

3상 PFC 부스트 컨버터를 채용한 상압플라즈마 세정기용 고역률 정형파 펄스 출력형 전원장치에 관한 연구

韓熙珉*, 金敏泳**, 徐光德***, 金峻爽†

A Study On High Power Factor Sine Pulse Type Power Supply For Atmospheric Pressure Plasma Cleaning System with 3-Phase PFC Boost Converter

Hee-Min Han, Min-Young Kim, Kwang-Duk Seo and Joohn-Sheok Kim

요 약

본 논문에서는 대기압 플라즈마 발생용 정형파펄스형 교류 전원 장치에 대한 연구를 진행하였다. 정형파펄스형 전원장치는 기존의 LC공진을 이용한 교류 전원장치보다 높은 dv/dt를 갖게 되므로 안정적인 플라즈마 공급이 가능하며 펄스형에 비해 고조파 노이즈가 적고, 정전류 턴온-영전압 턴오프 형태로 동작하므로 매우 높은 효율을 갖는다. 또한 플라즈마 점화 기능을 강화하고 안정적인 전압제어를 위해 3상 부스트형 컨버터를 입력단에 사용하여 입력 역률이 매우 높은 시스템을 구성할 수 있다. 실험실 수준의 10kW부하시설을 사용하여 본 연구의 결과를 입증하였다.

ABSTRACT

This paper presents quasi-resonant type high power factor ac power supply for atmospheric pressure plasma cleaning system adopting three phase PFC boost converter and its control method. The presented ac power supply consists of single phase H-bridge inverter, step-up transformer for generating high voltage and three phase PFC boost converter for high power factor on source utility. Unlikely to the traditional LC resonant converter, the propose one has an inductor inside only. A single resonant takes place through the inside inductor and the capacitor from the plasma load modeled into two series capacitor and one resistance. The quasi-resonant can be achieved by cutting the switching signal when the load current decrease to zero. To obtain power control ability, the propose converter controlled by two control schemes. One is the changing output pulse period scheme in the manner of PFM(Pulse Frequency Modulation) control. On the other, to provide more higher power to load, the DC rail voltage is directly controlled by the 3-phase PFC boost converter. The significant merits of the proposed converter are the uniform power providing capability for high quality plasma generation and low reactive power in AC and DC side. The proposed work is verified through digital simulation and experimental implementation.

Key Words : AC Plasma power supply, Atmospheric plasma, 3-Phase boost converter, Quasi-resonant AC inverter, High power factor

1. 서 론

최근 LCD(Liquid Crystal Display) 산업의 발달과 더불어 보다 빠른 LCD 제조공정에 대한 요구가 증가하고 있으며 이의 일환으로 LCD용 유리판의 세정공정 개선에 대한 관심이 높아지고 있다. 일반적으로 세정공정은 세정메커니즘에 따라 화학약품에 의한 습식세정과 플라즈마를 이용한 건식세정으로 크게 나눌 수 있다. 현재는 공정의 효율을 고려하여 습식세정이 주

†교신저자 : 정희원, 인천대 전기공학과 교수
E-mail : jskim@incheon.ac.kr

*정희원, 이엔테크놀로지(주) 수석연구원

**정희원, (주)에이치디전력기술단 대표이사

***정희원, 이엔테크놀로지(주) 연구소장/부사장

접수일자 : 2008. 8. 7 1차 심사 : 2008. 10. 1

2차 심사 : 2008. 12. 17 심사완료 : 2008. 12. 30

로 사용되지만 공정에서 유출되는 폐기 오염물에 의한 환경문제가 있으며 최근 플라즈마를 이용한 세정공정 기술의 발달과 더불어 건식세정 공정으로 점차 대체되고 있다.

플라즈마를 이용한 세정방식은 챔버(Chamber)를 이용한 진공세정과 대기압 상태의 상압세정방식으로 나뉘어 진다. 진공세정장비는 가격이 높고 LCD 패널의 대형화로 인하여 구현이 어렵기 때문에 최근에는 대기압 상태에서 플라즈마를 발생시키는 세정공정에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다^[1-4].

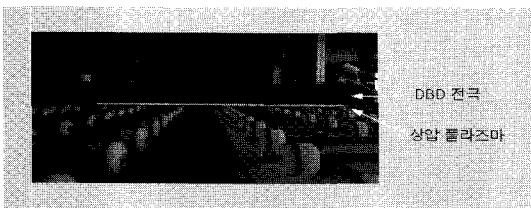


그림 1 상압 플라즈마 방전
Fig. 1 Discharge of the atmospheric pressure plasma

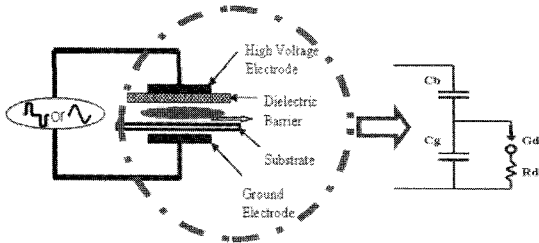


그림 2 상압 플라즈마 방전전극 구조(DBD)
Fig. 2 The structure of the Discharge Electrode for Atmospheric Pressure Plasma(DBD)

세정공정에 사용되는 상압 플라즈마를 구현하는 방법으로 주로 유전체 방전(DBD: Dielectric Barrier Discharge)이 사용되고 있다. 그림1.은 5세대급 LCD 유리의 세정 장비에서 DBD 전극을 이용한 상압 플라즈마를 발생시킨 사진이다. 유전체로 쌓여진 두개의 도체전극 사이에 고압의 교류전압을 인가하면 공정에 사용되는 가스 또는 대기상태의 공기를 매질로 하여 플라즈마가 발생된다. 일반적으로 LCD 유리 기판이 이동하며 두 전극 간에 발생된 상압 플라즈마에 의해 불순물이 이온화되면서 세정과 표면처리가 이루어진다.

이때 사용되는 플라즈마 발생용 전극의 구조는 그림2와 같이 유전체와 대기로 이루어진 두 개의 커패시터가 직렬로 연결된 부하로 모델링될 수 있다. 두 전극사이에 수십kHz, 수십kV의 전압을 인가하면

대기압 플라즈마 현상이 나타나며 이를 이용하여 건식 세정 공정이 이루어진다. 플라즈마 방전에서 고전압이 필수 요소이지만 전압이 너무 높은 경우 코로나 방전이 발생하여 부하가 소손되는 경우가 있으므로 주의할 필요가 있다. 플라즈마 방전에서 또다른 중요한 요소는 부하에 인가되는 전압의 dv/dt 값이다. dv/dt가 높을수록 커패시터로 모델링되는 부하가 빠르게 충전되는 효과가 있기 때문에 보다 많은 에너지를 전달하며, 원활한 방전을 유지하기 위해서는 dv/dt가 높은 전원 장치를 사용할 필요가 있다.

