش $\alpha = 104/5^\circ$ به حرکت در آورد. مقادیر حالت پایدار متغیرهای حالت بر حسب pu عبارتند از:

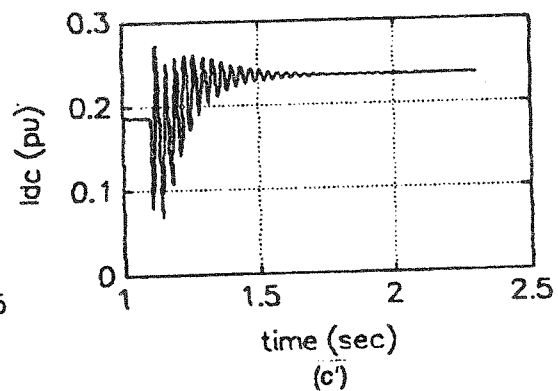
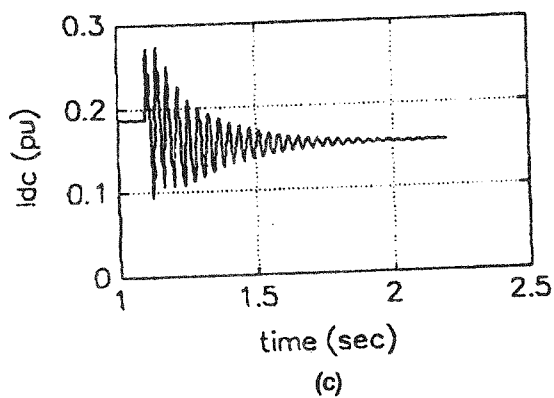
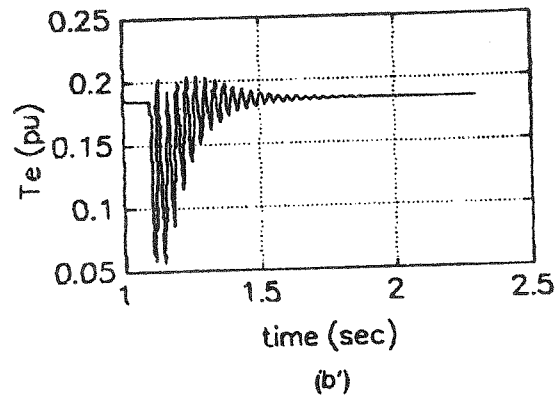
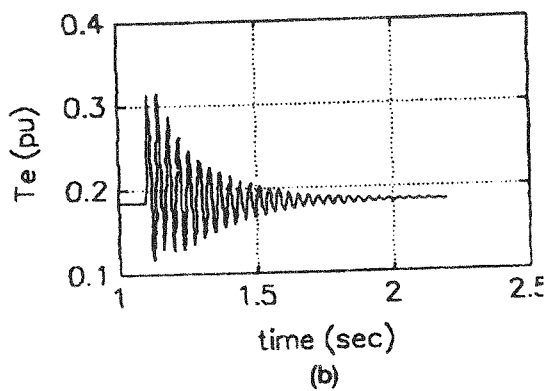
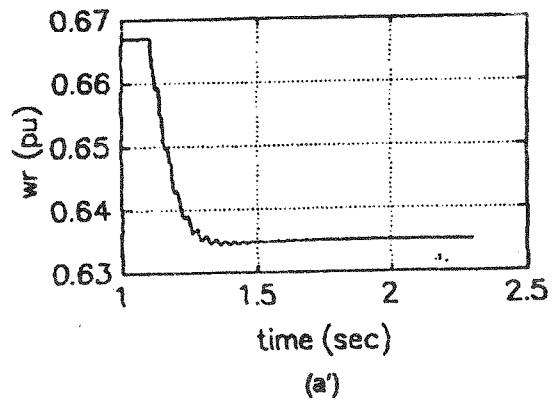
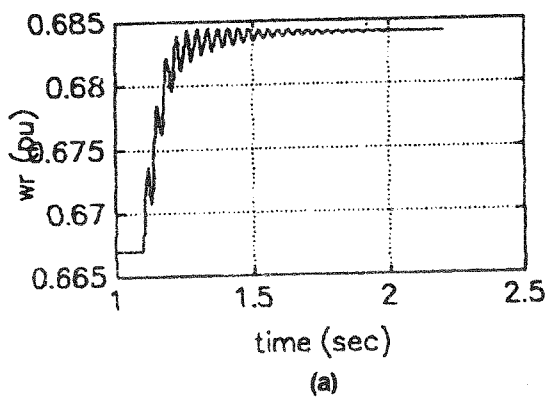
$$i_{qs}^* = 0.228, \quad i_{ds}^* = 1/219, \quad i_{qf}^* = -0.206, \quad V_{qs} = 0.007, \quad V_m = 1, \quad S = \frac{1}{3}$$



شکل (۳) پاسخ حلقه باز SERD به افزایش (با کاهش) پله ای گشتاور بار

به فرض در نقطه کار حالت پایدار فوق با گشتاور بار 1.185 pu زاویه آتش $5^\circ/10.4$ ، ولتاژ شبکه از 1 pu به $1/2 \text{ pu}$ افزایش یابد، عملکرد حلقه باز متناظر در شکل (۴) نشان داده شده است. شکل (۴-a) تغییرات سرعت موتور را نسبت به زمان نشان می‌دهد. افزایش ولتاژ شبکه سبب افزایش سرعت موتور شده و در نهایت ولتاژ القاء شده در روتور و جریان روتور کاهش می‌یابد، بنابراین جریان لینک DC کاهش می‌یابد. چون گشتاور بار ثابت است، گشتاور الکترومغناطیسی بعد از پرورد گذرا در مقدار قبلی خود ثابت باقی می‌ماند (شکل ۴-b).

به 0.925 pu (گشتاور بار در شکل (۳) نشان داده شده است. در یک زاویه آتش معین، با افزایش بار سیستم سرعت کاهش یافته و بعد از طی حالت گذرا به یک نقطه کار جدید می‌رسد (شکل ۳-a). شکل‌های (۳-b) و (۳-c) به ترتیب گشتاور الکترومغناطیسی تولیدی موتور و جریان لینک DC را بازاء افزایش بار نشان می‌دهند. شکل‌های (۳-a', b', c') منحنی‌های مشابهی را بازاء کاهش بار نشان می‌دهند. در یک زاویه آتش معین اینورتر، تغییر ولتاژ شبکه سبب تغییر مشخصه گشتاور-سرعت شده و در نتیجه سرعت اولیه محرکه را تغییر می‌دهد.



شکل (۴) پاسخ حلقه باز SERD به افزایش (یا کاهش) پله‌ای ولتاژ شبکه

پریود گذرا به ازای تغییر ولتاژ شبکه نوسانات بیشتری را نسبت به تغییر گشتاور بار نشان می‌دهد. شکل‌های (۴ - a' b' c') منحنی‌های مشابهی را به ازای کاهش ولتاژ شبکه از 1^{pu} به 0.8^{pu} نشان می‌دهند.

