

Solid-State marx modulator용 커패시터 충전기 설계 및 비교분석

김신*, 배정수*, 김태현*, 김형석**, 유찬훈**, 장성록***
 과학기술연합대학원대학교*, 한국전기연구원**

Design and comparison of capacitor charger for solid-state marx modulator

Shin Kim*, Tea Hyeon Kim*, Jung soo Bae*, Hyoung Suk Kim**, Chan Hun Yu**,
 Sung Roc Jang***

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

ABSTRACT

본 논문은 Solid-state Marx modulator (SSMM)용 10 kV, 1 kW급 고전압 커패시터 충전기의 설계에 대해 기술한다. 개발된 Marx modulator용 충전기는 소프트 스위칭방식을 통해 높은 스위칭 주파수로 동작하는 컨버터를 제안함으로써 고밀도 설계를 구현한다. 특히 고전압 변압기 설계에 있어 피할 수 없는 누설 인덕턴스와 기생 커패시턴스를 회로의 파라미터로 사용할 수 있는 공진형 컨버터를 기반으로 설계한다. 본 논문에서는 순수 전류원 특성을 가지며 스위치 온, 오프 시 모두 소프트 스위칭이 가능한 Discontinuous Conduction Mode (DCM) 직렬 공진형 컨버터와 공진 전류의 RMS값을 줄이고 변압기의 기생 커패시턴스를 공진 탱크로 사용하는 LCC 공진형 컨버터 Continuous Conduction Mode (CCM)를 설계한다. 각 컨버터의 동작에 따른 해석 및 공진 파라미터 상세 설계에 대해 기술하고 정격 운전 (10 kV, 1 kW) 실험결과를 통해 각 컨버터 토폴로지의 장단점을 비교하고 최종 실험결과에 대해 기술한다.

1. 서론

최근 다양한 분야에 펄스파워가 사용 되면서 스위치의 수명, 고주파 동작 등의 장점을 가지는 반도체 스위치 기반의 고전압 펄스 전원(Solid-state Pulsed Power Modulator)에 대한 연구가 많이 이뤄지고 있다.^[1-9] 특히, 커패시터 충전기를 통해 병렬로 다수의 커패시터에 에너지를 충전하고 스위치를 이용해 직렬로 연결하여 고전압을 인가하는 SSMM이 다양하게 연구되고 있다. SSMM의 고밀도 설계를 위해서는 높은 주파수에서의 스위칭을 통해 변압기 등 소자의 크기를 줄이는 것이 필수적이다. 따라서 본 논문에서는 영전압 스위칭(ZVS), 영전류 스위칭(ZCS)를 이용한 공진형 컨버터를 기반으로 하여 SSMM용 고전압 커패시터 충전기를 설계한다. 또한 가장 효과적인 토폴로지를 찾기 위해 스위치 온, 오프 시 모두 소프트 스위칭을 하며 순수 전류원 특성을 통해 안정적인 동작이 가능한 DCM 모드 직렬 공진형 컨버터와 공진전류의 모양을 사다리꼴 형태로 만들어 전류의 RMS값을 줄임으로서 도통손실을 줄이고, 높은 주파수로 이용하는 CCM모드 LCC 공진형 컨버터를 각각 설계하고 비교분석을 통해 제안된 10 kV, 1 kW급 SSMM용 커패시터 충전기에 적합한 토폴로지를 선정한다.

