

## dSPACE 시스템을 이용한 직류 전동기 구동 시스템의 전류 및 속도 제어기 설계

지준근<sup>1\*</sup>, 이용석<sup>2</sup>

### Design of Current and Speed Controller for DC Motor Drive System Using dSPACE System

Jun-Keun Ji<sup>1\*</sup> and Yong-Seok Lee<sup>2</sup>

**요약** 본 논문에서는 직류전동기 구동 시스템의 전류 및 속도 제어를 위하여 dSPACE 1104 시스템을 이용하여 전류 궤환을 갖는 속도 제어시스템을 구현하였다. 전류 및 속도 제어기의 설계는 MATLAB/SIMULINK 프로그램을 사용하여 간편하고 손쉽게 구현하였으며, 직류전동기 속도제어의 안정성과 응답성을 향상시킬 수 있었다. 직류전동기의 전류제어 및 속도제어는 DSP 보드와 dSPACE 시스템을 사용하여 수행하였으며, 속도의 궤환은 속도센서인 엔코더 펄스를 이용해서 QEP로 처리하였고, 전류의 궤환은 전류센서인 홀센서를 통해서 A/D 변환기로 처리하였다. 제어기들은 각각 PI 전류제어기 및 PI 속도제어기를 설계하였고 시뮬레이션과 실험을 통해서 전류 및 속도 응답을 확인하였다.

**Abstract** In this paper, design of current and speed controller for DC motor drive system using dSPACE 1104 system is introduced. Current and speed controller is designed and implemented using MATLAB/SIMULINK program simply and easily, and speed control response of DC motor can be advanced. Current and speed control of DC motor is carried in DSP control board using dSPACE system. Speed feedback is processed through QEP using pulse encoder as speed sensor, and current feedback is processed through A/D converter using hall sensor as current sensor. Controller is designed to PI current controller and PI speed controller. Current and speed response is verified through simulations and experiments.

**Key Words** : dSPACE 시스템, 직류 전동기, 전류 제어기, 속도 제어기

## 1. 서론

오늘날 메카트로닉스의 기초로서 가장 중요한 전동기 제어기술은 마이크로프로세서를 이용한 디지털 제어방식이다. 게다가 전동기제어는 일반적으로 먼저 Simulation을 통해 제어기를 설계한 후, 다시 C나 assembly 언어로 프로그램을 작성하여 구현하였다. 그러나 마이크로프로세서를 이용하여 제어 할 경우 프로세서를 알아야 제어기를 설계할 수 있고 제어기 프로그램 작성시 텍스트 방식으로 구현하기 때문에 제어기의 오류나 프로그램 수정

작업등으로 인하여 오랜 시간에 걸쳐 제어기를 완성하게 된다.[1]

본 연구에서는 dSPACE 1104 시스템과 Matlab/Simulink를 이용하여 텍스트 방식이 아닌 그래픽 방식으로 제어기를 설계하고 Simulation을 한 다음 직접 실시간 프로그램으로 자동 변환하여 제어기의 응답을 테스트함으로써 전동기의 제어 시스템 개발을 짧은 시간 안에 매우 편리하게 구현할 수 있음을 소개하고자 한다.

## 2. 제어기 설계

### 2.1 PI 전류제어기 설계

그림1은 직류전동기 구동을 위한 전류제어부이다.

<sup>1</sup>순천향대학교 정보기술공학부

<sup>2</sup>순천향대학교 대학원 정보제어공학과

\*교신저자 : 지준근(jkji@sch.ac.kr)

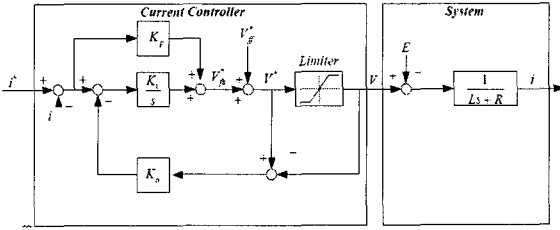


그림 1. 전류제어부

$$\text{전압지령} : V^* = V_{fb}^* + V_{ff}^* \quad (2.1)$$

$$\text{전향(Feed-forward)성분} : V_{ff}^* = E \quad (2.2)$$

궤환(Feedback) 성분 :

$$V_{fb}^* = K_p(i^* - i) + K_i \int \{(i^* - i) + K_a(V^* - V)\} \quad (2.3)$$

여기서,  $K_p$  : 비례이득,  $K_i$  : 적분이득,  
 $K_a$  : Anti-windup이득( $K_a=1/K_p$ )이다.

