

회전자 자속 이탈각 추정을 이용한 유도전동기의 회전자 시상수 보상

차영길* 정종진 김흥근
경북대학교 전기공학과

Rotor Time Constant Compensation of Induction Motor by
Estimating Deviation Angle

Young-Kil Cha Jong-Jin Jung Heung-geun Kim
Dept. of Electrical Eng. Kyung-Pook National Univ

Abstract - In indirect vector control, if the value of the rotor time constant used in slip calculation is different from the actual rotor time constant because of the temperature rising and flux saturation level, model flux angle and actual flux angle is different so that the transient and steady state response is degraded.

In this paper, flux deviation angle is calculated by using actual torque and reference torque, and this flux deviation angle is summed to slip angle, therefore rotor flux angle is always accurate and indirect vector control is satisfied.

I. 서론

벡터제어는 교류기기의 순시토크를 제어하기 위해 널리 사용되고 있는 제어방법으로 고정자의 자속성분전류와 토크성분전류를 독립적으로 제어하기 위해서는 회전자자속에 대한 정보가 필수적이다. 교류기계의 벡터제어 방법으로는 센서를 이용하여 직접 회전자 자속정보를 획득하는 직접 벡터제어와 전동기 회전자 자속도와 슬립 자속도를 더해 적분하여 회전자 자속정보를 얻는 간접벡터제어 있다. 직접 벡터제어는 전동기 파라미터의 변화에 영향을 받지 않지만 센서의 부착으로 표준전동기를 사용할 수 없고 또한 이 센서들이 기계적 강도와 열에 약하다는 단점이 있어 구현하기가 간단한 간접벡터제어 방식을 많이 사용하고 있다. 그러나 간접벡터제어에서 회전자 자속에 대한 정보는 고정자 저항, 회전자 저항, 회전자 누설 인덕턴스, 자화인덕턴스의 정확도에 의해 많은 영향을 받는다. 그 중에서도 슬립각을 계산할때 사용하는 회전자 시상수의 변화가 간접 벡터제어의 수행에 가장 큰 영향을 주는데 이 회전자 시상수는 전동기 회전자의 온도 변화에 따라 변하는 회전자 저항과 자속의 포화정도에 의해 변하는 회전자 인덕턴스로 구성되어 있다. 그러므로 슬립계산에 사용되는 회전자 시상수의 변화를 추정하는 분야가 많은 관심을 받고 있다. 이 회전자 시상수를 추정하고 보상하는 방법으로는 DC Link전압을 이용하는 방법^[1], 전압 방정식과 전류제어변수를 feedforward 형태로 이용하는 방법^[2], 고정자 좌표계 전압방정식을 이용하는 방법^[3]들이 있으나 이러한 방법들은 실제로 구현하기가 어렵고, 계산량이 매우 많다는 단점이 있다.

본 논문에서는 전동기의 회전자 시상수가 변할 경우 이로인한 자속과 토크에 대한 영향을 분석하였다. 벡터제어가 완전하게 이루어지고 있는 경우 고정자 좌표계에서의 토크와 회전자 좌표계에서의 토크값이 같다는 점을 이용하여 이탈각을 추정하고, 이 각을 이용하여 회전자 시상수 변화에 의한 슬립각의 오차를 보상하는 방법을 제안한다. 그리고 슬립각을 계산하는데 사용하는 회전자 시상수값이 정확하지 않아도 슬립각 오차를 보상하므로서 간접벡터제어시 정확한 회전자 자속위치를 구할 수 있다는 것을 시뮬레이션을 통해 입증하였다.

II. 회전자 시상수 변화의 영향

유도전동기의 시스템 방정식을 고정자 좌표계로 표현하면 식(1)과 같은 4개의 비선형 미분방정식으로 표현될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{v}_{as} \\ \dot{v}_{\beta s} \\ \dot{0} \\ \dot{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + pL_s & 0 & pM & 0 \\ 0 & r_s + pL_s & 0 & pM \\ pM & \omega_r M & r_r + pL_r & \omega_r L_r \\ -\omega_r M & pM & -\omega_r L_r & r_r + pL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{\beta s} \\ i_{ar} \\ i_{\beta r} \end{bmatrix} \quad (1)$$

2차속 자속의 두 성분은

$$\lambda_{ar} = M i_{as} + L_r i_{ar} \quad (2)$$

$$\lambda_{\beta r} = M i_{\beta s} + L_r i_{\beta r} \quad (3)$$

상당, pole당 토크는

$$T = \frac{M}{L_r} (\lambda_{ar} i_{\beta s} - \lambda_{\beta r} i_{as}) = \frac{M}{L_r} |\lambda_r| |i_s| \sin \phi \quad (4)$$

여기서 ϕ 는 회전자 자속벡터 λ_r 과 고정자 전류벡터 i_s 사이의 각이다.

