

정현파필터 알고리즘을 이용한 무성방전형 오존발생장치의 설계

(Design of Silent Discharging Ozonizer using Algorithm for Sinusoidal Filter)

엄태욱* · 이병순

(Tae-Wook Eom · Byung-Soon Lee)

Abstract

In this paper, a control method using Sinusoidal Filter Controller of Silent Discharging Ozonizer is proposed and also the control method performed robust control against variation of capacitance, command voltage and frequency. As the control system for this method, Sinusoidal Filter Algorithm can be simplified configuration of the power supply by using a low-pass filter. Through simulations and experiment results, the proposed control method compensates for the high voltage waveform to the ozonizer.

Key Words : Sinusoidal Filter Controller, Silent Discharging Ozonizer, Robust control

1. 서 론

오존발생기는 오존의 살균효과를 이용한 것으로 정수장 및 폐수처리 설비, 농수산물 살균처리설비, 대기오염방지시설 등에 적용되는 장치이다. 오존발생은 수 kV의 단상교류 고전압을 산소가 주입된 오존발생기 내부에 인가하여 무성방전을 일으켜, 산소분자를 활성산소 원자(O)로 분해시키고 이를 주위의 산소(O₂)와 결합시켜 오존(O₃)을 생성시키는 과정으로 이루어진다. 종래의 오존발생장치는 인버터와 변압기로 구성되어 있으며, 최종 변압기의 출력에서 발생된 고

전압을 오존발생기에 인가하는 방식이다. 이 방식은 인버터 출력주파수 크기에 따라 중주파형(600~1kHz), 고주파형(1kHz 이상)으로 분류된다. 그리고 부하공진형 필터를 적용한 개루프 제어방식과 저역통과 필터를 사용한 PWM(Pulse Width Modulation) 스위칭 피드백 제어방식이 있다[1-4]. 종래의 오존발생장치는 출력전압과형의 고조파성분을 최소화하는 장점이 있으나 오존발생기의 무성방전에 의한 유전체 정전용량 변화에 따른 공진점 변동에 의해 안정적인 제어가 어렵고, 주파수 가변폭이 제한되므로 지령주파수 변화에 대해 부하공진형 필터의 LC 탭도 같이 가변해야 하는 등의 단점이 있다. 피드백제어방식 저역통과 필터 오존발생장치는 출력전압특성이 특정 공진대역에서 발진하는 등 전압출력특성이 불안정하며 고조파성분이 많고 왜곡이 심하여 구현이 어렵다.

본 논문에서 정현파필터 알고리즘을 이용한 오존발생장치는 단상의 중주파 고전압발생장치로서 종래의

* 주저자 : 동양미래대학교 자동화시스템과 조교수
* Main author : Dongyang Mirae Univ. Dept. of
Automation System Assistant Professor
Tel : 02-2610-5187, Fax : 02-2610-1852
E-mail : twum0311@dongyang.ac.kr
접수일자 : 2014년 1월 20일
1차심사 : 2014년 1월 22일
심사완료 : 2014년 2월 7일

PWM스위칭 피드백제어방식과 동일하다. 그러나 정현파필터 알고리즘이 적용된 소프트웨어에 의한 인버터 스위칭제어를 통해 인덕터와 콘덴서로 이루어진 저역통과필터부의 공진주파수 대역에서의 급증하는 전류이득을 안정하게 유지하여, 고조파가 감쇄된 전압을 공급하는 시스템을 제안한다.

2. 시스템의 구조

2.1 오존발생장치의 구조

그림 1의 저역통과필터방식의 오존발생장치는 저역통과필터 역할을 하는 저역통과필터부와 이와 연결된 전원부를 포함하며 변압부를 통해 오존발생기에 연결된다. 전원부는 정류부, 평활부, 인버터부로 구성되어 있다.

