

## بهبود کارآیی محرکه DTC ماشین القایی با ابکارگیری تئوری قطعات فازی

محمد مهدی رضایی سید بهروز مجیدی سید مجتبی میرسلیم  
دانشکده مهندسی برق، قطب علمی قدرت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)

واژه‌های کلیدی: موتور القایی، DTC، منطق فازی

### چکیده

انتخاب مناسب بردارهای ولتاژ، عاملی کلیدی در کاهش ریپل شار و گشتاور محرکه کنترل مستقیم گشتاور مرسوم بشمار می‌آید. در این محرکه‌ها، با توجه به فرمان شار و گشتاور و همچنین موقعیت بردار فضایی شار دربرگیرنده استاتور، مناسب‌ترین بردار ولتاژ از جدول بردارهای سوئیچ‌زنی ولتاژ انتخاب شده و به ماشین اعمال می‌گردد. اما بررسی‌ها نشان می‌دهد با تغییر موقعیت بردار فضایی شار دربرگیرنده استاتور در هر قطاع مولفه‌های شارساز و گشتاورساز بردارهای ولتاژ موجود در این جدول تغییرات زیادی دارد. با توجه به کاهش تاثیر اعمال این بردارها، بروز ریپل شار و گشتاور بدیهی بنظر می‌رسد. در این مقاله یک روش جدید مبتنی بر منطق فازی بمنظور بهبود کارایی محرکه کنترل مستقیم گشتاور ماشین القایی پیشنهاد شده است. با شبیه سازی محرکه کنترل مستقیم گشتاور مرسوم و محرکه پیشنهادی، ریپل این دو محرکه با یکدیگر مقایسه گردیده است. نتایج شبیه سازی حاکی از آن است که علاوه بر کاهش چشمگیر ریپل شار و گشتاور، فرکانس سوئیچ‌زنی اینورتر بدون افزایش قابل ملاحظه‌ای تثبیت گردیده است.

### ۱- مقدمه

در مقایسه با روش کنترل برداری، روش کنترل مستقیم گشتاور محاسن زیادی دارد؛ برخی از این محاسن عبارتند از کاهش وابستگی سیستم کنترل به پارامترهای ماشین، طراحی و پیاده‌سازی ساده‌تر و پاسخ گشتاور سریع‌تر. علاوه بر آن در کنترل مستقیم گشتاور به کنترل کننده‌های جریان نیازی وجود ندارد، چراکه در این محرکه‌ها با توجه به خطای شار دربرگیرنده و گشتاور الکترومغناطیسی، بهترین بردار ولتاژ سوئیچ‌زنی انتخاب و به ماشین اعمال می‌شود [۱-۲]. ایده اصلی کنترل مستقیم گشتاور را می‌توان نوعی کنترل لغزشی درنظر گرفت، زیرا در شرایطی که دامنه شار دربرگیرنده استاتور ثابت است، رنج تغییرات گشتاور متناسب است با لغزش لحظه‌ای بین بردار فضایی شار دربرگیرنده استاتور و بردار فضایی شار دربرگیرنده روتور [۳]. بنابراین کنترل لغزش بین بردارهای فضایی شار دربرگیرنده استاتور و روتور مستقیماً موجب کنترل گشتاور خواهد بود.

در روش کنترل مستقیم گشتاور از دو مقایسه کننده هیستریسز بمنظور تنظیم مستقیم گشتاور و شار دربرگیرنده استفاده می‌شود. پهنای باند این مقایسه کننده‌ها تعیین کننده محدوده

## بیست و سومین کنفرانس بین‌المللی برق

فرکانس، موجب کاهش ریپل شار و گشتاور محرکه کنترل مستقیم گشتاور می‌شود. بنابراین پس از آنکه در بخش دوم مبنای روش کنترل مستقیم گشتاور بصورت خلاصه مرور گردید، در بخش سوم، ریپل شار و گشتاور مورد توجه قرار گرفته و منشاء آن بررسی خواهد شد. منطق فازی موضوعی است که در بخش چهارم بطور خلاصه مرور شده است. در بخش پنجم، به تشریح روش پیشنهادی پرداخته شده است. در بخش ششم، با استفاده از مدل محرکه کنترل مستقیم گشتاور، روش پیشنهادی مورد آزمایش قرار گرفته و نتایج حالت مانا و گذرای آن، با روش‌های دیگر مقایسه می‌گردد و در نهایت بخش هفتم ارائه دهنده نتیجه‌گیری کلی این روش می‌باشد.

### ۲- کنترل مستقیم گشتاور

شکل (۱) نمودار بلوکی یک محرکه‌ی کنترل مستقیم گشتاور را نشان می‌دهد. در این سیستم، با استفاده از متغیرهای استاتور مقادیر لحظه‌ای شار و گشتاور تخمین زده می‌شود. بردار فضایی شار دربرگیرنده استاتور را می‌توان با استفاده از ولتاژها و جریان‌های اندازه‌گیری شده و با توجه به معادلات ولتاژ استاتور در دستگاه مرجع ساکن، مطابق رابطه (۱) محاسبه نمود.

$$\bar{\psi}_s = \int (\bar{u}_s - R_s \bar{i}_s) dt \quad (1)$$

که در آن  $\bar{u}_s$ ،  $\bar{i}_s$  و  $R_s$  به ترتیب بردار فضایی ولتاژ، بردار فضایی جریان، بردار فضایی شار دربرگیرنده و مقاومت استاتور می‌باشند. گشتاور الکترومغناطیسی نیز با توجه به شار دربرگیرنده‌ی محاسبه شده در رابطه (۱) و با استفاده از جریان‌های اندازه‌گیری شده استاتور، مطابق رابطه (۴) محاسبه می‌گردد.

$$\psi_{sD} = \int (u_{sD} - R_s i_{sD}) dt \quad (2)$$

$$\psi_{sQ} = \int (u_{sQ} - R_s i_{sQ}) dt \quad (3)$$

$$T_e = \frac{3}{2} p (\bar{\psi}_s \times \bar{i}_s) = \frac{3}{2} p (\psi_{sd} i_{sq} - \psi_{sq} i_{sd}) \quad (4)$$

در این روابط  $i_{sD}$ ،  $i_{sQ}$ ،  $u_{sD}$ ،  $u_{sQ}$ ،  $\psi_{sD}$  و  $\psi_{sQ}$  به ترتیب مولفه‌های جریان ولتاژ و شار دربرگیرنده استاتور در دستگاه مرجع ساکن می‌باشند.  $T_e$  گشتاور الکترومغناطیسی و  $p$  نیز تعداد زوج قطب‌های ماشین می‌باشد.

مجاز نوسانات شار و گشتاور ماشین است. مادامی که شار و گشتاور ماشین در این محدوده قرار دارند ولتاژهای سوئیچ-زنی صفر به ماشین اعمال می‌گردد. اما هنگامی که یکی از این دو پارامتر به مرز باند برسد و یا محدوده مجاز باند مقایسه کننده هیستریز را نقض کند، با توجه به قطعی که بردار فضایی شار دربرگیرنده استاتور در آن قرار دارد، بهترین بردار ولتاژ انتخاب و به ماشین اعمال می‌شود. از اینرو روش کنترل مستقیم گشتاور را می‌توان یک روش کنترل BangBang نیز در نظر گرفت [۴]. از آنجا که بردارهای سوئیچ‌زنی ولتاژ استاتور دقیقاً بردارهای ولتاژ مورد نیاز برای ایجاد تغییرات مطلوب در شار دربرگیرنده استاتور و گشتاور الکترومغناطیسی نیستند، اعوجاج شار و گشتاور در محرکه‌های کنترل مستقیم گشتاور گریز ناپذیر خواهد بود.

