배터리 기반 고전압 충전기 설계

조찬기, 가재예, 최시훈, 류홍제
중앙대학교

Design of High Voltage LiPo Battery Based Capacitor Charger

Chan Gi Cho, Zi Yi Jia, Si Hoon Choi, Hong Je Ryoo
Chung-Ang University

ABSTRACT

본 논문은 리튬폴리머 배터리를 입력 전압원으로 High Altitude Electomagnetic Pulse (HEMP) 구동용 고밀도 고전압 충전기의 설계를 다루며, 제안하는 충전기는 독특한 3상 델타 와이 변압기 구조를 갖는 5.4kW 용량의 LCC 공진 컨버터로 제작 되었다. 풀브릿지 형태로 4개의 스위치를 사용하는 단상 충전기는 동일 용량을 설계하는 경우, 입력 전류량이 높아 소자의 발열로 충전기의 동작 시간이 제한되고 누설 인덕턴스에 의한 스파이크성 전압이 크게 발생하여 충전기의 안정적인 구동이 어려운 문제점이 있다. 이를 해결하기 위해 6개의 스위치를 사용하는 삼상 충전기를 HEMP 구동용 고밀도 고전압 충전기에 적용하였다. 동일 용량의 단상과 삼상 충전기 설계과정과 시뮬레이션 결과를 분석해 각 충전기의 차이점을 비교하고, 저항 및 커패시터 부하 실험으로 제안하는 삼상 충전기의 동작과 성능을 검증하였다.

1. 서 론

High Power ElectroeMagnetics(HPEM)는 고밀도의 전자계 방사를 발생시켜 발생점 주위의 전기전자 시스템에 손상을 주거나 파괴를 일으키는 현상 및 기술을 말한다.[1] 이는 Electro Magnetic Pulse(EMP) 실험용으로 쓰이거나 미사일, 드론과 같은 이동 수단에 실어서 국지적으로 전기전자 시스템을 마비시키는 무기로 사용된다.[2] 해당 시스템의 구현을 위해서는 배터리 전원 기반의 전원 장치를 개발하여 시스템의 고밀도, 경량화를 통해 효율적인 이동이 가능해야 한다.

본 논문에서는 5.4kW급 리튬 폴리머 배터리 기반의 HEMP용 고전압 충전기의 설계를 다루며, 단상 충전기와 삼성 충전기의 비교 시뮬레이션을 통해 제안하는 형태의 삼상 충전기가 갖는 장점들을 설명한다. 삼상 충전기의 경우 단상 충전기일 때 보다 하나의 스위치가 부담하는 전류량이 감소하게 되어 충전기의 장시간 구동에 적합하고, 리튬 폴리머 배터리의 부담과 스위치 양단에서 턴 오프 시 발생하는 스파이크 전압의 크기를 줄일 수 있는 장점을 갖는다.

논문의 순서는 본론에서 단상 풀브릿지 구조의 충전기와 삼상 델타 와이 변압기 구조의 충전기를 비교하여 삼상 충전기의 장점들을 확인하며, 실험 결과를 통해 제안하는 충전기의 출력 전압과 동작 성능을 검증하고, 결론으로 실험 내용들을 정리하며 끝을 맺는다.

2. 5.4kW급 단상·삼상 고전압 커패시터 충전기의 분석·비교

제안하는 5.4kW급 충전기의 시스템 사양은 표 1과 같다. 시스템의 사양을 만족시키도록 단상과 삼상 컨버터를 설계하고 그 성능을 시뮬레이션으로 확인하였으며, 단상 혹은 삼상의 구조 중 HEMP 구동용 5.4kW급 충전기에 적합한 구조를 선정하기 위해 시뮬레이션 결과를 비교하였다.

2.1 단상 고전압 커패시터 충전기 설계 및 분석

설계한 단상 충전기는 풀브릿지 구조로 4개의 스위치를 이용하였으며, 그림 1과 같이 LCC 공진 컨버터 회로와 출력 정류부의 배압 회로로 구성된다. LCC 공진 컨버터 부는 직렬 공진 커패시터(C_s)가 병렬 공진 커패시터(C_p)보다 큰 값을 갖는다는 점과 공진 전류는 사다리꼴 형태로 도통한다는 점을 바탕으로 설계[3]하였고 그 내용을 간략히 정리하면 다음과 같다.

시스템 사양의 입력 전압과 출력 전력, 그리고 스위치의 동작 주파수로부터 병렬 커패시터와 공진 인덕터의 공진 주파수를 식 (1)과 같이 계산할 수 있다.

