مدل‌سازی وکنترل محرکه دو موتور القایی پنج فاز با اتصال سری به روش خطی سازی ورودی خروجی

غلامرضا عرب مارکده[i]؛ سید محسن احمدی[ii]

چکیده

کاهش دامنه نوسانات گشتاور، افزایش نسبت آمپر بر گشتاور نسبت به ماشین‌های مشابه، کاهش جریان فاز بدون افزایش ولتاژ بر فاز و قابلیت اعتماد بیشتر، از جمله برتریهای محرکه های[1] چند فاز نسبت به محرکه های سه فاز متداول می‌باشند. قابلیت دیگری که در بکارگیری ماشین‌های چند فاز وجود دارد کنترل مستقل موتورهای با اتصال سری تغذیه شده از یک اینورتر منبع ولتاژ است که در آن از یک جابجایی فاز مناسب در اتصال سیم-پیچ موتورها استفاده شده است. روش خطی سازی ورودی-خروجی، ضمن ساده تر نمودن طراحی کنترل کننده، امکان کنترل مستقل خروجی‌های ماشین را نیز فراهم می‌کند. در این مقاله روش خطی سازی ورودی-خروجی برای کنترل مستقل گشتاور و شار دو موتور القایی پنج فازه سری مطرح شده است. شبیه سازی‌های کامپیوتری، درستی و دقت عملکرد کنترل مستقل ماشین‌ها را نشان می‌دهند.

کلمات کلیدی

اتصال سری، خطی‌سازی ورودی-خروجی، محرکه دو موتوری و ماشین‌های پنج فاز

Control of Series-Connected Two-Motor Five-Phase Induction Drive System with a Single-Inverter based on Input-Output Linearization

G. R. Arab Markadeh; S. M. Ahmadi

ABSTRACT

Multi-phase drive systems have several advantages over conventional three-phase drives such as: reducing the amplitude of torque pulsations, increasing the torque per ampere ratio for the same volume machine, reducing the current per phase without increasing the voltage per phase, and higher reliability. An additional possibility, opened up by the use of multiphase machines, is independent control of a set of series connected motors, supplied from a single voltage source inverter using a appropriate phase transposition in the motor winding connections. Input-output linearization method can be used to linearization of the relation between the induction motor inputs and outputs. Decouple torque and stator flux control of series-connected two-motor five-phase induction motor can be obtained using the linearized model. Simulation results confirm the effectiveness of the proposed control method.

KEYWORDS

Series connected, Input-output linearization, Two-Motor drives, Five-phase induction machine

[i]. استادیار دانشکده فنی-گروه مهندسی برق- دانشگاه شهرکرد. Email: arab-gh@eng.sku.ac.ir

[ii]. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی برق- دانشگاه آزاد اسلامی- واحد نجف آباد Email: sama_esf@yahoo.com

۱- مقدمه

کارخانجات کاغذ سازی، نخ‌پیچ‌ها در کارخانجات ریسندگی، کشنده‌ها و غیره مواردی هستند که در آنها سیستم‌های محرکه چند موتوری سرعت متغیر بکار گرفته می‌شوند. از آنجاکه تمامی سیستم‌های محرکه چند موتوری موجود شامل موتورهای سه فاز می‌باشند، امکان کنترل مستقل چند موتور توسط یک سیستم محرکه اینورتری سه فاز وجود ندارد، لذا در بکارگیری این نوع از محرکه ها لازم است موتورها هم از نظر نوع و هم از نظر شرایط کارکرد یکسان باشند تا بتوان آنها را توسط یک اینورتر سه ساق کنترل نمود [۱]. با ارائه مفهوم سیستم‌های بیش از سه فاز و تبدیل آنها به دستگاه‌های مرجع چندتایی [۲]، محققان استفاده از سیستم‌های بیش از سه فاز را برای ماشین‌های جریان متناوب مد نظر قرار داده‌اند.

در حقیقت افزایش تعداد فازها برای یک ماشین جریان متناوب، برتریهای زیادی را موجب می‌شود که یکی از این مزایا افزایش درجه آزادی عملکرد ماشین است، به این مفهوم که وقتی تعداد فازها از سه بیشتر می‌شود، متناسب با تعداد فازها جفت مؤلفه‌های موجود در دستگاه مرجع نیز افزایش می‌یابند (بیش از یک جفت مؤلفه dq ایجاد می‌شود). در صورتیکه این سیستم چند فاز متقارن و متعادل باشد (اختلاف فازهای متوالی و دامنه فازهای یکسان داشته باشد) تنها یکی از این جفت مؤلفه‌ها در دستگاه مرجع دارای مقدار می‌شود و بقیه جفت مؤلفه‌ها همانند مؤلفه صفر عمل خواهند کرد، که آن را افزایش درجه آزادی گویند. با ایجاد توالی فازهای مناسب برای هر یک از ماشین‌های چند فازه که با هم سری شده‌اند، می‌توان آنها را توسط یک اینورتر چند ساق به‌طورمستقل کنترل نمود [۳] و[۴]. علاوه بر این، نوع ماشین‌های بکار گرفته شده در اتصال سری نیز بی‌اهمیت بوده و هر ترکیبی از ماشین‌های القایی، سنکرون، سنکرون رلوکتانسی، مغناطیس دایم و غیره قابل استفاده می‌باشند [۵] و[۶].

محققان، پژوهش‌های فراوانی را در زمینه کنترل برداری سیستم‌های محرکه چند موتوری چند فازه انجام داده‌اند. این روش قادر به کنترل مستقل ماشین‌های چند فازه بر اساس کنترل مولفه های جریان استاتور در دستگاههای مرجع گردان می باشد. در این میان، سیستم‌های دو موتوری پنج فاز، دو موتوری شش فاز و سه موتوری هفت فاز از جمله مواردی هستند که مورد تحقیق قرار گرفته‌اند [۶]، [۷] و [۸].

یکی دیگر از روش‌های موجود برای کنترل سیستم محرکه ماشین‌های جریان متناوب، روش خطی سازی ورودی خروجی است. با بکارگیری این روش، تعداد کنترل کننده‌های PI کاهش می‌یابد، نیاز به انتقال متغیرها به دستگاه گردان وجود ندارد و کنترل مستقل گشتاور و شار در شرایط گذرای شار نیز میسر می‌شود [۹]. در حالیکه روش کنترل برداری در چنین شرایطی محقق نمی‌شود.

