

## طراحی کنترل کننده برای سیستم هدایت موتور محرک یک آسانسور خطی بدون کابل با استفاده از کنترل مستقیم نیرو

زهرا سرافرازی<sup>۱</sup>، حسن علیپور<sup>۲\*</sup>

۱- گروه برق- قدرت، دانشکده فنی، واحد شبستر، دانشگاه آزاد اسلامی، شبستر، ایران

۲- دانشیار گروه رشته برق - قدرت، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شبستر، ایران (نویسنده مسئول)

### خلاصه

موتورهای خطی نسل جدیدی از ماشین‌های الکتریکی هستند که در آن‌ها نیرو و حرکت خطی بدون واسطه مکانیکی و به طور مستقیم توسط میدان الکترومغناطیسی تولید می‌شود. امروزه در میان محرکه‌های الکتریکی در صنایع تولیدی دقیق موتور سنکرون خطی مغناطیسی دائم (PMLSM) به طور گسترده استفاده می‌شود احتمالاً این موتورها مناسب‌ترین انتخاب برای کاربردهای کنترل حرکت با سرعت و دقت بالا می‌باشند. یکی از کاربردهای موتورهای خطی در آسانسورها از جمله آسانسورهای بدون کابل<sup>۱</sup> است که امروزه در آسمان‌خراش‌های بزرگ کاربرد دارند به دلیل تعمیر و نگهداری آسانتر و سر و صدای ایجاد شده کمتر (به دلیل نداشتن تماس مکانیکی بین کابین و ریل) و همچنین امکان استفاده از چندین کابین در داخل یک تونل بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند.

کنترل مستقیم نیرو (DTC) به عنوان یکی از روش‌های کنترل برداری در کنار کنترل برداری جریان پذیرفته شده است. این روش کنترلی با حفظ عملکرد قوی در حالت گذرا و ماندگار دارای ساختاری با پاسخ سریع و مقاوم نسبت به تغییر پارامترهای سیستم می‌باشد و قابلیت پیاده‌سازی دارد. در این پژوهش هدف کنترل مستقیم نیرو موتور سنکرون خطی مغناطیسی دائم با در نظر گرفتن اثر انتهایی برای محرک یک آسانسور خطی بدون کابل در نظر گرفته شده است و برای هدایت و تخمین موقعیت و سرعت موتور از روش هدایت مد لغزشی استفاده شده استدر پژوهش حاضر از موتور سنکرون خطی آهنربایی دائم (PMLSM) به عنوان محرک استفاده می‌شود جهت درایو آن از روش کنترل مستقیم نیرو (DTC) استفاده شده است. دلیل استفاده از این روش برای کنترل موتور محرک آسانسور، سرعت و قابلیت اطمینان بالای این روش و عدم حساسیت زیاد به تغییر پارامترهای موتور محرک می‌باشد و برای طراحی از مدار معادل  $dq$  با در نظر گرفتن اثر انتهایی موتور استفاده خواهد شد.

اثر انتهایی در موتور سنکرون خطی، سبب تغییر مشخصات موتور و کاهش شار در فاصله هوایی و در نتیجه سبب کاهش نیروی تولیدی موتور می‌شود. سیستم پیشنهادی با نرم‌افزار MATLAB/Simulink شبیه‌سازی می‌شود نتایج حاصل حاکی از رفتار مطلوب موتور تحت کنترل با این روش می‌باشد.

**کلمات کلیدی:** کنترل مستقیم نیرو، موتور خطی آهنربای دائم

\* Corresponding author: حسن علیپور

Email: Hasan.alipour2006@gmail.com

<sup>1</sup> - Ropeless

## مقدمه

موتور سنکرون موتوری است که در آن میدان گردان و رتور با یک سرعت ثابت که همان سرعت سنکرون است می چرخند و چون با سرعت ثابت می چرخند برای کنترل سرعت مورد استفاده قرار نمی گیرند. این موتورها چون دارای جاروبک و حلقه لغزان هستند تلفات زیادی در ماشین ایجاد می شود. موتور سنکرون سه فاز در سیستم های قدرت به صورت کنترل کننده قدرت راکتیو (کندانسور) مورد استفاده قرار می گیرند. یعنی هم توان راکتیو از شبکه می گیرند و هم به شبکه تزریق می کنند بنابراین برای تنظیم ولتاژ خطوط انتقال بکار می روند. ولی مهمترین کاربرد موتور سنکرون، برای اصلاح ضریب قدرت است. یعنی با تغییر جریان تحریک می توان جریان موتور را از حالت پسفاز به حالت پیش فاز و برعکس برد [۱].

موتورهای سنکرون مغناطیس دائم (PMSM) بیشتر در مواردی به کار می روند که نیاز به پاسخ گشتاور سریع و عملکرد با کیفیت باشد. PMSM بسیار شبیه ماشین سنکرون با رتور سیم پیچی است به جز این که PMSM هیچ سیم پیچ میراکننده ای نداشته و تحریک به جای یک سیم پیچ میدان، توسط یک آهنربای دائم فراهم می شود.

حذف سیم پیچ میدان، منبع dc و حلقه های لغزان باعث کاهش تلفات و پیچیدگی موتور می شود. برای اندازه چارچوب های یکسان، موتورهای مغناطیس دائم دارای گشتاور شکست بیشتری هستند. از لحاظ ریاضی اثبات شده است که افزایش گشتاور الکترومغناطیسی در یک موتور مغناطیس دائم متناسب است با افزایش زاویه ی بین شارهای پراکندگی استاتور و رتور، و بنابراین، پاسخ سریع گشتاور از طریق تنظیم هر چه سریع تر سرعت گردشی شار پراکندگی استاتور دستیابی است. این کار توسط تکنیک کنترل مستقیم گشتاور (DTC) و به طور مشابه کنترل مستقیم نیرو در نوع خطی میسر می شود. کنترل مستقیم نیرو بیشتر در صنایع و در موتورهای سنکرون مغناطیس دائم با اینورتر دو سطحی سه فاز منبع ولتاژ با کنترلر هیستریزس به کار می رود که دلیل آن وجود برخی مزایاست، منجمله: سادگی، وابستگی کم به پارامترهای موتور، پاسخ خوب گشتاور دینامیکی. این نوع سیستم درایو را کنترل مستقیم گشتاور موتور سنکرون مغناطیس دائم ۱ کلاسیک می نامند [۲].

با این حال، کنترل مستقیم گشتاور موتور سنکرون مغناطیس دائم دارای معایبی چون ریپل زیاد گشتاور و شار و نیز هارمونیک بالا در جریان استاتور می باشد. لذا، برای غلبه بر این مشکلات یک الگوریتم جدید کنترل مستقیم گشتاور برای موتور القائی سه فاز ارائه می شود که از یک اینورتر سه سطحی استفاده می کند. این کار در واقع تعمیم DTC کلاسیک برای اینورترهای دو سطحی است. قانون اصلی DTC انتخاب مستقیم بردار ولتاژ استاتور طبق اختلاف بین مراجع گشتاور و شار پراکندگی و مقادیر واقعی آنهاست [۲].

