



## کنترل گشتاور و سرعت موتورهای القایی سه فازه با استفاده از روش DTC

محمود مرئوسی نوش آبادی<sup>۱\*</sup>، محمد جواد نوردی<sup>۲</sup>، سعید جوادی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>دانشجوی دکتری برق دانشگاه آزاد اسلامی کاشان، M.Marousi@Yahoo.com

<sup>۲</sup>عضو هیئت علمی گروه برق دانشگاه آزاد اسلامی کاشان، Navardi@Gmail.com

<sup>۳</sup>عضو هیئت علمی گروه برق دانشگاه آزاد اسلامی کاشان، S\_javadi\_arani@Yahoo.com

چکیده - یکی از روش های بسیار کارآمد جهت کنترل درایوهای موتور القایی که طی دو دهه اخیر مورد استفاده واقع شده، روش کنترل مستقیم گشتاور یا DTC می باشد. در این روش، شار موتور و گشتاور الکترومغناطیسی به عنوان کمیت های مرجع محسوب می گردند که توسط بردار ولتاژ ارسالی به اینورتر مستقیماً کنترل می شوند. از آنجائیکه DTC یک روش برداری کنترل موتور القایی است، علاوه بر فرکانس و دامنه ولتاژ، قابلیت کنترل موقعیت زاویه ای لحظه ای بردارهای فضایی ولتاژ را دارد. در نتیجه این روش طی حالت گذرا و پایدار قادر به کنترل و حفظ موقعیت زاویه ای صحیح و مطلوب بین بردارهای فضایی موثر در رفتار موتور القایی است. در این مقاله رفتار یک موتور القایی سه فازه در پاسخ به سرعت و گشتاور در حالات مختلف بررسی شده و به این نتیجه منجر می شود که استفاده از روش DTC به دلیل پاسخ سریع به تغییرات گشتاور و سرعت روش مناسبی برای کنترل موتورهای القایی سه فازه می باشد.

کلیدواژه- شار، کنترل مستقیم گشتاور، گشتاور الکترومغناطیسی، موتور القایی.

عامل اساسی باعث پیشرفت درایو های الکتریکی در سالهای اخیر شده است:

### ۱-مقدمه

۱- ساخت ادوات نیمه هادی قدرت با توانائی تحمل جریان و ولتاژ زیاد و همچنین سرعت کلیدزنی بالا  
۲- پیشرفت قابل توجه در ساخت مدارات مجتمع برای پردازش سیگنال دیجیتال [۱].

موتور های AC سرعت متغیر برای اولین بار دهه ۶۰ میلادی معرفی شدند اما قیمت و ابعاد آنها برای بسیاری از کاربردها مناسب نبود، همچنین بدلیل فرکانس کلیدزنی عملکرد چندان مطلوبی نداشتند. در اوایل دهه ۸۰ با افزایش قیمت انرژی و پیشرفت فناوری توجه به این موتور ها افزایش یافت و طی دهه ۹۰ استفاده از درایو های AC فراگیر شد و اساساً جایگزین روشهای سنتی کنترل سرعت و موتورهای DC جاروبک دار گردید. در حال حاضر محرکه های AC (شامل موتور و مبدل قدرت) از نظر قیمت با محرکه های DC قابل مقایسه و حتی ارزانتر از آنهاست. علاوه بر این، درایو های AC به نگهداری کمتری نیاز داشته، قابلیت اعتماد بیشتری دارند همچنین ابعاد و وزن موتورهای AC کمتر از موتورهای DC با توان مشابه است.

برای اولین بار مفهوم کنترل مستقیم گشتاور یا همان DTC توسط دانشمند ژاپنی آقای Takahashi و دانشمند آلمانی آقای Depenbrock در سال ۱۹۸۶ مطرح گردید. حدود ده سال بعد شرکت ABB موفق به ساخت اولین نوع درایو DTC گردید [۲]. درایو های DTC شار و گشتاور الکترومغناطیسی را بصورت مستقیم و جداگانه کنترل می کنند. این کار توسط اعمال بردار ولتاژ مناسب توسط اینورتر به موتور بدست می آید. خطای شار و گشتاور توسط رگولاتورهای هیستریزس در یک محدوده ی خاصی موسوم به باند هیستریزس نگه داشته می شوند. با استفاده از کنترل بردارهای ولتاژ خروجی اینورتر، زمان مناسب اعمال این بردارها و باند هیستریزس رگولاتورها می توان کارایی درایو شامل: پاسخ سریع به تغییرات گشتاور، فرکانس کلیدزنی اینورتر،

کنترل سرعت و گشتاور موتورهای AC نیاز به روشهای کنترلی بسیار پیچیده تری نسبت به موتورهای DC دارد که فقط با پردازشگرهای دیجیتال بسیار سریع میسر شده است. در واقع دو



جهت درک بهتر طریقه عملکرد این روش مفاهیم اصول کنترل شار و گشتاور در ادامه آورده شده است.

نوسانات گشتاور، نوسانات جریان و تلفات ناشی از آن را بهبود بخشد [۲].

