

2차 자속관측기 이용한 자계방향형 유도전동기 센스리스 벡터제어

홍순일, 손의식, 최재용, 홍정표*(부신대)

부경대학교

Sensless Vector Control of Field Oriented type for Induction Machine Using Flux Observer

S.I.Hong, E.S.Son, J.Y.Choi, J.P.Hong*

Pukyong National University

Abstract - 본 연구는 자계방향 기준 벡터제어 이론에 기초하여 속도 센스리스 벡터제어를 구현한다. 벡터제어는 상태량에 기초한 MRAS (MRAS: Model Reference Adaptive System)방법은 이득정수의 결정이 어려운 결점을 가지고 있다. 여기서는 관측기 이론에 기초하여 2차자속 관측기와 전류센스에서 검출한 전류값으로 속도추정을 행하는 새로운 속도 추정법을 제안한다. 그리고 제안한 방법이 자계방향 벡터제어 시스템의 실현에 가능성이 있음을 시뮬레이션으로 검토한다.

1. 서론

현재 속도센스를 이용하지 않는 유도전동기 제어에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 유도전동기의 속도 센서리스 벡터제어는 전동기의 모델식에서 얻어지는 정보를 기초로 속도를 추정하고 그 값을 사용해서 벡터제어를 행하는 것이다. 현재 속도추정 방법은 모델규범 시스템 (MRAS: Model Reference Adaptive System)을 이용한 것이 있지만 이 방법은 벡터제어의 상태량에 기초하여 속도추정을 행하므로 이득정수의 조정이 필요하고 그것의 결정이 어려운 결점이 있다 [1~4].

슬립주파수형 벡터제어는 연산된 전원 각주파수를 적분하여 2차 자속 벡터의 위상을 구하고 좌표 변환을 행하여 토크를 제어하는 것으로 비교적 실현하기 쉽다. 그러나 이 방법은 전동기 운전시에 발생하는 온도에 의해 변동하는 2차저항에 대한 감도가 높고 2차저항의 설정값과 실제값이 다른 경우에는 회망하는 제어 성능을 얻을 수 없다.

자계방향형 벡터제어는 2차자속 벡터를 검출하고 위상 θ_0 에서 $\gamma-\delta$ 좌표 변환을 행하여 제어한다. 이 방법은 전동기 파라미터의 변동에 대해서 감도가 낮은 특징이 있기 때문에 본 연구에서는 자계 방향형 벡터제어를 기본으로 센스리스 벡터제어에 관하여 연구한다.

2 자계방향 센스리스 벡터제어

자계방향 벡터제어는 고정자 좌표상에서 전동기 정수를 이용하여 2차 자속 벡터를 검출할 수 있으므로 파라미터의 변동에 영향을 받지 않는다. 여기서는 직접 검출이 곤란한 2차 자속을 관측기 이론을 이용해서 추정하는 방법을 취한다.

유도전동기 d-q 좌표상에서 상태방정식은 1차 전류와 2차 자속을 상태변수로 취하면 식 (1)이 된다.

$$P \begin{pmatrix} i_s \\ \phi_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_s \\ \phi_r \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B_1 \\ 0 \end{pmatrix} v_s \quad (1)$$

단. $i_s = \begin{pmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{pmatrix}$, $\phi_r = \begin{pmatrix} \phi_{dr} \\ \phi_{qr} \end{pmatrix}$, $v_s = \begin{pmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \end{pmatrix}$

$$A_{11} = a_{r11}I \quad A_{12} = a_{r11}I + a_{r12}J \quad B_1 = b_1I$$

$$A_{21} = a_{r21}I \quad A_{22} = a_{r22}I + a_{r22}J \quad \text{이고 } a_{ij} \text{는 전동기 정수에 의해 결정되는 값이다.}$$

2.1 2차 자속 관측기

식(2)에서 상태변수를 추정하기 위한 동일차원 관측기를 다음 식과 같이 구성한다.

$$P \begin{pmatrix} \hat{i}_s \\ \hat{\phi}_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{i}_s \\ \hat{\phi}_r \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B_1 \\ 0 \end{pmatrix} v_s^* + G(\hat{i}_s - i_s) \quad (2)$$

여기서, G는 관측기 이득, *는 지령값, \hat{x} 는 상태변수 및 추정치이다.

