DBpia

ISSN 1975-8359 [Print] / ISSN 2287-4364 [Online]
The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, vol. 71, no. 9, pp. 1237~1242, 2022
https://doi.org/10.5370/KIEE.2022.71.9.1237

Integrated 5 kW Xenon Flash Lamp Power Supply Using the Auxiliary Rectifier

보조 정류회로를 활용한 통합된 5 kW 급 소형 제논 램프 전원장치

Min-Kyu Choi · Seung-Ho Song · Hong-Je Ryoo
최민규* · 송승호** · 류홍제†

Abstract

This paper deals with the integrated 5 kW xenon flash lamp power supply. In order to drive a xenon lamp used in an application field of light sintering of printed electronics, the power supply in consideration of load characteristics is required. The simmer power supply that maintains the xenon lamp's ignition is designed based on an LCC resonant converter with both voltage and current source characteristics. Also, an auxiliary rectifier and trigger applying high voltage are required to ignite the xenon lamp. And the power supply is designed based on a boost-type resonance circuit and a Cockcroft Walton voltage multiplier, respectively, in consideration of sharing the inverter with the simmer. This paper analyzes the topology of the proposed power supplies and selects the parameters and confirms them through simulation. Finally it was verified through experiments that the output voltages of the simmer, the auxiliary rectifier, and the trigger were 20 V, 400 V, and 10 kV, respectively.

Key Words

Simmer power supply, Trigger power supply, Auxiliary Rectifier, Xenon lamp, LCC resonant converter

1. 서 론

제논 램프는 가스 방전 램프의 한 종류로서 유리 튜브 안의 이온화된 고압 제논 가스에 전기를 흘려 빛을 낼 수 있다. 이러한 빛은 매우 짧은 시간으로 강하게 조사하여 전도성 패턴이나 기판을 경화 및 소결하는 전자 인쇄 분야에 사용된다. 또한, 수백 μs에서 수 ms의 매우 짧은 시간으로 강하게 조사하기 때문에 기판의 열적 손상을 최소화할 수 있는 장점이 있다[1]-[2]. 제논 램프는 특성상 점등 시에 수십 kV의 전압을 요구하는 반면에 점등 유지 시에는 수백 V의 전압이 요구되며 구동 장치 설계 시에 이를 고려해야 한다. 따라서 5 kW 급 제논 램프 구동을 위해서는 제논 램프를 점등시켜주는 트리거(trigger), 점등한 상태를 유지해주는 지머(simmer), 그리고 짧은 시간 동안 소결용 빛을 만들어 주는 메인 펄스 방전 부(50 V, 100 A)가 필요하다[3]-[4].

최근에는 점등 전원장치의 소형화와 램프의 점등을 원활하게 하려는 여러 방안이 제시되고 있다. 소형화는 인버터 부를 공유하는 형태로 지머와 트리거 전원장치를 제작하거나 공진형 컨버터를 이용한 고주파수 스위칭을 하여 전력 밀도를 높이는 형태로 이루어진다. 그리고 지머 전원장치에서 점등 유지 전압뿐만 아니라 점등 전의 높은 전압을 가지도록 설계하여 램프의 점등을 좀 더 원활하게 하려는 방안들이 연구되고 있다[4]-[6].

하지만 더 높은 전압을 내기 위해서는 지머 전원장치의 부피가 커지게 되고 소자의 정격이나 설계하는데 어려움이 생기게 된다. 따라서 본 논문에서는 보조 정류부를 추가하여 지머 전원장치의 전압 스트레스를 해소하고 정격사양을 낮추는 연구를 진행하였다.

따라서 본 논문에서는 제논 램프의 점등을 위해 지머, 보조 정류부, 트리거로 구성된 통합 제논 램프 점등 전원장치를 제안한다. 각 전원장치에 사용된 토폴로지 분석을 통해 파라미터를 선정하였으며 이를 시뮬레이션을 이용하여 검증하였다. 또한, 선정된 파라미터를 직접 제작하여 점등 전과 후를 모의한 무부하와 정격 부하 조건의 실험을 통해 안정성과 신뢰성을 검증하였다.

