

가변전압 가변주파수(VVVF) 교류 플라즈마 전원장치

신완호, 윤기복*, 정환명**, 최재호***
 한국기계연구원, * (주)디씨아이테크, ** 성암전기(주) *** 충북대학교

AC Plasma Power Supply with Variable Voltage and Variable Frequency

Wan-Ho Shin, Kee-Pok Yun*, Hwan-Myoung Jeoung**, Jae-Ho Choi***

Korea Institute of Machinery & Materials, * DCI Tech., ** Sung-Am Electric Co., Ltd., *** Chungbuk Nat'l Univ.

Abstract - AC plasma power supply is used to control a ozone generator and a air pollution gas. AC plasma power supply is composed of power semiconductor switch devices and control board adapted SHE(Selected Harmonic Elimination) PWM method. AC plasma power supply with sinusoidal VVVF(variable voltage and variable frequency) is realized. Its output voltage range is from 0 [V] to 20[kV] and output frequency range is from 8[kHz] to 20[kHz]. Using proposed system, AC high voltage and high frequency discharge is tested in the DBD(dielectric barrier discharge) reactor, and the space distribution of a its non-thermal plasma is observed. In spite of the increasement of voltage and frequency, the proposed system have a stable operation characteristics. It is verified by the experimental results.

을 미칠 수 있으나 가장 단순하게 교류전원으로부터 가변 직류전압을 얻는 수단을 제공한다.

그림 1의 Full bridge inverter는 SHE기법으로 스위칭하며 Adjustable AC Filter를 통해 인버터 출력의 고조파 전압이 필터링 되어 정현파 전압 파형이 얻어지게 된다. 인버터의 가변 주파수 범위가 매우 넓기 때문에 filter inductor의 inductance를 가변함으로써 필터의 차단주파수를 조정하기 위해 Filter inductor를 탭 변환식으로 구성하였다.

필터의 고주파 정현파 전압 출력은 고압변압기에 입력되며 이는 트랜스포머를 통해 고압으로 변환되어 부하에 인가되게 된다.

1. 서 론

저온 플라즈마를 이용한 유해가스 처리를 목적으로 하는 플라즈마 전원공급장치로는 AC 고전압 공급방식, 직류펄스전압 공급방식 및 마이크로 웨이브 방식 등 여러 가지 예가 있으며 각각의 용도에 따라 개발 사용되고 있다[1]. 본 연구에서는 유해가스 처리와 플라즈마 반응기에서 플라즈마 발생 현상을 분석하기 위해 가변전압 가변주파수(VVVF) 교류 플라즈마 전원장치를 설계 제작하였고, 고주파영역에서 효과적으로 가변전압 가변주파수의 정현파 출력을 얻기 위한 고압발생장치를 구현하는데 주안점을 두고 시스템설계를 하였다. 특히 수십 킬로헤르츠 정도로 주파수가 높은 정현파 전원공급장치의 구현은 스위칭 소자의 스위칭 주파수의 한계로 인해 어려움이 따르게 되며, 이러한 문제를 해결하기 위한 방안을 제시하였다. 시뮬레이션과 실험을 통해 제안된 방식이 전원장치 특성에 적합함을 입증하였다.

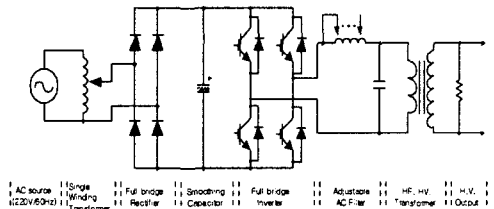


그림 1 AC 플라즈마 전원장치 회로도

2. 본 론

2.1 AC 플라즈마 전원장치 설계

그림 1에서는 전원공급장치의 회로도를 나타내고 있다. 교류전원으로부터 단권변압기를 통해 전압을 가변하고 Full bridge Rectifier를 이용하여 직류전압으로 변환한다. 평활커패시터의 용량에 따라 직류리플전압이 결정되지만 커패시터의 용량을 무한히 증가시킬 수 없기 때문에 전압 맥동이 존재하게 되며 이는 고압출력에 영향

고주파 인버터는 직류전압으로부터 고주파의 교류전압을 출력하는 역할을 하게 된다. 이 때 인버터는 교류필터의 용량이 최소화 될 수 있도록 스위칭이 가능한 범위 내에서 고조파가 감소된 파형을 출력하도록 제어된다.

