

Solid-state Marx modulator용 커패시터 충전기

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

Capacitor Charger for Solid-state Marx modulator

Shin Kim*, Jungsoo 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 10kV, 1kW급 고전압 커패시터 충전기의 설계에 대해 기술한다. 직렬 공진형 인버터를 기반으로 Marx modulator용 충전기 구현을 위해 다수의 커패시터를 동시에 충전할 수 있도록 다단 변압기와 정류기를 사용하는 구조를 제안한다. 변압기 1차 권선으로 단일 턴의 고전압 케이블을 사용하여 설계하고, 작은 누설 인덕턴스만으로 공진 인덕터를 구현하기 위해 DCM(Discontinuous Conduction Mode)를 기반으로 공진 파라미터를 설계한다. 6개의 환형 코어에 각각 2개의 2차 권선을 권취하고 각 2차 권선은 배전압 정류회로와 연결되어 총 24개의 커패시터를 각각 417V로 동시에 충전할 수 있도록 설계한다. 본 논문에서는 DCM영역에서 동작하는 직렬공진형 컨버터의 공진 파라미터 상세 설계에 대하여 기술하고, 24개의 커패시터 직렬 결선을 통한 10kV, 1kW 정격운전 시뮬레이션 및 실험결과를 통해 제안된 회로를 검증한다.

1. 서론

최근 펄스파워가 다양한 분야에 적용 되면서 스위칭 소자의 수명 및 스위칭 특성 등의 장점으로 반도체 스위치 기반 고전압 펄스전원(Solid state Pulsed Power Modulator)에 대한 많은 연구가 이뤄지고 있다.^[1-10] 특히, 커패시터에 에너지를 저장한 후 클로징 스위치를 이용하는 고전압 펄스전원 시스템에서 병렬로 다수의 커패시터를 충전하고 이를 직렬로 방전시킬 수 있는 Marx modulator의 장점을 기반으로 SSMM가 다양한 사양으로 개발되고 있는 추세이다. 비교적 낮은 평균출력을 가지는 SSMM은 저항을 이용한 충전방식이 주로 이용되고 있으나, 대용량화를 위해 효율적인 충전 방식에 대한 연구가 필요하다. 최근 개발된 Power Electronics Building Block(PEBB) 기반의 펄스전원은 출력전압 증대가 용이한 장점은 가지나 외부 충전기를 별도 구성하고, 충전을 위해 추가 IGBT를 사용 및 제어해야하는 단점이 있다.^[5]

본 논문에서는 펄스전원 내부에 포함될 수 있는 고전압 커패시터 충전기에 설계에 대하여 기술한다. 변압기의 크기를 줄이기 위한 고주파 스위칭 가능한 직렬 공진형 인버터, 다수의 커패시터를 동시에 충전할 수 있도록 구성된 다단의 변압기 및 정류부의 상세 설계에 대하여 기술하고 시뮬레이션 및 실험을 통해 그 설계를 검증한다.

2. 펄스전원용 고전압 커패시터 충전기 설계

2.1 제안된 커패시터 충전기 회로

제안된 펄스전원용 고전압 커패시터 충전기 회로는 그림 1과 같다. 하프 브릿지 직렬 공진형 컨버터를 기반으로 설계되었으며, 공진 인덕터(Lr)로 변압기의 누설 인덕턴스만을 사용하며, 공진커패시터(Cr)는 그림과 같이 DC link단과 연결된 두 개의 커패시터로 구현된다. 고전압 절연 확보를 위해 변압기 1차 권선을 고전압 케이블로 이용하고 단일 턴으로 설계하며, 작은 누설인덕턴스를 공진 인덕터로 활용하기 위해 DCM 영역에서 공진형 컨버터 설계한다. 변압기 TR1~TR6는 그림 1과 같이 단일 턴의 1차 권선으로 동시에 커플링된 구조이며, 각각의 변압기에 N턴의 2차권선 두 개가 권취되는 구조이다. 각각의 2차권선은 배전압 정류회로로 연결되어 두 개의 커패시터를 충전하도록 설계한다. 이에 따라 각 커패시터에 417V가 충전되며 24개의 커패시터가 직렬로 구성되면 최대 10kV의 DC 전압을 얻을 수 있는 구조이다. 본 회로를 SSMM에 적용하기 위해서는 직렬로 결선된 커패시터사이에 반도체 소자를 직렬로 연결하여 펄스 스위칭을 구현 수 있다. 위와 같이 변압기의 코어를 분리하여 구성하는 방식은 변압기 2차권선 간의 효율적 절연을 확보할 수 있는 장점을 가지며, 환형의 코어를 사용함으로써 고전압 케이블을 사용한 1차 권선이 각 코어를 관통하여 커플링이 용이한 장점을 가진다.

