

고출력 마그네트론 구동용 3.6 MW, 4 μ s, 200 pps 펄스 모듈레이터 개발

| |
|---------|
| 論 文 |
| 54C-3-5 |

Development of a 3.6 MW, 4 μ s, 200 pps Pulse Modulator for a High Power Magnetron

孫 鎰 奎^{*} · 張 成 德^{*} · 權 世 鎭^{*} · 裴 英 淳^{**} · 吳 宗 錫^{***} · 趙 武 顯[§] · 南 宮 垣^{§§}
(Yoon-Kyoo Son · Sung-Duck Jang · Sei-Jin Kwon · Young-Soon Bae · Jong-Seok Oh ·
Moo-Hyun Cho · Won Namkung)

Abstract - The Korean Superconducting Tokamak Advanced Research (KSTAR) tokamak device is being constructed to perform long-pulse, high-beta, advanced tokamak fusion physics experiments. The long-pulse operation requires the non-inductive current drive system such as the Lower-Hybrid Current Drive (LHCD) system. The LHCD system drives the non-inductive plasma current by means of C-band RF with 2-MW CW power and 5-GHz frequency. For the LHCD test experiments, an RF test system is developed. It is composed of a 5-GHz, 1.5-MW pulsed magnetron and a compact pulse modulator with 4 μ s of pulse width. The pulse modulator provides the maximum output voltage of 45 kV and the maximum current of 90 A. It is composed of 7 stages of Pulse Forming Network (PFN), a thyratron tube (E2V, CX1191D), and a pulse transformer with 1:4 step-up ratio. In this paper, the detailed design and the performance test of the pulse modulator are presented.

Key Words : 5 GHz LHCD, Pulse Modulator, Magnetron

1. 서 론

한국기초과학지원연구원(KBSI)에서 건설 중인 KSTAR (차세대 초전도 핵융합 연구 장치) 토카막 장치는 핵융합 연구실험을 위한 300초의 운전이 가능한 장펄스 실험로이다. KSTAR 장치는 세계 최초로 초전도 코일을 이용한 핵융합 장치가 될 것이며, 현재 건설 중인 국제 핵융합로 ITER장치^[1]의 pilot plant로 사용하기 위해 국제공동협력 방안을 모색하고 있다. KSTAR 장치를 장펄스로 운전하기 위해서는 마이크로웨이를 이용한 비유도성 플라즈마 전류구동 장치가 필요하다. LHCD 장치는 KSTAR 토카막장치에 비유도성 전류구동을 공급하게 된다. 이 장치는 연속 2 MW급, 5 GHz RF 소스로 클라이스트론(Klystron)을 사용하게 된다. 이와 같은 고출력 RF 시스템을 구성하기 전에 짧은 펄스의 RF 시스템을 개발하고 RF관련 실험용으로 4 μ s, 1.5 MW급 RF 시스템을 개발하였다. RF 테스트 시스템은 1 μ s 펄스의 고출력 1.5 MW급 마그네트론 한 대를 사용하며, 마

그네트론 구동용 전원장치는 45 kV, 90 A급의 펄스 모듈레이터이다. 펄스 모듈레이터의 펄스폭은 4 μ s로서 마그네트론 펄스폭 사양보다 큰 4배로 사용한다. 마그네트론 구동시 마그네트론 운전전압(-40 kV)보다 -38 kV 전압을 인가하여 펄스폭 증가로 인한 마그네트론의 부하 부담을 줄일 수 있다. 마그네트론 RF 출력 테스트를 위하여 마그네트론 보호용 4-port circulator와 C-band 도파관, 그리고 dummy-load^[2]를 마그네트론 출력단 이후에 연결하였다. 본 논문에서는 펄스 모듈레이터의 파라메타 선정과 설계결과에 관하여 소개하고자 한다.

2. 본 론

2.1 시스템 사양

KSTAR의 마이크로파 가열장치에 사용되는 LHCD시스템의 기본 설계에 의해 최적화된 파라메타는 표 1과 같다. 그림 1은 시스템의 전기회로를 보여주고 있다. 설계요조건인 펄스폭 4 μ s의 평탄부를 갖기 위해 PFN의 설계는 7단의 콘덴서와 인덕터로 구성하였다. 회로에서 PFN의 임피던스는 식(1)과 같이 나타내며 방전최대전류는 이 임피던스에 의해 정해진다.

$$Z_{PFN} = \sqrt{\frac{L_{PFN}}{C_{PFN}}} [\Omega] \quad (1)$$

Z_{PFN} : PFN 임피던스 [Ω]
 L_{PFN} : PFN total인덕턴스 [μ H]
 C_{PFN} : PFN total정전용량 [nF]

