

論 文 7-4-9

파라미터 민감도를 이용한 유도전동기 회전자 자속관측기의 특성비교

崔鐘宇*, 南炫宅, 朴龍煥, 金興根

Comparison of Rotor Flux Observer Characteristics in Induction Motor Using Parameter Sensitivity

Jong-Woo Choi, Hyun-Taek Nam, Yong-Hwan Park, and Heung-Geun Kim

요 약

유도전동기의 고성능 벡터제어를 수행하기 위해서는 회전자 자속의 정확한 추정이 필요하다. 유도전동기의 회전자 자속관측기들에서는 자속추정시에 전동기 상수들이 사용되므로 이들의 변동에 따라 자속추정에 영향을 받는다. 본 논문에서는 파라미터 민감도를 이용하여 파라미터 변동에 의한 자속관측기들의 추정자속 오차를 해석하였다. 파라미터 민감도는 시스템 파라미터의 변동분에 대한 시스템 전달함수의 변동분의 비로 정의되므로 실제 자속과 추정 자속의 비를 전달함수로 정의하고 해석을 수행하였다. 제안된 해석방법의 타당성을 확인하기 위해 시뮬레이션과 실험을 행하였다.

ABSTRACT

To obtain a high performance in a direct vector controlled induction machine, it is essential to obtain the current rotor flux. The accuracy of flux observers for induction machines inherently depends on parameter sensitivity. This paper proposes an analysis method for conventional flux observers using "parameter sensitivity". The "parameter sensitivity" is defined as the ratio of the percentage change in the system transfer function to the percentage change of the parameter variation. We define the ratio between real flux and estimated flux as the transfer function, and analyze a parameter sensitivity of this transfer function. Practical verification is presented to conform the capabilities of the proposed analysis method.

Key Words : Flux observer, Parameter sensitivity, Direct vector control

1. 서 론

유도전동기의 직접벡터제어에 있어서 정확한 회전자

자속 추정이 필수적이다. 빠른 과도응답을 얻기 위해서 고정자 전류를 자속성분과 토크성분 전류로 분리시켜 독립적으로 제어하여야 한다. 직접 벡터제어는 직접 측정된 자속을 이용하거나 전압, 전류, 속도 등을 이용하여 추정된 자속을 이용한다. 추정된 회전자 자속은 제어 알고리즘에 따라 약간의 차이는 있지만 전동기 상수의 영향을 받는다^[1-4]. Lorenz 등은 주파수 응답함수(FRF: frequency response function)를 이용하여서 전동기 상수의 영향에 대하여 해석하였으며 저속영역에

*경북대학교 전자전기공학부 조교수

E-mail : cjw@knu.ac.kr

접수일자 : 2002. 2.20

1차심사요청일 : 2002. 2.25 2차심사요청일 : 2002. 6.10

심사완료일 : 2002. 7.24

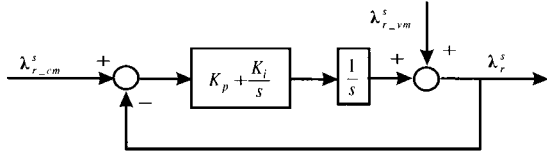


그림 2 자속관측기의 간략화된 개념도
Fig. 2 Simplified conceptual diagram of flux observer

$$K_i = \omega_c^2 \tag{8}$$

여기서, ω_c 는 필터의 차단각주파수이다.

2.4 개선된 고퍼나스 모델의 자속관측기

그림 3은 개선된 고퍼나스 모델의 자속관측기 블록도를 나타내고 있다. 이 모델의 기본적인 설계방법은 고퍼나스 모델의 경우와 같은데, 회전자 자속 추정식은 (4)와 같고 단지 자속관측기의 특성방정식이 식 (9)와 같이 약간 변형된다^[3].

$$F(s) = \frac{s^2}{s^2 + K_p s + K_i} e^{-j\alpha} \tag{9}$$

여기서, $\alpha = \pi - \tan^{-1}((K_p \omega_c)/(K_i - \omega_c^2))$ 이다.