관측기의 극은 회전수에 대응하여 변화시켜야 하고 유도전동기 고유극의 k배에 비례시키는 것에 의해 관측기 이득 행렬은 식(3)으로 나타낸다.

$$G = \begin{pmatrix} g_1 & g_2 & g_3 & g_4 \\ -g_2 & g_1 & -g_4 & g_3 \end{pmatrix}^T \quad (3)$$

$$g_1 = (k-1)(a_{r11} + a_{r22}), \quad g_2 = (k-1)a_{r22}$$

$$g_3 = (k^2 - 1)(a_{r21} - \rho a_{r11}) + \rho g_1, \quad g_4 = \rho g_2$$

이 관측기에 의한 자속 추정치는 식(4), (5)에 의해 결정할 수 있다.

$$|\hat{\phi}_r| = \sqrt{\hat{\phi}_{dr}^2 + \hat{\phi}_{qr}^2} \quad (4)$$

$$\cos \hat{\theta}_0 = \frac{\hat{\phi}_{dr}}{\sqrt{\hat{\phi}_{dr}^2 + \hat{\phi}_{qr}^2}}, \quad \sin \hat{\theta}_0 = \frac{\hat{\phi}_{qr}}{\sqrt{\hat{\phi}_{dr}^2 + \hat{\phi}_{qr}^2}} \quad (5)$$

2.2 비간섭 제어

γ 축 1차 전압과 2차 자속 크기 ϕ_{rr} 을 비간섭 제어하기 위해서 간섭분을 피드백 보상하여 v_{rs} 를 식(6)과 같이 준다.

$$v_{rs} = v'_{rs} - \omega_0 \sigma L_s i_{\delta s} \quad (6)$$

여기서, v'_{rs} : γ 축 1차 전압의 비간섭분이고 γ 축의 2차 자속 ϕ_{rr} 은 식(6)의 우변 제2항 $\omega_0 \sigma L_s i_{\delta s}$ 을 피드백 보상하는 것에 의해 비간섭 제어할 수 있다. 또한 $\phi_{dr} = 0$ 이기 때문에 $\sigma L_s i_{\delta s} = \phi_{\delta s}$ 이고 δ 축 1차 자속 $\phi_{\delta s}$ 의 연산에 의해 비간섭 제어할 수 있다.

$\gamma - \delta$ 축으로 나타낸 전동기 모델에서 식(7)이 성립한다.

$$P i_{\delta s} = -\frac{R_s}{\sigma L_s} i_{\delta s} - \frac{\omega_0 \phi_{rs}}{\sigma L_s} + \frac{v_{\delta s}}{\sigma L_s} \quad (7)$$

그리고 γ 축 1차 자속은 $\phi_{rs} = L_{i_{rs}} + M_{i_{rr}}$ 임으로 1차전류 크기의 간섭분은 γ 축 1차 자속에 의한 γ 축 속도 기전력 $\omega_0 \phi_{rs}$ 이다. 비간섭 제어로 하기 위해서는 이것을 피드백 보상하고 $v_{\delta s}$ 를 식(8)과 같이 준다.

$$v_{\delta s} = v'_{\delta s} + \omega_0 \phi_{rs} \quad (8)$$

여기서 $v'_{\delta s}$ 는 δ 축 1차 전압의 비간섭분이고 ϕ_{rs} 의 연산에 의해 $i_{\delta s}$ 은 $v'_{\delta s}$ 만으로 제어할 수 있는 것을 알 수 있다.