전류제어부의 페루프 전달함수는 다음과 같다.

$$\frac{I(s)}{I^*(s)} = \frac{\frac{K_p}{L}s + \frac{K_i}{L}}{s^2 + \frac{K_p + R}{L}s + \frac{K_i}{L}} \quad (2.4)$$

제어기 이득을  $K_p = L\omega_{cc}$ ,  $K_i = R\omega_{cc}$ 로 하면, 출력전류와 전류지령치 사이의 전달함수가 다음과 같은 1차 지연요소와 같이 된다.

$$\frac{I(s)}{I^*(s)} = \frac{\omega_{cc}}{s + \omega_{cc}} \quad (2.5)$$

여기서,  $\omega_{cc}$ 는 전류제어기의 주파수대역(Bandwidth)이다.[3]

## 2.2 PI 속도제어기 설계

전류제어계를 1차 시지연요소로 고려하고,

$$G_{cc}(s) = \frac{\omega_{cc}}{s + \omega_{cc}} \quad (2.6)$$

속도제어기는 비례적분(PI) 제어기를 사용하면,

$$G_s(s) = K_{sp} + \frac{K_{si}}{s} \quad (2.7)$$

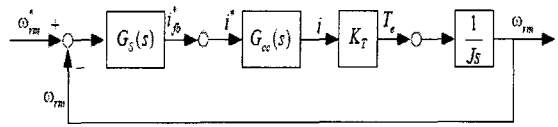


그림 2. 속도제어부

그림 2는 직류전동기 구동을 위한 속도제어부이다. 속도제어부의 개루프 전달함수는 다음과 같다.

$$G_{sc}^o(s) = \left\{ K_{sp} + \frac{K_{si}}{s} \right\} \frac{\omega_{cc}}{s + \omega_{cc}} \frac{K_T}{J s} \quad (2.8)$$

여기서,  $K_{sp}$  : 비례이득,  $K_{si}$  : 적분이득,  
 $K_T$  : 토크상수,  $J$  : 전동기의 관성이다.

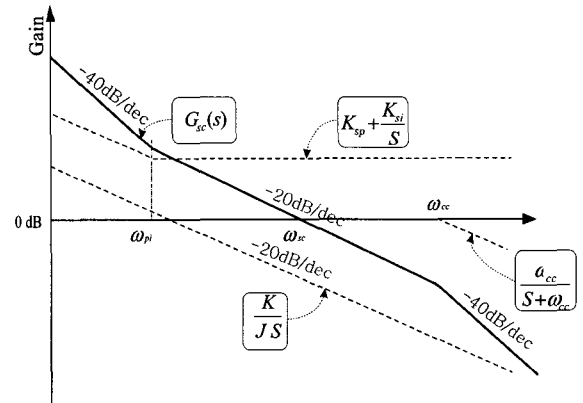


그림 3. PI속도제어계의 개루프 주파수 응답 특성

교차각 주파수  $\omega_{sc}$ 부근에서는,

$$\text{전류제어부} : G_{cc}(s) = \frac{\omega_{cc}}{s + \omega_{cc}} \approx 1 \quad (2.9)$$

$$\text{속도제어기} : G_s(s) = K_{sp} + \frac{K_{si}}{s} \approx K_{sp} \quad (2.10)$$

$\omega_{pi} = K_{si}/K_{sp}$  : PI 절점 각주파수( $\omega_{pi} \ll \omega_{sc}$ ) 라고 하면, 속도제어계의 개루프 전달함수는 다음과 같이 간략화할 수 있다.

$$G_{sc}^o(s) = \left\{ K_{sp} + \frac{K_{si}}{s} \right\} \frac{\omega_{cc}}{s + \omega_{cc}} \frac{K_T}{J s} \approx K_{sp} \frac{K_T}{J s} \quad (2.11)$$

$$\left| G_{sc}^o(j\omega_{sc}) \right| = 1, \omega_{sc} \approx K_{sp} \frac{K_T}{J} \quad (2.12)$$

결국 비례이득 :  $K_{sp} = \frac{J\omega_{sc}}{K_T}$ ,

적분이득 :  $K_{si} = K_{sp}\omega_{pi}$  이고,

$\frac{\omega_{sc}}{10} \leq \omega_{pi} \leq \frac{\omega_{sc}}{5}$  이다.[3]