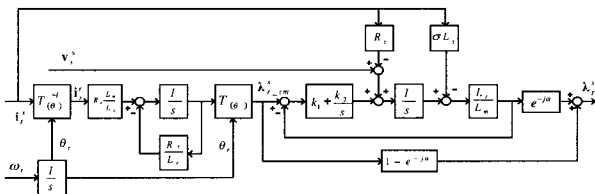


그림 3 개선된 고퍼나스 모델의 자속관측기 블록도
Fig. 3 Block diagram of Modified Improved Gopinath model flux observer

3. 파라미터 민감도

파라미터 민감도는 시스템 파라미터 변동에 따른 시스템 전달함수의 변동을 비함수의 형태로 나타낸 것이다. 파라미터 민감도를 식 (10)과 같이 정의한다.

$$S_\alpha^T = \frac{\Delta T / T}{\Delta \alpha / \alpha} = \frac{\alpha}{T} \frac{\Delta T}{\Delta \alpha} \tag{10}$$

여기서, S_α^T : 파라미터의 민감도

α : 시스템 파라미터, T : 전달함수

식 (11)은 시스템 파라미터의 미소 변화에 대한 시스템 전달함수의 변화량을 편미분으로 표시한 것이다.

$$S_\alpha^T = \frac{\partial T / T}{\partial \alpha / \alpha} = \frac{\alpha}{T} \frac{\partial \ln T}{\partial \ln \alpha} \tag{11}$$

여기서, 시스템 파라미터 변동에 따른 전달함수의 오차를 시스템 민감도로 표현하면 식 (12)과 같다.

$$\Delta T = S_\alpha^T T \frac{\Delta \alpha}{\alpha} \tag{12}$$

실제 회전자 자속과 추정된 회전자 자속의 비함수를 전달함수로 정의하고 이 전달함수의 전동기 상수들의 변화에 따른 자속변화의 비를 시스템 민감도를 이용해서 계산할 수 있다. 전압모델과 전류모델에서 전달함수를 정의하면 식 (13), 식 (14)과 같다^[1].

$$T_{vm} = \frac{\hat{\lambda}_{r_vm}^s}{\lambda_{r_vm}^s} = \frac{L_m \hat{L}_r}{\hat{L}_m L_r} \left[1 + \frac{L_r^2}{R_r L_m^2} \left(\frac{R_r}{L_r} + j\omega_{sl} \right) \times \left(\sigma L_s - \hat{\sigma} L_s \right) - j \frac{R_s - \hat{R}_s}{\omega_{sl} + \omega_r} \right] \tag{13}$$

$$T_{cm} = \frac{\hat{\lambda}_{r_cm}^s}{\lambda_r^s} = \frac{\left(\hat{R}_r \frac{\hat{L}_m}{\hat{L}_r} \right) \left(\frac{R_r}{L_r} + j\omega_{sl} \right)}{\left(R_r \frac{L_m}{L_r} \right) \left(\frac{\hat{R}_r}{\hat{L}_r} + j\omega_{sl} \right)} \tag{14}$$

여기서, $\hat{\lambda}_{r_vm}^s$: 전압모델 자속관측기의 추정자속

$\hat{\lambda}_{r_cm}^s$: 전류모델 자속관측기의 추정자속

\hat{R}_r : 제어기에서 사용된 고정자 저항값

\hat{R} : 제어기에서 사용된 회전자 저항값

\hat{L}_m : 제어기에서 사용된 자화 인덕턴스값

\hat{L}_r : 제어기에서 사용된 회전자 인덕턴스값

ω_{sl} : 슬립 각속도

식 (15)은 추정된 회전자 자속을 실제 회전자 자속과 전동기 상수들의 변동에 의해 발생한 오차항의 합으로 표현한 것이다.

$$\begin{aligned} \hat{\lambda}_{r_vm}^s &= \lambda_r^s + \Delta\lambda_{r_vm}^s \\ \hat{\lambda}_{r_cm}^s &= \lambda_r^s + \Delta\lambda_{r_cm}^s \\ \hat{\lambda}_r^s &= \lambda_r^s + \Delta\lambda_r^s \end{aligned} \quad (15)$$

오차를 고려할 경우 식 (4)를 식 (16)과 같이 표현할 수 있다.

$$\lambda_r^s + \Delta\lambda_r^s = F(s)[(\lambda_r^s + \Delta\lambda_{r_vm}^s) - (\lambda_r^s + \Delta\lambda_{r_cm}^s)] + (\lambda_r^s + \Delta\lambda_{r_cm}^s) \quad (16)$$

여기서 오차에 관한 항만을 분리해내면 식 (17)를 얻을 수 있다.

$$\Delta\lambda_r^s = F(s)\Delta\lambda_{r_vm}^s + (1-F(s))\Delta\lambda_{r_cm}^s \quad (17)$$

그러므로, 고피나스 모델과 개선된 고피나스 모델의 파라미터 민감도는 식 (18)과 같다.

$$S_\alpha^T = F(s)S_\alpha^{T_{vm}} + (1-F(s))S_\alpha^{T_{cm}} \quad (18)$$

여기서, $S_\alpha^{T_{vm}}$ 는 전압모델의 민감도이고, $S_\alpha^{T_{cm}}$ 는 전류모델의 민감도이다.

