

논문 2007-44SC-4-4

# 단상 DC/AC 인버터 시스템의 부하변동을 고려한 외란 관측기 기반 제어기

( A Disturbance Observer-Based Robust Controller Against Load  
Variations in a Single Phase DC/AC Inverter System )

김 성 종\*, 손 영 익\*\*, 정 유 석\*

( Sung-Jong Kim, Young-Ik Son, and Yu-Seok Jeong )

## 요 약

본 논문에서는 광범위하게 적용되고 있는 단상 인버터 시스템에 대한 강인성을 향상시키기 위해 외란관측기 기반의 PI-제어기 설계 방법을 제안한다. 출력 단에 모터나 정류기와 같은 가변부하가 존재할 경우, 인버터의 출력 전압은 변동하기 쉬우며 바람직하지 않은 과도현상을 보일 수 있다. 본 논문에서는 가변부하에 의해 발생하는 출력 전압의 변화를 시스템의 외란에 의한 결과로 간주하여 부하 전류와 시스템의 불확실성에 의한 오차 (파라미터 변화나 잘못된 모델링과 같은)를 보상하는 외란관측기 기반 제어기를 설계한다. Matlab Simulink의 SimPowerSystem을 이용하여 단상 인버터 시스템에 대한 외란관측기 기반 제어기의 성능을 입증한다.

## Abstract

Output voltage waves of a DC/AC inverter system are likely to be distorted if variable loads e.g. motors or rectifiers exist in the output terminal. This paper designs a disturbance observer-based PI-controller for a single-phase inverter system that is robust against load changes. In this paper, we regard the output voltage changes due to various loads as disturbances of the control system. Then we design a disturbance observer for estimation of the disturbances caused by the load current and any other error sources (such as parameter uncertainties and model mismatches etc.). In order to test the performance of the proposed control law, simulation studies are carried out for a single-phase inverter system using SimPowerSystems of Matlab Simulink. Compared to a simple PI-control, the disturbance observer-based controller shows enhanced performance in transient responses for step load changes.

**Keywords:** 외란 관측기, DC/AC 인버터, 과도응답 제어, SimPowerSystems

## I. 서 론

최근 DC/AC 인버터는 무정전 전원공급 장치(UPS) 시스템, 자동 전압조정 장치(AVR), 프로그래머블 교류 전원(PAS)시스템 등과 같은 여러 교류 전력 시스템에 사용되고 있다. 따라서 DC/AC 인버터에 대한 연구가

활발히 진행되고 있으며, 특히 DC/AC 인버터의 출력 단에 가변 부하가 존재할 경우, 부하 변동에 따른 인버터의 출력 전압 변화를 최소화 하기 위해 다양한 제어 기법들이 발표되고 있다.<sup>[1-3]</sup>

한편 로봇 제어, 정밀 제어 등에서 적용되고 있는 외란 관측기(Disturbance Observer, DOB)는 외란을 관측하여 피드백에 이용함으로써 외란의 영향을 줄이는 제어기 설계 기법에 많이 사용되고 있다. 따라서 외란 관측기가 가지는 특성을 분석하고 성능을 향상시키려는 노력이 계속 수행되고 있다.<sup>[4-6]</sup>

본 논문에서는 DC/AC 인버터의 출력 전압을 제어하기 위한 방법으로 외란 관측기 기반의 PI-제어기를 사

\* 학생회원, \*\* 정회원-교신저자, 명지대학교 전기공학과  
(Department of Electrical Engineering, Myongji University)

※ 본 연구는 BK21 프로젝트 및 과학기술부 / 한국과학기술재단 우수연구센터육성사업의 지원으로 수행되었음 (차세대전력기술연구센터)

