

의료용 선형가속기 응용분야를 위한 고전압 펄스 전원 모듈레이터

조현빈, 송승호, 이승희, 박수미, 장성록, 류홍제
 중앙대학교

High voltage Pulsed Power modulator for medical LINAC applications

Hyun-Bin Jo , Seung-Ho Song , Seung-Hee Lee , Su-Mi Park , Sung-Roc Jang, Hong-Je Ryoo
 Chung-Ang University

ABSTRACT

This paper describes -40kV high voltage solid state pulse power modulator (SSPPM) for driving a magnetron, which is used as a RF power source of LINAC for cancer treatment systems. In case of the medical LINAC, small size and light weight are required. The SSPPM is 92 liters in size and weighs 50 kg. In this paper, S-band 2.6 MW magnetron load experiment is conducted and impedance matching was applied to obtain a smooth output current. Finally, the experimental results is discussed and the reliability of SSPPM is verified.

1. 서 론

마그네트론은 고주파 RF파워 발생장치로써 출력 주파수와 파워에 따라 다양한 용도로 사용될 수 있으며, 대표적인 응용 분야는 전자레인지, 의료용 가속기 그리고 항공용 레이더 등이 있다.

근래에는 가속기의 소형화가 이루어지면서 암 치료를 위한 의료용 선형 가속기(LINAC)의 연구 또한 활발히 진행되고 있는데, 이 LINAC의 RF 파워 발생장치인 마그네트론을 구동하기 위해서는 두 가지 전원이 필요하다.

첫 번째는 마그네트론 히터용 전원이며 AC 또는 DC 전압 10~20V 정도가 요구된다. 두 번째는 수십 kV의 고전압 펄스전원 필요한데, 일반적으로 마그네트론 구동을 위한 고전압 펄스전원으로 사이라트론 스위치를 이용한 PFN 방식이 사용된다. 하지만 이 PFN 방식은 임피던스 정합이 어렵고 사이라트론 스위치는 값비싼 비용에도 불구하고 수명이 제한적이라는 단점이 존재한다.

이러한 단점을 보완하여 제어가 용이하고 수명 또한 긴 반도체 스위치 기반 고전압 펄스 전원장치 개발이 많은 곳에서 이루어지고 있지만 반도체 스위치 정격의 제한으로 인해 고전압 펄스 전원장치를 설계하는 것은 매우 높은 기술력이 요구된다. 그러나 본 논문에서 제안된 솔리드-스테이트 기반 펄스 파워 모듈레이터 (약어로는 SSPPM)는 MARX Generator기반으로 제작되어 -40kV, 150A 출력이 가능하다. 또한 92리터의 부피와 50kg의 가벼운 무게로 소형 경량화 된 장치이다.

암 치료를 위한 의료용 선형 가속기의 경우 펄스 전원장치의 소형 경량화는 매우 중요한 사항이라는 점을 고려하면,

해당 모듈레이터는 의료용 선형 가속기 적용에 적합하다고 볼 수 있다. 또한 SSPPM의 냉각 방식이 풍냉식을 통해서 이루어지는 것 역시 장점이다. 본문에서는 마그네트론 구동을 위해 필요한 전원 회로의 구조와 주요 특징에 대해 다루었으며, 실제 마그네트론 부하에 고전압 펄스를 인가하였을 때 나타나는 주요한 실험 결과를 기술한다.

표 1 SSPPM의 사양
 Table 1 Specifications of SSPPM

SSPPM	
개발품 사진	
최대 출력 펄스 전압	40 kV
최대 출력 펄스 전류	150 A
평균 최대 출력	15 kW
최대 출력	6 MW
최대 효율	90% 이상
펄스 폭	500 ns ~ 5us
최대 펄스 반복률	7kHz
펄스상승시간	100ns 이하
크기	430mm(W)*370mm(D)*580(H)
부피	92 liter
무게	50 kg
냉각방식	wind porced
보호 기능	Arc , Over-temperature

2. 본 론

2.1 실험 구조

마그네트론 부하실험에 사용된 장치는 마그네트론, SSPPM, 마그네트론 히터 전원용 슬라이닥스 그리고 고압 절연변압기가 있으며, 그림1에 실험 구조를 나타내었다.

