

세라믹 MHL 의 컨덕턴스 모델을 이용한 전자식 안정기 설계

Electronic Ballast Design for Ceramic MHL by using Its Conductance Model

박 중 연* 신 동 석**
Park, Chong-Yeon Shin, Dong-Seok

Abstract

This paper presents the conductance model at high frequency of the Ceramic Metal Halide Lamp and the designing method of the electronic ballast with the LCC resonant tank type by using that model.

Conductance model is based on a physical phenomenon in the discharge tube of the lamp and model constants of conductance model are obtained by Least Squares Method. After equivalent impedances are determined by the conductance model, The LCC resonance tank is designed by using the equation of the lamp power.

Simulation result using PSpice software and experimental results show that the conductance model in this paper is very useful to design the electronic ballast at high frequency for the Ceramic Metal Halide Lamps.

키워드 : 세라믹 메탈할라이드 램프, 안정기, 컨덕턴스 모델
Keywords : ceramic metal halide lamp, ballast, conductance model

1. 서론

세라믹 메탈 램프는 메탈헬라이드 램프의 아크 튜브에 석영관을 대신하여 세라믹(Ceramic)을 사용한 램프이다. 세라믹 메탈 램프는 기존의 메탈헬라이드 램프에 비해 광 효율 및 연색성, 광속 유지를 측면에서 우수한 특성을 갖고 있기 때문에 메탈헬라이드 램프를 대체할 새로운 광원으로 부각되고 있다.[1]

메탈헬라이드 램프를 위한 전형적인 전자식 안정기의 구조는 공진형 인버터이다. 이 구조는 공진 필터 회로와 Half Bridge 또는 Full Bridge 구조를

갖는 고주파 인버터이며, 정현 고주파 전압을 램프에 인가하고 램프 전류를 제어하는 역할을 한다.[2][3] 이러한 공진 탱크회로는 직렬 LC, 병렬 LC, 또는 직, 병렬의 LCC회로가 있다. 몇몇 논문에서 각 인버터에 대한 비교특성을 발표하였으며,[4][5] LCC 공진 인버터가 메탈헬라이드와 같은 HID 램프의 동작을 위해서 가장 우수한 특성을 갖는 것으로 발표되었다.[6]

LCC 공진 인버터는 전압 이득이 크고 비교적 낮은 입력 전류를 가지며, 입력과 부하에 대한 낮은 민감도를 가진다.[6] 그러나 이러한 고주파수 동작은 특정 주파수 대역에서 램프의 물리적인 구조로 인한 음향공명이 발생하여 아크 튜브의 파괴를 유발할 뿐 아니라 심한 경우 아크 튜브의 파괴를 가져올 수 있다.[7] 이러한 음향공명 현상을 피하는 방법으로는 200kHz 이상의 고주파로 동작시키거나, 200kHz 이하의 주파수 대역에서 음향공명

* 강원대학교 전기전자공학전공 교수, 공학박사, 교신 저자

** 강원대학교 대학원 전기전자전공, 석사과정

이 발생하지 않는 대역을 계산하여 이 대역 내에서 동작시키는 방법이 있다. 200kHz 이상의 고주파 동작은 스위칭 손실이 커지게 되며 특히 대용량인 경우 스위칭 소자의 부담이 커져서 바람직하지 않다.

본 논문에서는 램프의 물리적 현상에 기초한 컨덕턴스 모델[13]을 통해 공진 인버터의 LCC 값을 설계하는 방법을 제안 하였으며, 동작 주파수는 스위칭 손실을 최소로 하는 주파수 대역을 계산하여 이 대역 내에서 램프가 정격전력으로 동작하도록 결정하였다. 또한, 실험을 통하여 설계 방법의 타당함을 증명하였다.

2. 램프의 컨덕턴스 모델링

램프의 컨덕턴스 모델 $G(t)$ 는 방전관 내부의 플라즈마에 대한 물리적인 현상을 가정하여 수식으로 구할 수 있다.

