

HEMP 구동을 위한 배터리 기반 고전압 충전기

조찬기, 가재예, 류홍제
 중앙대학교

Battery Based High Voltage Capacitor Charger for HEMP Driving

Chan-Gi Cho, Ziyi Jia, Hong-Je Ryoo
 Chung-Ang University

ABSTRACT

본 논문은 리튬 폴리머 배터리를 기반으로 하여 High-altitude Electromagnetic Pulse (HEMP)를 구동하는 고전압 충전기의 2단 충전과 직접 충전 방법에 관하여 다룬다. 2단 충전 방법은 삼상 변압기의 출력 전압을 정류한 600 V의 전압에 공진 현상을 이용하여 최종 출력 전압 1.0 kV를 생성하는 반면, 직접 충전 방법은 공진 현상을 이용하지 않고 삼상 변압기의 출력 전압을 정류하여 1.0 kV를 생성한다. 두 방법 모두 1.0 kV의 출력 전압을 생성하는 점은 동일하지만, HEMP 구동을 위해서는 서로 다른 고려사항을 갖는다. 이에 따라, 시뮬레이션 및 기초 부하 실험을 통해 2단 충전 구조와 직접 충전 구조의 차이점, 그리고 충전기와 부하의 결선에 따른 차이점이 비교되었다.

1. 서론

강한 전자기 펄스 (Electromagnetic Pulse)의 에너지 장을 순간적으로 방사하여 일정 거리 내의 전력 서지에 민감한 전자기 시스템과 첨단 기술의 초소형 회로들을 파괴할 수 있다.^[1, 2] 따라서, EMP를 생성하는 시스템을 자동차, 배, 그리고 비행기와 같은 운송 수단에 탑재하여 이용자가 원하는 장소에서 선택적으로 동작 시키려는 수요가 있고, 이를 구현하기 위해서는 상용 전원이 아닌 독립 전원을 기반으로 하는 High-altitude Electromagnetic Pulse (HEMP) 구동 시스템 개발이 필요하다. 본 논문은 리튬 폴리머 배터리를 독립 전압원으로 이용하는 고전압 커패시터 충전기의 HEMP 구동 시스템 제작에 관한 내용을 다룬다. 다양한 방법의 고전압 커패시터 충전 방법 중 2단 충전 방법과 직접 충전 방법으로 충전기를 설계 하였으며, HEMP 구현을 위해 짧은 펄스 폭의 고전압 발생 장치인 테슬라 변압기와와의 결선을 고려하여 언급한 두 방법의 차이점을 시뮬레이션과 실험 결과를 통해 비교한다.

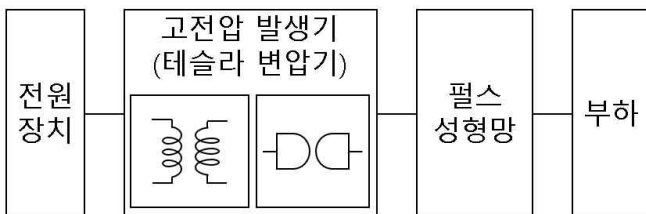


그림 1 HEMP 구동 시스템의 블록 다이어그램
 Fig. 1 Block diagram of HEMP driving system

논문은 2장에서 2단 충전 구조와 직접 충전 구조의 회로 및 특징을 비교 분석하였고, 시뮬레이션 결과와 실험 파형을 3장에 정리하였다. 마지막으로 4장 결론에서 실험 내용들을 정리, 비교하고 충전 방법들의 특징을 정리한다.

