

반도체 스위치 기반 막스 모듈레이터용 고전압 커패시터 충전기 개발

유운상*, 권창현*, 손성호*, 김형석**, 유찬훈**, 장성록**,
 과학기술연합대학원대학교*, 한국전기연구원**

Development of High-Voltage Capacitor Charger for Solid-State Marx Modulator

Yun Sang Yu*, Chang Hyun Kwon*, Seong Ho Son*, Hyoung Suk Kim**, Chan Hun Yu**,
 Sung Roc Jang**,**

University of Science & Technology*, Korea Electrotechnology Research Institute**

ABSTRACT

본 논문은 반도체 스위치 기반 막스 모듈레이터용 3kV, 30kW 고전압 커패시터 충전기의 개발에 대하여 기술한다. 개발된 충전기는 높은 전력 밀도의 달성을 위해 기생 성분을 공진 탱크로 활용하는 LCC 공진형 컨버터를 채택하며, 소프트 스위칭 및 낮은 RMS 값을 갖는 공진 전류를 통해 손실을 줄여 높은 효율을 달성한다. 동시에 다수의 커패시터를 충전할 수 있도록 단일 1차 권선과 복수의 2차 권선을 갖는 다단 변압기의 사용을 제안한다. 또한, 변압기 권취법을 통해 각 정류단이 균등한 출력 전압을 얻는 설계 방법을 제시한다. 개발된 반도체 스위치 기반 막스 모듈레이터용 고전압 커패시터 충전기를 시뮬레이션 및 실험을 통해 효율성을 검증한다.

1. 서론

의료, 식품, 국방 등 다양한 산업분야에서 고전압 펄스 전원 장치에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[1][2]. 특히, 최근에는 신뢰성에 문제가 있는 기계식 스위치를 반도체 스위치로 대체한 반도체 소자 기반 막스 모듈레이터(SSMM) 구조를 활용한 펄스 전원장치가 많이 연구되고 있다. 낮은 전압 정격을 가지는 스위치를 직렬로 연결하여 고전압을 발생시키는 SSMM은 동시에 다수의 커패시터를 균등한 전압으로 충전시키는 것이 요구된다. 그러나, 커패시터의 오차 및 기생성분의 차이 등의 이유로 인해 전압의 차이가 발생하는 문제를 해결해야 하는 어려움이 있다.

본 논문에서는 LCC 공진형 컨버터 토폴로지를 이용해 다단의 변압기 및 정류회로를 병렬로 연결하는 구조를 제안하며, 이를 통해 다수의 커패시터를 동시에 충전이 가능하다. LCC 공진형 컨버터는 복수의 변압기를 사용함으로써 인해 발생하는 기생 커패시턴스를 공진 성분으로 활용이 가능하므로 회로의 체적을 감소시켜 높은 전력밀도의 구현이 가능하다. 제안된 구조는 한 단의 전압을 측정하여 전체 출력 전압을 제어하며, 따라서 정류회로의 전압이 균등하게 충전된 상태가 요구된다. 이를 위해 단일 1차 권선과 복수의 2차 권선을 갖는 다단 변압기를 사용하고, 정류회로 전압의 균형을 이루는 결선법을 활용한다. 시뮬레이션을 통해 제안한 결선법이 각 커패시터의 전압을 균등하게 충전할 수 있음을 검증하였고, 30kW 정격 실험을 통해 개발된 충전기의 안정적인 동작을 확인하였다.

2. 개발된 고전압 커패시터 충전기

2.1 고전압 커패시터 충전기 구조

제안된 고전압 커패시터 충전기의 등가회로는 그림 1과 같다. 풀브릿지 인버터, 직렬 공진 커패시터, 직렬 공진 인덕터, 변압기, 병렬 공진 커패시터로 이루어진 LCC 공진회로와 정류 다이오드, 저장 커패시터로 이루어진 정류회로로 이루어진다. 변압기의 누설 인덕턴스를 직렬 공진 인덕터(L_s)로 사용하며, 기생 커패시턴스를 병렬 공진 커패시터(C_p)의 일부로 활용한다. 이를 통해 활용되는 소자의 수를 감소시키고 전체 회로의 체적을 줄여 전력 밀도를 높인다.

