

약계자영역에서 루엔버거관측기를 이용한 유도전동기의 속도 센서리스 고정자자속 기준제어

權泰成^{*},申明昊^{**},玄東石^{***}

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

T.S. Kwon, M.H. Shin, and D.S. Hyun

요 약

기존의 속도센서가 없는 유도전동기의 고정자자속 기준제어에서 추정된 속도가 이산화 될 때, 이산화에 의한 모델링오차 때문에 회전자속도 추정에 오차가 발생한다. 이 오차는 저역통과필터에 의해 제거되지만 추정된 속도는 과도상태에서 지연이 발생해서 약계자영역으로의 천이가 지연되는 문제가 발생하게 된다. 본 논문에서는 기존의 고정자자속 기준제어 속도 센서리스 시스템의 약계자영역에서 추정된 속도의 지연으로 발생하는 문제점을 고찰하고 또한 루엔버거관측기를 사용하여 정확한 속도 추정을 할 수 있는 방법을 제안한다.

ABSTRACT

In a conventional speed sensorless stator flux-oriented (SFO) induction motor drive, 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 is removed by the use of a low pass filter (LPF). As a result, the delay of the estimated speed occurs in transients by the use of the LPF. This paper proposes a method to estimate exactly the speed by using Luenberger observer to solve the problem of a conventional method.

Key Words : Speed sensorless, field weakening, Luenberger observer, SFO system

1. 서 론

공작기계, 스피들 드라이브와 같은 가변속 구동 분야는 약계자영역에서의 운전을 필요로 하며, 가속과 감속을 반복하는데, 신속한 속도제어를 위해서는 최대

토크운전이 필요하게 된다. 이 때문에 약계자영역에서 우수한 성능을 얻기 위해 많은 연구가 이루어졌다^{[1][2]}.

기존의 고정자자속 기준제어 속도 센서리스 시스템에서는 추정된 속도를 이산화 할 때 이산화오차에 의해서 추정된 속도에 오차가 발생한다. 이 오차는 보통 저역통과필터(LPF)에 의해 제거되지만^[3] 추정된 속도는 과도상태에서 지연이 발생하게 된다. 약계자운전을 위한 방법은, 약계자영역에서 기준자속을 회전자속도에 반비례하도록 저감시키는 것이다. 이 경우 약계자운전을 위한 기준속도는 최대토크를 고려하여 결정되어진다. 그러나 속도 센서리스 시스템에서는 추정된 속도가 과도상태에서 지연이 생기기 때문에 약계자운

*학생회원, 한양대학교 전기공학과 대학원 석사과정

E-mail : tskuen@ihanyang.ac.kr

**정회원, 서울산업대학교 전기공학과 전임강사

***정회원, 한양대학교 전자전기컴퓨터공학부 교수
접수일자 : 2003. 4.10

1차심사 : 2003. 5. 9

2차심사 : 2003. 7.28

심사완료일 : 2003. 8.11

전의 시작이 늦어지므로 전압여유가 부족하게 되어서 전류제어가 안 되는 문제가 발생하게 된다.

이러한 문제를 해결하기 위한 방법이 참고문헌 [4]에서 제안되었다. 이 방법에서는 추정된 속도의 이산화 오차를 제거하기 위하여 저역통과필터 대신 칼만필터를 사용하였으며, 과도상태에서 추정된 속도가 지연되지 않고 실제속도를 거의 정확하게 추정하였다.

칼만필터는 랜덤노이즈를 포함하는 시스템의 상태변수의 추정에 적합하고, 파라미터 변화에 강인한 특성을 가진다. 하지만 측정 노이즈의 통계학적 속성을 이용하고 있어 노이즈의 불확실성에 기인한 시스템 불능 또는 동특성 응답이 현저히 저하되는 문제가 발생할 수 있는 단점이 있다. 이에 반하여 결정론적 속성에 기반한 루엔버거관측기는 통계학적 속성을 가지는 칼만필터보다 주요 산업기기에 적용하기가 쉽고 이득행렬을 조정함으로써 추정된 상태의 빠른 수렴속도와 파라미터 변동에 대해 강인한 동특성을 얻을 수 있다. 또한 루엔버거관측기의 계산시간은 칼만필터의 계산시간보다 훨씬 적게 소요되는 장점을 가지고 있다^[5].

