

کنترل مستقیم شار و گشتاور یک موتور القایی شش فاز نامتقارن

داود قنبری^۱، دانشجوی کارشناسی ارشد، نویدرضا ابجدی^۲، استادیار، غلامرضا عرب مارکده^۳، استادیار، جعفرسلطانی^۴، استاد

^۱ دانشکده فنی مهندسی - دانشگاه شهرکرد-شهرکرد-ایران - ghanbari.64@gmail.com

^۲ دانشکده فنی مهندسی - دانشگاه شهرکرد-شهرکرد-ایران - navidabjadi@yahoo.com

^۳ دانشکده فنی مهندسی - دانشگاه شهرکرد-شهرکرد-ایران - arab-gh@eng.sku.ac.ir

^۴ دانشکده مهندسی برق - دانشگاه آزاد اسلامی - واحد خمینی شهر - خمینی شهر - ایران - j1234sm@cc.iut.ac.ir

استاد بازنشسته دانشگاه صنعتی اصفهان

چکیده: کنترل مستقیم شار و گشتاور^۱ موتور القایی یکی از روش‌های بسیار کارآمد در کنترل این ماشین الکتریکی می‌باشد. با استفاده از روش کنترل DTC محدودیت‌ها و پیچیدگی‌های کنترل برداری را می‌توان کاهش داد. در این مقاله الگوریتم کنترل مستقیم گشتاور موتور القایی شش فاز نامتقارن با استفاده از یک اینورتر منبع ولتاژ دوسطحی ارائه می‌شود. سیم پیچی استاتور یک موتور القایی شش فاز نامتقارن از دو مجموعه سیم پیچ سه فاز که نسبت به هم ۳۰ درجه اختلاف فاز دارند تشکیل شده است. ماشین بر اساس نظریه تجزیه بردار فضایی^۲ (VSD) مدل‌سازی شده است. با استفاده از انتخاب مناسب بردارهای کلیدزنی می‌توان به خوبی شار و گشتاور موتور را کنترل کرد. نتایج شبیه سازی این ادعا را اثبات می‌کند.

واژه‌های کلیدی: ماشین القایی شش فاز، کنترل مستقیم گشتاور، تجزیه بردار فضایی

Direct Flux and Torque Control of an Asymmetrical Six-phase Induction Motor

Davood Ghanbari, Navid Reza Abjadi, Gholamreza Arab Markadeh, Jafar Soltani

Abstract: Direct flux and torque control (DTC) of induction motor is one of the most effective methods in control of this electric machine. Using DTC the restrictions and complexities of vector control can be avoided. In this paper, the algorithm of direct torque control of an asymmetrical six-phase induction motor with a two-level voltage source inverter is presented. The stator winding of an asymmetrical six-phase induction motor consists of two three-phase winding sets which have 30 degrees phase displacement. The machine is modeled based on vector space decomposition (VSD) theory. Selecting suitable switching vectors the flux and torque of the motor are controlled properly. The simulation results prove this statement.

Keywords: Six-phase induction motor, direct torque control, vector space decomposition

تاریخ ارسال مقاله: ۹۰/۵/۲۵

تاریخ اصلاح مقاله: ۹۱/۴/۲۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۱/۷/۲۶

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر نویدرضا ابجدی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - شهرکرد - دانشگاه شهرکرد - دانشکده فنی مهندسی

۱- مقدمه

ماشین‌ها در برابر روی دادن خطا پرداخته شده است در برخی دیگر مانند [۵، ۷] به مسئله تغذیه این ماشین‌ها به ویژه با تکنیک مدولاسیون پهنای پالس با بردار فضایی پرداخته شده است. کنترل برداری و استفاده از کنترل غیرخطی موضوع برخی دیگر از کارهای تحقیقاتی می‌باشد [۸-۱۱].

در این مقاله، با توجه به مشکلات کنترل برداری نظیر نیاز به انتقال متغیرها به دستگاه سنکرون، حساسیت زیاد به پارامترهای ماشین و مشکل تنظیم کنترل کننده‌های جریانی، همچنین مشکلات و محاسبات نسبتاً سنگین روش‌های کنترل غیرخطی و مدولاسیون پهنای پالس، به کنترل مستقیم گشتاور و شار یک ماشین شش فاز نامتقارن پرداخته شده است. جدول‌هایی برای این منظور ارائه شده است [۱۲] ولی این جدول‌ها برای گشتاورهای منفی مشکلاتی دارند و جوابگو نمی‌باشند همچنین با استفاده از این جدول‌ها، در بعضی از حالت‌های گذرا شار ماشین به طور ناگهانی افت می‌کند. در مقالات متعددی نظیر [۱۵-۱۳] با استفاده از کنترل برداری یا تکنیک‌های کنترل غیرخطی مسئله کنترل گشتاور و شار ماشین مطرح شده است؛ ولی در واقع، برخلاف کنترل مستقیم گشتاور کلاسیک، این روش‌ها، ترکیب روش‌های کنترلی با تکنیک مدولاسیون پهنای پالس می‌باشند. در [۱۶، ۱۷] کنترل مستقیم گشتاور ماشین شش فاز متقارن مطرح شده است؛ شایان ذکر است که تبدیلات و در نتیجه بردارهای کلید زنی در سیستم شش فاز متقارن و نامتقارن کاملاً متفاوتند و روش ارائه شده برای ماشین متقارن برای نوع نامتقارن قابل استفاده نمی‌باشد.

در این مقاله جدولی جدید برای کنترل گشتاور و شار ماشین شش فاز نامتقارن ارائه می‌شود و کار آیی آن در کنترل گشتاور و شار از طریق شبیه سازی کامپیوتری بررسی می‌شود. شایان ذکر است که کنترل مستقیم گشتاور علی رغم سادگی که پیاده سازی آن را بسیار آسان می‌گرداند عمده مشکلات روش کنترل برداری را ندارد [۱۸]. علاوه بر این در این مقاله برای کاهش ریبیل گشتاور و شار، از منطق فازی استفاده شده و کنترل مستقیم گشتاور و شار فازی ماشین شش فاز نامتقارن مطرح می‌شود. ترکیب روش‌های هوشمند نظیر منطق فازی، شبکه‌های عصبی و ... می‌تواند باعث بهبود رفتار سیستم حلقه بسته گردد [۱۹، ۲۰].

در سال‌های اخیر، موتورهای القایی چند فازه (بیش از سه فاز) به واسطه مزایایی که دارند در صنعت کاربردهای فراوانی یافته‌اند [۱، ۲]. اولین کاربردهای صنعتی موتورهای چند فازه به اواخر دهه هفتاد قرن بیستم میلادی باز می‌گردد. اولین موتورهای چند فازه موتورهای پنج فاز و نیز شش فاز (سه فاز دو ستاره) بودند که بیشتر به علت کاهش گشتاور ضربانی نسبت به موتورهای سه فاز مورد توجه قرار گرفتند. از آن پس کاربرد این موتورها، در جریان‌های بالا مانند پیشران‌های کشتی و قطار و زیردریایی روز به روز گسترش یافته است. در یک موتور پیشران زیردریایی خصوصیتی همچون راندمان زیاد، قابلیت اطمینان بالا و نویز صوتی کم از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و انتخاب ساختار آن از جمله تعداد فاز، قطب و نحوه کنترل تا حد زیادی وابسته به این خصوصیات است. موتورهای چند فازه مزایای زیادی نظیر کاهش دامنه و میزان ضربانات گشتاور، کاهش دامنه جریان هر فاز بدون کاهش ولتاژ آن، کاهش هارمونیک‌های جریان لینک DC و قابلیت اطمینان بیشتر نسبت به موتورهای سه فاز دارند [۳، ۴].