### 3. 전체 시스템

#### 3.1 전체 시스템 구성도

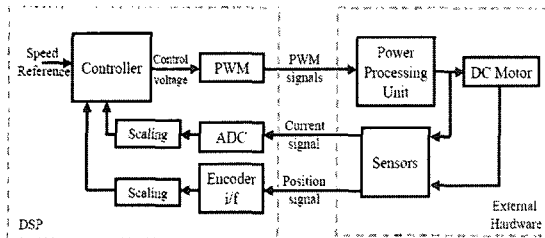


그림 4. 전체 시스템 구성도

그림 4의 전체 시스템은 제어부인 DSP 보드와 전력변환장치 및 모터로 이루어져 있다. DSP 보드에서 전류 및 속도제어기가 프로그램으로 설계되어 있으며 전류센서를 통해 ADC로 전동기 전류값을 받고, 모터의 엔코더 신호를 QEP로 받아 제어가 동작하여 최종출력은 PWM 신호로 내보낸다.[4]

#### 3.2 제어기 구성도

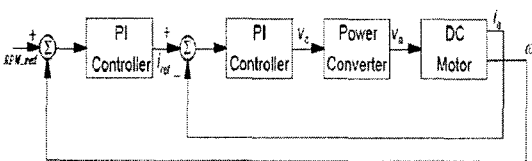


그림 5. 제어기 구성도

그림 5는 속도 및 전류제어기 구성도이며 바깥쪽이 속도제어기이고 안쪽이 전류제어기이다. 속도제어기 동작 타이밍을 전류제어기보다 1/10로 느리게 설정하여 전류제어기( $f_c=10\text{kHz}$ )가 10번 동작할 때 속도제어기( $f_s=1\text{kHz}$ )는 1번 동작하고 속도제어기와 전류제어기의 주파수대역은  $500\text{rad/s}$ ,  $20\text{rad/s}$  으로 설정하였다.

### 3.3 전력 변환 장치

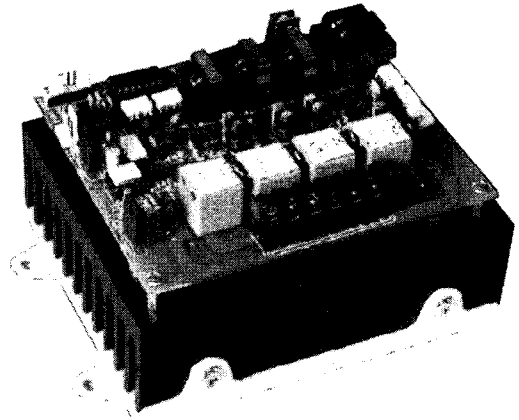


그림 6. 전력변환장치

그림 6은 실험에 사용한 전력변환장치이다. IPM 모듈을 사용하여 직류전동기 구동을 위한 단상인버터를 구성하였다.

### 4. 시뮬레이션 및 실험

#### 4.1 시뮬레이션

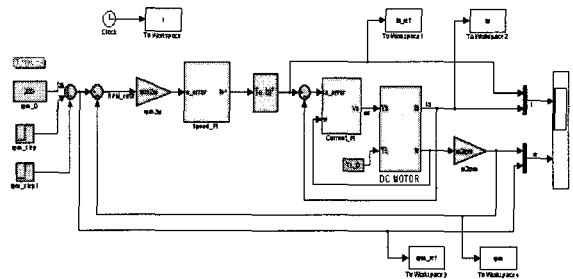


그림 7. 시뮬레이션 제어블록

그림 7은 시뮬레이션 제어블록이다. 시험을 하기 전에 먼저 실제 직류전동기를 모델링하여 시뮬레이션을 수행함으로써 실제 실험에서의 실수나 잘못된 제어기 설계등을 피하여 보다 안전한 실험을 할 수가 있었다.