2. HEMP 구동을 위한 배터리 기반 고전압 충전기의 2단 충전과 직접 충전 구조 분석

리튬 폴리머 배터리의 44 V 전압을 기반으로 한 고전압 충전기는 HEMP 구동을 위해 최종 출력 전압 1.0 kV가 요구된다. 그 후 생성된 1.0 kV의 전압으로 테슬라 변압기를 이용해 짧은 펄스폭을 갖는 고전압 펄스를 생성하고 pulse forming line을 거쳐 HEMP 방사가 이루어진다^[3]. 전체 시스템은 그림 1과 같이 표현할 수 있다. 그림 1의 전원장치는 HEMP 펄스 방전 시 발생하는 음전압으로부터 충전부를 보호하는 2단 충전 구조^[4]와 직접 충전 구조로 구현하여 실험하였다. 간단히 두 충전 방법의 특징을 정리하면 다음과 같다. 2단 충전 방법은 충전기 외부의 대용량 리액터와 커패시터의 공진 현상을 이용하기 때문에 추가적인 부품과 공간이 필요한 단점이 있지만, 충전부의 출력 정류 다이오드들을 HEMP 발생 순간에 발생하는 음의 전압으로부터 보호할 수 있다. 반대로, 직접 충전 방법은 외부의 추가 소자들을 이용하지 않고 1.0 kV의 출력 전압을 직접 생성하지만, HEMP 발생 순간의 발생하는 역전압에 취약한 단점이 있다.

2.1 2단 충전 회로

그림 2의 2단 충전 회로도도 같이, 44 V의 리튬 폴리머 배터리를 입력 전압원으로 이용하는 2단 충전 방법은 충전기의 변압기를 3개 사용하는 삼상 구조로 변압기 2차 측에 600 V의 전압을 생성한다. 이후 600 V로 충전된 커패시터 뱅크와 외부의 공진 인덕터, 그리고 커패시터 사이의 공진 현상을 이용해 최종 출력 전압 1.0 kV를 달성한다. 최종 충전 전압은 다음의 수식과 같이 표현된다.

$$Z_o = \sqrt{\frac{L_{rc}}{C_{Bank2}}}, w_o = 2\pi f_r = \frac{1}{\sqrt{L_{rc} C_{Bank2}}} \quad (1)$$

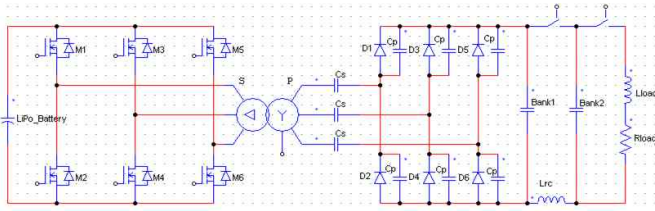
$$V(t) = V_{in} - V_{in} \cos \omega_o(t - t_0) \quad (2)$$

공진 충전 외에도 외부 인덕터와 스위치는 그림 2(b)에 표현한 것과 같이 HEMP 생성 시 발생하는 음전압으로부터 변압기 2차 측 정류부의 단락 전류를 방지하는 역할을 하여, 고 반복율에서도 안정적인 HEMP 출력이 가능하다.

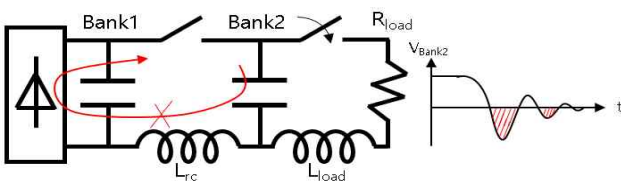
2.2 직접 충전 회로

직접 충전 회로는 그림 3과 같이, 2단 충전 회로를 구성하는 삼상 충전기의 출력 전압을 기존의 600 V에서 1.0 kV로 증가시키고, HEMP 모의 부하: 인덕터와 저항을 직접 출력 정류부에 연결한다. 이 경우 공진 충전부가 제외되기 때문에 전체 시스템의 부피와 소자수가 감소하는 장점이 있다. 그러나, 비록 수십 μ s의 매우 짧은 시간일지라도, HEMP 방전 시 발생하는 음전압이 삼상 충전기의 출력 정류부를 통해 단락 전류로 도통하여 정류 다이오드의 소손을 야기 할 수 있는 단점이 있다.

