

대기압 플라즈마 전원장치의 반응기 파라미터에 관한 연구

(The study on Reactor Parameters of Atmosphere Plasma Power Supply)

이우철* · 이택기**

(Woo-Cheol Lee · Taek-Ki Lee)

Abstract

This paper presents a digital control solution which can extract the reactor parameters in atmosphere plasma power supply. The critical issue of the atmosphere plasma power supply is a impedance matching. For the impedance matching, the reactor parameters should be known, but the parameters depend on the reactors. Therefore, the reactor parameters have to measure for the impedance matching. The proposed method is performed by detection of phase difference between inverter voltage and current, and extraction of impedance through active, reactive power.

Key Words : Reactor Parameter, Phase Difference, Impedance, Active, Reactive Power

1. 서 론

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 그림 1에 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 가

스의 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 설계되어야 한다[1-2].

산업 현장에서 사용하는 대기압 플라즈마 장비의 전극은 장비 메이커의 노하우로서 기업 비밀로 되어 있다. 그러나 전극 파라미터를 잘 알고 이와 잘 정합되게 대기압 플라즈마 전원장치의 파라미터를 조정하여야만, 플라즈마 장비가 고품질, 고효율로 피처리 소재를 처리할 수 있다. 종전에는 전원장치 공급자가 직접 측정을 통하여 반응기의 파라미터를 추출하였으나, 이는 숙련된 기술자와 시간이 많이 소요된다. 따라서 이러한 정합을 장비 운용자가 용이하게 할 수 있도록 플라즈마 전극의 파라미터를 추출하고, 장비 운영자가 매우 간단히 조정할 수 있도록 전원 장치의 조작 표시부(Display Windows)를 통하여 안내(Guide)를 제공

* 주저자 : 한경대학교 전기공학과 부교수

** 교신저자 : 한경대학교 전기공학과 교수

IT융합기술연구소

Tel : 031-670-5323, Fax : 031-670-5329

E-mail : woocheol@hknu.ac.kr, tklee@hknu.ac.kr

접수일자 : 2012년 3월 29일

1차심사 : 2012년 4월 4일, 2차심사 : 2012년 5월 14일

심사완료 : 2012년 5월 22일

하고자 한다. 파라미터 추출은 인버터측의 전압과 전류의 위상차를 검출하여 유효·무효 전력을 계산하여 자동으로 임피던스 추출을 할 수 있는 방법을 제안한다. 본 논문에서는 출력되는 전원의 형태는 스위칭 주파수 30[kHz]의 고주파수 이고 위상 변위 풀 브릿지 (Phase Shift Full-Bridge)방식의 인버터와 특고압 전원승압 변압기 및 출력장치로 구성되어 있고 시뮬레이션 및 실험을 통하여 제안된 알고리즘의 타당성을 입증하고자 한다.

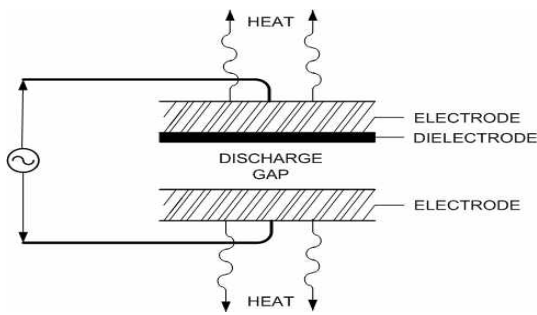


그림 1. Plasma Reactor
Fig. 1. A Plasma Reactor

2. 전원장치

2.1 풀 브릿지 인버터[2]

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

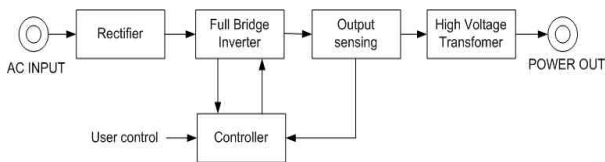


그림 2. 대기압 플라즈마 전원장치 블록도
Fig. 2. The block diagram of atmosphere plasma power supply

그림 3은 단상 풀 브릿지 인버터의 회로 구성을 보여주고, PWM출력방식은 준 구형파 인버터이다. 각

폴의 폴전압이 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.

