

트랜스포머의 자기공진특성을 이용한 플래쉬램프의 방전특성:

이론중심

이희창[†]

(원고접수일 : 2013년 9월 27일, 원고수정일 : 2013년 11월 1일, 심사완료일 : 2013년 11월 15일)

Flashlamp discharge characteristics adopting the self resonance of transformer: main theory

Hee-Chang Lee

요약: 고체레이저용 제논 플래쉬램프의 전원은 강력한 아크방전을 유발하기 위하여 높은 승압비를 갖는 전압변환회로를 가지고 있다. 일반적인 구조는 높은 승압비의 트랜스포머와 배압 정류방식으로 방전관의 절연을 파괴함과 동시에 방전관에 전류를 급격히 통과시키는 방식으로 구동한다. 이 때, 제논방전관의 방전특성상 입력전류를 제한하지 않으면 과전류로 인한 방전관의 과다발열, 전극손실, 봉입기체의 산화가속 등으로 인하여 수명저하의 원인이 되므로, 반드시 방전관에 유입되는 전류를 제한하여야 하며, 이를 위하여 종래에는 인덕터나 저항 등을 사용하여 인입전류량을 제한하는 방식을 채택하는 것이 일반적이었다. 본 연구에서와 같이 트랜스포머의 자기공진 특성을 이용하면 낮은 출력 트랜스포머의 1, 2차 권선비에서도 고유공진주파수의 전후에서 구동함에 따라서 비교적 높은 피크 전압을 얻을 수 있고, 트랜스포머의 특정주파수에서 고유임피던스 성분을 이용하여 출력 전류를 제한하면 제논방전관의 방전특성과 전원장치의 출력 측 충방전 정수에 의하여 아크방전 주기가 결정되는 자가 발진방식으로 동작하게 됨으로 종래의 회로구성보다 간단하여 소형 고체레이저용 전원장치의 구성이 가능함을 이론적으로 설명하였다.

주제어: 제논 플래쉬램프, 예비방전, 고체레이저용전원, 이론중심

Abstract: Xenon flashlamp power supply for solid-state laser has a converter with high voltage conversion ratio. General model is composed of transformer with high voltage conversion ratio and voltage doubler rectifier circuit. The purpose of power supply leads dielectric breakdown of Xenon flashlamp and passes current rapidly. When it is passing through the current, it has to limit current to avoid over-heat, damage of electrode and acceleration of gas oxidation which are cause of performance degradation of laser system. In general, the inductor and the resistor are used to limit current.

In addition, this type of transformer has high turn ratio to make high voltage. But we can get high voltage using transformer with low turn ratio which is driven by the self resonance. Also, advantage of the self resonance is to make simple circuit through the impedance of transformer in resonant frequency which filters output voltage. I investigated and simplified the main theory for the good characteristics for Xe arc discharge flashlamp.

Keywords: Xenon Flashlamp, Simmering, Solid state laser power supply, Main theory

[†] 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

1. 서론

제논 아크방전은 매우 넓은 분야에서 응용되고 있으며, 다양한 고체레이저의 광펌핑용으로 주로 사용된다. [1][2]

다양한 광원을 활용한 레이저 여기방식이 연구되고 있으나, [3][4] 여전히 의료 및 용접, 절단 분야에서는 제논 플래쉬 램프를 펌핑광원으로 사용하고 있다.

본 연구에서는 고체레이저의 펌핑 광원으로써 널리 사용되는 제논 플래쉬램프의 전원장치를 설계함에 있어서, 제논 방전관의 점등특성에서 매우 중요한 충전/방전 특성 및 이를 적절히 제어할 수 있는 회로구조를 통하여 시스템의 크기와 구성을 간소화하여 소출력용 고체레이저의 시스템에 적용하고자 한다.

