

## کنترل گشتاور موتور القایی با روش DTC

عباس شیری  
دانشکده برق  
دانشگاه علم و صنعت ایران  
[abbas\\_shiri@ee.iust.ac.ir](mailto:abbas_shiri@ee.iust.ac.ir)

عادل زکی پور  
دانشکده برق  
دانشگاه علم و صنعت ایران  
[zakupour@Gmail.com](mailto:zakupour@Gmail.com)

**چکیده:** کنترل دور موتورهای القایی با استفاده از روش کنترل مستقیم گشتاور<sup>1</sup> DTC یکی از روشهای بسیار نو و کارآمد در کنترل ماشینهای الکتریکی می باشد. با توجه به الگوریتم کار در این روش اجرای آن بصورت دیجیتال ساده و در عین حال بسیار مناسب می باشد. با استفاده از روش کنترل DTC محدودیتهای و پیچیدگیهای کنترل برداری را می توان کاهش داد. در این مقاله یک سیستم کنترل DTC شبیه سازی شده که نتایج آن این ادعا را تایید می کند.

**کلمات کلیدی:** کنترل دور موتور، کنترل مستقیم گشتاور، DTC، موتور القایی.

### ۱- مقدمه

کنترل ماشینهای الکتریکی همواره دغدغه اصلی مهندسين ماشین می باشد. گسترش و پیشرفت صنعت کامپیوتر و الکترونیک قدرت، و نیز به موازات این پیشرفت ها طرح روشهای نوین کنترل ماشینهای الکتریکی در دهه های گذشته دریچه ای نو در کنترل موتورهای الکتریکی باز کرده است. در نتیجه علاوه بر تمامی تلاشها و پیشرفتهای انجام یافته در قرن گذشته برای کنترل موتورهای القایی در راستای کنترل بهینه و اقتصادی شان، با وجود تمامی ابداعات و ابتکارات بکار رفته در آنها با روی کار آمدن روشهای کنترل برداری روشهای کنترل اسکالر کم کم کنار نهاده می شوند. آنچه که روشهای برداری را بسیار کارآمد می کند تبدیل موتور القایی با استفاده از این روشها به موتور dc از دید مدار کنترل می باشد، آنچه که این روش را با تمامی محاسنش محدود می کند پیچیدگیهای اجرایی آن می باشد. در روش DTC سعی بر آن داریم تا محدودیتهای و پیچیدگیهای روش کنترل برداری را حذف نماییم [۱]. این کار به قیمت افزایش ریبیلتهای گشتاور و فلوی ماشین می باشد. با این حال این مشکلات در مقابل محاسن سادگی این روش قابل چشم پوشی و در عین حال با استفاده از روشهایی تا حدودی قابل رفع می باشد [۲]. نتایج حاصله از شبیه سازی موتور القایی سه فاز توسط نرم افزار MATLAB که حاکی از سادگی و قابلیت های خوب این روش در کنترل گشتاور موتور می باشد، در انتهای مقاله آورده شده است.

### ۲- تئوری کار

#### ۲-۱- محاسبات فلوی و گشتاور

با اعمال تبدیلات سه فاز به دو فاز به معادلات موتور القایی می توان رابطه گشتاور موتور القایی به رابطه گشتاور در موتورهای dc بسیار شبیه شود.

<sup>1</sup> Direct Torque Control

$$T_m = K|\psi_s||I_s|\sin\alpha \quad (1)$$

$$T_m = KI_a I_f \quad (2)$$

همانطوریکه در رابطه (۱) مشاهده می‌شود گشتاور موتور القائی بسیار شبیه به گشتاور موتورهای dc که در رابطه (۲) آمده است می‌باشد. گشتاور و فلوی فاصله‌ی هوایی تابعی از ولتاژ و فرکانس هستند و این اثر تزویج باعث کندی پاسخ موتور القائی در روشهای کنترل اسکالر می‌گردد. بعد از طرح روشهای کنترل برداری در سال ۱۹۸۶ روش نوین کنترل موتورهای القائی به نام روش کنترل مستقیم گشتاور و یا DTC توسط Takahashi مطرح شد [1]. همانطوریکه از اسم این روش بر می‌آید در این روش اساس کار بر روی کنترل گشتاور موتور القائی بنا نهاده شده است. گشتاور موتور القائی را می‌توانیم از رابطه (۳) بصورت زیر محاسبه کرد:

