

진폭변조에 의한 메탈할라이드 램프의 음향공명 감소

(Acoustic-Resonance Reduction of Metal Halide Lamps
Using Amplitude Modulation)

이 치 환

(Chi-Hwan Lee)

요 약

MH 램프의 전자식 안정기에서 발생하는 음향공명의 감소를 위한 새로운 제어 방법을 제시한다. 주파수 가변 공진 인버터를 해석하고 전달함수를 구한다. 안정기의 전류제어기로 적분기를 채용한다. 램프전력 교란 및 주파수 확산을 이용하여 음향공명을 감소시키기 위해 전류제어기 입력에 200[Hz] 정현파를 부가하여 램프 전류를 진폭 변조시킨다. MH 250[W] 램프를 대상으로 변조도에 따른 램프의 아크 안정성을 조사하고 제안된 진폭변조에 의한 음향공명 감소법 및 전류 제어기 설계법의 타당성을 확인하였다.

Abstract

In this paper, a new control method is presented to reduce acoustic resonance phenomena of metal halide lamps with electronic ballasts. A behavior of frequency controlled resonant inverter is analyzed and the transfer function is obtained. An integrator as a current controller for ballast is employed. By using both a disturbance of the lamp power and spread spectrum effects for reducing acoustic resonance, an amplitude modulation is done by using the current controller with 200[Hz] sinusoidal wave. Arc stabilities of MH 250[W] lamps are studied with changing the modulation index. Experiments with two MH 250[W] lamps, made by different manufacturers, showed the validity of the proposed method.

1. 서 론

고압방전등은 고효율의 광원으로 점등장치인 안정기와 함께 많은 연구가 수행되고 있다. MH(metal halide discharge) 램프는 수은, 알곤 가스 외에 금속 할로겐화물이 봉입되어 광효율 상승과 연색성, 수명 등이 우수하다. 또한 방전관이 작아 점광원이 되어 조명제어가 용이하다. 전하입자와 가스 사이의 충돌에 의한 에너지교환 및 램프전력 변동이 내부압력

교란의 원인이며 구동주파수가 고유진동수에 도달하면 압력파는 진행파가 되고 방전경로를 교란하게 된다. 음향공명은 방전경로의 교란으로 발생하며 실제적으로 음파 또는 아크의 불안정으로 나타난다. MH 램프의 구조, 내부가스 등에 따라 고유진동수가 결정된다. 전자식 안정기를 적용하기 위하여 음향공명이 발생하지 않는 영역에서 동작시켜야 하고, 램프에 따른 고유주파수를 알고 있어야 한다. 이러한 문제로 MH 램프용 전자식 안정기는 독특한 구동방법이 필요하다[1].

MH 램프는 정현파인 경우 수[kHz]에서 100[kHz] 이상 음향공명 발생 영역이 넓게 분포되어 있다. 음

* 정 회 원 : 위덕대학교 전자공학과 조교수. 공박
접수일자 : 2000년 6월 22일

향공명의 해결방법은 100[kHz] 이상에서 구동하거나, 120[Hz] 구형파에 고주파를 혼합하는 방법 또는 주파수 변조, 위상변조 등을 이용하여 스펙트럼을 확산을 시킨다.[2,3]. 전자식 안정기는 20[kHz]-100[kHz] 주파수에서 공진 인버터로 구성되며 회로가 유도성이 되게 구동된다. 스펙트럼 확산 방법은 구동주파수를 직접 제어하므로 공진주파수 변동에 대한 전류제어가 어렵고, 120[Hz] 구형파 구동은 고주파 스위치 2개 및 저주파 스위치 2개 등 4개의 전력소자를 요구한다. 또한 100[kHz] 이상의 구동은 EMI 문제를 일으키며 스위칭 손실, 자기코어 손실 등을 고려하면 낮은 주파수가 유리하다.

전자식 안정기의 공진 인버터 회로설계는 MH 램프의 고주파 등가저항과 전원전압 및 공진 특성곡선을 이용하여 이루어진다. 램프전력은 동작주파수의 변화로 제어되지만, 주파수 변화에 따른 출력특성은 비선형으로 나타나므로 제어기 설계에 필요한 전달함수를 얻기가 어렵다. 자력식 공진회로는 공진회로의 변화 및 램프특성 변화에 대해 전력제어가 불가능하다[4,5,6].