ماشین های سنکرون با آهنربای دائم در رتور موسوم به PMSM ها در مقایسه با ماشین های آسنکرون (القائی) دارای اینرسی کمتر، راندمان بیشتر و نسبت گشتاور به حجم بیشتری هستند. این مزایا منجر به افزایش کاربرد آن ها در خودروهای هیبریدی، آسیاب های بادی، کمپرسورها، پمپ ها و فن ها شده است. علاوه بر این، عملکرد بهتر، درایوهای با دینامیک بالای مربوط به PMSM ها کاربردهای فراوانی در فرایندهای تولید و سیستم های حمل و نقل دارد جایی که نیاز به پاسخ گشتاور سریع و صحیح است. از آنجا که قابلیت اطمینان و هزینه های درایوهای PMSM های مدرن از اهمیت زیادی برخوردار است، تکنیک های پیشرفته ی کنترلی توسعه یافته است. یک ماشین سنکرون آهنربای دائم اساسا یک ماشین AC معمولی با سیم پیچ های توزیع شده در شیارهای استاتور است و بنابراین شار ایجاد شده با جریان استاتور

<sup>1</sup> - PMSM DTC

تقریباً سینوسی بوده و به جای الکترومغنت‌ها (آهنرباهای الکتریکی) از آهنرباهای دائم برای تولید میدان مغناطیسی فاصله‌ی هوایی استفاده می‌کند. این موتورهای دارای مزایای قابل توجهی هستند و توجه محققان و صنایع را جهت استفاده در انواع کاربردها به خود جلب کرده‌اند.

با این حال هزینه‌ی اولیه‌ی بالا، محدودیت‌های دمای کاری، و خطر از دست دادن خاصیت آهنربایی ناشی از حضور مغناطیس‌های دائم می‌تواند در برخی کاربردها محدودکننده باشد. در موتورهای سنکرون آهنربای دائم، آهنرباهای دائم در داخل یا خارج روتور نصب می‌شوند. برخلاف موتورهای DC با جاروبک، موتور سنکرون مغناطیس دائم نیازمند یک درایو برای تامین جریان کموتاسیون است.

این اتفاق از طریق مدولاسیون پهنای پالس باس DC و با استفاده از اینورتر DC به AC واقع در سیم‌پیچ‌های موتور صورت می‌گیرد. با برقرار کردن برخی سیم‌پیچ‌های خاص استاتور، بر اساس موقعیت روتور، یک میدان مغناطیسی گردشی ایجاد می‌شود. جریان‌های سیم‌پیچ‌های استاتور در یک توالی از پیش تعیین شده سوئیچ می‌شوند و لذا آهنرباهای دائم می‌توانند یک میدان مغناطیس ثابت روی روتور بوجود آورند که میدان مغناطیسی گردشی استاتور را در یک سرعت ثابت تعقیب می‌کند. این سرعت بستگی به فرکانس اعمالی و تعداد قطب‌های موتور دارد. از آنجا که فرکانس کلیدزنی از روتور استخراج می‌شود، موتور قادر نیست سنکرون و همگامی خود را از دست دهد. جریان همواره قبل از رسیدن به آهنرباهای دائم سوئیچ می‌شود؛ بنابراین سرعت موتور به طور مستقیم با نرخ کلیدزنی جریان متناسب است.

### بردار فضایی سیستم مختصات و تبدیلات

در هر ماشین سه فاز، شیف‌ت فاز ۱۲۰ درجه الکتریکی بین فازهای مختلف وجود دارد بنابراین عملکرد شیف‌ت فاز را به صورت زیر بیان می‌کنند:

$$a = e^{j\frac{2\pi}{3}} \quad (1)$$

این عملکرد می‌تواند برای ساخت بردهای فضایی جریان استاتور، از مقادیر لحظه‌ای جریان فازهای مختلف استفاده شود.

$$i_S = \frac{2}{3} [a^0 i_{SA}(t) + a^1 i_{SB}(t) + a^2 i_{SC}(t)] \quad (2)$$

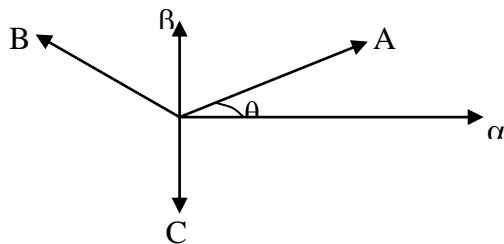
بردارهای فضایی اثر همه جریان‌های به وجود آمده توسط سیم‌پیچی‌ها را نشان می‌دهند ضریب  $\frac{2}{3}$  اجازه استفاده

از بردارهای فضایی با پارامترهای مدار معادل واقعی ماشین را می‌دهد. همچنین بردار فضایی ولتاژ استاتور بردار فضایی شار پیوندی با استفاده از کمیت‌های فاز به صورت زیر ساخته می‌شود.

$$u_S = \frac{2}{3} [a^0 u_{SA}(t) + a^1 u_{SB}(t) + a^2 u_{SC}(t)] \quad (3)$$

$$\psi_S = \frac{2}{3} [a^0 \psi_{SA}(t) + a^1 \psi_{SB}(t) + a^2 \psi_{SC}(t)] \quad (4)$$

حال نمایش برداری به وجود آمده از کمیت‌های سه فاز را داریم که می‌توانند به نمایش دو محوری بردارهای فضایی تبدیل شوند. سیم‌پیچ‌های استاتور در داخل استاتور ثابت هستند. بنابراین طبق شکل یک دستگاه مختصات قائم دو محوری تعریف می‌کنیم.



شکل (۱): قاب ABC به  $\alpha\beta$  [۳]

تبدیل ریاضی مورد نیاز از ۳ فاز A و B و C به دو فاز  $\alpha$  و  $\beta$  طبق معادله زیر می‌باشد.

معادلات برای جریان‌های استاتور به دست آمده‌اند اما برای ولتاژها، شارها نیز معتبر هستند.

$$\begin{bmatrix} is_{\alpha} \\ is_{\beta} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta + 120) & \cos(\theta + 240) \\ \sin \theta & \sin(\theta + 120) & \sin(\theta + 240) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} isA \\ isB \\ isC \end{bmatrix} \quad (5)$$

که  $\theta$  زاویه بین محور فاز A و محور  $\alpha$  می‌باشد با در نظر گیری  $\theta = 0$  معادله به صورت ساده شده زیر در می‌آید.

$$\begin{bmatrix} is_{\alpha} \\ is_{\beta} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} isA \\ isB \\ isC \end{bmatrix} \quad (6)$$

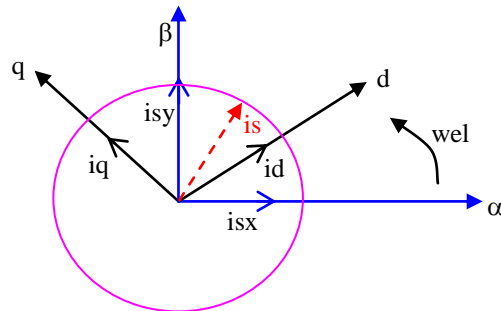
تبدیل معکوس از دو فاز به سه فاز طبق معادله زیر می‌باشد:

$$\begin{bmatrix} isA \\ isB \\ isC \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ \cos(\theta + 120) & \sin(\theta + 120) \\ \cos(\theta + 240) & \sin(\theta + 240) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} is_{\alpha} \\ is_{\beta} \end{bmatrix} \quad (7)$$

اگر  $\theta$  را برابر صفر در نظر بگیریم، داریم:

$$\begin{bmatrix} isA \\ isB \\ isC \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} is_{\alpha} \\ is_{\beta} \end{bmatrix} \quad (8)$$

مدل موتور سنکرون خطی با مغناطیس‌های دائم در قاب مرجع دو محوری / مستقیم-قائم (dq) معرفی خواهد شد که در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل (۲): قاب مرجع  $\alpha\beta$  با در نظر گرفتن سرعت زاویه‌ای  $wel$

این قاب مرجع نسبت به تاب مرجع  $\alpha\beta$  که ثابت در نظر گرفته شده است با سرعت زاویه‌ای سنکرون  $wel$  گردش می‌کند.

$$wel = \frac{\pi}{\tau} v_{lin} \quad (9)$$

همه متغیرها روی محور مستقیم و عمود با سرعت سنکرون گردش می‌کنند محور  $d$  در جهت محور مغناطیسی و محور  $q$ ، ۹۰ درجه پیش از آن در جهت عکس حرکت عقربه‌های ساعت گردش می‌کند.