## ۲- کنترل مستقیم گشتاور

### ۲-۱- اصول کنترل شار

در موتورهای تغذیه شده توسط اینورتر ولتاژی، با تغییر حالت کلیدزنی اینورتر، بردار ولتاژ اعمالی به موتور تغییر می کند. اگر فرض کنیم در طول مدت زمان  $T_c$  آرایش کلیدزنی ثابت بماند، با استفاده از روابط ولتاژ استاتور در دستگاه مرجع ایستا داریم:

$$\frac{d\bar{\psi}_s}{dt} = \bar{V}_s - R_s \bar{I}_s \quad (1)$$

که  $V_s$  بردار ولتاژ اعمال شده از طریق اینورتر می باشد. اگر افت ولتاژ روی مقاومت استاتور کوچک باشد معادله فوق را بصورت زیر می توان نوشت:

$$\frac{d\bar{\psi}_s}{dt} \cong \bar{V}_s \quad (2)$$

برای مقادیر کوچک  $T_c$ ، شار استاتور در لحظه نمونه برداری  $K+1$  بصورت زیر محاسبه می شود:

$$\bar{\psi}_{s_{k+1}} = \bar{\psi}_{s_k} + \bar{V}_{s_k} T_c \quad (3)$$

زیرنویس  $K$  معرف لحظه  $K$ ام است

با توجه به رابطه شماره (۴) مقدار لحظه ای ولتاژ بردارها بصورت زیر می باشد:

$$V_k = \frac{2}{3} * V_{dc} e^{j(k-1)\pi/3} \quad (4)$$

انتخاب آرایش غیرصفر، بردار شار را در جهت ولتاژ اعمال شده به موتور به حرکت وا می دارد، در حالیکه انتخاب آرایش صفر بردار

شکل (۱) طرح DTC بر اساس کنترل شار استاتور و گشتاور الکترومغناطیسی را نشان می دهد. در این شکل از یک اینورتر منبع ولتاژی برای تغذیه موتور استفاده می شود. مقدار شار و گشتاور محاسبه شده با مقادیر مرجع خود مقایسه شده و سیگنالهای خطا توسط رگولاتورهای هیستریزس محدود می شوند. این سیگنالهای خطا به همراه زاویه بردار شار استاتور جهت اعمال بردار ولتاژ مناسب وارد یک جدول کلیدزنی می شوند. این جدول نیز بردار متناسب با تغییرات شار و گشتاور را به اینورتر ارسال می کند [۳].

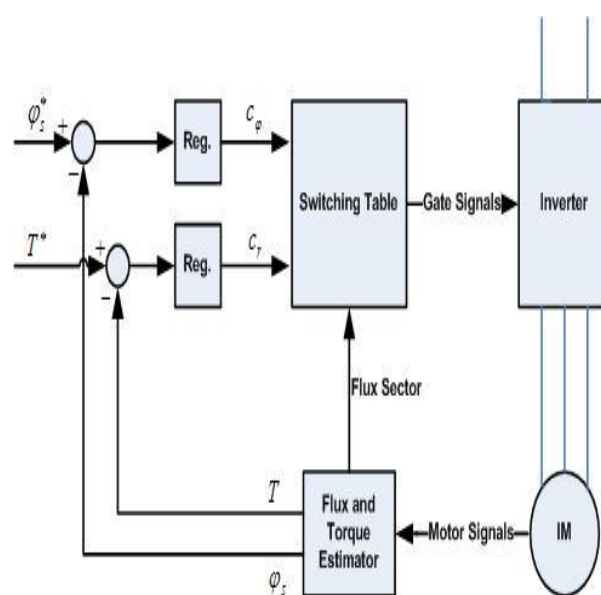
بطور خلاصه ویژگیهای اصلی روش کنترل مستقیم گشتاور عبارت اند از:

۱- تنظیم مستقیم شار استاتور و گشتاور؛

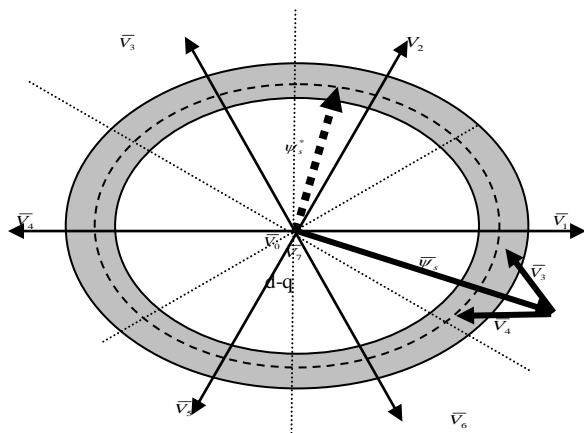
۲- شکل موج تقریباً سینوسی جریان و ولتاژ؛

۳- پاسخ سریع به تغییرات گشتاور حتی در حالت روتور قفل شده؛

۴- تنظیم غیرمستقیم ولتاژ و جریان استاتور؛



شکل ۱: بلوک دیاگرام طرح DTC



شکل ۳: مکان هندسی شار در صفحه ی

شار را در صفحه dq متوقف می کند. اندازه تغییرات شار متناسب با بردار ولتاژ و زمان اعمال این بردارها می باشد که در رابطه شماره ۵ نشان داده شده است:

$$\left| \bar{\psi}_{s_{k+1}} - \bar{\psi}_{s_k} \right| = \frac{2}{3} V_c T_c \quad (5)$$

با انتخاب مناسب و متوالی آرایش اینورتر، می توان بردار فضایی شار استاتور را در هر مسیر دلخواهی هدایت کرد. همانطور که در شکل (۲) نشان داده شده است، با اعمال مناسب بردارهای ولتاژ می توان مکان هندسی شار را در یک مسیر دایره ای شکل هدایت کرد. این کار به منزله ثابت نگهداشتن شار می باشد. با کم شدن مدت زمان اعمال هر بردار مسیرهای با دقت بالاتر بدست می آید