* 교신저자, 正會員 : 포항공과대학 가속기연구소 선임기술원

E-mail : ygson@postech.ac.kr

* 正會員 : 포항공과대학 가속기연구소 선임연구원

** 正會員 : 포항공과대학 가속기연구소 위촉연구원

*** 正會員 : 포항공과대학 가속기연구소 책임연구원

§ 正會員 : 浦項工大 物理學科 教授 · 理博

§§ 正會員 : 浦項工大 대학원장 · 理博

接受日字 : 2004年 10月 5日

最終完了 : 2005年 1月 18日

표 1. 펄스 모듈레이터의 설계 파라메타
Table 1. Design parameters of pulse modulator.

| 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 capacitance [nF] | 10 |
| PFN section inductance [μH] | 8.63 |
| PFN section number | 7 |
| Charging resistance [Ω] | 100 |
| Thyratron (CX1191D) | 8 MW, 35 kV, 500 A |

부하로 전달되는 에너지의 양은 펄스당 대략 17 J이며 최대 운전 주파수는 200 Hz가 되도록 하였다.

시스템에서 마그네트론 부하에 필요한 펄스의 상승시간과 하강시간, 평탄부 및 펄스폭을 얻기 위한 PFN의 단수결정에 펄스변압기의 파라메타가 중요하다. 펄스전압을 부하로 전달 시 평탄부에서 전압강하가 적어야 하고, 변압기 코어가 포화되지 않아야 한다.

2.2 시스템 구성

펄스 전원 공급 장치인 모듈레이터의 충전전원은 표준 19인치 랙에 장착되는 구조로 부피를 줄여 소형으로 제작하는데 목적을 두었다. 고압부품을 수납하는 19인치의 표준랙 내에서 절연을 견디는 구조의 배선방법과 각종 코로나 현상과 아킹현상 등을 고려하여 적절하게 배치하는 것이 중요하

다. 이를 위해 3차원 캐드를 사용하여 입체적으로 부품을 배치하고 기중 코로나 현상을 배제하기 위한 절연거리확보를 미리 예측하여 효율적인 공간배치가 되도록 하였다. 주회로는 크게 충전회로와 방전회로로 분류 할 수 있다.

충전부는 고전압을 공급하는 부분으로 고전압 인버터 전원과 에너지저장용 콘덴서가 여기에 해당된다. 고전압 인버터는 정전류원으로 지령충전에 의해 전압을 충전하며 방전 스위치에 고전압이 머무르는 시간을 줄여 자발방전이 생기는 효과를 줄일 수 있다.

방전부는 싸이라트론 스위치, 펄스변압기 2차측 회로를 포함한다. 방전회로에 의해 생성된 펄스는 펄스변압기의 승압 비에 의해 승압이 되고 부하로 전달된다. 펄스변압기는 별도의 탱크를 제작하여 펄스전압에 대해 충분한 절연을 확보하고 온도상승을 고려하여 냉각이 되도록 절연유에 함침하였다. 고압케이블로는 DS2124 동축케이블을 사용하였고, 인입과 인출부의 끝단처리에는 콘넥터 구조로 제작하여 연결하였다. 저전압의 히터전원과 펄스탱크와의 연결은 고압애자로 제작하여 고압전선으로 연결하였다. 펄스변압기의 일차측 전압은 PFN 전압의 절반인 11.25 kV가 되고, 변압기의 승압 비만큼 승압이 된다. 그리고 시스템에 공급되는 입력전원으로 동력용은 3상 220 V를, 제어전원으로는 110 V를 사용하였다.

2.2.1 고전압 인버터 전원 및 보호회로설계

PFN 콘덴서를 충전하기 위해 고주파 스위칭 방식의 정전류 전원을 사용하면, 장치의 크기를 크게 줄일 수 있고 고전압 스위치인 싸이라트론의 안정적인 동작을 확보하며 별도의 제어회로 없이도 높은 전압 안정도를 얻을 수 있어 기존의 정전압 전원을 사용하는 공진충전방식보다 유리하다. 모듈레이터의 충전전원으로 활용하기 위해서는 최고 출력전압 25 kV, 평균 출력전류 0.4 A의 고주파 인버터 전원이 필요

