

120kV/70A MOSFETs Switch의 구동회로 개발

송인호, 신현석, 최창호
포스콘 기술연구소

Development of the 120kV/70A High Voltage Switching Circuit with MOSFETs Operated by Simple Gate Drive Unit

In Ho Song, H. S. Shin, C. H. Choi
POSCON R&D Center

ABSTRACT

A 120kV/70A high voltage switch has been installed at Korea Atomic Energy Research Institute in Taejon to supply power with Korea Superconducting Tokamak Advanced Research (KSTAR) Neutral Beam Injection (NBI) system. NBI system requires fast cutoff of the power supply voltage for protection of the grid when arc detected and fast turn-on the voltage for sustaining the beam current. Therefore the high voltage switch and arc current detection circuit are important part of the NBI power supply and there are much need for high voltage solid state switches in NBI system and a broad area of applications. This switch consisted of 100 series connected MOSFETs and adopted the proposed simple and reliable gate drive circuit without bias supply. Various results taken during the commissioning phase with a 100kW resistive load and NBI source are shown. This paper presents the detailed design of 120kV/70A high voltage MOSFETs switch and simple gate drive circuit. Problems with the high voltage switch and gate driver and solutions are also presented.

1. 서 론

중성빔 입사가속장치, 레이저, 직류 고압시스템 등과 같은 펄스파워 시스템에서 싸이라트론과 이그니트론, 스파크 갭, vacuum triggered switch 등은 가스방전을 이용한 기계적 스위치들로써 폭 넓게 사용되어져 왔다. 그러나 이러한 스위치들은 원리적으로 제한된 사용수명, 제한된 펄스 반복률(repetition rate)과 복잡한 구동회로를 갖는다. 이에 반하여 반도체 스위치는 가스방전을 이용하지 않으며, 오랜 수명, 간단한 구동회로, 높은 주파

수의 동작과 빠른 스위칭 과도 특성을 갖는 장점이 있다. 이러한 이유로 고압, 대전류의 반도체 스위치를 개발하여 펄스파워 시스템에 적용하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 현재, 사용되고 있는 반도체 스위치로 IGBT, GTO, MOSFET와 싸이리스터 등이 있다. 싸이리스터의 경우 자기 소호 능력이 없기 때문에 사용 범위가 제한적이다. IGBT, GTO, MOSFET의 경우 자기소호 능력을 가지고 있으며, 빠른 스위칭 특성을 갖는다. IGBT의 경우 현재 3300V 전압정격을 갖는 소자가 생산되고 있으며, GTO의 경우 6600V, MOSFET의 경우 1700V의 소자가 산업현장에서 사용되고 있다. 그러나 이러한 전압정격의 반도체 스위치들은 펄스파워 시스템의 요구를 만족시킬 수 없어 수 킬로볼트에서 수십 킬로볼트의 전압정격을 갖는 직렬 연결된 IGBT, GTO 스위치들이 개발되어 사용되고 있다. 이러한 직렬 연결된 고압 반도체 스위치의 목적은 펄스파워 시스템에 적용하여 가격 및 크기를 줄이며 우수한 유지보수와 오랜 수명을 갖게 하는 것이다. 그 결과 직렬 연결된 반도체 스위치들이 고압 펄스파워 시스템에 폭 넓게 적용되고 있다. 반도체 스위치 소자를 직렬 연결하는데 있어 가장 중요한 문제는 직렬 연결된 소자간 스위칭 정상상태와 과도 상태에서의 전압균형 문제와 구동회로의 지연문제 이다. 직렬 연결 스위치의 전압 불균형 문제는 여러 연구가 진행되어져 왔다. [1], [2]와 [3]의 논문은 게이트 구동회로를 이용한 능동적인 전압균등제어에 관한 것이며, [4]에서는 IGBT의 직렬, 병렬연결 기술이 소개되었다. [5]에서는 능동 스너버회로를 이용한 직렬연결 기술이 소개되어져 있다. 그러나 이러한 방법들은 모두 스위칭의 과도상태 특성과 스위칭 시간 및 스위칭 손실간의 trade-off를 가지고 있다. 특히 수백 개의 반도체 소자를 위에서 제시된 방법으로 직렬 연결하는 경우 어떠한 스위칭 특성을 나타낼지 예측할 수 없으며, 스위칭 시간, 비용, 크기 면에서 단점을 가질 것이다^[1]. 수백 킬로볼트의 전압정격을 갖는 즉 수백 개의 반도체 소자를 직렬 연결하는 경우 다음과 같은 사항을 설계 시 반드시 반영하여야 한다.

