

빠른 상승률을 갖는 단일 IGBT 스위치 기반 고전압 펄스 파워 모듈레이터

유창어, 조찬기, 송승호, 류홍제
 중앙대학교

High-Voltage Pulsed Power Modulator based on single IGBT switch with Fast-Rising Time

Chang-yu Liu, Chan-Gi Cho, Seung-Ho Song, Hong-Je Ryoo
 Chung-Ang University

ABSTRACT

본 논문은 Discontinuous Conduction Mode (DCM) 플라이백 컨버터로 생성한 고전압 펄스를 스파크 갭으로 펄스 상승 시간을 줄이는 방법에 관하여 다룬다. 이러한 방법으로 생성된 빠른 상승률 특성을 가지는 고전압 펄스 전원장치는 친환경 가스 처리 분야에 사용할 수 있다. 기존 스테킹 구조의 펄스 전원 장치는 많은 수의 스위치들과 에너지 저장 소자가 필요하므로 부피가 커지고 제조 단가가 증가하는 반면, 본 논문에 제안된 전원 장치는 구조를 단순화하여 전체 시스템의 소형화 및 제조 단가를 낮춘 점을 특징으로 한다.

제안된 설계 토폴로지는 플라이백 변압기 2차 측에 다이오드의 사용 유무에 따라 두 개의 변형된 회로로 응용 가능하다. 변압기 2차측에 다이오드를 사용하면, 음의 성분 없이 깨끗한 고전압 출력 펄스를 만들 수 있지만 사용한 다이오드의 전압 정격을 고려해야 한다. 다이오드를 사용하지 않는다면, 고전압 출력 펄스에 음의 성분이 발생하지만 비용과 부피를 최대한 줄일 수 있다. PSIM 시뮬레이션을 사용하여 제안하는 전원 장치의 23kV, 0.5 μs, 10 ns rising time의 출력 펄스 발생 성능을 검증하고, 다이오드 사용에 따른 출력 펄스의 차이점을 비교하였다.

1. 서론

펄스 파워 기술은 현대 국방, 산업 및 의료 분야에서 널리 사용된다^[1]. 친환경 응용 분야의 경우, 고전압 펄스는 유해 화학 물질을 무해 물질로 변환하는 기능이 있어 폐기 및 폐수를 처리 할 수 있으며, 이는 전통 화학 처리 방식 보다 더 효율적이고 부피도 작으며 비용도 저렴하다.^[2]

배기 처리를 위해 인가하는 고전압 펄스는 빠른 펄스 상승률, 최소 펄스 폭, 그리고 높은 반복률을 달성해야한다. 기존의 스테킹 펄스 전원 장치는 이러한 조건을 잘 만족할 수 있으나 스테킹 구조로 인하여 많은 수의 스위치와 에너지 저장 요소가 필요하므로 비용이 많이 들고 부피도 커진다^[3].

본 논문에서는 스파크 갭과 플라이 백 컨버터 회로를 결합한 방식을 제안하며, 단일 Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT)와 변압기로 출력 펄스 전압의 빠른 상승률을 특징으로 한다.

논문은 2장에서 DCM 플라이백 컨버터의 동작 원리를 분석하였고, 3장에서 구성 요소의 선택을 정리하며, 마지막으로 4장에서 시뮬레이션을 통해 제안된 장치의 성능을 검증했다.

2. 제안된 펄스 파워 모듈레이터 동작 원리 분석

장치의 동작 모드는 그림 1 과 같이 표현할 수 있고, 동작 파형은 그림 2와 같다.

모드 0은 메인 스위치 턴 온 직전의 구간으로, 모든 에너지가 다 방전된 상태를 보여준다.

메인 스위치가 켜지면 모드 1이 시작된다. 스위치가 켜질 때 변압기의 자화 인덕턴스 (L_m)가 충전되어 에너지를 저장하고, 플라이백 컨버터의 변압기를 통해서 플라이백의 2차측에도 작은 전류가 흐른다. 메인 스위치의 턴오프까지 모드1 구간이 유지된다.

