

کنترل موتور القایی سرعت متغیر تغذیه شده با اینورتر نوع جریان اجباری

بهزاد میرزائیان دهکردی
دانشجوی کارشناسی ارشد

جعفر سلطانی
استادیار

دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی اصفهان

چکیده

موتورهای القایی تغذیه شده با اینورترهای فرکانس متغیر بطور وسیعی در صنعت بکار می‌روند. از میان انواع مختلف آن، درایو القایی تغذیه شده با اینورتر نوع جریان اجباری بخش عمده‌ای از این کاربردها را بخصوص در رنج توانهای بالا بخود اختصاص داده است. مقاله حاضر مشخصه‌های دینامیکی یک موتور القایی تغذیه شده با اینورتر جریان اجباری، که در آن خروجی اینورتر امواج شبه مربعی شش پالسه ایده‌آل فرض شده را بطور تحریک مورد مطالعه قرار داده است. مطالعه فوق بر اساس تئوری معادلات دو محوری پارک بوده و برای هر تعداد دلخواه از هارمونیکهای موجود در شکل موج جریانهای تغذیه کننده موتور برای دو حالت حلقه باز و حلقه بسته سیستم، شبیه‌سازی کامپیوتری انجام شده است. کنترل سرعت موتور در حالت سیستم مدار بسته با استفاده از جبران کننده‌های نوع PI و محدودکننده‌های سرعت با ثابت نگاه‌داشتن تقریبی دامنه فلوی مغناطیسی دوار فاصله هوایی بر روی مقدار نامی تحت کوپل بار ثابت انجام می‌پذیرد. در این راستا ضمن ارائه یک مثال، مشخصه‌های کاری درایو مورد بحث برای مدهای مختلف موتوری و ترمزی به نمایش گذاشته می‌شود. از نتایج کامپیوتری بدست آمده می‌توان تأثیرات هارمونیکهای مختلف جریانهای تغذیه کننده موتور را بر روی میزان ضربانهای کوپل تولیدی ملاحظه نمود.

Speed Control of Variable Speed Induction Motor Drives Supplied by CSI

Jafar Soltani
Assistant Prof.

B. M. Dehkordi
Graduate student

EE Dept. Isfahan univ. of Tech.

ABSTRACT

Induction motor drives supplied by square wave inverters are used in many areas of industry and between various types those are supplied by current source inverters are important. That is because, these drive systems have been used in high ranges of speed and power.

The present paper describes the dynamical performance of the above mentioned systems when the output of inverter is assumed to be the ideal quasi-square waveforms.

This study is based on the Fourier - Series of the inverter output currents and use the machine

two axis frame theory in order to simulate the drive system on the computer.

Using the P.I controllers and related limiters, the speed of motor is controlled under the condition of constant motor torque shaft and constant and approximately constant amplitude of airgap flux density. For a given example, the computer results relating to motoring and regenerative braking modes of operation are demonstrated. From these results, the effects of motor current harmonics on torque pulsation and machine extra losses can be investigated.

۱- مقدمه

تاکنون تحقیقات زیادی در خصوص درایوهای القایی تغذیه شده با اینورترهای فرکانس متغیر انجام شده است که برای نمونه می توان به [۲] و [۳] که در آنها مشخصه های کاری اینگونه درایوها وقتی که با اینورترهای جریان و ولتاژ اجباری و نیز در [۴] برای حالتی که با اینورتر نوع مدولاسیون پهنای باند تغذیه می گردند اشاره نمود. یکی از جدیدترین کارها در این زمینه را می توان در [۶] جستجو نمود. این مقاله مشخصه های کار دینامیکی یک موتور القایی، وقتی که موتور با منابع جریان ایده آل مربعی شش پالس تغذیه می گردد را مورد مطالعه قرار داده است. اساس مطالعه در مقاله مزبور متکی به روش حاصلضرب اپراتور S در تبدیل لاپلاس یک تابع [۵] بوده و آن بدین ترتیب است که ابتدا از روی مقادیر لحظه ای جریانهای موتور مؤلفه های فضائی دوار ۰ - ۲ - ۱ مربوط به این جریانها به دست آورده می شوند. سپس با متد ارائه شده، پاسخ های زمانی ولتاژ فازها، جریان مغناطیس کننده موتور و جریان خازن واقع در هر فاز محاسبه می گردند. از نواقص این روش می توان به :

