

빠른 상승률을 갖는 펄스 방전 스위치의 과도 구간 안정성 개선을 위한 게이트 구동 시스템

이윤석 정우철 이주영 류홍제
 중앙대학교

Gate driving system for improving the transient of pulsed discharge switches with fast-rising rate

Yoon-Seok Lee, Woo-Cheol Jeong, Joo-Young Lee, Hong-Je Ryoo
 Chung-Ang University

ABSTRACT

다양한 응용 분야에서는 짧은 펄스폭과 빠른 상승률을 갖는 고전압 펄스가 요구되며, 이를 위한 반도체 기반 고전압 펄스 출력 전원 장치용 구동 회로의 설계 시 고전압 펄스의 빠른 전압 변동에 기인하여 발생하는 반도체 스위치나 제어 회로의 오동작에 대한 고려가 필요하다. 본 논문에서는 펄스 출력 스위칭 과도 구간에서의 빠른 전압 변동 조건에서 반도체 스위치를 안정적으로 구동할 수 있는 게이트 드라이버 시스템을 제안한다. 제안하는 시스템은 스위칭 시 발생하는 노이즈로부터 제어 회로를 보호하기 위해 게이트 구동 루프와 변압기를 통해 구동 신호뿐만 아니라 절연된 전원을 공급하는 방식과 스위치의 턴 오프 시 발생하는 양단 전압의 높은 dv/dt로 인한 Self turn-on 문제를 개선하기 위한 방식이 적용되었다. 설계된 시스템은 PSpice 시뮬레이션 결과를 통한 기존 고전압 펄스 전원 구동 게이트 시스템과의 비교 분석을 수행, 신뢰성 있는 동작과 효율성이 검증되었다.

1. 서론

매우 짧은 시간 동안 고전압을 생성하는 고전압 펄스 발생 장치는 산업, 국방, 환경, 의료 등 다양한 분야에서 사용된다. 고전압 펄스 방전을 위한 고전압 스위치가 펄스 전원 장치에 사용되며, 그 중에서 펄스 출력 전압 및 폭의 제어가 용이하고 높은 효율과 반영구적인 수명 등의 장점을 가진 반도체 스위치 기반의 펄스 모듈레이터의 연구가 활발히 진행되고 있다.^[1] 하지만, 수십 kV에서 수백 kV에 이르는 고전압을 출력하는 전원 설계 시, 반도체 스위치의 정격 전압 한계로 인하여 스위치 소자의 직렬 스테킹 구조가 요구된다. 모든 스위치 소자들의 동기화된 스위칭과 스위치 양단 전압의 밸런스는 직렬 스테킹 구조 활용시 고려해야할 사항이며, 이를 위한 게이트 구동 회로 시스템은 스위치별 절연된 구동 전원과 동기화된 구동 신호를 공급해야한다. 또한 펄스 방전 후 스위치 양단 전압이 빠르게 충전되면서 고주파수의 성분이 증가하게 된다, 고주파수에 대해서 게이트의 임피던스가 구동회로의 임피던스보다 작아지는 문제가 발생한다. 이로 인해 스위치의 Miller capacitor를 통해 게이트 전하가 충전되고, 일부 스위치가 턴 온되면서 스위치의 전압 언밸런스로 인한 소자 손상의 문제가 발생한다.

본 논문에서는 이러한 문제들을 개선하기 위해 반도체 스위치 직렬 스테킹 구조의 스위칭 과도 구간에서의 빠른 스위칭

조건에서도 안정적으로 작동할 수 있는 새로운 게이트 구동 시스템을 제안한다.

설계된 시스템은 시뮬레이션을 통해 동작 모드별 분석이 수행되었다. 마지막으로 기존 고전압 펄스 전원 구동 게이트 시스템^[3]과의 비교 분석을 통하여 제안하는 게이트 구동 시스템의 신뢰성과 효율성을 검증하였다.

2. 게이트 구동 시스템 설계 및 동작 모드 분석

2.1 게이트 구동 시스템 설계

제안된 게이트 구동 시스템은 스위칭 과도 구간에서 빠른 전압 변동이 일어나는 조건에서도 반도체 스위치를 안정적으로 동작시킬 수 있도록 설계되었으며, 이 시스템의 전체 구조도와 게이트 구동 회로는 각각 그림 1과 그림 2와 같다. 각 방전 스위치당 하나의 게이트 구동 회로가 연결되고, 각 게이트 구동 회로는 변압기의 2차측과 연결되어 있다. 변압기 1차측은 단일 턴의 게이트 구동 루프로, 스위치 ON/OFF 신호 및 전원을 게이트 구동 회로로 전달한다. 변압기를 통해 공급된 (+) 성분의 ON pulse, (-) 성분의 OFF pulse으로 구성된 짧은 양극성 펄스에 의한 Cgate 전압이 충전되거나 방전되면서 스위치의 게이트 전압을 달리 인가하게 된다.