인버터 필터용량을 감소시키기 위해 스위칭 주파수를 낮게 가져가면서 출력의 고조파를 감소시키기 위한 방법 중의 하나로서 SHE(Selected Harmonic Elimination)기법이 있다[2 3]. 이 방법은 스위칭주파수가 수 kHz이하로 제한적인 대용량 시스템에 주로 적합한 방식으로 알려져 있으나 상대적으로 본 장치에서와 같이 출력주파수가 높은 경우에도 적은 스위칭으로 필터용량을 감소하는데 유리할 것으로 판단되어 본 실험에 적용하였다. 한편, 이 방식에 의해 일정한 직류 전압원으로부터 VVVF 변환 특성을 얻기 위해서는 출력전압의 크기에 따라 gating angle을 선형적으로 변동시켜야 하는 문제점이 있으나, 여기에서는 이를 극히 단순화하여 3차 고조파만을 최소화하기 위한 gating angle을 계산하여 고정값으로 하고, 출력전압의 변동은 직류전압을 가변 함으로써 교류출력 전압이 변동하도록 구성하였다. 부하변동에 따른 출력전압의 순시제어는 가능하지 않지만 위와 같이 함으로써

인버터 구성이 대폭 간단해지는 장점이 있게 된다.

출력 필터의 차단주파수는, 기본파를 10kHz로 가정하고, 3고조파의 발생이 최소화되었다고 가정할 때 인버터 출력단자전압은 5고조파성분부터 나타나므로 필터용량은 매우 작을 것으로 기대한다. 기본파가 20kHz라면 100kHz이상의 고조파가 포함되므로 필터 용량은 현저하게 낮아지게 된다.

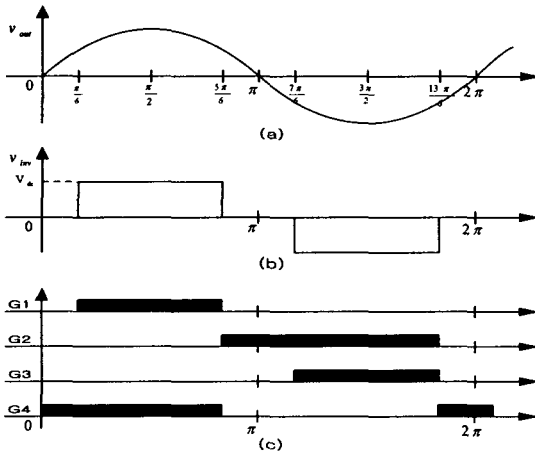


그림 2 (a) 필터 출력전압 (b) 인버터 출력 전압 (c) 게이트 신호

그림 2의 (a)에서는 필터 출력전압 파형을 (b)에서는 인버터 출력단자 전압을 (c)에서는 G1~G4의 게이트 신호를 각각 보여주고 있다. $\frac{\pi}{6} \sim \frac{5\pi}{6}$ 구간에서 직류전류는 Vdc-T1-L-Filter-T4를 통해 흐른다. $\frac{5\pi}{6} \sim \frac{7\pi}{6}$ 구간에서는 필터 인덕터전류에 의해 직류측으로 전류가 흐르는 것을 방지하기 위해 T2를 On 상태로 유지시킨다. T2를 On 상태로 유지함으로써 필터 인덕터 전류는 D1과 T2를 통해 흐르게 됨으로써 이 구간에서 출력단자전압을 0으로 할 수 있게 된다. $\frac{7\pi}{6}$ 이후의 구간에 대해서도 마찬가지로 동작함으로써 그림 2.(b)와 같이 3고조파 전압이 제거된 인버터 출력전압을 얻을 수 있다.

2.2 Filter 설계

필터역할에 있어서는 일반적인 상용교류전압 환경에서의 인버터 출력필터와 크게 다를 바 없지만 기본파 주파수가 통상의 스위칭 주파수정도까지 높기 때문에 커패시터에서의 손실증가에 의한 열화동을 쉽게 예상할 수 있다. 또한 약 2배 이상의 넓은 주파수 변동 범위를 갖아야 하기 때문에 필터의 차단주파수설정은 인버터출력주파수에 따라 가변 되도록 설계하여야 한다. 커패시터는 그 변동범위가 인덕터에 비해 제한적으로 되므로 본 실험에서는 인덕터의 권수를 변화하여 인덕턴스를 조절함으로써 필터의 차단주파수를 설정하도록 하였다.