از آنجاکه بهترین و مناسب ترین کاربرد برای سیستم‌های چند موتوری چند فازه با اتصال سری، سیستم دو موتوری می‌باشد، در این پژوهش خطی سازی ورودی خروجی برای کنترل سیستم محرکه دو موتوری پنج فاز با اتصال سری مورد بررسی قرار گرفته است. بر این اساس در بخش دوم این مقاله معادلات توصیف کننده یک ماشین پنج فاز و چگونگی اتصال سری دو ماشین پنج فاز ارائه شده است سپس در بخش سوم روش خطی سازی ورودی خروجی برای یک موتور پنج فاز القایی و تعمیم آن برای سیستم دو موتوری بیان شده است و در بخش چهارم، نتایج شبیه سازی سیستم یاد شده توسط نرم افزار *MATLAB* ارائه شده است.

۲- مدل‌سازی یک ماشین پنج فاز

۲-۱- معادلات توصیف کننده یک ماشین القایی پنج فاز

الف- مدل بر اساس متغیرهای فاز

طراحی یک ماشین القایی پنج فاز به گونه‌ای است که بین هر دو فاز متوالی، اختلاف زاویه‌ای $\alpha = \frac{2\pi}{5}$ وجود دارد و استاتور و روتور دارای ساختار پنج فازه می‌باشند. تمامی فرضیات استاندارد مربوط به تئوری جامع ماشین‌های الکتریکی قابل پیاده‌سازی است. بنابراین معادلات ولتاژ روتور و استاتور و معادلات شار پیوندی به صورت روابط (۱) و(۲) نوشته می‌شوند:

$$v^s = R_s i^s + \frac{d\psi^s}{dt} \qquad \psi^s = L_s i^s + L_{sr} i^r \qquad (۱)$$

$$v^r = R_r i^r + \frac{d\psi^r}{dt} \qquad \psi^r = L_r i^r + L_{rs} i^s \qquad (۲)$$

که v^s، i^s و ψ^s به ترتیب بردارهای ولتاژ، جریان و شار استاتور و v^r، i^r و ψ^r بردارهای متناظر روتور پنج فاز می‌باشند. همچنین L_s ، L_r، L_{sr} و L_{rs} به ترتیب ماتریسهای اندوکتانس خودی استاتور، روتور و متقابل استاتور-روتور می‌باشند.

سیم‌پیچ‌های روتور به طرف استاتور ارجاع داده شده‌اند و ماتریس‌های مقاومت روتور و استاتور قطری هستند. معادله گشتاور شامل جریان‌های فاز روتور و استاتور نیز به صورت رابطه (۳) است:

$$T_e = -\frac{2}{5}L_m\{(i_{1s}i_{1r}+i_{2s}i_{2r}+.....+i_{5s}i_{5r}\ )\sin\theta_r+$$
$$(i_{5s}i_{1r}+i_{1s}i_{2r}+i_{2s}i_{3r}+.....+i_{4s}i_{5r})\sin(\alpha+\theta_r)+$$
$$(i_{4s}i_{1r}+i_{5s}i_{2r}+i_{1s}i_{3r}+.....+i_{3s}i_{5r})\sin(\theta_r+2\alpha)+.....$$
$$+(i_{2s}i_{1r}+i_{3s}i_{2r}+.....i_{1s}i_{5r})\sin(\theta_r+4\alpha)\ \} \qquad (۳)$$

θ_r : موقعیت لحظه‌ای روتور نسبت به استاتور

ب- بکارگیری تبدیلات مجزا سازی برای بیان معادلات در دستگاه‌مرجع

همانگونه که با اعمال ماتریس مجزا سازی روی یک سیستم سه فاز، متغیرهای سه فاز به مختصات دستگاه‌های مرجع منتقل می‌شوند، برای سیستم پنج فاز نیز این امکان وجود دارد که با اعمال ماتریس مجزاسازی مناسب، متغیرهای پنج فاز به مختصات دستگاه‌های مرجع منتقل شوند. البته با این تفاوت که با اعمال این ماتریس روی متغیرهای پنج فاز، یک جفت مؤلفه $\alpha\beta$، یک جفت مؤلفه xy و یک مؤلفه صفر حاصل می‌شود. در حقیقت در یک سیستم پنج فاز منتقل شده به دستگاه‌های مرجع علاوه بر مؤلفه‌های $\alpha\beta 0$، یک جفت مؤلفه xy اضافی نیز بدست می‌آید. این مسئله موجب می‌شود که در سیستم پنج فاز نسبت به سیستم سه فاز یک درجه آزادی اضافی ایجاد شود. ماتریس مجزاسازی $\underline{C}$ برای تبدیل متغیرهای سیستم پنج فاز به $\alpha\beta xy\,0$ صورت رابطه (۴) است[۶]:

$$\underline{C}=\sqrt{\frac{2}{5}}\begin{bmatrix} 1 & \cos\alpha & \cos2\alpha & \cos3\alpha & \cos4\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \sin2\alpha & \sin3\alpha & \sin4\alpha \\ 1 & \cos2\alpha & \cos4\alpha & \cos6\alpha & \cos8\alpha \\ 0 & \sin2\alpha & \sin4\alpha & \sin6\alpha & \sin8\alpha \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \qquad (۴)$$

با اعمال ماتریس $\underline{C}$ روی متغیرهای پنج فاز (ولتاژ، جریان و شارهای پیوندی)، معادلات به دستگاه ساکن منتقل می‌شوند:

$$v^s{}_{\alpha\beta}=\underline{C}.v^s \qquad i^s{}_{\alpha\beta}=\underline{C}.i^s \qquad \psi^s{}_{\alpha\beta}=\underline{C}.\psi^s \qquad (۵)$$

$$v^r{}_{\alpha\beta}=\underline{C}.v^r \qquad i^r{}_{\alpha\beta}=C.i^r \qquad \psi^r{}_{\alpha\beta}=\underline{C}.\psi^r \qquad (۶)$$

برای یک سیستم پنج فاز متقارن (با دامنه یکسان و اختلاف فاز $\alpha=\frac{2\pi}{5}$ بین دو فاز متوالی) بسته به توالی فاز بکار گرفته شده ($abcde$ یا $acebd$) تنها یکی از دو جفت مؤلفه $\alpha\beta$ یا xy دارای مقدار بوده و جفت مؤلفه دیگر مشابه با مؤلفه صفر دارای مقدار صفر می‌باشد.

