

## 고정자 자속을 기반으로 한 유도전동기의 새로운 직접 토크 제어

朴 峻 賢\*, 鄭 鍾 鎭, 崔 鍾 宇, 金 興 根, 魯 義 哲, 全 泰 園

### A Novel Direct Torque Control of Induction Machines based on Stator Flux

Jun-Hyun Park, Jong-Jin Jung, Jong-Woo Choi, Heung-Geun Kim,  
Eui-Chel Nho, and Tae-Won Chun

#### 요 약

유도전동기의 직접 토크 제어방식은 구조가 간단하여 구현이 용이하고, 빠른 토크 응답성을 갖는 것을 특징으로 견인용 유도전동기의 구동시스템 등에 그 응용분야를 넓혀가고 있다. 그러나 히스테리시스 제어기를 사용하여 출력전압을 결정하는 기존의 직접 토크 제어방식에서는 인버터의 스위칭 주파수가 히스테리시스 밴드 폭과 운전조건에 따라 가변하고 토크맥동이 발생하는 문제점이 있다. 따라서 본 논문에서는 인버터의 스위칭 주파수를 일정하게 유지하고 저속 및 고속 운전영역에서 전동기의 토크 및 고정자 전류 맥동을 저감하기 위한 목적으로 고정자 자속 제어개념과 공간전압벡터 PWM에 의한 새로운 직접 토크 제어방식을 제안하였다. 시뮬레이션과 실험을 통해 제안한 알고리즘의 타당성을 입증하였다.

#### ABSTRACT

The direct torque control(DTC) of induction machines has the advantages of a simple control scheme and a very quick and robust torque response and its application is extended in the traction field. However, some drawbacks of the conventional DTC strategy using a hysteresis controller are the relatively large torque ripple in the steady state and the variation of switching frequency according to the amplitude of hysteresis bands and the motor operating conditions. In this paper, a novel direct torque control scheme of induction machines based on stator flux control and Space Vector Modulation is proposed to acquire the advantage of a fixed switching period and the minimization of the torque and stator current ripple in a wide speed range. The effect of proposed method has been proven by simulations and experiments.

**Key Words** : Direct Torque Control, Stator Flux Control, Torque Ripple Reduction

### 1. 서 론

유도전동기의 직접 토크 제어방식은 제어 알고리즘이 간단하여 구현이 용이하고, 빠른 토크 응답성을 갖

는 것을 특징으로 하고 있다<sup>[1][2]</sup>. 그러나 히스테리시스 제어기를 사용하여 출력전압을 결정하는 직접 토크 제어방식의 경우 스위칭 주파수가 운전속도 및 부하조건에 따라 2배 이상 가변하여 고속운전영역에서 전동기의 토크 맥동이 발생하는 문제점이 있다.

본 논문은 제어를 단순화하여 전류제어기, 토크제어기 및 자속제어용 PI제어기 등을 모두 생략하여 직접 토크 제어방식의 가장 큰 장점인 과도상태에서의 빠른 토크 응답성을 유지하고, 공간전압벡터 PWM방식을 이용해 인버터의 스위칭 주파수를 일정하게 유지

\*(주)메트로닉스 기술연구소 주임연구원

E-mail : hyungier@metronix.co.kr

접수일자 : 2002. 2.14

1차심사요청일 : 2002. 2.18 2차심사요청일 : 2002. 4.22

심사완료일 : 2002. 5.28

하여 정상상태에서의 토크 맥동을 최소화하도록 제어 하는 새로운 제어 알고리즘을 제안하였으며, 그 타당 성을 시뮬레이션과 실험을 통해 검증하였다.

## 2. 제안된 직접 토크 제어 방식의 구현

그림 1은 제안된 직접 토크 제어 방식의 제어 블록 도이다. 제어블록은 크게 속도 제어기, 자속관측기, 자속지령 연산기, 비교기, 공간 전압벡터 변조기 등으로 구성되어 있다. 제안된 제어 방식은 제어를 단순화 하여 전류제어기, 토크제어기 및 자속제어용 PI제어기 등을 모두 생략하여 직접 토크 제어방식의 가장 큰 장점인 과도상태에서의 빠른 토크 응답성을 유지하고, 공간전압벡터 PWM 방식을 이용해 인버터의 스위칭 주파수를 일정하게 유지하여 정상상태에서의 토크 리플을 최소화하도록 하였다