۲ - فرم فضای حالت مدل خطی SERD

مدل گذرای غیرخطی SERD نشان می‌دهد که ولتاژ شبکه و زاویه آتش اینورتر دو ورودی هستند که می‌توانند مستقل از هم تغییر کنند. با تغییر هر کدام از آن دو، مشخصه گشتاور - سرعت حالت پایدار تغییر می‌کند، اما در مطالعه حاضر فرض می‌شود که کنترل از سمت روتور بوده و استاتور به طور مستقیم توسط ولتاژ نامی اش تغذیه می‌شود. بنابراین زاویه آتش اینورتر، ورودی و سیگنال‌های اغتشاش مؤثر بر سیستم گشتاور بار و ولتاژ شبکه می‌باشند. با پیدایش هر کدام از سیگنال‌های اغتشاش در کنترل حلقه بسته و با تغییر پیوسته و هموار زاویه آتش اینورتر می‌توان به یک محرکه سرعت ثابت دست یافت.

چهار متغیر فضای حالت مستقیم $(s, i_{qr}^e, i_{ds}^e, i_{qs}^e)$ یعنی سرعت روتور و جریان لینک DC وجود دارد. در ادامه، مدل گذرای غیرخطی SERD با زاویه آتش اینورتر به عنوان ورودی $(\cos\alpha)$ و سیگنال‌های اغتشاش گشتاور بار و ولتاژ شبکه با استفاده از روش سیگنال کوچک اغتشاش حول نقطه کار حالت پایدار خطی شده و توابع انتقال بین متغیرهای ورودی و خروجی به دست خواهد آمد.

۲-۱ - خطی‌سازی مدل بازای سیگنال‌های اغتشاش گشتاور بار و ولتاژ شبکه

خطی‌سازی فرم فضای حالت حول نقطه کار براساس روش سیگنال کوچک اغتشاش به صورت زیر است:

$$\delta\dot{x} = J\delta x + A_1\delta u + B_1\delta T_1$$

$$\delta y = c\delta x$$

$$\delta x = [\delta i_{qs}^e \quad \delta i_{ds}^e \quad \delta i_{qr}^e \quad \delta s]^T$$

$$\delta y = [\delta i_{qr}^e \quad \delta \omega_r]^T \quad (5)$$

به طوری که $\delta x =$ اغتشاش در متغیرهای حالت (غزش و جریان‌ها)، $\delta u =$ اغتشاش در ورودی، $\delta y =$

$(\cos\alpha)$ اغتشاش در خروجی‌های اندازه‌گیری شده، $\delta T_1 =$ اغتشاش در گشتاور بار هستند. ماتریس‌های ضرایب در معادله (۵) در مرجع (۶) داده شده‌اند که براساس پارامترهای SERD و نقطه کار داده شده در بخش ۱ مشخص می‌شوند.

برای مدل کردن سیستم حلقه بسته محرکه، لازم است که توابع انتقال بین متغیرهای خروجی و ورودی و نیز سیگنال‌های اغتشاش به دست آید. جریان لینک DC متناسب با مؤلفه q جریان فاز روتور است [۴]، آنگاه مؤلفه q جریان فاز روتور متغیرهای خروجی و $\alpha = \cos u$ سیگنال ورودی و T_L سیگنال اغتشاش می‌باشد. براساس مدل خطی فضای حالت، توابع انتقال $G_1(s)$, $G_2(s)$, $G_{TL1}(s)$, $G_{TL2}(s)$ در [۶] آمده‌اند. فرض کنید که گشتاور ثابت بوده و تغییرات ولتاژ شبکه مد نظر باشد. خطی‌سازی فرم فضای حالت حول نقطه کار حالت پایدار با استفاده از روش سیگنال کوچک اغتشاش عبارت است از:

$$\delta\dot{x} = J\delta x + A_1\delta u + B_1\delta V_{ms}$$

$$\delta y = c\delta x$$

$$\delta x = [\delta i_{qs}^e \quad \delta i_{ds}^e \quad \delta i_{qr}^e \quad \delta s]^T$$

$$\delta y = [\delta i_{qr}^e \quad \delta \omega_r]^T$$

δV_{ms} اغتشاش در ولتاژ شبکه است. همه ماتریس‌های ضرایب مشابه با حالت تغییر بار بوده، به جز B_1 که به صورت زیر است:

$$B_1 = \begin{bmatrix} \frac{\delta f_1}{\delta V_{ms}} & \frac{\delta f_2}{\delta V_{ms}} & \frac{\delta f_3}{\delta V_{ms}} & \frac{\delta f_4}{\delta V_{ms}} \end{bmatrix} \quad (6)$$

دوباره براساس پارامترهای SERD و نقطه کار داده شده در قبل، ماتریس‌های ضرایب خطی فرم فضای حالت حول نقطه کار عبارتند از:

$$J_1 = \begin{bmatrix} -15.75 & -39.31 & 40.15 & 148.18 & 0 \\ 104.72 & 0 & 115.50 & -0.0002 & 0 \\ 4.79 & 89.41 & -42.94 & -163.44 & 0 \\ 0 & -0.66 & 3.91 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

مورد استفاده قرار می‌گیرند. حلقه داخلی برای کنترل جریان لینک DC و حلقه بیرونی برای کنترل سرعت می‌باشد و در هر حلقه، کنترل کننده‌های PI اعمال شده‌اند. سیستم کنترل حلقه بسته SERD در شکل ۵ نشان داده شده است [۸ و ۶].

سیستم حلقه بسته شکل (۵) چنانچه سیگنال‌های اغتشاش به محرکه اعمال شوند و سرعت روتور نسبت به مقدار مرجع (ω_m^*) تغییر کند، با نمونه برداری از سرعت روتور و جریان لینک DC و مقایسه با مقادیر مرجع متناظر، کنترل کننده‌های PI عمل کرده و سبب تغییر هموار و پیوسته زاویه آتش اینورتر می‌شوند. تغییر زاویه آتش سبب انتقال مشخصه گشتاور سرعت به گونه‌ای است که سرعت محرکه ثابت باقی بماند.

در سیستم حلقه بسته شکل (۵-a)، یک محدود کننده جریان استفاده شده است. چون سیگنال خروجی کنترل کننده سرعت ممکن است در طی حالت گذرا بزرگ باشد، خروجی محدود کننده به اشباع رفته و یک جریان مرجعی متناظر با ماکزیموم مقدار ممکن را فراهم می‌کند. بنابراین جریان مجاز به افزایش بیش از حد معین نمی‌باشد. در طی پریود گذرا جریان مرجع محدود کننده روی ماکزیموم مقدار ممکن تنظیم می‌شود و این موضوع امکان بهره‌گیری از کل قابلیت گشتاور تولیدی توسط محرکه را میسر ساخته و در نتیجه پاسخ سریع است.

شکل (۵-b) سیستم حلقه بسته SERD با وسایل نمونه برداری جریان و سرعت را نشان می‌دهد. برای اندازه‌گیری سرعت از تاکومتر استفاده می‌شود. اگر مسیر چرخش آزاد در مبدل یا اینورتر وجود نداشته باشد (اتصال کوتاه مبدل توسط دو تریستور در یک ساق) جریان طرف ac مبدل حاوی اطلاعات طرف dc می‌باشد [۸]. بنابراین برای اندازه‌گیری جریان از ساختار شکل (۵-b) استفاده می‌شود. یک مبدل (V/α) وجود دارد که متناظر با سیگنال خروجی کنترل کننده جریان، زاویه آتش اینورتر را تغییر می‌دهد.

