

کنترل مستقیم گشتاور یک موتور الکتریکی شش‌فازه نامتقارن و پیاده‌سازی با یک اینورتر دوسطحی SVPWM مناسب برای مانورهای ویژه شناور

احسان ابراهیمی^۱، سید ادیب ابریشمی‌فر^۲، احمد آل‌احمد^۳ و محمد علیزاده^۴
^۱دانشجوی دکتری الکترونیک دانشگاه صنعتی شیراز، e.brahimimi@sutech.ac.ir
^۲دانشیار دانشگاه علم و صنعت ایران، abrishamifar@iust.ac.ir
^۳استادیار دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، a.ahmad@nit.ac.ir
^۴مربی دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ره) نوشهر، golmahalleh63@gmail.com

چکیده - مزیت‌های زیاد رانش الکتریکی بهره‌گیری از آن را برای تحرک شناور مناسب کرده است. در این مقاله با توجه به مزایای موتورهای چندفازه، راه‌اندازی یک موتور القایی شش‌فازه بررسی شده است. به‌علت مزایای فراوان و پاسخ‌های مناسب، کنترل سرعت موتور با الگوریتم *DTC-SVPWM* انجام شده است. ابتدا مدل‌سازی موتور شش‌فازه و سپس استخراج روابط کنترلی و در نهایت شبیه‌سازی سیستم در نرم‌افزار *SIMULINK MATLAB* انجام شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی و پیاده‌سازی بر روی یک نمونه آزمایشگاهی با توان ۲ کیلوواتی همگی موید مناسب بودن این روش کنترلی برای کلیه شرایط عملکردی سیستم شناور بوده است. با اجرای یک سری مانورهای رایج عملی که در شناورها اجرا می‌شود، نتایج نمونه آزمایشگاهی جهت بهره‌برداری در یک شناور واقعی استخراج شد.

کلید واژه - موتور القایی شش‌فازه، کنترل سرعت موتور، *DTC-SVPWM*، رانش الکتریکی.

۱- مقدمه

بی‌جایگزین مدنظر گرفته‌اند. روش *DTC* در سال ۱۹۸۴ توسط تاکاهاشی و سپس در سال ۱۹۸۵ توسط دپنبروک در آلمان معرفی شد [۲]. بوگومولوف، یک مطالعه‌ی جامع برای طراحی موتور سنکرون آهنربای دائم ۲۰ مگاوات برای کاربرد رانش دریایی انجام داده است [۳]. طاهری و همکاران، یک کنترل‌کننده جستجوی شار را برای بهبود کارایی روش *DTC* در یک موتور القایی شش‌فازه پیشنهاد داده‌اند [۴]. در کارهای اخیر تمرکز بر روش *DTC* به‌دلیل برخورداری از مزایایی همچون پیاده‌سازی مناسب در پردازنده‌های دیجیتال و مقاوم بودن سیستم کنترل به تغییر مؤلفه‌های ماشین به‌جز مقاومت استاتور است. تدوین این مقاله به این صورت است که در ادامه روش کنترل دور موتور شش‌فازه القایی و الگوریتم *DTC-SVPWM* مناسب آن بازبینی شده است. سپس در بخش شبیه‌سازی برای بررسی درستی عملکرد سیستم، نرم‌افزار *MATLAB* به‌کار گرفته شد. نمایی از راه‌انداز پیاده‌سازی شده برای کنترل یک موتور القایی شش‌فازه ۲ کیلوواتی نشان داده شده است. در نهایت مقاله با نتیجه‌گیری کارهای صورت گرفته پایان می‌یابد.

