

조명용 LED의 스위칭 구동 회로로 변조되는 가시광 통신 시스템의 구현

Implementation of Visible Light Communication System Modulated by a Switching Driver Circuit of Lighting LED

조상호 · 한상규 · 노정욱 · 홍성수 · 장병준

Sang-Ho Cho · Sang-Kyoo Han · Chung-Wook Roh · Sung-Soo Hong · Byung-Jun Jang

요 약

본 논문에서는 조명용 LED(Light Emitting Diode)의 스위칭 구동 회로를 이용한 변조 기법으로 조명 기능과 무선 통신 기능을 동시에 수행하는 가시광 통신(VLC: Visible Light Communication) 시스템을 제안하였다. 본 방식은 기존의 선형 영역에서 동작하는 LED 구동 회로를 갖는 가시광 통신 시스템에 비해 고효율이므로 고출력의 조명용 LED 시스템에 적용할 수 있는 장점이 있다. 제안된 시스템의 유용성을 입증하기 위하여 디지털 방식의 오디오 시스템을 채용하여 가시광 통신 시스템을 구현하고, 그 실험 결과를 제시함으로써 제안된 방식의 우수성을 검증하였다. 실험 결과, 제안 회로의 시작품은 특별한 광필터 없이 20 W급 조명을 사용해서 약 1.5 m의 반경에서 최대 10 Mbps의 데이터 전송률을 달성하였다.

Abstract

In this paper, visible light communication(VLC) system modulated by a switching driver circuit of lighting light emitting diode(LED), not only for illumination but also for optical wireless communication, is implemented. Presented system could overcome the drawbacks of prior linear modulation technique such as low efficiency, heat generation, and limits to realization of high power lighting LED. Experimental results from the realized digital audio system are presented to confirm the superiority of the proposed circuit. Our prototype achieves a transmission data rate of 10 Mbps with a radius of 1.5 meters using 20 W output power, and the signals were detected successfully.

Key words : LED, Visible Light Communication, LED Driver, VLC, Switching Modulation, LED Driver

I. 서 론

유무선 통신 및 인터넷 서비스가 일반화되면서 근거리 무선 통신 기술로 LED를 이용한 가시광 통신 기술이 부각되고 있다. 가시광 통신이란 사람의 눈에 보이는 가시광 파장(380~780 nm)을 이용한 통신 방식으로, LED 조명 장치의 점멸을 이용한 송신과 PD(Photo Diode)를 이용한 수신을 기본 원리로 한

다. 특히, 가시광 통신은 통신 수단으로 빛을 사용하기 때문에 조명과 동시에 통신을 할 수 있는 것이 가장 큰 장점이다^{[1],[2]}. 가시광 통신에 사용되는 LED는 형광등과 달리 수은을 사용하지 않아 친환경적이며, 10만 시간 이상의 긴 수명, 백열등에 비해 90 % 이상 전력 효율 향상 등의 장점이 있으며, 특히 전기 신호를 빛으로 변환하는 속도가 약 30~250 ns 이하로 이러한 고속 스위칭 특성을 통신 변조에 활용할

「본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구 결과로 수행되었음(NIPA-2010-C1090-1021-0005)」
국민대학교 전자공학과(Department of Electrical Engineering, Kookmin University)

· 논문 번호 : 20100604-09S

· 교신저자 : 장병준(e-mail : bijjang@kookmin.ac.kr)

· 수정완료일자 : 2010년 8월 9일

수 있어 가시광 통신에 매우 유리하다^[3].