직접 충전 방법의 장점을 살리고 위의 단점을 보완하기 위해, 그림 2의 2단 충전 회로에 표현되어 있는 충전기와 모의 부하 간 결선과는 다른 새로운 결선 방법이 그림 3에 표현되어 있다. 그림 2와 달리 모의 부하가 최종 출력 커패시터와 직렬로 결선되어, HEMP 발생 시 생성 되는 음의 전압의 방전 전류 패스에 모의 부하의 인덕턴스와 저항 값으로 충전기의 출력 정류부에 흐르는 단락 전류량을 제한한다.



(a)



(b)

그림 2 HEMP 구동용 2단 충전 고전압 커패시터 충전기 회로도 (a) 전체 회로도 (b) 2단 충전 및 방전 회로도와 모의 부하 방전 파형 개념도

Fig. 2 Circuit of the 2-stage high voltage capacitor charger for HEMP driving (a) Entire schematic (b) concept diagram for the 2-stage charging and discharging with the equivalent load

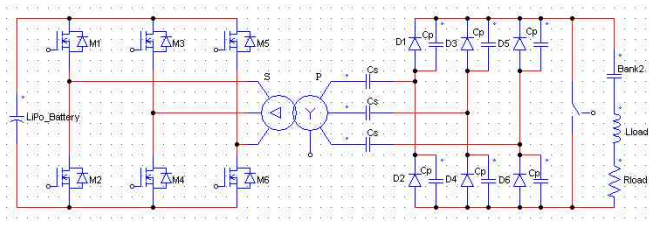


그림 3 HEMP 구동용 직접 충전 고전압 커패시터 충전기 회로도

Fig. 3 Circuit of the direct charging high voltage capacitor charger for HEMP driving

3. 시뮬레이션 및 실험 결과

2단 충전 회로와 직접 충전 회로의 설계 변수들을 표1과 같이 정리하였고, 시뮬레이션 및 실험 결과는 아래와 같다.

3.1 2단 충전 회로

2단 충전 구조에 따라 커패시터 뱅크부가 2개로 구성되어 있고, 각 뱅크부의 전압과 전류 파형을 시뮬레이션과 실험으로 측정하여 그림 4와 그림 5로 나타내었다. 공진 충전 전류로 커패시터 뱅크2의 전압이 충전 되고, 이 후 제어기의 신호에 따라 최종 출력 전압인 커패시터 뱅크2의 1.0 kV가 20 μ s 시간 내에 모두 방전된다.

커패시터 뱅크2가 방전 된 이후, HEMP 모의 부하: 인덕터와 저항이 소비하고 남은 에너지만큼의 음의 전압이 발생한다. 그러나, 2단 충전 구조에서는 인덕터와 스위치로 충전부의 출력 정류다이오드와 분리되어 있기 때문에 음의 전압에 의한 단락 전류가 흐르지 않는다.

표 1 삼상 고전압 커패시터 충전기의 설계 변수

Table 1 Design parameters of three phase high voltage capacitor charger

변수	값	변수	값
LiPo Battery	44 [V]	C_s (변압기 2차 측)	3 [uF]
L_s (leakage): Δ	1.04 [uH]	C_p (변압기 2차 측)	33 [nF]
C_{Bank1}	1.4 [mF]	C_{Bank2}	84 [uF]
턴수 비	5.6	f_{sw}	68 [kHz]
L_{rc}	5 [mH]	L_{load}	170 [nH]
R_{load}	20 [m Ω]	-	-

