

論文98-35S-8-13

무전극 램프 구동용 영전압 스위칭 고주파 인버터에 관한 연구 (Zero-Voltage-Switching High Frequency Inverter for Electrodeless Fluorescent Lamp)

朴東賢*, 金熙峻*, 趙基衍**, 桂文浩**

(Dong Hyun Park, Hee Jun Kim, Kee Yun Joe, and Mun Ho Kye)

요 약

무전극 램프의 점등은 램프 양단에 고주파를 갖는 고전압을 인가해야 한다. 종래의 무전극 램프의 구동 회로로 선형 증폭기가 이용되어져 왔으나, 낮은 에너지 변환 효율로 인해 PWM 스위칭 방식의 인버터로 교체되고 있다. 그러나 고주파 스위칭 인버터의 스위칭 소자에서 스위칭 손실의 증가 및 노이즈 발생의 문제로 인해 PWM 인버터는 고주파 동작이 제한된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 영전압 스위칭 기술을 PWM 인버터에 적용하여 고주파 스위칭이 가능하게 하고, 또한 스위칭 손실과 노이즈 발생을 줄일 수 있다. 본 논문에서는 무전극 램프 구동회로로 영전압 스위칭 고주파 인버터에 대하여 동작 해석과 설계 지침 제시하였다. 또한, 실험을 통하여 해석된 결과의 타당성을 확인하였다.

Abstract

Driving the electrodeless fluorescent lamp, the high ac voltage with high frequency is required. The linear power amplifier has been widely used as a driving circuit of electrodeless fluorescent lamp. However, the low efficiency of the power amplifier causes the driving circuit to be replaced by a PWM switching inverter. In order to use a PWM switching inverter as the driving circuit of an electrodeless fluorescent lamp, the high switching frequency is required. But due to the switching loss at switches of the inverter, the limitation of high switching frequency appears in the inverter. One solution to this limitation is to reduce the switching loss by using the zero voltage switching technique.

In this paper, zero voltage switching resonant inverter for driving an electrodeless fluorescent lamp is discussed. The results of analysis about the inverter are presented and the equations for design are established. And the validity of the analyzed results are verified through the experiment.

I. 서 론

무전극 램프는 전자유도에 의해 외부에서 램프의

* 正會員, 漢陽大學校 電氣工學科 電力電子制御 研究室
(Power Electronics Control Lab. School of
Electrical and Computer Eng. Hanyang Univ.)

** 正會員, 韓國電氣研究所 電力電子研究部
(Power Electronic Division Korea Electro-
technology Research Institute)

接受日字: 1998年3月17日, 수정완료일: 1998年6月22日

내부가스를 방전시켜 발광하기 때문에 램프 내부에 전극이 존재하지 않는다. 따라서 기본적으로 전력이 소모되는 부분인 전극을 갖지 않으므로 종래의 램프에 비해 수명이 길고 유지 보수면에서 큰 잇점이 있다. 무전극 램프는 현재 선진 각국에서 실용화 연구가 진행되고 있으며, 일반 조명용 램프로서의 이용이 점점 확대되어 가고 있는 실정이다.

무전극 램프의 구동은 램프 시동시부터 안정점등까지 주회로의 전압, 전류의 피크치가 크게 변화하기 때문에 램프 시동 및 안정점등을 만족하는 구동회로가

요구된다.^[1] 또한 무전극 램프 점등회로의 동작주파수는 코일에서 플라즈마로 흐르는 에너지 결합효율을 고려해서 결정해야 하는데, Open 페라이트 코어 무전극 램프인 경우 동작주파수가 1.5MHz에서 결합효율이 90% 이상이 된다. 그러므로 무전극 램프의 구동에는 동작 주파수가 1.5MHz 이상의 고주파 전압이 필요하게 된다. 현재 무전극 램프의 구동회로는 대부분 선형 전력증폭기가 이용되고 있으나 낮은 변환효율로 인하여 스위칭 타입의 PWM인버터로 대체되고 있다. 그러나 통상의 PWM 인버터는 스위칭 소자의 스위칭 손실로 인하여 1.5MHz 이상의 주파수에서는 동작시킬 수 없다.^{[2][3]}

본 논문에서는 무전극 램프 구동용으로 고주파 스위칭이 가능한 영전압 스위칭 인버터에 대하여 동작해석과 설계지침을 제시하였다. 우선 램프의 점등전과 점등후의 등가회로를 구하고 이를 인버터에 적용하여 동작해석을 함으로써 램프의 시동 및 안정점등의 조건을 구하였고, 이 결과를 토대로 무전극 램프 구동용 영전압 스위칭 인버터의 설계지침을 확립할 수 있었으며, 실험을 통하여 그 동작특성을 확인하였다.