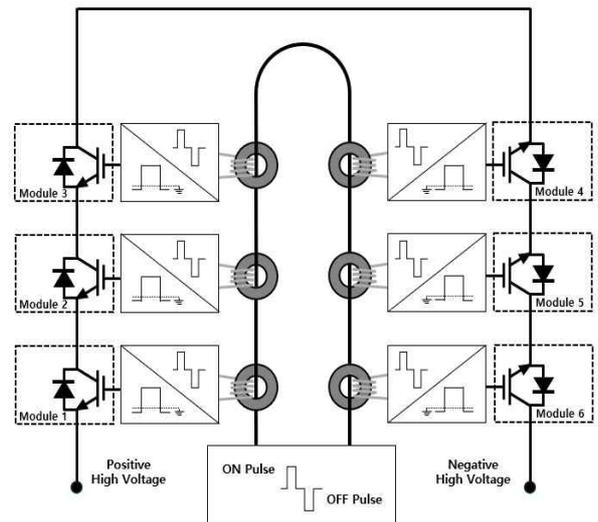


그림 1 제안하는 게이트 구동 시스템 전체 구조도
 Fig. 1 Overall block diagram of the proposed gate driver system

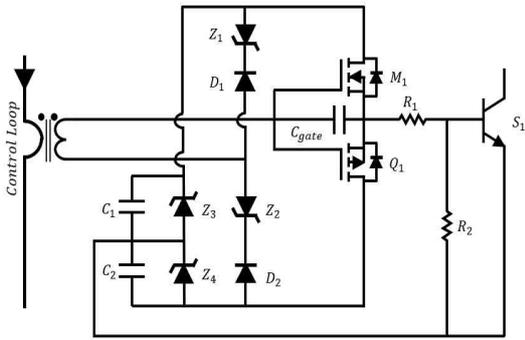


그림 2 설계된 게이트 구동 회로의 회로도
Fig. 2 Circuit diagram of the designed gate driver circuit

이러한 설계 방식은 기존 고전압 절연과 펄스 출력 시 발생하는 노이즈의 영향을 고려하여 컴팩트하게 설계된 방식을 유지하면서, 스위치 양단 전압의 높은 고주파수 성분에 의한 스위치 오동작을 개선하여 빠른 전압 상승률을 갖는 스위칭 과도 구간 조건에서도 안정적인 스위치 구동이 가능하다.

2.2 제안하는 게이트 구동 회로 동작 모드 분석

제안하는 게이트 구동 회로는 그림 3과 같이 6개의 동작 모드로 구분되며, 각 동작 원리 및 특징은 아래와 같이 기술한다.

MODE 1 : 모드 1은 Cgate의 음전압을 방전시키는 모드이다. Q1이 Cgate의 전압을 통해서 턴온 되어 있으므로, 변압기를 통해서 인가된 온 펄스가 Z2 제너다이오드와 D2 다이오드를 통해서 Cgate의 음전압을 방전시킨다.

MODE 2 : 모드 2는 Cgate의 전압이 모두 방전된 후, Q1이 턴 오프되면서 시작한다. 메인 방전 스위치 S1을 턴온 시키면서 Cgate의 전압은 M1의 역병렬 다이오드와 Z3, Z4, Z2, D2를 통해서 충전된다. Cgate의 충전되는 전압은 각각 Z3과 Z4의 제너다이오드로 제한된다.

MODE 3 : 모드 3은 제어 루프로부터 인가되는 전압 없이 모든 캐패시터의 전압이 충전되면서 시작된다. Cgate의 전압에 의해서 M1이 턴온되어 있으므로 C1의 전압으로 S1의 게이트 전압을 유지하는 구간이다.

MODE 4 : 모드 4는 Cgate의 양전압을 방전시키는 구간이다. Cgate 전압이 모두 방전되지 않아 M1은 턴온 되어 있으며 제어 루프로부터 인가된 오프 펄스가 Z1, D1, M1를 통해서 Cgate의 양전압을 방전시킨다.