روش‌هایی جهت کاهش اعوجاج شار دربرگیرنده و گشتاور الکترومغناطیسی پیشنهاد شده است که برخی نیازمند استفاده از سوئیچ‌های با فرکانس بالا [۶-۴] و برخی نیازمند استفاده از اینورتر با ساختار متفاوت است [۸-۷]. افزایش فرکانس سوئیچ‌زنی در نگاه اول مطلوب به نظر می‌رسد زیرا باعث کاهش اعوجاج گشتاور می‌شود. اما با افزایش فرکانس سوئیچ‌زنی علاوه بر افزایش فشار وارد شده بر سوئیچ‌ها، تلفات سوئیچ‌زنی افزایش می‌یابد و به همین دلیل در کاربردهای توان بالا ترجیح داده می‌شود تا حد امکان سوئیچ‌ها در فرکانس پایین‌تری کار کنند. علاوه بر آن هنگامی که از سوئیچ‌های فرکانس بالا استفاده می‌شود، نیاز به یک پردازشگر سریع‌تر از سوئیچ‌ها ضروری است چراکه در فرکانس‌های بالا زمان محاسبات بسیار کاهش می‌یابد. از لحاظ اقتصادی نیز بکارگیری سوئیچ‌ها در فرکانس‌های بالا مطلوب نیست زیرا از چند جهت باعث افزایش قیمت می‌شود. وقتی از روش تغییر ساختار اینورتر استفاده می‌شود، در ساختار اینورتر سوئیچ‌های بیشتری استفاده می‌شود و این علاوه بر افزایش پیچیدگی، باعث افزایش قیمت اینورتر می‌شود.

در این مقاله با استفاده از منطق فازی روش جدیدی پیشنهاد شده است که بدون تغییر ساختار اینورتر و بدون افزایش

**بیست و سومین کنفرانس بین‌المللی برق**

که در آن ولتاژ لینک DC است. به ازای  $k=7$  و  $k=8$   $\bar{u}_s = \bar{u}_k = 0$  است و بنابراین استاتور اتصال کوتاه می‌شود. مطابق شکل (۲)، بردارهای ولتاژ سوئیچ‌زنی فعال استاتور چنان در فضا قرار دارند که هر کدام از آنها با بردار فضایی ولتاژ همجوار  $60^\circ$  درجه فاصله دارد و بنابراین شش بردار ولتاژ سوئیچ‌زنی فعال فضا را به شش قطاع مساوی  $60^\circ$  درجه‌ای تقسیم می‌کنند. هر قطاع چنان انتخاب می‌شود که بردارهای فضایی ولتاژ درست در مرکز آن قرار داشته باشند. بطور مثال با توجه به قرار گرفتن بردار  $\bar{u}_1$  در زاویه صفر درجه نسبت به محور  $sD$  دستگاه مرجع ساکن استاتور قطاع مربوط به آن از  $-30^\circ$  درجه تا  $+30^\circ$  گسترش دارد. با فرض آنکه بردار فضایی شار دربرگیرنده استاتور در قطاع  $k$ م قرار دارد، با توجه به رابطه (۵)، اگر افزایش دامنه بردار فضایی شار دربرگیرنده استاتور مد نظر باشد، اعمال بردارهای ولتاژ  $\bar{u}_{k-1}$ ،  $\bar{u}_k$  و  $\bar{u}_{k+1}$  (بردارهای ولتاژی که جهت آنها از روتور به سمت انتهای بردار فضایی شار دربرگیرنده استاتور است)، باعث افزایش دامنه بردار فضایی شار دربرگیرنده استاتور و اعمال بردارهای  $\bar{u}_{k+2}$ ،  $\bar{u}_{k-2}$  و  $\bar{u}_{k-3}$  (بردارهای ولتاژی که جهت آنها از انتهای بردار فضایی شار دربرگیرنده استاتور به سمت روتور است)، موجب کاهش دامنه بردار فضایی شار دربرگیرنده استاتور می‌شود. با فرض آنکه جهت مثبت جهت مثلثاتی باشد، با اعمال بردارهای ولتاژ  $\bar{u}_{k+1}$  و  $\bar{u}_{k+2}$ ، بردار فضایی شار دربرگیرنده استاتور در جهت مثبت سرعت گرفته و در نتیجه گشتاور افزایش خواهد یافت.

در محرکه‌های DTC می‌توان با انتخاب مناسب حالت سوئیچ-زنی اینورتر، شار دربرگیرنده استاتور و گشتاور الکترومغناطیسی را مستقیماً و بصورت مستقل از یکدیگر کنترل نمود. اگر بمنظور سادگی از افت اهمی ولتاژ چشم-پوشی شود، با توجه به معادله ولتاژ استاتور می‌توان می‌توان به رابطه  $\bar{u}_s = d\bar{\psi}_s/dt$  رسید و با توجه به آن می‌توان نوشت

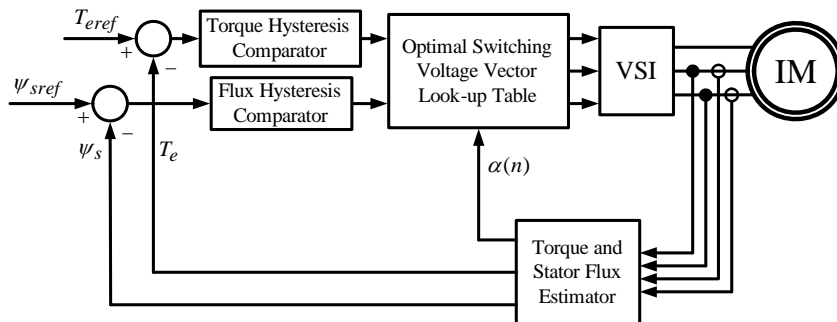
$$\Delta\bar{\psi}_s = \bar{u}_s \Delta t \quad (5)$$

بنابراین در مدت زمان کوتاه  $\Delta t$  به ماشین اعمال شده است، می‌توان بردار فضایی شار دربرگیرنده استاتور را به اندازه  $\Delta\bar{\psi}_s$  در جهت بردار فضایی ولتاژ استاتور و با سرعتی متناسب با اندازه آن جابجا نمود. با توجه به مقادیر مرجع شار و گشتاور، با انتخاب مرحله به مرحله بردار فضایی ولتاژ استاتور مناسب، می‌توان تغییرات لازم را در اندازه و زاویه بردار فضایی شار دربرگیرنده استاتور بوجود آورد. با تغییر اندازه بردار فضایی شار، شار ماشین و با تغییر در زاویه بردار فضایی شار، گشتاور ماشین بصورت مجزا کنترل می‌گردد.

با در نظر گرفتن یک اینورتر منبع ولتاژ شش پالسه می‌توان هشت حالت سوئیچ‌زنی و در نتیجه هشت بردار فضایی ولتاژ استاتور متصور شد. شش بردار فضایی  $(u_1, u_2, \dots, u_6)$  از این هشت بردار فضایی ولتاژ استاتور غیر صفر (فعال) و دو بردار فضایی ولتاژ استاتور باقی مانده  $(u_7, u_8)$  بردارهای فضایی صفر (غیر فعال) هستند [۱، ۱۶]. شش بردار فضایی ولتاژ غیر صفر استاتور را می‌توان توسط رابطه زیر بیان نمود.

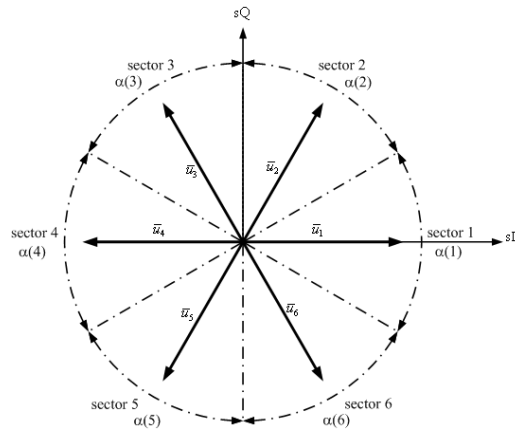
$$\bar{u}_s = \bar{u}_k = \frac{2}{3} U_d \exp[j(k-1)\pi/3], \quad (6)$$

$$k = 1, 2, \dots, 6.$$



شکل ۱: نمای کلی یک محرکه کنترل مستقیم گشتاور

**بیست و سومین کنفرانس بین‌المللی برق**



شکل ۲: قطاع‌ها و بردارهای ولتاژ شش‌گانه

الکترومغناطیسی  $(dT_e)$ ، بردارهای ولتاژ سوئیچ‌زنی بهینه را تعیین می‌کند.

