

배터리 기반 2단 충전 9 kJ/s 고전압 충전기 설계

조찬기¹, 가재예¹, 류홍제[†]

Design of 9 kJ/s High Voltage LiPo Battery based 2-stage Capacitor Charger

Chan-Gi Cho¹, Ziyi Jia¹, and Hong-Je Ryoo[†]

Abstract

A lithium polymer battery-based 9 kJ/s high-voltage capacitor charger, which comprises two stages, is proposed. A modified LCC resonant converter and resonant circuit are introduced at the first and second stages, respectively. In the first stage, the methods for handling low-voltage and high-current batteries are considered. Delta-wye three-phase transformers are used to generate a high output voltage through the difference between the phase and line-to-line voltages. Another method is placing the series resonant capacitor of the LCC resonant components on the transformer secondary side, which conducts considerably low current compared with the transformer primary side. On the basis of the stable operation of the first charging stage, the secondary charging stage generates final output voltage by using the resonance. This additional stage protects the rectifying diodes from the negative voltage when the output capacitor is discharged for a short time. The inductance and capacitance of the resonance components are selected by considering the resonance charging time. The design procedure for each stage with the aforementioned features is suggested, and its performance is verified by not only simulation but also experimental results.

Key words: Lithium polymer battery, Three phase resonant converter, High voltage capacitor charger

1. 서 론

High Power Electromagnetics (HPEM)는 고밀도의 전자기 방사능을 발생시켜 발생점 주위의 전기전자 시스템에 손상을 주거나 파괴를 일으키는 현상 및 기술을 말한다. 이는 Electro Magnetic Pulse (EMP) 실험용으로 쓰이거나 미사일, 드론과 같은 이동 수단에 실어서 국지적으로 전기전자 시스템을 마비시키는 무기로 사용된다.^{[1]-[3]}

이에 따라 계통 전원과 무관한 독립적인 전원 기반의 장치들로 Lithium Polymer (LiPo) 배터리 단일 셀 전압 (2.7-4.2 V)을 이용하는 저전력 벽, 부스트 전원 장치에

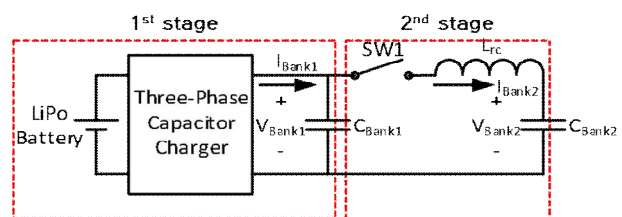


Fig. 1. Entire schematic of the proposed 2-stage high voltage capacitor charger.

관한 연구가 이루어지고 있다^{[4]-[6]}. 그러나, Lithium 이온 배터리를 입력 전압원으로 하는 대용량 전원 장치는 단일 셀 전압으로 구현하기 어렵고, 낮은 입력 전압 때문에 100A 이상의 전류가 발생하여 높은 턴-오프 피크 전압과 스위칭 시 발생하는 손실, 그리고 스위치 및 변압기의 발열이 야기되는 등의 어려움이 있다. 따라서, 대용량 전원 장치에 관한 연구로는 풀 브릿지나 하프 브릿지를 이용하여 단일 스위치에 흐르는 전류량을 줄이는 방법^[7]이 있지만 낮은 스위칭 주파수와 추가적인 인덕터를 사용해야하는 단점이 있으며, 컨버터를 2단 스테이지로 설계하여 승압하는 방법^[8]은 외부 인덕터의 사용

Paper number: TKPE-2019-24-4-5

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: hjryoo@cau.ac.kr, School of Energy Systems Eng., Chung-Ang University

Tel: +82-2-820-5178 Fax: +82-2-3280-5867

¹ Dept. of Energy Systems Engineering, Chung-Ang University

Manuscript received Jan. 21, 2019; revised Feb. 14, 2019; accepted Apr. 2, 2019

— 본 논문은 2018년 전력전자학술대회 우수추천논문임

— 본 논문은 2018년 전력전자학술대회 우수논문상 수상논문임

과 사용되는 스위칭 소자의 증가라는 단점이 있다.

