

자외선 살균 램프용 고역률 전자식 안정기에 관한 연구

강범석*, 김희준
한양대학교 전기공학과

High Power Factor Electronic Ballast for Ultraviolet Germicidal Lamp

Bum-Suk Kang*, Hee-Jun Kim
Dept. of Electrical Engineering Hanyang University

Abstract - Germicidal lamps efficiently emit a large amount of ultraviolet rays 253.7nm which have excellent germicidal effect. The lamps are primarily useful for sterilization of air, the surface of various materials and water or liquid. In this paper, analysis of the charge pump power factor correction inverter for driving a 65W UV lamp and electrical characteristics of the lamp are discussed. The operation of the inverter circuit, in which the lamp is included as a load, is analyzed. Experimental results of the inverter circuit are also presented.

1. 서 론

자외선은 가시 광선의 파장(400nm)보다는 짧고 X선(100nm) 보다는 긴 파장을 가진 전자 방사선을 의미하는데 그 중에 살균력을 갖고 있는 가장 적합한 파장은 253.7nm이다. 이러한 살균력을 가진 에너지원은 통상 저압 수은 방전 램프로부터 얻을 수 있으며 이것이 널리 사용되는 이유는 램프에서 나오는 자외선 에너지의 85% 정도가 253.7nm의 파장이기 때문이다. 자외선 살균 장치는 화학 약품을 이용한 살균시 발생되는 부산물이 생기지 않는 장점을 가지고 있기 때문에 공기나 수(水) 정화 처리 시설에 많이 이용되고 있다.

자외선 살균 램프는 부성 저항 특성을 가지고 있기 때문에 램프를 안정 점등시키기 위해서는 전류를 제한시키기 위한 안정기가 요구된다. 고주파 PWM 인버터 방식이 적용된 전자식 안정기는 스위칭 주파수의 고주파화를 통해 안정기의 소형·경량화에 이룰 수 있으며 최근에는 반도체 소자와 스위칭 기술의 발달로 고주파 스위칭시에 발생하는 손실 및 노이즈 발생의 문제를 해결하여 고효율의 전력 변환이 가능하다. [1], [2]

또한 IEC-555-2와 같은 고조파 규제에 대한 국제 표준의 채택으로 방전 램프용 전자식 안정기에 대해 선전류 고조파 성분 감소, 고입력 역률 개선에 대한 요구가 점차 커지고 있다. 하지만 일반적으로 전자식 안정기의 역률 개선을 위해 사용되는 승압형 컨버터를 이용한 역률 개선 회로는 회로가 복잡하고 가격이 비싸다는 단점이 있기 때문에, 저가격의 간단한 회로 방식으로 고역률 및 고조파 저감을 이룰수 있는 역률 개선 회로가 요구되고 있다.

따라서 본 논문에서는 자외선 살균 램프용 전자식 안정기의 주회로로서 직렬 공진형 인버터에 역률 개선 회로가 단일 회로 방식으로 결합된 Charge Pump Power Factor Correction Inverter 회로에 관하여 논의하였다. 우선 램프의 전기적 특성을 확립하였고 램프의 점등 전, 후의 등가 회로를 인버터에 적용하여 동작 해석을 하였다. 그리고 이 결과로부터 각 부의 설계식을 도출하였다. 이러한 설계식을 토대로 정격 출력이 65W급인 자외선 살균 램프용 고역률 전자식 안정기를 제작, 실험하였으며 이를 통하여 특성을 확인하였다. [3][4]

2. 자외선 살균 램프용 고역률 전자식 안정기

2.1 램프의 전기적 특성

그림 1은 65W급 자외선 살균 램프의 기동시의 전압, 전류 파형을 나타낸다. 이 그림으로부터 램프가 점등되기 위해서는 약 500V의 기동 전압이 요구됨을 알 수 있다.

그림 2은 자외선 살균 램프의 기동으로부터 완전 점등되는 동안의 임피던스 변화를 나타낸 곡선이다.

기동전에는 램프 저항은 거의 무한대로 볼 수 있으며 기동과 동시에 임피던스는 급격히 약 320Ω으로 저하했다가 약 8분정도의 과도 상태를 거친후 다시 320Ω정도로 안정 점등됨을 나타내고 있다.