با افزایش تعداد فازها همچنین می‌توان نسبت گشتاور به جریان مؤثر را به طور چشمگیری افزایش داد. به دلیل افزایش درجات آزادی در این موتورها می‌توان با تزریق هارمونیک‌های خاص جریان، گشتاور بیشتری تولید کرد و یا با یک سیستم درایو مشترک چندین موتور را تحریک نمود. امروزه، این موتورها بیشتر در سیستم محرکه کشتی و زیردریایی، وسایل نقلیه هابرید، کاربردهای هوا فضا استفاده می‌شوند. بعضی از مزایای موتورهای چندفازه از جمله کاهش هارمونیک و گشتاورهای ضربه‌ای از آنجا ناشی می‌شود که ماشین‌های چندفاز برای تغذیه با اینورتر طراحی می‌شوند. به عبارتی از همان ابتدا برای کار با اینورتر سازگار شده‌اند اما معمولاً استانداردهای ساخت ماشین‌های سه‌فاز برای کار با تغذیه با برق سینوسی ایجاد شده است و عملکرد آن‌ها با اینورتر، نسبت به موتورهای چندفاز بدتر است. ساختاری که در آن دو سیم‌پیچ نسبت به هم ۳۰ درجه شیف‌ت دارند معمول‌تر است [۵]. مهم‌ترین خصوصیت این موتور حذف هارمونیک ششم ریبیل گشتاور است که در موتورهای سه‌فاز تغذیه‌شده با اینورتر اتفاق می‌افتد. در مقابل موتور شش فاز متقارن قرار دارد که در [۶] به آن پرداخته شده است.

کارهای تحقیقاتی در زمینه ماشین‌های شش فاز جنبه‌های مختلفی دارد در برخی مراجع مانند [۶] به مسئله قابلیت اطمینان این

۲- مدل سازی ماشین شش فاز نامتقارن

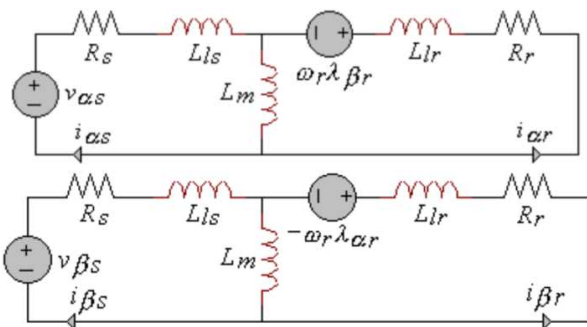
شکل (۱) به طور شماتیک سیم پیچ های استاتور یک ماشین شش فاز نامتقارن را نشان می دهد. در ارتباط با این ماشین به جای ماتریس تبدیل متداول سه فاز از ماتریس تبدیل زیر استفاده می شود [۵]:

$$C = \begin{bmatrix} \alpha & 1 & \cos \phi & \cos 4\phi & \cos 5\phi & \cos 8\phi & \cos 9\phi \\ \beta & 0 & \sin \phi & \sin 4\phi & \sin 5\phi & \sin 8\phi & \sin 9\phi \\ \sqrt{\frac{2}{6}} x & 1 & \cos 5\phi & \cos 8\phi & \cos \phi & \cos 4\phi & \cos 9\phi \\ y & 0 & \sin 5\phi & \sin 8\phi & \sin \phi & \sin 4\phi & \sin 9\phi \\ 0+ & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0- & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

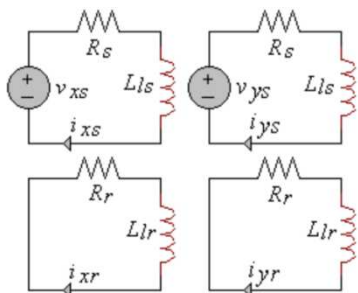
$$\begin{aligned} v_{\alpha s} &= R_s i_{\alpha s} + \frac{d}{dt}(L_s i_{\alpha s} + L_m i_{\alpha r}) \\ v_{\beta s} &= R_s i_{\beta s} + \frac{d}{dt}(L_s i_{\beta s} + L_m i_{\beta r}) \\ v_{x s} &= R_s i_{x s} + \frac{d}{dt}(L_l i_{x s}) \\ v_{y s} &= R_s i_{y s} + \frac{d}{dt}(L_l i_{y s}) \end{aligned} \quad (2)$$

در اینجا R_s مقاومت استاتور و L_s اندوکتانس استاتور L_m اندوکتانس متقابل و L_l اندوکتانس نشستی استاتور است. معادلات ولتاژ روتور به فرم زیر است:

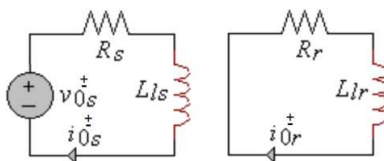
$$\begin{aligned} 0 &= R_r i_{\alpha r} + \omega_r (L_r i_{\beta r} + L_m i_{\beta s}) + \frac{d}{dt}(L_r i_{\alpha r} + L_m i_{\alpha s}) \\ 0 &= R_r i_{\beta r} - \omega_r (L_r i_{\alpha r} + L_m i_{\alpha s}) + \frac{d}{dt}(L_r i_{\beta r} + L_m i_{\beta s}) \end{aligned} \quad (3)$$



(الف) مدارهای معادل (α - β)

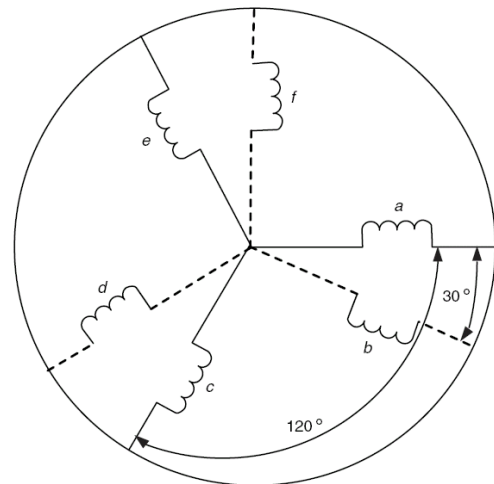


(الف) مدارهای معادل (x - y)