† Corresponding Author: Dept. of Energy System Engineering, Chung-Ang University, Korea
E-mail: hjryoo@cau.ac.kr
https://orcid.org/0000-0001-8657-7350
* Dept. of Energy System Engineering, Chung-Ang University, Korea
E-mail: chlalsrb303@naver.com, https://orcid.org/0000-0003-3916-6457
** Smart Electrical & Signaling Division, Korea Railroad Research Institute(KRRI), Korea
E-mail: songho310@naver.com, https://orcid.org/0000-0003-1893-1674
Received: Jul. 29, 2022 **Revised:** Aug. 25, 2022 **Accepted**: Aug. 27, 2022

Copyright © The Korean Institute of Electrical Engineers
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

www.dbpia.co.kr

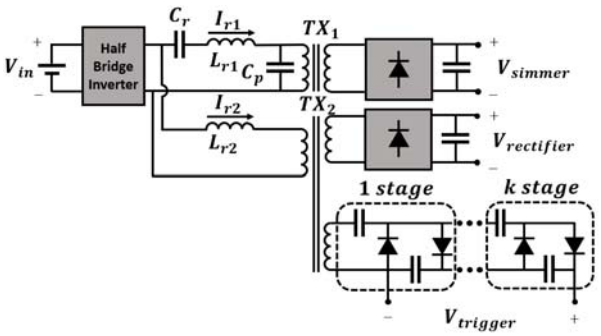


그림 1 전체적인 점등 장치의 회로도
Fig. 1 Circuit diagram of the overall flash ramp power supply

표 1 각 전원장치의 개발 사양
Table 1 Development specifications for each power supply

3 phase ac input voltage	380 $V_{ac,\mathrm{rms}}$ ±10%
Rectified dc input voltage	513 V±10%
Simmer output, rated load	20 V, 5 A(100 W)
Simmer output, no load	20 V
Rectifier output, no load	400 V
Trigger output, no load	10 kV

2. 회로 구성

이번 장에서는 제논 램프를 점등시키기 위한 전원장치들에 대해 다룬다. 점등을 위한 전체적인 구조는 3가지의 전원장치로 이루어져 있으며 이를 그림 1에 나타내었다. 점등 전 대기 전압을 형성시켜주는 보조 정류회로, 점등을 위한 높은 전압을 내주는 트리거 그리고 점등을 유지 시켜주는 지머 전원장치로 구분된다. 램프의 종류와 특성마다 각 전압의 레벨은 상이하며 본 논문에서 다루는 전원장치의 목표 전압은 각각 400 V, 10 kV, 20 V이다. 설계 사양은 표 1에 나타내었다.

2.1 지머 전원장치

본 논문에서 지머 전원장치의 역할은 점등의 여부와 관계없이 항상 일정한 전압을 유지하는 것이다. 점등 전에는 전압 제어를 통해 20 V를 출력하고 점등 후에는 전류 제어를 통해 20 V, 5 A를 출력하는 것이다. 지머 전원장치는 3상을 정류한 510 V를 입력 전원을 사용함에 따라 하프 브리지 인버터와 강압형 컨버터가 적용되었다. 따라서 제논 램프의 독특한 부하 특성을 고려하여 전압원과 전류원의 특성을 가질 수 있는 강압형 LCC 공진형 컨버터가 사용되었으며 이를 그림 2에 나타내었다. 공진 주파수 이상의 영역에서 동작하는 공진형 컨버터의 특징으로는 영 전압 스위칭이 가능하여 스위칭 손실을 줄이고 고주파수 스위칭이 가능하다는 점이다. 이러한 특징으로 인해 전력 밀도를 높여 소형화가 가능하다.

본 논문에서 제안하는 LCC 공진형 컨버터는 공진 전류의 변화를 기준으로 모드를 나눌 수 있으며 이를 그림 3에 나타내었다. 또한, 부하 조건에 따라 모드의 개수가 변화며 동작 모드 분석은 다음과 같다.