본 논문은 참고문헌 [4]와는 방법이 다른 또 하나의 논문이다. 본 논문에서는 기존의 고정자자속 기준제어 속도 센서리스 시스템의 문제점을 살펴본 후 약계자영역에서 정확한 속도추정을 위한 새로운 속도추정방법을 제안한다. 과도상태에서 정확한 속도추정을 위하여 추정된 속도에 포함된 오차는 저역통과필터를 사용하지 않고 루엔버거관측기를 사용하여 제거하였다.

2. 기존의 속도 센서리스 방법

기존의 고정자자속 기준제어에서 약계자영역에서의 운전은 고정자자속의 지령치를 회전자속도에 반비례해서 저감시키는 방법을 사용한다. 정지 2상 $\alpha-\beta$ 좌표계에서 추정된 동기 각속도는 식 (1)과 같다^[1].

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

여기서 R_s 는 고정자 저항, $v_{\alpha s}$ 와 $v_{\beta s}$ 는 $\alpha-\beta$ 축 고정자 전압, $i_{\alpha s}$ 와 $i_{\beta s}$ 는 $\alpha-\beta$ 축 고정자 전류, $\lambda_{\alpha s}$ 와 $\lambda_{\beta s}$ 는 $\alpha-\beta$ 축 고정자 자속이다.

회전 2상 d-q 좌표계에서 추정된 슬립 각주파수, 추정된 회전자 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 σ 는 총누설 계수, τ_r 은 회전자 시정수, p 는 미분 연산자, L_s 는 고정자 자기인덕턴스, P 는 극수 이다.

식 (1)은 이산화 과정에서 모델링오차가 발생하게 되어 추정된 속도에 오차가 발생하는데, 이 오차를 제거하기 위하여 식 (5)의 LPF를 사용한다^[3]. 그러나, LPF의 사용으로 추정된 속도는 과도상태에서 지연이 되고, 이 때문에 약계자영역으로의 천이가 지연되어 과도한 역기전력의 발생으로 전압여유가 부족해서 토크성분전류가 제어되지 못하게 된다.

$$\hat{\omega}_{r,LPF} = \frac{a}{s+a} \hat{\omega}_r \quad (5)$$

3. 루엔버거관측기에 의한 속도추정

기계방정식은 식 (6)과 같으며, 식 (7)은 회전자 속도이다. 부하토크 τ_d 는 샘플링주기에 비해서 변화가 매우 적으므로 식 (8)과 같이 나타낸다.

$$J_m \frac{d\omega_r}{dt} + B_m \omega_r = u + \tau_d \quad (6)$$

$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \quad (7)$$

$$\frac{d\tau_d}{dt} = 0 \quad (8)$$

여기서 ω_r 은 회전자속도, J_m 은 관성모멘트, B_m 은 마찰계수, u 는 구동토크, θ_r 은 회전자위치이다.

식 (6), (7), (8)로부터 상태방정식을 나타내면 식 (9)와 같다.

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu, \quad y = Cx \quad (9)$$

여기서

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

$$C = [0 \ 1 \ 0], \quad x = [\omega_r \ \theta_r \ \tau_d]^T \text{ 이다.}$$

루엔버거관측기는 식 (10)과 같다.

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

여기서 G 는 관측기 이득행렬이다.

추정된 오차 $\tilde{x}(t) = x(t) - \hat{x}(t)$ 는 식 (11)과 같다.

$$\dot{\tilde{x}} = (A - GC)\tilde{x} = A_o\tilde{x} \quad (11)$$

초기 추정값은 $\hat{x}(0)$ 이며, 초기 추정오차는 $\tilde{x}(0) = x(0) - \hat{x}(0)$ 이다. 추정된 오차가 빨리 제거되기 위해서는 $A_o = A - GC$ 가 점근 안정하도록 관측기 이득행렬 G 를 선택해야만 하는데, 이를 위해 관측기 이득행렬 G 는 A_o 의 고유치가 음의 실수값을 갖도록 선택되어야 한다. 그림 1은 루엔버거관측기가 적용된 속도제어기 블록도를 나타내고 있다.

