

고출력 마그네트론 구동용 3.6 MW, 4 μs, 200 pps 펄스모듈레이터 개발

손 윤규*, 장 성덕*, 오 종석*, 조 무현**, 남궁 원**, 이 한구**, 배 영순**, 이 경태***, 손 병학***
 *포항가속기연구소, **포항공과대학교 ***동아테크

Development of 3.6 MW, 4 μs, 200 pps Pulse Modulator for a High power magnetron

Y. G. Son,* S. D. Jang,* J. S.Oh,* M. H. Cho,** W. Namkang,** H. K. Lee,** Y. S. Bae,**
 K. T. Lee,*** B. H. Son,*** *PAL, **POSTECH, ***Dong-A Tech

Abstract - Microwave heating system of KSTAR consists of ECH and LHCD. ECH and LHCD offer the reliability of operation in the beginning of plasma formation and non-inductive current drive for long time steady state operation with maintaining MHD stability, respectively. LHCD demands 5 GHz of frequency and consists of c-band waveguide, 4-port circulator, dry dummy load, dual directional coupler, E-bend, arc detector. Our system is a lineup type pulse modulator that has 45 kV of output pulse voltage, 90 A of pulse current, 4 us of pulse width. 1:4 step-up pulse transformer, 7 stages of PFN and thyatron tube (E2V, CX1191D) are used in this modulator. The purpose of this paper is to show the modulator design and experimental result.

표 1. 설계파라미터

Parameter	Value
Peak voltage [kV]	45
Peak Current [A]	96
Load Impedance [Ω]	470
HV Pulse Length [μs]	4
Pulse Energy [J]	17.3
Repetition Rate Max [Hz]	200
Step-up Ratio	4
PFN Charging Voltage [kV]	25
PFN Impedance [Ω]	29.37
PFN Section Cap [nF]	10
PFN Section Inductance [μH]	8.63
PFN Section Number	7
Charging Resistance [Ω]	100
Thyatron(CX1191D)	8 MW, 35 kV, 500 A

1. 서 론

마그네트론을 부하로 하는 펄스 모듈레이터는 펄스 폭 4μs를 필요로 한다. 고출력의 3.6 MW 마그네트론을 구동하기 위한 전원장치로는 라인타입의 모듈레이터를 사용한다. 마그네트론을 운전하기 위한 모듈레이터의 설계방법과 필요한 파라미터의 선정하였다. 마그네트론 캐소드에 인가하는 펄스 파형은 그 평탄부가 왜곡이 없어야 하고 출력안정도를 높이는 것이 설계에서 중요한 부분을 차지한다. 고출력의 마그네트론을 이용한 설비의 응용분야로서는 환경처리 설비나 병원에서 사용하는 X-선 발생장치부분이 있다. 부하와 매칭에 필요한 전원 장치의 구성에서 중요한 부분을 차지하는 펄스트랜스포머와 전원장치간의 관련사항과 실제 제작 시에 필요한 부품의 성능시험을 이 논문에서 보이고자 한다.

부하로 전달되는 에너지의 양은 대략 17 J이며 최대운전 주파수는 200 Hz가 되도록 하였다. PFN 캐패시터에 충전되는 전압은 최대 25 kV이며 방전스위치인 싸이 라트론 튜브에 의한 부하로 전달되는 전압은 캐패시터에 충전되는 전압의 1/2 전압인 12.5 kV가 부하로 전달되며, 펄스변압기 권수비 승압비 만큼 전압이 승압되어 45 kV가 된다. 부하와 임피던스 매칭을 위한 회로시정수인 PFN 단의 캐패시터와 인덕턴스 값은 각각 10 nF 과 8.63μH의 값을 갖는다.

2. 본 론

2.1 시스템 사양

기본 설계에 의해 최적화된 파라미터는 표 1과 같다. 시스템에서 최대인가전압은 45 kV이며 펄스트랜스포머의 승압비는 1 : 4이다. 그림 1은 시스템의 전기회로의 연결을 보여주고 있다. 설계요구조건인 펄스 폭 4 μs의 평탄부를 갖기 위해 PFN의 설계는 7단의 캐패시터와 인덕터로 구성하였다. 회로에서 PFN의 임피던스에 의해 PFN에 충전된 전압에 의해 전류의 양이 정해진다. 회로에서 임피던스는 식 (1)과 같다.