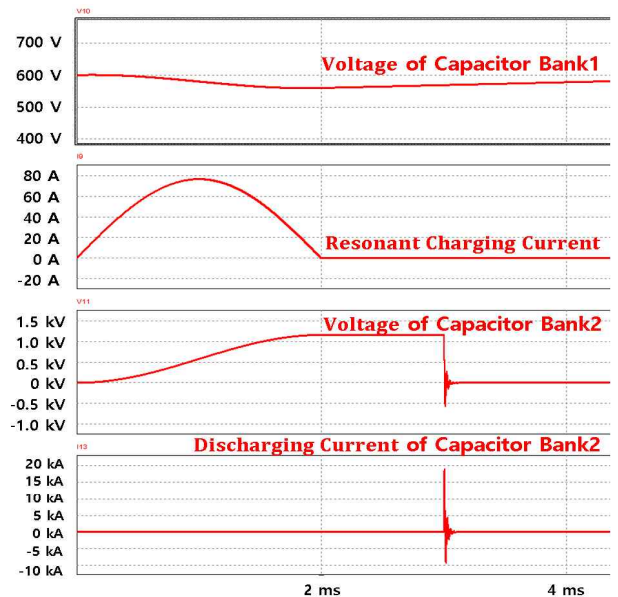


그림 4 HEMP 구동용 2단 충전 고전압 커패시터 충전기의 시뮬레이션 결과

Fig. 4 Simulation Results of 2-stage high voltage capacitor charger for HEMP driving

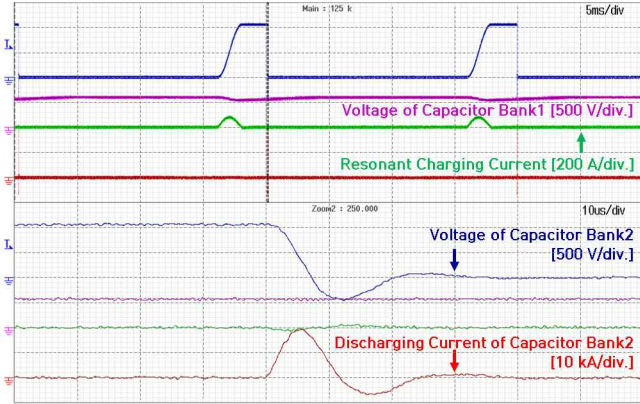


그림 5 HEMP 구동용 2단 충전 고전압 커패시터 충전기의 실험 측정 파형
 Fig. 5 Experimental waveforms of 2-stage high voltage capacitor charger for HEMP driving

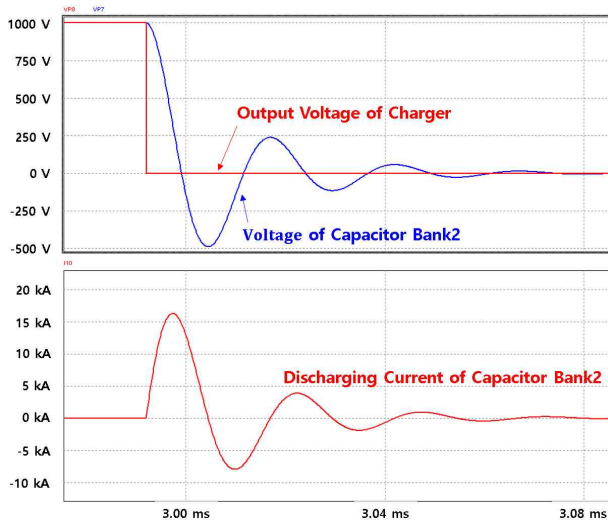


그림 6 HEMP 구동용 직접 충전 고전압 커패시터 충전기의 시뮬레이션 결과
 Fig. 6 Simulation Results of direct charging high voltage capacitor charger for HEMP driving