실제 LCC 공진회로를 구현할 때, 등가회로와 실제 회로의 구조는 동일하나, 그림 2 (b)와 같이 등가회로의 병렬 공진 커패시터 C_{eq} 가 정류회로의 다이오드와 병렬로 연결된 C_p 로 환산되어 실장되며 병렬 공진을 수행한다. 정류회로는 변압기의 권수비를 줄이고자 배전압 정류회로 구조를 채택하였으며, 이를 통해 고전압 변압기의 절연 및 권선의 권취공간 확보를 달성하였다. 또한 다수의 커패시터를 동시에 충전하고, 전압을 균등하게 충전하기 위해 다권선 변압기를 사용하였다.

제안된 변압기 결선법은 다권선 변압기가 이웃한 정류회로들과 연결되어 복수의 변압기를 사용하되, 등가회로로 환산하면 마치 하나의 변압기처럼 보이도록 하여 균등한 출력 전압을 얻을 수 있도록 하였다[3].

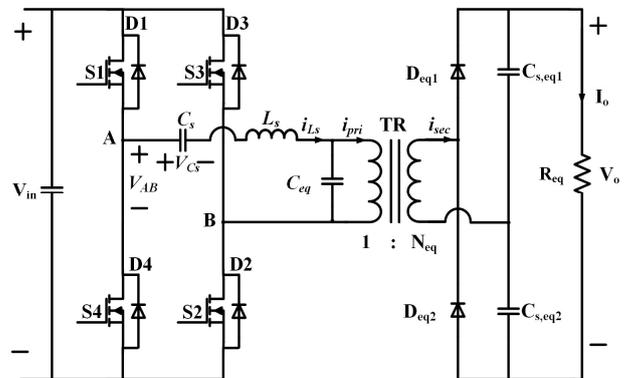
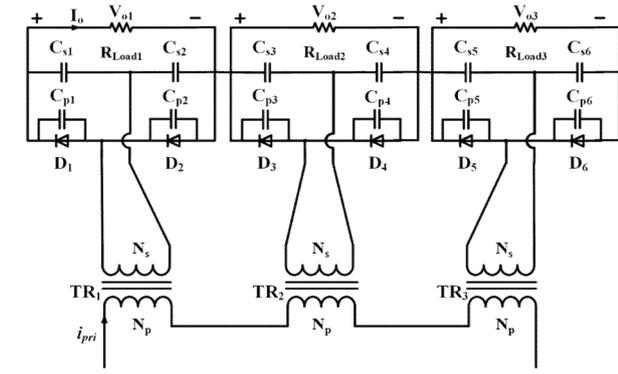
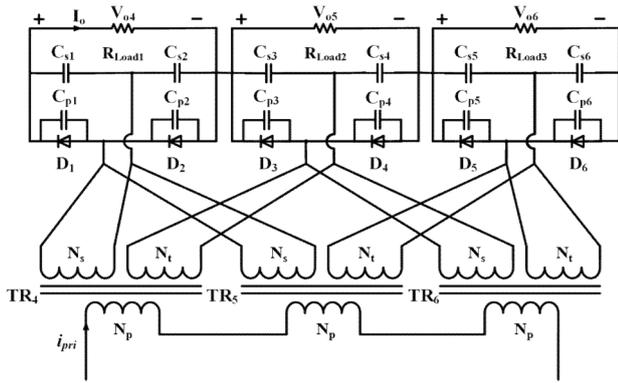


그림 1 개발된 고전압 커패시터 충전기 등가회로



(a)



(b)

그림 2 (a) 제안된 변압기 결선법이 적용되지 않은 정류회로
(b) 제안된 변압기 결선법이 적용된 정류회로

2.2 고전압 커패시터 충전기 설계

표 1 커패시터 충전기 설계 파라미터

Input Voltage, V_{in} (V)	513 \pm 10%
Output Voltage, V_o (kV)	3
Maximum Output Power, P_o (kW)	30
Switching Frequency, f_s (kHz)	30
Resonant Frequency, f_{op} (kHz)	60
Series Resonant Inductance, L_s (μ H)	33.4
Series Resonant Capacitance, C_s (μ F)	3.73
Parallel Resonant Capacitance, C_p (nF)	17.6
Transformer Turns Ratio, $N_p : N_s : N_t$	3 : 9 : 9

