

파워셀 구조 기반의 10kV 양극성 펄스 모듈레이터

송승호, 이승희, 류홍제
 중앙대학교

10-kV Bipolar Pulsed Power Modulator Based on Power Cell Structure

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

ABSTRACT

본 논문은 고전압 양극성 펄스 모듈레이터에 대해 소개한다. 모듈레이터는 충전을 위한 공진형 컨버터와 고전압 펄스를 생성하기 위한 12개의 파워셀로 구성된다. 12개의 파워셀은 다중 권선 변압기를 통해 모든 셀이 병렬로 충전되며, 방전 시에는 모든 셀이 직렬로 연결되어 고전압을 생성한다. 12개의 파워셀을 구성하는 48개의 스위치에 절연된 전력과 신호를 동시에 공급하기 위해, 2개의 고전압 케이블로 구성된 양극성 컨트롤 루프가 설계되었다. 최종적으로 10kV, 100A, 3kHz 사양을 갖는 양극성 펄스 모듈레이터가 구현되었으며, 저항부하 및 리액터 부하조건에서 테스트 되었다. 실험결과를 통해 제안하는 양극성 펄스 모듈레이터의 신뢰성이 검증되었다.

1. 서론

반도체 소자 기반의 양극성 펄스 모듈레이터는 의료, 살균, 식품처리 등의 응용분야에서 단극성 펄스 모듈레이터와 비교하여 더욱 효과적으로 사용 가능성이 검증되었다.^[1-2] 이와 관련하여, 파워셀 구조 기반의 양극성 모듈레이터의 서브모듈 설계 및 게이트 구조에 대한 연구가 소개되었다.^[3]

멀티스테이지 구조의 펄스 모듈레이터는 다수개의 서브모듈을 직렬로 구성하여 고전압을 출력하는 것이 특징이다. 하지만, 서브모듈을 구성하는 방전 스위치를 구동하기 위해서는 각 스위치마다 절연된 전력과 신호의 공급이 요구된다. 이를 만족하기 위해, 한 쌍의 고전압 케이블로 모든 게이트 회로에 전력과 신호를 동시에 공급가능한 양극성 컨트롤 루프가 제안되었으며, 2.5 kV 사양의 3-Cell 구동 실험을 통해 구조의 신뢰성이 검증되었다.^[3] 본 논문은 과거 연구를 통해 검증된 양극성 모듈레이터의 구조를 기반으로 설계된 10 kV 양극성 펄스 모듈레이터에 대해 다룬다. 8개의 스위치로 구성된 12개의 파워셀이 직렬로 연결되어 10kV 양극성 펄스를 생성한다. LCC 공진형 충전기는 12개의 셀에 병렬로 충전 전력을 공급하고, 10 kV 고압 절연이 가능하도록 설계되었다. 특히, 변압기는 병렬 충전 시 발생하는 2차 측 전압의 차이를 효과적으로 보상가능하도록 설계되었다. 48개의 방전 스위치의 구동을 위해, 한 쌍의 고전압 케이블로 단순하게 구성된 양극성 컨트롤 루프가 설계되었다. 설계를 바탕으로 구현된 모듈레이터는 저항 및 플라스마 리액터 부하조건에서 테스트 되었으며, 이를 통해 제안하는 고전압 양극성 펄스 모듈레이터의 신뢰성이 검증되었다.

2. 양극성 펄스 모듈레이터

그림 1은 10 kV 양극성 펄스 모듈레이터의 구조를 나타내며, 상단부터 12개의 서브모듈로 구성된 멀티 스테이지 구조의 방전 부, 서브모듈을 충전하기 위한 커패시터 충전기, 서브모듈의 구동을 위한 펄스 컨트롤인버터로 구성된다. 컨버터에서 출력되는 충전전류는 녹색의 파워루프와 변압기를 통해 각 셀에 공급되며, 각 셀에 충전된 에너지는 붉은색과 푸른색의 한 쌍의 컨트롤 루프의 신호에 의해 출력 측으로 방전된다. 각 파트의 설계사항은 다음과 같다.

