250W MHD 램프용 정출력 전자식 안정기의 개발

정동열 박종연
강원대학교 전기전자공학부
전화 : 033-250-6292 / 핸드폰 : 019-386-1129

Development of Electronic Ballast with Constant Power Output Controller for 250W MHD Lamp

Dong-Youl Jung, Jong-Yeon Park
Division of Electrical and Electronics Engineering, Kangwon National University
E-mail : superman@mirae.kangwon.ac.kr

Abstract

In this paper, the electronic ballast was developed to control 250W metal halide lamp. To avoid acoustic resonance phenomenon, we calculated the acoustic resonance band and determined the driving frequency to from 70kHz to 100kHz. Due to the switching loss of MOSFET, many problems are caused in the inverter circuit during lighting the lamp, so we have reduced the loss by connecting the capacitor to reduce inrush current
In this paper, main research area is to find the methods to operate the lamp on regulated constant output. After detecting the current I and voltage V of the lamp, we changed the driving frequency by changing the DC voltage level.

I. 서론

본 논문에서는 고휘도 방전 램프중 발광효율과 연색성이 가장 좋은 메탈할라이드 램프용 안정기에 대해 연구하였고 램프의 용량은 250W로 결정하였다. 램프의 사용기간이 오래되거나 램프 주위의 온도변화 등과 같은 현상이 발생하면 램프의 관전압이나 관전류의 변화가 생기고 특히 관전류의 변화가 심하게 발생된다. 램프의 전류가 변하면 램프의 power가 변하게 된다. 이러한 동작은 램프의 수명을 단축시키고 램프의 조도 또한 변하게 한다. 이러한 시스템에 적당한 controller를 사용하면 램프의 power를 항상 일정하게 할 수 있고, 램프의 수명 또한 증가시킬수 있다. 따라서 램프의 전압과 전류를 검출하여 이상시 inverter driver의 구동 주파수를 바꾸어주는 Controller를 개발하여 램프의 출력이 항상 일정하도록 유지 시켜주도록하였다. 그리고 스위칭소자의 발열 및 파손을 야기하는 스위칭손실을 줄여서 좀더 안정적으로 동작할 수 있도록 기여하였다.

II. 음향공명

메탈할라이드 램프는 특성 중 음향 공명 현상이 있는데 이 현상은 안정기의 주파수 조절로 피할 수 있었다. 공명현상은 아크 튜브의 반지름 방향, 길이 방향, 방위각 방향에 따라 나타나고 각 방향에 해당되는 고유의 공명 주파수가 존재한다. 길이의 방향으로 나타나는 공명 기본 주파수는 다음 식과 같다.

$$f_L = \frac{C}{2L} \quad (1)$$

여기서 C는 소리속도이고, L의 튜브의 길이이다.
반지름 방향으로 나타나는 공명 기본 주파수는 다음식과 같다.

$$f_R = \frac{3.83C}{2\pi R} \quad (2)$$

여기서 R은 튜브의 반지름이다.
방위각 방향으로 나타나는 공명 기본 주파수는 다음식과 같다.

$$f_A = \frac{1.84C}{2\pi R} \quad (3)$$

그러나 공명 주파수 대역을 결정하는데는 길이 방향의 공명 기본 주파수만이 필요하다.
공명 주파수대역에서 가장 낮은 주파수는 길이 방향 공명 기본 주파수 중 $\frac{1}{6}$ 부고조파까지가 가장 많은 영향을 미치므로 최저 공명 주파수는 다음과 같다.

$$f_L = \frac{C}{2L} \times \frac{1}{6} \quad (4)$$

가장 높은 주파수는 공명 기본 주파수의 고조파 중 4고조파까지 공명에 영향을 미치는 주파수이므로 최고 공명 주파수는 다음과 같다.

$$f_H = 4 \times \frac{C}{2L} \quad (5)$$

본 논문에서 실험한 250W MHD 램프의 경우 튜브의 길이가 0.045m이고 소리속도는 500m/s이다. 따라서 최저 주파수 $f_L = \frac{500}{2\times0.045} \times \frac{1}{6} = 926Hz$이고 최고 주파수 $f_H = \frac{500\times4}{2\times0.045}$

$=22kHz$이다.

