

빠른 상승 시간을 갖는 펄스 전원 장치 설계

이승희, 송승호, 조현빈, 류홍제
중앙대학교

Design of the pulsed power supply with fast rise time

Seung-Hee Lee, Seung-Ho Song, Hyun-Bin Jo, Hong-Je Ryoo
Chung-Ang University

ABSTRACT

본 논문은 빠른 상승 시간과 짧은 펄스폭을 위한 펄스 전원 장치의 설계에 대해 다룬다. 이를 위해서 적합한 방전 스위치의 선정과 높은 상승률을 가진 동기화된 게이트 전압을 만들어 내는 게이트 구동 회로의 설계가 진행 되었다. 방전 스위치로 IGBT가 선정되었으며, 방전 스위치들의 동기화된 빠른 게이트 드라이빙을 위한 펄스 컨트롤러 인버터와 게이트 드라이브 회로의 설계 및 동작에 대한 분석이 진행 되었다. 실험을 통해 펄스 컨트롤러 게이트 드라이빙 시스템에 대한 검증이 이루어졌고, 무유도 저항을 사용한 10 kV, 50 kHz 조건에서 펄스 출력 실험을 통해 20 ns 이하 상승시간과 100 ns 펄스폭을 갖는 펄스 전원 장치의 출력을 확인 하였다.

1. 서론

높은 전압 전류 내력을 갖는 기존의 스파크 갭과 같은 기계식 스위치 기반의 펄스 전원 장치는 짧은 수명, 반복률의 한계, 일정한 펄스 출력의 어려움으로 반도체 스위치를 사용한 펄스 전원 장치들이 이를 대체하고 있다.^[1] 또한 가스 처리 시스템, 도장 공정, 표면처리공정 등 여러 응용 분야에서 빠른 상승 시간을 갖는 짧은 펄스를 요구함에 따라 해당 사양을 갖춘 반도체 기반 펄스 전원 장치에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.^[2]

파워 셀 기반 펄스 전원 장치의 펄스 출력 원리는 다음과 같이 단순화 된다. 방전 부는 방전 스위치와 스토리지 커패시터로 구성된 파워 셀들의 직렬 스택으로 구성되어 있으며, 모든 방전 스위치가 일제히 턴 온 되면 스토리지 커패시터들은 직렬 연결되고 고전압 펄스가 부하에 출력된다. 이때, 방전 스위치들의 턴 온 속도와 동기화는 출력 펄스의 상승 시간을 결정하는 주요 요인이며, 턴 온/오프 전환 속도는 출력 펄스의 펄스폭을 결정하는 주요 요인이다.

본 논문에선 방전 스위치들의 턴 온 속도, 동기화, 턴 온/오프 전환 속도를 극대화하여 빠르게 상승하는 짧은 펄스 출력이 가능한 펄스 전원 장치를 제안한다. 온/오프 특성이 빠른 펄스 방전 스위치를 선정하였으며, 방전 스위치 동작을 극대화하기 위한 게이트 동기 구동 시스템이 사용되었다. 이 게이트 구동 시스템은 하나의 인버터를 사용하여 모든 방전 스위치 드라이버들을 빠른 속도로 트리거링하며, 방전 스위치 드라이버들은 높은 속도로 방전 스위치를 구동한다. 게이트 구동 시스템에

대한 분석이 이루어졌으며, 이 시스템을 적용한 펄스 전원 장치의 성능과 신뢰성을 확인하기 위한 실험적 검증이 이루어졌다.