접수일자: 2007년4월27일, 수정완료일: 2007년6월4일

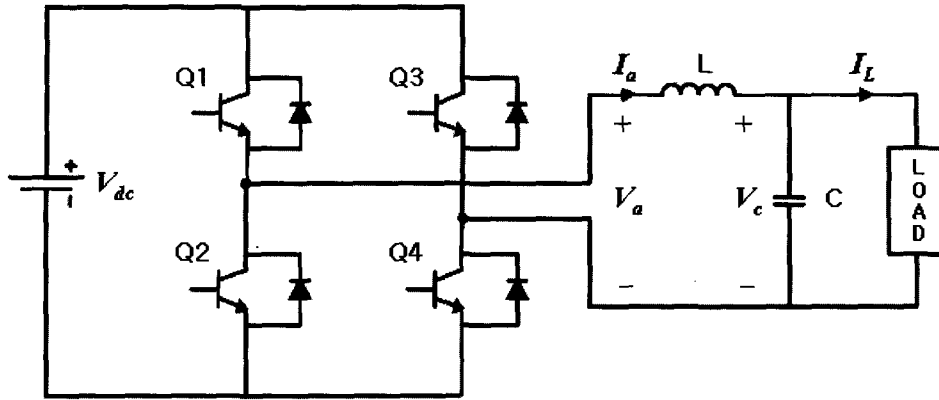


그림 1. 단상 DC/AC 인버터의 구조  
Fig. 1. Structure of Single Phase DC/AC Inverter.

용한다. 가변 부하에 따른 전압의 변화를 외란으로 간주하여 출력 전압의 변화를 감소시키는 제어기를 제안한다. 제안하는 제어기의 성능을 검증하기 위해 Matlab Simulink를 이용하여 시뮬레이션을 수행하고 외란 관측기를 사용하지 않았을 때와 비교하여 외란에 대한 시스템의 강인성을 확인한다.

## II. 본 론

### 1. 시스템의 구조

그림 1은 단상 DC/AC 인버터의 구조를 나타낸 것이다.<sup>[7]</sup> 전체 시스템은 직류 전압원, 인버터, LC 필터 및 부하로 구성되어 있다.

상태 변수를  $x = [I_a(t), V_c(t)]^T$  로 하여 전체 시스템을 상태방정식으로 표현하면 아래 식과 같다.<sup>[1]</sup>

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_a(t) \\ \dot{V}_c(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a(t) \\ V_c(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} V_a(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{C} \end{bmatrix} I_L(t) \quad (1)$$

식 (1)은 아래와 같은 일반식으로 표현할 수 있다.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Gw(t) \quad (2)$$

위에서  $u$ 는 제어입력이고  $w$ 는 외란이라고 할 때, 그림 1에서 인버터의 출력 전압  $V_a$ 는 시스템의 제어 입력, 부하전류  $I_L$ 은 외란이 된다. 출력 전압  $V_c$ 는 부하 변동에 따라 달라지므로 본 논문에서는 부하 전류 변화를 보상하는 외란 관측기 기반 제어기를 설계하여 출력 전압  $V_c$ 의 변화를 최소화 시키도록 한다.

### 2. 외란 관측기의 구조

외란 관측기는 그림 2와 같이 구성된다.  $P(s)$ 와  $P_n(s)$ 는 각각 실제 시스템 및 공칭 시스템의 전달함수이고,  $Q(s)$ 는  $Q$  필터 전달함수이다. 입력  $v$ 는 주 제어기에서 생성되는 제어 입력 신호이며,  $d$ 와  $\xi$ 는 각각 외란과 측정 잡음을 나타낸다.<sup>[4-6]</sup>

그림 2에서 출력  $y$ 에 대한 식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$y = \frac{PP_n}{P_n + (P - P_n)Q} v + \frac{PP_n(1 - Q)}{P_n + (P - P_n)Q} d - \frac{PQ}{P_n + (P - P_n)Q} \xi \quad (3)$$

외란 관측기의 성능에 중요한 역할을 하는  $Q$  필터는 저주파 통과 필터이며, 본 논문에서는 몇 가지 모의실험을 통해 의해 5차 Butterworth 저주파 통과 필터로 결정하였다. 본 논문에서 사용한 필터 식은 다음과 같다.<sup>[7]</sup>

$$Q = \frac{1}{(\tau s + 1)(\tau s - e^{-j4/5\pi})(\tau s - e^{j4/5\pi})} \times \frac{1}{(\tau s - e^{-j3/5\pi})(\tau s - e^{j3/5\pi})} \quad (4)$$

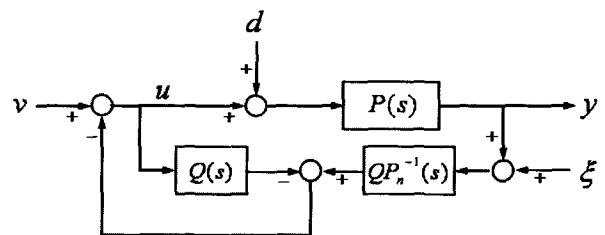


그림 2. 외란 관측기의 구조  
Fig. 2. Structure of Disturbance Observer.

