

간단한 구조를 갖는 직렬 반도체 스위치 스택킹 기반 고전압 스위치 및 게이트 구동 회로 설계

박수미, 정우철, 류홍제
중앙대학교

Design of High Voltage Switch Based on Series Stacking of Semiconductor Switches and Gate Drive Circuit with Simple Configuration

Su-Mi Park, Woo-Cheol Jeong, Hong-Je Ryoo
Chung-Ang University

ABSTRACT

반도체 기반 고전압 펄스 발생장치에 적용 가능한 고전압 스위치는 주로 수 kV 정격의 반도체 스위치를 직렬로 스택킹하여 구성되며, 이때 각 스위치 소자에는 절연과 동기화된 각각의 게이트 신호가 인가되어야 한다. 본 논문에서는 짧은 펄스폭의 온, 오프 게이트 펄스와, 단일 턴의 고전압 전선을 일차측으로 갖는 게이트 변압기를 통해 직렬로 구성된 반도체 스위치 스택 기반의 펄스 모듈레이터에 적용 가능한 간단한 구조의 게이트 구동회로가 설계되었다. 각 스위치에 게이트 신호를 전달하기 위해 온, 오프 게이트 펄스를 사용함으로써 게이트 변압기의 포화를 방지할 수 있으며, 이때 각 스위치의 게이트 턴-온, 오프 전압은 변압기 이차측의 제너 다이오드와 스토리지 커패시터를 통해 유지된다. Pspice 시뮬레이션을 통해 12개의 IGBT를 직렬로 구성하여 설계된 구조의 게이트 회로를 적용, 최대 10kV 펄스 출력 조건에서 안정적인 동작을 확인하고 설계를 검증하였으며 1200V 급 IGBT를 사용하여 실제 스위치 스택과 게이트 구동회로 모듈을 1리터 이내의 부피로 고밀도화하여 제작하였다.

1. 서론

산업, 국방, 의료 등 다양한 분야에서 사용되는 고전압 펄스 발생 장치에는 펄스 방전을 위한 고전압 스위치가 사용되며, 그 중에서도 효율이 높고 수명에 제약이 없는 반도체 스위치 기반의 펄스 모듈레이터의 연구가 활발히 진행되고 있다.^[1] 그러나 수 kV 수준의 반도체 스위치의 정격 전압의 한계로 인해 수십~수백 kV 급의 고전압 구동을 위해서는 스위치 소자의 직렬 스택킹 구성이 필수적으로 요구되며, 직렬 스택킹 스위치의 동기 구동이 실패할 경우 스위치의 전압 불평형으로 인한 일부 스위치의 소손이 발생할 수 있으므로 각 스위치는 반드시 동시에 턴-온, 턴-오프 되어야 한다. 이 외에도 직렬 연결된 다수의 반도체 스위치를 구동하는 경우에는 고전압 절연 및 전압 발란싱 등이 고려되어야 한다. 일반적으로 직렬 스택킹 구조의 반도체 스위치의 동기 구동을 위해서는 별도의 광신호를 사용하여 절연된 신호를 인가하거나 다양한 능동 소자로 구성된 별도의 보조 회로를 사용한다. 이를 통해 신뢰성 있는 동기 구동이 가능할 수 있으나, 회로의 복잡성 및 높은 단가를 야기한다. 본 논문에서는 간단한 구조의 직렬 스택킹 및 게이트 구동

회로를 설계하여 저비용으로 최대 10kV 펄스 전압 출력이 가능한 소용량 펄스 방전 스위치를 구성하였으며, 이는 추후 스위치 등 소자의 개수를 증가시켜 직렬 스택킹 스위치의 전압 정격을 높이는 등 범용 고전압 스위치로 활용이 가능하다. 시뮬레이션을 통해 본 연구에서 설계된 IGBT 스택과 게이트 구동 회로의 동작을 검증하였으며, 본 논문에서 제안된 구조의 게이트 구동회로를 적용, 1 liter 이내의 고밀도 고전압 스위치 모듈을 제작하여 저가격, 고밀도의 소용량 고전압 스위치를 효율적으로 구현하였다.