MODE 5 : 모드 5는 S1이 턴 오프되는 구간이며, Cgate의 양전압이 모두 방전되고, S1의 게이트 전압에 음전압을 인가하는 모드이다. 제어 루프 변압기의 오프 펄스를 통해서 Cgate의 전압이 음전압으로 충전되면서 Q1이 턴온된다. 이를 통해서 S1은 턴 오프되고, 게이트 전압은 음전압이 인가된다.

MODE 6 : 모드 6은 Cgate 전압에 의해서 Q1이 턴온이 유지되면서 C2의 전압으로 S1의 게이트 전압을 음전압으로 유지하는 구간이다.

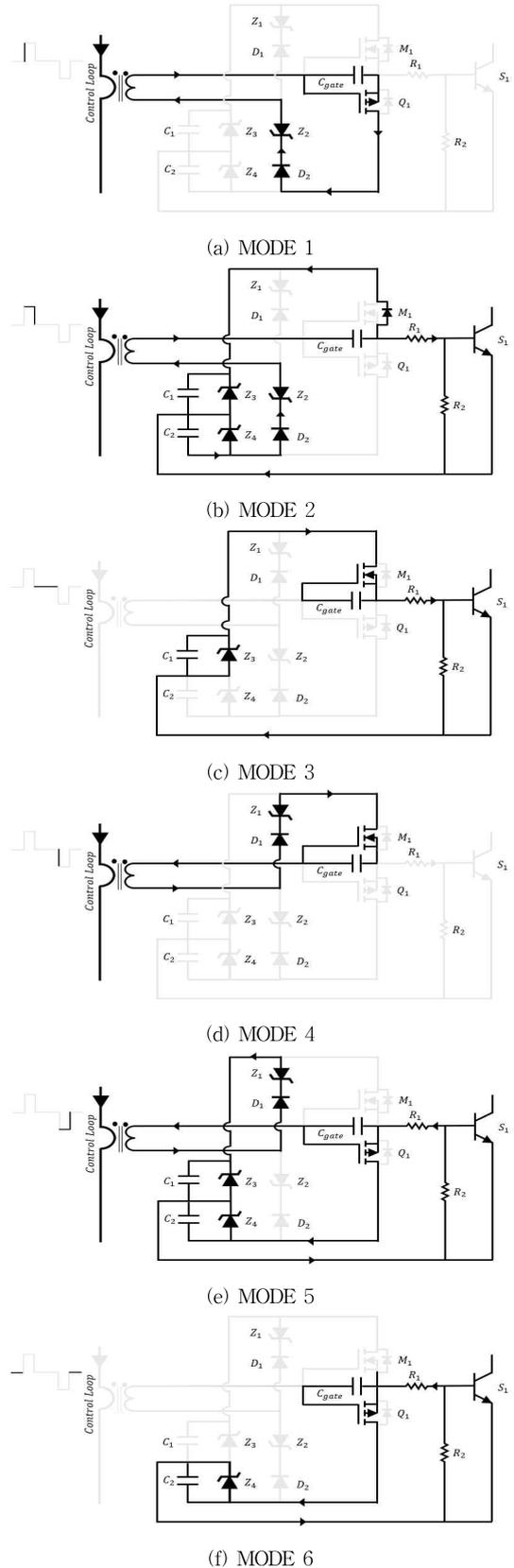


그림 3 게이트 구동 시스템 동작 모드 분석
Fig 3 Operating mode of the gate driving system

3. 결 론

본 논문은 펄스 출력 스위칭 과도 구간에서의 빠른 전압 변동 조건에서 반도체 스위치를 안정적으로 구동할 수 있는 게이트 드라이버 시스템을 설계하였다. 제안된 시스템은 직렬 스테킹한 스위치들의 동기화된 신호와 절연된 전원을 공급하기 위해서 단일 턴의 게이트 구동 루프와 변압기가 사용되었으며, 턴 오프 시 게이트의 전압을 음전압으로 유지하는 새로운 게이트 구동회로가 적용되었다. 게이트 구동 루프와 변압기를 활용한 게이트 구동 방식은 고압과 저압회로의 효과적인 전기적 절연을 통하여 펄스 방전시 발생하는 노이즈의 영향을 저감하여 제어회로를 보호하며, 짧은 ON/OFF 신호를 공급하는 구조로 소형 변압기를 사용하면서 컴팩트한 구성이 가능하다. 설계한 게이트 구동 회로는 시뮬레이션을 통한 기존 게이트 구동 시스템과의 비교 분석을 통하여 스위칭 과도 구간에서의 빠른 전압 변동 조건에서 안정적인 스위칭 동작의 신뢰성 및 효율성을 검증하였다. 설계한 게이트 구동 시스템은 추후 제작 및 실험을 통해 추가적인 검증을 할 예정이며, 10kV 이상의 펄스 발생에 대한 펄스 전원으로 확장 설계할 계획이다.