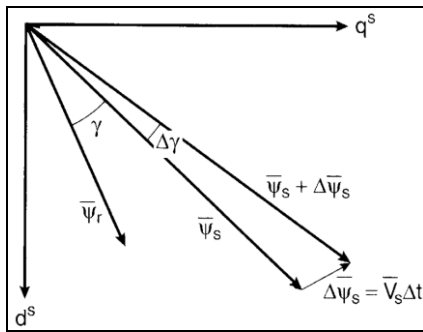
مزیت‌های زیاد رانش الکتریکی شامل قدرت حمل بار بیشتر، انعطاف‌پذیری زیاد در طراحی کشتی، دستیابی به قابلیت اطمینان بالاتر، صرفه‌جویی در مصرف سوخت، کاهش هزینه‌های نگهداری، افزایش دسترسی به نیروهای کمکی و مزیت زیست محیطی بهره‌گیری از آن را برای تحرک شناور مناسب کرده است. موتورهای چندفازه دارای مزایای تولید کمتر محتوای هارمونیکی، بازه خطا و قابلیت اطمینان بیشتر، افزایش فرکانس نوسان‌های گشتاور و کاهش دامنه جریان هر فاز بدون کاهش ولتاژ آن می‌باشد [۱]. مهم‌ترین دلیل انتخاب یک موتور القایی شش‌فازه در این پژوهش توجه به مداومت شناوری در صورت بروز خطا و همچنین آزمونی برای دستیابی به توان‌های زیاد در رانش الکتریکی یک کشتی می‌باشد. کارهای پیشین در کشور فاقد نگاه عملی و بهره‌گیری از نتایج برای پیشبرد طرح‌های مورد نیاز سازمان‌های دریایی کشور می‌باشد که استفاده از رانش الکتریکی را به‌عنوان نیازی

۲- کنترل مستقیم گشتاور با مدولاسیون پهنای پالس بردار فضایی (DTC-SVPWM)

که ρ_r و ρ_s به ترتیب زوایای شار استاتور و روتور هستند. با توجه به رابطه (۸) می‌توان گشتاور را با کنترل زاویه بین شار استاتور و روتور کنترل کرد. می‌توان سرعت زاویه‌ای شار روتور را ثابت در نظر گرفت و با تغییر زاویه شار استاتور ρ_s ، گشتاور موتور را تغییر داد و به صورت مستقل کنترل کرد. در فواصل زمانی کوچک نمونه‌برداری، می‌توان رابطه زیر را بین بردارهای فضایی شار و ولتاژ استاتور در نظر گرفت.

$$\overrightarrow{\Delta \psi_s} = \overrightarrow{V_s} \Delta T \quad (9)$$

که $\Delta \psi$ بردار تغییر شار استاتور، V_s بردار ولتاژ استاتور و ΔT زمان نمونه‌برداری است. می‌توان با اعمال بردار ولتاژ مناسب، شار استاتور را تغییر داد و زاویه بین شار استاتور و شار روتور و در نتیجه گشتاور موتور را کنترل کرد [۶]. در شکل ۱ چگونگی تأثیر بردار ولتاژ V_s بر بردار شار ψ_s را نشان می‌دهد.



شکل ۱: تغییرات بردار شار استاتور ψ_s در اثر اعمال بردار ولتاژ V_s [۹].

نظریه کنترل مستقیم گشتاور با مدولاسیون پهنای پالس بردار فضایی (DTC-SVPWM)، موفقیت‌های بزرگی در کنترل سرعت راه‌انداز موتورهای القایی به دست آورده است [۱۰]. روش SVPWM دارای مزایای متعددی است که استفاده بهتر از باس DC، فراجش گشتاور کمتر، اعوجاج هارمونیک کل کمتر در جریان موتور، تلفات

موارد زیر به آن دلیل آورده می‌شود که تفاوت‌ها و شباهت‌های موتور سه فاز با یک نمونه شش‌فازه تبیین شود. معادله گشتاور موتور القایی شش‌فازه به صورت رابطه (۱) می‌باشد.

$$T = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \overrightarrow{\psi_s} \times \overrightarrow{I_s} \quad (1)$$

که ψ_s شار استاتور، I_s جریان استاتور و P تعداد قطب‌های موتور است [۵-۶].

بین شارها و جریان‌های روتور و استاتور، روابط زیر برقرار است.

$$\overrightarrow{\psi_s} = L_s \overrightarrow{i_s} + L_m \overrightarrow{i_r} \quad (2)$$

$$\overrightarrow{\psi_r} = L_r \overrightarrow{i_r} + L_m \overrightarrow{i_s} \quad (3)$$

که L_s اندوکتانس استاتور، L_r اندوکتانس روتور و L_m اندوکتانس متقابل روتور و استاتور است. بازنویسی معادلات این‌گونه است.

$$\overrightarrow{i_r} = \frac{\overrightarrow{\psi_r}}{L_r} - \frac{L_m}{L_r} \overrightarrow{i_s} \quad (4)$$

$$\overrightarrow{i_s} = \frac{\overrightarrow{\psi_s}}{L_s} - \frac{L_m}{L_s} \overrightarrow{i_r} \quad (5)$$

با جایگزینی رابطه (۴) در (۵)، رابطه زیر به دست می‌آید.