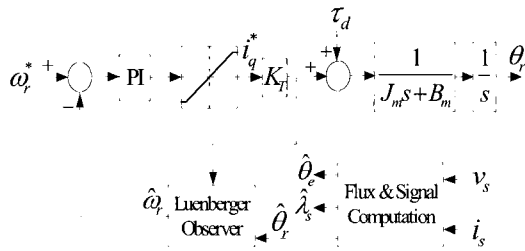


그림 1 루엔버거관측기를 갖는 속도제어기의 블록도
Fig. 1 Block diagram of speed controller that incorporates Luenberger Observer

4. 고정자자속 기준제어

그림 2는 제안한 방법을 적용한 고정자자속 기준제어의 블록도를 나타내고 있다. 고정자자속의 크기는 정지 2상 $\alpha-\beta$ 좌표계에서 식 (12)와 같고, 회전 2상 d-q 좌표계로 변환하기 위한 변환각은 식 (13)과 같으며, 비간섭 보상전류는 식 (14)와 같다^[6].

$$|\lambda_s| = \lambda_{ds} = \sqrt{\lambda_{\alpha s}^2 + \lambda_{\beta s}^2} \quad (12)$$

$$\cos(\hat{\theta}_e) = \frac{\lambda_{\alpha s}}{|\lambda_s|}, \quad \sin(\hat{\theta}_e) = \frac{\lambda_{\beta s}}{|\lambda_s|} \quad (13)$$

$$i_{dq} = \frac{\hat{\omega}_s \tau_r \sigma i_{qs}}{(1 + \sigma \tau_r s)} \quad (14)$$

고정자 입력전압은 인버터의 스위칭상태로부터 구했으며^[7], 고정자자속은 역기전력을 적분하여 구하는데, 순수적분기의 드리프트 및 포화문제 때문에 프로그래머블 저역통과필터를 사용했다^[2].

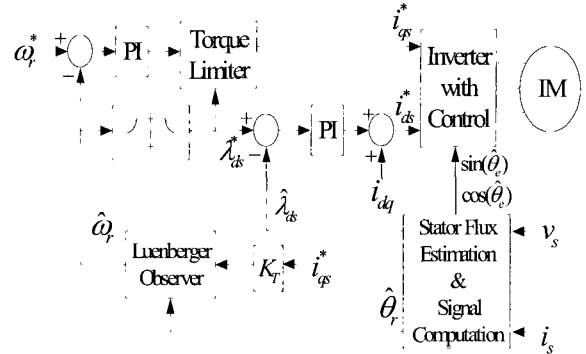


그림 2 제안한 방법의 고정자자속 기준제어 블록도
Fig. 2 Block diagram of the proposed SFO system

5. 시뮬레이션 결과

표 1은 3상 유도전동기의 파라미터를 나타내고 있다. 그림 3은 측정된 속도 ω_r 이 제어되고, 약계자운전을 위하여 사용될 때 LPF에 의한 추정속도 $\hat{\omega}_{r,LPF}$ 및 루엔버거 관측기에 의한 추정속도 $\hat{\omega}_{r,LO}$ 를 나타내고 있다. 기준속도는 1805 [rpm]이며, 루엔버거 관측기의 차단각주파수는 60 [rad/sec]로 설정하였다. 과도상태에서 $\hat{\omega}_{r,LPF}$ 는 LPF(식 (5), 차단각주파수: 40 [rad/sec])의 시정수 때문에 지연되지만, $\hat{\omega}_{r,LO}$ 는 과도상태에서 지연되지 않는 모습을 나타내고 있다. q축 전류는 측정된 속도 ω_r 이 제어되므로 제어가 잘 되는 모습을 나타내고 있다.

그림 4는 $\hat{\omega}_{r,LPF}$ 를 제어하고 약계자운전에 사용한 경우의 실제속도와 추정된 속도 및 q축 전류의 파형이다. $\hat{\omega}_{r,LPF}$ 가 과도상태에서 지연되기 때문에 $\hat{\omega}_{r,LPF}$ 가 약계자영역으로의 천이속도인 1805 [rpm]이 되었을 때 실제속도는 1805 [rpm]을 넘어선 값이 된다. 따라서 실제속도가 1805 [rpm]을 넘어서는 순간부터 q축 전류를 제어하기 위한 전압여유가 부족하게 되어 전류 제어가 안 되므로 전동기에서 발생하는 토크가 감소해서 가속이 느리게 되어 정상속도에 이르는데 많은 시간을 필요로 하게 된다.

그림 5는 기존의 방법에서 추정된 속도의 지연을 저감하기 위하여 식 (5)의 LPF의 차단각주파수를 200 [rad/sec]로 증가시킨 경우의 결과이다. 그림 4와 비교할 때 과도상태에서 추정된 속도의 지연이 줄어들었지만, 추정된 속도의 오차가 증가해서 속도제어가 불안정하게 됨을 알 수 있다.