(الف) مدارهای معادل توالی صفر

شکل (۲): مدارهای معادل یک ماشین شش فاز نامتقارن



شکل (۱): موتور القایی شش فاز نامتقارن

در اینجا $\phi = \pi/6$ و همچنین (α, β) ، (x, y) و $(0+, 0-)$ سه زیر فضای دو بعدی عمود بر هم هستند. مؤلفه های (α, β) در تبدیل انرژی و تولید گشتاور نقش دارند و مؤلفه های (x, y) در تبدیل انرژی هیچ نقشی ندارند و فقط باعث تلفات در ماشین می شوند و مؤلفه های $(0+, 0-)$ به مؤلفه های صفر^۳ معروف هستند. چنانچه مراکز ستاره دو مجموعه سه فاز به یکدیگر متصل نشود این مؤلفه ها صفر می شوند. با به کارگیری ماتریس تبدیل فوق، مؤلفه اول و هارمونیک های از مرتبه $12m \pm 1, (m = 1, 2, 3, \dots)$ به زیر فضای (α, β) تصویر می شوند؛ هارمونیک های از مرتبه $6m \pm 1, (m = 1, 3, 5, \dots)$ به زیر فضای (x, y) تصویر می شوند و هارمونیک های توالی صفر به زیر فضای $(0+, 0-)$ تصویر می شوند [۵]. معادلات ولتاژ استاتور در زیر فضای (α, β) و (x, y) به فرم زیر است:

۴- روش کنترل مستقیم شار و گشتاور موتور القایی

شش فاز

روش کنترل مستقیم شار و گشتاور موتور القایی شش فاز مشابه روش کنترل مستقیم شار و گشتاور موتور القایی سه فاز است که انتخاب کلید زنی مناسب بر اساس خطای شار و گشتاور و همچنین زاویه شار صورت می‌گیرد شکل (۴) بلوک دیاگرام روش کنترل مستقیم گشتاور موتور القایی شش فاز را نشان می‌دهد.

مؤلفه‌های شار استاتور در دستگاه مختصات ساکن، به صوت زیر

قابل محاسبه هستند

$$\begin{cases} \lambda_{\alpha s} = \int (v_{\alpha s} - R_s i_{\alpha s}) dt \\ \lambda_{\beta s} = \int (v_{\beta s} - R_s i_{\beta s}) dt \end{cases} \quad (6)$$

تعیین جدول کلید زنی :

همان طور که در بالا گفته شد ۶۴ حالت کلیدزنی وجود دارد که هر حالت یک بردار ولتاژ را تولید می‌کند که در انتخاب بردارهای کلید زنی باید به این نکته توجه داشت که بردارهایی انتخاب شوند که بزرگ‌ترین دامنه را در زیر فضای (α, β) و کوچکترین دامنه را در زیر فضای (x, y) ، که در تبدیل انرژی نقشی ندارند، داشته باشند. شکل (۵) نحوه قرار گرفتن بردارهای بزرگ در زیر فضای (α, β) و تصویر آنها در زیر فضای (x, y) را نشان می‌دهد. هر بردار بزرگ در زیر فضای دیگر معادل یک بردار کوچک است.

گشتاور افزایش یافت باید برداری انتخاب شود که زاویه شار را افزایش دهد و بالعکس؛ چرا که رابطه‌های زیر برای گشتاور و شار برقرار است

$$T_e \propto \lambda_s \times I_s \quad (7)$$

$$\Delta \lambda_s = V_s T_s \quad (8)$$

در اینجا V_s بردار کلیدزنی، I_s بردار جریان استاتور و T_s زمان نمونه برداری یا کلیدزنی است.

در اینجا R_r مقاومت روتور L_r و L_{lr} به ترتیب اندوکتانس روتور و اندوکتانس نشستی روتور هستند.

مدارهای معادل ماشین در شکل (۲) نشان داده شده است.

گشتاور از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$T_e = P L_m (i_{\alpha r} i_{\beta s} - i_{\beta r} i_{\alpha s}) \quad (4)$$

در این رابطه P تعداد زوج قطب است.

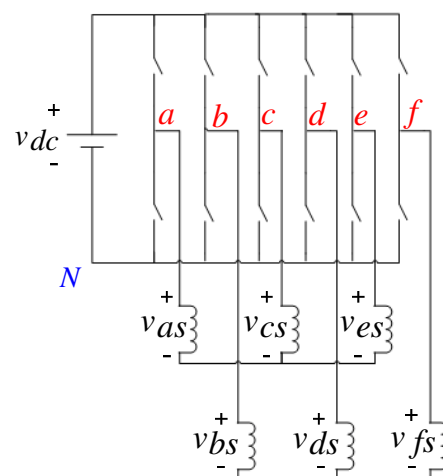
۳- اینورتر شش فاز

از اینورتر منبع ولتاژ ۱۲ کلیدی (۶ ساقه) برای تغذیه موتورهای شش فاز استفاده می‌شود. به علت اینکه هر کلید ۲ حالت خاموش و روشن دارد تعداد 2^6 حالت کلید زنی وجود دارد شکل (۳) یک اینورتر شش فاز متصل به سیم پیچی‌های یک ماشین شش فاز را نشان می‌دهد.

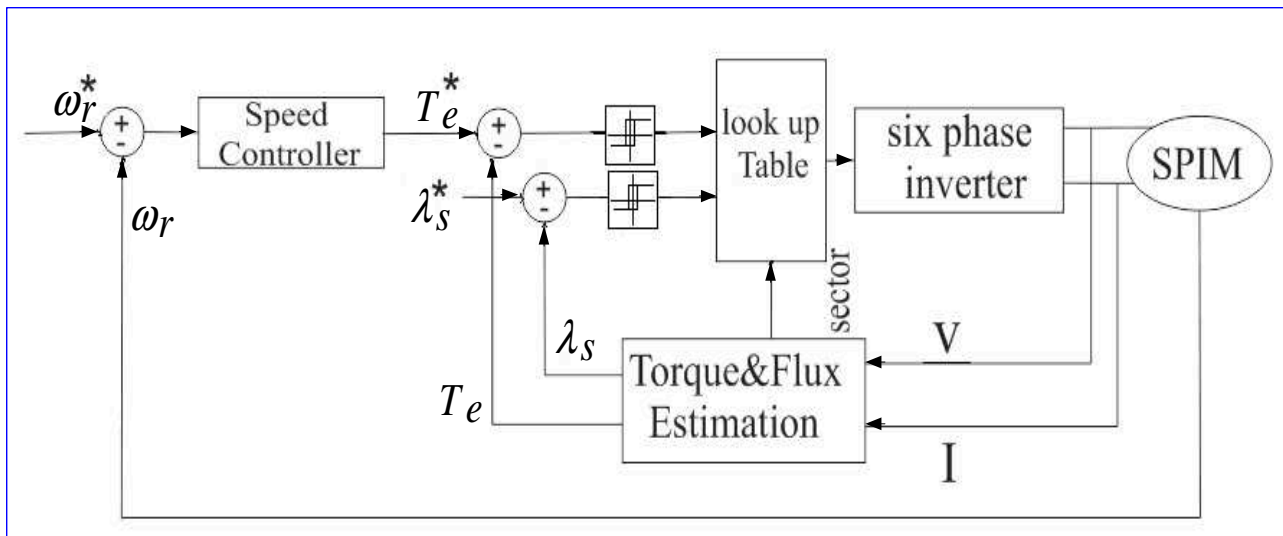
روابط ولتاژ اینورتر به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} v_{as} &= \frac{5}{6} v_{aN} - \frac{1}{6} (v_{bN} + v_{cN} + v_{dN} + v_{eN} + v_{fN}) \\ v_{bs} &= \frac{5}{6} v_{bN} - \frac{1}{6} (v_{aN} + v_{cN} + v_{dN} + v_{eN} + v_{fN}) \\ v_{cs} &= \frac{5}{6} v_{cN} - \frac{1}{6} (v_{aN} + v_{bN} + v_{dN} + v_{eN} + v_{fN}) \\ v_{ds} &= \frac{5}{6} v_{dN} - \frac{1}{6} (v_{aN} + v_{bN} + v_{cN} + v_{eN} + v_{fN}) \\ v_{es} &= \frac{5}{6} v_{eN} - \frac{1}{6} (v_{aN} + v_{bN} + v_{cN} + v_{dN} + v_{fN}) \\ v_{fs} &= \frac{5}{6} v_{fN} - \frac{1}{6} (v_{aN} + v_{bN} + v_{cN} + v_{dN} + v_{eN}) \end{aligned} \quad (5)$$