2. 10kV 급 IGBT 스택 및 게이트 구동회로

2.1 직렬 IGBT 스택 및 게이트 구동회로 설계 및 시뮬레이션

설계된 IGBT 스택의 전체 구조도는 그림 1과 같다. Gate ON/OFF Pulse Generator는 짧은 펄스폭을 갖는 온/오프 펄스를 생성하여 게이트 변압기 일차측에 공급하며, 게이트 변압기

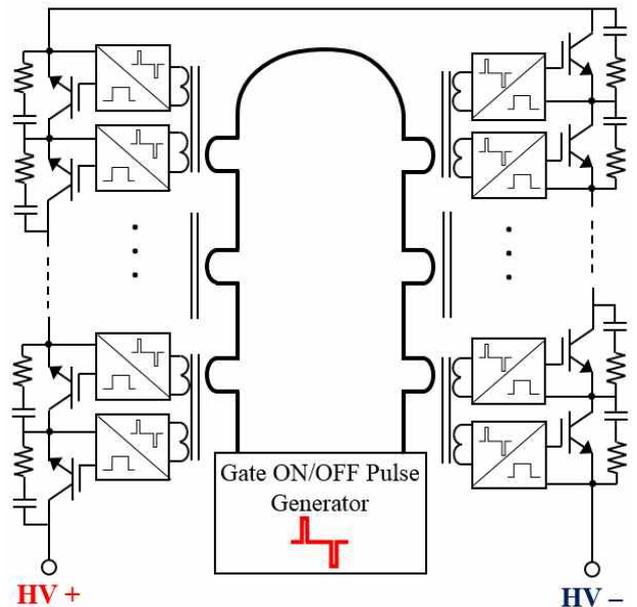


그림 1 제안하는 10kV 급 IGBT 스택 전체 구조도
Fig. 1 Overall block diagram of the proposed series stacked IGBT switches

이차측으로 전달된 온/오프 펄스는 간단한 게이트 구동 회로를 거쳐 각 IGBT에 적절한 게이트 신호 형태로 인가된다. 이때 게이트 변압기의 일차측 권선은 고전압 케이블을 단일 턴으로 다수의 변압기 코어를 관통하여 지나도록 감는 단순하고 효율적인 구조를 적용하여, 낮은 단가와 작은 부피로 각 게이트 신호의 절연 및 동기 구동이 가능한 직렬 스택킹 스위치의 구성이 가능하도록 설계되었다. 각 스위치 양단에는 전압 발란싱을 위한 RC 스너버 회로를 구성하였다.

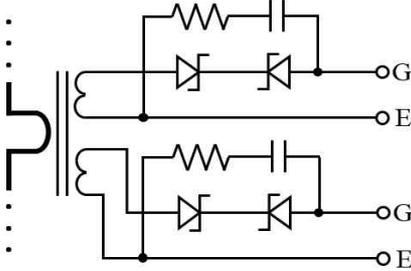


그림 2 설계된 게이트 구동 회로의 회로도
Fig. 2 Circuit diagram of the simple gate drive circuit

게이트 온/오프 펄스를 입력받아 각 스위치에 적절한 게이트 전압의 파형으로 변환하는 게이트 구동 회로의 자세한 회로도는 그림 2와 같다. 한 개의 스위치를 구동하기 위해 두 개의 제너 다이오드와 작은 커패시터와 저항이 하나씩 구성되어 있으며, 따라서 제안된 게이트 구동 회로는 일체의 능동 소자를 사용하지 않고 스위치 당 네 개의 수동 소자를 사용하여 저비용 고효율로 제작이 가능하다. 게이트 변압기를 통해 턴-온 펄스가 인가되면 스위치에 턴-온 신호가 인가됨과 동시에 게이트 구동 회로 상의 작은 커패시턴스 값을 갖는 스토리지 커패시터가 제너 다이오드의 역 바이어스 전압만큼 충전된다. 따라서 턴-온 펄스가 끝난 후에도 턴-오프 펄스가 인가되기 전까지 스토리지 커패시터에 저장된 전압이 스위치에 인가되어 턴-