가시광 통신에 사용되는 LED 구동 회로는 일반적으로 고속 스위칭을 위해 LED와 직렬 연결된 스위치를 선형 영역에서 구동시키는 것이 일반적이다^{[4],[5]}. 이러한 선형 방식의 LED 구동 회로는 전력 변환 효율이 낮으며, 이에 따라 발열 등의 문제가 발생할 수 있는 단점이 있다. 또한, 구동 회로를 고속으로 스위칭함에 따른 구현상의 어려움, 휘도 조절(dimming control) 회로와 결합의 어려움 등의 문제가 있다. 따라서 본 논문에서는 가시광 통신을 위한 스위치를 스위칭 영역에서 구동하면서, LED 전류의 고주파 스위칭이 가능한 새로운 방식의 가시광 통신용 LED 드라이버를 제안하였다. 제안 방식은 기존 회로와 같이 LED 전류의 고주파 스위칭이 가능해 높은 데이터 전송률을 달성할 수 있을 뿐만 아니라, 전력 변환 효율이 개선되어 대용량 구동 회로에 쉽게 적용할 수 있다. 또한 제안된 스위칭 변조 기법을 이용한 LED 구동 회로의 타당성을 입증하기 위하여 디지털 오디오 기기를 이용한 가시광 통신 시스템을 구현하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 2장에서는 가시광 통신 시스템의 일반적이 개요 및 기존의 가시광 통신 시스템 구현 방법의 장단점을 기술한다. 3장에서는 제안된 스위칭 변조 방식의 구동 회로의 동작 원리 및 주요 특징을 기술한다. 4장에서 구현된 LED 구동 회로와 상용 디지털 오디오 시스템을 이용한 데모 시스템의 성능을 보이고, 5장에서 결론을 맺는다.

II. 가시광 통신 시스템의 개요

2-1 가시광 통신 시스템의 구성

일반적인 가시광 통신 시스템의 구성은 그림 1과 같다. 가시광 통신 시스템은 크게 송신부와 수신부로 분리되며, 송신부는 전력 변환부와 LED로 구성된다. 전력 변환부는 AC 상용 전원의 고조파 규제를 만족하기 위해서 역률 개선(PFC: Power Factor Correction)을 수행하며, AC 전원의 입력을 LED 구동에 적합한 형태의 DC 전원으로 변환한다. LED 드라이버는 가시광 통신으로 송신할 데이터를 바탕으로 LED를 점멸한다. 이러한 LED 드라이버는 크게 전

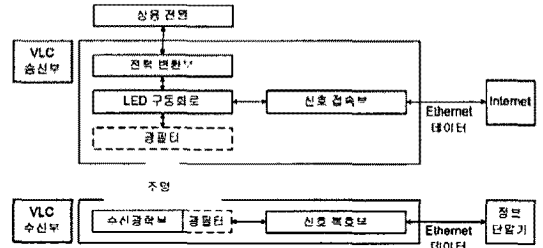


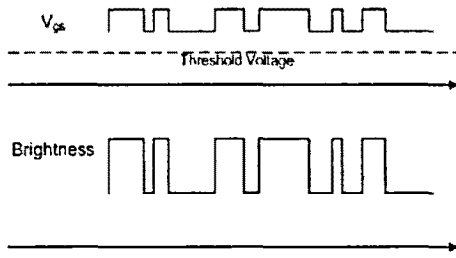
그림 1. 가시광 통신 시스템의 개념도
Fig. 1. Block diagram of VLC system.

압원 구동 및 전류원 구동 방식으로 구분된다. LED를 조명용으로 사용하기 위해서는 다수의 LED를 배열하여 사용해야 하는데, 각각의 LED는 같은 반도체 공정을 사용하였을 경우에도 전압, 전류 특성이 다르다. 또한, LED는 열 폭주 현상을 지닌 소자이기 때문에 정전압 제어를 할 경우, LED에 흐르는 전류는 시간이 지날수록 증가하게 된다. 이러한 LED를 구동하기 위해서는 정전류 방식의 구동 회로가 필요하다. 따라서 조명용 LED를 이용한 가시광 통신에서는 LED 드라이버가 필수적으로 들어가며, 통신 변조를 LED 드라이버를 이용하여 구현하게 된다. 본 논문에서는 이를 구현하기 위해 전압원 구동 방식의 LLC 공진형 컨버터를 적용하였다^[6].

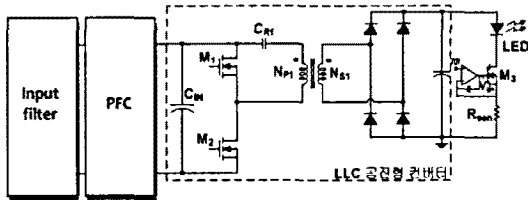
가시광 통신 시스템의 수신부는 크게 PD와 신호 처리부로 구성된다. PD는 LED의 점멸을 통해 수신된 빛을 전기적 신호로 변환하며, 신호처리부는 PD에서 변환된 전기적 신호를 알맞은 형태의 신호로 복조하게 된다.