2. 빠르게 상승하는 짧은 펄스를 출력하는 펄스 전원 장치 설계

제안하는 펄스 전원 장치는 그림 1과 같이 커패시터 충전기, 펄스 방전 부, 방전 스위치 게이트 드라이빙 회로로 이루어져 있으며, 펄스 방전 부는 스토리지 커패시터, 바이패스 다이오드, 펄스 방전 스위치로 이루어져 있다. 펄스가 생성되는 과정은 다음과 같다. LCC 공진형 컨버터 기반의 토폴로지를 사용하고 여러 개의 2차 측 와인딩으로 병렬 충전이 가능한 커패시터 충전기로 스토리지 커패시터들을 동시에 충전한다. 한편, 모든 방전 스위치들에 동기화된 게이트 시그널을 일제히 입력시켜 턴 온 시키면 커패시터들은 직렬 연결되어 부하에 펄스 에너지를 공급한다. 이때, 동기화에 실패하거나 오동작 시의 스위치들을 보호하기 위해 펄스 전류를 바이 패스하는 바이패스 다이오드가 방전 부에 구성되어 있다.

출력 펄스의 상승 속도를 극대화하기 위해선 커패시터들을 직렬 연결시키는 방전 스위치들의 턴 온 속도와 동기화가 중요하다. 턴 온 특성이 우수한 방전 스위치를 선정하고 최적화된 게이트 전압을 방전스위치에 입력하여 각각의 방전 스위치들의 턴 온 속도를 극대화해야 한다. 또한, 모든 스위치에 동기화된 게이트 시그널을 입력하여 순차적이지 않고 동시에 켜지도록 해야 한다.

2.1 방전 스위치 선정

방전 스위치로 가장 적합한 소자를 찾기 위해 여러 후보 방전 스위치들의 비교 실험이 진행 되었다. 기생 커패시턴스 성분의 크기가 작아 빠른 스위치 특성을 가진 IGBT와 SiC MOSFET 모델들이 후보가 되었으며, 이에 대한 싱글 셀 테스트가 이루어졌다. 모든 스위치들은 600 V와 여러 전류 조건에서 동일한 게이트 드라이버를 사용하여 출력 전압의 상승시간에 대한 비교가 이루어졌다. 그림 2 에서와 같이 다섯 종류의 스위치들 중에 FGL40N120(1200V/64A, IGBT)의 턴 온 속도가 가장 빠른 편에 속하였으며, 다양한 펄스 전원 장치에서의 고신뢰성이 여러 차례 검증된 모델로 해당 반도체 스위치를 방전 스위치로 선정 하였다.

