150W-CDM, HCI, CMH Lamp의 음향공명에 대한 분석

박종연*, **최현희*** 임기승*
강원대학교 전기전자 공학과*

Analysis of the Acoustic resonance phenomenon for Ceramic Metal Discharge Lamps

Chong-Yeon Park*, Hyeon-Hui Choe* , Ki-Seung Lim*
Dept. of Electrical and Electronics Engineering, Kangwon National University*

Abstract - 150W의 정격을 가지는 150W-CDM, HCI, CMH 세라믹 메탈 할라이드 램프의 음향공명주파수를 계산하여 예측하고 Half-Bridge구조의 Inverter로 각 램프를 점등하여 음향공명이 발생할 경우와 발생 하지 않을 경우의 램프 특성을 분석한 결과 음향공명 발생 시 30Hz이하의 낮은 주파수의 전류 신호가 포함됨을 확인 하였다.

1. 서 론

메탈 할라이드 램프는 다른 램프에 비해 높은 연색성과, 광효율 그리고 긴 수명을 가지고 있어 고출력용 램프로서 그 수요가 증가하고 있다. 고주파수로 동작하는 전자식 안정기는 광효율 증가와 안정기 소형화의 이점을 가지고 있어 메탈 할라이드 램프의 매력을 증가시키고 있다. 하지만 수 kHz이상의 주파수로 동작할 때 램프에서 발생하는 음향공명 현상은 빛의 플리커링, 아크 불안정 상태를 일으키며 심할 경우 아크가 소멸되거나 아크 튜브가 파손되어 수십 kHz의 구동 주파수를 가지는 전자식 안정기 개발에 많은 어려움이 있다. 특히 아크 튜브가 세라믹으로 구성된 메탈 할라이드 램프는 석영으로 구성된 램프 보다 뛰어난 연색성, 고르게 분포된 분광 스펙트럼, 긴 수명의 이점에도 불구하고 음향공명 현상이 넓은 주파수 영역에서 발생하여 안정기 개발자에게 큰 어려움을 주고 있다.[1][2] 본 논문은 150W용 CDM, HCI, CMH 세라믹 램프를 가지고 이미 학계에 발표된 음향공명 주파수 이론을 적용하여 각 램프의 음향공명 현상을 계산하여 예측하였다. 또한 LCpCs 공진 타입의 Half-Bridge Inverter를 이용하여 램프를 구동시키고 정출력일 경우의 램프 전압, 전류 그리고 아크 모양을 측정하여 음향공명이 발생할 경우와 발생하지 않을 경우의 차이점을 램프 전류의 spectrum 측면에서 분석하였다.

2. 본 론

2.1 음향 공명 주파수 예측 및 안정기 설계

음향 공명 현상은 아크 튜브에 흐르는 전류에 의한 입력 에너지의 주기적인 변화에 의해 발생한다. 인가되는 에너지는 아크 튜브 내 압력을 변화시키고 이 압력 변화는 정재파를 만들게 된다. 아크 튜브 내에 인가되는 에너지와 정재파의 주파수가 일치하게 되면 압력 변화는 증폭되어 음향 공명 현상을 발생시키게 된다. 음향 공명 현상은 아크를 불안정하게 하고 때로는 아크 튜브를 깨지게도 한다. 이때 아크를 통해 흐르는 전류, 전압 또한 불규칙적이다. 이는 실험을 통해 확인할 수 있다.[3] 세라믹으로 만들어진 아크 튜브를 가지는 메탈 할라이드 램프는 일반적으로 Cylindrical-shaped arc tube를 가지고 있다. Cylindrical-shaped arc tube의 acoustic wave equation은 식(1) 과 같다.

$$\nabla^2 p = \frac{1}{C^2}\frac{\partial^2 p}{\partial^2 t} \quad (1)$$

아크 튜브 내 입자가 벽에서 그 속도가 0이 되는 경계조건을 식(1)에 적용하면 식(2)의 acoustic resonance frequency를 얻을 수 있다.

$$f_{xyz} = \frac{C}{2}\sqrt{\left(\frac{z}{L}\right)^2 + \left(\frac{\alpha_{xy}}{R}\right)^2} \quad (2)$$

여기서 C는 effective sound speed 이고 x는 number of nodal diameter, y는 number of nodal circles, z는 length of arc tube, R은 radius of arc tube이다. C는 참고문헌[4]에서 가정한 값인 500m/sec를 사용하였다.