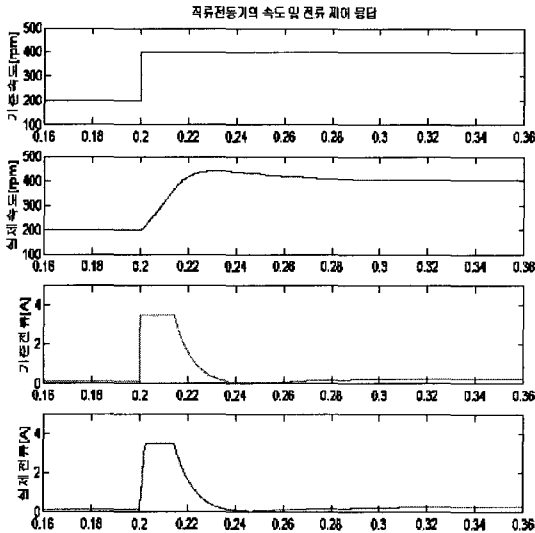


그림 8. 가속시 스텝응답(200→400RPM)

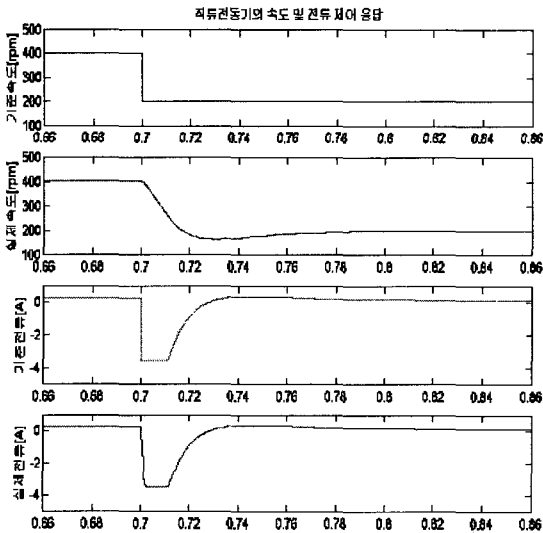


그림 9. 감속시 스텝응답(400→200RPM)

그림 8은 속도 200[RPM]에서 400[RPM]으로 가속시의 속도 전류파형을 나타내며, 그림 9는 속도 400[RPM]에서 200[RPM]으로 감속시의 속도 전류파형을 나타낸다. 전류제어기의 P Gain은  $L_a(94\text{mH}) \cdot \omega_{cc}(2\pi \cdot 500)$ , I Gain은  $R_a(5.5\Omega) \cdot \omega_{cc}(2\pi \cdot 500)$ 으로 설정하였고 속도제어기의 P Gain은  $J(0.003\text{kg} \cdot \text{m}^2) \cdot \omega_{sc}(2\pi \cdot 20)/K_T(0.8003\text{Nm/A})$ , I Gain은  $P_{\text{Gain}} \cdot \omega_{pi}(\omega_{sc}/7)$ 으로 설정하였다.

## 4.2 실험 장치 구성도

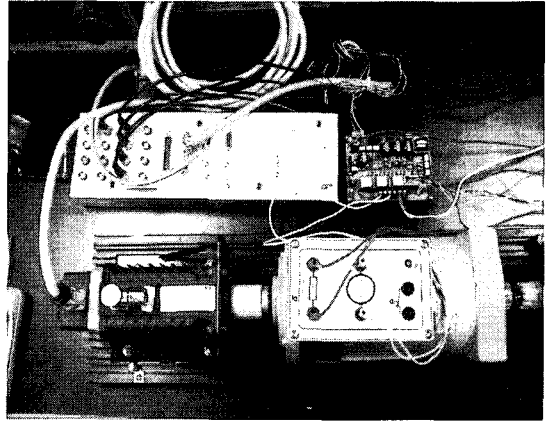


그림 10. 실제 장치 구성도

그림 10은 전동기, 전력변환장치와 dSPACE 1104 시스템을 나타낸다. 본 연구에서 사용한 전동기는 Leroy Somer MG set의 컨버터용 타여자 직류 전동기이다. 속도 센서인 엔코더가 직류전동기 옆에 있는 BLDC에 달려 있기 때문에 커플링으로 서로 연결하여 사용하였다. 표1은 사용된 직류전동기의 사양을 나타낸다.