II. 무전극 램프 점등 원리 및 구동회로

그림 1은 무전극 램프의 점등원리를 나타낸 개념도이다. 무전극 램프의 구동은 다음과 같이 설명할 수 있다. 우선 내부에 설치된 유도 코일 권선에 램프 시동전압을 넘는 고주파 고전압을 가한다. 코일에 흐르는 전류는 고주파 전류로 고주파자계를 유기시키고 또한, 이 자계는 무전극 램프 내부에 고주파의 전계를 발생시킨다. 이 전계에 의해 내부의 가스가 여기되어 자외선이 발생한다. 발생한 자외선은 발광체 내면에 도장된 형광체에 해당하는 가시광선으로 변환되어지며 무전극 램프가 점등하게 된다.

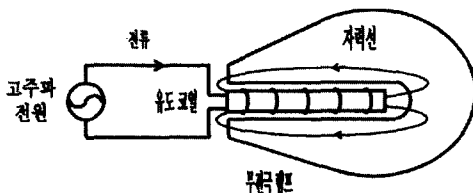


그림 1. 무전극 램프 점등원리
Fig. 1. The lighting principle of electrodeless lamp.

무전극 램프의 구동회로는 고주파동작에서 고효율을 얻을 수 있는 회로로 구성되어야 하며 램프시동에 필요한 고주파 고전압을 유도코일에 인가 할 때 소자의 전압, 전류 스트레스를 소자의 정격 내로 억제해야 한다. 또한 램프의 점등시에 정격 출력을 얻을 수 있어야하고 무전극 램프의 방전플라즈마가 갖는 부성저항 특성에 의한 불안정성을 제거하여 램프를 안정 점등하여야 한다.^[4]

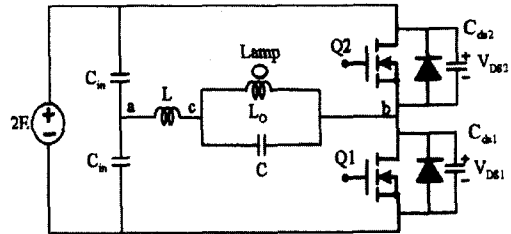


그림 2. 무전극 램프 구동을 위한 영전압스위칭 인버터
Fig. 2. Zero-voltage-switching inverter for electrodeless lamp.

그림 2는 무전극 램프의 구동을 위한 영전압스위칭 인버터의 기본 회로도다. 회로는 유도 코일 Lo에 병렬로 연결한 C와 직렬로 연결한 L로서 구성하여 직렬 공진회로를 구성한 하프 브리지형 인버터이다. 무전극 램프의 점등시에는 공진 회로에 의하여 램프 시동 전압 이상의 고주파 고전압을 유도코일 양단에 인가하여 램프를 점등시키고, 점등후에는 램프의 임피던스가 크게 변하여 전압, 전류의 진폭이 감소하므로 회로 소자에 과도한 전압, 전류 스트레스를 주지 않으며 무전극 램프의 정격 전력에 의한 안정점등이 행해진다.

1. 무전극 램프 등가회로

무전극 램프는 유도 코일에 고주파의 고전압을 인가하여 무전극 램프를 점등하는데 방전이 개시될 때까지는 방전관은 무부하로써 취급되는 한편, 방전후는 등가적으로 순수한 저항으로 볼 수 있다. 유도코일과 방전로와의 결합계수를 k, 방전로의 저항을 Rp, 유도코일의 권선수를 n이라 하면, 무전극 램프와 유도코일은 n:1의 공심 트랜스에 Rp인 저항이 접속된 등가회로로 표시할 수 있으며, 이를 그림3과 같이 나타낼 수 있다.

