

대기압 플라즈마 전원장치의 반응기 파라미터에 관한 연구

이용덕*, 이우철*, 이택기*, 유효열**, 박형진**
 *국립 한양대학교 전기공학과, ** (주) 다원시스

The study on Reactor Parameters of Atmosphere Plasma Power Supply

Yong-Duk Lee*, Woo-Cheol Lee*, Taek-Ki Lee*, Hyo-yol Yoo**, Hyung-Jin Park**
 *Dept. of Electrical Engineering, Hankyong National Univ., **DAWONSYS Co. Ltd.

Abstract - This paper proposed the extraction method of reactor parameters in atmosphere plasma power supply. This methods is performed by detection of phase difference between inverter voltage and current, and extraction of impedance through active, reactive power. The validity of the proposed scheme is investigated through simulation results.

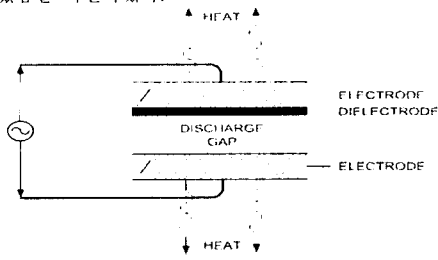
1. 서 론

산업 현장에서 사용하는 대기압 플라즈마 장비의 전극은 장비 메이커의 노하우로서 기업 비밀로 되어있다. 그러나 전극 파라미터를 잘 알고 이와 잘 결합되게 대기압 플라즈마 전원장치의 파라미터를 조정하여야만, 플라즈마 장비가 고품질, 고효율로 피처리 소재를 처리할 수 있다. 이러한 정합을 장비 운영자가 용이하게 할 수 있도록 Intelligent 하게 플라즈마 전극의 파라미터를 추출하고, 장비 운영자가 매우 간단히 조정 할 수 있도록 전원 장치의 Display Windows를 통하여 Guide를 하기 위한 연구이다.

대기압 플라즈마 반응기는 상압의 중성 가스에 높은 전계를 인가하여 중성가스의 일부분이 양성자와 전자로 분리되고 전계의 에너지에 의해서 중성 기체와 전자 및 양성자가 혼합된 플라즈마를 발생시키는 장비로서 그림1에 나타내었다. 이러한 플라즈마는 에너지가 높고 불안정하여 화학적 활성상태가 되는데 이를 이용하여 폴리머나 메탈 소재 표면의 미세 유기오염물 또는 산화물 등을 효과적으로 제거할 수 있다.

이때 전원장치는 반응기내의 상태에 따라(유입 가스의 압력 및 가스의 성분, 전극 변화) 전원장치의 전압과 전류의 위상이 변화하게 되어 반응기에 안정적인 전압공급이 어렵게 된다. 즉 이러한 임피던스의 부정합 및 플라즈마 반응기의 변경에도 정상적으로 동작될 수 있도록 전원 장치는 설계되어야 한다.^[1]

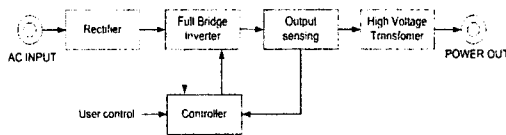
본 논문에서의 주 회로는 스위칭 주파수 30kHz의 위상 변위 풀 브릿지(Phase Shift Full-Bridge)방식의 인버터와 특고압 전원승압 변압기 및 출력장치로 구성되어있다. 시뮬레이션을 통하여 반응기의 전극 및 임피던스 변화에 따른 다양한 조건에서도 출력 전압을 안정되게 발생시킬 수 있음을 확인하였다.



〈그림 1〉 Plasma Reactor

2. 전원 장치

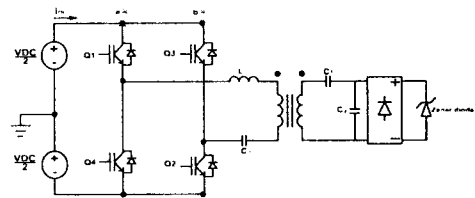
그림 2는 대기압 플라즈마 전원 장치의 구성도를 나타내었다. 전원장치의 주 전력회로는 위상변위 방식의 풀 브릿지 PWM인버터로 구성되어 있고 4개의 IGBT스위치 모두 영전압 스위칭으로 동작한다.