متناظر با وسایل اندازه‌گیری، محدود کننده جریان و مدار مبدل (V/α) یک بهره خطی وجود دارد که به صورت ذیل هستند:

K_1 بهره تاکومتر، K_2 بهره پتانسیومتر (به عنوان محدود کننده)، K_3 بهره حساسه جریان، $K_4 = (V/\alpha)$ بهره مدار مبدل در سیستم کنترل حلقه بسته از کنترل کننده‌های توابع انتقال زیر استفاده شده است:

$$A_1 = \begin{bmatrix} 164.69 \\ 0 \\ 181.64 \\ 0 \end{bmatrix} \quad B_1 = \begin{bmatrix} 493.82 \\ 0 \\ -118.98 \\ 0 \end{bmatrix}$$

توابع انتقال بین متغیرهای خروجی (مؤلفه q جریان فاز روتور، سرعت روتور) و متغیرهای ورودی ($u = \cos \alpha$) و سیگنال اغتشاش (V_{ms}) عبارتند از:

$$G'_{11}(s) = \frac{\delta i'_{qr}}{\delta \cos \alpha} = [0 \ 0 \ 1 \ 0] [SI-J]^{-1} \cdot A_1 \quad (7)$$

$$G'_{21}(s) = \frac{\delta \omega_r}{\delta \cos \alpha} = [0 \ 0 \ 1 - \omega_s] [SI-J]^{-1} \cdot A_1 \quad (8)$$

$$G_{vms1}(s) = \frac{\delta i'_{qs}}{\delta V_{ms}} = [0 \ 0 \ 1 \ 0] [SI-J]^{-1} \cdot B_1 \quad (9)$$

$$G_{vms2}(s) = \frac{\delta \omega_r}{\delta V_{ms}} = [0 \ 0 \ 0 - \omega_s] [SI-J]^{-1} \cdot B_1 \quad (10)$$

که در آن S اپراتور تبدیل لاپلاس در حوزه فرکانس مختلط و I ماتریس واحد 4×4 هستند.

توابع انتقال $G'_{11}(s)$ و $G'_{21}(s)$ به ترتیب با $G_1(s)$ و $G_2(s)$ برابرند. توابع انتقال $G_{vms1}(s)$ و $G_{vms2}(s)$ براساس صفر - قطب و بهره به صورت ذیل می‌باشند.

$$G_{vms1}(s) = \frac{a_1 s^4 + a_2 s^3 + a_3 s^2 + a_4 s + a_5}{d_1 s^4 + d_2 s^3 + d_3 s^2 + d_4 s + d_5}$$

$$G_{vms1}(s) = \frac{b_1 s^4 + b_2 s^3 + b_3 s^2 + b_4 s + b_5}{d_1 s^4 + d_2 s^3 + d_3 s^2 + d_4 s + d_5}$$

۳- سیستم حلقه بسته SERD

عدم کفایت دقت در پاسخ حالت پایدار سیستم حلقه باز محرکه، ضرورت سیستم حلقه بسته محرکه را نشان می‌دهد. در این صورت از حلقه‌های فیدبک برای محدود کردن پارامترها در محدوده قابل قبول و نیز اصلاح مشخصات دینامیکی محرکه استفاده می‌شود. در کنترل حلقه بسته، دو سیگنال فیدبک ناشی از دو حلقه کنترل با تخصیص دو کنترل کننده پشت به پشت

به طوری که (K_c, K_s) و (τ_c, τ_s) به ترتیب بهره های خطی و ثابت زمانی کنترل کننده ها می باشند. پارامترها بایستی براساس انتظاری که از سیستم حلقه بسته داریم، مشخص شوند.

براساس توابع انتقال بین متغیرهای ورودی و خروجی، بهره های خطی و توابع انتقال کنترل کننده های سرعت و جریان می توان سیستم حلقه بسته SERD را در حوزه s مدل کرد. این مدل به ازای سیگنال های اغتشاش گشتاور بار و ولتاژ شبکه در شکل (۶) نشان داده شده است. بهره های خطی بلوک دیاگرام شکل (۶) به صورت ذیل هستند [۶].

$$K_1 = \frac{\delta \omega_m - \text{act}}{\delta \omega_m} = 0.0305$$

$$K_2 = \frac{\delta i_{dc-\text{ref}}}{\delta i} = 0.25$$

$$K_3 = \frac{\delta i_{dc-\text{act}}}{\delta i_{dc}} = 0.15$$

$$K_4 = (V/\alpha) = 0.25 \text{ بهره خطی مبدل}$$

$$K_5 = \frac{\delta i_{dc}}{\delta i^{e}_{qr}} = -25.9716$$

$$K_6 = \frac{\delta \omega_m}{\delta \omega_r} = 0.5$$

در بلوک دیاگرام شکل (۶) تمام متغیرها به جز پارامترهای کنترل کننده ها تعریف شده اند و در بخش بعدی پارامترهای مذکور مشخص خواهند شد.

۴ - تخمین پارامترهای کنترل کننده ها

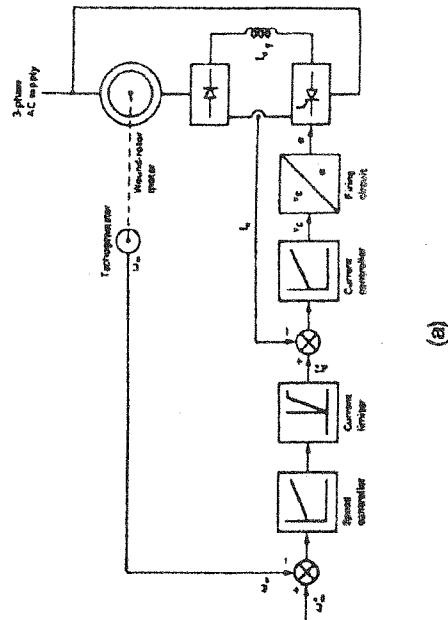
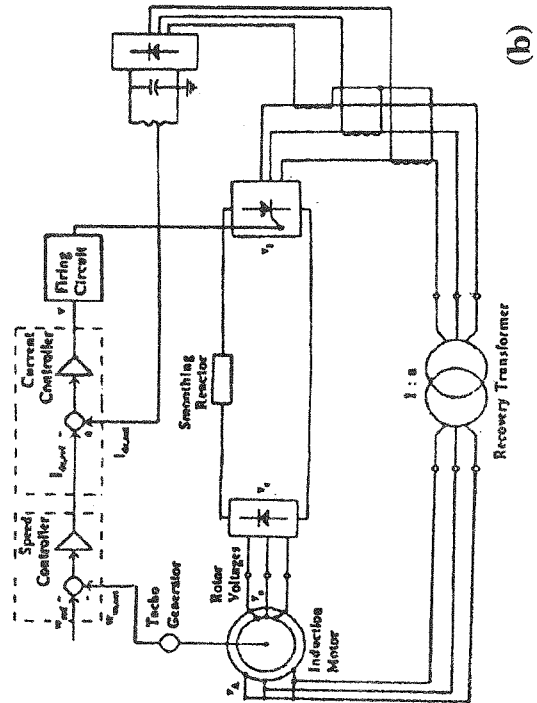
طراحی کنترل کننده ها براساس روش سعی و خطاست و استفاده از اصول طراحی کلاسیک طراحی چنین کنترل کننده هایی را میسر می سازد.

