

# 배터리 구동형 40 kV 펄스 전원 장치

안재범, 조찬기, 유창어, 정우철, 류홍제  
 중앙대학교

## Battery based 40 kV Pulsed Power Modulator

Jae-Beom Ahn, Chan-Gi Cho, Chang-Yu Liu, Woo-Cheol Jeong, Hong-Je Ryoo  
 Chung Ang University

### ABSTRACT

본 논문은 리튬폴리머 배터리를 기반으로 한 40 kV 펄스전원 장치의 설계를 다룬다. 기존에 설계된 펄스전원 장치는 삼상 380 V AC 입력 전원을 통해 구동되었으나, 이를 배터리 기반 2 kW 용량의 고전압 충전기를 통해 구동하도록 설계한다. 이 고전압 충전기는 44 V 리튬 폴리머 배터리를 기반으로 2 kW의 출력 용량을 갖도록 삼상 델타-와이 변압기 구조의 LCC 공진형 컨버터로 제작된다. 이를 통해 설계된 펄스전원 장치는 최대 전압 40 kV, 펄스 폭 1.5 us - 5 us, 최대 펄스 반복율 3 kHz의 사양을 갖는다. 본 논문을 통해 2 kW급 고전압 충전기의 설계 및 분석을 하고 시뮬레이션 결과, 실험 결과를 분석한다. 또한 배터리 기반 40 kV 펄스 전원 장치의 시스템을 설명하며, 저항부하 실험을 통해 안정적인 동작과 성능을 검증한다.

### 1. 서 론

반도체 스위치 기반의 펄스전원 장치는 고전압 펄스를 출력하는데 있어 펄스폭 및 반복율의 제어가 가능하고 빠른 스위칭이 가능한 장점이 있다. 또한 스파크 갭이나 사이로트론과 같은 기계식 스위치에 비교하여 스위치 수명이 긴 장점이 있어 환경 분야와 농업, 의료, 국방 분야 등 다양한 응용분야에 반도체 스위치를 이용한 펄스전원 장치가 개발되고 있다.<sup>[1]</sup>

그중 High-Altitude Electromagnetic Pulse (HEMP, 고밀도의 전자기펄스 발생장치)는 배터리나 축전기를 통해 저장된 에너지를 빠르게 스위칭하여 순간적으로 방출함으로써 고출력의 펄스 전력을 발생시키는 기술이다. 이와 같은 기술을 이용하여 레이더(RADAR)나 전자총(Electron gun)과 같은 전자기 펄스 무기 등으로 개발할 수 있다. 단, 군사 목적이나 테러 방지 목적 등 다양한 상황에 사용되기 위해 이동성이 요구되며, 배터리와 같은 휴대용 전원을 통해 전원을 공급받아야 한다.<sup>[2]</sup>

본 논문에서는 개발된 최대 40 kV, 최대 300 A, 펄스 폭 1.5 - 5us, 최대 반복율 3 kHz의 사양을 갖는 펄스전원 장치를 바탕으로, 기존 3상 380 V AC 입력전원 대신 리튬 폴리머 배터리 기반의 2 kW 고전압 충전기를 통해 입력 전원을 공급하여, 이동 가능한 배터리 구동형 40 kV 펄스 전원장치를 설계한 내용을 다룬다.

논문의 순서로 44 V 배터리를 입력 전원으로 한 2 kW 급

고전압 충전기 설계 및 분석을 다루며, 배터리를 기반으로 한 40 kV 펄스전원 장치의 구조 및 사양을 설명한다. 그리고 시뮬레이션 및 실험 결과를 통해 설계된 충전기의 성능과 구동, 배터리를 기반으로 한 40 kV 펄스전원 장치의 동작과 성능을 검증한다.

### 2. 배터리 기반 펄스 전원장치 설계

#### 2.1 2KW급 삼상 고전압 충전기 설계 및 분석

기존 40 kV 펄스 전원 장치는 삼상 380 V AC 입력 전원을 통해 구동되었으나, 이 입력 전원을 대체할 배터리 기반 2 kW, 600 V 출력의 고전압 충전기를 설계한다. 2 kW 충전기는 44 V 리튬 폴리머 배터리를 입력전원으로 사용하였다. 용량 22000 mAh, 최대 방전을 35C+로서 전류를 최대 770 A까지 흘릴 수 있으며, 2 kW 정격 출력을 위해서 입력 전압이 낮아 입력 전류가 높은 단점이 있다. 따라서 각 스위치에 흐르는 전류의 부담을 감소시킬 수 있는 삼상 구조로 설계하였다. 또한 정류부에서 변압기의 2차 측 선간전압을 정류할 수 있는 델타-와이 결선으로 설계하여 동일한 전압을 출력하기 위한 변압기 턴수비를 감소시킬 수 있도록 설계하였다. 설계한 삼상 델타-와이 구조의 공진형 컨버터의 회로도를 그림 1에 나타내었다.