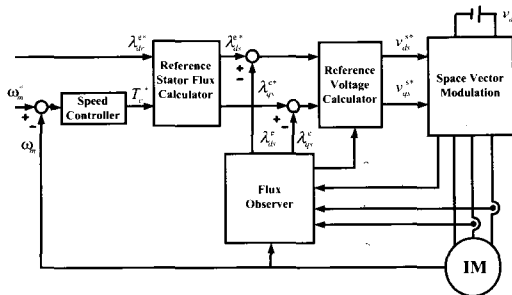


그림 1 제안된 직접 토크 제어 알고리즘의 제어기 구성도  
Fig. 1 The control block diagram of the proposed direct torque control

### 2.1 유도전동기의 모델링

일반 회전 좌표계에서의 유도전동기 등가회로는 그림 2와 같으며, 고정자측 및 회전자측 전압, 전류 방정식은 식(1)~(4)와 같다.

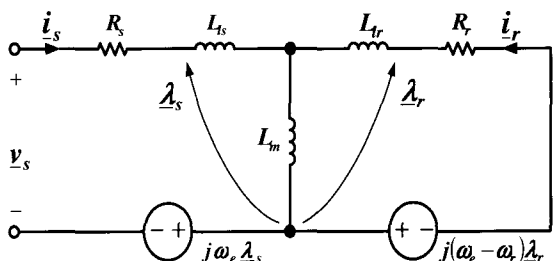


그림 2 일반 회전 좌표계에 대한 유도전동기의 등가회로  
Fig. 2 Equivalent circuit of Induction Machine in the general rotating reference frame

$$v_s = R_s i_s + p \lambda_s + j \omega_e \lambda_s \quad (1)$$

$$0 = R_r i_r + p \lambda_r + j(\omega_e - \omega_r) \lambda_r \quad (2)$$

$$\lambda_s = L_s i_s + L_m i_r \quad (3)$$

$$\lambda_r = L_r i_r + L_m i_s \quad (4)$$

여기서,  $p$ 는 미분연산자,  $\omega_e$ 는 회전좌표계 각속도,  $\omega_r$ 는 회전자 속도를 나타낸다.

전동기의 발생토크는 식 (5)와 같이 고정자 자속  $\lambda_s$  과 회전자 자속  $\lambda_r$ 의 방정식으로 표시 할 수 있다.

$$\begin{aligned} T_e &= \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \text{Im}[\lambda_r^* \lambda_s] \\ &= \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} |\lambda_r| |\lambda_s| \sin \eta \\ &= \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} (\lambda_{dr} \lambda_{qs} - \lambda_{qr} \lambda_{ds}) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서  $P$ 는 전동기의 극수, \*는 켈레 복소수,  $\text{Im}$ 는 허수부분,  $\eta$ 는 고정자 자속각  $\rho_s$ 와 회전자 자속각  $\rho_r$ 간의 사이각을,  $\sigma$ 는 누설자속계수로서 다음과 같다.

$$\sigma = \left(1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}\right) \quad (6)$$

식 (5)와 그림 3으로부터 회전자 자속 기준 좌표계에서 q축 고정자 자속 성분  $\lambda_{qs}^e$ 은 토크발생에 관계하

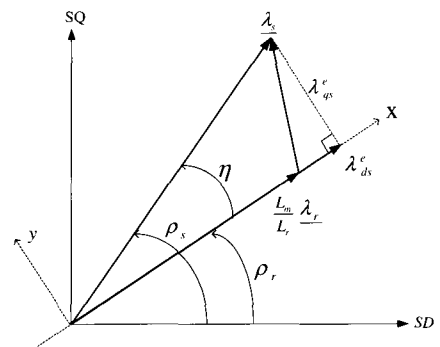


그림 3 회전자 자속과 고정자 자속의 벡터도  
Fig. 3 Rotor and stator Flux-linkage Space Vector Diagram

며 ( $|\lambda_s| \times \sin \eta = \lambda_{qs}^e$ ), 회전자 자속  $\lambda_{dr}^e$  과 d축 고정자 자속  $\lambda_{ds}^e$  는 동일축상에 존재하여 자속발생에 관여한다. 따라서, 회전자 자속은 d축 고정자 자속의 크기에 의해 제어되며, 토크는 q축 고정자 자속에 의해 제어할 수 있다.