2. SSMM용 고전압 커패시터 충전기 설계

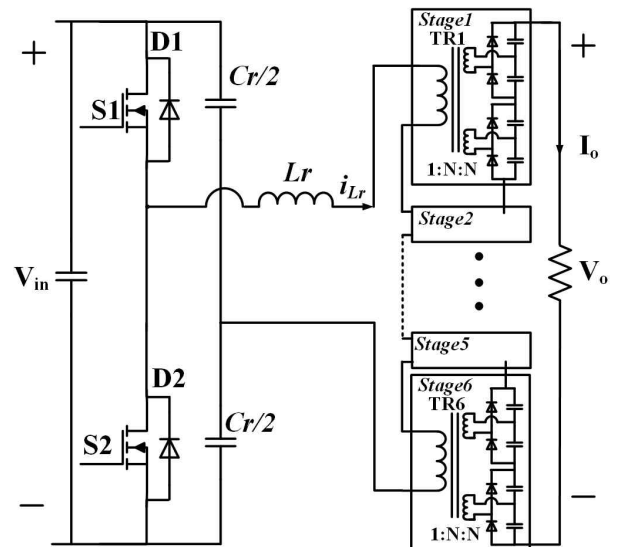


그림 1 제안된 커패시터 충전기 회로

Fig. 1 Circuit of the proposed capacitor charger

제안된 SSMM용 커패시터 충전기의 회로는 그림 1과 같다. 입력단에 하프 브릿지와 출력단에 배전압 정류기를 포함한 공진형 컨버터를 기반으로 설계되었고 변압기의 누설 인덕턴스와 기생 커패시터를 공진 인덕터(Lr)과 병렬 공진 커패시터(Cp)로 이용한다. 또한 단일턴의 변압기 1차측 권선이 총 6개의 코어에 동시에 커플링 된 구조로 이뤄져있다. 이 때 각 변압기는 2개의 2차측 권선을 통해 배전압 정류기로 연결되어 총 24개의 커패시터에 에너지를 동시에 충전하고, 직렬로 구성 시 최대 10 kV의 전압을 얻을 수 있다.

2.1 DCM, CCM모드 공진형 컨버터 해석

2.1.1 DCM모드 직렬 공진형 컨버터 해석

DCM모드 직렬 공진형 컨버터는 변압기의 누설 인덕턴스를 공진 인덕턴스로 사용하며 기본 동작에 대한 공진전류와 스위칭 전압 파형은 그림 2와 같다. 총 6개의 모드로 나누어 해석되며, 모드 1에서 스위치 S1이 턴 온되고 이 때 양의 공진전류가 흐르게 된다. 모드 2에서는 공진에 의해서 전류의 방향이

음으로 바뀌고 다이오드 D1을 통해 전류가 흐르게 된다. 이후 DCM모드의 특성에 따라 공진주파수가 스위칭 주파수의 2배가 넘게 됨으로 어떠한 소자도 동작을 하지 않는 모드 3가 발생한다. 모드 2에서 다이오드가 도통 될 때 S1이 턴 오프 됨으로 스위치는 턴 오프 시 영전압, 영전류 스위칭을 할 수 있다. 모드 4~6은 스위치 S2가 켜지면서 시작되며 모드 1~3과 같은 동작원리로 진행된다.^[6-8]

2.1.2 CCM모드 LCC 공진형 컨버터 해석

CCM모드 LCC 공진형 컨버터는 변압기의 누설 인덕턴스와 2차측 기생 커패시턴스를 공진 인덕턴스, 병렬공진 커패시터로 이용하는 형태이며 기본 동작에 대한 공진전류와 스위칭 전압 파형은 그림 2와 같다. DCM 모드 해석과 마찬가지로 총 6개의 모드로 나뉘고 C_s 가 C_p 보다 상당히 크다는 조건을 가지고 해석된다.^[8] 모드 1에서 스위치 S1이 턴 온되고 병렬공진 커패시터와 공진 인덕턴스가 공진을 하는 구간이다. 모드 2에서는 C_p 에 전압이 충전 된 후에 C_r 과 L_r 이 공진을 하게 되어 낮은 공진 주파수로 공진하여 평평한 모양의 파형이 형성된다. 모드 3에서는 S1이 꺼지고 다이오드 D2가 도통된다. D2가 도통 될 때 S2가 턴 온 되면서 소프트 스위칭을 구현하며, 모드 2에 의해 전류의 모양을 사다리꼴 형태로 만들어 줌으로써 전류의 RMS값을 줄여 도통손실을 크게 줄일 수 있다. 모드 4~6은 스위치 S2가 켜지면서 시작되며 모드 1~3과 같은 동작원리로 진행된다.