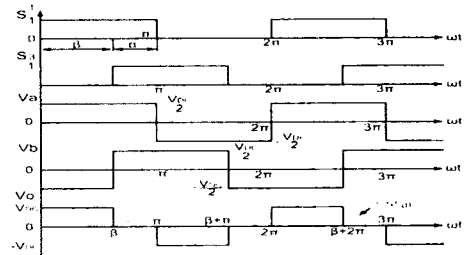
〈그림 2〉 대기압 플라즈마 전원장치 블록도

2.1 풀 브릿지 인버터^[2]

그림 3은 단상 풀 브릿지 인버터의 회로 구성을 보여주고, PWM출력방식은 준 구형파 인버터이다. 각 폴의 풀전압이 구형파이고 두 폴전압의 위상차가 β 가 되도록 제어하면 그림 4와 같이 출력전압은 준 구형파(quasi-square wave)가 된다. 여기서 β 는 준 구형파의 기본파의 크기를 조절하는 제어 변수가 된다.



〈그림 3〉 단상 풀 브릿지 인버터 및 반응기



〈그림 4〉 준 구형파 출력 전압

2.1.1 준 구형파 방식의 PWM 발생 방법

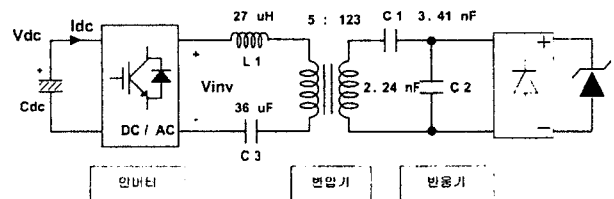
식(1),(2)는 디지털 제어기로 PWM을 발생하는 방법을 설명해준다. a상 스위치는 180도 Turn-on, Turn-off 하고, b상 스위치는 지령치 와 DC전압, 스위칭 주파수에 의하여 PWM 폭이 결정된다.

$$T_{a,on} = 0, \quad T_{a,off} = \frac{T_{smp}}{2} \quad (1)$$

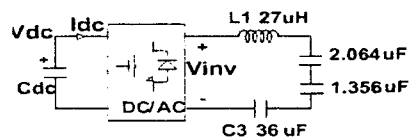
$$T_{b,on} = \frac{1}{V_{dc}} \frac{1}{T_{smp}} V_{ref}, \quad T_{b,off} = T_{b,on} + \frac{T_{smp}}{2} \quad (2)$$

2.2 반응기 모델링과 공진 주파수^[3]

그림 5는 단상 풀 브릿지 인버터와 공진을 위한 인덕터(L_1), 승압을 위한 변압기, DC차단을 위한 커패시터(C_3), 반응기(C_1, C_2 , Zener Diode)를 보여준다. 반응기 모델링은 커패시터 2개와 Zener Diode로 모델링 하였는데 Zener Diode는 일정 전압 이상일 경우 도통하여 반응기 C 값은 ($C_1 // C_2$)에 C_1 값으로 커지게 된다. 즉 공진주파수 입장에서 보면 반응기 동작 전(Zener Diode동작 전)의 공진주파수보다 반응기 동작 후의 공진주파수가 낮아지게 된다. 그림 6은 공진주파수를 계산하기 위하여 변압기 2차측을 1차측으로 환산하여 그런 등가회로이다. 2차측을 1차측으로 환산하는 수식은 식(3)과 같다.



〈그림 5〉 인버터와 반응기 모델링



〈그림 6〉 변압기 2차측을 1차측으로 환산

$$a = 1차측턴수/2차측턴수, \quad L = a^2 L, \quad C = C/a^2 \quad (3)$$

표 1은 공진주파수를 계산한 표로 파워부에 존재하는 모든 C값에 따른 주파수를 나타낸다. 여기서 DC차단 커패시터는 용량이 커서 실제 공진 주파수에는 영향을 못 미치는 것을 알 수 있다. 그리고 반응기가 동작 후의 공진 주파수는 동작 전 보다 낮아진다.

