

LLC 공진현상을 이용한 제논 플래시램프 전원회로의 설계 및 방전특성분석

이희창[†]

(원고접수일 : 2014년 2월 4일, 원고수정일 : 2014년 3월 12일, 심사완료일 : 2014년 3월 24일)

Power supply design and discharge characteristics analysis of xenon flashlamp by using LLC resonance phenomena

Hee-Chang Lee[†]

요약: 본 논문에서 고체레이저 광원으로 쓰이는 제논 플래시램프 점등을 위해 LLC공진형 컨버터 설계방법을 제안한다. 1.5kW 대용량 LLC 공진형 컨버터 제작을 통해 램프 방전특성 실험을 수행하였으며 램프 아크방전 시에 부하급변으로 인한 돌입전류를 제한하기 위한 K값의 변화에 따라 램프부하에 최대전력을 전달할 수 있으며, 콘덴서 및 전류제한저항 등을 적절하게 조절함으로써 전원장치의 원가를 절감할 수 있도록 하였다. 램프 방전회로에 대한 수학적인 모델링은 실제 방전상황에 맞추어 구성된 회로 내부손실과 램프자체의 파라미터 값들을 포함시켜 고려하였다. 시뮬레이션 결과와 실측과형을 비교분석하여 제논램프 점등조건에 대한 최적화 방안을 제시하였다.

주제어: 제논램프, LLC공진형 컨버터, 레이저용 전원

Abstract: In this paper, I propose the design technology of LLC resonant converter for the xenon flashlamp that is used to the solid state laser. Through the fabrication of 1.5kW large scale LLC resonant converter, the discharge characteristics are carried out, and introduce the new control method for limiting inrush current by the abrupt load current changes. The mathematical modeling for the lamp discharge includes the internal loss and lamp parameters. I propose the optimal method for the driving conditions of xenon flashlamp from the simulation results comparing the real measurements.

Keywords: Xenon lamp, LLC Resonant converter, Laser Power supply

1. 서론

제논 플래시램프는 펄스방전 방식으로 전기에너지를 강한 복사에너지로 전환시키는 광원으로서 커패시터에 저장된 에너지를 램프속의 기체방전형식으로 순식간에 방출하므로 펄핑효과가 우수한 장점이 있다. 스펙트럼의 특징상 근적외선 부근에서 피크가 존재하며 아크방전 시에 매우 높은 휘도를 가진다. 특히 음극부근의 휘도는 10^5cd/m^2 에

달한다. 이러한 특징들로 인하여 Nd:YAG 레이저나 루비 레이저 등의 고체 레이저의 펄핑 광원으로 많이 활용되고 있다. 따라서, 이러한 제논램프의 효율적인 펄핑을 위하여 다양한 방식의 레이저 전원장치들이 연구되어 왔다.

제논 플래시 램프는 아크방전 시에 저항이 매우 작으며, 방전특성은 방전전류 밀도와 밀접한 관련이 있다. 펄스방전 방식으로 점등함에 있어서 kW

[†] Corresponding Author: Department of Mechatronics Engineering, Tongmyong University, 179, Sinseonno, Nam-gu, Busan, 608-711, Korea, E-mail: lhc@tu.ac.kr, Tel: 051-629-1541

급 이상 대용량 램프전원장치를 사용할 경우 펄핑 에너지를 공급하는 전원의 충/방전 커패시터 자체 손실과 방전 전후 커패시터의 전압차이에 따라 램프 방전전류에 주는 영향이 다르며 방전특성에 따른 다양한 변화가 생기게 된다[1]-[3].

기존의 제논램프 특성에 관한 분석에서는 보편적으로 플래시램프 전원의 충/방전 커패시터를 이상적으로 보고 자체손실을 무시한다. 그러나 실제 상황은 동작조건 및 환경응력의 영향에 의해 손실 부분이 점차적으로 늘어나게 된다

본 연구에서는 LLC공진을 플래시램프 점등에 적용하여 최대 500V의 출력전압을 갖는 1.5kW급 대용량 전원회로를 설계 및 제작하였다. LLC공진을 적용한 목적은 컨버터의 스위칭 주파수를 높여 시스템의 부피와 구조면에서 경량화, 간소화를 실현하며 주파수 제어를 통해 전원의 충/방전 커패시터에서 충전 시에 발생하는 돌입전류를 유효하게 제한함으로써 램프를 안정하게 점등시키기 위한 것이다.