▶ 짧은 스위칭 지연시간을 갖는 반도체 스위칭 소자의 선정

▶ 게이트 구동회로의 응답 지연 시간을 가능한 줄임

▶ 수백 킬로볼트의 절연내압을 갖는 구동회로

120kV/70A의 반도체 스위치를 개발하기 위하여 반도체 스위칭 소자로써 BIMOSFET IXBH42N170 소자를 사용하였다. IXYS에서 새롭게 개발된 bipolar MOS transistor로써 같은 용량의 IGBT 소자보다 낮은 도통손실과 높은 전류정격, 작은 턴온/턴오프 시간을 갖는다. 본 논문에서는 백개의 MOSFET을 직렬 연결하는 데에 사용된 간단한 구동회로를 제시하였다. 이 구동회로는 소자 각각의 게이팅 신호 지연을 제거하였으며, 바이어스 전원을 위한 추가적인 회로를 없애면서도 +/-의 게이팅 전압을 가질 수 있다. 120kV/70A의 고압 스위치의 설계 및 제작에 관하여 설명하고, 모의 부하에서의 실험결과를 제시하였다. 표 1에 중성빔 입사 가속전원장치에서 요구되는 스위치의 사양을 나타내었다.

표 1 중성빔 입사 가속전원장치의 스위치 사양
Table 1 High voltage switch specification

Items	Spec.
Switching voltage/current	120kV/70A
Switching time	< 25us
Repetition rate	100Hz

2. Design

2.1 High voltage switching system

새롭게 제안된 고압 스위칭 시스템은 게이트 제어 부분, MOSFET을 이용한 고주파 스위칭 회로, 150kV 절연 고주파 변압기, 낮은 가격의 다이오드와 콘덴서, P-채널 MOSFET으로 이루어진 이중모드 게이트 구동회로, MOSFET과 스너버회로로 구성되어 있다. 그림 1은 간단한 게이트 구동 시스템을 갖는 100개의 직렬 연결된 MOSFET으로 이루어진 스위칭 시스템의 회로도이다. 본 스위칭 시스템의 전압정격은 120kV, 전류 정격은 70A, DC 출력 및 1kHz의 펄스 출력이 가능해야 한다. 일반적인 턴오프 RCD 스너버를 사용하였으며, $D_1 \sim D_{100}$ 은 MOSFETs에 내재된 다이오드이다. Pearson 전류센서와 Hall 전류센서는 스위치의 전류를 모니터링하며 동시에 아크전류를 감지하기 위하여 사용되었다. 게이트 제어부는 이 신호를 사용하여 부하 또는 NBI grid, 스위칭 시스템을 보호한다. 100개

의 직렬 연결된 MOSFETs는 간단한 게이트 구동 시스템에 의해서 턴온/턴오프 되며, 간단한 게이트 구동 시스템은 턴온/턴오프 명령을 내리는 게이트 제어부, 고주파 스위칭 회로, 120kV 절연 고주파 변압기 및 이중모드 게이트 구동회로로 이루어져 있다. 단순한 게이트 구동 시스템에서 게이트 제어부에서 고주파 스위칭 회로까지가 저압 부분들이며 그 외의 부분들은 고압이며 낮은 라인 임피던스를 갖는다.