## ۲-۲- اصول کنترل گشتاور

جهت محاسبه گشتاور از رابطه ذیل می توان استفاده کرد. در این رابطه P تعداد قطب، Wmr سرعت مکانیکی روتور، J ممان اینرسی روتور و TI گشتاور بار می باشند.

$$T = \frac{3}{2} \left( \frac{P}{2} \right) (\psi_{ds}^s \cdot i_{qs}^s - \psi_{qs}^s \cdot i_{ds}^s) \quad (6)$$

رابطه بالا را می توان به صورت ضرب خارجی دو بردار  $\bar{\psi}_s$  و  $\bar{I}_s$  بصورت زیر نوشت:

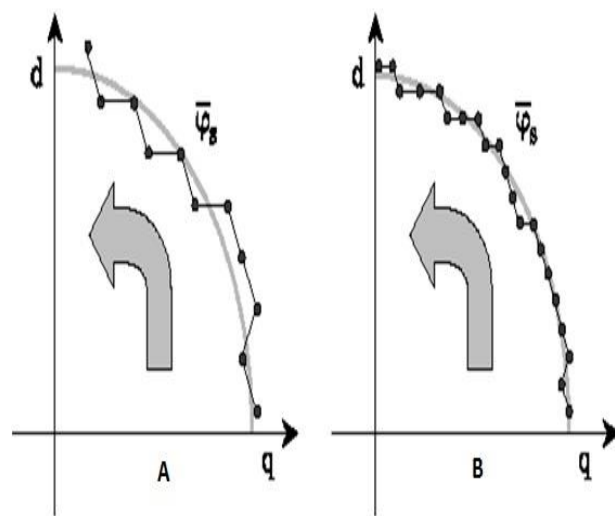
$$\bar{T}_e = \frac{3}{2} \left( \frac{P}{2} \right) (\bar{\psi}_s \times \bar{I}_s) \quad (7)$$

که در این رابطه  $\bar{\psi}_s = \psi_{qs}^s - j\psi_{ds}^s$  و  $\bar{I}_s = i_{qs}^s - ji_{ds}^s$  می باشند.

و دامنه گشتاور عبارتست از:

$$T_e = \frac{3}{2} \left( \frac{P}{2} \right) \frac{L_m}{L_r L'_s} |\bar{\psi}_r| |\bar{\psi}_s| \sin \gamma \quad (8)$$

که در این معادله  $\gamma$  زاویه میان شار استاتور و روتور می باشد. شکل (۴) نمودار برداری (دیگرام فازوری) معادله (۸) را نشان



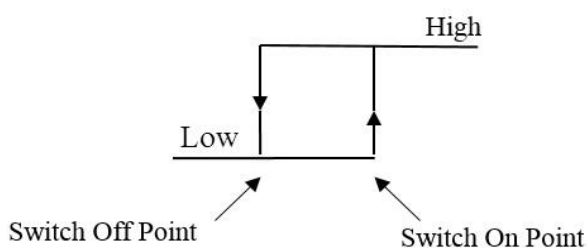
شکل ۲: مسیر شار استاتور به ازای مقادیر مختلف TC

پس با اعمال مقدار و مدت زمان مناسب بردارهای ولتاژ، بردار شار را می توان کنترل کرد. با توجه به تعداد بردارهای خروجی و غیر صفر اینورتر در صفحه مختلط، صفحه dq به شش بخش مطابق شکل (۳) تقسیم می شود که هر بخش  $60^\circ$  را در صفحه dq در بر می گیرد [۴].



### ۳- اجزای کنترلی روش DTC

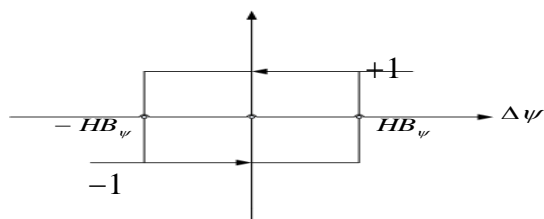
در کنترل مستقیم گشتاور از رگولاتورهای هیستریزس<sup>۱</sup> برای کنترل شار مغناطیسی استاتور و گشتاور الکترومغناطیسی استفاده می کنیم. شکل (۵) گویای عملکرد این نوع رگولاتور می باشد. تا وقتی که سیگنال ورودی به رگولاتور از حد نقطه خاموش شدن کمتر نشود، خروجی همچنان در حالت High می ماند و بالعکس تا هنگامیکه سیگنال ورودی از حد نقطه روشن شدن بالاتر نرود خروجی رگولاتور همچنان Low می ماند. حد نقطه روشن شدن می بایستی بزرگتر از حد نقطه خاموش شدن باشد و حد فاصل نقطه روشن شدن و نقطه خاموش شدن را پهنای باند هیستریزس می گویند [۶].