〈표 1〉 C값 변동에 따른 공진 주파수

공진주파수 L_1	$\Pi_0(C_1)$	$\Pi_0(C_1//C_3)$	$\Pi_0(C_1//C_2)$	$\Pi_0(C_1//C_2//C_3)$
22uH	23.619k[Hz]	24.287k[Hz]	37.517k[Hz]	37.937k[Hz]
27uH	21.320k[Hz]	21.923k[Hz]	33.886k[Hz]	34.245k[Hz]
32uH	19.583k[Hz]	20.138k[Hz]	31.108k[Hz]	31.456k[Hz]

3. 시뮬레이션 결과

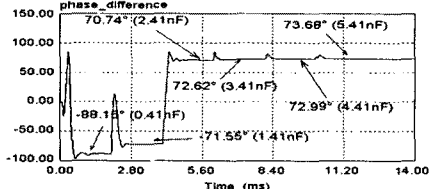
시뮬레이션은 PSIM을 통하여 파라미터 매칭 및 추출을 수행하였으며 시뮬레이션에 사용된 변수값은 표 2와 같다.

〈표 2〉 시스템 사양 및 파라미터

입력전압	285 V _{dc}	C ₁	0.41nF~5.41nF 가변
변압기 권수비	5:123	C ₂	2.24nF
주 스위칭 주파수	30kHz	C ₃	36uF
Duty ratio	0.75	L ₁	27uH
체너다이오드(Breakdown voltage)	2.28k[V]		

3.1 Zero-Crossing을 이용한 전압,전류 위상차 검출

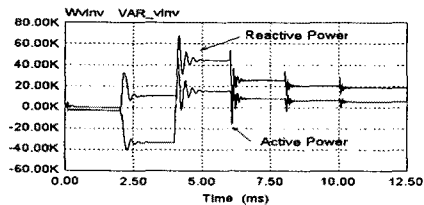
Zero-Crossing하기 위해서 인버터 출력부의 전류를 받아 0이 되는 시점을 검출한다. 이 값을 PWM한 인버터의 출력 전압과 비교하여 위상차를 추출하게 된다. 즉 임피던스의 부정합 상황과 반응기의 변경을 위상차를 통해서 알 수 있다. 또한 위상이 진상 또는 지상차이를 알게 되면 공진을 위한 인덕터(L₁)을 통해 반응기의 전극범위를 알 수 있다. 그림 7은 반응기 모델링에서 C₁값이 0.41nF~5.41nF까지 1nF씩 증가 할 때, 위상차가 진상 88°에서 지상 73°까지의 변화를 보여준다.



〈그림 7〉 C₁값 변화에 따른 위상변화

3.2 Complex Power 측정

Complex Power를 계산하게 되면 Active Power와 Reactive Power를 구할 수 있다. 이 값을 통해서 변압기 1차측 및 2차측의 파라미터를 추출할 수 있다. 그림 8은 반응기 모델링에서의 C₁값이 0.41nF~5.41nF까지 1nF씩 증가 할 때 PSIM에서의 전력 측정 프로브를 통한 인버터의 유효 및 무효 전력을 보여준다.



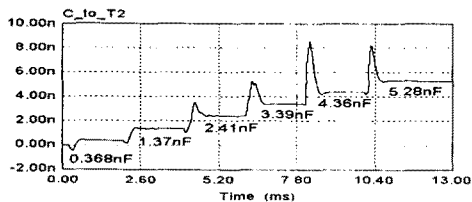
〈그림 8〉 전력측정

3.3 파라미터 추출 및 적용

위 3.1 및 3.2절에 의해 구해진 값들에 의해 변압기 2차측 임피던스 성분을 추출할 수 있게 된다.

3.3.1 Reactive Power에 의한 임피던스 추출

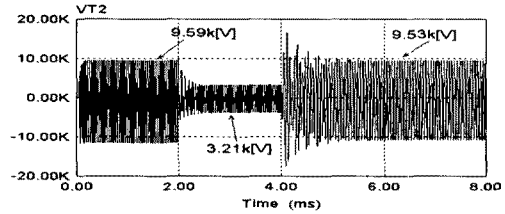
Reactive Power는 용량성 및 유도성 부하에 대한 전력이므로 반응기의 전극 파라미터를 알 수 있다. 그림 9는 2차측 전극 파라미터의 임피던스변화에 따른 반응기 등가 모델의 C₁값의 추출 및 변화를 보여준다. C₁값이 0.41nF~5.41nF까지 1nF씩 증가 할 때, C₁값을 추출해서 추종해 가는 것을 보여주고 있다.