جدول ۱: جدول بردارهای ولتاژ بهینه

$d\psi_s$	$dT_e$	sector					
		1	2	3	4	5	6
1	1	$u_2$	$u_3$	$u_4$	$u_5$	$u_6$	$u_1$
	0	$u_0$	$u_7$	$u_0$	$u_7$	$u_0$	$u_7$
	-1	$u_6$	$u_1$	$u_2$	$u_3$	$u_4$	$u_5$
-1	1	$u_3$	$u_4$	$u_5$	$u_6$	$u_1$	$u_2$
	0	$u_7$	$u_0$	$u_7$	$u_0$	$u_7$	$u_0$
	-1	$u_5$	$u_6$	$u_1$	$u_2$	$u_3$	$u_4$

اگر افزایش دامنه شار استاتور مد نظر باشد،  $d\psi_s = 1$  و اگر کاهش دامنه شار استاتور مد نظر باشد،  $d\psi_s = -1$  خواهد بود. این نحوه انتخاب با توجه به این موضوع است که خروجی مقایسه‌کننده هیستریسز دو سطحی شار دربرگیرنده، دیجیتالی بوده و برابر ۱ یا -۱ است.

$$\begin{cases} d\psi_s = 1 & \text{if } |\bar{\psi}_s| \leq |\bar{\psi}_{sref}| - \Delta\psi_s \\ d\psi_s = -1 & \text{if } |\bar{\psi}_s| \geq |\bar{\psi}_{sref}| + \Delta\psi_s \end{cases} \quad (7)$$

اگر افزایش گشتاور الکترومغناطیسی ماشین مد نظر باشد،  $dT_e = 1$  و اگر کاهش گشتاور الکترومغناطیسی ماشین مد نظر باشد،  $dT_e = -1$  و اگر مقدار گشتاور واقعی ماشین با مقدار مرجع گشتاور برابر باشد  $dT_e = 0$  خواهد بود. این نحوه انتخاب نیز با توجه به این موضوع است که خروجی

در محرکه‌های کنترل مستقیم گشتاور، پس از تخمین شار و گشتاور ماشین، از دو مقایسه‌کننده هیستریسز بمنظور تنظیم مستقیم گشتاور و شار دربرگیرنده استفاده می‌شود. پهنای باند این مقایسه‌کننده‌ها تعیین‌کننده محدوده مجاز نوسانات شار و گشتاور ماشین است. مادامی که شار و گشتاور ماشین در این محدوده قرار دارند ولتاژهای سوئیچ‌زنی صفر به ماشین اعمال می‌گردد. اما هنگامی که یکی از این دو پارامتر به مرز باند برسد و یا محدوده مجاز باند مقایسه‌کننده هیستریسز را نقض کند، با توجه به قطاعی که بردار فضایی شار دربرگیرنده استاتور در آن قرار دارد، بهترین بردار ولتاژ انتخاب و به ماشین اعمال می‌شود [۱-۲].

فرمان گشتاور محدود به سه حالت است، افزایش (گشتاور مثبت)، کاهش (گشتاور منفی) و تثبیت (گشتاور صفر). بطور مشابه فرمان شار نیز محدود به دو حالت است، افزایش دامنه شار دربرگیرنده استاتور و کاهش آن. با توجه به فرمان‌های شار و گشتاور و قطاعی که بردار فضایی شار دربرگیرنده استاتور در آن قرار دارد می‌توان روابط بدست آمده را در یک جدول به نام جدول انتخاب بردارهای ولتاژ سوئیچ‌زنی بهینه طبقه‌بندی نمود. این جدول به ازای همه موقعیت‌های ممکن بردار فضایی شار دربرگیرنده استاتور و فرمان‌های کنترل‌کننده (خطای دامنه شار دربرگیرنده  $d\psi_s$  و خطای گشتاور

### بیست و سومین کنفرانس بین‌المللی برق

قطاع، متفاوت است. در ابتدای قطاع ششم مولفه شار ساز بردار ولتاژ  $\bar{u}_1$  صفر است و هرچه بردار فضایی شار دربرگیرنده استاتور به انتهای قطاع نزدیک می‌شود این مولفه افزایش می‌یابد. از طرف دیگر مولفه گشتاور ساز بردار ولتاژ  $\bar{u}_1$  در ابتدای قطاع ششم بیشینه است، در حالی که هرچه بردار فضایی شار دربرگیرنده استاتور به انتهای قطاع نزدیک می‌شود این مولفه کاهش می‌یابد.

تغییراتی که در هر قطاع می‌بایست در گشتاور و شار دربرگیرنده استاتور ایجاد شود چهار حالت ((FI, TI)، ((FI, TD)، ((FD, TI) و ((FD, TD) می‌باشد. بنابراین بردارهای ولتاژ غیر صفری که با توجه به خطای شار و گشتاور در هر قطاع می‌بایست به ماشین اعمال شود، چهار بردار است که هر یک آنها یکی از حالات فوق را ارضا می‌کند. بطور مثال در قطاع ششم بردار ولتاژ  $\bar{u}_1$  مطابق شکل (۳)، دارای دو مولفه نشان داده شده است و با توجه به این مولفه‌ها اعمال این بردار ولتاژ به استاتور موجب افزایش شار و گشتاور می‌شود. این مشکل یکی از مهمترین منابع تولید ریپل گشتاور و شار در محرکه‌های DTC در حالت کار دائمی و بویژه در هنگام راه اندازی است، جایی که هم دامنه بردار فضایی شار دربرگیرنده استاتور و هم گشتاور الکترومغناطیسی ماشین به شدت در حال افزایش است. بمنظور درک بهتر موضوع فرض می‌شود مقادیر واقعی شار دربرگیرنده و گشتاور از مقادیر مرجعشان کمتر بوده ((FI, TI) و بردار فضایی شار دربرگیرنده استاتور در انتهای قطاع ششم قرار داشته باشد. در این حالت می‌بایست در هر قطاع بردار ولتاژی انتخاب و اعمال گردد که موجب افزایش شار و گشتاور می‌شود.

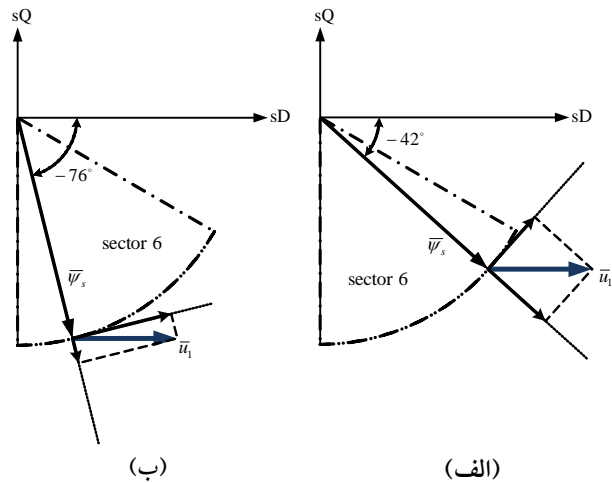
در قطاع ششم با توجه به مولفه‌های بردار ولتاژ  $\bar{u}_1$  اعمال این بردار ولتاژ بهترین انتخاب است. اما هرچه بردار فضایی شار دربرگیرنده استاتور در مسیر حرکت خود به انتهای قطاع ششم نزدیک می‌شود، تاثیر اعمال بردار ولتاژ  $\bar{u}_1$  بر افزایش شار بیشتر و تاثیر آن بر افزایش گشتاور کمتر خواهد شد. با رسیدن بردار فضایی شار دربرگیرنده استاتور به مرز بین قطاع‌های اول و ششم و ورود آن به قطاع اول، بدون آنکه در فرمان شار و گشتاور تغییری ایجاد شده باشد، تنها به دلیل

مقایسه کننده هیستریسیز سه سطحی گشتاور الکترومغناطیسی، دیجیتالی بوده و برابر ۱ یا -۱ و یا صفر است.

$$\begin{cases} dT_e = 1 & \text{if } |T_e| \leq |T_{eref}| - \Delta T_e \\ dT_e = 0 & \text{if } |T_{eref}| - \Delta T_e \leq |T_e| \leq |T_{eref}| + \Delta T_e \\ dT_e = -1 & \text{if } |T_e| \geq |T_{eref}| + \Delta T_e \end{cases} \quad (8)$$

### ۳- ریپل شار و گشتاور

مطابق آنچه در بخش ۲ بیان شد، بردار ولتاژ اعمالی به استاتور متناسب است با بردار تغییرات شار دربرگیرنده استاتور و همانطور که در شکل (۳) نشان داده شده است، مولفه مماسی بردار ولتاژ اعمالی (مولفه‌ای که بر محیط دایره به شعاع  $|\bar{\psi}_s|$  مماس است)، مولفه گشتاور ساز نام داشته و تنها موجب تغییر زاویه بردار فضایی شار دربرگیرنده استاتور و بنابراین تغییر گشتاور خواهد شد. مولفه قائم بردار ولتاژ اعمالی (مولفه‌ای که بر محیط دایره به شعاع  $|\bar{\psi}_s|$  عمود است)، مولفه شار ساز نام داشته و تنها بر دامنه شار دربرگیرنده استاتور تاثیر خواهد گذاشت.



