

직접 토오크 제어를 이용한 센스리스 유도전동기의 속도제어

(A Speed Control of Sensorless Induction Motor using Direct Torque Control)

박건우* · 고태언 · 하홍곤

동의대학교

(Gun-Woo Park* · Tea-Eon Go · Hong-Gon Ha)

(Dong-eui University)

Abstract

This paper presents a digitally speed sensorless control system for induction motor with direct torque control (DTC). The drive is based on Model Reference Adaptive System (MRAS) using state observer as a reference model for flux estimation. The system are closed loop stator flux and torque observer for wide speed range that inputs are currents and voltages sensing of motor terminal, model reference adaptive control (MRAS) with rotor flux linkages for the speed turning signal at low speed range, two hysteresis controllers. The proposed system is verified through simulation.

1. 서론

산업현장에서 주 동력원으로 사용되고 있는 유도전동기의 제어는 속도검출기나 위치검출기에 의한 전동기의 속도정보가 필수적이다. 벡터제어에 의해 유도전동기를 구동하는 경우 속도와 자속각 위치정보를 얻기 위해 일반적으로 속도센서를 사용한다. 그러나 속도센서를 사용하는 경우 부가적인 설치로 가격과 유지비를 증가시킬 뿐만 아니라, 시스템을 복잡하게 하며, 기계적인 강인성과 신뢰성을 저하시키는 등의 문제점이 따르게 된다. 따라서 전동기의 정밀하고 빠른 응답특성을 갖는 높은 신뢰성의 제어시스템이 필수적이므로 속도 및 위치센서를 사용하지 않는 속도제어 방식에 대한 관심이 고조되었고 여러 가지 속도추정 알고리즘이 제안되었다.[1]-[7] 그 방식에는 예를 들어 상태관측기에 의해 회전자 자속을 추정하고 고정자 전류와 회전자 자속을 이용하여 속도정보를 얻는 방식,[1]-[2] 고정자 모델과 회전자 모델에 의해 구한 추정치의 차이를 적응메카니즘에 적용시킴으로써 속도를 추정하는 방식,[3]-[4] 회전자 슬롯에 의한 릴럭턴스 변화로 야기되는 고정자 전압 및 전류 고조파를 측정하여 속도를 추정하는 방식,[5]-[6] 입출력이 잡음의 영향을 받을 경우에 칼만 필터를 이용하는 방식[7] 등이 있다.

본 논문에서는 제어구조가 디지털 형태로 간단하고 유도전동기 파라메타의 영향이 비교적 작은 직접 토오크 제어(Direct Torque Control : DTC)를 사용한 속도 센서없는 제어시스템을 제안한다.[8]-[9] 광범위한 속도영역에서의 정확한 자속

추정을 위해 PI제어기를 사용한 페루프 자속관측기를 사용하였고, 물리적 해석이 간결하고 적용이 용이한 회전자 자속을 사용한 MRAS (Model Reference Adaptive System)에 의한 속도 추정시스템을 제안한다.[4],[8] 제안된 알고리즘은 기준모델에서 측정전류를 피드백하는 상태관측기로부터 자속을 추정하며, 비교모델에서 회전자의 전류모델을 이용하여 회전자 자속을 측정전류로부터 구한다. 상태관측기에서 추정된 회전자 자속과 회전자의 전류모델에서 추정된 회전자자속의 오차를 적응메카니즘에 적용하여 회전자속도를 추정한다. 본 논문은 제안된 알고리즘을 시뮬레이션을 통하여 고찰하였다.

