

2.45GHz 산업용 마그네트론 구동을 위한 2.5kW DC 전원장치 설계

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

Design of 2.5kW DC power supply for 2.45GHz industrial magnetron

Tae-Hyun Kim*, Jung-Soo Bae*, Shin Kim*, Do-Kyun Kim*, Hyeong-Suk Kim**, Chan-Hun Yu**, Seong-Tae Han**, and Sung-Roc Jang**,**

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

ABSTRACT

본 논문은 1.8kW (4.5kV, 450mA)출력의 마그네트론을 구동하기 위한 2.5kW (5kV, 0.5A) 고전압 DC 전원장치 설계에 대해 기술한다. 무선 전력 전송을 위한 위상배열 시스템에 이용되는 마그네트론의 경우 인가되는 전압의 리플 최소화는 필수적이다. 본 논문에서는 소프트 스위칭을 기반으로한 400kHz 이상의 스위칭 주파수로 컨버터를 설계함으로써 출력리플을 저감하고 필터성분을 최소화 하여 전력밀도를 높일 수 있도록 한다. 변압기의 누설인덕턴스 만을 이용하여 공진 인덕터를 구현하고 변압기의 기생 커패시터 성분과 직렬로 스택킹 된 출력정류 다이오드의 전압 밸런싱을 위한 커패시터를 병렬 공진 커패시터로 활용한 LCC 공진형 컨버터 고밀도 설계에 대하여 기술한다. 또한, 공진전류의 Trapezoidal 해석 및 설계를 통해 도전 손실을 줄일 수 있는 LCC공진형 컨버터 기반의 마그네트론 구동전원 설계에 대하여 상세 기술하고 PSpice를 이용한 Simulation 및 실험 결과를 통하여 개발된 전원의 우수성을 검증한다.

1. 서론

산업용 마그네트론은 식료품, 의료기, 통신, 플라즈마, 등 다양한 용도로 사용되고 있으며, 무선 전력 전송을 위한 위상배열 시스템에도 응용이 되고 있다. 무선 전력 전송 시스템의 효율성은 마이크로파의 위상 안정도에 민감하고, 위상 안정도는 마그네트론의 노이즈에 영향을 받기 때문에 노이즈를 줄이기 위해 마그네트론 구동용 전원장치 출력 전압 리플의 저감이 요구된다. 출력 전압 리플 저감을 위해 고주파 스위칭이 필요하지만, 스위칭 손실과 스위치 스트레스가 증가하기 때문에 본 논문에서는 소프트 스위칭이 가능한 LCC 공진형 컨버터를 기반으로 400kHz이상의 스위칭 주파수로 동작하는 전원장치를 설계 및 제작한다.

2. 토폴로지 선정 및 설계 과정

2.1 전원장치 제작을 위한 토폴로지 선정

전원장치의 출력 전압 리플 저감하기 위해서는 고주파 스위칭 기반의 전원장치가 필요하다. 고주파 스위칭을 구현하기 위해서는 컨버터의 스위칭 손실과 스위치 스트레스를 줄이는

것이 중요하기 때문에 본 논문에서는 공진형 컨버터 기반의 전원장치 설계를 선택하였다. 공진형 컨버터 중에서도 변압기의 누설 인덕턴스 및 기생 커패시턴스를 활용하여 LC 공진탱크 구현이 가능한 LCC 공진형 컨버터를 선정하여 전력밀도를 높였다. 또, DCM 모드에 비해 공진전류의 RMS 값이 낮은 CCM 모드를 선택하고, Trapezoidal 형태의 공진전류 파형을 형성하여 도전손실을 줄였다.

2.2 제안된 LCC 공진형 컨버터의 동작 해석

본 논문에서 제안된 Half-bridge LCC 공진형 컨버터의 회로와 공진전류 파형을 각각 그림 1과 그림 2에 나타내었으며, 동작은 다음과 같이 해석된다.

