

유연전극의 플라즈마 반응을 위한 고효율 전원장치

곽봉우^{*,**}, 김명복^{*}

^{*}한국생산기술연구원 EV부품소재그룹

^{**}충남대학교 전기공학과

High Efficiency Power Supply for Plasma Reaction of Flexible Electrode

Bongwoo Kwak^{*,**} and Myungbok Kim^{*}

EV Components & Materials Group, Korea Institute of Industrial Technology^{*}

Electrical Engineering, Chungnal National University^{**}

ABSTRACT

본 논문은 유연전극의 플라즈마 반응을 위한 고효율 전원장치에 대한 연구이다. 유연전극은 저온 플라즈마 방전으로, 수 kV의 AC형태의 고전압 및 소전력 구동 사양이 요구된다. 상용전원을 사용하는 유연전극용 고전압 전원장치는 AC-DC, DC-AC로 변환이 가능한 2단 구조를 갖는다. 1단은 낮은 전력에서 높은 효율을 달성 할 수 있는 CrM(Critical Conduction Mode) PFC와 전부하 영역 소프트 스위칭을 통해 고효율 달성이 용이한 LLC 공진 컨버터를 사용하였다. 유연전극은 사양에 따라 커패시턴스가 달라진다. 따라서, 본 논문에서는 유연전극 사양에 따른 공진 주파수의 최적화를 통해서 유연전극의 플라즈마 반응 및 특성 시험을 위해 고효율 전원장치를 구성하였다. 실험을 통해서 유연전극용 고효율 전원장치를 검증하였다.

1. 서론

저온 플라즈마의 저전력으로 구동이 가능하여 의료분야의 살균/ 멸균을 위해 많이 주목받는 기술이다. 살균/ 멸균에 대한 치료 성능을 높이기 위해서는 상처 부위에 보다 밀착되어야 한다. 동축형 유연전극은 직조 및 편조 등으로 다양한 형태로 구성이 가능하다.[1] 유연전극의 플라즈마 방전을 위해서는 수kV의 AC 형태의 고전압 및 소전력 구동 사양이 요구된다. 상용전원을 사용하는 유연전극용 고전압 전원장치는 AC-DC, DC-AC 변환이 가능한 2단구조로 구성되어야 한다.

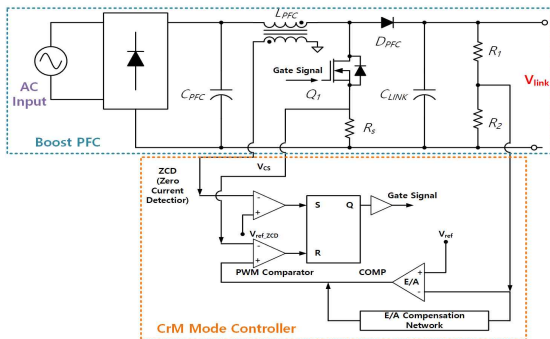


그림 1 CrM PFC 회로
Fig. 1 Circuit of CrM PFC

1단은 낮은 전력에서 높은 효율을 달성 할 수 있는 CrM PFC가 적합하다. CrM PFC는 유사 공진으로 전류 제어에 따른 스위칭 주파수가 달라지고, 빠른 응답 특성을 요구한다. 따라서 아날로그 제어 기반으로 구성하였으며, 그림 1과 같다.

2단은 유연전극 양단에 고전압 공급을 위해 높은 승압비를 갖는 변압기를 적용한 LLC 공진형 컨버터를 사용하였으며, 그림 2와 같이 고승압비를 갖는 트랜스포머를 포함한다.