در این رابطه‌ها N سر منفی لینک DC است.

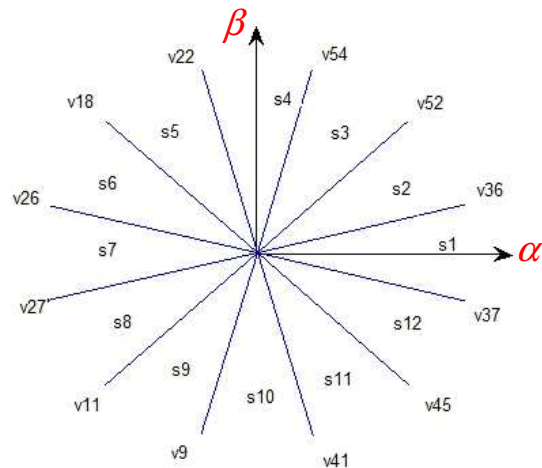


شکل (۳): اینورتر شش فاز



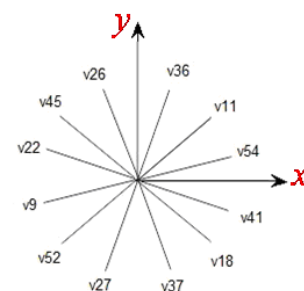
شکل (۴): بلوک دیاگرام روش کنترل مستقیم گشتاور و شار موتور شش فاز

شود که اندازه شار را افزایش دهد و بالعکس و همین‌طور اگر خطای دو جدول کلیدزنی برای روش کنترل مستقیم شار و گشتاور انتخاب شده است در زیر آورده شده است. جدول (۱) در مرجع [۱۲] ارائه شده و جدول (۲) در این مقاله پیشنهاد می‌شود. در این جدول‌ها T_c و λ_c به ترتیب نشان دهنده تغییر مطلوب گشتاور و شار استاتور (خروجی‌های باندهای هیستریزس شکل (۴)) می‌باشند؛ به عبارت دیگر چنانچه T_c و λ_c هر دو +۱ باشند لازم است گشتاور و شار استاتور افزایش داده شود و چنانچه -۱ باشند لازم است گشتاور و شار استاتور کاهش داده شود. بسته به موقعیت بردار شار، شماره بردار کلیدزنی مطلوب در جداول ارائه شده است.



(الف): زیرفضای (α, β)

برای مشخص شدن نحوه رسیدن به جدول (۲) یک عنصر جدول بدست آورده می‌شود. فرض کنید بردار شار استاتور در ناحیه S1 از صفحه $\alpha-\beta$ شکل (۵) باشد، همچنین فرض کنید T_c و λ_c هر دو مثبت باشند در این حالت لازم است گشتاور و شار استاتور افزایش داده شود با مراجعه به شکل (۵-الف) بردارهای v_{45}, v_{41} ، v_{37}, v_{36}, v_{52} و v_{54} همگی می‌توانند باعث افزایش شار شوند ولی v_{37} و v_{36} از همه بیشتر باعث این افزایش می‌شوند. از طرفی $v_{36}, v_{52}, v_{54}, v_{22}, v_{18}$ و v_{26} باعث افزایش زاویه بردار شار شده و در نتیجه گشتاور را افزایش می‌دهند. بین این مجموعه بردار و مجموعه قبلی تعدادی بردار مشترک وجود دارد که عبارتند از v_{36}, v_{52}, v_{54} که برای جلوگیری از تغییرات شدید بردار وسطی یعنی v_{52} انتخاب شده است که اولین عنصر جدول (۲) می‌باشد. به همین طریق سایر عناصر جدول انتخاب می‌گردند.



(ب): زیرفضای (x, y)

شکل (۵): نمایش بردارهای بزرگ در زیرفضای (α, β) و

تصویر آن‌ها در زیرفضای (x, y)

همان‌طور که گفته شد انتخاب بردار مناسب بستگی به خطای شار و گشتاور دارد یعنی اگر خطای شار افزایش یابد باید برداری انتخاب

جدول (۳): قوانین سیستم فازی

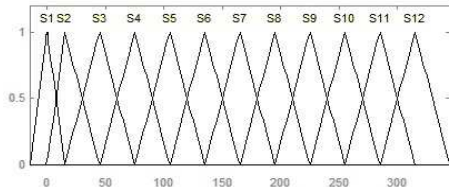
گشتاور خطای	خطای شار	شماره قطاع					
		1	2	3	4	5	6
PL	P	52	54	22	18	26	27
	Z	22	18	26	27	11	9
	N	18	26	27	11	9	41
NL	P	45	37	36	52	54	22
	Z	9	41	45	37	36	52
	N	11	9	41	45	37	36
گشتاور خطای	خطای شار	شماره قطاع					
		7	8	9	10	11	12
PL	P	11	9	41	45	37	36
	Z	41	45	37	36	52	54
	N	45	37	36	52	54	22
NL	P	18	26	27	11	9	41
	Z	54	22	18	26	27	11
	N	52	54	22	18	26	27

جدول (۱): بردارهای کلیدزنی مرجع [12]

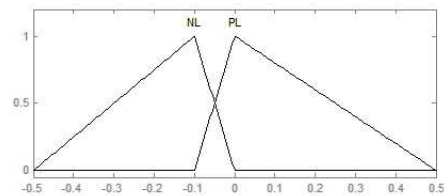
T	λ	شماره قطاع											
		c	c										
+1	+1	5	5	2	1	2	2	1	9	4	4	3	3
	-1	2	4	2	8	6	7	1	1	3	5	7	6
-1	+1	2	1	2	2	1	9	4	4	3	3	5	5
	-1	2	8	6	7	1	1	5	7	6	2	2	4
	+1	3	5	5	2	1	2	2	1	9	4	4	3
	-1	6	2	4	2	8	6	7	1	1	3	5	7
	+1	2	1	9	4	4	3	3	5	5	2	1	2
	-1	7	1	1	5	7	6	2	2	4	2	8	6