از معادلات زیر برای تبدیل بردارهای فضایی از قاب مرجع ثابت  $\alpha\beta$  به سیستم مختصات گردشی محور dq استفاده می‌شود.

$$id(t) = i_{s\alpha} \cos \theta + i_{s\beta} \sin \theta \quad (10)$$

$$iq(t) = i_{s\alpha} \sin \theta - i_{s\beta} \cos \theta \quad (11)$$

که  $\theta$  زاویه بین محور  $\alpha$  و محور  $d$  می‌باشد.

معادلات ریاضی موتور:

برای به دست آوردن مدل موتور سنکرون خطی در سیستم مختصات dq ابتدا معادلات ولتاژ استاتور را معرفی می‌کنیم

$$Ud(t) = R_{id} + d \frac{\psi_q}{dt} - \omega \psi_q \quad (12)$$



$$Uq(t) = R_{iq} + d \frac{\psi_q}{dt} + \omega \psi_d \quad (13)$$

به دلیل اینکه سرعت  $v_{lin}$  کمیتی مکانیکی و فرکانس زاویه  $\omega$  کمیتی الکتریکی است و با فرکانس منبع به طور مستقیم رابطه دارد. در به دست آوردن معادلات الکتریکی موتور از  $\omega$  استفاده شده است در روابط بالا  $Ud$  و  $Uq$  بردار فضایی ولتاژ استاتور محورهای  $d$  و  $q$  و  $id$  و  $iq$  بردار جریان آرمیچر محورهای  $d$  و  $q$  و  $R$  مقاومت فاز آرمیچر است.

شار پیوندی  $\psi_d$  و  $\psi_q$  در معادلات بالا از روابط زیر به دست می آیند.

$$\psi_d = L_d i_d + \psi_{pm} \quad (14)$$

$$\psi_q = L_q i_q \quad (15)$$

که  $L_d$  و  $L_q$  اندوکتانس آرمیچر محورهای  $d$  و  $q$  و  $\psi_{PM}$  شار پیوندی مغناطیس دائم می باشد. توان لحظه ای ورودی آرمیچر ۳ فاز از روابط زیر به دست می آید:

$$P = u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C = \frac{3}{2} (u_d i_d + u_q i_q) \quad (16)$$

که  $u_A$  و  $u_B$  و  $u_C$  ولتاژهای لحظه ای فاز،  $i_A$  و  $i_B$  و  $i_C$  جریان های لحظه ای فازها،  $u_d$  و  $u_q$  ولتاژهای محورهای  $d$ ،  $q$  و  $i_d$  و  $i_q$  جریان های محور  $d, q$  می باشد. معادله توان از معادلات ولتاژ استاتور به صورت زیر به دست می آید:

$$u_d i_d + u_q i_q + R i_d^2 + d \frac{\psi_d}{dt} i_d + R i_q^2 + d \frac{\psi_q}{dt} + \omega (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \quad (17)$$

جمله آخر در معادله توان الکترومغناطیسی برای ماشین سنکرون دو قطب در هر فاز می باشد، برای ماشین ۳ فاز داریم:

$$P_{elm} = \frac{3}{2} \omega (\psi_d i_q - \psi_q i_d) = \frac{3}{2} \omega [\psi_{pm} + (L_d - L_q) i_d] i_q \quad (18)$$

نیروی الکترومغناطیسی  $F_{thrust}$  برای موتور سنکرون خطی مغناطیس دائم با  $p$  جفت قطب از روابط زیر به دست می آید:

$$F_{thrust} = \frac{P_{elm}}{v_{lin}} p = \frac{3}{2} p \frac{\pi}{\tau} (\psi_d i_q - \psi_q i_d) = \quad (19)$$

$$\frac{3}{2} p \frac{\pi}{\tau} [\psi_{pm} + (L_d - L_q) i_d] i_q = \quad (20)$$

$$\psi_{pm} = \frac{\pi}{\tau} \frac{2}{3} p \left( \frac{F_{thrust}}{i_s} \right) = \frac{\tau}{\pi} \frac{2}{3} p k \quad (21)$$

مجموعه معادلات بالا مدل ریاضی موتور سنکرون خطی مغناطیس دائم می باشد حال با استفاده از مقادیر داده شده توسط سازندگان این موتورها نمونه ها ایجاد می شوند.

که نفوذپذیری نسبی مغناطیس های دائم به طور تقریبی یک می باشد. به این معنی که مغناطیس های دائم در مدارهای مغناطیسی شبیه به هوا هستند و پارامترهای مدار مغناطیسی در محورهای  $d$  و  $q$  برابر می باشند علت، برابری و کم بودن اندوکتانس در محورهای  $d$  و  $q$  می باشد

جدول (۱): مقادیر داده شده توسط سازندگان این موتورها

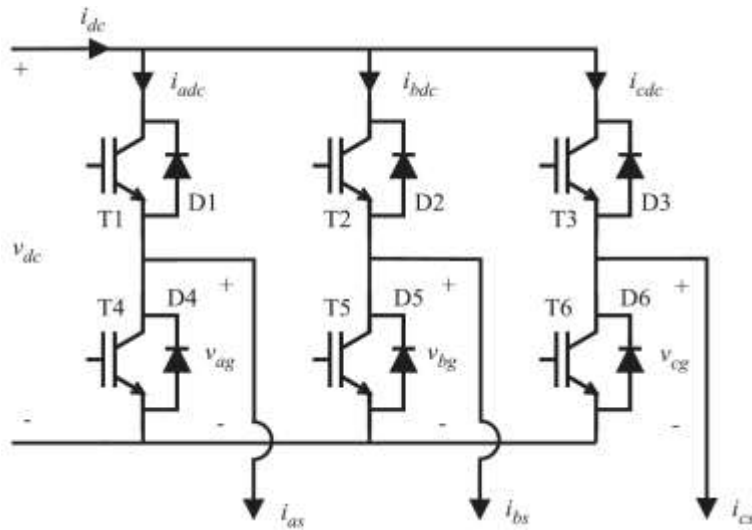
علائم اختصاری	مقدار	پارامتر
R	$1/6 \Omega$	مقاومت فاز
$L_d$	۱۳mh	اندوکتانس محور $d$
$L_q$	۱۳mh	اندوکتانس محور $q$
P	۱	تعداد جفت قطبها
$\tau$	$0.012m$	گام قطب مغناطیس دائم
k	$93 N/A$	ثابت نیروی موتور
$\Psi_{pm}$	$0.474 wb$	شار پیوندی مغناطیس دائم

## روش کنترل DTC

اشکال روش های کنترلی بر مبنای جریان و ولتاژ و یا روش FOC، پیچیده بودن ساختار، وابستگی به پارامترهای ماشین و همچنین وجود چند کنترل کننده (جریان) در ساختار این روش است. برای حل این مشکلات روش کنترل مستقیم گشتاور<sup>۱</sup> ارائه شد. همانطور که از اسم این روش مشخص است در این روش مستقیماً گشتاور کنترل می شود. مزیت های این روش شامل ساختار ساده، وابسته نبودن به پارامترهای ماشین و سرعت عملکرد دینامیکی خوب برای گشتاور و شار می باشد. در این روش دیگر احتیاجی به بلوک های مجزاسازی ولتاژ و حلقه کنترل جریان نمی باشد. در این روش حلقه کنترل جریان وجود ندارد بنابراین بردار ولتاژ طوری انتخاب می شود که خطای گشتاور و شار حداقل شود. برای اینکه با عملکرد این روش آشنا شویم ابتدا باید نحوه تشکیل بردار ولتاژ بوسیله اینورتر را توضیح دهیم.