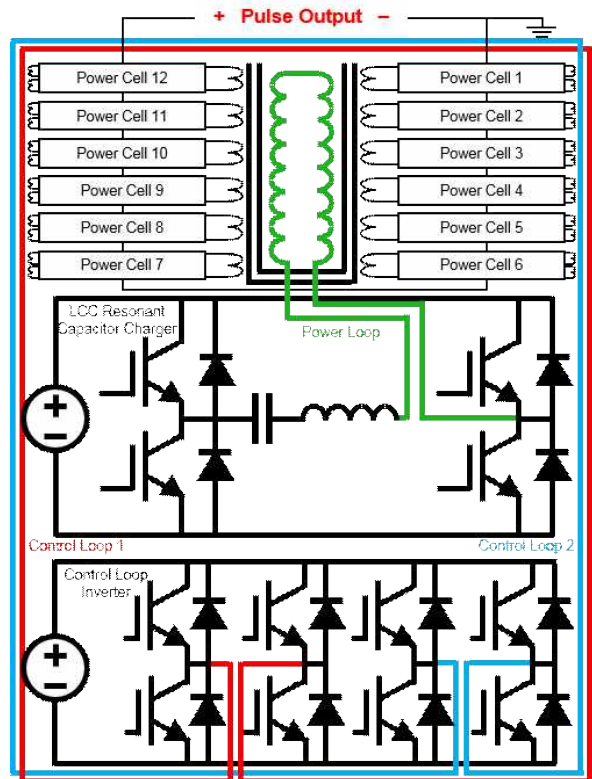


그림 1 10 kV 양극성 펄스 모듈레이터의 구조도
 Fig. 1 The structure of the 10-kV bipolar Pulsed power modulator

2.1 서브모듈 설계

양극성 펄스를 출력하기 위해 설계된 서브모듈을 그림 2. 에 나타내었다. 서브모듈은 변압기의 2차 측 권선을 통해 입력되는 충전전류를 정류하는 정류부, 에너지를 저장하는 스토리지 커패시터, 양극성 펄스출력 뿐만 아니라 능동형 풀다운 동작을 위한 풀브릿지 구조의 방전스위치 4개로 구성된다. 각 서브모듈은 동작 시 방전 스위치의 전압 정격을 넘지 않도록 830V의 충전 전압을 가지며, 12개의 서브모듈이 10kV 양극성 펄스를 생성하도록 설계되었다.

2.1.1 게이트 회로 설계

12개의 서브모듈을 구성하는 48개의 방전 스위치를 구동하기 위해, 양극성 컨트롤 루프구조가 설계되었으며, 이를 그림 3에 나타내었다. 각 컨트롤 루프가 하나의 레그를 구동하는 방식으로, 각 게이트 회로는 변압기를 통해 컨트롤 루프와 연결된다. 게이트 변압기는 양극의 펄스가 인가되면 턴-온 동작을 수행하며, 음극의 펄스가 인가되면 턴-오프 동작으로 토글 스위치와 같이 동작된다. 턴-온 동작이후 음극 펄스가 인가되지 않는 경우에는, 일정 시간이후 턴-오프된다. 게이트 구동에 요구되는 전력은 회로 내부의 소형 스토리지 커패시터에 충전된 에너지를 이용한다. 이 커패시터는 게이트 입력 신호를 정류하여 지속적으로 충전된다.

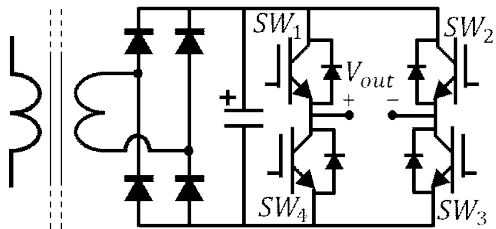


그림 2 설계된 양극성 서브모듈의 회로
Fig. 2 Circuit of the designed bipolar sub-module

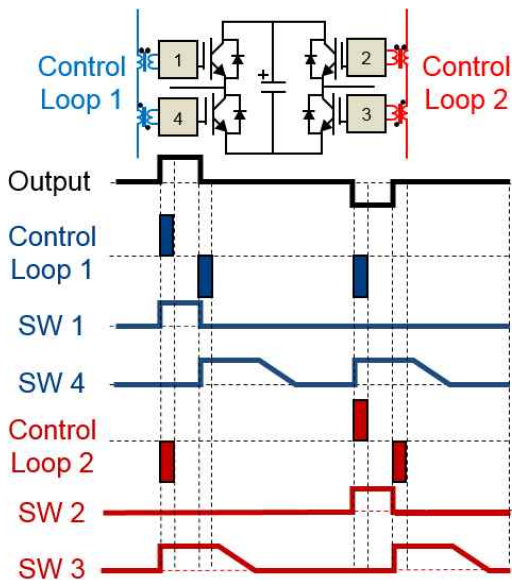


그림 3 양극성 컨트롤 신호에 따른 게이트 동작
Fig. 3 Gate Driver operation according to control signal