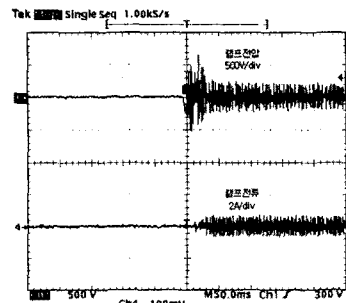


그림 1 기동시의 램프 전압 및 전류

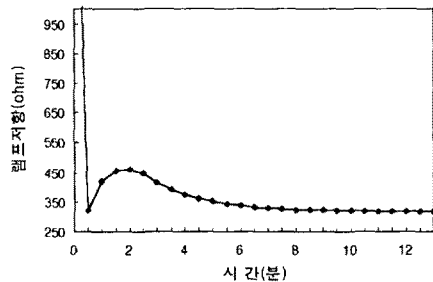


그림 2 점등 시간 동안 램프 임피던스 곡선

2.2 Charge Pump PFC Inverter

그림 3은 자외선 살균 램프용 고역률 전자식 안정기에 이용된 Charge Pump PFC Inverter의 회로도도를 나타낸다. 회로에서 v_g 는 전파 정류된 입력 전압을 나타내며 커패시터 C_{in} 은 고역률을 얻기 위한 charge pump 커패시터이고 공진 인덕터 L_r , 공진 커패시터 C_d 는 램프의

안정 점등을 위한 직렬 공진 회로를 구성하고 있으며 커패시터 C_r 은 램프 기동을 위하여 구성되어 있다.

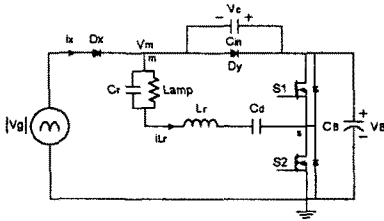


그림 3 Charge Pump Power Factor Correction Inverter

그림 3의 회로가 고역률을 이루기 위해서는 입력 전류 i_x 가 입력 전압 $|v_{g}|$ 에 비례하여 정현파 형태로 흘러야 한다. 이를 위한 조건으로 DC bus 전압 V_B 를 입력 전압 $|v_{g}|$ 보다 높게 설계함으로써 다이오드 D_x , D_y 가 동시에 도통되지 않게 한다. 따라서 입력 전류는 커패시터 C_{in} 양단 전압 V_c 가 $V_B - |v_{g}|$ 로 충전되어 있는 구간 동안에만 다이오드 D_x 를 통하여 흐르게 되는데 이 구간은 입력 전압 $|v_{g}|$ 에 비례하므로 이때 흐르는 전류를 평균화하게 되면 입력 전류는 입력 전압에 비례하게 되어 고역률을 얻을 수 있다.

그림 4는 인버터의 정상 상태일 때 이론적인 동작 파형으로 한 주기를 6개의 동작 모드로 나누어 해석하였다. 위로부터 스위치 S_2 양단 전압 V_{s2} , 접점 m의 전압 V_m , 접점 m과 s 사이의 전압 V_{sm} , 공진 인덕터 전류 i_{Lr} , 다이오드 D_x 에 흐르는 전류(입력 전류) i_x , 커패시터 C_{in} 양단의 전압 V_c , 스위치 S_2 에 흐르는 전류 i_{s2} 를 나타낸다.

Mode 1, $[t_0, t_1]$: t_0 에서 스위치 S_2 는 턴오프된 상태이고 공진 인덕터 전류 i_{Lr} 이 양의 방향으로 흐르기 시작하면 다이오드 D_y 는 자연적으로 오프된다. 공진 인덕터 전류 i_{Lr} 은 커패시터 C_{in} 을 충전하고 이에 따라 접점 m에서의 전압 V_m 은 감소하기 시작한다. 이때 C_{in} 은 공진 요소로 참여하게 된다. t_1 에서 전압 V_m 이 정류된 입력 전압 $|v_{g}|$ 와 같아지면 다이오드 D_x 는 도통된다.

Mode 2, $[t_1, t_2]$: 전압 V_m 은 정류된 입력 전압 $|v_{g}|$ 으로 클램프되고 공진 인덕터 전류 i_{Lr} 은 양의 방향으로 다이오드 D_x 를 통해서 흐르며 공진 탱크는 AC 입력 라인으로부터 에너지를 직접 흡수한다.