본 연구에서는 MH 램프의 고주파 공진형 안정기의 제어기 설계 및 진폭변조를 이용한 음향공명 감소 방법을 제시하였다. MH 램프용 안정기는 주파수 제어 직렬공진 인버터 및 램프 전류 제어기로 구성된다. MH 램프의 등가 저항과 공진회로의 특성방정식에서 안정기의 전달함수를 정의하고, PI 전류 제어기를 설계한다. 진폭변조에 의한 전력변조 및 스펙트럼 확산 효과를 얻기 위해, 전류 제어기의 입력에 200[Hz] 저주파 신호를 추가하여 램프 전류를 진폭변조하고, 변조파의 주파수 및 변조도에 따른 램프의 아크 안정성을 조사하여 음향공명을 제거하는 임계 변조도를 찾는다. 실험으로 MH 250[W] 램프용 전자식 안정기를 제작하여 구동하였고, 제안된 진폭변조에 의한 음향공명 감소 및 제어기 설계법의 타당성을 확인하였다.

2. 공진회로

공진회로를 이용한 안정기는 그림 1과 같이 구성된다. 캐패시터 Cs는 Cr에 비해 매우 작은 용량이며, MH 램프의 점등은 캐패시터 Cs를 이용하여 직렬공진 주파수 $1/(2\pi\sqrt{LrCs})$ 에서 일어나는 약 1[kV]의

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. 공진에 인가되는 V_f 는 다음 식으로 푸리에 전개된다.

$$v_f = V_{dc} \left(\frac{4}{\pi} \sin \omega t + \frac{4}{3\pi} \sin 3\omega t + \dots \right) \quad (2)$$

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

$$I_r = \frac{\sqrt{2} V_{DC}}{\pi Z_0 \sqrt{(R/Z_0)^2 + (\omega/\omega_0 - \omega_0/\omega)^2}} \quad (3)$$

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.

$$I_2 = 1.2I_n = \frac{2\sqrt{2} V_{DC}}{\pi Z_0 \sqrt{(R_{min}/Z_0)^2 + (\omega_2/\omega_0 - \omega_0/\omega_2)^2}} \quad (4)$$

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

$$I_1 = I_n = \frac{2\sqrt{2} V_{DC}}{\pi Z_0 \sqrt{(R_{max}/Z_0)^2 + (\omega_1/\omega_0 - \omega_0/\omega_1)^2}} \quad (5)$$

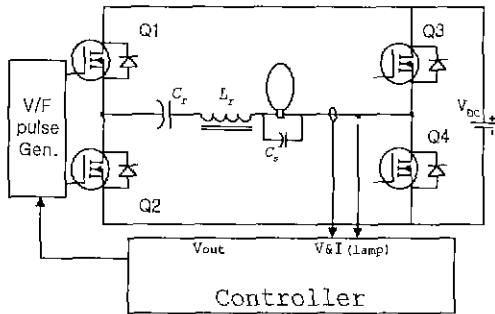


그림 1. MH 램프용 전지식 안정기의 구성
Fig. 1. Configuration of electronic ballast for MH lamps.

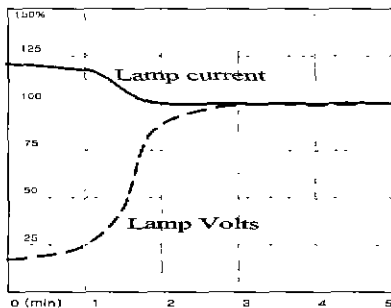


그림 2. MH 램프의 대표적 시동특성
Fig. 2. Typical starting characteristics of MH lamps.