2.2 커패시터 충전기 설계

커패시터 충전기는 그라운드 전위의 1번 째 서브모듈 뿐만 아니라 10 kV전위의 12번 째 서브모듈까지 동일한 전압으로 동시에 충전해야한다. 이를 위해, LCC공진형 컨버터와 고전압 변압기가 설계되었다.

2.2.2 고전압 변압기

멀티 스테이지 구조를 가지는 펄스 모듈레이터의 각 서브모듈 충전 시 고려되는 주요 사항중의 하나는 충전 전압 밸런싱이다. 양극성 모듈레이터의 충전기에 사용된 변압기는 12개의 서브모듈을 충전하기 위해, 12개의 2차 측 권선을 가지고 있으며, 각 병렬 권선 간의 기생성분이 충전 전압 차이를 유발하는 주요한 원인이다. 하지만, 기생성분의 차이를 최소화 하는데 한계가 있으므로 각 2차 측 권선에 흐르는 전류의 차이가 보상되도록 3차 보조권선이 설계되었으며, 설계된 변압기의 사양을 표 1에 나타내었다.

2.2.2 LCC 공진형 컨버터

고전압 변압기는 1차 측과 2차 측간의 절연거리로 인하여, 누설자속이 크다. 특히, 2차 측 권선이 병렬로 구성되는 경우에는 높은 2차 측 기생 커패시턴스 값을 갖는다. 이러한 성분들은 변압기의 특성상 최소화 하는데 제약사항이 따르기 때문에, LCC 공진형 컨버터로 설계되었다. 누설자속은 직렬 공진 인덕턴스로, 기생 커패시턴스는 병렬 공진 커패시턴스로 활용되었다. 설계된 LCC 공진형 컨버터의 각 파라미터를 표 2에 나타내었다.

표 1 고전압 변압기의 설계 파라미터
Table 1 Design parameters of the high voltage transformer

코어 재질	페라이트 코어 (PC40)		
코어 종류	UU120		
권선	1차 측	2차 측	3차 측
권선 종류	0.08/1500 Litz wire	0.65mm 테프론 단선	22AWG 실리콘 전선
정격 전류	23 A	3 A	3 A
턴 수	19 Turns (2병렬)	31 Turns (12병렬)	12 Turns (2병렬)

표 2 LCC 공진형 컨버터의 설계 파라미터
Table 2 Design parameters of the LCC resonant converter

입력 전압	310 V
출력 전압	833 V
정격 전력	2 kW
직렬 공진 인덕턴스	120 μ H
직렬 공진 커패시턴스	1 μ F
병렬 공진 커패시턴스	1.5 nF
스위칭 주파수	62 - 190 kHz

표 3 구현된 양극성 펄스 모듈레이터의 사양
Table 3 Specifications of the implemented power modulator

최대 출력전압	10 kV
최대 출력 전류	100 A
최대 평균 전력	2 kW
펄스 폭	1-10 μ s
최대 반복률	1 kHz

3. 실험결과

설계를 바탕으로 구현된 모듈레이터의 사양을 표3에 나타내었다. 구현된 양극성 모듈레이터의 신뢰성을 검증하기 위해, 충전실험, 펄스 출력실험이 진행되었다.

3.1 서브모듈 충전실험

구현된 양극성 펄스 모듈레이터의 각 서브모듈의 충전 전압 밸런싱의 검증을 위해, 2차 측 권선의 위치가 비슷하여 충전 전압에 차이가 적은 모듈들을 그룹으로 묶어 평균 전압을 측정하였으며, 그 결과를 그림4에 나타내었다. 전체 구간에서 5 % 이내의 차이를 보였다.

