

실시간 자속관측기를 이용한 유도전동기 속도제어

김은기*, 이재훈*, 전기영**, 이승환***, 오봉환§, 이훈구§§, 김용주§§§, 한경희*

*명지대학교, **중소기업진흥공단, ***대덕대학, §명지전문대학, §§용인송담대학, §§§동양공업전문대학

A Induction Motor Speed Control Using Online Flux Observer

E. G. Kim*, J. H. Lee*, K. Y. Jeon**, S. H. Lee***, B. H. Oh§, H. G. Lee§§, Y. J. Kim§§§,
K. H. Han*

*Myongji Univ., **SBC, ***Dadok Col., §Myongji Col., §§Yong-in Songdam Col.,
§§§Dongyang Tec. Col.

ABSTRACT

The rotor speed and flux information is most important in the vector control. The accuracy of flux observers for induction machine inherently depends on parameter sensitivity. The control strategy is using online flux observer for flux estimation. In the proposed system, the speed control characteristics using a online flux observer control isn't affected by a load torque parameter disturbance. Simulation results are presented to prove the effectiveness of the adaptive sliding mode controller for the drive variable load of induction motor.

1. 서 론

유도전동기의 고성능 벡터제어를 위한 다양한 자속관측기법들이 연구되어 왔다. 이 기법들은 크게 다음과 같이 분류할 수 있는데 MRAS, 적응속도관측기, 칼만필터를 이용한 방법, 고주파 신호 주입을 이용한 방법 등이 있다. 이들 방법들은 알고리즘에 따라 약간의 차이는 있지만 이득 설정의 어려움 또는 부하변동과 전동기의 파라미터 변화 등의 영향을 받는 단점이 있다.^{[1]~[3]}

본 논문에서는 자속관측기와 계산된 속도정보를 이용하여 부하변동이나 파라미터 변동시 영향을 받게 되는 전압과 전류로부터 토크성분을 추출하고 부하변동분을 고려해 속도를 계산한다.^[4] 이 속도 정보를 입력으로 하는 전류모델과 전압모델을 조합시킨 자속관측기를 구성한다. 이러한 조합 자속관측기에 의해 실시간으로 2차자속과 위상을 추정하고 이를 좌표변환에 이용함으로써 부하변동이나 파라미터 변동에 따른 자속의 변화를 실시간으로 보정한다. 이 기법의 타당성을 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

2. 자속관측기

2.1 전압모델의 자속관측기

동기회전좌표계를 고정좌표계로 변환하여 나타내면 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} v_{ds}^s &= R_s i_{ds}^s + p \lambda_{ds}^s \\ v_{qs}^s &= R_s i_{qs}^s + p \lambda_{qs}^s \\ v_{dr}^s &= R_r i_{dr}^s + p \lambda_{dr}^s - \omega_r \lambda_{qr}^s = 0 \\ v_{qr}^s &= R_r i_{qr}^s + p \lambda_{qr}^s + \omega_r \lambda_{dr}^s = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

채교자속식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \lambda_{ds} &= L_s i_{ds} + L_m i_{dr} = L_{ls} i_{ds} + L_m (i_{ds} + i_{dr}) \\ \lambda_{qs} &= L_s i_{qs} + L_m i_{qr} = L_{ls} i_{qs} + L_m (i_{qs} + i_{qr}) \\ \lambda_{dr} &= L_r i_{dr} + L_m i_{ds} = L_{lr} i_{dr} + L_m (i_{ds} + i_{dr}) \\ \lambda_{qr} &= L_r i_{qr} + L_m i_{qs} = L_{lr} i_{qr} + L_m (i_{qs} + i_{qr}) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 식 (1)에 식 (2)를 적용하여 정리하면 다음과 같이 자속의 미분 값으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} p \lambda_{dr}^s &= \frac{L_r}{L_m} [v_{ds}^s - (R_s + p \sigma L_s) i_{ds}^s] \\ p \lambda_{qr}^s &= \frac{L_r}{L_m} [v_{qs}^s - (R_s + p \sigma L_s) i_{qs}^s] \\ p \lambda_{dr}^s &= -\frac{1}{\tau_r} \lambda_{dr}^s - \omega_r \lambda_{qr}^s + \frac{L_m}{\tau_r} i_{ds}^s \\ p \lambda_{qr}^s &= -\frac{1}{\tau_r} \lambda_{qr}^s + \omega_r \lambda_{dr}^s + \frac{L_m}{\tau_r} i_{qs}^s \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, 누설계수 $\sigma = 1 - (L_m^2 / L_s L_r)$,

$$\text{회전자시정수 } \tau_r = L_r / R_r$$

고정자 전압방정식을 통해 고정자 자속을 구하고 식 (5)에서 회전자 자속을 계산한다.