ساختار یک اینورتر منبع ولتاژی (VSI) بصورت زیر می باشد:

<sup>1</sup> - Direct Torque Control



شکل (۳): ساختار یک اینورتر منبع ولتاژی (VSI)

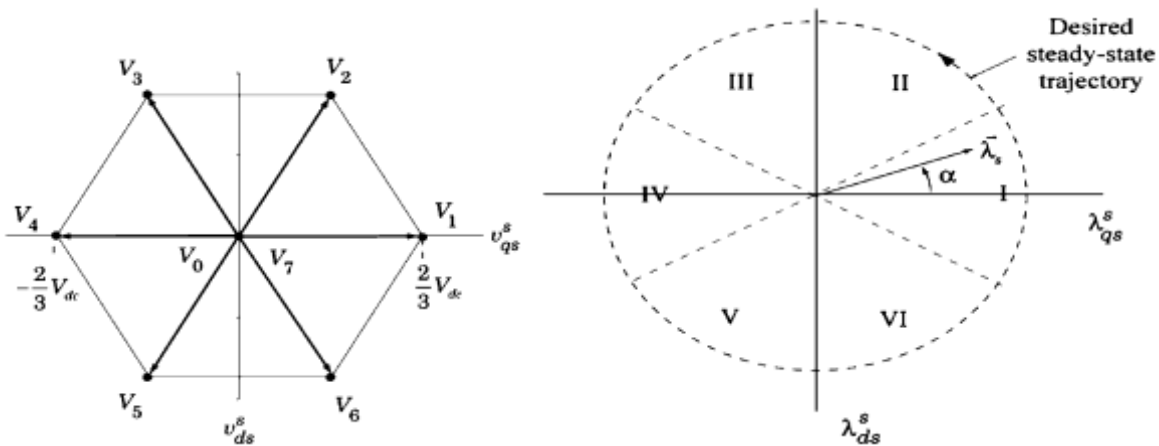
توجه شود که دو کلید موجود در هر ساق با هم نمی توانند روشن شوند زیرا منبع را اتصال کوتاه می کنند. با توجه به جدول زیر که مربوط به حالت های مختلف برای کلیدها می باشد می توان دریافت که ۸ حالت برای بردار ولتاژ خروجی وجود دارد:

جدول (۲): حالات موجود برای ولتاژ خروجی اینورتر

Voltage Vector	Switching State		
	$T_1 / \bar{T}_4$	$T_2 / \bar{T}_5$	$T_3 / \bar{T}_6$
V0	۰	۰	۰
V1	۱	۰	۰
V2	۱	۱	۰
V3	۰	۱	۰
V4	۰	۱	۱
V5	۰	۰	۱
V6	۱	۰	۱
V7	۱	۱	۱

بردار حالتی که تمام کلیدها روشن (V7) و تمام کلیدها خاموش (V0) هستند را بردار ولتاژ صفر می نامند. ۶ حالت دیگر بردارهای اصلی را نشان می دهند که اندازه آنها دو- سوم ولتاژ لینک DC می باشد.





شکل (۵): نواحی برای بردارهای ولتاژ خروجی اینورتر  
 شکل (۴): بردارهای ولتاژ خروجی اینورتر

رابطه اصلی گشتاور که مبنای پیاده‌سازی این روش می‌باشد، بصورت زیر بیان می‌شود.

$$T_e = \frac{3P}{4L_d L_q} |\Psi_s| [2\Psi_f L_q \sin \delta - |\Psi_s| (L_q - L_d) \sin 2\delta] \quad (22)$$

در این رابطه، مولفه اول گشتاور ناشی از میدان تحریک بوده و توسط شار آهنربای دائم ایجاد می‌شود و مولفه دوم گشتاور که گشتاور رلوکتانسی نیز نامیده می‌شود. دلیل ساختار ماشین بوجود می‌آید. با مشتق‌گیری از رابطه (۲۲) نسبت به زمان در لحظه  $t=0$  یعنی لحظه اعمال تغییرات گشتاور بار، داریم:

$$\frac{dT_e}{dt} \Big|_{t=0} = \frac{3P}{2L_d L_q} |\Psi_s| [\Psi_f L_q \delta' - |\Psi_s| (L_q - L_d) \delta'] \quad (23)$$

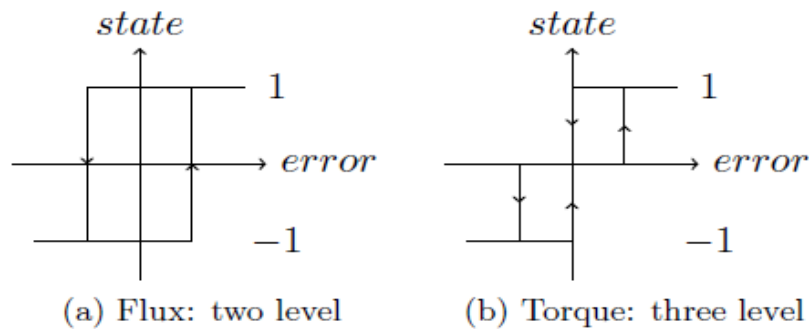
که در این رابطه  $\delta'$  سرعت زاویه شار دور استاتور نسبت به شار دور آهنربای دائم می‌باشد. بنابراین برای دستیابی به یک گشتاور پایدار، رابطه زیر باید برقرار باشد:

$$|\Psi_s| < \frac{L_q}{L_q - L_d} \Psi_f \quad (24)$$

برای داشتن پاسخ دینامیکی سریع و همچنین تغییرات سریع گشتاور، اندازه شار دور استاتور باید با استفاده از رابطه (۲۴) بدست آورده شود [۵].

معمولاً برای تعیین فرامین کنترلی مورد نیاز جهت کنترل صحیح شار یا گشتاور، از مقایسه‌گرهای هیستریزس استفاده می‌شود. مقایسه‌گرها اختلاف بین مقادیر مورد نیاز و مقادیر تخمینی را مقایسه نموده و سپس داده‌های لازم را

برای بردارهای شار و گشتاور ثبت می‌کند. مقایسه کننده گشتاور در هر سه سطح و مقایسه گر شار تنها در دو سطح کار می‌کند، زیرا در زمان بهره‌برداری از موتور سنکرون آهنربای دائم نمی‌توان شار استاتور را ثابت نگه داشت.