본 논문에서는 독립적인 입력 전압원으로 LiPo 배터리를 활용하여 150A 이상의 대용량 입력 전류를 다루는 2단 충전 9 kJ/s 고전압 커패시터 충전기를 제안한다. 충전기는 그림 1과 같이 1단 충전부와 2단 충전부로 구성되며, 1단 충전부는 공진 주파수 이상의 영역에서 동작하는 3상 LCC 공진형 컨버터를 적용하여, 변압기의 누설 인덕턴스로 외부 공진 인덕터를 대체하였고 공진 커패시터를 변압기 2차 측에 위치시켜 사용한 소자들의 전류 부담을 줄였다. 2단 충전부는 리액터와 커패시터로 공진 회로를 구성해 단일 스위치만을 이용한 간단한 회로로 목표 출력 전압인 1.0 kV를 달성하고, 1단 충전부의 승압비를 낮추어 메인 인버터부의 전류 부담을 줄인다. 또한, 스위치(SW1)와 공진 인덕터(L_{rc})로 1단 충전부와 펄스 방전부를 분리하여 HEMP 발생 순간의 reflecting pulses 그리고 커패시터(C_{Bank2})의 역전압으로부터 충전부를 보호하는 장점을 갖는다.

논문의 순서는 다음과 같다. 2장에서 2단 충전 구조를 설명하고, 각 충전부의 설계 과정과 시뮬레이션 결과를 분석한다. 그 후 3장에서 실무하 실험 파형과 시뮬레이션 결과를 비교하여 제안하는 2단 충전 고전압 커패시터 충전기의 성능을 검증하고, 결론에서 실험 내용들과 제안하는 충전기의 특징을 정리한다.

2. 배터리 기반 2단 충전 9 kJ/s 고전압 충전기 설계 및 분석

제안하는 배터리 기반 2단 충전 고전압 충전기는 그림 1과 같은 구조를 갖는다. 1단 충전부에서 리튬폴리머 배터리 전압 44 V는 삼상 변압기를 통해 커패시터뱅크 1에 600 V로 승압되어 저장된다. 그 후 600 V는 2단 충전부의 SW1이 턴-온 되어 공진 인덕터(L_{rc})와 커패시터뱅크2(C_{Bank2})간 공진이 발생한다. 공진으로 커패시터뱅크2의 전압이 높아지도록 커패시터뱅크1과뱅크2의 커패시턴스를 설계하였으며 최종 출력 전압 1.0 kV가 커패시터뱅크2에 인가된다. 1단 충전부와 2단 충전부의 사양은 표 1에 정리하였다.

2.1 1단 충전부: 삼상 고전압 커패시터 충전기 설계 및 분석

1단 충전부는 공진 주파수 이상에서 동작하는 삼상 LCC 공진형 컨버터로 제작되었다. 리튬폴리머 배터리의 낮은 44 V 입력 전압에 따라 150 A 이상의 높은 전류가 배터리에서 삼상 인버터부로 도통된다. 단일 스위치당 전류량을 줄이고 9 kJ/s의 출력 용량을 고려하여 그림 2(a)와 같이 삼상 구조로 설계하였으며, 삼상 변압기를 델타-와이로 결선하여 상 전압이 아닌 선간 전압을 출력 전압으로 정류한다. 따라서, 제안하는 회로는 상

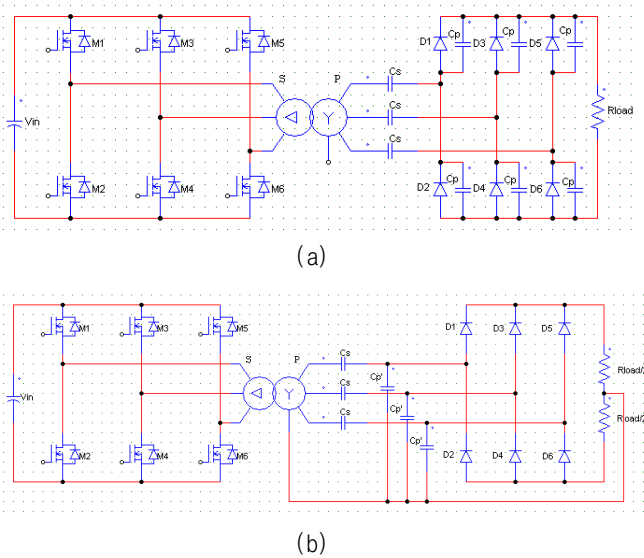


Fig. 2. Circuits of the proposed three phase high voltage capacitor charger (a) Original circuit diagram, (b) Modified circuit diagram for the design.