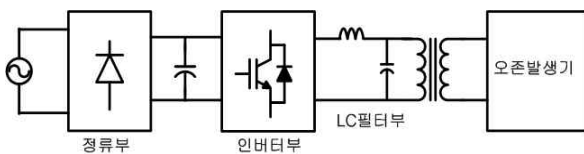


그림 1. 저역통과 필터방식 오존발생장치의 구조
Fig. 1. Structure of Ozonizer with Lowpass Filter

저역통과필터방식 오존발생장치는 PWM인버터를 사용하여, 정현파전압에 비례하는 PWM구형파전압을 발생시키고, 이 PWM구형파전압이 저역통과필터를 통과하면서 정현파전압으로 전환되어 변압기에서 승압된다. 최종 전압이 오존발생기의 전극에 인가되어 내부방전시간에 따라 오존을 발생시킨다. 저역통과필터를 적용한 오존발생장치의 PWM제어방식에서 제어부는 전압지령과 실제전압을 비교하고, 이때 발생된 오차를 스위칭 캐리어주파수(20kHz)가 포함된 삼각파 비교를 통해 PWM 신호를 발생한다.

이 신호가 인버터부의 스위치에 인가되어 PWM 구형파 전압이 발생되고 저역통과필터의 저역통과필터 특성에 의해 동작주파수(20kHz) 이상의 고조파는 제거된다. 저역통과필터부의 공진주파수는 식 (1)과 같다.

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

또한 필터부의 입력전압과 출력전압에 대한 전달함수는 식 2로 나타낼 수 있다.

$$H(S) = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{1}{L_f \cdot C_f \cdot S^2 + 1} = \frac{\omega_N^2}{S^2 + \omega_N^2}, \quad \omega_N = \frac{1}{\sqrt{L_f \cdot C_f}} \quad (2)$$

식 (2)로 얻어진 저역통과필터의 공진주파수에서의 이득은 오존발생기가 용량성 부하이므로 큰 값을 가지므로, 동작주파수가 공진주파수에 근접하면 할수록 이득은 커지게 되고 전압과형이 발전하게 된다. 저역통과필터의 공진주파수가 스위칭 주파수에 근접하는 경우, 기본파에 스위칭에 의한 고조파성분이 포함되므로 과형왜곡이 발생한다. 또한 승압 변압기의 누설인덕턴스 및 커패시턴스 성분으로 인해 저역통과필터의 공진주파수가 변화하는 등의 단점이 있다.

2.2 제안된 시스템의 설계

본 논문에서 제안한 정현파필터 알고리즘을 적용한 저역통과필터방식의 오존발생장치의 구조는 그림 2와 같다.

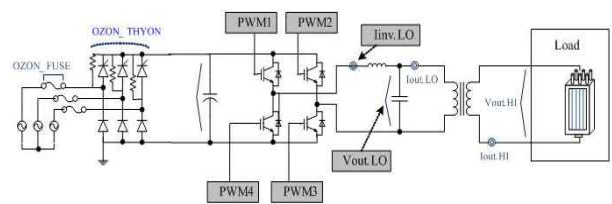


그림 2. 제안된 오존발생장치의 구조
Fig. 2. Structure of Proposed Ozonizer

제어기는 필터커패시터에 흐르는 전류와 양단간에 걸리는 전압, 변압기의 1차측 전류를 검출하여 전압 및 주파수 지령치와 비교한다. 게이트 제어신호의 증폭을 위한 게이트 드라이버에 의해 인버터부의 출력 전압은 전원부의 펄스폭 변조 또는 주파수 변조에 의

해 제어될 수 있다. 그림 3은 오존발생장치의 인버터부, RLC회로와 그에 접속된 부하임피던스로 등가회로를 구성하였으며, 이것을 전달함수 블록선도로 표시하였다.

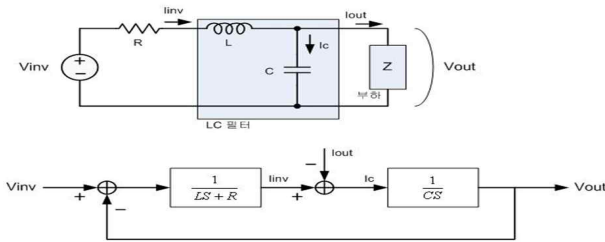


그림 3. 오존발생부 등가회로와 전달함수 블록선도
Fig. 3. Equivalent circuit of ozonizer and Transfer Function block diagram

2.3 전압 및 전류제어기

그림 3의 오존발생부 등가회로를 바탕으로 PI전압제어기 및 피드포워드제어기, 전류제어기를 그림 4와 같이 구성하였다.