2.3 속도추정

자속 관측기에서 추정된 자속 $(\hat{\phi}_{dr} \ \hat{\phi}_{qr})^T$ 과 그 미분치 $(\hat{\phi}'_{dr} \ \hat{\phi}'_{qr})^T$ 에서 전원각 주파수 $\hat{\omega}_0$ 는 식(10)과 같이 구할 수 있다.

$$\hat{\omega}_0 = \frac{d}{dt} \tan^{-1} \frac{\hat{\phi}_{qr}}{\hat{\phi}_{dr}} = \frac{\hat{\phi}'_{qr} \hat{\phi}_{dr} - \hat{\phi}_{qr} \hat{\phi}'_{dr}}{\hat{\phi}_{dr}^2 + \hat{\phi}_{qr}^2} \quad (9)$$

그리고 슬립 각주파수 $\hat{\omega}_s$ 는 발생 토오크 \hat{T} 에 비례하기 때문에 식(10)과 같이 구할 수 있다.

$$\hat{\omega}_s = \frac{R_r}{\hat{\phi}_{dr}^2 + \hat{\phi}_{qr}^2} \hat{T} \quad (10)$$

발생 토오크는 식(11)이다.

$$\hat{T} = \frac{M}{L_r} (\hat{\phi}_{dr} i_{qr} + \hat{\phi}_{qr} i_{ds}) \quad (11)$$

회전각 주파수를 $\hat{\omega}_r$ 는 식(12)이 된다.

$$\hat{\omega}_r = \frac{\hat{\phi}'_{qr} \hat{\phi}_{dr} - \hat{\phi}_{qr} \hat{\phi}'_{dr}}{\hat{\phi}_{dr}^2 + \hat{\phi}_{qr}^2} - \frac{R_r M}{L_r} \frac{\hat{\phi}_{dr} i_{qs} - \hat{\phi}_{qr} i_{ds}}{\hat{\phi}_{dr}^2 + \hat{\phi}_{qr}^2} \quad (12)$$

따라서 추정된 자속과 검출한 상태량 (1차전류)에서 회전속도를 추정할 수 있다.

3 시스템의 구성

Fig. 1은 본 연구에서 구성한 전동기 속도제어 시스템을 나타내고 DSP(TMS 320), D/A 컨버터, 및 A/D 컨버터로 구성한다. 센스에서 검출한 전류는 12비트 A/D 컨버터를 통하여 DSP에 입력되고, 연산 알고리즘에 따라 DSP에서 연산되어 전압 지령치를 전압형 인버터를 사용하여 전동기 입력전압을 출력한다. 이 경우 PWM 반송파는 3(Khz)이고 샘플링 주기는 50(μ s)이다. 이 샘플링 주기 내에 관측기에 의한 속도추정, 지령전압의 연산을 행한다. 이 경우 전압 지령치는 비간섭 제어규칙을 이용하여 연산하고 자속의 오차를 추정하는 자속 제어도 행한다.

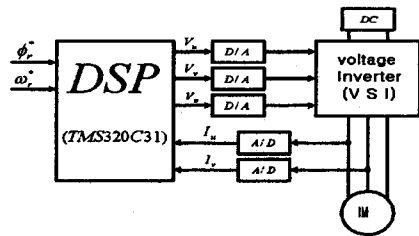


Fig. 1 Configuration of speed control system

3.1 시뮬레이션 실험결과

시뮬레이션에 사용한 전동기의 정격 전압 120[V], 정격속도 3000[rpm], 정격전류 2.0[A]이다.

Fig. 2는 센서리스 벡터제어 시스템에서 $\omega_r^* = 1200$ [rpm], 자속 전류지령 $i_{\phi s}^* = 1$ [A], 토크 전류지령 $i_{\phi s}^*$ 의 제한은 ± 1 [A]로 하여 실험한 결과를 나타낸다. 속도추정은 어느 정도의 범위에서 오차가 발생하고 있지만 속도 실측값(Real speed)은 매우 안정적이다. 이 결과에서 제안한 속도 추정법을 이용한 Fig. 2의 시스템은 실용성이 가능함을 나타내고 있다.