설계된 LCC 공진형 컨버터는 직렬 공진 주파수 이상의 영역에서 CCM 모드로 동작하며, 변압기의 누설 인덕턴스 성분과 변압기 2차 측의 직렬 공진 커패시터, 2차측 정류 다이오드에 병렬로 연결된 병렬 공진 커패시터를 공진탱크로 이용하였다. 병렬 공진 커패시터는 직렬 공진 커패시터의 값보다 매우 작은 값으로 설계하여 2차측 병렬 공진 커패시터의 전압이 빠르게 충전 및 방전 되는 특징을 갖는다. 제안하는 2 kW급 고전압 충전기의 설계된 파라미터는 표1에 나타내었다.

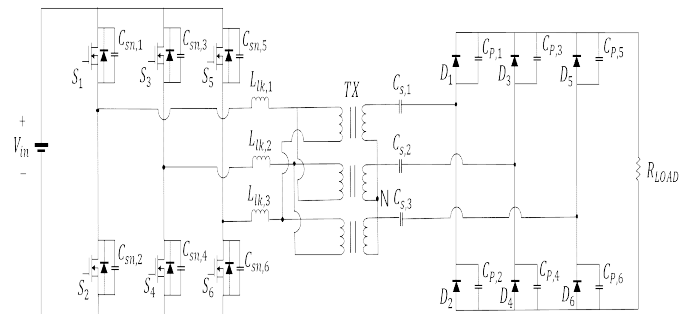


그림 1 2 kW 삼상 고전압 충전기 회로도

Fig. 1 Circuit of 2 kW three-phase high voltage capacitor charger

Parameter	Value
Input voltage	44 V
Switching frequency	38 kHz
Transformer core	EC 90x90x30
Turns ratio	6 [5 : 30]
Primary winding	40 AWG Litzwire 0.07mm / 1100심
Secondary winding	40 AWG Litzwire 0.08mm / 260심
Leakage inductance [ $L_{lk,1-6}$ ]	6 uH
Series resonant capacitance [ $C_{s,1-3}$ ]	3 uF
Parallel resonant capacitance [ $C_{p,1-6}$ ]	47 nF
Snubber capacitance [ $C_{sn,1-6}$ ]	68 nF

표 1 2 kW 충전기 설계 Parameter  
Table 1 Design parameters of the 2 kW capacitor charger

충전되며, 저장된 에너지를 통해 40 kV 펄스 전원 장치 충전부에 전원을 공급한다. 또한 커패시터 뱅크의 600 V는 방전부의 펄스 컨트롤러 인버터부의 입력 전압으로 공급된다.

40 kV 펄스 전원 장치는 고전압 충전부와 40 kV 방전부로 구성되어 있다. 고전압 충전부(Capacitor charger)는 풀브릿지 LCC 공진형 컨버터 기반으로 설계되었으며, 40 kV 방전부는 총 4개의 스테이지로, 각 스테이지에 12개의 셀이 직렬로 연결되어 있으며, 각 파워셀은 IGBT, 바이패스 다이오드로 구성되어 있다. 충전부는 방전부에 파워 루프 변압기를 통해 절연된 형태로 전력을 공급하며, 방전부의 각 파워셀이 각각 병렬로 800V 까지 충전된다. 방전시에는 펄스 컨트롤러로부터 컨트롤 루프를 통해 각 셀의 게이트 드라이버로 동기화 된 신호를 보내 최대 40 kV를 출력한다. 배터리 기반 40kV 펄스전원장치의 사양을 표 2에 나타내었다.

Input Voltage	44 V
Pulse Output Voltage	0 - 40 kV
Pulse Output Current	0 - 300A
Average Power	2 kW
Maximum Peak Power	12 MW
Maximum Repetition Rate	3 kHz
Pulse width	1.5us - 5us

표 2 배터리 기반 40 kV 펄스전원장치 사양  
Table 2 Specification of battery based 40 kV pulsed power modulator