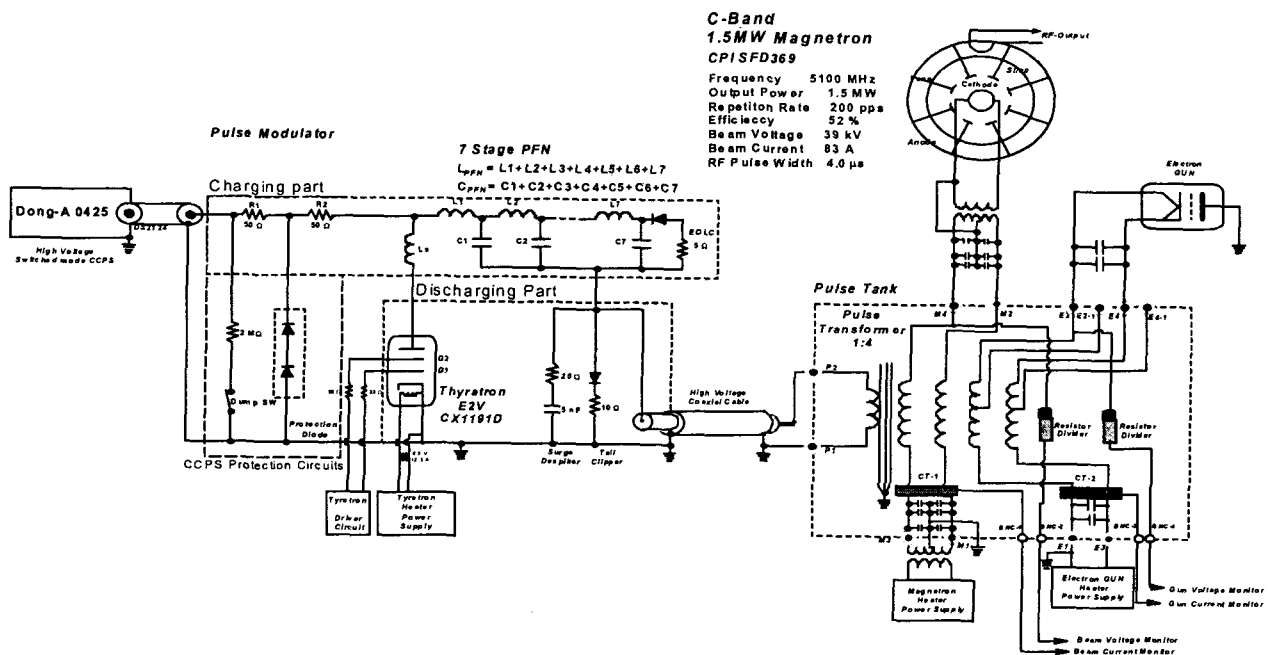


그림 1 펄스 모듈레이터 전기회로도
Fig. 1. Schematic diagram of a pulse modulator.

하다. 이를 위해 강제 공랭방식으로 개발된 인버터 전원 [3][4][5]은 최대 충전 용량은 5 kJ/sec이다. 전원장치는 19인치 표준 랙에 장착되는 콤팩트한 구조로 용량이 크며 고전압을 출력한다. PFN의 정전용량 합성용량은 70 nF이다. 시스템에서 필요한 충전시간을 계산해 보면 식 2와 같다.

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

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

마그네트론의 운전전압은 39 kV이다. 1차측으로 환산된 전압, 즉 인버터 출력전압은 20 kV로 된다. 계산에 의한 충전시간은 3.54 [ms]이고 실제 측정된 충전시간은 3.8 [ms]이다. 계산에 의한 충전시간과 측정된 충전시간과는 0.26 ms 시간의 차이가 생긴다. 시간차이가 생기는 원인으로서는 인버터 전원장치 내부의 손실로 추정되며 손실의 대부분은 인버터 IGBT 스위칭 손실과 고전압 고주파변압기 2차측 정류다이오드의 전압강하분이다. 이 전원장치는 작고 고효율의 에너지 밀도를 갖고 있으나 전원장치를 보호하는 보호회로의 설계가 필수적이다.

펄스 반복률은 200 pps로 콘덴서에 충전되는 전압이 동일한 기율기를 갖기 위해서는 전류가 일정하고 부하의 단락이나 개방되었을 때는 자기 자신을 보호 할 수 있는 전원장치가 되도록 하여야 한다. 콘덴서에 충전된 에너지는 싸이라트론 스위치에 의해 방전을 수행하므로 미처 부하로 전달되지 못한 에너지가 역으로 전원 측으로 귀환하게 되고 전원장치와 순방향이 되어 다시 에너지 저장용 콘덴서로 돌아온다. 초기에 전원을 충전할 때는 전원장치가 낼 수 있는 최대전류가 흐르지만 방전회로를 통해 흐르는 전류는 충전전류의 수배에서 수십 배의 전류가 흐른다. 역전류에 의해 전원장치의 말단인 정류다이오드가 소손될 수 있다. 이를 보호할 목적으로 저항과 다이오드를 조합한 T형의 보호회로를 그림 1에서와 같이 전원장치와 병렬로 연결한다. 이는 역기전력을 바이패스 시킬 목적으로 삽입하게 되는데 출력전압에 대해 내압을 견디어야 하고 역으로 귀환하는 방전 써지전류에 대해서 충분한 용량을 갖는 것으로 선정해야 한다. 방전회로인 싸이라트론 스위치 양단에 역전압은 보호회로인 저항 R1과 R2에서 열로 소비된다. 역전압이 발생되는 동안 유기된 써지전류는 다이오드가 정방향이 되어 환류하게 되고 보호회로의 다이오드는 써지전류를 견딜 수 있는 전류내량을 가져야 한다. 고전압 동축케이블의 경우에는 길이에 따른 정전용량(30 pF/ft)값을 가지고 있다. 충전회로인 PFN 콘덴서에 전원이 충전이 일어나고 고전압 동축케이블에도 충전이 이루어진다. 스위칭 시에 고전압 동축케이블에 충전된 전하도 방전이 일어나게 되는데 회로적으로는 케이블의 인덕턴스와 정전용량 값으로 직렬회로로 공진이 일어나게 된다. 임계전동을 유도하기 위해 직렬로 삽입되는 저항 R1은 충전 시에 흐르는 충전전류 값도 견디는 내량을 가져야 한다. 회로에서는 고전압 동축케이블의 특성임피던스와 같은 50 Ω을 선정하였고 바이패스 다이오드는 내전압

30 kV와 써지전류 내량 150 A(2.25 Aavg)인 제품으로 선정하였다. 설계에서 반영된 써지전류와 역전압이 존재하는 구간은 2 μs를 기준으로 하였다.