شکل (۶): مقایسه کننده‌های هیستریزیس

با مراجعه به نواحی تعیین شده و همچنین استفاده از جدول (۳-۶)، بردار ولتاژ مناسب انتخاب و بدین ترتیب حالت‌های مختلفی از مقایسه گر هیستریزیس  $(\Phi, \tau)$  به دست می‌آید. کنترل کننده‌های هیستریزیس شار و گشتاور بر اساس اختلاف بین مقادیر تخمین زده شده و مقادیر فرمان شار و گشتاور، خروجی مناسب را می‌دهد. اگر  $\Phi = 1$  باشد، به این معنی است که مقدار واقعی شار دور استاتور کوچکتر از مقدار مرجع شار می‌باشد. اگر  $\Phi = 0$  باشد، آنگاه مقدار واقعی شار دور از مقدار مرجع شار بیشتر می‌باشد. اگر  $\tau = 1$  باشد، مقدار واقعی گشتاور الکترومغناطیسی کوچکتر از مقدار گشتاور فرمان می‌باشد و لذا گشتاور باید افزایش یابد؛ در این صورت با اعمال بردار ولتاژ مناسب و با افزایش زاویه  $\delta$  گشتاور افزایش می‌یابد. به همین ترتیب اگر  $\tau = -1$  باشد، آنگاه مقدار واقعی گشتاور از مقدار مرجع بیشتر می‌باشد. برای کاهش ریپل گشتاور به جای دو سطح افزایش و کاهش گشتاور، می‌توان حالت بدون تغییر یعنی  $\tau = 0$  را نیز اضافه کرد. این کار با اعمال بردار ولتاژ صفر انجام می‌شود. این موضوع در جدول (۳) نشان داده شده است [۳ و ۶]. اینورتر منبع ولتاژ سه فاز شش کلیدی مورد استفاده در این روش کنترل در شکل ملاحظه می‌شود. این مبدل، شش بردار ولتاژ غیر صفر و دو بردار ولتاژ صفر ایجاد می‌نماید.

جدول (۳): جدول سوئیچینگ برای DTC

Flux $\phi$	Torque $\tau$	$\theta - Section$ (stator flux linkage position)					
		$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_4$	$\theta_5$	$\theta_6$
$\phi = 1$	$\tau = 1$	$V_r(110)$	$V_r(010)$	$V_f(011)$	$V_d(001)$	$V_f(101)$	$V_1(100)$
	$\tau = 0$	$V_v(111)$	$V_o(111)$	$V_v(111)$	$V_o(111)$	$V_v(111)$	$V_o(111)$
	$\tau = -1$	$V_f(101)$	$V_1(100)$	$V_r(110)$	$V_r(010)$	$V_f(011)$	$V_d(001)$
$\phi = 0$	$\tau = 1$	$V_r(010)$	$V_f(011)$	$V_d(001)$	$V_f(101)$	$V_1(100)$	$V_r(110)$
	$\tau = 0$	$V_o(111)$	$V_v(111)$	$V_o(111)$	$V_v(111)$	$V_o(111)$	$V_v(111)$
	$\tau = -1$	$V_d(001)$	$V_f(101)$	$V_1(100)$	$V_r(110)$	$V_r(010)$	$V_f(011)$

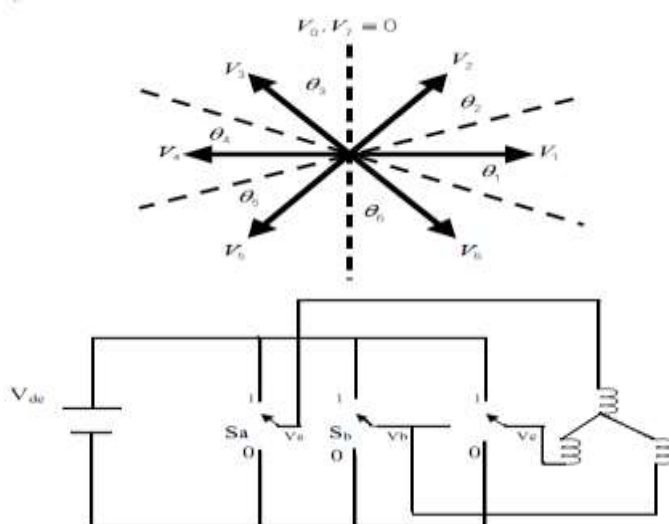
در زمان کلیدزنی، بردار ولتاژ ثابت بوده و مقاومت استاتور را نیز ثابت فرض می‌کنیم. در رابطه زیر  $\Psi_s|_{t=0}$

مقدار شار دور اولیه استاتور در ابتدای کلیدزنی می‌باشد. با چشم پوشی از مقاومت استاتور، رابطه شار دور استاتور با ولتاژ به صورت رابطه زیر بیان می‌شود:

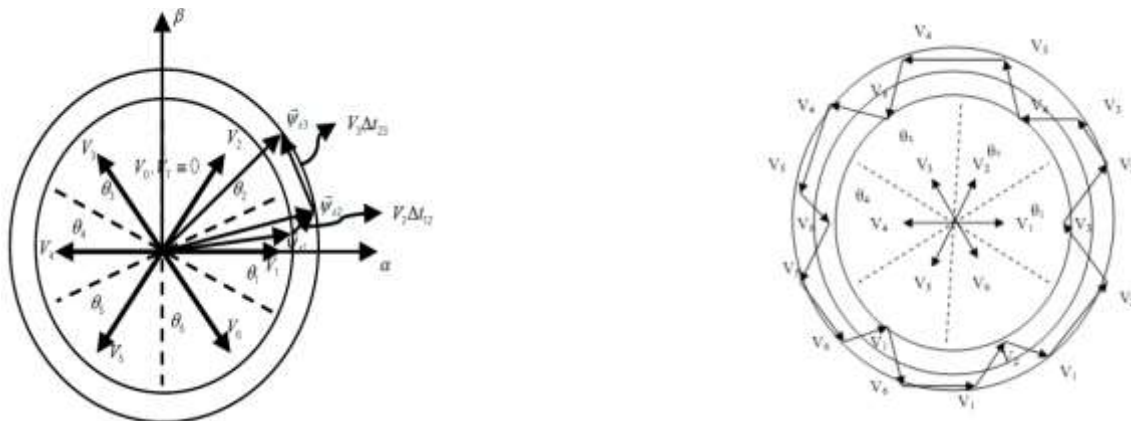
$$\Psi_s = v_s t + \Psi_s|_{t=0} \Rightarrow \Delta\Psi_s = v_s t \quad (25)$$

طبق رابطه فوق حرکت شار دور استاتور همراستا با بردار ولتاژ اعمال شده به استاتور می‌باشد. بنابراین می‌توان

اندازه، مسیر حرکت و سرعت حرکت شار دور استاتور را با انتخاب بردار ولتاژ مناسب، کنترل نمود.



شکل (۷): شماتیک اینورتر و نمایش بردارهای ولتاژ در نواحی ششگانه [۷]



شکل (۸): چرخش بردار شار دور استاتور با اعمال بردار ولتاژ [۷]

در هر ناحیه از نواحی ششگانه، دو بردار ولتاژ که کمترین فرکانس کلیدزنی را نتیجه می‌دهند، به منظور افزایش و یا کاهش اندازه شار استاتور انتخاب می‌شوند. بنابراین بردار  $\Psi_s$  در مکان اصلی خود باقی می‌ماند اگر بردار ولتاژ صفر به ماشین اعمال شود. در موتور سنکرون آهنربای دائم شار دور استاتور با تلفیق بردار ولتاژ استاتور و شار مغناطیسی روتور بدست می‌آید. از آنجاییکه شار مغناطیس دائم در تمام زمانها دوران می‌کند، شار دور استاتور حتی اگر بردار ولتاژ صفر استفاده شود، وجود دارد و در نتیجه بردار ولتاژ صفر تنها باعث کاهش گشتاور می‌شود. لذا بردار ولتاژ معکوس معمولاً برای کاهش سریع گشتاور انتخاب می‌شوند و بردارهای ولتاژ صفر برای کنترل شار دور استاتور انتخاب نمی‌شوند. بنابراین بردار شار استاتور یعنی  $\Psi_s$  همواره نسبت به شار دور روتور در حال حرکت می‌باشد.