یکی از روش های طراحی کلاسیک، روش مکان هندسی ریشه های معادله مشخصه تابع انتقال حلقه باز بوده که برای تنظیم بهره و ثابت زمانی کنترل کننده ها به کار می رود. برای حصول به پاسخ گذرای مطلوب درصد فرابجهش (overshoot) برای هر دو کنترل کننده ۵٪ (معادل نسبت میرایی ۰/۷) در نظر گرفته شده و زمان صعود و نشست، کوچک انتخاب می شوند [۹].

در روند طراحی، ابتدا تأثیر اغتشاش چشم پوشی شده و طراحی براساس ورودی پله واحد انجام می شود. سپس بعد از حصول به نتایج مطلوب به ازای ورودی

$$G_{c1}(s) = [K_c (s + \frac{1}{\tau_c})] / s \quad (11)$$

$$G_{c2}(s) = [K_s (s + \frac{1}{\tau_s})] / s \quad (12)$$



شکل (۵) سیستم کنترل حلقه بسته SERD.

مذکور، تأثیر حذف (یا تضعیف) اغتشاش در خروجی مورد بررسی و مطالعه قرار می‌گیرد. بلوک دیاگرام حلقه بسته SERD شامل دو حلقه داخلی و بیرونی بوده و ابتدا حلقه داخلی در نظر گرفته می‌شود و پارامترهای کنترل کننده PI جریان به گونه ای مشخص می‌شوند که شرایط مطلوب حاصل شوند.

برای حذف نوسانات ممکن در سیستم حلقه بسته ناشی از جریان لینک DC لحظه ای، ثابت زمانی کنترل کننده جریان کمتر از پریود موج جریان لینک DC گرفته می‌شود [۶]. با فرض ثابت زمانی ۲ میلی ثانیه، بهره کنترل کننده را می‌توان از مکان هندسی ریشه‌ها به دست آورد:

$$G_{cl}(s) = [K_c (s + \frac{1}{0.003})] / s \quad (13)$$

با در نظر گرفتن حلقه داخلی کنترل جریان و صرف نظر از تأثیر اغتشاش، تابع انتقال حلقه باز در این حلقه عبارت است از:

$$G_{cl}(s) = K_3 K_4 K_5 G_{cl} G_1 \quad (14)$$

با بکارگیری مکان هندسی ریشه‌ها و تغییر K_c ، مکان هندسی ریشه‌های معادله مشخصه سیستم حلقه باز (حلقه درونی) در شکل (۷) نشان داده شده است. این مکان از قطب‌های تابع انتقال حلقه باز شروع و به صف‌های آن ختم می‌شود. برای شرایط مطلوب، $K_c = 3/5$ به دست آمده است. آنگاه:

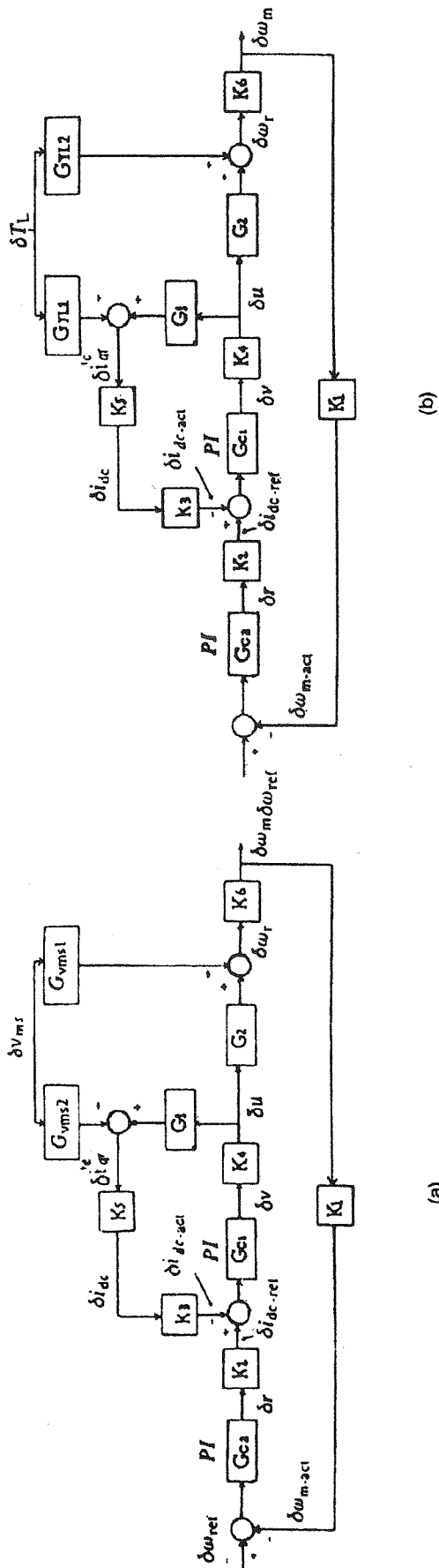
$$G_{cl}(s) = [3.5 (s + 333.33)] / s \quad (16)$$

تمام پارامترهای حلقه داخلی معلوم می‌باشند. پاسخ حلقه داخلی به ورودی پله واحد و اغتشاش پله واحد در شکل (۸) نشان داده شده‌اند. مشاهده می‌شود که $K_c = 3/5$ فرآیند پاسخ ورودی پله ۵٪ بوده که به خوبی ورودی پله را دنبال می‌کند و تأثیر اغتشاش پله حذف شده است.

شکل (۶) سیستم کنترل حلقه بسته SERD

(a) بازای گشتاور بار به عنوان سیگنال اغتشاش.

(b) بازای ولتاژ شبکه به عنوان سیگنال اغتشاش.