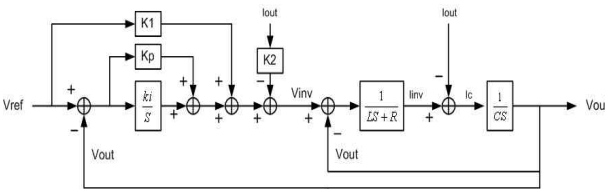


그림 4. PI제어기의 블록선도
Fig. 4. Block diagram of PI controller

$$\frac{V_{out}(S)}{V_{ref}(S)} = \frac{(K_1 + K_p) \cdot S + \frac{K_i}{LC}}{S^3 + \frac{R}{L} \cdot S^2 + \frac{(1 + K_p)}{LC} \cdot S + \frac{K_i}{LC}} \quad (3)$$

전압지령치를 V_{ref} 라 할 때 전달함수는 식 (3)과 같이 전개할 수 있다. 식 (3)의 전달함수에서 시스템의 특성방정식은 다음 식 (4)와 같다.

$$D(S) = S^3 + \frac{R}{L} \cdot S^2 + \frac{(1 + K_p)}{LC} \cdot S + \frac{K_i}{LC} \quad (4)$$

특성방정식의 3개의 근은 시스템의 3개의 해를 의미한다. 이는 시스템의 정상상태응답과 안정도에 관련이 있다. 극배치 방법을 이용하여 시스템에 영향을 미치는 중요한 2개의 극, 즉 해를 다음과 같이 정의한다.

$$S_{1,2} = -\alpha\omega \pm j\omega\sqrt{1-\alpha^2}$$

$$S_3 = -m\alpha\omega \quad (5)$$

따라서 위 식을 기준으로 계수를 비교하여, PI제어기 및 피드포워드, 비례제어기의 이득을 구할 수 있다. 여기에서 α 는 진동계수, ω 는 저역통과필터의 공진주파수, m 은 자유도를 의미한다.

2.4 정현파필터 제어기

전압-전류제어기의 출력은 정현파 필터제어기의 입력으로 전달되어 필터제어를 위한 지령치를 연산한다.

그림 5는 정현파 필터제어기의 기본구성을 나타낸 것으로 저역통과필터 커패시터 양단의 전압오차를 이용하는 능동댐핑기법을 이용한 것이다.

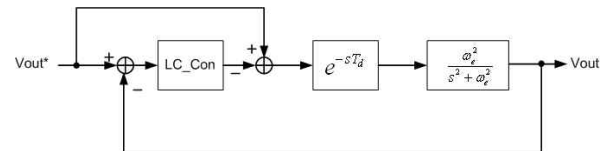


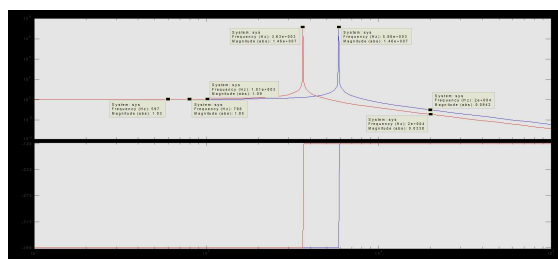
그림 5. 정현파필터 제어기의 블록도
Fig. 5. Block diagram of sinusoidal filter controller

여기에서 T_d 는 시간지연, ω_e 는 저역통과필터의 공진주파수를 의미하며 LC_{con} 은 제어기이득이다. 아래 그림의 전달함수는 다음 식 (7)과 같다.

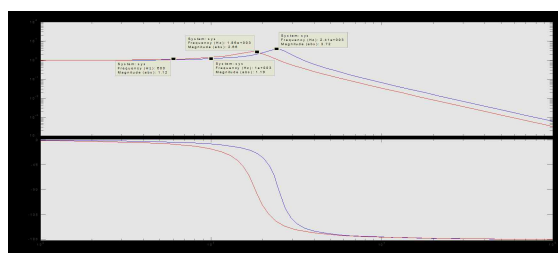
$$\frac{V_{out}}{V_{out}^*} = \frac{\omega_e^2(1-LC_{con})\left(-S + \frac{2}{T_d}\right)}{S^3 + \frac{2}{T_d}S^2 + (LC_{con}+1)\omega_e^2S^2 + \frac{2}{T_d}\omega_e^2(1-LC_{con})} \quad (7)$$

식 (7)로부터 능동댐핑기법을 이용한 저역통과필터는 T_d , ω_e 그리고, 진동계수 α 에 따라 감쇄율이 달라

지며 공진주파수는 $\omega_e \sqrt{1-LC_{con}}$ 으로 가변되는 특성을 가진다.