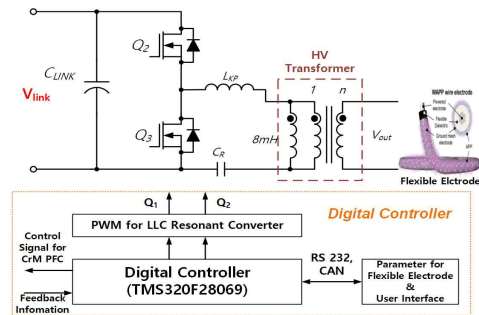


그림 2 LLC 공진 컨버터 구성
Fig. 2 Configuration of LLC Resonant converter

하지만, 유연전극이 가지는 커패시턴스에 의해서 LLC 공진 컨버터의 공진 주파수가 달라진다. 동축형 유연전극의 커패시턴스는 식 (1)과 같다.

$$C_L = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r \cdot s_h \cdot l}{\ln r_2 - \ln r_1} \quad (1)$$

여기서, l 은 유연전극 길이, ϵ_r 은 유전체의 상대 유전율, s_h 는 편조율, r_1 은 유연전극의 반지름. r_2 는 유전체의 내경에 대한 반지름이다 [1]. 유연 전극은 두께, 길이 등 사양에 따라 커패시턴스가 달라진다. 유연전극에 연결된 LLC 공진 컨버터의 주파수에 따른 입/출력 이득관계식은 식 (2)와 같이 정리된다.

$$T(\omega) = \frac{V_O}{V_I} = \frac{\omega L_m / (\omega L_k - \frac{1}{\omega C_{Lp}})}{\omega L_k - \frac{1}{\omega C_R} + \omega L_m / (\omega L_k - \frac{1}{\omega C_{Lp}})} \times \frac{1}{\omega L_k - \frac{1}{\omega C_{Lp}}} \quad (2)$$

$$= \frac{1}{\left[\left(\frac{\omega}{\omega_1} \right)^2 - 1 \right] + \left(\frac{\omega_4}{\omega} \right)^2 \cdot \left[\left(\frac{\omega}{\omega_2} \right)^2 - 1 \right] \cdot \left[\left(\frac{\omega}{\omega_3} \right)^2 - 1 \right]}$$

링크 전압(Vlink)와 출력전압(Vout)의 이득 관계식은 식 (3)과 같이 정리 할 수 있다.

$$\frac{V_{out}}{V_{link}} = \frac{\frac{2}{\pi} \cdot \left(\frac{N_s}{N_p}\right)}{\left[\left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2 - 1\right] + \left(\frac{\omega_4}{\omega}\right)^2 \cdot \left[\left(\frac{\omega}{\omega_2}\right)^2 - 1\right] \cdot \left[\left(\frac{\omega}{\omega_3}\right)^2 - 1\right]} \quad (3)$$

위 수식을 기반으로 LLC 공진 컨버터의 공진 주파수가 영향을 받는 것을 알 수 있다. 유연전극 사양에 맞게 주파수가 변경되어야 출력을 일정하게 제어 할 수 있다. 제안하는 유연전극용 고효율 전원장치는 유연전극 사양에 맞게 공진 주파수를 변경하여, 초기 구동과 정상상태에서 안정적으로 전압을 공급 할 수 있다.

2. 실험 결과 및 분석

고전압 전원장치의 유연전극 구동 실험 및 검증을 위해서 그림 3과 같이 시제품을 구성하고, 사양 표 1과 같다. 유연전극의 길이는 1 m, 편조율은 50%이다.

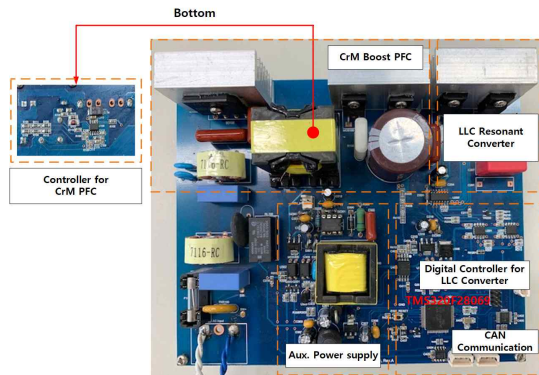
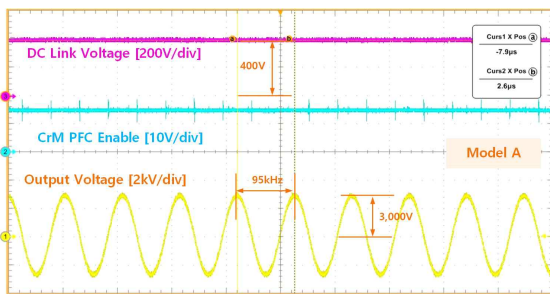
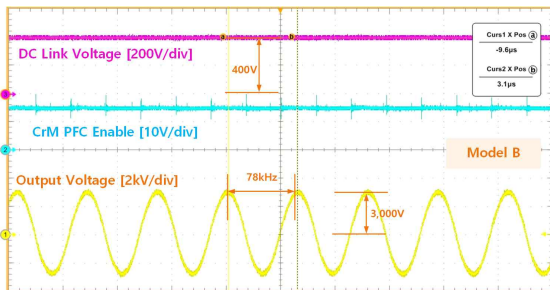