Mode 3, $[t_2, t_3]$: t_2 에서 스위치 S_2 는 턴오프되고 공진 인덕터 전류 i_{Lr} 은 계속 양의 방향으로 다이오드 D_x 를 통해서 흐른다. 또한 이때 공진 인덕터 전류는 설정된 데드 타임 구간동안 스위치 S_1 의 역병렬 다이오드를 통해 흐르게 되는데 이때 스위치 S_1 을 턴온시키면 영전압 턴온이 이루어진다. t_3 에서 인덕터 전류의 방향이 양에서 음으로 바뀌면 D_x 는 자연적으로 턴오프되고 이 모드는 종료한다.

Mode 4, $[t_3, t_4]$: 이 구간 동안 DC bus 전압 V_B 는 전압 V_m 보다 여전히 크기 때문에 다이오드 D_y 는 도통되지 못하고 공진 인덕터 전류 i_{Lr} 은 커패시터 C_{in} 을 방전시킨다. 이에 따라 전압 V_m 은 상승하기 시작하고 C_{in} 은 공진 요소로 참여하게 된다.

Mode 5, $[t_4, t_5]$: t_4 에서 커패시터 C_{in} 이 완전히 방전하면 다이오드 D_y 는 도통되고 전압 V_m 은 전압 V_B 로 클

램프되어 진다.

Mode 6, $[t_5, t_6]$: t_5 에서 스위치 S_1 은 턴오프되고 공진 인덕터 전류 i_{Lr} 은 계속 다이오드 D_y 를 통하여 흐르면서 커패시터 C_B 를 충전한다. 이때 역시 데드 타임 구간 동안 공진 인덕터 전류 i_{Lr} 은 스위치 S_2 의 역병렬 다이오드를 통해 흐르게 되는데 이때 스위치 S_2 를 턴온시키면 영전압 턴온이 이루어진다.

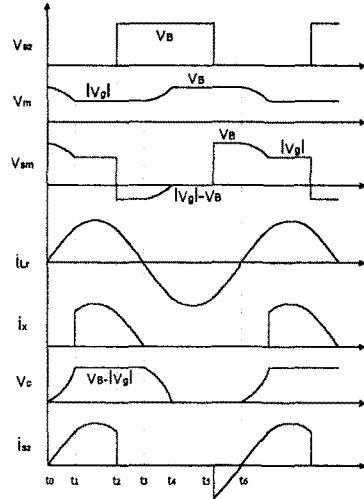


그림 4 각 부의 이론적인 동작 파형

등가 모드 해석으로부터 입력 전류는 불연속적이고 커패시터 C_{in} 이 충전되어 있는 구간, 즉 다이오드 D_x 가 도통되는 구간인 Mode 2와 Mode 3 구간 동안에만 흐른다는 것을 알 수 있었다. 따라서 한 스위칭 주기 동안의 평균 입력 전류는 다이오드 D_x 에 흐르는 평균 전류와 같기 때문에 다음과 같이 구할 수 있다.

$$i_x^{ave} = \left(\frac{I_{Lr}}{\pi} - C_{in} f_s V_B \right) + C_{in} f_s |v_{g}| \quad (1)$$

고역률을 얻기 위해서는 평균화된 입력 전류는 입력 전압에 비례하여야 하는데 그러기 위해서는 식 (1)의 첫번째 항이 0이 되어야만 한다. 따라서 다음과 같은 조건식이 구해진다.

$$I_{Lr} = \pi C_{in} f_s V_B \quad (2)$$

식 (2)은 고역률을 얻기 위한 조건이 되고, 위 식이 만족되면 식 (1)은 다음과 같은 식 (3)과 같이 나타내어져 평균화된 입력 전류가 입력 전압에 비례하게 된다.

$$i_x^{ave} = C_{in} f_s |v_{g}| \quad (3)$$

2.3 Series resonant inverter

지금까지 Charge Pump PFC Inverter에서의 역률 개선 원리에 대하여 알아보았고 램프의 기동 및 안정 점등을 위한 인버터 동작 특성을 알아보기 위하여, 해석의 편의상 그림 3에서의 접점 s와 m사이의 전압 V_{sm} 을 구형파 전원으로 근사 증가하여 그림 5와 같은 인버터 등가 회로를 구성하였다. 램프는 등가적으로 점등전에는 무한대의 저항, 즉 무부하로, 점등후에는 저항 R로 근사화시켜 나타낼 수 있다.