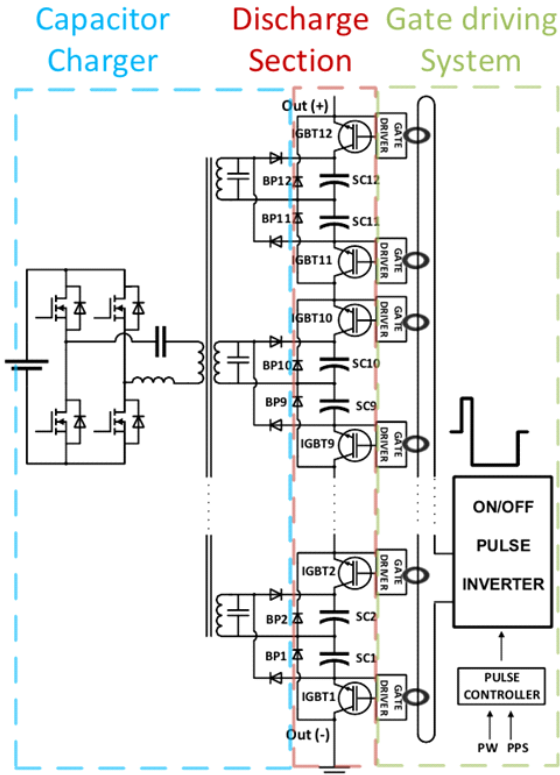


그림 1 제안하는 펄스 전원 장치
Fig. 1 Proposed pulsed power modulator

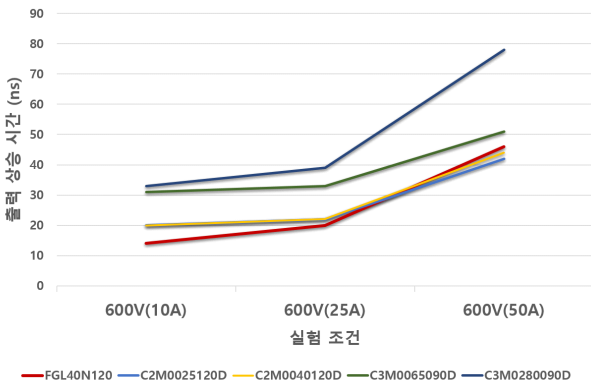


그림 2 방전 스위치 선정 단일 셀 실험 결과
Fig. 2 The results of single cell tests for discharge switch selection

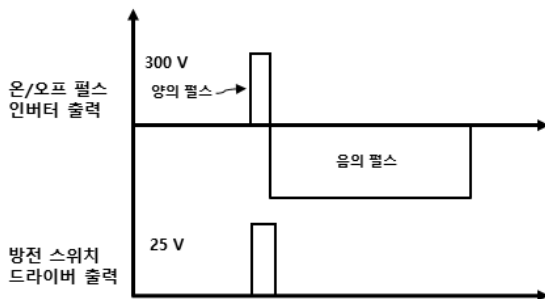


그림 3 제안하는 게이트 드라이빙 시스템 동작
Fig. 3 The operation of proposed gate driving system

2.2 온/오프 펄스 인버터를 사용한 고속 동기 게이트 구동 시스템

방전 스위치들의 고속 동기 게이트 구동을 위해 그림 1과 같은 인버터를 사용한 게이트 구동 시스템이 설계되었다. 온/오프 펄스 인버터에서 그림 3과 같이 300-V의 양의 펄스와 음의 펄스가 출력되면, 인버터 출력은 하나의 케이블과 드라이버들 각각의 변압기를 통해 모든 방전 스위치 드라이버들에 동시에 전달되어, 방전 스위치의 턴 온 동작과 턴 오프 동작을 만들어낸다. 온/오프 펄스 인버터는 높은 상승률을 갖는 양의 펄스를 출력하여 방전 스위치 드라이버들을 빠르게 트리거링한다. 또한, 인버터는 수십 나노초의 펄스폭을 갖는 양의 펄스 출력 뒤에 바로 음의 펄스를 출력하여 방전 스위치 드라이버의 온/오프 전환 속도를 높인다. 방전 게이트 드라이버는 on pulse를 입력 받아 게이트 드라이버 내의 턴 온 스위치 동작으로 그림의 커패시터 전압이 게이트에 입력되어 빠르게 게이트를 충전한다. 이후 off pulse가 입력되면 게이트 드라이버 내의 턴 오프 스위치가 동작하여 게이트를 빠르게 방전시키는 동작을 통해 짧은 펄스를 구현한다.

3. 실험 결과

제안하는 펄스 전원의 게이트 드라이빙 시스템 동작과 출력 펄스의 성능과 신뢰성을 검증하기 위한 실험이 진행되었다. 펄스 전원의 최대 출력 펄스 전압은 10 kV, 반복률은 50 kHz이며 최소 출력 펄스폭은 약 100 ns 이다.

3.1 온/오프 펄스 인버터 및 방전 스위치 게이트 드라이버 실험 결과

빠르게 전환 되는 온/오프 펄스 인버터의 출력 및 방전 스위치 게이트의 입력 시그널들을 확인하기 위한 실험들이 진행되었다. 그림 4는 온/오프 펄스 인버터의 출력 전압 파형 및 방전 스위치의 게이트 전압 중첩 파형이다. 인버터는 30 ns의 짧은 양의 펄스와 즉각적인 음의 펄스를 출력하며 이에 따라 짧은 방전 스위치 게이트 전압이 발생한다. 또한, 인버터 출력의 높은 상승률로 모든 방전 스위치 드라이버들을 빠르게 트리거링하여 동기화 오차를 최소화하였다. 그림 4의 방전 스위치 게이트 전압 중첩 파형에서 동기화 오차는 5 ns 이하로 방전 스위치들의 완벽한 동기화를 확인하였다.