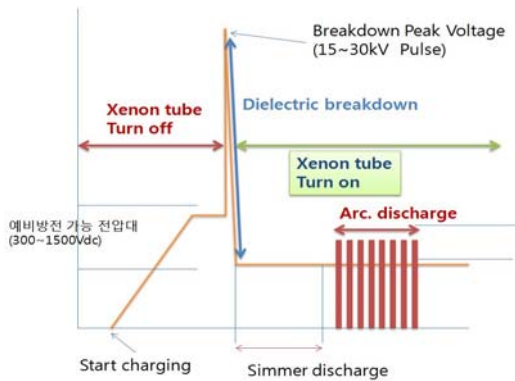


Figure 1: The voltage characteristics of Xe flashlamp discharge processes

제논 플래쉬램프는 Figure 1과 같이 2~3단계의 방전과정을 거쳐서 발광하게 되는데, 보통 저출력의 경우는 Figure 1의 회로와 같이 트리거를 통한 절연파괴와 동시에 아크방전을 일으키며[5], Figure 3의 회로의 예와 같이 고출력인 경우는 절연파괴, 예비 방전(Simmer discharge, Simmering), 아크 방전의 순서로 방전을 유지한다. 여기서 Simmer power supply를 별도 적용하는 것은 플래쉬램프의 수명과 램프의 임피던스를 감소시키기 위한 것이다[5][6].

일반적인 고체레이저에 사용되는 제논 아크 방

전의 특성은 펄스특성을 갖게 된다. 고체레이저의 모제를 여기시키는 실질적인 광 방출은 아크 방전 단계에서 일어나며, 제논 플래쉬램프의 방전특성 상 반복펄스 형태의 아크방전이며, 반복률을 통한 광량제어가 일반적이며 안정된 동작을 위하여 정격전류로 제한하여 구동하는 것이 일반적이다[10].

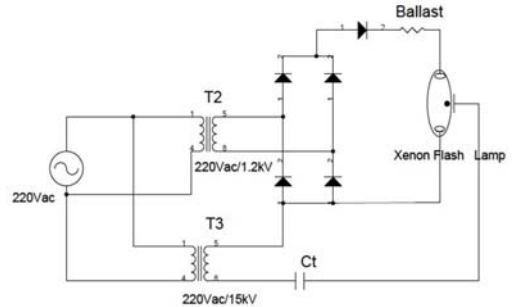


Figure 2: The minimum construction of Xe flashlamp (Storobo type)

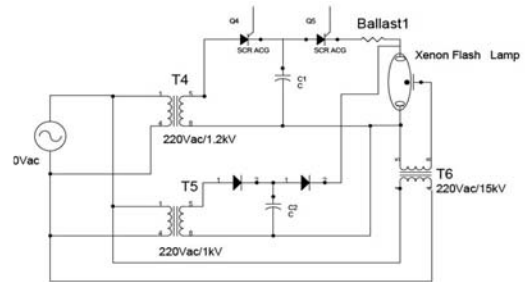


Figure 3: The power supply for CW discharge (Pulse lightning method)

Figure 2는 제논 플래쉬램프 점등장치의 최소구성 (스트로보 타입)을 보여주고 있으며, Figure 3과 같이 기존의 제논 플래쉬램프의 전원장치는 SCR, IGBT와 같은 대전류, 대용량 스위치를 이용하여 제논방전관에 고전압 펄스를 인가하는 방식으로 점등하며, 광펄스의 발생률을 제어하는 방법이다. 다만, 이 방식은 시스템이 크고 특별히 구성된 제어기구 즉 구동드라이버를 포함하는 반도체 스위치가 필수이므로 시스템이 대형화, 복잡화되는 원인이 된다[7]-[10].

따라서 본 연구에서는 아크방전을 위해 제논램

프에 공급되는 링크전류를 발라스트(저항, 인덕터)를 통하여 제한하지 않고, 승압트랜스포머의 기생 성분과 공진, 내부 임피던스를 이용한 구동주파수 특성에 따른 링크전압의 특성변화[11]-[13]를 이용한 자기공진 방식의 제논 플래쉬램프용 전원장치의 중요한 이론들을 단순화시켜서 정리하였다.