$$\lambda_s^s = \int (V_s^s - R_s i_s^s) dt \quad (4)$$

$$\lambda_r^s = \frac{L_r}{L_m} (\lambda_s^s - \sigma L_s i_s^s) \quad (5)$$

2.2 전류모델의 자속관측기

회전자 전류 식(6)을 회전자 전압 방정식 (7)에 대입하여 정리하면 식 (8)로 표현된다.

$$i_r^s = \frac{\lambda_r^s - L_m i_s^s}{L_r} \quad (6)$$

$$0 = R_r i_r^s + \frac{d}{dt} \lambda_r^s - j\omega_r \lambda_r^s \quad (7)$$

$$0 = R_r \left(\frac{1}{L_r} \lambda_r^s - \frac{L_m}{L_r} i_s^s \right) \frac{d}{dt} \lambda_r^s - j\omega_r \lambda_r^s \quad (8)$$

위 식을 회전자 자속의 미분식으로 표현하면

$$\frac{d}{dt} \lambda_r^s = R_r \frac{L_m}{L_r} i_s^s - \frac{R_r}{L_r} \lambda_r^s + j\omega_r \lambda_r^s \quad (9)$$

회전자 전압방정식을 회전자 자속과 고정자 전류로 표현한 식 (10)에서 고정자 전류를 이용하여 회전자 자속을 추정한다.

$$p\lambda_r^s = - \left(\frac{R_r}{L_r} - j\omega_r \right) \lambda_r^s + R_r \frac{L_m}{L_r} i_s^s \quad (10)$$

2.3 전압전류 혼용 자속관측기

그림 1은 전압, 전류모델의 조화 자속관측기 블록도이다^[4].

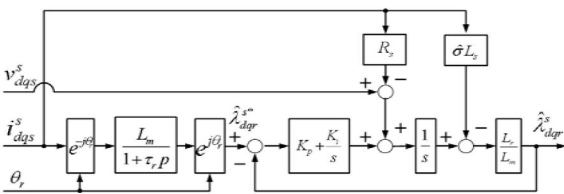


그림 1 전압, 전류모델의 조화 자속관측기
Fig. 1 Voltage, current model proportion flux observer

중 고속영역에서는 전압모델이 사용되고 저속영역에서는 전류모델이 사용된다. 추정된 자속을 관측기 특성방정식을 이용하여 전압모델과 전류모델에서의 추정자속항으로 분리하면 다음식과 같다.

$$\lambda_r^s = f(s) (\lambda_{r-vol}^s - \lambda_{r-cur}^s) + \lambda_{r-cur}^s = f(s) \lambda_{r-vol}^s + (1 - f(s)) \lambda_{r-cur}^s \quad (11)$$

여기서, λ_{r-vol}^s 은 전압모델에서 계산된 회전자 자속이며, λ_{r-cur}^s 은 전류모델에서 계산된 회전자 자속이다.

또한 $f(s) = \frac{s^2}{s^2 + K_p s + K_i}$, $1 - f(s) = \frac{K_p s + K_i}{s^2 + K_p s + K_i}$ 의 자속관측기의 특성방정식이다.

식 (11)은 결국, 전압모델에는 고주파 통과 필터가 전류모델

에는 저주파 통과 필터가 곁여진 형태가 된다.

$$\lambda_r^s = [H_{filter}] \lambda_{r-vol}^s - [L_{filter}] \lambda_{r-cur}^s \quad (12)$$

2.4 실시간 보정을 위한 자속관측기

자속관측기에서 전동기 상수, 특히 회전자 저항이나 자화 인덕턴스, 상호인덕턴스가 부하 변동이나 외부영향에 따라 오차가 있을 경우 두 모델이 전이되는 주파수 ω_c 부근에서의 자속 추정특성은 전압 모델 또는 전류모델 중 단독의 경우 보다 성능이 떨어지게 된다. 이것은 전압모델, 전류모델의 위상 변화를 적절하게 보상함으로써 개선할 수 있다. 즉 회전자 저항과 상호인덕턴스의 변화량을 자속관측기의 차분각 주파수에 감안함으로써 보정되어 진다. 이를 고려한 자속관측기의 블록도는 그림 2와 같다.