5GHz, 1.5MW Magnetron & Pulse Modulator System

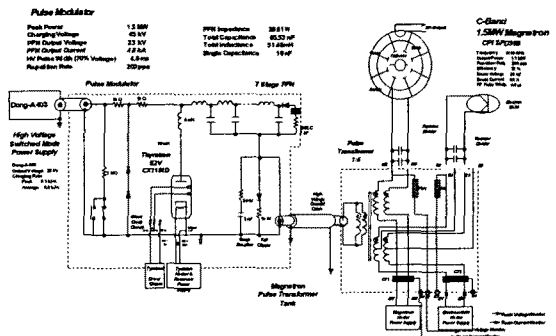


그림 1. 펄스 모듈레이터 전기회로도

$$Z_{PFN} = \sqrt{\frac{L_{PFN}}{C_{PFN}}} [\Omega] \tag{1}$$

시스템에서 마그네트론 부하에 필요한 펄스의 상승시간과 하강시간, 평탄부 및 펄스 폭을 얻기 위한 PFN의 단수결정에 펄스트랜스포머의 파라메타가 중요하다. 펄스전압을 부하로 전달시 평탄부에서 드롭현상이 적어야 하고 변압기 코어가 포화되지 않아야 한다. 이를 위해서는 적절한 코어의 선택이 중요하다. 설계에서 선정된 코어의 파라메타는 그림 2와 같다.

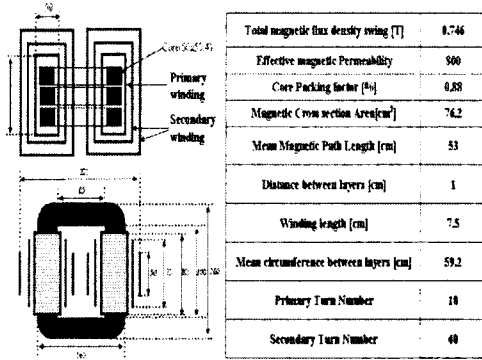


그림 2. 펄스트랜스포머 코어사양

2.2 시스템의 구성

펄스 전원 공급장치인 모듈레이터는 표준 19인치 랙에 장착되는 구조로 부피를 줄여 콤팩트하게 제작하는데 목적을 두었다. 시스템의 내부구성은 에너지를 충전하는 충전부와 펄스를 만드는 방전부로 분류할 수 있다. 충전부는 고전압 전원장치와 에너지를 저장하는 PFN(pulse forming network) 캐패시터이다. 방전부는 사이라트론 스위치와 펄스변압기를 포함하는 2차축회로까지 포함된다. 사용전원에는 충전인버터의 3상 220V와 제어전원 110V 두 종류의 전원으로 표준랙에 공급하는 것을 원칙으로 하였다. 충전회로와 방전회로의 일부는 가로길이와 세로길이는 표준랙의 길이에 따르고 높이는 1m 구조의 랙에 수납되는 구조가 되게 배치하였다. 펄스 트랜스포머의 경우는 별도의 수납함으로 제작하여 출력전압의 크기를 고려하여 충분히 절연을 견디도록 절연유에 함침하였다. 고압케이블로는 DS2124 동축케이블을 사용하였고, 인입과 인출을 위한 단말부는 콘넥터 구조로 제작하여 연결하였다. 저전압의 히터전원과 펄스탱크와의 연결은 고압애자를 제작하여 고압전선으로 연결하였다.

펄스트랜스포머의 일차측 전압은 PFN 전압의 절반인 11.25 kV가 되고 이 전압이 변압기의 승압비만큼 승압이 된다. 고압부품을 수납하는 19인치의 표준랙 내에서 절연을 견디는 구조의 배선방법과 각종 코로나 현상과 아킹현상 등을 고려하여 적절하게 배치하는 것이 무엇보다도 중요하다.

2.2.1 고전압 인버터 전원 및 보호회로설계

충전부에 19인치 표준랙에 장착되는 고전압 인버터 전원을 사용하였다. 높은 운전주파수의 펄스 반복률을 유지하기 위한 인버터 전원장치는 용량 5 kJ/sec, 출력전압 25 kV이다. PFN의 캐패시턴스 합성용량은 70 nF이다. 시스템에서 필요한 충전시간을 계산해 보면 식 2와 같다.[1][2][3]

$$t_{CH} = \frac{C_{PFN} \times V_{PFN}^2}{2 \times P_{CH}} \text{ [ms]} \quad (2)$$

t_{CH} : 충전시간 [ms]
 C_{PFN} : PFN 캐패시턴스 [nF]
 V_{PFN} : PFN 충전전압 [kV]
 P_{CH} : 인버터 용량[kJ/sec]

계산에 의한 충전시간은 3.54 [ms]이고 실제 측정된 충전시간은 3.8 [ms]이다.