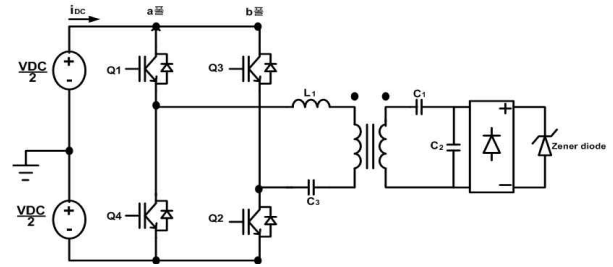


그림 3. 단상 풀 브릿지 인버터 및 반응기
Fig. 3. The block diagram of atmosphere plasma power supply

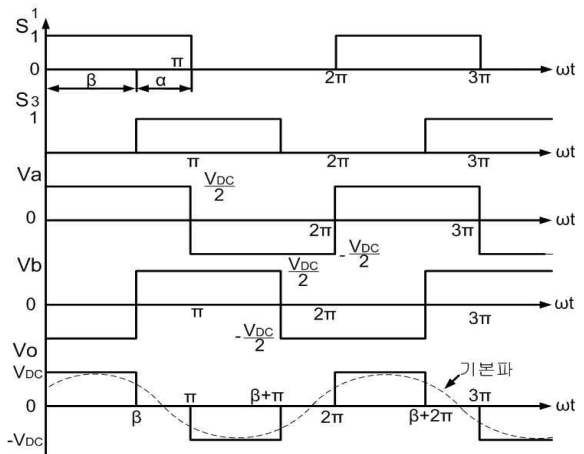


그림 4. 준 구형파 출력 전압
Fig. 4. The output voltage of quasi-square wave

식 (1), (2)는 디지털 제어기로 준 구형파 방식의 PWM을 발생하는 방법을 설명해준다. a상 스위치는 180° Turn-on, Turn-off 하고, b상 스위치는 지령치와 DC전압, 스위칭 주파수에 의하여 PWM 폭이 결정된다[3-4].

$$T_{a_on} = 0, \quad T_{a_off} = \frac{T_{samp}}{2} \quad (1)$$

$$T_{b_on} = \frac{1}{V_{dc}} \frac{1}{T_{samp}} V_{ref}, \quad T_{b_off} = T_{b_on} + \frac{T_{samp}}{2} \quad (2)$$

2.2 반응기 모델링과 공진 주파수[5]

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 모델링하였는데 Zener Diode는 일정 전압 이상일 경우 도통하여 반응기 C값은 ($C_1//C_2$)에서 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 2차 측을 1차측으로 환산하여 그린 등가회로이다. 2차 측을 1차 측으로 환산하는 수식은 식 (3)과 같다.

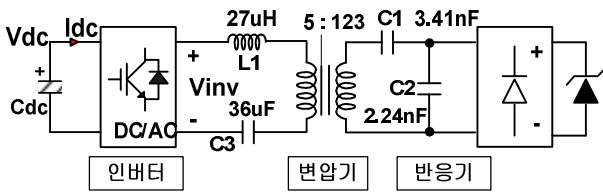


그림 5. 인버터와 반응기 모델링
Fig. 5. The modeling of inverter and reactor

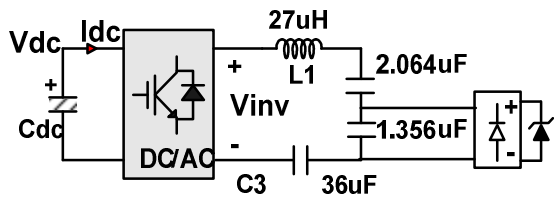


그림 6. 변압기 2차측을 1차측으로 환산
Fig. 6. Equivalent from the secondary to primary of transformer

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

$$a = \text{1차측 턴수} / \text{2차측 턴수}$$

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 동

작 후의 공진 주파수는 동작 전 보다 낮아진다.

