

직류링크전압가변에 의한 무전극램프의 조광제어 안정기 개발

張牧淳*, 林秉魯**, 申東碩**, 李永萬***, 朴鍾演†

Development of a Dimming Ballast for Electrodeless Fluorescent Lamps by Controlling DC-Link Voltage

Mog-Soon Jang, Byoung-Loh Lim, Dong-Seok Shin, Young-Man Lee and Chong-Yeun Park

요 약

본 논문은 무전극램프의 조광제어에 관한 안정기 설계방법을 제안하였다. 주파수 가변을 통한 전력제어는 램프의 등가 임피던스를 나타내는 유도코일간의 결합계수, 플라즈마 저항은 전력에 대한 함수이기 때문에 부적합하다. 따라서 본 논문은 직류링크전압을 가변함으로서 램프 임피던스와 독립적으로 램프의 출력 전력을 제어함으로서 무전극램프를 조광제어 하였다. 직류 링크 전압 가변방법은 벡 컨버터에 의해 제어하였으며, 제안된 설계 방법의 시뮬레이션과 실험 결과를 통하여 논문의 타당함을 증명하였다.

ABSTRACT

This paper presents a new method for designing a ballast that can provide dimming control of an electrodeless fluorescent lamp. Frequency control of lamp power is inappropriate because the lamp coefficients such as equivalent impedance, coupling coefficient of the transformer, and plasma resistance are a function of lamp power. In this paper, the dimming is achieved by controlling the DC_Link voltage in relation to the lamp power. The DC_Link voltage is controlled by a buck converter. Simulation and experimental results of the proposed design method are presented in order to validate the proposed method.

Key Words : Electronic ballast, Electrodeless fluorescent lamp, Resonant Inverter, Class-D Converter

1. 서 론

무전극램프(electrodeless fluorescent lamp, EFL)는 형광등에 비해 수명이 10배 이상이며, 기존 방전등 대비 35%의 에너지 절전효과가 있다. 또한, 아말감 기술

에 의한 친환경적인 장점을 가지고 있어 차세대 산업용 조명으로 수요가 늘어나는 추세이다. 기존의 형광램프와 다르게 가스가 봉입된 벌브 내부에 전극이 없는 대신 외부에 장치된 페라이트 코어에 의해 고주파 자계가 발생하게 된다. 발생된 고주파 자계는 직각방향의 전자유도전계에 의해 전자 유도형 방전인 H방전으로 변환된다. 변환된 전계에 의해 내부의 가스가 여기 되어 자외선을 발생하게 되며, 램프 내면에 도장된 형광물질에 의해서 가시광선을 발생시킨다.^[1]

무전극램프의 모델링 방법은 트랜스포머의 결합계수(k), 턴수 비, 플라즈마저항(R_p)을 구하여 등가모델링을 한다. 그러나 램프의 출력전력 변화 시에는 트랜스

†교신저자 : 강원대 전자전기정보통신공학부 교수

E-mail : cypark@kangwon.ac.kr

*정회원, 올라이트라이프(주) 연구소장

**학생회원, 전기전자공학과 석사과정

***정회원, 비티엘 코리아(주) 대표이사

접수일자 : 2007. 11. 1 1차 심사 : 2007. 11. 25

2차 심사 : 2007. 12. 29 심사완료 : 2008. 2. 1

포머의 결합계수(k)값과 플라즈마저항의 값이 변하게 되는 것을 고려해야한다.^[2] 또한, 램프의 회사에서는 램프의 모델링을 하기 위한 정보를 극히 일부만 제공하고 있어 램프의 모델링을 하는 것은 매우 어려운 실정이다.

무전극램프의 구동회로는 일반적으로 Class-D 인버터를 사용하며, 램프의 구동을 위해서는 임피던스 정합회로가 필요하게 된다. 정합회로는 LC소자에 의한 공진탱크 구조를 사용하며, 이때 램프의 구동을 위해서는 정확한 모델링에 의한 설계가 필요하게 된다.^[3] 또한, 램프의 전력을 가변하기 위해서는 주파수 가변 방식과 직류링크전압가변 방식을 사용되어지는 것으로 알려져 있다. 주파수 가변방식의 경우 선형적 조광제어에 부적합한 제어방법이며, 무전극램프의 조광제어 방식으로는 직류링크전압가변 방식이 매우 적합한 특성을 갖는다.^[4]

본 논문에서는 무전극램프의 광 출력변화에 따른 무전극램프의 모델링을 통하여 직류링크전압가변 시 램프의 계수의 값 변화도 고려하였으며, 직류링크전압과 전력의 관계를 수식적으로 정립하였다. 직류링크전압의 변화에 따른 전력의 변화가 선형적인 관계를 확인하였으며, 실제 직류링크전압을 가변하는 안정기를 제작하여 이론적 타당성을 증명하였다. 또한, 안정기가 KS C IEC 61000-3-2 Class-C의 기준에 적합한지 실험을 통하여 증명하였다.

2. 본 문

본문에서는 무전극램프의 전력변화에 의한 조광제어를 위해 직류링크전압을 가변하는 구조의 방법을 사용하였다. 전력의 변화에 의한 무전극램프의 등가모델링의 값의 변화를 고려하여 직류링크전압의 변화에 따른 무전극램프의 전력변화를 이론적으로 고찰하였다.

