کنترل میدانی موتورهای القایی

محمد حسین فردوسی　　　　مرتضی شرفی

HosseinFerdowsi@Yahoo.com　　　　MortezaSharafi@Gmail.com

دانشجویان باشگاه پژوهشگران جوان دانشگاه آزاد اسلامی واحد گناباد

چکیده:

مدل حالت دائم موتور های القایی (مدار معادل تک فاز) رفتار ماشین را در حالت دائم توصیف می کند. این مدل ، در حالت گذرا استفاده نمی شود .اگر ما بخواهیم استراتژی های کنترلی (برای مثال FOC یا DTC) را برای کارایی بهتر گسترش دهیم ،مدلی لازم است که که بتواند رفتار ماشین القایی را در حالت گذرا توصیف کند .مدل دینامیکی موتور القایی، بر اساس فضای برداری مختلط یا معادلات فضای فازوری است .

کلمات کلیدی : FOC ، فضای فازوری ، فضای برداری مختلط ، موتور القایی

معادلات فضای فازوری

اگر معادلات ماشین های سه فاز متقارن را به فضای برداری مختلط ویافضای فازوری منتقل کنیم ، آنالیز آن بسیار ساده تر می شود . فضای فازوری ابزاری است که هر متغیر سه فاز را (جریان ها ، ولتاژهاو mmf) با یک بردار واحد که در فضا می چرخد نمایش می دهد و برای هر دو صورت ، حالت دائم و گذرا، در دسترس است . در حالت فازوری کمیت ها به آسانی بر روی دو محور نمایش داده می شود .

در حالت کلی اگر X_a, X_b, X_c کمیت های سه فاز باشند ، در فضای برداری به صورت زیر بیان می شوند :

$$\overline{X} = (X_a + aX_b + a^2 X_c), \qquad Where: a = e^{\frac{j2\pi}{3}} \tag{1}$$

ضریب $\frac{2}{3}$معادل ضریب ثابت تغییر نا پذیری قدرتی (non-power invariant)یا ثابت دامنه در فضای فازوری است .عبارات بر حسب q,d در فضای فازوری به راحتی به صورت زیر بیان می شود :

$$\overline{X} = X_d + jX_q \tag{2}$$

مولفه های محور های q,d به کمیت های سه فاز با عبارات جداگانه قسمت حقیقی و قسمت موهومی وابسته هستند .

$$X_d = \mathrm{Re}[\overline{X}] = \mathrm{Re}\{\frac{2}{3}(X_a + aX_b + a^2 X_c)\} = \frac{2}{3}(X_a - \frac{1}{2}X_b - \frac{1}{2}X_c) \tag{3}$$

$$X_q = IM[\overline{X}] = IM\{\frac{2}{3}(X_a + aX_b + a^2 X_c)\} = \frac{1}{\sqrt{3}}(X_b - X_c) \tag{4}$$

بردار های گردان

جریان استاتور فضای فازوری در قالب مرجع ثابت یه صورت زیر بیان می شود :

$$\overline{i_s} = \frac{2}{3}(i_{sa} + ai_{sb} + a^2 i_{sc}) \tag{5}$$

این معادله ممکن است در حالت قطبی به شکل زیر باشد :

$$\overline{i_s} = i_s e^{j\theta_s} \tag{6}$$

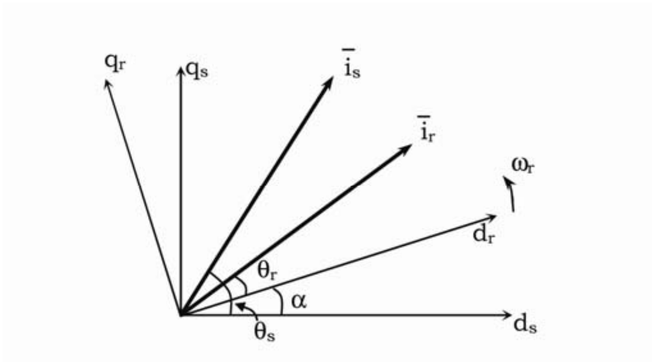
مشابها جریان روتور در قالب مرجع روتور (که با سرعت ω_r میچرخد)به صورت زیر نوشته می شود :

$$\overline{i_r} = \frac{2}{3}(i_{ra} + a i_{rb} + a^2 i_{rc}) \tag{7}$$

و در حالت قطبی به شکل :

$$\overline{i_r} = i_r e^{j\theta_r} \tag{8}$$

جریان های استاتور و روتور به صورت گرافیکی در شکل 1 نشان داده شده اند . $d_s - q_s, d_r - q_r$ به ترتیب محور های بردار های ثابت مرجع استاتور و گردان مرجع روتور هستند :