표 1 유도전동기 파라미터
Table 1 Induction motor parameter

5 [hp], 220 [V], 4 [poles], 60 [Hz]		
정격자속	0.42	[Wb]
정격전류 (peak)	18.2	[A]
고정자저항	1.26	[ohm]
회전자저항	0.2	[ohm]
자화인덕턴스	50	[mH]
고정자누설인덕턴스	4.7	[mH]
회전자누설인덕턴스	4.7	[mH]
관성모멘트	0.01	[kg · m ²]
마찰계수	0.00001	[Nmsec/rad]

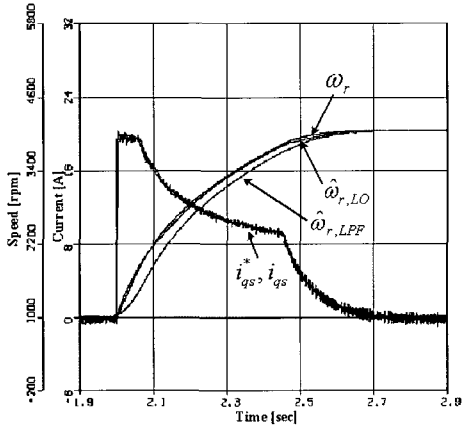


그림 3 ω_r 제어 시 $\hat{\omega}_{r,LPF}$ 와 $\hat{\omega}_{r,LO}$ 의 파형
Fig. 3 $\hat{\omega}_{r,LPF}$ and $\hat{\omega}_{r,LO}$ when ω_r is controlled

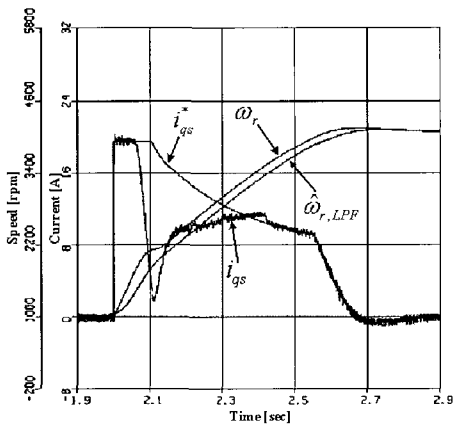


그림 4 $\hat{\omega}_{r,LPF}$ 를 제어했을 경우의 속도 및 전류
(차단각 주파수 : 40 [rad/sec])
Fig. 4 Speed and current when $\hat{\omega}_{r,LPF}$ is controlled

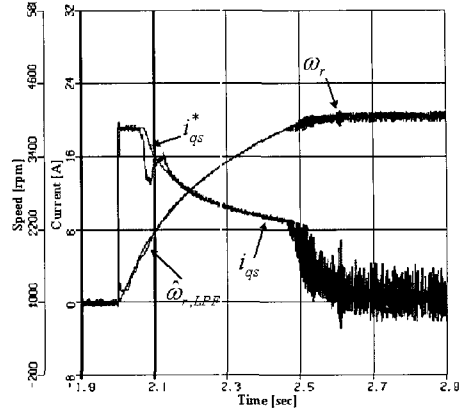


그림 5 $\hat{\omega}_{r,LPF}$ 를 제어했을 경우의 속도 및 전류
(차단각 주파수 : 200 [rad/sec])
Fig. 5 Speed and current when $\hat{\omega}_{r,LPF}$ is controlled

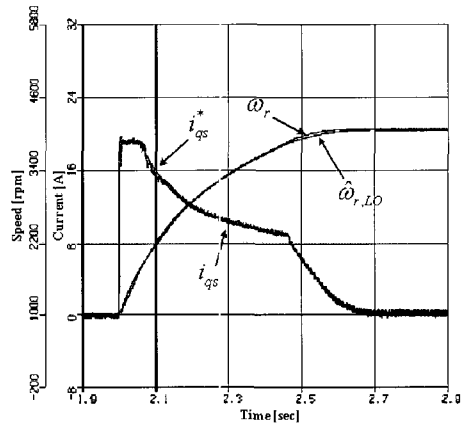


그림 6 $\hat{\omega}_{r,LO}$ 를 제어했을 경우의 속도 및 전류
Fig. 6 Speed and current when $\hat{\omega}_{r,LO}$ is controlled

그림 6은 $\hat{\omega}_{r,LO}$ 를 제어하고 약계자운전에 사용한 경우의 실제속도와 추정된 속도 및 q축 전류의 파형이다. 루엔버거관측기의 극점은 40 [rad/sec]로 설정하였다. 루엔버거관측기에 의해서 $\hat{\omega}_{r,LO}$ 가 과도상태에서 지연이 되지 않기 때문에 약계자영역으로의 천이가 지연되지 않아서 q축 전류제어가 잘 되고 있는 모습을 나타내고 있으며, 또한 과도상태에서 실제속도와 추정된 속도가 거의 일치하고 있는 모습을 나타내고 있다.