음향공명현상이 일어나지 않는 주파수는 926Hz이하와 22kHz이상이다. 본 논문에서는 22kHz 이상의 주파수 중 80kHz를 선택하였다. 이유는 실험에서 사용한 driver IC가 안정적인 동작을 하는 주파수가 140kHz까지 이어서 22kHz와 140kHz의 중심인 주파수로 결정하였다.

III. 스위칭 소자의 손실

본 연구에서의 문제점중의 하나는 MOSFET의 스위칭 손실이었다. 이 스위칭 손실은 MOSFET의 발열로 나타나고 이 발열은 MOSFET를 파손하기 충분하였다. 따라서 MOSFET의 발열을 줄이거나 제거하는 방법을 써야했다. 본 연구에서 스위칭 손실은 MOSFET가 off할 때 발생하는 돌입전류에 의해서 나타났고 MOSFET에 발열을 야기시켰다. off때 MOSFET D-S간의 임피던스를 R이라 하고 흐르는 전류를 I라고 하면 손실 power는 RI^2이 된다. R은 굉장히 크고 I또한 크므로 power 즉 손실 역시 굉장히 커지게 된다. 그러나 MOSFET가 on이 될 때에는 R이 굉장히 작으므로 손실 역시 매우 줄어들어 MOSFET의 발열에는 별 영향을 미치지 않는다. 따라서 본 논문에서는 MOSFET가 on할 때의 손실은 고려하지 않았다. 처음 제안되었던 회로의 경우(그림1) 출력단에는 전류제한을 위한 L만이 존재했다. 이 경우에는 스위칭 소자의 on, off때 돌입전류가 발생한다. 그림2는 스위칭시 MOSFET의 D-S간에 발생하는 임펄스성 전압과 스위칭소자에 흐르는 전류파형을 측정한 결과 파형이다.

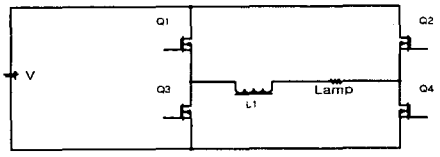

그림 1 인버터 회로

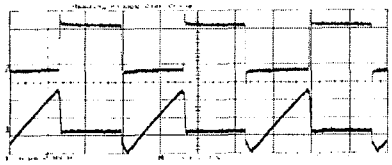

그림 2 MOSFET에 흐르는 전류와 D-S간의 전압 파형

off 때 발생하는 임펄스성 전압을 제거하는 것은 MOSFET의 D-S간에 C를 연결함으로써 해결할 수 있었다. off 때 MOSFET의 D-S 간에 발생하는 갑작스런 전압의 변화는 병렬로 연결한 C에 의해서 완만해지고 그 결과 발생될수 있는 loss를 줄일 수 있게 되었다. 그림3은 C를 MOSFET에 병렬로 연결한 회로도이고 그림 4는 스위칭 소자에 흐르는 전류와 전압을 측정한 결과파형이다.

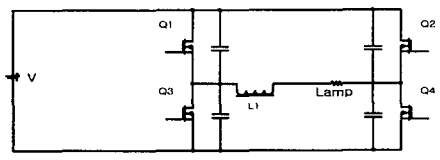

그림 3 MOSFET와 C의 병렬연결을 나타낸 회로도

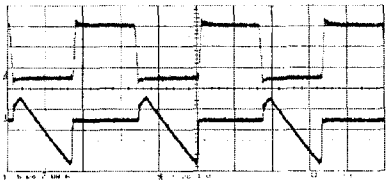

그림 4 C를 병렬로 연결한 경우의 MOSFET에 흐르는 전류와 D-S간의 전압파형

실제 개발에 있어서 4개의 스위칭소자 모두에 C를 연결한다는 것은 비용측면이나 효율면에서 나쁘기 때문에 C의 개수를 줄이는 방법을 선택하여 실험하였다. 2개의 MOSFET가 on이 될 경우, 그림3의 회로도는 그림5와 같이 등가적으로 나타낼 수 있다.