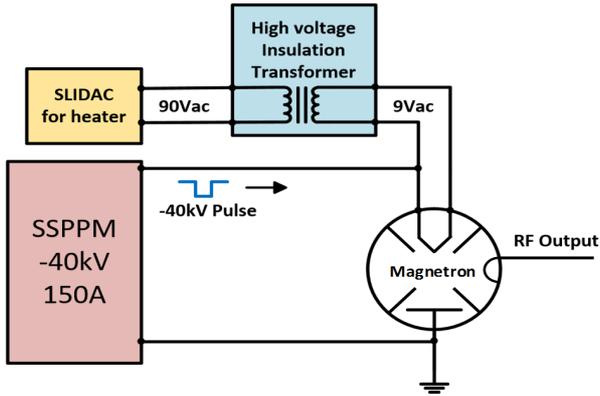


그림 1 마그네트론 부하 실험 구성도
Fig. 1 System configuration of Magnetron load test

2.1.1 마그네트론



표 1 마그네트론 사양
Table 1 Specifications of Magnetron

MG 5193 S-band Magnetron	
Peak output power	2.6 MW
Frequency range	2993 ~ 3002 MHz
Heater voltage	8.5 V
Heater current	9.0 A
Peak anode voltage	48 kV
Peak anode current	110 A
Pulse width	5.0 us

실험에 사용된 마그네트론은 S-band 2.6MW 마그네트론으로 상세 내용은 표1을 통해 나타낸다. 여기서 S-Band란 주파수 대역을 의미하며, 2~4 GHz 범위가 이에 해당한다. 마그네트론의 최대 출력 파워는 2.6MW이며 마그네트론 히터용 전압과 전류는 각각 8.5V, 9A 이다. 본 실험에서 히터 전압은 슬라이닥스와 절연 변압기를 통해 인가되었다.

최대 애노드 전압, 전류는 48kV, 110A 이다. 실험에서는 마그네트론 캐소드에 -40kV 4us펄스폭의 펄스전압이 SSPPM을 통해 인가되었다.

2.1.2 히터 전원용 슬라이닥스 및 고압 절연 변압기

마그네트론 구동을 위해 두 개의 전원이 요구된다. 첫 번째는 마그네트론 음극을 가열하여 전자방출을 활성화하기 위한 히터 전원이고 두 번째는 음극에 인가되는 수십kV의 고전압 전원이다. 고전압 전원은 펄스 전압으로 인가된다. 실험에 사용된 S-band 2.6MW 마그네트론의 경우 약 9V의 히터 전압이 요구된다. 슬라이닥스에서 약 90V 까지 전압을 올리면 10:1의 권선비를 갖는 고압 절연 변압기를 통해 히터에 9V의 AC 전압이 인가되는 방식이다. 전압을 급격히 올릴 경우 마그네트론

음극 필라멘트가 과열로 인해 끊어질 수 있으므로 천천히 전압을 올려야 한다. 고 전압 절연 변압기는 마그네트론 음극에 인가된 수십kV의 고전압으로부터 히터 전원용 슬라이닥스를 절연시키기 위해 사용된다.

2.1.3 SSPPM

SSPPM은 마그네트론 캐소드에 음의 고전압 펄스를 인가하기 위한 반도체 스위치 기반 펄스 출력 모듈레이터이다. 모듈레이터는 MARX Generator 기반으로 설계 되어 48개의 커패시터가 병렬로 충전되고, 직렬로 방전하는 구조이다. 직렬로 방전시 IGBT소자를 스위칭 하여 방전한다.

본 논문에서 사용된 SSPPM 은 마그네트론 캐소드에 음 극성 펄스 전압을 인가하기 위해, 기존 SSPPM의 양 극성 출력 방식에서 음 극성 펄스 전압 출력 방식으로 설계가 변경되었다. SSPPM의 주요 기능으로는 반복률 조절 및 펄스폭 조절기능과 아크보호 기능이 있다. 반복률은 최대 7kHz까지, 펄스폭은 500ns부터 5us 까지 조절 가능하다.