식(2)와 식(3)을 식(1)의 회전자 전압방정식 대입하면 식(5), (6)을 얻을 수 있다.

$$0 = p\lambda_{ar} + \omega_r \lambda_{\beta r} + \frac{r_r}{L_r} (\lambda_{ar} - M i_{as}) \quad (5)$$

$$0 = p\lambda_{\beta r} + \omega_r \lambda_{ar} + \frac{r_r}{L_r} (\lambda_{\beta r} - M i_{\beta s}) \quad (6)$$

공극 기전력이 정현분포되어 있고 고차 고조파, 철손, 포화에 의한 영향을 무시하고 또한 입력 여자전류(전압)가 정현적이면

회전자 자속 λ_r 은 정상상태에서 식(7-8)과 같다.

$$\lambda_{\alpha r} = |\lambda_r| \cos \omega t \quad (7)$$

$$\lambda_{\beta r} = |\lambda_r| \sin \omega t \quad (8)$$

식(7)과 (8)을 식(5)와 (6)에 대입하면 식(9-10)과 같다.

$$-\frac{L_r}{r_r}(\omega - \omega_r)\lambda_{\beta r} + \lambda_{\alpha r} = Mi_{\alpha s} \quad (9)$$

$$\frac{L_r}{r_r}(\omega - \omega_r)\lambda_{\alpha r} + \lambda_{\beta r} = Mi_{\beta s} \quad (10)$$

식(9-10)과 정상상태 슬립주파수를 이용하면 회전자 자속은 식(11)과 같다.

$$\lambda_r^2 = \frac{M^2 i_s^2 i_{ds}^2}{\left(\frac{r_r^2}{r_r}\right)^2 i_{\alpha s}^2 + i_{\beta s}^2} \quad (11)$$

식(4),(9),(10)과 슬립주파수를 이용하면 식(12)와 같은 토크식을 얻을 수 있다.

$$T = \frac{r_r^*}{r_r} \cdot \frac{M^2 i_s^2 i_{ds} i_{\alpha s}}{\left[\left(\frac{r_r^*}{r_r}\right)^2 i_{\alpha s}^2 + i_{\beta s}^2\right] \cdot L_r} \quad (12)$$

여기서 r_r^* 는 슬립주파수를 계산하는데 사용하는 값으로 실제 값과 구분된다.

그리고 전류귀환 루프가 존재하기 때문에 정상상태에서 고정자 전류는 식(13)과 같다.

$$i_s^2 = i_{ds}^2 + i_{\alpha s}^2 = (i_{ds}^*)^2 + (i_{\alpha s}^*)^2 \quad (13)$$

식(13)을 식(15)와 식(16)에 대입하고, r_r^* 이 r_r 과 같을 때 자속과 토크는 식(14-15)와 같다.

$$\lambda_r = Mi_{ds}^* \quad (14)$$

$$T = \frac{M}{L_r} Mi_{ds}^* i_{\alpha s}^* = \frac{M}{L_r} \lambda_r i_{\alpha s}^* \quad (15)$$

이 결과 식으로부터 r_r^* 과 r_r 의 값이 일치할 경우에는 $i_{\alpha s}^*$, i_{ds}^* 를 각각 제어하여 자속과 토크를 독립적으로 제어할 수 있는 decoupling을 유지할 수 있다는 것을 알 수 있다. 만일 r_r^* 이 r_r 의 값이 일치하지 않으면 $i_{\alpha s}^*$ 가 상호작용하여 $i_{\alpha s}^*$, i_{ds}^* 를 각각 제어하여 자속과 토크를 독립적으로 제어할 수 없게된다. 그 결과 벡터제어 시스템의 동특성에 역효과를 나타낸다.

