

유연전극의 플라즈마 발생용 고전압 전원장치에 대한 연구

곽봉우^{*, **}, 김종훈^{**}, 김명복^{*}
 한국생산기술연구원 EV부품소재그룹
 충남대학교 전기공학과

A Study on High Voltage Power System for Plasma Reaction of Flexible Electrode

Bongwoo Kwak^{*, **}, Jonghoon Kim^{**} and Myungbok Kim^{*}
 EV Components & Materials Group, Korea Institute of Industrial Technology^{*}
 Electrical Engineering, Chungnam National University^{**}

ABSTRACT

본 논문은 유연전극의 플라즈마 발생용 고전압 전원장치에 대한 연구이다. 유연전극의 플라즈마 발생용 고전압 전원장치는 가변 전압을 위해 투 스위치 포워드 컨버터와 주파수 변환을 위한 LLC 공진 컨버터로 구성된다. 유연전극의 경우 장비의 구조에 대한 자유도가 높기 때문에, 살균 및 멸균 효율이 높다. 다만, 유연전극은 길이와 재질에 따라 인덕턴스와 커패시턴스가 달라진다. 따라서, 유연전극의 정확한 모델링을 통해 공진 주파수의 최적화가 필요하다. 본 논문에서는 유연전극 길이와 재질에 따른 정확한 모델링을 통해 LLC 공진 주파수를 최적화하고, 실험을 통해 제안하는 유연전극의 플라즈마 발생용 고전압 전원장치를 검증하였다.

1. 서론

플라즈마를 활용하여 의료가 적용을 위해서는 상처 부위에 보다 밀착되어야 치료 효능이 뛰어나다. 그래서 동축 케이블과 유사한 유연 전극을 활용하여 직조 및 편조 등으로 보다 다양한 형태로 치료 패드를 만들 수 있다^[1]. 플라즈마 발생을 위해서는 전극 양단에 고전압이 필요하여 승압비가 높은 변압기를 적용한 공진형 컨버터가 주로 사용된다^[2]. 하지만, 전극이 가지는 커패시턴스에 의해서 공진형 컨버터의 공진 주파수등에 영향을 받기 때문에 이를 고려하여 주파수 특성을 분석해야 한다. 유연전극의 단면은 그림 1과 같다. 유연전극의 외피는 접지 단과 연결이 되며 내심은 출력 전압이 인가되며 외피는 유연성 유지를 위해서 일정 편조율(s_h)을 가진다.

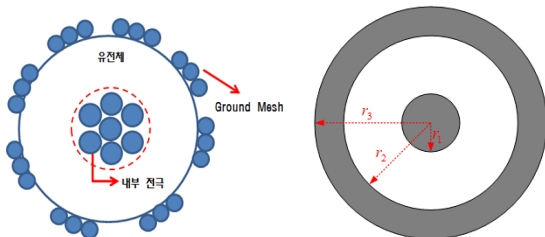


그림 1 플라즈마 발생을 위한 유연전극 단면도
 동축형의 유연전극이 가지는 커패시턴스를 계산하면 아래 식과 같이 표현할 수 있다.

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

여기서 l 은 유연전극의 길이이며, ϵ_r 은 전극 내부($r_1 \sim r_2$)의 유전체로 사용된 실리콘 재질의 상대 유전율이다.

유연전극을 구동하기 위한 공진형 하프브릿지 컨버터로는 그림2와 같이 구성할 수 있다. 플라즈마 반응을 위해서 유연전극 양단에 형성되는 전압은 수kV정도가 필요하므로 $N_p : N_s$ 는 고승압 권선비의 변압기를 구성하였다.

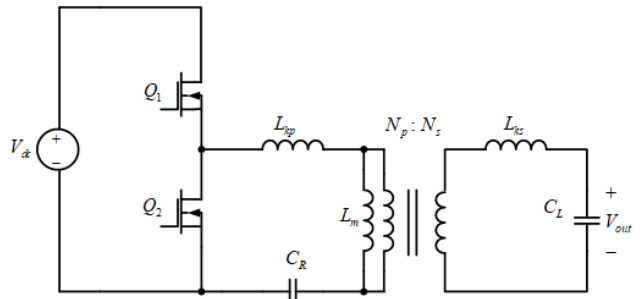


그림 2 유연전극 플라즈마 발생을 위한 하프브릿지 컨버터

유연전극의 커패시턴스로 인한 입출력 관계식을 유도하기 위해서 그림 2의 회로를 그림3과 같이 변압기의 1차단에서의 등가회로 구성을 하여 주파수 특성을 파악해야 한다^[3].

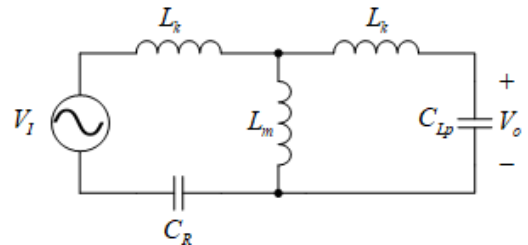


그림 3 입출력 전달함수유도를 위한 등가 회로

그림 3에서 회로 상수는 아래와 같이 정리할 수 있다.

$$L_{kp} \cong \left(\frac{N_p}{N_s}\right)^2 L_{ks} = L_k \left(\frac{N_s}{N_p}\right)^2 C_L = C_{Lp} \left(\frac{N_p}{N_s}\right) V_{out} = V_O$$

그림 3의 입력전압(V_I)는 공진형 컨버터의 Q_1 , Q_2 의 구동 주파수에 의해서 발생하는 구형파의 기본파 성분이다. 주파수에 따른 입출력 이득을 식으로 정리하면 아래 식과 같다.

