

## 확장된 Luenberger 관측기를 이용한 유도전동기 회전자 자속추정

정삼용\*, 최연옥, 조금배, 백형래\*\*, 김동휘, 서진연\*\*, 신사현\*\*\*\*  
\*한국전력공사, \*\*조선대학교, \*\*\*여수공대, \*\*\*\*송신공고

### Rotor Flux Estimation of Induction Motor Using Extended Luenberger Observer

Sam-Young Jeong\*, Youn-Ok Choi, Geum-Bae Cho, Hyung-Lae Baek\*\*  
Dong-Hui Kim, Jin-Yeun Seo\*\*\*, Sa-Yeun Sin\*\*\*\*

\*KEPCO, \*\*Dept. of Electrical Eng., Chosun Univ.

\*\*\*Dept. of Electrical Eng.,Yosu Techincal College. \*\*\*\*Sungsil Technical High School

#### ABSTRACT

In this paper, authors propose a new nonlinear rotor flux observer for rotor field oriented control of an induction motor which is designed based on theory of the extended Luenberger observer(ELO), one of a nonlinear state observer. The proposed rotor flux observer is derived from the 2 phase model of induction motor by the theory of ELO. The simulation results taken under the varying condition of rotor resistance and load torque show fast convergence of estimated rotor flux and high performance of IM drive system is acheived 표 experiment.

#### 1. 서 론

유도전동기의 가속기준제어는 구현이 상대적으로 간단한 간접벡터제어방식이 널리 활용되고 있으나 이 방식은 파라미터의 변동에 민감한 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 비선형관측기를 이용한 유도전동기 직접벡터제어에 대하여 기술한다.

일반적으로 페루프 선형관측기는 유도전동기와 같은 비선형계의 광역제어에서는 오차의 수렴성이 보증되지 않는다. 따라서 최근에는 오차선형화 기법을 적용한 확장된 칼만필터[4], 비선형 상태관측기[5], 이산형 확장된 Luenberger 관측기[6] 등의 적용연구가 활발히 진행되어 왔다.

확장된 칼만필터는 유도전동기 구동시스템에 성공적으로 적용되어 왔음에도 불구하고 노이즈의 통계학적 속성을 적용하고 있어 공분산 행렬이 적절히 조율되지 않는 경우 노이즈의 불확실성으로 인해 시스템의 응답이 현저히 저하되는 바이어스 문

제가 존재한다. 이에 비해 결정론적 속성의 비선형 상태관측기나 이산형 확장된 Luenberger 관측기는 관측기 오차 수정시 노이즈를 고려하지 않으므로 바이어스 문제를 배제할 수 있다[5]. 따라서 본 연구에서는 유도전동기 자속기준제어를 위하여 결정론적 속성의 M. Zeitz에 의해 정의된 확장된 Luenberger 관측기[7]의 원리를 적용한 새로운 유도전동기 회전자 자속 관측기를 제안하고 있다. 제안된 관측기는 확장된 칼만필터와 같이 예측된 상태 변수의 궤도를 따라 동특성 오차를 선형화하는 방식이나 바이어스 문제가 존재하지 않으며 선형 Luenberger 관측기와 유사하게 극점을 재배치하여 오차의 거동을 수정할 수 있다. 다만 확장된 Luenberger 관측기는 고차의 Talyor 전개를 포함하고 있어 구현이 복잡하므로 본 연구에서는 고차항의 Talyor 항을 제거한 축약된 형태의 자속관측기를 제안하고 이의 성능을 시뮬레이션 및 실험을 통하여 검증하였다.

