

## کنترل برداری موتور القائی با استفاده از روش مدولاسیون بردار فضائی با اینورتر منبع جریان

غلامرضا عرب مارکده<sup>(۱)</sup> - فروغ تاکی<sup>(۲)</sup> - سعید اباذری<sup>(۱)</sup>

(۱) دانشکده فنی دانشگاه شهرکرد

(۲) دانشگاه آزاد اسلامی واحد مجلسی

**خلاصه:** از آنجائی که گشتاور یک ماشین القائی توسط جریان ماشین و شار فاصله هوایی تعیین می‌گردد، کنترل مستقیم جریان به جای ولتاژ بسیار مناسب به نظر می‌رسد. همچنین مدولاسیون بردار فضائی (SVM) روش برتری برای اینورترهای منبع جریان از نظر کاهش هارمونیک‌های مرتبه پایین، فرکانس کلیدزنی پایین تر و پیاده سازی آسان تر می‌باشد. این مقاله به معرفی مدولاسیون بردار فضائی برای اینورتر منبع جریان می‌پردازد. سپس با کنترل برداری ماشین القائی تغذیه شده با اینورتر منبع جریان، نتایجی ارائه می‌کند که برتری مدولاسیون SVM را از جهت پاسخ دینامیکی سریع و کنترل ساده تر گشتاور به اثبات می‌رساند.

**کلمات کلیدی:** اینورتر منبع جریان، کنترل برداری، مدولاسیون بردار فضائی.

### ۱- مقدمه

پهنای پالس سینوسی، دوزنقه‌ای، پله‌ای، حذف هارمونیک‌های انتخابی و ... مدولاسیون بردار فضائی<sup>۱</sup> در کاهش هارمونیک‌های مرتبه پایین موثرتر است [۴]. از مزایای روش مدولاسیون بردار فضائی می‌توان به پیاده‌سازی دیجیتال آسان، استفاده بهتر از جریان لینک dc نسبت به مدولاسیون پهنای پالس سینوسی و همچنین ریبیل گشتاور کمتر اشاره نمود. همچنین دارای این خصوصیت ممتاز نسبت به مدولاسیون SPWM است که با فرکانس کلیدزنی حدود  $\frac{2}{3}$  می‌توان به ریبیل گشتاور مشابه آن تکنیک دست یافت.

با ارزیابی کنترل برداری موتور القائی مبتنی بر اینورتر منبع جریان، روش مدولاسیون SVM برای آن برگزیده شد تا محاسن عمده آن طی عملکرد موتور در شرایط مختلف به اثبات رسد.

### ۲- مدل سازی موتور القائی

برای کنترل درایو ماشین‌های الکتریکی جریان متناوب لازم است که عملکرد دینامیکی ماشین مورد بررسی قرار گیرد. به منظور سادگی روابط و روش مدل سازی از مدل دینامیکی ماشین در دستگاه‌های مرجع استفاده می‌شود. بر این اساس متغیرهای ولتاژ، جریان و شار سه فاز استاتور به صورت زیر به دستگاه مرجع ساکن برده می‌شوند:

امروزه به دلیل وجود معایب و مشکلاتی در روش کنترل اسکالر، از روش‌های کنترل برداری به علت عملکرد مطلوب آن‌ها در سطح گسترده‌ای استفاده می‌شود. از طرفی گسترش کاربرد الکترونیک قدرت کنترل سرعت موتورهای القائی را با استفاده از کنترل برداری با هزینه معقول امکان‌پذیر ساخته است [۱]. کنترل برداری یا کنترل با جهت یابی شار روتور امکان کنترل موتور القائی به طور مشابه با یک موتور جریان دائم با تحریک مستقل را فراهم می‌سازد [۲].

تغذیه موتورهای القائی با اینورتر منبع جریان، در کاربردهای ولتاژ متوسط و توان بالا در حال توسعه روز افزون است. اینورتر منبع جریان (CSI) در مقایسه با اینورتر منبع ولتاژ (VSI)، از توپولوژی ساده‌تر، امنیت بیشتر از لحاظ اتصال کوتاه و  $dV/dt$  کمتری برخوردار است. نسل جدید اینورترهای منبع جریان توان بالا به منظور ارتقای دینامیک و امنیت سیستم درایو با کنترل مستقل شار و گشتاور توسط روش‌های کنترل برداری، به سرعت در حال رشدند [۳].