전류모델과 전압모델의 경우에는 식 (11)과 식 (13), 식 (14)을 이용하여 파라미터 민감도를 직접 구하고, 고피나스 모델과 개선된 고피나스 모델의 경우에는 전압모델과 전류모델의 파라미터 민감도를 구한후 식 (18)을 이용하여 구하였다.

4. 시뮬레이션 및 실험결과

전동기 상수들의 변동에 대한 민감도를 시뮬레이션을 통하여 구하고 실험을 통하여 제안한 파라미터 민감도를 이용한 해석방법의 타당성을 확인하였다.

고정자저항(R_s), 회전자저항(R_r), 자화인덕턴스(L_m)의 경우는 20%의 변동을 고려하였고, 고정자 누설인덕턴스(L_{ls})와 회전자 누설인덕턴스(L_{lr})의 경우는 10%의 변동을 고려하였다. 전속도 영역에 대해서 무부하시와 정격부하시의 슬립에 대해서 각각 시뮬레이션을 수행 하였으며, 시뮬레이션 및 실험에 사용된 전동기 상수 및 정격을 표 1에 나타내었다.

표 1 유도전동기 정격 및 정수

Table 1 Ratings and Parameters of Induction Motor

정격출력	2.2 [kW]	R_r	1.66 [Ω]
정격전압	380 [V]	L_{ls}	75 [mH]
정격전류	5.1 [A]	L_{lr}	75 [mH]
극 수	4	L_m	225 [mH]
R_s	2.75 [Ω]	J	0.02 [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$]
ω_c	50 [rad/sec]		

4.1 시뮬레이션 결과

그림 4에서 그림 8은 각각의 전동기 상수들의 변동에 대한 자속추정기들의 파라미터 민감도를 보여주고 있다. 여기서, ω_{sl} 은 슬립각속도이다.

그림 4는 전류모델에서의 파라미터 민감도이다. 전류모델의 경우 자화 인덕턴스와 회전자 저항의 변동에 의한 영향이 크게 나타나는데 부하가 커질수록 회전자 저항에 관한 영향은 증가하고 자화 인덕턴스에 관한 영향은 줄어든다. 식 (14)에서처럼 전류모델의 전달함수는 파라미터 변동에 의한 영향이 속도와 무관하고 슬립의 함수로 나타나므로 민감도가 전 속도 영역에서 일정하다.

그림 5는 전압모델에서의 파라미터 민감도이다. 전압모델의 경우 식 (13)에서처럼 슬립과 속도의 함수로 나타나는데, 분모의 속도항의 의해 저속 영역에서 고정자 저항(R_s)의 변동과 부하 변동에 매우 민감하다.