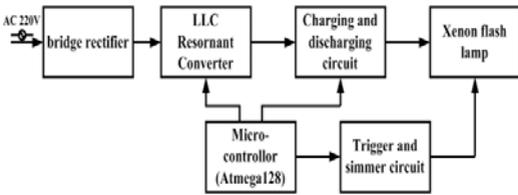


Figure 1: Configuration of Flashlamp power supply

Figure 1은 플래시램프 전원장치의 구성을 보여준다. 여기서 LLC 공진형 컨버터 및 충전/방전 회로, 시머 Trigger 회로는 ATmega128을 통해 제어하며 커패시터 충전/방전 회로는 마이컴을 통해 충전 시간과 방전시간을 각각 별도로 설정 가능하도록 설계하였다.

따라서 본 연구에서는 충전/방전 시간의 변화를 통해 방전 전후의 커패시터의 전압차이에 따른 램프 방전전압, 전류파형을 비교하고, 커패시터 자체 손실을 고려한 방전특성의 변화를 분석하였다.

2. 본론

2.1 LLC 공진형 컨버터 설계

Figure 2는 LLC 공진형 컨버터의 메인회로를 보여준다. MOSFET M1~M4를 사용하여 Full bridge 형 회로를 구성하였으며 M1과 M4는 동일한 게이트 신호로, M2와 M3의 위상을 180도 지연시킨 동일한 게이트 신호로 구동한다. Duty 비는 데드타임 부분을 포함하여 50%로 한다. D1~D4는 MOSFET 내부 기생다이오드를 표시하며 인덕터 L_r , L_m 및 커패시터 C_r 로 직렬공진회로를 구성하였다.

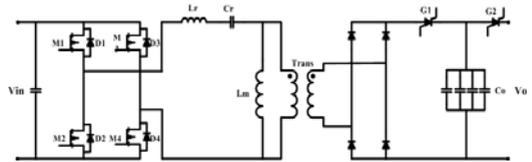


Figure 2: Main circuit of LLC Resonant converter

LLC 직렬공진부 입력전압 파형은 스위칭에 의해 시간축에 대칭되는 구형파 모양으로 볼 수 있다. 대신호 모델 분석에서 구형파 입력의 LLC공진부에 대한 응답은 기본파 성분만 작용할 때의 효과와 같다고 보기 때문에 위의 구형파 입력 V_{in} 을 기본파 성분 V_{inf} 으로 근사할 수 있다[4][5].

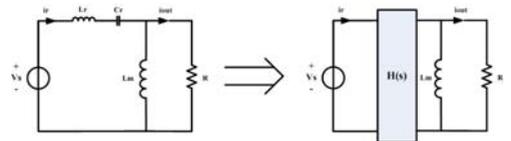


Figure 3 LLC 공진부의 등가회로

Figure 3 Equivalent circuit of LLC Resonant tank

Figure 3은 LLC 공진부의 등가회로를 나타내며 기본파 분석법(first harmonic approximation)을 통해 전달함수를 구하면 식 (1)로 주어진다.

$$H(s) = \frac{V_o(s)}{V_{in}(s)} = \frac{s^2 R C_r L_m}{s^3 C_r L_r L_m + s^2 C_r R (L_r + L_m) + s L_m + R} \quad (1)$$

위 식에서 R 은 트랜스포머 2차측을 1차측으로 환산한 등가저항을 나타내며 부하저항을 R_o 로 하고 트랜스포머 권수비를 n 이라 하면 식 (2)를 통

해 계산된다.

$$R = \frac{\pi^2}{8n^2} R_0 \quad (2)$$

식 (1)로부터 진폭비 및 위상각에 대한 주파수 응답을 구하면 다음과 같다.

$$|H(j\omega_s)| = \frac{h\omega_n^2}{\sqrt{[1-\omega_n^2(1+h)]^2 + h^2 Q^2 \omega_n^2 (1-\omega_n^2)^2}} \quad (3)$$

$$\angle H(j\omega_s) = 180^\circ - \arctan\left[\frac{Qh\omega_n(1-\omega_n^2)}{1-\omega_n^2(1+h)}\right]$$

여기서 $h = \frac{L_m}{L_r}$, $Q = \frac{\omega_0 L_r}{R}$, $\omega_n = \frac{\omega_s}{\omega_0}$ 을 표시한다.

위의 수식들에 의해 본 논문에서 설계한 파라미터 값들을 Table 1에서 보여준다. 여기서 L_r 은 직렬공진 인덕턴스 L_{sr} 과 공진트랜스포머의 1차 누설인덕턴스 L_{lsp} 을 더한 합으로 본다.