펄스 반복률은 200 pps로 캐패시터에 충전되는 전압이 동일한 기울기를 갖기 위해서는 전류가 일정하고 부하의 단락이나 개방되었을 때는 자기 자신을 보호 할 수 있는 전원장치가 되도록 하여야 한다. 캐패시터에 충전된 전원은 사이라트론의 방전스위치에 의해 방전을 수행하므로 미처 부하로 전달되지 못한 에너지가 역으로 전원측으로 귀환하게 되고 전원장치와 순방향이 되어 다시 에너지 저장용 캐패시터로 돌아온다. 초기에 전원을 충전할 때는 전원장치가 낼 수 있는 최대전류가 흐르지만 방전회로를 통해 흐르는 전류는 충전전류의 수배에서 수배의 전류가 흐른다. 역전류에 의해 전원장치의 팔단인 정류다이오드가 소손될 수 있다. 이를 보호 할 목적으로 저항과 다이오드를 조합한 T형의 보호회로를 전원장치와 병렬로 연결한다. 이는 역기전력에 대해 바이패스 시킬 목적으로 삽입하게 되는데 출력전압에 대해 내압을 견디어야 하고 역으로 귀환하는 방전 써지전류에 대해서 충분한 용량을 갖는 것으로 선정해야 한다.

2.2.2 PFN 방전회로 설계

라인타입의 펄스 모듈레이터에서 펄스 에너지를 저장하는 PFN은 부하임피던스와 등가한 값을 갖도록 설계한다. 펄스회로에서 부하와 전원장치간을 절연을 위하여 펄스트랜스를 사용하는 시스템에 있어서 승압비에 따라서 PFN 임피던스를 결정하였다.[4] 본 시스템에서 필요한 펄스폭으로부터 계산해 보면

$$t_u = 2\sqrt{L_N C_N} = 2C_N Z_N = \frac{2L_N}{Z_N} \text{ [Sec]} \quad (3)$$

$$L_N = \frac{1}{2} t_u Z_N [H] \quad (4)$$

$$C_N = \frac{t_u}{2Z_N} [F] \quad (5)$$

PFN을 설계하기 위해서는 우선적으로 펄스 폭을 결정하고 이로부터 임피던스 값과 캐패시터 값을 결정하게 된다. 결정된 값으로부터 부하임피던스와 PFN임피던스의 임피던스 정합을 위해서 펄스 트랜스포머의 승압비를 고려하여 정하게 된다.

그림 3은 제작된 고전압 방전부분과 PFN, thyatron 스위치를 보여주고 있다.

PFN의 조합은 인덕터와 캐패시터를 직렬로 연결하고 다음단의 캐패시터는 병렬로 연결되는 구조로 다단으로 형성되어있다. 대부분 이것은 펄스 폭을 결정하는 인자로 되며 부하와 매칭되는 내부 임피던스로 결정된다. 이것에 사용된 인덕터의 경우는 펄스 평탄부의 평탄도를 결정하며 이 값을 적절하게 조정여 평탄부의 평탄도를 좋게 한다. 본 시스템에서는 두가지의 인덕터를 제작하여 실험하였고 운전 중에 인덕터를 가변할 수 있는 구조로 제작을 하였다. 일체형의 인덕터의 경우는 상승시간과 하강시간에 대해서는 우수한 특성을 보였으나 평탄부에서는 전압이 상승함에 따라 오목하게 되는 경우가 발생되어 튜닝의 어려움이 있었다.