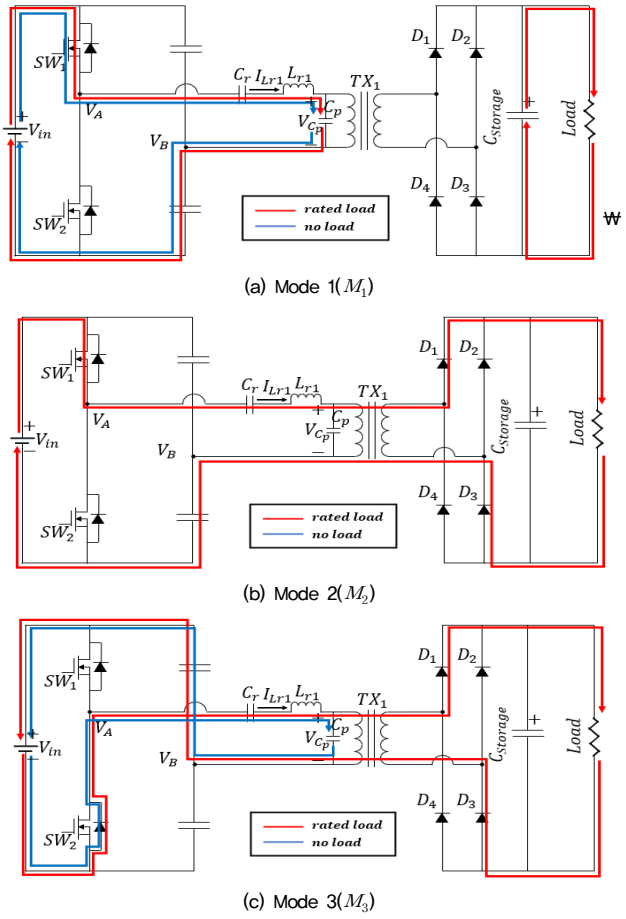


그림 2 정격과 무부하 조건에서 LCC 공진형 컨버터의 동작 모드 분석
Fig. 2 Analysis of operation mode of LCC resonant converter under rated and no load conditions

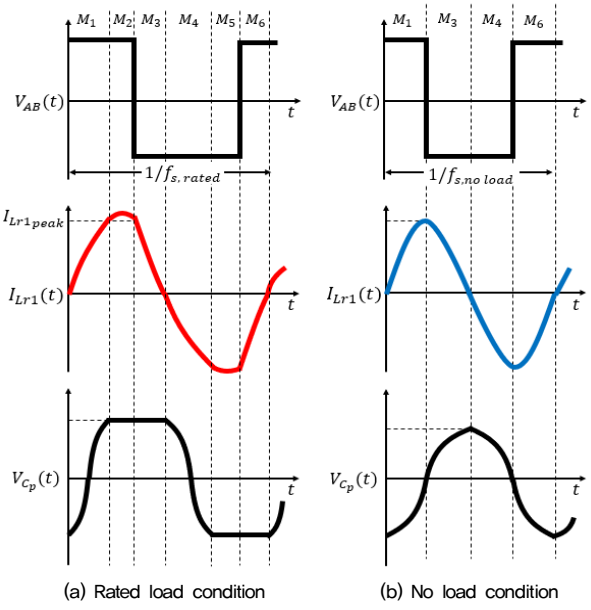


그림 3 LCC 공진형 컨버터의 정상 상태 파형
Fig. 3 Steady-state waveform of LCC resonant converter

www.dbpia.co.kr

모드 1(M_1)

모드 1이 시작하기 전에는 SW_2는 턴 오프되어 있고 SW_1의 역병렬 다이오드를 통해 음의 공진 전류가 흐르고 있는 상태이다. SW_1의 역병렬 다이오드가 도통 되어 있는 상태이기 때문에 이때 스위치가 턴 온 되면 영전압 스위칭이 만족한다. 그리고 공진 전류가 양으로 바뀌면서 모드 1이 시작된다. 모드 1은 음으로 충전된 병렬 공진 커패시터를 충전하는 구간이다. 병렬 공진 커패시터의 전압이 출력 전압보다 낮기 때문에 정류부 측에 있는 다이오드는 도통 되지 않는다. 따라서 출력 측에는 전력전달이 이루어지지 않는다. 따라서 정격 부하, 무부하 모두 병렬 공진 커패시터를 충전해주는 모드 1에서는 비슷한 공진 전류 파형이 형성된다.

모드 2(M_2)

모드 2는 병렬 공진 커패시터가 출력 전압까지 충전되고 정류부의 다이오드가 도통하며 시작된다. 다이오드를 통해 부하로 전류가 흐르기 때문에 출력 측에 전력이 전달된다. 하지만 무부하 조건에서는 출력 측에 전력이 전달되지 않기 때문에 모드 2는 거의 존재하지 않는다.