표 1 5.4kW급 고전압 충전기 시스템 사양
Table 1 Specifications of the proposed 5.4kW high voltage capacitor charger

변수	값	변수	값
입력 전압	44.44 [V]	출력 전압	600 [V]
전력 밀도	300 [kW/m^3]	출력 전류	9 [A_{avg}]

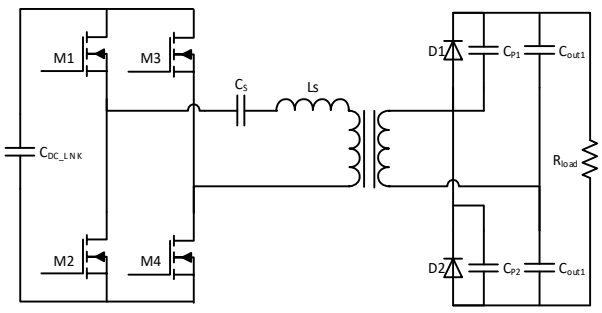

그림 1 제안하는 단상 고전압 커패시터 충전기 회로도
Fig. 1 Circuit of the proposed single phase high voltage capacitor charger

$$f_{op} = \frac{5}{8}\frac{f_s V_{\in put} I_{Ls\,peak}}{V_{\in put} I_{Ls\,peak} - P_O} \quad (1)$$

이 때 f_s는 스위칭 주파수, V_{input}은 입력 전압, $I_{Ls\ peak}$는 공진 전류의 첨두 값, P_O는 출력 전력을 의미한다.

$$t_{M2} = \frac{4T_s - 3T_{op}}{8} \quad (2)$$

$$V_{Cs\,peak} = \frac{I_{Ls\,peak} t_{M2}}{2C_s} \quad (3)$$

$$Z_{op} = \frac{2V_{\in put} + V_{Cs\,peak}}{I_{Ls\,peak}}, \qquad Z_{os} = \sqrt{\frac{L_S}{C_S}} \quad (4)$$

이 때 T_{op}는 식 (1)의 주파수의 주기, T_s는 스위칭 주기, t_{M2}는 공진 전류 파형의 일정 전류 값을 갖는 구간, $V_{Cs\ peak}$는 공진 커패시터의 첨두 전압 값, Z_{op}와 Z_{os}는 병렬 공진 특성 임피던스와 직렬 공진 특성 임피던스이다. 설계 수식들로부터 도출 된 단상 LCC 공진 컨버터의 변수들은 표 2와 같다.

그림 2는 계산 된 설계 변수를 적용한 시뮬레이션 결과로 5.4kW, 600V 출력 조건을 만족함을 알 수 있다. 그러나 시뮬레이션 결과의 유의해야할 사항은, 스위치로 흐르는 140 A_{rms}의 높은 전류로 인한 스위치 및 PCB의 발열과, 턴 오프 시 스위치 양단 전압에 입력 전압의 3.6배에 달하는 스파이크 전압이 발생한다는 점이다.

2.2 삼상 고전압 커패시터 충전기 설계 및 분석

단상 고전압 커패시터 충전기의 시뮬레이션에서 확인된 문제점들은 스위치로 흐르는 높은 전류로부터 야기되었다고 예상하여 다음과 같이 삼상 고전압 커패시터 충전기를 설계하고 시뮬레이션 결과를 비교해보았다.

표 2 제안하는 단상 고전압 커패시터 충전기의 설계 변수
Table 2 Design parameters of the proposed single phase high voltage capacitor charger

변수	값	변수	값
Ls (leakage)	430 [nH]	Cs (변압기 1차 측)	42 [uF]
턴수 비	7	C_p (변압기 2차 측)	10 [nF]
f_{sw}	70 [kHz]	Z_{os}	0.1 [Ω]

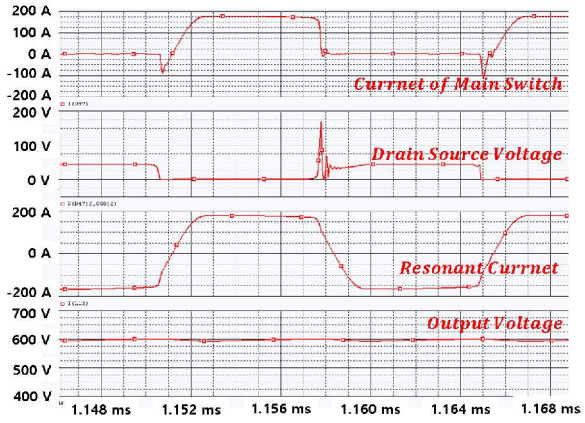

그림 2 제안하는 단상 고전압 커패시터 충전기 시뮬레이션 결과
Fig. 2 Simulation results of the proposed single phase high voltage capacitor charger