از سوی دیگر پیشرفت سریع قابلیت‌های کلیدزنی قطعات نیمه‌هادی قدرت به شیوه‌های مدولاسیون ساده‌تر، دقیق‌تر و سریع‌تری نیازمند است. در میان روش‌های مختلف مدولاسیون از قبیل مدولاسیون

دینامیکی سرعت ماشین نیز بر حسب گشتاور تولیدی به صورت زیر قابل بیان است:

$$\dot{\omega}_r = \frac{1}{J} (T_e - T_L) \quad (۴)$$

که  $J$  ممان اینرسی و  $p$  تعداد قطب ماشین است. بر این اساس گشتاور تولیدی موتور عبارت است از:

$$T_e = \frac{3 P L_m}{2 L_r} (\lambda_{ar} i_{\beta s} - \lambda_{\beta r} i_{as}) \quad (۵)$$

### ۳- کنترل برداری در راستای شار روتور با CSI

بلوک دیاگرام شکل ۱، درایو یک موتور القایی با سرعت متغیر با کنترل میدان گردان را نمایش می‌دهد. موتور القایی توسط اینورتر منبع جریان با مدولاسیون بردار فضایی تغذیه می‌گردد. سرعت موتور ( $\omega_r$ ) با سرعت مرجع ( $\omega_r^*$ ) مقایسه و تفاوت آن‌ها توسط یک کنترل کننده PI به گشتاور مرجع تبدیل می‌شود. جریان مرجع  $i_{qs}^*$  استاتور از گشتاور مرجع با رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$i_{qs}^* = \frac{2 L_r T_e^*}{3 P L_m |\Psi_r|_{est}} \quad (۶)$$

شار پیوندی تخمینی روتور است و داریم

$$|\Psi_r|_{est} = \frac{L_m i_{ds}}{1 + \tau_r s} \quad (۷)$$

$$\begin{bmatrix} f_{as} \\ f_{\beta s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2/3 & -1/3 & -1/3 \\ 0 & \sqrt{3}/3 & -\sqrt{3}/3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{as} \\ f_{bs} \\ f_{cs} \end{bmatrix} \quad (۱)$$

که  $f_a$ ،  $f_b$  و  $f_c$  متغیرهای سه فاز  $a$ ،  $b$  و  $c$  بوده و  $f_{\alpha}$  و  $f_{\beta}$  متغیرها در دستگاه مرجع ساکن می‌باشند.

تبدیل متغیرها از دستگاه مرجع گردان روتور به مختصات ساکن به صورت زیر است:

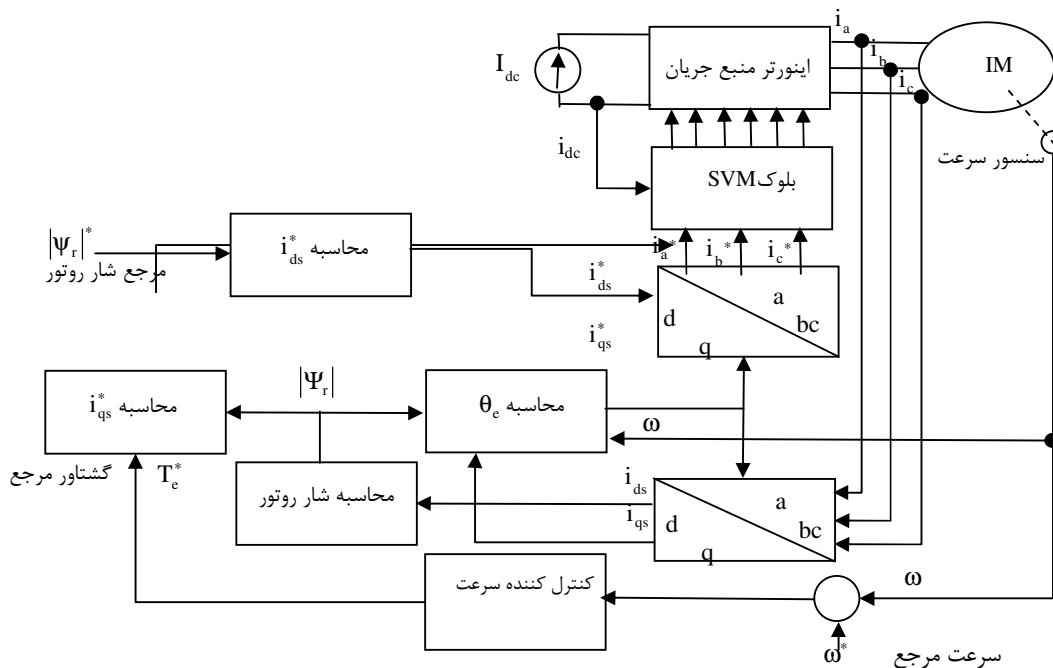
$$\begin{bmatrix} f_{\alpha} \\ f_{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_e & -\sin \theta_e \\ \sin \theta_e & \cos \theta_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} \quad (۲)$$