Table 1: Design parameters of LLC resonant part

Parameters	Value
Series Resonant inductance (L_{sr})	47 μ H
Leakage inductance (L_{lsp})	4 μ H
Magnetizing inductance(L_m)	258 μ H
Series Resonant capacitance $C_{sr}=C_r$	116 nF

제논램프를 점등하는 경우에 아크방전 시의 저항이 급격히 줄어드는 현상이 발생한다. 본 논문에서 사용한 제논램프는 반복테스트를 통해 아크방전 시의 저항치를 측정할 결과 7~10 Ω 사이에서 랜덤하게 바뀌는 것을 알 수 있었다. 이로 인해 램프 아크방전 시에 LLC컨버터에 과부하가 걸리는 문제가 생긴다. 본 논문에서는 IGBT G1, G2를 교차로 스위칭하여(Figure 1) 컨버터에서 출력 커패시터 Co에 충전이 끝난 후 스위치G1을 열고 G2를 닫는 방식을 채택하였다. 충전과정에 있어서 사용

된 충/방전커패시터 ESR저항 값이 200m Ω 이므로 발생하는 순간 돌입전류를 제한하기 위하여 스위칭 주파수를 정격동작 주파수 65kHz에서 100kHz로 급속히 올린 후 다시 원 상태로 소프트 스타트시키는 방식을 사용하였다. Figure 4는 주파수 상승에 따른 전류의 변화를 보여주고 있다.

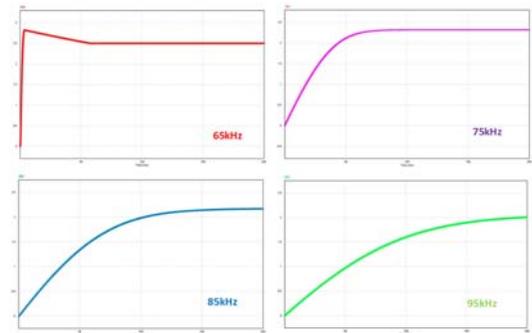


Figure 4: Current waveform at various frequencies

2.2 제논램프 방전회로 분석

실제 회로에서 커패시터는 내부저항 R , 기생인덕터 L 및 이상 커패시터 C 의 직렬모델의 등가회로로 둘 수 있다[6]. 충/방전커패시터의 자체손실을

고려한 제논 플래시램프의 동작과정을 정확히 분석하기 위하여 램프 방전회로를 Figure 5와 같이 등가변환 하였다.

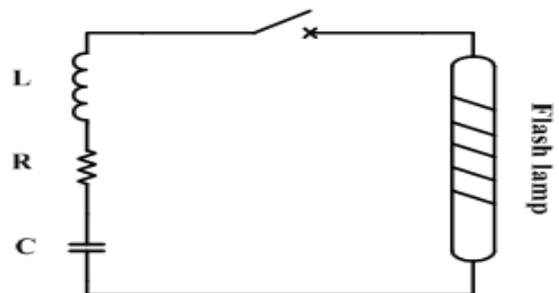


Figure 5: Discharge circuit of Flashlamp

충/방전 커패시터의 자체손실을 포함한 제논 플래시램프 방전의 미분방정식은 식 (4)로 표현할 수 있다.

$$L \frac{di}{dt} + K_o i^{1/2} + Ri + \frac{1}{C} \int idt = V \quad (4)$$

여기서 K_o 는 제논 플래시램프 저항계수를 표시하며, 식 (5)을 통해 계산된다[7].

$$K_o(t) = 1.28l(P/450)^{0.2}/d_c(t) \quad (5)$$

식 (5)에서 l , P , d_c 는 각각 램프 방전길이(cm), 램프가스기압(pa), 램프직경(cm)을 표시한다.

여기서 임피던스는 $Z_o = \sqrt{L/C}$, 전류최대치는 $I_o = V/Z_o$ 로 설정하고 $I = i/I_o$, $\tau = t/\sqrt{LC}$ 를 대입하여 식 (5)를 다시 정리하면 식 (6)과 같아진다.

$$\frac{dI}{d\tau} + \alpha I^{1/2} + \beta I + \int I d\tau = 1 \quad (6)$$

$$\alpha = K_o/Z_o\sqrt{V}, \quad \beta = R/Z_o$$

계수 α 는 감쇠비를 표시하며 제논 플래시램프 방전회로 설계에서 임계감쇠로 하여 $\alpha = 0.8$ 을 취한다.