(a)



(b)

그림 6. 기존시스템(a)과 제안된 시스템(b)의 보드선도
Fig. 6. Board plot diagram of Conventional System(a) and Proposed system(b)

일례로서 승압 변압비를 1:50, 오존발생기의 유전체 정전용량의 가변범위를 최소 1nF에서 최대 8nF, LC저역통과필터는 LC병렬구성, 필터의 L과 C를 각각 240uH, 12uF, LC저역통과필터의 공진주파수를 3kHz, 으로 하였을 때, 기존 시스템과 정현파필터 알고리즘이 적용된 제안된 시스템에 대한 주파수와 이득에 대한 특성은 그림 6에 나타냈다. 기존 시스템에서는 공진주파수 대역에서 이득이 증가하지만, 정현파필터 제어 시스템은 공진주파수 대역에서 이득값이 감소되었음을 볼 수 있다. 출력전압지령치와 실제출력전압의 위상차이가 커지는 특성이 있다. 정현파필터 제어기는 용량성부하인 오존발생기의 내부정전용량 변화에 따른 공진주파수 대역의 변화가 오존발생장치의 동작 주파수에 근접하더라도 그에 따른 이득이 제한되어 출력전압과형의 발진이 일어나지 않는다.

그러므로 안정적인 제어를 수행할 수 있으며 출력전압과형에 포함된 고조파성분을 제거하는 장점이 있다.

또한 전원회로 내에서의 댐핑을 위한 외부저항의 추가 없이 제어기의 정현파제어 알고리즘만을 사용하므로 이에 따르는 댐핑저항의 전류도통에 의한 전력손실이 없고 부품추가의 낭비를 줄일 수 있다.

3. 시뮬레이션 및 실험

제안된 방식을 적용한 오존발생장치의 모의시험은 PSIM을 이용하여 구현하였으며 구성은 그림 7과 같다.

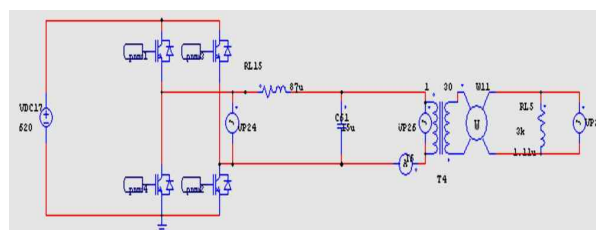


그림 7. 오존발생장치의 모의시험 회로도
Fig. 7. Simulation circuit of ozonizer

모의실험 순서는 부하 파라미터 추출에 의한 등가부하 실험에 앞서, 저항부하(3kΩ)를 적용하여, 기본동작 및 제어동작을 검증하였다. 그림 8은 저항 부하시 모의실험 파형으로 부하양단의 전압과형이 정현파를 유지하는 것을 알 수 있다.

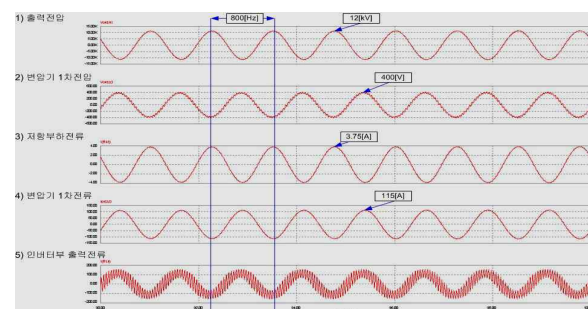


그림 8. 제안된 오존발생장치의 저항부하시 모의실험결과.
Fig. 8. Simulation result of Proposed Ozonizer with resistor load

표 1은 시뮬레이션과 실험에 사용된 제어기의 시스템 파라미터이다.

정현파필터 알고리즘을 이용한 무성방전형 오존발생장치의 설계

표 1. 시스템 파라미터
Table 1. System parameter

스위칭 주파수	20kHz
출력전압(변압기1차측)	300V
출력전압 주파수	800Hz
변압비	1 : 30
제어기 이득	0.5
Feed-Forward제어기 이득	0.1
전류비례제어기 이득	0.1
저역통과필터제어기 이득	0.05

그림 9는 오존방전관의 등가회로이다. 등가회로의 유전체정전용량(C_g)과 공극정전용량(C_a)을 추출하기 위해 방전봉과 1 μ F의 콘덴서를 직렬로 연결한 후에 전압을 인가하여, 방전관과 콘덴서양단의 전압을 측정한다.

