

압전 변압기 특성을 이용한 T5급 응용회로 동작 및 해석에 관한 연구

이해춘¹, 이창구^{2*}

¹한국폴리텍II대학 전기계측제어과, ²전북대학교 제어계측공학과

A Study on the Driven and Analysis of T5 Application Circuits using a Characteristics of Piezoelectric Transformer

Hae-Chun Lee¹ and Chang-Goo Lee^{2*}

¹Dept. of Electric Measuring & Control, Korea Polytechnic II College

²Dept. of Control & Instrumentation Eng, Chonbuk National Univ.,

요 약 압전 변압기와 CCFL, 형광등의 전기적 등가회로에 의한 PSPICE 모델을 제시하였고, 차세대 35W급 초절전형 삼파장 T5 형광램프용 고효율 형광등 안정기를 개발하였다. 이 안정기는 역률개선회로와 인버터에 압전 변압기를 채용하여 T5 형광램프의 점등실험을 하였으며, 압전 변압기의 효율적인 구동과 정확한 주파수 공급을 위하여 PLL 방식을 사용하였다.

Abstract In This Paper, at the PSPICE model is presented by Piezoelectric Transformer and CCFL and equivalent circuit of fluorescent light. Highly effective fluorescent light release for next generation is developed for 35W supremacy model three wave length T5 fluorescent lamps. Lighting a candle experiment of T5 fluorescent lamps is carried out by employing Piezoelectric Transformer power-factor improvement circuit and inverter. PLL method is used for supplying a correct frequency of Piezoelectric Transformer operating.

Key Words : Piezoelectric Transformer

1. 서론

압전 변압기(PiezoelectricTransformer)는 1956년 C.A.Rosen에 의하여 최초로 원리와 응용에 관한 연구가 이루어 졌으며, H.W.Katz, P.A.van Berkum 등에 의하여 발전되어 고전압 발생 장치로서 주목을 받기 시작하였다 [1,2]. 1960년대에는 TV의 수평 발진 회로에 이용되는 고압 변압기로서 개발되었지만, 고출력 특성을 얻기가 어렵기 때문에 개발이 중단되었다가 고출력용 압전 세라믹의 개발이 진행되면서 1994년 NEC사에 의해 노트북 PC용 액정 표시 장치의 배면 광원용 인버터에 사용하기 위한 대칭형 로렌 3차 방식의 압전 변압기가 개발되는 등 많은 연구가 활발히 진행되고 있다[2-5].

또한 조명부분에 소비되어지는 전기에너지의 비중이

점차 늘어가고 있어 보다 효율적인 에너지 관리가 시급한 실정이며, 이를 위한 갖가지 연구개발이 최근 들어 활발히 진행되고 있다. 형광등의 사용은 가정, 사무실, 공장 등에서 큰 비중을 차지하고 있어 조명기기로서의 형광등에서 전력을 아낄 수 있는 방법에는 광효율이 높은 형광램프의 선택과 이에 적합한 고효율의 안정기를 선택해야 한다.

압전소자를 이용한 정밀 액추레이터 외에 중요한 압전소자의 응용분야로써 압전 변압기와 같은 분야가 있는데, 이것은 유전체 세라믹스를 전기적으로 분극을 가하여 만든 압전 소자에 전계를 가하면 기계적인 변위의 변화가 발생하는 역 압전효과와 외부에 기계적인 응력이 가해졌을 때 출력 측에서 전하의 분포에 의한 전기적인 출력이 발생하는 압전효과를 이용한 고전압 출력소자이다.

*교신저자 : 이창구(changgoo@chonbuk.ac.kr)

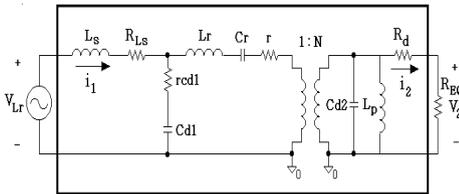
압전 변압기의 특성 해석에 있어서 C.A.Rosen은 압전 변압기의 등가 회로에서 공진 주파수가 부하 저항에 의존하는 경우에 대하여 해석을 행하고 승압비의 이론식은 치수와 재료의 압전 상수로 나타낼 수 있다고 하였으며, P.A. van Berkum은 탄성 진동 응력을 이용하여 일정 공진 주파수로 구동시 무손실의 경우와 등가 내부 손실 저항을 포함하는 일반적인 경우의 승압비 해석을 행하였다.