الف- عدم توانایی روش در تعیین اثرات تک تک

هارمونیکهای زمانی بر روی میزان ضربهای کوپل و

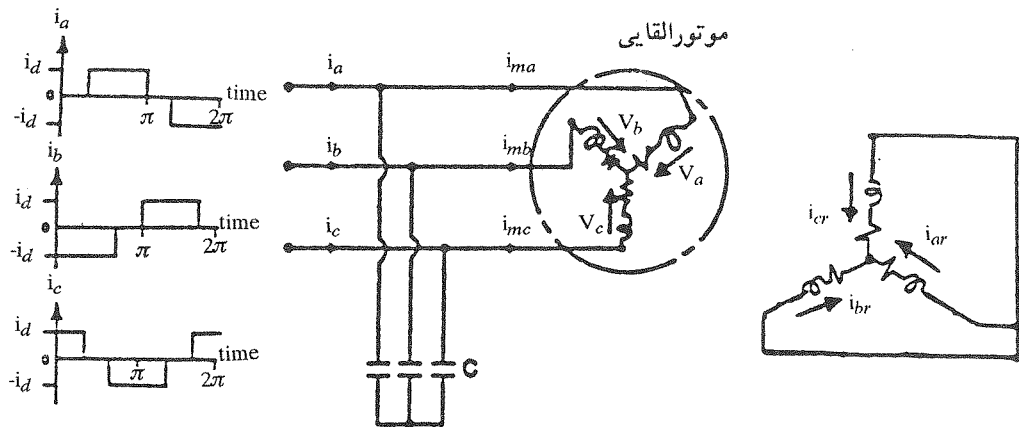
ب- عدم پرداختن به کنترل سرعت مدار بسته سیستم اشاره نمود.

این مقاله مشخصه های کاری دینامیکی درایو معرفی شده در [۶] را برای هر تعداد دلخواه از هارمونیکهای موجود در جریانهای تغذیه کننده موتور با استفاده از معادلات دوار دو محوری پارک مورد مطالعه قرار می دهد. مطالعه مزبور تحت شرایط کوپل بار ثابت همراه با ثابت نگاه داشتن تقریبی نسبت ولتاژ به فرکانس تغذیه موتور بوده و برای دو حالت مدار بسته و باز سیستم انجام شده است. لازم به ذکر است که در شبیه سازی کامپیوتری از اثرات اشباع مغناطیسی و نیز تغییرات پارامترهای الکتریکی موتور با درجه حرارت و فرکانس صرف نظر شده است.

۲- تئوری مقاله

با توجه به شکل (۱) جریانهای تغذیه موتور یعنی i_a , i_b , i_c را می توان بر حسب سری فوریه به صورت زیر بیان نمود.

$$i_a = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \left[(\cos(\omega t) - \frac{1}{5} \cos(5\omega t) + \frac{1}{7} \cos(7\omega t) - \dots) \right] \quad (1)$$



شکل (۱)

با توجه به روابط بیان شده می توان فرم کلی معادلات حالت سیستم را بصورت:

$$X' = AX + Bu \quad (11)$$

بدست آورد. در رابطه (11)، ماتریسهای X و A و Bu بقرار زیر محاسبه شده اند:

$$X = [i_{mq_s} \ i_{md_s} \ i_{qr} \ i_{dr} \ q_d \ q_d]^T \quad (12)$$

$$A_I = \begin{bmatrix} L_m + L_{Ls} & 0 & L_m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_m + L_{Ls} & 0 & L_m & 0 & 0 \\ L_m & 0 & L_m + L_{Lr} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_m + L_{Lr} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$B_I = \begin{bmatrix} -R_s & -\omega(L_{Ls} + L_m) & 0 \\ \omega(L_{Ls} + L_m) & -R_s & \omega L_m \\ 0 & (-\omega + \omega_r)L_m & -R_r \\ (\omega - \omega_r)L_m & 0 & (\omega - \omega_r)(L_{Lr} + L_m) \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} -\omega L_m & \frac{1}{C} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{C} \\ -(\omega - \omega_r)(L_{Lr} + L_m) & 0 & 0 \\ -R_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\omega \\ 0 & \omega & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$Bu_I = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ i_{qs} \ i_{ds}]^T \quad (15)$$

$$A = A_I^{-1} \cdot B_I, \quad Bu = A_I^{-1} \cdot Bu_I \quad (16)$$

در ضمن بر اساس معادلات دو محوری بدست آمده مدل های مداری سیستم را برای محورهای q_s و d_s می توان بصورت شکل (2) نمایش داد.

از طرفی معادله مکانیکی موتور [7] عبارتست از:

$$T_e - T_l = \frac{2}{P} [J \frac{d\omega_r}{dt} + B'\omega_r] \quad (17)$$

$$i_b = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d [\cos(\omega t - 120^\circ) - \frac{1}{5} \cos(5\omega t + 120^\circ) + \frac{1}{7} \cos(7\omega t + 120^\circ) - \dots] \quad (2)$$

$$i_c = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d [\cos(\omega t + 120^\circ) - \frac{1}{5} \cos(5\omega t - 120^\circ) + \frac{1}{7} \cos(7\omega t + 120^\circ) + \dots] \quad (3)$$

حال با استفاده از ماتریس انتقال [7] جریانهای لحظه ای موتور به محورهای چرخان با سرعت سنکرونی ω انتقال داده می شوند، بطوری که مؤلفه های دو محوری qs و ds حاصل به صورت روابط زیر می باشند.