TABLE I
SPECIFICATIONS OF THE 9 kJ/s 2-STAGE HIGH VOLTAGE CAPACITOR CHARGER

Parameter	Value	Parameter	Value
LiPo Battery	44 [V]	V_{Bank1}	600 [V]
I_{Bank1}	15 [A _{avg}]	V_{Bank2}	1.0 [kV]

TABLE II
DESIGN PARAMETERS OF THE 9 kJ/s THREE PHASE HIGH VOLTAGE CAPACITOR CHARGER

Parameter	Value	Parameter	Value
$L_s(\text{leakage}):\Delta$	1.04 [uH]	C_s (2 nd side of TR)	3 [uF]
turns ratio	5.6	C_p (2 nd side of TR)	106 [nF]
f_{sw}	68 [kHz]	Z_{os}	0.06 [Ω]
V_{in}	44 [V]	R_{load}	40 [Ω]

전압과 선간 전압의 차이만큼 변압기의 턴수비를 감소시키는 것을 특징으로 한다. 또한, 공진 커패시터를 변압기 2차 측에 배치하여 상용화 되어 있는 고전압, 저전류의 정격 용량을 특징으로 하는 필름 커패시터들을 이용하기 적합하도록 설계하였고 그림 2(a)와 같이 구성한다.

삼상 공진형 컨버터를 설계 및 분석하기 위하여 그림 2(b)와 같이 Y결선 된 변압기의 중성점을 이용하고 [9]-[11], 공진 전류가 사다리꼴형태를 갖도록 [12] 공진 변수들을 설계한다. 계산된 설계 변수 값을 표 2에 정리하였다. 그림 3은 이러한 설계 변수들의 시뮬레이션 결과로 메인 스위치의 드레인-소스 전압, 스위치의 도통 전류,

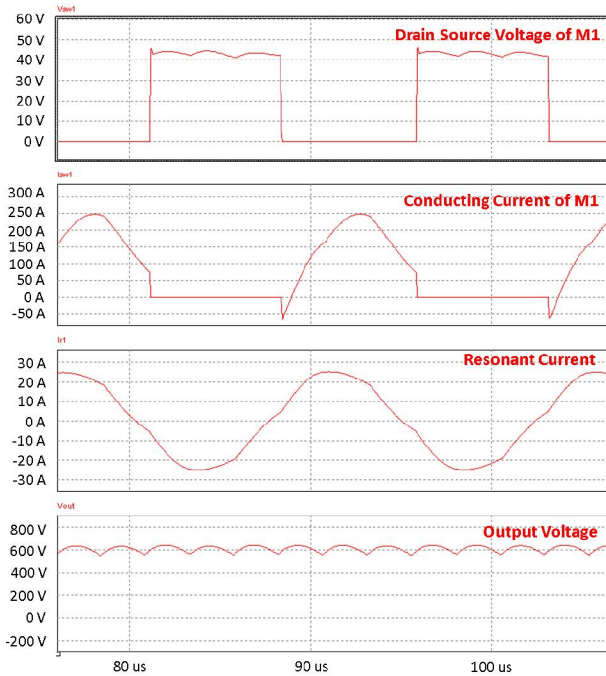


Fig. 3. Simulation results of the proposed 9 kJ/s three phase high voltage capacitor charger.