روابط (۱) و (۲) با اعمال ماتریس $\underline{C}$ به روابط (۷) و(۸) تبدیل می‌شوند:

معادلات ولتاژ استاتور:

$$v_{\alpha s}=\mathrm{R}_s i_{\alpha s}+\frac{d\psi_{\alpha s}}{dt}=R_s i_{\alpha s}+(L_{ls}+L_m)\frac{di_{\alpha s}}{dt}+$$
$$L_m\frac{d}{dt}(i_{\alpha r}\cos\theta_r-i_{\beta r}\sin\theta_r)$$
$$v_{\beta s}=\mathrm{R}_s i_{\beta s}+\frac{d\psi_{\beta s}}{dt}=R_s i_{\beta s}+(L_{ls}+L_m)\frac{di_{\beta s}}{dt}+$$
$$L_m\frac{d}{dt}(i_{\alpha r}\sin\theta_r-i_{\beta r}\cos\theta_r) \qquad (۷)$$
$$v_{xs}=R_S i_{xs}+\frac{d\psi_{xs}}{dt}=R_S i_{xs}+L_{ls}\frac{di_{xs}}{dt}$$
$$v_{ys}=R_S i_{ys}+\frac{d\psi_{ys}}{dt}=R_S i_{ys}+L_{ls}\frac{di_{ys}}{dt}$$
$$v_{os}=R_S i_{os}+\frac{d\psi_{os}}{dt}=R_S i_{os}+L_{ls}\frac{di_{os}}{dt}$$

معادلات ولتاژ روتور:

$$v_{\alpha r}=0=R_r i_{\alpha r}+\frac{d\psi_{\alpha r}}{dt}=R_r i_{\alpha r}+(L_{lr}+L_m)\frac{di_{\alpha r}}{dt}+$$
$$L_m\frac{d}{dt}(i_{\alpha s}\cos\theta_r+i_{\beta S}\sin\theta_r)$$
$$v_{\beta r}=0=R_r i_{\beta r}+\frac{d\psi_{\beta r}}{dt}=R_r i_{\beta r}+(L_{lr}+L_m)\frac{di_{\beta r}}{dt}+$$
$$L_m\frac{d}{dt}(-i_{\alpha s}\sin\theta_r+i_{\beta S}\cos\theta_r) \qquad (۸)$$
$$v_{xr}=0=R_r i_{xr}+\frac{d\psi_{xr}}{dt}=R_r i_{xr}+L_{lr}\frac{di_{xr}}{dt}$$
$$v_{yr}=0=R_r i_{yr}+\frac{d\psi_{yr}}{dt}=R_r i_{yr}+L_{lr}\frac{di_{yr}}{dt}$$
$$v_{or}=0=R_r i_{or}+\frac{d\psi_{or}}{dt}=R_r i_{or}+L_{lr}\frac{di_{or}}{dt}$$

و معادله گشتاور به صورت رابطه (۹) خلاصه می‌شود:

$$T_e=\frac{5}{2}PL_m[(i_{\alpha r}i_{\beta s}-i_{\beta r}i_{\alpha s})\cos\theta_r$$
$$-(i_{\alpha r}i_{\alpha s}+i_{\beta r}i_{\beta s})\sin\theta_r] \qquad (۹)$$

همانطورکه در رابطه (۹) مشاهده می‌شود، معادله گشتاور در یک ماشین پنج فاز در دستگاه مرجع به شکل مناسبی بهبود یافته است و تنها مؤلفه‌های $\alpha\beta$ تولید کننده گشتاور هستند، یعنی مؤلفه‌های جریانی xy در تولید گشتاور بی‌تاثیر هستند. بنابراین تنها یک جفت مؤلفه برای تولید گشتاور در یک ماشین پنج فاز کافی است.

در رابطه (۹) با توجه به بی اثر بودن مؤلفه‌های $xy\,0$ جریانهای استاتور و روتور در گشتاور تولیدی، لازم است که تبدیل چرخشی روی مؤلفه‌های $\alpha\beta$ استاتور یا روتور اعمال شود تا متغیرهای α و β استاتور و روتور را به دستگاه مرجع عمومی انتقال دهد. ماتریس‌های تبدیل چرخشی برای استاتور و روتور در رابطه (۱۰) داده شده است:

$$D_s=\begin{bmatrix}\cos\theta_s & \sin\theta_s \\ -\sin\theta_s & \cos\theta_s\end{bmatrix}, D_r=\begin{bmatrix}\cos\beta & -\sin\beta \\ \sin\beta & \cos\beta\end{bmatrix} \qquad (۱۰)$$

θ_S: موقعیت زاویه‌ای محور d دستگاه مرجع عمومی نسبت به محور فاز اول استاتور

$\beta = \theta_s - \theta_r$: موقعیت زاویه‌ای لحظه‌ای محور d دستگاه مرجع عمومی نسبت به محور فاز اول روتور

$\theta_a = \int \omega_a dt$: مربوط به دستگاه مرجع اختیاری

بنابراین با اعمال ماتریس‌های تبدیل چرخشی، معادلات $v_{\beta r}, v_{\alpha r}, v_{\beta s}, v_{\alpha s}$ در روابط (۷) و (۸) به شکل رابطه(۱۱) تبدیل شده و $v_{or}, v_{os}, v_{yr}, v_{xr}, v_{ys}, v_{xs}$ بدون تغییر باقی می‌مانند:

$$v_{ds} = R_s i_{ds} - \omega_a \psi_{qs} + \frac{d\psi_{ds}}{dt}$$
$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_a \psi_{ds} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} \qquad (۱۱)$$

$$v_{dr} = 0 = R_r i_{dr} - (\omega_a - \omega_r)\psi_{qr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt}$$
$$v_{qr} = 0 = R_r i_{qr} + (\omega_a - \omega)\psi_{dr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} \qquad (۱۲)$$