압전 변압기는 기존의 마그네틱 소자와 코일을 이용한 변압기에 비해서 초박형의 용이함, 권선의 불필요, 간단한 구조에 의한 대량 생산의 용이함, 우수한 절연특성, 그리고 낮은 가격 등의 장점을 가지고 있다. 이러한 장점들 때문에 높은 승압비를 이용한 고전압 출력이 가능한 로젠형 변압기는 현재 LCD의 백라이트를 위한 CCFL(Cold Cathode Fluorescent Lamp)을 동작시키기 위한 고효율 인버터에 사용되고 있다.[1]

본 논문에서는 압전 변압기와 CCFL, 형광등의 전기적 등가회로에 의한 PSPICE 모델을 제시하여 압전 변압기의 특성 해석을 하였으며, 차세대 35W급 초절전형 삼파장 T5 형광램프용 고효율 형광등 안정기를 회로를 접목시켜 효율을 개선시켰다.

이 안정기는 역률 개선회로와 인버터 뒷단에 압전 변압기를 채용하여 T5 형광램프의 점등실험을 하였으며, 압전 변압기의 특성해석 및 효율적인 구동과 정확한 주파수 공급을 위하여 PLL (Phase Locked Loop, 위상동기 루프) 방식을 사용하여 연구하였다.

2. 압전 변압기의 등가회로



[그림 1] 압전 변압기의 교류등가회로

압전 변압기의 입력측 전압 $V_{Lr}(t)$ 는 식 (1)과 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{Lr}(t) = V_{Lr} \sin \omega_s t \quad (1)$$

또한 압전 변압기의 출력 단자측의 등가임피던스는 식 (2)으로 표현된다.

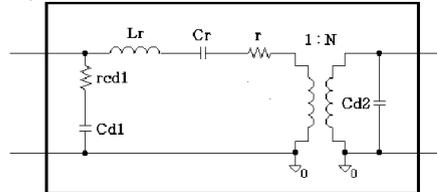
$$R_{EQ} = \frac{\pi^2}{2} R_L \quad (2)$$

그림 1의 교류 등가회로에서 기생저항 r_{cd1} 과 C_{d1} 은 효율의 주파수 특성을 정확하게 나타내기 위해 삽입하였으며, R_{Ls} 와 R_d 는 L_s 의 등가저항이다. 출력전압 V_o 의 반주기 동안의 평균값은 식 (3)으로 표현되며, 승압비 G 는 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$V_o = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi V_2 \sin \omega t \, d\omega t = \frac{V_2}{\pi} \quad (3)$$

$$G = \frac{(1-D)\pi^2}{2 \sin D\pi} \frac{V_o}{V_{in}} \quad (4)$$

그림 2는 압전 변압기의 등가회로이며, 이 회로를 근거로 하여 PSPICE로 라이브러리화 하였다.



[그림 2] 압전 변압기 등가회로

3. 램프 모델링

3.1 CCFL 모델링

CCFL을 점등할 때 방전 개시 전압, 유지 전압, 주파수 및 CCFL의 관 전류와 같은 4가지의 중요한 파라미터가 있다. 휘도는 램프의 동작 주파수 따라 크게 변화하지 않으며 일반적으로 램프의 전류에 의해 결정된다. [6]-[10]

본 논문에서 제시한 CCFL의 실효전압과 전류의 특성은 감광 레벨에서 형광 램프는 부정 임피던스 특성을 가지며, 램프는 2가지 서로 다른 감광 특성을 식 (5)으로 표현했다.

$$V_s = 60.966 + 110.45 \cdot e^{-1.9404 \times I_s} - 48.578 \times e^{-60.182 \times I_s} \quad (5)$$

식 (5)에서 첫 번째 항은 실효 전압과 전류 곡선의 기본적인 값이며, 두 번째항은 부정 임피던스 특성, 세 번째항은 양의 임피던스 특성을 나타낸다.

