

30kW급 고출력 산업용 마그네트론 구동전원 개발

장성록*, 류홍제**, 정순신**, 김대호**, 김중수**

*과학기술연합대학원대학교, **한국전기연구원

The Development of Industrial Magnetron Power Supply

S.R Jang*, H.J Ryoo**, J.S Kim**

*University of Science & Technology, **KERI

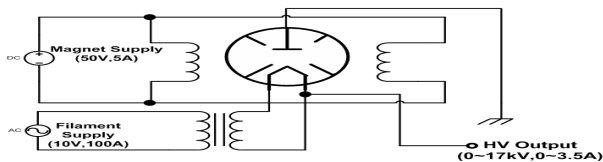
Abstract - In this paper, the design of power supply for high power magnetron system is studied. For magnetron drive, three kinds of power supply is required for main high voltage, magnet and heating filament. Detail design was accomplished with theoretical calculation and real system is developing based on basic design.

1. 서 론

마그네트론은 고효율, 고출력 마이크로파 에너지원으로서 식품, 환경, 화학, 종이, 목재 등 다양한 산업에 응용되고 있다. 본 논문에서는 마그네트론이라는 특수한 부하를 구동하기 위한 전원 장치의 설계 및 제작에 대하여 기술 한다. 마그네트론을 구동하기 위해서는 고압의 High Voltage Power Supply와 필라멘트를 가열하는데 필요한 Filament Power Supply, 마그네트론에서 생기는 전자를 여자 시키기 위한 Magnet Power Supply가 필요하다. 특히 고압전원의 설계에 있어서 마그네트론의 보호를 위한 protection 기능과 부하 특성상 온도상승에 따른 부하변동을 고려하여 설계하여야 한다. 부하변동을 컨트롤 하기위해 필라멘트 전원과 고압전원사이의 인터페이스를 이용하여 정저항 제어방식을 이용하였고, 각각의 전원장치에 Over Voltage / Over Current / Over Temperature 등의 protection 기능들을 통해 장치의 안전성을 높였다.

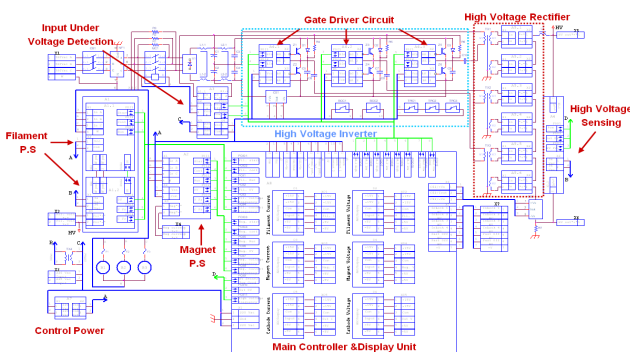
2. 마그네트론 구동전원의 설계

2.1 마그네트론 구동전원의 기본 구조



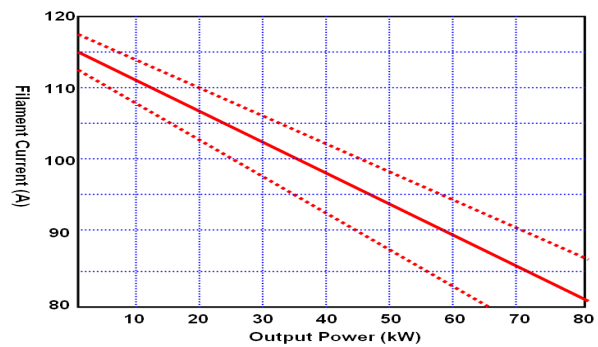
<그림 1> 마그네트론 전원 구성도

그림1은 서론에서 설명한 바와 같이 마그네트론을 구동하기 위한 세 전원 장치의 구성도를 나타내었다. 구성도에서 볼 수 있듯이 필라멘트 전원은 고압의 음극봉에 연결하기 위하여 절연을 필요로 하고, 고압에 의해 발생하는 전자를 여자 시키기 위한 마그넷 전원이 인가되어 있다.



<그림 2> 마그네트론 전원장치 인터페이스

그림2는 세 개의 전원장치의 인터페이스와 고압전원의 구조에 대하여 나타내었다. 모든 전원장치는 SLR converter 방식으로 구현하였는데 필라멘트와 마그넷 전원장치는 CCM(fs>fr) 영역에서 설계하였고, 고압전원은 DCM(2fs<fr) 영역에서 설계하였다. 특히 고압전원은 돌입전류 방지를 위한 입력필터부분과 출력조건을 고려한 트랜스 포머 및 정류부, 고압 출력을 센싱해서 control 하는 sensing part와 control part, IGBT를 구동하는 drive 회로 크게 나눌 수 있다. 고압의 특성상 component stress와 절연 등을 고려하여 설계하는 것이 매우 중요하다. 또한 마그네트론의 부하특성에 의해 출력이 높아짐에 따라 반사되는 전류가 생기게 되는데 이는 그림3과 같이 filament 전류를 줄임으로써 해결할 수 있다.