기존의 플라즈마 발생용 전원장치는 크게 LC 공진을 이용한 정현파 출력형^[5-7]과 구형파 펄스출력형^[8-10]으로 나누어 질 수 있다.

정현파 출력형의 대표적 방식은 LC공진 방식이며, 장치 내부에 별도로 구성된 공진용 LC 회로를 이용하여 정현파 교류를 만들고, 공진용 C에 변압기를 병렬로 연결하여 고전압을 전극에 인가하는 방식을 사용한다. 이 방식은 정현파의 고압 전압을 비교적 쉽게 얻을 수 있기 때문에 가장 널리 사용되고 있으나, 출력 주파수가 고정되어 있기 때문에 자유로운 전력 제어가 쉽지 않다. 또한, 부하에 대한 안정성을 확보하기 위하여 부하의 커패시턴스보다 5~10배 이상 큰 C를 LC공진에 사용하기 때문에 다량의 무효 전력이 발생하고 큰 용량의 전력용 소자를 사용해야하는 문제가 있으며, 더욱이 구형파 펄스형에 비하여 dv/dt가 매우 작아지는 문제가 있다.

구형파 펄스출력형 플라즈마 전원장치는 매우 큰 dv/dt를 갖는 전압을 부하에 직접 인가할 수 있기 때문에 비교적 큰 에너지를 공급할 수 있으나, 커패시턴스로 모델링 되는 플라즈마의 부하 특성으로 인하여 급격한 충방전 전류가 흐르게 되며 DBD 전극의 물리적 피로도가 증가하는 문제점이 있다.

본 논문에서는 상압 플라즈마 발생에 적합한 새로운 방식의 정현파 펄스출력형 전원장치를 제안한다. 새로운 전원 장치는 크게 3상 PFC(Power Factor Control) 기능을 갖는 승압 컨버터와 H-Bridge 방식의 단상 인버터, 그리고 하나의 내장 인덕턴스 및 승압용 변압기로 구성된다. 3상 PFC는 전원의 역률을 크게 개선함과 동시에 DC전압을 400~800V 사이의 원하는 전압으로 제어하는 역할을 담당한다. H-Bridge 방식의 단상 인버터는 이와 직렬로 연결된 내장 인덕턴스 및 부하의 커패시터에 LC공진을 일으켜서 부하에 전력을 공급하는 역할을 한다. 이 방식은 기존의 LC공진방식과는 다르게 내장된 커패시터 없이 부하의 C를 공진에 직접 이용한다. 따라서 공진전류 자체가 부하에 공

급되는 효과를 얻을 수 있으므로 불필요한 공진 전류를 최소화할 수 있으며 컨버터의 효율을 높이고 전력용 소자의 용량을 최대한으로 줄일 수 있다. 또한, 기본적으로 매우 높은 공진주파수를 갖기 때문에 상대적으로 높은 dv/dt를 갖는 정현파 출력이 부하에 인가됨으로써 매우 안정적인 플라즈마를 발생시킬 수 있다. 제안된 컨버터는 출력제어의 자유도를 높이기 위하여 두 가지 방식의 제어 알고리즘이 적용되었다. 출력제어의 기본 알고리즘은 출력펄스의 인가 주기를 변경하여 에너지 밀도를 높이는 방법과 DC전압을 제어하여 출력을 제어하는 기법 두가지를 혼용하여 사용한다. 제안되는 방식은 기존 LC공진 방식과는 다르게 준공진을 이용하므로 공진이 연속적으로 일어나지 않으며 PWM 출력 펄스의 폭을 임의로 조절하기가 어렵다. 따라서 펄스를 인가하는 주기를 변경하는 일종의 PFM(Pulse Frequency Modulation)방법을 사용하여 출력을 조절한다. 한편, 공진주파수 이상으로 출력 주파수가 변동할 수 없는 경우가거나 부하가 변동되는 경우에는 3상 PFC의 전압 부스트 기능을 사용하여 DC전압을 제어함으로써 전력 제어의 자유도를 크게 개선 시켰다.

제안된 방식은 기본적으로 높은 dv/dt를 갖는 정현파 펄스를 부하에 인가하여 플라즈마를 발생시키는 방법으로 기존의 LC공진형과 펄스출력형 전원장치의 장점을 모두 수용한 우수한 특성을 갖게 되며 시뮬레이션과 실험을 통하여 제안된 전원 장치의 우수성을 입증하였다.

2. 상압 플라즈마 세정 메카니즘

2.1 상압 플라즈마용 전극의 특성

상압 플라즈마를 발생시키는 부하전극은 그림1의 우측 그림과 같이 두 개의 커패시터 및 하나의 저항으로 모델링된다. 유전체와 공극이 하나의 커패시터(C_b)를 이루며, 플라즈마 부하는 공극 커패시턴스(C_g)와 병렬로 연결된 방전 갭 및 저항으로 모델링된다. 유전체와 공극의 커패시턴스는 다음 식 (1)과 같이 나타난다.

$$C = \epsilon_{\mu} \epsilon_o \frac{A}{d} \tag{1}$$

여기서, ϵ_{μ} 은 유전체의 유전율, ϵ_o 은 공극의 유전율, A는 도체의 면적, 그리고 d는 도체간의 거리를 나타내며 일반적으로 전극간의 폭은 대략 8~12mm 정도이며, 5세대 LCD 세정용 전극의 길이는 1.5m, 7세대는 2.2m로 되어 있다. 등가회로의 공극 커패시턴스(C_g) 값은 면적과 공정시 사용되는 가스의 종류에 따라 차

이가 있지만 1.5m 전극은 0.8~1.2nF, 2.2m전극에서는 1.8~2nF 정도의 값을 갖는다. 통상 유전체의 등가 커패시턴스(C_b) 값은 공극 커패시턴스의 4~8배 정도가 된다. 이 커패시터들은 부하에 따라 약간 변하는 것으로 알려져 있으나 전 운전 범위 내에서 거의 일정한 값으로 유지된다고 가정해도 큰 문제가 없다. 상압플라즈마 발생을 원활하게 하기 위해서는 유전체와 공극의 커패시터에 전압을 고속으로 충, 방전할 수 있는 고성능 AC 전원장치가 필요하다.