모드 3(M_3)

모드 3은 정격 부하 조건과 무부하 조건에 따라 파형이 달라진다. 모드 3은 SW_1이 꺼지면서 인덕터 양단 전압에 음 전압이 인가되고 공진 전류가 감소하는 형태로 변화하면서 시작된다. 이때 정격 부하 조건이라면 다이오드는 계속해서 도통하고 있기 때문에 출력 측에 전력이 전달되는 동시에 입력 측에 전력이 회생된다. 하지만 무부하 조건에서는 다이오드가 도통 되지 않기 때문에 병렬 공진 커패시터를 충전하면서 입력 측에 전력이 회생되는 파형이 나타나게 된다.

따라서 모드가 부하 조건에 나뉨에 따라 동일한 스위칭 주파수에 따른 출력 전압의 식이 식 (1)과 식 (2)처럼 바뀌게 된다[4],[7].

$$V_{o,rated} = V_{in} \cdot \frac{I_{Lr1,peak}}{I_o} \cdot (1 - \frac{5}{8}\frac{f_{s,rated}}{f_{op}}) \quad (1)$$

$$V_{o,noload} = V_{in} \cdot N_{TX_1} \cdot \left\{ \frac{1}{\cos(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_{op}}{f_{s,noload}})} - 1 \right\} \quad (2)$$

따라서 부하 조건에 따라 스위칭 주파수를 다르게 제어해 주어야 하며, 인버터를 공유하고 있는 본 논문의 전원장치 특성상 무부하 조건에서의 스위칭 주파수는 보조 정류부와 트리거 회로의 스위칭 주파수와 동일하다.

모드 4~모드 6(M_4~M_6)

모드 4~6은 공진 전류의 값이 음수로 바뀌면서 시작되며, 모드 1~3의 분석과 동일한 원리가 적용되고 전류의 방향만 반대이기에 설명을 생략한다.

2.2 보조 정류부와 트리거 전원장치

보조 정류부와 트리거 전원 장치는 점등 전에 동작을 한다는 특징이 있다. 따라서 제논 램프의 독특한 임피던스 특성에 의해 매우 높은 임피던스 조건에서 전원 장치들이 동작한다. 보조 정류부의 토폴로지를 설명하기에 앞서 트리거 회로는 보편적인 Cockcroft-Walton 배압회로를 기반으로 직렬 공진 인덕턴스를 추가한 토폴로지를 선정하였다. 이상적이라면 기존의 보편적인 Cockcroft Walton 배압회로는 식 (3)과 같은 스테이지 수에 비례하는 출력 전압을 가질 수 있다.

$$V_{trigger,ideal} = 2k\,V_{AB} \quad (3)$$

그러나 앞 stage의 커패시터가 다음 stage의 커패시터를 충전시켜주어야 하는 구조적인 한계 때문에 뒤의 stage로 갈수록 커패시터의 충전 전압 감소되며 출력 전압은 식 (4)에 표현한 것과 같이 감소 된다[8].

$$V_{trigger,actual} = 2k\,V_{AB} - \frac{I_{load}}{6f_sC}(4k^3 + 3k^2 - k) \quad (4)$$

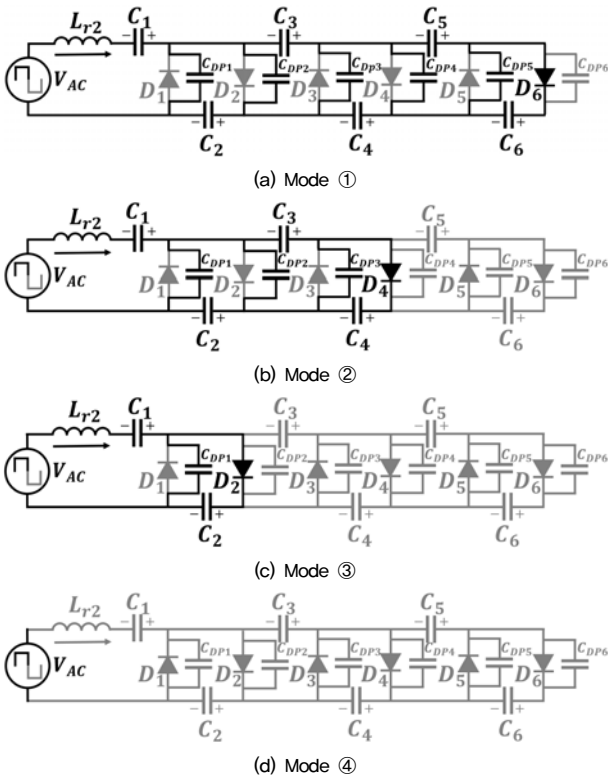
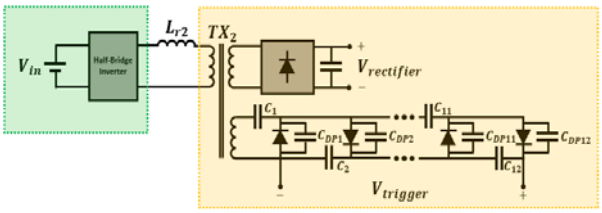
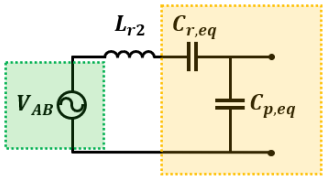