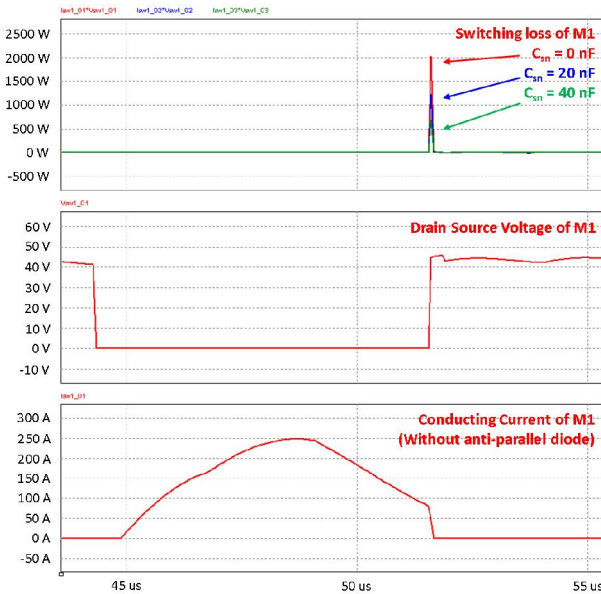


Fig. 4. Switching loss variation simulation results with snubber capacitances.

변압기 2차 측의 공진 전류, 그리고 출력 전압을 나타낸다. 공진 주파수 이상에서 동작하는 삼상 LCC 공진형 컨버터의 소프트 스위칭 턴-온 조건을 만족하기 위해서는 스위치가 켜지는 순간 스위치의 도통 전류가 음의 값이어야 한다. 스위치의 역방향 다이오드로 전류가 도통되는 동안 영전압 턴-온을 구현해야하기 때문이다. 따라서, 5.6 턴수비에 68 kHz의 스위칭 조건 시뮬레이션 결과는 600 V 출력에서 영전압 턴-온의 소프트 스위칭이 이루어 짐을 보여준다. 턴-온과 달리, 턴-오프 시에는

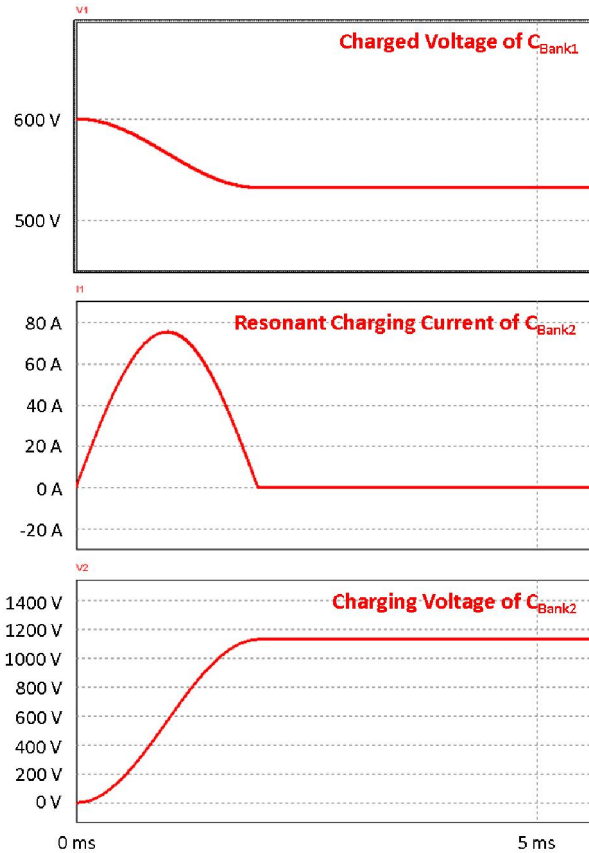


Fig. 5. Simulation results of the proposed second charging part.

손실이 발생하지만 스너버 커패시터를 이용해 스위치 손실을 보상하였으며, 스너버 값에 따라 변화하는 스위치 손실량은 그림 4와 같다.

2.2 2단 충전부: 공진 충전 회로 설계 및 분석

2단 충전부에서는 그림 1의 커패시터(C_{Bank1})의 600 V 전압을 공진 인덕터(L_{rc})를 이용하여, 최종 출력 전압 1000 V를 두 번째 커패시터 뱅크(C_{Bank2})에 인가한다. 이와 같이 공진 인덕터(L_{rc})와 SW1으로 C_{Bank1} 과 C_{Bank2} 를 분리하는 2단 공진 충전 방법을 이용하면 HEMP 발생부와 충전부 간 전기적 절연을 확보 할 수 있고, C_{Bank2} 을 방전 시켰을 때 생성되는 음전압으로부터 충전부의 정류 다이오드들을 보호 할 수 있다.