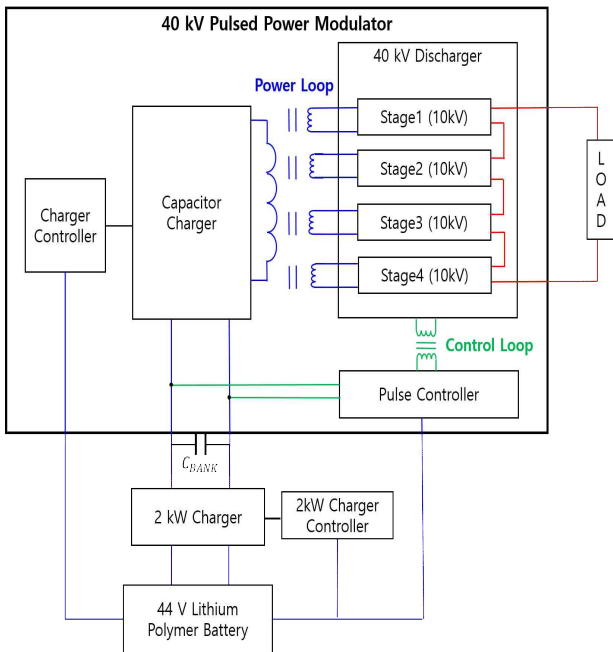


그림 2 배터리 기반 펄스전원장치 구조도  
Fig. 2 The structure of designed battery based 40 kV pulsed power modulator

## 2.2 배터리 기반의 40 kV 펄스 전원 장치

그림 2은 배터리 기반의 40 kV 펄스 전원 장치를 나타낸 구조도이다. 44 V 리튬 폴리머 배터리는 2 kW 충전기 및 컨트롤러의 입력 전원으로 공급된다. 또한 기존 SMPS를 통해 입력을 받던 40 kV 펄스전원장치의 충전기 컨트롤러, 그리고 펄스 컨트롤러도 44 V 배터리를 통해 전원이 공급된다.

2 kW 충전기를 통해 출력 전압 600 V가 커패시터 뱅크에

## 3. 시뮬레이션 및 실험 결과

### 3.1 2kW급 삼상 고전압 충전기 시뮬레이션 및 저항 부하 실험

표1의 설계 파라미터에 따라 P-spice 시뮬레이션을 진행한 결과 파형을 그림 3에 나타내었다. 스위치의 On-off에 따라 변압기의 2차 측에 공진 전류가 사인파 형태로 흐르는 것을 확인할 수 있으며, 구동 주파수 38 kHz에서 600V, 4A 출력을 하였다. 또한 메인 스위치의 양단의 스너버 커패시터가 공진 인덕터에 저장된 에너지를 통해 방전되어, 턴온 순간에 전류가 스위치의 역병렬 다이오드를 통해 흐름으로서 Zero Voltage Switching 되는 것을 확인할 수 있다.

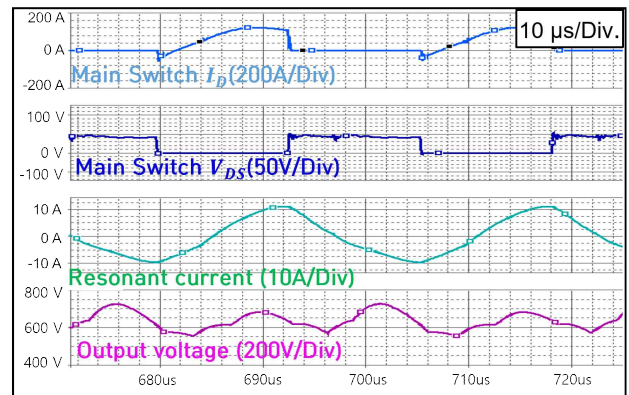


그림 3 2 kW 충전기 시뮬레이션 및 저항 부하 실험 파형  
Fig. 3 Simulation and experimental waveforms of the 2kW capacitor charger

### 3.2 2KW급 삼상 고전압 충전기 시뮬레이션 및 저항 부하 실험

제작된 2 kW 고전압 충전기에 140 Ω 저항부하를 이용하여 실험한 파형을 그림 4에 나타내었다. 시뮬레이션과 마찬가지로 최소 스위칭 주파수인 38 kHz 로 구동하였으며, 시뮬레이션 결과와 같이 변압기 2차측의 공진전류의 peak to peak 값이 약 20A로 동일하게 출력되었다. 메인 스위치의 양단에서 턴 오프 시 작은 링잉이 발생하는데, 이것은 PCB의 기생 인덕턴스 성분으로 인해 스누버 커패시터와의 공진에 의한 영향으로 보인다. 본 실험을 통해 44 V 배터리를 이용한 2 kW, 600 V 정격 출력이 안정적으로 가능함을 확인하였다.