**2.2 자속 추정기**

고정자 좌표계에서 고정자 자속 및 회전자 자속은 유도전동기의 고정자측 전압과 전류로부터, d축 고정자 자속  $\lambda_{ds}$  와 q축 고정자  $\lambda_{qs}$  를 추정할 수 있으며, 이 때 입력 전압은 직류링크 전압  $V_{dc}$  과 출력 스위칭 패턴으로부터 구할 수 있다. 일반적으로 자속추정은 역기전력이 큰 고속영역에서는 고정자 전압을 적분하여 구한 전압모델이 유리하고, 역기전력이 작은 저속영역에서는 회전자 회로를 이용한 전류모델을 사용하여 회전자 자속과 고정자 자속을 추정하는 것이 바람직하다. 본 논문에서는 Jansen에 의해 고안된 Improved Gopinath Model을 자속추정기로 사용하였으며, 그림 4는 자속추정기의 구성도를 나타내었다<sup>[3]</sup>.

회전자 자속각은 회전자 자속정보를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\theta_e = \tan^{-1} \frac{\lambda_{dr}^s}{\lambda_{ds}^s} \quad (7)$$

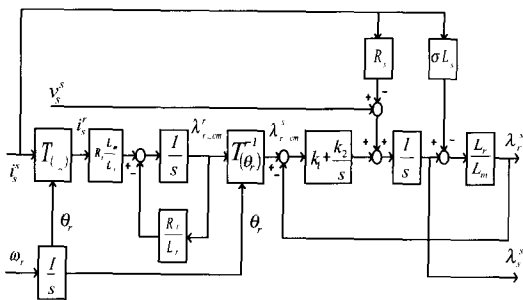


그림 4 Improved Gopinath Model 의 구성도  
Fig. 4 Closed loop stator flux observer based on Improved Gopinath Model

**2.3 자속지령 연산기**

회전자 자속 기준 좌표계에서 토크지령과 회전자 자속 지령으로부터 식 (5)를 이용하여, 고정자 q축 자속 지령  $\lambda_{qs}^{e*}$  를 유도해 내며 다음과 같다.

$$\lambda_{qs}^{e*} = \frac{2}{3} \frac{2}{P} \frac{\sigma L_s L_r}{L_m} \frac{T_e^*}{\lambda_{dr}^{e*}} \quad (8)$$

일정 토크 영역에서 회전자 자속  $\lambda_{dr}^e$  의 변화는 고정자 d축 자속  $\lambda_{ds}^e$  의 변화와 비례하며, d축 자속지령은  $\lambda_{ds}^{e*}$  은 다음과 같다.

$$\lambda_{ds}^{e*} = \frac{L_m}{L_r} \lambda_{dr}^{e*} + \sigma L_s i_{ds}^e = \frac{L_m}{L_r} \lambda_{dr}^{e*} + \frac{\sigma L_s}{L_m} (\tau_r p \lambda_{dr}^e + \lambda_{dr}^e) \quad (9)$$

**2.4 자속 비교기와 전압지령**

자속 지령기에서 구해진 고정자 자속지령  $\lambda_{ds}^{e*}$ ,  $\lambda_{qs}^{e*}$  과 자속 추정기에서 추정된 자속  $\lambda_{ds}^e$ ,  $\lambda_{qs}^e$  은 자속 비교기에서 비교되며 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta \lambda_{ds}^e &= \lambda_{ds}^{e*} - \lambda_{ds}^e \\ \Delta \lambda_{qs}^e &= \lambda_{qs}^{e*} - \lambda_{qs}^e \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 스위칭 시간  $T_s$  (스위칭 주파수의 반 주기)가 일정하다고 가정한다면, 고정자 d축과 q축의 전압지령은 식 (1)을 이용해 구할 수 있으며 다음과 같다.

$$\begin{aligned} v_{ds}^{e*} &= R_s i_{ds}^e + \frac{\Delta \lambda_{ds}^e}{T_s} - \omega_e \lambda_{qs}^{e*} \\ v_{qs}^{e*} &= R_s i_{qs}^e + \frac{\Delta \lambda_{qs}^e}{T_s} + \omega_e \lambda_{ds}^{e*} \end{aligned} \quad (11)$$