식 (5)의 파라미터는 최소 제곱근으로부터 유도되며, 고주파수에서 동작하는 저항으로써의 램프를 고려하면 등가임피던스는 식 (6)과 같이 쓸 수 있다.

$$R_{LAMP} = \frac{V_{rms}}{I_{rms}} \quad (6)$$

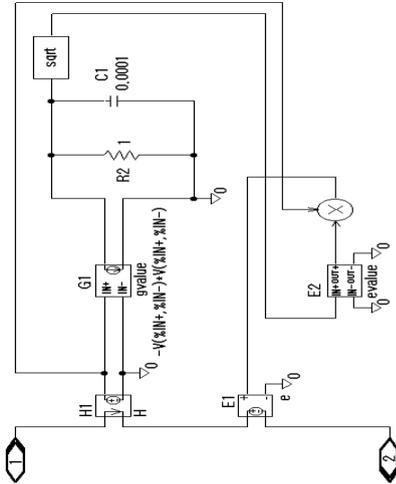
식 (5)과 식 (6)로부터 식 (7)을 구할 수 있다.

$$R_{LAMP} = \frac{60.966 + 110.45 \cdot e^{-1.9404 \times I_s}}{I_s} - \frac{48.578 \times e^{-60.182 \times I_s}}{I_s} \quad (7)$$

이 때 식 (8)와 같이 순시램프 전류 I_t 를 사용 순시램프 전압 V_t 에 대한 식을 구할 수 있다.

$$V_t = R_{LAMP} \times I_t = \left(\frac{60.966 + 110.45 \cdot e^{-1.9404 \times I_s}}{I_s} - \frac{48.578 \times e^{-60.182 \times I_s}}{I_s} \right) \times I_t \quad (8)$$

식 (8)에 의해 CCFL을 모델링 하였으며, 순시전압 V_t 는 순시램프전류 I_t 와 실효전류 I_{rms} 의 함수로써 구할 수 있다.



[그림 3] CCFL의 PSPICE 모델

3.2 형광등 모델링

Cassie와 Mayr 미분 방정식 모델은 에너지 균형 형태의 아크 스트라이킹이나 소호를 결정하는 현상을 이해하는데 유용하다. 이것으로부터 양극기동의 과도 회로 시뮬레이션에 대한 적합한 형태로 Cassie와 Mayr 모델을 수정할 수 있다.

종속 변수인 콘덕턴스 G 의 Cassie 방정식은 식 (9)과

같으며, 전류가 클 때 아크의 동작을 나타낸다.

$$G = \frac{v \cdot i}{E_o^2} - \theta \frac{dG}{dt} \quad (9)$$

여기서, E_o : 아크전압, θ : 아크 시정수,

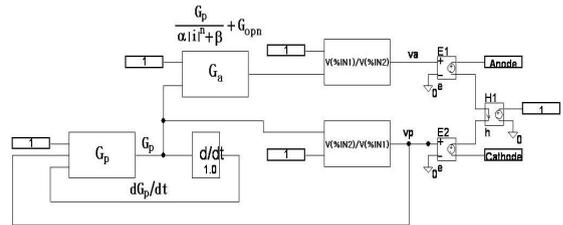
v : 램프전압, i : 램프전류

Mayr 방정식은 식 (10)로 나타내며, 소전류 범위에서 곡선의 동작을 나타낸다.

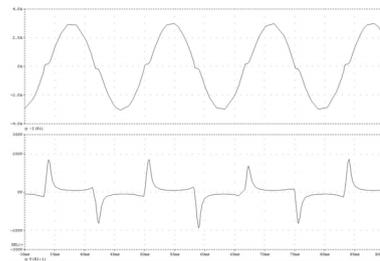
$$G = \frac{i^2}{P_o} - \theta \frac{dG}{dt} \quad (10)$$

여기서, P_o : 전력손실

Mayr 방정식은 0과 낮은 전류 범위에서, Cassie 방정식은 고전압 전류 범위에서 효과적으로 적용된다. 양극 기동은 식(9)과 식(10)에 의해 시뮬레이션을 할 수 있다. 양극강하에서 콘덕턴스는 양극 기동 콘덕턴스 G_p 에 비례하고 역으로 램프 전류 i 의 선형함수와 비례하며 형광등의 아크 모델은 PSPICE로 만들었다.