2.1 무전극램프용 안정기의 구조

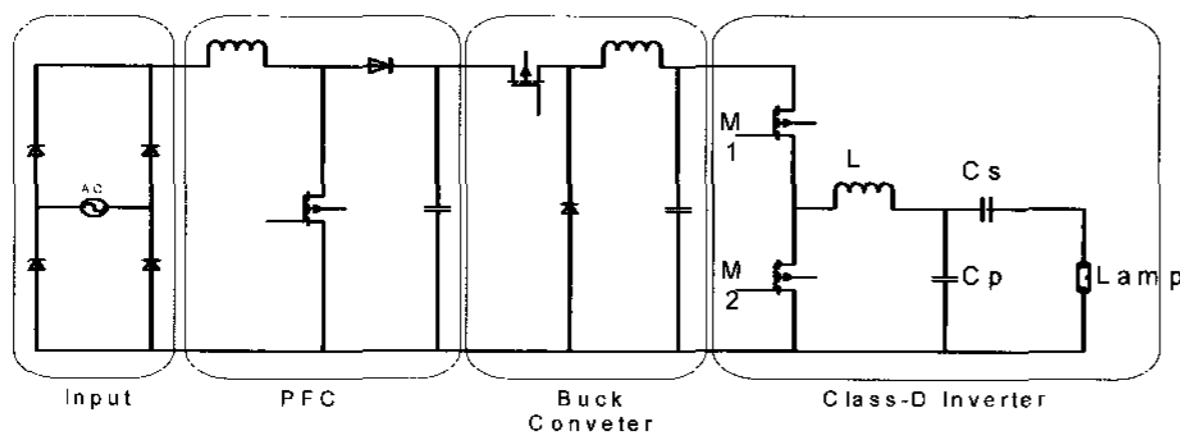


그림 1 전자식 안정기의 구조
Fig. 1 The structure of electronic ballast

무전극램프용 안정기의 구조는 그림 1과 같으며, 크게 3단계로 나뉘어서 설명할 수 있다. 첫 단계는 PFC부분으로 고 역률 및 저 THD 안정기를 실현하는데 필요하며, 일정한 직류링크전압을 만드는데 사용된다. 두 번째 단계는 벡 컨버터로 직류링크전압을 가변하여 램프에 공급되는 전력을 가변하는 회로이다. 마지막 단계는 Class-D 인버터 부분으로 직류링크전압으로부터 교류전압을 만드는 역할을 한다.

무전극램프에 공급되는 전력을 가변하기 위해서는 벡 컨버터의 Duty를 제어함으로, 직류링크전압은 가변할 수 있다. 즉, Class-D 인버터의 공급되는 전압을 가변함으로써 램프에 출력되는 광 출력을 변화하게 만든다.

2.2 무전극램프의 모델링

무전극램프는 정상점등 시에는 전력을 소비하는 저항성분과 페라이트 코어에 의한 인덕턴스 성분으로 등가화 할 수 있다.^{[5],[6]} 이러한 무전극램프의 공급전력에 변화를 줄 경우 램프의 등가저항과 인덕턴스의 성분도 변하게 되며, 무전극램프의 정확한 모델링을 하기 위해서는 등가저항과 인덕턴스 값을 결정하는 결합계수(k), 플라즈마저항(Rp)의 변화를 고려해야 한다.