<그림 3> 출력에 따른 필라멘트 전류제어

2.2 고압전원의 설계

2.2.1 Power Stage

본 논문에서 소개한 세가지 전원장치는 모두 SLR 방식을 사용하였기 때문에, 설계가 가장 까다로운 고압전원장치에 대하여 자세히 설명 하도록 한다. 고압전원은 Discontinuous Conduction Mode 영역(2fs<fr)에서 설계하여서 Zero Current Switching으로 switching loss를 줄일 수 있고, 스위칭 주파수와 출력전류가 선형적인 비례관계를 가지므로 컨트롤 하기 쉬운 장점을 가진다. 즉, SLR 컨버터는 스위칭 주파수를 조절하여 원하는 출력을 얻을 수 있기 때문에 정해진 출력에 맞게 공진주파수(fr), Resonant characteristic impedance(ρ)를 정하고 그에 따라 공진 인덕턴스(Lr), 커패시턴스(Cr)를 결정한다. 이때 공진 인덕턴스(Lr)는 장치의 부피를 줄일 수 있도록 트랜스포머의 leakage inductance를 이용한다. 아래의 조건은 고압 전원장치의 입력 및 출력 조건이다.

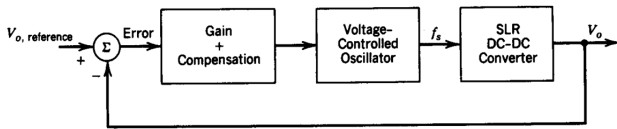
- 정격출력(Pout): 45kW
 - 출력전압 및 전류(Vout, Iout): 15kV, 3A
 - 입력전압(Vin): 3□~380V±10%
 - 스위칭 주파수(fs): 35kHz
- 위에서 설명한 바와 같이 아래의 수식을 통해 Power Stage를 설계 할 수 있다.
- $$V_{DC} = 380 \times 1.35 \approx 513 [V] \tag{1}$$
- $$I_{DCrms} = \frac{P_o}{V_{DC}} = 132 [A] \tag{2}$$
- $$I_{peak} = 2.5 I_{DCrms} = 219 [A] \tag{3}$$
- $$f_R = 3.5 \sim 4 f_s = 120 kHz$$

$$\rho = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} = \frac{V_{DC}}{I_{peak}} \approx 2.34\Omega \quad (4)$$

$$L_r = \frac{\rho}{2\pi f_R} = 3.04\mu H, \quad C_r = \frac{L_r}{\rho^2} = 0.55\mu F \quad (5)$$

3상 입력이 정류된 DC 입력전압(1)을 구하고, 출력에 맞는 전류의 rms value(2)와 공진전류의 peak치(3)를 정한다. 공진전류의 peak치와 공진주파수는 약간을 마진을 두고 정하고, 정해진 공진 주파수와 출력조건으로 characteristic impedance(4)와 인덕턴스, 커패시턴스(5)를 구할 수 있다. 이때 공진 인덕턴스는 트랜스포머의 leakage 인덕턴스를 이용하는데, 그 값은 1차측 턴수(W1)에 의해 결정된다. 원하는 인덕턴스를 얻기 위한 W1은 14 turn이 나오고, 출력전압을 고려해 턴수비를 정해 이차측 턴수W2를 구하면 75turn이 됨을 알 수 있다. 위와 같은 과정을 거쳐서 원하는 출력에 맞는 Power Stage를 제작할 수 있고, 이때 공진 커패시터, switch등의 stress를 고려해야 되고, 트랜스포머의 loss와 이로 인해 발생하는 열을 적절히 고려하여 설계하여야 한다.

2.2.2 Control of SLR Converter

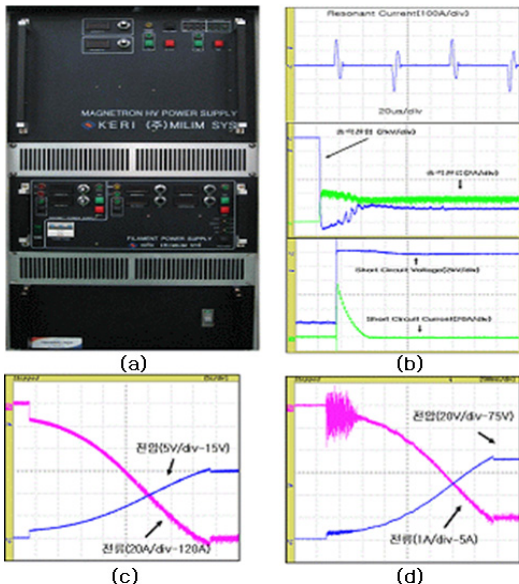


〈그림 4〉Block Diagram of the SLR Controller

SLR 컨버터의 컨트롤은 그림5를 보면 간단히 알 수 있다. 기준신호와 실제 측정신호를 PI regulator 구조를 갖는 compensation 회로의 입력으로 사용하고, 이를 통하여 얻은 컨트롤 신호로 스위칭 주파수를 결정한다. 이때 출력전압이 매우 고전압이기 때문에 전압을 센싱하는 부분에서 적절한 절연이 필요로 하고, 보호기능이 추가되어야 한다. 본 논문에서는 기본적으로 Current mode control하였고, 원하는 전압 regulation을 위해 Voltage control loop도 추가하여 전류와 전압을 원하는 출력으로 제어할 수 있게 하였다.