2.2.2 PFN 방전회로 설계

라인타입의 펄스 모듈레이터에서 펄스에너지를 저장하는 PFN은 부하 임피던스와 등가한 값을 갖도록 설계한다. 펄스회로에서 부하와 전원장치 사이의 절연을 위하여 펄스변압기를 사용하는 시스템에 있어서 승압 비에 따라서 PFN 임피던스^[6]를 결정하였다. 본 시스템에서 필요한 펄스폭으로부터 계산해 보면

$$t_w = 2\sqrt{L_N C_N} = 2C_N Z_N = \frac{2L_N}{Z_N} [\mu s] \quad (3)$$

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

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

t_w : 펄스 폭 [μs]
 C_N : 각각의 PFN 정전용량(C1 - CN)[nF]
 L_N : 각각의 PFN 인덕턴스(L1 - LN)[μH]
 Z_N : 각각의 PFN 임피던스 [Ω]

PFN을 설계하기 위해서는 우선 펄스폭을 결정하고 이로부터 인덕턴스 값과 콘덴서 값을 결정하게 된다. 결정된 값으로부터 부하와 PFN의 임피던스 정합을 위해서 펄스 변압기의 승압 비를 고려하여 정하게 된다. 그림 2는 인덕터와 콘덴서로 구성된 PFN 모듈을 보여주고 있다.

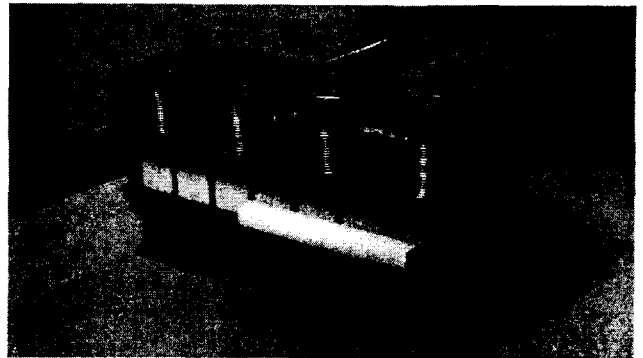


그림 2. LHCD 모듈레이터 PFN
 Fig. 2. PFN assembly for a LHCD modulator.

PFN모듈은 순서대로 인덕터와 콘덴서를 직렬로 연결하고 다음단의 콘덴서를 병렬로 연결하여 다단으로 구성된다. 펄스폭을 결정하는 인자가 되며 부하와 매칭 되는 내부 임피던스에 의해 결정된다. 인덕터는 펄스 평탄부의 평탄도를 결정하며, 이 값을 PFN콘덴서와 적절하게 조정하여 평탄부의 평탄도를 좋게 한다. 소형으로 제작하는 PFN의 경우는 인덕턴스를 고정으로 하는 것이 일반적이다.

본 시스템에서는 PFN의 인덕턴스 값을 가변 할 수 있는 구조로 하였고 운전 중에 펄스모양을 보면서 인덕턴스 값을 조정하여 평탄도를 조정할 수 있게 하였다. 그림 3은 PFN

과 스위치 부하를 등가적으로 나타낸 회로도이다.

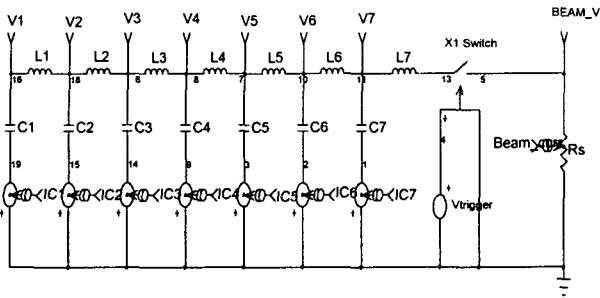


그림 3 7단 PFN 회로도
Fig. 3. Schematic diagram of a 7-stage PFN.

PFN 단 수를 변화시키면서 전산모사를 실시하였다. PFN 콘덴서에 충전되는 전압은 최대 25 kV이며 방전스위치인 싸이라트론 스위치에 의한 부하로 전달되는 전압은 콘덴서에 충전되는 전압의 1/2 전압인 12.5 kV가 부하로 전달되며, 펄스변압기 권수비만큼 전압이 승압되어 40 kV가 된다. 부하와 임피던스 매칭을 위한 회로시정수인 PFN 단의 콘덴서와 인덕턴스 값은 각각 10 nF 과 8.63 μH 의 값을 갖는다.