2. 유도전동기의 직접 토오크 제어

2.1. 직접 토오크 제어 개념과 방식

유도전동기의 직접 토오크 제어는 고정자 자속과 토오크를 제어함에 있어서 매 샘플링 주기마다 실제 값과 지령치를 비교하여 생긴 오차를 히스테리시스 밴드폭과 비교하여 매 연산주기마다 가장 제어오차를 최소화하는 적절한 인버터 전압벡터를 선정하여 출력하는 방식으로, 출력전압의 결정에 PWM방식을 사용하지 않고 자속과 토오크가 각각 직접적으로 제어된다. 원리상, 토오크를 증가시키기 위해서는 유효전압 벡터의 빈도수를 늘려 출력하고 감소시키기 위해서는 영 전압벡터의 빈도수를 늘려 토오크를 감소시키게 된다. 또한, 자속의 크기는 고정자 자속 벡터와 인접한 유효 전압 벡터 중 자속을

압모델과 전류모델을 통해 자속을 각각 연산하고 두 모델 사이의 연산오차를 PI제어기로 제어하여 보정한다. 각각의 모델의 수식은 식(4)~(9)이다.

$$\frac{d}{dt} \begin{vmatrix} \Phi_{ds}^s \\ \Phi_{qs}^s \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} V_{ds}^s \\ V_{qs}^s \end{vmatrix} - R_s \begin{vmatrix} I_{ds}^s \\ I_{qs}^s \end{vmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{vmatrix} \Phi_{dr}^s \\ \Phi_{qr}^s \end{vmatrix} = \frac{L_r}{L_m} \begin{vmatrix} \Phi_{ds}^s \\ \Phi_{qs}^s \end{vmatrix} - \sigma L_s \begin{vmatrix} I_{ds}^s \\ I_{qs}^s \end{vmatrix} \quad (5)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{vmatrix} \Phi_{dr}^r \\ \Phi_{qr}^r \end{vmatrix} = -\frac{R_r}{L_r} \begin{vmatrix} \Phi_{dr}^r \\ \Phi_{qr}^r \end{vmatrix} + R_r \frac{L_m}{L_r} \begin{vmatrix} I_{ds}^r \\ I_{qs}^r \end{vmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{vmatrix} I_{ds}^r \\ I_{qs}^r \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos \theta_r & \sin \theta_r \\ -\sin \theta_r & \cos \theta_r \end{vmatrix} \begin{vmatrix} I_{ds}^s \\ I_{qs}^s \end{vmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{vmatrix} \Phi_{dr}^s \\ \Phi_{qr}^s \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos \theta_r & -\sin \theta_r \\ \sin \theta_r & \cos \theta_r \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \Phi_{dr}^r \\ \Phi_{qr}^r \end{vmatrix} \quad (8)$$

$$\Phi_{dqs}^s = \int [(V_{dqs}^s - R_s I_{dqs}^s) + \epsilon_\omega (K_p + \frac{K_I}{S})] dt \quad (9)$$

여기서, I_{dqs}^s 와 Φ_{dqs}^s 는 고정자에서 본 고정자 전류와 자속, Φ_{dqr}^s 는 고정자에서 본 회전자 자속, I_{dqs}^r 와 Φ_{dqr}^r 는 회전자에서 본 고정자 전류와 회전자 자속, θ_r 은 회전자 자속각이고, σ 는 누설계수이며, ϵ_ω 는 폐루프 자속 연산기의 전압 모델과 전류 모델간의 자속의 차이이다.

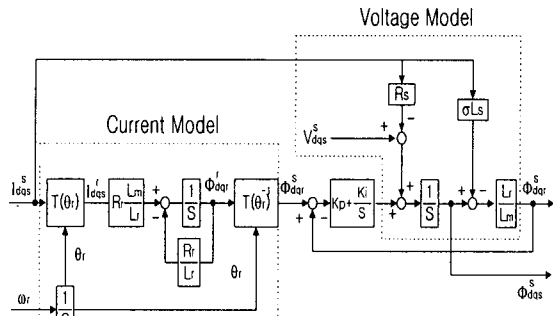


그림 3. 전압모델과 전류모델을 함께 사용하는 자속 연산기
Fig.3. Flux estimator with voltage and current model

2.3. MRAS의 구성

유도전동기에서 MRAS (Model Reference Adaptive System)에 의한 센서리스 속도제어는 두 추정치의 출력을 비교하여 두 추정치의 차이를 적응메카니즘에 적용시킴으로써 회전자속도를 추정하는 방식이다.