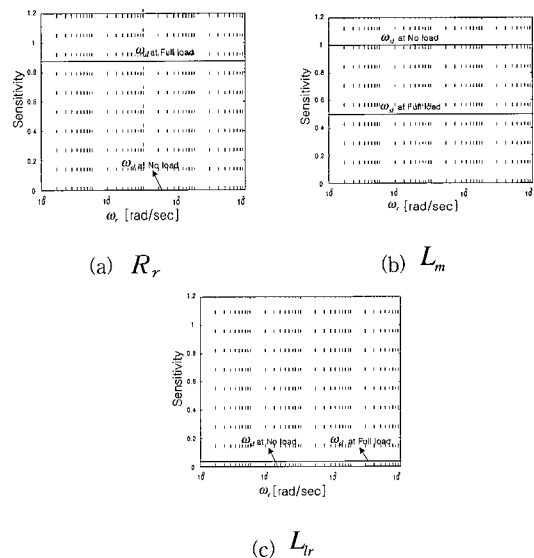


그림 4 전류모델의 파라미터 민감도
Fig. 4 Parameter sensitivity of Current model

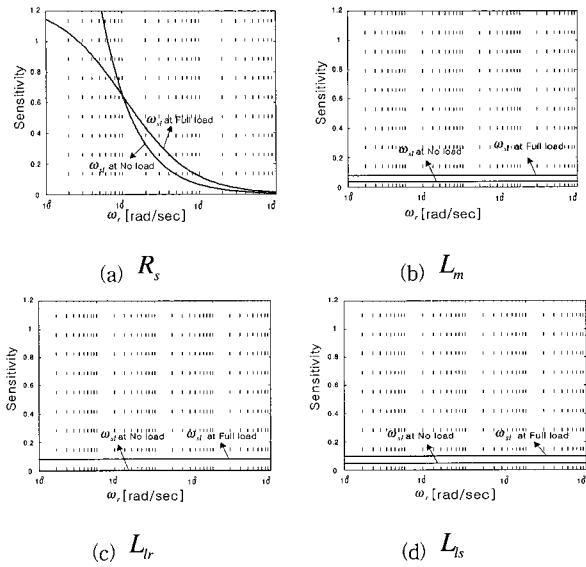


그림 5 전압모델의 파라미터 민감도
Fig. 5 Parameter sensitivity of Voltage model

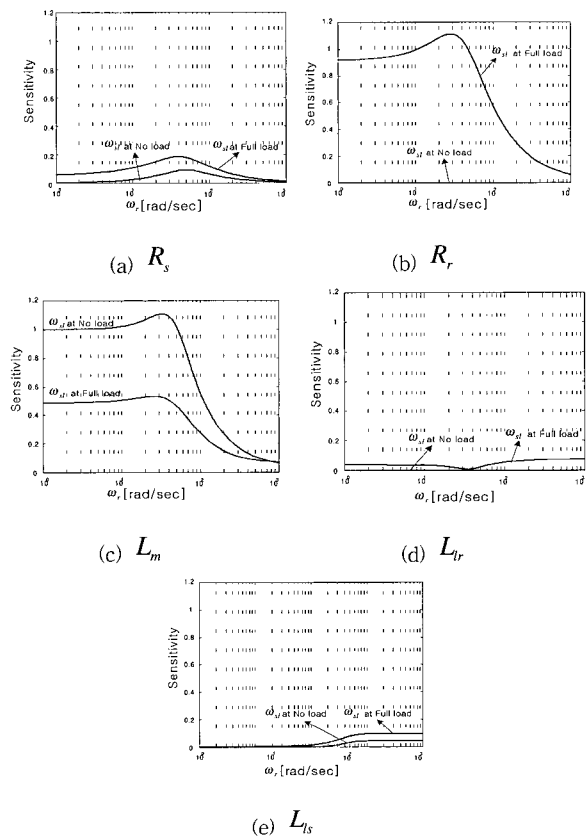


그림 6 고티나스 모델의 파라미터 민감도
Fig. 6 Parameter sensitivity of Improved Gopinath model

그림 6은 고티나스 모델에서의 파라미터 민감도이다. 고티나스 모델은 저속에서는 전류모델을 사용하고 고속에서는 전압모델을 사용하므로 저속에서는 민감도가 슬립의 함수로 나타나고, 고속에서는 슬립과 속도의 함수로 나타난다. 회전자 저항과 자화 인덕턴스에 대한 민감도에서 저속과 고속의 경계부분인 교차각 주파수 부근에서 오버슈트가 발생하는데 이는 주파수 응답함수에 위상항이 포함되어 있기 때문이다.

그림 7은 개선된 고티나스 모델에서의 파라미터 민감도이다. 개선된 고티나스 모델은 고티나스 모델의 위상변화를 식 (9)의 α 를 적절히 보상함으로써 회전자 저항과 자화 인덕턴스의 민감도에서 교차각 주파수 부근에서의 오버슈트가 발생하지 않는다.