$$i_{qs} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d [1 - \frac{2}{35} \cos(6\omega t) - \frac{1}{143} \cos(12\omega t) - \dots] \quad (4)$$

$$i_{ds} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d [\frac{2}{35} \sin(6\omega t) - \frac{24}{143} \sin(12\omega t) - \dots] \quad (5)$$

پس از نوشتن معادلات سه محوری برای سیستم نشان داده شده در شکل (1) بصورت زیر:

$$[i(abc)_s] = \frac{d}{dt} [q(abc)] + [i_m(abc)] \quad (6)$$

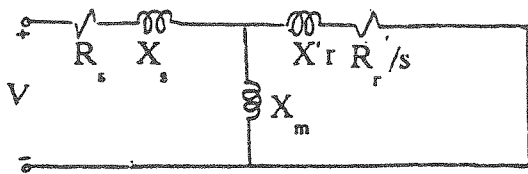
$$\begin{bmatrix} V(abc)_s \\ \dots \\ V(abc)_r=0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i(abc)_s \\ \dots \\ i(abc)_r \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda(abc)_s \\ \dots \\ \lambda(abc)_r \end{bmatrix} \quad (7)$$

و با انتقال معادلات (6) و (7) بر روی محورهای چرخان با سرعت سنکرونی ω داریم:

$$i_{qds} = \frac{d}{dt} [q_{qd}] + \omega [q_d - q_q]^T + [i_{mqd}] \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} V_{qds} \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qds} \\ \dots \\ i_{qdr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_{qda} \\ \dots \\ \lambda_{qdr} \end{bmatrix} + \omega [\lambda_{dqs} \ \lambda_{dqs}]^T \quad (9)$$

$$q_q = C \frac{dV_{qs}}{dt}, \quad q_d = C \frac{dV_{ds}}{dt} \quad (10)$$



شکل (۳) مدل موتور در حالت مانا

کننده موتور را بر روی مقدار نامی ثابت فرض نمود. با توجه به شکل (۳) داریم:

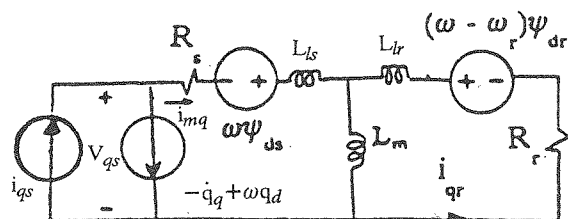
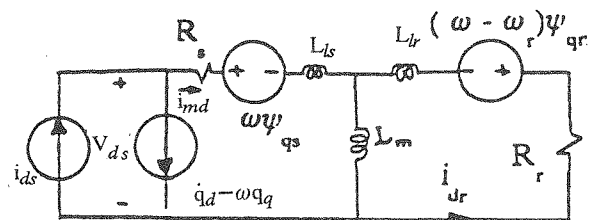
$$|I_s| = [I_m^2 \frac{(R'_r/s)^2 + X'^2_r}{(R'_r/s)^2 + (X_m + X'_r)^2}]^{1/2} \quad (19)$$

از رابطه (۱۹) استفاده کرده و برای مقادیر مختلف سرعت لغزشی (ω_{SL}) به ازاء جریان نامی مغناطیس کننده موتور تحت کوپل بار ثابت، مقادیر مختلف I_s را بدست می آوریم. I_s مقدار مؤثر هارمونیک اول شکل موج مربعی شکل تغذیه کننده موتور می باشد که از رابطه زیر بدست می آید:

$$I_s = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d \quad (20)$$

که در آن I_d ، دامنه موج مربعی شکل جریان می باشد. پس از بدست آوردن مقادیر مختلف I_d در تابعی از ω_{SL} منحنی تغییرات این دو متغیر را نسبت به یکدیگر رسم می کنیم. این منحنی در مدار کنترل شکل (۶) که با بلوک کنترل فلو مشخص شده است، استفاده می گردد. در این بلوک I_d طوری کنترل می گردد که موتور در حالت دینامیکی، تقریباً تحت فلو ی ثابت کار کند. لازم به تذکر است که از اثرات سایر هارمونیک ها در مقدار جریان مغناطیس کننده موتور به علت ناچیز بودن صرف نظر شده است.

با توجه به شکل (۶)، ملاحظه می شود که سیگنال خطای سرعت پس از عبور از یک کنترل کننده PI با تابع تبدیل $(K_I + K_I/s)$ وارد یک محدود کننده سرعت می گردد. خروجی محدود کننده سرعت سیگنال ω_{SL} بوده که از آن در بلوک کنترل فلو استفاده شده و از طرفی با جمع این سیگنال با سیگنال سرعت نمونه برداری شده از خروجی موتور، سرعت سنکرونی بدست می آید که توسط آن فرکانس تغذیه موتور تعیین می گردد. اگر سیگنال خطای سرعت مثبت باشد درایو در حالت موتوری شتاب گرفته تا خود را به سرعت انتخاب شده (ω_m^*) برساند و زمانی که این خطا منفی باشد درایو در حالت



