

펄스전원을 위한 고전압 DC 전원장치 개발

김형석, 유찬훈, 류홍제, 김광훈
한국전기연구원

Development of High Voltage DC Power Supply for Pulsed Power Modulator

Hyoung Suk Kim, Chan Hun Yu, Hong Je Ryoo, and Guang Hoon Kim
Korea Electrotechnology Research Institute

ABSTRACT

본 논문에서는 펄스전원장치에 고전압을 공급하기 위한 DC 전원장치의 개발에 관해 다룬다. 제작된 DC 전원장치는 공진형 컨버터에 배전압 정류기를 채택하여 높은 전압이득과 전력 밀도를 가진다. 특히, 정류다이오드의 전압 균등화를 위해 사용하는 커패시터를 병렬공진 커패시터로 활용함으로써, 사용되는 소자의 수를 최소화하며 높은 신뢰성을 얻을 수 있다. 또한, 두 개의 공진주파수로 인해 공진전류가 사각파 형태가 되어 낮은 도통손실을 가진다. 제안된 회로를 이론적으로 분석하고, 그 타당성을 실험으로 검증한다.

1. 서론

부하에 짧은 시간에 고전압을 인가해 주기 위한 고전압 펄스전원 시스템은, 의료용 레이저와 국방용 레이더를 비롯한 다양한 산업 응용분야에서 널리 사용된다.

그림 1은 고전압 펄스전원 시스템의 일반적인 구조를 나타낸다. 그림 1에서 보여지듯이 고전압 펄스전원 시스템은 상용 AC전원을 DC로 변환해주는 AC-DC 정류기, 정류된 DC전압을 승압하기 위한 고전압 DC전원, 그리고 부하에 고전압 DC를 원하는 시간과 반복률을 가지고 인가해 주기 위한 펄스전원 장치로 구성되어 있다.

본 논문에서는 이러한 고전압 펄스전원 시스템을 구성하는 고전압 DC전원장치의 개발에 관해 다룬다. 제작된 고전압 DC 전원장치는 LCC 공진형 컨버터에 배전압 정류기를 채택하여 높은 전압 이득과 전력밀도를 가진다. 특히, 정류다이오드의 전압 균등화를 위해 사용하는 커패시터를 병렬공진 커패시터로 활용함으로써, 사용되는 소자의 수를 최소화하며 높은 신뢰성을 가진다. 또한, 사각파 형태의 공진전류로 인해, 낮은 실효전류를 가져 도통손실을 줄일 수 있다.

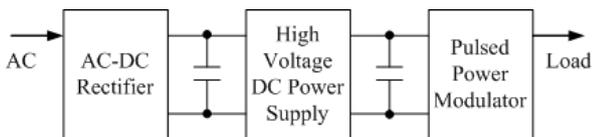


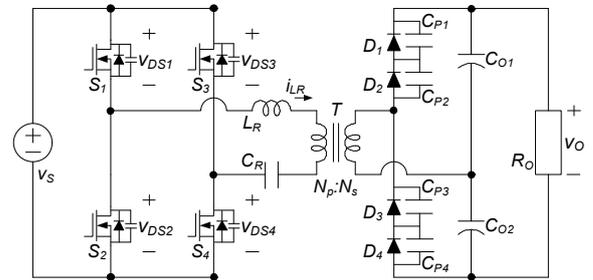
그림 1 고전압 펄스전원 시스템 구조
Fig. 1 Structure of high voltage pulsed power system

2. 개발된 고전압 DC 전원장치

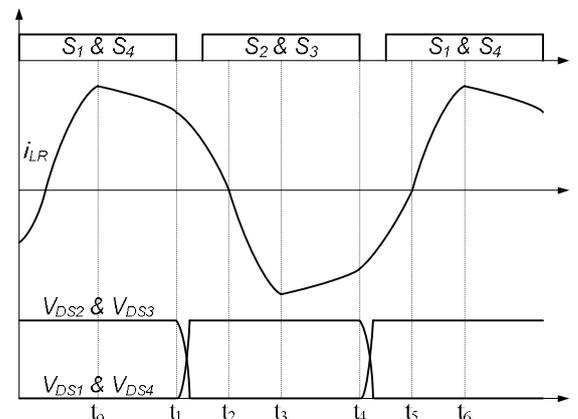
2.1 동작원리

그림 2는 개발된 고전압 DC 전원장치의 회로와 주요파형을 나타낸다. 그림 2 (a)에서 보여지듯이, 제작된 회로는 1차측 스위치(S_1 S_4), 2차측 정류다이오드(D_1 D_4), 직렬 공진 커패시터 (C_R), 직렬 공진 인덕터(L_R), 병렬 공진 커패시터(C_{P1} C_{P4})로 이루어져 있다. 회로의 해석을 위해 그림 2 (a)에 명시되지 않은 기생성분은 모두 무시하며, 한 스위칭 주기의 각각 반주기는 동작이 서로 동일하므로 반주기에 대해서만 해석한다.

모드1(t_0 t_1): 정류다이오드 D_1 과 D_2 가 도통된 순간부터 출력전압의 절반이 1차측으로 투영되어 공진전류가 감소한다.