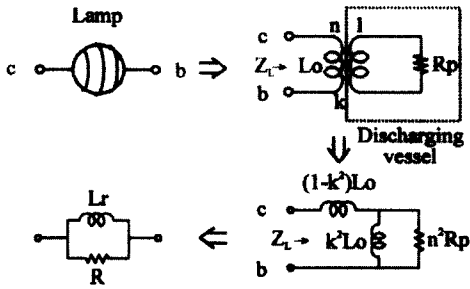


그림 3. 무전극 램프의 등가회로
Fig. 3. Equivalent circuit of electrodeless lamp.

이 등가회로로부터 유도코일의 양단 b c의 임피던스 Z_L 를 구하면 다음식과 같이 된다.

$$Z_L = R_1 + j \omega_s L_1 \quad (1)$$

$$R_1 = \frac{\omega_s^2 n^2 R_p k^4 L_0^2}{n^4 R_p^2 + k^4 L_0^2 \omega_s^2} \quad (2)$$

$$L_1 = (1 - k^2) L_0 + \frac{n^4 R_p^2 k^2 L_0}{n^4 R_p^2 + k^4 L_0^2 \omega_s^2} \quad (3)$$

여기서 L_0 는 b, c 단자에서 본 여자인덕턴스, ω_s 는 스위칭 각주파수를 나타낸다. 그리고 해석을 용이하게 하기 위해 임피던스 Z_L 를 저항 R과 인덕턴스 L_r 를 병렬 접속한 것으로 변환하면 그 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R = R_1 + \frac{\omega_s^2 L_1^2}{R_1}, L_r = L_1 + \frac{R_1^2}{\omega_s^2 L_1} \quad (4)$$

그림 4는 식(4)로 표현되는 무전극 램프 등가회로를 적용한 영전압 스위칭 인버터의 회로도를 나타낸다.

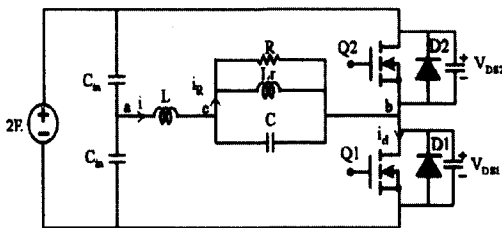


그림 4. 무전극 램프의 등가회로를 적용한 영전압 스위칭 인버터 회로
Fig. 4. ZVS inverter with an equivalent circuit of electrodeless lamp.

2. 영전압스위칭 인버터의 기본동작

무전극 램프의 점등전에 있어서 공진인덕터L을 포함한 공진회로부 전체의 리액턴스 X로부터 병렬 공진 주파수 f_{ox} 와 직렬 공진주파수 f_{rx} 를 구하면 다음 식과 같이 된다.

$$f_{ox} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{CL_0}} \quad (5)$$

$$f_{rx} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{C} \left(\frac{1}{L_0} + \frac{1}{L} \right)} \quad (6)$$

같은 방법으로, 점등후의 병렬 공진 주파수 f_o 와 직렬 공진 주파수 f_r 은

$$f_o = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{CL_r} - \frac{1}{(2CR)^2}} \quad (7)$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{C} \left(\frac{1}{L_r} + \frac{1}{L} \right) - \frac{1}{(2CR)^2}} \quad (8)$$

로 구할 수 있다.

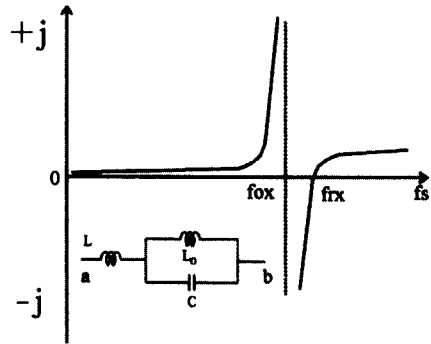


그림 5. 주파수 변화에 대한 공진회로부의 리액턴스 X
Fig. 5. Reactance X of resonant part for the frequency variation.

그림 5는 점등전, 공진회로부의 리액턴스 X의 주파수 특성을 나타낸다. 병렬공진주파수 f_{ox} 에서 무한대의 값을 가지며, 직렬공진주파수 f_{rx} 에서 0의 값을 가짐을 알 수 있다. 따라서 그림4의 인버터가 영전압 스위칭 동작을 수행하기 위해서는 스위칭 주파수 f_s 를 직렬 공진주파수 f_r 보다 높게 설정하여 공진회로부를 유도성 부하로 동작하게끔 해야 한다. 이것은 양 스위치가 오프 되는 데드타임 기간 중에 유도성부하인 공진회로부에 축적된 에너지에 의해 공진전류는 스위칭 출력기 생용량 $C_{ds1}(C_{ds2})$ 을 방전 시키고 더 나아가 스위치의

역병렬다이오드를 통해 계속 흐르게 되며 이 기간 동안에 스위치를 턴온시켜 영전압 스위칭을 실현할 수 있음을 의미한다.