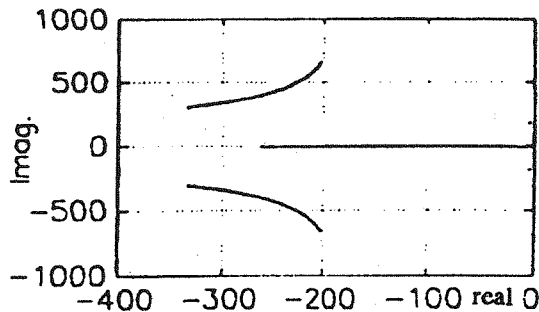
تابع انتقال حلقه باز، حلقه بیرونی براساس $G_3(s)$ به دست می‌آید، بنابراین:

$$G_{02}(s) = K_1 K_2 K_4 G_{c2} G_2 G_3 \quad (18)$$

ثابت زمانی کنترل کننده PI سرعت به ثابت زمانی مکانیکی سیستم SERD وابسته است. در اینجا $\tau_s = 0.5$ انتخاب شده است و با تغییر بهره خطی کنترل کننده (K_s)، مکان هندسی ریشه‌های معادله مشخصه $G_{02}(s)$ به دست می‌آید که در شکل (۹) نشان داده شده است. تحت شرایط مطلوب $K_s = 12$ به دست آمده و بنابر این تابع انتقال کنترل کننده سرعت عبارت است از:

$$G_{c2}(s) = [12(s+2)]/s \quad (19)$$

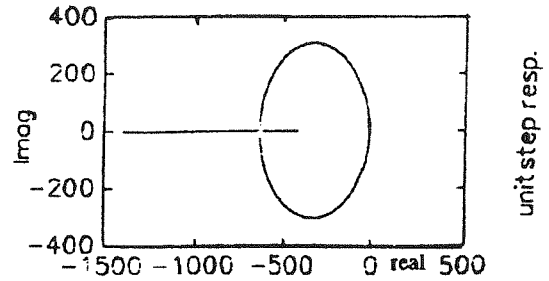
بنابراین تمام پارامترها و مجهولات بلوک دیاگرام حلقه بسته SERD با کنترل کننده‌های سرعت و جریان مشخص شده‌اند. در بحث‌های بعدی تأثیر حذف اغتشاشات موجود مطالعه خواهد شد.



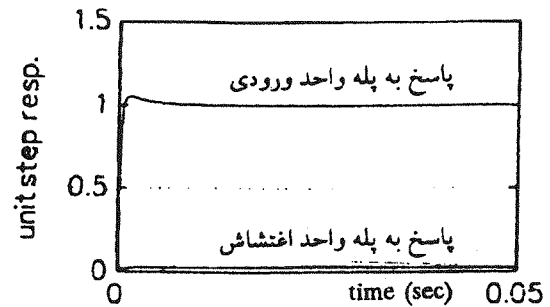
شکل (۹) مکان هندسی ریشه‌های معادله مشخصه تابع انتقال حلقه باز، حلقه کنترل سرعت سیستم حلقه بسته SERD.

۵- پاسخ زمانی سیستم کنترل حلقه بسته SERD به ورودی‌های اغتشاش به ازای یک سرعت معین

بلوک دیاگرام حلقه بسته SERD شکل (۶) به ازاى ورودی‌های اغتشاش در یک سرعت ثابت و تغییر سیگنال کوچک حول نقطه کار حاصل شده است. پاسخ زمانی $\delta\omega_m$ (تغییرات سرعت)، δV (تغییرات خروجی کنترل کننده PI جریان)، δi_{dc-ref} (جریان لینک DC مرجع یا تغییرات خروجی کنترل کننده PI سرعت)، δi_{dc-act}



شکل (۷) مکان هندسی ریشه‌های معادله مشخصه حلقه داخلی سیستم کنترل SERD



شکل (۸) پاسخ پله حلقه داخلی کنترل جریان (سیستم حلقه بسته SERD)

برای مشخص کردن پارامترهای کنترل کننده PI سرعت و رسم مکان هندسی ریشه‌های معادله مشخصه سیستم حلقه باز، لازم است حلقه داخلی سیستم کنترل را با یک بلوک جایگزین کنیم، برای این منظور تابع انتقال حلقه بسته داخلی عبارت است از:

$$G_3(s) = K_4 G_{cl} / (1 + K_3 K_4 K_5 G_{cl} G_1) \quad (17)$$

تابع انتقال $G_3(s)$ براساس صفر - قطب و بهره عبارت است از:

$$Z = 1.0e + 002 \begin{bmatrix} -3.3330-00.0000i \\ -0.0570 - 1.7580i \\ -0.0570+1.7580i \\ -0.2350-0.1100i \\ -0.2350+0.1100i \end{bmatrix}$$

$$Z = 1.0e + 002 \begin{bmatrix} 0 \\ -3.3376+3.0708i \\ -3.3376-3.0708i \\ -0.0496+1.8188i \\ -0.0496-1.8188i \end{bmatrix}$$

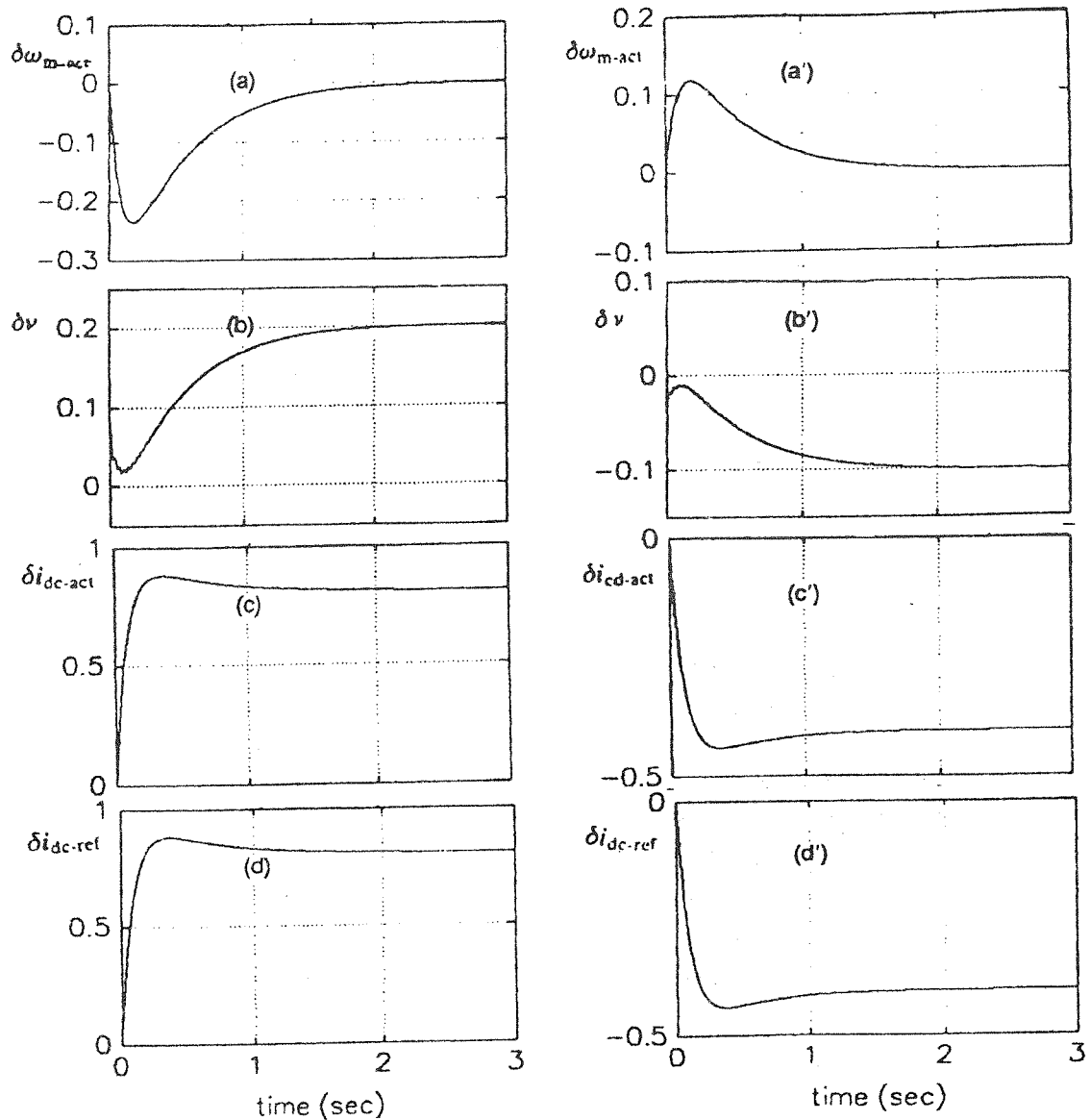
$$k = 0.8750$$

تغییرات جریان لینک DC واقعی) به ورودی‌های اغتشاش نسبت به زمان نشان داده خواهند شد.

