

반도체 스위치 기반 고반복 펄스전원

장성록\*, 안석호\*, 류홍제\*\*, 김종수\*\*, 임근희\*\*  
 \*과학기술연합대학원, \*\*한국전기연구원

High Repetitive Pulsed Power Supply Based on Semi-Conductor Switches

S.R. Jang\*, S.H. Ahn\*, H.J. Ryou\*\*, J.S. Kim\*\*, G.H. Rim\*\*  
 \*University of Science & Technology, \*\*KERI

**Abstract** - In this paper, a novel 10kV, 50A, 50kHz pulsed power supply based on IGBT stacks is proposed. Proposed scheme consists of series connected 12 IGBT to generate maximum 10kV output pulse and 10kW full bridge phase-shifted zero voltage switching converter to charge DC capacitor voltage. Each IGBTs are sustain the 830V of capacitor voltage at turn off interval. By turn on the each IGBT for the same time it gives the path for the series connection of charged capacitor. From above turn on and off procedure, high voltage repetitive pulse is applied to the load. The synchronization of gating signal is important of series operation of IGBTs. For gating signal synchronization, specially designed gate power circuit using full bridge inverter and pulse transformer is developed to generate IGBT gating signal.

1. 서 론

펄스전원장치에는 소자의 정격 등의 한계로 싸이랏론과 같은 기계적 스위치들이 사용되어 왔다.[1-2] 최근에 수명, 펄스반복율, 소형 경량화 등의 목적으로 반도체 소자에 의한 펄스전원장치 개발에 대한 연구가 진행되고 있다.[3-5]

반도체 스위치 소자를 사용한 펄스전원장치는 그 소자의 정격상의 문제로 인하여 직렬 스택된 반도체 스택과 승압형 펄스변압기를 사용하는 방식[3]과 고전압을 변압기 등의 이용 없이 직접 반도체 스택에 의해 인가하는 방식이 고려될 수 있으며, 후자의 경우 더욱 빠른 펄스 상승시간과 제어에 장점을 지니게 된다.

본 논문에서는 기존에 발표된 반도체 스위치에 의한 펄스전원장치[5]의 연구 성과를 바탕으로 반복률이 높은 펄스파워를 요구하는 응용분야에 적합한 새로운 전원 장치를 제안한다. 제안하는 전원장치는 기본적으로 고압 충전을 위한 full bridge phase shifted PWM ZVS converter 방식의 충전기와 수정된 Marx generator형식의 고압발생장치로 구성되며, 10kV 펄스 출력을 위하여 1200V급 IGBT 12개가 직렬구동으로 연결되었다. 제안한 방식의 구조와 설계사항에 대하여 기술하고, 실험을 통한 제시한 펄스전원장치의 성능을 검증한다.

2. 제안하는 펄스전원장치

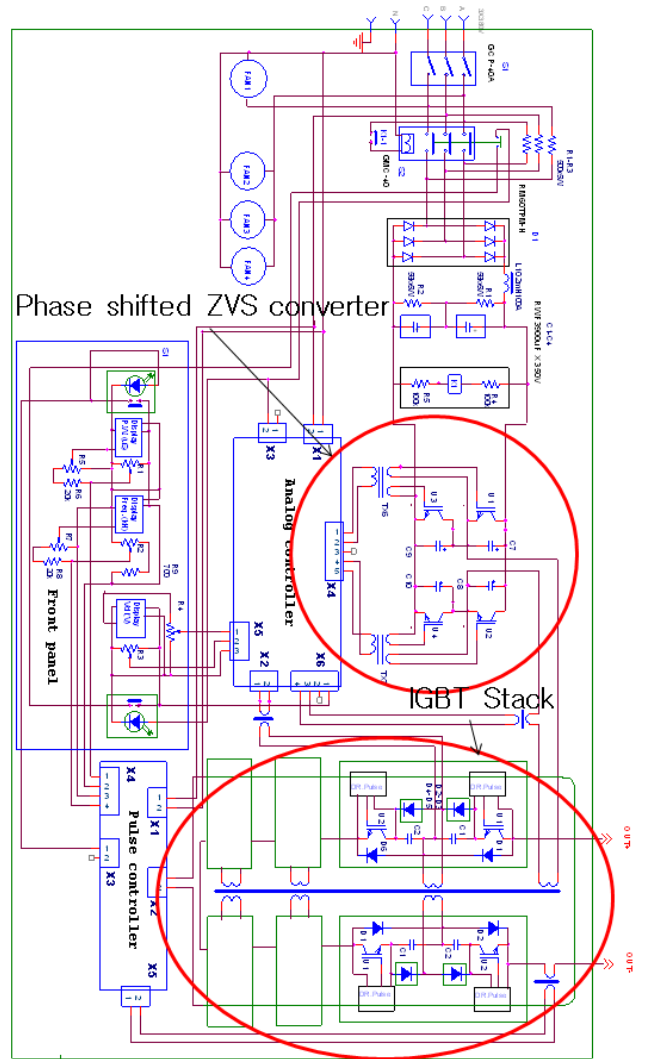
설계 제작된 펄스전원장치의 사양을 정리하면 다음과 같다.