2. 본 론

2.1 회로의 구동방식

수 십V의 저전압입력을 통하여 1~2kV의 피크 전압으로 변환하기에 용이한 트랜스포머의 자기공진을 이용하고, 출력 펄스발생은 트랜스포머의 고유임피던스 성분과 출력 측 충전 커패시터와의 충전 시정수를 이용하여 시간 지연을 유발하며 방전 요구전압에 충분히 근접한 출력전압에 도달하면, 방전관을 턴 온하며, 이를 스스로 연속적으로 반복하는 방식으로 광펄스를 방출하는 방식이다. 즉, 출력 측의 아크방전과 관련하여 별도의 마이크로 프로세서, 스위치 구동드라이버 등을 요구하지 않으므로 소형화할 수 있으므로, 저출력 제논 플래쉬램프의 파워 엔진으로 가장 적합하다. 또한 아크방전 유지 및 제어를 위한 고전압, 대전류 스트레스에 강한 값비싼 SCR, IGBT와 같은 스위칭소자를 적용하지 않아도 되므로 경제성 또한 높다.

2.2 자기공진형 트랜스포머의 설계

일반적으로는 높은 전압변환비를 얻기 위해서는 1, 2차 측 사이의 권선비에 의존하는 종래의 방법이 주를 이루었으나 10~20V의 비교적 낮은 전압을 1~2kV의 고전압으로 승압시키기 위해서는 일반적인 SMPS 설계방식에 의하면 1차적으로 1, 2차간 1:100의 높은 권선비에 의하여 기본 설계정수가 결정된다. 그러나 모든 1, 2차 측간 높은 권선비의 트랜스포머는 부유용량이 존재하는데, 이 부유용량과 트랜스의 1차측 자화 인덕턴스간에 공진을 유발하는 조건이 성립한다. 특히 동일한 권선수로도 권선하는 방법에 따라서 내부 기생요소가 변동함은 주지의 사실이다. 트랜스포머를 제작할 때, 소밀권선방법으로 2차측을 권선할 경우, 조밀한 권선방법에서 보다 기생용량이 줄어들고 기생용량과

자화인덕턴스의 조합으로 결정되는 자기공진 주파수는 높아지는 성향을 갖게 된다. 특히 높은 주파수에서 구동하여야 하는 것은 트랜스포머의 권선수를 줄일 수 있고 그로 인하여 트랜스의 크기가 줄어들 수 있는 장점이 있기 때문에 비교적 구동주파수는 높은 2~400kHz에서 구동한다.

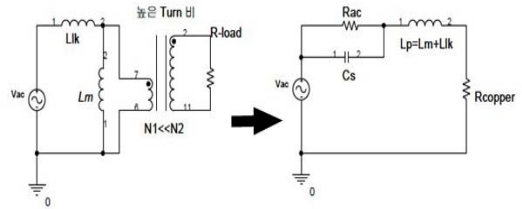


Figure 4: Output equivalent circuit of magneto-resonant transformer



Figure 5: Low density windings (between gap 1~2 mm)

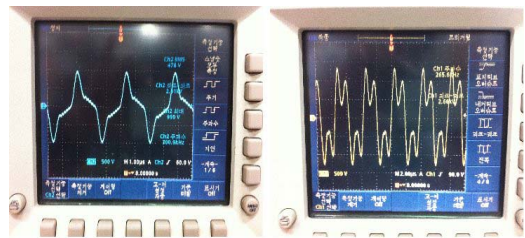


Figure 6: Waveforms of each frequency by the transformer magneto-resonance (Push-Pull Topology, turn ratio 2:80, primary inductance(Lm) 3.3uH, Left:300kHz/2kVpeak, Right: 265kHz/2.66kVpeak)