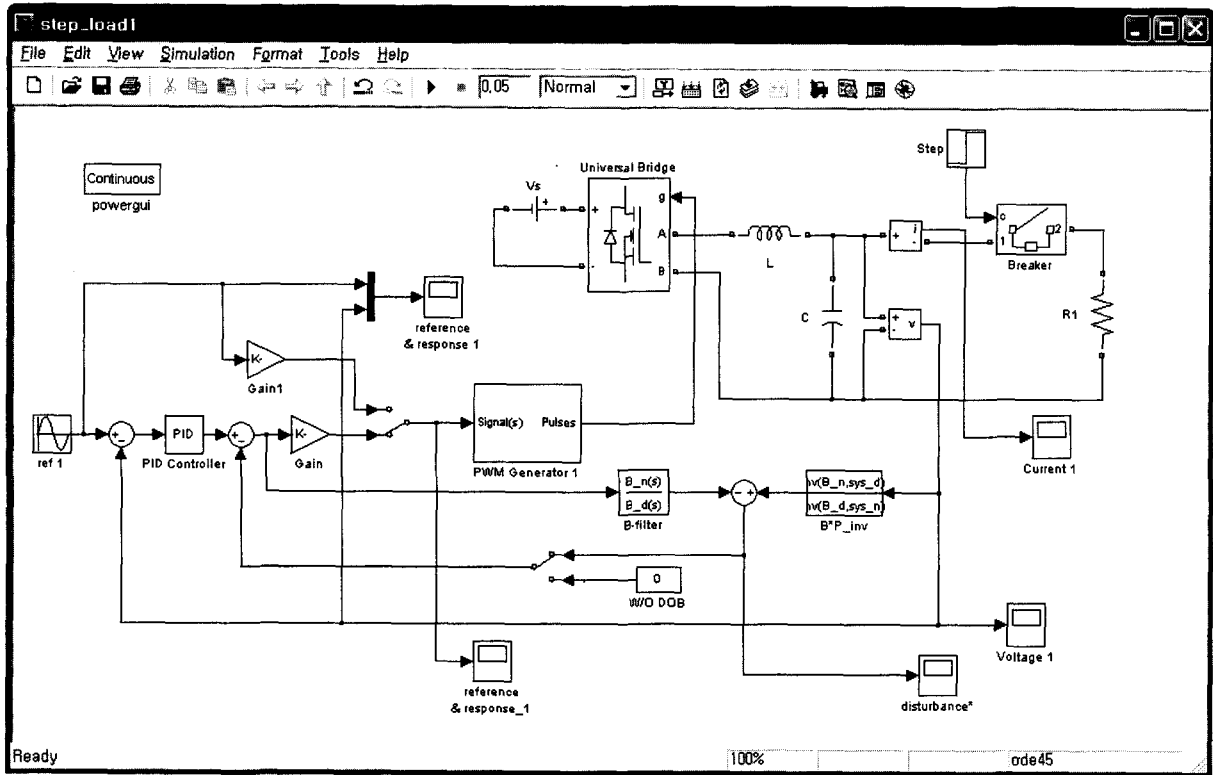


그림 3. 외란관측기를 적용한 PI-제어기  
Fig. 3. PI-controller with Disturbance Observer.

일반적으로 외란은 저주파 영역으로, 측정 잡음은 고주파 영역으로 각각 구분되는 경우, 식 (3)을 살펴보면 저주파 영역에서  $Q(s) \approx 1$ 이면 출력에 대한 외란의 영향이, 고주파 영역에서  $Q(s) \approx 0$ 이면 측정 잡음에 의한 영향이 각각 무시 될 수 있음을 알 수 있다.

### 3. 외란관측기 설계

식 (1)로부터 출력의 전달함수 식을 구해보면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$V_c = \frac{1}{s^2LC+1} V_a + \frac{-sL}{s^2LC+1} I_L \quad (5)$$

따라서 그림 2에서와 같은 외란 관측기 설계 기법을 적용하기 위해 본 논문에서는  $-sL \cdot I_L$ 을 그림 2의 외란  $d$ 로 생각하고 외란 관측기를 설계한다. 식 (5)에서 부하전류  $I_L$ 의 변화량과 외란  $d$ 가 비례하기 때문에 순간적으로 부하가 걸리는 스텝 부하에 경우 본 논문에서 제안하는 방법이 효과적일 것으로 예상할 수 있다.