3.2 펄스 출력실험

펄스 출력실험은 1 k Ω 의 저항 부하 조건과 친환경 응용분야에 사용되는 가스처리 리액터 부하 조건에서 수행되었으며, 각 실험결과를 그림 5, 6에 나타내었다. 두 실험모두 10kV 정격 전압의 펄스를 인가하였으며, 정상적으로 출력됨이 확인되었다.

3. 결론

본 논문은 10 kV 양극성 펄스 모듈레이터의 구조 및 설계를 제한한다. 검증된 서브모듈의 구조 및 게이트 구동회로에 대한 기존연구를 기반으로 본 논문에서는 다수개의 서브모듈로 높은 출력전압을 가지는 양극성 펄스 모듈레이터가 설계 및 구현되었다. 증가된 서브모듈의 수에 대하여 충전기 및 고전압 다중권선 변압기가 설계되었다. 특히, 변압기는 각 서브모듈의 충전 전압의 오차가 10%이내가 되도록 설계되었으며, 충전 실험을 통해 검증되었다. 최종적으로, 10 kV 펄스 출력 실험을 통해 제한하는 양극성 펄스 모듈레이터가 효과적으로 사용될 수 있음이 검증되었다.

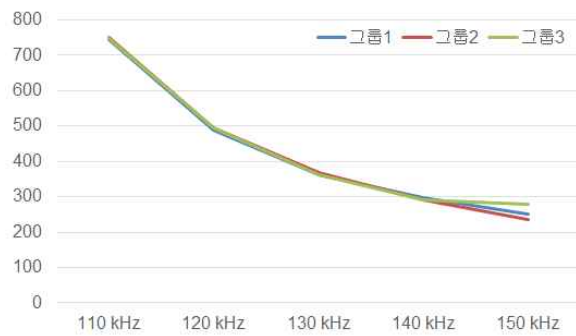


그림 4 스위칭 주파수에 따른 각 서브모듈의 충전전압
Fig. 4 Charge voltage of each submodule according to switching frequency

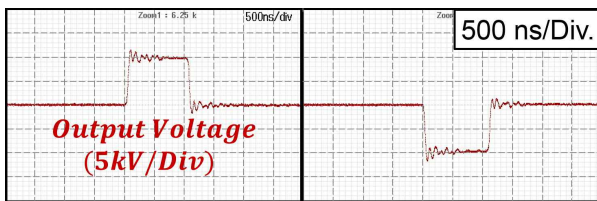


그림 5 저항부하 조건에서의 10kV 양극성 펄스 전압파형
Fig. 5 Voltage waveform of 10kV Bipolar modulator under resistive load conditions

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

참고 문헌

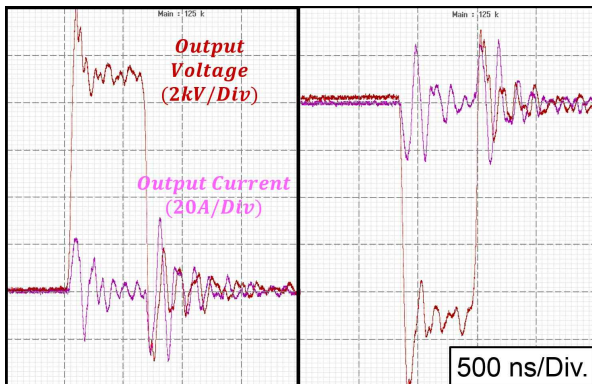


그림 6 리액터 부하조건에서의 10kV 양극성 펄스파형
Fig. 6 Waveforms of 10kV Bipolar modulator under plasma reactor load conditions

[1] C.B. Arena, M.B. Sano, J.H. Rossmeisl, J.L. Caldwell, P.A. Garcia, M.N. Rylander, and R.V. Davalos, "High-frequency irreversible electroporation (H-FIRE) for non-thermal ablation without muscle contraction", Biomedical engineering online, vol. 10, no. 1, pp. 102-122, Nov, 2011

[2] T.F. Wu, S.Y. Tseng, and J.C. Hung, "Generation of pulsed electric fields for processing microbes", IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 32, no. 4, pp. 1551 - 1562, Oct. 2004.

[3] 송승호, 이승희, 류홍제, "플브릿지 파워셀 구조 기반의 양극성 펄스 전원장치", 전력전자학회 학술대회 논문집, 254-256, 2019