6. 실험 결과

제안한 방법의 검증을 위하여, TMS320C31 DSP보드를 이용하여 실험을 수행하였다. 모터는 표 1의 3상

유도전동기를 사용하였다. 루엔버거관측기 및 LPF 극점은 모두 40 [rad/sec]로 하였다.

그림 7은 약계자영역에서 측정된 속도 ω_r 를 제어했을 때 기존방법과 제안한 방법에 의한 속도 및 전류 파형을 나타내고 있다. 기준속도는 1805 [rpm]이다. 그림 7(a)는 $\hat{\omega}_{r,LPF}$ 가 과도상태에서 지연되는 것을 나타내고 있다. 그림 7(b)는 $\hat{\omega}_{r,LO}$ 가 과도상태에서 지연이 안 됨을 나타내고 있다. 그림 7(c)는 전류제어가 잘 되는 모습을 나타내고 있다.

그림 8(a)는 $\hat{\omega}_{r,LPF}$ 와 $\hat{\omega}_{r,LO}$ 를 제어했을 때 측정된 속도 $\omega_{r,LPF}$ 와 $\omega_{r,LO}$ 를 나타낸다. 그림 8(b)는 $\hat{\omega}_{r,LPF}$ 를 제어했을 때 전류파형이고, 그림 8(c)는 $\hat{\omega}_{r,LO}$ 를 제어했을 때 전류파형이다. 그림 8(b)에서 $\hat{\omega}_{r,LPF}$ 의 지연으로 인해 1805 [rpm]보다 높은 속도에서 약계자영역의 천이 시작되기 때문에 전류제어가 안 되는 모습을 나타내고 있다. 그 결과 그림 8(a)에 나타난 것처럼 $\omega_{r,LPF}$ 가 $\omega_{r,LO}$ 보다 더 많은 가속시간을 요구하고 있다.

그림 9는 관측기에서 관성오차 +50%, 마찰오차 +200%가 존재할 때 $\hat{\omega}_{r,LO}$ 를 제어한 경우의 결과이다. 약계자영역으로의 천이 시 전류제어가 안 되는 부분이 잠깐 존재하나 대체로 속도추정 및 전류제어가 양호하게 이루어지고 있음을 알 수 있다.