그림 3 유연전극용 전원 장치
Fig. 3 Power Supply for Flexible Electrode



(a)



(b)

그림 4 유연전극사양에 따른 구동 파형
Fig. 4 Operating Waveforms by Flexible Electrodes specification.

표 1. 유연전극 사양 및 구동 회로 상수

유연전극 사양		전원장치 사양	
ϵ_r	11.9 F/m	Input Voltage	220 V _{AC}
A_r ₁	0.5 mm	C_R	22 nF
A_r ₂	1.5 mm	L_{PFC}	350 μ H
B_r ₁	1.0 mm	L_{kp}	0.218 μ H
B_r ₂	2.0 mm	L_m	8 mH
A_C _L	0.3 nF	Turn ratio	50 : 750
B_C _L	0.47 nF	Output Power	3,000Vpk, 150W

유연 전극 사양에 따른 동작 특성은 그림 3과 같다. 유연전극 사양에 맞게 출력 주파수를 변경하여, 출력 전압을 3kV로 일정하게 유지되는 것을 확인할 수 있다.

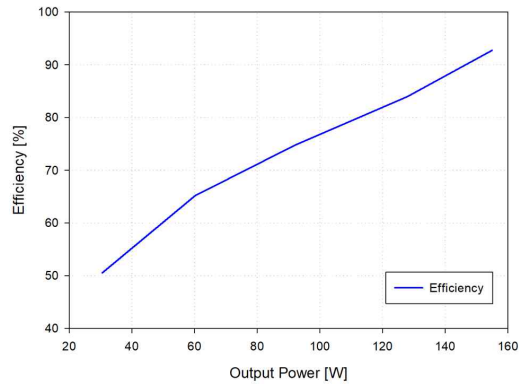


그림 5 부하별 효율 특성
Fig. 5 Efficiency Characteristics by Load

부하에 따른 전력변환효율은 그림 5와 같다. 높은 전압으로 인해서 트랜스포머의 절연거리로 인해 크게 설계되어 낮은 전류 사양에서 손실로 인한 효율이 낮다. 하지만, 정격 부하 조건에서 최대 92.7%의 효율로 높은 효율 특성을 검증하였다.

3. 결론

동축형 유연전극의 플라즈마 반응을 위한 전원장치에 대해 제안하였다. 제안하는 전원장치는 2단 구조를 가진다. 낮은 용량에서 고효율 달성이 용이한 CrM PFC를 사용하여 링크 전압을 제어한다. 링크 전압을 기반으로 LLC 공진 컨버터를 사용하여 유연전극에 높은 전압 사양의 AC 전원을 공급하도록 구성하였다. 유연전극 사양에 따른 공진주파수 최적화 기법 및 특성 시험을 위해 전원장치를 구성하였다. 실험 결과를 바탕으로 제안하는 전원장치의 실용성을 입증하였다.

이 논문은 국방과학연구소의 민군기술적용사업 (17-SF-2B-04)의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

참고 문헌

[1] H. S. Jung, J. A. Seo, S. K. Choi, "Wearable Atmospheric Pressure Plasma Fabrics Produced by Knitting Flexible wire Electrodes for the Decontamination of Chemical Warfare Agents", Scientific Reports, pp. 1-9, 2017.