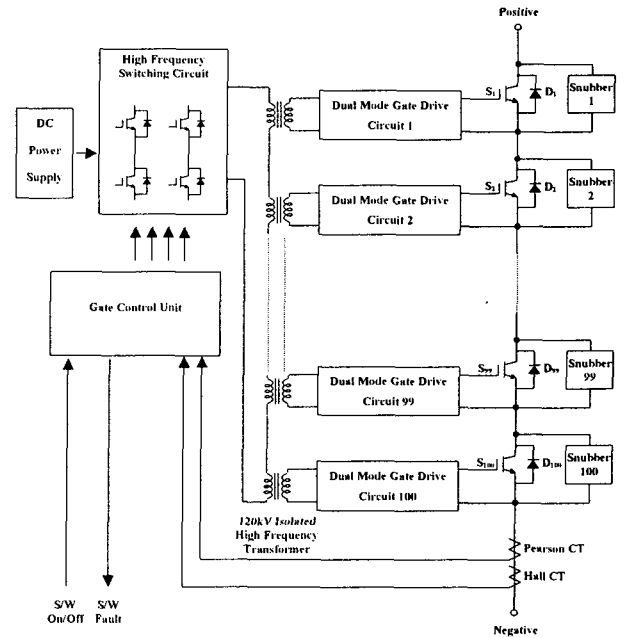


그림 1 고압 스위칭 시스템 회로도
Fig. 1 Schematic of the high voltage switching system

또한 본 시스템은 기존의 광 절연부와 많은 절연된 바이어스 전원들을 필요로 하는 게이트 구동 시스템과 다르게 거의 적은 수의 저 전압 전원만을 필요로 한다. 제어신호 및 바이어스 전원이 120kV 절연 고주파 변압기로부터 공급되기 때문에 바이어스를 위한 어떠한 추가적인 전원도 필요하지 않는다. 이 고압 스위칭 회로는 절연 오일이 가득 찬 접지된 탱크 안에 놓여진다. 게이트 제어부와 120kV 절연 고주파 변압기는 절연과 소형화를 위하여 탱크 밖에 놓여진다. 시스템의 크기를 작게 함으로써 스너버회로 및 소자간에 존재하는 누설 인덕턴스의 값을 최소화하였다. 수 백개의 직렬 연결된 MOSFETs 스위칭 시스템에 있어서 가장 주의할 부분은 개별 소자들의 턴온/턴오프 시간차와 그 것을 줄이는 것이며, 위와 같은 시간차가 발생하는 이유는 게이트 구동회로 및 전송에의 응답 지연 때문이다. 본 논문에서 제시된 간단한 게이트 구동 시스템은 전송부와 백개의 이중모드 게이트 구동회로의 응답시간 차이를 제거하기 위하여 하나

의 게이트 구동 회로와 하나의 고주파 스위칭 회로, 1-turn의 입력과 각각의 출력을 갖는 백개의 120kV 절연 고주파 변압기로 구성되어 있다.

2.2 Simple gate drive system

게이트 구동부는 광으로 절연된 턴온/턴오프 신호를 제어부로부터 받으며 1MHz의 이중모드 게이트 신호를 만든다. 고주파 스위칭 회로는 두 종류의 구형파 신호를 만들며 스위칭 탱크의 상부에 놓여져 있다. 고주파 스위칭 회로는 풀브리지 인버터와 같은 구조를 가지며 0V에서 (+)400V, 0V에서 (-)200V 1MHz의 구형파를 120kV 절연 고주파 변압기의 일차 측에 공급한다. (-)에서 다른 전압을 공급하기 위하여 풀브리지의 한 암에는 다른 DC-link 전압을 인가한다. 그림 2에 제시된 120kV 절연 고주파 변압기는 전류형으로써 한 turn의 단일 입력과 여러 turns의 개별적인 출력을 갖는다. 변압기의 코어는 우수한 고주파 성능을 가지며 높은 자속밀도를 갖는 amorphous 합금을 사용하였다. 누설 인덕턴스를 최소화하기 위하여 최소의 turns를 갖도록 디자인하였다.

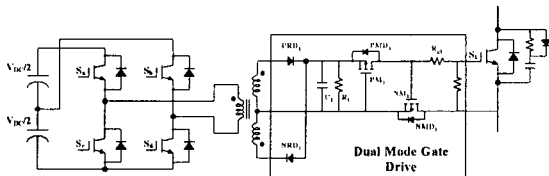


그림 2 간단한 게이트 구동시스템의 회로도
Fig. 2 Schematic of simple gate drive system

2.3 Dual mode gate drive circuit

그림 2에 간단한 게이트 구동 시스템의 이중모드 게이트 구동회로를 제시하였다. 그림 2에서 2개의 p-채널 MOSFETs PM₁, PM₂는 파워스위치 S₁의 게이트와 소스 사이에 positive와 negative 바이어스 전압을 인가한다. Positive 모드에서 턴온 신호가 게이트 제어부에서 발생되면 고주파 스위칭 회로의 MOSFET S_a와 S_b가 1MHz의 주파수로 온/오프되며 PRD₁이 도통 된다. PM₁의 threshold 전압 이상으로 C₁이 충전되면 PM₁이 온 되고 파워 스위치 S₁의 게이트와 소스 사이에 positive의 바이어스 전압이 인가되어 스위치가 턴온 된다. Negative 모드에서는 턴오프 신호가 발생시 S_b, S_c가 온/오프하며 0V에서 (-)V_{DC}/2의 1MHz 구형파를 발생한다. NRD₁이 도통하며 C₁이 (-)전압으로 충전된다. NM₁이 온 되고 negative의 바이어스 전압이 S₁에 인가되어 스위치가 턴오프 된다. 그림 3에 이중모드 게이트 구동회로의 시뮬레이션 회로를 제시하였으며, 그림 4에 그 결과를 제시하였다.