제안하는 삼상 고전압 커패시터 충전기는 그림 3과 같이 3개의 변압기가 사용되었으며 변압기의 1차 측은 델타결선, 2차 측은 Y결선으로 구성된다. 이러한 구조는 두 가지 이유로 메인 스위치에 흐르는 전류량을 감소시킨다. 첫 번째 이유는 600V의 출력 전압이 변압기 2차 측의 선간 전압에서 정류되므로 변압기 1차 측은 상 전압만큼의 전류만 흐르게 되기 때문이다. 두 번째는 6개의 스위치를 이용한 삼상 델타 결선으로 전류가 흐르는 동안 스위치는 항상 2개 이상 턴 온 되어 스위치 각각이 부담하는 공진 전류량이 감소한다.

삼상 고전압 커패시터 충전기의 설계는 델타 결선된 변압기의 누설 인덕턴스 값을 측정한 후 동일한 직렬 공진 특성 임피던스를 갖도록 직렬 공진 커패시턴스를 계산하는 과정으로부터 시작된다. 이 후 시뮬레이션을 이용해 삼상 고전압 커패시터 충전기의 설계 값들을 확인하였으며 표 3은 그 결과를 나타낸다.

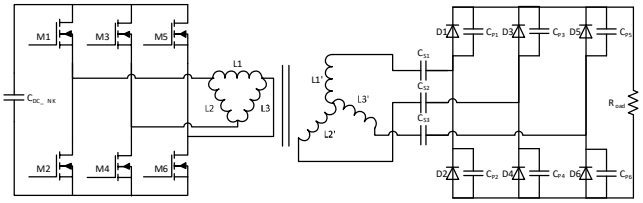

그림 3 제안하는 삼상 고전압 커패시터 충전기 회로도
Fig. 3 Circuit of the proposed three phase high voltage capacitor charger

표 3 제안하는 삼상 고전압 커패시터 충전기의 설계 변수
Table 3 Design parameters of the proposed three phase high voltage capacitor charger

변수	값	변수	값
Ls(leakage):Δ	2.2 [uH]	Cs (변압기 2차 측)	3 [uF]
Ls(leakage):Y	730 [nH]	Cs (변압기 1차 측)	75 [uF]
턴수 비	5	C_p (변압기 2차 측)	33 [nF]
f_{sw}	70 [kHz]	Z_{os}	0.09 [Ω]

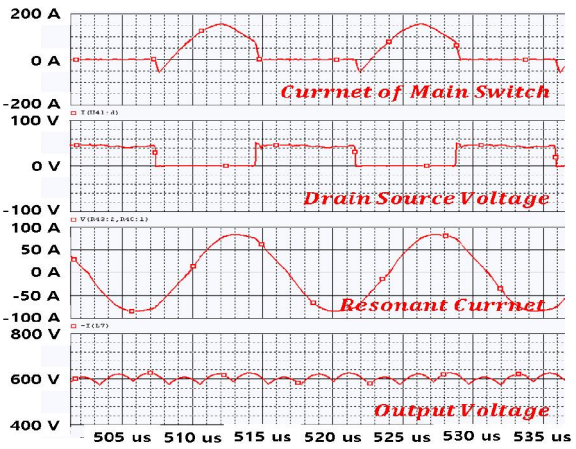

그림 4 제안하는 삼상 고전압 커패시터 충전기 시뮬레이션 결과
Fig. 4 Simulation results of the proposed three phase high voltage capacitor charger

그림 4의 시뮬레이션 결과는 5.4kW, 600V 동일 출력 조건에서 삼상 구조의 충전기라면 스위치로 흐르는 전류는 74 A_{rms}로 단상 충전기 보다 0.52배 낮은 전류가 흐르고, 턴 오프 시 스위치 양단의 스파이크 성 전압은 입력 전압의 1.1배로 단상 충전기 보다 작게 발생함을 확인하였다.

2.3 단상·삼상 고전압 커패시터 충전기 비교

HEMP 구동을 위한 고전압 커패시터 충전기와 같이, 저전압 고전류의 입력으로부터 고전압의 출력을 달성하기 위해서는 단상 충전기보다 삼상 충전기를 이용해 메인 스위치의 전류 손실을 줄이고 턴 오프 시 발생하는 스파이크 전압의 크기도 감소시킬 수 있음을 시뮬레이션 결과로 확인하였다. 삼상 충전기는 단상 충전기보다 2개의 스위치와 2개의 변압기를 추가적으로 사용되어야 하지만 대용량의 전류를 이용하기 용이하며 동일 용량의 출력 조건에서 팬과 같은 냉각 소자들을 사용하지 않을 수 있어 고밀도화에 적합하다고 판단되어, 본 논문에서는 HEMP용 고전압 커패시터 충전기로 삼상 구조를 선택하였다.