و در پایان رابطه گشتاور به صورت رابطه (۱۳) تبدیل می‌شود[۴]:

$$T_e = \frac{5}{2} P L_m \left[i_{dr} i_{qs} - i_{ds} i_{qr} \right] \qquad (۱۳)$$

با بررسی روابط(۱۰-۱۳) دیده می‌شود که معادلات ماشین پنج فاز در دستگاه مرجع اختیاری مشابه با ماشین سه فاز است تنها با این تفاوت که در ماشین پنج فاز معادلات مربوط به مؤلفه‌های xy نیز ظاهر شده‌اند. بنابراین همانطوری که اشاره شد در صورتی که از یک توالی پنج فاز متعادل با دامنه‌های فاز یکسان و اختلاف فازهای متوالی $\alpha = \frac{2\pi}{5}$ برای تغذیه ماشین استفاده شود، بسته به ترتیب توالی فازها یک جفت از مؤلفه‌ها و بدنبال آن معادلات مربوط به آن صفر شده و ماشین پنج فاز همچون یک ماشین سه فاز عمل می‌کند.

۲-۲- ایده اتصال سری دو ماشین پنج فاز و اعمال جابه‌جایی فاز

یک ماشین پنج فازنسبت به یک ماشین سه فاز دارای برتریهایی است که از جمله آنها می توان به چند مورد زیر اشاره کرد:

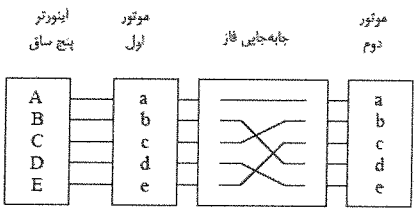
- کاهش توان بر هر ساق اینورتر تغذیه کننده ماشین و بدنبال آن کاهش مقادیر نامی هر کلید
- افزایش قابلیت اعتماد بدلیل افزایش تعداد ساق‌ها
- توزیع سینوسی mmf در فاصله هوایی و ....

آنچنان که پیشترگفته شد یکی دیگر از قابلیت‌های ایجاد شده در ماشین پنج فاز، وجود یک درجه آزادی اضافی است. این ویژگی موجب می‌شود که بتوان از این درجه آزادی به منظور کنترل مستقل دو موتور پنج فاز سری شده که با یک اینورتر تغذیه شده اند استفاده شود. در حقیقت اتصال سری سیم‌پیچ‌های استاتور دو ماشین پنج فاز به گونه‌ای است که ابتدا یک توالی فاز متقارن برای ماشین اول و سپس با اعمال یک جابه‌جایی فاز مناسب، یک توالی فاز متقارن دیگر برای ماشین دوم فراهم می‌کند. از آنجاکه در دستگاه مختصات مرجع، توالی فاز متقارن اول فقط منجر به ایجاد جفت مؤلفه dq شده و توالی فاز متقارن دیگر تنها متناظر با جفت مؤلفه xy می‌باشد، روشن است که در اتصال سری، هر دو جفت مؤلفه xy, dq روی هر کدام از ماشین‌ها ظاهر می‌شوند ولی علت عملکرد مستقل ماشین‌ها از یکدیگر آنست که جفت مؤلفه‌ای که در ماشین اول به شکل dq ظاهر می‌شود در ماشین بعدی بدلیل وجود جابه‌جایی فاز به xy تبدیل می‌شوند و بالعکس.

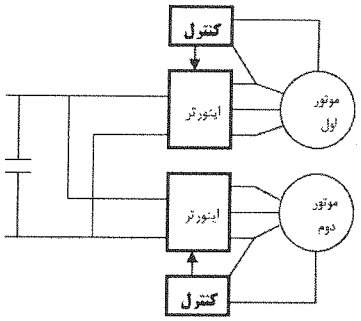
بدین منظور لازمه داشتن دو توالی فاز متقارن برای دو ماشین آنست که روی پنج فاز خروجی از استاتور ماشین اول یک جابه‌جایی فاز مناسب صورت گیرد. در شکل (۱) یک سیستم دو موتوری پنج فاز تغذیه شده از یک اینورتر پنج ساق با اعمال جابه‌جایی فاز مناسب نشان داده شده است. در این سیستم امکان کنترل مستقل گشتاور(سرعت) و شار هر دو موتور با استفاده از یک اینورتر وجود دارد.

گفتنی است که با استفاده از یک اینورتر شش فاز یا دو اینورتر سه فاز که از یک لینک DC مشترک تغذیه شده اند هم می‌توان کنترل مستقل دو موتور سه فاز را انجام داد (مشابه شکل(۲)) ولی هدف از کنترل دوموتور القایی چندفازه با یک اینورتر چندفاز، استفاده از برتریهای موتورهای چند فاز نسبت به موتورهای سه فازاست که پیشتر به آنها اشاره شد. از آنجا که افزایش تعداد فازهای ماشین باعث پیچیده تر و گرانتر شدن اینورتر آن می‌شود بسیار مطلوب است که با استفاده از یک اینورتر چندفازه بتوان بطور همزمان دوموتور را کنترل کرد تا در عین حال که از مزایای موتورهای چندفازه بهره برده می‌شود از اینورتر هم استفاده بهینه گردد.

البته لازم است به این نکته نیز اشاره شود که یکسان بودن نوع ماشینهای سری شده یا برابر بودن تعداد فاز آنها الزامی نیست. به عنوان مثال می‌توان یک موتور القایی شش فاز را با یک موتور PMS سه فاز با جابجایی و ترکیب فاز مناسب با استفاده از یک اینورتر ۶ فاز تغذیه نمود. ولی بهتر است ماشین دوم در اتصال سری از لحاظ قدرت پایین‌تر از ماشین اول باشد (این موضوع ناشی از افت ولتاژ ایجاد شده روی سیم‌پیچ‌های استاتور ماشین اول است).



