

400W 메탈 할라이드 램프의 전자식 안정기 구현

(Implementation of an Electronic Ballast for Metal Halide Discharge 400W lamp)

이 치 환

위덕대학교 전자공학과

(Chi-Hwan Lee, Uiduk Univ. Electronic Eng.)

HTTP://MOTORJUN.TO/

Abstract

In this paper, a prototype electronic ballast for 400W MH lamps is designed and implemented. To remove the phenomenon of acoustic resonance in the lamp being operated at high frequency, a spread spectrum method is employed on the ballast. Half-bridge resonant inverter, voltage-controlled-oscillator and PFC are used and the current of lamp is controlled with taking into account the voltage of lamp. The ballast is built with analog OP-amps and MOSFETs. The experimental results show the good performance as PF 0.93, A_{THD} 0.14, Ballast loss 22W at output 400W.

1. 서 론

고압방전등은 고효율의 광원으로 점등장치인 안정기와 함께 많은 연구가 수행되고 있다. MH(metal halide discharge) 램프는 수은, 알곤 가스 외에 금속 할로젠화물이 봉입되어 광효율 상승과 연색성, 수명 등이 우수하다. 음향공명은 전하입자와 가스 사이의 충돌에 의한 에너지교환 및 램프전력 변동이 내부압력 교란의 원인이며 구동주파수가 방전관내부의 고유진동수에 도달하면 압력파는 진행파가 되고 방전경로를 교란하게 된다. MH 램프의 구조, 내부가스 등에 따라 고유진동수가 결정된다. MH 램프에 전자식 안정기를 적용하기 위해서는 음향공명이 발생하지 않는 영역에서 동작시켜야 하고, 램프에 따른 고유주파수를 알고 있어야 한다. 이러한 문제로 MH 램프용 전자식 안정기는 독특한 구동방법이 필요하다.

MH 램프는 정현파인 경우 수kHz에서 100kHz이상 음향공명 발생 영역이 넓게 분포되어 있다. 음향공명의 해결방법은 100kHz 이상에서 구동하거나, 120Hz 구형파에 고주파를 혼합하는 방법 또는 주파수 변조, 위상 변조 등을 이용하여 스펙트럼을 확산을 시킨다. 일반적 전자식 안정기는 20kHz-100kHz 주파수에서 공진 인버터로 구성되며 회로가 유도성이 되게 구동된다. 스펙트럼 확산 방법은 구동주파수를 직접 제어하므로 공진주파수 변동에 대한 전류제어가 어렵고, 120Hz 구형파 구동은 고주파 스위치 2개 및 저주파 스위치 2개 등 4개의 전력소자를 요구한다. 또한 100kHz 이상의 구동은 EMI 문제를 일으키며 스위칭 손실, 자기코어 손실 등을

고려하면 낮은 주파수가 유리하다.

본 연구에서는 400W MH 램프를 구동하기 위한 전자식 안정기를 설계, 제작한다. 반파 브리지로 공진회로를 구성하고 전원 입력에 PFC를 사용하여 역율을 개선하고 전원 전류 고조파를 감소시킨다. 램프 시동전압은 램프와 병렬로 연결된 보조 콘덴서에서 얻어지고 방전 개시 후 구동주파수로 전환 되도록 한다. 음향공명 제거를 위해 전류 제어기에 120Hz 섭동을 추가하여 램프 전류의 스펙트럼을 확산시키며 램프전압을 검출하여 램프전력을 제어한다.

OP-amp와 IRFP450, IRFP460으로 제작된 400W MH 램프 전자식 안정기는 안정기 손실 22W, PF 0.93, A_{THD} 14%를 달성하였다.

2. 본 론

공진회로를 이용한 안정기는 그림 1과 같이 구성된다.

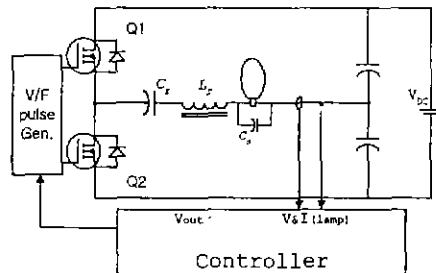


그림 1. MH 램프용 전자식 안정기의 구성
Fig. 1. Configuration of electronic ballast for MH lamps.