그림 4 3 stage Cockcroft Walton 배압 회로의 동작 모드
Fig. 4 Operation mode of 3 stage Cockcroft Walton voltage multiplier circuit

www.dbpia.co.kr



(a) Actual circuit



(b) Equivalent circuit

그림 5 보조 정류부와 트리거 회로의 등가회로 과정
Fig. 5 Equivalent circuit process of auxiliary rectifier and trigger circuit

이때, 변압기의 누설 인덕턴스나 직렬 인덕턴스를 추가로 제작하여 커패시터와 직렬로 연결하면 같은 stage라도 기존의 배압 회로보다 높은 출력 전압을 기대할 수 있으며 직렬 인덕턴스로 인해 보편적인 Cockcroft Walton 배압 회로와는 다른 파형을 보인다[5]. 추가적으로, 본 논문에서는 직렬 공진 인덕터(L_{r2})를 추가한 배압 회로의 공진을 분석하기 위해 동작 모드를 파악하려고 하며 이를 그림 4에 나타냈다.

우선, 파형은 과도 상태가 아닌 정상 상태를 기준으로 나타내었으며 이미 커패시터에는 전압이 충전된 상태이다. 모드 ①은 입력이 양의 전압으로 바뀔 때 시작되며, 맨 오른쪽에 있는 stage에서 D_6이 도통 된다. 따라서 C_6를 C_1, C_3, C_5가 충전시켜주며 C_5와 C_6의 전압이 같게 되면 D_6은 더 이상 도통 되지 않는다. 다음으로 모드 ②는 D_4가 도통 되면서 시작된다. 이전 모드와 똑같은 원리로 C_1와 C_3가 C_4를 충전시켜주며 C_3와 C_4가 같은 전압을 같게 되면 D_4가 더 이상 도통 되지 않는다.

모드 ③ 또한 D_2가 도통 되면 시작되며 C_1이 C_2를 충전시켜주며 C_1와 입력 전압의 합이 C_2의 전압이 같게 되면 더 이상 D_2가 도통 되지 않으며 전류가 흐르지 않는 모드 ④로 넘어가게 된다. 입력 전압이 반대라면 모드 ①~④와 마찬가지의 원리로, 전류의 방향만 반대로 분석을 진행한다. 이때 직렬 공진 인덕터에 의해 다이오드의 도통 구간이 늘어나게 되어 커패시터의 충전 전압이 더 올라가게 되는 전압 부스팅 효과가 나타나게 된다. 이는 다이오드의 기생 커패시터, 직렬로 연결된 커패시터, 그리고 직렬 공진 인덕터의 공진에 의한 효과이다.

그림 5는 변압기를 공유하는 보조 정류부와 트리거 회로의 등가회로 과정을 나타낸 것이다. 그림 5(a)에서 보옂 보조 정류부는 트리거 회로에 의해 부스팅된 AC 전압을 DC 전압으로 바꾸어주는 간단한 정류회로와 필터를 이용한 토폴로지를 사용하였다. 따라서 보조 정류부 다이오드의 기생 커패시터를