기준모델은 폐루프 자속연산기에서 나오는 회전자 자속을 사용하였으며 식(10)과 같고, 적응모델은 정지좌표계에서의 전류모델에 의한 방정식 식(11)과 같다. 그림 4는 MRAS 속도관측기를 나타내고 있다.

$$\begin{vmatrix} \widehat{\Phi}_{dr}^s \\ \widehat{\Phi}_{qr}^s \end{vmatrix} = \frac{L_r}{L_m} \left[\int (V_{dqs} - R_s I_{dqs}^s) dt - \sigma L_s I_{dqs}^s \right] \quad (10)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{vmatrix} \widehat{\Phi}_{dr}^s \\ \widehat{\Phi}_{qr}^s \end{vmatrix} = -\frac{1}{T_r} \begin{vmatrix} \widehat{\Phi}_{dr}^s \\ \widehat{\Phi}_{qr}^s \end{vmatrix} + \omega_r \begin{vmatrix} \widehat{\Phi}_{dr}^s \\ -\widehat{\Phi}_{qr}^s \end{vmatrix} + \frac{L_m}{T_r} \begin{vmatrix} I_{ds}^s \\ I_{qs}^s \end{vmatrix} \quad (11)$$

여기서 T_r 은 시정수이며, 두 모델에서 회전자 자속 추정치의 차이를 적응메카니즘에 적용시켜 구한 회전자속도는 다음과 같다.

$$\widehat{\omega}_r = K_p \epsilon_\omega + K_I \int \epsilon_\omega dt \quad (12)$$

$$\epsilon_\omega = \widehat{\Phi}_{qr}^s \widehat{\Phi}_{dr}^s - \widehat{\Phi}_{dr}^s \widehat{\Phi}_{qr}^s \quad (13)$$

$\widehat{\Phi}_{qr}^s, \widehat{\Phi}_{dr}^s$: 자속연산기의 회전자자속 추정값

$\widehat{\Phi}_{dr}^s, \widehat{\Phi}_{qr}^s$: 회전자 전류모델의 회전자자속 추정값

K_p, K_I : 비례 및 적분상수

그림 4는 제안한 MRAS의 속도추정 블록도이다.

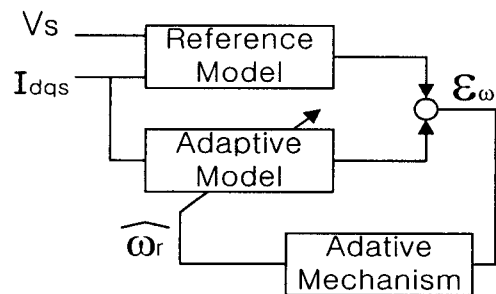


그림 4. MRAS의 속도추정 블록도
Fig.4. Block diagram of a MRAS based speed estimation

3. 시뮬레이션 결과

직접 토크 제어의 센서리스 유도전동기의 속도제어

를 위하여 Matlab/Simulink를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 본 논문에서 사용된 유도전동기는 3상 농형으로서 전동기 사양은 표 2와 같다.

표 2. 5마력 유도전동기의 사양
Table 2. Parameters of 5hp induction motor

파라메타	값
극수	4
정격 속도	1760 rpm
1차측 저항(R_s)	0.5532 Ω
2차측 저항(R_r)	0.252 Ω
1차측 인덕턴스(L_s)	0.065 H
2차측 인덕턴스(L_r)	0.065 H
상호 인덕턴스(L_m)	0.0634 H
관성 계수	0.0181 $kg \cdot m^2$

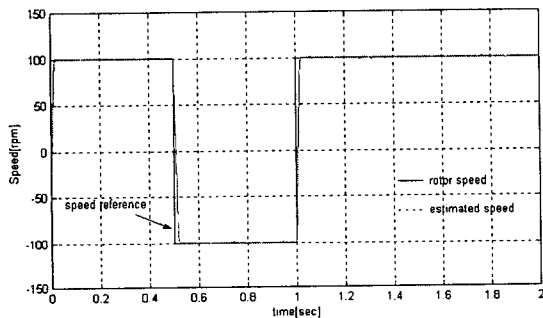


그림 5. 속도 제어 응답 (± 100 rpm)
Fig.5. Response of speed control (± 100 rpm)

