

# 고압 직류송전망을 위한 모듈형 멀티레벨 컨버터의 서브모듈 특성시험

서동우\*, 정종규\*, 정홍주\*  
(주)효성\*

## Characterization Test of Sub-Modules for High Voltage DC Transmission System-Based Modular Multi-Level Converter

Dong-Woo Seo\*, Jong-Kyou Jeong\*, Hong-Ju Jung\*  
Hyosung Corporation, South Korea\*

### ABSTRACT

High Voltage Direct Current (HVDC) 시스템은 고압 직류 송전을 위한 시스템으로서 단위 유닛인 서브모듈로 구성된 모듈형 멀티레벨 컨버터 구조를 갖는다. 서브모듈의 신뢰성 확보 및 설계 검증은 HVDC 시스템의 성능과 효율, 크기를 결정짓는 중요한 요소이다. 본 논문에서는 (주)효성이 개발하는 200MW 모듈형 멀티레벨 컨버터 서브모듈의 성능을 검증하기 위한 특성시험을 나타낸다. 특성시험을 통해서 개발 중인 서브모듈의 성능과 보호동작을 검증한다.

### 1. 서 론

High Voltage Direct Current (HVDC)는 발전소에서 생산된 교류 전력을 직류 전력으로 변환시켜 직류로 송전하는 전력변환 시스템을 의미하며, 수전점에서 직류를 교류로 변환하는 Back-to-Back (BTB) 구조를 갖는다. DC 송전은 AC 송전 대비 높은 송전 효율을 가지며, 계통의 연계가 용이하고 전력 운용의 안정성과 효율성을 확보할 수 있다.

HVDC 시스템은 내부에 적용되는 전력반도체 소자의 종류에 따라 Thyristor 계열을 사용하는 전류형 타입과 Transistor 계열을 사용하는 전압형 타입으로 구성되며, 최근 모듈형 멀티레벨(Modular Multi-level Converter, MMC) 컨버터를 이용하여 시스템의 용량 증대와 전력망 연계가 용이한 전압형 HVDC 시스템의 연구가 진행 중이다.<sup>[1]</sup>

본 논문에서는 서브 모듈의 주요 구성요소인 IGBT와 게이트 드라이브 유닛을 시험하기 위한 특성 시험인 더블 펄스 실험과 단락회로 시험의 목적 및 시험회로를 설명하고 시험 결과를 나타내었으며, 향후 서브모듈의 개발 방향에 대해 기술한다.

### 2. 특성 시험

특성 시험에 사용될 서브모듈은 (주)효성에서 개발 중인 200MW 급 DC±120kV 전압형 HVDC에 적용하는 것을 목표로 개발되었다. 스위치의 동특성 및 서브모듈의 설계를 검증하기 위해 특성시험을 진행하며 더블 펄스 시험과 단락 회로 시험으로 구성된다.

### 2.1 더블 펄스 시험

IGBT 특성은 회로의 설계와 동작 조건, 레이아웃에 따라 바뀌기 때문에 어플리케이션 마다 IGBT의 실제 성능을 알기 위해 더블 펄스 시험을 진행한다. 더블 펄스 시험을 통해 게이트 저항의 적절한 저항 값을 선정하고 IGBT의 턴온 및 턴오프 특성과 역병렬 다이오드의 역회복 특성, DC 버스바의 기생 인덕턴스 성분을 확인한다.

더블 펄스 시험의 회로구성은 그림1과 같다. 상단의 IGBT  $S_1$ 를 시험하기 위한 회로이며,  $L$ 은 부하 인덕터,  $V_{ge}$ 는 게이트 전압,  $V_{ce}$ 는 에미터-컬렉터 전압,  $I_c$ 는 컬렉터 전류,  $V_R$ 은 다이오드 역전압,  $I_F$ 는 다이오드 전류이다.