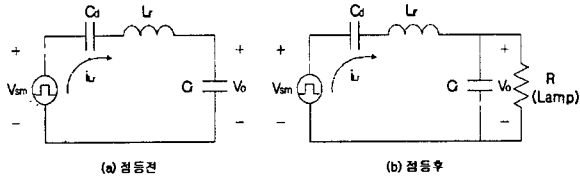


그림 5 인버터의 근사 등가 회로

그림 5(a)의 등가 회로로부터 안정 점등을 위하여 C_d , C_r , L_r 로 구성되는 직렬 공진 회로에 의해 500V 이상의 높은 기동 전압 v_o 를 얻고 있음을 알 수 있다. 이때의 공진 주파수는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\omega_o = \sqrt{\frac{C_d + C_r}{L C_d C_r}} \quad (4)$$

한편 점등후의 특성으로서 그림 5(b)의 회로로부터 점등후의 공진 주파수 ω_r 와 공진 회로부의 임피던스 Z 를 구하면 다음과 같다.

$$\omega_r = \sqrt{\frac{-\alpha + \sqrt{\alpha^2 + 4\beta}}{2\beta}} \quad (5)$$

여기서,

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= L_r C_d - R^2 C_r^2 - R^2 C_d C_r \\ \beta &= L R^2 C_d C_r^2 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} Z &= \frac{R \left[(1+A) \left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_o} \right)^2 \right) + j \frac{1}{Q_L} \left(\frac{\omega}{\omega_o} - \frac{\omega_o}{\omega} \frac{A}{1+A} \right) \right]}{1 + j Q_L \left(\frac{\omega}{\omega_o} \right) (1+A)} \\ &= Z e^{j\theta} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서,

$$\left. \begin{aligned} Z &= Z_o Q_L \sqrt{\frac{(1+A)^2 \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_o} \right)^2 \right]^2 + \frac{1}{Q_L^2} \left(\frac{\omega}{\omega_o} - \frac{\omega_o}{\omega} \frac{A}{1+A} \right)^2}{1 + [Q_L \left(\frac{\omega}{\omega_o} \right) (1+A)]^2}} \\ \phi &= \tan^{-1} \left[\frac{\frac{1}{Q_L} \left(\frac{\omega}{\omega_o} - \frac{\omega_o}{\omega} \frac{A}{1+A} \right) - Q_L (1+A) \left(\frac{\omega}{\omega_o} \right) \left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_o} \right)^2 \right)}{1 + [Q_L \left(\frac{\omega}{\omega_o} \right) (1+A)]^2} \right] \\ A &= \frac{C_r}{C_d}, \quad Z_o = \sqrt{\frac{L_r}{C}}, \quad C = \frac{C_d C_r}{C_d + C_r}, \quad Q_L = \omega_o C R = \frac{R}{\omega_o L_r} = \frac{R}{Z_o} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

한편 인버터 회로가 앞서 설명한 모드 해석에서와 같이 영전압 스위칭으로 동작하기 위해서는 스위칭 주파수 ω 를 공진 주파수 ω_r 보다 높게 설정하여 식 (7)로 표현되는 공진 회로부의 임피던스를 유도성으로 되게 하여야 한다.

2.3.1 동작 해석

2.3.1.1 점등전 해석

자외선 살균 램프의 점등전의 해석을 위하여 그림 5(a)의 근사 등가 회로를 적용할 수 있으나 보다 실제적인 접근을 위하여 공진 인덕터 L_r 와 공진 커패시터 C_d , C_r 의 등가 직렬 저항 r 을 고려한 등가 회로를 구성하면 그림 6과 같이 된다. 여기서 구형파 전원 $v_{sm}(t)$ 는 Fourier 급수

로 전개하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_{sm}(t) = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{V_m}{n} \sin n\omega t \quad (V_m = 2V_B/\pi) \quad (9)$$

스위칭 주파수 ω 가 직렬 공진 주파수 ω_r 에 근접하고 하면 구형파 $v_{sm}(t)$ 는 기본파 성분으로 근사화 할 수 있다.