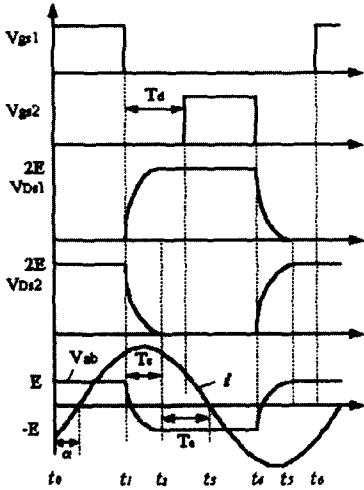


그림 6. 전압 스위칭 인버터의 동작 파형
Fig. 6. The operational waveforms of zero-voltage-switching inverter.

본 회로의 동작파형은 그림 6과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, V_{gs1} , V_{gs2} 는 스위치 Q1, Q2의 게이트-소스간 전압, V_{ds1} , V_{ds2} 는 스위치 Q1, Q2의 드레인-소스간 전압, V_{ab} 는 공진회로부의 a, b간 전압, i 는 인덕턴스 L에 흐르는 공진전류를 나타낸다. 그리고 T_d 는 데드타임을 나타낸다. t_0 의 시점에서 스위치 Q1을 턴온하면 공진회로부가 유도성 임피던스이므로 인덕터 전류 i 는 위상각 α 만큼 지연되어 흐르면서 공진인덕터 L에 에너지가 축적된다. 이때 차단되고 있는 스위치 Q2의 드레인-소스간 전압 V_{ds2} 는 입력전압 $2E$ 로 클램프된다. t_1 의 시점에서 스위치 Q1을 턴오프시키면 공진전류 i 에 의해, 스위치 Q1의 출력 기생용량 C_{ds1} 은 충전되어 시간 T_c 동안에 스위치 양단전압 V_{ds1} 이 입력전압 $2E$ 에 도달되는 한편, 스위치 Q2는 출력 기생용량 C_{ds2} 가 방전되므로 그 양단의 전압 V_{ds2} 는 영전압에 도달한다. 이때의 총·방전은 공진회로부의 회로정수와 스위치의 출력기생용량의 공진에 의해서 이루어진다. 총·방전시간 T_c 의 경과 후에도 인덕터 전류는 감소하기는 하지만 같은 방향으로 계속 흐르게 되므로 0 이되는 T_a 의 시간동안 스위치 Q2의 역병렬다이오드 D2를 통하여 흐르게되고 V_{ds2} 는 계속 영전압으로 클램프된다. 따라서 T_a 의 동안에 스위

치 Q2를 턴온시키면 영전압 스위칭 동작이 실현가능하게 된다. 스위치 Q1에 대해서도 동일한 원리로 영전압 스위칭 동작이 실현된다.

III. 동작해석

1. 전압, 전류식의 유도

해석의 편의상 공진회로부의 양단 전압을 구형파의 전원으로 근사화하여 점등후의 등가회로를 그림 7과 같이 구성하였다. 또한 스위칭 주파수가 직렬공진주파수에 근접하면 공진회로부의 임피던스는 기본파 성분인 스위칭 주파수에서 가장 작으며, 고조파 성분에 대해서는 상대적으로 큰 임피던스를 가지므로 무시할 수 있다. 즉, 구형파 전원을 기본파성분만을 고려하여 정현파의 전원을 갖는 회로로 근사화할 수 있다. 따라서 공진회로부의 양단전압은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_i \cong V_m \sin \omega_s t \tag{9}$$

여기서

$$V_m = \frac{4E}{\pi} \tag{10}$$

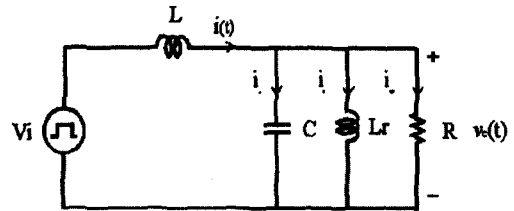


그림 7. 무전극 램프회로의 등가회로
Fig. 7. Approximated equivalent circuit of inverter.