شکل ۳. مولفه‌های شار ساز و گشتاور ساز بردارهای ولتاژ در قطاع ششم

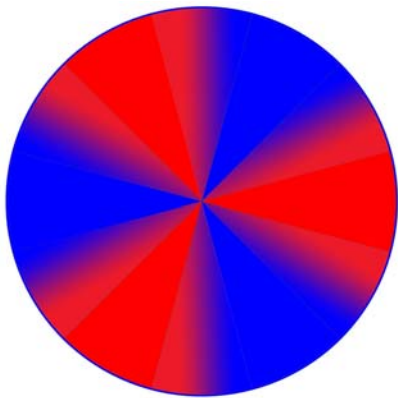
نکته قابل توجهی که وجود دارد این موضوع است که با توجه به محل قرار گرفتن بردار فضایی شار دربرگیرنده استاتور در هر قطاع، تاثیر اعمال یک بردار ولتاژ متفاوت خواهد بود. بطور مثال مطابق شکل (۳) تاثیر اعمال بردار ولتاژ  $\bar{u}_1$  بر شار و گشتاور ماشین در ابتدای قطاع ششم با تاثیر آن در انتهای

### بیست و سومین کنفرانس بین‌المللی برق

بمنظور حل این مشکل و کاهش ریپل‌های ناشی از آن می‌بایست به نحوی در نزدیکی مرز بین قطعات‌ها بردارهای ولتاژ اعمالی تغییر یابند، بطوری که گسستگی بین بردارهای ولتاژ هنگام عبور بردار فضایی شار دربرگیرنده استاتور از یک قطعه به قطعه دیگر از بین رفته و تغییرات شدید مولفه‌های شار ساز و گشتاور ساز بردارهای ولتاژ اعمالی هنگام تغییر قطعه کاهش یابد. بنابراین ابتدا می‌بایست به نحوی نزدیکی بردار فضایی شار دربرگیرنده استاتور به مرز بین قطعات‌ها تشخیص داده شود و با توجه به آن تغییرات لازم در بردارهای ولتاژ بوجود آید. راه حل پیشنهادی استفاده از یک کنترل کننده فازی است.

#### ۴- قطعات فازی

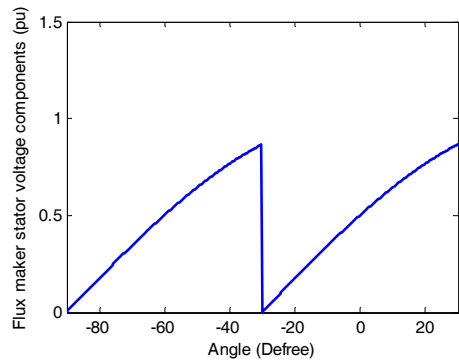
در این روش جدید، مرز بندی بین قطعات‌ها از حالت گسسته خارج و در عوض بصورت فازی در نظر گرفته می‌شود. یک کنترل کننده فازی می‌تواند درجه عضویت بردار فضایی شار دربرگیرنده استاتور را تعیین نموده و با توجه به آن در بردارهای ولتاژ تغییرات لازم را بوجود آورد. شکل (۵) این دو نوع مرز بندی قطعات‌ها را نشان می‌دهد.



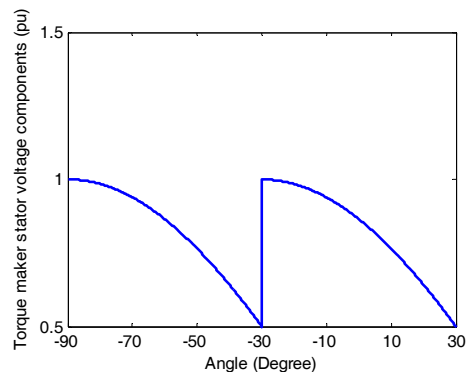
شکل ۵: قطعات فازی

در شکل (الف-۵) درجه عضویت بردار فضایی شار دربرگیرنده استاتور در هر قطعه دیجیتالی بوده و مقدار صفر یا یک دارد. اگر درجه عضویت بردار فضایی شار دربرگیرنده استاتور در یک قطعه ۱ باشد بدین معنی است که بردار فضایی شار دربرگیرنده استاتور در آن قطعه قرار دارد. در این حالت

تغییر قطعه، بردارهای ولتاژ تغییر خواهند یافت. بمنظور افزایش شار و گشتاور، به جای بردار ولتاژ  $\bar{u}_1$  که در قطعه ششم اعمال می‌شود، در قطعه اول بهترین بردار ولتاژ، بردار ولتاژ  $\bar{u}_2$  می‌باشد. شکل (۴) تاثیر اعمال بردارهای ولتاژ  $\bar{u}_1$  و  $\bar{u}_2$  بر افزایش شار و گشتاور را به ترتیب در قطعات ششم و اول، نشان می‌دهد. چنانچه مشاهده می‌شود، در مرز این دو قطعه بطور ناگهانی بردارهای ولتاژ و به تبع آن مولفه‌های گشتاور ساز و شار ساز این بردارها تغییر خواهد یافت و در نتیجه آهنگ تغییر شار و گشتاور ماشین عوض خواهد شد. این تغییر باعث ایجاد ریپل بزرگی در دامنه شار دربرگیرنده استاتور و گشتاور خواهد شد. این موضوع موجب بروز مشکل دیگری نیز خواهد شد؛ هنگامی که تاثیر بردارهای ولتاژ اعمال شده کاهش می‌یابد، مدت زمان بیشتری طول خواهد کشید تا گشتاور و شار دربرگیرنده تغییر نموده و به مقدار مرجع نزدیک شوند. در طول این مدت، با توجه به عدم تغییر فرمان شار و گشتاور، حالت سوئیچ‌زنی تغییر نیافته و بنابراین پررود سوئیچ‌زنی در این حالت افزایش می‌یابد و موجب تغییرات شدید فرکانس سوئیچ‌زنی در اینورتر می‌شود.



(الف)



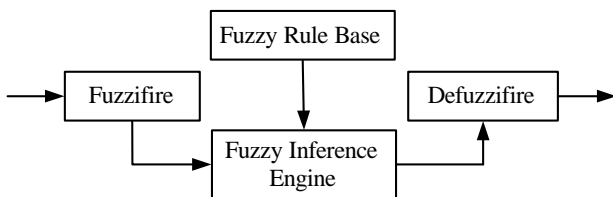
(ب)

شکل ۴: تغییرات مولفه‌های شار ساز و گشتاور ساز در قطعات ۱ و ۶

## بیست و سومین کنفرانس بین‌المللی برق

یک نزدیکتر باشد آن شیء تعلق بیشتری به آن مجموعه دارد [۹، ۱۰].

کنترل‌کننده‌های فازی بر پایه مجموعه‌های فازی طراحی می‌شوند. مطابق شکل (۶)، یک کنترل‌کننده فازی اصولاً از چهار قسمت تشکیل شده است. که دو قسمت آن وظیفه تبدیل مقادیر و پارامترها را از فضای قطعی به فضای فازی را بر عهده دارند. این چهار قسمت عبارتند از فازی‌سازی، که وظیفه تبدیل ورودی‌های کنترل‌کننده از فضای گسسته به فضای فازی را بر عهده دارد، پایگاه قوانین فازی، که از یک سری قوانین زبانی منطبق با تجربه انسانی تشکیل شده است، موتور استنتاج فازی، که بعنوان مغز یک کنترل‌کننده فازی عمل می‌کند و غیر فازی‌سازی، که بعنوان دومین مبدل مقادیر فازی‌سازی و وظیفه تبدیل ورودی‌های کنترل‌کننده از فضای فازی به فضای گسسته را بر عهده دارد.