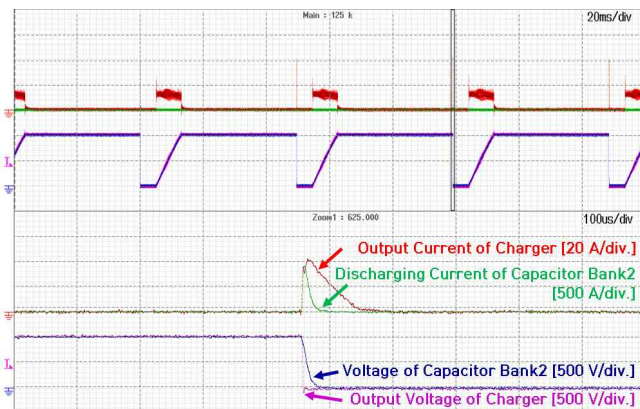


그림 7 HEMP 구동용 직접 충전 고전압 커패시터 충전기의 실험 측정 파형
 Fig. 7 Experimental waveforms of direct charging high voltage capacitor charger for HEMP driving

3.2 직접 충전 회로

2단 충전 구조와의 큰 차이점은 충전부의 출력 전압이 600 V가 아닌 1.0 kV라는 점과 외부 소자를 추가로 사용하지 않는 점이다. 직접 충전 구조의 시뮬레이션 및 실험 결과를 그림 6 과 그림 7에 표현하였다. 커패시터 뱅크2의 방전 시, 음의 방향으로 약 500 V의 전압이 생성되고 이는 충전기 출력 정류부의 단락 전류를 야기한다. 이에 따라 그림 3의 회로도 와 같이 모 의 부하의 인덕터와 저항을 방전 전류 경로에 포함하도록 최종 출력 커패시터와 부하의 결선을 그림 2의 병렬 결선에서 직렬 결선으로 변경하였고, 방전 반복율 20 Hz 조건에서 정상 동작 함을 확인하였다.

4. 결론

본 논문은 HEMP 구동을 위하여 독립 전압원인 리튬 폴리머 배터리를 이용한 고전압 커패시터 충전기의 충전 방법 중 2 가지: 2단 충전방법과 직접 충전방법을 비교 분석했다. 첫 번째 방법은 충전부의 출력 전압을 600 V로 제어하고, 외부의 공진 충전 회로를 구현하여 최종 출력 전압 1.0 kV를 생성하는 2단 충전 방법이고, 두 번째는 충전부의 출력 전압을 1.0 kV로 공진 충전 회로 없이 직접 충전하는 방법이다. 2단 충전 방법은 충전기 외에 추가적인 소자들을 사용하지만 HEMP 생성 시 커패시터 뱅크 부에서 발생하는 음의 전압으로부터 충전기의 출력 정류 다이오드들을 보호하는 것을 특징으로 한다. 이와 대조적으로, 직접 충전 방법은 20 us의 짧은 시간에 출력 정류 다이오드로 단락 전류가 발생하지만, 외부의 추가 소자를 사용하지 않아 전체 시스템의 부피와 소자수를 줄일 수 있는 점을 특징으로 한다. 또한 직접 충전 구조로 고전압 커패시터 충전기 구동 시, 단점을 보완하기 위하여 단락 전류의 크기를 감소시키는 출력 커패시터와 의사 부하 간의 결선을 새롭게 제안하였다.

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

참고 문헌

- [1] Clay Wilson, High Altitude Electromagnetic Pulse (HEMP) and High Power Microwave (HPM) Devices: Threat Assessments, USA: CRS Report for Congress, Mar. 2008.
- [2] 이성동, 박수영, 박복룡, 안희남, "정보통신기반시설 고출력 전자파 영향 및 대책 연구", 2014.
- [3] 신진호, 윤동기, "자심 테슬라 변압기를 이용한 400kV급 소형 고전압 펄스 발생기 개발", 전력전자학술대회논문집, 2014.7, pp. 385-386.
- [4] 조찬기, 가재예, 박수미, 조현빈, 이승희, 류홍제, "9 kJ/s 배터리 기반 2단 충전 고전압 충전기 설계", 전력전자학회 2018년도 전력전자추계학술대회, 2018.11, pp. 45-47.