#### 2. 유도전동기 구동시스템 모델링

##### 2.1 유도전동기

유도전동기는 정지좌표에서 식 (1)과 같이 고정자 전류, 회전자 자속 및 속도를 상태 변수로 하여 모델링할 수 있다<sup>[9]</sup>

$$\begin{aligned} \dot{i}_{ds} &= -a_1 i_{ds} + a_3 \phi_{dr} + a_4 \omega_r \phi_{qr} + b v_{ds} \\ \dot{i}_{qs} &= -a_1 i_{qs} - a_4 \omega_r \phi_{dr} + a_3 \phi_{qr} + b v_{qs} \\ \dot{\phi}_{dr} &= a_5 i_{ds} - a_7 \phi_{dr} - a_8 \omega_r \phi_{qr} \\ \dot{\phi}_{qr} &= a_5 i_{qs} + a_8 \omega_r \phi_{dr} - a_7 \phi_{qr} \\ \dot{\omega}_r &= a_9 (i_{qs} \phi_{dr} - i_{ds} \phi_{qr}) - a_{10} T_L \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,

$$a_1 = \left( \frac{R_r M^2}{\sigma L_s L_r^2} + \frac{R_s}{\sigma L_s} \right), \quad a_3 = \frac{M}{\sigma L_s L_r},$$

$$a_4 = \frac{R_r M}{\sigma L_s L_r^2}, \quad a_5 = \frac{R_r M}{L_r}, \quad a_6 = \frac{R_r}{L_r}, \quad a_8 = 1$$

$$a_9 = \frac{3N^2 M}{2J L_r}, \quad a_{10} = \frac{N}{J}, \quad b = \frac{1}{\sigma L_s}$$

$R_s$  및  $R_r$  : 고정자 및 회전자 저항

$L_s, L_r$  &  $M$  : 고정자, 회전자 및 상호 인덕턴스

$\sigma = 1 - M^2 / (L_s L_r)$  : 누설계수

$N$  : 극의 쌍 수,  $J$  : 회전자 관성

$T_L$  : 부하 토오크

## 2.2 회전자 자속기준제어

회전자 자속기준제어시 전동기의 고정자 전류는 회전자 자속의 d축 및 q축 성분과 동상인 자속 및 토오크 성분으로 재구성 할 수 있으며, 식 (2)에 의해 동기좌표 성분으로 변환된다<sup>[1,2]</sup>.

$$\begin{bmatrix} f_{qs}^e \\ f_{ds}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{qs} \\ f_{ds} \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 위첨자  $e$ 는 동기좌표 성분을 의미함.

다음의 식 (3)은 직접벡터제어 방식의 회전자의 위치각  $\theta$ 를 구하는 식이며, 식 (4)는 간접벡터제어에서의  $\theta$ 를 구하는 식이다.

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{\phi_{qr}}{\phi_{dr}} \right) \quad (3)$$

또는

$$\theta = \theta_{sl} + \theta_r = \int (\omega_{sl} + \omega_r) dt \quad (4)$$

여기서,  $\omega_{sl}$  및  $\omega_r$ 는 슬립 및 회전자 속도임.

이상적인 회전자 자속기준제어시  $\phi_{qr}$ 는 영이 되고,  $\phi_{dr}$  및  $i_{ds}$ 는 일정하게 유지될 것이 요구된다. 따라서 식 (1)로부터 유도전동기의 토오크는 q축 전류를 가변하여 제어할 수 있다.

## 2.3 전력변환장치

전력변환장치는 공간벡터 펄스폭변조방식의 전압형 인버터<sup>[3]</sup>를 적용하였다.

## 3. 회전자 자속 추정

다음은 확장된 Luenberger 관측기<sup>[7]</sup>를 이용한 유도전동기 회전자자속 추정에 대한 기술로 설계과정은 참고문헌<sup>[7,9]</sup>을 자세히 기술되어 있다.