2.2 상압 플라즈마의 방전 메카니즘과 상압 플라즈마용 전원장치의 필요조건

상압 플라즈마가 발생하기 위해서는 일반적으로 전극간에 일정전압 이상이 공급되어야 한다. 상압 플라즈마 전극은 단위의 커패시터의 연속적인 연결로 볼 수 있으며, 방전전극에 해당하는 각 단위 커패시터는 방전 개시전압 이상이 될 때 부분적으로 방전이 개시된다. 모든 방전 커패시터에서 방전이 일어나면 전 면적의 전극에서 균일한 플라즈마를 발생하게 된다. 방전 전극은 그림3과 같이 수많은 커패시턴스의 점 단위 전극으로 모델링할 수 있으며 그림 4는 상압 플라즈마 방전의 메카니즘을 나타낸 것이다. 플라즈마 발생은 평면적으로도 균일하게 발생하여야 하지만 시간적으로

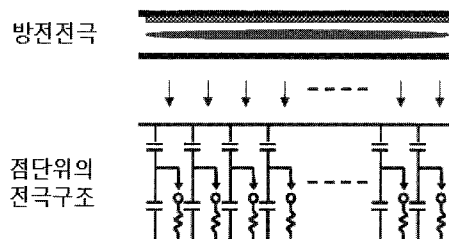


그림 3 상압 플라즈마 방전전극의 모델링
Fig. 3 Modeling of discharge electrode for atmospheric pressure plasma

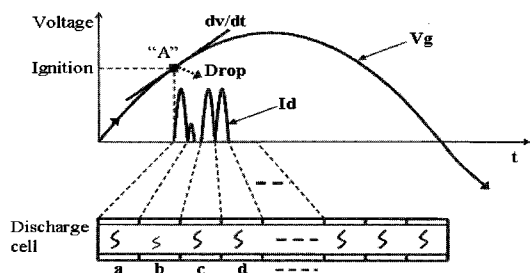


그림 4 상압플라즈마 방전 메카니즘
Fig. 4 Mechanism of discharge electrode for atmospheric pressure plasma

도 매우 균일하게 발생해야 한다. 그림4.에서 보이는 것처럼 방전개시전압 이상이 되는 A부분에서 점a 부분이 방전되면 방전전류가 일단 흐른 뒤 다시 재충전되는 과정을 거쳐 b, c, d... 와 같이 연속적인 방전이 일어난다. 이때 방전이 연속적으로 원활하게 발생하기 위해서는 충분한 전류가 빠르게 공급되어야 할 필요가 있으며 충전전류는 전압의 dv/dt 에 비례하는 성향을 갖는다. 일반적으로 전극의 방전 개시 후 방전이 확립되기까지의 시간지연이 $0.5 \sim 1\mu s$ 이고 점전극간의 방전 전압 차이가 $1kV$ 정도라고 할 경우, 방전이 시작되는 $6 \sim 7kV$ 에서의 전압 상승기울기인 dv/dt 는 $2kV/\mu s$ 이상이 되어야 한다.

상압 플라즈마 방전 메커니즘에서 필요로 하는 전원 장치의 특징을 정리하면 다음과 같다.

첫째, 플라즈마의 방전 메커니즘에서 플라즈마의 균일성을 확보하기 위해 출력 전압은 높은 dv/dt 를 가져야 한다. 낮은 dv/dt 는 플라즈마 방전과 밀도의 불균일을 초래하여 세정 효과를 감소시킬 수 있다.

둘째, 커패시터의 충전 무효전력을 극복할 수 있는 충분한 전류 내량을 가져야 하며, 부하의 형태에 따라 임피던스의 변화가 심한 플라즈마 세정기의 특성상 부하 임피던스 변동에 대해 안정적이어야 한다.

셋째, 세정효과를 높이기 위해서는 고밀도의 펄스전력을 가지면서 발생 주기를 자유롭게 조절할 필요가 있다.

플라즈마 발생의 균일성은 그림 1의 등가회로에서 모델링한 공극 커패시터(C_g)에 병렬로 연결된 방전 갭의 방전에너지에 비례하며, 방전에너지는 공급 전원의 전압, 그리고 동작주파수에 비례한다. 플라즈마의 출력을 높이기 위해서는 전압 혹은 주파수를 상승시켜야 한다. 그러나, 일정전압 이상의 상승은 방전 전극의 구조적 이상 방전이나 절연파괴를 유발하여 전극을 손상시킬 수 있다.

3. 기존의 플라즈마 발생용 전원장치

3.1 LC공진형 전원장치

그림 5.에는 현재 플라즈마 전원으로 널리 사용되는 LC공진형 전원장치의 기본구조가 도시되어 있다. LC공진형에서는 장치 내부에 내장된 공진용 LC를 사용하여 공진을 발생시킴으로 부하의 커패시턴스와 무관하게 일정한 정형파 전압을 출력할 수 있는 장점이 있다. 그러나, 이 방식은 부하 커패시터의 영향을 무시할

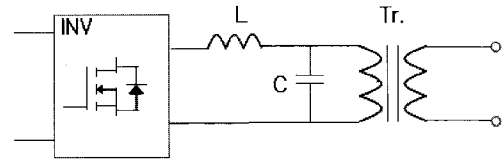


그림 5 일반적인 LC 공진형 전원장치 구성
Fig. 5 Structure of the conventional LC resonant type power supply

수 있을 정도의 큰 커패시턴스를 사용하므로 불필요한 대량의 무효전력이 발생하기 때문에 큰 용량의 스위칭 소자를 사용해야 한다. 또한 LC공진형 전원장치에서는 고정된 LC를 사용하기 때문에 출력 주파수의 변경이 불가능하다. 따라서 공진 전압의 크기만으로 출력을 제어하므로 속응성이 떨어지며 과도한 전압 상승으로 인한 DBD전극의 절연파괴가 발생할 우려가 있다. 아울러, 공진 주파수가 비교적 작기 때문에 공급전압의 dv/dt 가 상대적으로 작아지며 균일한 플라즈마를 발생시키기 어려운 문제가 있다. 기본 출력 파형이 그림6의 왼쪽에 도시되어 있다.

3.2 펄스출력형 전원장치

펄스 출력형 전원장치에서는 PWM 전압 출력을 그대로 부하에 인가하기 때문에 매우 높은 dv/dt 를 갖게 되며 균일한 품질의 플라즈마를 얻을 수 있다. 그림6.의 오른쪽 그림에 펄스출력형 전원장치의 출력 파형이 도시되어 있다. 이 방식에서는 불연속의 펄스 전력을 공급하기 때문에 제어가 용이하며 속응성이 뛰어나기 때문에 플라즈마 부하가 급격하게 변하는 경우에도 안정적인 동작이 가능하다. 그러나, 커패시턴스로 모델링되는 부하전극에서는 높은 dv/dt 로 인한 과도한 전류의 충전방전이 연속하여 발생하기 때문에 효율이 좋지 않으며, 과도한 충전방전 전류로 인하여 부하 전극이 쉽게 소손되고 대용량화가 어려운 문제점이 있다.

