

PLS-II 용 반도체 스위치 기반 키퍼 펄스 모듈레이터 설계 및 제작

안석호, 공형섭, 박용화, 이병준
포항가속기연구소

Design and Implementation of Solid-State Kicker Modulator for PLS-II

Suk-Ho An, Hyung-Sup Kong, Wung-Hoa Park, Byung-Joon Lee,
Pohang Accelerator Laboratory

ABSTRACT

The Pohang Light Source (PLS) - II is a 3 GeV third-generation synchrotron radiation facility. To inject electron beam from LINAC, a kicker modulator system and kicker magnets are installed in the PLS-II storage ring tunnel. The injected beam then falls into the storage ring beam dynamic aperture. This paper describes the design and implementation of the solid-state kicker modulator for PLS-II. The solid-state kicker modulator is consisted of high voltage solid state switch stacks. the technical considerations of the solid-state switch stacking for kicker modulator is discussed. The achieved capability of the solid-state kicker modulator demonstrates that is fulfills the design requirement of providing half-sine pulsed current of 10kA (peak), 6 μ s (Base-width), with jitter < 2ns (Standard deviation). simulation and experimental results are presented to demonstrate the performance of the solid-state kicker modulator.

1. 서 론

포항가속기연구소의 키퍼 모듈레이터 시스템은 선형가속기를 지나면서 3 GeV의 에너지를 갖도록 가속된 전자빔을 저장 링에 입사하기 위한 장치이다. 키퍼 모듈레이터는 키퍼 전자석에 펄스폭 6.0 μ s, 반복율 10 Hz, 하프-사인파 형태의 최대 첨두 10 kA 전류를 공급하여야 하는 사양을 가진다.

본 논문에서는 기존의 Thyatron으로 구성된 키퍼 모듈레이터 시스템을 대체하고자 하는 반도체 스위치 기반 키퍼 모듈레이터의 설계 및 제작에 관하여 논한다.

Thyatron의 평균수명은 제작사 및 모델에 따라 다르지만 일반적으로 Thyatron의 히터가동시점으로부터, 3-5만 시간으로 수명이 제약적인 단점을 가진다. 이에 반해, 반도체 스위치의 수명은 동작 환경/온도, 사용시간에 영향을 받지만 일반적으로 반영구적(30년 이상)으로 본다. 이런 반도체 스위치에 비해 수명이 제약적인 단점과 더불어, Thyatron은 "Unpredictable life span"을 가진다. 스위치의 수명시간을 예측하기 어려워 예방정비가 불가능하다. 이는 고 신뢰성을 요구하는 시스템에 적용 시에 신뢰도에 큰 영향을 주는 단점을 가진다.

Thyatron의 구동을 위해서는 반도체 스위치와 같이 구동을 위한 Trigger System 외에 반도체 스위치와 다르게 cathode heater와 reservoir heater에 별도의 독립된 전원장치로부터의 전원을 공급받아야 한다. 또한 Thyatron은 cathode heater와 reservoir heater가 원하는 온도까지 상승되어야 하는 최소 10분 이상의 heating time을 필요로 함에 반해, 반도체 스위치의 경우 동작 전 heating time을 필요로 하지 않고 즉각적으로 사용 가능하다. 과거 반도체 스위치 모듈의 가격으로 인하여 초기 설치비용이 Thyatron에 비하여 높은 수준 이었으나, 유지보수 비용 측면에서는 반영구적이고 별도의 전원장치가 불필요한 점에 의해 운영기간이 길어질수록 설치 및 유지보수 비용을 모두 포함한 총액 기준으로 반도체 스위치가 유리한 장점을 가졌다. 그러나 최근 반도체 스위치 제작 기술의 향상으로 인하여 초기 설치비용 또한 반도체 스위치가 유리하게 되어 비용적 측면에서 반도체 기반 스위치가 우수하다.

또한, Thyatron의 경우 스위치 고유 특성 (Jitter, Rise Time, On-State Resistance)을 전체 Thyatron의 수명시간동안 유지하기가 힘든 단점을 가진다.

이러한 Thyatron 대비 반도체 기반 스위치의 장점을 활용하고자 대형연구시설을 중심으로 반도체 기반 스위치를 적용하고자 하는 연구가 증대되고 있다.

2. 본 론

2.1 키퍼 모듈레이터용 반도체 스위치

표 1은 포항가속기연구소의 키퍼 모듈레이터에 적용하고자 제작한 반도체 기반 고전압, 대전류 스위치의 사양을 나타낸다. 제작된 반도체 기반 스위치는 최대 운용전압 16kV, 최대 운용전류 14kA 그리고 최대반복율 60Hz를 가지며, Applied Pulsed Power사의 S38 모듈의 4직렬, 2병렬로 구성되었다.