2.1 램프의 컨덕턴스 모델 상수의 식별

램프의 컨덕턴스 모델 $G(t)$ 는 방전관 내부 Arc에 의한 자유전자의 변화량을 물리적인 가정을 통하여 나타낸다[8]-[12]. 기본적인 가정은 방전관 내부의 자유전자의 변화량은 방전관 내부에서 생성되는 자유 전자의 양과 방전 내부에서의 자유 전자 손실의 양을 더한 것과 같다는 것이며, 이 가정으로부터 얻어낸 최종 램프의 컨덕턴스 모델 $G(t)$ 는 식 (1)과 같다.[13]

$$\frac{dG(t)}{dt} = \frac{A \cdot i^2(t)}{G(t)} - B \cdot G(t) - C \cdot e^{D \cdot G(t)} \quad (1)$$

식 (1)에서 모델 상수 A, B, C, D는 측정된 램프의 전류 $i(t)$ 와 램프의 전압 $v(t)$ 를 이용하여 비선형 보간법으로 추정할 수 있다.

모델 상수는 다음과 같은 단계로 구할 수 있다.

Step 1 :

미분 방정식인 식 (1)을 Euler's Implicit 방법을 사용하여 대수적인 수식 식 (2)로 근사화 한다.

Step 2 :

$v(t_n)$, $i(t_n)$, $G(t_n) = i(t_n)/v(t_n)$ 는 Oscilloscope로 램프의 파형을 측정하여 얻는다. 실험을 하여본 결과 램프 Data $v(t_n)$, $i(t_n)$, $G(t_n)$ 는 램프 정현파의 최소 10주기 이상을 측정한 Data가

되어야 목적에 근접한 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 본 논문에서는 좀 더 정확한 결과를 위하여 램프 Data 측정 주기를 30주기로 하였다.

Step 3 :

최소자승 근사법을 이용하여 모델 상수 A, B, C, D를 구한다. 최소자승 근사법은 식 (2)에 램프의 전압 $v(t_n)$ 과 램프의 전류 $i(t_n)$, 컨덕턴스 $G(t_n)$ 를 대입하였을 때 식 (2)의 좌변과 우변의 오차가 가장 작은 A, B, C, D를 구하는 것이다. 램프의 Data와 램프의 모델링 상수의 관계는 비선형적이다. 이런 비선형적인 관계는 Matlab의 함수에 Isqnonlin 함수를 사용하여 모델링 상수를 구한다.

2.2 램프의 컨덕턴스 모델 표현

본 논문에서는 200W Ceramic MHL 램프를 30kHz의 구동주파수로 구동시켜 램프의 전압과 전류를 측정하였으며, 이 측정된 Data를 최소자승 근사법을 적용하여 모델 상수 A, B, C, D를 구하였다. 표 1은 Matlab으로 구한 200W Ceramic MHL의 모델 상수를 나타낸다.

표 1. 200W Ceramic MHL의 모델 상수

A	B	C	D
0.14156	14417	455.24	116.3

그림 1은 컨덕턴스 모델인 식 (1)을 시뮬레이션하기 위해 PSpice로 구현한 컨덕턴스 모델이다. PSpice의 ABM(Analog Behavioral Modeling)소자인 덧셈기, 곱셈기, 수식, 상수를 이용하여 식 (1)을 구현하였으며, 이 구현된 수식 (1)을 적분기로 적분하여 컨덕턴스 $G(t)$ 를 구할 수 있다.

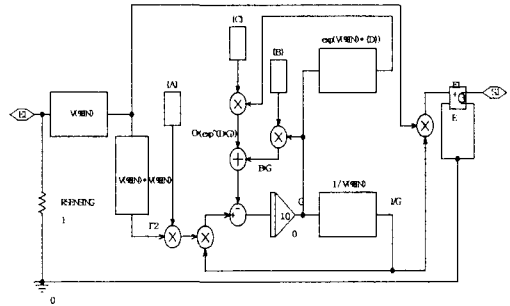


그림 1. PSpice를 이용한 램프의 컨덕턴스 모델

$$\frac{G(t_n - t_{n-1})}{t_n - t_{n-1}} = \frac{A \cdot i^2(t_n)}{G(t_n)} - B \cdot G(t_n) - C \cdot e^{D \cdot G(t_n)} \quad (2)$$

2.3 램프의 컨덕턴스 시뮬레이션

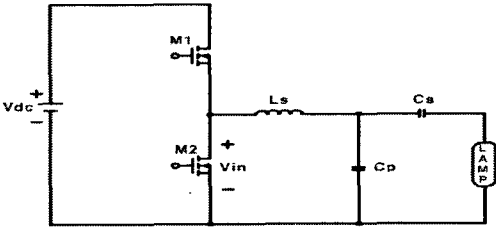


그림 2. Half-Bridge LCC 공진 인버터의 구조

그림 2는 Ceramic MHL의 관 전압과 관 전류를 측정하기 위해 Half-Bridge LCC 공진 인버터를 사용한 실험 세트이다. LCC 공진필터는 램프를 단순히 정격전압과 정격전류에 의해 계산된 등가저항으로 설계하여 얻어진 값으로[14], $L_s = 470[\mu F]$, $C_p = 1[\mu F]$, $C_s = 1.5[\mu F]$ 으로 구성하였다.