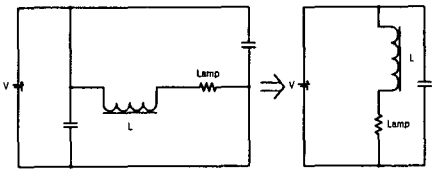

그림 5 그림 3 회로의 등가회로

즉 이것은 L과 lamp 양단에 C를 병렬로 연결한 것과 같게 된다. 따라서 회로를 그림6과 같이 변형시킬 수 있다.

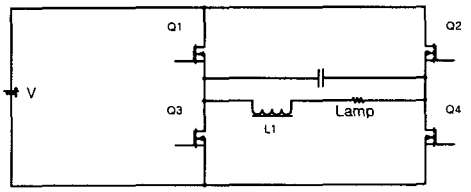

그림 6 본 논문에서 제안한 인버터 회로

IV. Power 유지 방법

그림6과 같은 회로에서 램프의 전류나 전압에 이상이 생기면 램프가 정격 power를 벗어나게 된다. 이 때 inverter의 구동 주파수를 바꾸어서 램프의 전류를 변화시켜 정격 power가 되도록 한다. Power의 크기는 램프의 전류와 전압의 양을 더한 후 그 값의 변화량을 가지고 예측하였다. 이것을 수식으로 나타내면 $aI + bV$로써 a와 b는 저항분배로 이루어지는 factor이다. L과 Lamp 양단에 걸리는 전압을 V라고 하면 lamp에 흐르는 전류는 다음과 같다.

$$I=\frac{V}{|Z|}=\frac{V}{|jwL+R|}=\frac{V}{\sqrt{(2\pi fL)^2+R^2}} \qquad (6)$$

여기서 R은 정상상태에서의 램프 등가 저항이다.

주파수 f가 증가하면 I는 줄게 되고 f가 감소하면 I는 커지게 된다. 램프의 전류와 전압이 커지게 되면 주파수를 높여 전류를 줄이고, 램프의 전류와 전압이 작아지게 되면 주파수를 낮춰 전류를 크게하는 것이다. 이것은 램프의 전류와 전압을 검출하여 controller를 통해 주파수를 조절을 함으로써 이루어진다.

램프 등가 저항 R은 램프의 전압과 전류의 비이므로

$R=\frac{V_L}{I_L}$ 이다. 따라서 식(6)은 식(7)과 같이 고칠 수 있다.

$$I_L=\frac{V}{\sqrt{(2\pi fL)^2+(\frac{V_L}{I_L})^2}} \quad (7)$$

위 식을 램프 전류 I_L에 대해 정리하면

$$I_L=\frac{\sqrt{V^2-V_L^2}}{2\pi fL} \quad (8)$$

이고 램프전압 V_L에 대하여 정리하면

$$V_L=\sqrt{V^2-(2\pi fL)^2 I_L^2} \quad (9)$$

이다.

램프 전압이 일정할 때 주파수에 따른 power의 변화는 다음과 같다. 램프전압은 130V이다.

$$P_I=130\times\frac{\sqrt{V^2-V_L^2}}{2\pi fL} \quad (10)$$

그림 7은 식(10)에 대한 simulation 결과이다.
여기서 V(dc-link voltage)=400V, V_L=130V, L=375uH이다.

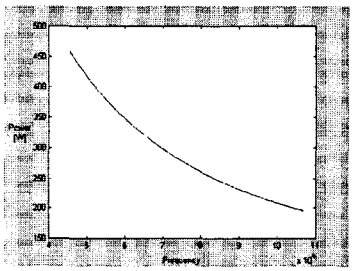

그림 7 램프전압의 변화에 따른 power곡선의 시뮬레이션결과

그림8에서 정해진 구동주파수에서 정격 watt로 출력하다가 전류가 증가하면 power의 곡선이 위로 옮겨진다. 이 상태에서 계속 정해진 구동주파수로 인버터를 동작시키면 출력 watts는 정격 power 이상의 power로 유지된다. 이 때 구동주파수를 증가 시켜 power가 정격이 되도록 한다.