شکل(۱): سیستم دو موتوری پنج فاز با اتصال سری



شکل(۲): سیستم دو موتوری سه فاز متداول

۳- استفاده از روش خطی سازی ورودی خروجی برای کنترل سیستم محرکه دو موتوری پنج فاز

به منظور کنترل مستقل دو ماشین پنج فاز سری تغذیه شده از یک اینورتر پنج ساق، لازم است کلیدزنی اینورتر به گونه ای انجام گیرد که خروجی پنج فاز اینورتر شامل مجموع هر دو توالی متقارن برای موتور اول و دوم باشد. این موضوع در مختصات دستگاه‌های مرجع عمومی بدان معنی است که با اعمال ماتریس تبدیل روی متغیرهای پنج فاز جفت مؤلفه‌های v_{dqs1} برای موتور اول و v_{dqs2} (همان v_{xy}) برای موتور دوم حاصل می‌شوند. با اجرای روش خطی سازی ورودی خروجی همانطورکه اشاره خواهد شد برای موتور پنج فاز اول ولتاژهای مرجع v_{dqs1} و برای موتور دوم ولتاژهای مرجع v_{dqs2} ایجاد شده و بدنبال آن با بکارگیری تبدیل معکوس روی این دو جفت مؤلفه (v_{dqs2}, v_{dqs1})، ولتاژهای مرجع پنج فاز برای کلیدزنی اینورتر تولید می‌شوند.

در این قسمت چگونگی اجرای روش خطی سازی ورودی خروجی روی یک موتور القایی پنج فاز ارائه می‌شود. سپس به حالت دوموتوری تعمیم داده می شود. چنانچه یک موتور پنج فاز با معادلات (۱۱)، (۱۲)، (۱۳) و $v_{or}, v_{os}, v_{yr}, v_{xr}, v_{ys}, v_{xs}$ از معادلات (۷) و (۸) در نظر گرفته شود، مدل موتور رفتار بسیار غیر خطی خواهد داشت ولی با استفاده از متغیرهای کمکی غیر خطی می‌توان رابطه بین ورودی و خروجی‌های سیستم را خطی نمود. شرط لازم در استفاده از این روش آنست که تمامی حالت‌های سیستم قابل اندازه‌گیری باشند.

در یک موتور القایی پنج فاز در صورتیکه بردار متغیرهای حالت به صورت (۱۴) در نظر گرفته شود، شرط یاد شده برآورده می‌شود (پایین نویس ۱ بیانگر موتور اول است).

$$x = \begin{bmatrix} i_{ds1} & i_{qs1} & \psi_{ds1} & \psi_{qs1} \end{bmatrix}^T \qquad (۱۴)$$

فرم متعارف برای بیان معادلات یک سیستم غیر خطی به صورت رابطه(۱۵) است [۱۰]:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x,u) \\ y &= h(x) \end{aligned} \qquad (۱۵)$$

u می‌تواند به شکل کلی رابطه(۱۶) باشد:

$$u = w[v + \varphi(x)] \qquad (۱۶)$$

w: تابع اسکالر معکوس پذیر، $\varphi(x)$: تابع دلخواه از x و v: ورودی سیستم غیر خطی می‌باشند.

هدف مرحله بعدی آنست که یک رابطه خطی و ساده بین خروجی y و ورودی کنترلی حاصل شود که با مشتق‌گیری از خروجی انجام می‌گیرد. تعداد مرتبه مشتق‌گیری آنقدر تکرار می‌شود تا ورودی کنترلی در رابطه یاد شده دیده شود. مرتبه مشتق‌گیری (r) که مرتبه نسبی سیستم غیر خطی نامیده می‌شود به طور معمول کوچکتر از مرتبه کامل سیستم غیر خطی است ($r<n$). در خطی سازی ورودی خروجی، دینامیک‌های سیستم به دو قسمت خارجی و داخلی تقسیم می‌شوند. دینامیک‌های خارجی همان رابطه ساده و خطی بین مشتقات خروجی و ورودی کنترلی است اما دینامیک داخلی بخشی از دینامیک‌سیستم است که در رابطه ورودی خروجی قابل دیدن نیست. شرط اجرای موفقیت آمیز این روش، پایدار بودن دینامیک‌های داخلی سیستم است که دیدنی نمی‌باشند. انتخاب تابع خروجی $y=h(x)$ در این روش محدود نیست ولی بعضی از انتخاب‌ها برای خروجی منجر به دینامیک‌های داخلی پایدار و بعضی دیگر منجر به دینامیک‌های داخلی ناپایدار می‌شوند. پس انتخاب مناسب خروجی می‌تواند منجر به دینامیک‌های پایدار شده و موفقیت اجرای روش را تضمین کند[۱۰].

با توجه به موارد یادشده و انتخاب v_{ds1} و v_{qs1} به عنوان ورودی‌های کنترلی، رابطه (۱۷) را می‌توان برای مدل غیر خطی موتور القایی ارائه نمود:

$$\dot{x} = f(x) + g_1(x)v_{ds1} + g_2(x)v_{qs1} \qquad (۱۷)$$

که با توجه به (۱۱) و (۱۲) و $v_{0r}, v_{0s}, v_{yr}, v_{xr}, v_{ys}, v_{xs}$، توابع $f(x)$ و $g_i(x)$ به صورت رابطه (۱۸) بدست می‌آیند:

$$f(x)=\begin{bmatrix} -(\frac{R_s}{\sigma}+\frac{L_r.L_s}{R_r.\sigma}).i_{ds1}+\omega_r.i_{qs1}+\frac{R_r}{L_r.\sigma}.\psi_{ds1}+\frac{\omega_r}{\sigma}.\psi_{qs1} \\ -(\frac{R_s}{\sigma}+\frac{L_r.L_s}{R_r.\sigma}).i_{qs1}+\omega_r.i_{ds1}+\frac{R_r}{L_r.\sigma}.\psi_{qs1}-\frac{\omega_r}{\sigma}.\psi_{ds1} \\ -R_s.i_{ds1} \\ -R_s.i_{qs1} \end{bmatrix} \quad (۱۸)$$