β 는 커패시터 자체손실에 의해 도입된 계수이다. Figure 6은 β 값이 각각 0, 0.2, 0.4, 0.6일 때 Runge Kutta방법을 응용하여 시간에 따른 방전전류 곡선을 시뮬레이션 한 결과이다.

그래프로부터 알 수 있듯이 β 값이 커지면 즉 충/방전 커패시터 자체손실이 클수록 전류곡선은 감쇠진동에서 과감쇠진동으로 넘어간다. 따라서 진동 피크치가 줄어든다. 정착시간은 $\beta = 0$ 에 비해 $\beta = 0.2$ 일 때 77%, $\beta = 0.4$ 일 때 62%, $\beta = 0.6$ 일 때 55%로 줄어든다.

방전 전후 충/방전 커패시터의 전압차이는 플래시램프 아크점등 시 입력된 에너지양을 표시한다. 충전된 전압을 V_c 로 표시하고 방전 후 남은 전압을 V_r 이라 하면 커패시터의 실제 방전된 에너지는 식 (7)로 표시된다.

$$E_{act} = \frac{1}{2} C (V_c^2 - V_r^2) = \frac{1}{2} C_F V_c^2 \quad (7)$$

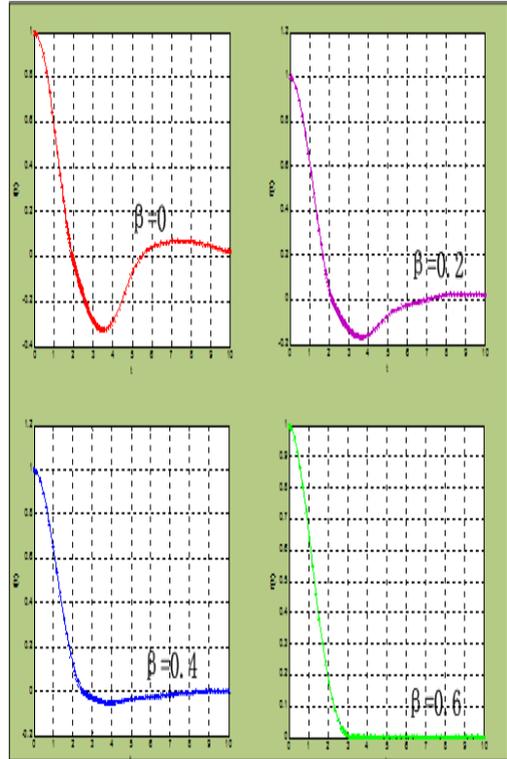


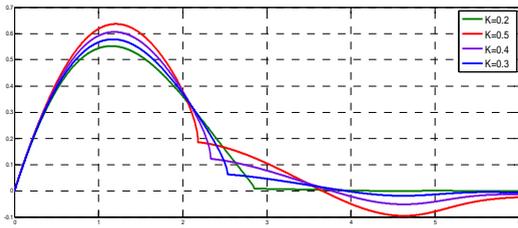
Figure 6: discharge current curve of Flashlamp

여기서 $K = \frac{V_r}{V_c}$ 로 표시하면

$$C_F = (1 - K^2) C \quad (8)$$

그러므로 식 (8)에서의 C_F 를 식 (4)에 포함된 C 에 대입하면 K 값의 변화에 의한 제논램프 방전특성을 얻을 수 있다. 시뮬레이션 시 초기조건은 $I(0) = 0$, $\frac{dI}{d\tau}|_{\tau=0} = 1$ 을 대입한다.

Figure 7은 K 값 변화에 의한 제논 플래시램프 방전전류곡선을 나타낸다. 시뮬레이션 그래프로부터 알 수 있는바 $K \leq 0.2$ 인 경우 회로의 임계감쇠진동 상태는 큰 변화가 없다. 그러나 $K \geq 0.3$ 이 되면 회로의 진동감쇠가 뚜렷하며 피크전류치도 다소 증가한다. 피크 전류치의 증가는 제논플래시램프의 수명에 영향을 줄뿐더러 회로진동에 의해 커패시터에 단시간 역 충전 현상이 나타난다.



(X axis: K value, Y axis: lamp current)

Figure 7: lamp current curve for K value

3. 실험결과

본 실험에서 사용한 제는 플래쉬램프 규격은 $\Phi 8 \times 100mm$ 로서 $K_0 \approx 32$ 이다. 방전은 커패시터 충전전압을 310[V]로 유지하는 전제 하에서 펄스 방식으로 Atmega128에서 1[pps] PWM 신호를 주도록 하였으며 방전시간은 1.2[ms]에서 8.9[ms]까지 약 1.5배 간격으로 늘려가면서 실험을 하였다. Figure 8은 방전시간에 따른 전류과형을 보여주고 있다.