표 1. 직류 전동기 상수

Amature resistance ( Ra )	5.5	$\Omega$
Amature inductance ( La )	94	mH
Moment of inertia of the rotor ( J )	0.003	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
Back emf factor ( K <sub>E</sub> )	0.9597	V/ $\omega$
Motor torque factor ( K <sub>T</sub> )	0.8003	Nm/A

## 4.3 실험

그림 11은 실험을 위한 직류전동기 속도 및 전류제어기 블록을 나타내며 기본주기는 전류제어주기로서 ( $T_{cc}=100\mu\text{s}$ )로 동작하도록 설정되어 있다. 하지만 속도 제어기는 이보다 1/10 정도 느려야 하기 때문에 인터럽트 블록을 만들어 전류 제어기와 서로 다른 주파수( $T_{sc}=1\text{ms}$ )로 동작하도록 설계하였다. 제어기가 제대로 동작하는지 확인하기 위해 속도지령, 실제속도, 전류지령, 실제 전류의 값들을 각각 DAC로 출력하였고, 각각의 실제 값들과 DAC 출력전압을 서로 맞추어주기 위해서 DAC 앞단에 적절한 Gain을 곱하여 속도는 0.01V/RPM 이고 전류는 1V/A가 되도록 설정하였다. PI전류제어기와 PI속도제어기 설계이론을 바탕으로 제어기의 Gain값들을 설정하여 시뮬레이션을 하고 그 제어기를 실험에 사용하였다.

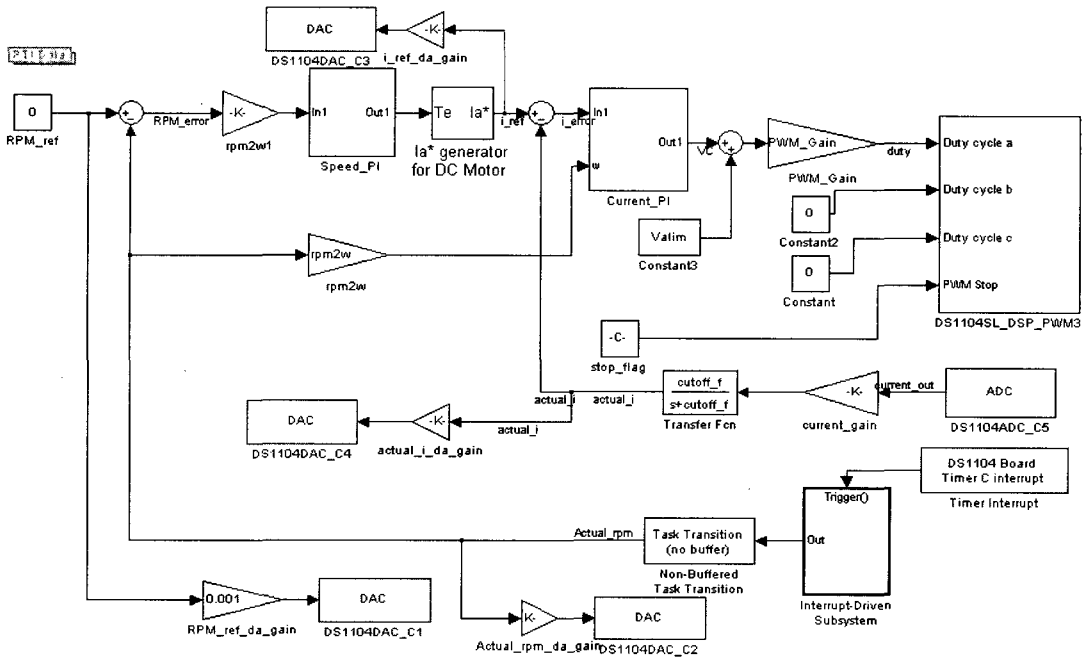


그림 11. 직류전동기 속도 및 전류제어기 제어블록

그러나 그림 10에서 보듯이 속도센서인 엔코더가 직류전동기 옆에 있는 BLDC에 달려 있기 때문에 커플링으로 서로 연결하여 사용하는 과정에서 약간의 백래시 현상이 발생하여 스텝명령의 20ms이후 부근에서 진동이 생겨났다. 명령추종을 빠르게 하기 위하여 제어주파수대역을 높이면 축진동 현상이 심하게 발생하기 때문에 주파수대역을 시뮬레이션에서의 값보다 1/5로 줄여서 실험을 하였다.

