

루엔버거 관측기를 이용한 약계자 영역에서 유도전동기의 속도 센서리스 고정자자속 기준제어

권태성*, 신명호**, 현동석*
*한양대학교, **서울산업대학교

Speed Sensorless Stator Flux-Oriented Control of Induction Motor in the Field Weakening Region Using Luenberger Observer

Tae-Sung Kuen*, Myoung-Ho Shin**, Dong-Seok Hyun*

*Dept. of Electrical Engineering, Hanyang Univ.

**Dept. of Electrical Engineering, Seoul National Univ. of Technology

ABSTRACT

In a conventional speed sensorless stator flux-oriented(SFO) induction motor drive system, when the estimated speed is transformed into the sample-data model using the first-forward difference approximation, the sampled data model has a modeling error which, in turn, produces an error in the rotor speed estimation. The error included in the estimated speed is removed by the use of a low pass filter (LPF). As the result, the delay of the estimated speed occurs in transients by the use of the LPF. This paper investigates the problem of a conventional speed sensorless SFO system due to the delay of estimated speed in the field weakening region. In addition, this paper proposes a method to estimate exactly speed by using Luenberger observer. The proposed method is verified by experiment with a 5-hp induction motor drive.

1. 서 론

공작기계 및 스피들 드라이브와 같은 분야에서는 약계자 영역에서 최대토크 운전을 필요로 하게 된다. 약계자 영역에서 유도기의 동특성은 인버터에서 전동기에 공급할 수 있는 최대전압과 전동기의 정격전류에 의해 정해진다. 약계자영역에서 우수한 성능을 얻기 위해 많은 연구가 이루어졌다.^{[1]-[4]}

고정자자속 기준제어 속도 센서리스 시스템에서는 모델을 샘플할 때 이산화 오차가 발생하여 추정된 회전자 속도에 오차가 발생한다^[5]. 이 오차는 보

통 저역통과필터에 의해 제거되지만 추정된 속도는 과도상태에서 지연이 발생하게 된다.

약계자 운전을 위한 방법은, 약계자 영역에서 기준 자속을 회전자 속도에 반비례해서 저감시키는 것이다. 이 경우 약계자 운전을 위한 기준속도는 최대 토크를 고려하여 결정되어 진다. 그러나 속도 센서리스 시스템에선 추정된 속도가 과도상태에서 지연이 생기기 때문에 정확한 기준 속도를 정할 수 없다. 더 나아가 추정된 속도의 지연으로 인하여 약계자 영역의 시작이 늦어지게 된다. 결국 전압여유가 부족하게 되어서 전류제어가 안되는 문제가 발생하게 된다.

본 논문에서는 기존의 고정자자속 기준제어 센서리스 시스템의 문제점을 해결하고 약계자 영역에서 정확한 속도 추정을 하기 위하여 새로운 속도 추정 방법을 제안한다. 추정된 속도에 포함된 오차는 저역통과필터를 사용하지 않고 루엔버거 관측기를 사용하여 제거하였다. 루엔버거 관측기의 사용으로 과도상태에서 정확한 속도 추정을 할 수 있게 된다. 실험을 통하여 기존 방법보다 제안된 방법이 우수하다는 것을 입증한다.

2. 기존의 속도 센서리스 방법

기존의 고정자자속 기준제어 시스템에서 약계자 영역에서의 동작은 고정자자속의 지령치를 회전자 속도에 반비례해서 저감시키는 방법을 사용한다. 고정자자속 기준제어 시스템에서 정지 2상 α - β 좌표계에서 추정된 동기 각속도는 식(1)과 같다.^[6]

$$\hat{\omega}_e = \frac{(v_{\beta s} - R_s i_{\beta s}) \hat{\lambda}_{\alpha s} - (v_{\alpha s} - R_s i_{\alpha s}) \hat{\lambda}_{\beta s}}{|\hat{\lambda}_s|^2} \quad (1)$$

여기서 ‘^’는 추정값, R_s 는 고정자 저항, $v_{\alpha s}$ 와 $v_{\beta s}$ 는 α - β 축 고정자 전압, $i_{\alpha s}$ 와 $i_{\beta s}$ 는 α - β 축 고정자 전류, $\lambda_{\alpha s}$ 와 $\lambda_{\beta s}$ 는 α - β 고정자 자속이다.