- Mode 1 (t_0-t_1) : 시간이 t_0 전일 때, 다이오드 D1이 도통된 상태에서 S1이 영전압 턴-온을 한다. 공진전류(i_{Lr})는 공진 인덕터(L_r)와 하단의 직렬 공진 커패시터(C_r)를 통해 흐르게 되며, 병렬 공진 커패시터(C_p)를 충전한다.
- Mode 2 (t_1-t_2) : 병렬 공진 커패시터(C_p) 충전 후, 공진전류(i_{Lr})는 공진 인덕터(L_r)와 직렬 공진 커패시터(C_r)에 의해 결정되며, Mode 2 구간의 파형을 형성한다.
- Mode 3 (t_2-t_3) : 시간이 t_2 에서 S1이 턴-오프 된다. 이때의 공진전류의 방향은 Mode 2와 동일하기 때문에 S2의 역 병렬 다이오드 D2가 도통되고, LC 공진탱크에 큰 역전압이 걸리게 되면서 공진전류(i_{Lr})가 빠르게 감소한다. 또, 다이오드 D2가 도통되어있는 동안 스위치 S2를 영전압 턴-온 한다.

Mode 4 - Mode 6의 동작 해석은 Mode 1 - Mode 3의 해석과 동일하다.

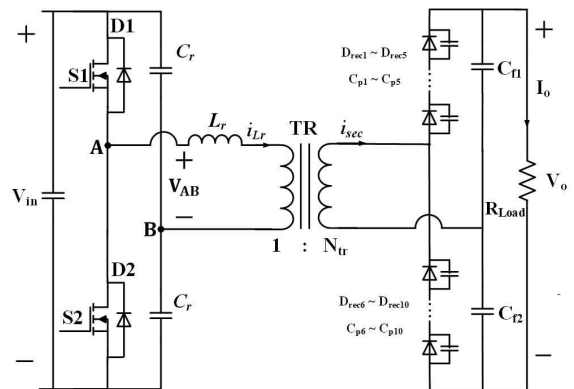


그림 Half-bridge LCC 공진형 컨버터 회로도
 Fig. 1. Half-bridge LCC Resonant Converter

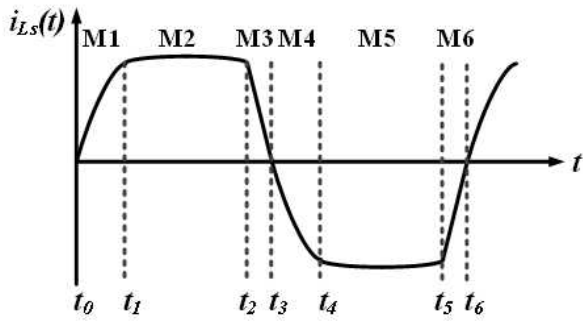


그림 2 LCC 공진형 컨버터의 공진전류 파형
Fig. 2. Resonant Current waveform of LCC Resonant Converter

2.3 LCC 공진형 컨버터의 공진 파라메타 설계

LCC 공진형 컨버터 설계를 위한 수식 및 과정은 다음과 같다.^[1]

$$P_{TR} = \left(1 - \frac{5}{8} \frac{f_s}{f_{op}}\right) \cdot V_{AB} \cdot I_{Lr,peak} \quad (1)$$

수식 (1)은 변압기의 2차측으로 전달되는 전력(P_{TR}), 스위칭 주파수(f_s), 공진 인덕턴스와 병렬 공진 커패시터로 결정되는 병렬 공진 주파수(f_{op}) 그리고 1차측 공진전류 피크값($I_{Lr,peak}$)의 관계식이다. 수식 (1)로부터 1차측 공진전류 피크값을 계산한다.

$$Z_{op} = \sqrt{\frac{L_r}{C_p}} = \frac{2 \cdot V_{AB} + V_{Cp,peak}}{I_{Lr,peak}} \quad (2)$$

수식 (2)는 병렬 공진탱크 특성 임피던스(Z_{op})와 변압기의 입력 전압(V_{dc}), 병렬 공진 커패시터 전압($V_{Cp,peak}$), 1차측 공진전류 피크값의 관계식이다. 수식 (2)로부터 병렬 공진탱크 특성 임피던스를 계산한다.