- 펄스출력전압: 0-10kV
- 펄스출력전류: 최대 50A
- 펄스폭: 1μsec - 10μsec
- 펄스반복 주파수: 1Hz - 50kHz
- 펄스상승시간: 60nsec

제안한 펄스전원장치의 구조를 그림 1에 나타내었다. 전원장치는 크게 펄스 출력단에 커패시터를 충전 하기위한 10kW의 Phase shifted ZVS converter와 충전된 각 커패시터를 직렬로 연결시켜 고압 펄스를 생성하는 IGBT stack 파트로 나뉜다.

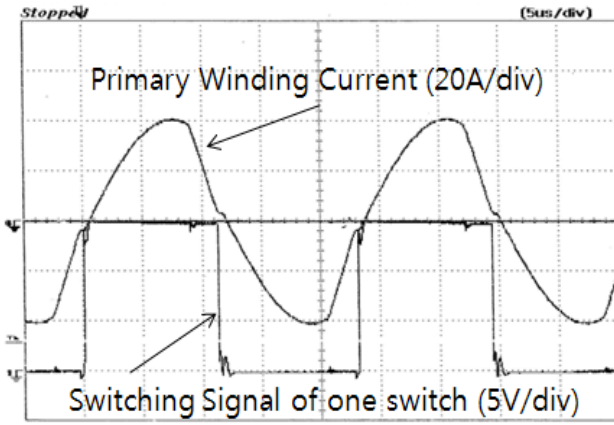
2.1 Full Bridge Phase-Shift ZVS PWM Converter

Phase shifted ZVS converter는 스위치를 이용하여 파워를 전달하는 active region 과 스위치의 역병렬 다이오드를 이용하여 전압 인가 없이 전류를 freewheeling 하는 passive region으로 나뉜다. 이때 active region의 구간을 각 switching signal의 위상을 조절하면 서 바꿀 수 있게 된다. 즉 switching signal의 위상차로 출력전압이 제어 가능해진다.