$$v_{sm}(t) = V_m \sin \omega t \quad (V_m = 2V_B/\pi) \quad (10)$$

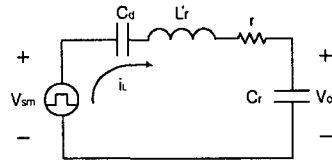


그림 6 점등전 인버터 등가 회로

이 등가 회로로부터 입력 임피던스 Z , 공진 인덕터 전류 i_{Lr} 및 램프 양단의 전압 v_o 는 각각 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Z = r + j \left(\omega L_r - \frac{1}{\omega C} \right) = r \left[1 + j Q_o \left(\frac{\omega}{\omega_o} - \frac{\omega_o}{\omega} \right) \right] = Z e^{j\theta} \quad (11)$$

여기서,

$$\left. \begin{aligned} Z &= r \sqrt{1 + Q_o^2 \left(\frac{\omega}{\omega_o} - \frac{\omega_o}{\omega} \right)^2} \\ \phi &= \tan^{-1} \left[Q_o \left(\frac{\omega}{\omega_o} - \frac{\omega_o}{\omega} \right) \right] \\ Q_o &= \frac{\omega_o L_r}{r} = \frac{1}{\omega_o C r}, \quad C = \frac{C_d C_r}{C_d + C_r} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

$$i_{Lr}(t) = I_{mn} \sin(\omega t - \phi_m) \quad (13)$$

여기서,

$$I_{mn} = \frac{V_m}{Z} = \frac{2V_B}{\pi r \sqrt{1 + Q_o^2 \left(\frac{\omega}{\omega_o} - \frac{\omega_o}{\omega} \right)^2}} \quad (14)$$

$$\phi_m = \tan^{-1} \left[Q_o \left(\frac{\omega}{\omega_o} - \frac{\omega_o}{\omega} \right) \right]$$

$$v_o(t) = V_{on} \sin(\omega t - \theta) \quad (15)$$

여기서,

$$\left. \begin{aligned} V_{on} &= \frac{2V_B \cdot \frac{Q_o \cdot C \cdot r}{C_r} \cdot \frac{\omega_o}{\omega}}{\pi r \sqrt{1 + Q_o^2 \left(\frac{\omega}{\omega_o} - \frac{\omega_o}{\omega} \right)^2}} \\ \theta &= \tan^{-1} \left[Q_o \left(\frac{\omega}{\omega_o} - \frac{\omega_o}{\omega} \right) \right] + 90^\circ \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

2.3.1.2 점등후 해석

자외선 살균 램프 점등후의 인버터 등가 회로는 그림 5(b)와 같이 나타낼 수 있다. 이때 공진 인덕터의 등가 직렬 저항 r 은 램프 저항 R 에 비해 작은 값으로서 해석의 편의상 무시하기로 하였다.

이 등가 회로로부터 점등 후 공진 인덕터에 흐르는 전류 i_{Lr} 과 램프 양단의 전압 v_o 를 구하면 다음과 같다.

$$i_{Lr}(t) = I_{Ln} \sin(\omega t - \psi_n) \quad (17)$$

여기서,

$$I_{Ln} = \frac{2V_B}{\pi Z_o Q_L} \sqrt{\frac{1 + [Q_L(\frac{\omega}{\omega_o})(1+A)]^2}{(1+A)^2 [1 - (\frac{\omega}{\omega_o})^2]^2 + \frac{1}{Q_L^2} (\frac{\omega}{\omega_o} - \frac{\omega_o}{\omega} \frac{A}{1+A})^2}}$$

$$\psi_n = \tan^{-1} \left[\frac{\frac{1}{Q_L} (\frac{\omega}{\omega_o} - \frac{\omega_o}{\omega} \frac{A}{1+A}) - Q_L (1+A)^2 (\frac{\omega}{\omega_o}) (1 - (\frac{\omega}{\omega_o})^2)}{(1+A) [1 - (\frac{\omega}{\omega_o})^2]} \right] \quad (18)$$

$$v_o(t) = V_{om} \sin(\omega t - \theta_n) \quad (19)$$

여기서,

$$V_{om} = \frac{2V_B}{\pi \sqrt{(1+A)^2 [1 - (\frac{\omega}{\omega_o})^2]^2 + \frac{1}{Q_L^2} (\frac{\omega}{\omega_o} - \frac{\omega_o}{\omega} \frac{A}{1+A})^2}}$$

$$\theta_n = \tan^{-1} \frac{\frac{1}{Q_L} (\frac{\omega}{\omega_o} - \frac{\omega_o}{\omega} \frac{A}{1+A})}{(1+A) [1 - (\frac{\omega}{\omega_o})^2]} \quad (20)$$

또한 램프 출력은

$$P = \frac{V_R^2}{R}$$

$$= \frac{2V_B^2}{\pi^2 Z_o Q_L [(1+A)^2 (1 - (\frac{\omega}{\omega_o})^2)^2 + \frac{1}{Q_L^2} (\frac{\omega}{\omega_o} - \frac{\omega_o}{\omega} \frac{A}{1+A})^2]} \quad (21)$$

로 구할 수 있다.