L-C 저역통과필터의 차단주파수는 식(1)과 같이 되며

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad \text{단, } C = 0.55 \times 10^{-6} \mu\text{F} \quad (1)$$

한편, 턴수 N_L 은

$$N_L = \sqrt{\frac{L}{AL_{50}}} \quad [\text{Turn}] \quad \text{단, } AL_{50} = AL\text{-Value} \\ \text{at, } 50\mu\text{M(gap)} = 1.1\mu\text{H/N}^2 \quad (2)$$

식(2)와 같이 된다. 인덕턴스는 각 동작 주파수별로 시뮬레이션을 통해 적절한 값을 선정하였으며 차단주파수를 기본파의 1.5배에서 정하였다. 주파수별 인덕턴스와 권회수를 표시하면 표 1과 같다.

표 1 필터 인덕턴스와 권회수

| freq.[kHz] | L[uH] | f_c [kHz] | N_L [Turn] |
|------------|-------|-------------|--------------|
| 20 | 51.2 | 30 | 7 |
| 18 | 63.2 | 27 | 8 |
| 16 | 80.0 | 24 | 9 |
| 14 | 104.4 | 21 | 10 |
| 12 | 142.2 | 18 | 12 |
| 10 | 204.7 | 15 | 14 |
| 8 | 319.9 | 12 | 17 |

권선단면적이 한정되어 절연에 문제가 있을 것으로 예상되어 두 개의 코어를 사용하였으며, 1차측은 병렬로 2차측은 직렬로 각각 결선하여 1-2차 절연을 위한 충분한 공간을 확보하였다. 또한 2차 권선은 층간 절연과 커패시턴스 감소를 위해 6권선으로 분할하여 sandwich 구조로 권선하였다. 트랜스포머의 정격과 설계결과를 나타내면 표 2와 같다.

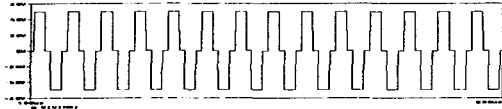
표 2 트랜스포머 parameter

| 정 격 | | 설 계 결 과 | |
|------------|----------------------|-------------|------------|
| 정격출력 | 300[VA] | 1차 턴수 | 18[Turn] |
| 1차 전압 | 80-170[Vp] | 2차 턴수 | 1050[Turn] |
| 2차 전압 | 5-20[kVp] | 1차 코일굵기 | φ0.8mm |
| 1차 전류 | 3.75-1.75[A] | 2차 코일굵기 | φ0.25mm |
| 2차 전류 | 60-15[mA] | 코어 | PQ5050S |
| 동작 주파수 | 8-20[kHz] | 권선비 | 1:60 |
| 냉각및절연 | 유입식 | 1차 전압 | 171.42Vp |
| | | 2차 전압 | 10kV |
| 코어AL-value | 1.1uH/N ² | 자화전류(20kHz) | 3.8Ap |
| 허용 자계 | 150[AT] | 자화전류(10kHz) | 7.7Ap |
| | | Lm | 356.4uH |

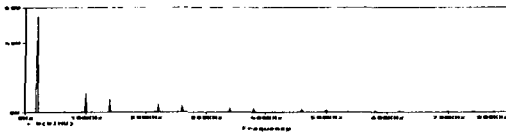
2.3 회로 시뮬레이션

시뮬레이션은 변압기 2차측 반응기의 정확한 부하 모델에 어려움이 있고 따라서 인버터의 저항 부하에 대해서만 시뮬레이션 하였다. 인버터 부하는 40[Ω]의 저항 부하를 사용하였으며 시뮬레이션 결과를 나타내면 아래

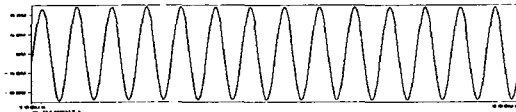
내용과 같다. 그림 3은 20kHz에서의 동작파형으로 (a)와 (b)에서는 인버터 출력단자전압파형과 FFT결과를 나타낸다. FFT 결과에서 보는 바와 같이 3차고조파가 0임을 볼 수 있다. (c)와 (d)는 인버터 필터 출력파형으로 FFT 결과에서 보는 바와같이 저차 고조파가 제거되어 정현파 출력을 나타냄을 알 수 있다.