식 (5)는 관측기 설계를 위해 식 (1)에 부하토오크  $T_L$ 을 추가한 6차 상태방정식 모델이다.

$$\dot{x} = f(x, u), \quad y = h(x) \quad (5)$$

여기서,

$$\begin{aligned} x &= [i_{ds}, i_{qs}, \phi_{dr}, \phi_{qr}, \omega_r, T_L]^T \\ u &= [v_{ds}, v_{qs}]^T \\ y &= [i_{ds}, i_{qs}, \omega_r]^T \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)에서  $i_{ds}$ ,  $i_{qs}$  및  $\omega_r$ 를 측정가능한 변수로 두면 확장된 Luenberger 관측기에 근거한 가관측성 행렬과 이의 역행렬은 각각 식 (6) 및 (7) 같이 구성할 수 있다.

$$\begin{aligned} Q(x, u) &= [dh_1, L_f(dh_1), dh_2, L_f(dh_2), dh_3, L_f(dh_3)]^T \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -a_1 & 0 & a_3 & a_4 x_5 & a_4 x_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -a_1 & -a_4 x_5 & a_3 & -a_4 x_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -a_9 x_4 & a_9 x_3 & a_9 x_2 & -a_9 x_1 & 0 & -a_{10} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} Q(x, u)^{-1} &= \frac{1}{D} \begin{bmatrix} D & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D & 0 & 0 & 0 \\ k_1 & k_2 & -k_3 x_5 & -k_4 x_5 & m_{35} & 0 \\ k_3 x_5 & k_4 x_5 & k_1 & k_2 & m_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & D & 0 \\ m_{61} & m_{62} & m_{63} & m_{64} & m_{65} & m_{66} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서,  $D = a_3^2 a_{10} + a_4^2 a_{10} x_5^2$

$k_c$  : 상수,

$m_{ij}$  : 상수와 상태변수로 구성된 변수식

식 (6)과 (7)은 모두 비특이 행렬이며 모든 행이 선형 독립이므로 관측가능하다<sup>[7,8]</sup>. 식 (7)의 2열, 4열 및 6열을 각각의 측정가능변수에 해당하는 서브시스템의 스타팅벡터로 선정하고  $\text{Det}(Q^{-1}) = D$ 가 식 (8)의 관계를 갖는다고 하면

$$\partial \bar{h}_1^* / \partial x_1^* = \partial \bar{h}_2^* / r \partial x_3^* = \partial \bar{h}_3^* / \partial x_5^* = D \quad (8)$$

각 서브시스템의 이득행렬은 식 (9)와 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} g_1 &= \{p_{11} * s_1 + p_{12} * ad_f s_1 + ad_f^2 s_1\} / D \\ g_2 &= \{p_{21} * s_2 + p_{22} * ad_f s_2 + ad_f^2 s_2\} / D \\ g_3 &= \{p_{31} * s_3 + p_{32} * ad_f s_3 + ad_f^2 s_3\} / D \end{aligned} \quad (9)$$

여기서,

$p_1, p_2$  및  $p_3$  : 오차 동특성 방정식의 특성계수

$$s_1 = [0, D, k_2, k_4x_5, 0, m_{62}]^T$$

$$s_2 = [0, 0, -k_4x_5, k_2, 0, m_{64}]^T$$

$$s_3 = [0, 0, 0, 0, 0, m_{66}]^T$$

식 (9)에서 특성계수는 선형 Luenberger 관측기의 재배치 극점에 해당하는 것으로 확장된 Luenberger 관측기에서는 시스템의 Jacobian 행렬의 고유치를 분석하여 임의의 배치할 수 있다. 본 연구에서는 식 (9)에서 2차항 및 3차항을 제거한 축약된 형태의 관측기를 제안한다.

최종적으로 제안된 관측기를 이용한 유도전동기의 회전자 자속추정 알고리즘은 식 (10)와 같이 구성된다.

$$\dot{\hat{x}} = f(\hat{x}, u) + g(\hat{y} - y) \quad (10)$$

여기서,

$$g(\hat{y} - y) = g_1(\hat{y}_1 - y_1) + g_2(\hat{y}_2 - y_2) + g_3(\hat{y}_3 - y_3)$$

#### 4. 시뮬레이션

시뮬레이션은 Simulink 패키지를 이용하여 수행하였다. 표 1은 시뮬레이션 및 실험에 적용된 유도전동기 구동시스템의 파라미터를 나타낸 것이다.