이 때 무전극 램프 양단전압 $v_c(t)$ 는 다음과 같이 구할 수 있으며

$$v_c(t) = v_{cm} \sin(\omega_s t - \theta) \tag{11}$$

여기서

$$\left. \begin{aligned} v_{cm} &= \sqrt{\frac{V_m/LC}{(T^2 + \omega_r^2 - \omega_s^2)^2 + (2\omega_s T)^2}} \\ \theta &= \tan^{-1} \frac{2\omega_s T}{T^2 + \omega_r^2 - \omega_s^2} \\ T &= \frac{1}{2RC} \end{aligned} \right\} \tag{12}$$

공진회로부의 인덕터 L에 흐르는 전류 $i(t)$ 는 다음과

같이 구할수 있다.

$$i(t) = I_m \sin(\omega_s t - \alpha) \tag{13}$$

여기서

$$I_m = \frac{V_m \sqrt{(T^2 + \omega_o^2 - \omega_s^2)^2 + (2\omega_s T)^2}}{\omega L \sqrt{(T^2 + \omega_r^2 - \omega_s^2)^2 + (2\omega_s T)^2}}$$

$$\alpha = 90^\circ + \tan^{-1} \frac{2\omega_s T}{T^2 + \omega_r^2 - \omega_s^2} - \tan^{-1} \frac{2\omega_s T}{T^2 + \omega_o^2 - \omega_s^2} \tag{14}$$

점등전의 램프양단의 전압 $v_\alpha(t)$ 와 인덕터 전류 $i_x(t)$ 는 식(11)과 (13)에 $R = \infty$ 를 대입해서 구하면 다음과 같다.

$$v_\alpha(t) = \frac{V_m / LC}{\omega_r^2 - \omega_s^2} \sin \omega_s t \tag{15}$$

$$i_x(t) = \frac{V_m (\omega_\alpha^2 - \omega_s^2)}{\omega L (\omega_r^2 - \omega_s^2)} \sin(\omega_s t - 90^\circ) \tag{16}$$

인덕터 설계시 가장 핵심적인 부분인 공진회로 및 스위치 전류의 설계값으로 이 두식의 최대값을 이용할 수 있다.

2. 데드 타임의 조건식

그림 6에서 영전압 스위칭동작을 행하기 위해서는 스위치의 역병렬다이오드 도통시간, T_a 동안에 스위치가 턴온 되어야 한다. 스위치의 출력기생용량의 방전시간을 T_c 라고 하면, 영전압 스위칭 동작을 위한 데드타임 T_d 의 조건식은 다음과 같이 표시된다.

$$T_c \leq T_d \leq T_c + T_a \tag{17}$$

이 식에서 특히 $T_a = 0$ 인 경우는 스위치가 영전압 및 영전류에서 턴온되는 최적동작이 된다. 스위치의 출력기생용량의 충전시간을 유도하면 다음과 같이 표시된다.

$$2C_{ds}E = \int_{\pi - \frac{T_c}{2}}^{\pi + \frac{T_c}{2}} |i(t)| d\omega_s t \tag{18}$$

$$\therefore T_c = 2 \sin^{-1} \frac{C_{ds}E}{I_m \sin \alpha} \tag{19}$$

여기서 α 는 $i(t)=0$ 일때의 위상각이고 스위치의 출력기생용량은 $C_{ds}=C_{ds1}=C_{ds2}$ 로 가정한다. 스위치의 역병렬다이오드의 도통시간, T_a 는 다음식과 같이 된다.

$$T_a = \alpha - \frac{T_c}{2} \tag{20}$$

3. 램프의 안정 점등 조건

무전극 램프의 점등시에 램프저항 R 의 값은 일정하지 않고 일반적으로 전력의 증가와 함께 감소하는 부성저항특성을 나타낸다. 이 부성저항 특성이 무전극 램프의 출력에 대해 정제환으로 작용하는 경우 램프의 안정점등이 이루어지지 않는다. 따라서 무전극 램프를 안정점등하기 위해서는 램프출력 P 는 램프저항 R 이 감소하면 램프출력도 감소하는 부제환의 특성을 가져야 한다. 저항 R 의 변화에 대한 램프출력 P 의 관계식을 구하면 다음식과 같이 표시된다.

