

무전극 램프 점등용 2.5MHz급 ZVS 인버터 개발에 관한 연구

박 동현, 김 희준
한양대학교 전기공학과
전력전자 제어 연구실

조 기연, 계 문호
한국 전기연구소
전력전자부

2.5MHz Zero-Voltage-Switching Resonant Inverter for Electrodeless Fluorescent Lamp

D.H.Park, H.J.Kim
PEC Lab, Dept. of Electrical Eng.
Hanyang Univ.

K.Y.Joe, M.H.Kye
Power Electronic Division
Korea Electrotechnology Research Institute

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.

1. 서론

무전극 램프는 전자유도법칙에 의해 외부에서 내부가스를 방전시켜 발광하기 때문에 램프 내부에 전극이 존재하지 않는다. 따라서 기본적으로 전력이 소모되는 부분을 갖지 않으므로 종래의 램프에 비해 수명이 길고 유지보수면에서 큰 잇점이 있다. 무전극 램프는 현재 선진 각국에서 실용화 연구가 진행되고 있으며, 일반 조명용 램프로서의 이용이 점점 확대되어 가고 있는 실정이다. 무전극 램프의 구동은 램프시동시부터 안정점등까지 주회로의 전압, 전류의 피크치가 크게 변화하기 때문에 램프 시동 및 안정점등을 만족하는 구동회로가 요구된다. 또한 무전극 램프 점등회로의 동작주파수는 코일에서 플라즈마로 흐르는 에너지 결합효율을 고려해서 결정해야 하는데, Open 페라이트 코어 무전극 램프인 경우 동작주파수가 1.5MHz에서 결합효율이 90%이상

이 된다. 그러므로 무전극램프의 구동에는 동작 주파수가 1.5MHz 이상의 고주파 전압이 필요하게 됨을 알 수 있다. 현재 무전극 램프의 구동회로에는 대부분 선형 전력증폭기가 이용되고 있으나 낮은 변환효율로 인하여 스위칭 타입의 인버터로 대체되고 있다. 그러나 통상의 PWM 인버터는 스위칭 소자의 스위칭 손실로 인하여 1.5MHz이상의 주파수에서는 동작시킬 수 없다. 본 논문은 무전극 램프 구동용으로 고주파 스위칭이 가능한 영전압 스위칭 인버터에 대하여 동작해석과 설계지침을 제시하고 있다. 우선 램프의 점등전과 점등후의 등가회로를 구하고 이를 인버터에 적용하여 동작해석을 함으로써 시동 및 안정점 등의 조건을 구할 수 있었다. 또한 이 결과를 토대로 무전극 램프 구동용 영전압 스위칭 인버터의 설계지침을 확립할수 있었으며, 실험을 통하여 그 동작특성을 확인하였다.

2. 무전극 램프 점등 원리 및 점등회로

무전극 램프의 구동은 다음과 같이 설명할 수 있다. 우선 내부에 설치된 유도 코일 권선에 램프 시동 전압을 넘는 고주파 고전압을 가한다. 코일에 흐르는 전류는 고주파 전류로 고주파자계를 갖는 고주파 전계를 유지시킨다. 이 전계에 의해 내부의 가스가 여기되어 자외선이 발생한다. 발생한 자외선은 발광체 내면에 도장된 형광체에 해당하는

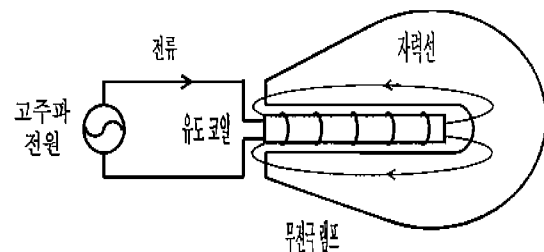


그림 1 무전극 램프 점등원리

가시광선으로 변환되어지며 무전극 램프가 점등하게 된다. 무전극 램프의 구동회로는 고주파동작에서 고효율을 얻을 수 있는 회로로 구성되어져야 하며 램프시동에 필요한 고주파 고전압을 유도코일에 인가 할 때 소자의 전압, 전류 스트레스를 소자의 정격내로 억제해야 한다. 또한 램프의 점등시에 있어서 정격 출력을 얻을 수 있어야 하고 무전극 램프의 방전플라즈마가 갖는 부정저항특성에 의한 불안정성을 제거하여 램프를 안정점등하여야 한다. 회로는 유도 코일 L_o 에 병렬로 연결한 C 와 직렬로 연결한 L 로서 구성하여 직렬 공진회로를 구성한 하프 브리지 인버터이다.