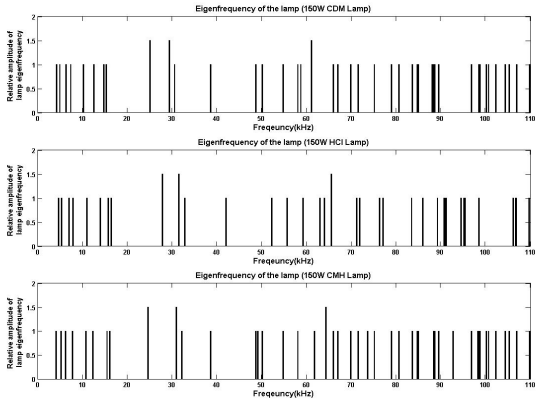
2.1.1 3가지 램프에 대한 음향공명 주파수 대역

논문에서 사용된 램프는 CDM(Phillip社), HCI(Osram社) ,CMH(GE社)이다. 각 램프의 Arc tube에 대한 반지름, 길이는 표1에 나타내었다. 여기서 길이는 실제 아크가 형성되는 두 전극 사이의 길이를 나타낸다.

<표 1> 램프의 반지름과 길이

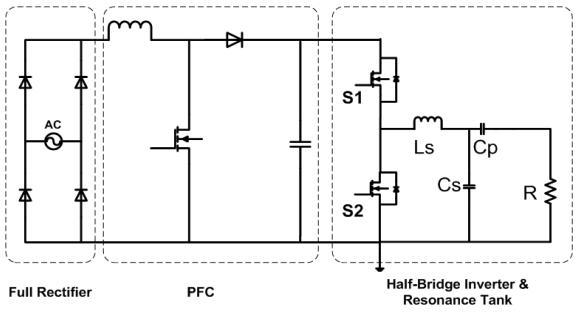
램프	반지름 (mm)	길이 (mm)
MasterColor CDM TD 150W/942 RX7s T7	5	10
POWERSTAR HCI-TS 150W/942 NDL	4.6	9
CMH 150 TD UVC 942 RX7s-24	4.7	10.2

표 1의 값을 가지고 110kHz까지의 음향공명 대역을 계산하여 그림 1에 그래프로 표현하였다. 그림 1에서 보듯이 3개의 램프는 비슷한 음향공명 대역을 가지고 있다. 20kHz 에서는 음향공명 주파수가 없고 55kHz 근처에서는 음향공명 주파수가 있는 것을 확인 할 수 있다. 본 논문은 음향공명이 발생할 것으로 예상되는 57kHz와 발생하지 않을 것으로 예상되는 23kHz로 구동 주파수를 정하여 램프를 점등시켰다.



<그림 1> 계산된 음향공명 주파수

2.1.2 LCpCs Resonance Inverter

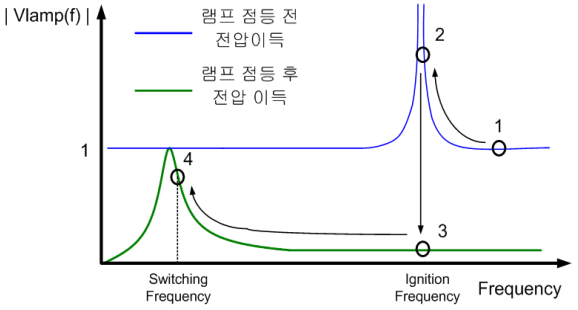


<그림 2> 전자식 안정기 개략적 구조

램프를 구동시키기 위한 안정기는 LCpCs 공진형의 Half-Bridge Inverter 구조로 설계 하였다.[5] Soft start-up technique을 이용한