표 1의 램프의 모델 상수를 그림 1의 컨덕턴스 모델에 대입하여 PSpice Software로 램프의 컨덕턴스 모델을 계산하면 그림 3과 같은 램프의 컨덕턴스를 얻을 수 있다.

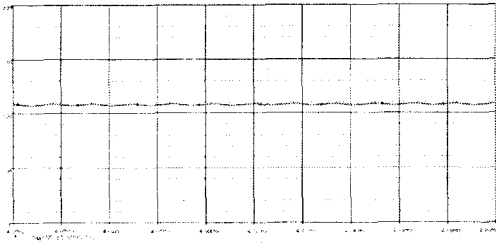


그림 3. 계산된 Ceramic Lamp의 컨덕턴스 모델

램프의 컨덕턴스 모델을 사용하여 시뮬레이션 하여 램프의 관 전압과 관 전류 파형, 램프의 저항 성분 $R(t) = dv(t)/di(t)$ 를 그림 4와 같이 구할 수 있다. 저항 성분 $R(t)$ 에서 peak를 보이는 부분은 전압의 변화량보다 전류의 변화량이 더 작기 때문에 나타난다.

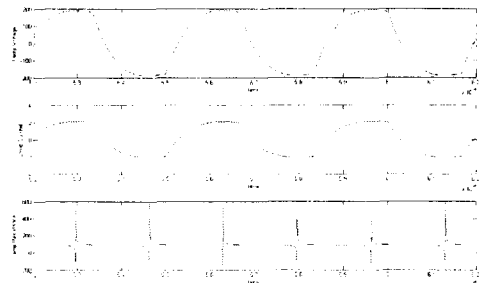


그림 4. 계산된 램프의 저항 성분

그림 4에서 램프의 저항 성분은 평균 93[Ohm]이며, 최대 580[Ohm]과 최소 -230[Ohm]의 부정 저항 성분이 나타남을 알 수 있다. 그러나 램프의 최대, 최소의 저항 성분이 나타나는 시간은 매우 짧은 시간 나타나기 때문에 램프를 평균 저항으로 등가 할 수 있다. 또, 램프가 최대 저항 또는 최소 저항일 때 구동 주파수 30kHz에서의 LCC 공진 필터의 전체 임피던스는 각각 $(5.63e+02) + (6.78e+00)i$, $(-1.68e+02) + (7.61e+01)i$ 이다. 따라서 인버터로 흐르는 전류는 전압보다 위상이 느림으로 안정된 시스템임을 확인할 수 있다.

3. 램프의 음향공명 주파수 대역

논문 [15]에 의해서 200W Ceramic MHL의 음향 공명 주파수 대역을 계산하면 그림 5와 같다. 그림 5에서 나타낸 것처럼 28[kHz]에서 40[kHz] 내에서 음향 공명이 비교적 적은 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 음향 공명 주파수 대역을 피하여 램프의 구동 주파수를 30[kHz]로 결정하였다.

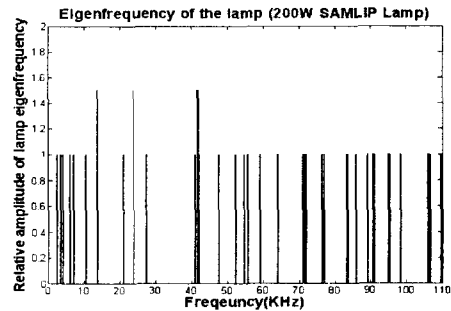


그림 5. 200W Ceramic MHL의 음향공명 주파수 대역

4. LCC 공진 필터 설계

4.1 램프의 전력식 유도

본 논문에서는 Ceramic MHL 용 안정기를 그림 2와 같은 Half-Bridge LCC 공진 인버터를 사용하였다. 그림 2에서 공진 필터를 구성하는 L_s , C_p , C_s 를 결정하기 위해서는 램프에 공급되는 전력식을 구해야한다.