2.3 회로 전산모사

펄스 폭의 구성과 펄스의 상승시간과 하강시간을 확인

하기 위해 그림 4는 본 시스템의 회로를 등가회로로 구

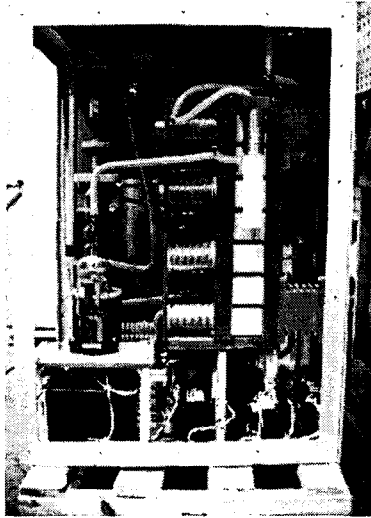


그림 3. 제작된 펄스모듈레이터 내부

성하였다. 등가회로에서 펄스폭을 4 μ s로 유지하기위해 PFN 캐패시터와 인덕터를 6단과 7단으로 하여 펄스 트랜스포머를 등가회로로 변환하여 각각의 변수들을 넣어서 펄스의 상승시간과 하강시간의 관계를 전산모사를 통해서 회로 시정수를 점검하였다. 펄스 트랜스포머의 경우 제작이 완료된 후 계산된 값과 측정된 값을 전원투입 시 확인을 통하여 검증을 하였다. PFN 인덕터의 값을 변화시키면서 펄스의 평탄부 전산모사를 수행하였으며 상승시간 계산을 통해서 컴퓨터 전산모사와 비교하였다. 그림 5와 6은 전산모사에 출력된 전압, 전류파형과 실제 실험 시에 측정된 출력전압, 전류파형이다.

Sample Circuit

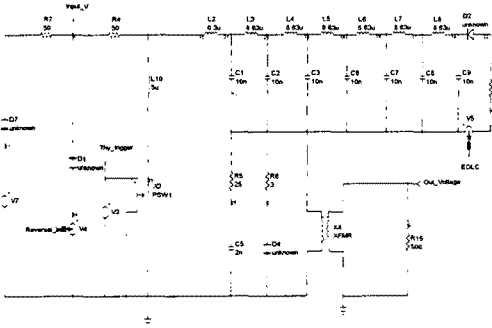


그림 4. 펄스 모듈레이터 등가회로

3. 결 론

회로설계에서 제작 그리고 실험을 통하여 1.5 MW급의 펄스 모듈레이터 설계기술을 확보하였다. 펄스모듈레이터에 있어서 핵심부품 중의 하나인 펄스 트랜스포머 설계기술과 펄스의 평탄부의 평탄도를 위해 운전 중이라도 튜닝이 가능하도록 설계하였다. 고전압의 펄스전원을 콤팩트하게 소형화하는 작업은 전기적인 절연을 견디는 구조의 이격거리를 확보하는 것이다. 3차원 캐드를

이용한 고전압 부품의 공간배치 시뮬레이션과 전계해석을 수행하였다. 이를 바탕으로 실제 제작에 반영하였고 실험할 때 고전압으로 인한 코로나 현상을 개선하는데 활용하였다.

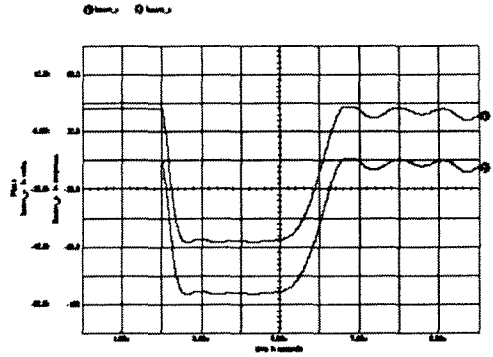


그림 5. 전산모사 시 출력전압, 전류파형

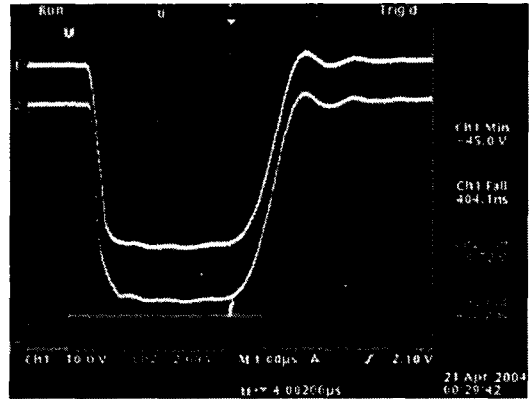


그림 6. 출력 펄스 전압 및 전류파형

[참 고 문 헌]

- [1] 손운규 외, "50 kV, 10 kW 소형 고주파 전원장치 개발", 대한전기학회 하계학술대회 논문집 F, pp. 2027~2029, 1998.
- [2] 손운규 외, "대출력 고전압 35 kW, 50 kV 인버터 전원장치 개발에 관한 연구", 대한전기학회 하계학술대회 논문집 B, pp.992~995, 2001.
- [3] 손운규 외, "대출력 고전압 35 kW, 50 kV 인버터 전원장치 개발에 관한 연구", 대한전기학회 논문집 Vol.51B, No. 11, NOV. 2002, pp.628~634, 2002.
- [4] RALPH E. TARTER, P.E. "Solid State Power Conversion Handbook", 1993