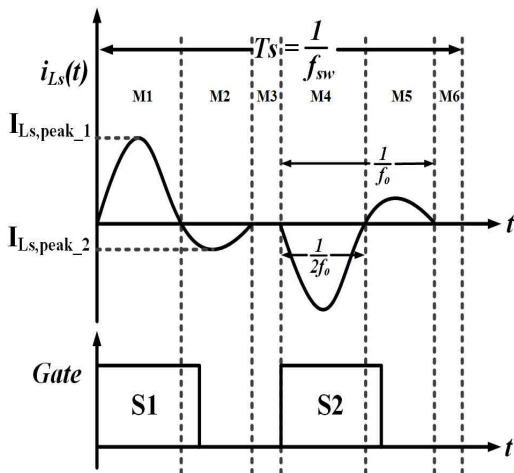


그림 2 DCM모드 직렬 공진형 컨버터 동작파형
Fig. 2 Waveform of DCM mode series resonant converter

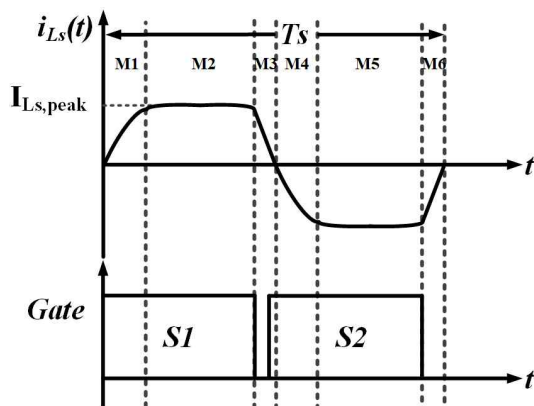


그림 3 CCM모드 LCC 공진형 컨버터 동작파형
Fig. 3 Waveform of CCM mode LCC resonant converter

2.2 CCM모드 LCC 공진형 컨버터 설계

제안된 커패시터 충전기의 입력력 사양에 따른 DCM모드 직렬 공진형 컨버터와 CCM모드 LCC 공진형 컨버터의 설계 파라미터를 정리하면 표 1과 같다. 같은 입력력 전압, 같은 용량으로 설계 되었고 입력단의 하프 브릿지, 출력단의 배전압 정류기를 이용하며 턴수비는 같도록 설계 했다. 각각 토폴로지에 대한 공진 파라미터는 공진전류와의 상관관계, 사다리꼴 형태의 전류를 만들기 위한 조건, 경부하 운전 등의 조건 등을 고려하여 계산한다.^[6-9]

표 1 1kW고전압 커패시터 충전기의 사양 및 설계 파라미터
Table 1 Specifications and Design Parameters of 1kW High voltage Capacitor Charger

	DCM	CCM
Input Voltage, Vin	310Vdc±10%	310Vdc±10%
Maximum Output Voltage, Vo	10kV	10kV
Maximum Output Power, Po	1kW	1kW
Switching Frequency, fsw	20~130kHz	300kHz~1.2MHz
Transformer Turns Ratio, 1:N:N	1:40:40	1:40:40
Resonant Inductance, Lr	4.37nH	4.37nH
Series Resonant Capacitance, Cs	55nF	160nF
Parallel Resonant Capacitance, Cp		10pF

3. 실험결과

설계된 파라미터를 기반으로 제안된 커패시터 충전기를 제작하였고 제작된 커패시터 충전기 모습 및 실험 사진은 그림 4와 같다. 실험은 모든 커패시터를 직렬로 결선하여 100 kΩ부하 조건에서 10 kV, 1 kW운전을 했고 실험 파형은 그림 5, 6이다. 두 파형에서 볼 수 있듯이 DCM 모드에서는 스위치 턴 온, 오프 시 모두 소프트 스위칭을 하는 것을 볼 수 있고, CCM 모드에서는 스위치 턴 온 시 소프트 스위칭을 한다. 공진 전류 측면에서는 DCM에서는 공진전류 RMS가 13.9 A이며, CCM 모드에서는 앞서 언급한 동작설명에서와 같이 공진전류의 모양이 사다리꼴 형태로 만들어져 전류의 RMS가 10.9 A가 측정되었다.

회로에 사용된 스위치 S1, S2의 온도는 DCM 모드에서는 90 °C, CCM 모드에서 60 °C로 측정되었다. 따라서 설계된 커패시터 충전기에서 스위치의 손실은 턴 오프 스위칭 손실 보다 공진전류에 의한 도통 손실이 큰 비중을 가진다는 것을 알 수 있었다. 이 결과를 통해 제안된 커패시터 충전기는 스위치의 손실 측면에서 장점을 가지는 CCM모드 LCC 공진형 컨버터를 이용하여 SSMM 설계에 적용하는 것이 적합하다고 판단된다.