[그림 4] 형광등의 PSPICE 모델



[그림 5] 60[Hz]에서 램프전류 및 애노드 전압(시뮬레이션)

3.3 무전극 램프 모델링

램프의 임피던스는 고주파수에서 동작할 때 저항으로 볼 수 있으며, 모든 동작점에서 전압과 전류의 유효값과 램프의 임피던스는 옴의 법칙으로 정의 할 수 있다.

$$I_{lamp} = \frac{V_{lamp}}{R_{lamp}} \quad (11)$$

여기서 I_{lamp} : 램프 전류, V_{lamp} : 램프 전압

R_{lamp} : 램프 저항

임피던스와 전류의 관계는 식 (8)와 같다.

$$R_{lamp} = 24.2171 I_{lamp}^{-1.2997} \quad (12)$$

본 논문에서는 S.Ben-Yaakov가 제안한 회로 모델을 이용했다. 램프는 식 (12)에 따라 저항을 계산하기 위해 종속전류원(G_1) 보았다. 종속 전압원 E_1 의 출력은 캐패시터 C_1 에 걸리는 전압의 제공근에 비례한다. 이러한 관계식은 식(13)~(16)이 된다,

그림 5는 식(13)~(16)에 의한 무전극 램프의 모델이며, 그림 7은 이 때의 PSPICE 모델이다.

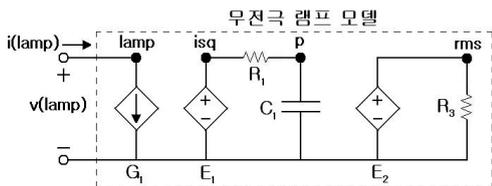
$$G_1 = \frac{V_{lamp}}{R_{lamp}(i(rms))} \quad (13)$$

$$E_1 = i^2(lamp) \quad (14)$$

$$V(p) = \frac{1}{R_1 C_1} \int_0^{R_1 C_1} V(isq) dt \quad (15)$$

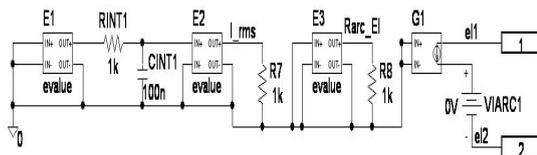
$$= \frac{1}{R_1 C_1} \int_0^{R_1 C_1} i^2(lamp) dt$$

$$i(rms) = \sqrt{V(p)} \quad (16)$$

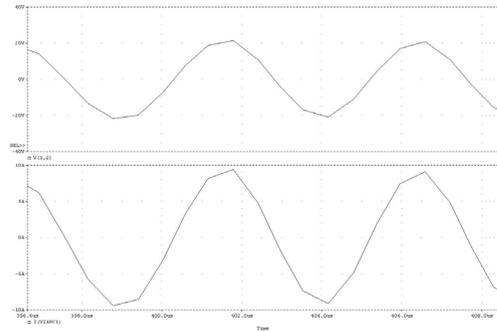


[그림 6] 무전극 램프모델

그림 6은 식 13 ~ 식 16에 의한 무전극 램프의 모델이며, 그림 7은 이 때의 PSPICE 모델이다.그림 8은 이때 램프의 전압 및 전류파형이다.



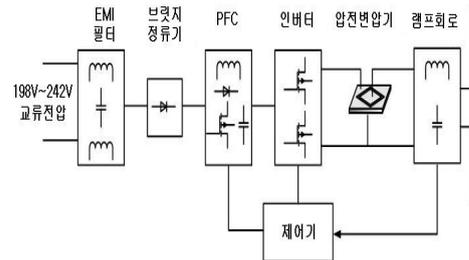
[그림 7] 무전극 램프의 PSPICE 모델



[그림 8] 무전극 램프의 전압 및 전류파형(시뮬레이션)