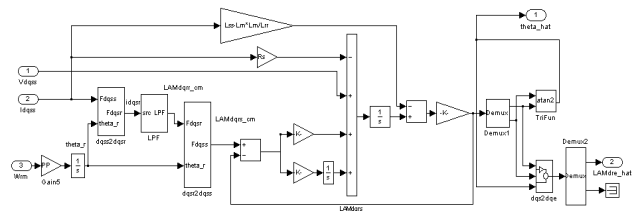


그림 2 파라미터 변화를 고려한 자속관측기
Fig. 2 Flux observer with parameters variation compensation

3. 시뮬레이션

본 논문에서는 전류모델과 전압모델을 조화시킨 자속관측기를 구성하여 실시간으로 2차자속과 위상을 추정하고 이를 적절히 보상함으로써 파라미터변동이나 부하변동에 따른 자속의 변화를 실시간으로 보정한다. 이를 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 시뮬레이션에 사용된 파라미터는 다음 표 1에 나타내었고, 전체 시스템 블록도는 그림 3과 같다.

표 1 전동기 파라미터
Table 1 Motor parameters

정격 출력, 극수	3.7 [kW] (5HP), 4극
정격 전압, 정격 전류	220 [V], 12.9 [A]
관성 모멘트	0.0918 [kg·m ²]
고정자 저항, 회전자 저항	0.6992 [Ω], 0.3552 [Ω]
고정자, 회전자, 상호인덕턴스	0.0661 [H], 0.0632 [H]

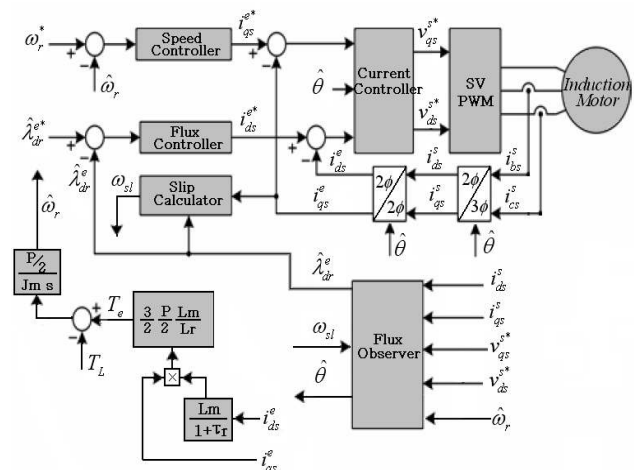


그림 3 시스템 제어 블록도
Fig. 3 System control block diagram

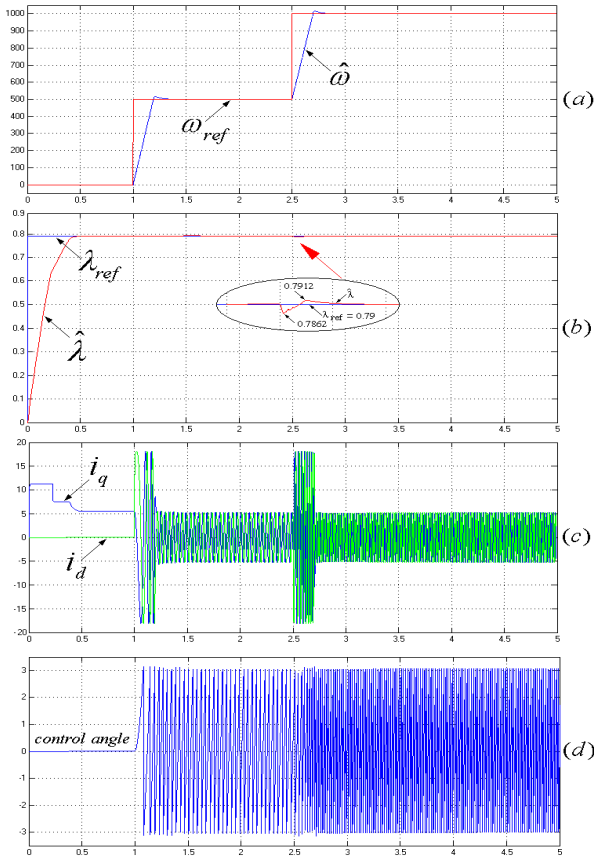


그림 4 계단 속도 지령에 대한 속도, 자속, 전류, 제어각
Fig. 4 ω , λ , i , θ response for step speed response

그림 4는 전구간에 반부하를 가하고, 0→500→1000rpm으로 지령속도를 가변시켰을 때 (a)는 기준속도와 계산속도, (b)는 이때의 기준자속과 추정자속, (c)는 i_d , i_q 전류, (d)는 이때의 제어각을 나타낸다. 그림 4(b)에서와 같이 속도 가변구간에서도 미세한 오차로 빠른 자속추정이 이루어지므로 그림 4(a)에서와 같이 양호한 속도 추정이 이루어짐을 알 수 있다.