그림 4 제작된 커패시터 충전기 및 실험사진
Fig. 4 Photograph of proposed capacitor charger and experimental setting

참 고 문 헌

- [1] Weihua Jiang *et al.*, "Compact solid-State switched pulsed power and its applications," in *Proc. IEEE*, vol. 92, no. 7, pp. 1180-1196, July 2004.
- [2] J. R. Grenier, S. H. Jayaram, M. Kazerani, H. Wang and M. W. Griffiths, "MOSFET-Based Pulse Power Supply for Bacterial Transformation," in *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 44, no. 1, pp. 25-31, Jan.-feb. 2008.
- [3] M. Sack, S. Keipert, M. Hochberg, M. Greule and G. Mueller, "Design Considerations for a Fast Stacked-MOSFET Switch," in *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 41, no. 10, pp. 2630-2636, Oct. 2013.
- [4] R. L. Cassel, "An all Solid State Pulsed Marx Type Modulator for Magnetrons and Klystrons," *2005 IEEE Pulsed Power Conf.*, Monterey, CA, 2005, pp. 836-838.
- [5] K. J. P. Macken, D. MacNair, M. N. Nguyen, J. Hugyik, J. Olsen and M. Kemp, "IGBT PEBB technology for future high energy physics machine operation applications," *2011 Twenty-Sixth Annual IEEE Applied Power Electron. Conf. and Exposition (APEC)*, Fort Worth, TX, 2011, pp. 1319-1337.
- [6] S. R. Jang, H. J. Ryoo, J. S. Kim and S. H. Ahn, "Design and analysis of series resonant converter for 30kW industrial magnetron," *IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, Glendale, AZ, 2010, pp. 415-420.
- [7] S. R. Jang, H. J. Ryoo, S. H. Ahn, J. Kim and G. H. Rim, "Development and Optimization of High-Voltage Power Supply System for Industrial Magnetron," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 3, pp. 1453-1461, March 2012.
- [8] 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 Electron.*, vol. 33, no. 5, pp. 3816-3825, May 2018.
- [9] J. Bae, J. Kim, H. Kim, C. Yu and S. Jang, "Modular Design of a Bipolar-Pulse-Power-Supply-Based LCC Resonant Converter for Strategic Mineral Exploration," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 9, pp. 6846-6855, Sept. 2019.

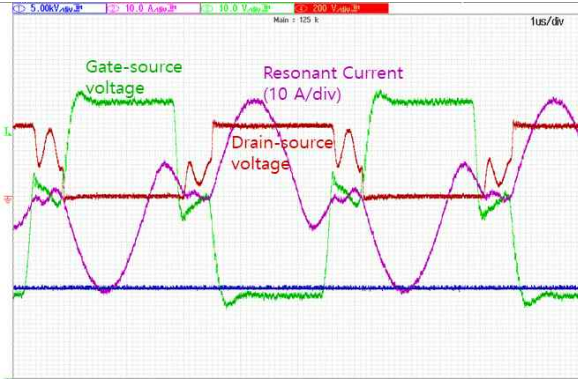


그림 5 DCM모드 직렬 공진형 컨버터 동작파형
Fig. 5 Waveform of DCM mode series resonant converter

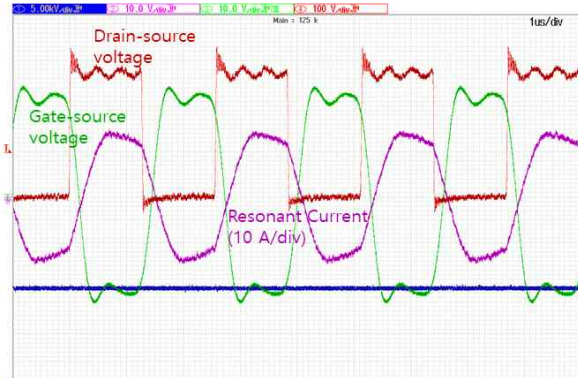


그림 6 CCM모드 LCC 공진형 컨버터 동작파형
Fig. 6 Waveform of CCM mode LCC resonant converter

4. 결 론

본 논문에서는 Solid-state Marx modulator(SSMM)용 10kV, 1kW급 고전압 커패시터 충전기의 설계에 대해 설명하였다. 고밀도 설계를 구현하기 위해 고주파 스위칭을 하는 공진형 컨버터를 제안하였고 DCM 모드 직렬 공진형 컨버터와 CCM 모드 LCC 공진형 컨버터를 각각 설계하여 비교, 분석하여 제안된 회로에 적합한 토폴로지를 설정하였다. 향후 연구내용으로는 개발된 커패시터 충전기를 기반으로 ns급 펄스전원을 연구 진행 할 예정이다.

본 연구는 2019년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 국가과학기술연구회의 지원을 받아 수행된 한국전기연구원 주요사업임.
(No. 19-12-N0101-12)