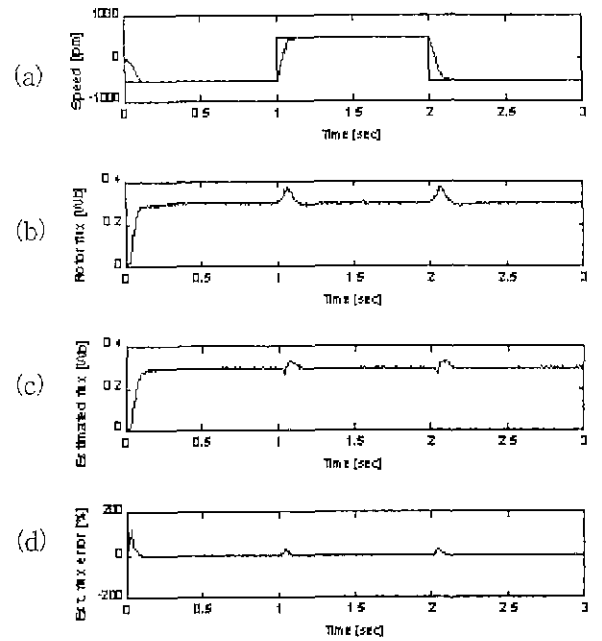
표 1. 유도전동기 구동시스템 파라미터  
Table 1. parameters of Induction Motor Drive

Parameters		
<u>Motor parameters:</u>		
P =1.5[kW]	V =220[V]	Rr =1.1806[Ω]
Rs=1.1712[Ω]	Ls=94.84[mH]	Lr =94.84[mH]
Lm=91.89[mH]	J=0.007[kg.m <sup>2</sup> ]	B=0
<u>Speed Controller</u>		
Kp=1.050,	Ki=31.500	
<u>Flux Controller</u>		
Kp=17.625,	Ki=217.652	
<u>Current Controllers</u>		
Kp=8.712,	Ki=3,420	
<u>Assigned Characteristic Factor</u>		
p1=-10,	p2=-10	p3=-1000

##### 4.1 회전자저항 변동 모드

유도전동기에서 회전자 저항은 운전조건에 따라 가변되는 대표적인 파라미터로서 보다 정교한 벡터 제어를 구현하기 위해서는 자속 추정시 회전자 저항의 변동을 고려하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 제안된 관측기를 적용하여 회전자 저항의 변동이 자속 추정에 미치는 영향을 시뮬레이션을 통하여 검토하였다.

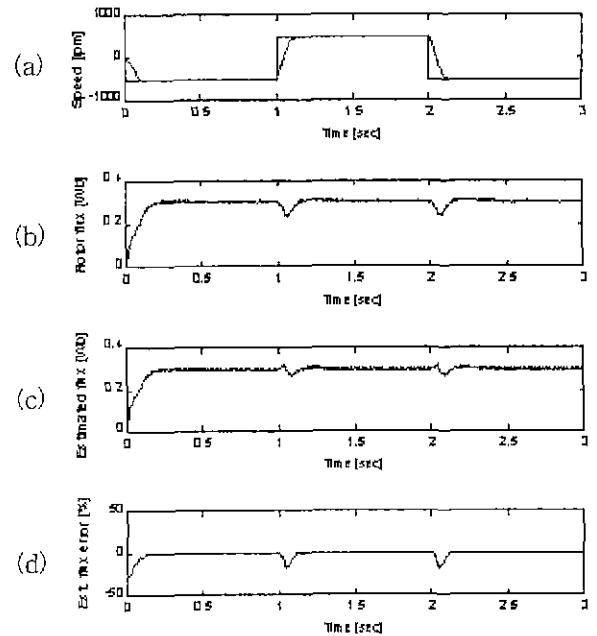
그림 2은 표 1의 파라미터 대비 관측기의 회전자 저항을 50%로 설정하였을 경우의 시뮬레이션 결과이다.