$$g_1(x)=\begin{bmatrix}1/\sigma & 0 & 1 & 0\end{bmatrix}^T \quad (۱۹)$$

$$g_2(x)=\begin{bmatrix}0 & 1/\sigma & 0 & 1\end{bmatrix}^T$$

w_r: سرعت زاویه‌ای الکتریکی و $\sigma = L_s(1-\frac{L_m^2}{L_s.L_r})$

چون لازم است تعداد خروجی‌ها با تعداد بردارهای کنترلی (v_{ds1}, v_{qs1}) برابر باشند و همچنین خروجی‌های انتخابی نباید منجر به دینامیک‌های داخلی ناپایدار شوند، خروجی‌های سیستم به صورت رابطه (۲۰) انتخاب می‌شوند:

$$y_1 = T_e = \frac{3.p}{2}(\psi_{ds1}.i_{qs1}-\psi_{qs1}.i_{ds1}) \quad (۲۰)$$

$$y_2 = |\psi_s|^2 = (\psi_{ds1}^2+\psi_{qs1}^2) \quad (۲۱)$$

بدین ترتیب دینامیک‌های خروجی سیستم عبارتند از:

$$\begin{bmatrix}\dot{y}_1\\ \dot{y}_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}L_f y_1\\ L_f y_2\end{bmatrix}+D(x).\begin{bmatrix}v_{ds1}\\ v_{qs1}\end{bmatrix} \quad (۲۲)$$

$$D(x)=\begin{bmatrix}L_{g_1}y_1 & L_{g_2}y_1\\ L_{g_1}y_2 & L_{g_2}y_2\end{bmatrix} \quad (۲۳)$$

در این روابط $L_f y$ و $L_g y$ مشتق‌های Lie تابع $y(x)$ در راستای بردارهای $f(x)$ $g_1(x)$ و $g_2(x)$ می‌باشند که به فرم رابطه (۲۴) تعریف شده‌اند:

$$L_\varphi y = \sum_{i=1}^{n}\frac{\partial y}{\partial x_i}\varphi_i(x) \quad (۲۴)$$

در اینجا n تعداد متغیرهای حالت است.

با توجه به ناویژه بودن ماتریس $D(x)$، قانون کنترل برای سیستم غیر خطی موتور القایی پنج فاز به شکل رابطه (۲۵) حاصل می‌شود[۱۱]:

$$\begin{bmatrix}v_{ds1}\\ v_{qs1}\end{bmatrix}=D^{-1}(x).\left(\begin{bmatrix}-L_f y_1\\ -L_f y_2\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}v_a\\ v_b\end{bmatrix}\right) \quad (۲۵)$$

که

$$\begin{cases} v_a = \dot{y}_1 \\ v_b = \dot{y}_2 \end{cases} \quad (۲۶)$$

v_a, v_b ورودی‌های کنترلی کمکی بوده و برای جایابی مناسب قطب‌های سیستم خطی شده به فرم روابط (۲۷) و (۲۸) تعریف می‌شوند:

$$v_a = -k_a(y_1 - T_{eref}(t)) + \dot{T}_{eref}(t) \quad (۲۷)$$

$$v_b = -k_b(y_2 - |\lambda_s|^2_{ref}(t)) + |\dot{\lambda}_s|^2_{ref}(t) \quad (۲۸)$$

ثابت‌های k_b, k_a چنان انتخاب می‌شوند که سیستم گفته شده به یک سیستم خطی غیر تزویجی مرتبه اول تبدیل شده و خطاهای کنترل شار و گشتاور به طور نمایی به سمت صفر میل کنند[۱۱].

به همین ترتیب برای اجرای روش خطی سازی ورودی خروجی برای یک سیستم محرکه دو موتوری پنج فاز با اتصال سری کافی است که قانون کنترل مربوط به سیستم غیر خطی ارائه شده در (۲۵) برای موتور دوم نیز بر اساس مؤلفه‌های d_2q_2 اجرا شود. در پایان خروجی حاصل از این سیستم که جفت مؤلفه v_{dqs2} می‌باشد همراه با جفت مؤلفه v_{dqs1} بدست آمده برای ماشین اول توسط ماتریس تبدیل به مؤلفه‌های پنج فاز تبدیل شده و ولتاژهای مرجع پنج فاز را برای کلیدزنی اینورتر فراهم می‌کنند. یادآوری می‌شود که v_{dqs1} و v_{dqs2} مولفه‌های ولتاژ مرجع استاتور در دستگاه ساکن می‌باشند و یکی از برتریهای روش پیشنهادی هم این است که نیاز به انتقال متغیرها به دستگاه گردان ندارد.

در شکل (۳) بلوک دیاگرام نحوه اجرای خطی سازی ورودی خروجی برای سیستم دو موتوری پنج فاز نشان داده شده است. گفتنی است که برای کنترل سرعت موتورها می‌توان با استفاده از کنترل کننده PI از روی خطای سرعت نسبت به مقدار مرجع آن، مقدار گشتاور مرجع را بدست آورد و با استفاده از روش یاد شده، کنترل مستقل سرعت و شار استاتور دو موتور سری شده را با یک اینورتر انجام داد.

گفتنی است که در سیستم عملی توسط حسگرهای اثر هال می‌توان ولتاژهای پنج فاز هر دو موتور را اندازه‌گیری نمود و یا با استفاده از ولتاژ لینک DC و با داشتن وضعیت کلیدهای اینورتر می‌توان ولتاژهای پنج فاز را با استفاده از رابطه (۲۹) بدست آورد:

$$\begin{aligned}\overline{V}_{s1} &= 0.4V_{dc}\left[S_a + aS_b + a^2S_c + a^3S_d + a^4S_e\right] \\ \overline{V}_{s2} &= 0.4V_{dc}\left[S_a + aS_c + a^2S_e + a^3S_b + a^4S_d\right]\end{aligned} \quad (۲۹)$$

که $a = e^{j2\pi/5}$ و $S_a,...,S_e$ وضعیت کلیدهای نظیر در اینورتر پنج فاز هستند.