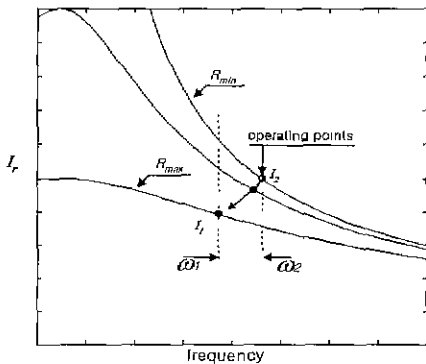


그림 3. 직렬 공진 인버터의 특성곡선
Fig. 3. Characteristic curves of a series resonant inverter.

주어진 조건값 $V_{DC}, Z_0, R_{max}, I_n$ 와 식(5)에서 ω_1/ω_0 비를 식(6)으로 구할 수 있고 정상상태 구동주파수 ω_1 도 구하여진다.

$$\frac{\omega_1}{\omega_0} = \frac{Q_1 + \sqrt{Q_1^2 + 4}}{2} \quad (6)$$

$$Q_1 = \sqrt{\left(\frac{2\sqrt{2}V_{DC}}{\pi Z_0 I_n}\right)^2 - \left(\frac{R_{max}}{Z_0}\right)^2} \quad (7)$$

점등초기 상태에서 전류는 $1.2I_n$ 이므로 식(8)을 이용하여 식(10)에서 ω_2 를 얻는다.

$$1.2I_n = \frac{2\sqrt{2}V_{DC}}{\pi Z_0 \sqrt{(R_{min}/Z_0)^2 + (\omega_2/\omega_0 - \omega_0/\omega_2)^2}} \approx \frac{2\sqrt{2}V_{DC}}{\pi Z_0 (\omega_2/\omega_0 - \omega_0/\omega_2)}, \quad R_{min} \ll Z_0 \quad (8)$$

$$Q_2 = \frac{2\sqrt{2}V_{DC}\omega_0}{1.2\pi Z_0 I_n}, \quad \omega_2 > \omega_1 \quad (9)$$

$$\omega_2 = \frac{Q_2 + \sqrt{Q_2^2 + 4\omega_0^2}}{2} \quad (10)$$

3. 전류 제어기

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

$$\frac{\Delta I_r}{\Delta \omega} = \frac{I_r(\omega_1) - I_r(\omega_2)}{\omega_1 - \omega_2} = -K_{INV} \quad (11)$$

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

$$I_r = (-K_{INV} \cdot K_p) v + I_0 = -K_r v + I_0 \quad (12)$$

여기서 I_0 는 off-set값을 나타낸다. 일반적으로 램프 전류는 검출 후 정류하여 직류로 변환되며 LPF(low pass filter)를 통하여 제어기에 공급된다.

진폭변조에 의한 메탈화라이드 램프의 음향공명 감소

그림 4-b)는 주파수 제어되는 적렬공진 인버터의 블록도이다. 램프전류는 그림 2의 점등특성과 같이 유지하기 위해 램프 양단전압으로부터 전류를 결정한다. 공진 인버터의 출력 전류제어기는 정상상태 오차를 제거하기 위해 PI 제어기를 적용한다. LPF를 고려한 전체 시스템의 전달함수는 다음으로 표현된다.

$$\frac{I_r(s)}{I_r^*} = \frac{K_r(K_p T_f s^2 + (K_i T_f + K_p)s + K_i)}{T_f s^2 + (1 + K_r K_p)s + K_r K_i} \quad (13)$$

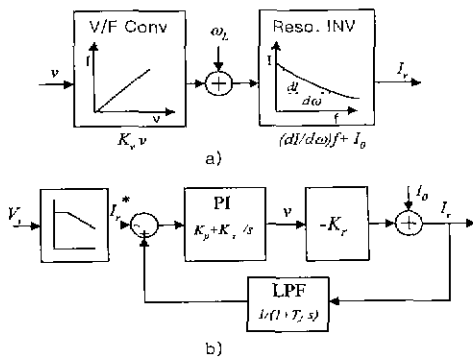


그림 4. 전자식 안정기의 모델
Fig. 4. The model of electronic ballast
a) model of frequency-controlled ballast
b) block diagram of the ballast.