LCpCs 타입의 공진 인버터는 램프를 점등시키기에 충분한 전압이득을 가지고 점등 시 전류의 과도한 공급을 제한하여 인버터 시스템의 안정성과 신뢰성을 향상 시킨다. 공진 필터로 사용되는 각 L, Cp, Cs 값은 기본주파수에 대한 제 3, 5고주파의 영향을 최소화하기 위해 전압이득이 높은 첨예도를 가질 수 있도록 각 구동 주파수별로 L, Cp, Cs값을 다르게 설계하였다. 23kHz로 구동되는 인버터의 경우는 L=1,170uH, Cp=0.6nF, Cs=94nF으로 55kHz로 구동되는 인버터의 경우는 L=781uH, Cp=1nF, Cs=15nF의 값으로 설계하여 공진 인버터를 구성하였다. 인버터에 사용된 스위치는 ST社의 26NM60이고 Half Bridge Driver IC는 TL494와 FAN7382를 사용 하였다.

Soft start-up technique은 PWM IC인 TL494의 Rt단의 전류를 제한하여 구성하였고 원리는 그림 3과 같다. 안정기에 전원을 공급하면 스위칭 주파수는 point-1 에서 떨어지기 시작하여 무부하일 경우의 공진 전압 이득 특성으로 인해 일정 주파수영역에서 램프를 점등 시키기에 충분한 전압이득을 가진다. 일단 점등 되고 나면 공진 전압이득 커브는 바뀌게 된다. 스위칭 주파수는 순차적으로 point-2, 3 으로 떨어지기 시작하여 일정시간이 지나면 point-4에서 스위칭 동작이 정상적으로 이루어지게 된다.



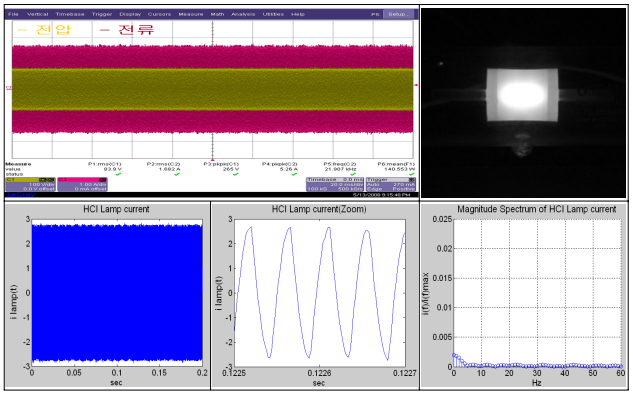
<그림 3> Soft Start up Technique

2.2 실험 결과

110kHz이하의 주파수 대역에서 3가지 램프에 공통적으로 음향공명 주파수가 없는 대역은 20kHz 대역이다. 이 대역 중에 정 출력을 나타내는 23kHz로 구동 주파수를 결정하여 실험 하였다. 또한 음향공명이 발생할 것으로 예상되는 57kHz로 구동 주파수를 결정하여 실험 하였다. 메탈 할라이드 램프의 특성상 램프 전압 보다 전류의 변화가 크기 때문에 램프의 전류를 가지고 데이터를 측정하여 분석 하였다.

2.2.1 음향 공명이 현상이 없을 경우의 램프 특성 (f=23kHz)

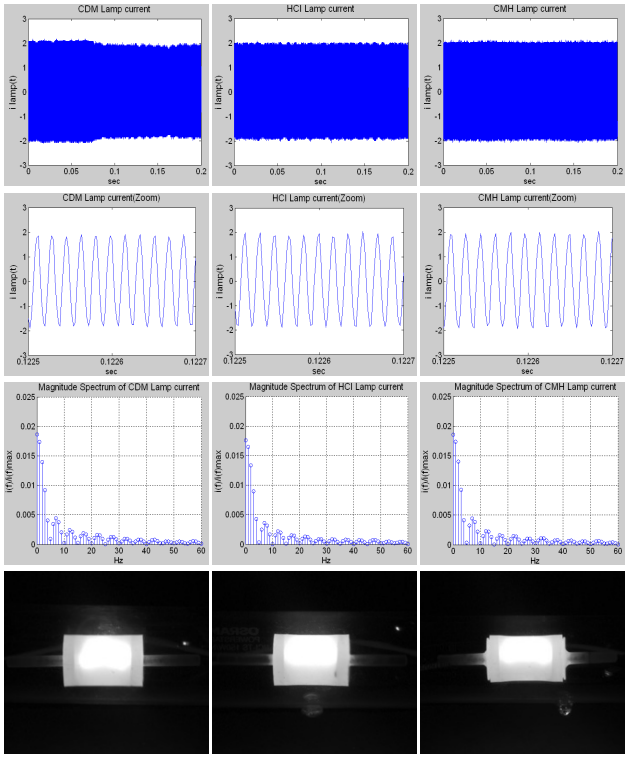
이 대역에서 3가지 램프의 전압, 전류는 매우 안정된 값을 타나냈다. 아크 모양 또한 두 전극 사이에서 안정된 모양으로 형성 되었다. 그중 대표적으로 HCI lamp의 전압, 전류, 아크, 램프 전류의 spectrum을 그림 3에 나타 내었다.