표 1 키퍼 모듈레이터용 반도체 기반 고전압 스위치 사양
Table 1 Specification of Solid-State Switch for Kicker Modulator

Peak Operating Voltage	16 kV
Peak Repetitive Forward Current	14 kA
Maximum RMS On-State Current	200 Amps
Peak di/dt	40 kA/ μ sec
Peak Pulsed Repetition Rate	60 Hz
Turn-On Delay	< 200 nsec
Turn-On Jitter	< 2 nsec
Turn-Off Time	< 5 msec

2.2 반도체 스위치 기반 키커 모듈레이터

제작된 반도체 기반 고전압 대전류 스위치를 적용한 PLS-II 용 키커 모듈레이터가 설계 및 제작되었으며, 그림 1은 반도체 스위치 기반 키커 모듈레이터의 다이어그램을 나타낸다. Thyatron 적용시 Thyatron의 수명 증대를 위해 반드시 Thyatron의 역전압을 빠르게 방전시켜 주기위한 추가 회로가 필요하나, 반도체 스위치의 경우 역전압이 수명에 영향을 주지 않기 때문에 그림 1과 같이 부가적인 회로를 필요로 하지 않는 형태로 설계되었다. 이를 통해 그림 2와 같은 반도체 스위치 기반 키커 모듈레이터의 프로토타입이 제작되었으며, 표 2는 제작된 반도체 스위치 기반 키커 모듈레이터의 사양을 나타낸다.

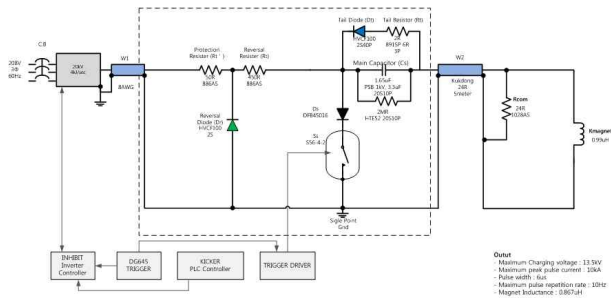


그림 1 반도체 스위치 기반 키커 모듈레이터
Fig. 1 Solid-State Kicker Modulator



그림 2 프로토타입 반도체 스위치 기반 키커 모듈레이터
Fig. 2 Prototype Kicker Modulator Based on Solid-State Switch

표 2 반도체 스위치 기반 키커 모듈레이터 사양
Table 2 Specification of Solid-state Kicker Modulator

최대 침투 전류	10 kA
펄스폭(base-width)	6 µs
최대 반복율	10 Hz
최대 충전 전압	13 kV
키커 전자석 인덕턴스	0.867 µH

2.2 실험 결과

설계 및 제작된 반도체 기반 키커 모듈레이터의 성능 측정 및 검증을 위해 다양한 실험이 진행되었으며, 그림 3과 그림 4는 각각 정격운전 파형 및 지터 측정 파형을 나타낸다. 측정된 지터는 피크-피크 기준 2.3 ns로 같은 사양의 Thyatron 대비 우수함을 확인했다.

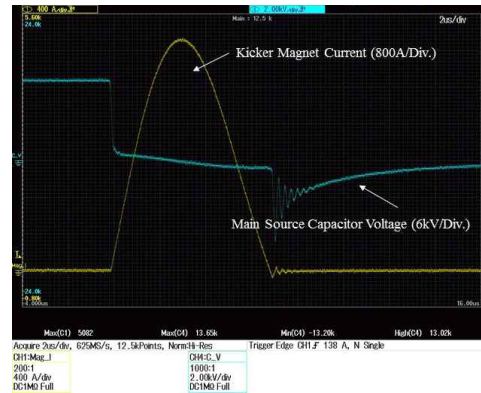


그림 3 키커 모듈레이터 정격 운전 파형
Fig. 3 Experimental Waveform of kicker Modulator

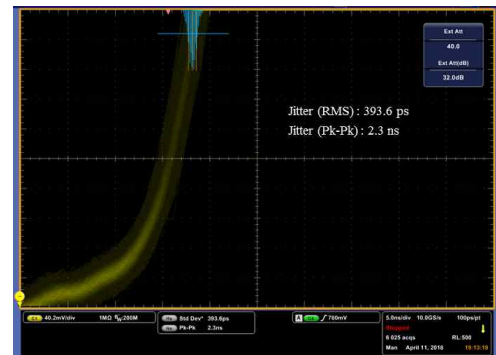


그림 4 지터 측정 파형
Fig. 4 Jitter Test Result

3, 결론

본 논문에서는 반도체 스위치 기반의 키커 모듈레이터의 설계 및 제작에 관하여 논하였으며, Thyatron 대비 반도체 스위치가 가지는 장점을 소개하였다. 피크 기준 16 kV, 14 kA의 사양을 가지는 반도체 스위치가 설계 되었으며, 이를 적용한 반도체 스위치 기반 키커 모듈레이터가 제작되었다.

제작된 반도체 스위치 기반 키커 모듈레이터의 실험결과를 통해 성능 및 적용 가능성을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] Ficklin, D. B. "An updated history of the thyatron lifetimes at the Stanford Linear Accelerator Center." Power Modulator Symposium, 1998. Conference Record of the 1998 Twenty-Third International. IEEE, 1998.
- [2] R. Saethre, B. Morris and H. Sanders, "Thyatron replacement for the spallation neutron source linac extraction kicker PFN system," 2015 IEEE Pulsed Power Conference (PPC), Austin, TX, 2015, pp. 1-6
- [3] A. Welleman, W. Fleischmann. "Solid State Switches are Successfully Replacing Thyatrons in Demanding Applications" ABB Technical Report, 2007