이때 나타나는 시스템의 극점은 다음과 같다.

$$p1, p2 = -\frac{K_r K_p + 1}{2T_f} \pm \sqrt{\left(\frac{K_r K_p + 1}{2T_f}\right)^2 - \frac{K_r K_i}{T_f}} \quad (14)$$

안정한 시스템의 동작을 확보하기 위해서 LPF보다 좁은 시스템 대역폭을 가져야 하므로 식(14)에서 $K_p=0$ 으로 두면 시스템 극점의 실수부는 LPF 대역의 1/2이 된다. 이때의 극점과 영점은 다음으로 주어진다.

$$p1, p2 = -\frac{1}{2T_f} \pm \sqrt{\left(\frac{1}{2T_f}\right)^2 - \frac{K_r K_i}{T_f}} \quad (15)$$

$$z1 = -\frac{1}{T_f}$$

시간응답의 속용성을 위해 약간의 오버슈트를 가

지도록 극점을 배치하면 식(15)로부터 적분상수 K_i 를 결정할 수 있다. 그러므로 MH 램프 전자식 안정기의 전류제어기는 적분기만으로 구성된다.

$$K_i > \frac{1}{4T_f K_r}, \quad K_p = 0 \quad (16)$$

4. 음향공명 감소

급속 증기 가스를 봉입한 발광관 내의 음파가 고주파 전류로 형성된 내부 아크와 공명하여 발생하는 음향공명은 발광관 내의 가스압 변화 주파수와 다음의 발광관 구조에 의한 음향공명 주파수 f_a 가 같을 때 음향 정제효과 발생하고 아크 방전이 불안정하게 된다.

$$f_a = \frac{mv_s}{2l} \quad (17)$$

여기서 m 은 1, 2... 정수, l 은 발광관의 길이, v_s 는 발광관 내의 음속이다. 실제 f_a 는 관 구조와 봉입물 종류에 따라 변화한다. 고압 나트륨 램프와 같이 발광관이 가늘고 긴 경우는 하나의 기본주파수 f_a 로 이루어지므로 그림 5와 같이 불안정 영역이 규칙적으로 존재하지만, MH 램프, 수은램프와 같이 타원형상일 경우 복수개의 기본주파수 f_a 가 존재하여 불안정 영역이 그림 6과 같이 확대된다.

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 전류제어기의 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.

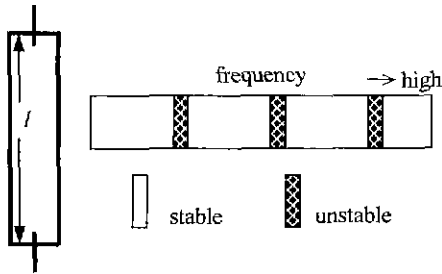


그림 5. 고압 나트륨 램프의 형상과 음향공명 영역
Fig. 5. Shape of high-pressure sodium lamp and bands of acoustic resonance.

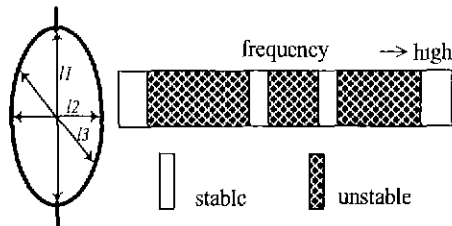


그림 6. MH 램프의 형상과 음향공명 영역
Fig. 6. Shape of MH lamp and bands of acoustic resonance.

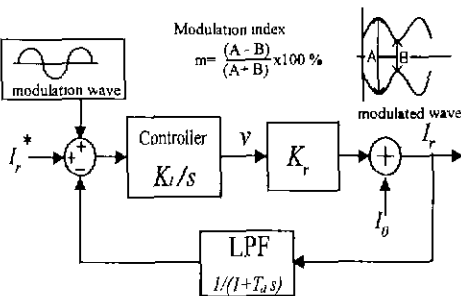


그림 7. 진폭변조가 포함된 전류제어기
Fig. 7. Current controller with amplitude modulation.