$$\overrightarrow{i_s} = \frac{\overrightarrow{\psi_s}}{L_s} - \frac{L_m}{L_s} \left(\frac{\overrightarrow{\psi_r}}{L_r} - \frac{L_m}{L_r} \overrightarrow{i_s} \right) \quad (6)$$

با توجه به روابط جریان استاتور بر حسب شار روتور و استاتور به دست می‌آید:

$$\overrightarrow{i_s} = \frac{L_r}{L_s L_r - L_m^2} \overrightarrow{\psi_s} - \frac{L_m}{L_s L_r - L_m^2} \overrightarrow{\psi_r} \quad (7)$$

اگر جریان استاتور در رابطه (۱) قرار داده شود، معادله گشتاور به صورت زیر به دست می‌آید [۷-۸]:

$$\begin{aligned} \overline{T_e} &= \frac{3P}{2} \frac{L_m}{L_s L_r - L_m^2} \overrightarrow{\psi_s} \times \overrightarrow{\psi_r} \\ &= \frac{3P}{2} \frac{L_m}{L_s L_r - L_m^2} |\overrightarrow{\psi_s}| \times |\overrightarrow{\psi_r}| \cdot \sin(\rho_s - \rho_r) \end{aligned} \quad (8)$$

در مورد هارمونیک‌های مختلف در ماشین شش‌فازه بیان کرد:

۱- هارمونیک اصلی به اضافه هارمونیک‌های $12m \pm 1, (m=1,3,...)$ به زیرفضای $(d-q)$ مدل می‌شوند و در ایجاد نیروی الکتروموتوری و چرخش MMF در فاصله هوایی نقش دارند.

۲- هارمونیک‌های $6k \pm 1, (k=1,3,...)$ به زیرفضای $(z_1 - z_2)$ مدل می‌شوند و در ایجاد نیروی الکتروموتوری نقشی ندارند. این هارمونیک‌ها شامل هارمونیک‌های پنجم، هفتم، نهم و ... هستند. چون زیرفضای $(z_1 - z_2)$ عمود بر زیرفضای $(d-q)$ است، پس متغیرهای موجود در این فضا باعث ایجاد نیروی الکتروموتوری و چرخش MMF در فاصله هوایی نمی‌شوند و باید در قسمت راه‌انداز تا حد ممکن مقدار آن‌ها را کاهش داد. این زیرفضا را به عنوان یک زیرفضای صفر در نظر می‌گیریم.

۳- هارمونیک‌های مضرب سه به زیرفضای $(o_1 - o_2)$ مدل می‌شوند و اگر ماشین از نوع دو زمین مجزا باشد حذف می‌شوند. این هارمونیک‌ها در چرخش MMF نقشی ندارند.

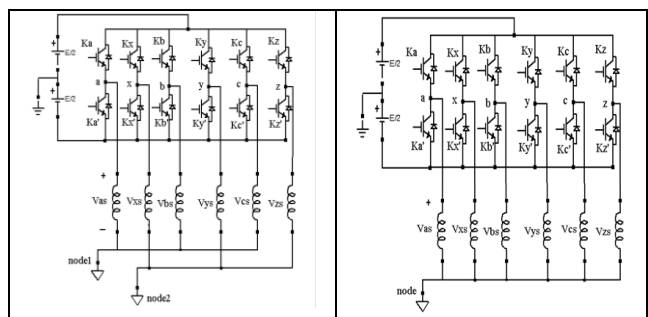
با ضرب ماتریس تبدیل T در هر ولتاژ یا جریان، مقادیر مربوطه در این سه صفحه به دست می‌آیند.

$$T = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & \cos(4\gamma) & \cos(8\gamma) & \cos(\gamma) & \cos(5\gamma) & \cos(9\gamma) \\ 1 & \sin(4\gamma) & \sin(8\gamma) & \sin(\gamma) & \sin(5\gamma) & \sin(9\gamma) \\ 1 & \cos(8\gamma) & \cos(4\gamma) & \cos(5\gamma) & \cos(\gamma) & \cos(9\gamma) \\ 1 & \sin(8\gamma) & \sin(4\gamma) & \sin(5\gamma) & \sin(\gamma) & \sin(9\gamma) \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

۲-۱- مدل‌سازی ماشین

برای ساده‌سازی کار، مدل‌سازی

کلیدزنی کمتر و پیاده‌سازی آسان‌تر در سیستم‌های دیجیتال را ارائه می‌دهد. به‌طور کلی دو روش اصلی برای افزایش توان در ماشین‌های الکتریکی وجود دارد. روش نخست استفاده از اینورترهای چندسطحی و روش دوم بهره‌گیری از ماشین‌های چندفازه می‌باشد [۱۱]. ماشین‌های شش‌فازه از نظر اتصال سیم‌پیچی‌های استاتور به دو ساختار یک صفر مشترک و دو صفر مجزا تقسیم می‌شوند که در شکل ۲ شمای کلی هر دو روش نمایش داده شده است.