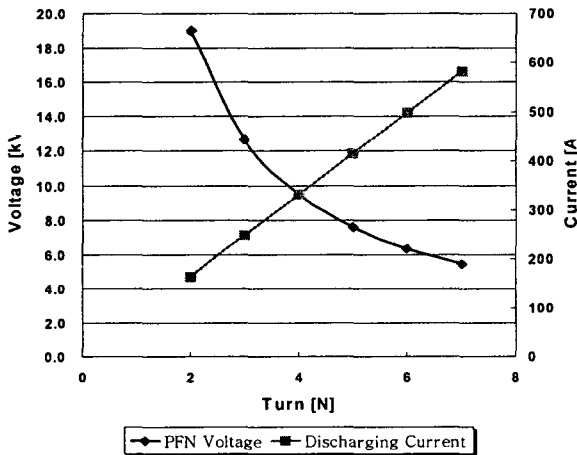
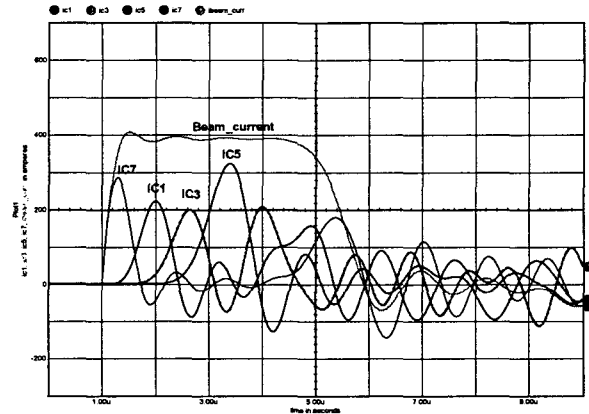


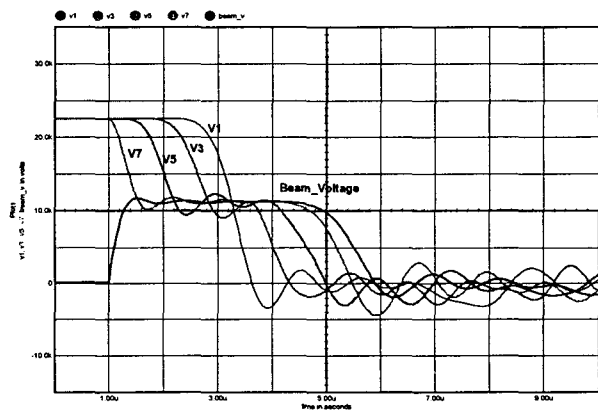
그림 4. 펄스변압기 권수비에 따른 전압전류
Fig. 4. Pulse transformer turn ratio vs. voltage and current.

그림 4는 시스템 설계에서 사용하는 방전스위치의 정격전류와 출력펄스의 평탄도를 결정하는 PFN의 단수를 결정하기 위해 입력전압을 고정하고 펄스변압기의 권수비만 변화시키면서 방전회로에 흐르는 전류의 크기를 비교한 그래프이다. 입력전압과 방전회로에 흐르는 전류의 크기는 서로 반비례하고 펄스변압기의 권수비가 적은 경우는 입력 측에 인가해야 하는 전압이 크고 전류의 크기는 작아진다. 이와 반대로 권수비를 크게 할 경우는 입력전압은 낮게 되고 그 때 회로에 흐르는 전류는 커지게 된다. 전류가 커지게 되면 부품의 정격전류가 커지게 되어 부피가 커져 전체적으로 시스템이 커지게 된다. 이와 반대로 권수비가 작은 쪽은 입력전압이 고압으로 되어 부품들이 절연이 견디는 구조의 고압부품으로 되는 단점이 있다. 전압과 전류의 적절한 기준이 되고

시스템 적용 시에 구하기 쉬운 부품으로 선정하게 되면 펄스변압기의 적절한 권수비가 정해지게 된다. 본 시스템에서는 1 : 4의 권수비를 얻었다. PFN의 단수를 작게 설계하면 펄스의 평탄도가 나빠진다. 그림 5는 전산모사를 실시한 후 얻은 결과로 방전 시에 각각의 PFN 콘덴서의 출력전압과 전류모양을 보여주고 있다.



(a) 출력전류파형 (ibeam_curr)과 PFN 콘덴서 전류파형
(a) Output current waveform (I(beam_curr)) and current in each capacitor of PFN.



(b) 출력전압파형 (beam_v)과 PFN 콘덴서 전압파형
(b) Output voltage waveform (beam_v) and voltage on each capacitor of PFN.

그림 5. 각각의 콘덴서 방전파형과 PFN 출력펄스파형
Fig. 5. Individual capacitor discharge waveforms and resulting PFN output pulse.