캐패시터 C_S 는 C_r 에 비해 매우 작은 용량이며, MH 램프의 점등은 캐패시터 C_S 를 이용하여 직렬 공진 주파수 $1/(2\pi\sqrt{L_r C_S})$ 구동에서 얻어지는 약 1kV의 전압으로 시작된다. 고주파로 구동되는 MH 램프는 전압과 전류가 동상으로 나타나는 순수 저항성을 갖는다. 그러므로 MH 램프의 특성변화는 공진회로 부하저항의 변화로 취급되고 방전개시 직후의 최소저항 R_{min} 과 정상상태 저항 R_{max} 사이의 값을 가진다.

$$R = [R_{min} \quad R_{max}] \quad (1)$$

그림 2에 일반적 MH 램프의 점등특성을 나타내었다. 초기 전압은 매우 낮으며 초기전류는 warm-up 시간을 줄이기 위해 정격전류의 120%를 공급한다 공진회로의 전류 특성은 부하저항에 따라 그림 3과 같이 나타난다.

출력 전류는 인가되는 구형파 전압 V_{DC} 의 푸리에 전개로부터 기본파를 고려하면 다음으로 표현된다.

$$I_r = \frac{\sqrt{2} V_{DC}}{\pi Z_0 \sqrt{(R/Z_0)^2 + (\omega/\omega_0 - \omega_0/\omega)^2}} \quad (2)$$

여기서 $Z_0 = \sqrt{L_r/C_r}$, $\omega_0 = 1/\sqrt{L_r C_r}$ 이다. 초기 점등시 램프는 R_{min} 상태이며, 정격전류 I_n 의 1.2배가 공급되어야 하므로 초기 구동 주파수 ω_2 에서의 램프 전류는 다음으로 된다.

$$I_2 = 1.2I_n = \frac{2\sqrt{2} V_{DC}}{\pi Z_0 \sqrt{(R_{min}/Z_0)^2 + (\omega_2/\omega_0 - \omega_0/\omega_2)^2}} \quad (3)$$

정상상태 등가 램프저항은 R_{max} 이며 이때의 램프전류는 정격전류 I_n 이다.

$$I_1 = I_n = \frac{2\sqrt{2} V_{DC}}{\pi Z_0 \sqrt{(R_{max}/Z_0)^2 + (\omega_1/\omega_0 - \omega_0/\omega_1)^2}} \quad (4)$$

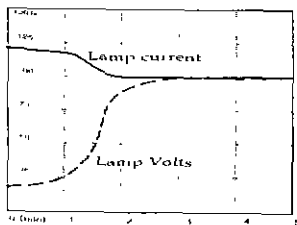


그림 2. MH 램프의 대표적 시동특성
Fig. 2 Typical starting characteristics of MH lamps.

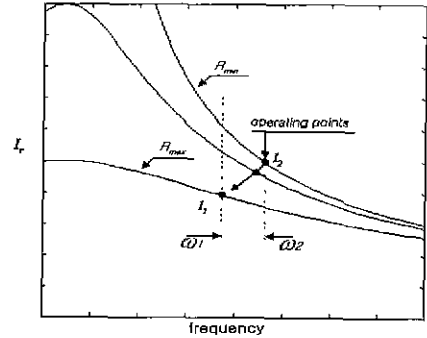


그림 3. 직렬 공진 인버터의 특성곡선
Fig. 3. Characteristic curves of a series resonant inverter.

주어진 조건값 $V_{DC}, Z_0, R_{max}, I_n$ 와 식(4)에서 ω_1/ω_0 비를 식(5)로 구할 수 있고 정상상태 구동주파수 ω_1 로 구하여진다.

$$\frac{\omega_1}{\omega_0} = \frac{Q_1 + \sqrt{Q_1^2 + 4}}{2} \quad (5)$$

$$Q_1 = \sqrt{\left(\frac{2\sqrt{2} V_{DC}}{\pi Z_0 I_n}\right)^2 - \left(\frac{R_{max}}{Z_0}\right)^2} \quad (6)$$

점등초기 상태에서 전류는 $1.2I_n$ 이므로 식(7)을 이용하여 식(5)에서 ω_2 를 얻는다.

