

클라이스트론 모듈레이터용 50kV, 50kW 커패시터 충전기 개발

권창현*, 김태현*, 손성호*, 유찬훈*, 장성록**, 안석호**, 김형석**,
과학기술연합대학원대학교*, 한국전기연구원**, 포항가속기연구소**

Development of 50kV, 50kW Capacitor Charger for Klystron Modulator

Chang-Hyun Kwon*, Tae-Hyun Kim*, Seong-Ho Son*, Chan-Hun Yu**, Sung-Roc Jang**,
Suk-Ho Ahn**, Hyoung-Suk Kim**,

University of Science & Technology*, Korea Electrotechnology Research Institute**, Pohang
Accelerator Laboratory**

ABSTRACT

본 논문은 클라이스트론 모듈레이터 시스템을 위한 50kV, 50kW 커패시터 충전기 개발에 대해 기술한다. 개발된 충전기는 넓은 주파수 범위에서 소프트 스위칭 특성을 가지며, 변압기의 기생성분을 활용하여 높은 전력 밀도를 가질 수 있는 LCC 공진형 컨버터로 설계한다. 출력전압의 높은 재현성을 달성하기 위해 출력전압 센싱을 통한 주파수 변조 및 버스트 모드 제어를 적용한다. 추가로, 스위치 전압 링잉을 줄이기 위한 인버터 구조 및 고전압 절연을 위한 변압기 구조를 제시한다. 개발된 50kV, 50kW 커패시터 충전기의 성능을 실험을 통해 검증하였다.

1. 서 론

가속기는 RF 전력 공급을 위한 클라이스트론 모듈레이터를 필요로 한다. 출력 빔의 방사율과 에너지 확산율을 낮추기 위해서 클라이스트론 모듈레이터는 펄스 전류의 높은 재현성이 요구된다.^[1] 또한, 출력 빔의 높은 에너지와 반복율을 가지기 위해 부하를 안정적으로 재충전할 수 있는 고전압 대용량 전원장치가 요구된다. 이에 따라, 출력전압의 높은 안정성 및 정밀성을 가지는 대용량 고전압 커패시터 충전기 개발을 필요로 한다.

본 논문에서는 클라이스트론 모듈레이터를 위한 커패시터 충전기 개발에 관해 기술한다. 개발된 커패시터 충전기는 LCC 공진형 컨버터를 기반으로 설계되어, 고전압 변압기 특성상 발생하는 기생성분들을 활용할 수 있고 고주파 동작으로 인해 높은 전력밀도를 가진다. 또한, 목표 출력전압에서 버스트 모드 및 주파수 변조 기법을 적용함으로써 시간당 충전량을 낮추어 정밀한 출력전압 제어를 가능하게 하여 출력전압의 높은 재현성을 가진다.

2. 제안된 커패시터 충전기

2.1 제안된 커패시터 충전기 회로 및 동작 모드

그림 1은 클라이스트론 모듈레이터를 위한 커패시터 충전기의 회로도를 나타낸다. 커패시터 충전기는 풀브릿지 인버터(S_1-S_4), 직렬공진 인덕터(L_S), 직렬공진 커패시터(C_S), 병렬 공

진 커패시터 (C_P), 변압기 (TR_N), 고전압을 위한 배전압 정류회로로 구성되어 있다. 제안된 커패시터 충전기의 사양 및 공진 파라미터들을 정리하면 표1과 같다.

그림 2는 커패시터 충전기의 동작 모드를 나타낸다.

- 1) Mode1 (M1) : 초기 충전 시에는 34kHz의 스위칭 주파수로 동작하여 커패시터 부하를 빠르게 충전한다.
- 2) Mode2 (M2) : 출력 전압이 목표 값까지 충전이 되면 스위칭 주파수를 높임으로써 한 스위치 주기당 충전량을 낮춘다. 이를 통해 정밀한 출력 전압 제어를 가능하게 한다.
- 3) Mode3 (M3) : 충전 지령 시간이 끝날 때까지 버스트 모드 제어를 사용하여 출력 전압강하를 보상한다.
- 4) Mode4 (M4) : 다음 충전 지령이 오기 전까지 컨버터는 휴지상태로 대기한다..