회전 2상 d-q 좌표계에서 추정된 슬립 각주파수, 추정된 기계회전자 속도, 그리고 추정된 회전자 위치는 각각 식 (2), (3), (4)와 같다.^[6]

$$\hat{\omega}_{sl} = \frac{(1 + \sigma \tau_r p) L_s i_{qs}}{\tau_r (\hat{\lambda}_{ds} - \sigma L_s i_{ds})} \quad (2)$$

$$\hat{\omega}_r = \frac{2}{P} (\hat{\omega}_e - \hat{\omega}_{sl}) \quad (3)$$

$$\hat{\theta}_r = \int \hat{\omega}_r dt \quad (4)$$

여기서 L_s 는 고정자 자기 인덕턴스, σ 는 총누설 계수, p 는 미분 연산자, τ_r 은 회전자 시정수, P 는 극수이다.

식 (1)은 디지털 제어를 위하여 이산 시스템으로 변환하는 이산화 과정에서 모델링 오차를 포함하게 되어 추정된 속도에 오차가 발생하여 속도 제어를 할 수 없게 된다. 이 오차를 제거하기 위하여 저역통과필터를 사용한다. 그러나, 저역통과필터 사용으로 추정된 속도는 속도가 변하는 과도 상태에서 지연이 발생하여 약계자 영역으로의 천이가 지연되고, 결국 과도한 역기전력의 발생으로 전압여유가 부족해서 q축 전류 제어가 되지 못하는 문제가 발생한다.

3. 루엔버거 관측기에 의한 속도 추정

기계계 상태방정식은 식 (5), (6), (7)과 같다.

$$J_m \frac{d\omega_r}{dt} + B_m \omega_r = u + \tau_d \quad (5)$$

$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \quad (6)$$

$$\frac{d\tau_d}{dt} = 0 \quad (7)$$

여기서 J_m 은 관성 모멘트, ω_r 은 회전자 속도, B_m 은 마찰 계수, u 는 구동 토크, τ_d 는 부하토크, θ_r 은 회전자 위치이다.

식 (5), (6), (7)로부터 상태방정식을 나타내면 식 (8)과 같다.

$$\frac{dx}{dt} = Ax + bu, \quad y = Cx \quad (8)$$

여기서

$$A = \begin{bmatrix} -B_m/J_m & 0 & 1/J_m \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 1/J_m \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$C = [0 \ 1 \ 0], \quad x = [\hat{\omega}_r \ \hat{\theta}_r \ \hat{\tau}_d]^T \text{이다.}$$

루엔버거 관측기는 식 (9)와 같이 표시된다.

$$\dot{\hat{x}} = (A - GC)\hat{x} + Bu + Gy = A_o \hat{x} + Bu + Gy \quad (9)$$

여기서 G 는 관측기 이득 행렬이다.

추정된 오차 $\hat{x}(t) = x(t) - \hat{x}(t)$ 는 식 (10)과 같이 표시된다.

$$\dot{\hat{x}} = (A - GC)\hat{x} = A_o \hat{x} \quad (10)$$

초기 추정값은 $\hat{x}(0)$ 이며, 초기 추정 오차는 $\hat{x}(0) = x(0) - \hat{x}(0)$ 이다. 추정된 오차가 빨리 제거되기 위해서는 $A_o = A - GC$ 가 점근 안정하도록 관측기 이득 행렬 G 를 선택해야만 한다. 그러므로, 관측기 이득 행렬 G 는 A_o 의 고유치가 음의 실수부를 갖도록 선택되어야 한다.

그림 1은 루엔버거 관측기가 적용된 속도 제어기 블록 다이어그램을 보여주고 있다.

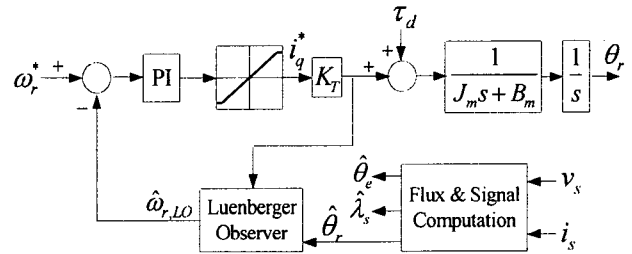


그림 1 루엔버거 관측기가 적용된 속도 제어기 블록 다이어그램
Fig. 1 Block diagram of speed controller that incorporates Luenberger Observer