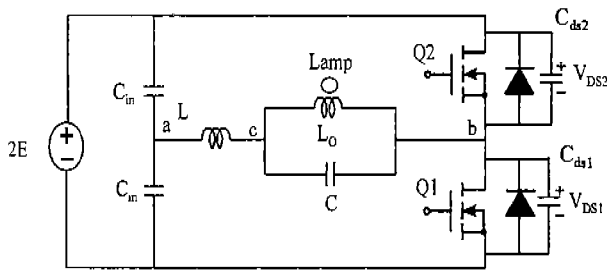


그림 2 영전압 스위칭 인버터에 관한 무전극 램프회로

2. 1 무전극 램프 등가회로

무전극 램프는 유도 코일에 고주파 고전압을 인가하여 무전극 램프를 시동하는데 방전이 개시될때까지는 방전관은 무부하로써 취급되는 한편, 방전후는 등가적으로 순수한 저항으로 볼 수 있다. 유도코일과 방전로와의 결합계수를 k , 방전로의 저항을 R_p , 유도코일의 권선수를 n 이라 하면, 무전극 램프와 유도코일은 $n:1$ 의 공심 트랜스에 R_p 인 저항이 접속된 등가회로로 표시되며 이를 변형하여 그림3와 같이 표시할 수 있다.

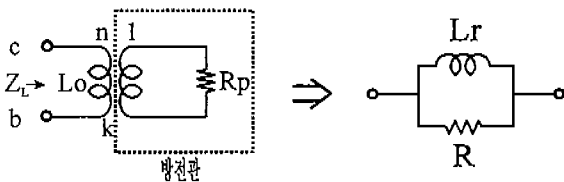


그림 3 무전극 램프의 등가회로

유도코일의 양단 b c의 임피던스 Z_L , 스위칭 각주파수를 w_s 라 하면, 다음식으로 표시된다.

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

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

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

여기서 L_o 는 b,c 단자에서 본 여자인덕턴스를 나타낸다. 그리고 해석을 용이하게 하기 위해 임피던스 Z_L 을 저항 R 과 인덕턴스 L_r 을 병렬 접속한 것으로 변환하면 변환식은 다음으로 표시된다.

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

그림4은 무전극 램프의 등가회로를 적용한 영전압 스위칭 인버터의 회로도를 나타내었다.

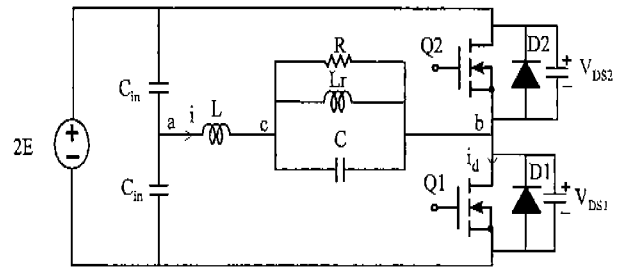


그림 4 무전극램프 점등용 영전압 스위칭 인버터 회로

2. 2 기본동작

무전극 램프 인버터 회로에서 점등전의 병렬공진주파수 f_{ox} 와 직렬공진주파수 f_{rx} 는,

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

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

로 표시된다. 또한, 점등후의 병렬 공진 주파수 f_o 와 직렬 공진 주파수 f_r 은

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

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

가 된다.

본 회로에서 스위칭 주파수 f_s 는 직렬공진주파수 f_r 보다 높게 설정한다. 부하는 유도성 임피던스이기 때문에 양 스위치가 오프되면 데드타임 기간중에도 축적된 리액턴스에 너지여의해 공진전류 i_g 가 계속흐른다. 이 전류에의해 스위치 기생용량 C_{ds1} , C_{ds2} 의 충전전압이 이루어지며, 이로써 영전압 스위칭이 실현된다. 본 회로의 이상적인 동작파형은 그림4와 같이 나타낼 수 있다.