۱-۵ پاسخ به اغتشاش پله‌ای گشتاور بار

عملکرد سیستم حلقه بسته به افزایش ۱۰٪ گشتاور بار (از 0.185^{pu} به 0.2037^{pu}) در شکل (۱۰) نشان داده شده است. شکل (a-۱۰)، تغییر سرعت بر حسب زمان نسبت به نقطه کار قبل از اعمال اغتشاش را نشان می‌دهد. با اعمال پله مثبت گشتاور بار، سرعت 0.24^{pu} کاهش یافته که با حضور کنترل کننده‌ها این خطای سرعت تقریباً در ۲ ثانیه حذف می‌شود. شکل (b-۱۰) تغییرات خروجی کنترل کننده جریان را نشان می‌دهد

(متناسب با $\cos a$ یا α) با اعمال اغتشاش بار بازای یک سرعت معین، برای انتقال مشخصه گشتاور-سرعت، زاویه آتش اینورتر به طور پیوسته تغییر کرده است. با توجه به شکل (a-۲)، با افزایش گشتاور بار برای تثبیت سرعت مشخصه گشتاور-سرعت بایستی به سمت راست انتقال یابد (زاویه آتش اینورتر کاهش یابد). تغییرات پیوسته و هموار زاویه آتش اینورتر از مقدار اولیه $10.4/5^\circ$ به مقدار قابل انتظار $10.1/5.6^\circ$ حاصل شده است (شکل b-۱۰). شکل c-۱۰، d-۱۰، به ترتیب جریان لینک DC مرجع (خروجی کنترل کننده سرعت) و تغییرات جریان لینک DC واقعی را نشان می‌دهند. افزایش گشتاور بار جریان لینک DC را افزایش



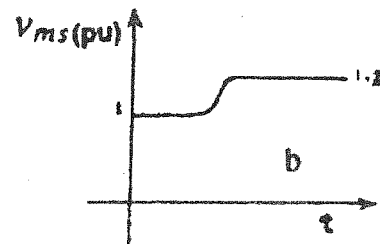
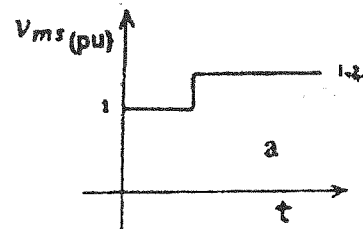
شکل (۱۰) پاسخ زمانی سیستم حلقه بسته SERD به تغییر بار

داده و جریان لینک DC واقعی به خوبی جریان مرجع را دنبال می کند. شکل های (a', b', c', d' - ۱۰) پاسخ زمانی حلقه بسته SERD را بازای کاهش بار نشان می دهند (از 0.185^{pu} به 0.925^{pu}).

۲-۵. پاسخ به اغتشاش پله ای ولتاژ شبکه

ولتاژ شبکه تحت شرایط مختلفی از قبیل بارگذاری و خارج کردن بارهای بزرگ، حالت های گذرای کلیدزنی، عیوب اتصال کوتاه و غیره، ممکن است تغییر کند. در مطالعه حاضر فقط تغییرات ولتاژ شبکه ناشی از بار در نظر گرفته شده است. این تغییرات به کیفیت، ساختار، شکل و وضعیت شبکه بستگی دارد.

در شبکه هایی که از کیفیت خوبی برخوردارند، هیچگونه تغییر ولتاژی وجود ندارد، در صورتی که در شبکه های ضعیف این تغییرات مشاهده می شود. نوع اغتشاش ولتاژ (به صورت پله ای لحظه ای یا پله ای هموار) به بارهای موجود در شبکه، بارگذاری و خارج کردن بار شبکه وابسته است. فرض کنید ولتاژ شبکه به اندازه 0.2^{pu} افزایش یابد (شکل ۱۱).



شکل (۱۱) افزایش پله ای ولتاژ شبکه

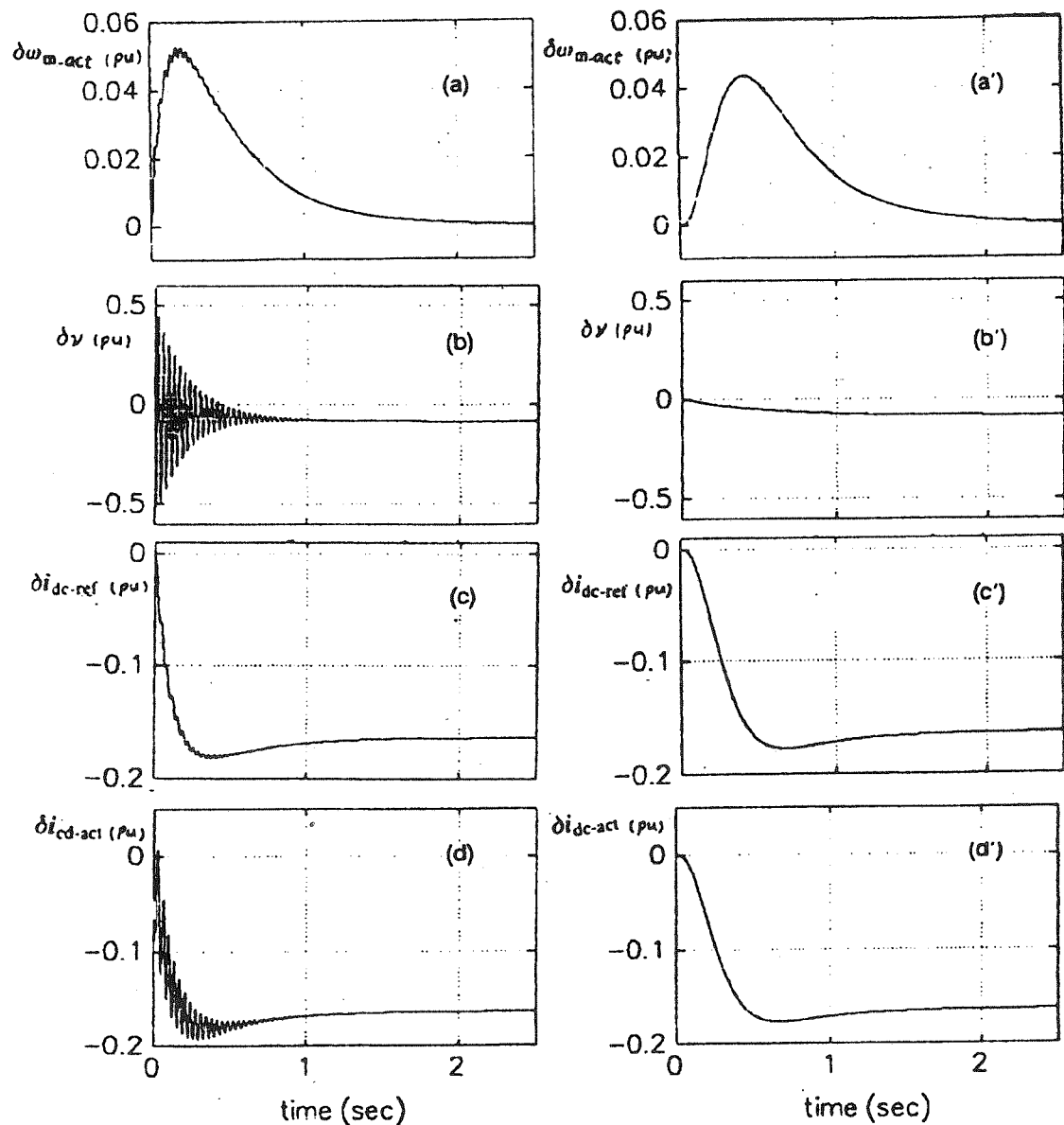
بلوک دیاگرام شکل (b-۶) و افزایش پله ای لحظه ای ولتاژ شبکه را در نظر می گیریم، عملکرد سیستم حلقه بسته بازای اغتشاش مذکور در شکل (۱۲) نشان داده شده است. وقتی که ولتاژ پله ای لحظه ای اعمال می شود نتایج، مشابه نتایج حلقه باز SERD بوده و نوسانات گذرا وجود دارند.