일반적으로 인버터는 펄스 변조에 따라 PWM(Pulse Width Modulation)과 PAM(Pulse Amplitude Modulation)으로 분류된다.<sup>[8]</sup> 본 논문에서는 일반적으로 사용되는 PWM 방식을 이용하여 시뮬레이션을 하도록 한다. 이

때 PWM의 전달함수를 1이라 가정한다면 시스템의 공칭 전달함수  $P_n(s)$ 는 다음 식과 같다.

$$\frac{V_c(s)}{V_a(s)} = \frac{1}{s^2LC+1} \quad (6)$$

따라서 그림 3과 같이 외란 관측기를 구성 할 수 있다. 그림 3은 Matlab Simulink로 작성한 시스템 구성도이다.<sup>[9]</sup>

### 4. 시뮬레이션

제안된 제어 방법의 타당성 및 성능을 확인하기 위해 컴퓨터 모의실험을 실시하였다. 이 때 사용된 파라미터 값은 아래 표 1과 같다.<sup>[10]</sup>

모의실험은 개루프 시스템에 대한 결과 (그림 4, 5)와 PI-제어기를 사용할 때 (그림 6, 7), 그리고 논문에서 제안하는 제어기를 사용할 때 (그림 8, 9)에 대해 출력을 비교한다. 두 번째 그림은 정확한 비교를 위해 과도 현상 부분을 확대한 그림이다.

개루프 시스템의 경우 제어기를 사용하지 않을 때 무부하 상태에서 부하가 갑자기 인가되면 (0.02초) 전압 및 전류의 파형이 심하게 일그러짐을 확인할 수 있다. (그림 4, 5)

표 1. 모의실험 파라미터

Table 1. System Parameters for Simulation.

LC 필터	$L = 2\text{mH}$
	$C = 10\mu\text{F}$
DC 전압	$V_{dc} = 200\text{V}$
스텝부하	$R = 30\Omega$
출력 전압, 주파수	$V_c = 110\text{V}, f = 60\text{Hz}$
스위칭 주파수	$f_{sw} = 20\text{kHz}$
PI-제어기	P gain = 50
	I gain = 10
저주파통과필터 (Butterworth filter)	차수 = 5
	차단주파수 = 30000rad/s

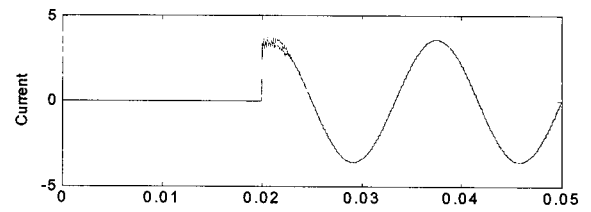


그림 6. PI-제어기 사용한 모의파형 1

Fig. 6. Simulation Results Using PI-controller 1.

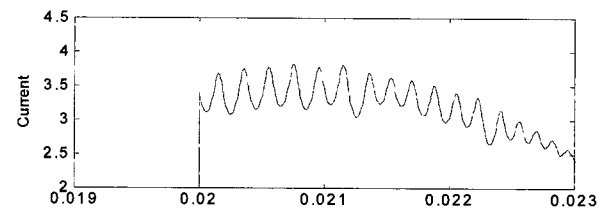
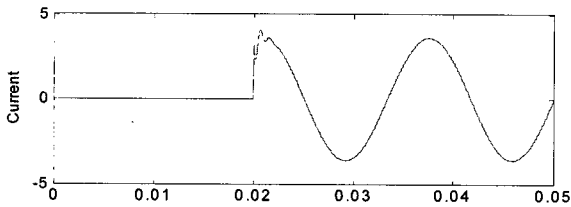
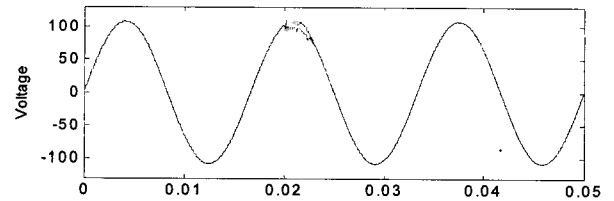


그림 7. PI-제어기 사용한 모의파형 2

Fig. 7. Simulation Results Using PI-controller 2.