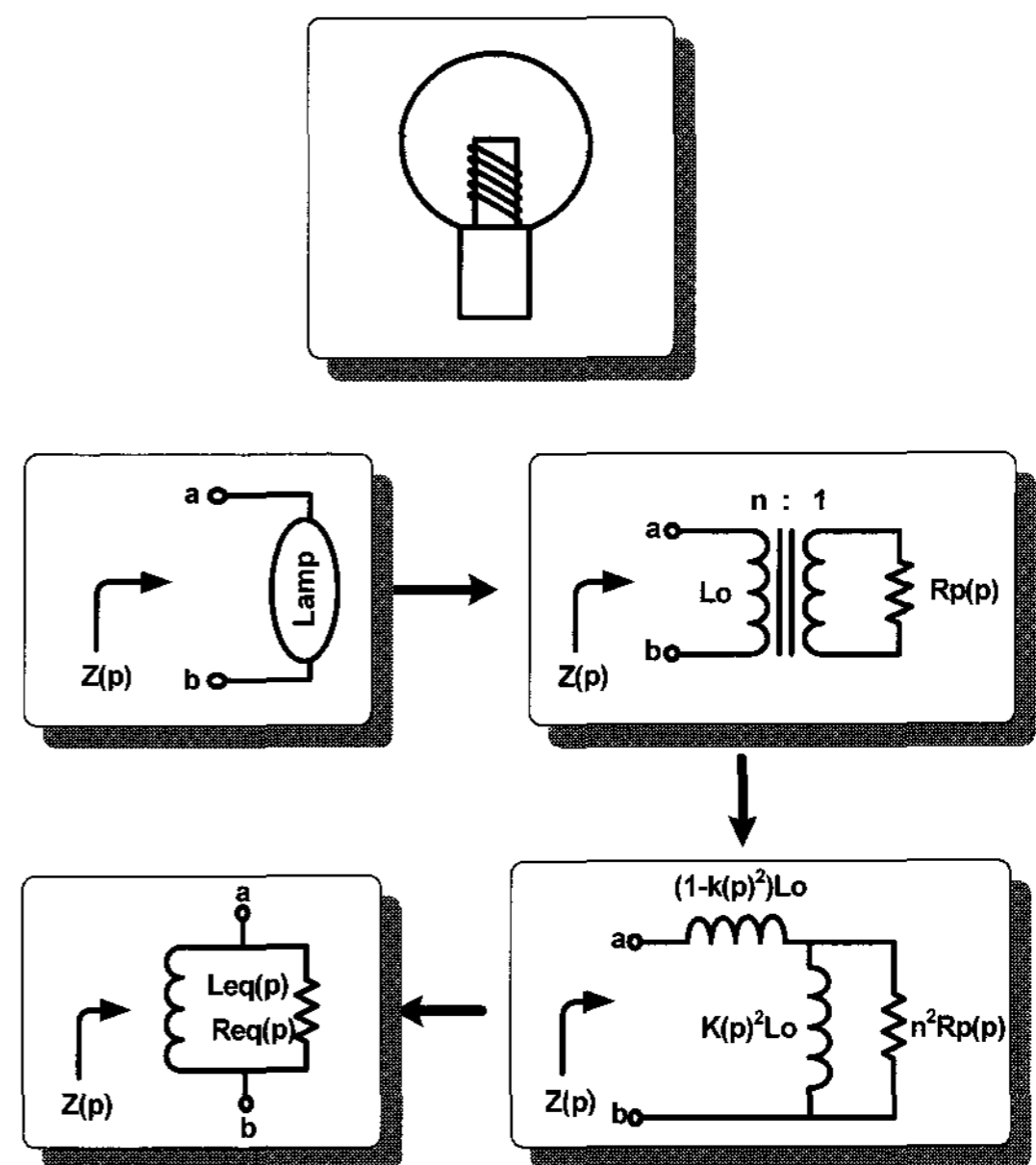


그림 2 무전극램프의 등가모델
Fig. 2 Equivalent circuit of the EFL

무전극램프의 모델링은 그림 2와 같으며, 3단계에

결쳐서 모델링 하였다. 전력변화에 따른 모델링 시 유도코일과 방전관과의 결합계수를 $k(p)$, 방전관의 플라즈마저항은 $R_p(p)$ 의 변화를 고려해야 하며, 유도코일의 권선수의 비를 $n:1$ 로 하였다.^[7]

그림 2에서 전력변화에 대한 전체 임피던스인 $Z(p)$ 은 다음과 같이 표현할 수 있으며,

$$Z(p) = R_1(p) + j\omega L_1(p)$$

전력변화에 따른 $R_1(p)$, $L_1(p)$ 에 대해서 표현하면,

$$R_1(p) = \frac{n^2 R_p(p) k(p)^4 \omega^2 L_o}{n^4 R_p(p) + k(p)^4 \omega^2 L_o^2} \quad (1)$$

$$L_1(p) = \frac{n^4 R_p(p)^2 k(p)^2 L_o}{n^4 R_p(p)^2 + k(p)^4 L_o^2 \omega^2} + (1 - k(p)^2) L_o \quad (2)$$

$R_{eq}(p)$ 와 $L_{eq}(p)$ 을 구하기 위해서 변화하면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{1}{Z(p)} &= \frac{1}{R_{eq}(p)} + \frac{1}{j\omega L_{eq}(p)} \\ &= \frac{1}{R_1(p) + j\omega L_1(p)} \end{aligned}$$

$$R_{eq}(p) = R_1(p) + \frac{\omega^2 L_1(p)^2}{R_1(p)} \quad (3)$$

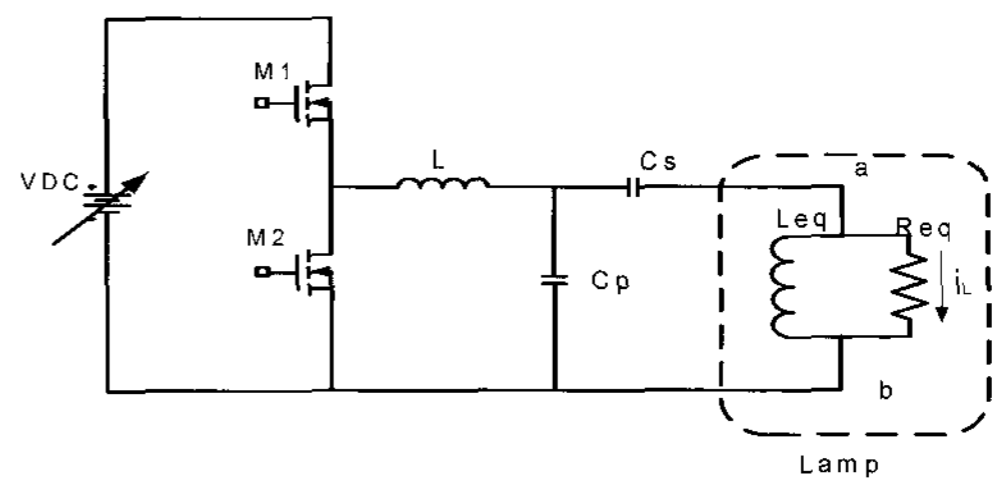
$$L_{eq}(p) = L_1(p) + \frac{R_1(p)^2}{\omega^2 L_1(p)} \quad (4)$$

식(1), 식(2)의 값을 식(3)과 식(4)에 대입하여 등가화 된 저항과 인덕턴스의 관계식을 구할 수 있다. 그러나 램프의 제조회사에서는 유도코일의 턴수비(n), 결합계수(k), 플라즈마 저항(R_p)을 제공하지 않으므로, 임의의 값과 램프의 소비되는 전력으로부터 $R_{eq}(p)$ 와

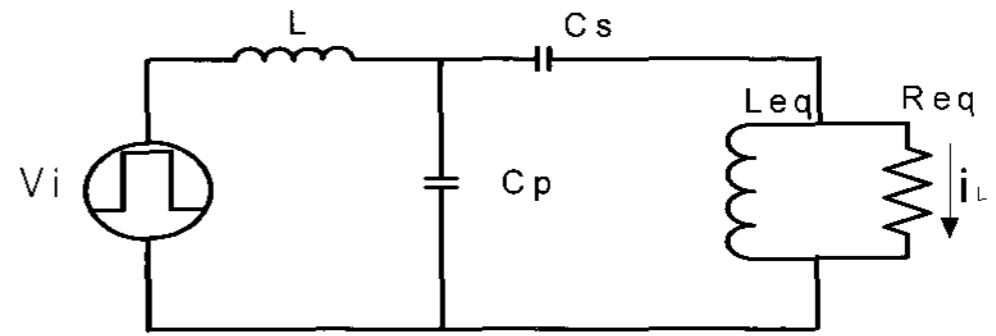
$L_{eq}(p)$ 을 구할 수 있다.^[2]