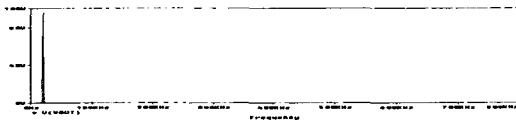
(a) 인버터 출력단자 전압파형



(b) 인버터 출력단자전압의 FFT 결과



(c) 인버터 필터 출력파형



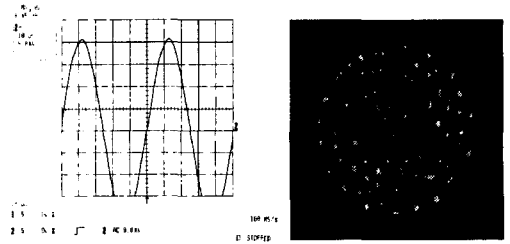
(d)인버터 필터 출력파형의 FFT 결과

그림 3 시뮬레이션 결과 파형

2.4 실험 및 결과

그림1.과 같이 교류입력전압을 단권변압기를 사용하여 직류전압을 가변 하였을 경우와 전압가변이 가능한 별도 외부직류전원을 직류 평활 커패시터에 연결하여 구성하였을 때 반응기에서의 반응의 차이점은 나타나지 않았으나 전자의 경우 120Hz의 직류리플로 인해 출력전압에 저조파의 맥동이 발생하였으며, 크기는 주파수가 높을수록 많이 나타났다.

그림 4 (a)에 반응기의 방전현상이 발생하여 20kV_p, 20kHz에서의 고압측 출력 전압파형을 나타내고 있다. 전반적으로 안정된 정현파 출력을 나타내고 있으나 출력 주파수 18kHz에서 왜형의 발생이 관측되었다. 이러한 문제점은 유전손실이 작은 커패시터를 사용하거나 혹은 필터인덕터 코어내부의 자속 밀도를 낮게 설계함으로써 필터인덕터가 3차 고조파에 대해 임피던스가 높도록 하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.



(a) 출력파형

(b) 방전 공간분포 특성

그림 4 고전압 출력 파형 및 방전 공간분포 사진 (20kV_p/20kHz)

그림 4 (b)는 DBD 반응기에 고전압을 인가했을때 방전 현상을 촬영한 것으로 플라즈마 상태의 공간적인 분포 특성을 파악하기 위하여 광증폭 소자의 2차원 array인 ICCD카메라(Princeton Instrument, ICCD576G/RBE)를 이용하였다.

3. 결 론

AC 교류 플라즈마 발생 전원장치의 설계 및 제작에 대하여 연구하였다. AC 교류 플라즈마 전원장치는 출력 용량 300VA의 소용량으로 설계되었다. 출력전압이 0~20kV의 가변범위를 갖고 출력주파수는 8kHz~20kHz의 변동범위를 갖는 정현파 출력의 VVVF이다. 용량과 출력주파수의 확장성을 고려하고, 스위칭소자의 효율적인 사용을 위해, 최적의 스위칭을 구현할 수 있도록 SHE-PWM 기법을 사용하였다. 급격한 부하변동에 따른 고속의 능동적인 전압제어는 필요하지 않기 때문에 스위칭 각은 고정하여 변조지수M을 일정하게 한 상태에서 출력전압의 크기는 직류전압을 가변 함으로써 조절하도록 하였다.

고주파 방전실험을 통해 출력전압파형과 플라즈마의 공간분포 특성이 안정됨을 확인하였으며, 일부 주파수에서 필터 인덕터 특성이 맞지 않아 일그러짐 현상이 나타나지만 스트리머 방전상태에서 고압측 출력파형에 크게 영향이 미치지 않는 것으로 실험결과를 통해 알 수 있었다. 따라서 용량과 주파수가 증가하더라도 제안된 방식에 의해 접근할 경우 안정된 고주파 전원장치 설계에 적합할 것으로 판단된다.

[참 고 문 헌]

- [1] Penstrate, B.M. "Comparison of Electrical Discharge Techniques for Non-thermal Plasma Processing of NO in N₂". IEEE Trans. Plasma Sci. Vol. 23, pp. 679 687, 1995.
- [2] J.Holtz, W.Lotzkat and M.Khambadkone, "On continuous control of PWM inverters in the overmodulation range including the six step mode", IEEE Trans. Power Electronics, Vol. 8, pp. 546 543, 1993.
- [3] B. K. Bose, "Modern Power Electronics and AC Drives" Printice Hall, Inc., pp. 218-223, 2001.