2-2 선형 방식의 가시광 통신 시스템 구동 회로

가시광 통신에 사용되는 LED 구동 회로는 일반적으로 그림 2와 같은 선형 변조 방식을 사용한다. 그림 2(a)는 가시광 통신 시스템의 동작 원리를 설명하며, 그림 2(b)는 회로로 실제 회로로 구현한 예를 보여 준다. 이러한 회로의 원리는 기본적으로 송신 데이터에 따라 LED 전류를 고속 스위칭하기 위해 LED와 직렬 연결된 스위치 M_3 를 선형 영역에서 구동시킨다. 그러나 기존 회로는 스위치 M_3 를 선형 영역에서 구동함에 따라 LED 드라이버의 전력 변환 효율이 저하되며, 이에 따른 발열 등의 문제로 대응



(a) 동작 원리
(a) Operating principle



(b) 구현된 회로
(b) Implemented circuit

그림 2. 기존 가시광 통신용 LED 드라이버
Fig. 2. Conventional LED driver for VLC.

량의 조명용 LED에 적용하기 어렵다. 또한 통신 시스템의 SNR(Signal to Noise Ratio)이 저하되어 통신 품질의 저하를 가져온다. 기존 회로의 스위치 M_3 를 수 MHz 이상의 주파수로 스위칭 영역에서 동작시킬 경우, 고속으로 스위칭하는 LED 전류의 순시값 제어를 위해서는 전력단을 전송 데이터 대역폭의 3~5 배 정도의 고속 스위칭 주파수로 구동해야 하기 때문에 구현상 한계가 존재한다.

III. 제안된 가시광 통신 시스템

2장에서 설명한 바와 같이 기존의 가시광 통신용 LED 드라이버는 스위치의 선형 영역 구동에 따른 전력 변환 효율 저하 및 대용량의 조명용 LED에 적용하기 어려운 문제점이 있다. 따라서 본 논문에서는 기존 회로의 문제점을 해결하는 새로운 방식의 회로를 제안하고, 이를 이론 및 실험적으로 검증한다.

3-1 제안 LED 드라이버의 동작 원리

본 논문에서 제안하는 가시광 통신용 LED 드라이버를 그림 3에 나타내었으며, LED 드라이버의 전력단은 고효율 및 저가형에 유리한 LLC 공진형 컨버터로 구성하였다.

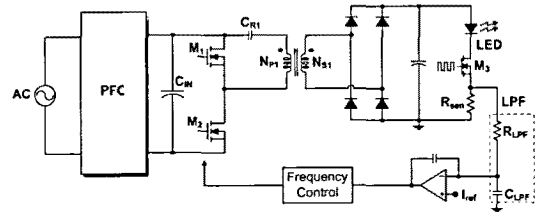


그림 3. 제안 가시광 통신용 LED 드라이버
Fig. 3. Proposed LED driver for VLC.

LED와 직렬 연결된 스위치 M_3 는 스위칭 영역 구동을 통해 LED 전류를 고속으로 스위칭하며, 스위치 M_3 의 턴-온 동작 시에는 LED에 일정 크기의 전류가 도통되어 빛으로 출력되며, 스위치 M_3 의 턴-오프 동작 시에는 LED 전류가 차단된다. 저항 R_{sen} 을 통해 전압의 형태로 검출된 LED 전류값은 저역 통과 필터(LPF)를 통해 LED 전류의 평균치 $\langle I_{LED} \rangle$ 를 검출한다. 검출된 LED 전류의 평균치 $\langle I_{LED} \rangle$ 는 전류 명령 I_{ref} 를 추종하도록 LLC 공진형 컨버터를 펄스 주파수 변조(Pulse Frequency Modulation: PFM)를 통해 제어한다. 만약, LED 전류의 평균치 $\langle I_{LED} \rangle$ 가 전류 명령 I_{ref} 보다 작은 값으로 출력이 되면 드라이버의 전력단인 LLC 공진형 컨버터의 스위치 M_1 과 M_2 는 저속 스위칭을 통해 LED 전류의 평균치 $\langle I_{LED} \rangle$ 를 상승시키며, 반대로 LED 전류의 평균치 $\langle I_{LED} \rangle$ 가 전류 명령 I_{ref} 보다 큰 값으로 출력이 되면 드라이버의 전력단인 LLC 공진형 컨버터의 스위치 M_1 과 M_2 는 고속 스위칭을 통해 LED 전류의 평균치 $\langle I_{LED} \rangle$ 를 감소시킨다. 여기에서 제안 회로는 저역 통과 필터(LPF)를 통해 LED 전류의 순시값이 아닌 평균값을 제어하기 때문에 기존 회로와 달리 전력단의 저속 스위칭 구동이 가능하며, LED 전류의 평균치 제어를 통해 조명 기기의 휘도 조절 또한 가능하다.