جدول (۲): بردارهای کلیدزنی پیشنهادی

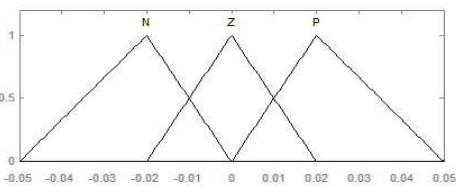
T	λ	شماره قطاع											
		c	c										
+1	+1	5	5	2	1	2	2	1	9	4	4	3	3
	-1	2	4	2	8	6	7	1	1	3	5	7	6
-1	+1	1	2	2	1	9	4	4	3	3	5	5	2
	-1	8	6	7	1	1	5	7	6	2	4	2	2
	+1	4	3	3	5	5	2	1	2	2	1	9	4
	-1	5	7	6	2	4	2	8	6	7	1	1	2
	+1	1	9	4	4	3	3	5	5	2	1	2	2
	-1	1	1	1	5	7	6	2	4	2	8	6	7



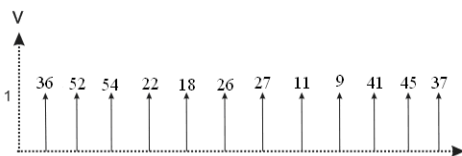
الف) توابع عضویت زاویه بردار شار استاتور



ب) توابع عضویت خطای گشتاور



ج) توابع عضویت خطای شار



د) توابع عضویت خروجی

شکل (۶): نمایش توابع عضویت متغیرهای ورودی و خروجی سیستم فازی

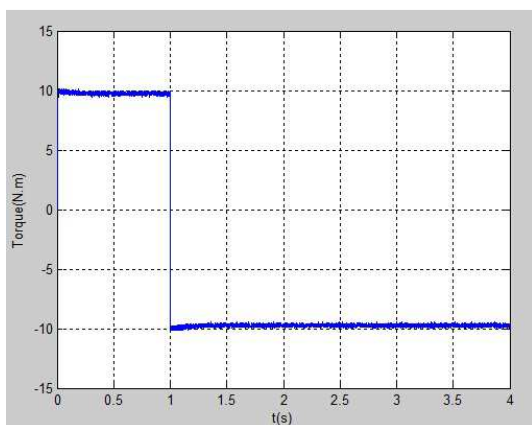
۵- روش کنترل مستقیم شار و گشتاور فازی

با بکارگیری منطق فازی می‌توان ریپل موجود در گشتاور و شار را کاهش داد. در این قسمت با استفاده از جدول (۲)، بردار کلیدزنی مطلوب با به‌کارگیری منطق فازی بدست آورده می‌شود. در این سیستم فازی سه ورودی زاویه شار، خطای گشتاور و خطای شار در نظر گرفته می‌شود و یک خروجی شماره بردار کلیدزنی. توابع عضویت انتخابی ورودی‌ها و خروجی در شکل (۶) نشان داده شده است. قوانین سیستم فازی در جدول (۳) آورده شده است. برای خطای گشتاور از دو متغیر زبانی خیلی مثبت (PL) و خیلی منفی (NL)، برای خطای شار از سه متغیر زبانی منفی (N)، صفر (Z) و مثبت (P) و برای زاویه بردار شار از ۱۲ متغیر زبانی استفاده شده است. جدول (۳) برگرفته از جدول (۲) می‌باشد و قوانین سیستم فازی را نشان می‌دهد.

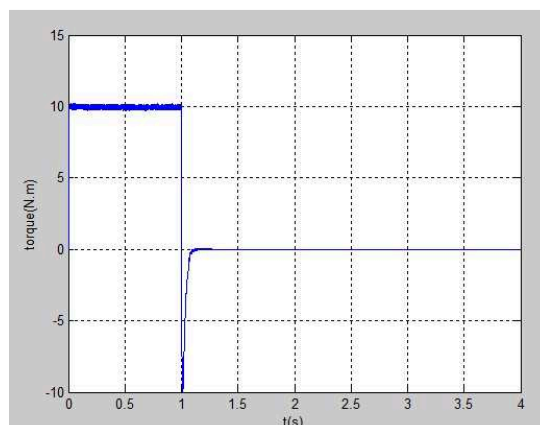
۵- نتایج شبیه سازی

نتایج آزمایش‌های کنترل گشتاور برای هر دو جدول در شکل‌های (۶) و (۷) نشان داده شده است. همان طور که در شکل‌های (۶) و (۷) مشخص است گشتاور مرجع تا زمان ۱ ثانیه روی ۱۰ نیوتن متر و در زمان‌های بیش از ۱ ثانیه روی ۱۰- نیوتن متر فرمان داده شده که در جدول (۱) با انتخاب نامناسب بعضی از بردارها، گشتاور تولیدی، گشتاور مرجع زمانی که مثبت است را دنبال می‌کند ولی گشتاور منفی را نمی‌تواند به خوبی دنبال کند و همین طور سرعت در زمانی که گشتاور منفی فرمان داده می‌شود ناگهان به صفر می‌رسد و یا در شار تولیدی افت مشاهده می‌شود و این مشکلات در

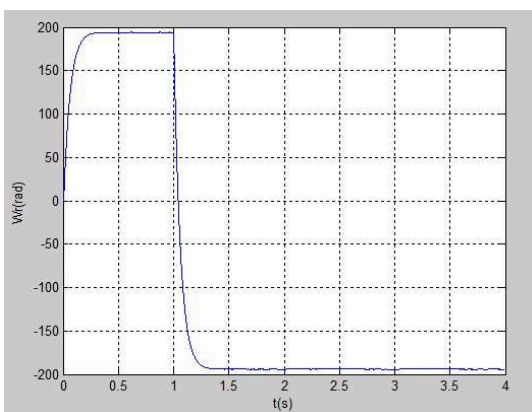
جریان‌ها هم مشخص است ولی با انتخاب مناسب و بهینه بردارها که در جدول (۲) نشان داده شده است گشتاور ماشین، گشتاور مرجع را به خوبی دنبال می‌کند و همین طور مشکل شار ماشین برطرف می‌شود و جریان ماشین به شکل سینوسی می‌شود. گشتاور الکترومغناطیسی از دینامیک خوبی برخوردار است و دارای ریبیل کمی می‌باشد با این وجود برای کاهش بیشتر ریبیل و داشتن رفتار بهتر (کاهش لرزش و سر و صدای ماشین) از روش کنترل مستقیم شار و شار فازی استفاده می‌شود.