شکل ۵: کنترلر هیستریزس

### ۳-۱- رگولاتور شار

با فرض اینکه  $E_{\psi}$  مقدار خطای شار یعنی  $\psi_s^* - \psi_s$  باشد. که با  $\psi_s^*$  و  $\psi_s$  به ترتیب مقادیر شار مرجع و شار محاسبه شده می باشند. اگر  $E_{\psi} > HB_{\psi}$  آنگاه  $H_{\psi} = 1$  و اگر  $E_{\psi} < -HB_{\psi}$  آنگاه  $H_{\psi} = -1$  می باشد. در اینجا  $2HB_{\psi}$  پهنای باند رگولاتور شار و  $H_{\psi}$  خروجی رگولاتور می باشد. شکل (۶) این نوع رگولاتور را نشان می دهد.

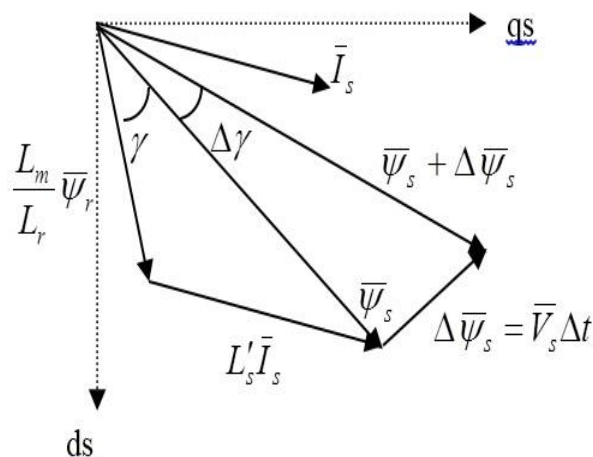


شکل ۶: کنترلر هیستریزس شار

<sup>۱</sup>Hysteresis Regulator

می دهد. همانطور که از این معادله برمی آید، افزایش شار روتور، شار استاتور، و جریان استاتور، باعث افزایش گشتاور می گردد. اگر شار روتور ثابت بماند و شار استاتور بوسیله ولتاژ استاتور  $V_s$  افزایش یابد آنگاه زاویه  $\gamma$  به اندازه  $\Delta\gamma$  افزایش می یابد و بنابراین افزایش مقدار گشتاور به صورت زیر بدست می آید: [۵]

$$\Delta T_e = \frac{3}{2} \left( \frac{p}{2} \right) \frac{L_m}{L_r L'_s} |\bar{\psi}_r| |\bar{\psi}_s + \Delta \bar{\psi}_s| \sin \Delta \gamma \quad (9)$$



شکل ۴: دیاگرام برداری شار استاتور، شار روتور و جریان استاتور در صفحه dq

بنابراین هر برداری که باعث افزایش زاویه بین بردار شار استاتور و روتور گردد سبب افزایش گشتاور خواهد شد. با توجه به شکل ۴ اگر بردار شار را در بخش اول و جهت چرخش را جهت مثلثاتی فرض کنیم. بردار  $V_2$  سبب افزایش گشتاور و بردار  $V_6$  سبب کاهش آن می شود. چرا که بردار  $V_2$  زاویه میان شار استاتور و روتور را افزایش می دهد ولی بردار  $V_6$  سبب کاهش زاویه بین دو بردار شار می گردد.



### ۳-۳- جدول سویچینگ<sup>۲</sup>

بردار ولتاژ بر روی مقادیر شار و گشتاور تاثیر می گذارد. به عنوان مثال اگر بردار شار در بخش اول صفحه مختلط واقع باشد ( $-30 \leq \theta \leq +30$ ) اعمال بردار  $V_2$  باعث افزایش شار و گشتاور می شود. کنترل اینورتر بر اساس خروجی رگولاتورها و بسته به محلی که بردار شار موتور در آن واقع است مطابق با جدول شماره (۲) یا همان جدول سویچینگ صورت می گیرد.

با انتخاب بردارهای ولتاژ صفر (بردارهای  $V_0$  و  $V_7$ ) عمل کلیدزنی متوقف می شود در اینصورت بردار شار بصورت ثابت روی صفحه dq می ماند و این در صورتی اتفاق می افتد که مقدار گشتاور در محدوده باند هیستریزس رگولاتور خود باقی بماند. البته با گذشت زمان مقدار شار و گشتاور به آهستگی کم می شوند و اینورتر دوباره توسط سیستم کنترلی فعال می شود.  $k$  نمایانگر شماره بخش (سکتور) می باشد. روشن است که شماره بخشها عددی بین ۱ تا ۶ می باشد. [۵]

جدول شماره ۲: انتخاب بردار مناسب جهت اعمال تغییرات شار و گشتاور (جدول سویچینگ)

نوع رگولاتور	خروجی		
	گشتاور	+1	0
شار	$k+1$	0 or 7	$k-1$
	$k+2$	0 or 7	$k-2$
شار	+1		-1

### ۴- شبیه سازی

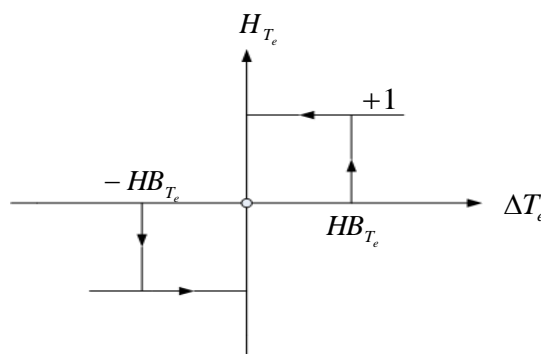
در این قسمت با توجه به معادلات بررسی شده در مقاله حاضر و معادلات حاکم بر موتور سه فاز القایی، شبیه سازی الگوریتم کنترل مستقیم گشتاور در محیط سیمولینک که زیر مجموعه نرم افزار MATLAB می باشد، انجام شده است. نمای کلی الگوریتم شبیه سازی شده در شکل شماره (۸) قابل

### ۲-۲- رگولاتور گشتاور

همانند قبل مقادیر  $ET_e$  مقدار خطای سیگنال گشتاور می باشد؛ که برابر اختلاف مقدار گشتاور مرجع  $T_e^*$  و گشتاور محاسبه شده  $T_e$  می باشد.  $2HB_{T_e}$  پهنای باند کنترلر گشتاور و  $H_{T_e}$  خروجی رگولاتور می باشد [۳].