2.3 조광 제어 방법

본 논문에서는 Class-D 인버터 구조를 사용하였으며, 출력전력 변화를 주기위해서 벡 컨버터를 이용한 직류링크전압을 가변하는 방법으로 구성하였다. 직류링크전압의 변화에 따른 출력 전력의 변화를 알아보기 위해서 그림 3과 같이 등가모델링 하였다.[3][8] 여기서 L , C_p , C_s 의 ESR(Equivalent Series Resistance)는 매우 작으므로 무시할 수 있다.



(a)



(b)

그림 3 (a) Class-D 인버터의 구조 (b) 모델링
Fig. 3 (a) The structure of Class-D inverter
(b) The modeling of Class-D inverter

그림 3은 무전극램프의 모델링 된 회로에 Class-D 인버터를 적용한 구조이며, V_i 는 임피던스정합회로에 입력전압을 의미하며, 램프의 소비 전류는 입력 전류의 기본파 성분만 고려하였다. i_L 에 대한 각주파수의 함수로 구하면, 아래 식(5)와 같이 표현된다.

그리고 램프의 소비되는 전력은 식(6)으로 표현된다.

$$P_{Lamp} = |i_L|^2 R_{eq}(p) \quad (6)$$

$$i_L(\omega) = \frac{V_i \frac{L_{eq}}{C_p}}{-\omega^2 R L L_{eq} + \frac{L R_{eq}}{C_p} + \frac{L R_{eq}}{C_s} + \frac{R_{eq} L_{eq}}{C_p} - \frac{R_{eq}}{\omega^2 C_p C_s} + j \left(\frac{\omega L L_{eq}}{C_p} + \frac{\omega L L_{eq}}{C_s} - \frac{L_{eq}}{\omega C_p C_s} \right)} \quad (5)$$

식(3)과 식(4)는 전력에 관한 함수로 표현되며, 식(6)에 식(5)를 대입하면 출력변화에 대한 램프의 소비 전력을 아래 식(7)과 같이 구할 수 있다.

그림 3의 입력 전압인 V_i 는 식(8)과 같다.

$$V_i = \begin{cases} V_{DC}, & \text{for } 0 < \omega t \leq \pi \\ 0, & \text{for } \pi < \omega t \leq 2\pi \end{cases} \quad (8)$$

램프의 공급되는 전압과 전류는 기본주파수에 대해서만 고려하면 식(9)와 같다.

$$V_{i1} = V_m \sin \omega t \quad (9)$$

식(9)로부터 V_{i1} 의 크기를 구하면 다음과 같다.

$$V_m = \frac{2}{\pi} V_{DC} = 0.6366 V_{DC} \quad (10)$$

식(10)로부터 실효값을 구하면 식(11)과 같다.

$$V_s = \frac{V_m}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} V_{DC} = 0.4502 V_{DC} \quad (11)$$

식(7)에 식(11)을 대입하여 V_{DC} 의 변화에 따른 전력의 변화는 아래 식(12)과 같다. 램프의 소비전력은 광 출력의 변화를 의미한다.

3. 실험 및 결과 검토

본 연구에서 제작된 안정기의 특성을 측정하기 위해서 오실로스코프(Lecroy 6030)과 전력분석기(XITRON 2551)를 사용하였다. 그림 4는 마쯔시다 정공의 'Ever Light 50W' 무전극램프와 구동하기 위해 실제 제작된 안정기 및 실험 장비이다.