구해진 d축, q축 전압지령  $v_{ds}^{e*}$ ,  $v_{qs}^{e*}$  은 기준좌표계에 의하여, 정지 좌표계에서의 고정자 전압지령  $v_{ds}^{s*}$ ,  $v_{qs}^{s*}$  으로 변환되며, 변화식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} v_{ds}^{s*} &= v_{ds}^{e*} \cos \theta_e - v_{qs}^{e*} \sin \theta_e \\ v_{qs}^{s*} &= v_{ds}^{e*} \sin \theta_e + v_{qs}^{e*} \cos \theta_e \end{aligned} \quad (12)$$

**2.5 공간 전압벡터의 선정**

공간전압벡터 PWM에서 인버터의 스위칭상태는 주어진 전압지령  $v_{ds}^{s*}$ ,  $v_{qs}^{s*}$  으로부터 결정된다. 전압지령 으로부터 인버터의 스위칭 영역과 스위칭 시간을 계산하여 순시 고정자 전압 벡터를 결정한다<sup>[4]</sup>.

### 3. 시뮬레이션 및 실험

#### 3.1 시뮬레이션 결과

본 논문에서는 제안된 알고리즘의 타당성과 특성분석을 위해 ACSL(Advanced Continuous Simulation Language)을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 본 시뮬레이션에 사용된 유도전동기의 정수 및 정격은 표 1과 같다.

그림 5와 6은 기존의 직접토크 제어방식과 제안된 직접토크 제어방식의 특성을 보여주고 있다. 시뮬레이션 조건은 무부하로서 속도지령을 0[rpm]에서 1500[rpm]으로 스텝변화 하였을 때 속도 및 토크 응답 특성이다. 그림 5와 6을 비교한 결과 속도응답특성은 같으나 토크맥동이 현저히 감소함을 알 수 있다.

표 1 유도전동기의 정수 및 정격  
Table 1 Induction Machine Parameter

정격 용량	2.2 [kW]	$R_s$	3.2 [ $\Omega$ ]
정격 전압	380 [V]	$R_r$	1.8 [ $\Omega$ ]
정격 전류	5.1 [A]	$L_s$	0.2204 [mH]
정격 주파수	60 [Hz]	$L_r$	0.2204 [mH]
정격 속도	1750 [rpm]	$L_m$	0.211 [mH]
정격 토크	12.1 [Nm]	$J_m$	0.089 $kg \cdot m^2$
극 수	4	스위칭 주파수	10[kHz]

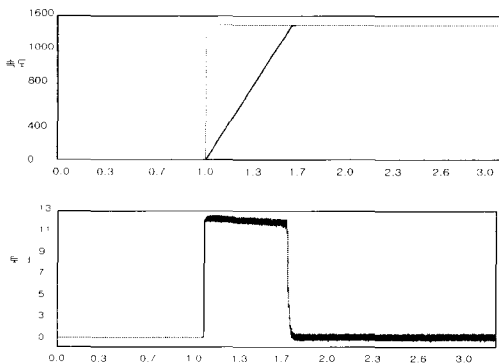


그림 5 기존의 직접토크 제어방식의 속도 및 토크 특성  
Fig. 5 Simulation Result from Conventional Direct Torque Control

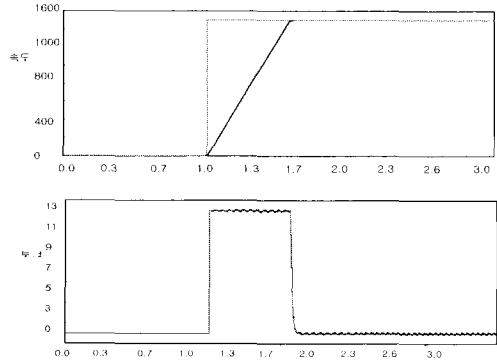


그림 6 제안된 직접토크 제어방식의 속도 및 토크특성  
Fig. 6 Simulation Result from Proposed Direct Torque Control

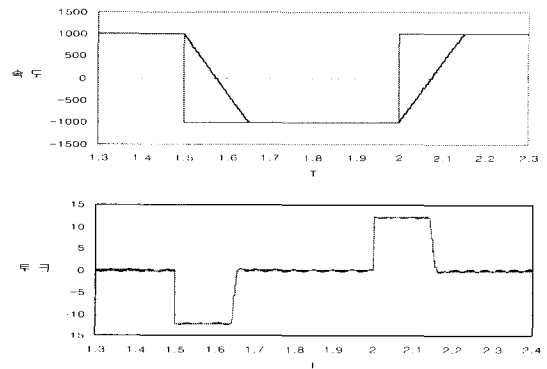


그림 7 속도지령의 변화에 따른 속도 및 토크 응답특성  
Fig. 7 The speed and Torque response for speed command changes

그림 7은 제안된 직접토크 제어방식의 정·역회전 특성을 파악하기 위해 무부하에서 속도지령을 1초에서 1000[rpm], 2초에서 -1000[rpm], 다시 3.5초에서 1000[rpm]으로 변화하였을 경우의 응답 특성이다.