이와 같이 자기공진형 트랜스포머의 출력특성은 Figure 4에서와 같이 내부의 기생요소와 1차측의

자화인덕턴스가 결합되어 **Figure 4**의 우측도와 같은 등가회로로 표시되며, 출력 시에 얻어지는 펄스 전압의 피크값은 Rac양단에서 출력되는 전압의 출력특성과 동일하다. 특히 설계하고자 하는 공진형 트랜스포머는 아래와 같은 식으로 일반화할 수 있다. 특히 저밀도 권선법이란 2차측의 권선을 1~2mm의 간격으로 권선하는 방법으로 정의한다. 트랜스포머를 설계하기 위해서 일단, 제작하고자 하는 형태의 트랜스포머가 저밀도 권선법인 경우, 권선 시에 나타나는 기생용량(부유용량: Cs, 단위부유용량: Csu)을 산출해야 하는데 산출방법은 선행적 실험에 의하여 **식 (1)**과 같다. 일반적으로 많이 사용되는 페라이트코어(3329, 4042, 5060 등)에서는 단위부유용량 Csu가 저밀도 권선법을 적용하면 **식 (1)**의 값과 유사하게 근사화되며, 트랜스포머의 자기공진주파수 fsr은 **식 (2)**와 같이 표현할 수 있다.

$$C_s = N_2^2 \frac{\sqrt{C_{su}}}{N_1^2} C_{su} = 353.6 \times 10^{-24} F \quad (1)$$

$$f_{sr} = \frac{1}{2\pi \sqrt{C_s L_{m1}}} \quad (2)$$

(f_{sr} : 트랜스포머의 Self-Resonant Frequency)

공진주파수에서 1차 측 출력전압(Vout)은 아래 **식 (3)**과 같이 근사적으로 표현할 수 있다.

$$V_{out} \approx I_{Lm} \omega L_m \frac{N_2}{N_1} = 2\pi f_{sr} I_{Lm} L_m n (V_{peak}) \quad (3)$$

또한, 충전 시정수를 결정하는 중요한 인자인 트랜스포머의 임피던스는 아래 **식 (4)**와 같이 근사화되며 **식 (1)~(4)**와 같이 근사적으로 값을 산출하여도 설계에 큰 영향을 미치지 않는 것은 기본적으로 자기공진형 트랜스포머의 경우 200~300kHz의 높은 주파수에서 구동하는 특성을 가지므로 일차측의 인덕턴스성분(Lm)에 의해서 결정되게 되며, 1차측의 권선수는 2~3턴 수준의 매우 작은 양이어서 동선의 고유저항 Rcopper는 무시되어도 좋으며, 낮은 1차측의 권선량으로 인하여 1차측 리키지 성분이 거의 0에 가까운 특성을 갖는다.

$$Z_{trans} \approx R_{copper} + j(2\pi f_{sr} L_m n^2), \text{ 여기서 } R_{copper} \approx 0$$

따라서

$$Z_{trans} \approx (2\pi f_{sr} L_m n^2) \quad (4)$$

2.3 제논램프의 방전조건 및 구성회로

종래에는 방전관에 충분한 전류가 도통할 수 있도록 하기 위하여 예비방전 유지전압 보다 상대적으로 2배 높은 전압을 출력 측의 커패시터에 충전하고, 이를 일시에 방전관에 도통하는 방식으로 아크방전을 유발하였으나, 방전관 고유임피던스와 수명을 고려한다면 적절하지 않은 방법이다. 특히 과전압을 방전관에 인가하면 강력한 아크 방전이 발생되기는 하나 예비방전의 전류부족 등으로 인한 불안정과 봉입가스의 조기 산화 및 과열로 인한 관구의 파손까지 유발할 수도 있다. 따라서, 상기의 문제를 보완하고 최적방전을 위한 관구 상태를 유지하기 위해서는 실험적으로 아래의 커패시터 충전전압 조건을 제시한다.

$$V_{sm} \leq V_c < 2V_{sm} \quad (5)$$

(V_c : Capacitor 충전전압, V_{sm} : 예비방전 유지전압)

방전을 통한 광 방출량의 조절은 상기의 **식 (5)**와 같이 조절된 전압범위 내에서 충분한 커패시터 용량을 통한 방전관 통전 전류량에 의해서 결정된다.