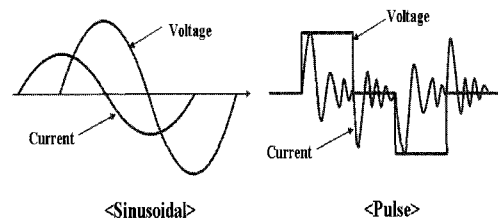


그림 6 기존 전원장치의 부하전압과 전류파형
Fig. 6 Waveform of the conventional power supply

4. 제안된 정현파 펄스 출력형 전원장치

4.1 정현파 펄스 출력형 전원장치의 동작 원리

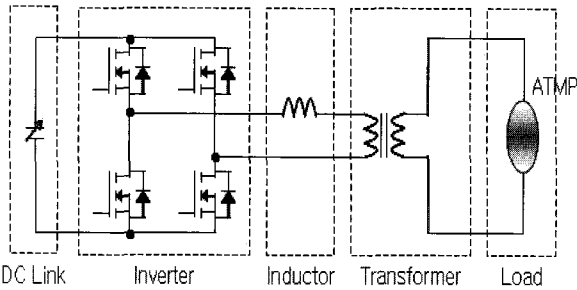


그림 7 정현파 펄스형 교류전원장치의 구조
Fig. 7 Structure of the proposed sine pulse type power supply

그림 7.에는 제안된 정현파 펄스형 전원장치의 출력 단 구조가 도시되어 있다. 기본 형태는 LC공진형 전원 장치와 거의 유사하며 다른 점은 공진용 C를 내장하지 않고 부하의 C를 공진에 직접 사용한다는 것이다. 전원 장치에 내장된 L과 부하의 C가 고주파 변압기를 통하여 직접 연결되며 H-Bridge에서 공급되는 전압이 LC사이의 공진을 발생시킨다. 통상적으로 부하의 커패시턴스가 수 nF 단위이므로 내장된 인덕턴스에 가변 탭을 붙여서 인덕턴스를 가변함으로써 100kHz 정도의 고주파 공진이 가능하다. 따라서 기존의 LC공진 방식에 비해 상대적으로 높은 dv/dt를 얻을 수 있으며, 펄스 형에 비해 전류가 정현파 형태로 인가되어 안정적인 전력 공급이 가능하므로 플라즈마 전원장치에 매우 적합한 출력을 얻을 수 있다. 또한 공진으로 발생된 전류가 직접 부하 C에 흐르기 때문에 공진전류가 곧 부하전류가 되어 전통적인 LC공진 방식에 비하여 무효전력을 최대한 억제할 수 있다.

내장 인덕터와 부하사이에는 고압을 유지시키기 위한 고주파 변압기가 실장되어 있다. 변압비는 1:10을 사용하였다.

4.2 준공진 정현파 펄스 출력

제안된 정현파 펄스출력형 전원 장치는 플라즈마 부하의 작은 커패시터를 공진에 사용하므로 매우 높은 출력 주파수를 유지하게 된다. 이때 일정한 LC로 인하여 공진 주파수가 일정하게 유지되며 연속으로 공진을 일으키면 출력 주파수가 고정되는 문제가 있다. 본 연구에서는 연속적인 공진 대신 전류의 크기를 검출하여 준공진 형태의 불연속 공진을 발생시키고 공진과 공진

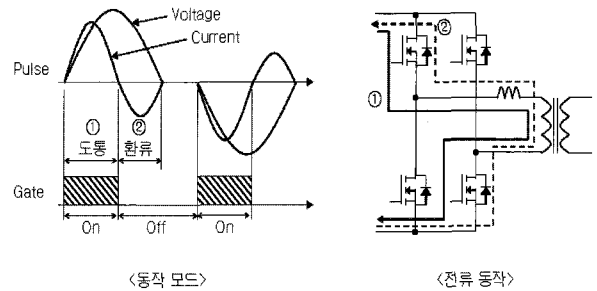


그림 8 준공진 전압 펄스 발생 방법
Fig. 8 Method of the quasi-resonant pulse generation

사이의 간격을 조절하여 전력을 제어하는 방식을 도입하였다.

그림8.에는 단상 H-Bridge 인버터를 이용하여 불연속적인 준공진 전압을 발생시키는 동작이 도시되어 있다. 먼저 H-Bridge 상대쪽의 두 스위치를 동작시켜서 공진을 발생시킨다. 이때 고주파 변압기가 전류 경로의 중간에 있으나 높은 주파수에서 변압기의 내부 임피던스가 거의 무한대로 동작하므로 그 영향이 거의 나타나지 않는다. 스위치를 닫으면 ①번 경로를 통하여 전압과 내부 공진용 L 및 부하의 C를 거쳐서 그림 8의 왼쪽과 같은 정현파 형태의 공진 전류가 발생한다. 그림에 표시된 전압은 부하 커패시터 양단의 전압이다. 이때 스위치는 전류가 0인 상태에서 닫히게 되므로 ZCS(Zero Voltage Switching)로 동작하여 스위칭 로스가 최소화 된다. 스위칭이 개시되면 전류를 감시하여 전류가 감소하여 0이 되는 지점에서 스위치를 개방한다. 이때 역시 ZCS형태의 스위칭이 일어난다. 이때 전류신호를 비교기에 입력하고 하드웨어를 이용하면 비교적 어렵지 않게 스위치 개방시점을 얻을 수 있다. 스위치가 열린후 전류는 ②번 경로를 통하여 스위치에 역병렬로 부가된 다이오드를 거쳐 환류하게 되며 전류가 다시 상승하여 0이 되면 전류의 패스가 없기 때문에 한주기의 공진이 강제로 마감된다. 부하 커패시터의 전압 평형을 위하여 두번째 공진은 반대쪽 스위치를 통하여 발생시키며 이때 두 번째 공진이 일어나는 시기를 조절함으로써 불연속 공진의 출력 주파수를 조절할 수 있다.