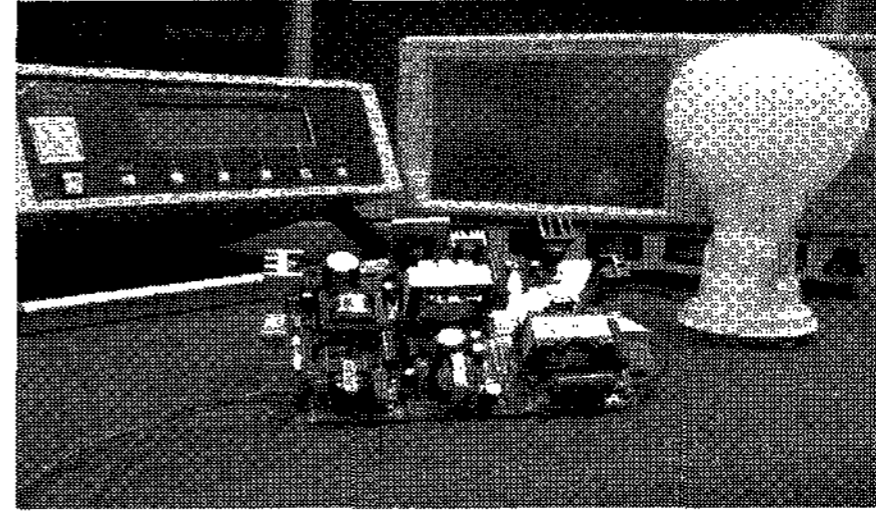
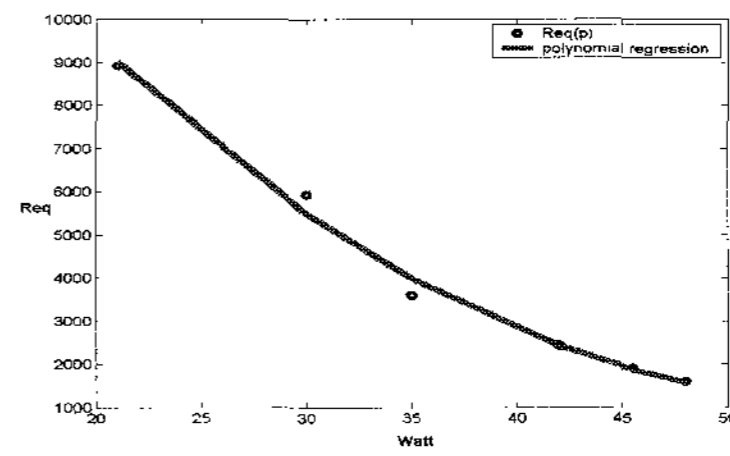
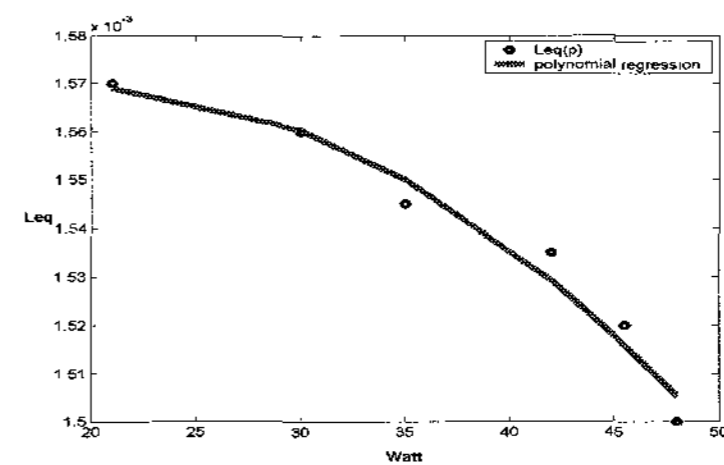


그림 4 실제 제작된 안정기 회로
Fig. 4 Development of the electronic ballast

그림 5는 식(12)로부터 구한 전력변화에 따른 R_{eq} , L_{eq} 의 값이다. 전력변화에 의한 R_{eq} 의 값이 비선형적인 값의 변화를 보여주며 직류링크전압의 변화에 대해서는 선형적인 변화를 보여준다. Class-D 인버터의 소자 값의 결정은 램프의 정격 구동 주파수인 130kHz와 등가임피던스 값과 식(12)에 램프의 전력에 대한 관계식으로부터 구할 수 있으며, L, Cs, Cp의 전력이 램프 (L_{eq} , R_{eq})에 정격구동 주파수에서 전력 변환이 정격 전력이 되도록 설계하였다.^{[9][10]} 표 1은 Class-D 인버터의 소자 값을 표시 하였다.



(a) Power Vs Req



(b) Power Vs Leq

그림 5 전력에 대한 등가임피던스
Fig. 5 The results of equivalent impedance

$$P_{Lamp} = \frac{\left(V_i \frac{L_{eq}(p)}{C_p} \right)^2 R_{eq}(p)}{\left(-\omega^2 R L L_{eq}(p) + \frac{L R_{eq}(p)}{C_p} + \frac{L R_{eq}(p)}{C_s} + \frac{R_{eq}(p) L_{eq}(p)}{C_p} - \frac{R_{eq}(p)}{\omega^2 C_p C_s} \right)^2 + \left(\frac{\omega L L_{eq}(p)}{C_p} + \frac{\omega L L_{eq}(p)}{C_s} - \frac{L_{eq}(p)}{\omega C_p C_s} \right)^2} \quad (7)$$

$$P_{Lamp} = \frac{\left(\frac{\sqrt{2}}{\pi} V_{DC} \frac{L_{eq}(p)}{C_p} \right)^2 R_{eq}(p)}{\left(-\omega^2 R L L_{eq}(p) + \frac{L R_{eq}(p)}{C_p} + \frac{L R_{eq}(p)}{C_s} + \frac{R_{eq}(p) L_{eq}(p)}{C_p} - \frac{R_{eq}(p)}{\omega^2 C_p C_s} \right)^2 + \left(\frac{\omega L L_{eq}(p)}{C_p} + \frac{\omega L L_{eq}(p)}{C_s} - \frac{L_{eq}(p)}{\omega C_p C_s} \right)^2} \quad (12)$$

표 1 Class-D 인버터의 소자 값

Table 1 The element values of Class-D inverter

	Ever Light 50W
램프의 정격 구동 주파수	130kHz
램프의 일차측 인덕턴스(L_o)	160uH
L	483uH
C_s	0.0185uF
C_p	0.022uF

무전극램프의 광 출력을 변화하기 위해서는 벽 컨버터의 직류 링크 전압을 가변하였다. 연구에서 사용된 방법은 PWM IC(TL 494)를 이용하였으며, 마이크로컨트롤러를 이용하여 Duty를 제어하여 직류 링크 전압을 가변 시켰다. 그리고 Class-D 인버터의 스위칭 소자는 IRF830A를 사용하여 제작하였다.

제작된 무전극램프용 안정기의 출력전력 변화에 따른 특성을 측정하였으며, 표 2에 정리하였다.