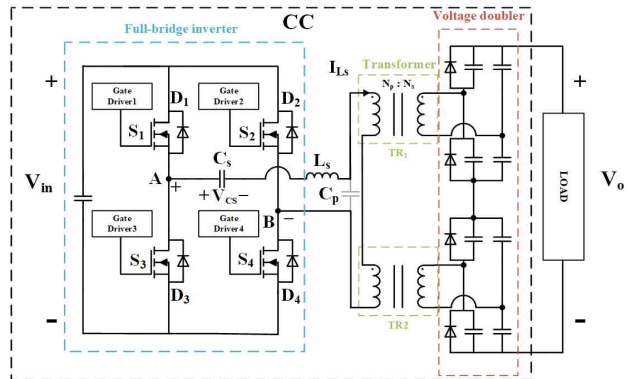


그림 1 커패시터 충전기 회로도
Fig. 1 Circuit of capacitor charger

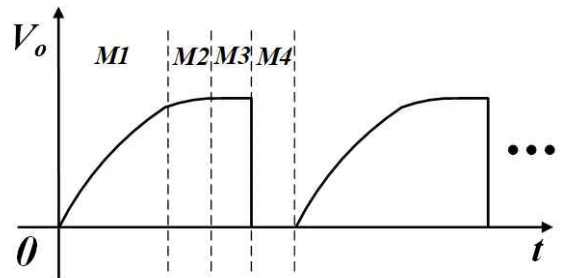


그림 2 커패시터 충전기의 동작 모드
Fig. 2 Circuit of capacitor charger

표 1 커패시터 충전기 사양 및 공진 파라미터
Table 1 Specifications of capacitor charger

Input voltage [V_{dc}]	510
Switching frequency [kHz]	34 ~ 100
Maximum output voltage [kV]	50
Maximum output power [kW]	50
Transformer turns ratio, $N_p : N_s$	5 : 250
Series resonant inductance, L_s [μH]	15
Series resonant capacitance, C_s [μF]	9.4
Parallel resonant capacitance, C_p [nF]	187

2.2 제안된 커패시터 충전기 특징

1) 높은 효율 및 전력 밀도: LCC 공진형 컨버터를 전류연속 모드로 설계하여 영전압 스위칭이 가능하고, 공진 전류를 사다리꼴 형태로 만듦으로써 전류의 실효값을 낮추어 도통 손실을 줄일 수 있다. 추가로, 전압 강하를 보상하기 위한 기법으로 버스트 모드를 사용함으로써 스위칭 횟수를 줄여 스위칭 손실 및 코어 손실을 줄일 수 있다. 변압기의 누설인덕턴스로 직렬공진 인덕터를 구현하였으며, 전압 밸런스를 위해 정류단 다이오드에 병렬로 연결한 커패시터를 병렬 공진 커패시터로 활용함으로써 높은 전력 밀도를 가진다.

2) 기생 인덕턴스 감소를 위한 버스바 구조: 그림 3과 같이 입력단의 파워 루프를 두 개의 버스바로 구현을 하였다. 버스바 사이의 자속 상쇄를 통해 기생 인덕턴스를 줄임으로써 스위치의 전압 링잉을 줄일 수 있다.

3) 출력전압의 높은 재현성: 출력전압의 높은 재현성을 위해서는 목표 출력 전압에서 한 스위칭 주기당 충전량을 줄이는 것이 중요하다.^[2] 따라서, 목표 출력전압에서 100kHz까지 스위칭주파수를 높임으로써 한 스위칭 주기당 충전량을 줄여 정밀한 출력전압 제어가 가능하다.

4) 고전압 절연 변압기: 그림 4는 고전압 변압기의 구조를 나타낸다. 유입 변압기를 사용하여 1차측과 2차측 사이의 50kV 절연을 확보 할 수 있다. 코어에 접지 전위를 부여함으로써 외함과의 절연을 확보할 수 있다. 2차측과 코어 사이의 절연을 위해 16kV/mm의 절연 내력을 가지는 mc nylon 재질의 보본이 사용되었다.