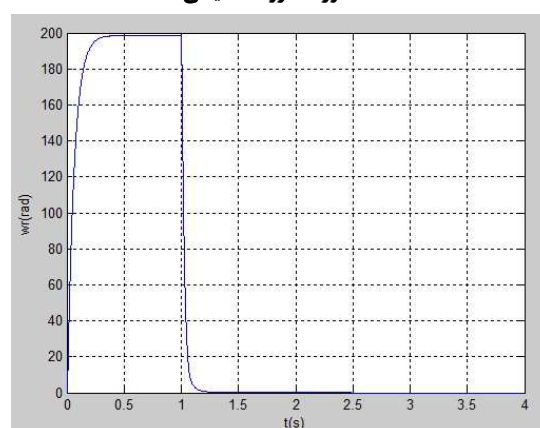
گشتاور الکترومغناطیسی



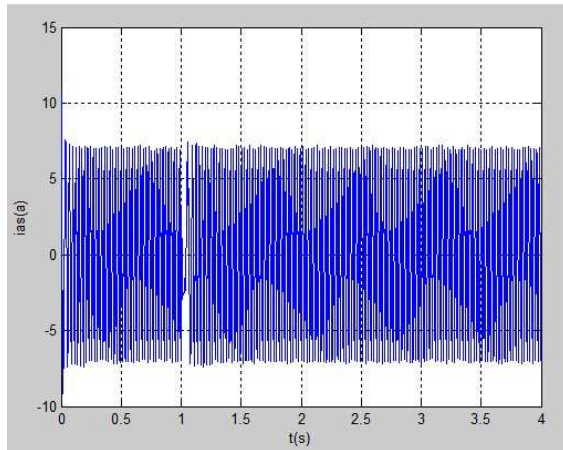
گشتاور الکترومغناطیسی



سرعت موتور

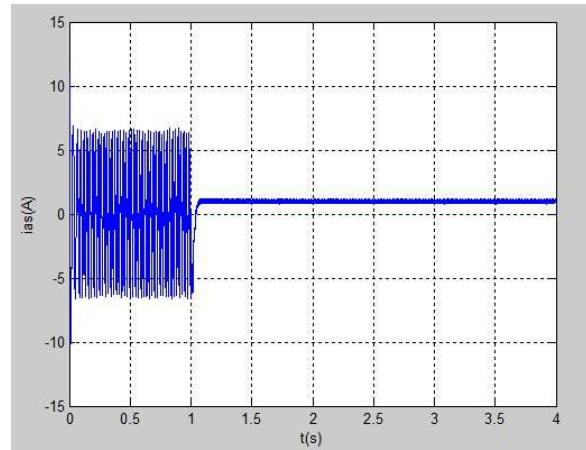


سرعت موتور



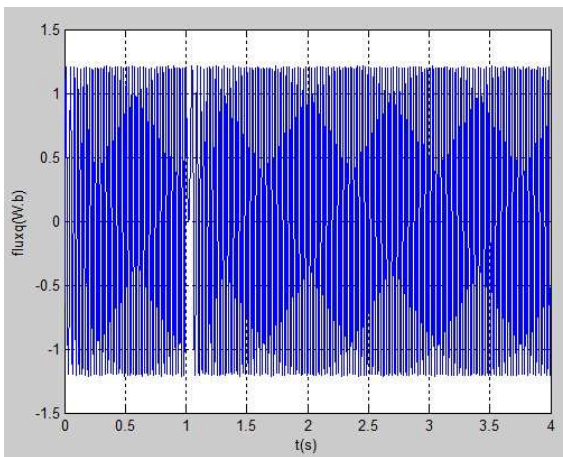
جریان یک فاز استاتور

شکل (۷): نتایج حاصل از شبیه سازی کنترل گشتاور با استفاده از بردارهای جدول (۲)



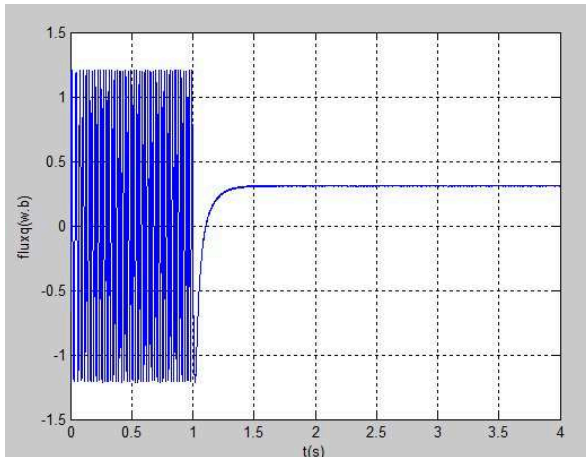
جریان یک فاز استاتور

شکل (۶): نتایج حاصل از شبیه سازی کنترل گشتاور با استفاده از بردارهای جدول (۱)



مؤلفه عمود شار استاتور

ادامه شکل (۷): نتایج حاصل از شبیه سازی کنترل گشتاور با استفاده از بردارهای جدول (۲)



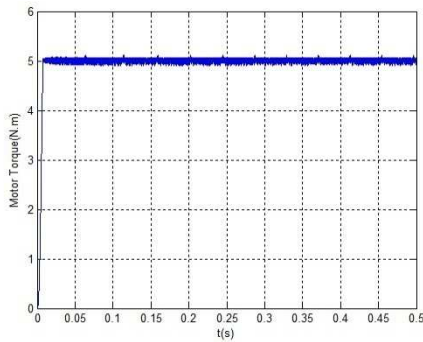
مؤلفه عمود شار استاتور

ادامه شکل (۶): نتایج حاصل از شبیه سازی کنترل گشتاور با استفاده از بردارهای جدول (۱)

ترسیم شده‌اند که در روش فازی شکل بدست آمده به یک دایره نزدیک تر است.

برای مقایسه بیشتر روش کلاسیک جدول پیشنهادی (۲) با روش فازی، نتایج حاصل از تغییر گشتاور یا تغییر شار به ترتیب در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) آورده شده است. از لحاظ دینامیکی (سرعت پاسخ دهی) هر دو روش مشابه هستند ولی ریبیل گشتاور و شار روش فازی در شرایط یکسان کمتر است؛ به عبارت دیگر روش فازی علی رغم داشتن پاسخ مطلوب تر باعث کاهش سرعت پاسخ دهی نشده است.

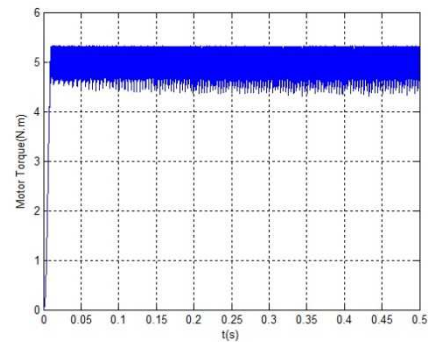
نتایج آزمایش‌های کنترل گشتاور برای روش کلاسیک جدول پیشنهادی (۲) و روش فازی به ترتیب در شکل‌های (۸) و (۹) نشان داده شده است. این نتایج برتری روش فازی پیشنهادی را به نمایش می‌گذارند. کنترل گشتاور در هر دو مورد تحت شرایط یکسان صورت گرفته است با این وجود ریبیل گشتاور در روش فازی به مراتب کمتر است. همچنین مؤلفه های جریان در روش فازی به حالت سینوسی نزدیک ترند. دامنه شار استاتور نیز در روش فازی از ریبیل کمتری برخوردار است. مؤلفه های شار نیز نسبت به یکدیگر