(a) Rotor speed, (b) Rotor flux,  
(c) Estimated rotor flux, (d) Estimated flux error

그림 1. 제안된 관측기에 의한 회전자 자속 추정 (Rr=50%, ±500rpm)

Fig. 1 Rotor flux estimation with the proposed Observer (Rr=50%, ±500rpm)



(a) Rotor speed, (b) Rotor flux,  
(c) Estimated rotor flux, (d) Estimated flux error

그림 2. 제안된 관측기에 의한 회전자 자속 추정 (Rr=150%, ±500rpm)

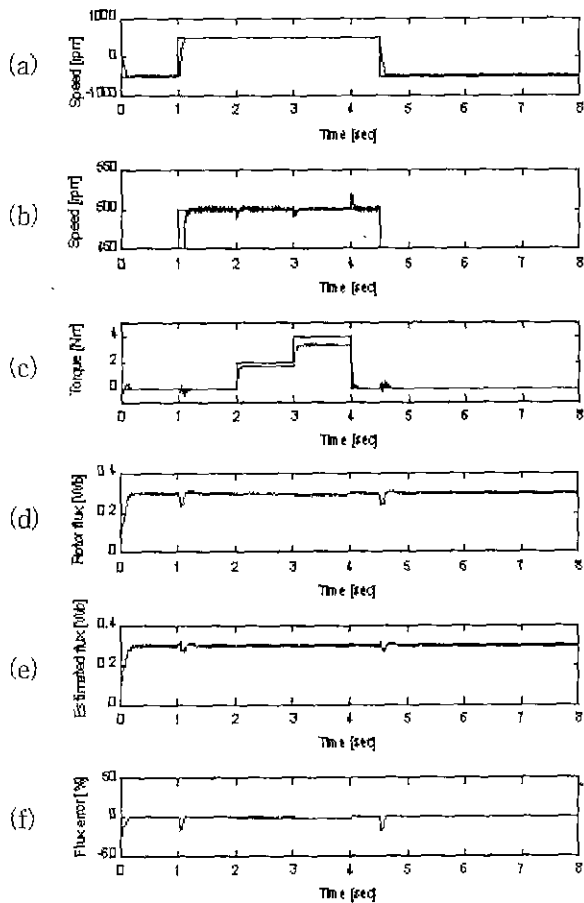
Fig. 2 Rotor flux estimation with the proposed Observer (Rr=150%, ±500rpm)

그림 1에서 정역제어에 따른 과도기간은 약 150 [ms]로 추정자속의 오차는 정역제어 순간의 초기 40 [ms] 동안 급격히 증가하여 최대오차에 도달하고 이후 40~150[ms] 구간에서는 감소하여 정상상태 편차범위내에서 영으로 수렴하고 있다. 추정자속의 최대오차는 26%이고 정상상태 편차는  $\pm 0.2\%$ 이다.

그림 2는 회전자 저항을 기준값의 150%로 설정하였을 때의 관측기 자속추정특성으로 최대 오차는 18.5%이고 정상상태 편차는 약  $\pm 0.15\%$ 이다.

#### 4.2 부하토크 변동 모의

그림 3은 관측기의 회전자 저항값을 기준값의 150%로 설정하고, 부하 토크를 0으로부터 2[Nm], 4[Nm] 및 0으로 스텝가변하였을 때의 제안된 관측기를 적용한 유도전동기 구동시스템의 시뮬레이션 동특성응답이다.



(a) Rotor speed, (b) Rotor speed(enlarged)  
 (c) Load Torque, (d) Estimated load torque,  
 (e) Estimated q-axis flux, (f) D-axis rotor flux