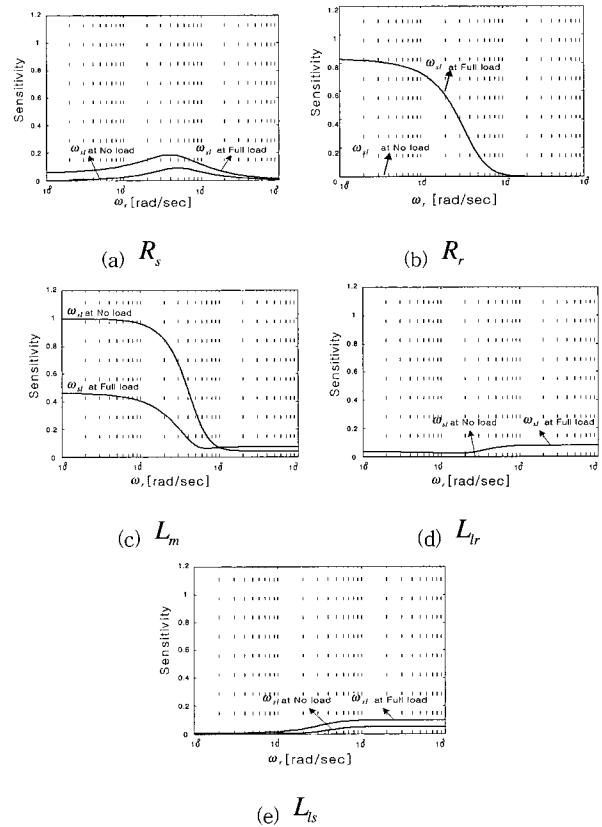


그림 7 개선된 고티나스 모델의 파라미터 민감도
Fig. 7 Parameter sensitivity of Modified Improved Gopinath model

4.2 실험 결과

시뮬레이션을 통해서 구한 파라미터 민감도의 타당성을 확인하기 위하여 실험을 수행하였다. 그림 8은 실험에 사용된 직접벡터제어시스템의 블록도이다.

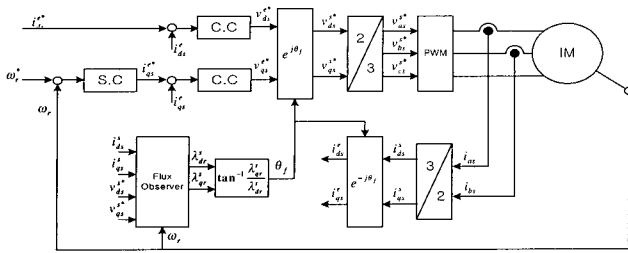


그림 8 직접벡터제어시스템의 블록도
Fig. 8 Block diagram of direct vector control system

전동기상수 중 시뮬레이션을 통해 변동에 의한 영향이 가장 크게 나타난 L_m 과 R_r 에 대하여 실험을 수행하였다. 본 논문에서는 전동기 상수의 정확성에 대한 신뢰도를 높이기 위해서 반복적인 실험을 통해서 정상상태에서의 전동기 상수를 추정하였다. 실험에서는 시뮬레이션과 동일하게 L_m 과 R_r 에 대해서 20%의 변동을 고려하였다. 실험에서는 추정자속의 크기의 오차만을 고려하여 측정하였다. L_m 의 경우에는 그림 6에서 알 수 있듯이 부하가 감소할수록 민감도가 증가하며, 무부하시에는 민감도가 1로 나타나고 있으므로 민감도가 가장 큰 무부하의 경우로 실험을 수행하였고, R_r 의 경우에는 증가할수록 민감도가 증가하므로 50% 부하의 경우를 고려하여 실험을 수행하였다.

그림 9는 L_m 이 20% 변동되었을 경우의 추정자속 오차이다. 그림 4의 시뮬레이션 결과 무부하시 전류모델의 L_m 에 대한 민감도가 1로 나타나므로 L_m 의 20% 변동에 대하여 추정자속도 20%의 오차를 지닐 수 있다. 다른 두 모델의 경우도 마찬가지로 민감도에 비례하는 오차가 발생함을 확인 할 수 있다.

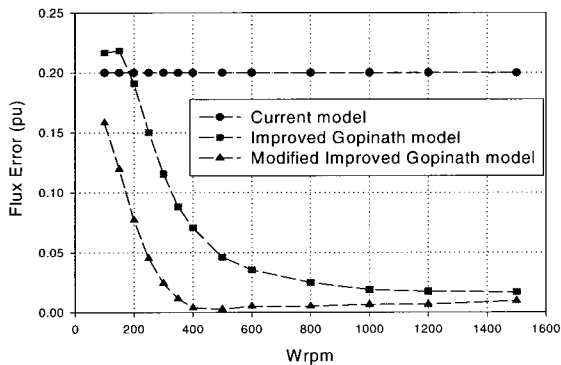


그림 9 L_m 이 20% 변동되었을 경우의 추정자속 오차
Fig. 9 Estimated flux error with 20% variation of L_m

그림 10은 R_r 의 20% 변동으로 인한 추정자속의 오차이다. 그림 4의 시뮬레이션 결과 50% 부하시에 전류모델의 R_r 에 대한 민감도가 0.5정도로 나타나고 있으므로 R_r 의 20% 변동에 대해서 자속의 오차가 10% 정도의 오차를 보임을 알 수 있고, 다른 두 모델의 경우에도 민감도에 비례하는 오차가 발생하고 있다. 그림 9와 그림 10은 시뮬레이션으로 구한 파라미터 민감도와 동일한 경향을 나타낸다.