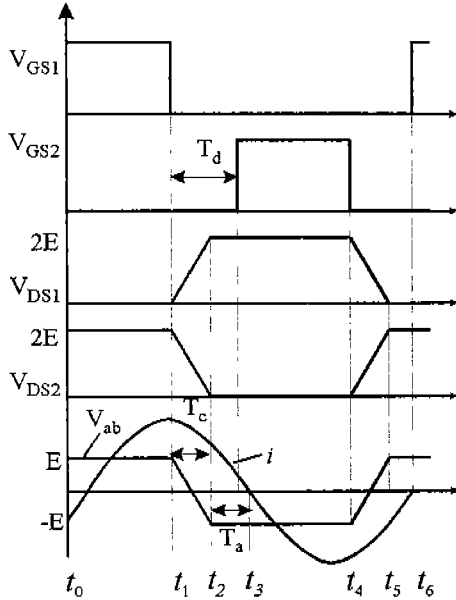


그림 5 이상적인 동작파형

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 a, b간 전압, i 는 인덕턴스 L에 흐르는 공진전류이다. Q1, Q2는 구형파의 게이트 전압 V_{GS1} , V_{GS2} 에 의해 양 스위치가 오프되면 데드타임 T_d 동안 상호 온, 오프되어지며, 게이트 전압 V_{GS1} 이 영이 되면 스위치 Q1이 턴-오프되고 공진전류 i 에 의해 스위치 Q1의 기생용량 C_{ds1} 이 충전되어 스위치 양단전압 V_{DS1} 은 시간 T_c 사이에 직선적으로 증가하는 한편, 스위치 Q2는 기생용량 C_{ds2} 가 방전되어 그 양단전압 V_{DS2} 는 직선적으로 감소한다. 전류시간 T_c 경과후 양 단전압 V_{DS2} 가 영이 되면 스위치 Q2의 기생다이오드 D2가 도통하여 양단전압 V_{DS2} 는 영전압으로 클램프된다. 이 기생 다이오드 D2가 도통되고 있는 시간 T_a 사이에 게이트 전압 V_{GS2} 에 온전압을 인가하여 스위치 Q2를 턴온시켜 영전압 스위칭 동작이 실현되고 스위치 Q1에 대해서도 동일하게 영전압 스위칭 동작이 실현된다.

3. 동작해석

3.1 전압, 전류식의 유도

해석의 편의상 a, b양단 전압을 구형파의 전원으로 등가화하여 구성할 수 있다. 스위칭 주파수가 직렬공진주파수에 근접하면 직렬공진회로부의 임피던스는 스위칭 주파수에서 가장 작으며 스위칭 주파수의 2배 이상의 대역에서 상대적으로 큰 임피던스를 갖으므로 무시할 수 있다. 즉 구형파를 Fourier변환하여 기본파성분만을 고려하여 정현파의 전원을 갖는 회로로 재 등가화할 수 있다.

$$V_i = E \quad (0 < \omega t \leq \pi) \\ -E \quad (\pi < \omega t \leq 2\pi) \quad (9)$$

V_i 를 Fourier변환하여 근사화 하면

$$V_i = V_m \sin \omega t \quad (V_m = 4E/\pi) \quad (10)$$

무전극 램프 양단전압 $V_c(t)$ 는

$$v_c(t) = v_{cm} \sin(\omega t - \theta) \quad (11)$$

$$v_{cm} = \frac{V_m/LC}{\sqrt{(T^2 + \omega_r^2 - \omega^2)^2 + (2\omega T)^2}}$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{2\omega T}{T^2 + \omega_r^2 - \omega^2}$$

$$T = \frac{1}{2RC}$$

공진회로부의 인덕턴스 L에 흐르는 전류 $i(t)$ 는

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \alpha) \quad (12)$$

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

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

점등전의 $V_{cx}(t)$, $i_x(t)$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$v_{cx}(t) = \frac{V_m/LC}{\omega_r^2 - \omega^2} \sin \omega t \quad (13)$$

$$i_x(t) = \frac{V_m(\omega_{cx}^2 - \omega^2)}{\omega L(\omega_r^2 - \omega^2)} \sin(\omega t - 90^\circ) \quad (14)$$