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} L_m (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}) \quad (3)$$

با توجه به رابطه (۲) گشتاور موتور تابعی از فلوی استاتور و زاویه‌ی بین فلوی استاتور و روتور می‌باشد. فلوی استاتور را می‌توان مستقیماً از روی ولتاژهای ترمینال موتور ساخت. برای اینکار ولتاژهای اندازه‌گیری شده توسط سنسورهای ولتاژ به مرجع d-q انتقال می‌یابد، سپس با استفاده از رابطه (۴) و (۵) می‌توان فلوی استاتور ماشین را محاسبه کرد.

$$\lambda_{ds} = \int (V_{ds} - R_s i_{ds}) dt \quad (4)$$

$$\lambda_{qs} = \int (V_{qs} - R_s i_{qs}) dt \quad (5)$$

با اندازه‌گیری جریانهای ترمینال ماشین می‌توان از رابطه (۳) گشتاور ماشین القائی را محاسبه نمود. از روابط (۴) و (۵) مشاهده می‌شود که فلوی، مستقیماً از روی ولتاژهای ترمینال ساخته می‌شود در کنترل DTC با کنترل ولتاژ ترمینال ماشین القائی فلوی ماشین و به طبع آن گشتاور تولیدی موتور را کنترل نمود.

آنچه که این روش کنترل را بسیار قوی و محکم می‌کند وابستگی کم آن به پارامترهای ماشین می‌باشد، به عبارت دیگر برای ساخت فلوی استاتور و نیز گشتاور تنها پارامتری از موتور که بایستی اندازه‌گیری شود مقاومت استاتور می‌باشد. بدین ترتیب حساسیت سیستم کنترل به تغییر پارامترهای ماشین در حین کار بسیار کم می‌باشد و نیز در این روش کنترل ما نیاز به داشتن محل قرارگیری فلوی (زاویه‌ی فلوی استاتور) داریم که این زاویه و نیز اندازه فلوی به سادگی با استفاده از رابطه (۶) و (۷) قابل محاسبه می‌باشد:

$$\theta_f = \tan^{-1} \left( \frac{\lambda_{qs}}{\lambda_{ds}} \right) \quad (6)$$

$$\lambda_s = \sqrt{(\lambda_{qs})^2 + (\lambda_{ds})^2} \quad (7)$$

## ۲-۲- کنترل فلوی و گشتاور

همانطوریکه گفته شد در روش dtc هدف کنترل فلوی استاتور موتور و به طبع آن کنترل مستقیم گشتاور ماشین می‌باشد. با در دسترس داشتن  $\lambda_q$  و  $\lambda_d$  می‌توان اندازه و نیز زاویه‌ی  $\lambda$  را ساخت. ولتاژ فاز ماشین نیز اختلافی ۹۰ درجه با  $\lambda$  دارد که با در دست بودن اندازه و فاز شار می‌توان اندازه و فاز  $V$  را بدست آورد. در روش dtc اصول کار بر روی کنترل شار استاتور بنا نهاده شده است. با مقایسه مقدار اندازه بدست آمده از رابطه (۷) و مقایسه آن با فلوی مرجع خطای فلوی بدست می‌آید.

گشتاور موتور را می‌توان با استفاده از جریانهای اندازه‌گیری شده و شار تخمین زده شده بصورت زیر محاسبه نمود:

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (i_{qs} \lambda_{ds} - i_{ds} \lambda_{qs}) \quad (8)$$

مقدار فلوی محاسبه شده و نیز مقدار گشتاور تخمین زده شده با مقادیر مرجع مقایسه شده و حاصل مقایسه‌ها به پنجره‌های هیستریزس داده می‌شود. منطق حاکم بر پنجره‌های هیستریزس در جداول ۱ و ۲ آمده است. از روی این

خطاها و نیز سکتور مربوط به فلوی استاتور حالات سوئیچینگ سوئیچهای قدرت انتخاب می‌شوند. که در بخش بعدی به نحوه انتخاب حالات سوئیچینگ خواهیم پرداخت.