همانطور که از شکل 1 مشاهده می شود ، جریان روتور می تواند در قالب ساکن استاتور با معادله ساده زیر مشخص شود :

$$\begin{gathered}\overline{i_r^s} = i_r \cos(\theta_r - \alpha) + j i_r \sin(\theta_r - \alpha) \\ \bar{i}_s^r = i_s e^{j\theta_s} e^{-j\alpha} \\ \therefore \bar{i}_r^s = \bar{i}_r e^{-j\alpha}\end{gathered} \tag{9}$$

همچنین جریان استاتور بر اساس قالب گردان روتور به صورت زیر بیان می شود :

$$\overline{i_s^r} = i_s \cos(\theta_r - \alpha) + j i_s \sin(\theta_r - \alpha)$$

$$\bar{i}_s^r = i_s e^{j\theta_s} e^{-j\alpha} \tag{10}$$

$$\therefore \bar{i}_s^r = \bar{i}_s e^{-j\alpha} \tag{11}$$

e^{ja}, e^{-ja} به عنوان 2 بردار متحرک شناخته می شوند .

معادلات ماشین های القایی در فضای فازوری

معادلات موتور القایی در فضای فازوری به صورت معادلات زیر بیان می شود :

$$\bar{v}_s^g = R_s \bar{i}_s^g + \frac{d\overline{\psi}_s^g}{dt} + j\omega_g \overline{\psi_s^g} \tag{12}$$

$$0 = R_r \bar{i}_r^g + \frac{d\overline{\psi_r^g}}{dt} + j(\omega_g - \omega_r)\overline{\psi}_r^g \tag{13}$$

$$\overline{\psi}_s^g = L_s \bar{i}_s^g + L_m \bar{i}_r^g \tag{14}$$

$$\overline{\psi}_r^g = L_r \bar{i}_r^g + L_m \bar{i}_s^g \tag{15}$$

هنگامی که $\overline{v}_s^g = \frac{۲}{۳}(v_{sa} + av_{sb} + a^۲v_{sc})$ ولتاژ استاتور در فضای فازوری باشد که به صورت یک مرجع کلی بیان شده است. مشابها همین تعریفات را برای $\overline{i}_r^g, \overline{\psi}_r^g$ و $\overline{\psi}_s^g$ می توان بیان کرد . عبارت g برای بیان شکل عمومی مرجع(general reference) استفاده شده است . اگر معادلات به صورت مرجع ساکن استاتور بیان شوند در آن صورت $\omega_g = 0$ و می توانیم بنویسیم :

$$\overline{v}_s^s = R_s\overline{i}_s^s + \frac{d\overline{\psi_s^s}}{dt} \tag{16}$$

$$0 = R_r\overline{i}_r^s + \frac{d\overline{\psi_r^s}}{dt} - j\omega_r\overline{\psi}_r^s \tag{17}$$

$$\overline{\psi}_s^s = L_s\overline{i}_s^s + L_m\overline{i}_r^s \tag{18}$$

$$\overline{\psi}_r^s = L_r\overline{i}_r^s + L_m\overline{i}_s^s \tag{19}$$

در معادلات 16 تا 19 همه کمیت ها برای حالت مرجع استاتور نوشته شده اند .

کنترل میدان گرا برای موتور های القایی (FOC)

گشتاور الکترومغناطیسی به چند صورت بیان می شود که یکی از صورت ها به شکل زیر است :

$$T_e = \frac{3}{2}\frac{p}{2}\overline{\psi}_s \times \overline{i}_s \tag{20}$$

با جانشینی شار نشتی استاتور که درجریان های استاتور و روتور بیان شده است ، گشتاور می تواند به شکل زیر نوشته شود :

$$T_e = \frac{3}{2}\frac{p}{2}\overline{\psi}_s \times \overline{i}_s = \frac{3}{2}\frac{p}{2}(L_s\overline{i}_s + L_m\overline{i}_r) \times \overline{i}_s \tag{21}$$

این معادله به فرم ساده زیر نیز بیان می شود :

$$T_e = \frac{3}{2}\frac{p}{2}L_m(i_{rd}i_{sq} - i_{rq}i_{sd}) \tag{22}$$

معادله گشتاور همچنین می تواند بر اساس شار روتور و جریان های استاتور به شکل زیر بیان شود :

$$T_e = \frac{3}{2}\frac{p}{2}\frac{L_m}{L_r}\overline{\psi_r} \times \overline{i}_s \tag{23}$$

در محور های $d-q$ معادله به شکل زیر نوشته می شوند :

$$T_e = \frac{3}{2}\frac{p}{2}\frac{L_m}{L_r}(\psi_{rd}i_{sq} - \psi_{rq}i_{sd}) \tag{24}$$

معادله 24 گشتاور را در حالت کلی بیان می کند . این بدین معنی است که بردار های $d-q$ شار روتور و جریان استاتور با هر سرعتی می توانند بچرخند .