3.2 데드 타임의 조건식

영전압 스위칭동작을 행하기 위해서는 양 스위치가 오프된 데드타임 T_d 기간중에 2개의 스위치의 기생용량이 충전방전을 행하여, 전류시간 T_c 의 종료후, 기생 다이오드 도통시간 T_a 내에 스위치가 온 되지 않으면 안된다. 영전압 스위칭동작을 하기위한 데드타임 T_d 의 조건식은 다음과 같이 표시된다.

$$T_c \leq T_d \leq T_c + T_a \quad (15)$$

윗식에서 특히 $T_a = 0$ 인 경우는 스위치의 동작을 영전압 스위칭을 갖고 영전류되는 최적동작이 된다.

스위치 Q1의 턴오프시의 전류기간에서 다음의 식을 유도하면, 단 $C_{ds} = C_{ds1} = C_{ds2}$

$$2C_{ds}E = \int_{\pi - \frac{T_c}{2}}^{\pi + \frac{T_c}{2}} |i(t)| d\omega t \quad (16)$$

$$\therefore \sin \frac{T_c}{2} = \frac{C_{ds}E}{I_m \sin \alpha} \quad (17)$$

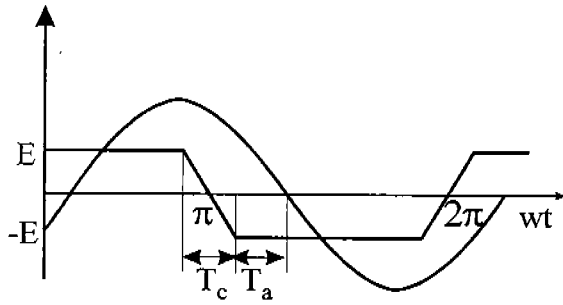


그림 6 Vab양단 전압과 인덕터 전류 i의 파형

기생다이오드 도통시간 T_a 는 $i(t) = 0$ 일 때 위상각 α 의 관계식으로부터 구하면

$$T_a = \alpha - \frac{T_c}{2} \quad (18)$$

3.3 램프의 출력 전력

무전극 램프의 점등시에 있어서 램프 출력 P 는 다음식으로부터 구해진다.

$$P = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} \frac{[v_c(t)]^2}{R} dt = \frac{V_m^2}{2RL^2C^2} [(T^2 + w_r^2 - w^2)^2 + (2wT)^2]^{-1} \quad (19)$$

식(19)으로부터 출력전력 P 를 크게하기 위해서는 직렬공진 주파수 f_r 이 스위칭주파수 f_s 에 근접하도록 설계할 필요가 있다. 또한, 무전극 방전 램프에서는 점등시의 플라즈마 저항 R_p 의 값은 일정하지 않고 일반적으로 전력의 증가와 함께 감소하는 부정저항특성을 나타내며, 출력전력 P 가 플라즈마 저항 R_p 에 대해 감소관계를 갖는 경우, 플라즈마 저항 R_p 가 작게 되면 출력전력 P 는 커진다.

방전 특성에의해서 플라즈마 저항 R_p 가 작게 되고 출력전력 P 가 커지게 되는 정계환이 걸리게 된다. 정계환이 걸리게 되면 플라즈마 저항 R_p 의 변화에 대해 출력전력 P 가 크게 변화하여 나쁘다. 출력전력 P 는 플라즈마 저항 R_p 에 대해 증가관계를 갖지 않으면 안된다. 저항 R 의 변화에 따른 출력전력 P 의 관계식을 구하면

$$P = \frac{V_m^2}{2L^2C^2} \frac{1}{y(R)} \quad (20)$$

$$y(R) = R[(w_r^2 - w^2) + \frac{1}{(2RC)^2}]^2 + (\frac{w^2}{RC^2}) \quad (21)$$