제안된 커패시터 충전기는 스위칭 손실 및 도전 손실을 줄이기 위해 소프트 스위칭 및 낮은 공진전류 RMS 값을 갖는 LCC 공진 컨버터 토폴로지를 이용하여 설계되었다. 그림 1은 제안된 회로를 LCC 공진형 컨버터 기본 구조로 등가화한 회로이며, 등가화된 회로의 설계는 기존 LCC 공진형 컨버터의 설계 기법과 동일한 방법의 적용이 가능하다. 등가 커패시턴스 (C_{eq})의 값과 실제 실장되는 병렬 공진 커패시턴스(C_p) 값의 계산은 식 (1)과 같다.

스위칭 주파수의 선정은 스위칭 소자의 특성에 따라 30kHz로 선정하였으며, 병렬 공진 주파수는 스위칭 주파수의 2배인

60kHz로 선정하였다. 이는 식 (2)에 따라 병렬 공진 주파수와 스위칭 주파수의 비가 출력에 영향을 주므로, 경부하 조건을 고려하여 선정하였다. 요구사항 및 주파수 선정 후 식 (2)와 (3)을 이용하여 공진 파라미터 계산을 진행하며, 계산 결과는 표 1과 같다⁴⁾.

$$C_{eq} = \frac{C_{p,sec} \cdot \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2}{N_{stage} \cdot 4} \quad (1)$$

$$P_o = V_{in} \cdot I_{L_s,peak} \cdot \left(1 - \frac{5}{8} \frac{f_s}{f_{op}}\right) \quad (2)$$

$$I_{L_s,peak} = \frac{2 \cdot V_{in} + V_{C_s,peak}}{Z_{op}} \quad (3)$$

3. 시뮬레이션 및 실험 결과

그림 3과 4는 3개의 정류회로를 병렬 연결한 정격 부하 실험 결과 및 동일한 조건의 시뮬레이션 결과이다. 실제 실험은 부하 용량 및 절연의 문제로 인해 정류회로를 병렬 연결하여 1kV 30kW 조건으로 실험을 진행하였으며, 이에 따라 병렬 연결하여 시뮬레이션을 진행하였다. 실험 결과 약 928V의 출력 전압이 측정되었으며 이는 저항 부하를 제작하며 정확한 값으로 제작하지 못하여 발생한 결과이다. 시뮬레이션 결과와 유사한 형태의 공진전류 파형이 확인 가능하며, 개발된 고전압 커패시터 충전기의 정상 동작을 확인하였다.

그림 5와 6은 그림 2 (a)와 (b)의 결선법을 각각 적용한 시뮬레이션 결과이다. 기생 성분으로 인한 오차를 가정하여 3, 5, 9nF의 변압기 기생 커패시턴스를 설정하였다. 제안된 권선법을 적용하지 않은 경우 약 2%의 전압 차이가 발생하였으며, 제안된 권선법을 적용한 결과 약 0.001%의 전압 차이가 발생하였다. 제안된 권선법을 적용할 때 출력 전압의 차이를 유의미하게 감소시키는 것을 확인하였다.