$$I_c = \frac{C_b \Delta V_c}{\Delta t} \quad (6)$$

(I_c : 방전가능 전류량, V_c : 충전전압, t : 충전시간)

여기서, 실제 관구에 도통하는 전류량의 관계식은 다음과 같다.

$$I_{arc} = \frac{(V_c - V_{off})}{R_{arc}} = \frac{C_b (V_c - V_{off})}{\Delta t} \quad (7)$$

(I_{arc} : Arc 방전 전류량,

V_c : 충전전압,

V_{off} : 방전종료전압,

R_{arc} : 아크방전개시 후 방전관 임피던스)

따라서 식 (7)은 방전관의 아크방전에 따른 고유 임피던스는 방전전류량에 따라서 경시적으로 바뀐다는 것을 알 수 있으며, 최대방전 전류량은 커패시터 뱅크의 최대 충전전류량과 동일하지 않음을 알 수 있고, 방전관에 가해지는 에너지는 다음의 식 (8)과 같이 정리된다.

$$E = \int_{T_0} \frac{C_b d(V_c - V_{off})}{dt} dt \quad (8)$$

$$E = \frac{1}{2} C_b (V_c - V_{off})^2 \text{ (J/sec)} \quad (9)$$

충전정수의 결정과 자기 진동의 충전 커패시터의 용량을 Cb라 할 때, 충전정수 Vc 는 아래와 같다.

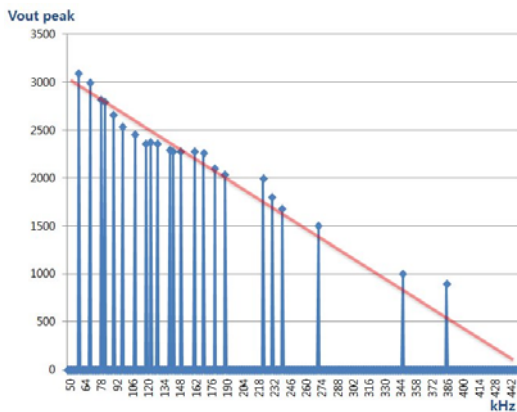


Figure 7: Transformer secondary pulse peak voltage vs. driving frequency (Lm2=4.5mH, 2:80Turn)

Figure 5에서와 같이 Cb의 충전전압의 상승시간은 Cb에 급전될 수 있는 전압의 최대값과 주파수와와의 상관관계는 측정치에서와 같이 주파수 증가에 따라서 선형적으로 감소하는 패턴을 갖는다.

$$V_{peak} = -k(f_r - a) + b, \quad k \propto L_{m2} // L_{m1} \quad (10)$$

또한 공진형 트랜스포머를 통하여 출력되는 고전압 펄스의 Vpeak값과 전파정류 후 커패시터를 통하여 충전되는 전압의 상관관계는 실험을 통하여 식 (11)과 같이 주어지며, 식 (12)와 같이 비례상

수 k를 구할 수 있다. 여기서 k는 트랜스포머의 권선비(n), 1차측의 인덕턴스(Lm)에 의해 결정됨으로 제작되는 트랜스포머에 따라서 다른 값을 갖는다.

$$V_{out} \approx I_{Lm} \omega L_m \frac{N_2}{N_1} = 2\pi f_{sr} I_{Lm} L_m n (V_{peak}) \quad (11)$$

$$\frac{V_{out}}{V_{IN} n} \omega L_m = \frac{2\pi f_s V_{out} L_m}{V_{IN} n} \approx \kappa \approx 13.5 \quad (12)$$

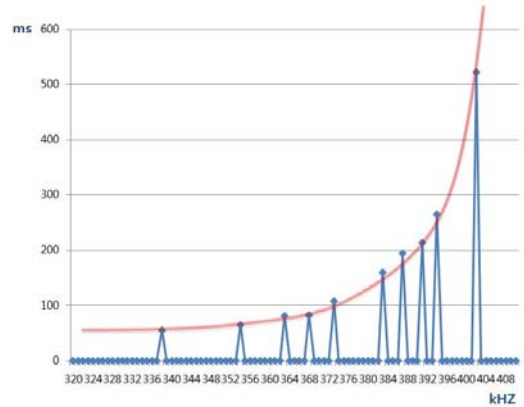


Figure 8: The charging time vs. frequency (Cb=34uF, Vmax=240V, Lm2=4.5mH)