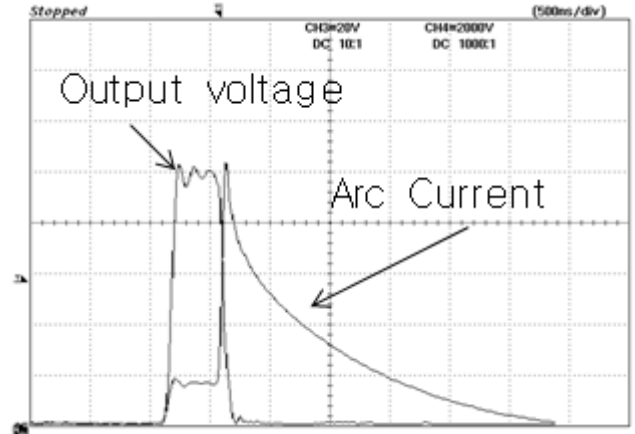


<그림 1> 제안하는 전원장치의 전체 회로도

이 topology는 ZVS 방식을 이용하여 스위칭 손실을 줄일 수 있고, 동통 손실 또한 다른 공진형 soft switching 방식보다 작다는 장점이 있다. 또한 switching frequency가 고정되어 있고, 소자의 기생성분(output capacitance and body diode of switch, leakage inductance of transformer)을 이용하여 구현이 가능하여 추가 부품이 필요 없거나 필요 하다면 작을 크기의 소자를 사용할 수 있어 전원장치의 부피를 줄일 수 있다. 그러나 각 switching signal의 위상차 고려하여야 하고, light load에서의 전류 peaking과 feedback문제도 컨트롤러 설계가 복잡한 단점이 있다. 또한 출력 정류 다이오드의 reverse recovery에 의한 ringing성분의 영향으로 손실이 커지는데 이 또한 고려 되어져야할 사항이다. 본 논문에서는 변압기 1차측에 L,C 직렬공진회로를 추가하여 위와 같은 단점을 보완하여 설계하였다. 직렬공진 회로를 추가한 후의 실험파형은 그림2와 같다.



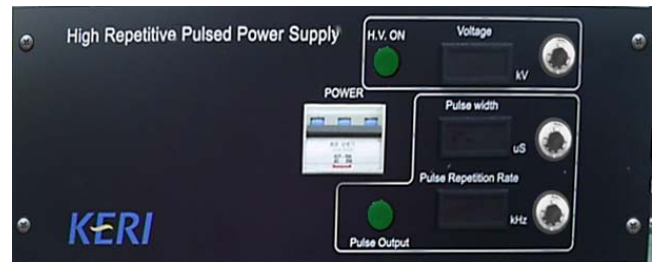
〈그림 2〉 Phase shifted ZVS converter의 파형



〈그림 5〉 Arc 보호 파형 (전압 : 2kV/div, 전류 : 20A/div)

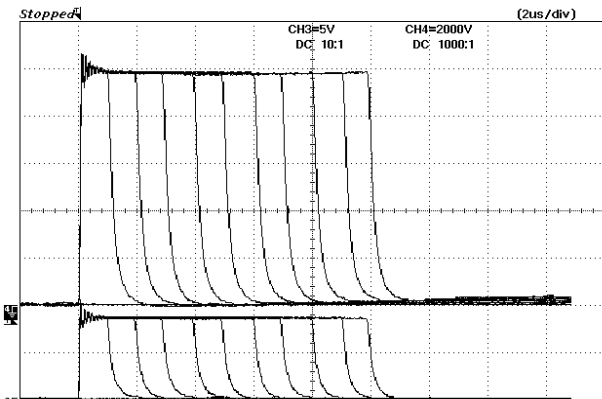
## 2.2 IGBT Stack and Driver

그림1에서 IGBT stack의 구조를 살펴보면 각 stack은 ZVS converter의 변압기 2차측과 연결되어 있고, voltage doubled rectifier를 통하여 2개의 커패시터를 충전시킨다. 충전되는 커패시터는 각각 IGBT와 직렬로 연결되어 있어 IGBT를 동시에 turn on하면 출력단의 모든 커패시터가 직렬로 연결되어 고압펄스를 만들게 된다. 이때 각 IGBT를 동시에 turn on/off하는 것이 중요한데 이는 변압기를 이용하여 각 드라이버 회로에 signal과 power를 동시에 전달하는 방식을 사용 하였다. 트랜스 포머를 통한 turn on/off 사이의 시간 delay로 그림3과 같이 펄스폭을 가변 할 수 있도록 하였고, signal의 주파수를 바꾸어 그림4와 같이 펄스 반복률을 높일 수 있도록 설계 되었다.[6] 또한 펄스 파워 응용분야에서 빈번히 발생하는 arc에 대한 보호 성능도 우수함을 그림 5를 통하여 확인 할 수 있다. 이는 단락전류를 센싱하여 컨트롤 파트에서 제어 하지 않고, 드라이버 회로 내부의 보호기능으로 바로 IGBT를 turn off 시키기 때문에 빠른 응답 특성으로 IGBT 보호가 가능 하다.