III. d축과 회전자 자속 사이의 이탈각 추정 방법

간접 벡터제어에서 회전자 자속위치에 대한 정보는 슬립각속도 계산에 사용되는 회전자 저항과 인덕턴스가 온도의 상승과 회전자 자속의 포화 정도에 의해 변하게 되어 슬립각속도를 계

산할때 발생한 δ 만큼의 오차를 가진다. δ 는 실제 회전자 자속과 모델 회전자 자속속사이의 각으로 이탈각이라 정의한다. 이 오차에 의해 d-q축에서 α - β 축으로 또는 그 반대로 축변환을 할때 자속성분전류와 토크성분전류의 크기가 변하게 된다. 그러므로 식(16-17)에서 처럼 기준 파라미터 값을 사용하여 계산한 회전자 자속각에 δ 를 고려하면 회전자 파라미터 값이 변하여도 자속각의 위치를 정확하게 알 수 있다.

$$\theta_F^* = \int (\omega_{sl} + \omega_r) dt \quad (16)$$

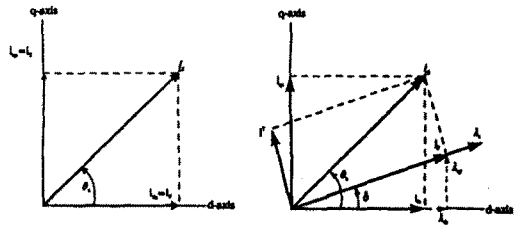
$$\theta_F = \int (\omega_{sl} + \omega_r) dt + \int (\Delta \omega_{sl}) dt = \theta_F^* + \delta \quad (17)$$

회전자 자속의 d축으로 부터의 이탈에 대한 페이저 다이어그램이 그림 1에 나타나 있다. 그림 1(a)는 자속이 d축과 일치하고 있는 경우이고 그림 1(b)는 실제 회전자 시상수가 슬립계산에 사용되는 회전자 시상수 보다 작은 경우를 나타내는 것으로 자속이 d축으로 부터 이탈해 있는 경우를 나타낸다. 이탈각이 발생했을 경우 자속전류 i_F 와 토크전류 i_T , 회전자 자속은 d축과 회전자 자속축이 일치했을 때의 자속전류 i_{ds} 와 토크전류 $i_{\alpha s}$ 를 이용하여 식(18-20)과 같이 나타낼 수 있다.

$$i_F = i_{ds} (\cos \delta + \frac{i_{\alpha s}}{i_{ds}} \sin \delta) \quad (18)$$

$$i_T = i_{\alpha s} (\cos \delta - \frac{i_{ds}}{i_{\alpha s}} \sin \delta) \quad (19)$$

$$\lambda_r = Mi_F \quad (20)$$



(a)자속과 d축이 일치한 경우 (b) 자속과 d축에서 이탈한 경우
그림. 1. 회전하는 좌표계에서 자속전류와 토크전류

이탈각이 영이 아닐 때 토크는 식(21)과 같다.

$$T = \frac{3}{2} n_p \frac{M^2}{L_r} i_{\alpha s} i_{ds} \left(1 - \sin \delta \cos \delta \left(\frac{i_{\alpha s}}{i_{ds}} - \frac{i_{ds}}{i_{\alpha s}}\right)\right) \quad (21)$$

식(21)을 보면 발생한 토크 T는 자속기준제어 전동기의 파라미터 변화에 무관한 토크성분과, 파라미터 변화에 의해 발생하는 원하지 않는 토크성분으로 구성되어 있다. 그림 1에서 회전자 자속과 d축이 일치하여 이탈각 δ 가 영이 되면 발생한 토크는 식(21)의 우변의 첫 번째 항만 존재하게 된다. 이탈각이 영이 되지 않으면 토크는 식(21)로 표현되는 $i_{\alpha s}$, i_{ds} 와 δ 의 복잡한 비선형 함수가 된다.

그러나 이탈각을 구하기 위해서는 실제 전동기 토크를 획득해야한다. 실제 전동기 토크를 획득하는 방법에는 여러 가지 방법이 있으나 가장 간단하고 쉬우며 정확한 방법은 식(22)에 나타난 고정자 자속으로부터 식(23)처럼 전동기 토크를 추정하

는 방법¹⁴⁾이다. 이 방법은 고정자 자속을 추정하는데 있어 고정자 전압이 파라미터에 대해 민감하지 않다는 것이다.

$$\lambda_{\alpha\beta s} = \int (v_{\alpha\beta s} - i_{\alpha\beta s} r_s) dt. \quad (22)$$

$$\hat{T} = \frac{3}{2} n_p I_m (\lambda_{\alpha s}^* i_{\beta s} - \lambda_{\beta s} i_{\alpha s}^*) \quad (23)$$