3-2 송·수신 데이터의 코딩 기법

본 논문에서 제안하는 가시광 통신용 LED 드라이버를 통해 송·수신하는 데이터는 그림 4와 같은 맨체스터 코딩 기법^[7]을 적용하여 변조하였으며, 그림에서 확인할 수 있듯이 송·수신 데이터의 종류에 관계없이 항상 50%의 시비율(duty cycle)을 보장하는 것을 특징으로 한다.

3-3 제안 VLC 시스템의 수신부

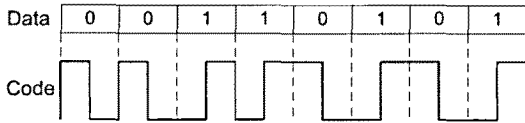


그림 4. 맨체스터 코딩 기법
Fig. 4. Manchester coding technique.

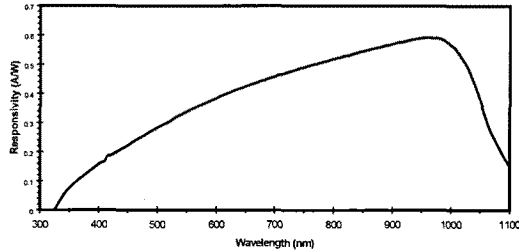


그림 5. PDA36A-EC의 스펙트럼 반응도
Fig. 5. Spectral responsivity of PDA36A-EC.

가시광 통신 시스템의 수신부는 PD와 신호 처리부로 구성되어 있다. PD는 THORLABS사의 PDA-36A-EC를 사용하였으며, PD의 스펙트럼 반응도는 그림 5와 같다. 가시광 대역 파장인 380~780 nm의 스펙트럼 반응도가 큰 PD를 선정하는 것이 가시광 통신에 유리하며, 변환된 전기적 신호를 증폭시킬 수 있는 증폭 회로가 구성되었다. 신호 처리부는 증폭된 전기적 신호를 원신호로 복조하는 역할을 담당한다.

3-4 제안 회로의 조명 및 통신 기능 융합

본 논문에서 제안하는 가시광 통신용 LED 드라이버를 데이터 통신 기능과 더불어 LED 본래의 조명 기능 구현을 위해서는 사용자의 명령에 따른 휘도 조절이 가능해야 한다. 제안 회로의 LED 휘도 조절은 전류 명령인 I_{ref} 전압 가변을 통해 이루어지며, LED 전류의 평균치 $\langle I_{LED} \rangle$ 가 I_{ref} 를 추종하면서 휘도가 조절된다. 이 때, LED 전류의 시비율은 항상 50%로 동작하기 때문에 LED 전류의 최대값은 LED 평균 전류 $\langle I_{LED} \rangle$ 의 2배의 값을 가진다.

3-5 제안 가시광 통신 시스템의 특징

제안 회로는 스위치 M_3 를 스위칭 영역에서 구동하기 때문에 전력 변환 효율 및 발열 특성이 크게 개

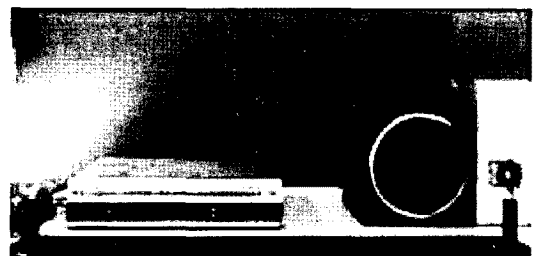
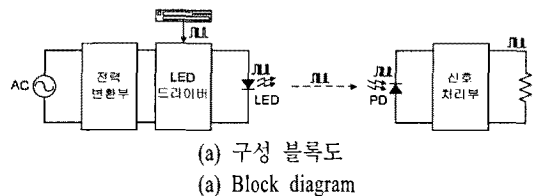
선되어 대용량의 조명용 LED 구동이 가능하고, 통신 시스템의 SNR이 개선되어 통신 품질이 개선된다. 또한, LED 전류의 평균치 제어를 통해 스위치 M_3 의 고속 스위칭에 관계없이 전력단의 저속 스위칭 동작이 가능해 실제 구현 가능성 측면에서 매우 유리하다.

