

10kV 고 반복률 펄스 전원장치

조현빈, 송승호, 장성록¹, 류홍제
 중앙대학교, 한국전기연구원¹

10kV High Repetitive Pulsed Power Generator

Hyun-Bin Jo, Seung-Ho Song, Sung-Roc Jang¹, Hong-Je Ryoo
 Chung-Ang University, KERI¹

ABSTRACT

In this paper, 10kV solid-state pulsed power modulator with high repetition rate is described. The modulator is based on a Marx generator that charges capacitors in parallel and discharges them in series. Twelve IGBTs and capacitors are connected in series to generate output voltages up to 10kV at a repetition rate of 100kHz. The volume of the modulator is 26.1 liters, and its maximum average output power is 10kW. Therefore, the compact design is achieved with a high power density of 380 W/L. Finally, it is confirmed that the pulsed power modulator can operate stably through the experiment results at 10kV 100kHz condition.

1.서론

펄스 전원 치는 커패시터나 인덕터와 같은 에너지 저장 소자에 응축된 에너지를 순간적으로 짧은 시간 동안 높은 에너지의 구형파 형태로 방전하는 장치로써 마그네트론 구동, 플라즈마 방전, 가스 처리, 오 폐수 처리 등 이러한 응용분야에 걸쳐 사용되고 있다. 다양한 응용분야 중에서 DLC(Diamond Like Carbon) 코팅의 경우 높은 플라즈마 밀도 $(5-10) \times 10^{10} cm^{-3}$ 로 물질을 균등하게 코팅하기 위해 2~10kV의 전압과 10~100kHz 범위의 높은 반복률이 요구된다.[1][2][3] 본 논문에서는 이와 같은 고 반복률 펄스 전원 응용 분야에 적합한 반도체 스위치 기반 펄스 전원 장치를 설계하고, 10 kV 100 kHz 반복률 실험을 통해 고 반복률 조건에서 동작 안정성을 검증하였다.

2. 10kV 펄스 모듈레이터

2.1 모듈레이터의 구조

펄스 모듈레이터의 기본 구조는 그림1에 나타내었으며, 에너지 저장 소자인 스토리지 커패시터와 이를 충전하는 고전압 커패시터 충전부, 그리고 커패시터에 충전된 에너지를 방전하는 방전부로 구성된다. 병렬로 커패시터를 충전하고 직렬로 커패시터를 방전하는 방식은 막스 제너레이터를 기반으로 하지만, 막스 제너레이터의 낮은 충전 효율과 방전 구조가 개선된 것이 특징이다.

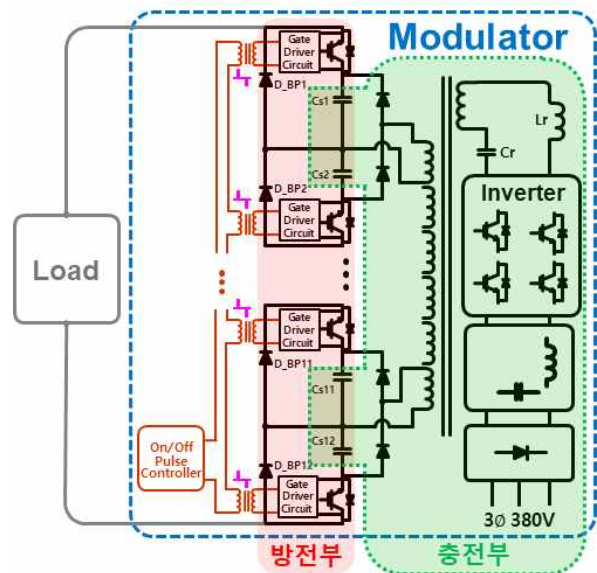


그림 1 설계된 10kV 펄스 전원장치 구조
 Fig. 1 The structure of designed 10kV pulsed power generator

2.1.1. 충전부

표 1 고전압 커패시터 충전부 사양

Table 1 Specifications of high-voltage capacitor charger

| 입력 전압 | 380 Vac $\pm 10\%$ |
|---------------|--------------------|
| 평균 최대 출력 | 10 kW |
| 최대 효율 | 90% 이상 |
| 스위칭 주파수, fs | 42 kHz |
| 공진 주파수, fo | 37.5 kHz |
| 공진 인덕턴스, Lr | 40 uH |
| 공진 커패시턴스, Cr | 0.45 uF |
| 스토리지 커패시터, Cs | 15 uF |
| 변압기 턴수 비 | 13 : 25 \times 6 |