그림 2에서 램프에 공급되는 전류를 구하면 식 (3)과 같다.

$$I_{Lamp} = \frac{jwC_s \cdot V_{in}}{(1 - w^2L_s(C_p + C_s)) + jwC_sR_{lamp}(1 - w^2L_sC_p)} \quad (3)$$

식 (3)에서 w 는 정상상태 구동 각 주파수이다.

램프가 점등 전일 때 LCC 공진 필터의 공진 주파수를 고려하기 위해서 $w_p = 1/\sqrt{L_s C_p}$ 를 식 (3)에 대입하면 램프의 관 전류의 크기는 식 (4)가 유도된다.

$$|I_{lamp}| = \frac{w C_s \cdot V_{in}}{\sqrt{(1-k^2-w^2 L_s C_s)^2 + (w C_s R_{lamp} (1-k^2))^2}} \quad (4)$$

여기서 $k = w/w_p$ 이다.

램프에 공급되는 전력은 $P_{lamp} = I_{lamp}^2 \cdot R_{lamp}$ 이므로 이 식에 식 (4)를 대입하여 램프의 전력 식 (5)를 유도 할 수 있다.

$$P_{lamp} = \frac{(w C_s V_{rms})^2 \cdot R_{lamp}}{(1-k^2(\alpha+1))^2 + (w C_s R_{lamp} (1-k^2))^2} \quad (5)$$

여기서

V_{rms} : LCC 공진 필터에 인가되는 구형파의 기본파 성분의 RMS 전압
 α : C_s/C_p 로 C_s 와 C_p 의 비

4.2 LCC 공진 필터의 설계

LCC 공진 필터의 L_s , C_s , C_p 값 결정은 식 (5)를 Matlab으로 α 와 C_s 에 따른 P_{lamp} 의 그래프로 표현하여 결정 한다. 이 그래프를 그리기 위해서는 다음과 같은 설계 조건을 가정 한다.

- 조건 ① 램프 저항 R_{lamp} : 92.7 [Ohm]
- 조건 ② 정상상태 주파수 f : 30 [kHz]
- 조건 ③ 점등 전 공진 주파수 f_p : 190 [kHz]
- 조건 ④ k : $\frac{w}{w_p} = \frac{2\pi \times 30kHz}{2\pi \times 190kHz} = 0.16$

조건 ①은 컨덕턴스 모델을 통해서 구해진 램프의 등가 임피던스이며, 조건 ②는 램프의 음향 공명주파수 대역을 피한 정상상태 주파수이다.

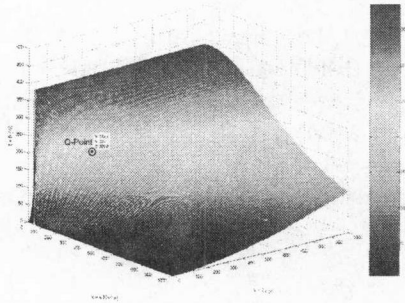


그림 6. α 와 C_s 에 따른 P_{lamp}

그림 6은 식 (5)를 α 와 C_s 를 변화시키면서 P_{lamp} 의 값을 나타낸 그래프이다. 이 그림 6에서 임의의 한 Q-Point를 결정하고, 아래와 같은 단계로 LCC 공진 필터의 소자 값을 결정한다.

Step 1 : C_s 를 결정한다.

램프의 전력이 200W인 Q-Point를 결정한다. 그림 6에서 결정된 Q-Point는 $C_s = 220[nF]$, $\alpha = 176.9[nF]$ 이다.

Step 2 : C_p 를 결정한다.

Q-Point에서 $C_s = 220[nF]$, $\alpha = 177[nF]$ 임의로 C_p 는 식 (6)과 같다.

$$C_p = \frac{C_s}{\alpha} = \frac{220nF}{177nF} = 1.24[nF] \quad (6)$$

Step 3 : L_s 를 결정한다.

램프가 점등되기 전에는 램프를 무한대 임피던스로 등가 할 수 있기 때문에 공진 주파수는 식 (7)과 같다.

$$w_p = 2\pi f_p = \frac{1}{\sqrt{L_s C_p}} \quad (7)$$

조건 ③에서 $f_p = 190[kHz]$ 로 가정하였고, Step 2에서 $C_p = 1.24[nF]$ 로 결정되었다. 따라서 L_s 는 식 (8)이 된다.

$$L_s = \frac{1}{w_p^2 C_p} = \frac{1}{(2\pi \cdot 190k)^2 \cdot 1.24nF} = 565[uH] \quad (8)$$

5. 시뮬레이션

설계한 LCC 공진 필터의 값들을 그림 2의 Half-Bridge LCC 공진 필터에 적용하고, 200W 세라믹 MHL 램프 대신 램프의 컨덕턴스 모델 그림 1을 적용하여 램프의 관 전압과 관 전류를 시뮬레이션 하였다. 또, 그림 2에서 인버터에 인가되는 DC 전압의 크기는 400V, 인버터의 구동 주파수는 30kHz로 시뮬레이션을 하였다.