IV. 제안 가시광 통신 시스템의 실험 결과

앞서 고찰된 동작 해석을 바탕으로 그림 6과 같이 무선 통신 오디오 시스템을 제작하였으며, 고찰된 실험 결과를 그림 7에 나타내었다.

AC 상용 전원을 입력받아 PFC단 및 DC/DC 컨버터를 통해 LED 구동에 적합한 DC 전원을 획득한다. LED 드라이버는 DVD 플레이어에서 출력되는 맨체스터 코드를 바탕으로 LED를 점멸한다. 이 때, LED 점멸을 위한 스위치는 스위칭 영역에서 구동함으로써 전력 손실을 최소화할 수 있다. LED의 점멸은 수신단의 PD에 의해 감지되어 전기적 신호로 변환되며, 신호처리부에서 오디오 재생에 적합한 신호로 복조되어 스피커에 입력된다.

그림 7의 첫 번째 파형은 오디오 재생을 위한 송신 데이터로써 맨체스터 코딩 변조를 통해 50%의 시비율이 보장되는 것을 확인할 수 있다. 두 번째 파



(b) 구현 사진
(b) Photograph of implemented system

그림 6. 무선 통신 오디오 시스템
Fig. 6. Wireless communication audio system.

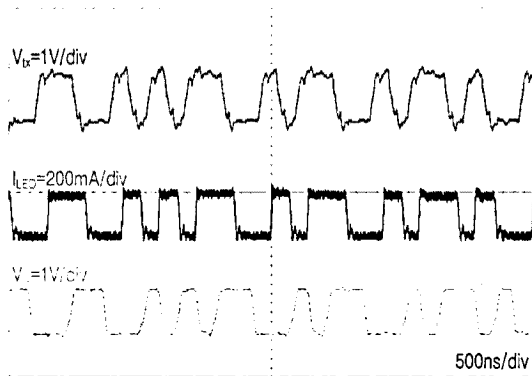


그림 7. 제안 가시광 통신 시스템의 주요 동작 파형
Fig. 7. Key waveforms of proposed VLC system.

형은 송신 데이터에 따라 스위치 M_3 의 스위칭 영역 구동을 통해 도통하는 LED 전류를 나타내었다. LED 평균 전류의 명령을 100 mA로 설정했고, LED 전류의 최대값이 평균 전류 명령의 2배인 200 mA로 제어되는 것을 확인할 수 있다. 세 번째 파형은 PD를 통해 수신된 가시광 신호를 전기적 신호로 복조한 파형으로 약 300 ns의 시간 지연을 가지고, 가시광을 통해 오디오 신호의 통신이 가능함을 확인할 수 있었다. 한편, 송신 데이터의 주파수는 약 4 MHz, LED 드라이버 전력단인 LLC 공진형 컨버터의 구동 주파수는 약 100 kHz로서 LED의 평균 전류 제어를 통해 고속으로 스위칭하는 송신 데이터에 관계없이 전력단의 저속 스위칭 구동이 가능함을 확인하였다.

V. 결 론

본 논문에서는 최근 근거리 무선 통신 기술로 주목 받고 있는 가시광 통신을 위한 LED 드라이버를 제안하였다. 기존 가시광 통신용 LED 드라이버는 스위치의 선형 영역 구동으로 인해 LED 드라이버의 전력 변환 효율이 낮아 조명 장치와 같은 대용량 LED 조명에 적용하기 어려운 문제점이 있다. 이를 해결하기 위해 본 논문에서는 스위치를 스위칭 영역에서 구동하면서, LED 전류의 고주파 스위칭이 가능한 새로운 방식의 가시광 통신용 LED 드라이버를 제안하였다. 제안 방식은 기존 회로와 같이 LED 전류의 고주파 스위칭이 가능해 높은 데이터 전송률을 달성할 뿐 아니라, 전력 변환 효율이 크게 개선되어 대용량 구동 회로에 매우 적합해 LED 본래의 조명

기능에 부가적인 통신 수행이 가능하다.