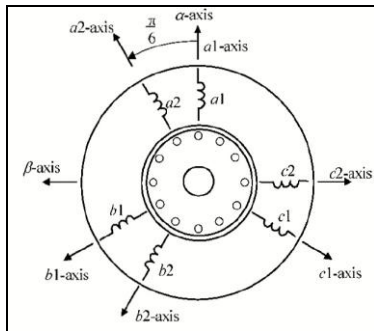


شکل ۲: الف- دو زمین مجزا، ب- یک زمین مشترک.

در سیستم چندفازه که با یک اینورتر منبع ولتاژ شش ساقه تغذیه می‌شود، هارمونیک‌های بزرگ جریان به وجود خواهد آمد. با راه‌برد جداسازی بردارهای فضایی، کاهش این هارمونیک‌ها دنبال می‌شود. برای این منظور، مؤلفه‌های ولتاژ و جریان ماشین به سه زیرفضا تصویر می‌شوند. ابتدا بردار فضایی اصلی با زیرفضای d-q مدل می‌شود و سپس دو زیرفضای عمود بر آن در نظر گرفته می‌شود. با این کار هارمونیک‌هایی که باعث چرخش نیروی الکتروموتوری در ماشین می‌شوند و هارمونیک‌هایی که چرخش در آن‌ها صفر است از هم جدا می‌شوند و تحلیل و کنترل ماشین بسیار ساده‌تر خواهد شد.

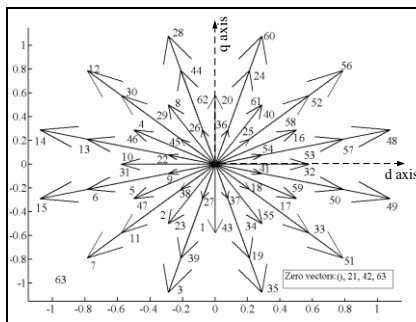
به‌طور خلاصه می‌توان مطالب زیر را

مشاهده می‌شود که مؤلفه‌های این زیرفضاها در تبدیل انرژی الکترومغناطیسی نقش ندارند و باید تضعیف شوند. فازورهای در نظر گرفته شده برای ولتاژ سیم‌پیچ‌های سه فاز به صورت شکل ۳ می‌باشند. با فرض آن که ماشین دارای دو زمین مجزا باشد، با تغییر مقادیر کلیدزنی از صفر تا ۶۳ تمام حالت‌ها به دست می‌آیند ($\gamma = \pi/6$).



شکل ۳: نمایش فازوری سیم‌پیچ‌های ماشین شش‌فاز.

با ضرب ماتریس تبدیل در ولتاژ فازها، مقادیر مربوطه در سه صفحه $(d-q)$ ، (z_1-z_2) ، (o_1-o_2) به دست می‌آیند. نمایش بردارهای صفحه $d-q$ در ماشین شش‌فاز در شکل ۴ نشان داده شده است. شبیه‌سازی و پیاده‌سازی سیستم با این مدل‌سازی انجام شد.



شکل ۴: نمایش بردارهای مربوط به صفحه $d-q$ در ماشین شش‌فاز [۱۰].

۳- شبیه‌سازی

ساختار کلی شکل ۵ مبنای پیاده‌سازی

ماشین با فرض‌های توزیع سینوسی سیم‌پیچ‌های ماشین، صرف‌نظر از اندوکتانس ناشی متقابل، مسیر شار خطی و نسبت تبدیل یکسان استاتور و روتور در نظر گرفته شده است [۱۱].

$$\begin{aligned} [V_s] &= [R_s] \cdot [i_s] + p \cdot ([\Psi_s]) \\ &= [R_s] \cdot [i_s] + p \cdot ([L_{ss}] [i_s] + [L_{sr}] [i_r]) \end{aligned} \quad (11)$$

با اعمال تبدیل T به روابط ولتاژ، رابطه زیر به دست می‌آید.