$$L_r = \frac{Z_{op}^2}{2 \cdot \pi \cdot f_{op}} \quad (3)$$

$$C_p = \frac{L_r}{Z_{op}^2} \quad (4)$$

수식 (2)에서 계산된 병렬 공진탱크 특성 임피던스로부터 수식 (3)과 수식 (4)를 이용하여 공진 인덕터(L_r)와 병렬 공진 커패시턴스(C_p)를 계산한다.

$$C_r = \frac{I_{Lr,peak} \cdot \left(\frac{T_s}{2} - \frac{3}{8} T_{op}\right)}{2 \cdot V_{Cr,peak}} \quad (5)$$

마지막으로, 수식 (5)를 이용하여 직렬 공진 커패시턴스(C_r)를 계산한다.

표 1 개발된 전원장치의 LCC 공진형 컨버터 파라메타
Table 1 Designed parameters of LCC Resonant Converter

V_{in}	$513 \pm 10\%$
N_{TR}	9
f_{sw} [kHz]	435
f_{op} [kHz]	870
$i_{Ls,peak}$ [A]	14.26
Z_{op} [Ω]	40.23
L_r [μ H]	7.36
C_p [nF]	4.54
C_r [nF]	17.67

3. PSpice Simulation 및 실험

3.1 PSpice Simulation 모델

제안된 LCC 공진형 컨버터의 PSpice Simulation 모델은 그림 3과 같다. 그림 4에는 공진전류, 드레인-소스 전압, 출력 전압의 Simulation 결과 파형을 나타내었다. 그림 3에서 PSpice Simulation 모델의 LCC 공진형 컨버터 파라메타들은 변압기 제작 후 누설 인덕턴스의 실제 측정치를 기준으로 재설계된 값들이 적용되었다. 그림 4에서 공진전류, 드레인-소스 전압, 게이트-소스 파형을 통해 소프트 스위칭이 잘 이루어지고 있음을 확인할 수 있다. 출력 전압 리플은 출력 커패시턴스 0.2 μ F 기준으로 약 1.2V(0.024%)를 보여준다.

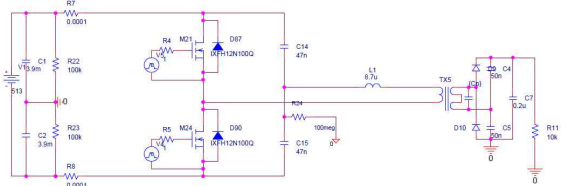


그림 제안된 LCC 공진형 컨버터의 PSpice Simulation 회로
Fig. 3. PSpice Simulation Circuit of proposed LCC Resonant Converter

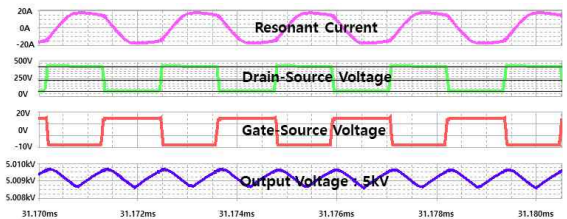


그림 제안된 LCC 공진형 컨버터의 PSpice Simulation 출력 파형
Fig. 4. PSpice Simulation waveforms of proposed LCC Resonant Converter

3.2 개발된 전원장치의 저항 부하 실험 및 결과

개발된 전원장치의 저항 부하 실험 주요 파형들을 그림 5에 나타내었다. 그림 5의 공진전류 파형은 PSpice Simulation 모델의 공진전류 결과 파형과 비교하였을 때, Mode 2 구간에서 하강하는 형태를 보인다. 두 공진전류 파형의 차이는 저항 부하 실험 시의 입력전압과 PSpice Simulation 상의 입력전압의 차에 의해 발생하였다. 그림 6과 그림 7에는 75kHz로 동작하는 Alter사의 SM445 마그네트론 전원장치의 저항 부하 실험 출력 전압과 개발된 전원장치의 저항 부하 실험 출력 전압을 각각 나타내었다. Alter사의 SM445의 개발된 전원장치의 경우 450kHz 동작 조건으로 출력 전압 파형이 측정되었다. 개발된 전원장치의 경우 출력 전압 리플 저감으로 인해 출력 전압 파형이 SM445의 출력 전압 파형과 비교하여 안정적임을 확인할 수 있다.