جدول ۱. منطق حاکم بر پنجره هیستریزس فلوی

شرایط	$S_\lambda$
$\lambda^* - \lambda > \delta\lambda_e$	۱
$\lambda^* - \lambda < \delta\lambda_e$	۰

شرایط	$S_T$
$(T_e^* - T_e) > \delta T_e$	۱
$\delta T_e < (T_e^* - T_e) < \delta T_e$	۰
$(T_e^* - T_e) < -\delta T_e$	-۱

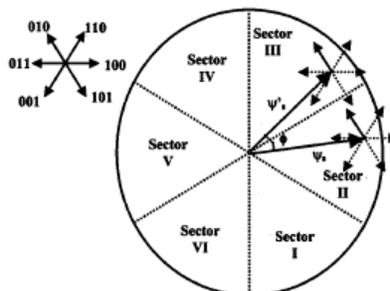
### ۲-۳- حالات سوئیچینگ اینورتر

برای کنترل ولتاژ در روش DTC از اینورتر ولتاژ استفاده می‌کنیم. حالات سوئیچینگ اینورتر از روی خطاهای فلوی و گشتاور از روی جدول سوئیچینگ تعیین می‌شود (جدول ۳).

جدول ۳. انتخاب سوئیچها با توجه به خطاهای شار و گشتاور

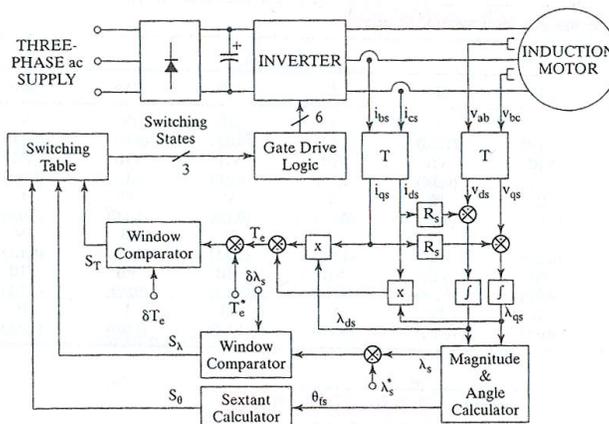
سکتور	$\theta_e$	<1>	<2>	<3>	<4>	<5>	<6>
		$(\frac{\pi}{3}, \frac{2\pi}{3})$	$(0, \frac{\pi}{3})$	$(-\frac{\pi}{3}, 0)$	$(-\frac{2\pi}{3}, -\frac{\pi}{3})$	$(-\pi, -\frac{2\pi}{3})$	$(\frac{2\pi}{3}, \pi)$
$S_\lambda = 1$	$S_T = 1$	110	100	101	001	011	010
	$S_T = 0$	111	000	111	000	111	000
	$S_T = -1$	101	001	011	010	110	100
$S_\lambda = 0$	$S_T = 1$	010	110	100	101	001	011
	$S_T = 0$	000	111	000	111	000	111
	$S_T = -1$	001	011	010	110	100	010

با انتخاب هر کدام از بردارهای ولتاژ جدول ۳ می‌توان ولتاژهایی با زاویه‌های ۶۰ درجه نسبت به هم ساخت. الگوریتم کار به این صورت است که با توجه به خطاهای فلوی و گشتاور و نیز سکتور مربوط به روتور که از روی زاویه استاتور محاسبه می‌شود بردار مناسب برای اصلاح خطاها انتخاب می‌شود (شکل ۱). نا گفته پیداست که حالات کلید زنی اینورتر ولتاژ محدود می‌باشد، بنابراین ولتاژ استاتور بصورت گسسته تغییر خواهد کرد. اما با توجه به انتگرال گیری که از ولتاژ استاتور برای ساخت فلوی انجام می‌شود شار استاتور پیوسته و تقریباً یکنواخت می‌باشد. برای ایجاد ولتاژی بین دو حالت بایستی بصورت ترکیبی سوئیچها را روشن و خاموش کنیم که این کار خود باعث بروز مشکلات سوئیچ زنی و کموتاسیون و نیز گرانی سوئیچ قدرتمان می‌شود.



شکل ۱. تاثیر انتخاب بردار مناسب برای اصلاح خطای شار

با این اوصاف می‌توانیم بلوک دیاگرام مربوط به روش کنترلی DTC را بصورت شکل ۲ رسم نماییم.