아크보호 기능은 두 가지의 이중 구조가 사용된다. 첫 번째는 게이트 드라이버 측 보호동작이며, 아크 전류가 발생하여 메인 IGBT의 컬렉터 전압이 빠르게 상승 할 때 밀러 커패시턴스를 통해 흐르는 전류를 이용해 IGBT 게이트 전압이 빠르게 방전하는 방식이다. 두 번째는 48개의 게이트 드라이버에 동기 신호를 인가하는 온-오프 펄스 컨트롤러 측 동작이며, 아크 전류를 검출할 경우 빠르게 오프 신호를 인가해 펄스 전압을 턴-오프 시키는 보호동작이다. 이 외 에도 온도 보호 등의 회로를 사용하여 고전압 모듈레이터의 신뢰성이 증대되었다. SSPPM의 동작원리나 구조에 대한 상세한 내용은 논문[1]에서 확인할 수 있으며, 본 논문에서는 마그네트론 부하 실험에서 얻은 내용을 기술한다.

2.2 마그네트론 부하 실험

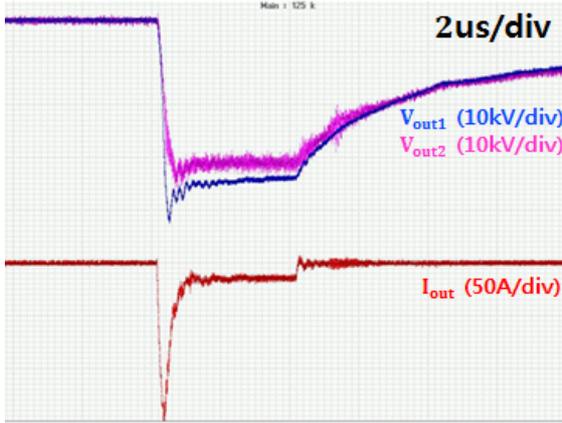
그림2는 2.6MW급 S-Band 마그네트론 부하 실험환경을 보여준다. 실험 구성은 -40kV 출력을 위한 SSPPM, 히터 전원용 슬라이닥스, 고 전압 절연 변압기, 2.6MW S-Band 마그네트론으로 구성되며 SSPPM의 출력 파형과 마그네트론의 최대 출력 파워 또한 나타나 있다. 사진에는 나타나 있지 않지만 고압 절연 변압기는 -40kV의 고 전압으로부터 슬라이닥스를 절연 보호하기 위해 사용된다.



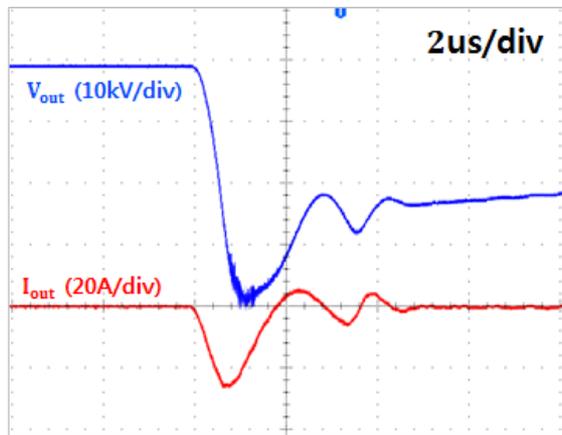
그림 2 마그네트론 부하실험 환경
Fig. 2 Magnetron load test environment