در شکل شماره (۷) رگولاتور گشتاور را نشان می دهد. خروجی رگولاتورها تغییرات اندازه و زاویه شار را به جدول سویچینگ انتقال می دهد به عنوان مثال هرگاه خروجی رگولاتور شار برابر ۱+ باشد نشان دهنده اینست که شار کاهش یافته و می بایستی با اعمال بردار ولتاژ مناسب، مولفه شعاعی شار افزایش یابد.

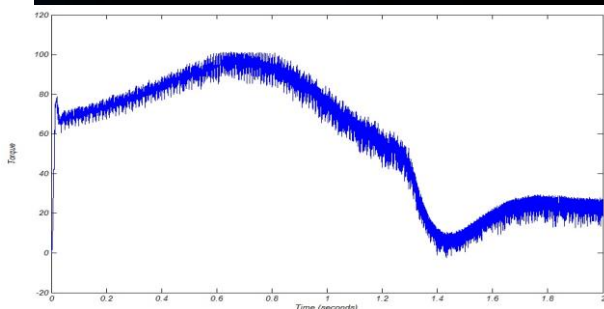
تعیین تغییرات بردار شار بر اساس خروجی رگولاتورها در جدول شماره (۱) آمده است. همچنین هنگامی که مقدار شار تخمینی در مقایسه با شار مرجع در محدوده باند هیستریزس قرار داشته باشد، بردارهای صفر به اینورتر اعمال می شوند و اگر زمان اعمال این بردارها بطول انجامد باعث کاهش تدریجی شار و گشتاور می گردد که در اینصورت مدار کنترلی دوباره به راه خواهد افتاد [۷].



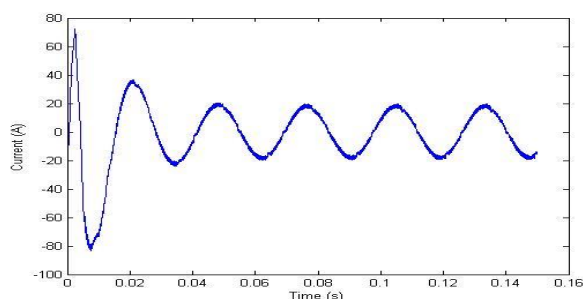
شکل ۷: کنترلر هیستریزس گشتاور

جدول شماره ۱: تاثیر خروجی رگولاتورها بر روی شار استاتور

خروجی مقایسه گرها	آرایش کلیدزنی انتخاب شده
$C_\psi = +1$	افزایش مولفه شعاعی
$C_\psi = -1$	کاهش مولفه شعاعی
$C_T = +1$	افزایش مولفه مماسی
$C_T = 0$	بدون تغییر
$C_T = -1$	کاهش مولفه مماسی



شکل شماره ۱۰: گشتاور تخمین زده شده توسط الگوریتم DTC کلاسیک در سرعت 1000 r.p.m



شکل شماره ۱۱: جریان گذرنده از یک فاز در سرعت 1000 r.p.m

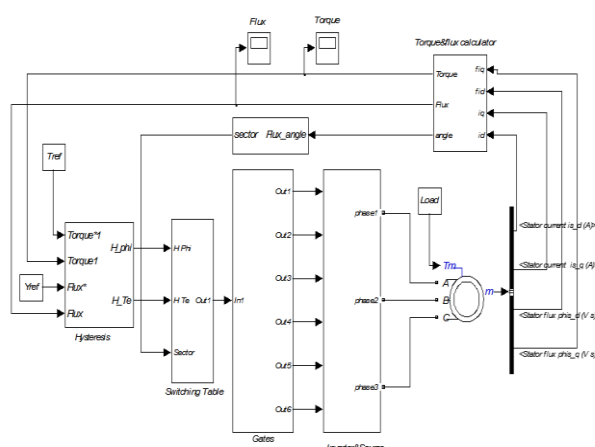
جهت سنجش کارآرایی الگوریتم DTC در هنگام تغییر بار، با اعمال یک گشتاور پله به ورودی، از مقدار +25 تا -25 نیوتن - متر استفاده می شود. گشتاور در زمان ۰/۵ ثانیه از مقدار نامی تا منفی مقدار نامی گشتاور تغییر می کند. نتایج اعمال این نوع بار در شکل های (۱۲) تا (۱۴) آمده است. این بار، در سرعت ثابت ۱۰۰۰ دور بر دقیقه اعمال شده است. همانطور که از این شکل ها بر می آید بدلیل اینکه شار و گشتاور دکوپله هستند، در هنگام تغییر گشتاور، شار استاتور ثابت باقی می ماند. تغییرات گشتاور توسط جریان استاتور جبران می گردد.