بنابراین به ازای هر وضعیتی در کلیدهای اینورتر، یک بردار $\overline{V}_{s1}$ در صفحه $dq1$ و یک بردار $\overline{V}_{s2}$ در صفحه $dq2$ بدست می‌آید که با اعمال ماتریس تبدیل معکوس C^{-1} روی هر کدام از این بردارها به ترتیب ولتاژهای پنج فاز موتور اول و دوم بدست می‌آیند. در مرجع [۱۲] در تکمیل این مبحث، با در نظر گرفتن اثرات افت ولتاژ ناشی از کلیدها و همچنین اثر افت ولتاژ ناشی از مؤلفه صفر ولتاژ هر موتور بر موتور دیگر، تحقیق

دیگری انجام شده است.

٤- نتایج شبیه سازی

روش خطی سازی ورودی خروجی روی سیستم محرکه دو موتوری پنج فاز با اتصال سری توسط نرم افزار *MATLAB* و در محیط *SIMULINK* بر اساس بلوک دیاگرام شکل (۳) مورد شبیه‌سازی قرار گرفت. موتورهای مورد استفاده در شبیه سازی یکسان فرض شده اند و پارامترهای آنها در جدول (۱) آمده است.

در شکل (۴- الف) ابتدا تحت شرایط بی‌باری، مرجع سرعت برای هر دو موتور در بازه‌های زمانی ۱-۸/. و ۰/۵-۰/۳ از صفر به ۱۰۰rad/sec افزایش داده شده و در۱۰۰ rad/sec ثابت شده است سپس به ترتیب در زمان‌های ۳ و ۲/۵ ثانیه دوباره مرجع سرعت هر دو موتور از۱۰۰ rad/sec به ۱۰۰- معکوس شده است. همانطورکه دیده می‌شود وقتی مرجع سرعت برای یکی از موتورها تغییر می‌کند، هیچ تاثیری روی سرعت موتور دیگر نخواهد داشت. این موضوع عملکرد مستقل ماشین‌ها را در اتصال سری به اثبات می‌رساند. در شکل (۴- ب) گشتاور بار و گشتاور الکترومغناطیسی تولیدی موتورها برای اثبات عملکرد چهار ناحیه‌ای محرکه نشان داده شده است. گشتاورهای بار به ترتیب در زمان‌های ۱/۵ و ۱ ثانیه به موتور اول و دوم اعمال شده‌اند.

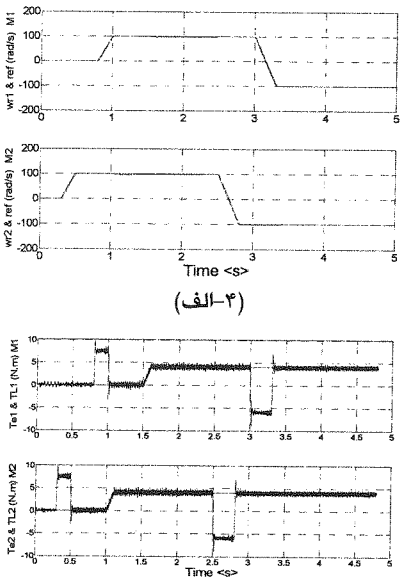
در شکل (۵) ولتاژ و جریان فاز a اینورتر با روش کلیدزنی SPWM نشان داده شده‌اند.

ولتاژهای مرجع v_{q1s}, v_{d1s} برای موتور اول در شکل (۶- الف) و برای موتور دوم در شکل (۶- ب) مشخص شده‌اند. در لحظه ۳ ثانیه با تغییر مرجع سرعت موتور اول، v_{qs1}, v_{ds1} موتور اول و در لحظه ۲/۵ ثانیه با تغییر مرجع سرعت موتور دوم، v_{qs2}, v_{ds2}موتور دوم تحت تاثیر قرار می‌گیرند (v_{qs2}, v_{ds2} موتور دوم همان v_{ys}, v_{xs} موتور اول می‌باشند).

شایان گفتن است که روش ارائه شده در این مقاله بسیار متاثر از پارامترهای ماشین می‌باشد که برای مقاوم نمودن کنترل کننده نسبت به تغییر پارامترهای موتور، استفاده از روش خطی سازی ورودی - خروجی تطبیقی پیشنهاد می‌شود.

جدول (۱): پارامترهای موتورهای القایی ۵ فاز

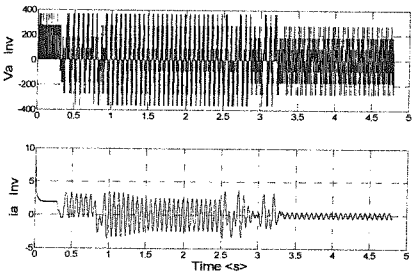
جریان	۲،۱A	R_r	۶،۳Ω
قطب	۲	R_s	۱،Ω
ولتاژ	۲۲۰V	L_m	۴۲۰mH
سرعت	۱۵۰۰r.p.m	L_{lr}	۴۰mH
اینرسی	۰/۰۳Kgm^2	L_{ls}	۴۰mH



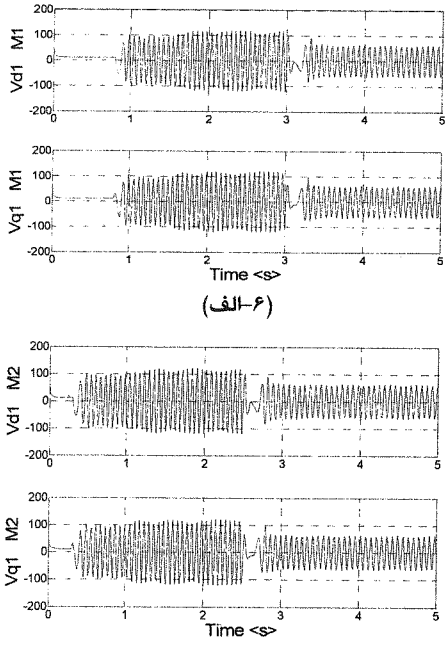
(۴-الف)

(۴-ب)

شکل(۴): سرعت و گشتاور برای دو ماشین پنج فاز سری شده



شکل(۵): ولتاژ و جریان فازa اینورتر پنج ساق با روشSPWM



(۶-الف)

(۶-ب)