표 2 무전극 램프 특성 실험 결과

Table 2 Shows the experimental result of the EFL

DC Link [V]	입력 전압 [V]	입력 전류 [mA]	역률	전류 THD [%]	램프 전압 [V]	램프 전류 [A]	램프 전력 [W]	조도 백분율 [%]
339	207	243	0.99	10.10	261.3	1.963	44	100
308	207	229	0.99	10.30	268.2	2.009	41	83
258	205	208	0.99	10.90	285.9	2.131	35	64
218	204	189	0.99	11.60	313.3	2.336	31	46
167	205	165	0.99	12.30	343.0	2.559	25	30
137	204	144	0.98	13.30	347.6	2.801	20	20

표2는 무전극램프의 조도변화에 따른 입력전력특성 및 램프에 공급되는 출력 전력 특성을 정리하였으며, 그림 6는 입력의 전력의 변화에도 차수별 고조파의 함유율은 KS C IEC 61000-3-2 Class-C의 규격에 적합함을 보여준다. 또한, 전력의 변화에도 역률은 0.98 이상을 유지하였으며, THD도 고조파 함유율이 약 20% 이하를 유지하는 것을 알 수가 있으며, 제작된 안정기는 KS C IEC 61000-3-2 Class-C의 조건에 만족하도록 설계하였다.

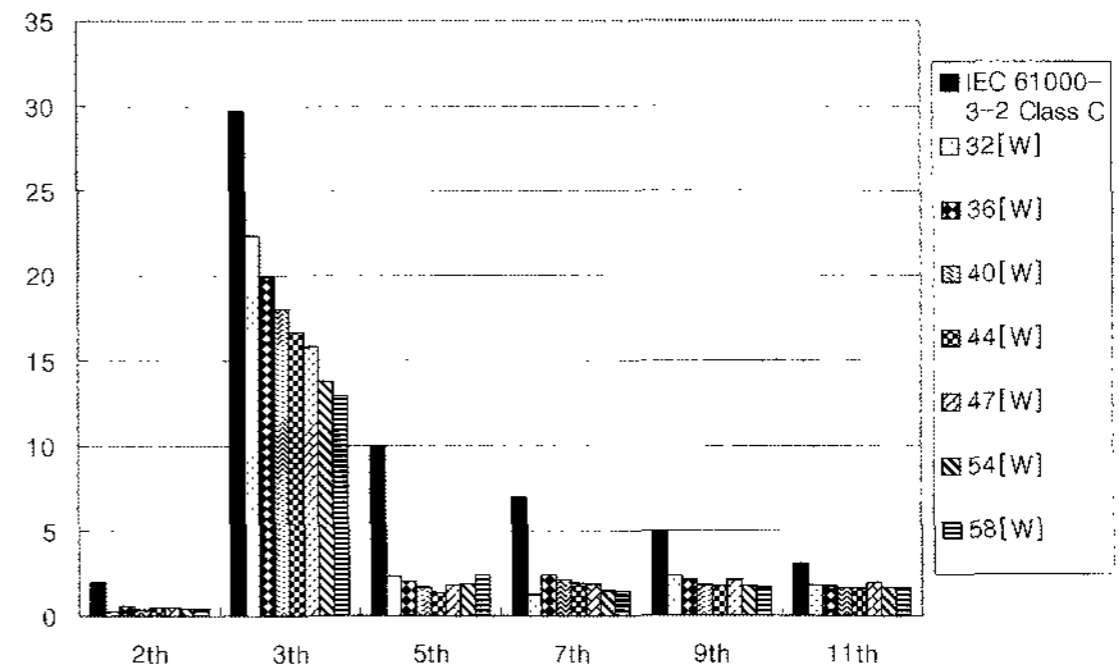


그림 6 측정된 입력 전류의 고조파

Fig. 6 Measured input current harmonic

그림 7은 직류링크전압 변화에 의한 전력의 변화가 선형적인 것을 알 수 있으며, 시뮬레이션의 결과와 일치하는 것을 보여주며 시뮬레이션 결과 값이 타당함을 보여준다.

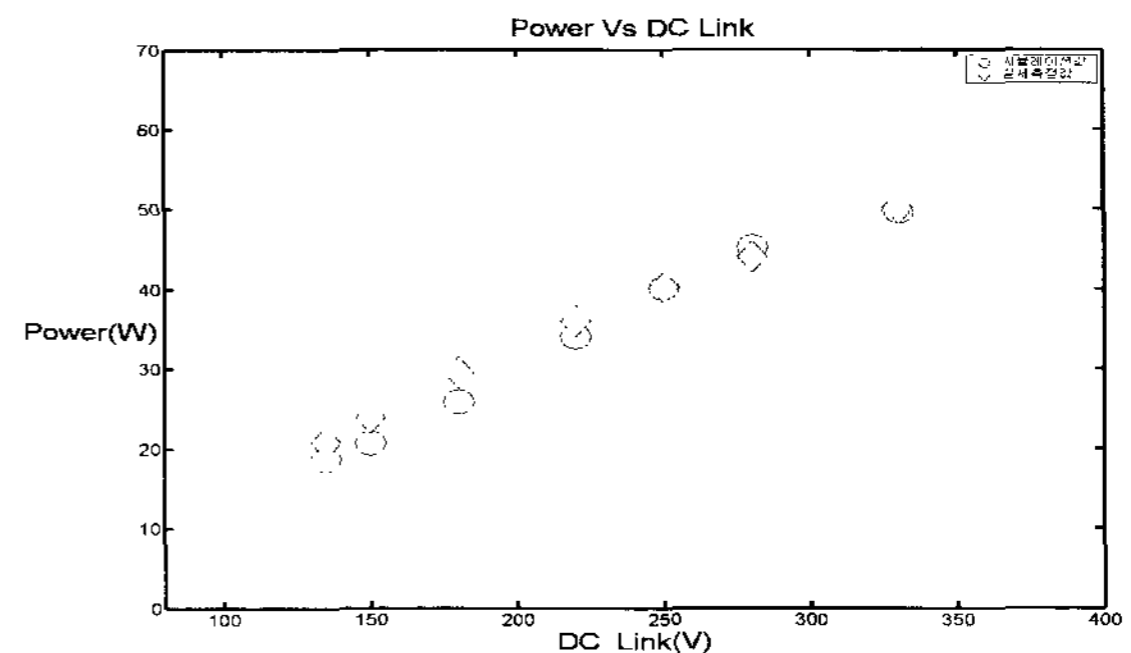


그림 7 출력전력 Vs 직류링크전압

Fig. 7 Power Vs DC_Link

그림 8은 전력변화에 따른 무전극램프의 조광 상태이며, (a)의 경우 최대출력이며, (b)의 경우 50%이며, (c)는 20%의 조도 상태이다.