3. 실험 결과

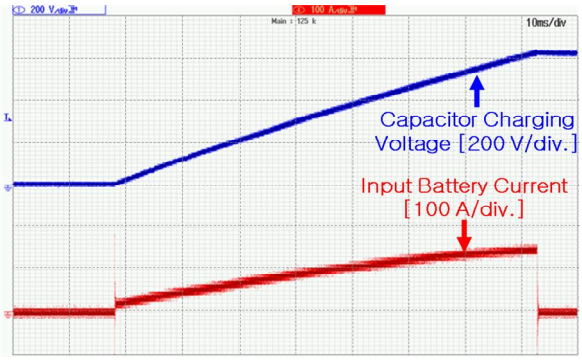

그림 5 제안하는 삼상 고전압 커패시터 충전기 동작 파형
Fig. 5 The operation waveform of the proposed three phase high voltage capacitor charger

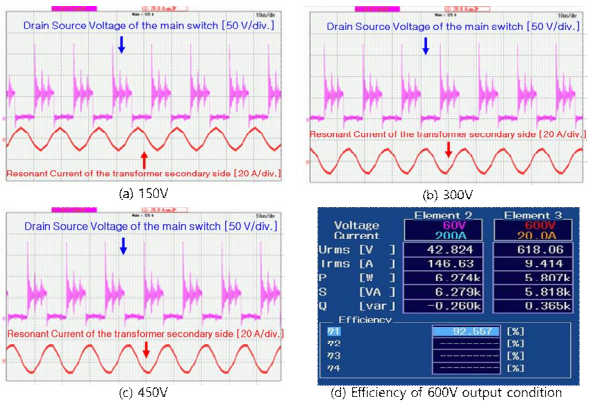

그림 6 커패시터 부하 충전 전압 별 동작 파형과 저항부하 실험 효율 측정 결과
Fig. 6 The operation waveforms of the capacitor charger with capacitor load (a) 150V charged voltage. (b) 300V charged voltage. (c) 450V charged voltage. (d) Measured efficiency of the proposed capacitor charger with the resistor load.

제안하는 HEMP 구동용 고밀도 고전압 삼상 커패시터 충전기는 삼상 델타 Y 변압기 구조로 제작되었으며 실제 실험 파형은 그림 5와 그림 6과 같다. 충전기 구동에 따라 입력 전압원인 LiPo 배터리로부터 최대 150A의 전류를 사용하는 것을 확인하였고, 메인 스위치의 양단 전압에서 발생하는 턴 오프 피크 전압은 시뮬레이션 결과보다 더 높게 측정 되는데 이는 PCB 및 도선의 인덕턴스에 의한 영향이며 이웃한 메인 스위치의 턴 오프 순간마다 피크 전압이 발생함을 알 수 있다. 또한, 66.66Ω 저항 부하로 600V 출력 조건에서 92.56% 전력 효율을 측정하였으며 그 결과는 그림 6의 (d)와 같다.

4. 결 론

본 논문에서는 LiPo 배터리를 이용한 고밀도 고전압 커패시터 충전기의 단상과 삼상 구조의 설계 방법과 설계한 충전기의 시뮬레이션 결과를 바탕으로 각 구조별 특징을 비교하였다. 그 결과 델타 Y 결선을 이용한 삼상 구조의 LCC 공진 컨버터가 LiPo 배터리 전압원과 같은 낮은 입력 전압과 높은 입력 전류 조건에서 단상 구조의 LCC 공진 컨버터보다 스위치 별 전류 부담을 줄일 수 있음을 확인하였고, 설계한 삼상 LCC 공진 컨버터를 구현하여 저항 및 커패시터 충전 실험을 통해 배터리 기반의 HEMP용 고밀도 고전압 충전기의 정상 동작을 확인하였다.

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

참 고 문 헌

[1] 이성동, 박수영, 박복룡, 안희남, "정보통신기반시설 고출력 전자파 영향 및 대책 연구", 2014.

[2] 장동원, 최형도, "전자기 펄스 표준화 동향 연구", 주간기술동향 통권 1464호, pp. 1 13, 2010.

[3] S. R. Jang, C. H. Yu, and H. J. Ryoo, "Trapezoidal Approximation of LCC Resonant Converter and Design of Multi Stage Capacitor Charger for Solid State Marx Modulator," IEEE Trans. Power Electronics, vol. 33, DOI 10.1109/TPEL.2017.2716975, no. 5, pp. 3816 3825, May. 2018.