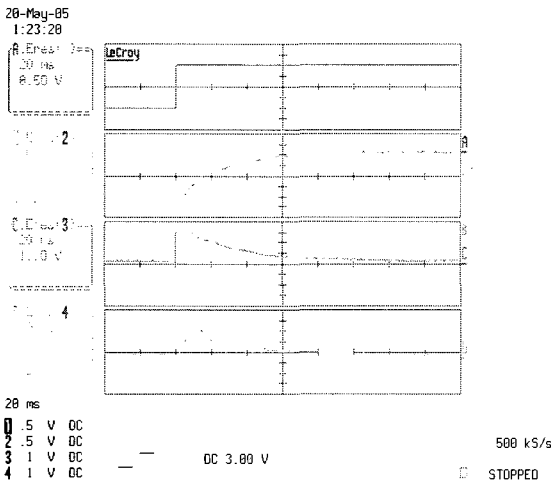


그림 12. 가속시 스텝응답(200→400RPM)

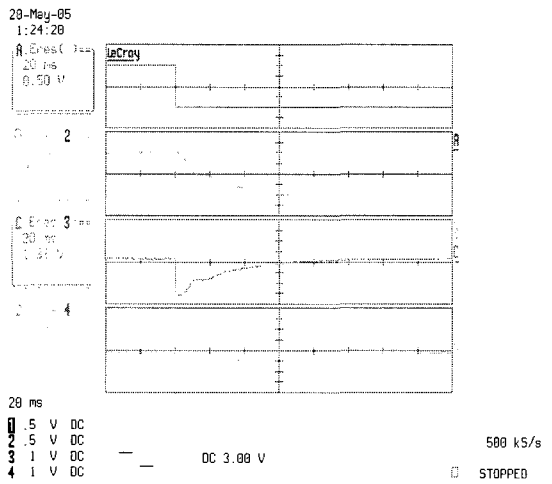


그림 13. 감속시 스텝응답(400→200RPM)

그림 12와 13은 전동기의 속도 가감속시 실험결과와 파형이다. 각 채널은 1 : 속도지령, 2 : 실제속도, 3 : 전류지령, 4 : 실제전류를 나타낸다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 dSPACE 1104 시스템과 MATLAB/

SIMULINK 프로그램을 사용하여 직류전동기의 속도 및 전류제어기를 구현하였으며, 일반적으로 많이 사용하는 PI제어기를 사용하여 속도스텝 명령시 속도 및 전류 응답을 살펴 보았다.

보통은 제어기 이득을 실험적으로 구하지만, 본 연구에서는 직류전동기와 각각의 제어기들의 전달함수를 구하여 해석적으로 제어기 이득을 구할 수 있었고, 또한 시뮬레이션을 통해 사전에 출력 결과를 알 수 있어서 실제 실험에 많은 도움이 되었다.

dSPACE 1104 시스템과 MATLAB/SIMULINK 프로그램을 이용할 경우 기존의 제어시스템 개발시 보다 제어기의 설계 및 구현이 매우 쉽고 응답 결과도 보기에 편하여 제어시스템 해석 및 설계에 관하여 쉽게 이해하고 단기간에 제어 시스템을 설계할 수 있었다.

## 참 고 문 헌

- [1] 지준근, 이동민, "고속설계시스템에 의한 AC 서보시스템의 속도관측기 및 속도제어기 설계", 한국산학기술학회논문지 제6권 제6호, pp. 1-4.
- [2] 최준동, DSP를 이용한 속도 및 전류 궤환을 갖는 직류전동기 제어, 순천향대학교 학사논문, 2002.
- [3] 설승기, "전기기기제어론" p.41-128, 2002
- [4] Amit Kumar Jain, "Hands-on Tutorial on Using Simulink in Modeling of Controlled Drives".

## 지 준 근(Jun-Keun Ji)

[정회원]



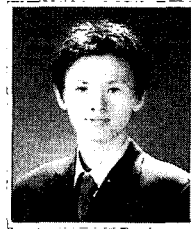
- 1986년 2월 : 서울대학교 전기공학 (공학사)
- 1988년 2월 : 서울대학교 대학원 전기공학과 (공학석사)
- 1994년 2월 : 서울대학교 대학원 전기공학과 (공학박사)
- 1994년 9월 ~ 현재 : 순천향대학교 정보기술공학부 교수

<관심분야>

전력전자, 전기기계, 전력변환, 전동기 제어, 전원장치, 전력품질제어, 모션제어, 제어응용

## 이 용 석(Yong-Seok Lee)

[준회원]



- 2006년 2월 : 순천향대학교 정보기술공학부 (공학사)
- 2006년 3월 ~ 현재 : 순천향대학교 대학원 전기공학과 석사과정 재학중

<관심분야>

전력전자, 전기기계, 전력변환, 전동기 제어