C_{Bank2} 의 84 uF을 1.0 kV로 2 ms이내에 충전하는 것을 기준으로 커패시턴스와 인덕턴스를 선정하였고 선정 과정은 다음의 수식을 이용하였다.

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

$$i(t) = \frac{V_{in}}{Z_o} \sin w_o(t - t_0) \quad (2)$$

$$V(t) = V_{in} - V_{in} \cos w_o(t - t_0) \quad (3)$$

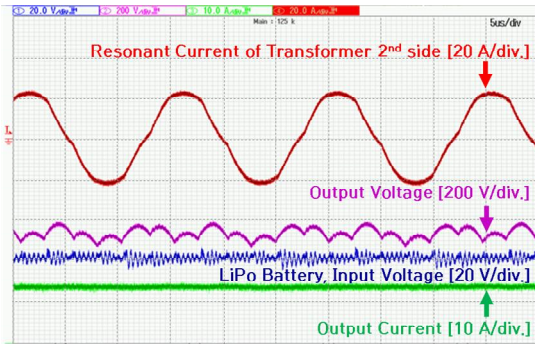
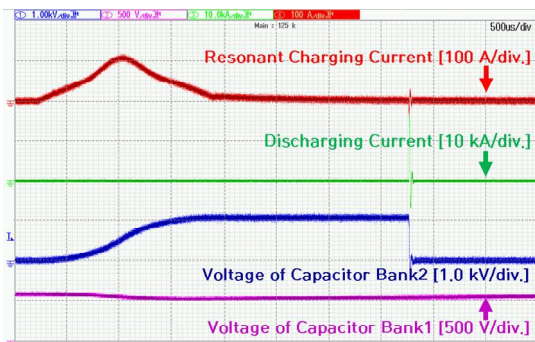
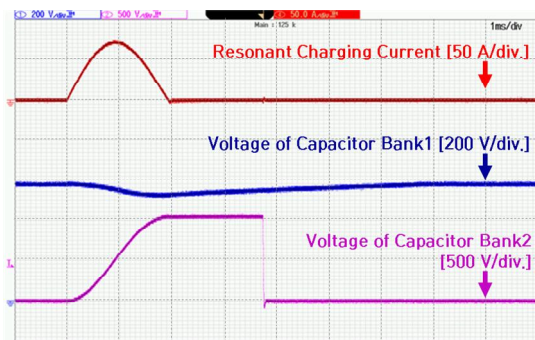


Fig. 6. Proposed first charging part experimental waveforms with resistor load.



(a)



(b)

Fig. 7. Resonant charging experimental waveforms (a) Saturation occur of the used reactor, (b) Saturation does not occur of the used reactor.

수식 (1)의 Z_0 는 특성 임피던스, ω_0 는 각주파수, f_r 은 공진 주파수, V_{in} 은 C_{Bank1} 의 초기 전압을 의미하고, 수식 (2)와 (3)으로 각각 공진 충전 전류와 최종 출력 전압을 표현한다. 이 때 C_{Bank1} 의 커패시턴스는 C_{Bank2} 의 커패시턴스 보다 매우 큰 값을 사용하기 때문에 이상적인 전압원으로 가정하여 수식 (2), (3)과 같이 2계 선형 미분 방정식으로 정리하였다.

수식 (3)은 출력 전압의 최대값이 입력 전압 V_{in} 의 2 배임을 보여준다. 따라서 1.0 kV의 목표 전압을 달성하기 위해 1단 충전부의 출력 전압은 이상적인 경우라면 500 V로 설계 가능 하지만, 실제 회로 구현 시 커패시터의 내부 저항과 도선의 저항 등 기생 성분들이 존재

하여 손실이 있기 때문에 20%의 마진을 고려하여 C_{Bank1} 의 전압을 600 V로 선정하였다. 이 후 공진 충전 시간 2 ms는 공진 주파수와 공진 인덕턴스를 250 Hz (공진 주기는 4 ms)와 4.82 mH로 선정하여 구현하였다. 선정 한 공진 인덕턴스와 공진 커패시턴스로부터 특성 임피던스를 수식 (1)로 계산할 수 있고, 계산 한 특성 임피던스와 수식 (2)를 연립하면 공진 충전 전류의 침투값은 79.2 A로 계산된다.