표 2 점등 전원장치의 파라미터
Table 2 Key parameter for the flash lamp power supply

Parameter	Value	Parameter	Value
L_{r1}	$233\,\mu H$	L_{r2}	$146\,\mu H$
C_r	$0.22\,\mu F$	C_p	$1.72\,nF$
C_{tri}	$3.33\,nF$	C_{dp}	$7\,pF$
TX_1	$16:1$	TX_2	$26:19:76$
$f_{s,rated}$	$280\,kHz$	$f_{s,noload}$	$340\,kHz$

병렬 공진 커패시터로 등가할 수 있다. 그리고 앞서 말한 대로 트리거 회로의 커패시터와 다이오드 기생 커패시터를 직렬 공진 커패시터와 병렬 공진 커패시터로 등가시킬 수 있으며 최종적으로 그림 5(b)와 같이 LCC 공진형 컨버터 토폴로지로 나타낼 수 있다[9]. 따라서 점등 전을 담당하는 전원장치들의 해석을 2.1 절에서 진행했던 LCC 공진형 컨버터와 동일하게 해석할 수 있다.

3. 시뮬레이션 결과

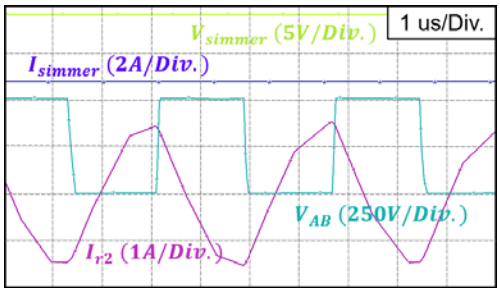
설계한 지머, 보조 정류부, 트리거 전원 장치의 검증을 위해 PSPICE 시뮬레이션 회로를 구성하였으며, 각 파라미터를 표 2에 정리하였다. 시뮬레이션 결과는 그림 6에 나타내었다. 그림 6(a)는 설계한 지머 전원장치가 정격 부하 조건에서 20 V, 5 A 출력을 나타낸 파형이며, 공진 주파수 이상의 영역에서 동작하는 LCC 공진형 컨버터의 특성으로 인해 공진 전류는 연속적인 파형을 보인다. 공진 전류와 스위치 양단 전압을 통해 영전압 스위칭이 이루어짐을 확인하였다. 이때의 스위칭 주파수는 정격 부하에서 20 V 출력을 하기 위한 280 kHz이다.

다음으로, 그림 6(b)는 무부하 조건에서의 지머, 보조 정류부, 트리거 전원장치의 출력 전압을 시뮬레이션한 결과이다. 세 개의 전원장치 모두 같은 인버터 단을 공유하고 있기에 같은 스위칭 주파수로 동작하며, 스위칭 주파수는 무부하 조건에서 각각의 목표 전압을 달성하기 위해 정격 주파수보다 높은 340 kHz 조건에서 동작하였다. 지머 전원장치는 약 24 V를 출력하였으며 목표인 20 V를 잘 추종하는 모습이다. 또한, 보조 정류부와 트리거 전압 모두 400 V, 13 kV를 출력하는 것을 확인하였으며 목표 전압에 모두 근접하는 것을 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

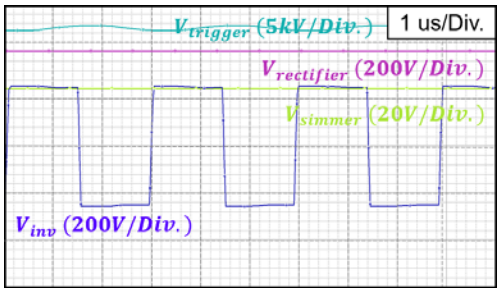
4. 실험 결과

시뮬레이션으로 검증한 파라미터를 이용하여 실제 통합 램프 점등 전원장치를 구현하였다. 제작된 전원장치들은 2가지 부하에서 실험이 진행되었으며 이를 그림 7에 나타내었다. 그림 7(a)는 4 Ω의 저항 부하에서 실험이 진행되어 20 V, 5 A의 정격 출력실험을 진행하였다. 스위칭 주파수는 280 kHz이며

