산업기술연구(강원대학교 산업기술연구소 논문집), 제27권 A호, 2007.
Journal of Industrial Technology, Kangwon Natl. Univ., Korea, No. 27 A, 2007.

마그네트론 스퍼터용 20kW급 플라즈마 전원장치 개발

Development of Module Type 20kW Plasma Power Supply for Magnetron Sputter

서 광 덕* 김 상 훈**
Seo, Kwang-Duk Kim, Sang-Hoon

Abstract

This paper describes a power supply aimed at the production of plasma and its control method for a magnetron sputter in thin film coating process of PVD(Physical Vapor Deposition).

Plasma load changes its impedance characteristic easily according to operating conditions and frequently produces electric arc. So, in this paper, a plasma power supply with improved output control performance in the transient state for the plasma load is presented. Also, it includes a strategy that can detect arc rapidly and reduce arc energy effectively into a load.

The validity of the proposed power supply through experimentation on 20kW system was proved.

키워드 : *마그네트론 스퍼터, 플라즈마 전원장치*
Keywords : *Magnetron sputter, Plasma power supply*

1. 서론

그림 1에 보이는 마그네트론 스퍼터(sputter)를 이용한 박막 코팅 기술은 반도체 제조의 도체 배선 박막 공정, LCD 평판 디스플레이 패널(FPD)의 투명 전도막 코팅 공정, 그리고 가전기기의 하프미러, 건축용 유리, 장식코팅, 공구코팅 등의 다양한 박막 제조 공정에 널리 사용되고 있다[1]. 최근 신공정 기술개발과 제조장비의 고성능, 고기능화로 인해 이러한 시스템을 위한 전원장치의 고품질화가 요구되고 있다.

플라즈마를 이용한 박막공정에 사용되는 전원장치는 아크(arc) 발생 시에 부하로 전가되는 아크 에너지가 매우 적도록 제어되어야 한다. 과도한 아크 에너지는 타겟(Target)에 손상을 주며 파티클(Particle)을 발생시키게 된다. 이러한 파티클이 피코팅물(Substrate)에 증착됨으로써 박막제품의 불량을 발생시키게 되며 손상된 타겟은 연속적인 아크 발생의 원인이 된다.

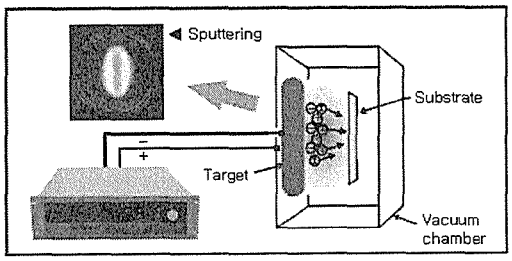


그림 1 마그네트론 스퍼터링 시스템

따라서 아크 발생시 이에 대한 제어성능을 향상시키고 부하에 전가되는 아크 에너지를 저감시키기 위한 고성능 특성이 전원장치에 요구된다.

* 이엔테크놀로지(주), 공학박사
** 강원대학교 전기전자공학부 부교수, 공학박사

또한 이러한 스퍼터링(sputtering) 공정에 사용되는 전원장치는 플라즈마 이그니션(ignition)을 위해 고전압의 출력이 요구되며 전류, 전압 및 전력제어가 모두 가능해야 한다. 이 경우 출력제어 동작영역은 일반적인 전원장치와는 달리 그림 2에 보이는바와 같이 정격전압, 정격전류의 동작은 물론 정격전압의 1/2전압과 정격전류의 2배에 해당하는 영역에서도 동작을 보장할 수 있어야 한다. 또한, 이러한 전원장치는 박막 제조장비 시스템 구성에 용이하도록 설계되어 여러 기기와의 다양한 인터페이스를 제공해야하며, 장치의 소형화 및 외부로부터의 왜란(Disturbance)과 노이즈(Noise)에 대해 강인해야 한다.

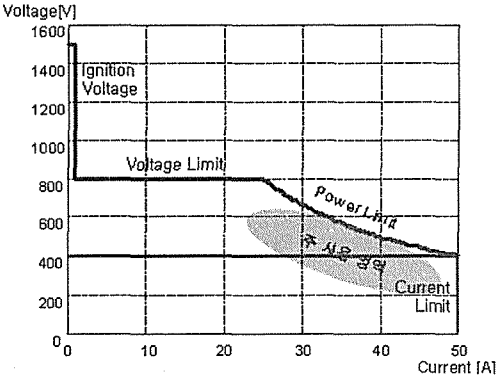


그림 2 전원장치의 동작 영역

본 논문에서 제안된 직류 전원장치는 정격출력은 20kW이고 출력 전압/전류 용량은 800V/25A, 400V/50A이며, 아크 에너지는 0.5mJ/kW이하로 극히 낮게 제어가 가능하도록 개발되었다.