2.2.3 펄스변압기 설계

펄스변압기의 설계에 있어서 중요한 인자는 코어재료 중에 펄스에 대해 높은 투자율이다. 또한 펄스의 종단부분에서 전압강하가 적어야 한다. 펄스변압기는 방전회로에 의해 생성된 펄스를 부하에 전달하고 부하가 갖는 필요전압까지를 승압하는 역할을 담당하게 된다. 펄스변압기 코어는 충분한 에너지를 전달할 수 있고 철손과 동손을 수용할 수 있는 크기를 가져야 한다. 펄스변압기의 등가회로는 그림 6과 같이 나타낼 수 있다. 등가회로인 펄스변압기 1차는 펄스를

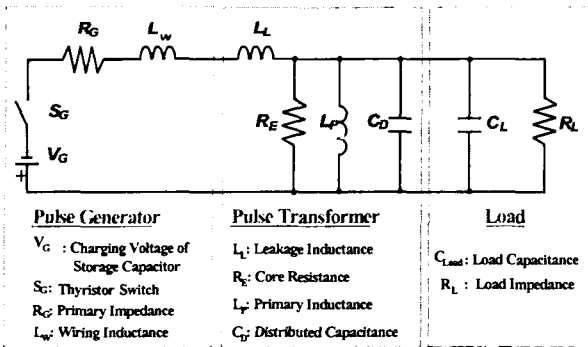


그림 6. 펄스변압기 등가회로도
Fig. 6. Equivalent circuit of a pulse transformer.

만드는 방전회로에 해당되고 2차는 부하에 해당된다. 본 시스템에 필요한 펄스변압기의 사양은 표 2와 같다. 펄스변압기의 펄스 종단 전압강하는 4 %/ μ s, 전압상승시간은 0.4

표 2. 펄스 변압기 사양
Table 2. Specifications of a pulse transformer

| Parameter | Value |
|---------------------------------|-------|
| Pulse droop [%/ μ s] | 4 |
| Rising time [μ s] | 0.4 |
| Step-up ratio | 4 |
| Primary voltage [kV] | 22.5 |
| Primary current [A] | 375 |
| Secondary voltage [kV] | 45 |
| Secondary current [A] | 96 |
| Load impedance [Ω] | 470 |
| Flat-top pulse width [μ s] | 4 |
| Pulse energy [J] | 17.3 |
| Repetition rate, max [Hz] | 200 |

μ s, 펄스 반복률은 200 Hz로 선정하였다. 설계에 의해 제작된 펄스변압기의 권선과 코어가 결합된 모양은 그림 7과 같다. 펄스변압기 2차권선은 병렬로 마그네트론 히터에 공급되는 저압의 교류가 인가되고 또한 1차권선에서 생성된 펄스전압이 마그네트론 캐소우드에 공급된다. 이와 같이 저전압의 교류와 펄스전압을 동시에 공급하는 방식을 bifilar winding이라한다. 표 3은 펄스변압기의 설계 파라메타와 제작 후에 측정된 데이터를 비교한 것이다. 설계파라메타 중 변압기 부유정전용량의 경우 설계값과 측정 후의 차이를 발견할 수 있다. 변압기 제작 후 펄스 탱크 내에 절연유를 넣어서 측정된 것으로 절연유의 비유전율 값에 의한 차이로 보인다. 다른 파라메타의 설계 값은 측정데이터 값이 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 펄스변압기 제작에 있어서 중요한 인자인 변압기 누설인덕턴스 값과 권선과 코어, 권선과 권선 사이에 존재하는 부유 정전용량 값은 펄스변압기의 실제 운전에서 펄스의 상승시간과 펄스종단의 전압강하에 영향을 미친다. 빠른 상승시간과 짧은 펄스폭을 요구하는 시스템에서는 이 값을 적게 하는 것이 필요하다.

2.3 회로 전산모사 및 실험

시스템에서 요구되는 펄스폭을 생성하기 위해 기본적인

회로구성을 검토하고 펄스전압을 승압하는 펄스변압기의 상승시간과 하강시간을 확인하기 위해 전기적인 등가회로를 그림 8과 같이 구성하여 컴퓨터 전산모사를 실시하였다.

표 3. 펄스변압기 파라메타
Table 3. Main parameters of a pulse transformer

| Parameter | Designed | Measured |
|------------------------------|--------------------|--------------|
| Turns ratio | 1:4 | 1:4 |
| Primary turns | 10 | 10 |
| Leakage inductance | 37 μ H | 42.2 μ H |
| Distributed capacitance | 12.8 pF | 38.8 pF |
| Primary inductance | 21.6 mH | 19.9 mH |
| Magnetic flux swing | 0.68 T | - |
| Effective permeability | 800 | - |
| Gap length | 24 μ m | 24 μ m |
| Effective core cross-section | 66 cm ² | - |
| Mean magnetic path length | 50.3 cm | - |
| Core weight | 47 kg | - |