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

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

여기서 각각의 주파수는 회로의 인덕턴스와 커패시턴스의 조합으로 형성되는 주파수이다.

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L_k C_{Lp}}}, \omega_2 = \frac{1}{\sqrt{L_k C_R}}, \omega_3 = \frac{1}{\sqrt{(L_m + L_k) C_{Lp}}}, \omega_4 = \frac{1}{\sqrt{L_m C_R}}$$

입력전압(V_{dc})와 출력전압(V_{out})의 이득 관계식은 아래와 같이 정리할 수 있다.

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

이를 구동 주파수에 따른 이득($T(\omega)$)을 그래프로 구성해 보면 그림 4와 같이 표현할 수 있다.

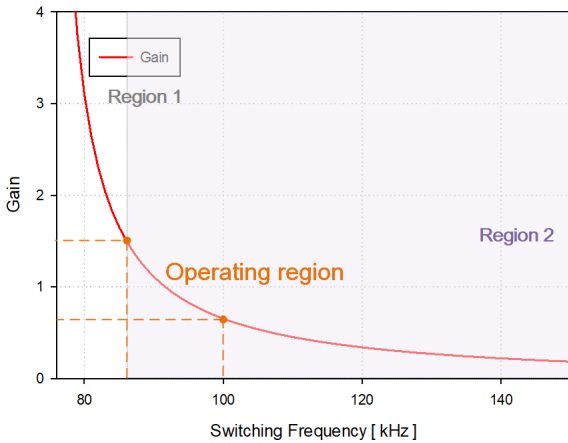


그림 4 구동주파수에 따른 입출력 이득관계

그림 4와 같이 구간2에서 초기 구동과 정상상태에서의 구동을 해야 시스템을 안정적으로 구동할 수 있다.

2. 실험 결과 및 분석

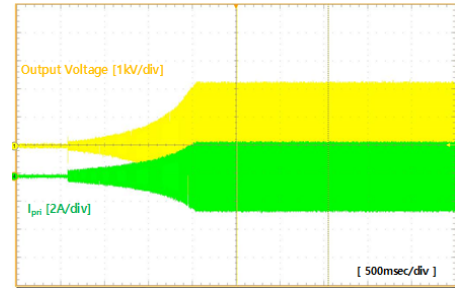
유연전극용 공진형 컨버터의 동작 검증을 위해서 표1과 같은 사양을 가지는 150W급의 시제품을 구성하였다.

표 1. 유연전극 사양 및 구동 회로 상수

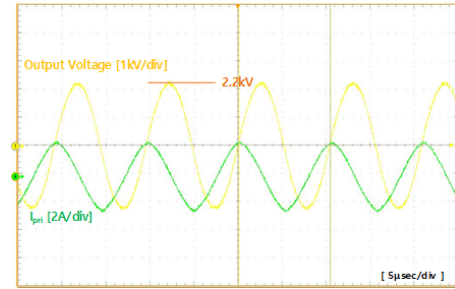
유연전극 사양		공진형 컨버터 사양	
ϵ_r	11.9 F/m	L_{kp}	0.218 mH
s_h	50 %	L_m	8 mH
l	1.0 m	N_p	50T
r_1	0.5 mm	N_s	500T
r_2	1.5 mm	C_R	22 nF
V_{dc}	400 V	C_L	0.3 nF

플라즈마 발생을 위한 공진형 컨버터의 초기 구동 주파수는

250kHz이며 정상상태에서의 구동 주파수는 95kHz로 구동하였으며 초기 및 정상상태에서의 구동 파형은 그림5와 같다.



(a) 컨버터 초기 구동 파형



(b) 컨버터 정상상태에서의 출력 전압 파형과 일차측 전류 파형
그림 5 LLC 공진 컨버터 실험 결과

초기 soft-start를 도입하여 과도 상태에서의 입력전류의 도입 전류가 거의 발생하지 않았으며 정상상태에서의 출력 전압은 2.2kV이며 이때 유연전극에서 플라즈마 반응이 발생하였다.

3. 결론

유연전극 구조를 가진 플라즈마 발생용 전원단을 위해 공진형 컨버터를 제안하였다. 유연전극의 커패시턴스를 고려하여 주파수 응답특성을 고려하여 전원단의 초기 주파수 선정 및 정상상태에서의 주파수를 고려하여 컨버터 설계를 진행하였으며 실험을 통하여 그 효율성을 검증하였다.

이 논문은 국방과학연구소의 민간기술적용사업 「유연전극 구조를 가진 플라즈마 치료기기 개발」 과제 수행에 의하여 연구되었음

참고 문헌

- [1] Heesoo Jung, Jin Ah Seo, Seungki 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.
- [2] Minjun Kwon, woo cheol Lee, "A Study on the Analysis and control of No-Load Characteristics of LLC Resonant Converter for Plasma Process", 2018 International Power Electronics Conference, pp. 114 - 117, 2018.
- [3] Hang-seok Choi, "Design Consideration of Half-Bridge LLC Resonant Converter", Journal of Power Electronics, vol.7, No.1, pp. 13 - 20, 2007.