شکل ۲. بلوک دیاگرام کلی DTC

### ۳- شبیه‌سازی

برای شبیه‌سازی دتc از مدل موتور القائی [3] که معادلات آن در مرجع ساکن نوشته شده است استفاده می‌کنیم. در شبیه‌سازی انجام یافته برای موتور و نیز بلوکهای DTC از انتگرالگیرهای گسسته بجای انتگرالگیر پیوسته استفاده می‌کنیم. حسن استفاده از انتگرالگیرهای گسسته افزایش سرعت شبیه‌سازی با انتخاب گام محاسباتی ثابت  $1e-5$  ثانیه و در نتیجه داشتن جوابهای بهتر می‌باشد. مقادیر استفاده شده موتور القایی برای شبیه‌سازی در جدول ۴ آمده است. برای ساخت جدول انتخاب حالات سوئیچهای قدرت و نیز تعیین سکتور فلوی استاتور برای تشخیص حالات بعدی سوئیچ زنی ( $S_0$ ) از S-function استفاده شده است.

جدول ۴. مقادیر موتور سه اسب مورد آزمایش

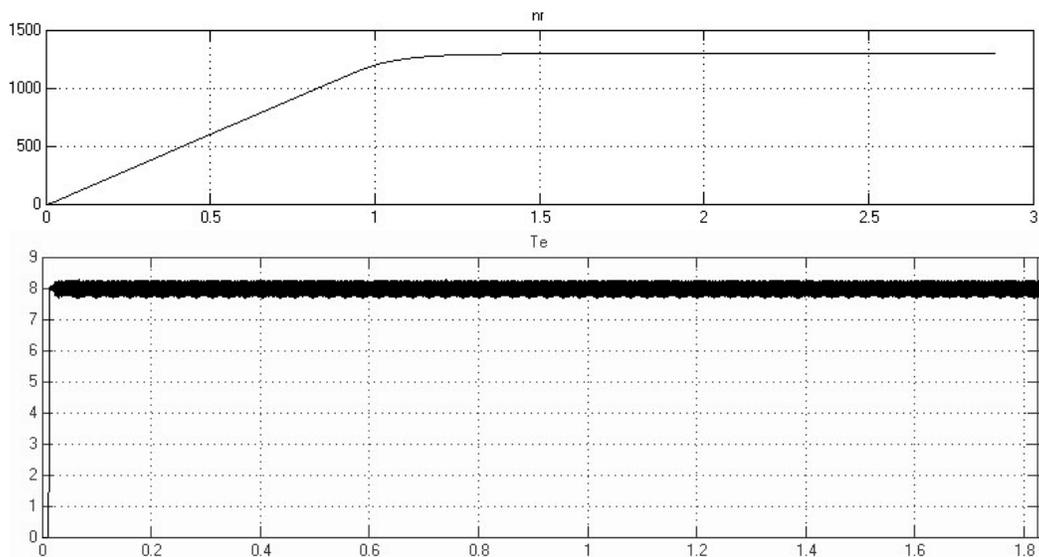
hp	۳	$I_{B(abc)}$	۵٫۸	$X_M$	۲۶/۱۳
Volts	۲۲۰	$r_s$	۰/۴۳۵	$r'_r$	۰/۸۱۶
rpm	۱۷۱۰	$X_{ls}$	۰/۷۵۴	J	۰/۰۸۹
$T_n$	۱۱/۹	$X'_{lr}$	۰/۷۵۴		

مقدار گشتاور مرج ۸ نیوتن متر در نظر گرفته می‌شود. شار استاتور در نزدیکی‌های مقدار نامی (۰/۳۵) انتخاب می‌گردد. گشتاور خروجی موتور در شکل ۶ آمده است. فلوی استاتور در شکل ۷ رسم شده است. همانطوریکه در شکلهای ۸ و ۹ مشاهده می‌شود گشتاور و فلوی دارای ریبیل نسبتاً بالای می‌باشند. که این خود از مشکلات اساسی روش DTC بشمار می‌آید.