شکل (۲) مدل سیستم برای محورهای d و q

که در آن کوپل تولیدی عبارتست از:

$$T_e = \frac{-3}{P} [\lambda_{qr} i_{mds} - \lambda_{dr} i_{mqs}] \quad (18)$$

در این روابط، P تعداد قطبها، J ممان اینرسی و B' ثابت اصطکاک محور موتور می باشد براساس معادلات (۱۱) و (۱۷) یک برنامه کامپیوتری با فلوچارت نشان داده شده در شکل (۴)، نوشته شده است. نتایج کامپیوتری این برنامه برای موتور القایی با مشخصات داده شده در جدول (۱) طی سری شکلهای (۵) نمایش داده شده اند.

۲-۱- بررسی مشخصه های کاری درایو در حالت کنترل سرعت مدار بسقه

روش کنترل دور موتورهای القایی تغذیه شده با اینورترها [۸]، (به عنوان مثال CSI یا VSI) بدین نحو است که تا سرعت های کمتر از سرعت پایه، کنترل دور موتور تحت کوپل بار ثابت همراه با ثابت نگاه داشتن تقریبی، نسبت ولتاژ به فرکانس تغذیه موتور انجام می گیرد. برای سرعت های بالاتر از سرعت پایه، موتور تحت عنوان بار ثابت طوری کنترل می شود که سرعت لغزشی تقریباً ثابت بماند و در ضمن ولتاژ ترمینال موتور همواره بر روی مقدار نامی تنظیم شده باشد.

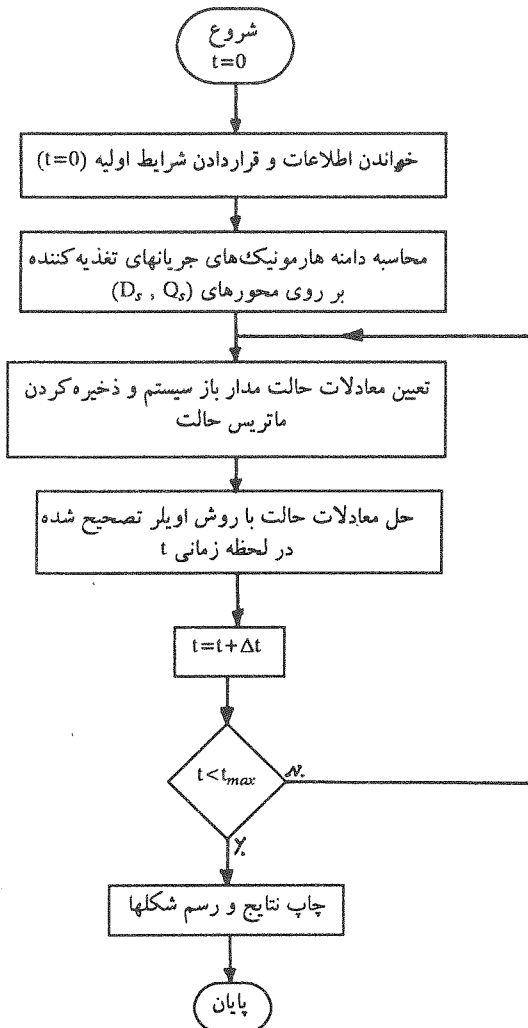
نظر به اینکه در فاصله تغییرات سرعت موتور از صفر تا پایه دامنه فلو مغناطیسی دوار در فاصله هوایی تقریباً ثابت نگاه داشته می شود، لذا می توان از اثرات تقریبی اشباع مدار مغناطیس ماشین صرف نظر نموده و در نتیجه جریان مغناطیس

ترمزی قرار گرفته و با تولید کوپل منفی از سرعتش کاسته شده تا به سرعت انتخاب شده (ω_m^*) برسد. در هر دو حالت کار موتور و ترمزی درایو در سرعت‌های بین صفر و سرعت پایه بدلیل ثابت بودن تقریبی دامنه فلو، حالت دینامیکی سیستم تحت ماکزیمم گشتاور تولیدی انجام می‌شود. روش انتخاب ضرایب K_1 و K_2 در این مقاله بر اساس روش سعی و خطا بوده و این بدان دلیل است که معمولاً در درایوهای AC به خاطر غیرخطی بودن سیستم به خصوص اینورتر تغذیه کننده موتور نمی‌توان از روش‌های متداول خطی سازی استفاده نمود. استثنائاً برای کار ارائه شده در این مقاله می‌توان ضرایب مذکور را از تابع تبدیل $H(s)$ بدست آمده در [۶] بطور دقیق تعیین نمود بطوری که قطبهای تابع سیستم مدار بسته در سمت چپ محور انگاری قرار گیرند.