$$P = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} \frac{[v_c(t)]^2}{R} dt$$

$$= \frac{V_m^2}{2RL^2C^2} [(T^2 + \omega_r^2 - \omega_s^2)^2 + (2\omega_s T)^2]^{-1} \tag{21}$$

램프의 안정점등 영역을 얻기위해 출력전력 P 가 최대치가 되는 저항 R 의 값을 R_m 로 정의하고 $dP/dR=0$ 의 관계로부터 R_m 을 구하면 다음과 같다.

$$R_m = \frac{\omega_s}{C(T^2 + \omega_r^2 - \omega_s^2)} \tag{22}$$

그림 8은 램프저항 R 의 변화에 대한 램프 출력의 이론적인 결과를 나타낸다. $R < R_m$ 의 범위에서 출력전력 P 는 램프저항 R 에 대해 증가관계를 갖는 안정점등의 영역이 되고 $R > R_m$ 의 범위에서는 불안정 점등영역이 된다. 위의 결과로부터 R_m 을 충분히 크게 설정함으로써 램프의 안정점등의 신뢰성을 향상 시킬수 있음을 알 수 있다.

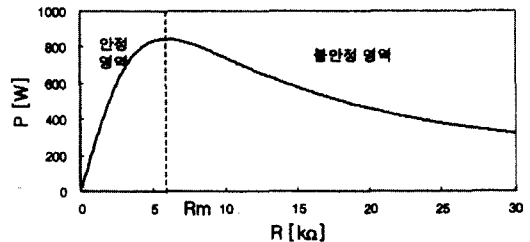


그림 8. 저항 R의 변화에 대한 램프 출력
Fig. 8. Lamp power vs. lamp resistor.

IV. 시뮬레이션 및 실험 결과

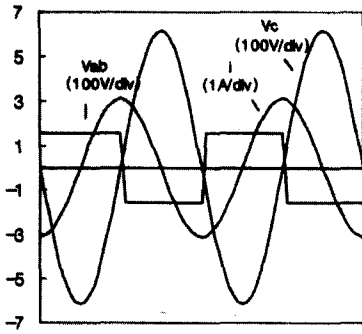
시뮬레이션과 실험을 통해 해석된 결과의 타당성을

입증하기 위해 필립스사에서 제작된 85W급 무전극 램프를 이용하였다.

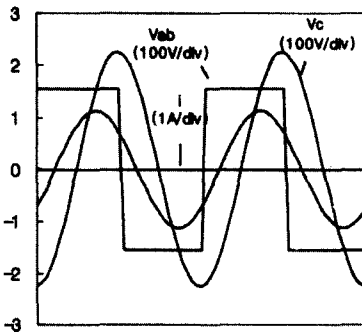
식(15)와 (16)으로부터 공진커패시턴스 C와 공진인덕턴스 L을 구하면 $L=16.6\mu\text{H}$ 와 $C=660\text{pF}$ 로 각각 계산된다. 이 외에 시뮬레이션에 사용된 파라미터는 다음과 같다.

$$P = 85\text{W}, 2E = 310\text{V}, L_o = 12\mu\text{H},$$

$$L_r = 9.5\mu\text{H}, R = 300\Omega, f_s = 2.5\text{MHz}$$



(a) 점등전
(a) Before starting



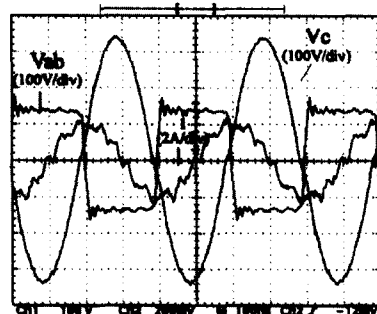
(b) 점등후
(b) After starting

그림 9. V_{ab} , V_c , i 의 이론적 파형
Fig. 9. Simulated waveforms of ZVS inverter.