(a) 회로도



(b) 주요파형

그림 2 개발된 DC 전원장치
Fig. 2 Developed DC power supply

모드2(t_1 t_2): t_1 에서 스위치 S_1 과 S_4 가 꺼지면 공진전류에 의해 S_1 과 S_4 의 출력 커패시터가 충전되고 S_2 와 S_3 의 출력 커패시터가 방전된다. S_2 와 S_3 양단 전압이 0이 되면 역 병렬다이오드가 도통하며 이때 S_2 와 S_3 를 커 줌으로써 영전압 스위칭이 가능하게 된다. C_{P1} C_{P4} 는 공진에 관여하지 않으며, L_R 과 C_R 의 공진에 의해 공진전류가 빠른 속도로 감소한다.

모드3(t_2 t_3): t_3 에서 공진전류가 극성을 바꾸게 되면, 병렬 공진 커패시터 C_{P1} 과 C_{P2} 가 충전되고 C_{P3} 와 C_{P4} 가 방전된다. C_{P3} 와 C_{P4} 가 모두 방전되면 D_3 와 D_4 를 통해 에너지가 출력으로 전달된다. 나머지 반주기는 앞의 반주기와 동일한 동작을 반복하게 된다.

1.2 주요특징

개발된 회로의 주요특징은 다음과 같다.

1) 높은 전압이득과 전력밀도: 개발된 회로는 LCC 공진 컨버터와 배전압 정류기를 적용하여 높은 전압 이득을 얻을 수 있으며, 영전압 스위칭을 통해 고주파 구동이 가능해 전력밀도를 높일 수 있다.

2) 높은 신뢰성 및 소자수 최소화: 고전압 응용분야에서는 전압 분배를 위해 정류단 다이오드를 직렬로 연결하여 사용하게 된다. 다이오드를 직렬 연결하여 사용하게 되면 소자의 특성 차이로 인해 특정 다이오드에 과도한 전압 스트레스가 인가될 수 있다. 2차측 정류 다이오드에 병렬로 연결된 커패시터는 정류 다이오드에 전압을 균등하게 분배함과 동시에 병렬 공진 커패시터로 동작함으로써, 별도의 병렬커패시터가 필요 없어 소자수를 최소화하며 높은 신뢰성을 얻을 수 있다.

3) 도통손실 저감: 제안된 회로는 한 스위칭 주기에 두 개의 공진주파수를 가지고 동작함으로써, 공진전류가 사각파 형태가 된다. 이러한 공진전류는 정현파형태의 공진전류에 비해 실효값이 작아 도통 손실을 줄일 수 있다.

1.3 설계 고려사항

LCC 공진형 컨버터는 기본적으로 정현파 형태의 공진전류를 가정하여 설계 가능하다^[1,2]. 기존의 LCC 공진형 컨버터에 비해, 개발된 회로는 정류 다이오드의 전압 균등화 커패시터를 병렬 공진 커패시터로 활용하는 구조로, 1차측으로 환원한 등가 병렬커패시턴스(C_{eq})는 (1)과 같음을 고려하여 설계하여야 한다.

$$C_{eq} = \left(\frac{N_S}{N_P} \right)^2 \times \left(\frac{C_{P1} \times C_{P2}}{C_{P1} + C_{P2}} + \frac{C_{P3} \times C_{P4}}{C_{P3} + C_{P4}} \right) \quad (1)$$

3. 실험결과

표 1은 제작된 고전압 DC 전원장치의 사양 및 회로정수를 나타낸다.

표 1 제작된 고전압 DC 전원장치의 사양 및 회로정수
Table 1 Specification and circuit parameters of developed DC power supply

| | | | |
|-------------|---------------|-------------------|-----------|
| 입력전압 | 60V | 출력전압 | 2kV |
| 출력전력 | 200W | L_R | 8.15uH |
| C_R | 2.2uF | C_{P1} C_{P4} | 200pF |
| S_1 S_4 | PSMNO38 100YL | D_1 D_4 | C4D02120E |



그림 3 정상상태 파형



그림 4 영전압 스위칭 파형

그림 3은 200W 정격부하에서 제작된 DC 전원장치의 정상상태 실험 파형을 나타낸다. 이론적 분석과 잘 맞음을 확인할 수 있다.

그림 4는 스위치의 게이트 신호와 스위치 양단 전압을 나타낸다. 스위치 양단의 전압이 0이 된 이후 게이트 신호가 인가되는 영전압 스위칭이 잘 이루어지고 있음을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 펄스전원을 위한 고전압 DC 전원장치의 제작에 관해 다루었다. 개발된 회로는 LCC 공진형 컨버터를 기반으로 하고 있어 높은 전압이득과 전력밀도를 가지며, 다이오드 정류기의 전압 균등화 커패시터를 병렬 공진 커패시터로 활용하여 소자의 수를 최소화 하며 높은 신뢰성을 가지고, 사각파형태의 공진전류로 인해 낮은 도통손실을 가진다. 실험을 통해 개발된 DC 전원장치의 타당성을 검증하였다.

참고 문헌

[1] V. Belaguli and A. K. S. Bhat, "Operation of the LCC type parallel resonant converter as a low harmonic rectifier", IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 46, No.2, pp.288-299, 1999.
[2] A.J. Forsyth, G.A. Ward and S.V. Mollov, "Extended fundamental frequency analysis of the LCC resonant converter", IEEE Trans. Power Electron., Vol. 18, No.6, pp. 1286-1292, 2003.