설계한 2단 충전부의 시뮬레이션 결과는 그림 5와 같다. 시뮬레이션의 초기 조건으로 1단 충전부의 1.4 mF는 600V로 충전되어 252J의 에너지를 저장하고 있으며, SW1이 닫히면 L_{rc} , C_{Bank1} , 그리고 C_{Bank2} 에 공진 현상이 발생하여 최종 출력 측인 84 uF의 C_{Bank2} 에 1.000 V의 전압이 충전된다. 즉, C_{Bank1} 에 저장되어 있던 252J의 에너지 중 42J의 에너지가 2 ms의 시간 동안 C_{Bank2} 로 전이됨을 의미하고, 공진 충전 전류의 시뮬레이션 침투값과 계산된 값이 일치함을 보여준다.

3. 실험 결과

제안하는 HEMP 구동용 고밀도 고전압 삼상 커패시터 충전기는 1단 충전부와 2단 충전부로 구성되며 각 부의 실험 결과를 그림 6과 7로 나타내었다.

그림 6의 1단 충전부 실험 파형은 40옴 저항부하를 이용하여 측정하였으며 3장의 시뮬레이션과 유사한 결과를 얻었다. 변압기 2차 측의 공진 전류 침투 값은 20 A이고, 출력 전류는 15 A로 9 kJ/s 용량을 달성하였고, 측정 효율은 배터리의 입력 전압 46V 조건에서 94 %로 측정 되었다. 출력 전압에 존재하는 리플은 필터 커패시턴스가 매우 작은 값이기 때문에 발생하는 현상으로, HEMP 구동 시스템에서는 1.4 mF의 커패시터가 저항부하를 대체하므로 안정적인 DC 전압을 확보할 수 있다. 추가적으로, LiPo 배터리 측정 전압에 고주파수의 리플이 존재하는 것을 확인하였는데, 이는 LiPo 배터리 전원과 PCB 기판에 존재하는 인덕터 사이의 공진에 의해 시뮬레이션 결과에서는 관측하지 못했던 고주파수의 전압 리플이 관측 된 것으로 분석하였다.

2단 충전부의 실험 결과는 그림 7로 정리하였으며, 사용한 리액터의 포화 유무에 따라 그림 7(a)와 (b)로 나누었다. 그림 7(a)는 C_{Bank2} 를 공진 충전할 때 약 50 A의 공진 충전 전류가 흐르는 순간 리액터가 포화되었기 때문에 공진 충전 전류가 시뮬레이션 결과와는 다른 날카로운 봉우리 형태로 측정되었지만, 그림 7(b)는 포화가 되지 않도록 리액터의 용량을 변경하였고 그 결과 시뮬레이션과 같은 사인 형태로 공진 전류가 측정되었다. 그러나 변압기의 포화 유무에 관계 없이 최종 출력 전압 1000 V를 모두 달성하였으며, 오히려 변압기 포화로 인해 더 많은 전류가 도통한 그림 7(a)가 그림 7(b)보다 목표 전압인 1000 V에 도달하는 시간이 짧음을 알 수

있다. 또한, HEMP 생성을 모의한 부하를 이용해 그림 7과 같이 커패시터 뱅크2(C_{Bank2})의 전압을 매우 짧은 순간에 1000 V에서 0 V로 방전시키는 실험을 진행하였고, 방전 시 발생하는 역전압으로부터 제안하는 2단 충전 구성은 1단 충전부의 변압기 2차 측 정류부를 안정적으로 보호하는 것을 확인하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 LiPo 배터리를 이용한 고밀도 고전압 커패시터 2단 충전기의 설계와 설계한 충전기의 시뮬레이션 결과, 그리고 실험 결과를 바탕으로 제작한 충전기의 성능을 검증하였다. 그 결과 변압기의 턴수비를 감소시키고, 대용량 배터리 전류를 효과적으로 도통하는 공진 커패시터를 변압기 2차 측에 위치한 9 kJ/s의 삼상 델타-와이 공진형 LCC 충전기의 안정적인 동작 성능을 확인하였다. 그리고 2단 충전부의 공진 현상을 이용해 삼상 충전기의 출력 600 V를 최종 출력 전압 1000 V로 커패시터 뱅크2에 인가하였으며, 공진 충전에 사용되는 리액터의 포화 유무에 따른 공진 충전 시간의 변화를 실험적으로 확인하였다.