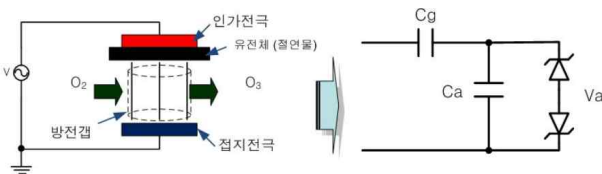


그림 9. 오존방전관의 등가회로
Fig. 9. Equivalent circuit of ozone generation tube

이때 오실로스코프로 측정된 전압파형을 리사주(Lissajous)파형으로 변환하여, 파형의 기울기로 방전봉 파라미터를 추출하게 된다[5].

그림 10은 방전관의 파라미터(C_g , C_a)를 추출하기 위한 리사주파형을 나타내고 있다.

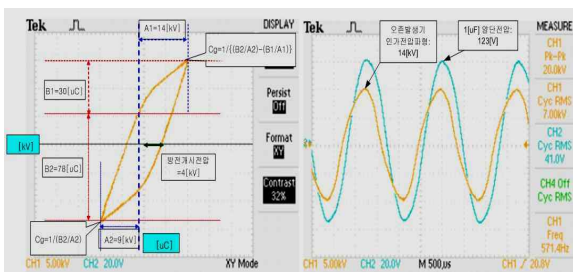


그림 10. 방전관과 콘덴서의 리사주파형
Fig. 10. Lissajous waveform of ozone generation tube and capacitor

이러한 리사주파형의 기울기를 이용하여 다음 표 2와 같이 방전관의 등가파라미터를 추출할 수 있다.

표 2. 오존방전관의 등가파라미터
Table 2. Equivalent parameter of ozone generation tube

항목	설명	수식	크기	비고
C_g	유전체 정전용량	$C_g=1/m^2$	2.81nF	기울기: $m1 = A2/B2 = 0.43$ $m2 = A1/B1 = 0.11$
C_a	공극 정전용량	$C_a=1/(m1-m2)$	1.06nF	
C_{load}	초기 정전용량	$C_{load}=(C_g * C_a) / (C_g + C_a)$	0.77nF	콘덴서 직렬계산

그림 11은 제안된 방식의 오존발생장치에 대한 모의 실험 결과를 나타낸 것으로, 표 2에서 추출한 방전관의 등가 파라미터를 이용하여, 모의실험에 사용될 등가부하(유전체정전용량 90nF, 공극정전용량 34nF)로 전체초기정전용량은 25nF)로 적용하였다. 그림 11의 상단부 파형은 변압기 2차측에서 오존발생기 양단 간에 걸리는 인가전압과 오존발생기 내의 공극정전용량단의 방전개시전압을 나타낸다. 방전개시전압은 2.8kV로 그 이상의 전원이 오존발생기에 인가된 경우 공극정전용량단(C_a)이 도통이 되어 방전개시전압을 일정하게 유지하게 된다.

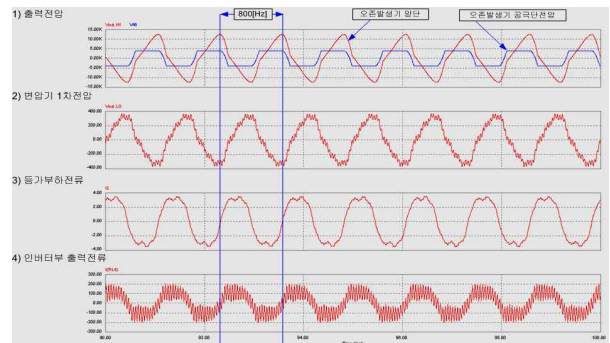


그림 11. 제안된 오존발생장치의 모의 실험결과
Fig. 11. Simulation result of Proposed Ozonizer

이때 오존발생기의 양단에 인가되는 전압은 유전체 정전용량단(C_g)만 나타나게 되므로 오존발생기의 내부정전용량의 변화에 의해 파형이 왜곡되는 구간이 발생하게 된다. 이러한 출력전압의 왜곡은 오존방전관의 방전시에 정전용량의 변화로 인하여 발생하는 것이다. LC저역통과필터의 커패시터 전류와 변압기 1차측 전류와 전압은 제어기에 피드백 되어 PI제어 및 정현파필터제어에 입력으로 사용된다.