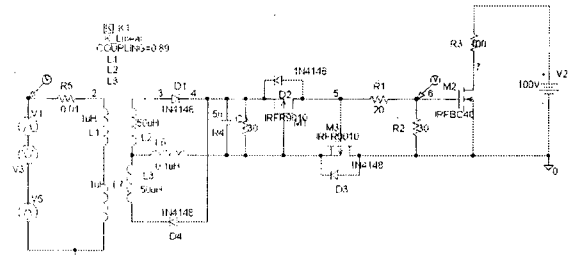


그림 3 이중모드 게이트 구동회로의 시뮬레이션 회로도
Fig. 3 Schematic of dual mode gate drive simulation

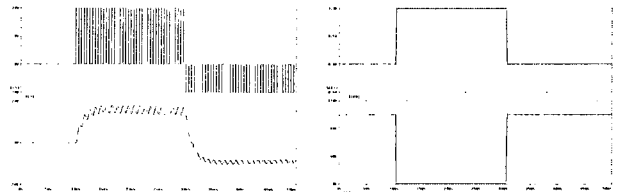


그림 4 이중모드 게이트 구동회로의 시뮬레이션 결과
Fig. 4 Simulation results of gate drive

2.4 Fabrication and installation

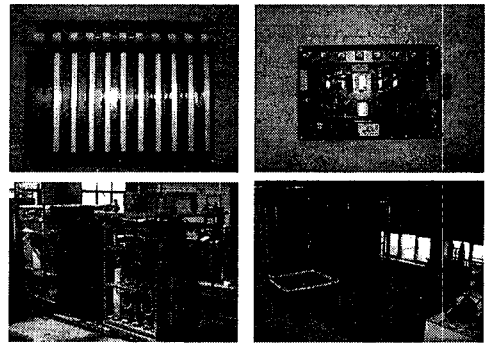


그림 5 게이트 구동회로 및 실험실 전경

Fig. 5 View of the gate driver and NBI test site

그림 5에 이중모드 게이트 구동회로 및 고주파 스위칭 회로의 그림을 제시하였다. 본 시스템은 왼쪽의 이중모드 게이트 구동회로가 10set가 사용되었으며 오른쪽의 고주파 스위칭 회로는 고압 스위칭 시스템 탱크의 상부에 놓인다. 그림 5의 아래 왼쪽 사진은 오일 탱크에 담그기 전의 고압 스위칭 시스템의 사진이며, 아래 오른쪽 사진은 중성빔 입사 실험실에 설치된 상태를 보여주고 있다. 120kV/70A의 고압 스위칭 시스템은 원자력 연구소에 2001년 3월 설치가 시작되었으며 현재까지 시험 중에 있다. 지금은 120kV, 70A 전 정격으로 저항 부하에서 실험을 진행하고 있다. 실험이 완료된 후에는 중성빔 입사 장치의 extraction grid(G1)에 연결하여 빔 인출 실험을 진행할 계획이다. 중성빔 입사 장치 실험의 최종 목표는 120kV의 grid 전압과 50A의 빔 전류를 얻는 것이다.

3. 실험결과

3.1 Factory acceptance test

그림 6은 제작 공장에서의 실험 결과를 나타내고 있다. 실험실에서의 수전 전원이 실제 용량의 10분의 1 수준이기 때문에 출력 펄스의 폭을 줄여 실험을 수행하였다. 100kV 출력의 전원장치를 사용하여 스위치를 시험하였다. 그림 6의 왼쪽 그림은 펄스 반복률을 8.3Hz로 하여 시험한 결과이다. 오른쪽 실험 파형은 부하가 단락 되는 아크 발생시 스위칭 시스템의 전류 차단을 시험한 결과이다. Pearson CT와 Hall CT의 출력 값을 더하여 게이트 제어부에 보내 아크 상황에 대한 동작을 하게 하였다. 초기 아크 발생 및 일정 전류를 흘리고 있는 정상 상태에서의 갑작스러운 아크 모드를 검출하기 위하여 위와 같은 방식의 전류 검출회로를 채택하였다.