그림 7은 주어지는 속도 지령에 실제 속도가 충실히 추종함을 볼 수 있다.

#### 3.2 실험 결과

본 논문에서 제안된 시스템의 타당성을 보이기 위해 DSP320C31을 사용하여 그림 1에서 보인 직접 토크 제어 시스템을 구성하여 실험하였다. 본 실험에 사용된 유도전동기의 정수 및 정격은 시뮬레이션에서 사용된 표 1과 같으며, 전동기의 정격토크는 12.1[Nm], 스위칭 주파수는 10[kHz]로 하였다.

그림 8은 제안된 직접 토크 제어 방식이 갖는 기본적인 속도 및 토크 제어 특성을 나타낸다. 실험조건은

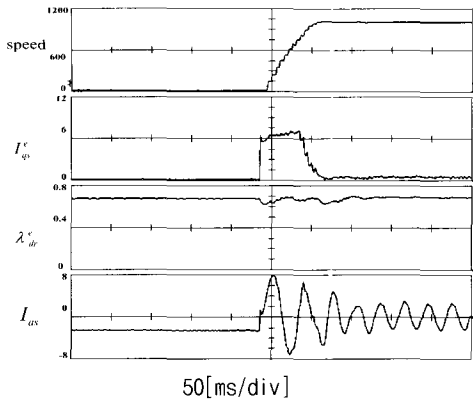


그림 8 제안된 직접 토크 제어 방식의 운전특성  
Fig. 8 Response with the proposed DTC method

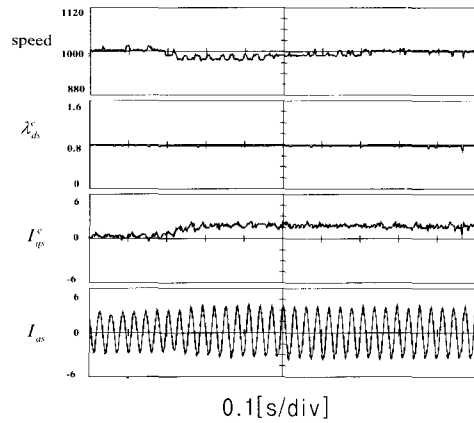


그림 10 부하토크 변화에 따른 토크 및 속도 응답 특성  
Fig. 10 The Speed and Torque responses for Load changes

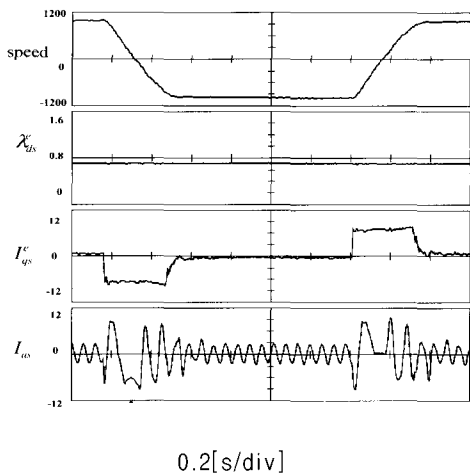


그림 9 속도지령 변화에 따른 토크 및 속도 응답특성  
Fig. 9 The speed and Torque response for speed command changes

무부하에서 속도지령을 0[rpm]에서 1000[rpm]으로 스텝 인가하였을 때 응답특성이다.

그림 9은 제안된 제어기의 정·역회전 특성을 파악하기 위해 무부하에서 속도지령을 1000[rpm], -1000[rpm], 다시 1000[rpm]으로 변화하였을 경우의 응답 특성이다.

그림에서 주어지는 속도지령에 실제속도가 충실히 추종함을 볼 수 있으며, 기존의 직접 토크 제어에 비해 토크 리플이 현저히 개선되었음을 알 수 있다.