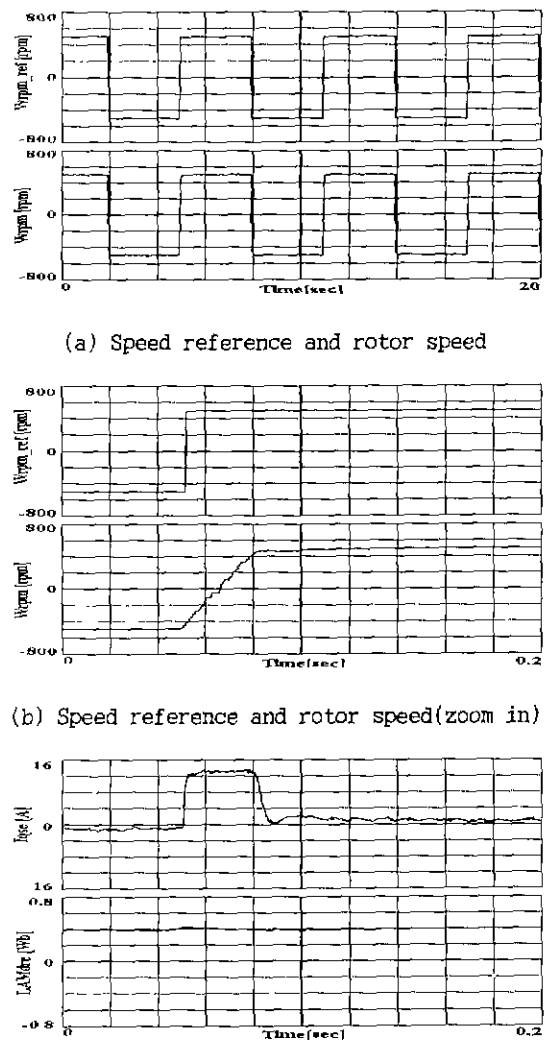
그림 3. 부하 및 회전자 저항가변시 회전자 자속 추정  
 ( $T_L=0, 2, 4$  Nm,  $R_r=150\%$ ,  $\pm 500$ rpm)

Fig. 3 Rotor flux estimation under varying of rotor resistance and load torque

그림 3(a) 및 3(b)는 전동기의 속도응답특성이며 그림 3(c)는 인가된 부하토크 및 관측기에서 추정된 부하토크를 나타낸 것이다. 그림 3(c)의 경우 추정토크의 정상상태 편차는 약 16%인 반면 추정 자속의 정상상태 편차가 각각  $-0.1 \pm 0.2\%$  및  $-0.6 \pm 0.2\%$ 이다. 시뮬레이션 결과에서 제안된 관측기를 적용하는 경우 회전자 저항의 변화는 부하토크의 변동에 비하여 추정자속의 오차에 미치는 영향이 상대적으로 낮음을 알 수 있다.

#### 5. 실험

다음의 그림 4와 5는 실험결과를 나타낸 것이다.



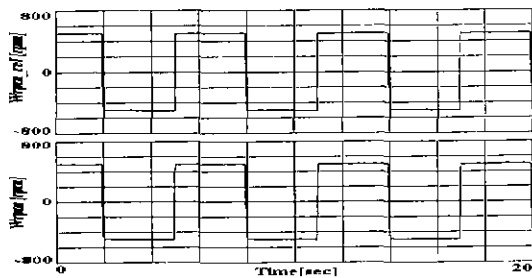
(a) Speed reference and rotor speed  
 (b) Speed reference and rotor speed(zoom in)  
 (c) q-axis current and estimated d-axis flux(zoom in)

그림 4. 유도전동기 구동시스템의 동특성  
 ( $R_r=50\%$ ,  $\pm 500$ rpm)

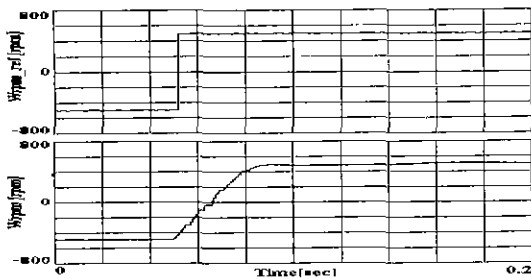
Fig. 4 Dynamic response of IM drive system  
 ( $R_r=50\%$ ,  $\pm 500$ rpm)

유도전동기 구동시스템은 TMS320C31 프로세서를 탑재한 AC-DC-AC 컨버터와 3상 220V, 1.5kW 유도전동기로 구성하였으며, 실험결과는 자속관측기의 회전자 저항을 각각 기준값의 50% 및 150%로 설정하고 전동기를  $\pm 500$ [rpm]에서 정역 제어하여 취득하였다.