4. 고정자자속 기준제어

제안된 구동시스템의 제어방법은 고정자자속 기준제어이다. 그림 2는 제안된 방법을 적용한 고정자자속 기준제어의 블록 다이어그램을 보여주고 있

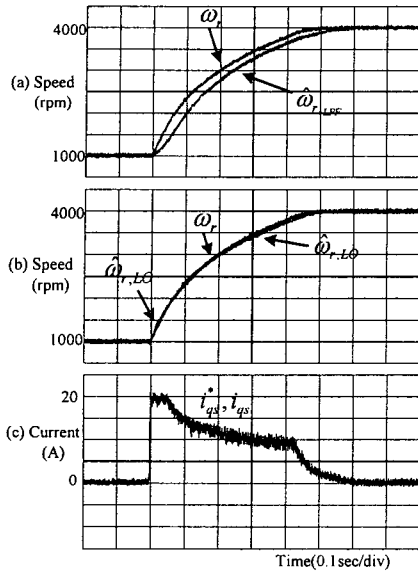


그림 3 약계자 영역에서 측정된 속도를 제어했을 때 기존 방법과 제안한 방법에 의한 속도 및 전류 파형
 Fig. 3 Estimated speed, $\hat{\omega}_{r,LPF}$, $\hat{\omega}_{r,LO}$ and current when the measured speed is controlled and used for the filed weakening region

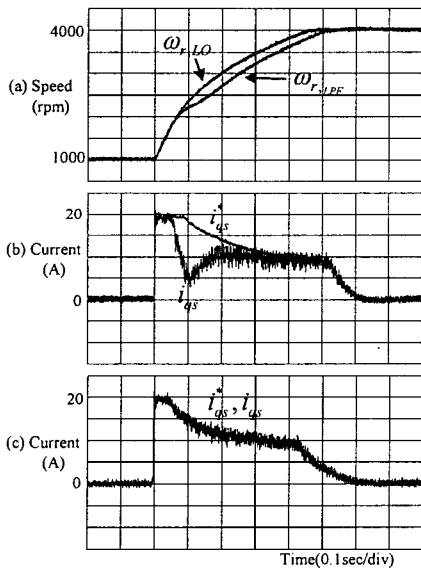


그림 4 속도 및 전류 파형 (a) $\hat{\omega}_{r,LPF}$ 와 $\hat{\omega}_{r,LO}$ 를 각각 제어했을 때 측정된 속도 파형
 (b) $\hat{\omega}_{r,LPF}$ 를 제어했을 때 전류 파형
 (c) $\hat{\omega}_{r,LO}$ 를 제어했을 때 전류 파형
 Fig. 4 Speed and current (a) measured speed when $\hat{\omega}_{r,LPF}$, $\hat{\omega}_{r,LO}$ are controlled, respectively
 (b) current when $\hat{\omega}_{r,LPF}$ is controlled
 (c) current when $\hat{\omega}_{r,LO}$ is controlled

통과필터를 사용하지 않고 루엔버거 관측기를 사용하여 제거하였다.

기존의 속도 추정 방법에서는 추정된 속도의 지연으로 인해 약계자 영역에서의 성능이 나빠진다. 하지만 제안한 방법에서 추정된 속도는 지연되지 않았으며 약계자 영역에서도 우수한 성능을 나타내었다.

참 고 문 헌

- [1] X. Xu and D.W. Novotny, "Selection of the Flux Reference for Induction Machine Drives in the Field Weakening Region", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 28, no. 6, pp. 1353-1358, 1992.
- [2] Y.T. Kao and C.H. Liu, "Analysis and Design of Microprocessor-Based Vector-Controlled Induction Motor Drive", IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 39, no. 1, pp. 46-54, 1992.
- [3] S.H. Kim and S.K. Sul, "Maximum Torque Control of an Induction Machine in the Field Weakening Region", IEEE Trans. Indus. Appli., vol. 31, no. 4, pp. 787-794, 1995.
- [4] M.H. Shin, D.S. Hyun, and S.B. Cho, "Maximum Torque Control of Stator Flux-Oriented Induction Machine Drive in the Field Weakening Region", in Proc. IEEE IAS Ann. Meet., pp. 1461-1467, Oct. 2000.
- [5] L. Ben-Brahim and A. Kawamura, "A Fully Digitized Field-Oriented Controlled Induction Motor Drive Using only Current Sensors", IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 39, no. 3, pp. 241-249, 1992.
- [6] X. Xu, R.D. Doncker, and D.W. Novotny, "A Stator Flux oriented Induction Machine Drive", IEEE Power Electron. Specialists Conf, pp. 870-876, 1988.
- [7] T.G. Habetler and D.M. Divan, "Control Strategies for Direct Torque Control Using Discrete Pulse Modulation", in Proc. IEEE IAS Ann. Meet., pp. 514-522, Oct. 1989.
- [8] Myoung-Ho Shin and Dong-Seok Hyun, "Speed sensorless stator flux-oriented control of induction machine in the field weakening region", PESC. 2001 IEEE 32nd Annual, vol. 2, pp. 1185-1190, 2001.
- [9] Peter Vas, Sensorless Vector And Direct Torque Control, Oxford University Press, 1998.
- [10] Flank L. Lewis, Applied Optimal Control & Estimation, Prentice-Hall International, Inc., 1992.