그림9에는 출력 주파수를 조절하여 부하에 인가되는 전력을 제어하는 출력 주파수 제어 방식의 개요도가 도시되어 있다. 그림에서 T1의 주기로 출력 펄스를 발생시키다가 부하의 평균 전력을 감소시킬 경우 펄스의 출력 주기를 T2로 바꾸어 단위시간당 출력되는 펄스의 숫자를 감소시킨다. 공진 주파수 자체는 고정되어

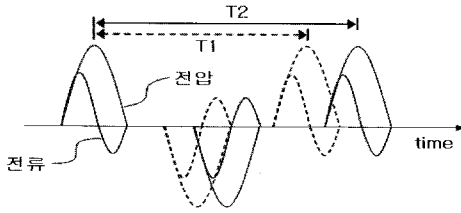


그림 9 출력주파수 제어(PFM) 방법 개요
Fig. 9 Control scheme of the output frequency(PFM Method)

있으므로 이를 바꾸기는 불가능하지만 이와 같이 불연속 공진 펄스의 출력주기를 조절함으로써 부하전력을 원활하게 제어 할 수 있다. 이때 펄스의 전압 폭 (Width)은 고정된 부하전극의 커패시턴스에 대해 전원장치 내부 인덕턴스 값을 변경하여 가변시킬 수 있다. 부하전극에 공급하는 전압의 크기는 인버터에 입력되는 DC-Link 전압의 조절에 의해 제어되며 공진에 의해 DC-Link 전압의 약 2배에 가까운 전압이 출력된다. 출력전압이 정현파 형태가 되기 위해서는 공진 전압의 폭이 출력 주파수의 반주기보다 작도록 내부 인덕터 값을 조절할 필요가 있으며 이때 인덕터의 제한 값은 식 2과 같이 나타낼 수 있다.

$$L_r \leq \left(\frac{1}{\pi F_o} \right)^2 \frac{1}{C_L} \quad (2)$$

식에서 F_o 는 그림9에서 출력 주기 T의 역수에 해당하는 출력 주파수를 의미한다. 내부 인덕턴스는 여러 개의 탭을 가진 단일 인덕턴스를 사용하며 탭을 조절하여 원하는 인덕턴스 값을 맞출 수 있다.

$$T_w = \pi \sqrt{L_r C_L} \quad (3)$$

정현파 펄스 전압의 폭은 식(3)의 형태로 나타나며, L_r 은 공진용 인덕터, C_L 은 부하전극의 커패시턴스, 그리고 T_w 는 펄스 전압의 폭이다.

4.3 3상 PFC Boost 컨버터

출력 펄스의 주기를 조절하는 방법은 비교적 쉽게 부하에 인가되는 전력을 제어할 수 있는 장점이 있으나 기본 공진 주파수의 주기 이하로 출력 주기를 작게 할 수 없기 때문에 공급할 수 있는 최대 전력이 제한되는 문제점이 발생한다. 또한, 주기를 조절하는 방법은 기본적으로 평균 전력을 제어하는 방식이므로 안정적이기는 하지만 속응성이 크지 않은 단점이 있다. 경

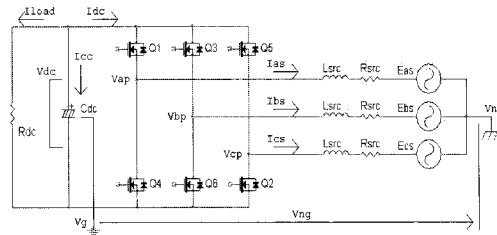


그림 10 3상 Active PFC 컨버터 회로.
Fig. 10 The circuit of three phase active converter with PFC

우에 따라서는 방전개시 전압과 유지 전압이 달라서 방전을 개시하기위해 보다 높은 전압을 필요로 하는 경우도 발생 할 수 있다. 더욱이 부하가 변경되는 경우 방전 유지 전압 자체가 달라지는 경우가 종종 발생하기 때문에 부하의 전압을 가변 해야 할 필요성이 자주 발생한다. 이때마다 변압기의 권선을 바꿀 수는 있으나 전원장치의 응용성이 매우 떨어지는 문제가 있다. 본 연구에서는 플라즈마 전원장치의 응용도를 높이고 보다 큰 전력을 부하에 공급시키기 위한 목적으로 DC전압을 가변하는 PAM(Pulse Amplitude Modulation)기법을 도입하였다. DC전압을 제어하는 방식은 여러 가지가 있을 수 있으나 본 연구에서는 전원의 역률을 획기적으로 높이면서 아울러 DC전압을 자유로이 제어할 수 있는 3상 PFC(Power Factor Correction) 부스트 컨버터^[11]를 도입하여 여러 가지 목적을 두루 달성하도록 연구를 진행하였다.

그림 10.에는 전형적인 3상 PFC 부스트 컨버터가 도시되어 있다. 제어 방식은 전통적인 상전압기준 벡터제어 방식을 도입하였으며 DC전압을 400~800V 사이로 제어할 수 있도록 알고리즘을 구성하였다.

플라즈마 세정 장치는 부하의 종류에 따라 다르기는 하지만 통상적으로 6~12kV의 전압이 인가되어야 정상적인 세정이 이루어지며 실제 플라즈마 응용분야에서는 최대 15kV의 전압까지 출력될 필요가 있다. 출력 변압기의 권선비를 1:10으로 하는 경우 220V를 정류하면 약 300V를 얻을 수 있으며, 공진전압이 DC전압의 약 2배가 됨을 감안하면 최대 6kV의 전압을 부하에 인가할 수 있다. 이때 DC전압을 800V가 되도록 제어하면 이론적으로 1.6kV의 공진 전압이 출력되며 변압기를 거친 후 부하에는 16kV의 전압이 인가될 수 있다. 실제적으로는 인버터와 부하 중간에 설치된 고주파 변압기가 이상적이지 않고 완전공진이 발생하지 못하기 때문에 DC전압이 800V인 경우 부하에 따라 약간 다르지만 최대 12kV 정도가 부하에 인가된다. 3상 PFC 부스트 컨버터를 사용하면 전원의 역률개선과

EMI문제를 해결함과 동시에 각종 플라즈마 발생장치에 필요로 하는 다양한 전압을 공급할 수 있기 때문에 전원장치의 활용도를 크게 개선할 수 있다.