شکل ۶: ساختار کلی یک کنترل‌کننده فازی

فازی‌سازی: کنترل‌کننده فازی مورد نظر دارای دو ورودی، مطابق روابط زیر است. در این روابط  $\tilde{\psi}_{sD}$  و  $\tilde{\psi}_{sQ}$  مقادیر نرمال شده مولفه‌های شار دربرگیرنده استاتور در دستگاه مرجع ساکن بر استاتور می‌باشند.

$$\tilde{\psi}_{sD} = \psi_{sD} / \sqrt{\psi_{sD}^2 + \psi_{sQ}^2} \quad (9)$$

$$\tilde{\psi}_{sQ} = \psi_{sQ} / \sqrt{\psi_{sD}^2 + \psi_{sQ}^2} \quad (10)$$

عمل فازی‌سازی با استفاده از توابع عضویت انجام می‌پذیرد. با توجه به ورودی‌های کنترل‌کننده طراحی شده، دو تابع عضویت خواهیم داشت که هر کدام شامل چند منحنی است. این توابع در شکل (۷) نشان داده شده‌اند.

پایگاه قوانین و روابط فازی: در منطق فازی روابط و قوانین فازی بصورت مجموعه‌ای از قوانین اگر-آنگاه تعریف می‌شود. این قوانین عبارتند از:

درجه عضویت بردار فضایی شار دربرگیرنده استاتور در دیگر قطع‌ها صفر است و به عبارت دیگر بردار فضایی شار دربرگیرنده استاتور در آن قطع‌ها قرار ندارد. اما مطابق شکل (ب-۵)، در روش پیشنهادی، درجه عضویت بردار فضایی شار دربرگیرنده استاتور در هر قطع بصورت پیوسته بوده و مقداری در بازه [۰، ۱] می‌باشد. هرچه درجه عضویت بردار فضایی شار دربرگیرنده استاتور در یک قطع به عدد یک نزدیکتر باشد، این بردار به مرکز قطع نزدیکتر است. اختلاف درجه عضویت بردار فضایی شار دربرگیرنده استاتور در هر قطع با عدد یک، بیانگر درجه عضویت این بردار در قطع‌های همجوار است.

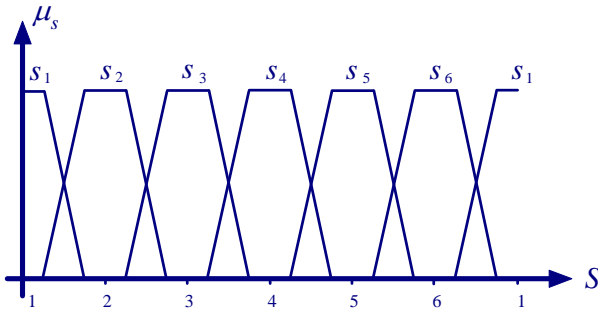
در این روش پس از تبدیل مرز بندی قطع‌ها از حالت گسسته به حالت پیوسته فازی، متناسب با درجه عضویت بردار فضایی شار دربرگیرنده استاتور در هر قطع بردارهای ولتاژ مربوط به آن قطع با توجه به مقادیر فرمان گشتاور و شار به استاتور اعمال می‌شوند. بنابراین هنگامی که درجه عضویت بردار فضایی شار دربرگیرنده استاتور در یک قطع کمتر از یک است، بردار ولتاژ اعمالی ترکیبی است از بردارهای ولتاژ بهینه مربوط به آن قطع و قطع مجاور. نحوه ترکیب بردارهای ولتاژ این دو قطع توسط درجه عضویت بردار فضایی شار دربرگیرنده استاتور در هر یک چنان تعیین می‌گردد که اندازه بردار ولتاژ همواره ثابت مانده و زاویه آن بصورت پیوسته تغییر نماید.

## ۵- طراحی کنترل‌کننده فازی

منطق فازی، با بهره‌گیری از تئوری مجموعه‌های فازی به جای مجموعه‌های گسسته (قطعی) امکان استفاده از تجربیات انسان را در حوزه ریاضیات فراهم می‌آورد. درجه عضویت هر شیء در مجموعه‌های گسسته (قطعی) بصورت دیجیتالی بوده و مقدار آن صفر یا یک است. اگر شیئی در این مجموعه‌ها وجود داشته باشد، درجه عضویت آن یک است. اما درجه عضویت هر شیء در مجموعه‌های فازی عددی در بازه [۰، ۱] است. هرچه درجه عضویت یک شیء در یک مجموعه به

**بیست و سومین کنفرانس بین المللی برق**

به فضای حقیقی منتقل شود. شکل (۸) این تابع عضویت را نشان می دهد.



شکل ۸: تابع عضویت قطعات فازی

فرایند غیر فازی سازی طبق روش های گوناگونی انجام می شود، روش هایی نظیر روش میانگین مراکز، روش میانگین مساحت، روش بیشینه، روش کمینه و ...؛ اما روشی که در این کنترل کننده بکار رفته است روش مرکز ثقل است. در این روش خروجی غیر فازی ساز مطابق رابطه زیر محاسبه می گردد.

$$S^* = \frac{\int S \max\{\min(\mu_{\psi_{sD}}, \mu_{\psi_{sQ}})\}}{\max\{\min(\mu_{\psi_{sD}}, \mu_{\psi_{sQ}})\}} \quad (11)$$

که در آن  $S^*$  شماره فازی قطعات است و مقداری پیوسته در بازه [۱,۷] می باشد. مقدار  $S^*$  تعیین کننده این واقعیت است که بردار فضایی شار دربرگیرنده استاتور بین کدام قطعات واقع شده است و چه مقدار به هر یک تعلق دارد. با توجه به میزان تعلق بردار فضایی شار دربرگیرنده استاتور به هر قطعات، مدت زمان اعمال بردارهای ولتاژ سوئیچ زنی آن قطعات تعیین می گردد.

$$\alpha_x = \{S^*\} \quad (12)$$

$$\alpha_y = \text{mod}((\alpha_x + 1), 6) \quad (13)$$

$$\beta_x = (1 + \alpha_x - S^*) \quad (14)$$

$$\beta_y = (S^* - \alpha_x) \quad (15)$$

$$T_x = \frac{\beta_x}{\sqrt{\beta_x^2 + \beta_y^2 + \beta_x \beta_y}} T_s \quad (16)$$

$$T_y = \frac{\beta_y}{\sqrt{\beta_x^2 + \beta_y^2 + \beta_x \beta_y}} T_s \quad (17)$$

Rule1: IF  $\tilde{\psi}_{sD}$  is PL and  $\tilde{\psi}_{sQ}$  is N, THEN S is  $S_1$

Rule2: IF  $\tilde{\psi}_{sD}$  is PM and  $\tilde{\psi}_{sQ}$  is P, THEN S is  $S_2$

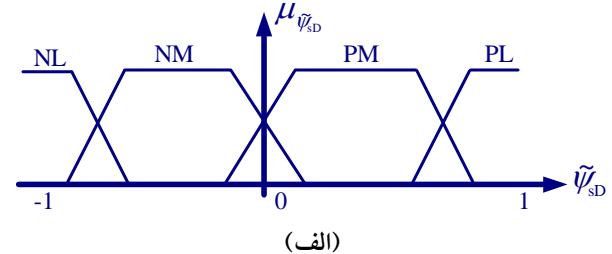
Rule3: IF  $\tilde{\psi}_{sD}$  is NM and  $\tilde{\psi}_{sQ}$  is P, THEN S is  $S_3$

Rule4: IF  $\tilde{\psi}_{sD}$  is NL and  $\tilde{\psi}_{sQ}$  is P, THEN S is  $S_4$

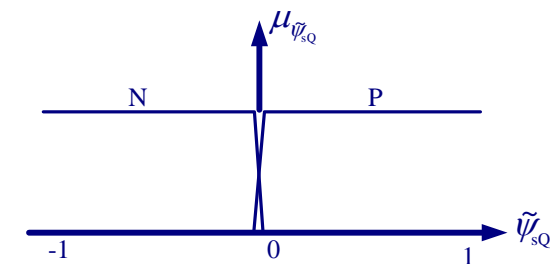
Rule5: IF  $\tilde{\psi}_{sD}$  is NM and  $\tilde{\psi}_{sQ}$  is N, THEN S is  $S_5$

Rule6: IF  $\tilde{\psi}_{sD}$  is PM and  $\tilde{\psi}_{sQ}$  is N, THEN S is  $S_6$

که در آن S خروجی کنترل کننده فازی بوده و  $S_i$  ( $i=1,2,\dots,6$ ) نام توابع عضویت قطعات شش گانه است. در این روابط PL, PM, NM, NL, N, P نیز مطابق شکل (۷) نام توابع عضویت مولفه های نرمال شده شار دربرگیرنده استاتور می باشند.