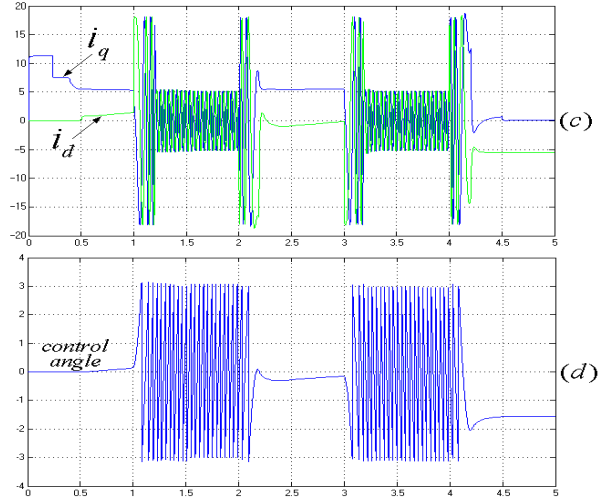
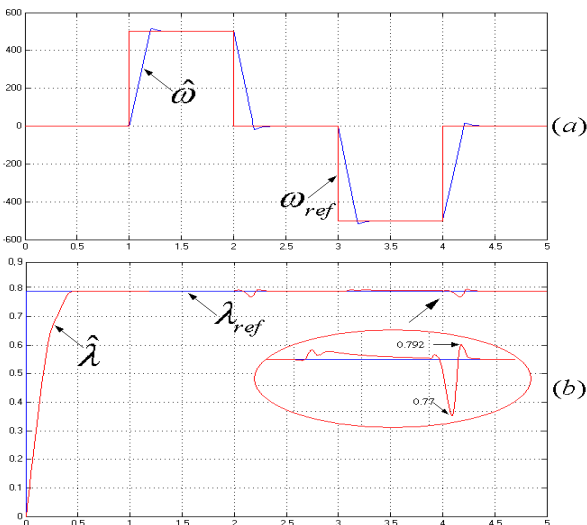


그림 5 정역 속도 지령에 대한 속도, 자속, 전류, 제어각
Fig. 5 ω , λ , i , θ response for P&N speed response

그림 5는 그림 4와 같은 조건에서 지령속도를 0→500→0→-500rpm의 정역으로 하였을 때의 ω , λ , i , θ 의 응답을 나타낸다. 자속을 실시간으로 보정함으로써 빠른 속도 추정이 이루어짐을 알 수 있다.

4. 결론

자속관측기에 의해 실시간으로 2차자속과 위상을 추정하고 이를 좌표변환에 이용함으로써 부하변동이나 파라미터 변동에 따른 자속의 변화를 실시간으로 보정함으로써 유도전동기의 속도를 제어한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 전구간에서 반부하를 가하고, 속도 가변구간에서 실시간으로 자속을 추정 보상한 결과 0.2[s], 3[%]이하의 오버슈트로 속도제어가 이루어짐을 확인하였다.
- (2) 정역 속도 가변시에서도 기준자속 0.79 ± 0.02 내의 빠른 자속추정으로 0.2[s], 3[%]이하의 오버슈트로 속도제어가 이루어짐을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] Hisao Kubota, Kouki Matsuse, and Takayoshi Nakano, "New adaptive Flux Observer of Induction Motor for Wide Speed Range Motor Drives", IEEE, IECON '90, pp. 921 ~ 926.
- [2] H. Kubota, K. Matsuse and T. Nakano, "DSP-Based Speed Adaptive Flux Observer of Induction Motor", IEEE, IA-29, No. 2, pp.344-348, 1993.
- [3] Patric L., Jansen and Robert D. Lorentz, "A Physically Insightful Approach to the Design and Accuracy Assessment of Flux Observer for field Oriented Induction Machine Driver", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol 30, no. 1, pp. 101 ~ 110, Jan./Feb. 1994
- [4] M. Elbuluk, N. Lagovsky and M. D. Kankam, "Design and Implementation of a Closed-Loop Observer and Adaptive Controller of Induction Motor Drives", IEEE, IA-34, No.3 pp.435 ~ 443, 1998.