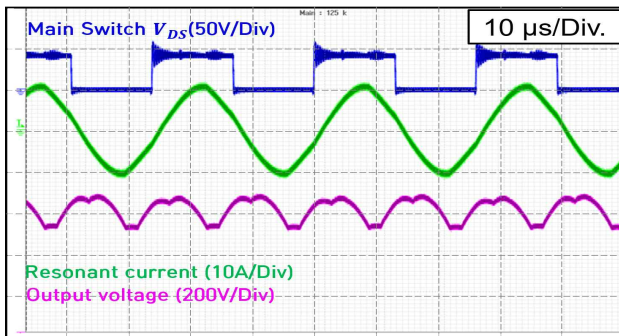
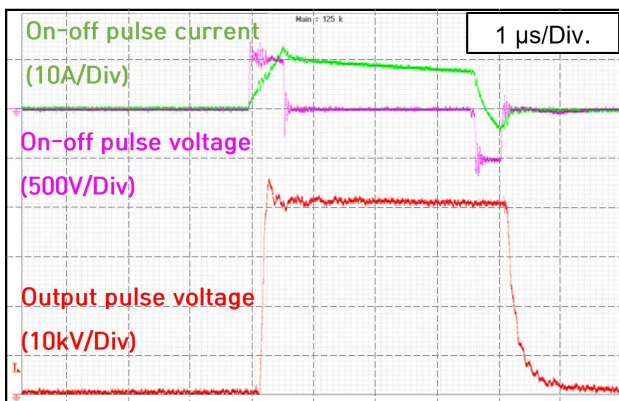


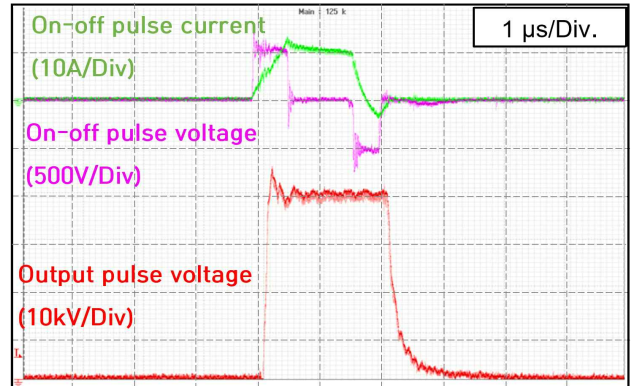
그림 4 2 kW 충전기 저항부하 실험 파형  
Fig. 1 Experimental waveforms of the 2 kW capacitor charger

### 3.3 배터리 기반 40 kV 펄스전원장치 저항부하 실험

앞서 실험 된 2 kW 충전기와 40 kV 펄스전원장치와의 시스템을 구성한 뒤, 배터리 기반의 펄스 전원장치의 구동 및 신뢰성을 검증하기 위해 666Ω 저항 부하를 이용하여 실험을 진행하였다. 그림 4는 펄스 컨트롤러의 On-off 펄스 신호가 인가됨에 따라 40 kV, 30A 출력 조건에서 펄스폭 2us, 반복율 375 Hz 로 출력된 파형과 펄스폭 4.2us, 반복율 140 Hz로 출력된 파형이다. 이를 통해 배터리 기반의 펄스 전원 장치가 안정적으로 원하는 정격 출력 구동이 가능하며 펄스 폭 또한 조절이 가능함을 확인하였다.



(a) 40 kV, 30 A, 최대 펄스폭, 최소 반복을 출력



(b) 40 kV, 30 A, 최소 펄스폭, 최대 반복을 출력  
그림 4 배터리 기반 40 kV 펄스 전원 장치 펄스 출력 파형  
Fig. 4 Experimental waveforms of the designed 40 kV pulsed power modulator

### 3. 결론

본 논문에서는 개발된 최대 40 kV, 최대 300 A, 펄스 폭 1.5 us - 5 us, 최대 반복율 3 kHz의 사양을 갖는 펄스전원 장치를 바탕으로, 입력 정류부에 기존 3상 380 V AC 입력전원을 대체하기 위해 리튬 폴리머 배터리 기반의 2 kW, 600 V 출력의 고전압 충전기를 설계하고, 충전기 및 펄스 컨트롤러의 입력전원도 기존 SMPS 입력전원을 대체하기 위해 배터리를 이용하여 공급함으로써 배터리 구동형 40 kV 펄스 전원장치를 설계한 내용을 다루었다. 2 kW 충전기의 설계와 시뮬레이션 및 실험 결과를 통해 2 kW, 600 V가 안정적으로 출력되는 것을 확인 하였으며 배터리 기반의 40 kV 펄스 전원 장치의 저항 부하 실험 결과를 바탕으로 40 kV 출력 구동이 가능하며, 펄스 폭 조절 또한 가능함을 검증하였다.

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

본 연구는 2018년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No.20184030202270)

### 참 고 문 헌

- [1] Seung-Bok Ok, "Design of High Efficiency 40kV, 150A, 3kHz Solid-state Pulse Power Modulator", IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 40, No. 10, pp. 2569-2577, 2012, Oct
- [2] 최진수, 임동우, "전자기 펄스 발생과 응용", 물리학과 첨단기술 January/February 2006, pp. 36-41.