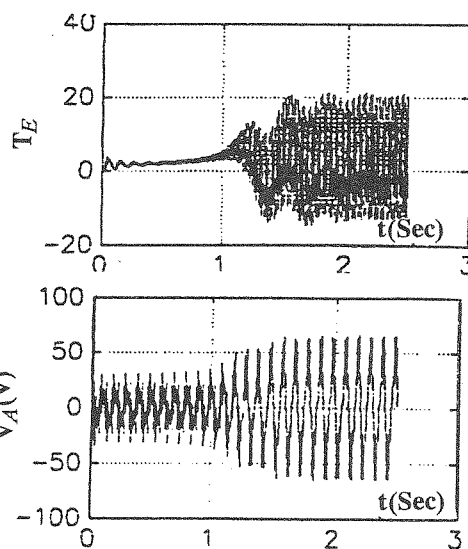
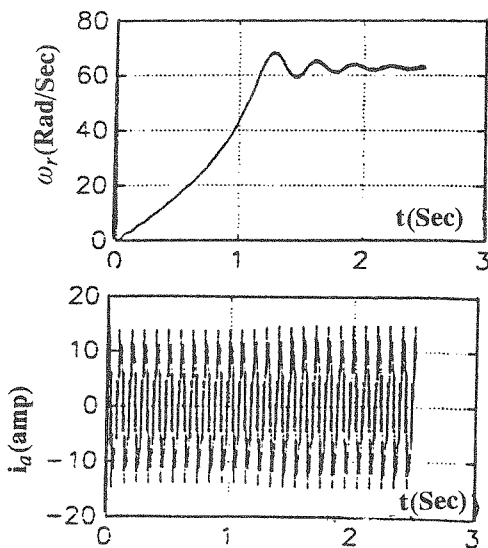
برای موتور داده شده در جدول (۱)، در حالت کنترل مدار بسته شبیه‌سازی کامپیوتری (با تکمیل برنامه کامپیوتری مربوط به فلوچارت شکل (۴)) انجام شده و با روش سعی و خطا مقادیر، $K_1 = 2$ ، $K_2 = 0.1$ تعیین گردیده‌اند. نتایج شبیه‌سازی فوق برای چند سرعت انتخابی (ω_m^*) در شکل‌های (۷) آمده است.

جدول (۱)

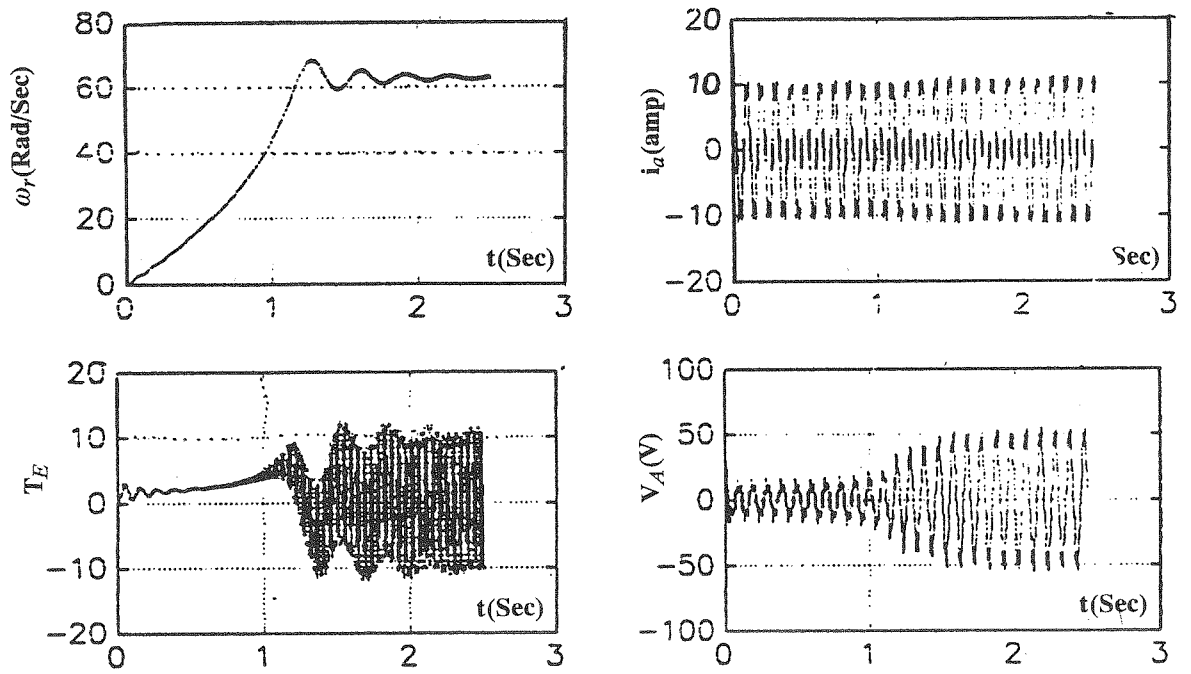
$X_{Ls} = 0.0314$ p.u	$V_{base} = 132.79$ Volt
$X_m = 0.8814$ p.u	$I_{dbase} = 9.36$ Amp
$X_{Lr} = 0.0314$ p.u	$Z_{base} = 14.8$ Ohm
$R_r = 0.024$ p.u	$f = 30$ HZ
$P = 4$	$J = 0.12$ (N-Sec ² /Rad)