고전압 커패시터 충전부는 총 12개의 스토리지 커패시터 Cs를 병렬로 충전하며, 최대 출력 전압은 10kV, 최대 출력 파워는 10kW로 설계되었다. 기본 구조는 평활 회로, ZVS PWM 인버터, LC 공진 탱크, 다중 권선 변압기, 배압 회로로 구성된다. ZVS PWM 인버터는 Phase shifted pwm 제어 방식이 사용되어, 경부하 구동시 발생하는 높은 스위칭 손실 문제, 가청

주파수 소음 문제 등이 없고 필터 설계가 용이하다는 장점이 있다. 다중 권선 변압기는 고전압 절연 설계 구조를 통해 발생하는 상대적으로 큰 누설 인덕턴스가 있는데, 이 인덕턴스는 직렬 공진 인덕터로 사용되며, 인덕터에 저장된 충분한 에너지로 인해 ZVS 영역이 크게 증가한다는 장점이 있다.

2.1.2. 방전부

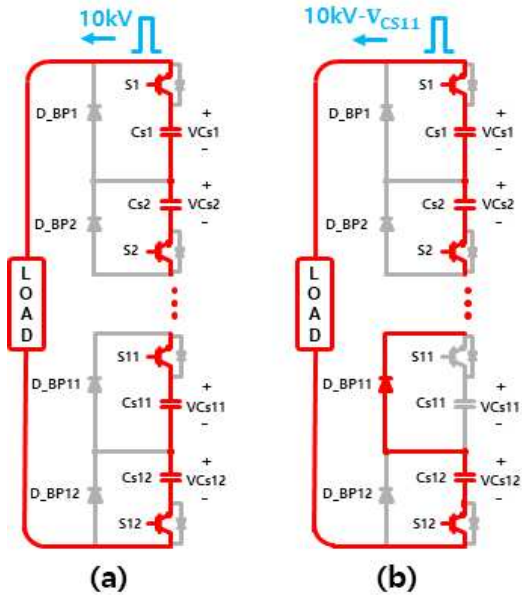


그림 2 펄스 방전부 구조 및 바이패스 다이오드 동작 회로도
Fig. 2 Configuration for pulse discharge and bypass diode operation

그림 2는 방전부의 구조와 bypass diode 동작을 보여준다. 방전부의 구조는 스토리지 커패시터(Cs), IGBT(S), Bypass diode(D_BP)로 구성되어 있으며 충전부로부터 병렬로 충전된 12개의 스토리지 커패시터 Cs가 IGBT 스위칭을 통해 직렬로 연결되어 부하로 방전하는 동작을 한다. 반도체 기반 스위치는 단일 소자 정격의 제한으로 인하여 직렬 또는 병렬 스테킹 구조를 사용한다. 이 때 각각의 스위치가 동일한 타이밍에 턴 온, 오프 되는 스위치의 동기화 특성은 주요한 고려 사항이며, 동기화 문제가 발생할 경우 스위치 간 전압 밸런싱이 무너지면서 소자의 소손이 일어날 수 있다.

그림 2 (a)는 방전부의 정상 동작 시 전류 경로이다. 여기서 12개의 커패시터가 직렬로 연결되어 10kV의 전압이 출력된다. 그림 2(b)는 방전부의 오동작 모드이며, IGBT S11이 오동작을 하거나 동기화를 실패할 경우 Bypass diode D_BP11를 통해 전류 경로가 형성되어 안전하게 펄스를 출력할 수 있다. 이처럼 해당 구조는 게이트 구동 신호의 동기화가 맞지 않더라도 스위치가 소손되지 않는 장점을 갖는다. 여기서 하나의 IGBT가 고장으로 Bypass diode를 통해 전류가 흐를 경우 출력전압은 10kV에서 V_{cs11} 전압이 차감되어 출력된다.