이는 전반적으로 시스템의 설계된 부분을 전산모사를 통해서 검증하고 회로요소 중에 과전압이나 과전류로부터 중요부품을 보호하기 위한 일련의 과정이기도하다. 전산모사를 구현하기 위해 펄스폭 4 μ s로 하기 위한 PFN 콘덴서와 인덕터를 6단과 7단으로 가변하였고, 고전압의 펄스를 승압하기 위한 펄스변압기를 이상적인 변압기로 모델링하고 각각의 측정된 변수들을 넣어 펄스의 상승시간과 하강시간의 관계를 전산모사를 하였다. PFN 인덕터 값을 변화시켜 펄스의 평탄부 변화와 펄스상승시간을 전산모사에서 측정된

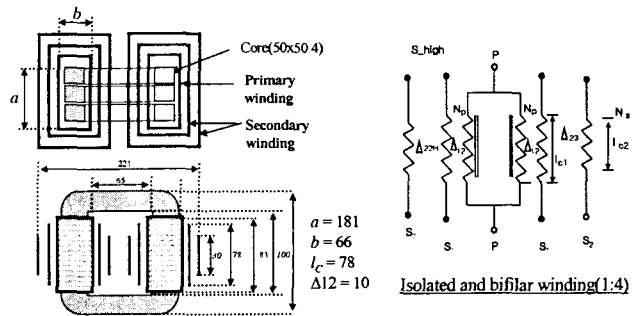


그림 7. 펄스 변압기의 코일 배치와 권선구조
Fig. 7. Coil geometry and winding configuration of a pulse transformer.

파형과 비교하였다. 그림 9는 전산모사 시에 출력된 전압, 전류파형과 실제 실험 시에 측정된 출력전압과 전류, RF 출력, 전자총에 인가되는 전압파형이다. 그림 10은 마그네트론 튜브에 전압을 단계적으로 인가하면서 측정된 전류와 그때 출력으로 인가된 RF출력과 부하의 효율을 나타낸 것이다.

3. 결 론

회로설계에서 제작 그리고 실험을 통하여 1.5 MW급의 펄스 모듈레이터 설계기술을 확보하였다. 펄스 모듈레이터 전원의 구성을 정전류원인 고전압 인버터 전원을 사용하여 지령충전에 의한 필요한 시점에서 전원을 충전하도록 하였으며, 콤팩트하면서 높은 펄스 반복율에 의한 신뢰도를 높였다. 또한 핵심부품 중의 하나인 펄스 변압기의 설계는 전산 모사로부터 예측한 펄스의 상승시간과 평탄부 전압강하율이 측정치와 잘 일치하는 것을 확인하였다. PFN의 가변인덕터는 운전 중이라도 펄스 평탄도 조절이 가능하도록 설계하였다. 고전압의 펄스전원을 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.

참 고 문 헌

- [1] G. S. Lee et al., "Design and construction of the KSTAR tokamak," Nuclear Fusion 41, 1515 (2001).
- [2] B. G. Hong, B. H. Oh, W. Namkung, Y. D. Bae, Y. S. Bae, D. H. Chang, M. H. Cho, C. K. Hwang, S. R. In, S. H. Jeong, J. G. Kwak, K. W. Lee, C. S. Seo, S. J. Wang, B. J. Yoon, J. S. Yoon, "Recent Advances in the Long Pulse Heating and Current Drive System for KSTAR," FT-P7-15, 20th IAEA Fusion Energy Conference, (November 1-6, 2004, Vilamoura, Portugal).
- [3] 손윤규 외, "50 kV, 10 kW 소형 고주파 전원장치 변압기 개발," 대한전기학회 하계학술대회 논문집 F, pp. 2027~2029, 1998.
- [4] 손윤규 외, "대출력 고전압 35 kW, 50 kV 인버터 전원장치 개발에 관한 연구," 대한전기학회 하계학술대회 논문집 B, pp.992~995, 2001.
- [5] 손윤규 외, "대출력 고전압 35 kW, 50 kV 인버터 전원장치 개발에 관한 연구," 대한전기학회 논문집 Vol.51B, No. 11, NOV. 2002, pp.628~634, 2002.
- [6] RALPH E. TARTER, "Solid-State Power Conversion Handbook," 1993

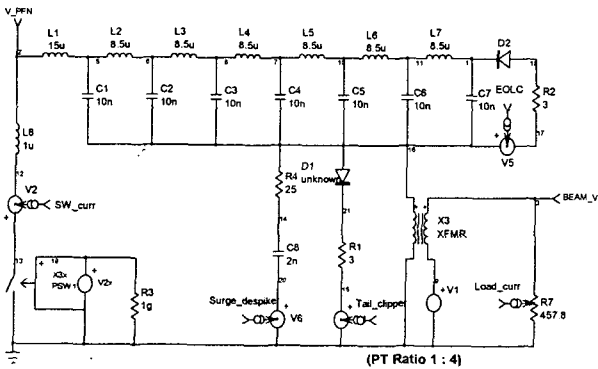


그림 8. 펄스 모듈레이터 등가회로
Fig. 8. Equivalent circuit of a pulse modulator.