$$1.2I_n = \frac{2\sqrt{2} V_{DC}}{\pi Z_0 \sqrt{(R_{min}/Z_0)^2 + (\omega_2/\omega_0 - \omega_0/\omega_2)^2}} \approx \frac{2\sqrt{2} V_{DC}}{\pi Z_0 (\omega_2/\omega_0 - \omega_0/\omega_2)}, \quad R_{min} \ll Z_0 \quad (7)$$

$$Q_2 = \frac{2\sqrt{2} V_{DC} \omega_0}{1.2\pi Z_0 I_n}, \quad \omega_2 > \omega_1 \quad (8)$$

$$\omega_2 = \frac{Q_2 + \sqrt{Q_2^2 + 4\omega_0^2}}{2} \quad (9)$$

동작점 부근의 주파수 변화에 대한 부하전류의 변동은 그림 4-a)와 같이 모델링 된다. MH 램프 전자식 안정기는 공진점 ω_0 와 멀리 떨어진 높은 주파수에서 동작되므로 상수 $-K_{INV}$ 로 인버터의 특성을 표현할 수 있다.

$$\frac{\Delta I}{\Delta \omega} = \frac{I_r(\omega_1) - I_r(\omega_2)}{\omega_1 - \omega_2} = -K_{INV} \quad (10)$$

인버터의 구동펄스는 V/F 변환기에서 공급되며 입력 전압 v 에 대한 인버터 출력전류 I_r 의 전달함수는 다음으로 주어진다.

$$I_r = (-K_{INV} \cdot K_v) v + I_o = -K_r v + I_o \quad (11)$$

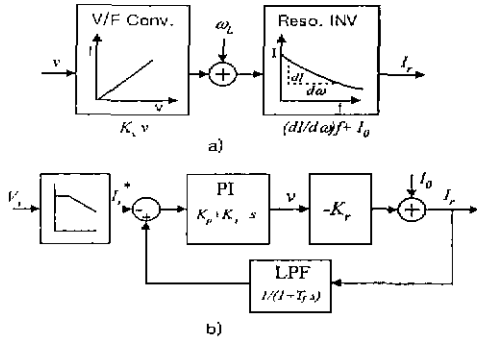


그림 4. 전자식 안정기의 모델
Fig. 4. The model of electronic ballast
a) model of frequency-controlled ballast
b) block diagram of the ballast.

전체 시스템의 전달함수는 다음으로 표현된다.

$$\frac{I_r}{I_r^*}(s) = \frac{K_r(K_p T_f s^2 + (K_i T_f + K_p)s + K_i)}{T_f s^2 + (1 + K_r K_p)s + K_r K_i} \quad (12)$$

금속 증기 가스를 봉입한 발광관 내의 음파가 고주파 전류로 형성된 내부 아크와 공명하여 발생하는 음향공명은 발광관 내의 가스압 변화 주파수와 발광관 구조에 의한 음향공명 주파수가 같을 때 음향 정재파가 발생하고 아크 방전이 불안정하게 된다. 고압 나트륨 램프와 같이 발광관이 가늘고 긴 경우는 하나의 기본주파수로 이루어지므로 그림 5와 같이 불안정 영역이 규칙적으로 존재하지만, MH 램프, 수은램프와 같이 타원형상일 경우 복수개의 기본주파수가 존재하여 불안정 영역이 그림 6과 같이 확대된다.

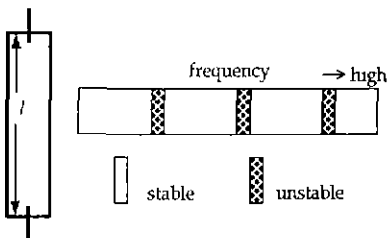


그림 5 고압 나트륨 램프의 형상과 음향공명 영역
Fig. 5. Shape of high-pressure sodium lamp and bands of acoustic resonance.

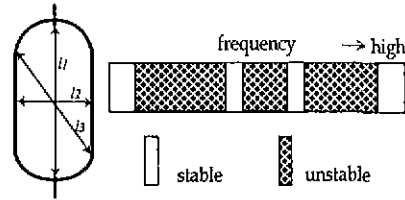


그림 6. MH 램프의 형상과 음향공명 영역
Fig. 6. Shape of MH lamp and bands of acoustic resonance.

일반적으로 공진 인버터에 의해 구성되는 안정기는 램프전류의 주파수가 공진주파수 보다 높게 설정되므로 정현파가 아닌 삼각파와 유사하다. 삼각파 전류는 기본파 외에 다수의 고조파를 가지고 있으므로 방전관에서 소리를 발생시키지는 않지만 아크의 불안정이 관측된다. 아크의 불안정을 감소시키기 위해 그림 7과 같이 전류 제어기의 입력에 정현파를 중첩시킨다. 변조신호로 구형파, 삼각파 등을 채용할 수도 있으나 고조파의 영향으로 소음이 발생하므로 낮은 주파수의 정현파를 선택한다. 변조파의 주파수는 시스템의 대역폭보다 낮게 선택하며 램프전류 I_r 은 전류제어기에 의해 지령치 I_r^* 에 정현파가 중첩된 파형으로 나타난다.