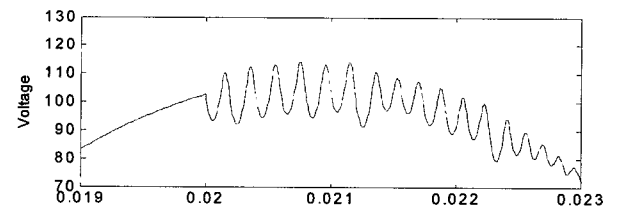
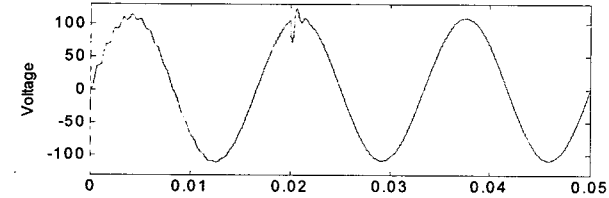


그림 4. 개루프 시스템의 과도 응답 1

Fig. 4. Response to Open-loop System 1.

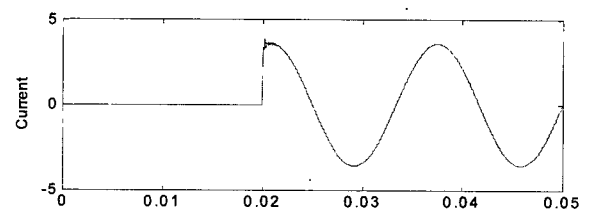
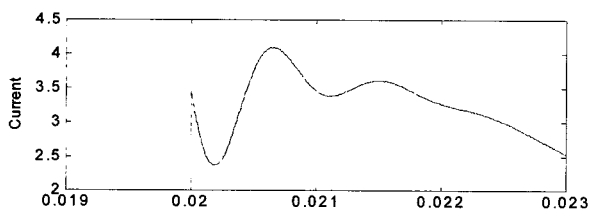


그림 8. 외란 관측기 기반 PI-제어기 모의파형 1

Fig. 8. Simulation Results Using Disturbance Observer-based PI-controller 1.

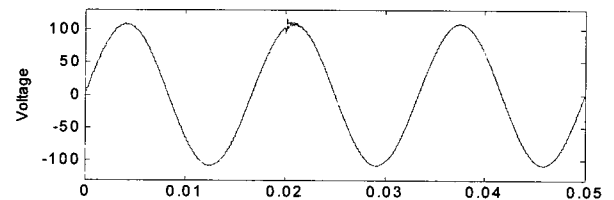
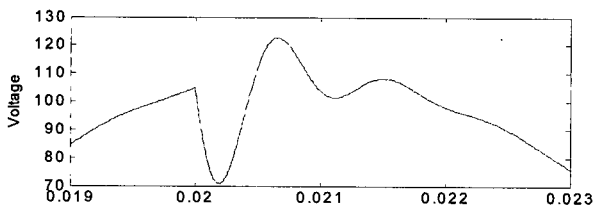


그림 5. 개루프 시스템의 과도 응답 2

Fig. 5. Response to Open-loop System 2.

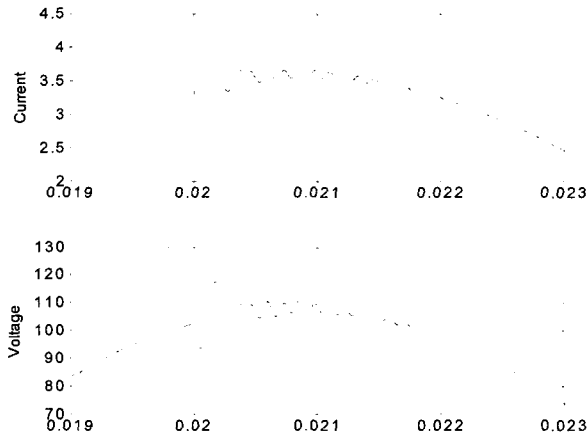


그림 9. 외란 관측기 기반 PI-제어기 모의실험 2  
 Fig. 9. Simulation Results Using Disturbance Observer-Based PI-controller 2.