که  $\theta_e$  موقعیت شار روتور است [۵].

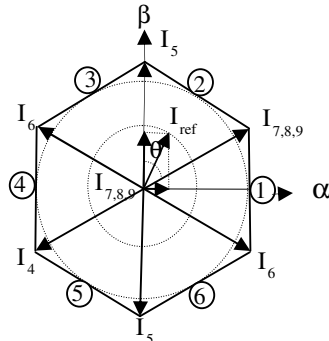
به دلیل استفاده از اینورتر منبع جریان، معادلات توصیف کننده عملکرد ماشین بر اساس جریان استاتور و شار روتور در مرجع مختصات ساکن نوشته می‌شوند:

$$\begin{bmatrix} \dot{\lambda}_{ar} \\ \dot{\lambda}_{\beta r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1/\tau_r & -\omega_r \\ \omega_r & -1/\tau_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_{ar} \\ \lambda_{\beta r} \end{bmatrix} + \frac{M}{\tau_r} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{\beta s} \end{bmatrix} \quad (۳)$$

که  $\lambda_{ar}$ ،  $\lambda_{\beta r}$  و  $i_{as}$  و  $i_{\beta s}$  به ترتیب مؤلفه‌های بردار فضایی شار روتور و جریان استاتور در دستگاه مرجع ساکن می‌باشند و  $\tau_r = L_r / R_r$  ثابت زمانی روتور،  $M = L_m$  اندوکتانس متقابل،  $L_r$  اندوکتانس روتور و  $\omega_r$  سرعت الکتریکی روتور است. همچنین معادله



شکل (۱): بلوک دیاگرام کنترل برداری موتور القایی با اینورتر منبع جریان



شکل (۳): سکتورهای بردار فضایی جریان

بردار صفر به معنای این است که هر دو سوئیچ بالا و پایین از یک بازو در حالت روشن قرار دارند [۷]. بردارهای جریان در شکل ۳ نمایش داده شده است [۸].

کارکرد اصلی بلوک SVM تولید پالس‌های ۶ سوئیچ اینورتر CSI به منظور تولید جریان فاز مطلوب است. از روی محتوی dq جریان  $i_{ref}$  و زاویه  $\alpha$  به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$|i_{ref}| = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \quad (11)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{i_q}{i_d} \right) \quad (12)$$

مدت زمانی که باید هر یک از بردارهای فعال در یک پریود کلیدزنی اعمال شوند از حل دو معادله جبری خطی بدست می‌آید. به عنوان مثال با فرض اینکه  $i_{ref}$  در سکتور دوم باشد با اعمال دو بردار  $I_1$  و  $I_2$  با نسبت وظیفه  $d_1$  و  $d_2$  بر روی کل دوره نمونه برداری  $\Delta T$  بردار  $i_{ref}$  ساخته می‌شود [۹]:

$$i_{an}^* = A_1 d_1 + A_2 d_2 \quad (13)$$

$$i_{bn}^* = A_3 d_1 + A_4 d_2$$

که  $A_1, A_2, A_3, A_4$  جریان لینک dc و مقدار آن می‌تواند بسته به وضعیت سوئیچ  $I$  یا  $-I$  باشد (جدول ۱).