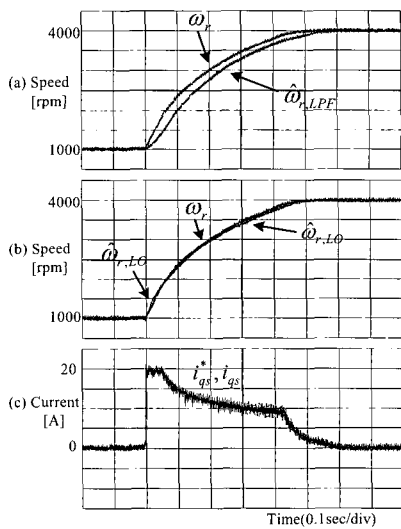


그림 7 ω_r 를 제어했을 때 기존방법과 제안한 방법에 의한 속도 및 전류

Fig. 7 Speed and current when ω_r is controlled

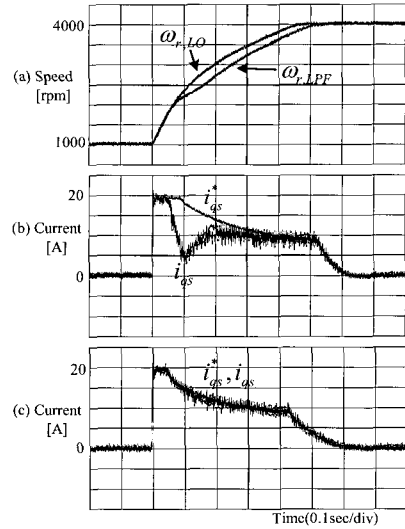


그림 8 (a) $\hat{\omega}_{r,LPF}$ 와 $\hat{\omega}_{r,LO}$ 를 각각 제어했을 때 측정된 속도

(b) $\hat{\omega}_{r,LPF}$ 를 제어했을 때 전류 파형

(c) $\hat{\omega}_{r,LO}$ 를 제어했을 때 전류 파형

Fig. 8 (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

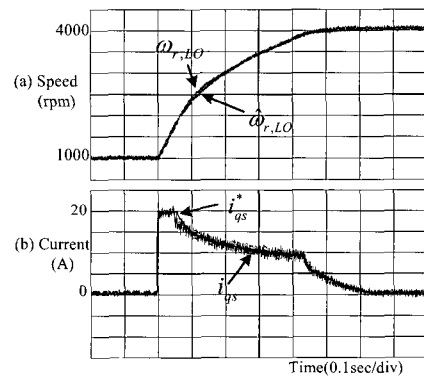


그림 9 $\hat{\omega}_{r,LO}$ 제어 시 속도 및 전류 (관측기 관성오차+50%, 마찰 오차 +200%)

Fig. 9 Speed and current when $\hat{\omega}_{r,LO}$ is controlled (J_m :+50% error and B_m :+200% error)

그림 10은 관측기에서 관성오차 -50%, 마찰오차 +200% 존재할 경우 $\hat{\omega}_{r,LO}$ 를 제어한 경우의 결과이다. 속도추정 및 전류제어가 양호하게 이루어지고 있음을 알 수 있다.

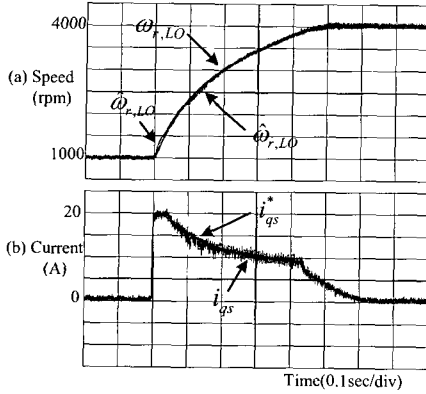


그림 10 $\hat{\omega}_{r,LO}$ 제어 시 속도 및 전류
(관측기 관성오차 -50%, 마찰 오차 +200%)

Fig. 10 Speed and current when $\hat{\omega}_{r,LO}$ is controlled
(J_m : -50% error and B_m : +200% error)

7. 결 론

본 논문에서는 약계자영역에서 기존의 속도 센서리스 고정자자속 기준제어의 문제점을 살펴 보았으며 과도상태에서 정확하게 속도를 추정하기 위한 새로운 속도추정방법을 제안하였다. 추정된 회전자 속도에 포함된 오차는 LPF를 사용하지 않고 루엔버거관측기를 사용하여 제거하였다.

기존의 속도추정방법에서는 추정된 속도의 지연으로 인해 약계자영역에서의 성능이 나빠졌으나, 제안한 방법에서 추정된 속도가 과도상태에서 지연되지 않았으며 약계자영역에서도 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] 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", *IEEE Trans. IA*, Vol. 38, No. 1, pp. 117~122, 2002.

[3] 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.

[4] M.H. Shin and D.S. Hyun, "Speed Sensorless Stator Flux-Oriented Control of Induction Machine in the

Field Weakening Region", *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 18, No. 2 pp. 580~586, Mar. 2003.

[5] Peter Vas, *Sensorless Vector And Direct Torque Control*, Oxford University Press, 1998.

[6] X. Xu, R.D. Doncker, and D.W. Novotny, "A Stator Flux Oriented Induction Machine Drive", *IEEE PESC*, pp. 870~876, 1988.

[7] T.G. Habetler and D.M. Divan, "Control Strategies for Direct Torque Control Using Discrete Pulse Modulation", *IEEE IAS*, pp. 514~522, Oct. 1989.

[8] 조급배, 최연옥, 정삼용, "확장된 루엔버거 관측기를 이용한 유도전동기 회전자 자속 추정", *전력전자학회논문지*, 6권 2호, pp. 115~124, 2001년 4월.

저 자 소 개



권태성(權泰成)

1977년 1월 10일생. 2002년 인천대 전기공학과 졸업. 2002년~현재 한양대 대학원 전기공학과 석사과정.



申明昊(申明昊)

1967년 11월 27일생. 1989년 한양대 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1991년~1996년 삼성종합기술원 근무(선임연구원). 현재 서울산업대학교 전기공학과 전임강사.



玄東石(玄東石)

1950년 4월 8일생. 1973년 한양대 전기공학과 졸업. 1978년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1984년~1985년 미국 토레도대학 교환교수. 1988년~1989년 원현 공과대학 교환교수. 현재 한양대 전자전기컴퓨터공학부 교수. 당 학회 회장 역임.