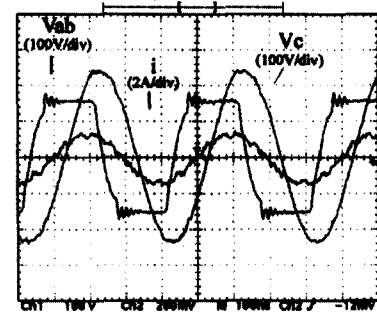
그림 9는 무전극램프 구동용 ZVS 인버터의 점등 전·후의 시뮬레이션 결과 파형을 나타낸다. 그림에서 V_{ab} 는 인버터의 공진회로부 a, b간 전압, V_c 는 램프 전압, i 는 인덕터에 흐르는 전류를 나타낸다. 램프전압의 피크치는 램프저항의 변화로 인하여 점등전에 600V에서 점등후에 230V로 감소됨을 알 수 있다. 실험에서 인덕턴스 L은 회로의 기생 인덕턴스를 고려하

여 해석치보다 약간 작은 값인 $L=15.3\mu\text{H}$ 로 결정했으며 나머지 회로의 파라미터들은 시뮬레이션에 사용된 값을 사용하였다.

그림 10은 무전극 램프 구동용 영전압 스위칭 인버터의 실험결과를 나타낸다. 이 실험을 통하여 무전극 램프의 시동 및 안정점등이 이루어짐을 확인할 수 있었다. 또한, 실험의 결과가 이론적인 해석결과와 잘 일치함을 알 수 있었다.



(a) 점등전
(a) Before starting



(b) 점등후
(b) After starting

그림 10. 실험결과 파형
Fig. 10. Experimental waveforms.

V. 결 론

무전극 램프 구동용 영전압 스위칭 인버터에 대한 회로의 동작 해석 및 점등실험을 통하여 다음의 결론을 얻었다.

- (1) 무전극 램프 등가회로를 이용한 회로의 동작해석으로부터 램프 출력전력과 각부의 전압, 전류식을 구하였다.

- (2) 해석식을 통하여 영전압 스위칭 조건 및 설계지침을 얻을 수 있었다.
- (3) 램프정격과 램프 저항과의 관계를 통하여 램프의 안정점등 조건을 구하였다.

참 고 문 헌

[1] J.M.Anderson: "Electrodeless Fluorescent Lamps Exited by Solenoidal Electric Field" Illum. ENG. 64 (1969).

[2] M.Shinomiya: "Development of the Electrodeless Fluorescent Lamp" IEs Annual Conference.

[3] C.I.Babat: "Electrodeless Discharges and Some Allied Problems" J. of I E E Part 3. 94, pp.27-37 (1942).

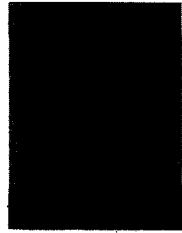
[4] K.Harada, T.Hosotani, Y.Ishihara, T.Todaka F. Okamoto: "10MHz Zero-Voltage-Switched Resonant Inverter for Electrodeless Fluorescent Lamp" J. Illum. Engng. Inst. Jpn. Vol 79 No.11 1995.

저 자 소 개

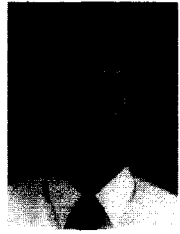
朴 東 賢(正會員)

1970년 9월 20일생. 1996년 한양대 전기공학과 졸업.
1998년 동 대학원전기공학과 졸업(석사). 현재 LG 산
전 중앙연구소 R&D Center 연구원

金 熙 峻(正會員)



1954년 11월 16일생. 1976년 한양
대 공대 전자공학과 졸업. 1978년
동 대학원 전자공학과 졸업(석사).
1986년 일본 큐슈대 대학원 전자공
학과 졸업(공학박사). 1987년 ~ 현
재 한양대학교 전자·컴퓨터·전기·제어공학부 교수.
1991년 ~1992년 미국 버지니아공대 방문교수. 대한
전기학회 평의원. 한국전력전자학회 편집이사. 주관심
분야는 Resonant Converter, 고밀도 전원장치,
Electronic Ballast등 임



趙 基 衍(正會員)

1954년 2월 5일생. 1980년 영남대
공대 전기공학과 졸업. 1982년 동
대학원 전기공학과 졸업(석사).
1991년 동 대학원 전기공학과 졸업
(박사). 현재 한국전기연구소 책임

연구원(전력전자연구부 부장)

桂 文 浩(正會員)



1958년 1월 30일생. 1982년 한양대
공대 전자공학과 졸업. 1993년 창
원대 공대 전기공학과 졸업(석사).
현재 한국전기연구소 전력전자연구
부 선임연구원, 부산대 공대 박사과

정