شکل (a-۱۲) تغییرات سرعت بر حسب زمان را نسبت به قبل از اعمال اغتشاش نشان می دهد. بازای یک گشتاور بار معین و افزایش ولتاژ شبکه، سرعت روتور بالا می رود (همانند منحنی های گشتاور - سرعت شکل (d-۲) و پاسخ حلقه باز شکل (a-۴))، که با حضور کنترل کننده های سرعت و جریان این خطای سرعت حذف می شود.

شکل (b-۱۲)، تغییرات خروجی کنترلی کننده PI جریان (متناسب با تغییرات زاویه آتش اینورتر) را نسبت به قبل از اعمال اغتشاش نشان می دهد. افزایش ولتاژ شبکه، مشخصه گشتاور - سرعت حالت پایدار را انتقال می دهد، تغییر پیوسته زاویه آتش اینورتر این انتقال و جابجایی را جبران کرده و محرکه به ازای گشتاور و بار معین دارای سرعت ثابتی خواهد شد. تغییرات زاویه آتش اینورتر (خروجی کنترل کننده جریان) بعد از طی پریود گذرا و رسیدن به نقطه کار حالت پایدار جدید در شکل (b-۱۲) نشان داده شده است.

شکل های (c-۱۲) و (d-۱۲) به ترتیب جریان لینک DC مرجع (خروجی کنترل کننده سرعت) و جریان لینک DC واقعی را نشان می دهند. نوسانات پریود گذرا نیز در این شکل ها مشاهده می شود (که در جریان δi_{dc-act} واضح تر است). گشتاور الکترومغناطیسی تقریباً متناسب با حاصلضرب ولتاژ فاز و جریان لینک DC است $(T_e \propto V_{ms} I_{dc})$. بنابراین بازای یک گشتاور بار ثابت، با افزایش ولتاژ شبکه (V_{ms}) جریان I_{dc} بایستی کاهش یابد، که این نتایج با مشاهده پاسخ سیستم حلقه بسته روشن است.

نکته مهم در نتایج پیش بینی شده، وجود نوسانات در خروجی کنترل کننده جریان (شکل b-۱۲) می باشد که ممکن است کموتاسیون و آتش کردن ترستورهای اینورتر را مختل سازد. در واقع تغییرات ولتاژ شبکه نرم و هموار بوده و به ندرت به صورت پله ای لحظه ای می باشد. فرض کنید تغییرات ولتاژ شبکه به صورت پله ای هموار باشد (شکل b-۱۱)، نتایج پیش بینی شده در شکل های (a'-۱۲) تا (d'-۱۲) نشان داده شده است. از مقایسه نتایج مربوط به تغییرات پله ای لحظه ای ولتاژ با پله ای هموار، مشاهده می شود که بعد از طی پریود گذرا نقطه کار حالت پایدار جدید در هر دو حالت یکسان بوده و نوساناتی که قبلاً وجود داشت، ظاهر نشده است و تغییرات گذرای هموار و پیوسته منجر به نتایج مطلوبی شده است.



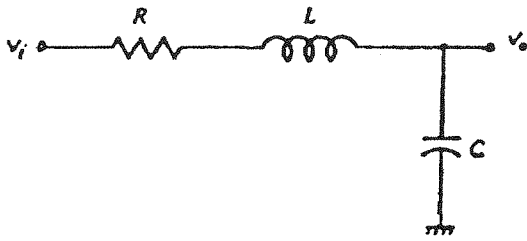
شکل (۱۲) پاسخ زمانی سیستم حلقه بسته SERD به افزایش ولتاژ شبکه

به طوری که: $\omega_n^2 = \frac{1}{LC}$, $2\zeta\omega_n = \frac{R}{L}$

کاهش ولتاژ شبکه روی سرعت و سایر متغیرهای سیستم حلقه باز و بسته SERD مؤثر است. این تأثیر با مراجعه به مشخصه گشتاور سرعت (شکل d-۲) و نتایج حلقه باز شکل (a', b', c', d'-۴) به خوبی درک می شود. کاهش سرعت ناشی از کاهش ولتاژ در یک گشتاور بار معین و تغییر پیوسته زاویه آتش اینورتر را