본 연구는 2018년도 지식경제부의 재원으로 한국 에너지기술연구원(KETEP)의 지원 (No. 20184030202270) 과, 2017년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임. (No.NRF-2017R1A2B3004855)

References

- [1] S. Ichimasa, "Threat of cascading "Permanent Blackout" effects and high altitude electromagnetic pulse (HEMP)," *NIDS Journal of Defense and Security*, No. 17, pp. 1-18, Dec. 2016.
- [2] C. Wilson, *High Altitude Electromagnetic Pulse (HEMP) and High Power Microwave (HPM) Devices: Threat Assessments*, Washington D.C.: Library of Congress. Congressional Research Service, pp. 1-19, 2008.
- [3] R. Hoad and W. A. Radasky, "Progress in high-altitude electromagnetic pulse (HEMP) standardization," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 55, No. 3, pp. 532-538, Jun. 2013.
- [4] B. Sahu and G. A. Rincón-Mora, "A low voltage, dynamic, noninverting, synchronous buck-boost converter for portable applications," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 19, No. 2, pp. 443-452, Mar. 2004.
- [5] A. Maity, A. Patra, N. Yamamura, and J. Knight, "Design of a 20 MHz DC-DC buck converter with 84% efficiency for portable applications," *24th Annual Conference on*

VLSI Design, pp. 316-321, Jan. 2011.

- [6] W. Liou, M. Yeh, and Y. L. Kuo, "A high efficiency dual-mode buck converter IC for portable applications," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 23, No. 2, pp. 667-677, Mar. 2008.
- [7] N. M. L. Tan, T. Abe, and H. Akagi, "Design and performance of a bidirectional isolated DC-DC converter for a battery energy storage system," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 27, No. 3, pp. 1237-1248, Mar. 2012.
- [8] N. N. L. Do, A. J. Taberner, and B. P. Ruddy, "Design of a portable pulsed power system for needle-free jet injection," *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp. 6633-6640, Sep. 2018.
- [9] M. S. Almaray, and A. K. S. Bhat, "Three-phase (LC)(L)-type series-resonant converter with capacitive output filter," *IEEE Trans. Power Electr.*, Vol. 26, No. 4, pp. 1172-1183, 2011.
- [10] A. K. S. Bhat and R. L. Zheng, "Analysis and design of a three-phase LCC-type resonant converter," *IEEE Trans. Aerospace and Electr. System*, Vol. 34, No. 2, pp. 508-519, 1998.
- [11] A. K. S. Bhat and R. L. Zheng, "A three-phase series-parallel resonant converter-analysis, design, simulation, and experimental results," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 32, No. 4, pp. 951-960, 1996.
- [12] S. R. Jang, C. H. Yu, and H. J. Ryoo, "Trapezoidal approximation of LCC resonant converter and design of a multistage capacitor charger for a solid-state marx modulator," *IEEE Trans. Power Electr.*, Vol. 33, No. 5, pp. 3816-3825, 2018.

조찬기(趙燾起)



1992년 2월 18일생. 2016년 경희대 정보디스플레이학과 졸업. 2018년 중앙대 에너지공학과 졸업(석사). 2019년~현재 동 대학원 에너지시스템공학과 박사과정.

가재예(賈梓藝)



1993년 4월 6일생. 2016년 장안대 재료과학 및 공정, 에너지전자소재학과 졸업. 2019년 중앙대 에너지공학과 졸업(석사).

류홍제(柳泓齊)



1969년 3월 4일생. 1991년 성균관대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 2004년~2005년 미국 위스콘신 메디슨 대학교 초빙연구원. 1996년~2015년 한국 전기연구원 전기추진연구본부 책임연구원(팀장, 램장, 센터장). 2005년~2015년 과학기술연합대학원 에너지변환공학 전공책임교수. 2015년~현재 중앙대 에너지시스템공학과 교수. 당 학회 학술이사.