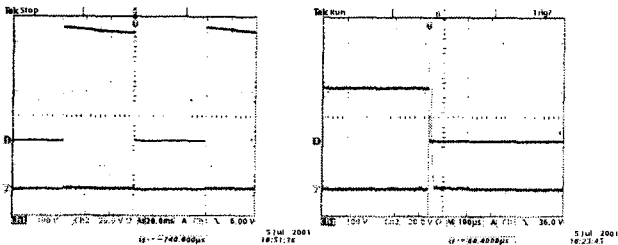


그림 6 모의 부하에 의한 실험결과
Fig. 6 Test results of dummy load

3.2 Site acceptance test

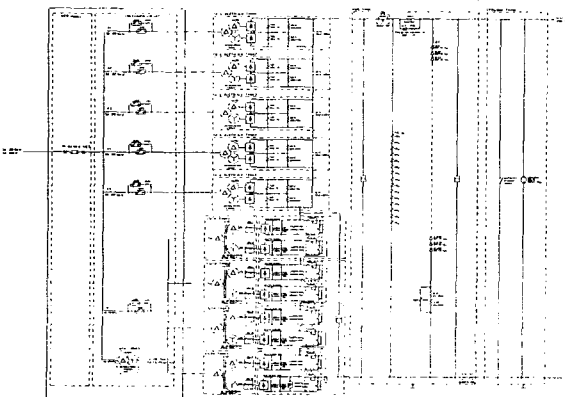


그림 7 중성빔 가속전원 시스템 회로도
Fig. 7 Schematic of NBI power system

그림 7는 현재 원자력 연구소에 설치된 중성빔 입사 가속 전원장치의 회로도이다. 고압 스위칭 시스템에 120kV, 70A의 파워를 공급하며 여러 가지 기능을 수행한다. 스위치의 경우 현장에서의 실험을 통하여 각부의 파라메타 수정 등 여러 가지 재설계 및 튜닝이 이루어졌다. 부하는 저항부하로서

1.7k를 사용하였다. 그림 8은 100kV에서 고압 스위칭 시스템의 출력전압파형과 전류파형이다. 25us 이내에 턴온/턴오프 함을 알 수 있다.

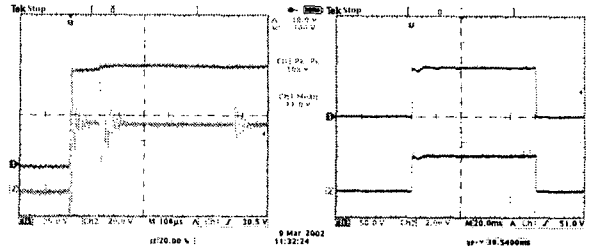


그림 8 중성빔 가속전원 실험결과
Fig. 8 Test result of NBI power system

4. 결 론

간단한 게이트 구동 시스템에 의해서 턴온/턴오프 되는 100개의 직렬 연결된 MOSFETs를 갖는 고압 스위칭 시스템을 개발하였다. 운전방식, 특징 및 설계 시 주의할 점등을 제시하였으며, 시뮬레이션과 실험 결과를 통하여 제시하였다. 고압, 대용량 스위칭 시스템에서 스위치의 높은 신뢰도를 저가의 간단한 게이트 구동 시스템을 통하여 이루었으며, 지금까지 시험을 진행하고 있다. 본 시스템에서 가장 중요한 부분은 이중모드 게이트 제어회로와 120kV 절연 고주파 변압기이다. 새롭게 개발된 고압 스위칭 시스템은 고압 펄스파워 시스템에 폭 넓게 적용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] Patrick R. "The Series Connection of IGBT's with Active Voltage Sharing," *IEEE Trans. Power Electronics*, vol. 12, No. 4, pp. 637-644, 1997.
- [2] A. Consoli, "Active Voltage Balancement of Series Connected IGBTs," in *Proc. IEEE Ind. App. Soc. Meet., Orlando, Fl, Oct. 1995*, pp. 2752-2758.
- [3] A. Galluzzo, "Snubberless Balancement of Series Connected Insulated Gate Devices by a Novel Gate Control Startegy," in *Proc. of Thirty-Second IAS Annual Meeting, Vol. 2*, pp. 968-974, 1997.
- [4] Jiann-Fuh Chen, "The Techniques of the Serial and Paralleled IGBTs," in *Proc. of the 1996 IEEE IECON 22nd, Vol. 2*, pp. 999-10004, 1996.
- [5] G. Busatto, "Series Connection of IGBTs in Hard-Switching Applications," in *Proc. of Thirty-Third IAS Annual Meeting, Vol. 2*, pp. 825-830, 1998.