2. 직류 전원장치의 개발

2.1 회로구성 및 동작원리

본 논문에서 개발된 20kW급 직류 전원장치는 5kW급의 DC/DC 컨버터 4개를 직, 병렬로 연결하는 전력회로로 구성되었다. 각각의 DC/DC 컨버터는 그림 3과 같이 L-C 직렬공진 방식의 단상 고주파 인버터, 고주파 절연변압기와 정류부로 구성된다[2,3]. 인버터의 스위칭 소자로는 MOSFET을 사용하였고 L-C직렬공진 회로를 이용한 소프트 스위칭 기법을 적용하여 최대 200kHz까지 동작하도록 하였다.

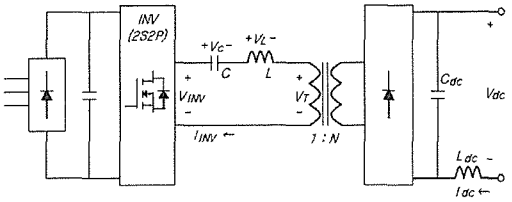


그림 2 전력회로의 구성도

수하특성을 갖는 부하에 최적의 안정된 출력을 공급하기 위해 변압기 자체의 누설 인덕턴스 성분을 이용하여 공진회로를 구현하였다. 이로 인하여 외부의 공진용 인덕터가 제거되어 인버터 스택의 크기와 무게를 최소화 하였다. 개발된 직류 전원장치의 제어를 위해 32bit floating point DSP인 TI(Texas Instrument)사의 TMS320C31을 주 CPU로 사용한 디지털 제어기를 사용하였다.

제안된 단상 공진형 인버터는 100~200kHz의 제어주파수로 PFM(Pulse Frequency Modulation)과 PWM(Pulse Width Modulation) 제어방식을 병행하여 동작시킨다. 이들 인버터는 제어 한주기 내에서 4개의 제어 위상각으로 나누어 제어하는 방식을 사용하였는데, 이를 통해 제어주파수의 8배가 되는 최종 출력리플을 얻도록 하였다. 그리고 각 상의 전류를 센서를 통해 검출하고 그 위상들을 제어함으로써 컨버터의 불평형(Unbalance)을 방지하였다.

DC/DC 컨버터의 출력 전압의 제어 원리는 다음과 같다. 그림 3의 단상 직렬공진회로에서 각부 전압간의 페이서도를 그림 4에 표시하였다.

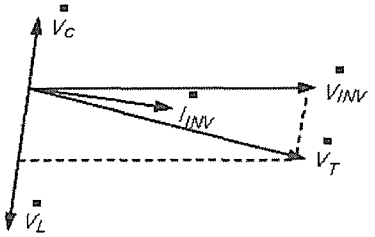


그림 4 인버터 각부 전압의 페이서도

인버터 출력전압 V_{INV} 는 인덕터 L과 커패시터 C 전압 및 변압기 입력전압 V_T 로 식(1)과 같이 표현된다.

$$V_{INV} = V_C + V_L + V_T \quad (1)$$

DC/DC 컨버터의 출력을 제어하기위해서는 변압기 입력전압 V_T 을 제어 할 필요가 있다. 식(1)로부터 식(2)과 같은 변압기 입력전압 V_T 이 얻어진다.

$$V_T = V_{INV} - V_C - V_L \quad (2)$$

이 식으로부터 인버터의 PWM 제어를 이용하여 인버터 출력전압 V_{INV} 를 제어하거나, 인버터 주파수를 변경하여 직렬로 구성되어있는 인덕터 L과 커패시터 C의 주파수에 따른 임피던스의 강하분인 V_L과 V_C의 크기를 제어함으로써 V_T 전압을 제어할 수 있음을 알 수 있다.

일정 전류 하에서 주파수 변동에 따른 L과 C 양단의 전압 V_L 과 V_C 는 식 (3)과 (4)로부터 얻을 수 있다.

$$V_C = \frac{I_{INV}}{2\pi fC} \quad (3)$$

$$V_L = I_{INV} \times 2\pi fL \quad (4)$$

주파수에 따른 V_L과 V_C 의 변동 특성이 그림 5에 보인다.