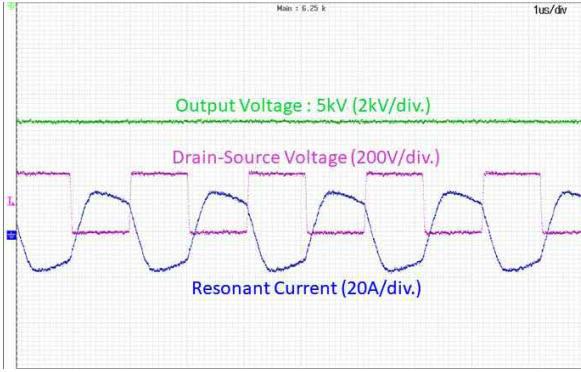


그림 5 개발된 전원장치의 정격 실험 주요 파형
Fig. 5. Experimental waveforms of Developed Power Supply in rating operation condition

Output voltage 4.3kV (100V/div.)

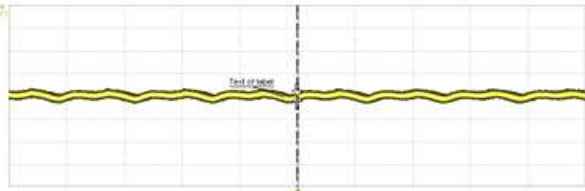


그림 6 Altera SM445 전원장치의 저항 부하 출력 전압 파형
Fig. 6. Output voltage waveform of SM445 Power Supply of Altera at Resistor Load Test

Output voltage 4.3kV (100V/div.)

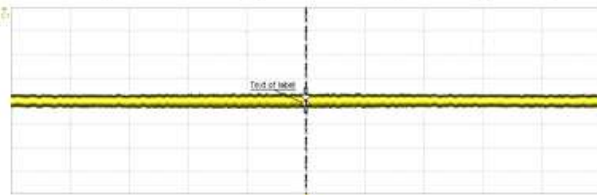


그림 7 개발된 전원장치의 저항 부하 출력 전압 파형
Fig. 7. Output voltage waveform of Developed Power Supply at Resistor Load Test

3. 결론

본 논문에서는 마그네트론 구동용 전원장치의 설계, PSpice Simulation 그리고 저항 부하 실험에 대해 기술하였다. 제안된 LCC 공진형 컨버터 기반의 전원장치 설계는 고주파 스위칭이 가능하다는 점에서 출력 전압 리플 저감에 도움이 되는 것을 확인하였으며, 향후 마그네트론 부하 실험을 통해 마그네트론의 위상 안정도에 미치는 영향을 확인할 예정이다.

본 연구는 2019년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 국가과학기술연구회의 지원을 받아 수행된 한국전기연구원 주요사업임.

(No. 19-12-N0101-12)

참고 문헌

- [1] 장성록, 서정호, 안석호, 김종수, 류홍제, “30kW, 95GHz 자이로트론 구동을 위한 50kV, 100kW 고전압 전원장치”, 전력전자학회논문집, 2015. 07, 345-346
- [2] Sung-Roc Jang, et al, “Trapezoidal Approximation of LCC Resonant Converter and Design of Multi-Stage Capacitor Charger for Solid-State Marx Modulator”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.33, no.5, pp.3816-3825 May. 2018
- [3] 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.
- [4] Byeong-Mun Song, et al, “Power supply Design for Magnetron Power Source from Single Phase Supply”, 2015 International Conference on Energy Systems and Applications (ICESA 2015), pp. 546-551, Pune, India, Oct. 2015
- [5] 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.