모드 2에서, 자화 인덕턴스 (L_m)에 저장된 에너지는 메인 스위치가 꺼지며 변압기 2 차측으로 방출되기 시작한다. 변압기 2 차측 전류는 병렬 커패시터 (C_p)를 충전한다. 병렬 커패시터 (C_p)와 트랜스포머 2차 인덕턴스 (L_{sec}) 사이의 공진으로 인해 고전압 펄스가 생성되고, 병렬 커패시터 (C_p)에 저장된 에너지와 동일한 스파크 갭 1 차측 펄스 에너지는 다음과 같이 표현 될 수 있다.

$$E_{primary} = \frac{1}{2} \times C_p \times V_{primary-peak}^2 \quad (1)$$

따라서,

$$V_{primary-peak} = \sqrt{\frac{2 \times E_{primary}}{C_p}} \quad (2)$$

다음 모드는 펄스 전압이 스파크 갭 동작의 임계점에 도달 할 때 시작된다.

모드 3에서, 스파크 갭 사이의 공기는 순간적으로

브레이크 다운이 되어서 스파크 갭이 단락으로 볼 수 있습니다. 스파크 갭을 통해서 펄스 상승 시간을 줄일 수 있다.

자화 인덕턴스 (L_m)가 완전히 방전되면 모드 4가 시작된다. C_p 와 부하 (C_{load})에 저장된 에너지는 병렬 저항 (R_p)을 통해 방전된다. 방전 시간은 C_p , C_{load} 및 R_p 의 값에 의해 결정된다. 만약 C_p 에 저장된 에너지가 충분히 방전되지 못하면, 잔여 에너지는 변압기 1차측의 자화 인덕턴스 (L_m)와 C_p 사이에서 발생하는 공진에 의해 소진된다. 다음 스위치 온 신호 전에 모든 에너지 저장 요소가 완전히 방전되어 모드 0으로 돌아간다.

3. 제안된 펄스 파워 모듈레이터 설계

그림3와 같이, 전체 시스템은 3 개의 부분, 즉 입력 부분, DCM 플라이백 컨버터 부분 및 출력 부분으로 나눌 수 있다. 또한 상용 110V 교류 입력으로 23kV 펄스 출력을 구현하는 것이 설계 목표이다.

110V의 상용 전압을 DC 입력으로 플라이 백 컨버터에 공급하기 위해 정류기 및 입력 필터 커패시터가 입력 측에 사용되었다.

DCM 플라이백 컨버터 부분에 사용될 메인 스위치는 1200V/600A 정격의 인피니온 FZ600R12KE4 IGBT이다. (2)에서 언급 한 것처럼 스파크 갭 1 차측의 펄스 피크 전압은 변압기 턴수비와 무관하고 DCM 플라이 백 컨버터의 변압기 턴수비는 다음과 같이 계산 할 수 있다.

$$N = \frac{V_{primary-peak}}{V_{CES} - V_{in}} = \frac{23kV}{1200V - 156V} \approx 22 \quad (3)$$

여기서 V_{CES} 는 IGBT 항복 전압, $V_{primary-peak}$ 는 스파크 갭 1 차측 피크 전압이며 V_{in} 는 정류 및 필터링 후 입력 전압이다.

또한, 병렬 커패시터 (C_p)는 출력 펄스 에너지를 결정하며 값은 다음과 같이 계산 된다.

$$C_p = \frac{2 \times E_{primary}}{V_{primary-peak}^2} \quad (4)$$

여기서 $E_{primary}$ 는 스파크 갭 1 차측 펄스 에너지이다. $E_{primary}$ 값을 0.3J로 설정하면 C_p 값이 1.13nF 로 계산된다.

변압기 2 차측 다이오드 사용은 선택 사항이다. 그림3과 같이 다이오드를 사용하지 않으면 병렬 커패시터 (C_p)와 부하 (C_{load})의 방전 루프로 인해 출력 펄스에 음의 성분이 있다. 반면, 다이오드를 사용하면 출력 펄스가 더 깔끔하고 음의 성분이 거의 없어진다. 그러나 다이오드 양단에 고전압이 걸리기 때문에 직렬로 구성된 많은 다이오드들이 필요하므로 비용과 부피가 증가된다. 따라서 요구되는 출력 요건에 따라 다이오드를 사용하는 토폴로지나 다이오드를 사용하지 않는 토폴로지를 선택할 수 있다. 출력 부분에 간단한 스파크 갭으로 구현된다. 스파크 갭 간에 공기가 고전압으로 브레이크 다운이 되면 스파크 갭의 2차측에서 빠른 상승 속도를 가지는 펄스를 얻을 수 있다.