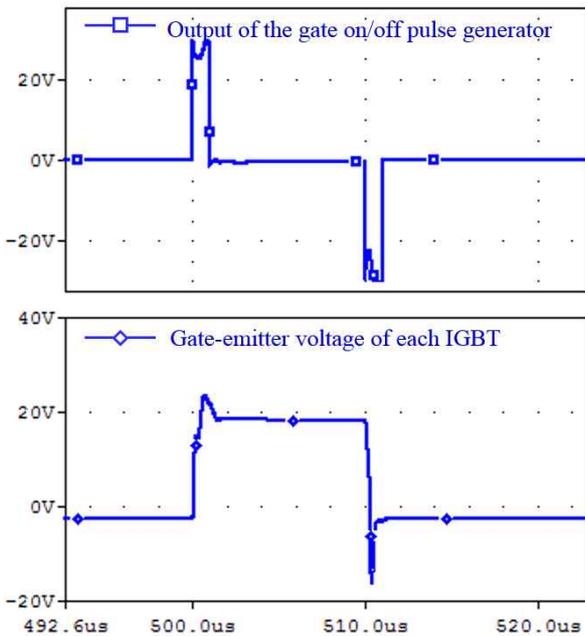


그림 3 설계된 게이트 구동 회로의 시뮬레이션 결과
Fig. 3 Simulated results of the designed gate drive circuit for IGBT stack

온 상태가 유지된다. 이후 턴-오프 펄스가 전달되면 스위치가 턴-오프됨과 동시에 스토리지 커패시터가 방전된다.

그림 3은 본 논문에서 설계된 게이트 구동 회로의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. Gate ON/OFF pulse generator는 +30V, -30V 크기의 온/오프 펄스를 발생시키며, 각 펄스의 펄스폭은 약 1 μ s로 게이트 변압기의 포화를 방지한다. 이때 온/오프 펄스의 주기와 간격을 조절하여 IGBT 스택의 출력 펄스의 펄스폭과 반복율을 가변 가능하다. 아래의 파형은 각 IGBT 스위치의 게이트 전압으로, 온/오프 펄스 형태의 전압이 게이트 구동 회로의 스토리지 커패시터와 제너 다이오드를 통해 각 스위치에 알맞은 턴-온/오프 전압의 형태로 인가됨을 확인할 수 있다. 또한 12개 IGBT를 직렬 구성하여 제안된 구조의 게이트 구동 회로와 RC 스너버를 적용, 10kV 100A 펄스 방전 상황을 모의한 결과는 그림 4와 같다. 시뮬레이션에 사용된 IGBT는 실제 실험에서 사용된 모델과 동일하게 모델링하여 구현하였다. 그림 4의 결과는 출력 펄스폭 10 μ s, 반복율 100Hz (주기 10ms), 100 Ω 저항 부하 조건에서의 시뮬레이션 결과이다.