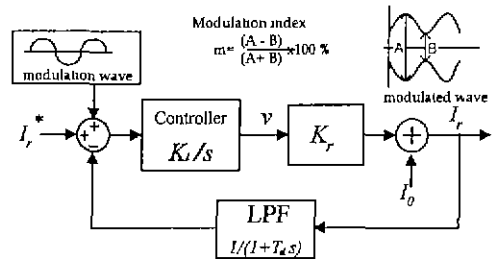


그림 7. 진폭변조가 포함된 전류제어기
Fig. 7. Current controller with amplitude modulation.

출력 전류는 진폭변조 되므로 변조파와 동일한 주기의 전력변화가 나타나고, 동시에 캐리어의 주파수가 변화하여 스펙트럼 확산 효과가 발생한다. 스펙트럼 확산, 위상변조, 구형파 구동, 3고조파 중첩 등의 음향공명 감소법은 부가적 제어기가 요구되지만, 전류제어기에 의한 진폭변조법은 전류제어기에 저주파 변조 신호의 추가로 이루어지므로 구성이 단순하며 변조도의 변경으로 쉽게 음향공명을 제거할 수 있다. 음향공명 현상인 아크 불안정은 방전관에서 쉽게 관측되므로 음향공명이 제거되는 임계 변조도를 실험으로 구할 수 있다.

3. 실험

MH 400W 램프를 구동하기 위해 그림 9와 같은 장치를 제작하였다. PFC 제어기는 KA7526을 사용하고 IRFP460으로 스위칭하여 직류 350V를 얻고 IRFP450으로 half-bridge 공진 인버터를 구성한다. 초기 1kV 시동 전압은 램프 병렬 C_s 에 의해 얻어지며 구동주파수는 35kHz 부근으로 선택하였다.

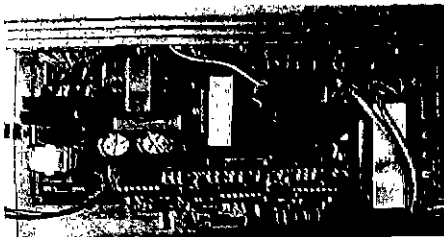
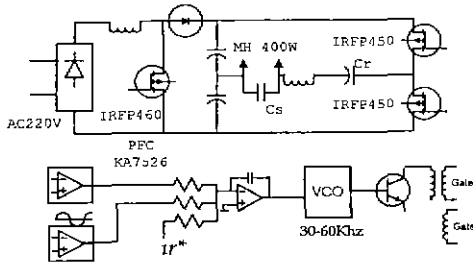


그림 8. MH 램프용 안정기 구성
Fig. 8. Circuit of ballast for MH lamp.

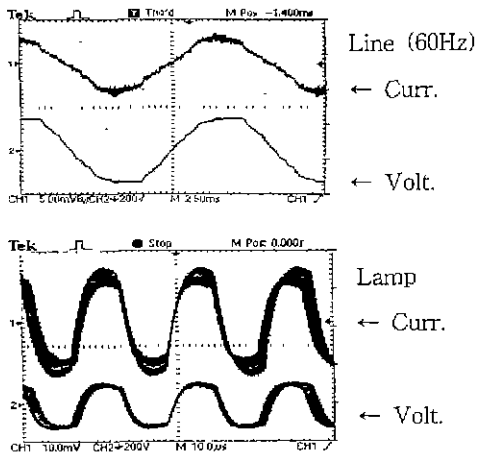


그림 9. 안정기 입력 V, A 및 램프 V, A
Fig. 9. Current and voltage waveforms of input line and lamp.

표 1. 제작된 전자식 안정기의 전기적 특성

Table 1. Electrical characteristics of the prototype ballast.