3. 실험결과

설계과정을 통한 실제 전원장치를 설계하고 동작 특성을 실험을 통해 분석해 보았다. 그림5는 제작된 전원장치 외형과 각 전원장치의 실험 파형이다.

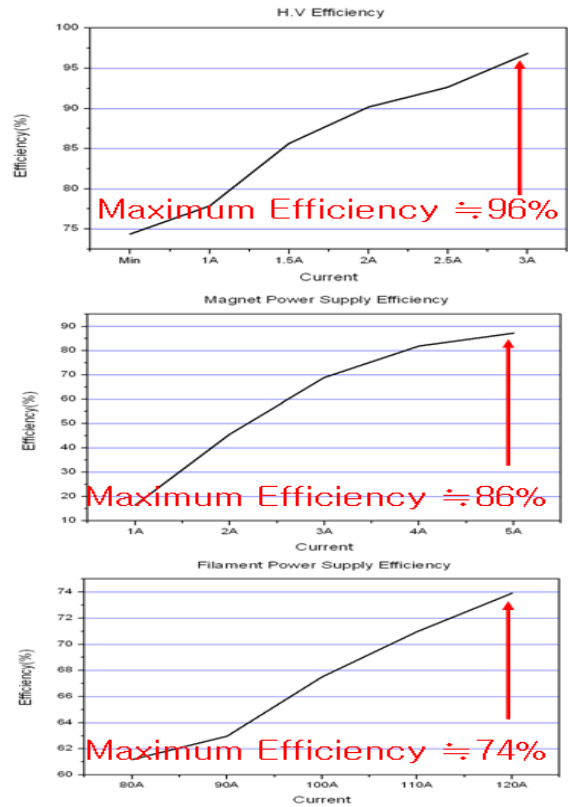


〈그림 5〉Practical Machine and Waveforms

그림5(a)의 가장 상단이 고압 구동 전원이고, 중간의 전원이 마그넷 필라멘트 전원이다. 가장 아래의 것은 3상 380Vac입력을 받아 돌입전류 방지하고, 전원 장치에 전원을 공급하는 입력 정류부이다. 그림5(b)는 고압 전원장치의 파형을 나타내었다. 상단의 파형은 고압전원의 공진전류이며, 중단의 파형은 변압기출력단의 고압출력전압 및 전류이다. 하단의 파형은 출력 단이 short

되었을 때의 보호동작성능을 보여준다. 제작된 고압전원은 마그네트론 구동시에 빈번하게 발생하는 short circuit 조건에서 훌륭하게 protection이 가능함을 검증할 수 있었다. 이 외에도 마그네트론과 전원장치를 보호하고, 유지할 수 있도록 OverVoltage / Over Current / Over Temperature등의 protection 기능도 추가되어 있다. 그림5(c)는 Filament 전원의 정격(15V, 120A)출력 파형을 나타내고, 오른쪽은 Magnet 전원의 정격(75V, 5A)를 나타낸다. 세 전원장치 모두 마그네트론 구동전원 사양에 만족함을 알 수 있다.

실험을 통해 측정된 각 전원장치의 효율은 그림6과 같다.



〈그림 6〉Efficiency Test

고압전원은 정격에서의 최대 96%의 높은 효율을 달성 하였으며, 마그넷 전원장치(50V,5A)의 효율은 최대 86%정도로 측정되었다. 하였다. 반면에 필라멘트 전원(10V,100A)은 저전압 대전류 전원장치의 특성상 그 효율이 그리 높지 않게 나타났으며 실제 측정 효율은 최대 74%로 측정 되었다.

4. 결 론

본 논문은 마그네트론을 구동하는데 있어서 필요한 전원장치들의 특징과 전원장치에 요구되는 조건에 따라 설계하는 과정을 제시하고, 실제 제작 및 실험을 통해 그 타당성을 검증 하였다. 직렬공진형 인버터방식의 고압전원을 구현하여 높은 효율과 우수한 보호동작 성능을 확인하였으며 필라멘트 전원의 경우 기존의 전원장치와 다른 정지형 제어 방식을 제안하여 고압전원과 독립적으로 제작 가능한 장점이 추가되었다.

설계 제작된 산업용 대출력 마그네트론 구동전원은 관련업체에 기술이전을 통하여 국산화 양산 계획예정이며, 취약한 국내 대출력 마그네트론 구동전원의 국산화로 수출 증대 및 수입대체 효과가 막대할 것으로 예상된다.

〔참 고 문 헌〕

- [1] Wing C. Ho, M. H. Pong, "Design and analysis of discontinuous mode series resonant converter", IEEE International Conference, pp486-489, 1994
- [2] S. J. Chang, C. M. Liaw, J. H. Ouyang, C. C. Chiang, "Multi Module parallel series-loaded resonant converter", IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, pp257-265, 1995
- [3] "산업용 마그네트론 및 구동전원 개발" 한국전기연구원 1,2차년도 보고서