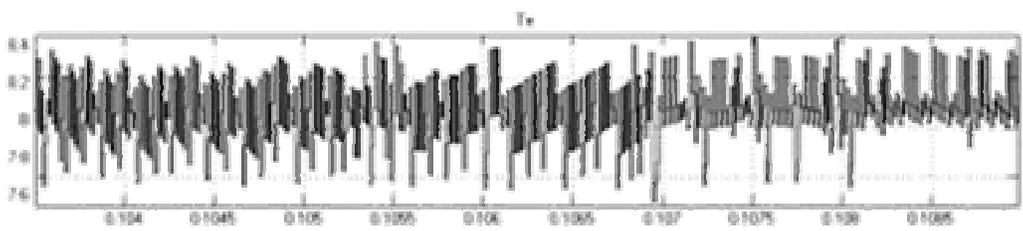
در شکل ۶ تغییرات فلوی دیده می‌شود. فلوی ماشین نیز همانند گشتاور آن در حول و حوش مقدار مرجع با توجه به تنظیمات پنجره هیستریزس در حال نوسان کردن می‌باشد. مقدار فلوی بعد از چند سوئیچ زنی به مقدار مرجع خود می‌رسد. با توجه به شکل گشتاور خروجی در شکل ۷ مشاهده می‌شود که گشتاور مقدار مرجع را بخوبی دنبال می‌کند اما مقدار سرعت بخاطر عدم وجود حلقه کنترل سرعت کمتر از مقدار نامی ماشین می‌باشد. بعبارت دیگر مقدار گشتاور خروجی در یک سرعت پایین‌تر در موتور تولید می‌شود، در این حالت موتور در ناحیه ولتاژ ثابت کار می‌کند. در شکل ۸ نمای بزرگ شده شکل موج گشتاور مشاهده می‌شود. در شکل ۹ نمای بزرگ شده فلوی مشاهده می‌شود. در شکل ۱۰ جریانهای استاتور و روتور ماشین نمایش داده شده است.

در شکل ۱۱ یک گشتاور پالسی با دامنه ۱۱ نیوتن‌متر به عنوان گشتاور مرجع به کنترل کننده DTC اعمال شده در این حالت موتور همانطوریکه در شکل مشاهده می‌شود به خوبی مقدار مرجع را دنبال می‌کند.

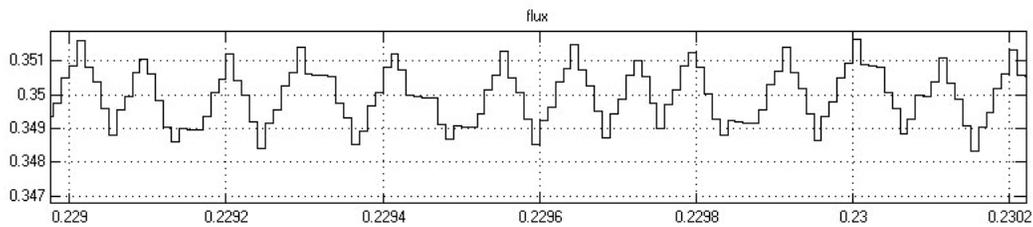




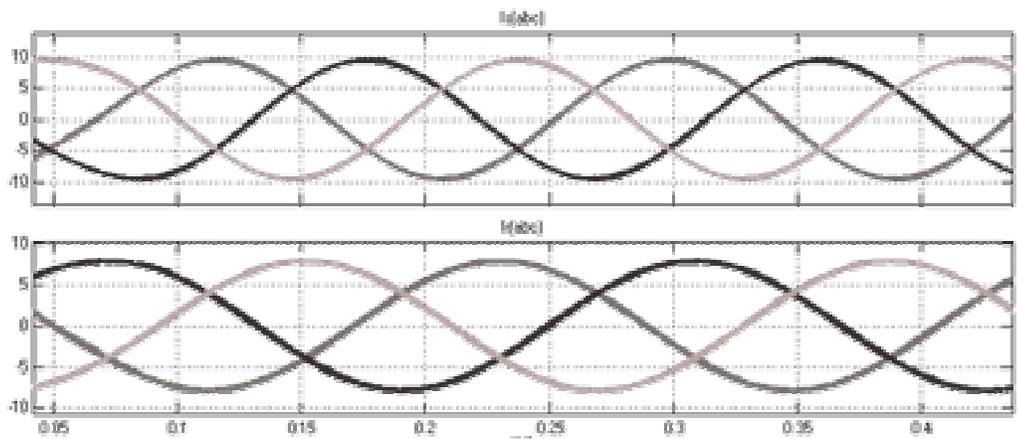
شکل ۷. منحنی تغییرات گشتاور و سرعت خروجی موتور با گشتاور مرجع ۱۱/۵ نیوتن