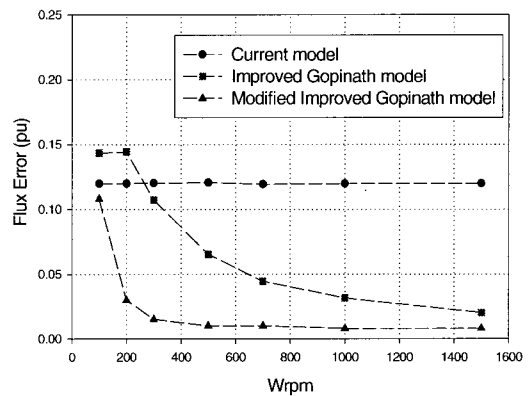


그림 10 R_r 이 20%변동했을 경우의 추정자속 오차 (50% 부하시)
Fig. 10 Estimated flux error with 20% variation of R_r (with 50% load)

5. 결 론

유도전동기의 직접벡터제어에 사용되는 회전자 자속 관측기들은 자속추정시에 전동기 상수들을 포함하는 계산식을 사용한다. 전압과 전류를 이용하여 자속을 추정하는 경우 전동기 상수들의 변동으로 인하여 회전자 자속의 크기와 위상이 변한다. 이로 인해 회전자 자속에는 오차가 수반되고 오차가 수반된 자속을 벡터제어에 사용하게 되면 유도전동기 구동시스템의 특성저하를 발생시킨다. 그러므로 본 논문에서는 이러한 전동기 상수들의 변동에 의한 자속관측기의 추정오차를 확인하기 위해 파라미터 민감도를 이용한 해석방법을 제시하고 시뮬레이션을 통해 자속관측기들의 파라미터 민감도를 구하였고, 실험을 통해 그 타당성을 확인하였다. 파라미터 민감도를 살펴보면 자속추정시에 각각의 전동기 상수들의 변동이 추정자속 오차에 주는 영향을 쉽게 확인 할 수 있다. 제안한 해석방법은 다른 자속관측기에 적용가능하며 이 해석방법을 기초로 자속관측기의 설계에 응용이 기대된다.

이 논문은 2001년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음. (KRF-2001-003-E00101)

참 고 문 헌

- [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] Patric L. Jansen and Robert D. Lorentz, "A Physically Insightful Approach to the Design and Accuracy Assessment of Flux Observers for field Oriented Induction Machine Drives", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 30, no. 1, pp. 101~110, Jan./Feb. 1994.
- [3] P.L. Jansen, R.D. Lorenz, and D.W. Novotny, "Observer-Based Direct Field Orientation: Analysis and Comparison of Alternative Methods", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 30, no. 4, pp. 945~953, July/August 1994.
- [4] Jang-Hwan Kim, Jong-Woo Choi, and Seung-Ki Sul, "Novel Rotor Flux Observer Characteristic Function in Complex Vector Space for Field Oriented Induction Motor Drives", APEC 2001. 6th Annual IEEE , Vol. 1, pp. 615~621, 2001.

저 자 소 개



박용환(朴龍煥)

1972년 4월 23일생. 1998년 경북대 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.



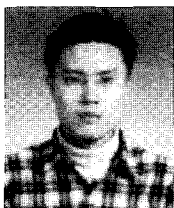
김흥근(金興根)

1956년 4월 24일생. 1980년 서울대 전기공학과 졸업. 1982년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 경북대 전자전기공학부 교수. 당 학회 편집이사.



최종우(崔鐘宇)

1969년 2월 25일생. 1991년 서울대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 경북대학교 전자전기공학부 조교수. 당 학회 학술위원.



남현택(南炫宅)

1974년 10월 16일생. 2000년 경북대 전자전기공학부 졸업. 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 LG-Philips. LCD 연구원.