گشتاور الکترومغناطیسی

شکل (۹): نتایج حاصل از شبیه سازی کنترل گشتاور با استفاده از قوانین

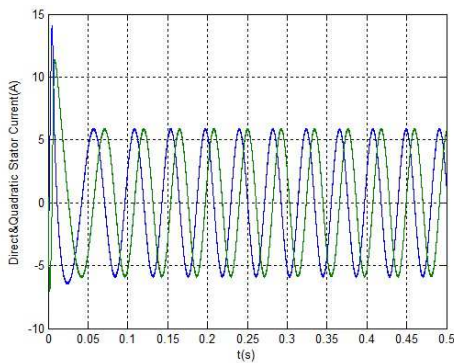
فازی جدول (۳)



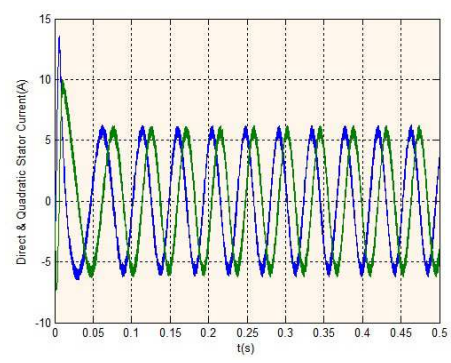
گشتاور الکترومغناطیسی

شکل (۸): نتایج حاصل از شبیه سازی کنترل گشتاور با استفاده از

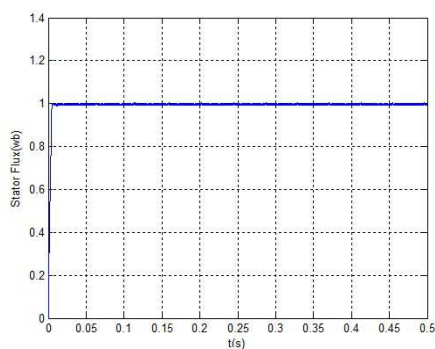
بردارهای جدول (۲)



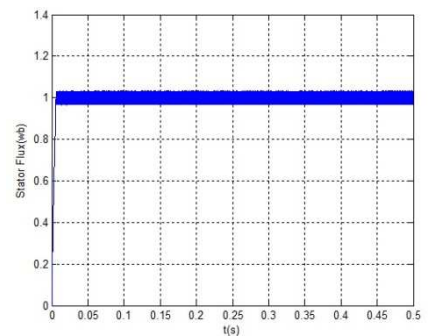
مؤلفه های جریان استاتور



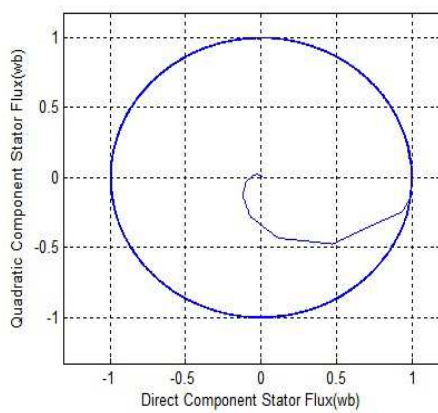
مؤلفه های جریان استاتور



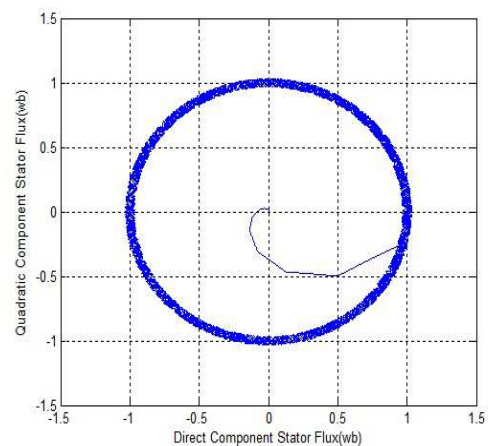
دامنه شار استاتور



دامنه شار استاتور



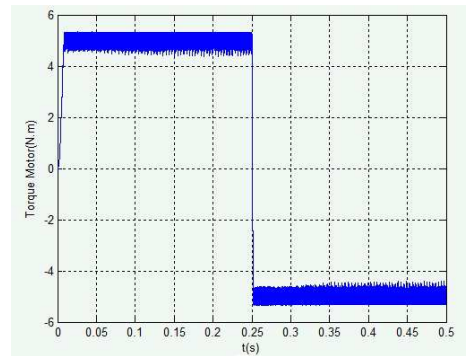
مؤلفه های شار استاتور نسبت به یکدیگر



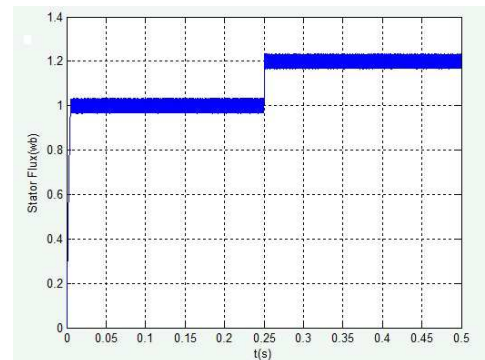
مؤلفه های شار استاتور نسبت به یکدیگر

ادامه شکل (۸): نتایج حاصل از شبیه سازی کنترل گشتاور با استفاده از

بردارهای جدول (۲)



گشتاور الکترومغناطیسی



دامنه شار استاتور

شکل (۱۰): نتایج حاصل از شبیه سازی تغییر گشتاور و شار با استفاده از

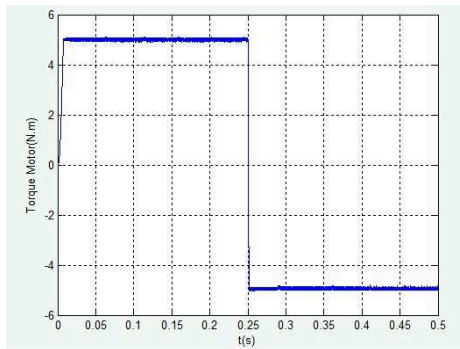
بردارهای جدول (۲)

۶- نتیجه

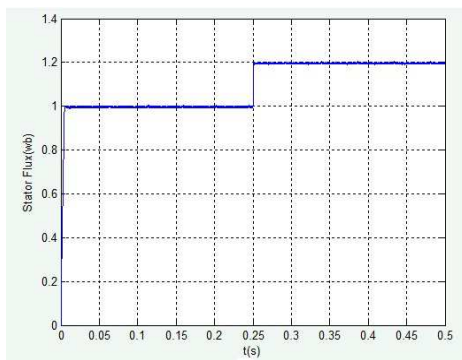
در این مقاله برای کنترل مستقیم گشتاور و شار یک ماشین القایی شش فاز نامتقارن یک جدول اصلاح شده ارائه گردید. برای این منظور مدل موتور القایی شش فاز نامتقارن، با استفاده از روش تجزیه بردار فضایی مورد استفاده قرار گرفت. کنترل مستقیم گشتاور با توجه به حذف محاسبات روش‌های کنترل برداری و کنترل غیرخطی و سادگی پیاده‌سازی یکی از روش‌های مطلوب کنترل موتورهای القایی می‌باشد. ماشین شش فاز نسبت به ماشین سه فاز از نوسان گشتاور کمتری برخوردار است و استفاده از جدول پیشنهادی باعث کنترل مطلوب گشتاور و شار می‌گردد. نتایج شبیه سازی کامپیوتری در شرایط مختلف نشان دهنده کارایی این روش با جدول پیشنهادی می‌باشد. سیستم درایو شش فاز نامتقارن پیشنهادی برای کاربردهای توان بالا یا جریان بالا، جایگزین مناسبی به جای سیستم‌های سه فاز متداول است. همچنین کنترل مستقیم گشتاور و شار فازی این ماشین مطرح شد که از ریبیل کمتری برخوردار است.