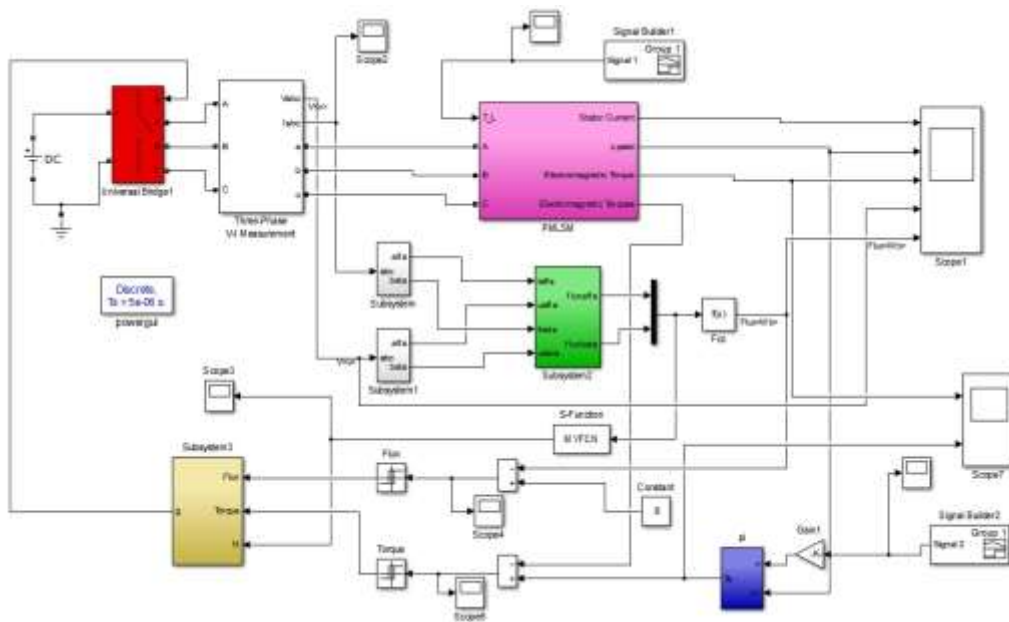
همانطور که رابطه (۳-۲۷) نشان می‌دهد، گشتاور الکترومغناطیسی به طور موثر می‌تواند با کنترل اندازه شار دور استاتور و سرعت دوران آن کنترل شود. برای عملکرد خلاف عقربه‌های ساعت، اگر گشتاور واقعی از گشتاور مرجع کوچکتر باشد، بردارهای ولتاژ به نحوی انتخاب می‌شوند که باعث چرخش  $\Psi_s$  در همان جهت (مثلاً) شوند. در این حالت زاویه  $\delta$  به سرعت تغییر می‌کند و گشتاور واقعی ماشین افزایش می‌یابد. حال اگر گشتاور موتور بزرگتر از مقدار مرجع باشد، بردارهای ولتاژ به نحوی انتخاب می‌شوند که باعث چرخش  $\Psi_s$  در جهت معکوس شده و لذا  $\delta$  کاهش یافته و همچنین گشتاور کاهش می‌یابد. جدول کلیدزنی برای کنترل اندازه و مسیر دوران بردار  $\Psi_s$  می‌باشد که برای هر دو مسیر عملکردی استفاده می‌شود. در این جدول،  $\phi$  و  $\tau$  به ترتیب خروجی‌های کنترل‌کننده‌های هیستریزس گشتاور و

شار می‌باشند و  $\theta_1 - \theta_6$  ناحیه‌ای از صفحه بردار فضا که بردار شار دور استاتور در آن قرار دارد را نشان می‌دهد. این جدول استراتژی کنترل DTC برای موتور PMSM را نشان می‌دهد.

در این مقاله اثر انتهایی با ضریب ثابت kend مشخص شده و مقدار آن ۰/۰۱ پیشنهاد شده است [۸]

### شبیه سازی و نتایج

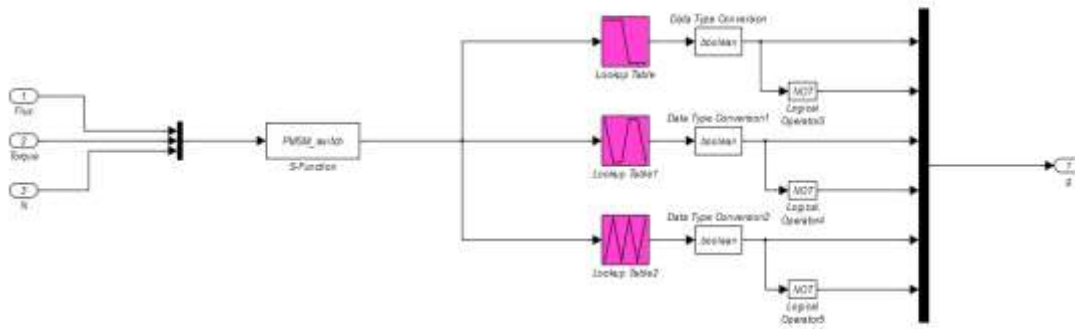
شماتیک شبیه سازی در شکل (۹) نشان داده شده است. تخمین گر شار و گشتاور به ترتیب با بلوک‌های سبز و آبی رنگ نشان داده شده است. بلوک مربوط به تولید پالس برای کلیدزنی اینورتر نیز با رنگ زرد مشخص شده است که حاوی جدول کلیدزنی می‌باشد.



شکل (۹): شماتیک شبیه سازی PMSM-DTC

زیرسیستم مربوط به تولید پالس کلیدزنی و جداول کلیدزنی در شکل (۱۰) ارائه شده اند.