V_L과 V_C 전압 벡터의 합과 PWM에 의한 인버터 출력 전압 벡터 V_{INV} 의 합에 의해 변압기 입력전압 V_T가 형성되므로 본 논문에서는 PWM과 PFM을 혼합한 인버터 제어방식을 사용하여 전원장치의 수하특성과 고속정밀 제어를 구현하였다

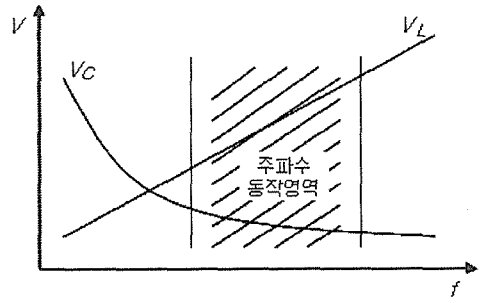


그림 5 주파수에 따른 전압특성곡선

2.2 전원장치의 제어기 구성

플라즈마용 전원장치에서는 정전류, 정전압 및 정전력 제어특성이 모두 요구된다. 이러한 제어를 위한 블록도가 그림 6에 보인다.

각 제어모드별로 제어 기준신호와 실제 검출된 전압 및 전류 신호를 가지고 주 제어성분에 대해 기본적으로 PI(proportion and integral) 제어를 수행한다. 4개의 인버터 PWM 출력은 Phase Shift 기법에 의한 제어를 한다. 또한 출력리플을 줄이기 위한 피드포워드 방식의 보상제어를 수행하며 병렬운전 제어가 가능한 부하공유 제어기술을 적용하였다. 그밖에 스위칭 효율 향상을 위해 제어통유율이 65%~85% 사이에서 정상상태 동작을 갖도록 하기위한 주파수 제어부분이 포함되어있다. 이 부분은 식 (2)의 조건에서 알 수 있듯이 제어 통유율이 낮으면 인버터의 제어 주파수를 증가

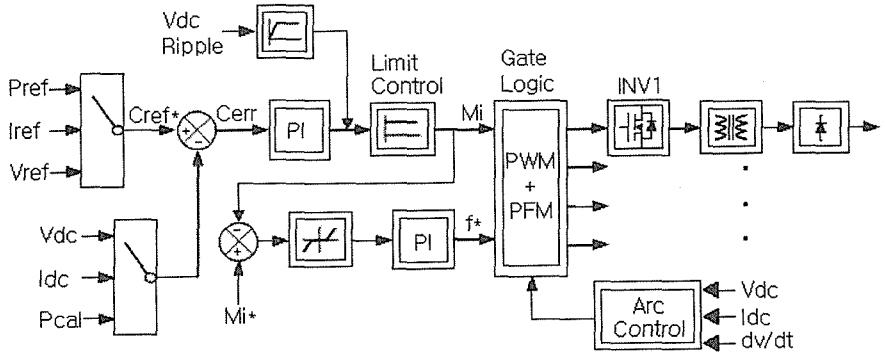


그림 6 DC/DC 컨버터의 제어기

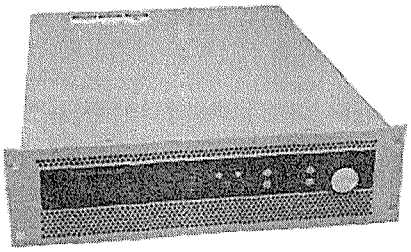
시켜 인덕턴스(L)의 임피던스 강하분을 증가시킴으로써 제어 통유율이 증가되도록 동작한다.

전원장치는 아크 발생시 이를 고속으로 감지, 차단하고 재기동하는 제어 시퀀스가 요구된다. 따라서 제어기는 부하의 아크발생시 검지신호를 입력받아 고속의 아크 제어기를 통해 차단, 재기동하는 루틴을 수행한다. 아크 발생은 출력 전압, 전류 및 dv/dt를 이용하여 감지하며 고속의 아크 제어성능을 구현하였으며, L-C 직렬공진회로에 의한 수하특성을 이용하여 부하로 전달되는 아크에너지를 극소하였다.