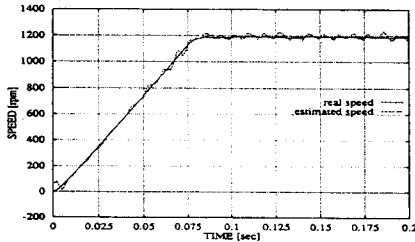


Fig. 2 Speed response by simulation

관측기 극은 2차 자속 관측기 시스템을 안정화시키기 위해서 관측기 이득을 조정하여야 하고 관측기 이득은 회전속도에 빠르게 추종하여 수렴하도록 설정한다. 따라서 최적인 관측기 극을 택하기 위해 관측기 극의 변화에 대한 속도응답의 변화를 시뮬레이션에 의해 검토한다.

Fig. 3은 관측기 극을 $k = 0.5 \sim 2.5$ 까지 변화시킬 때의 속도응답 변화의 시뮬레이션 결과이다. 그 결과, $k = 1.2 \sim 1.6$ 까지는 속도응답은 미소하게 변화하지만 안정되고 있는 것을 알 수 있다.

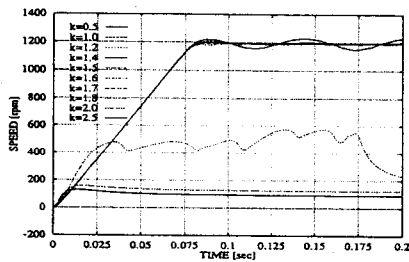


Fig. 3 Speed response as parameter with $k = 0.5 \sim 2.5$

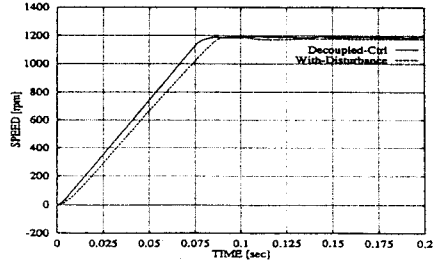


Fig. 4 Speed response as parameter decoupled control

fig. 4는 비간섭 제어의 유무에 대한 조건에서 시뮬레이션한 속도 응답 결과를 나타낸다. 비간섭 제어를 행한 것이 비간섭 제어를 행하지 않는 것보다 외란의 영향을 받을 때, 입상시간이 빠르게 되고 설정값에 가깝게 되는 것을 알 수 있다.

4 결론

본 연구는 자계방향 기준 벡터제어 이론에 기초하여 속도 센서리스 벡터제어를 구현한다. 관측기 이론에 기초하여 2차 자속 관측기와 전류센스에서 검출한 전류값으로 속도추정을 행하는 새로운 속도 추정법을 나타내었다.

센서리스 벡터제어를 실행하기 위해 자속 관측기와 비간섭 제어를 실행하였다.

그리고 제안한 알고리즘에 의해 자계방향 벡터제어의 실현에 가능성이 있음을 시뮬레이션으로 검토하였다.

(참고문헌)

- [1] 久保田, 尾崎, "Sensorless Vector Control of Induction Machine Using Flux Observer", 電學論 D, No. 111, pp. 954 ~960, 平成 3년.
- [2] 楊金, "Sensorless Vector Control of Induction Machine Using Slip Frequency", 電學論 D, No. 111, pp. 945 ~9953, 平成 3년.
- [3] 久保田壽夫, 尾岐正則, 松瀬貢規, 適應2次磁束オブザーバ의 誘導電動機 速度推定への 應用, 電學論, D110, p.954, 1991.
- [4] 楊耕, 金東海, MRASによる一次抵抗 同定機能付 誘導機速度 센サレスベクトル制御, 電學論, D111, p.945, 1993.