در FOC با جهت شار روتور ، گشتاور بیان شده در معادله 24 استفاده می شود و قالب مرجع انتخاب شده بدین صورت است که بردار d، با قدر مطلق شار که با سرعت سنکرون می چرخد ، منطبق می شود .

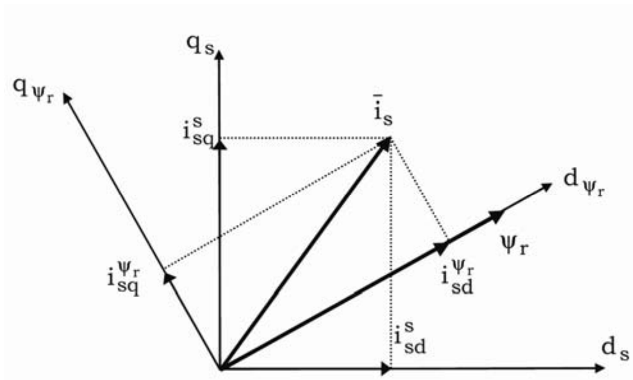
این بدین معنی است که شار روتور در جهت محورq صفر است .

$$\overline{\psi}_r = \psi_{rd}^{\psi_r}$$

$$\psi_{rq}^{\psi_r} = 0$$

بنابر این معادله 24 به شکل زیر نوشته می شود .

$$T_e = \frac{3}{2}\frac{p}{2}\frac{L_m}{L_r}\psi_r i_{sq}^{\psi r} \qquad (25)$$



مقادیرمولفه های d,q شار روتور و جریان استاتور در این قالب مرجع گردان ثابت هستند ، بنابراین گشتاور نشان داده شده در مدل 25 ، همانطور که در این مدل مرجع نشان داده شده ، مشابه گشتاور موتور تحریک مستقل DC می باشد .

$$T_{e,dc} = k i_f i_a \qquad (25b)$$

درموتور DC میدان ثابت است و به منظور دست یافتن به یک پاسخ سریع گشتاور، گشتاور با کنترل جریان آرمیچر ، کنترل می شود . به طور مشابه در FOC شار ثابت است و پاسخ گشتاور سریع با کنترل مولفه q جریان استاتور کنترل می شود .

گشتاور در 25 به شکل مرجع سنکرون بیان می شوند . برای پیاده سازی مقادیر مرجع در قالب گردان باید به صورت یک مقدار مرجع ساکن بیان شود . برای انجام این تغییر ما باید محل دقیق شار روتور را بدانیم . 2 تکنیک وجود دارد که با استفاده از آن می توان محل شار روتور را بدست آورد . پس FOC به دو صورت زیر است :

FOC غیر مستقیم :

از 13

$$0 = R_r \overline{i_r^g} + \frac{d\overline{\psi_r^g}}{dt} + j(\omega_g - \omega_r)\overline{\psi_r^g}$$

با جانشینی جریان روتور در معادله 15 داریم :

$$0 = \frac{R_r}{L_r}\overline{\psi_r^g} - \frac{L_m R_r}{L_r}\overline{i_s^g} + \frac{d\overline{\psi_r^g}}{dt} + j(\omega_g - \omega_r)\overline{\psi_r^g} \qquad (26)$$