www.dbpia.co.kr

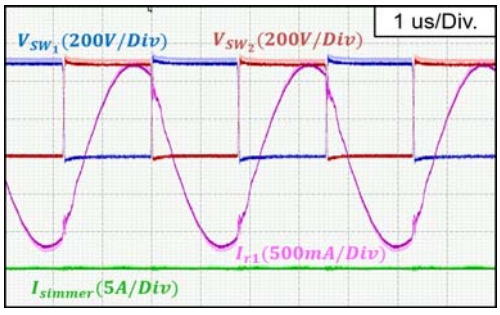


(a) Rated load condition

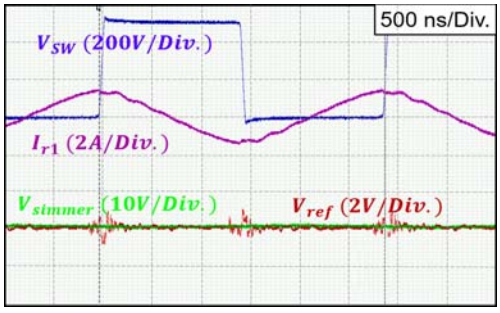


(b) No load condition

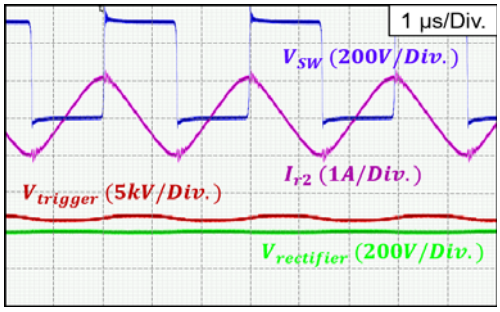
그림 6 피스파이스 시뮬레이션 결과
Fig. 6 PSpice simulation results



(a) Output of simmer with rated load condition



(b) Output of simmer with no load condition



(c) Output of auxiliary rectifier and trigger with no load condition

그림 7 실험 결과 파형
Fig. 7 Experimental results

지머 출력 전류는 5 A로 확인되어 출력 전압이 20 V임을 검증하였다. 그림 7(b)와 그림 7(c)는 저항을 달지 않은 무부하에서 실험을 진행하였다. 스위칭 주파수는 정격 스위칭 주파수보다 높은 340 kHz에서 진행되었으며 지머 출력 전압은 21 V로 측정되어 레퍼런스 전압에 잘 추종함을 확인하였다. 그림 7(c)를 보게 되면 트리거 전압과 보조 정류부의 전압도 13 kV와 400 V로 목표 전압인 10 kV와 400 V에 각각 부합함을 확인하였으며 인버터 부를 공유하기 때문에 스위칭 주파수가 340 kHz로 동일하다.

5. 결 론

본 논문에서는 제논 램프 구동용 점등 전원 설계를 위한 각 전원장치의 설계 사양, 토폴로지 분석 그리고 파라미터 선정에 대해 설명했다. 지머 전원장치는 높은 전력 밀도를 만족하기 위해 고주파 스위칭이 적용되었으며, 제논 램프의 독특한 부하 특성에 대응하는 방안이 필요하다. 이를 만족하기 위해 영전압 스위칭이 가능한 LCC 공진형 컨버터가 제안되었다. 또한, 지머 전원장치와 인버터 부를 공유하기에 낮은 입력 전압으로부터 높은 전압을 출력하기 위한 공진 회로와 Cockcroft Walton 배압 회로가 제안되었다. 등가회로로 변환하여 앞서 해석한 LCC 공진형 토폴로지처럼 회로를 해석하여 파라미터를 선정하였으며 시뮬레이션을 통해 이를 검증하였다. 최종적으로 전원장치는 각각 20 V, 400 V, 10 kV를 목표 전압으로 설계되었으며 정격과 무부하 실험을 통해 목표 전압을 안정적으로 출력하는 것을 확인하였다. 추후, 제논 램프를 직접 연결한 실부하 실험을 통해 설계한 점등 장치의 검증을 진행할 계획이다.

Acknowledgements

This work was supported by the Technology development Program (S2862711) funded by the Ministry of SMEs and Startups(MSS, Korea)

References

[1] Q. Mu et al., “Intense pulsed light sintering of thick conductive wires on elastomeric dark substrate for hybrid 3D printing applications,” Smart Mater. Struct., vol. 27, no. 11, Oct. 2018, Art. no. 115007

[2] A. Shankar, E. Salcedo, A. Berndt, D. Choi, and J.-E. Ryu, “Pulsed light sintering of silver nanoparticles for large deformation of printed stretchable electronics,” Adv. compos hybrid mater vol. 1, pp. 193-198, doi: 10.1007/s42114-017-0012-3, 2018.