〈그림 9〉 C₁ 값 추출

3.3.2 C₁값의 변화에 따른 스위칭 주파수 변경을 통한 정전압 출력

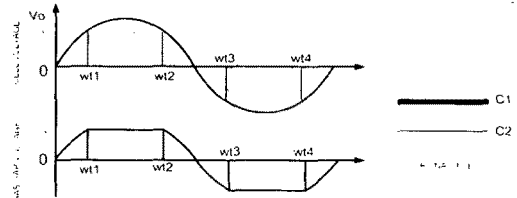
C₁이 3.41nF에서의 공진 주파수는 21kHz이고 실제 사용 주파수는 30kHz이다. 이는 공진시 아주 큰 전압이 인가되므로 이러한 문제점을 피하기 위해 공진점보다 높은 지점의 주파수를 택하게 된다. 반응기 등가 모델의 C₁값이 커지면 반응기 입력 전압이 작아지게 되고, C₁값이 작아지면 반응기 입력 전압은 커지게 된다. 즉 이런 C₁값의 변화 및 변경이 발생하면 반응기 쪽에 정전압 출력을 유지 할 수 없다. 그림 10은 C₁값의 변화 및 변경이 발생하면 C₁값을 추출하여, 스위칭 주파수의 가변에 의한 정전압 출력을 보여준다. C₁값이 3.41nF에서 8.41nF의 값으로 바뀌게 되면 공진 주파수가 21kHz에서 15kHz로 낮아진다. 이 때 제어기는 파라미터를 추출하여 그 값을 바탕으로 스위칭 주파수를 가변 하여 C₁값이 변화하기 전의 전압인 9.5k[V]로 정전압제어를 하게 된다.



〈그림 10〉 주파수 가변에 의한 정전압 출력

3.3.3 C₂ 값 추출

C₂값은 공진에 영향을 주지는 않는다. 그러나 C₁이 반응기 내에서 Breakdown이 일어나기 위한 최소 전압(Sparking potential Voltage)과 같은 범위의 전압을 만드는 공진조건에서는 C₂의 영향을 받게 된다. 이러한 조건이 발생시 C₂값의 추출이 필요하다. C₂값은 반응기에 C로 구성된 회로를 연결하여 추출할 수 있다.^[4] 그림 11는 반응기에 인가된 전압파형 및 방전전압 파형을 보여준다.



〈그림 11〉 반응기에 인가된 전압파형 및 방전전압 파형

4. 결 론

대기압 플라즈마 전원장치의 반응기 파라미터 추출을 통한 매칭에 대해서 연구 하였다. 난제로 걸림들이 되고 있는 반응기의 파라미터 매칭 문제를 해결하여 반응기의 변화 및 공정조건의 변경에 따른 운전 조건을 쉽게 대응하게 하기 위한 것이다. 제한된 방법을 사용 시 임피던스 매칭기가 필요하지 않아 초기구입비가 절감 될 수 있는 효과와 반응기의 변경에도 새로운 전원장치의 구입 없이 기존의 전원장치를 사용할 수 있어 유지 및 보수에서 비용을 절감 할 수 있다. 비록 시뮬레이션을 통한 검증을 수행 하였으나, 추후 반응기의 C₂ 추출에 관한 연구 및 실험을 통하여 제한된 방법의 타당성을 검증하고자 한다.

본 논문은 경기도에서 시행한 차세대 성장 동력기을 개발사업의 지원을 받아 연구되었음.

This study was supported by a fund from the Brain Korea 21 project.

〈참고 문헌〉

- [1] 김수석, 원충연, 최대규, 최상돈, "건식 세정기용 전원장치 개발", 전력전 자학회 논문집, 제6권 제5호, 2p, 2001년
- [2] 노의철, 정규범, 최남섭, "Power Electronics", 제2판, pp. 361~370, 2005
- [3] Zhiyu Chen, "PSpice Simulation of One Atmosphere Uniform Glow Discharge Plasma Reactor System", IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, vol. 31, No. 4, pp.2~3, August 2003
- [4] Rip G. Rice and Aharon Netzer, Editors, "HANDBOOK OF OZONE TECHNOLOGY AND APPLICATIONS", ANN ARBOR SCIENCE, vol. 1, pp.42~50, 1982