(الف)



(ب)

شکل ۷: توابع عضویت مولفه های شار استاتور

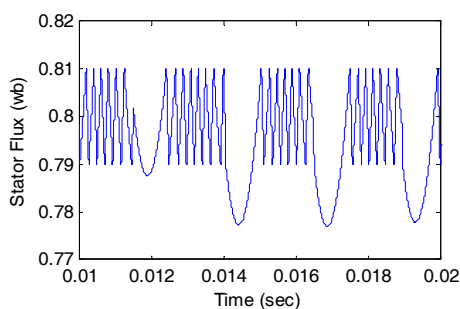
غیر فازی سازی: در نهایت موتور استنتاج فازی با توجه به خروجی فازی ساز و قوانین فازی مقدار فازی S را بعنوان نتیجه، تعیین می کند. این عدد می بایست توسط قسمت غیر فازی ساز با توجه به تابع عضویت خروجی، از فضای فازی



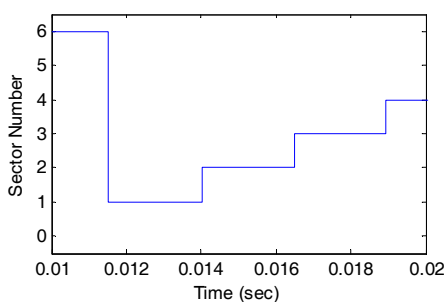
### بیست و سومین کنفرانس بین‌المللی برق

میکروثانیه است. در هنگام راه اندازی هم دامنه بردار فضایی شار دربرگیرنده استاتور و هم گشتاور الکترومغناطیسی ماشین به شدت در حال افزایش هستند، اما مولفه‌های گشتاور ساز و بویژه شار ساز بردارهای ولتاژ اعمال شده در محرکه کنترل مستقیم گشتاور مرسوم، تغییرات بسیار شدیدی دارند. این تغییرات باعث تولید ریپل‌های شدید شار و گشتاور می‌شوند. در روش بهبود یافته، با کاهش تغییرات مولفه‌های گشتاور ساز و شار ساز بردارهای ولتاژ، انتظار می‌رود این ریپل‌ها بطور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته باشند.

شکل (۹) نمودار تغییرات شار دربرگیرنده استاتور، مولفه‌های ولتاژ استاتور، به همراه قطاعی که بردار فضایی شار دربرگیرنده استاتور در آن قرار دارد را برای محرکه کنترل مستقیم گشتاور مرسوم نشان می‌دهد. مطابق این شکل با ورود بردار فضایی شار دربرگیرنده استاتور به قطاع اول، در حالی که حالت (FI, TI) برقرار است، علی‌رغم اعمال بردار ولتاژ  $\bar{u}_2$  شار ماشین نمی‌تواند افزایش یابد؛ چراکه چنانچه پیش از این نیز ذکر شد، مولفه شار ساز این بردار ولتاژ در ابتدای قطاع اول بسیار کوچک می‌باشد. این موضوع در بقیه قطاع‌ها نیز تکرار شده است.



(الف)، تغییرات شار استاتور



(ب)، شماره قطاعی که بردار شار در آن جای دارد

در روابط فوق علامت { } عملگر جزء صحیح است.  $\alpha_x$  و  $\alpha_y$ ، شماره قطاع‌هایی است که بردار فضایی شار دربرگیرنده استاتور در حال انتقال از یکی به دیگری است.  $\beta_x$  و  $\beta_y$  نیز درجه عضویت بردار فضایی شار دربرگیرنده استاتور در قطاع‌های  $\alpha_x$  و  $\alpha_y$  است.  $T_s$  پریود سوئیچ زنی اینورتر،  $T_x$  مدت زمان اعمال بردارهای مربوط به قطاع  $\alpha_x$  و  $T_y$  مدت زمان اعمال بردارهای مربوط به قطاع  $\alpha_y$  می‌باشد. بطور مثال اگر  $S^* = 1.3$  باشد، مطابق روابط فوق  $\alpha_x = 1$  و  $\alpha_y = 2$ ،  $\beta_x = 0.3$  و  $\beta_y = 0.7$  و در نتیجه  $T_x = 0.3375$  و  $T_y = 0.7876$  خواهد بود. در این حالت اگر مقادیر واقعی شار دربرگیرنده و گشتاور الکترومغناطیسی از مقادیر مرجعشان کمتر باشد،  $\Delta\psi = 1$ ،  $\Delta T = 1$  خواهد بود و با توجه به جدول بردارهای سوئیچ‌زنی ولتاژ بهینه، ولتاژ اعمالی به استاتور برابر است با:

$$\bar{u}_s = \frac{T_x}{T_s} \bar{u}_2 + \frac{T_y}{T_s} \bar{u}_3 \quad (18)$$

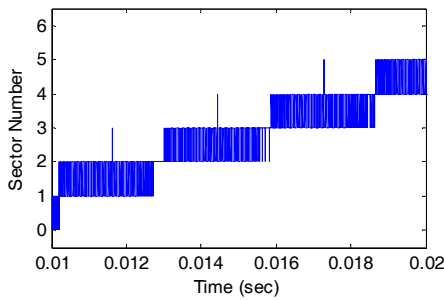
شکل (۹) چگونگی ترکیب این دو بردار را نشان می‌دهد. بنابراین در این روش با تغییر قطاع محل قرار گیری بردار فضایی شار دربرگیرنده استاتور، بردارهای ولتاژ اعمالی بصورت گسسته و ناگهانی تنها در اثر تغییر قطاع تغییر نمی‌یابند، بلکه بصورت پیوسته تغییر می‌کنند. این روش علاوه بر کاهش ریپل شار دربرگیرنده استاتور و گشتاور الکترومغناطیسی بویژه در راه اندازی، موجب کاهش تغییرات فرکانس سوئیچ‌زنی، بدون افزایش آن خواهد شد.

### ۶- نتایج شبیه سازی

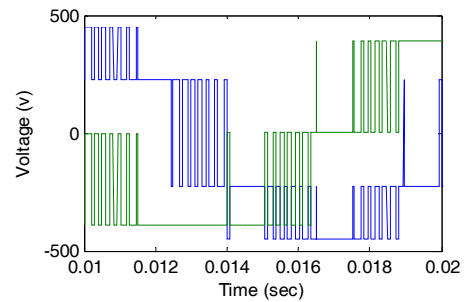
بمنظور مقایسه، دو مدل محرکه کنترل مستقیم گشتاور با دو روش کنترل متفاوت توسط برنامه Matlab/Simulink شبیه سازی شده است. پارامترهای ماشین القایی بکار رفته در این محرکه‌ها، در جدول (۱) نشان داده شده است.

یکی از این دو مدل محرکه کنترل مستقیم گشتاور با روش کنترل مرسوم بوده و دیگری توسط روش بهبود یافته جدید کنترل می‌شود. در هر دو مدل زمان نمونه برداری ۱۰