5. 실험 및 결과 검토

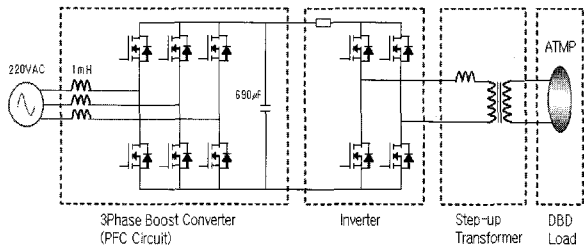


그림 11 제안된 시스템의 전체 구성도
Fig. 11 Block diagram of the proposed system

본 논문에서 제안한 정현파 펄스형 전원장치의 동작 특성을 보이기 위해 실부하를 이용한 실험을 진행하였다. 플라즈마 세정장치에 사용하도록 개발 되어진 전원 장치이므로 세정효과에 대한 검증이 필요하지만 현재 이를 검증할 수 있는 유일한 방법이 '접촉각' 측정 방법이며 이마저도 공인된 방법이 아니기 때문에 최종적인 동작 검증은 다음을 기약하기로 하고, 본 장에서는 제안된 전원장치의 동작성능 및 이론적 적합성 등을 검증하는데 중점을 두었다. 그림 11.에 제안된 고효율 삼상 플라즈마용 정현파 펄스형 교류 전원장치의 전체 구성도가 도시되어 있다. 3상 PWM 컨버터는 50A 1200V IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) 6개를 이용하여 구성하였으며 입력측 각 상에 전압 승압을 위한 1mH의 3상 인덕터를 부착하였다. 인버터는 TMOS 4개로 구성되었으며 소프트 스위칭(ZCS-On, ZVS-Off) 방식으로 구동되므로 50kHz의 높은 주파수로 구동하여도 열적인 문제가 거의 나타나지 않는다. 제어기는 32Bit DSP(Digital Signal Process)로 구성된 전용제어기를 사용하였으며 FPGA를 사용하여 대부분의 기능을 하드웨어적으로 처리하도록 시스템을 구성하였다. 제안된 전원장치의 주요 구성요소에 대한 제정수를 표.1에 정리하였다. 도표에서 부하의 커패시턴스는 정확하게 측정하기 곤란하므로 변압기 권선비를 적용한 등가회로부터 계산한 것이다.

그림 12.는 실부하 실험장치의 구성을 보여준다. 좌측에는 플라즈마 방전을 간신히 할 수 있도록 유전체 장벽 방전 전극을 설치하였고 가운데는 본 연구를 통해 제작된 정현파펄스출력 전원장치이다. 20kV의 전압

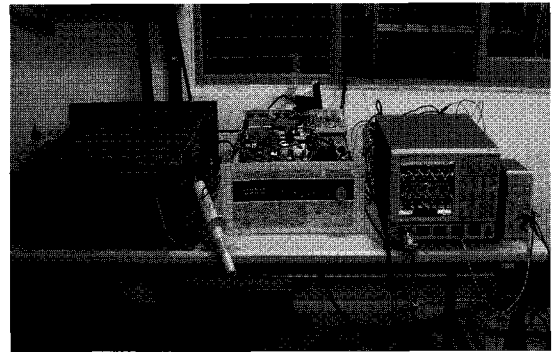


그림 12 실부하 실험 장치 구성
Fig. 12 Experimentation setup with actual load

표 1 실험에 사용된 주요 구성요소 제정수 및 정격
Table 1 Ratings and major parameters in experimental test

구분	종류	값	비고
정격	출력전압	12kV peak	부하 최대 전압
	출력전류	6A peak	부하 최대전류
	출력전력	20kW	최대 부하
3P-PFC 컨버터 (Input)	L_{src}	1 mH	상당 인덕턴스
	C_{DC}	300 uF	DC-Link Capacitor(1200V)
H-Bridge Inverter (Output)	L_R	20 uH	공진용 리액터
	C_b	2.5 nF	부하전극커패시터
	C_g	2 nF	부하갭 커패시터
	Atrans	1:10	변압기 권선비

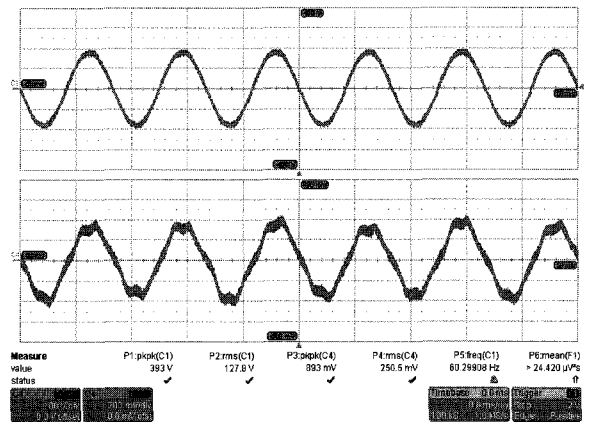


그림 13 3상 PFC 부스트 컨버터 동작 파형 - A상 상전압(위:100V/div)과 상전류(아래:10A/div) 파형. (시간축: 10 ms/div)
Fig. 13 Experimental results for 3phase PFC boost converter. - Source side A-phase phase voltage (upper:100V/div) and phase current (lower:10A/div). (Time axis: 10ms/div)

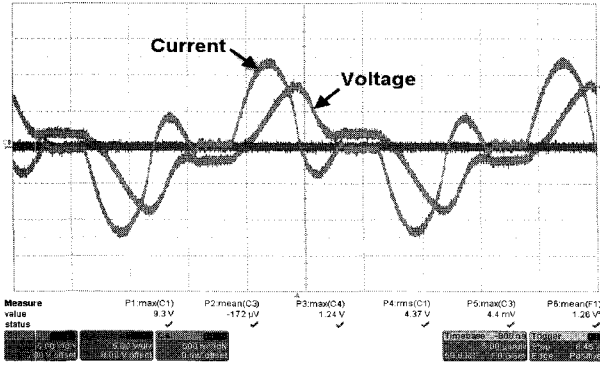


그림 14 제안된 전원장치의 출력전압(5 kv/div)과 전류(1A/div)파형. (시간축: 5 μ s/div)
 Fig. 14 The Waveform of load voltage(5 kv/div) and load current(1A/div) of the proposed power supply(Time axis: 5 μ s/div)

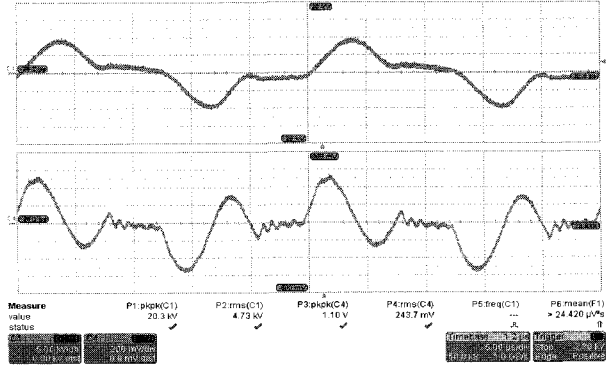


그림 16 출력주파수 40kHz 동작 파형
 - 부하전압 (위:5kV/div)과 부하전류(아래:1A/div)
 (시간축: 5 μ s/div)
 Fig. 16 Experimental results with 40kHz output frequency. - Load voltage (upper: 100V/div) and Load current (lower: 10A/div) (Time axis: 5 μ s/div)