[3] S.-H. Song, C.-G. Cho, S.-M. Park, H.-I. Park, and H.-J. Ryoo, “Design and implementation of novel series trigger circuit for xenon flash lamp driver,” IEEE Trans. Plasma

www.dbpia.co.kr

Sci., vol. 46, no. 10, pp. 3584－3590, Oct. 2018.
[4] S. Song, C. Cho, S. Park, H. Park, W. Jeong, and H. Ryoo, “Design and analysis of an LCC resonant converter for xenon flash lamp simmer circuit,” IEEE Trans. Dielect. Elect. Insul., vol. 26, no. 2, pp. 484－491, Apr. 2019.
[5] C. G. Cho, et al., “Integrated 15-kV DC Trigger and Simmer Power Supply for Light Sintering,” IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 47, no. 10, pp. 4473-4480, 2019.
[6] J. -B. Ahn, S. -H. Song and H. -J. Ryoo, “Design and Implementation of 3-kW Simmer and 30-kV DC Trigger Power Supply System for Driving Xenon Flash Lamps in Large-Area Processes,” in IEEE Transactions on Industrial Electronics, doi: 10.1109/TIE.2021.3128898.
[7] S.-R. Jang, C.-H. Yu, and H.-J. Ryoo, “Trapezoidal approximation of LCC resonant converter and design of multi-stage capacitor charger for solid-state Marx modulator,” IEEE Trans. Power Electron., vol. 33, no. 5, pp. 3816－3825, May 2018.
[8] S. Mao, J. Popovi´c, and J. A. Ferreira, “Diode reverse recovery process and reduction of half-wave series Cockcroft－Walton voltage multiplier for high frequency high voltage generator applications,” IEEE Trans. Power Electron., vol. 34, no. 2, pp. 1492－1499, Feb. 2019.
[9] S. -H. Son, et al., “Development of 80kW High Voltage Power Supply for X-ray Generator,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, doi: 10.1109/TIE.2022.3181363

저자소개



최민규 (Min-Kyu Choi)

Min-Kyu Choi received the B.S. degree in energy systems engineering from Chung-Ang University, Seoul, South Korea, in 2022, where he is currently pursuing the M.S. and degree in energy systems engineering from Chung-Ang University, Seoul. His current research interests include high-voltage pulsed-power supply systems and resonant converter applications for light sintering systems.



송승호 (Seung-Ho Song)

Seung-Ho Song received his B.S. degree in electrical engineering from the Kwang-Woon University, Seoul, South Korea, in 2016 and his M.S. and Ph.D. degrees at the Department of Energy Engineering, Chung-Ang University, Seoul, in 2021. He worked as a postdoctoral Researcher in Chung-Ang University. Since 2022, he has been with the Korea Railroad Research Institute (KRRI), Uiwang, South Korea, as a Senior Researcher in the Smart Electrical & Signaling Division. His research interests include soft-switched resonant converter applications and high-voltage solid state transformer.



류홍제 (Hong-Je Ryoo)

Hong-Je Ryoo (Senior Member, IEEE) received the B.S., M.S., and Ph.D. degrees in electrical engineering from Sungkyunkwan University, Seoul, South Korea, in 1991, 1995, and 2001, respectively. From 2004 to 2005, he was a Visiting Scholar with WEMPEC, University of Wisconsin-Madison, Madison, WI, USA. From 1996 to 2015, he joined the Electric Propulsion Research Division as a Principal Research Engineer, the Korea Electrotechnology Research Institute, Changwon, South Korea, where he was a Leader with the Pulsed Power World Class Laboratory, a director of Electric Propulsion Research Center. From 2005 to 2015, he was a Professor with the Department of Energy Conversion Technology, University of Science and Technology, Daejeon, South Korea. In 2015, he joined the School of Energy Systems Engineering, Chung-Ang University, Seoul, where he is currently a Professor in major of Electrical Energy Engineering. His current research interests include pulsed-power systems and their applications, as well as high-power and high-voltage conversions. Prof. Ryoo is an Academic Director of the Korean Institute of Power Electronics, a planning director & editorial director of the Korean Institute of Electrical Engineers, and the Vice President of the Korean Institute of Illuminations and Electrical Installation Engineers.

www.dbpia.co.kr