بیست و سومین کنفرانس بین‌المللی برق

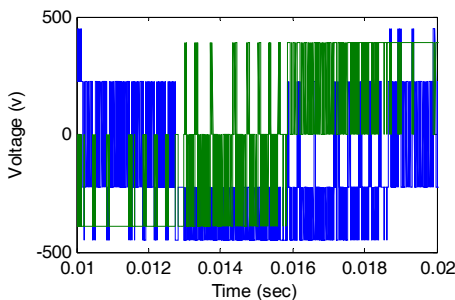


(ب)، شماره قطاعی که بردار شار در آن جای دارد



(ج)، مولفه‌های بردار ولتاژ استاتور

شکل ۹



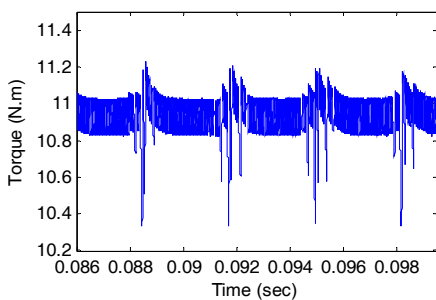
(ج)، مولفه‌های بردار ولتاژ استاتور

شکل ۱۰

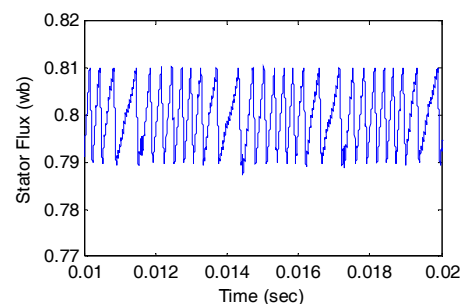
چنانچه پیش از این مفصل مورد بحث قرار گرفت، مشکل روش مرسوم، ثابت باقی ماندن حالت سوئیچ‌زنی اینورتر ویژه هنگام راه‌اندازی، با توجه به کاهش تاثیر بردارهای ولتاژ اعمالی به استاتور بود و این به معنی کاهش فرکانس سوئیچ‌زنی در آن شرایط و عدم استفاده بهینه از ظرفیت سوئیچ‌زنی اینورتر در آن شرایط می‌باشد. چراکه پس از سپری شدن زمان راه‌اندازی و رسیدن ماشین به شرایط تقریباً پایدار، فرکانس سوئیچ‌زنی اینورتر بکار رفته در محرکه کنترل مستقیم گشتاور به مقدار نامی خود می‌رسد.

شکل (۱۰) نمودار تغییرات شار دربرگیرنده استاتور، مولفه‌های ولتاژ استاتور، به همراه قطاعی بردار فضایی شار دربرگیرنده استاتور در آن قرار دارد را برای محرکه کنترل مستقیم گشتاور پیشنهادی نشان می‌دهد. مطابق این شکل با بکارگیری روش جدید، عضویت بردار فضایی شار دربرگیرنده استاتور در هر قطاع فازی بوده و بنابراین ولتاژ اعمالی نیز فازیست. این امر موجب کاهش تغییرات مولفه شار ساز بردارهای فضایی ولتاژ استاتور شده است و در بشدت موجب کاهش نوسانات شار دربرگیرنده استاتور گردیده است.

این امکان وجود دارد که با مقایسه شکل (۹) و (۱۰)، در نگاه اول اینچنین به نظر برسد که فرکانس سوئیچ‌زنی در روش پیشنهادی نسبت به فرکانس سوئیچ‌زنی روش کنترل مستقیم گشتاور مرسوم به شدت افزایش یافته است. اما در حقیقت مقایسه این دو شکل به منظور مقایسه فرکانس سوئیچ‌زنی آنها نتیجه درستی نمی‌دهد. زیرا در ابتدای راه‌اندازی، فرکانس سوئیچ‌زنی محرکه DTC مرسوم بسیار پایین می‌باشد.



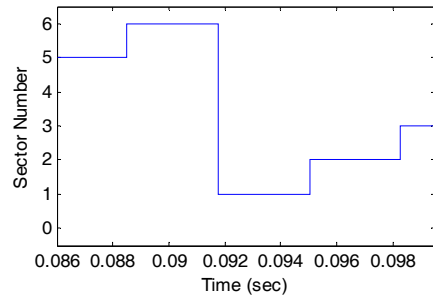
(الف)، تغییرات گشتاور



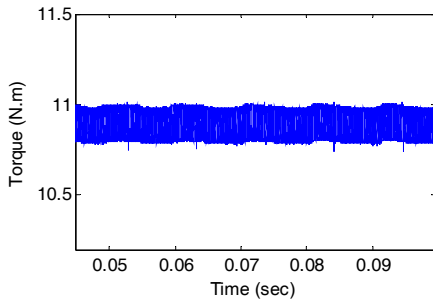
(الف)، تغییرات شار استاتور

**بیست و سومین کنفرانس بین‌المللی برق**

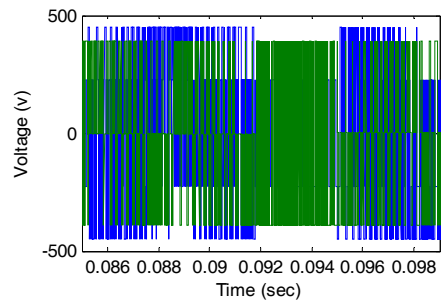
درب‌گیرنده استاتور در هر قطاع فازی بوده و بنابراین ولتاژ اعمالی نیز فازیست. این امر موجب کاهش تغییرات مولفه گشتاورساز بردارهای فضایی ولتاژ استاتور شده و نهایتاً بشدت موجبات کاهش نوسان گشتاور الکترومغناطیسی را فراهم آورده است.



(ب)، شماره قطاعی که بردار شار در آن جای دارد

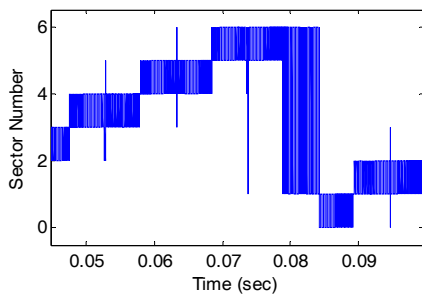


(الف)، تغییرات گشتاور

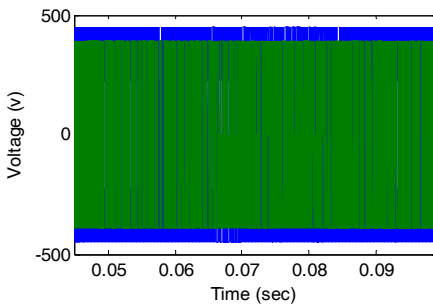


(ج)، مولفه‌های بردار ولتاژ استاتور

شکل ۱۱



(ب)، شماره قطاعی که بردار شار در آن جای دارد



(ج)، مولفه‌های بردار ولتاژ استاتور

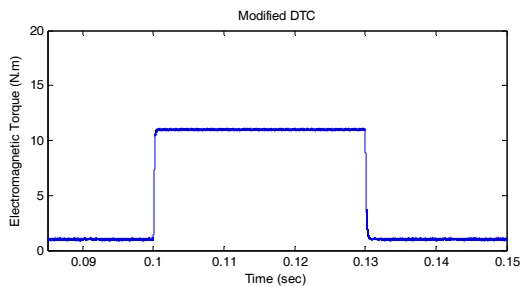
شکل ۱۲

در شکل (۱۳) اندازه بردار فضایی شار دربرگیرنده استاتور مربوط به محرکه کنترل مستقیم گشتاور مرسوم (شکل الف) و محرکه کنترل مستقیم گشتاور بهبود یافته (شکل ب) با

شکل (۱۱) نمودار تغییرات گشتاور الکترومغناطیسی، مولفه-های ولتاژ استاتور، به همراه قطاعی که بردار فضایی شار دربرگیرنده استاتور در آن قرار دارد را برای محرکه کنترل مستقیم گشتاور مرسوم نشان می‌دهد. مطابق این شکل، با رسیدن بردار فضایی شار دربرگیرنده استاتور به انتهای هر قطاع، ریپل‌های گشتاور قابل توجهی بوجود خواهد آمد؛ زیرا در حالی که نیاز محرکه به تغییرات خاص گشتاور عوض نشده است، علی‌رغم اعمال بردارهای ولتاژ مناسب، گشتاور ماشین نمی‌تواند مطابق انتظار تغییر یابد؛ چراکه مولفه گشتاورساز این بردارهای ولتاژ در انتهای هر قطاع کوچک می‌باشد.