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 제어가 요구된다. 그러나 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 변조도에 따른 음향공명 유무를 실험으로 구할 수 있다. 변조도 m 의 진폭변조에 의한 스펙트럼 확산 대역은, 식(5)를 이용하여, 상한동작주파수 ω_x , 하한 동작 주파수 ω_y 로부터 계산할 수 있다.

$$\omega_m = \omega_x - \omega_y$$

$$(1 - m/100)I_n = \frac{2\sqrt{2} V_{DC}}{\pi Z_0 \sqrt{(R_{min}/Z_0)^2 + (\omega_x/\omega_0 - \omega_0/\omega_x)^2}}$$

$$(1 + m/100)I_n = \frac{2\sqrt{2} V_{DC}}{\pi Z_0 \sqrt{(R_{min}/Z_0)^2 + (\omega_y/\omega_0 - \omega_0/\omega_y)^2}} \quad (18)$$

전류 스펙트럼은 공진특성 곡선이 비선형이므로 중심 주파수를 기준으로 낮은 주파수에 비해 높은 주파수의 대역폭이 넓고, 확산 대역의 왼쪽이 오른쪽보다 큰 진폭을 가지는 그림 8과 같은 모양이 된다.

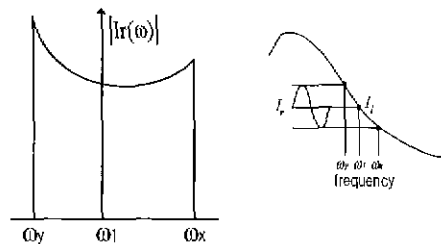


그림 8. 진폭변조된 전류 스펙트럼
Fig. 8. Current spectrum of AM wave.

5. 실험

MH 250[W] 램프를 구동하기 위해 그림 9와 같은 장치를 제작하였다. 직류 300[V]의 맥동을 줄이기 위해 1000[μF] 전해 콘덴서를 사용하였고 IRFP450 MOSFET으로 직렬공진 회로를 구성하였다. 전류제어기는 OP amp와 펄스트랜스를 이용하여 구현하였다. MH 250[W] 램프는 제조사가 다른 A 및 B 두 종류를 선택하였고 음향공명의 발생유무는 램프 아크 상태를 관찰하여 흔들림으로 결정하였다. 변조파의 주파수를 200[Hz]에서 800[Hz]까지 변화시킬 때 아크가 안정되는 변조도를 그림 10에 보인다.

진폭변조에 의한 메탈헤라이드 램프의 음향공명 감소

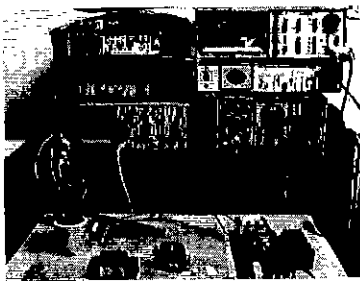
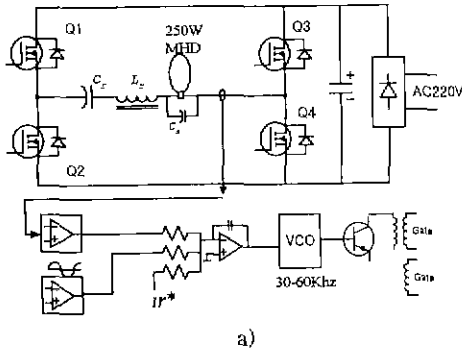


그림 9. MH 램프용 안정기 구성
Fig. 9. Circuit of ballast for MH lamp

a) circuit b) system.

램프 A는 변조파의 주파수가 500[Hz] 이상에서는 변조도가 낮아도 안정한 아크 상태를 나타내며 램프 B는 변조파 주파수와 무관한 특성을 보인다. 램프 A 및 B 모두 변조도 15% 이상에서 음향공명이 제거되었다. 변조파 주파수가 높은 경우, 안정기에서 소음이 발생하기 쉽고 낮은 변조파 주파수와 비슷한 변조도 임계치를 나타내므로 낮을수록 유리하다고 판단된다. 그림 11은 변조도 15%에서의 램프전류와 스펙트럼을 표시한다. 변조도 0인 경우 램프전류는 38.5[kHz]의 삼각파에 가까운 모양이며 큰 진폭의 기본파 만이 나타나고, 변조도 15%에서 램프전류는 진폭변조되며 스펙트럼이 확장됨과 동시에 스펙트럼 첨두치는 감소하였음을 알 수 있다. 스펙트럼 대역은 38.5[kHz]를 중심으로 ± 6 [kHz] 대역을 가지며 그림 8과 유사하다. 중심주파수의 변동에 대한 임계변조도의 변화는 미소하며, 변동대역폭을 고려 할 때 중심주파수는 30[kHz] 이상이 되도록 설정하여야 한다. 음향공명 제거를 위해 채용하는 120[Hz] 구형파에 고주파를 인가하는 방법은 4개 스위치가 요구되지만,