표 1. C값 변동에 따른 공진 주파수
Table 1. Resonant frequency depending on capacitance variation

공진주파수 L_1	$W_0(C_1)$	$W_0(C_1//C_3)$	$W_0(C_1//C_2)$	$W_0(C_1//C_2//C_3)$
22[uH]	23.619k[Hz]	24.287k[Hz]	37.517k[Hz]	37.937k[Hz]
27[uH]	21.320k[Hz]	21.923k[Hz]	33.886k[Hz]	34.245k[Hz]
32[uH]	19.583k[Hz]	20.138k[Hz]	31.108k[Hz]	31.456k[Hz]

3. 시뮬레이션 결과

3.1 Zero-Crossing을 이용한 전압, 전류 위상차 검출

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

표 2. 시스템 사양 및 파라미터
Table 2. System specification and parameters

입력전압	285 V_{dc}	C_1	0.41[nF]~5.41[nF] 가변
변압기 권수비	5:123	C_2	2.24[nF]
주 스위칭 주파수	30[kHz]	C_3	36[uF]
Duty ratio	0.75	L_1	27[uH]
제너다이오드(Breakdown voltage)	2.28k[V]		

인버터 출력부의 전류를 받아 Zero-Crossing하여 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(L_1)을 통해 반응기의 전극범위를 알 수 있다. 그림 7은 반응기 모델링에서 C_1 값이 0.41[nF]~5.41[nF]까지 1[nF]씩 증가할 때, 위상차가 진상 88[°]에서 지상 73[°]까지의 변화를 보여준다[5-6].

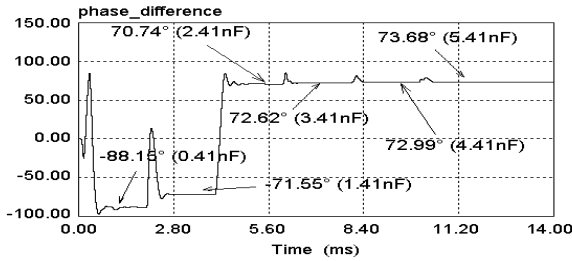


그림 7. C_1 값 변화에 따른 위상변화
Fig. 7. The phase-shifting according to changes in the value C_1

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 C_1 값이 0.41[nF]~5.41[nF]까지 1[nF]씩 증가할 때 PSIM에서의 전력 측정 프로브를 통한 인버터의 유효 및 무효 전력을 보여준다[7].

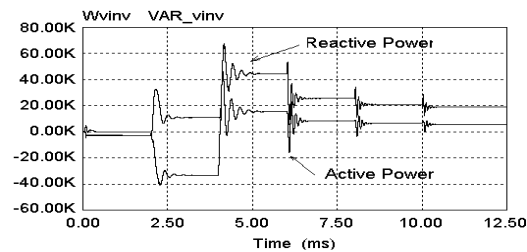


그림 8. 전력측정
Fig. 8. Power Measurement

3.3 파라미터 추출

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

3.3.1 Active Power에 의한 저항성분 추출

Active Power는 순수 저항 성분에 대한 전력이므로 변압기 2차측 저항성분을 추출할 수 있다. 그림 9는 반응기 모델링에서의 C_1 값이 0.41[nF]~5.41[nF]까지 1[nF]씩 증가하여 위상차가 생길 때의 저항 성분의 변

화를 보여준다[8-9].

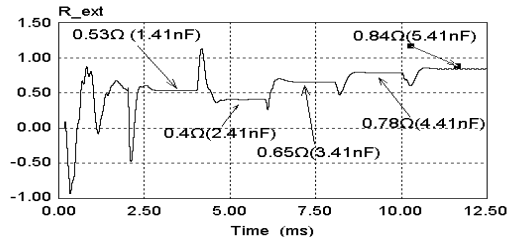


그림 9. 저항값 추출
Fig. 9. The extraction of resistance value

3.3.2 Reactive Power에 의한 임피던스 추출

Reactive Power는 용량성 및 유도성 부하에 대한 전력 이므로 반응기의 전극 파라미터를 알 수 있다. 그림 10은 2차측 전극 파라미터의 임피던스변화에 따른 반응기 등가 모델의 C_1 값의 추출 및 변화를 보여준다. C_1 값이 0.41[nF]~5.41[nF]까지 1[nF]씩 증가할 때, C_1 값을 추출해서 추중해 가는 것을 보여주고 있다.