이 논문은 2024년 정부 (과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원에 의하여 연구되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] G. N. Appiah, S. R. Jang, J. S. Bae, C. G. Cho, S. H. Song and H. J. Ryoo, "Compact design of high voltage switch for pulsed power applications," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 24, no. 4, pp. 2006-2013, 2017, doi: 10.1109/TDEI.2017.006272.
- [2] Ryoo, H. J., Kim, J. S., Rim, G. H., and Goussev, G., "Current Loop Gate Driver Circuit for Pulsed Power Supply based on Semiconductor Switches," in 2007 IEEE 34th International Conference on Plasma Science(ICOPS), vol. 34, pp. 943, 2017.
- [3] S.-B. Ok, H.-J. Ryoo, S.-R. Jang, S.-H. Ahn, and G. Goussev, "Design of a high-efficiency 40-kV 150-A 3-kHz solid-state pulsed power modulator," IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 40, no. 10, pp. 2569-2577, Oct. 2012.

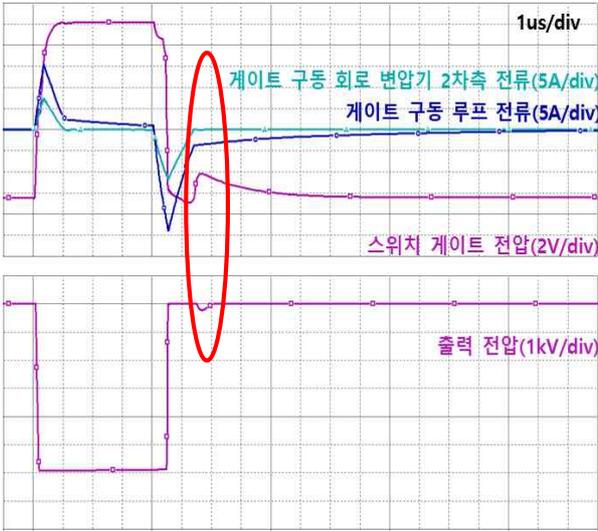


그림 4 기존 게이트 구동 시스템 시뮬레이션 결과
Fig 4 Simulation result of the previous gate driving system

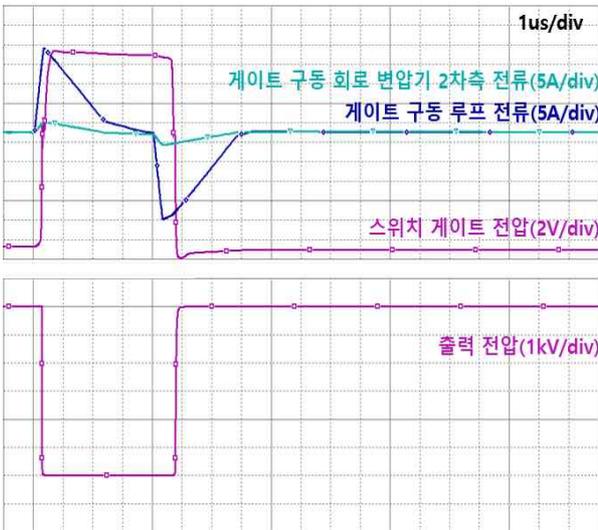


그림 5 제안하는 게이트 구동 시스템 시뮬레이션 결과
Fig 5 Simulation result of the proposed gate driving system

2.3 시뮬레이션 결과 및 분석

본 논문에서 제안한 게이트 구동 시스템의 동작 및 실효성 검증을 위해 PSpice 시뮬레이션이 수행되었으며, 시뮬레이션 결과는 그림 4와 그림 5와 같다. 이 시뮬레이션 결과를 통한 제안된 게이트 구동 시스템과 기존 고전압 펄스 전원 구동 게이트 시스템 비교 분석에 대해 후술한다.

그림 4는 기존 고전압 펄스 전원 구동용 게이트 드라이버의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. OFF 펄스가 종료 후, 게이트 전압을 유지하는 구간이 존재하지 않기 때문에 게이트 전압이 상승하는 문제가 발생한다. 이로 인해 스위치가 오동작을 그림 4에서 확인할 수 있다. 반면, 본 논문에서 제안한 게이트 구동 시스템은 그림 5와 같이 OFF 펄스 종료 후 스위치의 게이트 전압을 음전압으로 유지하면서 개선된 스위치 동작을 확인할 수 있다.