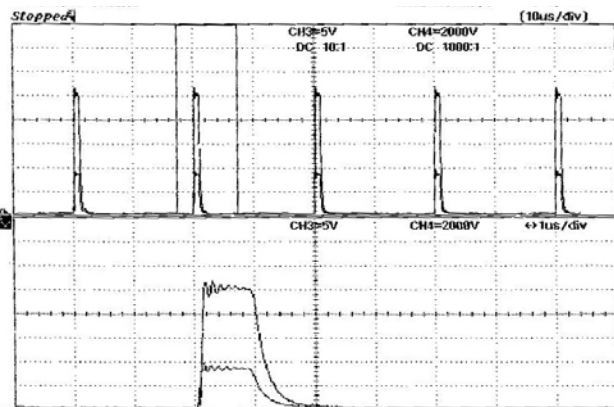


〈그림 6〉 제작된 전원장치 사진( Width\*Height\*Depth : 44cm\*15\*40 )

제작된 전원장치의 다양한 실험 결과가 그림 3~그림 5까지 제시되었으며, 그 외형을 그림 6에 나타내었다. 반도체스위치 방식으로 반영구적이며 펄스 폭, 반복률을 자유자재로 제어 할 수 있고 50kHz의 높은 최대 반복률로 동작할 수 있다.



〈그림 3〉 펄스 폭 가변 실험파형 출력 전압 및 전류 파형(1us-10us)  
(상단전압 : 2kV/div, 하단전류 : 5A/div)



〈그림 4〉 최대 반복률(50kHz) 실험 파형  
(상단전압 : 2kV/div, 하단전류 : 5A/div)

## 3. 결 론

본 논문에서는 최대 10kV, 50A, 50kHz 반복율로 동작 가능한 IGBT stack에 의한 펄스전원장치의 설계 및 제작에 대하여 다루었다. 제안된 방식은 총 12개의 IGBT와 커패시터로 구성되며, 각 커패시터가 830V로 충전되어 직렬연결구조 됨으로써 10kV의 출력전압을 펄스형태로 인가 할 수 있다. 커패시터를 충전하기 위해 phase shifted zero voltage switching 방식을 사용하여 효율을 높이고 구조를 간단화 하였고, 직렬 공진 회로를 추가로 사용하여 phase shifted converter topology에서 항상 문제가 되는 경부하 문제를 해결 하였다.

제안한 펄스전원장치는 IGBT와 커패시터의 추가에 따라 최대 전압을 높일 수 있는 구조이고 펄스폭 및 주파수 조절 가능하게 하였고, 실험을 통해 증명된 바와 같이 arc에 대한 보호 성능도 우수하기 때문에 다양한 요구분야의 펄스 전원장치로 사용될 수 있을 것으로 예상된다.

## [참 고 문 헌]

- [1] D. Deb, J. Siambis, R. Symons, and G. Genovese, "Beam Switch Tube Modulator Technology For Plasma Ion Implantation Broad Industrial Application", 9th IEEE International Pulse Power Conf., 1993, pp. 333-336.
- [2] D. M. Goebel, R. J. Adler, D. F. Beals, and W. A. Reass, "Handbook of Plasma Immersion Ion Implantation and Deposition", Andre Anders, New York: 2000, pp. 472-477.
- [3] G.H Rim et al., "Semiconductor switch based pulse power generator for Plasma source ion implantation", IEEE International Power Modulator Conference 2004
- [4] G.H Rim et al., "Solid state marx generator using series connected IGBTs", IEEE International Power Modulator Conference 2004
- [5] H.J Ryoo et al., "Development of 60kV Pulse Power Generator Based on IGBT stacks for wide application", IEEE International Power Modulator Conference 2006
- [6] H.J Ryoo et al., "Development of 10kV, 50A, 50kHz High Repetitive Pulsed Power Modulator Based on IGBT Stacks, IEEE International Power Modulator Conference 2008