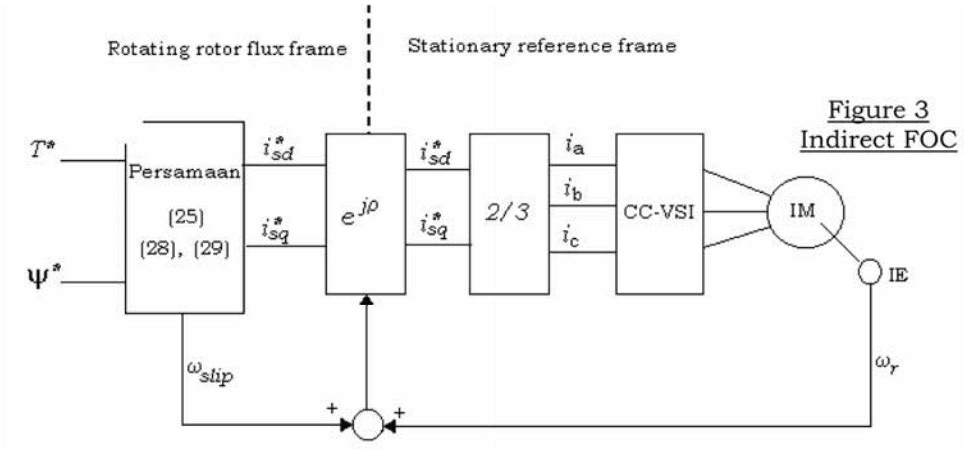
در حالتی که شار روتور مرجع باشد ($\overline{\psi}_r = \psi_{rd}^{\psi_r} dan \psi_{rd}^{\psi_r} = 0$) معادله 26 به شکل زیر نوشته می شود:

$$0 = \frac{R_r}{L_r}\psi_r - \frac{L_m R_r}{L_r}(i_{sd}^{\psi_r} + j i_{sd}^{\psi_r}) + \frac{d\psi_r}{dt} + j(\omega_{slip})\psi_r \qquad (27)$$

با جدا کردن قسمت های حقیقی و موهومی داریم :

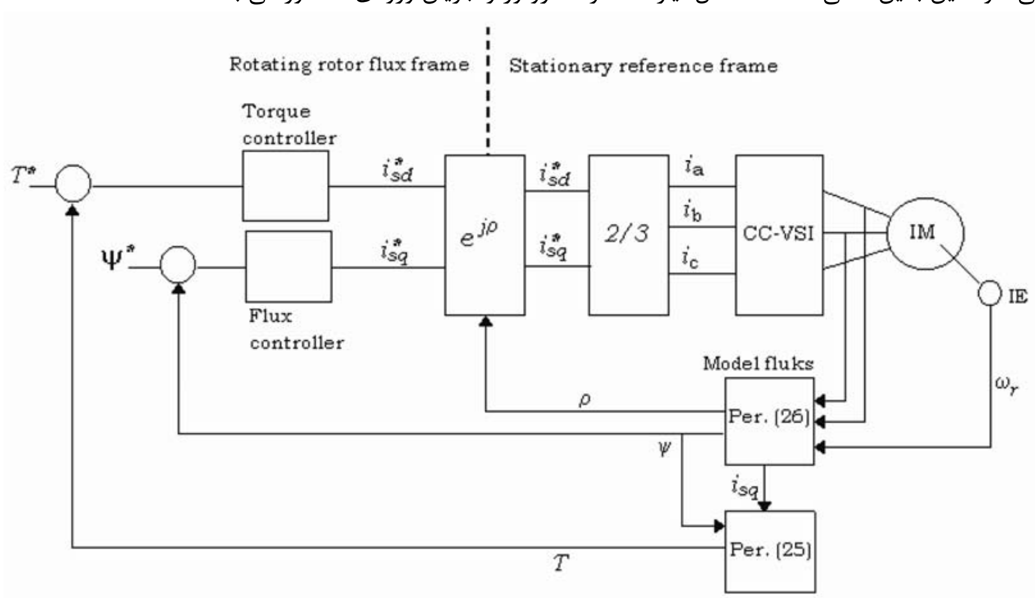
$$0 = \frac{R_r}{L_r}\psi_r - \frac{L_m R_r}{L_r} i_{sd}^{\psi_r} \tag{28}$$

$$0 = -\frac{L_m R_r}{L_r} i_{sq}^{\psi_r} + (\omega_{slip})\psi_r \tag{29}$$



مستقیم : *FOC*

در FOC مستقیم موقعیت شار روتور با هر یک از دو صورت اندازه گیری یا تخمین زده شده با استفاده از معادلات ماشین ، بر اساس ترمینال های متغیر (جریان و ولتاژ) بدست می آید .امروزه با دردسترس بودن میکرو پروسسور های سریع ، عموما شار خیلی سریع با استفاده از پروسسور های سیگنال دیجیتال به صورت معادله 26 تخمین زده می شود .این بدین معنی است که مدل نیازمند سرعت روتور و جریان ورودی استاتور می باشد .



References

Novotny, D.W, and Lipo, T.A. (1998). “Vector control and dynamics of AC drives” Oxford University Press, New York.

Vas, P. (1990). “Vector Control of AC Machines”, Oxford University Press, New York.

Murphy, J. M. D. and Turnbull, F. G.(1987). “Power Electronic Control of AC Motors”, Pergamon Press, Oxford.