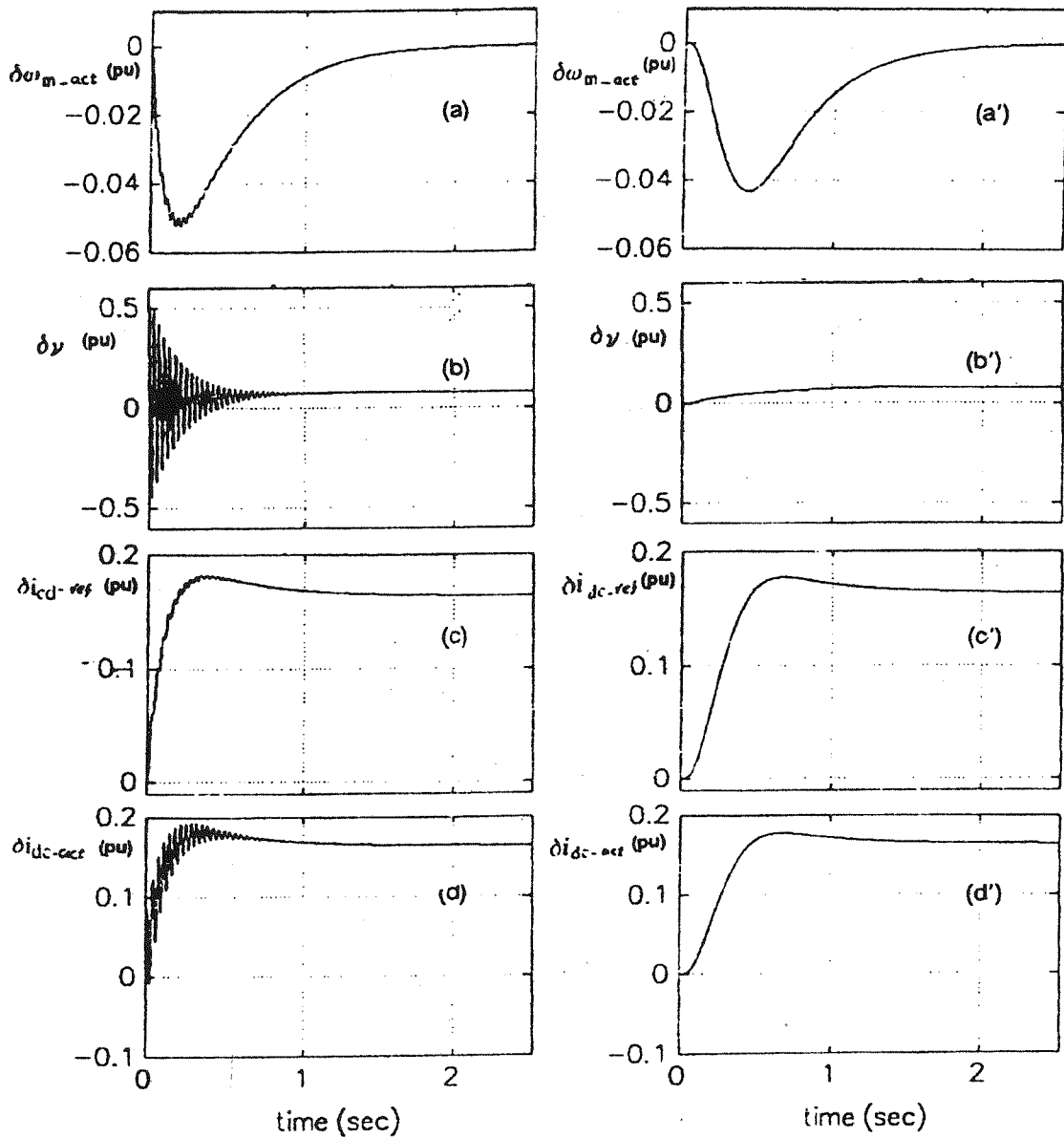
چنانچه تغییرات پله ای لحظه ای ولتاژ وجود داشته باشد، می توان آن را به تغییرات پله ای تبدیل کرده و به SERD اعمال کرد. قرار دادن خازن در ترمینال هر فاز استاتور و ترکیب با خط انتقال با خاصیت اهمی - سلفی (RL) (شکل ۱۳) منجر به هموار شدن ولتاژ پله ای شده و به SERD اعمال می شود. در شکل (۱۳) داریم:

$$\frac{V_0}{V_i} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (20)$$



شکل (۱۳) مدل خط و خازن متصل به استاتور SERD.

می توان با استفاده از کنترل کننده های PI جریان و سرعت جبران کرد و سپس به یک سرعت ثابت دست یافت. نتایج پیش بینی شده پاسخ زمانی سیستم حلقه بسته SERD ناشی از کاهش ولتاژ در شکل (۱۴) نشان داده شده است. این نتایج قابل قبول و مطلوب می باشند.



شکل (۱۴) پاسخ زمانی سیستم حلقه بسته SERD به کاهش ولتاژ شبکه.

۶- نتیجه گیری

شده‌اند. همچنین با اعمال دو کنترل کننده پشت به پشت (برای کنترل جریان لینک DC و سرعت) مدل خطی سیستم حلقه بسته محرکه کامل شده و با تخمین پارامترهای کنترل کننده‌ها براساس روش‌های طراحی مرسوم (مکان هندسی ریشه‌ها)، پاسخ زمانی حلقه بسته به سیگنال‌های اغتشاش بازای یک سرعت معین و تغییر پیوسته زاویه آتش اینورتر بررسی شد. انتخاب بهینه پارامترهای کنترل کننده‌های PI و عملکرد خوب مدل خطی سیستم حلقه بسته محرکه در حذف خطای سرعت بازای سیگنال‌های اغتشاش نسبت به نقطه کار حالت پایدار، در نتایج نشان داده شدند.

این مقاله، تأثیر سیگنال‌های اغتشاش گشتاور بار و ولتاژ شبکه روی عملکرد سیستم حلقه بسته محرکه‌های بازیافت انرژی لغزشی بازای یک سرعت معین را نشان می‌دهد. برای حصول به این هدف، SERD در مختصات چرخان سنکرون مدل شد. با پیش بینی مشخصات حالت پایدار و پاسخ زمانی حلقه باز محرکه بازای سیگنال‌های اغتشاش، ضرورت سیستم کنترل حلقه بسته محرکه نشان داده شد.

برای مدل کردن سیستم حلقه بسته محرکه، مدل غیرخطی گذرای محرکه با استفاده از روش سیگنال کوچک اغتشاش حول نقطه کار حالت پایدار خطی شده و توابع انتقال بین متغیر خروجی - ورودی مطلوب استنتاج

مراجع

- [1] E. Akpınar and P. Pillay: "Modelling and performance of slip energy recovery induction motor drives", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 5, No. 1, March 1990, pp. 203 - 210.
- [2] E. Akpınar and P. Pillay: "A Computer program to predict the performance of slip energy recovery induction motor drives", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 5, No. 2, June 1990, pp. 357 - 365.
- [3] E. Akpınar, P. Pillay and A. Erask "Starting transients in slip energy recovery induction motor drives formulation and modelling", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 7, No. 1, March 1992, pp. 238 - 244.
- [4] P. C. Krause, O. Wasynczuk and M. S. Hildebrant: "Reference frame analysis of a slip energy recovery system", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 3, No. 2, June 1988, pp. 404 - 408.
- [5] P. Liao, J. Sheng and T. A. Lipo: "A new energy recovery scheme for doubly - fed adjustable speed induction motor drives", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 27, No. 4, July/August 1991, pp. 728-733.
- [6] E. Akpınar, R.E. Trahan and A.D. Nguyen: "Modelling and analysis of closed-loop slip energy recovery induction motor drive using a linearization technique", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 8, /No. 4, December 1993, pp. 688-697.
- [7] P. C. Krause: "Analysis of Electric Machinery", IEEE Press, 1992.
- [8] G.K. Dubey: "Power semiconductor controlled drives", Prentic-Hall, 1989, UK.
- [9] B.C. Huo: "Automatic control systems", Prentic-Hall, 1991, U.K.
- [10] G. W. Stagg and A. H. El-Abiad: "Computer methods in power system analysis", McGraw-Hill, Inc 1968, USA.