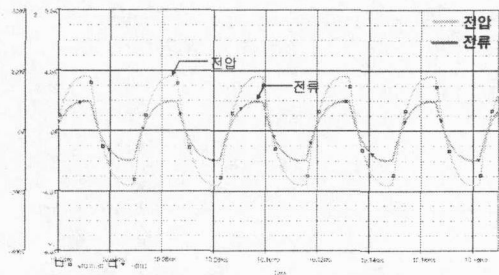


그림 7. 시뮬레이션 된 램프의 전압과 전류 파형

그림 7은 PSpice를 이용한 시뮬레이션 결과 파형이며, 측정된 값은 표 3과 같다. 시뮬레이션 결과는 램프에 정출력 203W를 출력함을 확인 할 수 있다. 즉, 본 논문에서 제안한 안정기 설계방법이 타당함을 시뮬레이션을 통해 간접적으로 증명되었다.

표 3. 시뮬레이션 측정 결과

	관 전압	관 전류
실효치	137.4 [V]	1.48 [A]
주파수	30[kHz]	

6. 실험 결과

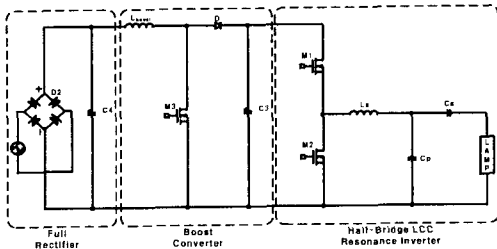


그림 8. 실제 제작한 안정기의 구조

그림 8은 실제 제작한 안정기의 구조를 나타낸다. 안정기는 전파 정류부, 역류보상 회로부, Half-Bridge LCC 공진 인버터부로 구성되어 있다. 위에서 설계한 LCC 공진 필터의 값으로 안정기를 설계하여 제작하여 시뮬레이션과 결과를 비교하였다. 표 4는 설계한 LCC 값과 실제 제작한 LCC 값을 나타낸다. 설계 값과 실제 제작한 LCC 값에 사이에 나타나는 오차는 L_s 와 C_p 의 제작 상에 나타나는 오차이다. 이 오차로 인해 L_s 와 C_p 로 인해 램프에 공급되는 전력이 이론값과 실험값의 오차가 발생할 수 있다.

표 4. LCC 설계 값과 제작 값

	L_s	C_s	C_p
설계 값	565 [uH]	220 [nF]	1.24 [nF]
제작 값	554 [uH]	220 [nF]	1.5 [nF]

그림 7의 시뮬레이션 된 램프의 전압과 전류 파형과 그림 9의 실험을 통해 측정된 램프의 전압 전류 파형을 비교한 결과 램프에 공급되는 전력이 약 5%의 오차가 발생함을 확인 할 수 있다. 이것은 LCC가 제작시 발생하는 오차로 인한 것이다. 그러나 설계된 안정기는 메탈할라이드 램프용 안정기 규격 KS C 8019에서 출력전력 변동률(정격

전력의 10%이내)을 충분히 만족시킨다.

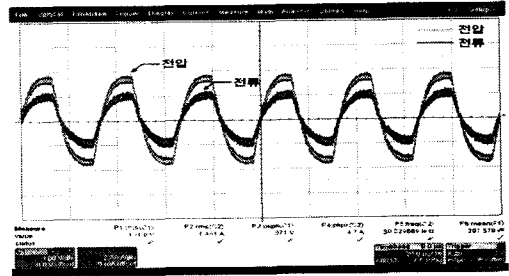


그림 9. 실제 측정된 관 전압과 관 전류

실험을 통해 측정된 결과는 표 5와 같다.

표 5. 실험을 통한 측정 결과

	관 전압	관 전류
실효치	131.0 [V]	1.461 [A]
주파수	30[kHz]	

그림 9은 실제 제작한 안정기를 이용하여 램프의 관 전압과 관 전류를 측정된 파형이다. 측정된 파형은 시뮬레이션 결과 파형 그림 7과 유사함을 확인 할 수 있다. 이것은 컨덕턴스 모델을 이용하여 알아낸 램프 임피던스를 이용한 LCC 설계 방법이 타당함을 증명한다.