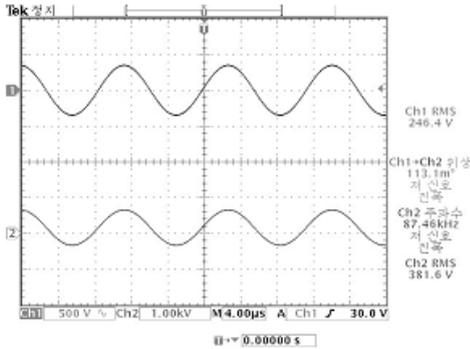
4. 실험결과 및 분석

전체 안정기의 회로는 전원회로부와 컨트롤, 구동회로로 구분되며 전자식 안정기의 그림 9에 나타내었다

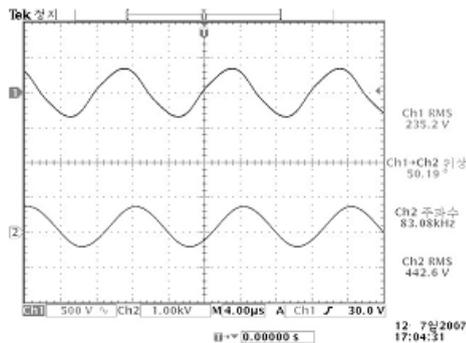


[그림 9] 전자식 안정기의 블록도

역률개선 회로는PFC(Power Factor Correction)IC로 ST사의 L6561을 사용하였다. 위상 고정 루프 PLL(Phase Locked Loop) IC 14046B는 입력된 신호를 기준주파수와 비교하여 특정 위상으로 고정시키는 제어방식이며, 주파수원으로 사용되는 주파수가 흔들리는 것을 고정하기 위해 사용된다. 전자식 안정기는 VCO를 통해 주파수원을 만들어 내지만 출력주파수가 주변 상황에 많은 영향을 받게 된다. 회로적 영향 및 주변 장비의 영향, 온도와 날씨의 영향 등에 의해 출력주파수는 미세하게 흔들려서 다른 주파수로 바뀌게 된다. 전자식 안정기에 특정주파수에서 구동하는 압전 변압기를 적용하자면 2~3[kHz]대역의 특정주파수에서 도 구동이 가능하지만, 적절한 승압비를 갖고 구동하는 주파수 대역은 더욱 좁아지게 된다. 따라서 본 시스템에서 PLL은 주파수원을 흔들리지 않도록 고정해주며 주파수원을 정확하게 가변 해 주는 역할을 한다.



(a) 점등 전 압전 변압기 입·출력 전압 파형 (상: 입력 전압, 하: 출력전압)

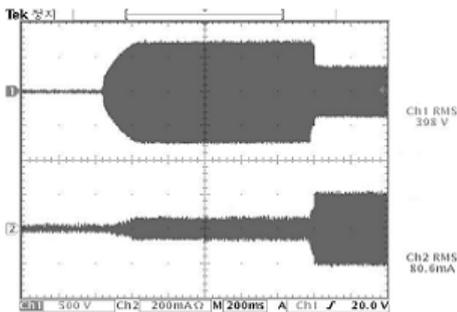


(b) 점등 후 압전 변압기 입·출력 전압 파형 상: 입력 전압, 하: 출력전압

[그림 10] 압전 변압기의 입, 출력 전압 특성

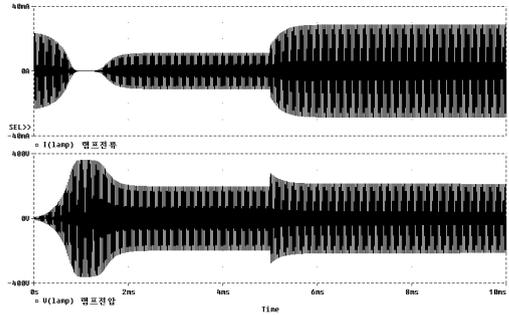
그림 10(a)은 형광등 점등 전, 그림 10(b)는 점등 후의 압전 변압기의 입력과 출력의 전압파형을 나타낸 것으로 PLL동작으로 점등 전에는 위상이 거의 0°에 가깝다가 점등 후에는 50°로 위상이 고정됨을 볼 수 있다.

그림 11은 초기 방전부터 점등까지의 시간과 전압전류 파형을 보여주고 있다. 환경이 작은 T5형광램프의 특성을 고려, 점등예열 시간(약 1s)을 충분히 하여 램프의 전극의 무리가 감소됨을 보여주고 있다



[그림 11] 램프의 점등 특성(상:전압,하:전류)

또한 그림12는 0~5[ms]까지는 저항을 15[kΩ]으로 하고, 5[ms]~10[ms]까지는 저항을 5[kΩ]으로 가변했을 때의 CCFL 전압 및 전류 파형의 시뮬레이션 결과이다.