در کاربردهای عملی، درایو DTC باید بتواند در هر سرعت دلخواه که البته در محدودی مجاز سرعت موتور قرار داشته باشد، گشتاور مرجع را به موتور اعمال کند. بدین منظور از یک رگولاتور PI جهت اعمال گشتاور مرجع به موتور استفاده می شود. ورودی های این رگولاتور اختلاف سرعت مرجع و سرعت واقعی موتور می باشد. هنگام تغییرات سرعت مرجع، روش DTC باید بتواند تغییرات سرعت را به موتور اعمال نماید. برای بررسی این موضوع، سرعت مرجع دوزنقه ای شکل همانند شکل (۱۵) به موتور اعمال می گردد. تغییرات سرعت، گشتاور، شار، و جریان

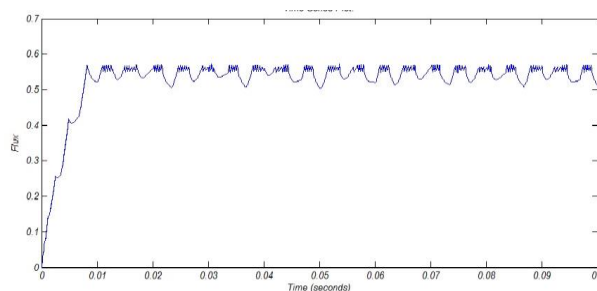
مشاهده می باشد، همچنین موتور مورد استفاده در این شبیه سازی دارای مشخصاتی به شرح زیر می باشد:

$$\begin{aligned}
 P_n &= 4 \text{ kw} & L_s &= 58 / 2 \text{ mH} \\
 L_m &= 56 \text{ mH} & L_r &= 58 / 2 \text{ mH} \\
 R_s &= 0 / 51 \Omega & \text{POLE} &= 4
 \end{aligned}$$

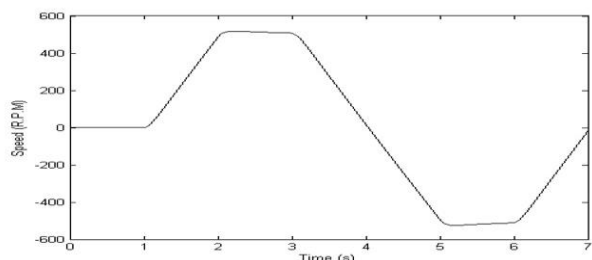
مقدار شار مرجع ۰/۵۶ وبر، گشتاور مرجع ۲۵ نیوتن - متر و ولتاژ نامی برابر ۲۲۰ ولت می باشد. در شکل های شماره (۹) و (۱۰) مقادیر شار و گشتاور تخمین زده شده توسط الگوریتم DTC برای سرعت ۱۰۰۰ دور بر دقیقه نشان داده شده است. جریان گذرنده از موتور القایی می بایست در حدود جریان نامی موتور و یا کمتر از آن باشد. شکل شماره (۱۱) جریان گذرنده از یک فاز موتور القایی را نشان می دهد.



شکل شماره ۸: نمای الگوریتم DTC در محیط متلب

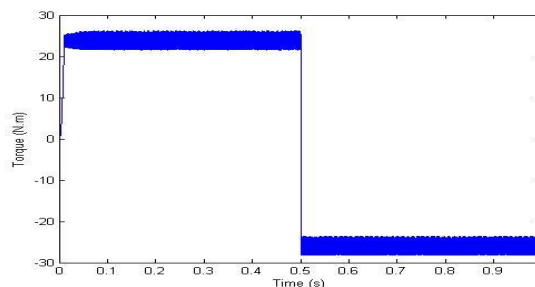


شکل شماره ۹: شار تخمین زده شده توسط الگوریتم DTC کلاسیک در سرعت 1000 r.p.m

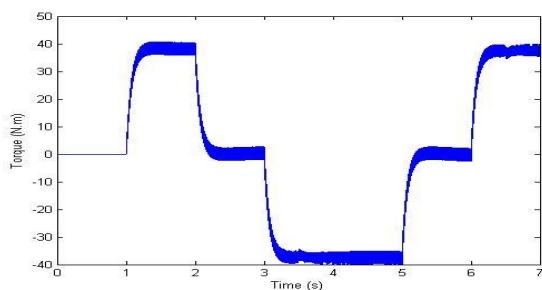


شکل شماره ۱۶: تغییرات سرعت موتور با اعمال مرجع دوزنقه‌ای و در حالت بی‌باری

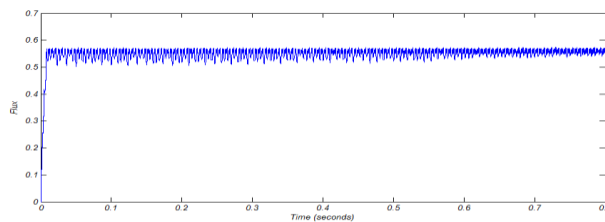
موتور در اثر اعمال این مرجع سرعت در شکل‌های (۱۶) تا (۱۹) نشان داده شده‌اند. در این حالت موتور بصورت بی بار راه اندازی شده است.