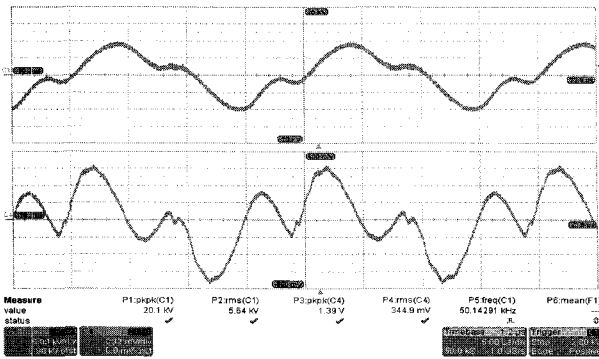


그림 15 출력주파수 50kHz 동작 파형
 - 부하전압 (위:5kV/div)과 부하전류(아래:1A/div).
 (시간축: 5 μ s/div)
 Fig. 15 Experimental results with 50kHz output frequency. - Load voltage (upper: 100V/div) and Load current (lower: 10A/div) (Time axis: 5 μ s/div)

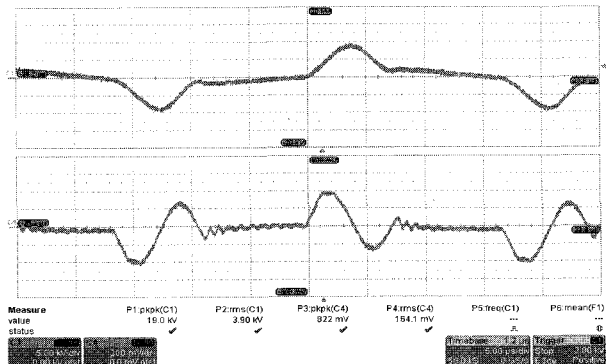


그림 17 출력주파수 30kHz 동작 파형
 - 부하전압 (위:5kV/div)과 부하전류(아래:1A/div)(시간축: 5 μ s/div)
 Fig. 17 Experimental results with 30kHz output frequency. - Load voltage (upper: 100V/div) and Load current (lower: 10A/div) (Time axis: 5 μ s/div)

측정이 가능한 고전압 프로브(Probe)와 전류 앰프를 이용하여 파형을 측정하였다. 대기압 플라즈마발생장치가 동작하면 상당한 양의 오존이 발생하므로 실제 실험에 임할 때에는 격리된 챔버에 플라즈마 발생부를 밀폐시켜서 실험하였으며 별도의 공정용 가스(Gas)는 사용하지 않았다. 그림 13은 3상 PFC 부스트 컨버터의 동작 성능을 나타낸 그림으로 전원 입력 상전압과 상전류를 나타내고 있다. 출력전압은 550V이며 전원단 인덕턴스가 1mH의 비교적 작은 값을 사용하여 전류에 리플이 적지 않지만 전압과 전류의 위상이 일치하며 0.94 이상의 높은 역률로 제어되고 있음을 볼 수 있다.

그림 14.에는 제안된 전원장치의 출력전압과 전류파형이 도시되어 있다. 10kV의 일정 전압 출력으로 동작하는 것이며 공진주파수는 전압기준으로 약 100kHz이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 부하의 커패시터를 직접 이용하여 공진이 원활하게 이루어지고 있음을 확인할 수 있으며, 공진 전류가 곧 부하전류가 되므로 불필요한 무효전력 성분이 크게 감소한다는 것을 알 수 있다. 앞에서 언급한 동작원리에서와 같이 전류가 환류하기 시작할 때 스위치를 끄고 다시 음(-)의 값에서 0이 되는 순간에 전류 패스가 차단되어 일종의 불연속 준공진으로 운전되고 있다.

그림 15,16,17에는 출력주파수를 변동하였을 경우의 주파수별로 동작파형을 도시하였다. 그림 15.는 출력주파수가 50kHz일 때의 출력전압과 전류의 실험 파형이다. 최대 전력 공급을 위하여 공진이 끝나자마자 바로 다음 공진주기로 이양되는 경우에 해당한다. 그림 16.은 출력 주파수가 40kHz일 때의 파형이며 그림 17.은 출력 주파수가 30kHz에서의 파형이다. 시험에서와 같이 필요로 하는 DC전압을 설정한 후에 출력 주파수를 변동하여 부하에 인가되는 평균 전력을 제어 할 수 있다. 이 부하에서는 50kHz가 최대 출력 주파수가 되며 최대 전력을 공급하는 경우가 된다. 이보다 더 큰 전력 공급이 필요한 경우에는 부하의 정전파괴가 일어나지 않는 범위에서 DC전압을 상승시켜서 이를 충족할 수 있다.

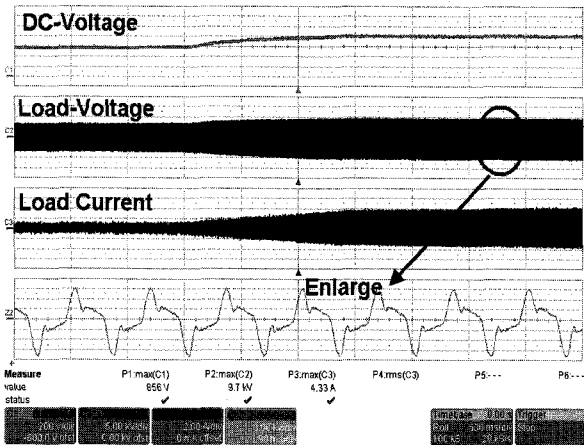


그림 18 직류전압 변동 시험(600V → 800V).
- 위부터 차례대로 직류전압(200V/div), 부하 전압 (5kV/div), 부하전류(2A/div), 부하전압의 확대파형 (3kV/div). (시간축: 0.5s/div)

Fig. 18 DC-Voltage change experimental result.
- Sequentially from top wave, DC-Voltage (100V/div), Load voltage(5kV/div), Load current(2A/div) and Enlarged load voltage(3kV/div). (Time axis: 0.5s/div)