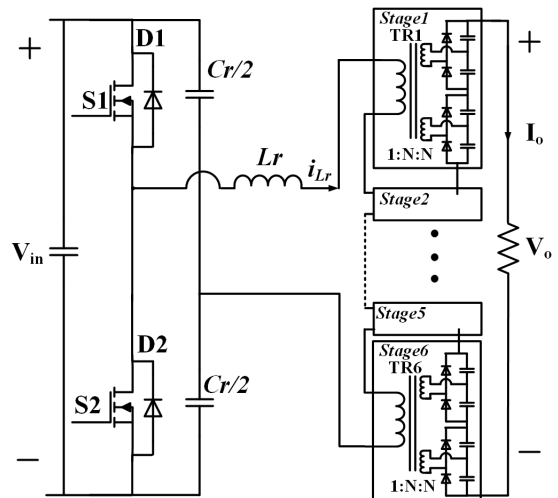


그림 1 제안된 커패시터 충전기 회로
Fig. 1 Circuit of the proposed capacitor charger

2.2 DCM 공진형 컨버터 설계

제한된 고전압 커패시터 충전기의 입력력 사양과 이에 따른 설계 파라미터를 정리하면 표 1과 같다. 본 논문에서는 변압기 제작 후 측정된 누설인덕턴스를 바탕으로 직렬 공진형 컨버터 DCM 설계를 진행한다. 먼저 입력전압과 출력전압의 관계에 따라 변압기 턴수비 결정한다. 직렬 공진형 컨버터는 변압기 없이 승압이 불가능한 토폴로지로 최소 입력 전압조건에서 출력전압을 얻기 위한 턴수비를 계산하면 수식 1과 같다. 변압기 2차측 전압의 출력전압으로부터 6개의 충전스테이지 및 하나의 스테이지에 포함된 4개의 셀을 통해 계산할 수 있고, 1차측 전압 역시 스테이지수를 고려할 수 있고 계산된 값은 25 턴으로 출력전압 마진을 고려하여 30턴을 권취 하도록 한다. 변압기 제작 후 측정된 0.7μH의 누설인덕턴스를 기반으로 공진 커패시터를 계산할 수 있다. 먼저 DCM 동작의 정의에 따라 공진 주파수는 최대 스위칭 주파수의 2배 이상이어야 하며, 수식 2와 같이 최대 스위칭 주파수 330kHz를 기준으로 마진을 고려하여 2.5배를 계산하면 825kHz로 공진주파수가 결정된다. 공진 커패시터의 값은 수식 3의 공진 주파수와 앞서 측정된 공진 인덕턴스와의 관계를 통해 계산 할 수 있다.^{[9] [10]}

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

Input Voltage, Vin	200V~340V
Maximum Output Voltage, Vo	10kV
Maximum Output Power, Po	1kW
Switching Frequency, fsw	~330kHz
Transformer Turns Ratio, 1:N:N	1:30:30
Number of Stage, Nstage	6
Number of Cell, Ncell	4
Resonant Inductance, Lr	700nH
Resonant Capacitance, Cr	54nF

$$N = \frac{V_{o,max}/N_{stage}/N_{cell}}{V_{in,min}/N_{stage}/2} = \frac{10kV/6/4}{200V/6/2} = 25turns \quad (1)$$

$$f_o = 2.5 \times f_{sw,max} = 2.5 \times 330kHz = 825kHz \quad (2)$$

$$C_r = \frac{1}{(2\pi f_o)^2 \cdot L_r} \cong 54nF \quad (3)$$

3. 시뮬레이션 및 실험결과

3.1 시뮬레이션

표 1에 설계된 값을 바탕으로 PSpice 시뮬레이션을 통해 그림 2와 같은 정격운전 시의 파형을 얻을 수 있었다. 300V 입력전압 조건에서 240kHz 스위칭 주파수 동작 시 최대 출력 전압 10kV 및 최대출력 전력 1kW 동작을 확인할 수 있었다. 또한, 그림 2의 게이트 전압 파형에서 볼 수 있듯이 공진전류가 다이오드를 통해 도통하는 구간에서 MOSFET 턴온을 유지함으로써 도전손실을 줄일 수 있었다.