제안 가시광 통신용 LED 드라이버의 이론적 해석을 통해 실제 무선 통신 오디오 시스템을 구현하여 제안 회로의 우수성과 이론적 분석의 타당성을 검증하였다.

따라서 본 논문에서 제안하는 LED 드라이버는 LED의 고유의 조명 기능에 부가적인 근거리 무선 통신을 수행하는 가시광 통신 시스템에 매우 적합하게 적용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] Y. Tanaka, T. Komine, S. Haruyama, and M. Nakagawa, "Indoor visible light transmission system utilizing white LED lights", *IEICE Trans. on Commun.*, vol. E86-B, no. 8, pp. 2440-2454, Aug. 2003.
- [2] T. Komine, M. Kakagawa, "Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights", *IEEE Trans. on Consumer Electron.*, vol. 50, no. 1, pp. 100-107, Feb. 2004.
- [3] 채균, "LED 응용 제품 개발 및 사례", *전력전자학회지*, 14(3), pp. 36-40. 2009년 6월.
- [4] N. Kumar, N. Lourenco, M. Spiez, and R. Aguiar, "Visible light communication systems conception and VIDAS", *IETE Journal*, vol. 25, issue 6, pp. 359-367. Nov. 2008.
- [5] H. L. Minh, D. O' Brien, G. Faulkner, L. Zeng, K. Lee, D. Jung, and Y. Oh, "High-speed visible light communication using multiple-resonant equalization", *IEEE Photonics Technology*, vol. 20, no. 14, pp. 1243-1245, Jul. 2008.
- [6] B. Lu, W. Liu, Y. Liang, F. C. Lee, and J. D. Van Wyk, "Optimal design methodology for LLC resonant converter", *Applied Power Electronics Conference and Exposition*, pp. 533-538, Mar. 2006.
- [6] K. Inoue, "Waveform distortion in a gain-saturated semiconductor optical amplifier for NRZ and Manchester formats", *Optoelectronics, IEE Proceedings*, vol. 44, issue 6, pp. 433-437, 1997.

조 상 호



2006년 8월: 국민대학교 전자공학과 (공학사)
2006년 8월~현재: 국민대학교 전자공학과 석박사통합과정
[주 관심분야] 전력 회로 해석 및 설계, 에너지-IT 융합 분야

홍 성 수



1984년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학사)
1986년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
1992년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
1992년 7월~1993년 6월: Virginia Polytechnic Institute and State University 방문연구원
1994년 1월~1999년 2월: (주)현대전자정보통신연구소 책임연구원
1996년 1월~1997년 3월: SS/L 인공위성 기술 전수 피교육생
1999년 3월~현재: 국민대학교 전자공학과 부교수
[주 관심분야] 전력 회로 모델링 및 제어, EMI 감쇄 기법, 신재생 에너지, 에너지-IT 융합 분야

한 상 규



1999년 2월: 부산대학교 전기공학과 (공학사)
2001년 2월: 한국과학기술원 전자산학과 (공학석사)
2005년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
2005년 3월~2005년 8월: 한국과학기술원 정보전자연구소 박사후연구원
2005년 9월~현재: 국민대학교 전자공학과 조교수
[주 관심분야] 전력 회로 해석 및 설계, 신재생 에너지, 에너지-IT 융합 분야

장 병 준



1990년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
1992년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
1997년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학박사)
1995년 3월~1999년 1월: LG전자(주) 1999년 1월~2003년 9월: 한국전자통신연구원 무선방송연구소
2003년 10월~2005년 8월: 정보통신연구진흥원
2005년 9월~현재: 국민대학교 전자공학부 부교수
[주 관심분야] RF/마이크로파 회로 및 시스템, 무선 통신 시스템, RFID/USN, 주파수 간섭, 에너지-IT 융합

노 정 욱



1993년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학사)
1995년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
2000년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
2000년 3월~2004년 2월: (주)삼성전자 영상 디스플레이 사업부 책임연구원
2004년 3월~현재: 국민대학교 전자공학과 부교수
[주 관심분야] 전력 회로 해석 및 설계, 신재생 에너지, 에너지-IT 융합 분야