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ v_{z1s} \\ v_{z2s} \\ v_{o1s} \\ v_{o2s} \end{bmatrix} = [T] \cdot [v_s], \quad \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{z1s} \\ i_{z2s} \\ i_{o1s} \\ i_{o2s} \end{bmatrix} = [T] \cdot [i_s] \quad (12)$$

با ساده‌سازی و نمایش به شکل رابطه (۱۳) و تبدیل روابط از مرجع چرخان به ساکن با ماتریس (۱۴)، به شکل ماتریسی روابط ماشین در محور $d-q$ می‌رسیم که در رابطه (۱۵) نشان داده شده است.

$$\begin{aligned} p &= \frac{d}{dt} & L_s &= L_{ls} + 3L_{ms} \\ M &= 3L_{ms} & L_r &= L_{lr} + 3L_{ms} \end{aligned} \quad (13)$$

$$[T_r^s] = \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & -\sin(\theta_r) \\ \sin(\theta_r) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \quad (14)$$

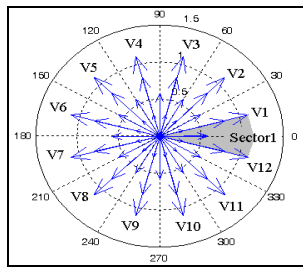
$$\begin{bmatrix} v_{ds}^s \\ v_{qs}^s \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + L_s \rho & 0 & M \rho & 0 \\ 0 & r_s + L_s \rho & 0 & M \rho \\ M \rho & -\omega_r M & r_r + L_r \rho & -\omega_r L_r \\ \omega_r M & M \rho & \omega_r L_r & r_r + L_r \rho \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^s \\ i_{qs}^s \\ i_{dr}^s \\ i_{qr}^s \end{bmatrix} \quad (15)$$

برای صفحه‌های (z_1-z_2) ، (o_1-o_2) روابط ولتاژی به صورت زیر تبدیل می‌شوند.

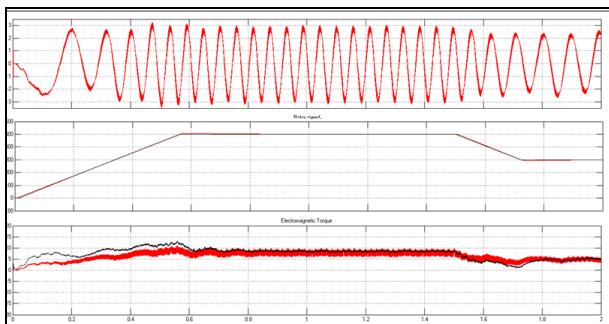
$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} v_{z1s} \\ v_{z2s} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} r_s & 0 \\ 0 & r_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_{ls} & 0 \\ 0 & L_{ls} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{z1s} \\ i_{z2s} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} v_{o1s} \\ v_{o2s} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} r_s & 0 \\ 0 & r_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_{ls} & 0 \\ 0 & L_{ls} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{o1s} \\ i_{o2s} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (16)$$

از روابط پیشین آشکار می‌شود که تمام متغیرهایی که در تبدیل انرژی الکترومغناطیسی نقش دارند به صفحه $(d-q)$ مدل می‌شوند و باید مقدار آن‌ها افزایش یابد. با روابط موجود در زیرفضای (z_1-z_2) ، (o_1-o_2)

است. این منحنی‌ها و پاسخ سیستم به آن‌ها در شکل ۸ نشان داده شده است.

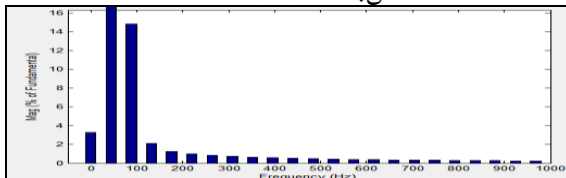


شکل ۷: ولتاژها در صفحه $(\alpha-\beta)$ با $\delta=30^\circ$.



شکل ۸: دستورات ارسالی برای سیستم شش‌فاز با الگوریتم کنترلی DTC-SVPWM و پاسخ سیستم به آن‌ها.

برای سیستم شش‌فاز با الگوریتم کنترلی DTC-SVPWM مقدار THD برابر با ۱۵/۲۳ می‌باشد.