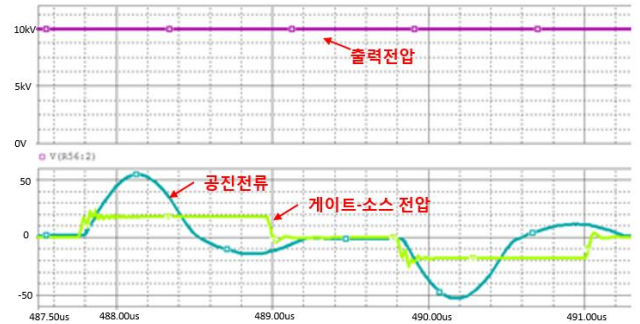


그림 2 시뮬레이션 파형
Fig. 2 Simulation Waveform

3.2 실험결과

개발된 고전압 커패시터 충전기는 그림 1에서 보여 지는 결선도와 같이 모든 커패시터를 직렬로 결선하여 100kΩ부하조건에서 1kW운전을 했고, 그 실험파형은 실험 3과 같다. 그림 3에서 보여 지듯이 출력된 수치들이 시뮬레이션 값과 유사함을 알 수 있고, 이 때 스위칭 주파수 245kHz에서 10kV를 달성하였다. 공진이 끝난 후 발생한 링잉성분은 다이오드의 리버스리커버리, MOSFET의 출력 커패시터 충/방전에 따라 발생함을 확인하였다. 이러한 손실로 인해 시뮬레이션 값과 약간의 차이가 발생하게 되었다.

개발된 전원장치의 컨버터 특성을 검증하기 위해 스위칭 주파수를 가변 하는 실험을 진행하였다. 스위칭 주파수에 따른 출력 전압을 그림 4와 같이 확인하였고, 실험을 바탕으로 DCM에서 동작하는 직렬 공진형 컨버터는 순수 전류원 특성을 가지는 것을 확인 할 수 있었다.

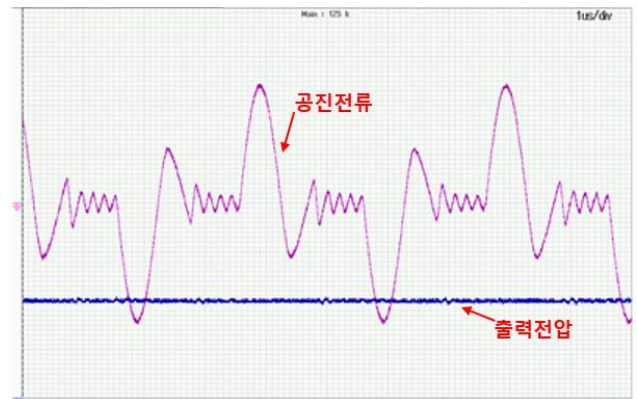


그림 3 300V, 245kHz 조건에서의 출력전압 및 공진전류파형
Fig. 3 Waveforms of Output Voltage and Resonant Current at 300V, 245kHz operation (500kV/div, 20A/div)

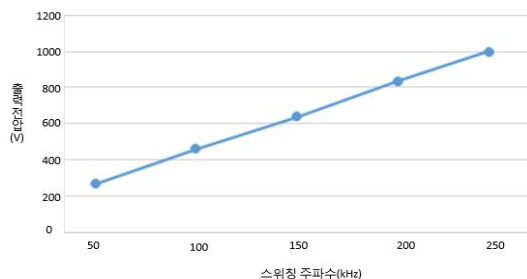


그림 4 스위칭 주파수에 따른 출력전압 그래프
Fig. 4 Graph of Output Voltage depending on Switching frequency

4. 결 론

본 논문에서는 Solid state Marx modulator(SSMM)용 10kV, 1kW급 고전압 커패시터 충전기의 설계에 대해 설명하였다. DCM 영역에서 동작하는 직렬 공진형 컨버터를 설계하기 위한 기본적인 수식과 원리를 바탕으로 개발되었으며, 시뮬레이션 및 실험을 통하여 설계된 값들을 검증하였다. 향후 연구내용으로는 개발된 커패시터 충전기를 기반으로 ns급 펄스를 출력하기 위한 연구를 진행할 예정이다.

본 연구는 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 국가과학기술연구회의 지원을 받아 수행된 한국전기연구원 주요사업임.(No. 18 12 N0101 28)

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] Kefu Liu; Yan Luo; Jian Qiu; , "A repetitive high voltage pulse adder based on solid state switches," *Dielectrics and Electrical Insulation*, IEEE Transactions on , vol.16, no.4, pp.1076 1080, August 2009.
- [7] S. R. Jang, H. J. Ryoo and G. Goussev, "Compact and high repetitive pulsed power modulator based on semiconductor switches," in *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 18, no. 4, pp. 1242 1249, August 2011.
- [8] S. R. Jang, H. J. Ryoo, G. Goussev and G. H. Rim, "Comparative Study of MOSFET and IGBT for High Repetitive Pulsed Power Modulators," in *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 40, no. 10, pp. 2561 2568, Oct. 2012.
- [9] 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.
- [10] 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.