شکل (۱۲) نمودار تغییرات گشتاور الکترومغناطیسی، مولفه-های ولتاژ استاتور، به همراه قطاعی که بردار فضایی شار دربرگیرنده استاتور در آن قرار دارد را برای محرکه کنترل مستقیم گشتاور پیشنهادی نشان می‌دهد. مطابق این شکل با بکارگیری روش جدید، عضویت بردار فضایی شار

**بیست و سومین کنفرانس بین‌المللی برق**

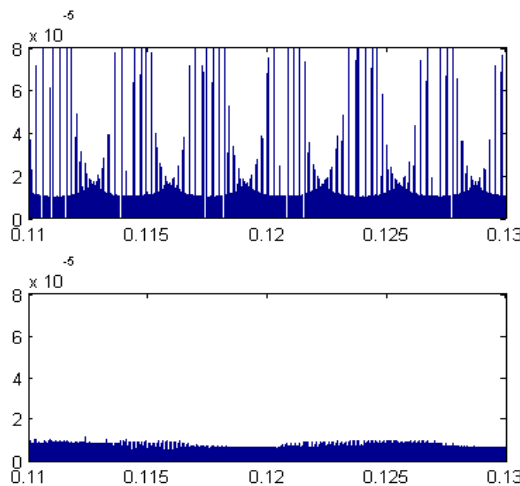


(الف)، تغییرات گشتاور الکترومغناطیسی روش پیشنهادی

شکل ۱۴

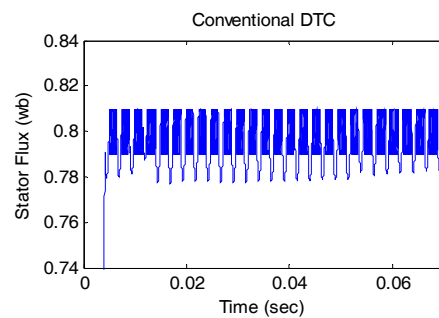
شکل (۱۴) نیز پاسخ گشتاور الکترومغناطیسی ماشین به فرمان پله گشتاور، مربوط به محرکه کنترل مستقیم گشتاور مرسوم (شکل الف) و محرکه کنترل مستقیم گشتاور بهبود یافته (شکل ب) را با یکدیگر مقایسه نموده است. در محرکه‌های کنترل مستقیم گشتاور مرسوم، نوسانات گشتاور در حالت کار دینامیکی، می‌تواند بسیار بزرگ باشد، چنانچه مطابق این شکل، نوسان گشتاور حتی به ۵۰٪ نیز رسیده است. با بکارگیری روش بهبود یافته، این نوسانات شدیداً کاهش می‌یابد.

به منظور مقایسه فرکانس سوئیچ‌زنی، نمودار دوره تناوب سوئیچینگ دو روش فوق در حالت مانا در شکل (۱۵) آورده شده است. همانطور که در شکل نیز مشاهده می‌شود، بدون افزایش قابل توجهی در فرکانس، تغییرات دوره تناوب سوئیچ‌زنی روش پیشنهادی نسبت به روش مرسوم کاهش چشمگیری داشته است.

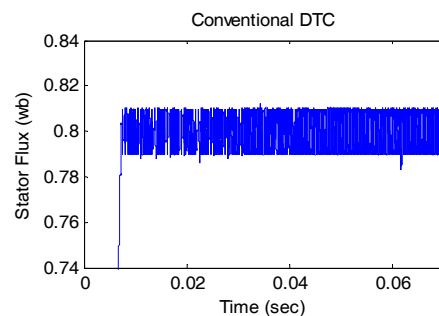


شکل ۱۵: دوره تناوب سوئیچ‌زنی روش مرسوم (بالایی) و روش پیشنهادی (پایینی)

یکدیگر مقایسه شده‌اند. هنگامی که مولفه شار ساز بردارهای فضایی ولتاژ استاتور در ابتدای هر قطاع کاهش می‌یابد، در حقیقت تاثیر اعمال آن بردارهای ولتاژ بر تغییر شار دربرگیرنده استاتور کاهش یافته و بنابراین موجب می‌شود علی‌رغم انتخاب و اعمال بهترین بردار ولتاژ سوئیچ‌زنی از جدول بردارهای ولتاژ، شار دربرگیرنده استاتور تغییر چندانی نکند. این فرایند موجب تولید ریبیل شار می‌شود. مطابق انتظار، با کاهش تغییرات مولفه شار ساز بردارهای فضایی ولتاژ استاتور، تغییرات شدید اندازه بردار فضایی شار دربرگیرنده استاتور کاهش چشمگیری یافته است.

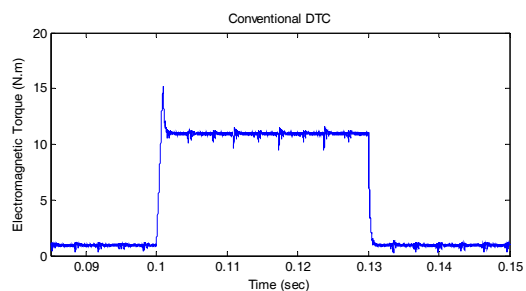


(الف)، تغییرات دامنه شار دربرگیرنده استاتور روش مرسوم



(ب)، تغییرات دامنه شار دربرگیرنده استاتور روش پیشنهادی

شکل ۱۳



(الف)، تغییرات گشتاور الکترومغناطیسی روش مرسوم

## بیست و سومین کنفرانس بین‌المللی برق

application in direct torque control, Power Electronics and Drive Systems”, Proceedings., 1997 International Conference, pp. 91 - 96 , vol.1, May 1997.

[7] Quinder6, K.E.B.; F., E.Ruppert; de Oliveira F., Milton E., “A Three-Level Inverter Direct Torque Control of a Permanent Magnet Synchronous Motor”, IEEE ISIE 2006, pp. 2361-2366 July 9-12, Quebec, Canada, 2006.

[8] Garcia, Xavier del Toro; Arias, Antoni; Jayne, Marcel G.; Witting, Phil A.; Sala, Vicenç M.; Romeral, Jose Luis, “New DTC Control Scheme for Induction Motors fed with a Three-level Inverter”, AUTOMATIKA 46, pp. 73–81, 2005.

[۹] وانگ، لی، "سیستم‌های فازی و کنترل فازی"، تشنه لب،

محمد؛ صفار پور، نیما؛ افیونی، داریوش، انتشارات دانشگاه خواجه

نصیر الدین طوسی، ۱۳۷۸.

[10] San Dan, He Yikang , Zhi Dawei, “Direct torque control of a permanent magnet synchronous motor base on fuzzy logic”, Trans. of china Elec. Society, vol.18, pp. 33-38, Feb. 2003.

جدول (۱)

۵	توان نامی خروجی (اسب بخار)
۴۶۰	ولتاژ نامی (ولت)
۶۰	فرکانس نامی (هرتز)
۲	تعداد قطب‌ها
۱۷۵۰	سرعت نامی (دور در دقیقه)
۱/۱۱۵	مقاومت استاتور (اهم)
۱/۰۸۳	مقاومت روتور (اهم)
۲۰۳/۷	اندوکتانس متقابل (میلی هانری)
۵/۹۷۴	اندوکتانس نشتی استاتور (میلی هانری)
۵/۹۷۴	اندوکتانس نشتی روتور (میلی هانری)
۰/۰۲	اینرسی (کیلو گرم-متر مربع)

## ۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله، ابتدا منشاء رپل شار و گشتاور محرکه کنترل مستقیم گشتاور بررسی شد و سپس بمنظور کاهش آن، روشی جدید، مبتنی بر منطق فازی پیشنهاد گردید. نتایج شبیه سازی حاکی از آن است که در این روش بدون تغییر توپولوژی یا افزایش فرکانس اینورتر، علاوه بر کاهش رپل گشتاور به میزان ۳۶٪ و کاهش رپل شار از ۳٫۲٪ به ۱٫۲٪، تغییرات فرکانس اینورتر نیز کاهش یافته است.

## ۸- مراجع

- [1] Takahashi, I.; Noguchi, T., “A New Quick Response and High-Efficiency Control Strategy of an Induction Motor”, IEEE Trans. Applicat. Vol. 22, pp. 820-827, Sept./Oct. 1986.
- [2] Depenbrock, M., “Direct Self-Control (DSC) of Inverter-Fed Induction Machine”, IEEE Trans. Power Electron., Vol. 3, No. 4, pp. 420-429, Oct. 1988.
- [3] Tang Lixin and Rahman M.F., “A New Direct Torque Control Strategy for Flux and Torque Ripple Reduction for Induction Motors Drive, A Matlab/Simulink Model”, IEMDC 2001, pp. 884-890, 2001.
- [4] Yang Xia, Oghanna W., “Fuzzy Direct Torque Control of Induction Motor with Stator Flux Estimation Compensation”, IECON97, vol.2, pp. 505-510, Nov 1997.
- [5] H. Gholizad, M. Mirsalim, “A New Method for the Reduction of Flux and Torque Ripples in DTC”, ICEE 2001, May 8-10, 2001
- [6] Zhong, L.; Rahman, M.F.; Lim, K.W.; “A fuzzy observer for induction motor stator resistance for