그림18.은 PFC부스트 컨버터에서 DC전압을 600V에서 800V로 변경시키는 과도 상태의 동작특성을 실험한 것이다. 그림의 제일 상단에 DC전압이 표시되어 있다. 약 1초의 동안 전압이 안정하게 상승하는 것을 볼 수 있다. 이때의 부하 전압과 부하전류 파형을 그 아래 단에 표시하였다. 시간축이 매우 길기 때문에 자세한 파형의 관찰을 위하여 부하전압 파형의 원호 부분을 확대하여 아랫단 그림에 도시하였다. 전압을 가변함에 따라 출력전압이 변동하고 플라즈마 방전이 개

시되면서 부하전류가 급격하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 실험에서 확인할 수 있는 바와 같이 제안된 대기압 플라즈마 전원장치가 매우 안정된 동작을 하는 것을 알 수 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 고성능 상압 플라즈마 발생장치에 적용하는 정현파 고역률 펄스형 교류 전원장치를 제안하였다. 기존의 LC공진형과는 달리 부하의 커패시터를 직접 공진에 사용함으로써 매우 높은 dv/dt를 갖기 때문에 고밀도 플라즈마를 발생시키기에 적합하며 기존의 펄스형과는 달리 정현파에 가까운 불연속 공진 전류를 부하에 인가함으로써 안정된 출력을 얻을 수 있는 장점이 있다. 또한, 동작전압이 다른 여러 가지 부하에 손쉽게 적용하고 초기 플라즈마 이그니션(점화) 동작을 원활하게 하기위하여 3상 부스트 컨버터를 입력단에 적용하였으며 PFC기능을 이용하여 역률을 크게 개선시켰다.

상압 플라즈마 발생용 전원장치는 아직 산업계의 초기 적용단계에 있으며 LCD/PDP등의 디스플레이 산업이 계속하여 발전함에 따라 건식 세정 작업 및 상압에서의 에칭, 도금 분야 등으로 그 응용대상이 계속 넓어지고 있다. 본 연구 역시 보다 원활한 플라즈마 구현의 한 일환으로 연구된 것이며 아직 연구의 초기 단계에 있다. 무엇보다도 응용분야에서의 큰 문제는 상압 플라즈마 특성 자체에 대한 연구가 계속 진행중이

표 2 대기압 플라즈마 발생용 전원장치의 비교 일람
Table 2 Comparison list of the power supply for generating atmospheric-pressure plasma

비교요소	LC공진형	펄스출력형	정현파펄스파형
스위칭주파수(kHz)	10~50	10~50	50~100
dv/dt	작음	매우큼	큼
효율	매우큼	작음	큼
무효전력(소자용량)	큼	중간	중간
제어기법	PWM	PWM+PAM	PFM+PAM
스위칭기법	소프트 스위칭	하드 스위칭	소프트(인버터) 하드(컨버터)
특징	LC공진	쉽게 제작	LC공진+안정한 동작

며 건식세정 분야에서 세정의 정도를 판단할 수 있는 공인된 방법이 정의되어 있지 않다는 것이다. 현재에는 전원장치 자체의 특성에 대한 연구만이 진행되었지만 향후 주변 여건의 발달과 함께 응용분야에서의 동특성에 대한 구체적 연구가 보다 원활하게 진행될 수 있을 것으로 기대된다. 끝으로 표2에 현재 산업계에 실용화 되고 있는 상압 플라즈마용 전원장치의 간략한 비교표를 수록하였다.

본 연구는 2007년도 인천대학교 자체연구비의 지원으로 이루어졌음을 알려드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Andreas Schütze, and et al. "The Atmospheric-Pressure Plasma Jet: A Review and Comparison to Other Plasma Sources", pp.1685-1694, *IEEE Tran. On Plasma Science*, Vol. 26, 1998.
- [1] E. E. Kunhardt, "Generation of Large-Volume, Atmospheric-Pressure, Nonequilibrium Plasmas", pp.189-200, *IEEE Tans. On Plasma Science*, Vol. 28, 2000.
- [2] Zhan Huamao Ding Lijian Li Chengrong and Li Ming "Pre-ionization Methods for Atmospheric Pressure Discharge Controlled by Dielectric Barrier", pp.287-289, Annual Report COEI and DP, 2006.
- [4] M. Sakamoto, S. Kikuchi and R. Ohyama, "Fundamental Characteristics on Plasma Diagnoses of Gas-Jet Type Atmospheric Pressure Plasma", pp.525-528, Annual Report COEI and DP, 2007.
- [5] M. Teschke/Ia, D. Korzeca, E. G. Finantu-Dinua, J. Engemad, and R. Kennelb. "Resonant, High Voltage, High Power Supply for Atmospheric Pressure Plasma Sources", pp.835-836, PESC'04, 2004.
- [6] In-Hwan Oh and Myung-Joong Youn. "A Simple Soft-Switched PWM Inverter Using Source Voltage Clamped Resonant Circuit", pp.451-459, *IEEE Trans. On IE*, Vol. 46, 1999.
- [7] Masahito Shoyama, Toshiyuki Naka, and Tamotsu Ninomiya, "Resonant Switched Capacitor Converter with High Efficiency", pp.3780-3786, PESC'04, 2004.
- [8] Wanho Shin, Jaeho Choi and Taewoong Kim, "Bidirectional Pulse Plasma Power Supply for Treatment of Air Pollution", pp.1-6, PESC'06, 2006.
- [9] Tran, K. and Millner, A., "A new power supply to ignite and sustain plasma in a reactive gas generator", pp.1885-1892, APEC 2008.

- [10] Yong-Duk Lee, Woo-Cheol Lee and Taeck-Ki Lee, "A study on the reactor parameter of atmosphere plasma power supply", pp.1-8, EPE'07, 2007.
- [11] R.Wu, S.B Dewan and G.R Slemom, "A PWM AC-to-DC Converter with Fixed Switching Frequency", pp.880-885, *IEEE Tran. On IA* Vol. 26. 1990.

저 자 소 개



한희민(韓熙珉)

1971년 2월 13일생. 1996년 인천대 전자공학과 졸업 2007년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 이엔테크놀로지(주) 수석연구원.



김민영(金敏泳)

1964년 4월 4일생. 2004년 인천대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2007년 동 대학원 졸업(공학). 2008년 ~ 현재 유한대학 겸임 교수. (주)에이치디전력기술단 대표이사.



서광덕(徐光德)

1964년 2월 22일생. 1995년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(공학). 2004년 현대중공업 기계전기연구소 수석연구원. 현재 이엔테크놀로지(주) 연구소장/부사장.



김준석(金峻奭)

1965년 12월 12일생. 1989년 서울대 전기공학과 졸업. 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 인천대 전기공학과 교수.