شکل(۶): ولتاژهای مرجع استاتور دو ماشین پنج فاز سری شده

۵- نتیجه گیری

با افزایش تعداد فازهای یک ماشین سه فاز به پنج فاز یک درجه آزادی در عملکرد ماشین فراهم می‌شود که می‌توان با بکارگیری یک جابه‌جایی فاز مناسب، دو ماشین پنج فاز را به‌گونه ای با هم سری نمود که با تغذیه آنها از یک اینورتر پنج ساق، امکان عملکرد مستقل آنها فراهم شود. بدین ترتیب با استفاده از یک اینورتر چند فازه می‌توان بطور همزمان دو موتور را کنترل نمود تا در عین استفاده از مزایای موتورهای چند فازه از اینورتر هم استفاده بهینه شده باشد. در این مقاله معادلات توصیف کننده یک ماشین پنج فاز القایی و چگونگی اجرای روش خطی سازی ورودی خروجی روی آن بیان شد و به طور مشابه روش یاد شده به سیستم محرکه دو موتوری پنج فاز القایی تعمیم داده شد که نتایج شبیه سازی، درستی و دقت عملکرد این روش را در سیستم مورد نظر به اثبات رساند.

۶- مراجع

[۱] Y. Kuono, H. Kawai, S. Yokomizo, and K Matsuse, "A speed sensorless vector control method of parallel connected dual induction motor fed by a single inverter," in Proc. IEEE Ind. Applicat. Soc. Annu. Meeting IAS'01, Chicago, IL, 2001.

[۲] Gataric, S. "A poly phase Cartesian vector approach to control of poly phase AC machines", Proc. IEEE Ind. Appl. Soc. Annual Meeting IAS, Rome, Italy, CD-ROM Paper 38-02, (2000).

[۳] E. Levi, M. Jones, S. N. Vukosavic, and H. A. Toliyat, "Operating principles of a novel multi phase multi motor vector controlled drive," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 19, no. 3, pp. 508–517, Sep. 2004.

[۴] E. Levi, M. Jones, S. N. Vukosavic, and H. A. Toliyat, "A novel concept of a multiphase, multi-motor vector controlled drive system supplied from a single voltage source inverter," IEEE Trans. Power Electron., vol. 19, no. 2, pp. 320–335, Mar. 2004.

[۵] E. Levi, M. Jones, and S. N. Vukosavic, "A series-connected two-motor six-phase drive with induction and permanent magnet machines," IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 21, no. 1, pp. 121–129, Mar. 2006.

[۶] E. Levi, A. Iqbal, S.N. Vukosavic and H. A. Toliyat, "Modeling and control of a five-phase series-connected two-motor drive," IEEE Ind. Elec. Soc. Annual Meeting IECON, Roanoke, VA, pp. 208-213, 2003.

[۷] M. Jones, S. N. Vukosavic, and E. Levi, "Independent vector control of a six-phase series-connected two-motor drive," in Proc. 2nd IEE Int. Conf. Power Electronics, Machines and Drives PEMD, Edinburgh, U.K., 2004, pp. 879–884.

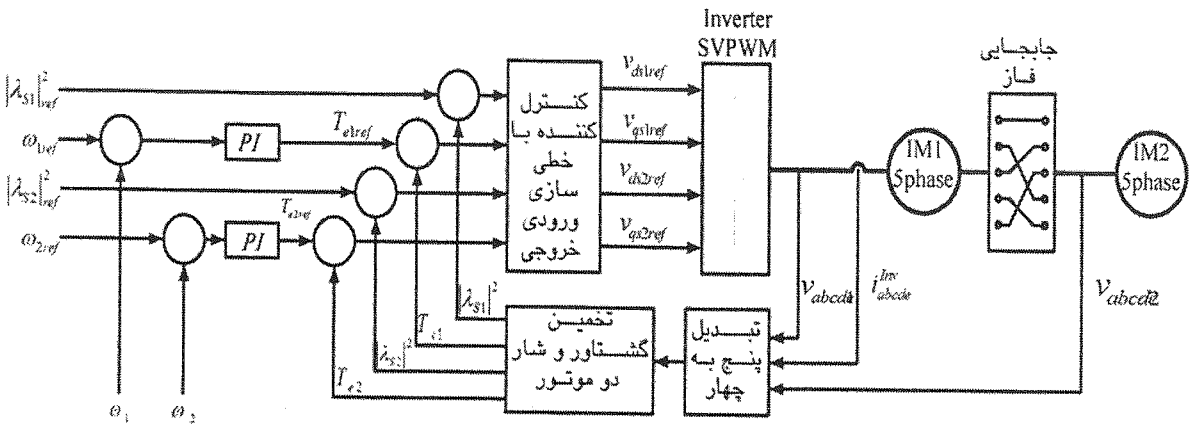
[۸] M. Jones, E. Levi, S.N. Vukosavic, H.A. Toliyat. "Independent vector control of a seven-phase three motor drive system supplied from a single voltage source inverter", Proc. IEEE Power Elec. Spec. Con $PESC, Acapulco, Mexico, pp. 1865-1870, 2003.

[۹] R. Marino, S. Peresada, and P. Valigi, "Adaptive Input-output Linearizing control of induction motors" , IEEE Trans. Automatic cont., vol. 38, no. 2, pp. 208-220, Feb. 1993.

[۱۰] H. Nijmeijer and A. J. van der Schaft, "Nonlinear Dynamical Control Systems", New York: Springer-Verlag, 1990.

[۱۱] عرب مارکده، غلامرضا، میرزائی تشنیزی، رضا، "کنترل مستقیم گشتاور موتور القایی پنج فاز به روش خطی سازی ورودی خروجی"، پانزدهمین کنفرانس مهندسی برق ایران، مجلد قدرت، ص ٤٩تا٥٥، اردیبهشت ١٣٨٦.

[۱۲] N.R. Abjadi, J. Soltani, G.R. Arab Markadeh, S. M. Ahmadi, "Full Decoupling Control of a Sensorless Six-Phase Series Connected Two Induction Motor Drive Taking into Account the Voltage-Drop of Each Motor," Int. Review Elect. Eng. (IREE) - June 2009.



شکل(۳): دیاگرام بلوکی کنترل مستقل سرعت و شار دو موتور القایی پنج فاز سری شده با یک اینورتر

۷- زیرنویس

۱. Drive