2.1.3. On/Off 펄스 컨트롤러 및 게이트 드라이버

고전압 펄스 전원장치 설계 시 각각의 스위치에 동기화된 신호와 절연된 파위를 공급하는 것은 중요한 설계 고려 요소이다. 펄스 컨트롤러로부터 출력된 온 오프 펄스는 토로이달 코어를 통해 12개의 게이트 드라이버로 전달되어 동기화 및 절연된 파워, 신호 공급이 이루어진다. 온-오프 펄스를 인가받은 12

개의 게이트 드라이버의 동작은 다음과 같다. 먼저 온 펄스가 입력되면 IGBT가 턴 온된다. 이 후 오프 펄스가 인가되기 전까지 턴 온을 유지하며 오프 펄스 인가 후 IGBT가 턴 오프 한다. 이와 같이 온 오프 펄스를 통하여 IGBT 게이트 전압 펄스 폭을 제어하는 방식은 코어의 포화를 방지하고, 코어 사이즈를 최소화하는 장점이 있다.

2.2 실험 결과

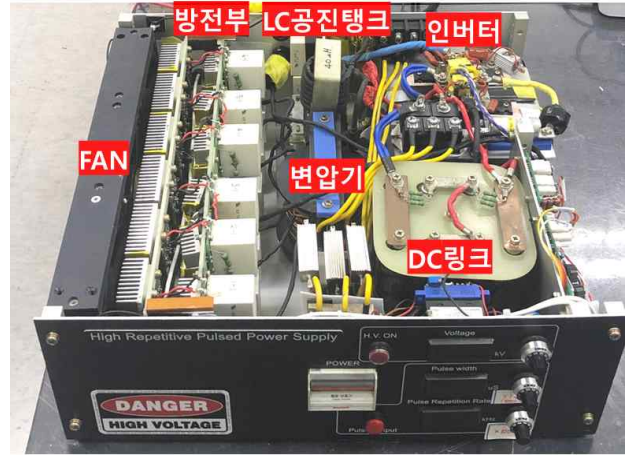


그림 3 10kV 펄스 전원 장치 내부 구성
Fig. 3 Internal arrangement of 10kV pulsed power generator

충전부와 방전부가 통합된 10kV 펄스 전원 장치의 내부 구성은 그림 3에 나타나 있으며, 상세 설계 사양과 주요 특징은 표 2를 통해 확인할 수 있다.

표 2 10 kV 펄스전원장치 설계 사양
Table 2 Specifications of 10 kV Pulsed power generator

| | |
|-----------|---|
| 최대 출력 전압 | 10 kV |
| 최대 출력 전류 | 50 A |
| 평균 최대 출력 | 10 kW |
| 최대 펄스 반복률 | 100 kpps |
| 최대 충전 효율 | 90% 이상 |
| 펄스 폭 | 500 ns ~ 10 us |
| 펄스 상승 시간 | 60 ns 이하 |
| 크기 | 430mm(W) * 400mm(D) * 150mm(H) |
| 부피 | 26.1 Liters |
| 평균 전력 밀도 | 380 W/liter |
| 냉각 방식 | Forced air |
| 보호 기능 | Arc, short, Over-temperature, Over voltage protection |

2.2.1. 1.3kΩ 무유도 저항부하 10kV 출력 테스트

그림 4는 1.3kΩ 무유도 저항 부하에서 10kV 100kHz 8A 1us 펄스폭 (7.5kW) 조건 실험 파형이며, 10kV 100kHz의 조건에서 안정적인 동작을 하여 고 반복률 신뢰성을 검증하였다.

그림 5(a)는 1us부터 10us까지 펄스폭을 가변한 파형이며, 그림 5(b)는 2kV부터 10kV까지 전압을 가변한 파형으로 펄스 폭 및 전압을 자유롭게 조절할 수 있음을 확인하였다.

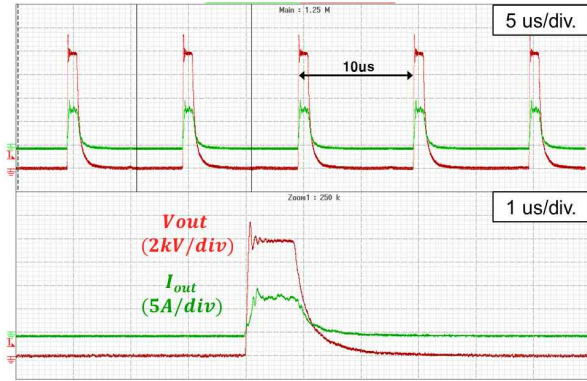
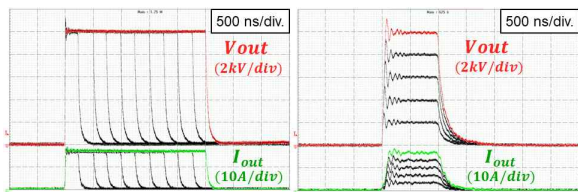


그림 4 10kV 8A 100kHz 1us 펄스폭 실험 파형
Fig. 4 10kV 8A 100kHz 1us pulse width Test waveform



(a) 1~10us 펄스폭 조절 (b) 2~10kV 전압 조절
그림 5 펄스폭 가변 및 전압 조절 동작 파형
Fig. 5 Waveforms of the variable pulse width and pulse amplitude.