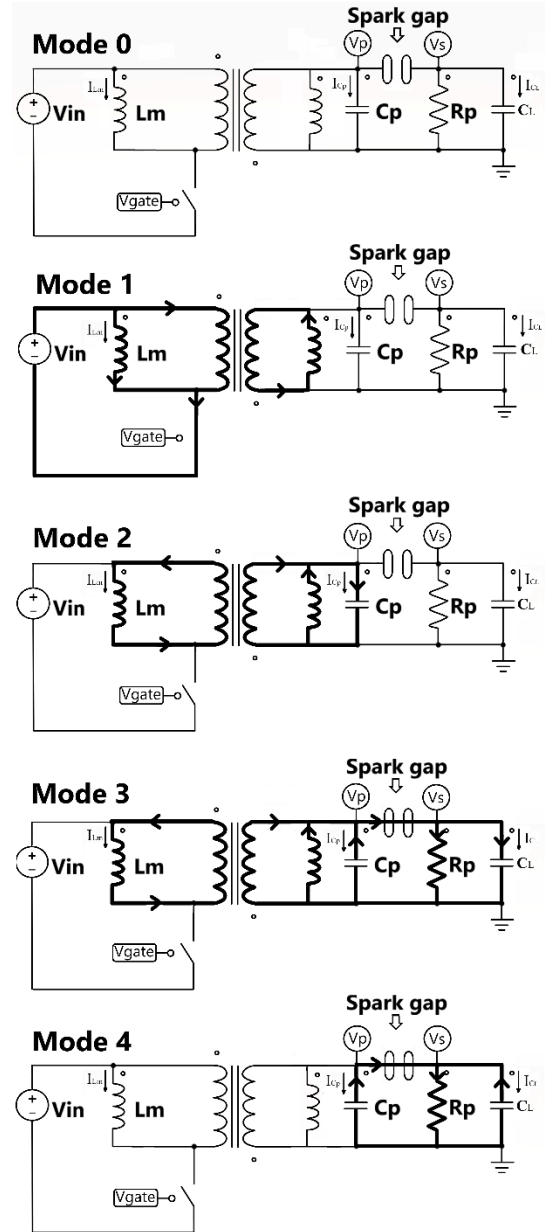


그림1. 제안된 펄스 파워 모듈레이터 동작 모드

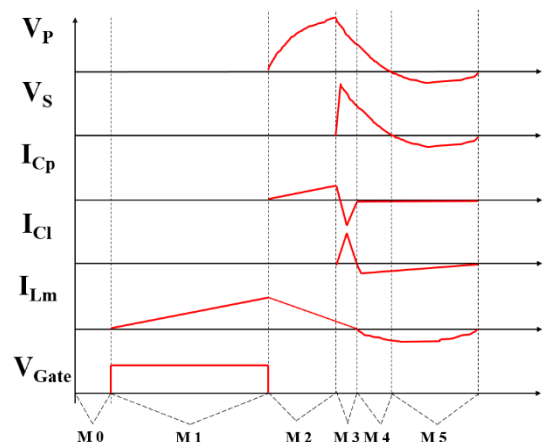


그림2. 제안된 펄스 파워 모듈레이터 동작 파형

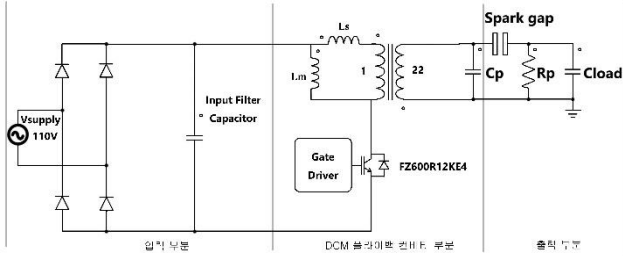


그림3. 제안된 펄스 파워 모듈레이터 총 회로도

병렬 커패시터 (C_p) 및 부하 (C_{load})를 방전하기 위해 병렬 저항 (R_p)이 사용된다. C_p 의 방전 방정식은 다음과 같다.

$$V_{Cp} = E_{pulse} \times e^{-\frac{t}{R_p C_p}} \quad (5)$$

(5)식에서, $2 \cdot RC$ 시간 후 병렬 커패시터 (C_p)의 잔류 전압이 0.135배 펄스 에너지만 남기는 것을 계산 할 수 있다. 따라서 $2 \cdot RC$ 시간 후에 방전이 완료되었다고 가정 할 수 있으며, 스파크 갭 1차측 펄스 폭을 1 μ s로 설정하면 다음 식과 같이

$$R_p = \frac{1\mu s}{2C_p} = 885\Omega \quad (6)$$

R_p 의 값을 계산할 수 있다.