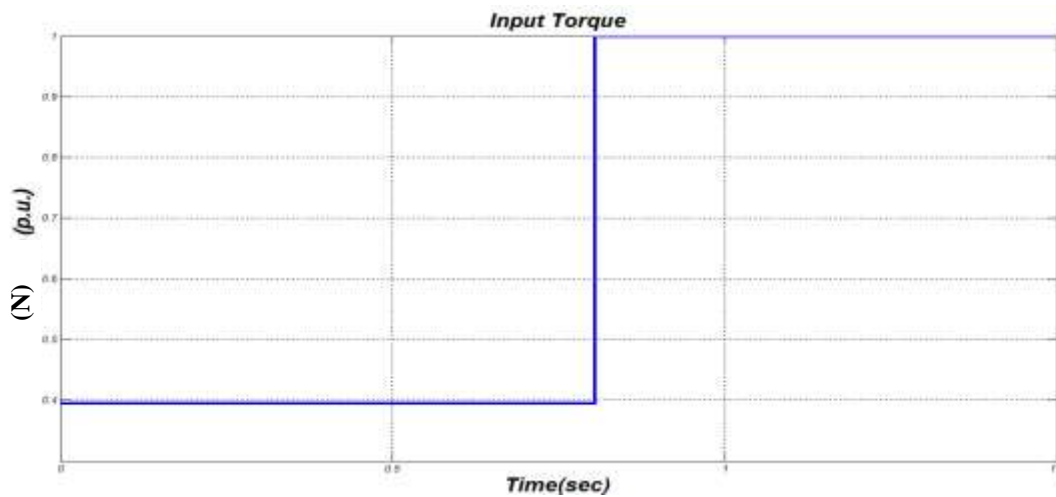




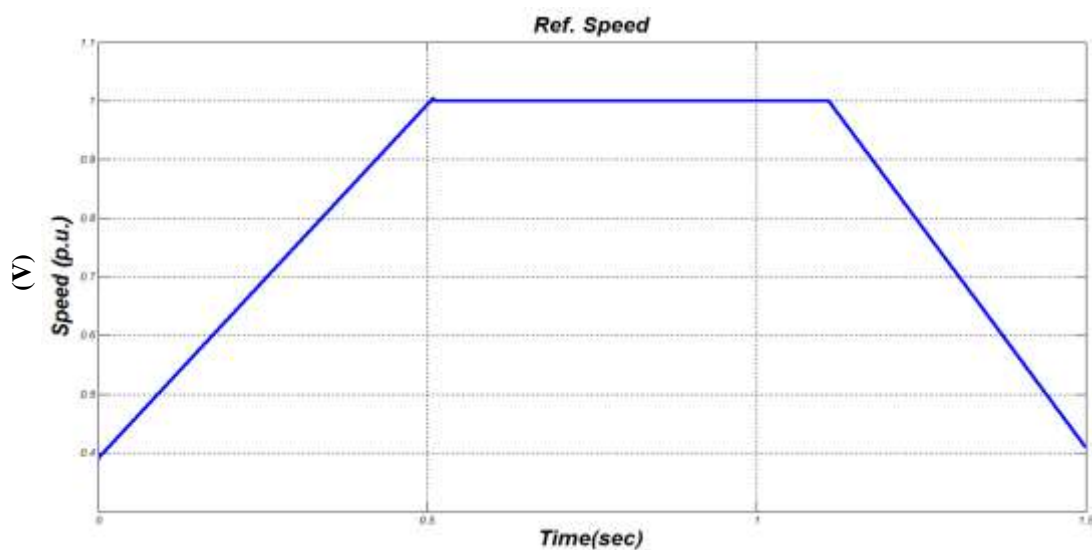
شکل (۱۰): جداول کلیدزنی سوئیچ‌های اینورتر

گشتاور اعمالی به موتور و سرعت مرجع در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) نشان داده شده است که گشتاور در لحظه S

از  $t=0/1$  مقدار اولیه صفر به مقدار ۱ پریونیت افزایش می‌یابد. سرعت نیز شکل موج دوزنقه ای دارد.

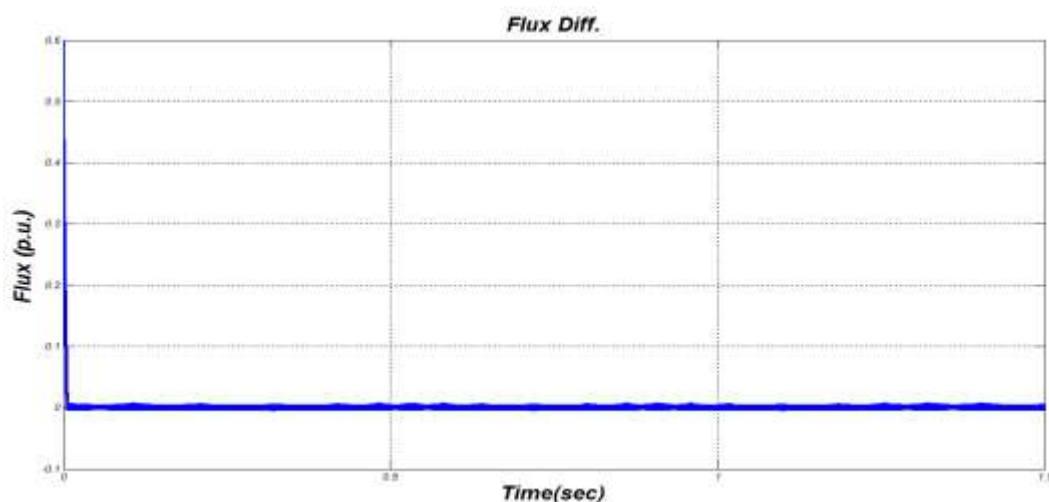


شکل (۱۱): گشتاور اعمالی به موتور PMSM



شکل (۱۲): سرعت مرجع موتور PMSM

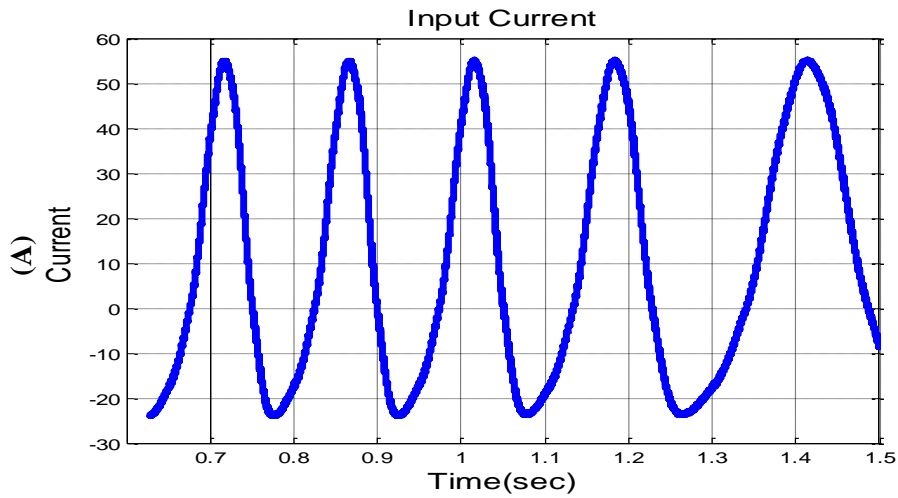
اختلاف بین شار موتور و شار تخمینی در شکل (۱۳) نشان داده شده است که مشاهده می‌شود پس از کمتر از ۰/۰۱ ثانیه به صفر می‌رسد.



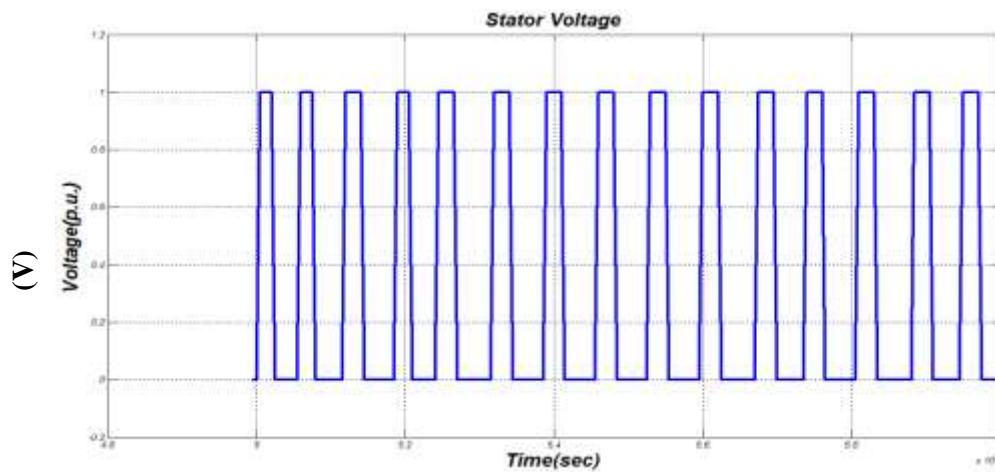
شکل (۱۳): اختلاف بین شار موتور و شار تخمینی

شکل موج گشتاور تخمینی و گشتاور واقعی ماشین نیز در شکل (۱۴) آورده شده است. منحنی آبی مربوط به مقدار واقعی و منحنی قرمز رنگ مربوط به مقدار تخمینی می‌باشد. کاملاً مشخص است که تخمین گر توانسته است بخوبی روند تغییرات گشتاور ماشین را دنبال کند.