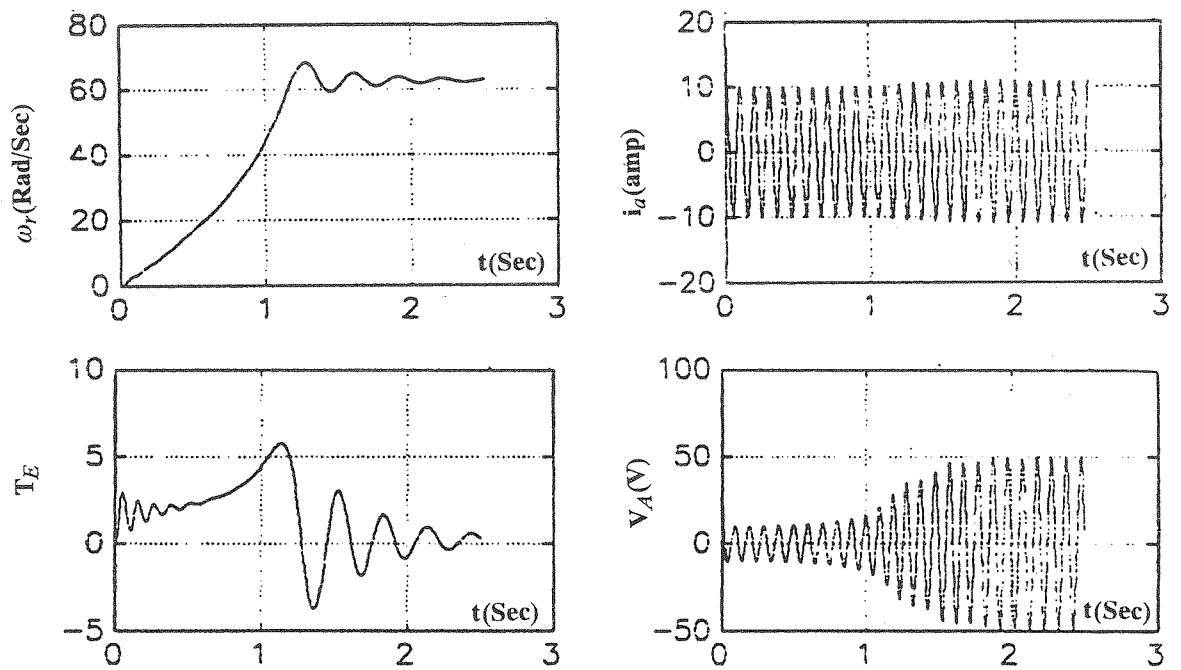
شکل (۴) فلوچارت برنامه کامپیوتری



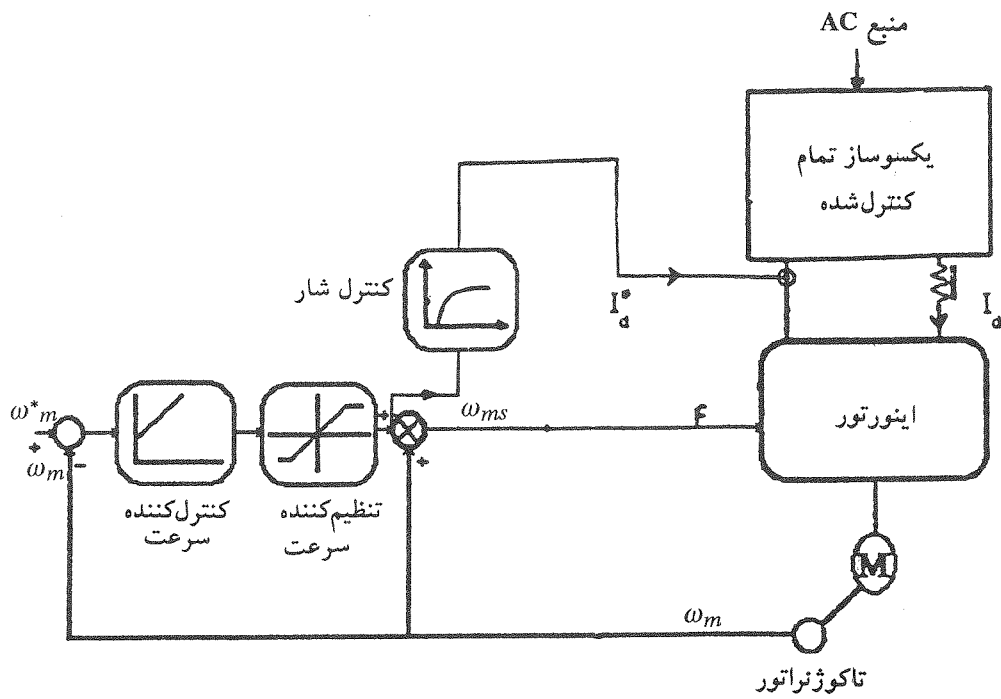
شکل (۵-۱) با در نظر گرفتن تأثیرات تا یازدهمین هارمونیک موجود در جریانهای تغذیه کننده موتور ($h=11$)