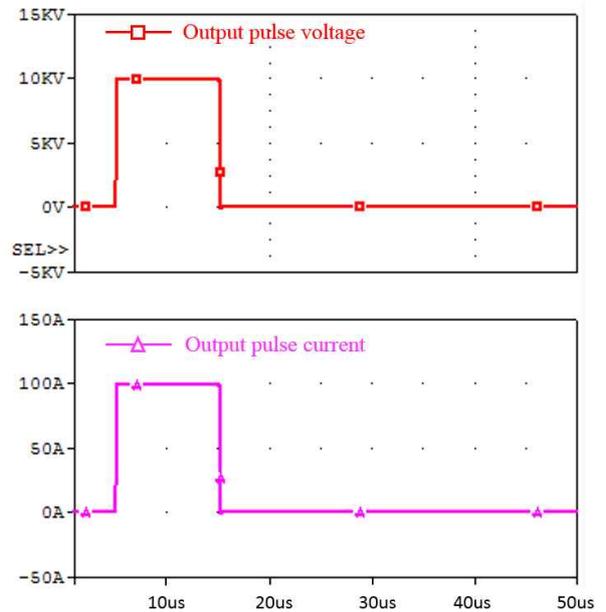


그림 4 제안하는 구조와 게이트 구동 회로를 적용한 IGBT 스택 기반 고전압 스위치의 펄스 방전 시뮬레이션 결과
Fig. 4 Simulated results for the pulse output of the designed IGBT stack-based high voltage switch with the proposed configuration and gate drive circuit

2.2 10kV 급 IGBT 스택 및 게이트 구동 회로 제작

2.1 절의 설계 및 시뮬레이션 결과를 바탕으로 12개의 1200V 급 IGBT를 직렬 스택킹 구성하여 게이트 구동 회로와 함께 제작하였다.

제작된 IGBT 스택은 그림 5와 같으며, 제작에 사용된 주요 소자 및 부품들의 사양은 표 1을 통해 정리하였다. 그림 5의 사진을 통해 확인할 수 있듯, 제작된 고전압 스위치의 하층은 단일 전원을 사용하여 게이트 온/오프 펄스를 생성하는 on/off pulse generator로, 상층은 12개의 IGBT가 직렬 연결된 IGBT 스택과 이를 동기 구동하기 위한 게이트 변압기, 구동 회로 및 전압 발란싱을 위한 RC 스너버 회로로 구성되어 있다. 본 논문에서 제안된 단순한 구조의 설계를 반영함으로써, 복잡한 구조의 보조 회로를 사용하지 않고도 직렬 스택킹 스위치를 높은

신뢰성으로 구동 가능한 저가격 고밀도의 게이트 구동 회로를 구현하였으며 상층과 하층을 포함하여 10kV급 소용량 고전압 스위치 모듈을 1리터 (10cmX10cmX10cm) 이내의 부피로 제작 가능함을 확인하였다.

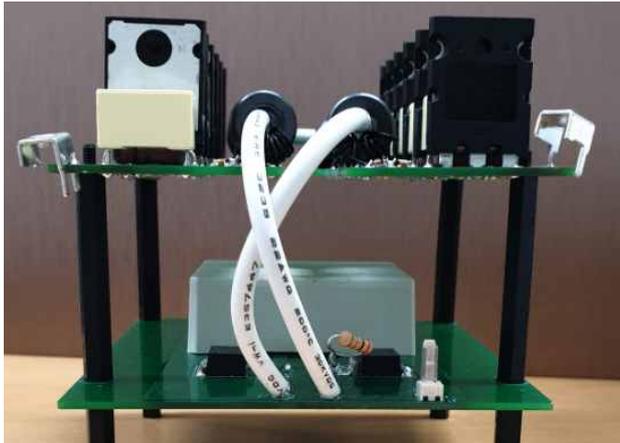


그림 5 제작된 IGBT 스택 기반의 고전압 스위치
Fig. 5 Developed IGBT stack-based high voltage switch

표 1 제작된 IGBT 스택 기반 고전압 스위치의 각부 사양
Table 1 Specifications of each component of the developed high voltage switch based on IGBT stack

Main IGBT for series stacking	FGL40N120AND (1200V/40A)
Snubber resistor	5Ω
Snubber capacitor	1nF
Gate transformer	Core: T14*5*7
	Primary: one-turn (20kV high voltage cable)
	Secondary: 5-turn