출력전력 P 가 최대치가 되는 저항 R 의 값을 R_m , $dy(R)/dR=0$ 로부터 근사화한 R_m 은

$$R_m = \frac{w}{C(T^2 + w_r^2 - w^2)} \quad (22)$$

$R_m > R$ 의 범위에서 출력전력 P 는 저항 R 즉 플라즈마 저항 R_p 에 대해 증가관계가 된다. 직렬공진주파수 f_r 을 스위칭 f_s 에 충분히 근접하도록 설정하여 저항 R_m 을 충분히 크게 저항 R 의 변화가 $R_m > R$ 의 범위내에 있도록 하면, 출력전력 P 는 저항 R 즉 플라즈마 저항 R_p 에 대해 증가 관계가 된다. 출력전력 P 의 증가에 반해 플라즈마 저항 R_p 가 감소 되면 출력전력 P 도 감소하는 부계환을 갖고 무전극 램프를 안정점등할 수 있다.

3.4 램프 시동 전압 및 전류 스트레스

무전극 방전 램프를 시동하기 위해서는 램프의 유도코일의 양단에 방전개시 전압을 넘는 고주파 고전압을 인가하여 점등시킬 필요가 있다. 방전개시 전압 즉, 램프시동 전압을 V_s 라 하면 점등전의 커패시터의 양단전압 V_c 의 피크치 $V_{cx(max)}$ 은 램프시동전압 V_s 이상이 되어야 한다.

$$v_s \leq v_{cx(max)} = \frac{V_m/LC}{w_{rc}^2 - w^2} \quad (23)$$

소자의 정격범위내에서 램프시동전압을 인가하기 위해서는 스위치의 내전류치가 문제가 된다. 즉, 점등전은 점등시에 비해서 인덕터 L 에 흐르는 공진전류의 피크치가 크기 때문에 그것을 고려하여 소자의 정격을 결정할 필요가 있다. 점등전의 공진전류 i 의 피크치를 I_p , 스위치의 내전류치를 I_β 라 하면, 전류 스트레스의 조건식은 다음과같이 구해진다.

$$I_\beta \geq I_p = \frac{V_m(w_{rc}^2 - w^2)}{wL(w_{rc}^2 - w^2)} \quad (24)$$

4. 시뮬레이션 결과

해석을 기초로 하여 실험에 이용한 램프의 정격출력 85W 를 얻기 위해 각소자의 값을 결정하고 점등전·후의 이론적인 파형을 구할 수 있다.

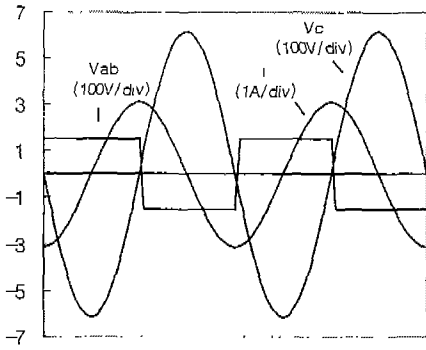
$$P = 85W, 2E = 310V, L_o = 12\mu H, L_r = 9.5\mu H, R = 300\Omega, f_s = 2.5MHz$$

출력전력과 전류 스트레스를 고려하여 인덕턴스 L 을 식(18)로부터 구하고 전류스트레스와 직렬공진주파수 f_r 이 직렬공진주파수 f_s 에 근접하도록 C 를 결정한다.

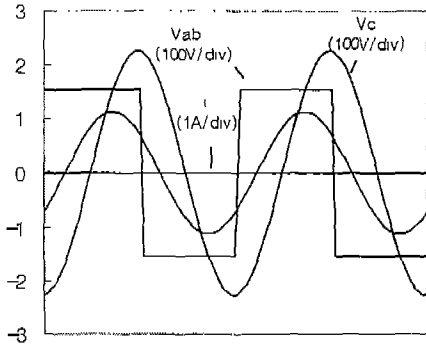
$$C \geq \frac{I_\beta}{V_m w^2 - w^3 L I_\beta} \left[\frac{V_m}{L_o J_\beta} - wL \left(\frac{1}{L} + \frac{1}{L_o} \right) \right] \quad (25)$$

$L = 16.6\mu H, C = 660 pF$ 로 구해진다.