그림 10은 전동기를 1000[rpm]의 속도로 구동하고 있는 경우, 50% 정격부하 토크를 인가하였을 때 응답 특성이다.

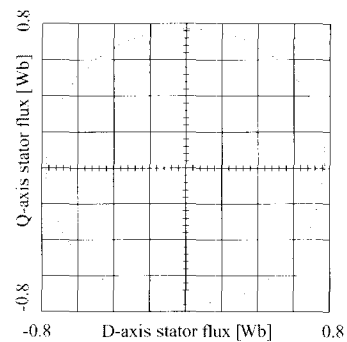


그림 11 제안된 방식의 자속제어 특성  
Fig. 11 Stator flux control performance with the proposed method

그림 11은 본 논문에서 제안한 직접 토크 제어 방식을 사용할 경우의 고정자 자속의 궤적이다. 제안한 방법에서의 고정자 자속 제어의 특성은 양호함을 확인할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 논문은 직접 토크 제어 방식으로서 전압, 전류, 속도의 정보로부터 스위칭 주기동안의 토크와 자속의 변화량을 계산하고, 다음 주기의 예상되는 토크지령과 자속지령으로부터 고정자 전압을 계산하였다. 공간 전압벡터 PWM방식을 이용하여 스위칭 주파수를 일정하게 하며, 매 스위칭주기마다 인버터의 스위칭 상태를 결정하도록 하였다. 제안된 직접 토크 제어 방식은 제어 알고리즘이 간단하며, 기존의 직접 토크 제어 방식

이 갖는 빠른 토크 응답성을 유지하고, 일정 스위칭 주파수를 유지하여 전동기의 토크 리플을 최소화하도록 제어하는 장점을 가지고 있다. 또한 제안된 알고리즘은 실험을 통하여 구현하여 가능성과 유용성을 확인하였다.

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초 전력공학 공동연구소 주관으로 수행되었습니다.

### 참 고 문 헌

- [1] I. Takahashi and T. Noguchi, "A New Quick-Response and High-Efficiency Control Strategy of an Induction Motor", IEEE Trans. Ind Appl, Vol. IA-22, No. 5, pp. 820~827, Sept. 1986.
- [2] M. Depenbrock, "Direct Self-Control(DSC) of Inverter-Fed Induction Machine", IEEE Trans. Ind Electron, vol. 3, No. 4, pp. 420~427, 1988.
- [3] Patrick L. Jansen, and Robert D. Loren, "Observer Based Direct Field Orientation: Analysis and Compensation of Alternative Methods", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 30, No. 4, pp. 945~953, Jul./Aug. 1994.
- [4] Thomas G. Habetler, "Direct Torque Control of Induction Machines Using Space Vector Modulation", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 28, No. 5, pp. 1045~1052, Sept. 1992.
- [5] J.K. Kang and S.K. Sul, "New direct torque control of Induction motor for minimum torque ripple and constant switching frequency", IEEE Trans. Vol. 35, pp. 1076~1082, Sept./Oct. 1999.

### 저 자 소 개



**박준현(朴峻賢)**

1972년 2월 5일생. 1996년 경일대 전기공학과 졸업. 2002년 경북대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 (주)메트로닉스 기술연구소 주임연구원.



**정종진(鄭鍾鎭)**

1966년 6월 1일생. 1992년 경북대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 성덕대학 정보통신과 전임강사.



**최종우(崔鐘宇)**

1969년 2월 25일생. 1991년 서울대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 경북대 전자전기공학부 조교수.



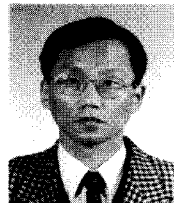
**김흥근(金興根)**

1954년 4월 24일생. 1980년 서울대 전기공학과 졸업. 1982년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 경북대 전자전기공학부 교수. 당 학회 편집이사.



**노의철(魯義哲)**

1960년 8월 2일생. 1984년 서울대 전기공학과 졸업. 1986년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원 졸업(공학). 1997년~1998년 미국 Univ. of Wisconsin-Madison 방문교수. 현재 부경대 전기제어계측공학부 조교수. 당 학회 편집위원.



**전태원(全泰園)**

1959년 1월 30일생. 1981년 부산대 전기공학과 졸업. 1983년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 울산대 전기전자 및 자동화공학부 교수.