또는

$$\hat{T} = \frac{3}{2} n_p (\lambda_{\alpha s} i_{\beta s} - \lambda_{\beta s} i_{\alpha s}) \quad (24)$$

식(21)과 식(24)를 이용하여 식(25-27)로부터 이탈각을 계산할 수 있다.

$$\hat{T} - T = \Delta T = \frac{3}{2} n_p \frac{M^2}{L_r} i_{\alpha s} i_{\beta s} \sin \delta \cos \delta \left(\frac{i_{\alpha s}}{i_{\alpha s}} - \frac{i_{\beta s}}{i_{\beta s}} \right) \quad (25)$$

또는

$$\Delta T = \frac{3}{4} n_p \frac{M^2}{L_r} \sin(2\delta) (i_{\alpha s}^2 - i_{\beta s}^2) \quad (26)$$

그러므로

$$\delta = \frac{1}{2} \sin^{-1} \left(\frac{4 \Delta T L_r}{3 n_p M^2 (i_{\alpha s}^2 - i_{\beta s}^2)} \right) \quad (27)$$

회전자 시상수의 변화에 의해 이탈각이 영이 되지 않을 경우 이 이탈각을 기준값으로 계산한 슬립 각속도와 회전자 각속도로 계산한 회전자 자속각 θ_F^* 를 합하여 실제 회전자 자속각 θ_F 를 구할 수 있다. 이렇게 기준토크와 실제토크사이의 비교로부터 구한 이탈각 δ 를 이용하여 토크와 자속이 완전히 분리되어 제어될 수 있다.

IV. 시뮬레이션

위에서 제안한 이탈각을 이용한 회전자 자속각 보상법의 타당성을 검토하기 위해 시뮬레이션을 하였다. 그림 2는 전체 시스템의 블록 다이어그램으로 속도제어기는 1ms의 주기로 샘플링을 하게 된다. 전류제어기로는 동기속도 회전좌표계 삼각파 비교제어기를 사용하였으므로 실제 토크와 기준토크도 전류제

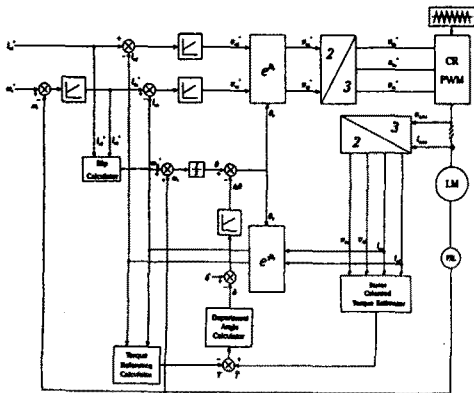


그림 2. 시스템 블록 다이어그램

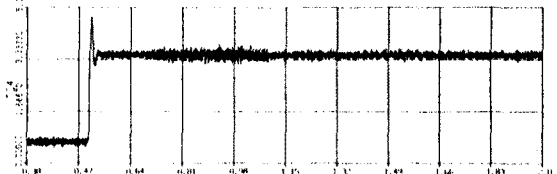
어기의 샘플링 시간과 같이 2.5E-5의 주기로 샘플링하여 이탈각을 추정하고 회전자 자속각을 보상 한다.

시뮬레이션에 사용한 전동기의 상수는 다음과 같다.

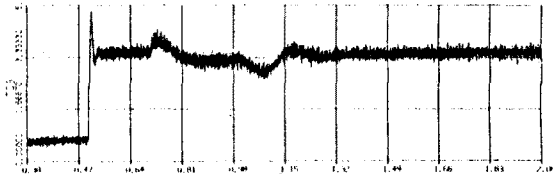
표1. 시뮬레이션에 사용한 유도전동기 상수

정격출력	3 [HP]	R_r	2.526 [Ω]
정격전압	380 [V]	L_s	251.91 [mH]
정격전류	5.1 [A]	L_r	255.84 [mH]
정격속도	1735 [rpm]	L_m	244.08 [mH]
극 수	4	J	0.03 [$\text{Kg} \cdot \text{M}^2$]
R_s	2.061 [Ω]	B	0.01 [$\text{Kg} \cdot \text{M}^2/\text{sec}$]

시뮬레이션은 유도전동기를 무부하 상태에서 일정속도로 운전중 0.5초후에서 4.5 [Nm]의 부하 토크를 인가하였으며, 0.70초후에 회전자 저항 r_r 값을 65% 변화시키고 1.0초후부터 제안한 알고리즘을 적용하였다.