[그림 12] 램프의 점등 특성(시뮬레이션)

5. 결론

본 논문에서는 램프와 압전 변압기의 PSPICE 모델을 제시했다. 램프모델은 최소 제공근을 이용하여 모델의 파라미터들을 유도하였으며, 압전 변압기는 인버터회로에 적용시켜 램프의 특성을 해석했다.

(1) 압전 변압기는 대칭형 3차 로젠형 등가회로를 이용하여 모델링함으로써 부하조건과 입력전류에 따른 공진특성의 변화를 알 수 있었으며, 만족스러운 결과를 얻을 수 있었다.

(2) T5 형광램프 구동을 위해 제작된 압전 변압기를 이용한 전자식 안정기의 실험을 통하여 형광램프의 점등 특성과 압전 변압기 효율을 증가를 알 수 있었다.

앞으로의 과제는 자고주파용 CCLL의 인버터 설계 및 고출력용 램프의 모델링과 고출력용 압전 변압기의 모델링이 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

- [1] T.Zaitso, O.Ohnishi, T.Inoue, M.Shoyama, T.Ninomiya, F.C.Lee and G.C. Hua, "Piezoelectric Transformer Operating in Thickness Extensional Vibration and Its Application to Switching Converter," IEEE PESC Record, June, 1994.
- [2] S.Kawashima, O.Ohnishi, H.Hakamata,S.TAgami, A.Fukuoka, T.Inoue, and S.Hirose, "Third-Order

- Longitudinal Mode Piezoelectric Ceramic Transformer and Its Application to High-Voltage Power Inverter," IEEE APEC, 1997, pp.568~572.
- [3] T.Zaitso, Y.Fuda, Y.Okabe, T.Ninomiya, S.Hamamura, and M.Katsuno, "New Piezoelectric Transformer Converter for AC Adapter," IEEE APEC, 1997, pp.568-572
- [4] Fukunga, H., Kakehashi. H.,Ogasawara, H., Ohta, Y.,"Effect of Dim- ension on Characteristic of Rosen-Type Piezoelectric Transformer Converter and its Matching Networks,"PESC Record, 1994, pp.607~612
- [5] PJM Smidt and JL Duarte,"Power Neon Lamps Through Piezoelectric Transformers," IEEE PESC '96, June, 1996, Vol.2, pp.310~315
- [6] T.Zaitso, TInoue, O.Ohnishi, and Y.Sasaki, "2 MHz Power Converter with Piezoelectric Ceramic Transformer," IEICE Transactions on Elect ronics. Vol. E77-C, No.2.
- [7] T.Zaitso, O.Ohnishi, T.Inoue, M.Shoyama, T.Ninomiya, F.C.Lee, and G.C.Hua, "Piezoelectric Transformer operating in Thickness Extensional Vibration and Its Application to Switching Converter," IEEE PESC Record. pp.585 -589. June.1994.
- [8] T.Zaitso, T.Shigehisa, M.Shoyama, and T.Ninomiya,"Piezoelectric Transfor- mer Converter with PWM Control, "IEEE APEC'96 Proc., pp.279 - 283, March 1996.
- [9] T.Zaitso, Y.Fuda, Y.Okabe, T.Ninomiya, S.Hamamura, and M.Katsuno. "New piezoelectric Transformer Converter for AC-adapter." IEEE APEC'97 Proc., pp.568-572, March 1997.
- [10] T.Zaitso, T.Ninomiya, and M.Shoyama, "Piezoelectric Transformer Conv- erters with PWM Control," IEICE Transactions on Communications, Vol. E80-B. No.7.

이 창 구(Chang-Goo Lee)

[정회원]



- 1981년 2월 : 전북대학교 전기공학과 학사
- 1991년 2월 : 전북대학교 대학원 전기공학과(공학박사)
- 1983년 3월 ~ 1992년 8월 : 한국전자통신연구원 선임연구원
- 1992년 9월 ~ 현재 : 전북대학교 전자정보공학부 제어계측전공 교수

<관심분야>

지능제어, 홈네트워크, 임베디드시스템

이 해 춘(Hae-Chun Lee)

[정회원]



- 2010년 2월 : 전북대학교 대학원 제어계측공학과 (공학박사)
- 1991년 8월 ~ 현재 : 한국폴리텍Ⅱ대학 인천캠퍼스 전기계측 제어과 제어계측전공 교수

<관심분야>

제어계측, 에너지변환