شکل (۱۶): جریان سه فاز سیستم PMSM\_DTC

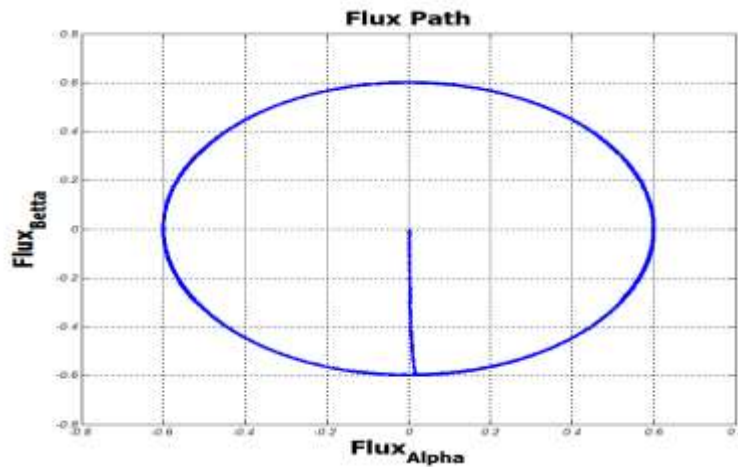


شکل (۱۷): ولتاژ اعمالی به استاتور سیستم PMSM\_DTC

شکل (۱۸) نیز مسیر شار بر حسب شار محور  $q$  و شار محور  $d$  را نشان می‌دهد که همانگونه که انتظار میرفت

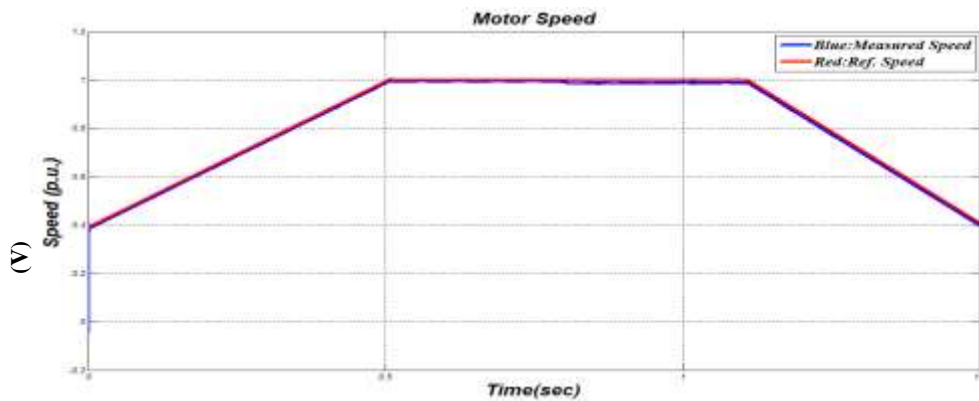
یک مسیر دایره ای شکل را طی کرده است.





شکل (۱۸): مسیر شار بر حسب شار محور  $q$  و شار محور  $d$

شکل زیر منحنی سرعت مرجع و واقعی است که همدیگر را بخوبی دنبال می کنند



شکل (۱۹) سرعت مرجع و سرعت اندازه گیری شده موتور

### جمع بندی و نتیجه گیری روش DTC

DTC روشی سریع و از جدیدترین روش های کنترل گشتاور و سرعت موتورهای AC می باشد. در این روش بمنظور حذف واسطه ولتاژ و جریان، فرمان های سوئیچ های اینورتر مستقیماً بر اساس حالت الکترومغناطیسی موتور، گشتاور و شار آن صادر می شود و با استفاده از سگنال های فیدبک جریان و ولتاژ استاتور و بر اساس یک مدل دقیق از فرآیند کاری موتور، متغیرهای حالت موتور تخمین زده می شوند. با روابط ثابت شد که افزایش یا کاهش گشتاور در یک موتور سنکرون مغناطیس دائم به ترتیب متناسب با افزایش یا کاهش زاویه بین بردارفضایی شار استاتور و شار رتور می باشد. بنابراین تغییر سریعی در گشتاور توسط کنترل سریع سرعت گردش بردار شار استاتور نسبت به بردار شار رتور



امکان پذیر است و نیز سرعت تغییر شار استاتور وابسته به بردار ولتاژ عملی و زمان اعمال آن بوده و بردار شار رتور در هر زمانی کوچک و ثابت در نظر گرفته می شود.

از اصول اساسی این روش اعمال انتخاب مستقیم بردارهای فازور و ولتاژ عملی به استاتور موتور بر اساس اختلاف بین مقادیر مبنای شار و گشتاور با مقادیر واقعیشان می باشد. در این روش نیازی به بردارهای صفر و کنترل کننده های جریان بر اساس PWM نیست. همچنین پارامتر مؤثر مورد استفاده از موتور، مقاومت استاتور آن است که باعث کمتر شدن وابستگی و اثر پذیری سیستم کنترل از تغییرات و اغتشاشات پارامترهای ماشین شده و پاسخ گشتاور بسیار سریعتری نسبت به حالت کنترل گشتاور با PWM بدست می دهد.

در این روش عوامل محدود کننده پاسخ سریع گشتاور شامل محدودیت مکانیکی رتور و زمان سوئیچینگ می باشد

#### منابع

- [1] Tecnotion. A primer of Tecnotion linear motors. Version 2.1. Issue date: September 2008. Document nr. 4022.363.4187.2. [Online document]. Available at <http://www.tecnotion.com/Products.php?Keuze=Techdocs>.
- [2] L. H. Zheng, and J. X. Jin, "Investigation of HTS bulk magnet linear synchronous motors. Chengdu", Proceeding of IEEE on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices, pp. 17-21, 2009.
- [3] R. Islam, L. Husain, A Fardoun, and K. Mclaughlin, "Permancent – magnet synchronous motor magnet designs with skewing for torque ripple and cogging torque reduction," IEEE Transactions on Industry Application, vol. 45, no. 1, pp. 152-160, Feb.2009.
- [4] T. H. Liu, Y. C. Lee, and Y. H. Change, "Adaptive controller design for a linear motor control system," IEEE Trans, Aerosp. Electron. Syst., vol. 40, no. 2, pp. 601-616, Apr. 2005.
- [5] M. Abroshan, K. Malekian, Y. Milimonfare, and B. A. Varmiab, "An optimal direct thrust force control for interior Permanent Magnet Linear Synchronous Motors incorporating filed weakening", in 2008 international Symposium on Power Electronics, electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM 2008).
- [6] Chang- Chou Hwang, Ping- Lun Li, Cheng- Tsung Liu, "Optimal Design of a Permanent Magnet Linear Synchronous Motor with Low Cogging Force", IEEE Trans Magnetics, Vol. 48, no. 2, pp. 1042-1048, Feb. 2012.
- [7] Jung, In – soung & Yoon, Sang- Baek & Shim, Jang- Ho & Hyun, Dong- Seok, "Analysis of Forces in a Short Primary Type and a Short Secondary Type Permanent Magnet Linear Synchronous Motor" IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 14, no. 4, pp. 1265-1270. Dec 1999.
- [8] L. C. Jiao and S. Y. Yuan, "Study on operating characteristics of permanent magnet linear synchronous motor for vertical movement," *Proceedings of the Csee*, vol. 4, no. 4, p. 006, 2002.