<그림 4> 음향공명이 없을 때 HCI Lamp(fs=23kHz)의 전류 및 아크

2.2.2 음향 공명이 발생 할 경우의 램프 특성 (f=57kHz)

57kHz대역에서 구동 된 3가지 램프의 전류, 전류의 spectrum 그리고 아크는 그림 4에 보여 주고 있다. 음향공명이 발생할 경우 램프의 전류는 불규칙적인 포락선을 나타내고 아크 또한 기울어져 불안정한 모양을 형성하였다. 특히 음향공명이 발생할 경우의 Normalized 된 전류의 magnitude spectrum을 보면 30Hz 이하의 주파수 영역에서 음향공명이 발생하지 않을 때 보다 더 큰 비율의 신호가 검출됨을 확인 할 수 있다.



<그림 5 > 음향공명 발생시 CDM, HCI, CMH Lamp(fs=57kHz)의 전류 및 아크

3. 결 론

150W용 CDM, HCI, CMH 메탈 할라이드 램프에 대하여 음향공명 주파수를 계산하여 예측하고 실제 각 주파수에서 동작하는 인버터를 설계하여 램프를 구동 시켜 보았다. 음향공명 현상이 없을 경우 램프는 일정한 전압, 전류를 보였고 아크는 안정적인 형상을 유지하였다. 반면 음향공명이 발생할 경우 아크는 불안정한 모양을 보였고 램프 전류 또한 비주기적, 불규칙적인 변화를 보였다. 또한 음향공명 현상이 없을 경우에 30Hz이하에서의 전류 신호가 없지만 음향공명이 발생 할 경우에는 3가지 램프 모두에서 나타남을 확인 하였다. 이는 음향공명이 발생하는 것을 눈으로 뿐만이 아니라 램프 전류의 주파수 신호 해석으로 감지 할 수 있음을 보여준다. 차후 이 실험 결과를 바탕으로 음향공명 신호에 대한 여러 측면의 신호 해석을 하고자 한다.

본 연구는 중소기업청 주관 산학 협력실(협동 기업:(주)삼영기업) 사업에서 지원 받아 수행 되었으며 관계 기관 및 기업에 감사드립니다.

[참 고 문 헌]

[1] C.-A. Cheng, T.-J. Liang, R.-L. Lin and J.-F. Chen, "Design and implemenation of frequency-modulated electronic ballast for metal-halide lamps", IEE Proc-Electr.Power Appl. Vol.153. No.5, pp702-710, September 2006.

[2] Yan Jiang, Miaosen Shen, Hua Li, Zhaoming Qian, "An Adaptive Acoustic Resonance Free Electronic Ballast for HID Lamps", 38th IAS Vol.2 pp 1020-1024, 2003

[3] Wei yan. Y.K.E.Ho, S.Y.R.Hui, "Stability Study and Control Methods for Small-Wattage High-Intendity-discharge (HID) Lamps", IEEE Tran. Ind. Appl. Vol.37, pp1522-1530, 2001

[4] H. L. witting, "Acoustic resonances in cylindrical high-pressure arc discharge",J'Appl. Phys. Vol 49, No.5, pp.2680-2683, 1978

[5] Christian Branas, Francisco J. Azcondo, Salvador Bracho, "Design of LCpCs Resonannt Interters as a Power Source for HID Lamp Ballast Applications", IEEE Trans.Ind.Appl Vol.41, No.6, November 2005