2.2.1 마그네트론 부하실험 파형

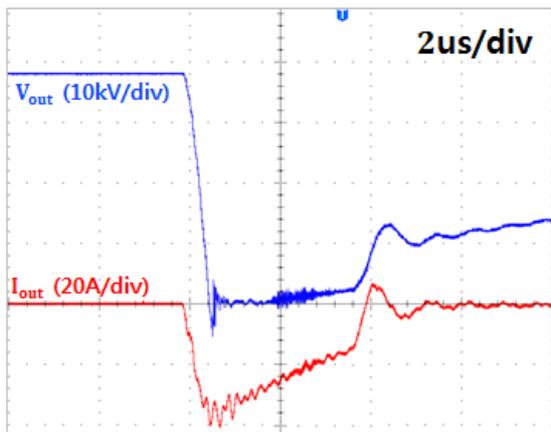
그림3은 마그네트론 부하에 인가된 SSPPM 출력 전압과 출력전류를 보여준다. 파형(a)에서 출력전압은 2개의 계측기를 사용하여 V_{out1} 과 V_{out2} 로 각각 나타나며 하단의 파형은 출력전류를 나타낸다. 파형(a)를 통해 마그네트론에 펄스 전압이 인가될 때 돌입 전류가 발생하는 것을 확인할 수 있다.



(a) 공심 인덕터가 연결되지 않은 마그네트론 부하 실험 파형



(b) 공심 인덕터가 연결된 마그네트론 부하 실험 파형 (SSPPM 인가 전압 30kV)



(c) 공심 인덕터가 연결된 마그네트론 부하 실험 파형 (SSPPM 인가 전압 40kV , 마그네트론 출력 : 830kW)

그림 3 마그네트론 부하 실험 파형
Fig. 3 Magnetron load test waveform

이러한 마그네트론의 커패시터 부하 특성을 고려하여, 공심 인덕터를 SSPPM 출력단과 마그네트론 입력단 사이에 직렬 연결시켜 돌입전류를 억제하였다. 공심 인덕터를 연결하여 돌입 전류가 억제된 것은 파형 (b)와 (c)를 통해 확인할 수 있다. 파형(a)는 파형(b), (c)와 다른 조건에서 실험되어 정확한 비교가 어려우며, 돌입전류가 억제된 특징만이 비교되었다.

마그네트론은 문턱전압을 넘기 전까지는 전류의 흐름이 적으며, 문턱전압 이상 전압이 인가될 경우 전류가 흐르기 시작하는 제너다이오드와 유사한 특성을 갖고 있다. 또한 인가된 전압 크기가 증가하여 문턱전압에 근접할수록 전압 파형은 피크 전압이 평활하게 유지되는 펄스 전압 형태로 나타난다. 이 특징은 파형(b)와 (c)를 통해 확인할 수 있다.

파형(b)는 마그네트론에 인가된 펄스전압이 30kV일 때의 파형이고, 파형(c)는 인가된 펄스전압이 40kV일 때 파형이다. 40kV 전압이 인가될 때 마그네트론 출력 파워는 830kW로 확인된다. 실험에 사용된 마그네트론의 정격전압까지 입력전압을 증가시킬 경우 오실로스코프를 통해 측정되는 출력 전압은 큰 변화 없이 일정하지만 출력 전류는 계속 증가하게 된다.

이에 따라 마그네트론 최대 출력 파워 역시 증가하게 된다. 현재 제작된 모듈레이터는 S-Band 이 외에도 1.7MW급 X-Band 마그네트론 구동 실험 또한 수행되었으며, 해당 실험에서도 안정적인 동작이 검증되었다.

3. 결론

본 논문에서는 의료용 LINAC의 RF파워 소스로 사용되는 마그네트론이 반도체 기반 펄스 전원 모듈레이터를 통해 구동되는 실험 내용에 대해 기술하였고, 안정적인 동작을 통해 적합성을 입증하였다. 또한 직렬 공심 인덕터를 연결하여 마그네트론 구동시 발생하는 돌입전류를 억제하였다.

향 후 에는 범용으로 설계된 SSPPM을 마그네트론 구동용으로 최적화된 설계를 통해 보다 높은 전력밀도와 효율, 그리고 안정적인 동작을 할 수 있도록 개발하는 것이 연구 진행 방향이다.

이 논문은 2017년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임.
(No. NRF-2017R1A2B3004855)

참고 문헌

[1] Seung-Bok, "Design of High Efficiency 40kV, 150A, 3kHz Solid-State Pulse Power Modulator", IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 40, No. 10, pp. 2569-2577, 2012, Oct.