제안된 진폭변조에 의한 방법은 half-bridge 회로에서 스위치 2개로 구현되고 전력소자의 손실을 감소시킨다.

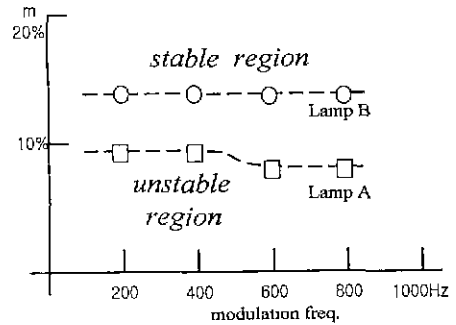


그림 10. 음향공명 제거의 임계 변조도
Fig. 10. Threshold values of modulation index for free-acoustic resonance.

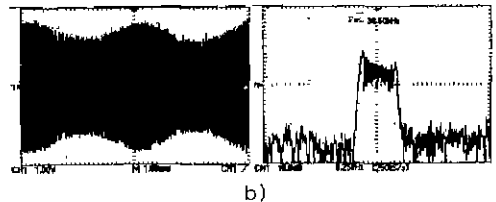
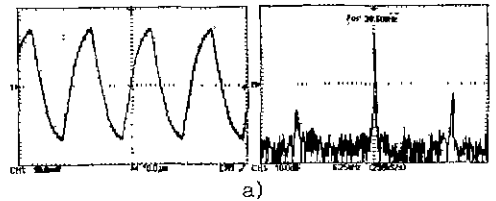


그림 11. 전류파형 및 스펙트럼
Fig. 11. Current waveforms and spectrums
a) $m=0$ b) $m=15\%$ (200Hz)

6. 결 론

MH 램프의 전자식 안정기 설계를 위한 전류 제어기 구성과 진폭변조를 이용한 음향공명 감소 방법을 제시하였다. 고주파 전력 발생을 위해 채용되는 주파수 가변 공진 인버터와 PI 전류제어기를 포함한 시스템 전달함수를 정의하였다. 적분형 제어기가 공진형 인버터의 전류제어기로 사용될 수 있음을 보이고, 제어기 적분상수를 결정하였다. 제안된 전류제어

기의 입력에 200[Hz] 정형파의 변조파를 인가하여 램프전류에 진폭변조를 행하였다. 진폭변조로 인하여 MH 램프에는 공급전력의 변화와 스펙트럼 확산의 효과가 동시에 인가되어 음향공명의 현상인 아크 흔들림을 제거 할 수 있었다. MH 250[W] 램프를 대상으로 변조파의 주파수 및 변조도에 따른 MH 램프의 아크 안정성을 조사하고 음향공명을 제거하는 임계 변조도 15[%]를 결정하였다. 실험으로 제조사가 다른 MH 250[W] 램프 2개를 구동하였고, 제안된 진폭변조에 의한 음향공명 감소 및 전류 제어기 설계법의 타당성을 확인하였다.

참 고 문 헌

- (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. Kazimierzuk and Dariusz Czarkowski, Resonant power converters, John Wiley & Sons, Inc., Chap. 6, 1995.
- (5) Shmuel Ben-Yaakov and Michael Gulko, 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.

◇ 저자소개 ◇

이 치 환 (李治煥)

1961년 8월 6일생, 1984년 명남대 공내 전자공학과 졸업. 1994년 경북대 대학원 전자공학과 졸업(박사) 현 제 위덕대 전자공학과 조교수. <http://motor.run.to/>