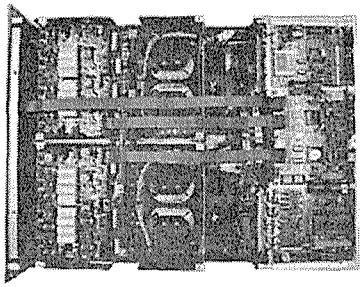
3. 전원장치의 특성 및 실험결과

3.1 전원장치의 구성 및 제작

개발된 전원장치는 그림 7과 같이 19″ 표준 Rack Type의 높이 3U, 깊이(Depth) 600mm의 Size로 제작되었으며 10kW 모듈(Module)을 2개 병렬로 구성하였다.



(a) 외관

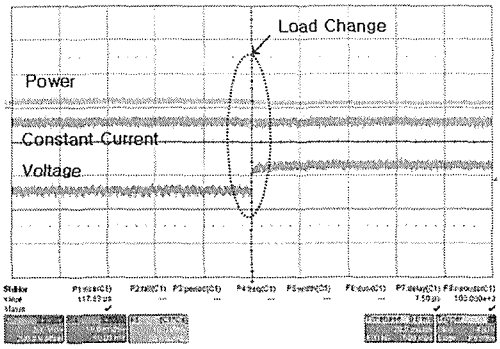


(b) 스택 및 제어기

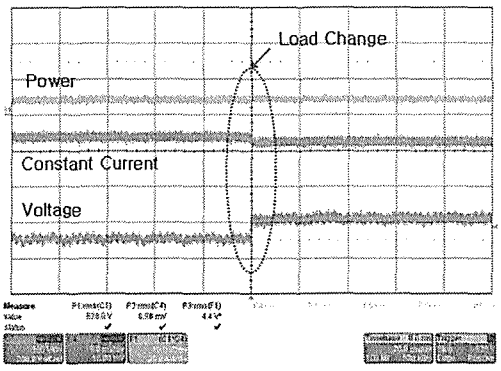
그림 7 전원장치 구성

3.2 출력제어 특성

플라즈마는 부하는 급격한 임피던스의 변화와 아크발생이 빈번히 발생한다. 이와 같은 상태에서도 전원장치는 우수한 정전류, 정전압 및 정전력 특성을 유지하여야 한다. 그림 8(a)와 (b)는 각각 정전류 및 정전력 제어시의 동작특성이다. 각각의 제어 동작시 부하가 급격히 변동하는 경우에도 좋은 제어 특성을 보임을 알 수 있다.



(a) 정전류 모드 (10A)



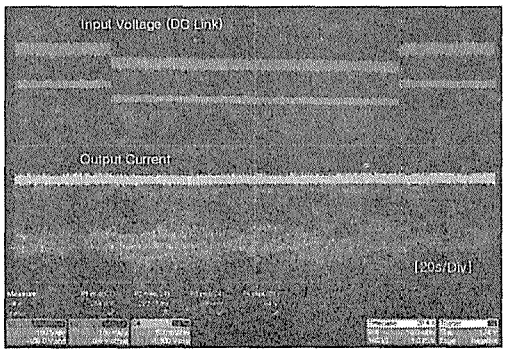
(b) 정전력 모드 (18kW)

그림 8 정전류 및 정전력 제어특성

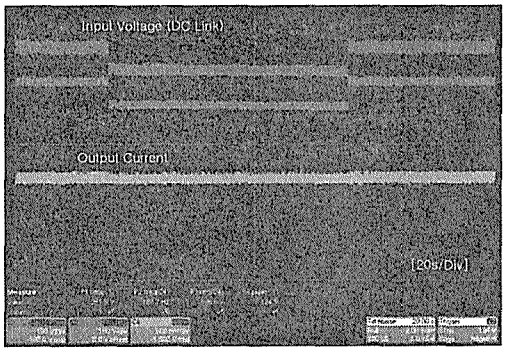
플라즈마용 전원장치는 반도체 제조장비에 주로 사용되는데 최근에는 전기설비 고장 등의 원인으로 인하여 순간전압저하(Sag)가 자주 발생한다. 이로 인하여 장비가 멈추거나 오동작을 일으켜 제품생산이 중단되거나 감소하여 많은 손실이 발생한다. 이에 반도체 설비제조자 협회(SEMI)에서는 SEMI F47과 같은 반도체 공정장비의 Sag 내성에 대한 규격을 정의하고 있다. 이 규정에 따르면 입력전압의 80%에서 1초, 70%에서 0.5초, 50%에서는 0.2초간 정상동작 할 것을 요구하고 있다.