3.2 펄스 출력 실험 결과

그림 5은 400 옴의 무유도 저항을 사용한 10 kV, 25 A, 50 kHz 조건에서의 실험 결과를 보여준다. 파워 셀의 두 스토리지 커패시터의 합이 약 1650 V이 되게 하여 모든 스토리지 커패시터의 합이 10 kV이 되게 하였다. 펄스 출력 결과 100 ns의 펄스가 구현되었으며 상승 시간은 약 13 ns 으로 우수함을 확인하였다.

W., Fetzer R., Mueller G. “ A Fast Modular Semiconductor-Based MarxGenerator for Driving Dynamic Loads”, IEEE Transactions on Plasma Science. Vol. 44, No. 1, pp. 627-633, 2019, Jan.

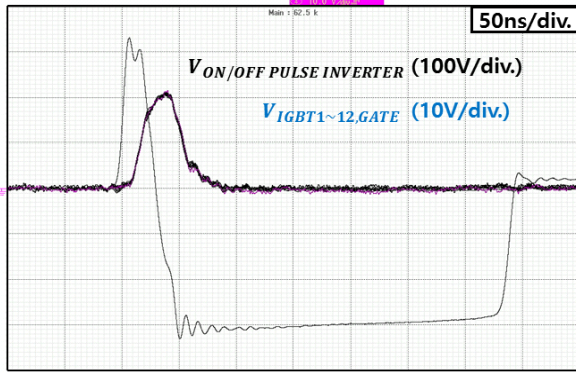


그림 4 인버터 출력 파형 및 방전 스위치 게이트 전압 증첩 파형

Fig. 4 The waveforms of the inverter output voltage and discharge switch gate voltages

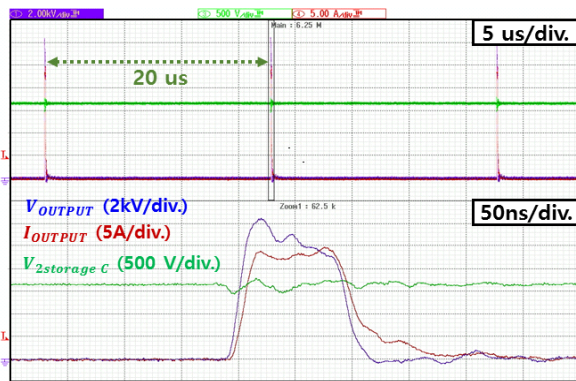


그림 5 제안하는 펄스 전원 장치의 펄스 방전 실험 파형

Fig. 5 The waveforms of pulse discharge test of the proposed pulsed power modulator

4. 결론

본 논문에선 반도체 스위치를 사용한 파워 셀 기반의 펄스 전원 장치의 빠르고 짧은 펄스 출력을 위한 설계 사항들이 제시 되었다. 적합한 방전 스위치의 선정이 이루어졌으며, 온/오프 펄스 인버터를 사용하여 동시에 방전 스위치들을 높은 속도로 드라이빙 하였으며 이에 대한 분석이 이루어졌다. 실험을 통해 인버터의 출력과 방전 스위치 게이트 입력 전압을 측정 하였으며 게이트 드라이빙 시스템을 검증 하였다. 무유도 저항을 이용한 펄스 파워 출력 실험을 통해 제안하는 펄스 전원 장치의 성능을 검증하였다.

이 성과는 2017년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.NRF-2017R1A2B3004855).

참 고 문 헌

- [1] 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, Oct.
- [2] Hochberg M., Sack M., Herzog D., Weisenburger A., An