جدول (۱): وضعیت و ترکیب سوئیچ‌های روشن اینورتر CSI با مدولاسیون SVM

وضعیت	سوئیچ‌های روشن	$i_{ia}$	$i_{ib}$	$i_{ic}$
۱	۱,۲	I	۰	-I
۲	۲,۳	۰	I	-I
۳	۳,۴	-I	I	۰
۴	۴,۵	-I	۰	I
۵	۵,۶	۰	-I	I
۶	۶,۱	I	-I	۰
۷	۱,۴	۰	۰	۰
۸	۳,۶	۰	۰	۰
۹	۵,۲	۰	۰	۰

جریان مرجع  $i_{ds}^*$  از ورودی مرجع شار روتور  $|\Psi_r|^*$  به قرار زیر تعیین می‌گردد:

$$i_{ds}^* = \frac{|\Psi_r|^*}{L_m} \quad (8)$$

موقعیت شار روتور مورد نیاز برای تبدیل مختصات و فرکانس لغزش  $\omega_{sl}$  به صورت زیر ساخته می‌شود:

$$\theta_e = \int (\omega_r + \omega_{sl}) dt \quad (9)$$

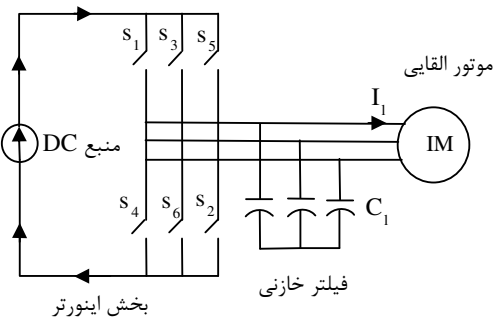
$$\omega_{sl} = \frac{L_m R_r}{|\Psi_r|_{est} L_r} i_{qs}^* \quad (10)$$

جریان‌های مرجع  $i_{qs}^*$  و  $i_{ds}^*$  به جریان‌های مرجع فاز  $i_a^*$  و  $i_b^*$  و  $i_c^*$  تبدیل شده و ورودی‌های بلوک SVM را می‌سازد.

نقش کنترل کننده سرعت برابر نگه داشتن سرعت موتور با سرعت مرجع ورودی در حالت دائمی و مهیا کردن دینامیک مناسب در حالت‌های گذراست [۶].

#### ۴- مدولاسیون بردار فضایی (SVM)

در شکل ۲، یک اینورتر منبع جریان سه فاز ۶ سوئیچ ترسیم شده است.



شکل (۲): اینورتر منبع جریان ۳ فاز با ۶ سوئیچ

در هر زمان دو سوئیچ در دو بازوی متفاوت (یکی از سوئیچ‌های بالای پل  $S_5, S_3, S_1$  و دیگری از سوئیچ‌های پایین پل  $S_6, S_4, S_2$ ) مجاز به هدایت هستند. همچنین بایستی یک مسیر جریان در CSI وجود داشته باشد، در غیر این صورت ولتاژ بزرگی در پایانه‌های باز القا و امکان آسیب سوئیچ‌ها وجود دارد. خازن‌های متصل به پایانه‌های ac اینورتر وظیفه جذب اضافه ولتاژهای ناشی از قطع جریان را بر عهده دارند. علاوه بر این مانند یک فیلتر عمل نموده و بنابراین جریان خروجی شکل موج سینوسی دارد.

CSI می‌تواند تنها ۶ بردار فضایی فعال و ۳ بردار صفر تولید کند.