	전자식 안정기	기계식 안정기
Input power	422 W	445 W
Output	400 W	400 W
Power factor	0.93	0.86
Arm	14 %	215 %
Mod. index	20 %	0 %

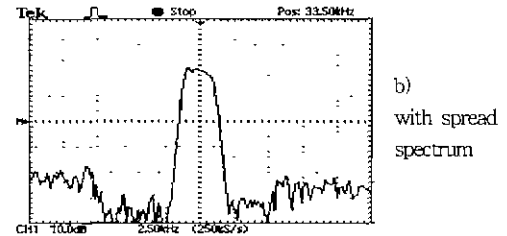
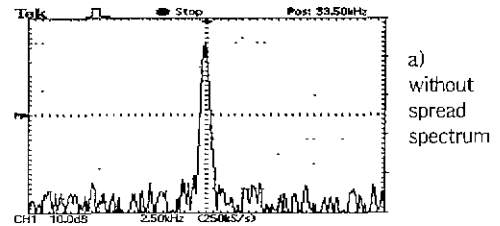


그림 10. 램프 전류 스펙트럼
Fig. 10. Spectrums of the lamp.

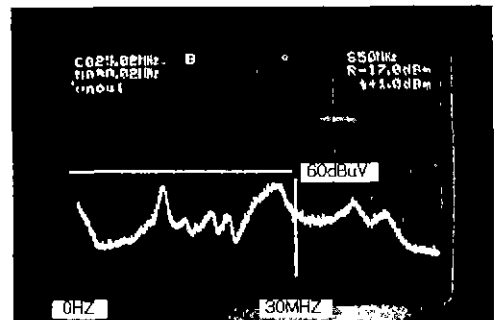


그림 11. 전도성 EMI level
Fig. 11. Conducted EMI emission level.

그림 9는 안정기의 입력 전압, 전류 및 램프 출력의 전압, 전류를 보인다. 입력전압에 대해 입력전류는 PFC 회로의 동작으로 같은 모양의 파형을 보인다. 출력 전류는 주파수확산으로 주기 및 진폭이 변동됨을 알 수 있다. 표 1에서, 전압 THD 6%에서 전류 THD 14%를 달성하였고 역을 0.93이 얻어졌다. 안정기 손실 22W에 대해 기존 기계식 안정기는 45W 손실을 보이며 특히 입력 전류의 파형은 매우 나빴다. 음향공명을 제거하기 위해 램프 전류제어기의 입력에 120Hz 정현파 섭동을 인가하여 전류 스펙트럼을 확산시키며 그림 10에서 램프전류의 스펙트럼을 확인할 수 있다. 섭동이 없는 경우 구동주파수는 33.5kHz 단일 대역이며 스펙트럼 확산이 있는 경우 약 5kHz 확산 대역에서 음향공명이 제거되었다. 램프 제조사와 램프 상태에 따라 약간의 차이를 보였다. 그림 11은 안정기에서 방출되는 전도성 EMI를 측정된 것이다. 주어진 대역내에서 57dBuV의 침투치를 나타내었다.

3. 결 론

400W 메탈 할라이드 램프의 전자식 안정기를 설계하고 제작하였다. 음향공명을 제거하기 위해 스펙트럼 확산법을 전류제어기에 적용하였고, 구동 주파수 33.5kHz에서 5kHz 스펙트럼 확산으로 아크 흔들림이 없는 안정된 점등이 달성되었다. 입력부에 PFC를 채용하여 고역율 및 낮은 전류 THD를 획득하고, 램프 400W 출력시 입력전력 422W로 변환 효율 95%를 얻었다.

제안된 전자식 안정기의 구조 및 설계법의 타당성을 실험 결과로부터 확인하였다.

- [1] S. Wada et al, "Study of HD lamps with reduced acoustic resonances", Journal of the Illuminating Engineering Society, pp.162-175, Winter 1987
- [2] Jo Olsen and Warren P. Moskowitz, "Time resolved measurements of HD lamp acoustic frequency spectra", IEEE IAS annual meeting, pp.2111-2116, 1998
- [3] J.Zhou, L.Ma and Z.Qian, "A novel method for testing acoustic resonance of HD lamps", APEC '99, pp.480-485, 1999.
- [4] Marian K. Kazimierzczuk and Dariusz Czarkowski, Resonant power converters, John Wiley & Sons, Inc., Chap. 6, 1995.
- [5] Shmuel Ben-Yaakov and Michael Culko, Design and performance of an electronic ballast for high-pressure sodium(HPS) lamps, IEEE Tran. on IE Vol. 44, No. 4, pp.486-491, Aug. 1997.
- [6] Richard Redl and Jon D. Paul, "A new high-frequency and high-efficiency electronic ballast for HD lamps: topology, analysis, design, and experimental results", APEC '99, pp.1174-1178, 1999.