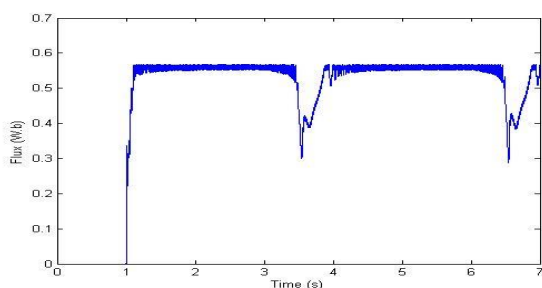
شکل شماره ۱۷: گشتاور تخمینی توسط روش DTC کلاسیک در اثر اعمال بار پله‌ای



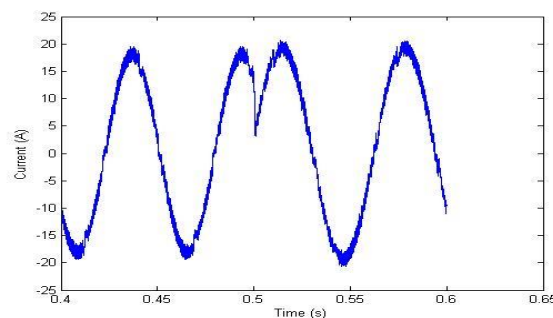
شکل شماره ۱۸: گشتاور موتور با اعمال مرجع دوزنقه‌ای و در حالت بی‌باری



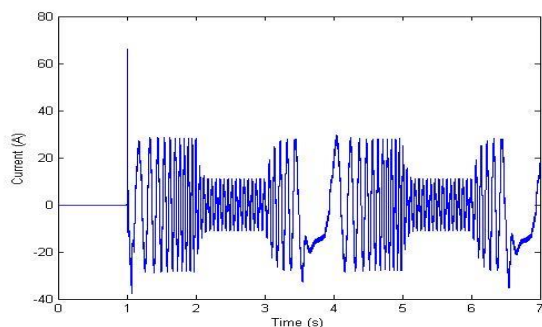
شکل شماره ۱۹: شار تخمینی توسط روش DTC کلاسیک در اثر اعمال بار پله‌ای



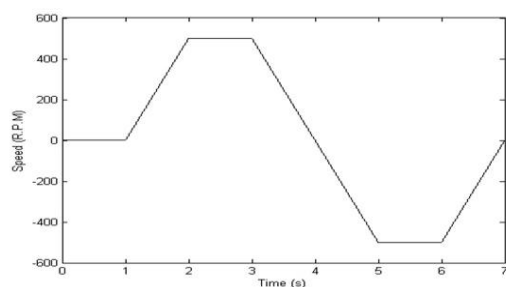
شکل شماره ۲۰: شار استاتور با اعمال مرجع دوزنقه‌ای و در حالت بی‌باری



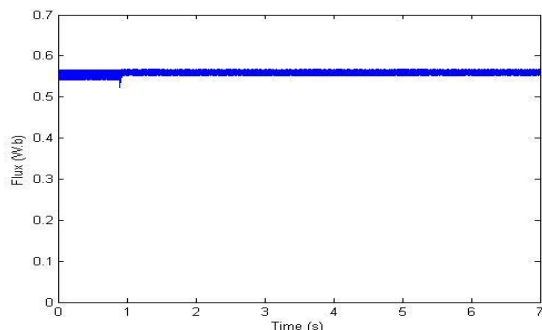
شکل شماره ۲۱: تغییرات جریان استاتور هنگام اعمال بار پله‌ای



شکل شماره ۲۲: جریان موتور با اعمال مرجع دوزنقه‌ای و در حالت بی‌باری



شکل شماره ۲۳: سرعت مرجع اعمال شده به موتور



شکل شماره ۲۳: شار استاتور هنگام اعمال تغییرات گشتاور

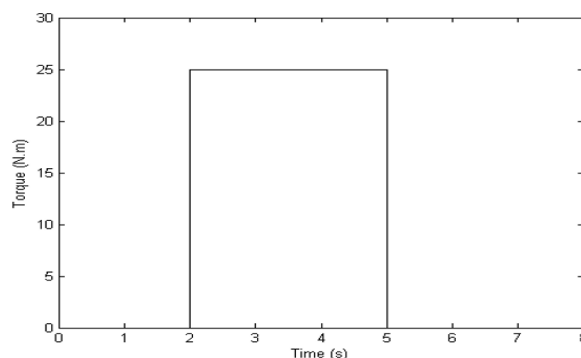
### ۵- نتیجه گیری

کنترل مستقیم گشتاور یا DTC یکی از روشهای کنترلی کارآمد جهت کنترل مستقیم و جداگانه شار و گشتاور موتور می باشد. مشاهده می کنیم که در این الگوریتم خطای سیگنالهای شار و گشتاور توسط رگولاتورهای هیستریزس در مقادیر از پیش تعیین شده محدود گشته همچنین تخمین شار تنها با استفاده از مقادیر ولتاژ و جریان استاتور انجام می گردد.