7. 결론

본 논문은 200W Ceramic MHL의 컨덕턴스 모델을 구하였다. 이 모델을 통해 Ceramic MHL의 컨덕턴스 성분을 예측하였으며, 모델을 이용하여 Half-Bridge LCC 공진 필터를 설계하였다. LCC 공진 필터의 L_s , C_s , C_p 의 값은 램프의 전달되는 전력에 대한 수식을 유도하였으며, 수식을 그래프로 그려 정 출력을 내는 L_s , C_s , C_p 를 결정하였다.

본 논문에서 제안한 Ceramic MHL 용 전자식 안정 설계 방법을 시뮬레이션과 실험을 통해 증명하였다. 향후 여타의 HID 램프를 위한 전자식 안정기의 고주파 Half-Bridge LCC 공진 인버터의 설계 시 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 신상욱, 이세현, 조미령, 황명근, 이도영, 양승용, 신현정, 김진모, "세라믹 메탈할라이드 램프의 광학적 특성에 대한 분석", 한국조명.전기설비학회, 2006추계학술대회 논문집, pp. 3-7, 2006.11.
- [2] T.H. Yu, H.M.Huang, T.F Wu, "Self

- excited half bridge series resonant parallel loaded fluorescent Lamp electronic Ballasts”, *Applied power Electronics Conference Records*, pp.657-664.
- [3] M. C. Cosby, R. M. Nelms, “A resonant inverter for electronic ballast applications”, *IEEE Transac., on Power Electronics*, vol. 41, No. 4, pp.418-425, Aug. 1994.
- [4] R. M. Nelms, T. D. Jones, and M. C. Cosby, “A comparison of resonant inverter topologies for HPS Lamp Ballasts”, *IAS 93, Meet conference, Records*, Oct. 1993.
- [5] D. Tadesse, F. P. Daswon, S. B. Dewan, “A comparison of power circuit topologies and control techniques for a high frequency ballast”, *IAS 93, Meet, Conference Records*, pp.2341-2347 Oct, 1993.
- [6] J. Marcos Alonso, Cecilio Blance, Emilio Lopez, Antonio J Calleja, Manuel RICO, “Analysis Design and Optimization of the LCC resonant Inverter as a High-Intensity Discharge Lamp Ballast”, *IEEE Transac., on Power Electronics*, Vol. 13, No. 3, May, 1998.
- [7] Jo Olsen and Warren P. Moskowitz. “Optical Measurement of Acoustic Resonance Frequencies in HID Lamps” *IEEE Industrial Applications Society Annual Meeting New Orleans, Louisiana*, Oct. 5-9, pp.2263-2268, 1997.
- [8] G. Zissis, J. J. Damelincourt, and T. Bezanahary, “Modelling discharge lamps for electronics circuit designers: A review of the existing methods”, in *Proc. 29th IEEE IAS Conf.*, 2001, pp.1260-1262.
- [9] V. J. Francis, *Fundamentals of Discharge Tube Circuits*. London, U.K.: Methuen and Co., Ltd., 1948.
- [10] C. Meyer and H. Nienhuis, *Discharge Lamps*. Eindhoven, The Netherlands: Philips Technical Library, 1988.
- [11] J. J. de Groot and J. A. van Vliet, *The High-Pressure Sodium Lamp*. Eindhoven, The Netherlands: Philips Technical Library, 1985.
- [12] J. F. Waymouth, *Electric Discharge Lamps*. Cambridge, MA: MIT Press, 1971.
- [13] Cecilio Blanco, Juan C. Antón, Arturo Robles, Francisco J. Ferrero, Juan C. Campo, Manuela González and Georges Zissis, “A Discharge Lamp Model Based on Lamp Dynamic Conductance”, *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*, VOL. 22, NO. 3, pp.727-737, MAY 2007.
- [14] 박종연, 장목순, 임병노, “HID 랩프를 위한 전자식 안정기의 LCC 공진 인버터의 최적 설계”, *대한전기학회*, 56권, 3호, pp.531-507, 2007.03.
- [15] H. L. Witting, “Acoustic Resonance in Cylindrical high pressure ARC Discharges”, *J’ Apple Phy.* 49(5), May, 1978.