한편 PI-제어기를 사용하는 경우 그림 6과 7에서 확인하듯이 전압 및 전류 파형의 변화량이 감소하게 된다. 추가로 논문에서 제안하는 방법으로 외란 관측기를 추가적으로 설계하면 앞 절에서 예상한 대로 PI-제어기 단독으로 사용한 경우에 비해 과도현상이 상당히 개선됨을 확인할 수 있다. (그림 8, 9)

### III. 결 론

본 논문에서는 단상 DC/AC 인버터 시스템 사용 시에 빈번하게 발생하는 부하 변동에 따른 출력 전압의 변화를 줄이기 위해 외란 관측기를 적용하여 시스템의 강인성을 향상시키는 방법을 연구하였다. 순간적으로 인가되는 부하에 의해 발생하는 파형의 변화를 외란 입력에 의한 것으로 생각하고 외란 관측기를 적용하여 이를 효과적으로 제거할 수 있는 제어 방법을 제시하였다. 이 방법은 기존 PI-제어기에 추가적으로 적용할 수 있는 방법으로 제어기의 설계가 다른 강인 제어 기법에 비해 까다롭지 않게 구현할 수 있다. Matlab Simulink를 사용한 모의실험을 통해 PI 제어기만 사용한 경우보다 외란 관측기에 의한 과도현상 개선 성능을 확인하였다.

### 참 고 문 헌

[1] P. Mattavelli, "An Improved Deadbeat Control for UPS Using Disturbance Observers", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 52 No. 1,

pp. 206-212, 2005. 2.  
 [2] M. J. Ryan, W. E. Bruntsickle, R. D. Lorenz, "Control Topology Options for Single-phase UPS Inverters", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 33, No. 2, pp. 493-500, 1997. 3.  
 [3] 김제홍, 손재현, "전력용 능동필터형 무정전 전원 장치", 전자공학회논문지, 36권 4호, pp. 53-59, 1999. 12.  
 [4] 최영진, 양광진, 정완균, 김홍록, 서일홍, "강인성과 제어 성능을 고려한 외란 관측기의 설계 (1) : 2차 시스템에 대한 이론적 해석", 제어·자동화시스템공학 논문지, 8권 8호, pp. 655-663, 2002. 8.  
 [5] 김홍록, 최영진, 서일홍, 정완균, 박명관, 이경호, "강인성과 제어 성능을 고려한 외란 관측기의 설계 (2) : 광디스크 드라이브 서보 시스템에의 적용 실험", 제어·자동화시스템공학 논문지, 9권 4호, pp. 270-276, 2003. 4.  
 [6] 김성중, 신명준, 손영익, 김갑일, 임승철, 강환일, "부하변동이 존재하는 DC 모터의 속도 제어를 위한 외란관측기 설계", 정보 및 제어 학술대회 논문집, pp. 133-135, 2006. 10.  
 [7] 장영범, DSP 이론과 실무, 생능출판사, 2006.  
 [8] 정동화, 전력전자 및 전동기제어, 인터뷰전, 2006.  
 [9] On-line documents powersys.pdf at <http://www.mathworks.com>  
 [10] E. C. Chang, J. F. Chen, T. J. Liang, "DSP-Based Terminal Sliding Mode Control with Difference Equation Grey Prediction for DC/AC Inverters", submitted to IET Electric Power Applications, 2007.

## — 저 자 소 개 —



김 성 종(학생회원)  
 2006년 명지대학교 전기공학과  
 학사 졸업.  
 2007년 현재 명지대학교  
 전기공학과 석사과정  
 <주관심분야 : 제어이론 및 적용,  
 DSP를 이용한 제어기 설계, 임베  
 디드 시스템>



손 영 익(정회원)  
 1995년 서울대학교 전기공학과  
 학사 졸업.  
 1997년 서울대학교 전기공학부  
 석사 졸업.  
 2002년 서울대학교 전기·컴퓨터  
 공학부 박사 졸업.  
 2007년 현재 명지대학교 전기공학과 부교수  
 <주관심분야 : 제어이론 및 적용, 로보틱스, 임베  
 디드 시스템>



정 유 석(정회원)  
 1993년 서울대학교 전기공학과  
 학사 졸업.  
 1995년 서울대학교 전기공학부  
 석사 졸업  
 2005년 서울대학교 전기·컴퓨터  
 공학부 박사 졸업.  
 2007년 현재 명지대학교 전기공학과 조교수  
 <주관심분야 : 전력전자 및 전기기기, 신재생에너  
 지변환, 차세대친환경자동차>