4. 시뮬레이션 결과

제안된 펄스 파워 모듈레이터의 시뮬레이션은 PSIM을 사용하여 구현된다. 스파크 갭 1차측 전압 (V_p) 및 스파크 갭 2차측 전압 (V_s)의 전압 파형의 시뮬레이션 결과는 다이오드 유무에 따라 그림 4(a)와 4(b)에 나와 있다. 23kV의 출력 펄스가 얻어지고 빠른 펄스 상승 시간은 그림 4(c)와 같이 확인된다.

5. 결론

본 논문은 DCM 플라이백 컨버터를 기반으로 하는 새로운 유형의 펄스 파워 모듈레이터를 제시한다. DCM 플라이백 컨버터 변압기 2차측에 병렬 커패시터를 추가하고, 병렬 커패시터가 변압기의 자화 인덕턴스와 공진하여 고전압 펄스가 스파크 갭에 인가된다. 그 결과 23kV, 상승 시간 10ns인 펄스를 생성할 수 있으며 시뮬레이션으로 성능을 검증하였다. 제안된 펄스 파워 모듈레이터는 하나의 IGBT만 사용하므로 소형 및 저비용의 목표를 달성할 수 있다.

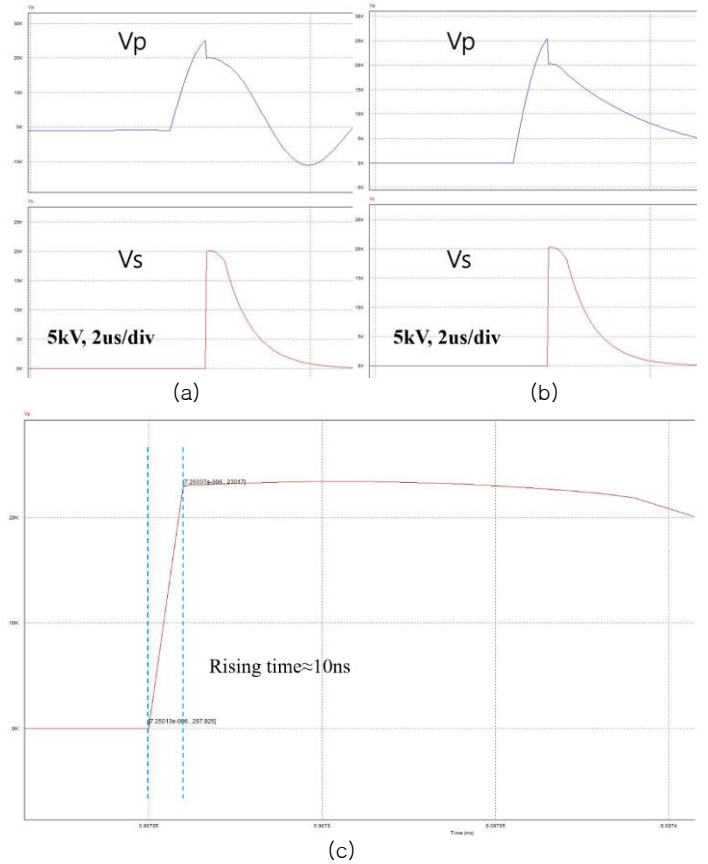


그림4. 제안된 펄스 파워 시뮬레이션 파형: (a) 다이오드 사용 시; (b) 다이오드 안 상용 시; (c) 펄스 상승 시간

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

참고 문헌

- [1] H. Akiyama, T. Sakugawa, T. Namihira, K. Takaki, Y. Minamitani, and N. Shimomura, "Industrial applications of pulsed power technology," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 14, no. 5, pp. 1051–1064, Oct. 2007
- [2] H. Jin, S. Song, C. Cho, S. Park and H. Ryoo, "Study of Exhaust Air Treatment From a Ship Building Factory Painting Facility Using Pulse Plasma Technology", IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 46, no. 10, pp. 3552–3556, 2018.
- [3] S. Song, C. Cho, S. Park, H. Park and H. Ryoo, "Design and Implementation of Novel Series Trigger Circuit for Xenon Flash Lamp Driver", IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 46, no. 10, pp. 3584–3590, 2018.