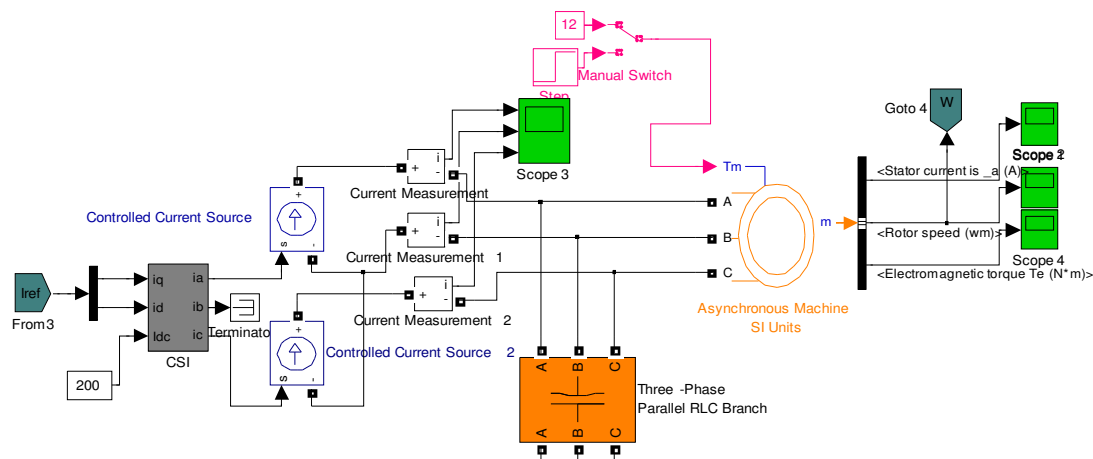
در شکل ۶، کنترل سرعت این موتور با تغییر سرعت مرجع از  $100 \text{ rad/sec}$  به  $120 \text{ rad/sec}$  در زمان  $t=0,3 \text{ sec}$  بررسی شده است. مشاهده می‌شود که پس از مدت زمان  $30 \text{ ms}$  سرعت موتور به مقدار مطلوب می‌رسد. نتایج شبیه‌سازی حاکی از عملکرد مطلوب کنترل کننده می‌باشد. در شکل ۷، عملکرد این مبدل با اعمال گشتاور بار پله‌ای در  $t=0$  با دامنه  $10 \text{ N.m}$  و پس از آن با گشتاور بار  $30 \text{ N.m}$  در  $t=0,3 \text{ sec}$  ترسیم شده است. مشاهده می‌شود که پس از اعمال بار  $30 \text{ N.m}$  موتور به اندازه  $30 \text{ rad/sec}$  از مقدار مرجع کمتر شده است و پس از گذشت  $0,15 \text{ sec}$  به مقدار مطلوب بازگشته است. پاسخ دینامیکی مبدل مورد نظر بسیار مناسب می‌باشد.

جدول (۲): پارامترهای موتور القایی

Poles	۴	$R_s$	$0.087 \Omega$
$R_r$	$0.228 \Omega$	$L_s$	$35.5 \text{ mH}$
$L_r$	$35.5 \text{ mH}$	$L_m$	$34.7 \text{ mH}$
$P_n$	$50 \text{ Hp}$	$f_n$	$50 \text{ Hz}$

## ۵- نتایج شبیه سازی

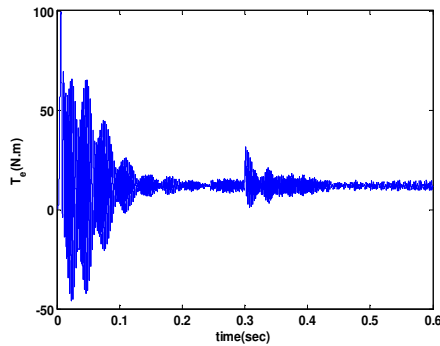
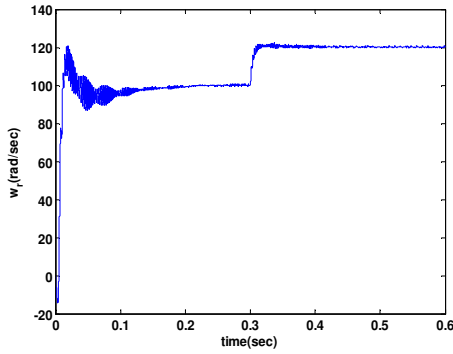
شکل ۴، بلوک دیاگرام کنترل برداری موتور القایی تغذیه شده با CSI با تکنیک کلیدزنی SVM در محیط MATLAB/SIMULINK را نشان می‌دهد. پارامترهای موتور مورد استفاده در جدول ۲ آمده است. فرکانس نمونه برداری نیز  $10 \text{ KHz}$  و اندازه خازن فیلتر  $C=100\mu\text{F}$  انتخاب شده است. در کنترل کننده PI بهره انتگرالی  $15$  و بهره تناسبی  $1$  انتخاب شده است. عملکرد کنترل سرعت موتور القایی سه فاز در شرایط گشتاور بار  $12 \text{ N.m}$  و با سرعت مرجع پله‌ای  $120 \text{ rad/sec}$  در شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به میزان بالادگی کمتر و زمان نشست اندک سرعت خروجی، عملکرد مناسب این کنترل کننده نسبت به دیگر کنترل کننده‌ها اعم از کنترل کننده مبتنی بر اینورتر منبع ولتاژ مشهود است [۱۰].