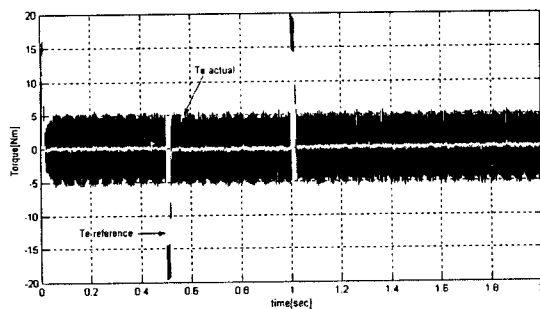
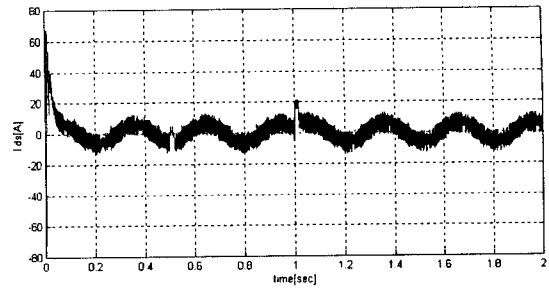


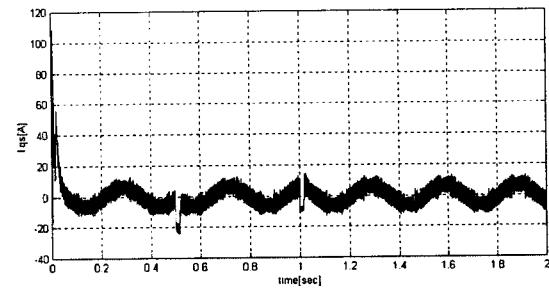
그림 6. 토오크 제어 응답
Fig.6. Response of Torque control

그림 5에서 그림 9까지는 속도 지령을 +100rpm에서 -100rpm의 지령을 주었을 경우, 제안된 제어시스템의 응답특성을 2초 동안 나타내고 있다. 그림 5는 속도 응답 특성, 그림 6은 토오크 응답 특성, 그림 7은 정지좌

표계에서의 d-q축 전류파형, 그림 8은 고정자 좌표계에서의 d-q축 고정자 자속계적. 그림 9는 d-q축 고정자 자속파형을 나타내고 있다.



(a)



(b)

그림 7. 저속영역에서의 전류 (a)d-축 전류 (b)q-축 전류

Fig.7. The current at the low speed range (a)d-axis current (b)q-axis current

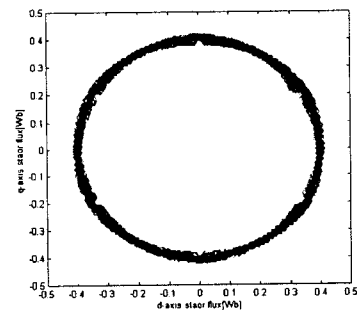


그림 8. d-q 고정자 자속의 궤적
Fig.8. Trajectory of the d- and q-axis stator flux

그림 10과 그림 11은 속도 지령을 +1500rpm에서 -100rpm의 고속의 지령을 주었을 경우의 응답특성을 나타내고 있다. 그림 10은 속도 응답 특성, 그림 11은

고정자 좌표계에서의 dq축 고정자 자속파형을 나타내고 있다.