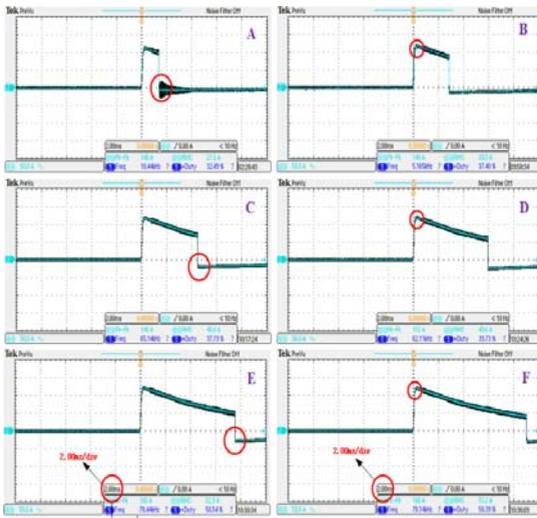


Figure 8: The change of current curve during the discharge time

실험결과 파형에서 그림B~E는 K값이 0.2보다 작은 상황에서 파형상태를 나타내고 그림A는 K값이 0.33인 경우 파형상태를 나타낸다. 방전시간이

길수록 방전전후 전압차이가 크므로 K값이 작아진다. Figure 7로 부터 K 값이 작아져서 0.2보다 작은 경우 전류과형의 감쇠진동상태는 거의 변화가 없다. 그러나 K값이 커지면 어느 시점부터 그림A와 같이 진동이 발생하게 된다. 그러므로 램프점등 시의 진동을 줄여서, 램프의 사용수명을 늘리려면 방전회로의 등가인덕턴스 값을 적당하게 증가시키는 방법으로 방전전후의 전압차를 키워서 K값을 0.2 이하로 제한할 필요가 있다.

4. 결론

본 논문에서 제안한 LLC공진형 컨버터를 이용한 주파수 변조 전류제한 방법은 고체레이저에 적용되는 제는 플래쉬램프와 같이 부하변동이 심한 경우에 점등전원장치로 유효하게 적용된다. 램프를 포함한 방전회로의 수학적 모델링을 통해 방전조건을 $\beta = 0.6$ $K \leq 0.2$ 로 최적화하였으며, 그 이유는 부하에 최대전력을 전달할 수 있기 때문이다.

본 연구결과를 레이저 전원장치 경량화는 물론, 램프점등조건 최적화 구현도 가능하므로 값비싼 콘덴서나 전류조절용 저항 등의 단가를 낮출 수 있게 되어. 경제적인 면에서 제조단가의 절약효과도 얻을 수 있다.

참고 문헌

- [1] K. Hidaka, D. Sakai, and T. Kouno, "Laser trigger effect on induced electrical discharge", Transaction IEE Japan, vol. 115-A, no. 5, pp. 622-629, 1995.
- [2] M. Miki and T. Shinodo, "Development of long gap discharge guided by a pulsed CO2 laser", Journal Physics. D, vol. 26, no. 4, pp. 1244-1250, 1983.
- [3] D. Golla, "300W cw diode laser side-pumped Nd:YAG rod laser", Optical Letter vol. 20, no. 3, pp. 1148-1150, 1995
- [4] P. Xu, Q. Wu, and P. Wong, "A novel integrated current doubler rectifier", IEEE Transaction on Power Electronics, vol. 517, no. 5, pp. 735-740, 2000.

- [5] B. Yang, R. Chen, and F. Lee, "Integrated magnetic for LLC resonant converter", IEEE Transaction on Power Electronics, vol. 519, no. 6, pp. 346-351, 2002.
- [6] H. J. Kim, J. Y. Choi, J. H. Kim, J. T. Hong, H. W. Seo, D. G. Lee, K. J. Lee, and M. K. Son, "Proposal of optimal process parameters for poly-methyl- meth-acryl plastic adhesion using a pulsed Nd:YAG laser", Optical Engineering vol. 48, no. 3, pp. 084301-1-7, 2009.
- [7] J. Xie, "Mathematical modeling of melting during laser materials processing", Applied Physics, vol. 81, no. 4, pp. 3015-3022, 1997.