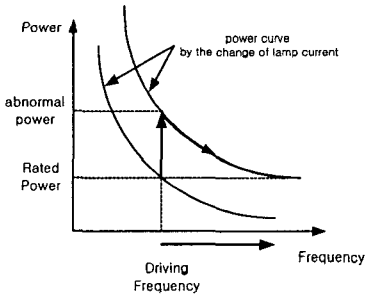

그림 8 정격 power와 이상 power의 관계

램프전류가 일정할 때 주파수에 따른 power의 변화는 다음과 같다.

$$P_V=2\times\sqrt{V^2-(2\pi fL)^2 I_L^2} \quad (11)$$

그림 9는 식(11)에 대한 시뮬레이션 결과이다.
여기서 V(dc-link voltage)=400V, V_L=130V, L=375uH이다.

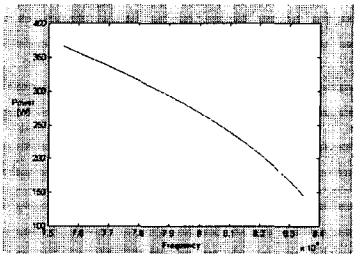

그림 9 램프전류의 변화에 따른 power 곡선의 시뮬레이션 결과

그림10에서 보면 정해진 구동주파수에서 정격 watt로 출력하다가 전압이 증가하면 power의 곡선이 위로 옮겨진다. 이 상태에서 계속 정해진 구동주파수로 인버터를 동작시키면 출력 watts는 정격 이상의 power로 유지된다. 이 때 구동주파수를 증가 시켜 power가 정격이 되도록 한다.

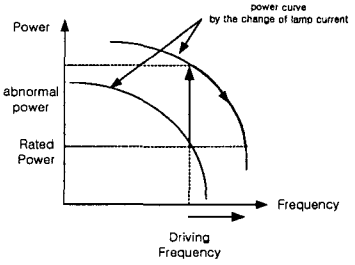

그림 10 정격 power와 이상 power의 관계

이러한 동작으로 인하여 램프의 전류와 전압이 변하더라도 항상 램프의 power를 유지시킬 수 있다.
그림 11는 전압과 전류 모두 변할 때 Power의 변화를 시뮬레이션한 결과이다.

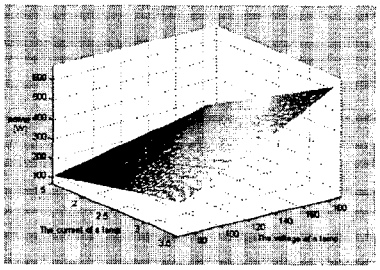

그림 11 전압, 전류와 power의 관계(시뮬레이션)

V. Controller의 구조

그림 12는 안정기의 구조도이다. PFC IC를 사용하여 역율을 개선하였고 invert의 형태는 full-bridge로 하였다. 그림 13은 인버터와 controller의 회로도이다. A1과 A2는 전류 검출 단자이고 B1과 B2는 전압 검출 단자이다. $aI + bV$는 정류기(DF04M)과 연산증폭기(TL072)로 실현하였다. 연산증폭기로 가산증폭기를 만들어 검출된 전류와 전압을 더하였다. 연산증폭기 U2의 출력은 DC 전압으로써 VCO의 입력이 되고 VCO의 출력은 주파수를 갖는 구형파이다. 이 구형파가 driver IC를 구동시키게 된다.

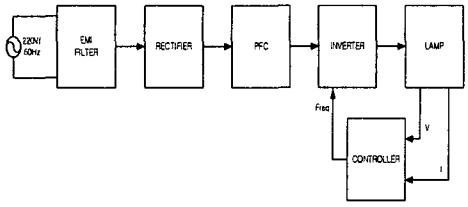

그림 12 안정기의 구조

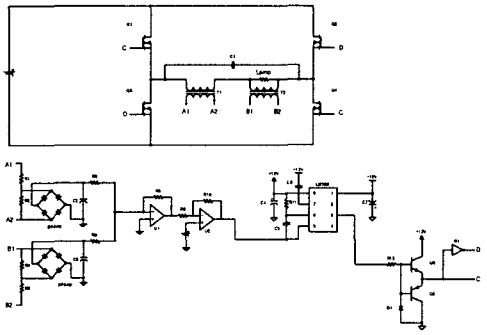

그림 13 제안된 controller 및 inverter의 회로도

VI. 실험결과

역율개선은 SGS-Tomson사의 PFC IC 인 MC33262를 사용하였고 역율은 약 0.96이었다. 인버터의 형태는 full-bridge 이고 스위칭 소자는 MOSFET IRF840을 사용하였다. Driver IC는 SGS-Tomson사의 L6569를 사용하였다.