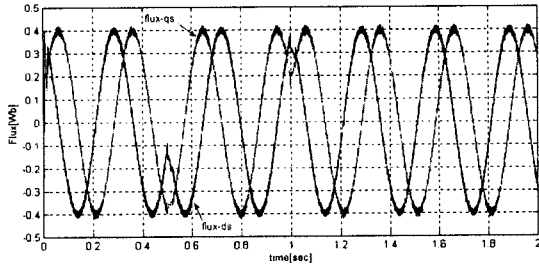


그림 9. d-q 고정자 자속 파형
Fig.9.Waveform of the d- and q-axis stator flux

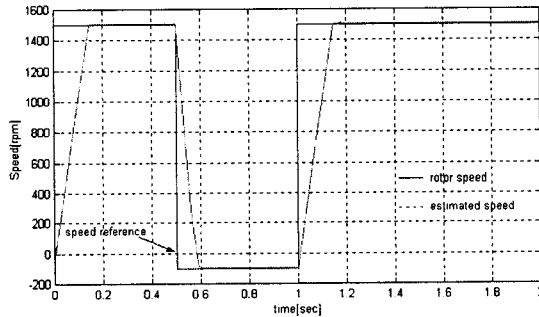


그림 10. 속도 제어 응답 (1500rpm,-100rpm)
Fig.10.Response of speed control (1500rpm,-100rpm)

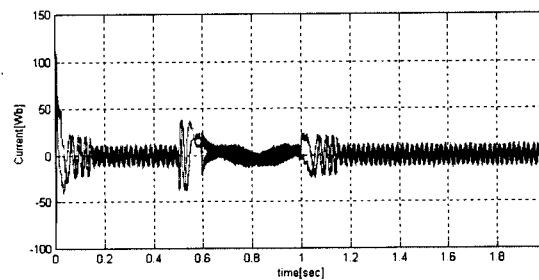


그림 11. 고속영역에서의 전류
Fig.11.The current at the high speed range

4. 결론

본 논문에서는 속도검출기가 없는 유도전동기의 직접 토크 제어 시스템을 위하여 DTC의 성능에 매우 큰 영향을 주는 자속을 고속에서 뿐만 아니라 저속에서도

매우 정확하게 추정할 수 있는 페루프 자속 연산기를 사용하였고 속도 추정은 고정자 자속을 이용한 MRAS를 사용하였다. 저속영역에서 제안된 알고리즘과 시스템의 적용 가능성을 확인하기 위해서 5hp 농형 유도전동기를 적용하여 속도센서 없는 DTC의 응답특성을 시뮬레이션을 통하여 분석한 결과, 100rpm의 저속영역에서도 우수한 동적 특성이 얻어짐을 확인하였다. 앞으로 제안된 제어알고리즘을 실제 시스템에 적용하여 검토할 예정이다.

참 고 문 헌

- [1] P. L. Jansen, R. D. Lorentz and D. W. Novotny, "Observer Based Direct Field Orientation : Analysis and Comparison of Alternative Methods", IEEE, IA-30, No. 4, pp.945-953, 1994.
- [2] 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.
- [3] R. B. Gimenez, G. M. Asher, M. Sumner and K. J. Bradley, "Dynamic Performance Limitations for MRAS Based Sensorless Induction Motor Drives," IEE Proc B, Vol. 143, No. 2, pp.113-121, 1996.
- [4] F. Z. Peng and T. Fukao, "Robust Speed Identification for Speed-Sensorless Vector Control of Induction Motors", IEEE, IA-30, No. 5, pp.1234-1240, 1994.
- [5] K. D. Hurst and T. G. Habetler, "A Comparison of Spectrum Estimation Techniques for Sensorless Speed Detection in Induction Machine", IEEE, IA-33, No. 4, pp.898-905, 1997.
- [6] F. Profumo, G. Grive, M. Pastorelli and J. C. Moreira, "Universal Field Oriented Controller Based on Air Gap Flux Sensing via Third Harmonic Stator Voltage", IEEE, IA-30, No.2, pp.448-455, 1994.
- [7] Y. R. Kim, S. K. Sul and M. H. Park, "Speed Sensorless Vector Control of an Induction Motor Using an Extended Kalman Filter", IEEE/IAS, pp.594-599, 1992.
- [8] M. H. Kim, N. H. Kim and M. H. Kim, "An Induction Motor Position Control System with Direct Torque Control", IEEE, ISIE 2001, pp.771-774, 2001.
- [9] J. K. Kang and S. K. Sul, "New Direct Torque Control of Induction Motor for Minimum Torque Ripple and Constant Switching Frequency", IEEE, Trans. Ind. Applicat. Vol.35, No.5, pp.1076-1082, 1999.