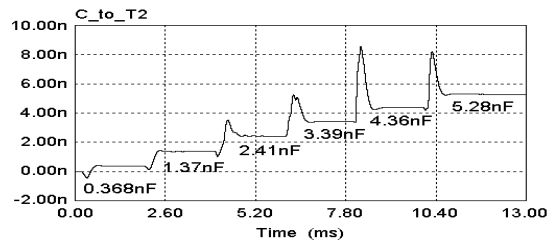


그림 10. C_1 값 추출
Fig. 10. The extraction of C_1 value

3.3.3 C_1 값의 변화에 따른 스위칭 주파수 변경을 통한 정전압 출력

C_1 이 3.41[nF]에서의 공진 주파수는 21[kHz]이고 실제 사용 주파수는 30[kHz]이다. 이는 공진시 아주 큰 전압이 인가되므로 이러한 문제점을 피하기 위해 공진점보다 높은 지점의 주파수를 택하게 된다. 반응기 등가 모델의 C_1 값이 커지면 반응기 입력 전압이 작아지게 되고, C_1 값이 작아지면 반응기 입력 전압은 커지게 된다. 즉 이런 C_1 값의 변화 및 변경이 발생하면 반응기 쪽에 정전압 출력을 유지할 수 없다. 그림 11는 C_1 값의 변화 및 변경이 발생하면 C_1 값을 추출하여,

스위칭 주파수의 가변에 의한 정전압 출력을 보여준다. C_1 값이 3.41[nF]에서 8.41[nF]의 값으로 바뀌게 되면 공진 주파수가 21[kHz]에서 15[kHz]로 낮아진다. 이 때 제어기는 파라미터를 추출하여 그 값을 바탕으로 스위칭 주파수를 가변 하여 C_1 값이 변화하기 전의 전압인 9.5[kV]로 정전압제어를 하게 된다.

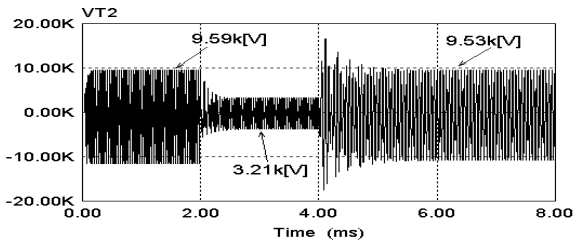


그림 11. C_1 값이 변화주파수 가변에 의한 정전압 출력
Fig. 11. Constant voltage of C_1 by variable frequency

3.3.4 C_2 값 추출

C_1 값은 공진에 영향을 주지는 않는다. 그러나 C_1 이 반응기 내에서 Breakdown이 일어나기 위한 최소 전압 (Sparking potential Voltage)과 같은 범위의 전압을 만드는 공진조건에서는 C_2 의 영향을 받게 된다. 식 (4)는 C_2 추출할 수 있는 계산식이다[4]. 그림 12는 반응기에 인가된 전압파형 및 방전전압 파형을 보여준다.

$$\begin{aligned} \langle P \rangle &= C_1 \omega V_s V_o \left[\int_{\omega t_1}^{\frac{\pi}{2}} \cos(\omega t) d(\omega t) \right] \frac{4}{2\pi} \quad (4) \\ &= 4f C_1 V_s \left[V_o - \left(\frac{C_1 + C_2}{C_1} \right) V_s \right] \end{aligned}$$

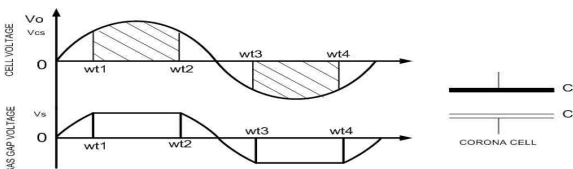


그림 12. 반응기에 인가된 전압파형
Fig. 12. The voltage waveform applied to the reactor

4. 실험 결과

제안된 기법을 검증하기 위하여 제어 알고리즘들은

DSP(TMS320C33)을 사용하여 구현되었다. 32-bit 부동 소숫점 연산을 하는 DSP로 하나의 명령어를 수행하는데 13.3[msec]가 걸린다. IGBT를 사용한 준 구형파 방식의 PWM 인버터를 제작하였다.