4. 결 론

본 논문에서는 무전극램프의 출력전력변화에 따른 등가모델링을 구하였으며, 실제 안정기를 제작하였다. 출력전력과 직류 링크전압의 관계를 이론적으로 설명하였다. 또한, 출력전력변화에도 안정기의 고조파 특성이 IEC 61000-3-2 Class-C의 기준에 적합하도록 설계하였다.

무전극램프의 경우 출력전력변화에 따라 $R_{eq}(p)$ 와 $L_{eq}(p)$ 값이 변하게 되며, 선형적인 광 출력 변화를

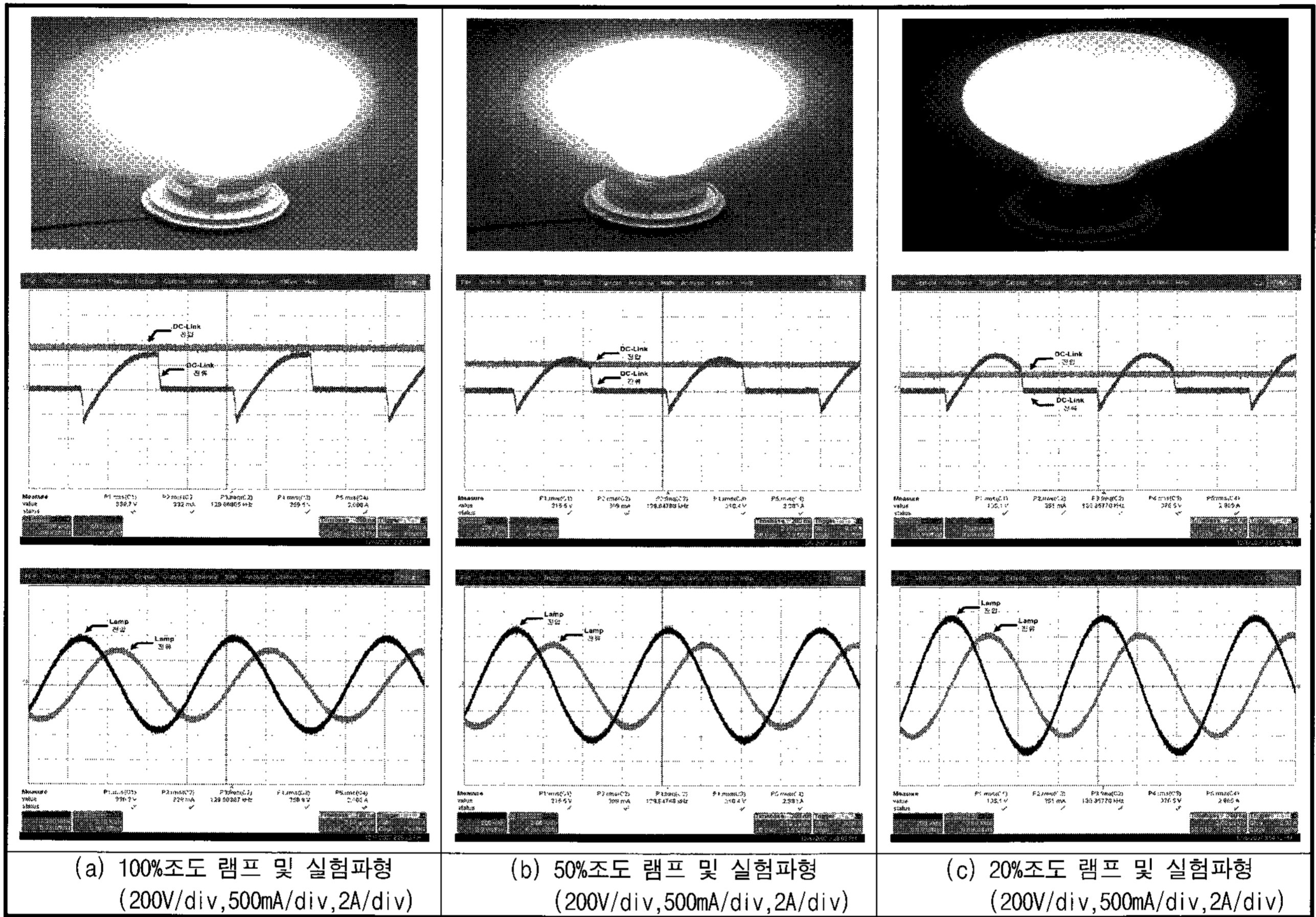


그림 8 전력변화에 따른 조광상태
 Fig 8 Variations in luminescence according to the variation of the power

위해서는 직류링크전압 가변 방법이 가장 적합함을 확인하였다. 제작된 안정기는 백 컨버터를 사용하여 직류링크전압을 350V~100V까지 제어하도록 설계하였으며, 마이크로컨트롤러를 이용하여 PWM의 Duty를 제어하였다. 또한, 직류링크전압의 변화에 따른 조도특성은 100%~25%까지 제어가 가능하였으며, 그 이하의 상태에서는 빛 떨림 현상이 발생하였다.