또한, 설계하는 시스템에서는 펄스 출력전압 Vout이 결정되어야만 출력측 커패시터 Cb에 충전되는 전압의 시정수 t가 결정됨으로, 식 (13)의 일반적인 시정수 공식을 통하여 최대충전값에 이르렀을 때, Vpeak = Vout로 가정하고, 식 (14)와 같이 식 (12)를 식 (14)와 같이 변환할 수 있다.

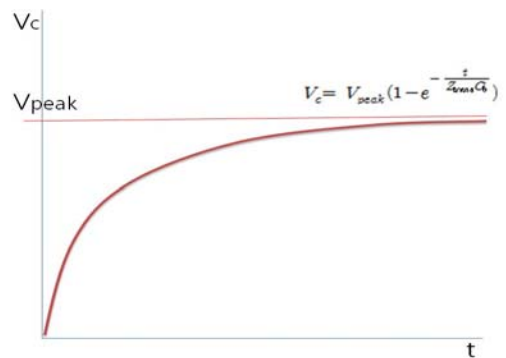


Figure 9: Charging voltage for the charging time

$$V_c = V_{peak} (1 - e^{-\frac{t}{Z_{trans} C_b}}), \text{ 여기서 } \quad (13)$$

$V_{peak} = V_{out}$ 이라 가정하면,

$$\frac{V_{out}}{V_{IN}^n} \omega L_m \approx \kappa \text{ 에서, } \quad (14)$$

$$V_{out} \approx \frac{V_{IN}^n \cdot \kappa}{\omega L_m}$$

따라서, 식(13)과 식(14)를 시간 t에 대하여 정리하면, 아래의 식(15)를 유도할 수 있다.

$$t = \text{Ln} \left(\frac{V_c \cdot \omega L_m}{V_{IN}^n \cdot \kappa} \right) Z_{trans} C_b \quad (15)$$

정리하면, 최대충전시간 t는 자가발진의 최대 주기로 정의할 수 있으며, 1/t는 방전발진 주파수 f_t 로 놓을 수 있다.

다만, 설계할 때, 구동 주파수 fs는 트랜스포머의 자기공진 주파수를 피하여 구동하여야만 돌발적인 과전압 상태를 막을 수 있으며, 상기 출력전압 설계 공식에 따라서 구현이 가능한 점을 잘 파악해야 한다.

따라서 트랜스포머를 설계할 때, t를 결정하면, 그에 맞는 각 정수의 결정을 통하여 방전관을 포함한 시스템의 자가발진 주파수를 결정할 수 있는

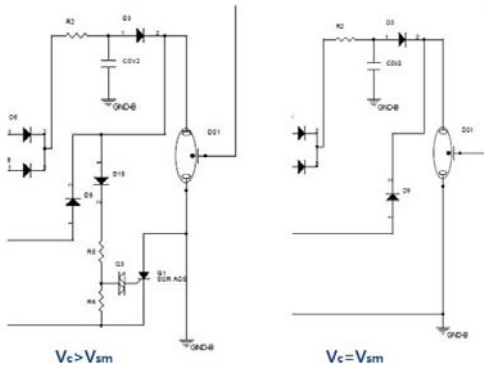


Figure 10: The additional circuit for the increasing firing voltage

회로구조를 가지므로, 마이크로프로세서와 스위치 및 스위칭 드라이버를 없애거나 최소화할 수 있으므로, 시스템의 공간적, 경제적 효율을 극대화할 수 있는 장점이 있다. 또한 방전전력을 종래와 같이 방전관 양단 전압을 상승시키는 방법으로 통전 전류량을 강제로 늘리는 방법을 사용하지 않고, 예비방전 유지전압과 같거나 약간 높은 전압에 커패시터 बैं크의 충전전류량을 통한 방전제어방식으로 반복되는 자가발진 방전을 통해 방전관의 수명 및 과전류에 따른 방전관의 과발열, 파괴와 같은 안전상의 문제에 있어서도 유리한 방식이다.