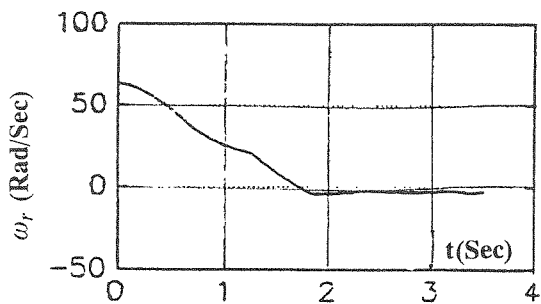
شکل (۵-۲) با در نظر گرفتن تأثیر هارمونیکهای اول و پنجم در جریانهای تغذیه کننده موتور ($h=5, h=1$)



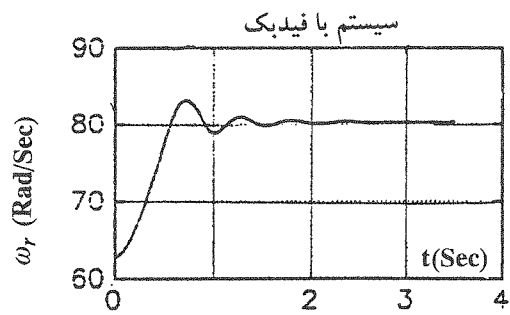
شکل (۵-۳) با در نظر گرفتن تأثیر هارمونیک اصلی در جریانهای تغذیه کننده موتور ($h=1$)



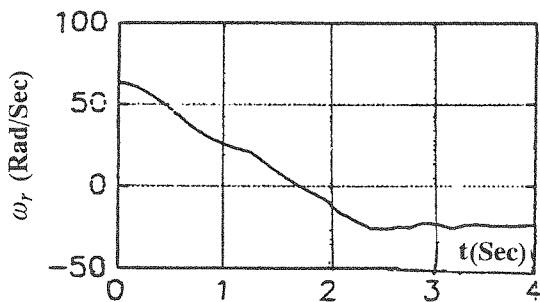
شکل (۶) بلوک دیاگرام مدار بسته سیستم



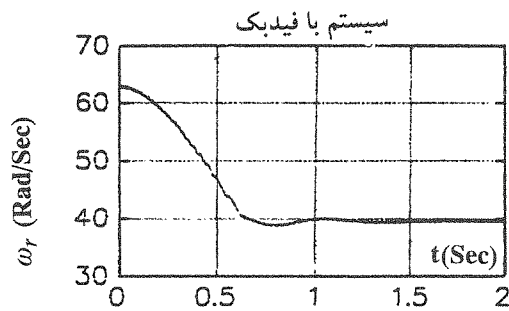
شکل (۳-۷) $\omega_r = 60 \text{ Rad/s}$ سرعت اولیه
 $\omega_m^* = 0 \text{ Rad/s}$ سرعت انتخاب شده



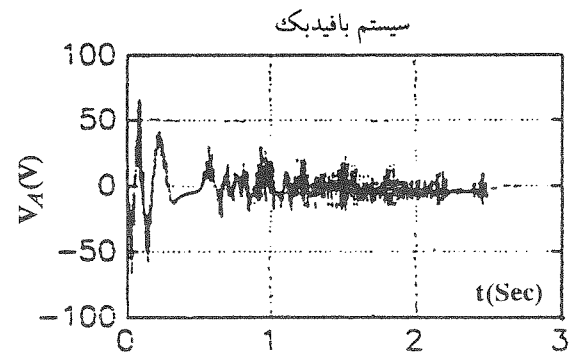
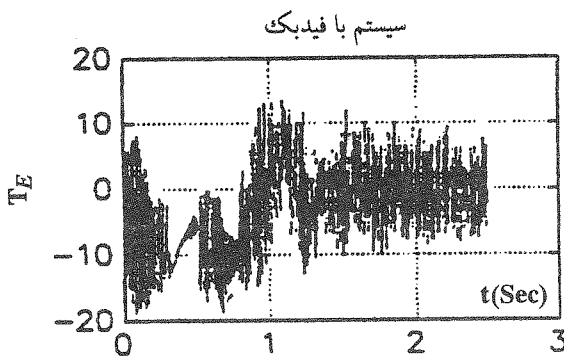
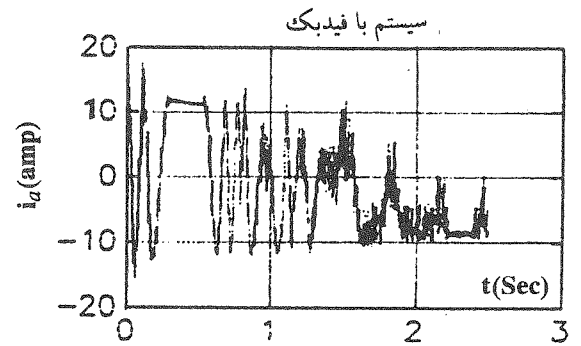
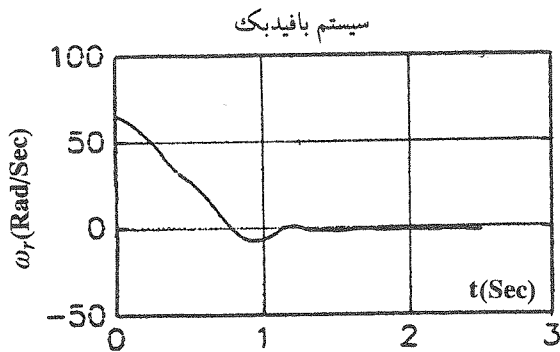
شکل (۱-۷) سیستم با فیدبک
 $\omega_r = 60 \text{ Rad/s}$ سرعت اولیه
 $\omega_m^* = 80 \text{ Rad/s}$ سرعت انتخاب شده