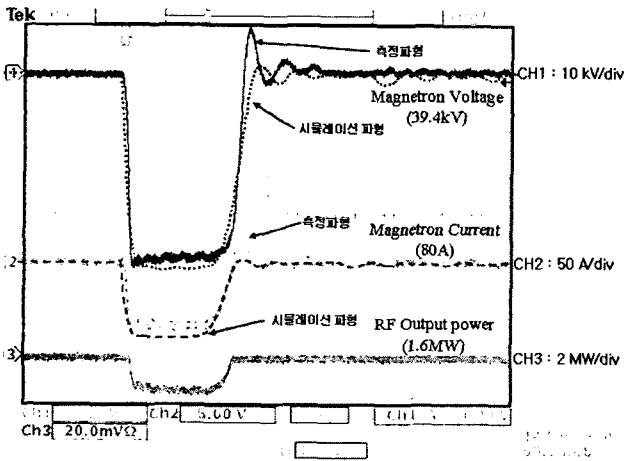


그림 9. 출력전압, 전류파형
Fig. 9. Output voltage and current waveforms.

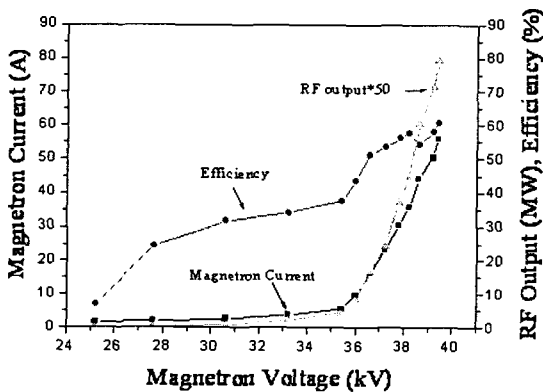


그림 10. 마그네트론 전압, 전류특성
Fig. 10. Characteristics of magnetron voltage and current.

감사의 글

본 연구는 한국기초과학지원 연구원 KSTAR프로젝트의 부분적인 연구지원을 받았습니다.

저 자 소 개



손 윤 규 (孫 鎭 奎)

1964년 4월 2일생. 1998년 경일대 전기 공학과 졸업. 1991년~현재 포항공과대학교 가속기연구소 선임기술원
Tel : 054) 279-1148
Fax : 054) 279-1199
E-mail : ygson@postech.ac.kr



오 종 석 (吳 宗 錫)

1965년 3월 23일생. 1999년 서울대 원자핵 공학과 졸업(박사) 1991년~현재 포항공과대학교 가속기연구소 책임연구원
Tel : 054) 279-1143
Fax : 054) 279-1199
E-mail : jsoh@postech.ac.kr



장 성 덕 (張 成 德)

1965년 4월 19일생. 1991년 동아대 전자 공학과 졸업. 1995년~현재 포항공과대학교 가속기연구소 선임연구원
Tel : 054) 279-1146
Fax : 054) 279-1199
E-mail : sdjang@postech.ac.kr



조 무 현 (趙 武 顯)

1954년 10월 1일생. 1979년 서울공대 원자 핵공학과 졸업(석사),1979~1982년 육군제3 사관학교 물리학 교관, 1988년 미국 UW-Madison 대 NEEP 졸업 (이학박사), 1989년 포항공대 물리학과 조교 수 부임, 1989~1994년 포항방사광 가속기 건설 참여, 현재 포항공대 물리학과 교수 및 환경 공학부 겸임교수.
Tel : 054) 279-2075
Fax : 054) 279-3099
E-mail : mhcho@postech.ac.kr



권 세 진 (權 世 鎭)

1964년 8월 5일생. 1992년 금오공과대 전자공학과 졸업(석사) 1995년~현재 포항공과대학교 가속기연구소 선임연구원
Tel : 054) 279-1204
Fax : 054) 279-1199
E-mail : sjkwon@postech.ac.kr



남 궁 원 (南 宮 垣)

1943년 10월 13일 생
1965년 서울대학교 물리학과 졸업 (이학사)
1965~1969년 공군장교 복무
1977년 Univ. of Tennessee, 물리학과 졸업 (이학박사), 1978-1984년, Univ. of Maryland, 연구원, 조교수, 1984~1988년, 미해군연구소 (NSWC) 연구원
1988년, 포항공대 물리학과 교수 부임, 포항방사광가속기건설 참여
1996-1998년, 포항가속기연구소 소장
2003-2005년, 포항공대 대학원 원장
Tel : 054) 279-2066
Fax : 054) 279-3099
E-mail : namkung@postech.ac.kr



배 영 순 (裴 英 淳)

1972년 4월 20일생
1998년 포항공과대학교 물리학과 졸업 (석사), 1998~1999년 포항가속기연구소 연구원 근무, 2004년 포항공과대학교 물리학과 졸업 (이학박사)
2004-현재 포항공과대학교 물리학과 Post-doc, 포항가속기연구소 위촉연구원
Tel : 054-279-1136
Fax : 054-279-1129
E-mail : ysbae7@postech.ac.kr