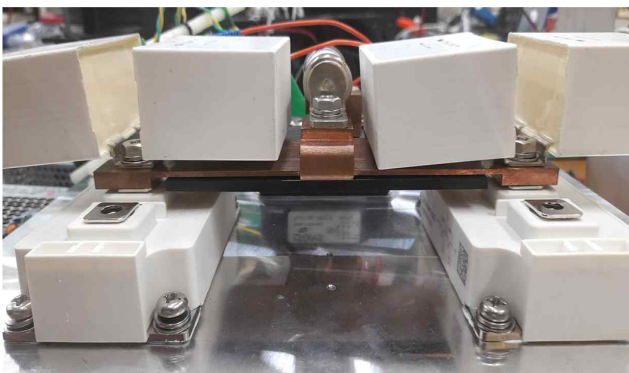


그림 3 커패시터 충전기의 인버터 구조
Fig. 3 Picture of inverter structure

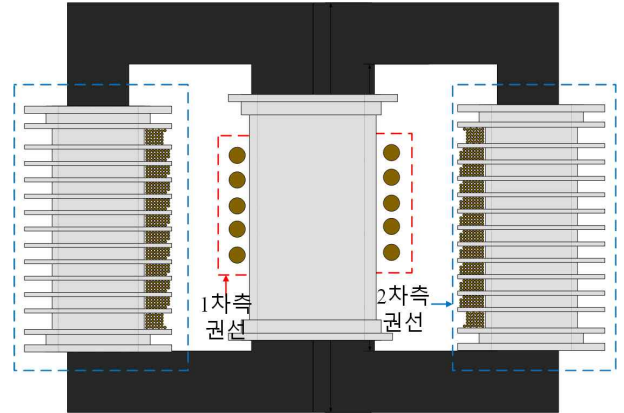


그림 4 고전압 변압기 구조
Fig. 4 Picture of high voltage transformer

3. 실험 결과

표 1에 설계된 파라미터들을 바탕으로 그림 5와 같이 정격 부하 실험을 위한 실험 환경을 구현하였다. 그림 6과 그림 7은 각각 커패시터 충전기의 시뮬레이션 파형과 정격 동작 파형을 나타낸다. 정격 동작 실험 파형이 시뮬레이션 파형과 동일하다는 것을 확인할 수 있다. 충전기의 정격실험을 위해 부하는 저항 부하(Load=50k Ω)를 사용하였으며, 그림 7과 같이 사다리꼴 형태의 공진 전류가 나타난다. 이를 통해 충전기는 정격 동작 시 낮은 전류 실효값을 가짐으로써 작은 도통 손실을 가지는 것을 확인할 수 있다.

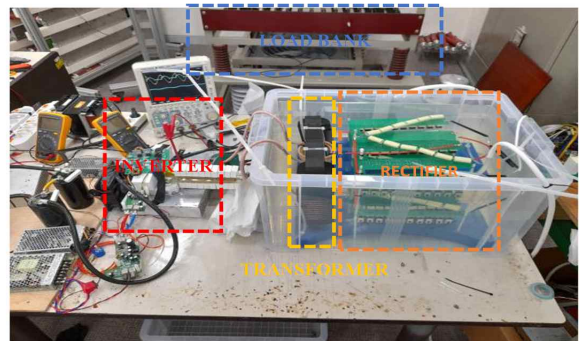


그림 5 실험 환경
Fig. 5 Experimental setup

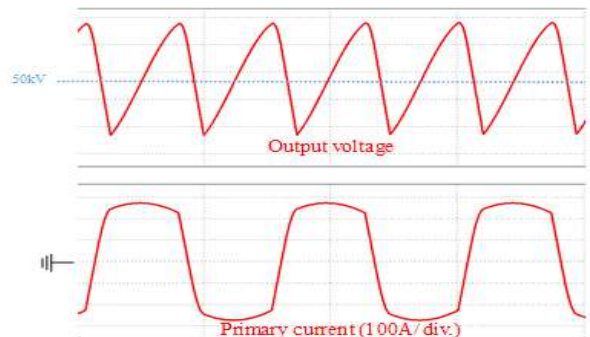


그림 6 PSIM을 이용한 정격 동작 시뮬레이션 파형
Fig. 6 Simulation waveform in rated load condition

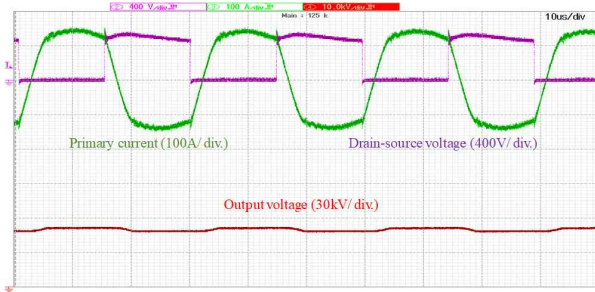


그림 7 커패시터 충전기의 정격 동작 실험 파형
Fig. 7 Experimental waveform in rated load condition

4. 결 론

본 논문에서는 클라이스트론 모듈레이터 용 50kV, 50kW 커패시터 충전기 개발에 대해서 기술하였다. 개발된 전원 장치는 LCC 공진형 컨버터 기반으로 설계하여 높은 효율과 전력 밀도를 가진다. 또한, 주파수 변조 제어와 버스트 모드 제어를 사용함으로써 출력전압의 높은 재현성을 가진다. 실험을 통해 충전기의 성능을 검증했다.

이 연구는 2023년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로
국가과학기술연구회의 지원을 받아 수행된 한국전기연구원
주요사업임(No. 23A01034)

참 고 문 헌

- [1] J. S. Oh, S. S. Park, Y. J. Han, I. S. Ko and W. Namkung, "Design Considerations for the Stability Improvement of Klystron-Modulator for PAL XFEL," Proceedings of the 2005 Particle Accelerator Conference, Knoxville, TN, USA, 2005, pp. 1165-1167, doi: 10.1109/PAC.2005.1590695.
- [2] S. Blume, D. Gerber and J. Biela, "High precision, low ripple 3kV capacitor charger," 2016 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC), San Francisco, CA, USA, 2016, pp. 113-119, doi: 10.1109/IPMHVC.2016.8012815.