그림 13은 반응기 파라미터 추출 실험 파형으로 Ch1은 인버터 전압, 전류 위상차를 보여주며, Ch2는 반응기 파라미터, Ch3는 인버터전류, Ch4는 인버터 전압을 보여준다. 실제 반응기 파라미터가 1[μF]인데 듀티비가 0.5에서 0.95로 변화함에 따라 위상차가 62[°]에서 65[°]로 변하는 것을 볼 수 있다. 위상차의 변화 시점에 의해 무효전력 값이 변해 약간의 과도기적 상태를 보이지만, 다시 반응기 파라미터를 보여주는 Ch2는 1[μF]를 추종해 나가는 것을 볼 수 있다.

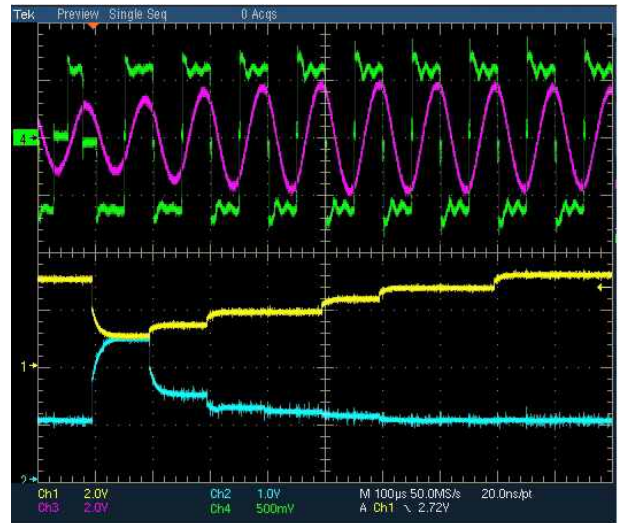


그림 13. 시비율 변화에 따른 반응기 파라미터 추출 I
Fig. 13. Reactor parameter extraction according to the duty ratio I
(Ch1: 위상차(20[°/div]),
Ch2: 반응기 파라메타(1[μF/div]),
Ch3: 인버터 전류(100[A/div]),
Ch4: 인버터 전압(250[V/div])

그림 14 역시 반응기 파라미터가 1[μF]인데 듀티비가 그림 13과하고는 반대로 0.95에서 0.5로 변화함에 따라 위상차가 65[°]에서 62[°]로 변하는 것을 볼 수 있다. 이 역시 위상차의 변화 시점에 의해 무효전력 값이 변해 약간의 과도기적 상태를 보이지만, 반응기 파라미터인 1[μF]를 추종해 나가는 것을 볼 수 있다.

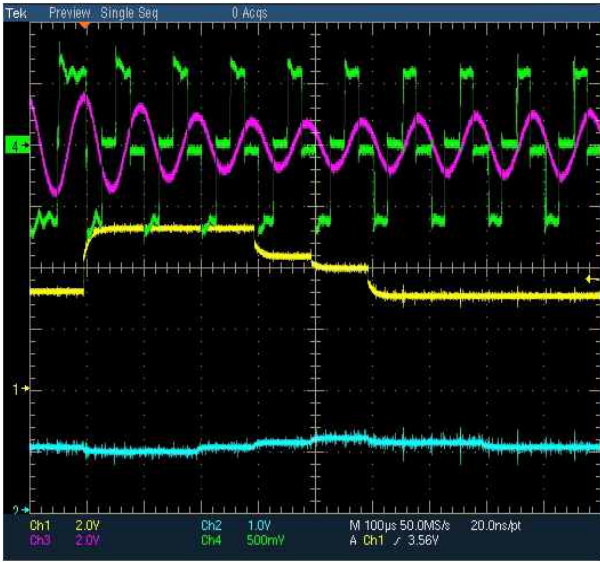


그림 14. 시비율 변화에 따른 반응기 파라미터 추출 II
 Fig. 14. Reactor parameter extraction according to the duty ratio II
 (Ch1: 위상차(20/div),
 Ch2: 반응기 파라메타(1[uF.div]),
 Ch3: 인버터 전류(100[A/div]),
 Ch4: 인버터 전압: 250[V/div])



그림 15. 제안된 알고리즘을 이용한 반응기 파라미터 추출 I
 Fig. 15. Reactor parameter extraction according to the proposed algorithm
 (Ch1: 위상차(20/div),
 Ch2: 반응기 파라메타(1[uF.div]),
 Ch3: 인버터 전류(100[A/div]),
 Ch4: 인버터 전압:250[V/div])

그림 15는 대기압 플라즈마 전원장치가 기동시 최종적으로 제안된 알고리즘에 따라 위상차에 따라 반응기 파라미터를 추종해 가는 것을 보여준다. 초기 기동시 위상차를 추출해 가면서 반응기 파라미터를 추출하고 있다. 실제 반응기 파라미터 1[μ F]를 추종하는데는 약 400[msec]가 걸리는 것을 확인할 수 있다.