회로 정수를 이용한 경우의 해석에 의해 점등전·후의 무전극 램프 점등시에 있어서 회로의 a,b간 인가 전압 V_{ab} , 커패시터 전압 V_c 및 공진전류 i 의 각 시뮬레이션 파형이 그림7에 나타내었다.



(a) 점등전



(b) 점등후

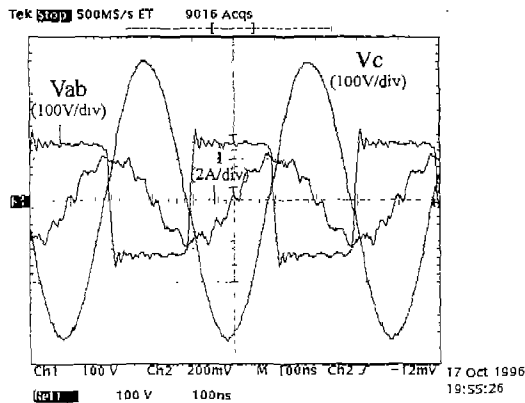
그림 7. Vab, Vc, i의 이론적 파형

5. 실험결과

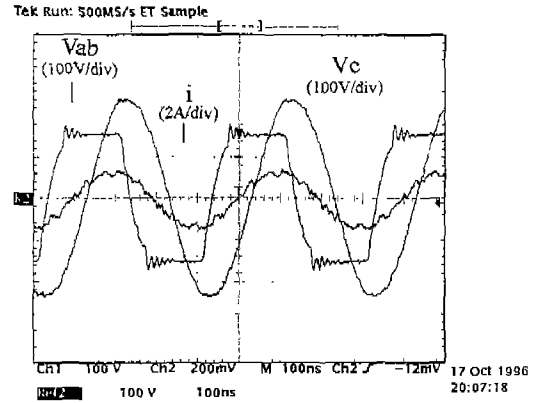
해석을 기초로 무전극램프의 점등실험을 하였다. 사용한 무전극 램프는 필립스사에서 제작한 85W, 무전극 램프이고 인덕턴스 L은 직경 0.08 mm×90가닥의 리쯔선을 사용하여 공심으로 제작했다. 실제점등회로에서는 인덕턴스 L은 회로의 기생 인덕턴스를 합하여 해석치보다 약간 작은 값으로 다음의 소자 정수를 사용했다.

$L_o=12\mu H$, $L=15.3\mu H$, $C=580pF$, $f_s=2.5MHz$

입력전압 2E가 310V인 경우 램프의 유도코일 양단전압 Vc, ab간 전압 Vab, 인덕터에 흐르는 전류 i의 점등전·후의 각 파형, 주 스위치의 Vgs, Vds 전압과 전류 id의 파형을 그림 8에 나타냈다. 이 실험을 통하여 무전극램프의 시동 및 안정점등이 이루어짐을 확인할 수 있었다.



(a) 점등전



(b) 점등후

그림 8. 실험결과 파형

6. 결론

무전극 램프 점등용 영전압 스위칭 인버터에 관한 연구를 통하여 다음의 결론을 얻었다.

- (1) 무전극 램프 등가회로를 이용한 회로의 동작해석으로부터 램프 출력전력과 각부전압, 전류식을 구하였다.
- (2) 해석식을 통하여 영전압 스위칭 조건, 램프 시동전압의 조건, 점등의 안정범위등이 구해졌으며, 설계지침을 얻을 수 있었다.
- (3) 해석결과를 기초로 한 점등회로의 설계를 통하여, 소자의 정격과 램프정격을 모두 만족하고 고효율의 인버터 회로를 실현했다.
- (4) 램프의 방전 프라즈마의 부성저항 특성에 있어서 불안정성을 제거하여 무전극 램프의 안정점 등을 실현하였다.

7. 참고문헌

- [1] 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
- [2] J.M. Anderson: "Electrodeless Fluorescent Lamps Exited by Solenoidal Electric Field" Illum. ENG. 64 (1969)
- [3] M. Shinomiya: "Development of the Electrodeless Fluorescent Lamp" IEs Annual Conference
- [4] C.I. Babat: "Electrodeless Discharges and Some Allied Problems" J. of I E E Part 3. 94, pp.27-37 (1942)