(a) 고정좌표계에서 토크 응답(실제토크)



(b) 회전좌표계에서 토크 응답(기준토크)

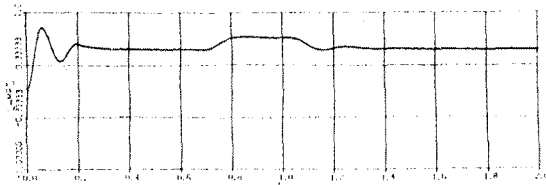
그림 3. 토크응답특성

그림 3은 실제토크와 기준토크를 나타내는 것으로 기준토크는 회전자 저항값이 변할 경우 그 토크값이 변하는 것을 알 수 있다. 그림 4는 회전자 자속을 나타내는 것으로 회전자 저항값이 변하기 전까지는 $\lambda_{\alpha s}$ 이 일정한 값을 유지하고, $\lambda_{\beta s}$ 의 값은 항상 영이 된다는 것을 알 수 있다.

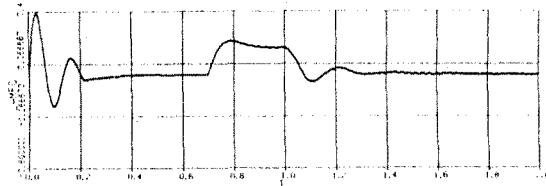
실제로 회전자 저항 r_r 값이 변할 경우 슬립각속도를 이용하여 계산한 회전자 자속의 위치가 정확하지 않으므로 d축 회전자 자속성분 $\lambda_{\alpha s}$ 은 증가하고 q축 회전자 자속성분 $\lambda_{\beta s}$ 도 영이 되지 않고 그 크기를 가지게 되므로 자속성분과 토크성분사이의 완전한 decoupling이 이루어지지 않음을 알 수 있다. 그림 3과 그림 4에서 알고리즘을 적용한 1.0초부터 토크는 회전자 저항값이 변하기 전의 정상적인 값을 유지하게되고 회전자 자속의 q축 성분값은 영으로 되어 회전자 자속과 동기속도 회전좌표계의 d축과 완전히 일치하게되므로 자속성분과 토크성분이 완전한 decoupling을 유지하고 있다는 것을 알 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 유도전동기의 간접벡터제어에서 회전자 시상수가 변할때 실제토크와 기준토크사이의 오차를 이용하여 회전



(a) d축 자속응답 (λ_{dr})



(b) q축 자속응답 (λ_{qr})

그림 4. 자속응답특성

자 자속과 동기속도회전좌표계의 d축사이의 이탈각을 on-line으로 추정하여 회전자 자속각의 위치를 보상해주는 알고리즘이다. 이 알고리즘을 이용함으로써 교류전동기의 운전중 회전자의 온도의 상승으로 인해 회전자 저항이 변하여도 회전자 자속각이 정확하게 추정되어 회전자 자속의 d축 성분만이 존재하고 q축성분은 영이되어 고정자 전류의 토크성분전류와 자속성분전류가 완전히 decoupling되어 제어된다는 것을 시뮬레이션을 통해 입증하였다.

참고문헌

- (1) Dal Y. Ohn, Yuri Khersonsky & James R. Kimzey, "ROTOR TIME CONSTANT ADAPTATION METHODE FOR INDUCTION MOTORS USING DC LINK POWER MEASUREMENT", IEEE IAS. Conf. Rec., pp688-693, 1989
- (2) Takafumi Maruyama & Hideto Negoro, "A STATOR AND ROTOR RESISTANCE ESTIMATION METHODE BASED ON MOTOR VOLTAGE EQUATIONS AND CURRENT CONTROL VARIABLES IN STEADY STATE", PROCEEDINGS of 1995 International Power Electronic Conference - Yokohama, pp1290-1295, 1995 April 3-7
- (3) C.C. CHAN & HUAQLAN WANG, "An Effective Methode for Rotor Resistance Identification for High-performance Induction Motor Vector Control", IEEE Tran. Ind. Appl., Vol IA-37, No.6, DECEMBER 1990, pp 477-482.
- (4) R. D. Lorenz & D. B Lawson, " A simplified Approach to continuous On-Line Tuning of Field-Oriented Induction Machine Drive", IEEE Tran. Ind. Appl., Vol.26, No. 3, May/June 1990, pp 420-424