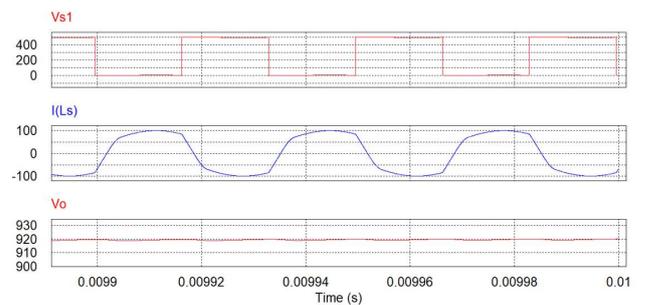


그림 3 정격 부하 조건 시뮬레이션 결과

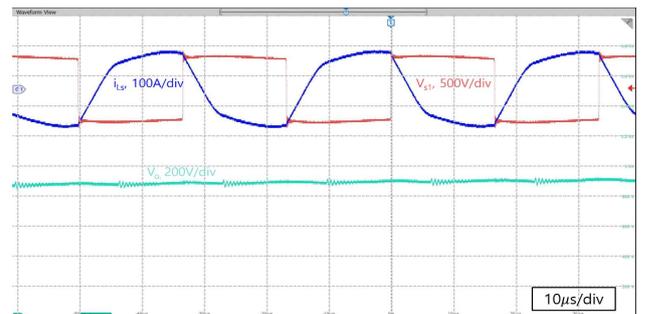


그림 4 정격 부하 조건 실험 결과

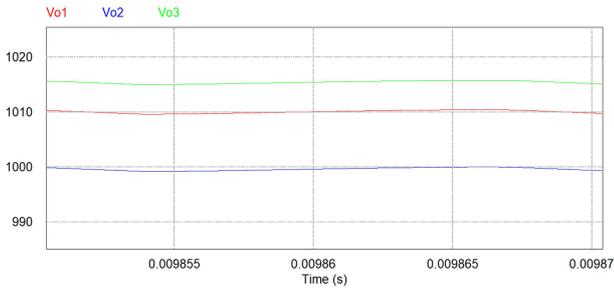


그림 5 제안된 결선법을 적용하지 않은 시뮬레이션 결과

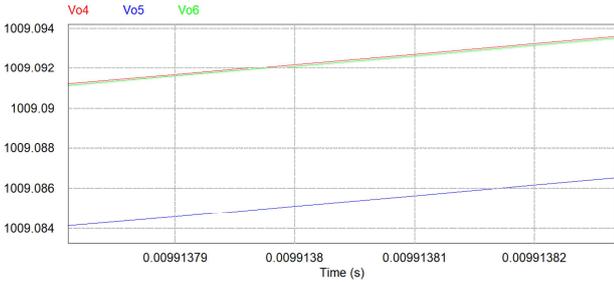


그림 6 제안된 결선법을 적용한 시뮬레이션 결과

4. 결론

본 논문은 반도체 스위치 기반 막스 모듈레이터용 3kV 30kW 고전압 커패시터 충전기의 개발에 대하여 기술하였다. 개발된 커패시터 충전기는 기생성분을 활용하여 전력밀도를 높이고, 손실을 줄여 높은 효율을 달성하기 위해 LCC 공진형 컨버터 기반으로 설계 되었다. 또한 복수의 커패시터를 동시에 충전하기 위해 다단의 변압기 및 정류단을 사용하는 구조를 제안하였다. 시뮬레이션을 통해 제안된 구조의 효율성을 확인하였으며, 실험을 통해 제안된 커패시터 충전기의 정격 부하 동작을 확인하였다.

이 연구는 2024년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 국가과학기술연구회의 지원을 받아 수행된 한국전기연구원 기본사업임(No. 24A01075)

참 고 문 헌

[1] 김태현, 손성호, 권창현, 김형석, 유찬훈, 박성주, 진윤식, 안석호, 장성록. (2022-07-05). 활성수 제조용 글라이딩 아크 방전을 위한 DC 전원장치 개발. 전력전자학회 학술대회 논문집.
 [2] 손성호, 배정수, 김태현, 권창현, 장성록, 유찬훈, 김형석. (2021-07-06). CT용 X-ray 발생장치 구동을 위한 200kV, 80kW 고전압 전원장치. 전력전자학회 학술대회 논문집.
 [3] J. -S. Bae, J. -S. Kim, H. -S. Kim, C. -H. Yu, S. Kim and S. -R. Jang, "Design and Testing of Bipolar Pulsed-Power Supply With High Efficiency and Power Density for Strategic Mineral Exploration," in IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 47, no. 10, pp. 4458-4465, Oct. 2019, doi: 10.1109/TPS.2019.2907961.
 [4] 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," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 33, no. 5, pp. 3816-3825, May 2018, doi: 10.1109/TPEL.2017.2716975.