제안된 방법의 의해서 직류 링크전압과 출력의 관계로부터 무전극램프의 광 출력특성을 분석하였으며, 조도조절가능한 안정기의 설계시의 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 올라이트라이프(주)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

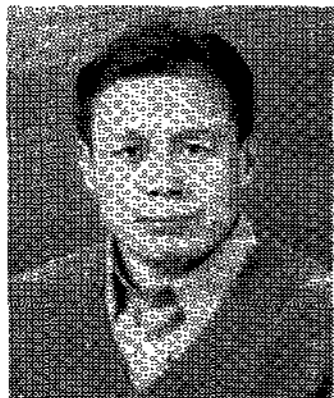
참 고 문 헌

- [1] B. Cook, "New developments and future trends in high efficiency lighting" *Journal of Engineering Science and Education*, pp. 207-217
- [2] 임병노, 장목순, 신동석, 박종연, "무전극램프의 출력전력 변화에 따른 새로운 모델링 기법", *대한전기학회 논문지*, Vol. 56, No. 9, pp. 1626-1631, 2007. 9.
- [3] Louis Robert Nerone, "Design of a 2.5-Mhz, Soft-Switching, Class-D converter for Electrodeless Lighting", *IEEE Transactions on power electronics*, Vol. 12, No. 3, pp. 507-516, 1997, May.
- [4] 장태은, "무전극 램프용 전자식 안정기에 관한 연구", 석사학위논문, 2006. 3.
- [5] Ben-Yaakov, S. Shvartsas, M., "A Behavioral SPICE Compatible Model of and Electrodeless Fluorescent Lamp", *IEEE APEC2002*, pp. 948-954, 2002, March.
- [6] Lousi R. Nerone, A. Haq Qureshi, "Mathematical modeling and optimization of the electrodeless,

low-pressure, discharge system" in 24th Annu. *IEEE Power Elec. Specialist Conf.*, Univ. Washington, Seattle, pp. 509-514, 1993.

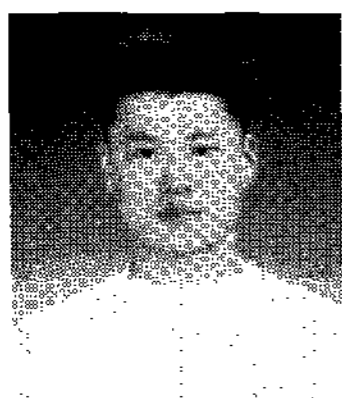
- [7] Kyu-Min Cho, Won-Seok Oh, Jae-Eul Yeon, Hee-Jun Kim, "A Novel Average Burst-Duty Control Method for the Dimming of Induction Lamps", *Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, 2006. SPEEDAM 2006. International Symposium on May, 23rd-26th, pp. 897-902, 2006.
- [8] Miyazaki, H., Shoji, H., Namura, Y., "High-frequency class-D converter driving with feedback capacitors for electrodeless fluorescent lamps", *Industry Applications, IEEE Transactions on* Vol. 36, No. 4, pp. 1033-1038, 2000, July/Aug.
- [9] 박종연, 장목순, 임병노, "HID 램프를 위한 전자식 안정기의 LCC 공진 인버터의 최적 설계", *대한전기학회 논문지*, Vol. 56, No. 3, pp. 531-537, 2007. 3.
- [9] Branas. C., Azcondo F. J., Bracho S., "Design of LCpCs Resonant Inverters as a Power Source for HID Lamp Ballast Applications", *Industry Applications, IEEE Transactions on* Vol. 41, No. 6, pp. 1584-1593, 2005. Nov./Dec.

저 자 소 개



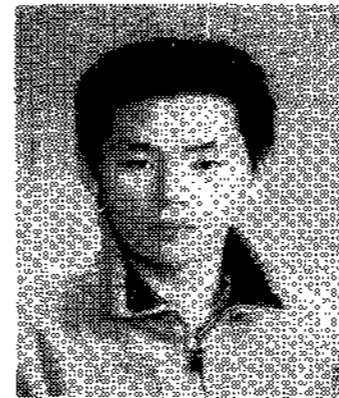
장목순(張牧淳)

1966년 10월 25일생. 1992년 강원대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1998년~2005년 University of Toronto, Electric Power Group 선임 연구원. 2006년~현재 강원대 전기공학과 강사. 올라이트라이프(주) 연구소장.



임병로(林秉魯)

1978년 11월 18일생. 2002년 안양과학대 전기제어과 졸업. 2001년~2004년 (주)ADG 선임 연구원. 2006년 한림대 전자과 졸업. 2006년~현재 강원대 대학원 전기전자공학과 석사과정.



신동석(申東碩)

1985년 2월 22일생. 2007년 강원대 전기전자공학과 졸업. 2007년~현재 동 대학원 전기전자공학과 석사과정.



이영만(李永萬)

1976년 5월 19일생. 2002년 강원대 전기공학과 졸업. 2003년~2005년 올라이트라이프(주) 부설연구소 선임연구원. 2006년~2007년 올라이트라이프(주) 부설연구소 부소장. 2008년~현재 비티엘 코리아(주) 대표이사.



박종연(朴鍾演)

1951년 2월 23일생. 1973년 고려대 전자공학과 졸업. 1980년 경북대 대학원 졸업(석사). 1984년 동 대학원 졸업(공박). 1973년~1977년 KIST 연구원. 1977년~1984년 울산대 공대 조교수, 부교수. 1984년~현재 강원대 IT특성화대학 전기전자정보통신공학부 교수.