더블 펄스 시험에서, 첫 번째 펄스는 부하 인덕터  $L$ 을 통해 전류 값을 원하는 시험 전류까지 상승시키기 위해 사용된다. 스위치가 턴-오프 되어 있을 때, 부하 인덕터에 연결된 프리 휠링 다이오드는 전류의 도통 경로를 만들기 위해 사용된다. 두 번째 펄스는 전류가 시험전류 값에 도달했을 때 턴-온 특성과 역병렬 다이오드의 역회복 특성을 확인하기 위해 사용된다.

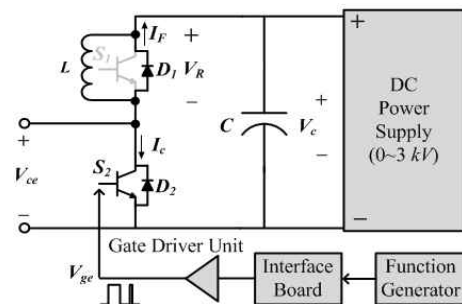


그림 1 더블 펄스 시험 회로도  
Fig. 1 Circuit of the double-pulse test

### 2.2 단락 회로 시험

단락 회로 시험의 목적은 회로 상의 단락 발생 시 IGBT의 내구성 평가 및 동작 영역이 제조사에서 보장하는 SCSOA (Short Circuit Safe Operation Area) 확인이다. 또한 게이트 드라이브 유닛이  $V_{ce}$  값의 감시를 통해 보호 동작을 적절하게 하는지 확인해야 한다.

단락 회로 시험의 회로 구성은 그림 2와 같다. 스위치  $S_1$ 이 턴-온되면 강제로 단락 회로가 되도록, 하단 스위치  $S_2$ 의 컬렉터 단자와 에미터 단자 사이에 버스바를 연결하여 단락시킨다.

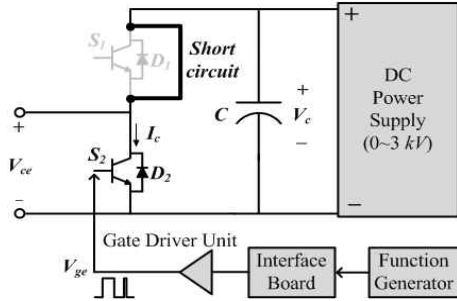


그림 2 단락 회로 시험 회로도  
Fig. 2 Circuit of the short-circuit test

### 3. 특성 시험 결과

시험에 사용된 IGBT 소자는 Mitsubishi Electric의 CM1500HC-90XA이다. CM1500HC-90XA는 모듈형 타입의 IGBT이고, 이 소자의 정격 전압은 4500V, 정격 전류는 1500A이다<sup>[2]</sup>. 시험은 상온 25°C에서 진행하였다.

#### 3.1 더블 펄스 시험

첫 번째 펄스의 하강 엣지에서 턴-오프 특성을 확인하며, 두 번째 펄스의 상승 엣지에서 턴-온 특성과 역병렬 다이오드의 역회복 특성을 확인한다.

그림 3은 IGBT의 턴-오프 특성을 확인하기 위해  $V_{ge}$ ,  $V_{ce}$ ,  $I_c$ 를 측정된 파형이다. 턴-오프 파형으로부터 턴-오프 시간, 턴-오프 스위칭 에너지,  $V_{ce}$  오버슈트와 같은 파라미터를 확인한다.

그림 4는 IGBT의 턴-온 특성을 확인하기 위해  $V_{ge}$ ,  $V_{ce}$ ,  $I_c$ 를 측정된 파형이다. 턴-온 파형으로부터 턴-온 스위칭 에너지,  $I_c$  오버슈트,  $di/dt$ 와 같은 파라미터를 확인한다.  $di/dt$ 를 통해 DC 버스바의 기생 인덕턴스 성분을 계산한다.

그림 5는 역병렬 다이오드의 역회복 특성을 확인하기 위해  $V_{ge}$ ,  $V_R$ ,  $I_F$ , 피드백 신호를 측정된 파형이다. 이 파형으로부터 역회복 전류의 피크값, 역회복 에너지 파라미터를 확인한다.