2.2.2. 링잉 저감

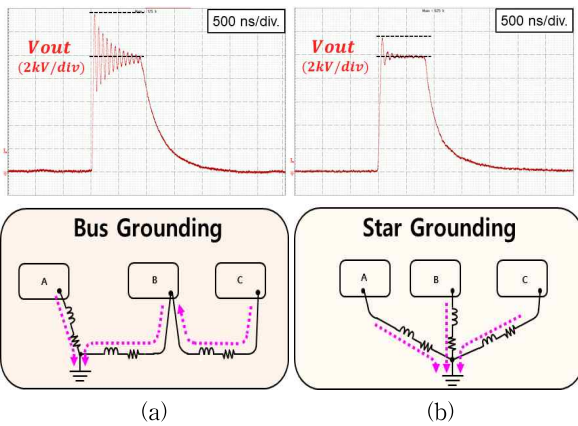


그림 6 10kV 링잉 출력 파형 및 접지 결선 구조
Fig.6 10kV ringing output waveform and each grounding wire system.

고전압 펄스 출력시, 기생 성분 영향에 의해 출력 링잉이 심한 파형이 나타날 수 있다. 이러한 링잉을 줄이기 위해 라인의 길이를 최소화하는 것뿐만 아니라, 접지 결선 방식 또한 신중히 고려되어야 한다. 그림 6은 접지 결선에 방식에 따라 출력 전압 링잉이 변화한 모습을 보여준다. 그림 6(a)의 파형의 경우 접지 결선방식은 버스 접지 결선방식이 사용되었다. 버스 접지 방식은 접지 단자간 불평형으로 인해 전위차가 발생하고, 루프가 형성되어 기생성분의 영향이 증대된다. 여기서 피크 전압은 14kV까지 상승하였는데 이러한 전압은 전원장치와 부하에 스트레스를 가하여 소자 수명에 악영향을 미친다. 그림 6(b)의 파형은 스타 접지방식이 사용되었으며, 접지 경로에 루프가 형성되는 것을 방지하여 기생성분의 영향을 최소화시키고, 그에 따라 링잉을 저감할 수 있었다.

3. 결론

본 논문에서는 반도체 스위치 기반 고 반복률 펄스 전원 장치를 소개하였다. 전원 장치는 크기가 26리터이고 10kW 평균출력이 가능하여 380 W/L의 높은 평균전력 밀도를 갖는다. 또한 냉각방식에서 별도의 칠러를 사용하지 않고 공냉식 냉각 방식만을 사용하여 소형 경량화 뿐만 아니라 유지보수 측면에서도 장점을 갖는다. 본 논문에서는 1.3kΩ 무 유도 저항 부하에서 10kV 8A 100kHz 1us 7.5kW 고 반복률 출력 실험을 진행하여 안정적인 동작을 검증하였으며, 고전압 펄스 출력 시 빈번하게 나타나는 링잉 현상을 접지 결선 측면에서 분석하였다.

이 논문은 2017년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2017R1A2B3004855).

참고 문헌

- [1] H. J. Ryoo, S. A. Nikiforov "DLC coatings by PI3D:Low-voltage vs High-voltage Biasing", Acta Physica Polonica A, Vol. 115, No. 4, pp. 1146-1148, 2009.
- [2] S. A. Nikiforov, H. J. Ryoo, H. S. Oh, and G. H. Rim,"PI3D processing of DLC coatings for different applications",Physica status solidi c ,Vol.5, No.4 , pp.968-972, 2008
- [3] Martí-González and E. Bertran, "Mechanical and Surface Characterization of Diamond-Like Carbon Coatings onto Polymeric Substrate," arXiv preprint arXiv:1509.08512, 2015.
- [4] Seung-Bok, "Design of High Efficiency 40kV, 150A, 3kHz Solid-State Pulse Power Modulator", IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 40, No. 10, pp. 2569-2577, 2012