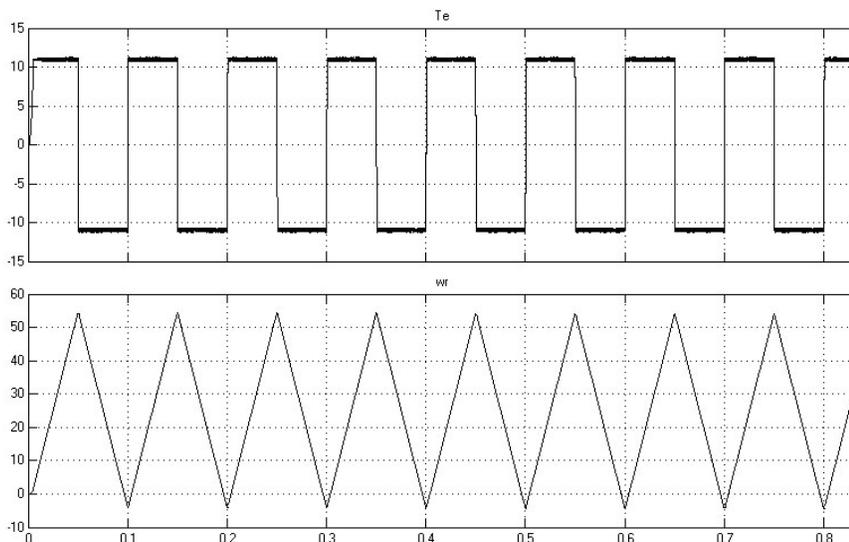
شکل ۸. نمای بزرگ شده گشتاور



شکل ۹. نمای بزرگ شده منحنی تغییرات فلوی موتور



شکل ۱۰. شکل موج جریانهای استاتور و روتور موتور القایی



شکل ۱۱. منحنی تغییرات سرعت و گشتاور با گشتاور مرجع پالسی ۱۱ نیوتن متر

### نتیجه‌گیری

کنترل مستقیم گشتاور به خاطر سادگی و سرعت بالایش در پاسخ به تغییرات گشتاور مرجع یکی از کارآمدترین روشهای کنترل ماشینهای الکتریکی بشمار می آید، که می‌توان از آن برای کنترل انواع ماشینهای الکتریکی استفاده کرد. در این مقاله سعی بر آن داشتیم تا به بررسی نحوه عملکرد و نیز شبیه سازی کنترل DTC بپردازیم. سرعت بالا در پاسخ به تغییرات گشتاور، سادگی اجرا، عدم وابستگی به پارامترهای ماشین (در این روش فقط به  $I_s$  نیاز داریم) و نیاز به محاسبات کم از مزایای این روش کنترل می‌باشد. از جمله معایب این روش هم می‌توان به مشکلات احتمالی در هنگام راه‌اندازی، ریپل بالای گشتاور و شار، و نیاز به تخمینگر شار و گشتاور را ذکر کرد.

### مراجع

- [1] I.Takashi and T.noguchi, "A new quick-response and high-efficiency control strategy of an induction motor." IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. IA-22, pp.820-827, Sept./Oct. 1986.
- [2] R.krishnan, "Electric Motor Drives", Prentice in hall com., 2001.
- [3] Chee-Mun ong, "Dynamic simulation of electric machinery," Prentice in hall com., 1998.
- [4] Nik Rumzi Nik Idris, "An Improved Stator Flux Estimation in Steady-State Operation for Direct Torque Control of Induction Machines," IEEE Trans. Ind. Applicant., vol. 38, pp.110-116, Jan./Feb. 2002.
- [5] Romeo Ortega, Nikita Barabanov, and Gerardo Escobar Valderrama "Direct Torque Control of Induction Motors: Stability Analysis and Performance Improvement" IEEE Trans. Auto. Control. vol. 46, pp. 1209-2001, NO.8, AUGUST 2001