여기서 V_R 은 램프 양단의 전압의 실효치를 나타낸다.

3. 실험 결과

이상의 해석을 기초로 65W급 자외선 살균 램프용 고역률 전자식 안정기를 제작, 실험하였다. 설계 사양 및 설계값은 표 1과 같다.

표 1 설계 사양 및 설계값

설계 사양	설계 값
입력 전압	220V
출력 전압	145V
출력 전류	0.45A
스위칭 주파수	50KHz
커패시터 C_{in}	14.7nF
공진인덕터 L_r	915uH
공진커패시터 C_d	100nF
기동커패시터 C_r	18nF

그림 7은 입력 전압과 입력 전류 파형으로써 입력 전류가 약간의 고조파 성분을 포함하고 있으나 입력 전압에 비례하여 흐름을 알 수 있다. 이때에 측정된 역률은 0.94이다. 그림 8은 램프 전류 파형으로써 거의 왜곡이 없는 정현파 형태로 흐르고 있음을 알 수 있다. 인버터에서의 효율은 88%로 측정되었다.

이상의 실험 결과로부터 자외선 살균 램프용 고역률 전자식 안정기가 안정 점등 동작에 있어서 만족할 만한 특성을 보이고 있음이 입증되었다.

4. 결 론

자외선 살균 램프용 고역률 전자식 안정기에 관한 연구를 통하여 다음의 결론을 얻었다.

- (1) 램프의 전기적 특성을 확립하였다.
- (2) 자외선 살균 램프용 전자식 안정기의 주회로로 직렬 공진형 인버터에 역률 개선 회로가 단일 회로 방식으로 결합된 Charge Pump Power Factor Correction Inverter 회로를 적용함으로써 0.94 이상의 높은 역률 및 고조파 저감을 달성했다.
- (3) 자외선 살균 램프 등가 회로가 적용된 인버터 회로의 동작 해석으로부터 램프 출력 전력과 각부 전압, 전류식을 구하였다.
- (4) 해석 결과를 기초로 한 점등 회로의 설계를 통하여 램프 정격을 만족하고 안정 점등을 이루는 인버터 회로를 실현했다.

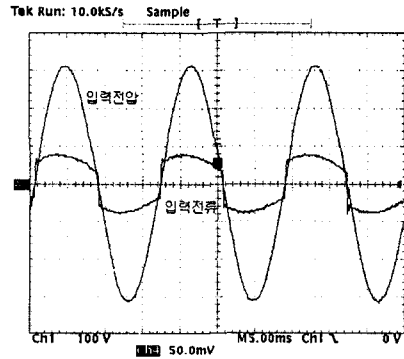


그림 7 입력 전압과 입력 전류 (역률 : 0.94)

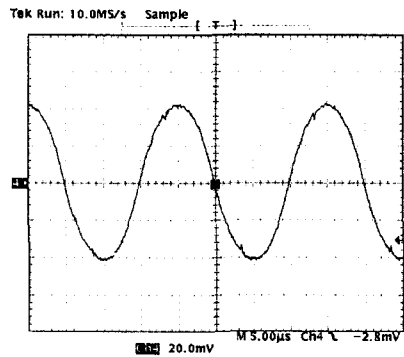


그림 8 램프 출력 전류 (div : 0.3A)

[참 고 문 헌]

- (1) Chr.Meyer, "DISCHARGE LAMPS", PHILIPS TECHNICAL LIBRARY, pp.249~282, 1988.
- (2) J. R. Coaton, "Lamps and Lighting", Fourth Edition, ARNOLD, pp.235~248, 1997.
- (3) MARIAN K. KAZIMIERCZUK, "RESONANT POWER CONVERTERS", A Wiley-Interscience Publication, pp.241~266, 1995.
- (4) Jinrong Qian and Fred C. Lee, "Current Source Charge Pump Power Factor Correction Electronic Ballast", PESC '97, pp.66~72, 1997.