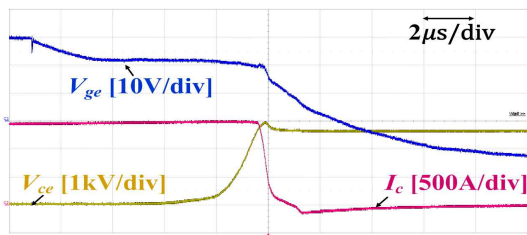


그림 3 IGBT의 턴-오프 파형  
Fig. 3 Waveform of the IGBT Turn-off times

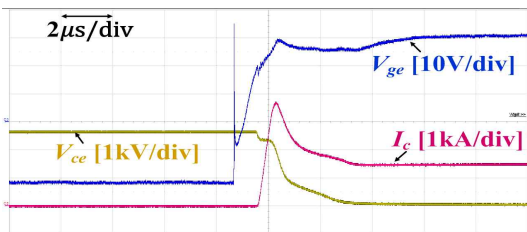


그림 4 IGBT의 턴-온 파형  
Fig. 4 Waveform of the IGBT Turn-on times

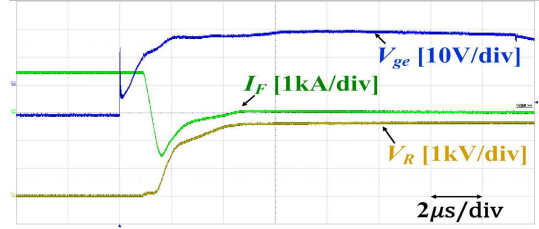


그림 5 역병렬 다이오드의 역회복 파형  
Fig. 5 Waveform of the Reverse-recovery for reverse Diode

#### 3.2 단락 회로 시험

단락 회로 시험을 하기 위해 전압은 3000V, 전류는 3000A로 가압하였다. 단락 조건에서의 보호 성능을 확인하기 위해 게이트 드라이브 유닛으로부터 생성되는 피드백 신호를 확인한다.

그림 6은 단락 조건에서의  $V_{ge}$ ,  $V_{ce}$ ,  $I_c$  그리고 피드백 신호를 측정된 파형이다. 게이트 드라이버 유닛으로부터 오는 피드백 신호는 보호 동작 시 펄스를 출력한다.

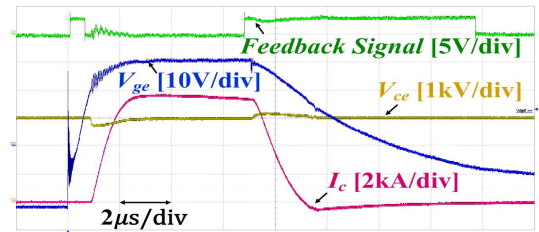


그림 6 IGBT의 단락 회로 시험 파형  
Fig. 6 Waveform of the Reverse-recovery for reverse Diode

### 4. 결론

본 논문에서는 (주)효성에서 개발하고 있는 MMC 기반의 200MW HVDC 시스템을 위한 서브 모듈의 특성 시험의 목적을 설명하고 시험결과를 나타내었다. 서브 모듈은 MMC를 구성하는 기본 구성요소이기 때문에, 전체 시스템을 구성하기 전에 설계의 적합함과 성능을 확인하는 것이 매우 중요하다. 특성 시험을 통해 서브 모듈을 구성하는 IGBT의 특성을 확인하고 게이트 드라이버 유닛 등의 성능과 보호 동작을 검증하였다. 개발하는 서브모듈을 바탕으로, 향후 다양한 시험과 개발을 통해 MMC 기반의 전압형 HVDC의 기술을 축적하여 200MW 급 BTB(Back to Back) HVDC의 결과물로 활용할 예정이다.

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20179310100060)

### 참고 문헌

- [1] R. O. C. Lyra, B. J. Cardoso Filho, V. John and T. A. Lipo, "Coaxial current transformer for test and characterization of high-power semiconductor devices under hard and soft switching," in *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 36, no. 4, pp. 1181-1188, July-Aug. 2000.
- [2] Mitsubishi Electric "High Voltage Insulated Gate Bipolar Transistor : HVIGBT," CM1500HC-90XA datasheet, Oct. 2018