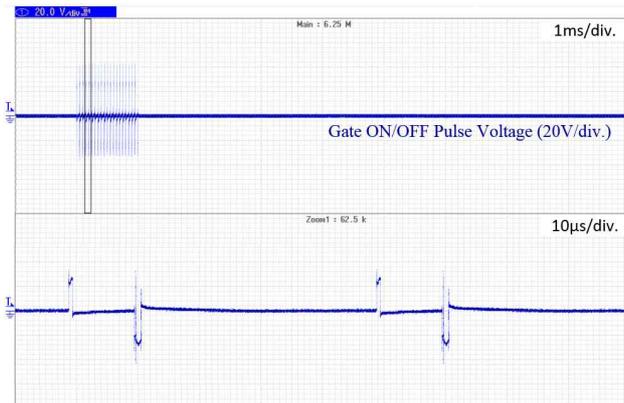


그림 6 제작된 IGBT 스택 기반 고전압 스위치의 게이트 온/오프 펄스 전압 파형 (20V/div., time: 1ms/div. for main, 10μs/div. for zoom)

Fig. 6 Experimental voltage waveform of gate ON/OFF pulses of the developed IGBT stack-based high voltage switch (20V/div.)

그림 6은 제작된 고전압 스위치 모듈의 게이트 온/오프 펄스 전압 파형을 보여준다. 그림 6의 실험 파형은 시뮬레이션과 동일한 조건에서 측정되었으며, 각각의 턴-온/오프 펄스는 약

1μs의 펄스폭을 가지며, 출력 펄스폭은 10μs 조건에서의 파형이다. 제작된 고전압 스위치 모듈은 게이트 온/오프 펄스와 게이트 전압에 대한 테스트가 성공적으로 진행되었으며, 추후 최대 10kV 급의 고전압 커패시터 충전기 등을 사용하여 고전압 펄스 방전 테스트 등을 통한 동작 검증이 요구된다.

3. 결론

본 논문에서는 다양한 소용량 펄스 파워 응용 분야에 적용 가능한 직렬 스택킹 구조의 반도체 스위치 기반 고전압 스위치와 이를 신뢰성있게 동기 구동할 수 있는 간단한 구조의 저가격, 고밀도 고전압 스위치 모듈을 설계하고 제작하였다. 본 연구에서는 다수의 반도체 스위치의 직렬 스택킹 모듈을 동기 구동하기 위해 단일 턴의 고전압 케이블을 일차측으로 갖는 게이트 변압기를 사용하고, 이차측에는 별도의 광신호 또는 능동 소자를 사용하지 않고 각 스위치에 네 개의 수동 소자만을 사용하는 간단한 회로의 게이트 구동 회로를 설계하였다. 이러한 단순한 구조를 갖는 IGBT 스택과 게이트 구동 회로를 설계함으로써 회로의 복잡성과 단가를 낮추었음에도 불구하고, 다수의 직렬 스택킹 기반의 반도체 스위치에 절연 및 동기화된 게이트 전압을 안정적으로 인가할 수 있다. 또한 실제로 제작된 IGBT 스택 기반의 10kV 급 고전압 스위치 모듈은 전체적으로 1리터 이내의 부피로 제작되어 컴팩트한 제작이 가능함을 확인하였다. 제작된 고전압 스위치 모듈을 사용하여 최대 10kV, 100A 급 펄스 방전 시험에 적용하고 스위치의 개수를 증가시켜 보다 고전압 범용 스위치로써 사용하는 것이 추후 연구 목표로 고려된다.

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

참고 문헌

- [1] Dongdong Wang et al., "All-solid-state repetitive pulsed-power generator using IGBT and magnetic compression switches," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 38, no. 10, pp. 2633 - 2638, Oct. 2010.
- [2] J. H. Kim et al., "IGBT Stacks based pulse power generator for PIII&D," *2005 IEEE Pulsed Power Conference*, DOI 10.1109/PPC.2005.300503, Feb. 2007.
- [3] J. W. Back et al., "High-voltage switch using series-connected IGBTs with simple auxiliary circuit," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 37, no. 6, pp. 1832-1839, Sep. 2001.