شکل (۴-۷) $\omega_r = 60 \text{ Rad/s}$ سرعت اولیه
 $\omega_m^* = -20 \text{ Rad/s}$ سرعت انتخاب شده



شکل (۲-۷) سیستم با فیدبک
 $\omega_r = 60 \text{ Rad/s}$ سرعت اولیه
 $\omega_m^* = 40 \text{ Rad/s}$ سرعت انتخاب شده



شکل (۵-۷) $\omega_r = 60 \text{ Rad/s}$: سرعت اولیه $\omega_m^* = 0 \text{ Rad/s}$: سرعت انتخاب شده

۲- با انتخاب مناسب مقدار راکتانس خازن‌ها در مقایسه با راکتانس مغناطیس‌کننده موتور می‌توان بنحو قابل توجهی دامنه هارمونیک‌های ۵ و ۷ و بالاتر از آن را در شکل موج جریان موتور کاهش داد و بدین‌وسیله ضربانهای کوپل را پایین آورد.

۳- نرم‌افزار تهیه شده در این مقاله می‌تواند بطور مؤثری در طراحی سطح کنترلرها در مدار فیدبک درایو مورد استفاده قرارگیرد و نیز بخاطر ماهیت غیرخطی بودن سیستم در تعیین ضرایب مربوط به این بلوکها نظیر بلوکهای PI مورد استفاده قرارگیرد.

۳- نتیجه‌گیری

۱- اولاً بخاطر اینکه در این نوع درایو از خازنهای موازی در سر ترمینالهای ماشین استفاده شده است، لذا آنها را نمی‌توان با حضور منابع تغذیه جریان اجباری شبه مربعی شکل، دیگر بارهای مستقل قلمداد نمود و از اینرو در اثر حضور این خازن‌ها شکل‌های جریان و ولتاژ هر فاز موتور به شدت تحت تأثیر قرار گرفته بطوری که از میزان پرش در شکل موج ولتاژ هر فاز ماشین کاسته می‌شود. ثانیاً شکل موج جریان هر فاز آن متمایل به یک شکل موج هارمونیک می‌گردد.

مراجع

[1] HSU, J.S, Amin, A.m.a. "Torque Calculations of Current Source Induction Machines Using the 1-2-0 Coordinate System". IEEE Transactions on Industrial Electronics. Vol 37, No. 1, Feb. 1990 pp. 34-40.

[2] Lienau, W. "Commutation Modes of A Current Source Inverter". Proc. of 2nd IFAC Symposium on Control in Power Electronics and Electrical Drives, pergamon press, 1977, pp. 219-229.

[3] Lipo, T.A. , "Analysis and Control of Torque

- Pulsations in Current Fed Induction Motor Drives". IEEE, Power Elec. Spec. Conf, 1978, p.p. 89-96.*
- [4] Bowes, S.R. Bullough, R.I. "Optimal P.W.M Microprocessor Controlled Current Source Inverter Drives". *IEEE Proc, Vol. 135, Pt. B, No. 2, March. 1988, pp. 59-75.*
- [5] Pipes, Louis A. "Applied Mathematics for Engineers and Physics", Second Edition, New York. Mc Graw Hill Company, Inc. 1958, "Book".
- [6] John S.HSU(Htsue). "Capacitor Effects on Induction Motors Fed by Quasi Rectangular Current Sources". *IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 7, No. 3, Sep. 1992, pp. 509-516.*
- [7] "Analysis of Electric Machinery" By: Paul c. Krause, "Book".
- [8] B.K. Bose, "Power Electronics and AC Drives", Book By Prentice - Hall, 1986.
- [9] "Power - Semiconductor Drives", Book By : Eopal K. Dubey.