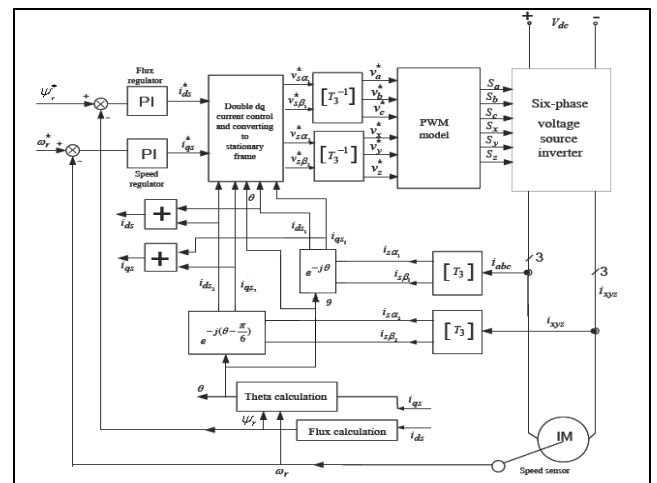


شکل ۹: THD موتور شش‌فاز با DTC-SVPWM.

۳-۱- پیاده‌سازی عملی

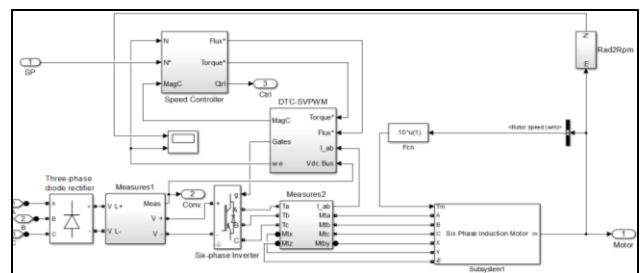
موارد مطرح شده در این مقاله منجر به ساخت یک نمونه آزمایشگاهی شد که شامل قسمت‌های نشان داده شده در شکل (۱۱) می‌باشد که قسمتی از کارهای انجام شده در ادامه آمده است. برای ایجاد باس DC یک یکسوکننده DC سه فاز و جهت کنترل دور موتور یک اینورتر شش‌فاز طراحی و با تحلیل حرارتی و تلفات پیاده‌سازی شد.

قرار گرفته است. ولتاژ تغذیه ورودی سه فاز با دامنه ۳۸۰ ولت و فرکانس ۵۰ هرتز می‌باشد. در شکل، یک بخش جدول انتخاب کلیدزنی قرار دارد که خروجی کنترل‌کننده‌های هیستریزس و شماره بخش محل قرارگیری شارگردان به آن اعمال می‌شود. سپس انتخاب بردار ولتاژ از جدول کلیدزنی انجام می‌شود. این بردار از طریق اینورتر شش‌فاز به موتور اعمال می‌شود.



شکل ۵: ساختار کلی الگوریتم DTC-SVPWM.

در شکل ۶ شمای کلی بخش راه‌انداز نشان داده شده است.



شکل ۶: شمای کلی اجزای بخش‌های تشکیل‌دهنده ساختار الگوریتم DTC-SVPWM.

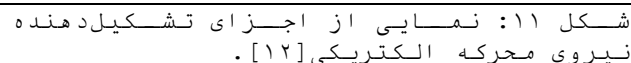
نمایش کلیدزنی‌ها در صفحه $(\alpha-\beta)$ در حالتی که زاویه بین سیم‌پیچ‌ها ۳۰ درجه است، به صورت شکل ۷ می‌باشد. برای آزمون سیستم شبیه‌سازی، یک منحنی تغییرات سرعت و گشتاور در وضعیتی عملیاتی از شناوری واقعی در نظر گرفته شده

سیاسگذاری

مراجع

- [۱۰] اصغر طاهری "کنترل گشتاور موتور القایی با دو استاتور به منظور کاهش تلفات و ضریب گشتاور"، رساله دکتری، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی برق، تابستان ۱۳۹۰.

- [11] A. R. Munoz and T. A. Lipo, "Dual Stator Winding Induction Machine Drive," IEEE Transactions on Industrial Applications, Vol 36, no. 5, pp. 1369-1379, Sep/Oct 2000.
- [12] Reference List LNG Carriers Electric Power and Propulsion Systems, ABB AS Marine and Turbocharging, 2010.



شکل ۱۲: شمای کلی پیاده‌سازی راه‌انداز موتور القایی شش‌فازه با الگوریتم کنترل DTC-SVPWM.

۴- نتیجه گیری

9