3. 결론

본론에서 정리된 이론에서와 같이, 일반화하면 비교적 용이하게 시스템 설계가 가능하므로 소 출력 고체 레이저 파워 스테이지로 0.5~5pps 급 저반복, 저출력 제논방전램프용 전원장치를 직접 제작하여 실험을 진행할 예정이다. 특히 방전속도를 빨리하기 위해서는 파워스테이지의 전류용량만 증가시키면 되며, 여기에 부가하여 방전관의 최대방전전류 용량에 적합하도록 커패시터 बैं크의 용량만 적절히 가변하면 되므로 전류조절과 속도조절을 동시에 달성하며, 수십 pps급의 소용량이면서 저반복율의 고체레이저의 컴팩트한 전원장치로서의 구현도 가능하므로, 경제성도 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 향후, 실제적인 실험을 진행하여 얻어진 결과는 조만간에 후편으로 발표할 예정이다.

참고문헌

- [1] J. B. Trenholme and J. S. Emmet, "Xenon flashlamp model for performance prediction," International Conference on High Speed Photography, pp. 229. 1970.
- [2] Hatem Elloumi, Georges Zissis, Thierry Berthier, and Jean Jacques Damelin-court. "Time-dependent behavior of a pulsed high power xenon flashlamp," Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, vol. 86, pp. 361-369, 2004
- [3] G. HARTEL, M. KETTLITZ, H. SCHÖPP, and

- F. SERICK. "Pulsed alkali pump light sources for Nd:YAG lasers," vol. 28, no. 6, pp 437-443, 1996.
- [4] Kangin Lee, Hyeon Cheor Lee, Joon-Young Cho, Jae-Cheul Lee, and Jonghoon Yi. "Passively Q-switched, high peak power Nd:YAG laser pumped by QCW diode laser," Optics & Laser Technology vol. 44, pp. 2053-2057, 2012.
- [5] Steven CHU and Robert W. SMITH. "A reliable thyatron-switched flashlamp-pumped dye laser," vol. 28, no. 2, 1979
- [6] Nan-Jing Zhao, and Wen-Qing Liu. "Study of the charging circuit of a pulsed solid-state laser power supply," A New Concept of High Charging Efficiency and Realization. Optics & Laser Technology. vol. 41, pp. 461-469, 2009.
- [7] P. A. FRRESTER, V. J. ALEXANDER, and H. W. EVANS. "Pocket-size Nd-YAG pulsed laser" Optics and Laser Technology, pp. 29-37, 1974
- [8] Jung-Hwan Hong, Kum-Young Song, Hyun-Ju Chung, Jong-Han Jung, Whi Young Kim, Uk Kang, and Hee-Je Kim. "Long pulse generation technology of solid-state laser adopting a new real time multi-discharge method," Optics & Laser Technology, vol. 34, pp. 203-207, 2002
- [9] Hee-Je Kim, Eun-Soo Kim, and Dong-Hoon Lee. "The development of a high repetitive and high power Nd:YAG laser by using a zero-current switching resonant converter," Optics & Laser Technology vol. 30 pp. 199-203. 1998
- [10] Piero Mazinghi and Fabrizio Margheri. "A short pulse, free running, Nd:YAG laser for the cleaning of stone cultural heritage," Opteng vol. 39 pp. 191-202. 2003.
- [11] Simon S. Ang., Power Switching Converters, Marcel Dekker Inc., 1995.
- [12] Ned Mohan, Tore M. Undeland, and William P. Robbins, Power Electronics, Converters, Applications, and Design, John Willey & Sons, Inc., 1989.
- [13] Abraham I. Pressman, Keith Billings, and Taylor Morey. Switching Power Supply Design, Third Edition. The McGraw-Hill Companies., 2009.