5. 결론

대기압 플라즈마 전원장치의 반응기 파라미터 추출을 통한 매칭에 대해서 연구 하였다. 제안된 방식은 인버터 측의 전압과 전류의 위상차를 검출하여 유·무효 전력을 계산하여 자동으로 임피던스 추출을 할 수 있는 방법을 제안하였다. 따라서 난제로 걸림돌이 반응기의 변화 및 공정조건의 변경에 따른 운전 조건을 쉽게 대응할 수 있게 할 것이다. 제안된 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 절감할 수 있다. 시뮬레이션 및 실험을 통하여 검증은 수행 하였으나. 이는 반응기 파라미터의 C1에 관한 값으로 추후 반응기의 또 하나의 파라미터인 C2 추출에 관한 연구 및 실험을 통하여 제안된 방법의 타당성을 검증하고자 한다.

본 연구는 경기도의 경기도지역협력연구센터(GRRC) 사업의 일환으로 수행하였음.
 ((GRRC환경2011-B04), 물류 자동화 시스템의 에너지 절약을 위한 전력변환 기술개발)

References

- [1] S. S. Kim, C. Y. Won, D. K. Choi, S. D. Choi, "The development of power supply for dry scrubber", The Transactions of The Korean Institute of Power Electronics, Vol. 6, No. 5, pp. 394-399, 2001. 10.
- [2] Y. C Roh, J. K. Jeong, N. S. Choi, "Power Electronics", Second Edition, pp. 361-370, 2005.
- [3] J-G Lim, S-K Chung, "Digital Control of Phase-Shifted Full-Bridge PWM Converter", Journal of Power Electronics, Vol. 3, No. 3, pp.201-209, July, 2008.
- [4] M. J. Schutten. D. A. Torrey, "Improved Small-Signal

- Analysis for the Phase-Shifted PWM Power Converter', IEEE Transaction on Power Electronics, Vol. 18, No. 2, pp.659-669, March, 2003.
- [5] 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.
- [6] Rip G. Rice and Aharon Netzer, Editors, "HANDBOOK OF OZONE TECHNOLOGY AND APPLICATIONS", ANN ARBOR SCIENCE, Vol. 1, pp. 42-50, 1982.
- [7] Zhiyu Chen : Impedance Matching for One Atmosphere Uniform Glow Discharge Plasma (OAugDP) Rea, IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, Vol. 30, No. 5, pp. 1922-1930, 2002.
- [8] Wang, C., She, Z.-t., Peng, Y.-j. : Implementation of phase-shifted full-bridge PWM inverter based on EPLD and 80C196KC, ADVANCED TECHNOLOGY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND ENERGY, Vol. 25 No. 2, pp.72-75, 2006.
- [9] Ye, Z., Jain, P., Sen, P. : A Full Bridge Resonant Inverter with Modified Phase Shift Modulation, IEEE Power Electronics Specialists Conference, Vol. 36, No. 1, pp. 642-649, 2005.

◇ 저자소개 ◇



이우철 (李雨哲)

1964년 3월 24일생. 1987년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1989년 한양대학교 대학원 전기공학과 졸업. 1988~1998년 효성중공업 기술연구소 책임연구원. 1995~2001년 한양대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2007~2009년 Virginia Polytechnic Institute and State University USA Visiting Professor. 현재 한경대학교 전기공학과 부교수. 2011년~현재 전력전자학회 학술위원.



이택기 (李宅基)

1963년 9월 4일생. 1987년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 1994~1996년 서남대학교 전기공학과 조교수. 1996년~현재 국립 한경대학교 전기공학과 정교수. 2010~2011년 성균관대학교 전력전자연구센터 방문교수. 2010년~현재 전력전자학회 학술이사.