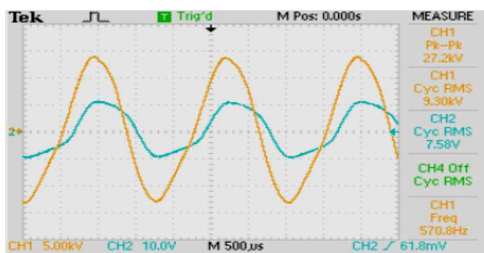


그림 12. 제안된 오존발생장치 출력전압파형
Fig. 12. Output voltage waveform of Proposed Ozonizer

그림 12는 제안된 시스템에서의 오존발생장치의 출력전압과 오존발생기의 등가부하를 측정하기위해 직렬로 연결한 콘덴서(1uF)양단전압을 나타낸다.

그림 11의 모의시험파형과 그림 12의 실험파형에서 설정주파수 가변에 따른 고압변압기의 변압비에 따라 전압을 출력하였으며 정현파를 유지하여 운전전압과 운전주파수를 모두 만족함을 볼 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 정현파 필터알고리즘을 적용하여, 출력전압크기와 주파수 추종제어가 가능한 오존발생장치를 제안하였다. 제안된 시스템은 저역통과필터를 사용함으로써 사용자의 주파수가변에 따른 부하공진형 필터의 가변이 필요 없기 때문에 전원장치의 구성을 단순화 할 수 있고, 운전 및 조작이 간편하다. 댐핑 저항소자 및 회로의 추가 없이 정현파필터 알고리즘을 이용하여 저역통과필터의 공진점에서 급증하는 전류이득을 감쇄함으로써 댐핑저항 소자의 추가에 의한 전력손실 없이 인버터 출력전압에 포함된 고조파성분

을 제거하고 파형왜곡이 적은 출력전압특성을 얻을 수 있음을 모의실험과 실험을 통해 확인하였다.

향후 본 논문의 내용을 토대로 하여, 다양한 용량의 오존발생기에서도 제안된 시스템의 결과가 적용되는지를 모의실험과 실험을 통해 확인 및 분석을 수행하여, 실제 시스템에 적용할 계획이다.

References

- [1] Tae, H. K. and Joon, W. K., "A study on the ozone consumption rate for drinking water treatment process with ozone application", Journal of KSWW, Vol. 27, pp.663-669, 2005.
- [2] Jae, W. C. and Moo, H. C., "Ozone generation characteristics of silent discharge process", Journal of KSEE, Vol. 28, pp.305-312, 2004.
- [3] Hiroaki, M. Y. and Masahiro, H. N., "Space charge distribution for various glass materials under DC stress", IEEJ Trans. FM, Vol. 123, No. 1, pp. 62-69, 2003.
- [4] Y. J. Kim and M. Nakaoka, "Comparative Characteristic Evaluations of Specially-Designed High-Voltage Transformer Parasitic Resonant PWM Inverter-Linked High-Power DC-DC Converter", IEEE-PESC Proceedings, pp. 120-127, June 1995.
- [5] Chang-Ho Lee, Byung-Joon Jun, Hyun-jig Song, Chang-Ho Lim, Sang-Tae Choi, "The Ozone Generation and Discharge Power Characteristics for High Frequency Ozonizer by V-Q Lissajous Method". KIIEE pp. 308-312, 2004.
- [6] Shengpei Wang, "A Novel Silent Discharge Type Ozonizer using Pulse Density Modulated High Frequency invert". Proc., of the 1999 IEEE Industry Applications Meeting Vol. 2, pp. 746-772, 1999.

◇ 저자소개 ◇



엄태욱 (嚴泰昱)
1968년 3월 11일생. 1990년 중앙대학교 전기공학과 졸업. 1992년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 2008년 동대학원 전자전기공학부 졸업(박사). 현재 동양미래대학교 자동화시스템과 조교수.



이병순 (李炳順)
1962년 11월 19일생. 1988년 중앙대학교 전기공학과 졸업. 1991년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 8월 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 서일대학교 전기과 강의전담교수.