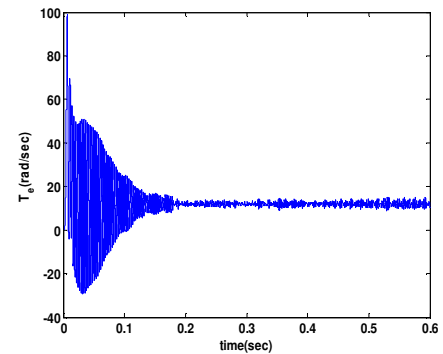
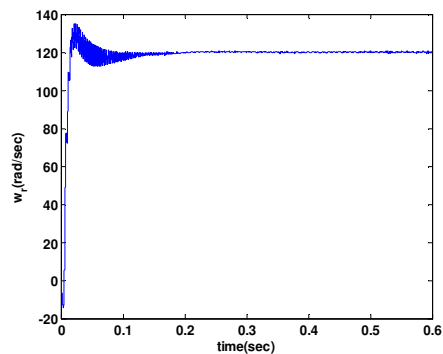
شکل (۴): بلوک دیاگرام کنترل برداری موتور القایی تغذیه شده با CSI با تکنیک کلیدزنی SVM

### ۶- نتیجه گیری

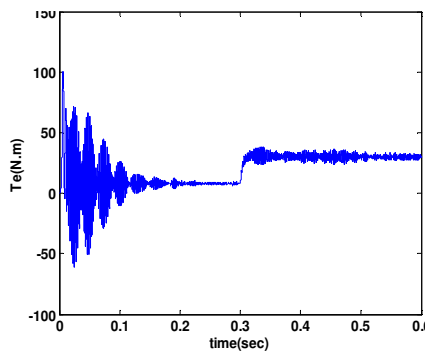
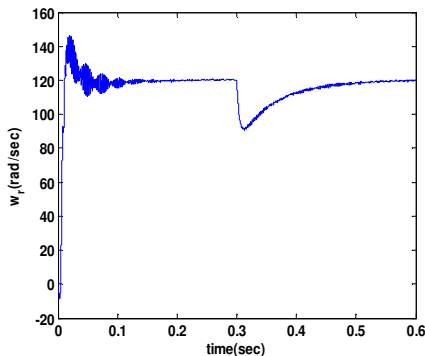
در این مقاله به منظور اثبات کنترل ساده‌تر گشتاور موتور القائی با اینورتر منبع جریان و برتری مدولاسیون بردار فضائی نسبت به مدولاسیون پهنای پالس سینوسی از نظر ریپل گشتاور کمتر، موارد مذکور مورد شبیه سازی قرار گرفت. نتایج خروجی پاسخ دینامیکی سریع در اثر روش SVM و خروجی مطلوب گشتاور و سرعت را نشان می‌دهد. پاسخ به تغییرات سرعت مرجع و گشتاور بار بسیار سریع و با دقت بالا برتری این روش را کاملاً اثبات می‌کند. همچنین پیاده سازی مدولاسیون بردار فضائی برای CSI به فرکانس کلیدزنی حدود  $\frac{2}{3}$  فرکانس کلیدزنی مدولاسیون PWM محتاج و قادر به کاهش فرکانس‌های مرتبه پایین است.



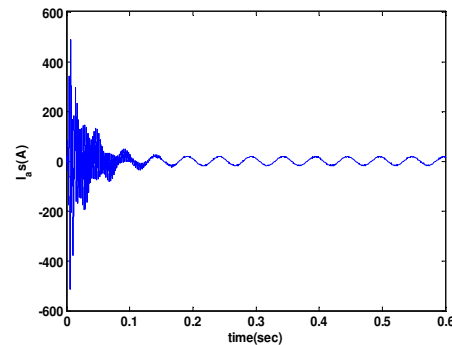
شکل (۶): سرعت روتور و گشتاور خروجی با تغییر سرعت مرجع از ۱۰۰ به ۱۲۰ rad/sec و گشتاور بار ثابت ۱۲ N.m



شکل (۵): سرعت روتور، گشتاور و جریان خروجی موتور با اعمال سرعت مرجع ۱۲۰ rad/sec و گشتاور بار ۱۲ N.m



شکل (۷): سرعت روتور و گشتاور خروجی با تغییر گشتاور بار از ۱۲ N.m به ۳۰ N.m با سرعت مرجع ثابت ۱۲۰ rad/sec



پی‌نوشت:

### 1- Space Vector Modulation

### مراجع

- [۱] شهرام رئیسی هارونی، صادق واعظ زاده، "کنترل برداری موتور القائی تکفاز"، سیزدهمین کنفرانس مهندسی برق ایران، ۱۳۸۴
- [۲] محمد ابراهیمی، "کنترل درایوهای الکتريکی (درایوهای dc و ac)"، اصفهان: جهاد دانشگاهی، واحد صنعتی اصفهان، مرکز انتشارات، ۱۳۸۱
- [3] A.M.Qiu, Y.W.Li, B.Wu, D.Xu, N.Zargari, Y.Liu, "High performance current source inverter fed induction motor drive with minimal harmonic distortion", IEEE/PESC, pp.79-85, Orlando, June 2007.
- [۴] محمد رضا علیزاده پهلوانی، عباس شولائی، "بهینه سازی الگوی کلید زنی مدولاسیون پهنای پالس فضای برداری در اینورترهای دو سطحی با توابع هدف مختلف"، بیست و دومین کنفرانس بین المللی برق، ۱۳۸۶
- [5] P.Vas, "Sensorless vector and direct torque", Oxford New York Tokyo, section 4, 1998.
- [6] P.Parthiban, Pramod, Agarwal, S.P.Srivastava, "A simplified space – vector modulated scheme for CSI fed IM drive", IEEE/PEDES, pp.1-6, New Delhi, Dec. 2006.
- [7] D.Lee, D.Kim, D.Chung, "Control of PWM current source inverter system for high performance induction motor drives", IEEE/IECON, Vol.2, pp.1100-1105, Aug.1996.
- [8] A.Bakhshai, J.Espinoza, G.Joos, H.Jin, "A combined artificial neural network and DSP approach to the implementation of space vector modulation techniques", IEEE/IAS, Vol.2, pp.934-940, San Diego, Oct. 1996.
- [9] C.L.Chen, C.Lee, R.Tu, J.K.Horng, "A novel simplified space-vector modulated control scheme for three-phase switch-mode rectifier", Proc. Power Electronics Specialists conf., pp.1358-1361, 1998.
- [۱۰] غلامرضا عرب مارکده، "طراحی و ساخت کنترل کننده تطبیقی مستقیم گشتاور و شار موتور القایی بدون حسگر سرعت با روش SVM"، رساله‌ی دکتری مهندسی برق، دانشگاه صنعتی اصفهان، مرداد ۱۳۸۴.

### رزومه



غلامرضا عرب مارکده در سال ۱۳۵۳ در شهرکرد متولد شده و دوره کارشناسی خود را در رشته مهندسی برق الکترونیک دانشگاه صنعتی اصفهان در سال ۱۳۷۵ دوره کارشناسی ارشد و دکتری را در همان دانشگاه به ترتیب در سالهای ۱۳۷۷ و ۱۳۸۴ اخذ نمود و در حال حاضر به عنوان استادیار دانشکده فنی دانشگاه شهرکرد مشغول به کار می‌باشد. زمینه تحقیقاتی ایشان درایوهای الکتريکی، الکترونیک صنعتی و سیستمهای کنترل غیر خطی می‌باشد.



فروغ تاکی در سال ۱۳۶۲ در شهرضا متولد شده و دوره کارشناسی خود را در رشته مهندسی برق الکترونیک دانشگاه یزد در سال ۱۳۸۵ و دوره کارشناسی ارشد را در دانشگاه شهرکرد در سال ۱۳۸۸ اخذ نمود و در حال حاضر به عنوان مربی در دانشگاه آزاد اسلامی واحد مجلسی مشغول به کار می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان درایوهای الکتريکی، پایداری سیستمهای قدرت و ادوات FACTS می‌باشد.



سعید ابادری دوره کارشناسی خود را در رشته مهندسی برق دانشگاه صنعتی اصفهان در سال ۱۳۶۹ دوره کارشناسی ارشد را در دانشگاه فردوسی مشهد و دکتری را در دانشگاه صنعتی شریف به ترتیب در سالهای ۱۳۷۲ و ۱۳۸۲ اخذ نمود و در حال حاضر به عنوان استادیار دانشکده فنی دانشگاه شهرکرد مشغول به کار می‌باشد. زمینه تحقیقاتی ایشان درایوهای الکتريکی، پایداری سیستمهای قدرت و ادوات FACTS می‌باشد.