그림 9는 20%와 30%의 순간 전압 감소에 대한 개발된 전원장치의 정전류제어 특성을 보인다. 순간 전압 감소시에도 출력전류가 일정히 잘 제어되

고 있음을 알 수 있다.

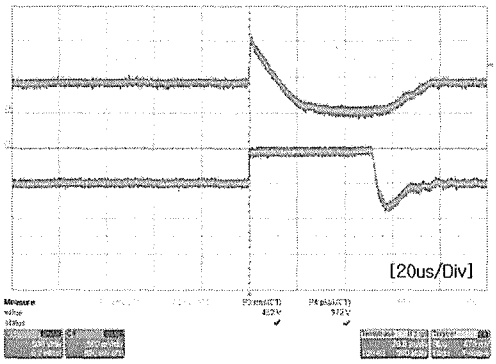


(a) 20%와 30%의 순간 전압 감소

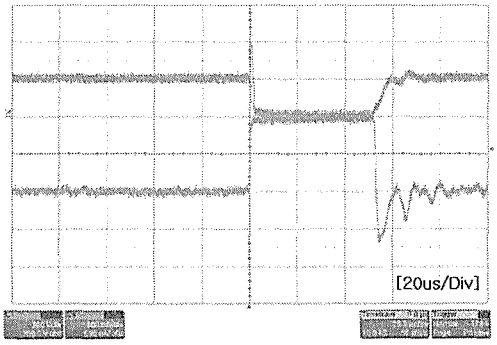


(b) 30%의 순간 전압 감소

그림 9 순간 전압저하의 실험파형



(a) 기존 방식



(b) 제안된 방식

그림 10 아크 제어 특성

3.3 아크제어 성능

플라즈마를 이용한 박막공정에서 박막품질에 영향을 주는 가장 큰 요인은 바로 아크 에너지이다. 아크는 출력 쇼트와 같은 경우에 발생하는데 전원장치는 아크를 가능한 빨리 검지하여 출력을 차단함으로써 아크에너지를 극소화시킬 필요가 있다. 개발한 장치에서는 발생된 아크를 출력 전압, 전류 및 전압변화율 dv/dt를 이용하여 고속으로 감지하도록 하였다.

그림 10은 알루미늄 타겟을 사용한 마그네트론 스퍼터링 공정 과정에서 측정한 아크제어 특성을 보인다. 그림 10(a)는 기존의 아크 제어시 출력전압 및 전류이며, 그림 10(b)는 제안된 고속 아크제어기법을 적용한 새로 개발한 장치의 아크 제어성능을 보인다. 제안된 아크에너지 저감 기법을 적용한 장치에서는 전류가 매우 빠르게 리셋되고 있으며 아크 에너지는 0.5mJ/kW이하로 매우 적게 나타남을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문은 최근 다양한 어플리케이션에 이용되고 있는 플라즈마 공정용 전원장치 개발에 관한 것이다. 플라즈마를 이용한 여러 종류의 박막처리 및 증착공정이 있으며 이에 따른 전원장치의 사양과 출력제어 특성도 다양하다.

여기서는 마그네트론 스퍼터용으로 사용되는 직류 전원장치를 위해 수하특성이 우수한 L-C 직렬공진 컨버터를 개발하였다. 출력리플을 최소화하기 위한 고주파 직, 병렬 제어기술을 적용하였으며, 대용량화를 위해 Unit 간의 병렬운전 제어기법에 대한 연구를 수행하였다. 또한, 아크 에너지를 최소화 하기위한 아크제어기법을 개발하였다.

개발된 전원장치를 실제 플라즈마 박막코팅 공정에 적용하여 고속의 아크제어 성능과 각 모드에 따른 출력 제어 특성, 그리고 형성된 박막의 품질

비교를 통해 본 제품의 우수성을 확인하였다.

참 고 문 헌

[1] Fred Barlow, Aicha Elshabini-Riad(2000), "Film Deposition Techniques and Processes", Thin Film Technology Handbook, Mcgrowhill.

[2] Seong-Jeub Jeon and Kyu-Hyeong Cho, "A Zero-Voltage and Zero-Current Switching Full Bridge DC-DC Converter With Transformer Isolation," IEEE Trans. Power Electron., Vol. 16, PP. 573-580, 2001.

[3] Christian Hattrup, Heinz W. van der Broeck and Martin Ossmann, "Fast Estimation Techniques for Digital Control of Resonant Converters" IEEE Trans. Power Electron., Vol. 18, PP. 365-372, 2003.