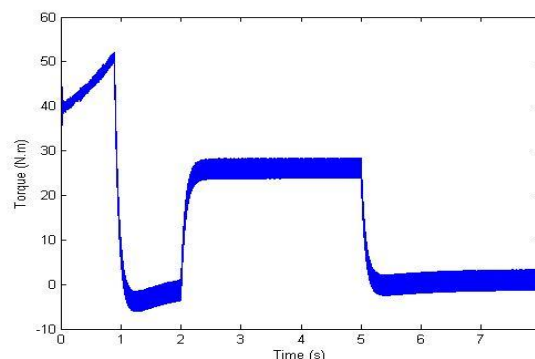
خروجی رگولاتورها بر اساس مقادیر سیگنال خطا تنظیم می شود. با توجه به مکان بردار شار و خروجی رگولاتورها، بردار ولتاژ مناسب با استفاده از یک جدول کلیدزنی انتخاب می گردد، بطوریکه مقدار شار و گشتاور در مقادیر مرجع، ثابت نگه داشته شده و بردار ولتاژ مناسب توسط سیگنالهای فرمان مبدل اعمال می شود. این الگوریتم مزایای زیادی از جمله:

- ۱- عدم نیاز به سنسور مکانیکی؛
- ۲- تنظیم مستقیم و مستقل شار استاتور و گشتاور الکترومغناطیسی موتور؛
- ۳- شکل موج تقریباً سینوسی جریان و ولتاژ؛
- ۴- پاسخ سریع به تغییرات گشتاور حتی در حالت روتور قفل شده؛
- ۵- عدم نیاز به تبدیل مختصات مرجع؛
- ۶- عدم نیاز به بلوک مدولاتور ولتاژ؛
- ۷- عدم نیاز به کنترلرهای PID؛
- ۸- فقط نیاز به اندازه گیری ولتاژ و جریان استاتور می باشد.

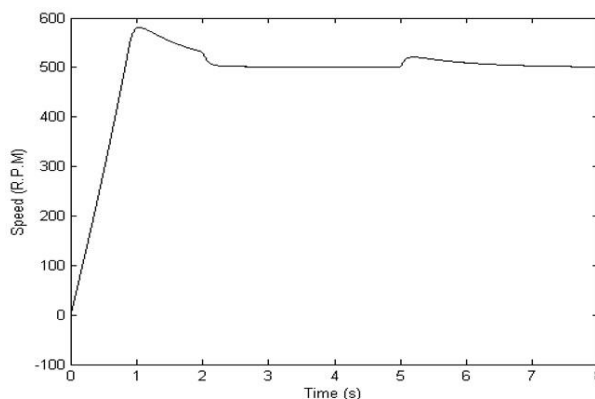
هنگام کار موتور در سرعت ثابت، روش کنترلی باید بتواند در لحظه تغییرات بار، با اعمال بردار ولتاژهای مناسب موتور را به گشتاور بار اعمالی برساند. جهت ارزیابی کارایی موتور نسبت به این تغییرات گشتاور باری به شکل شماره (۲۰) به موتور اعمال می شود. در شکل های (۲۱) تا (۲۳) مقدار گشتاور تخمینی، سرعت و شار استاتور نشان داده شده است.



شکل شماره ۲۰: گشتاور لحظه ای اعمالی به موتور



شکل شماره ۲۱: گشتاور تخمینی هنگام اعمال تغییرات گشتاور



شکل شماره ۲۲: سرعت موتور هنگام اعمال تغییرات گشتاور





معرفی نماد ها

$\psi_s$ : شار استاتور

$V_s$ : بردار ولتاژ اعمالی

$R_s$ : مقاومت استاتور

$I_s$ : جریان عبوری از استاتور

$J$ : ممان اینرسی

$P$ : تعداد قطب های موتور

$\omega_{mr}$ : سرعت مکانیکی موتور

$\omega_{er}$ : سرعت الکتریکی موتور

$V_{dc}$ : ولتاژ منبع dc

$T_c$ : زمان اعمال بردار

$T_L$ : گشتاور بار

$L_m$ : اندوکتانس مغناطیس کنندگی

$L_r$ : اندوکتانس رتور

$L_s$ : اندوکتانس استاتور

نتیجه شبیه‌سازی‌های انجام شده عملکرد مطلوب ماشین در سرعت‌های پایین و بالا، حالت گذرا، ماندگار، تغییرات ناگهانی بار و سرعت را به ما نشان می‌دهد.

## مراجع

[۱] فرزاد تهمی - کنترل ماشین‌های الکتریکی - انتشارات دانشگاه صنعتی شریف - ۱۳۸۵

[2] I. Takahashi, T.Nogouchi; "A new quick response and high efficiency control strategy of an induction motot," IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. IA-22, pp. 820-827, Sep./Oct. 1986.

[۳] محمود مرئوسی نوش آبادی - بهبود در کنترل مستقیم گشتاور ماشین های القایی سه فازه بر مبنای مبدل های الکترونیک قدرت چند سطحی - دانشگاه آزاد اسلامی کاشان - ۱۳۹۵

[4] A. Idir1 & M. Kidouche1 ; "Direct Torque Control for Matrix Converter-fed Three phase Induction Motor ", International Conference on Control, Engineering & Information Technology (CEIT'13)Proceedings Engineering & Technology - Vol.2, pp.94-99, 2013 Copyright - IPCO

[5] peter Vas; "Sensorless vector and direct torque control"; Oxford University Press, Inc., New York,1998.

[6] Mahrous Ahmed and M.K. Metwally, Tharwat Hanafy; " Direct Torque Control of Induction Motor Drive Fed from a Photovoltaic Multilevel Inverter, Journal of Engineering Research and Applications www.ijera.comISSN : 2248-9622, Vol. 4, Issue 9( Version 3), September 2014, pp.127-132

[۷] پال.سی.کراوز - تحلیل ماشین‌های الکتریکی - ترجمه: سید مرتضی سقاییان نژاد، حسن نیک خواجویی - مرکز نشر دانشگاه صنعتی اصفهان - ۱۳۷۶