그림 14는 램프의 과도 동작상태에서의 전압과 전류파형을 보여주고 있다. 상단 파형이 전압의 파형이고 하단의 파형이 전류의 파형이다.

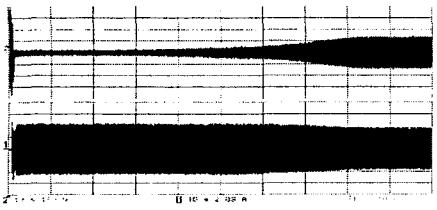

그림 14 램프 과도 상태에서의 전압과 전류파형

그림15는 램프 전압 파형으로 피크 전압이 180v이고 rms전압이 130V인 것을 확인할 수 있다.

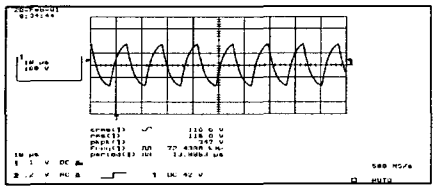

그림 15 램프 전압

그림16은 램프 전류 파형으로 피크 전류가 2.8A이고 rms전류가 2A인 것을 확인할 수 있다.

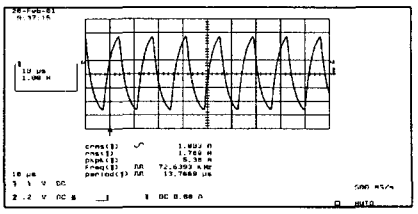

그림 16 램프 전류

VII 결론

250w용 메탈할라이드 램프의 전류나 전압이 정격 이상이 되면 예상치 못한 현상이 다양하게 나타난다. 이것은 램프가 정상적인 상태에서 동작을 하지 못한다는 것을 의미한다. 이러한 비정상적인 상태에서 정상적인 상태로 바꾸기 위해 램프의 power를 일정하게 하는 회로를 제안하였다. 이 방법은 검출된 램프의 전류와 전압을 조합하고 이 값을 컨트롤러를 통해 주파수를 조절함으로써 실현할 수 있었다. 그리고 인버터의 스위칭 소자인 MOSFET의 손실과 발열을 줄이기 위해 스위칭소자가 off할 때 생기는 임펄스성 전압을 없애는 방법을 썼고 이는 L과 lamp양단에 C를 연결함으로써 해결이 되었다. 스위칭소자(MOSFET)가 off 할 때 D-S 간의 발생하는 갑작스런 전압의 변화를 C에 의해서 완만하게 하였다. 따라서 스위칭소자가 스위칭을 할 때 발생하는 손실을 줄일 수 있게 하였다.

참고문헌(또는 Reference)

[1] Janson Melts presents, "electronic ballast design for HID lamps:, 1998.

[2] Hans-Juergen Faehnrich and Erhard Rasch, "Electronic Ballasts For Metal Halide Lamps", Journal of the Illuminating Engineering Societv 131-140 Summer 1988

[3] J. Marcos Alonso, Cecilio Blanco, Emilio Lopez, Antonio J. Calleja, Manuel Rico, " Analysis, Design, and Optimization of the LCC Resonant Inverter as High-Intensity Discharge Lamp Ballast", IEEE Transactions on Power Electronics. VOL. 13, NO. 3, 573-585, May 1998

[4] H.L. Witting, "Acoustic resonance in cylindrical high pressure arc discharges." J. appl. phy. 49(5), May. 1978

[5] J.W. Denneman, "Acoustic resonances in high frequency operated low watt metal halide lamps", Philips J. of research, Vol. 38, 1983.

[6] R. Schafer and H. P. Stornberg, "Investigation of fundamental longitudinal acoustic resonance of high pressure discharge lamps", j. appl. ohys, 53(5), may. 1982.

<후기> 본 연구는 BK21사업단의 지원으로 수행되었음