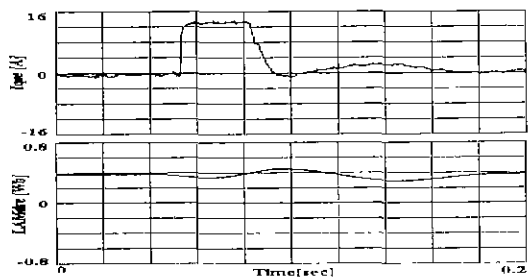
그림 4(a)와 (b)는 기준신호에 대한 속도 응답 특성이며 그림 4(c)는 q축 고정자 전류와 추정된 d축 회전자 자속을 나타낸 것으로 추정된 회전자 자속이 기준값(0.38[Wb])을 적절히 추종함을 보여준다.



(a) Speed reference and rotor speed



(b) Speed reference and rotor speed(zoom in)



(c) q-axis current and estimated d-axis flux(zoom in)

그림 5. 유도전동기 구동시스템의 동특성  
( $R_r=50\%$ ,  $\pm 500$ rpm)

Fig. 5 Dynamic response of IM drive system  
( $R_r=50\%$ ,  $\pm 500$ rpm)

그림 5(c)는 추정 자속이 약 0.37 [Wb]로 기준 값을 적절히 추종하는 반면 기준값의 약 30%에 이르는 동요가 약 80[ms] 동안 지속됨을 보여준다.

## 6. 결론

유도전동기의 회전자 자속기준제어 구현을 위하여 확장된 Luenberger 관측기 원리에 기반한 새로운 회전자 자속관측기를 제안하고, 시뮬레이션을 통하여 적용 가능성을 확인하였으며, 실험을 통하여 제안된 관측기에 의한 빠른 응답 특성을 갖는 벡터 제어를 구현이 가능함을 확인하였다.

실험에서는 추정 자속과 실측값과의 비교 검토가 생략되어 있으나 벡터 제어시의 전동기 속도응답 특성과 전류응답 특성을 시뮬레이션 결과와 비교하므로서 제안된 관측기를 적용하는 경우 전동기 회전자 저항과 같은 파라미터가 가변되거나 부하 변동이 빈번한 경우에 있어서 기존의 회전자 자속 관측기에 비해 보다 정확하고 안정적인 자속추정이 가능할 것으로 기대된다.

이 논문은 조선대학교의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

## 참고 문헌

- [1] B. K. Bose, "Power electronics and AC drives", Prentice-Hall, 1988
- [2] D. W. Novotny and T. A. Lipo, "Vector control and dynamics of AC drives", Clarendon Press, 1996
- [3] V. R. Stefanovic and S. N. Vukosavic, "Space-vector PWM voltage control with optimized switching strategy", *Industrial Application: Society Annual Meeting, IEEE*, pp1025-1033, 1992
- [4] L. C. Zai and T. A. Lipo, "An extended Kalman filter approach to rotor time constants measurement in PWM induction motor drives", *IEEE IAS Annu. Meet. Conf. Rec.*, pp 177-183, 1987
- [5] C. Manes, F. Parasiliti and M. Tursini, "DSP based field-oriented control of induction motor with a nonlinear state observer", *Power Electronics specialists conference, PESC '96 Record, 27th, IEEE* pp 1254-1259, 1993
- [6] T. Du and M. A. Brdys, "Implementation of extended Luenberger observers for joint state and parameter estimation of PWM induction motor drive", *Proc of EPE, Vol. pp 439-444*, 1993
- [7] M. Zetz, "Extended Luenberger observer for nonlinear multivariable systems", *International Journal of Control, Vol 47, No. 6*, pp 1823-1836, 1988
- [8] H. Nijmeijer and A. van der Schaft, "Nonlinear dynamical control systems", Springer, 1995
- [9] S.Y. Jeong, et al, "Application of Extended Luenberger Observer for Induction Motor control", *ICPE'98*, pp. 304-309, 1998