ادامه شکل (۹): نتایج حاصل از شبیه سازی کنترل گشتاور با استفاده از

قوانین فازی جدول (۳)



گشتاور الکترومغناطیسی



دامنه شار استاتور

شکل (۱۱): نتایج حاصل از شبیه سازی تغییر گشتاور و شار با استفاده از قوانین

فازی جدول (۳)

ضمیمه

پارامترهای موتور القایی به کار رفته:

$P = 2$	$J = 0.003$	$B = 0.0001$
$R_S = 9$	$R_r = 8.37$	$L_S = 740\text{mH}$
$L_r = 740\text{mH}$	$L_m = 712\text{mH}$	$v_{dc} = 500\text{v}$

مراجع

- [1] N. R. Abjadi, J. Soltani, Gh. Arab Markadeh, S. M. Ahmadi, "full Decoupling Control of a Sensorless Six-Phase Series Connected Two Induction Motor Drive Taking into Account the Voltage-Drop of Each Motor", International Review of Electrical Engineering (I.R.E.E.), Vol. 4, No. 3, pp. 485-494, May-June 2009.
- [2] R.Bojoi, F.Farina, F.Profumo and A.Tenconi, "Dual-Three Phase Induction Machine Drives Control – a Survey", JIEE Trans. on Industry Appl., 2006, Vol. 126, No. 4, pp.420-429.
- [3] E. Levi, S. N. Vukosavic and M. Jones, "Vector control schemes for series-connected six-phase two-

- Drive*", Power Electronics and Motion Control Conference EPE-PEMC 2006, Portoroz, Slovenia, pp. 1233 – 1238, Aug. 30 2006-Sept. 1 2006.
- [13] R. Bojoi, A. Tenconi and S. Vaschetto, "Direct Stator Flux and Torque Control for Asymmetrical Six-Phase Induction Motor Drives", IEEE International Conf. on Industrial Technology (ICIT), pp. 1507 - 1512, 2010.
- [14] M. Jones, S. N. Vukosavic, D. Dujic and Emil Levi, "A Synchronous Current Control Scheme for Multiphase Induction Motor Drives", IEEE Trans. on Energy Conv., Vol. 24, No. 4, pp. 860-868, Dec. 2009.
- [15] R. Bojoi, E. Levi, F. Farina, A. Tenconi and F. Profumo, "Dual Three-Phase Induction Motor Drive with Digital Current Control in the Stationary Reference frame", IEE Proc. On Electr. Power Appl., Vol. 153, No. 1, pp. 129-139, Jan. 2006.
- [16] R. Kianinezhad, R. Alcharea, B. Nahid, F. Betin and G. Capolino, "A Novel Direct Torque (DTC) for Six-Phase Induction Motors with Common Neutrals", International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM 2008), pp. 107-112, 2008.
- [17] R. Alcharea, R. Kianinezhad, B. Nahid Mobarakeh, F. Betin and G. Capolino, "Direct Torque Control for Six-Phase Symmetrical Induction Machines", IEEE Conf. on Industrial Electronics (IECON 2008), pp. 3090-3095, 2008.
- [18] M. B. Bannae Sharifian, E. Babaei and A. Eslami, "Comparison of two torque control methods for induction motors", in Proc. 4th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), Bursa, Turkey, Electric-Control, pp. 167-171, Dec. 7-11, 2005.
- [19] B. K. Bose, "Neural Network Applications in Power Electronics and Motor Drives—An Introduction and Perspective", IEEE Trans. on Ind. Electron, Vol. 54, No. 1, pp. 14-33, Feb. 2007.
- [20] B. K. Bose, "Expert System, Fuzzy Logic, and Neural Network Applications in Power Electronics and Motion Control", Proc. of the IEEE, Vol. 82, No. 8, pp. 1303–1323, Aug. 1994.
- motor drive systems", IEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol. 152, No. 2, March 2005.
- [4] M. Jones, S. N. Vukosavic, E. Levi and A. Iqbal, "A Six-Phase Series-Connected Two-Motor Drive With Decoupled Dynamic Control", IEEE Trans. on Ind. Appl., Vol. 41, No. 4, July/August 2005.
- [5] Y. Zhao, T. A. Lipo, "Space Vector PWM Control of Dual Three-phase Induction Machine Using Vector Space Decomposition", IEEE Trans. on Ind. Appl., Vol. 31, No. 5, pp. 1100-1109, Sep./Oct. 1995.
- [6] M. A. Fnaiech, F. Betin, G. A. Capolino and F. Fnaiech, "Fuzzy Logic and Sliding-Mode Controls Applied to Six-Phase Induction Machine With Open Phases", IEEE Trans. on Ind. Electr., Vol. 57, No. 1, pp. 354-364, Jan. 2010.
- [7] N. R. Abjadi, G. R. Arab Markadeh, J. Soltani, "A Two-Frequency Quasi Six-Phase Voltage Source Inverter Based on Space Vector PWM", European Power Electronics and Drives Journal (EPE), Vol. 20, No. 3, 2010.
- [8] R. Bojoi, M. Lazzari, F. Profumo and A. Tenconi, "Digital Field Oriented Control for Dual-Three Phase Induction Motor Drives", IEEE Trans. on Ind. Appl., Vol. 39, No.3, pp. 752-760, May/June 2003.
- [9] G. R. Arab Markadeh, J. Soltani, N. R. Abjadi, M. Hajian, "Sensorless Control of a Six-Phase Induction Motors Drive Using FOC in Stator Flux Reference Frame", World Academy of Science, Engineering and Technology, Issue 58, Oct. 2009.
- [10] N. R. Abjadi, G. R. Arab Markadeh, J. Soltani, "Model Following Sliding-Mode Control of a Six-Phase Induction Motor Drive", Journal of Power Electronics (JPE), Vol. 10, No. 6, pp. 694-701, Nov. 2010.
- [11] J. Soltani, J. Askari, N.R. Abjadi and G.R. Arab Markadeh, "Sliding-mode control for a six-phase series-connected induction two-motor drive", Electromotion, vol. 15 , No. 1, Jan.-Mar. 2008, pp. 31-39.
- [12] K. Marouanil, F. Khouchal, A. Khelouil, L. Baghli and D. Hadiouche, "Study and Simulation of Direct Torque Control of Double-Star Induction Motor

زیر نویس ها

¹ Direct Torque Control (DTC)

² Vector Space Decomposition

³ Zero Sequence