

# 3kV, 1000A급 전압형 HVDC MMC용 서브모듈 시험장치 개발

오창열, 김기룡, 김재훈, 이종필, 김태진  
한국전기연구원 전력변환시스템연구센터

## Development of 3kV, 1000A ratings Submodule Test Equipment for MMC-Based VSC-HVDC System

Chang-yeol Oh, Ki Ryong Kim, Jae-Hoon Kim, Jong-Pil Lee, and Tae-Jin Kim  
Korea Electrotechnology Research Institute (KERI)

### ABSTRACT

본 논문에서는 전압형 HVDC MMC용 서브모듈을 시험하기 위해 개발된 3kV, 1000A급 서브모듈 시험장치 개발을 제시한다. 제안하는 시스템은 실제 전압형 MMC 서브모듈 운전 환경과 동일한 조건의 전압 및 전류를 모의하기 위한 회로 구조와 제어 방식을 적용하였다. 또한, 제안하는 시스템은 MMC의 이상적인 동작뿐만 아니라 운용 중 발생하는 전류 왜곡을 모사하여 실 운전 상황을 동일하게 모의하고, 서브모듈의 스위칭 동작으로 인하여 발생하는 커패시터 전류의 불연속성을 3kV, 1000A급 서브모듈 시험장치 시작품을 통해 구현하였다. 또한, HILS로 구현된 전압형 HVDC MMC에서 서브모듈의 동작 특성과 비교하여 그 타당성을 검증하였다.

### 1. 서론

전압형 HVDC 시스템의 고전압, 고전력 조건으로 인하여 그림 1과 같이 MMC로 구성된 HVDC 스테이션은 수백개의 직렬 연결된 서브모듈로 구성된 밸브가 모여 구성된다<sup>[1]</sup>. 따라서 MMC와 이를 구성하는 서브모듈의 안정성 및 신뢰성은 전체 HVDC 시스템의 안정성 및 신뢰성으로 직결된다. 특히 서브모듈을 구성하는 부품의 신뢰성이 매우 중요한 부분을 차지하지만, 구성 부품레벨에 대한 적절한 시험사양, 조건 및 시험장치가 존재하지 않는 실정이다. 전압형 HVDC와 관련된 유일한 규격인 IEC 62501에서는 MMC의 밸브 레벨에서 시험을 나타내지만, 그 구성 부품에 대한 테스트 방법은 언급하고 있지 않다<sup>[1]</sup>. 또한, IEC 62501에서 제공하는 시험의 조건은 최소 5개 이상의 서브모듈로 구성된 MMC 밸브로 제한하고 있다. 이 규격은 시스템 수준에서 전압형 HVDC 시스템을 다루는 시스템 제조사에 적합하며, 서브모듈 및 그 구성품을 연구 및 개발하는 업체에 시험장비 및 전원 공급을 위한 매우 높은 비용 및 공간을 요구한다<sup>[2]-[4]</sup>. 이로 인해 부품 제조사는 고전압, 고전력 조건인 철도의 표준을 준수하거나 수요기업에서 제시하는 요구사항에 기반한 시험을 진행한다.

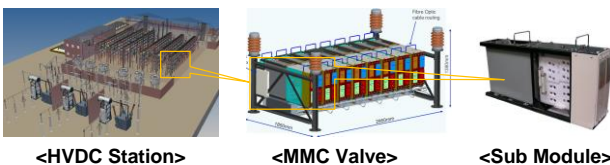


그림 1. 전압형 HVDC 시스템의 구성

이로 인하여 서브모듈 및 그 구성품에 대한 시장 진입 장벽이 매우 높으며, 기존 제품의 개선을 위한 연구개발이 매우 수동적으로 진행된다. 이를 위해 기존의 많은 연구들을 통해 서브모듈 레벨에서 시험을 하기 위한 토폴로지들이 소개되었지만, 전압형 HVDC 시스템의 동작 환경을 구현하는데 많은 제약이 존재한다<sup>[2]-[4]</sup>. 특히, 실제 시스템에서 제어 및 전압 밸런싱 기법에 의해 야기될 수 있는 서브모듈 전류의 2차 고조파 및 DC 오프셋의 구현에는 많은 제약이 따른다.

그러므로 본 논문에서는 실제 동작과 매우 유사한 방식으로 전압형 HVDC 시스템에 적용된 MMC의 서브 모듈을 시험하기 위한 시험장치를 제안한다. 제안된 장비는 간단한 구조와 제어를 사용하여 전류의 2차 고조파 및 DC 오프셋을 구현할 수 있다. 또한, 제안한 장치는 동작 중 서브모듈의 스위칭 패턴을 포함하여 실제와 동일한 동작환경을 제공할 뿐만 아니라 장치 및 서브모듈에서 발생하는 손실에 대한 보상을 제외한 별도의 추가전원이 필요치 않아 전원용량을 최소화 할 수 있다. 제안된 시험장치의 성능은 실제 전압형 HVDC에 적용되는 서브모듈과 동일한 조건의 3kV, 1000A에서 시험을 통해 검증되었다.

### 2. 3kV, 1000A급 서브모듈 시험장치 설계 및 제어

#### 2.1 절 서브모듈 시험장치 구성

서브모듈 시험장치는 부품 및 서브모듈 제조사를 위해 밸브 레벨 시험과 비교하여 작은 전원 공급용량 및 공간을 요구하고, 전압형 HVDC 시스템의 동작 중 발생하는 전류의 2차 고조파 및 DC 오프셋을 구현 가능해야 한다. 이러한 요구조건을 만족하기 위하여 그림 2와 같은 3kV, 1000A급 전압형 HVDC MMC용 서브모듈 시험장치를 구성하였다.

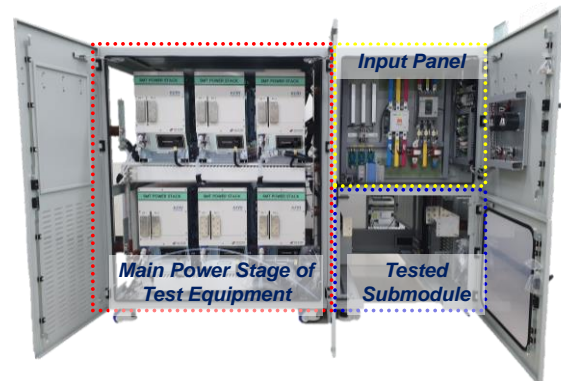


그림 2. 3kV, 1000A급 전압형 HVDC MMC용 서브모듈 시험장치

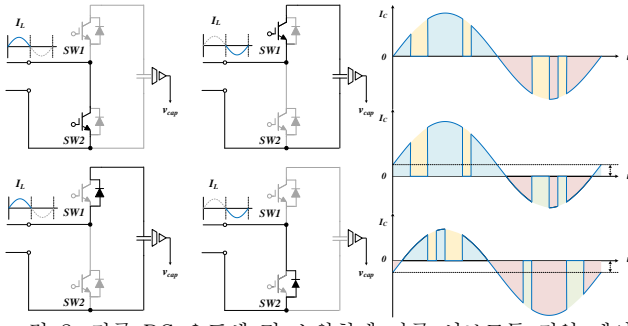


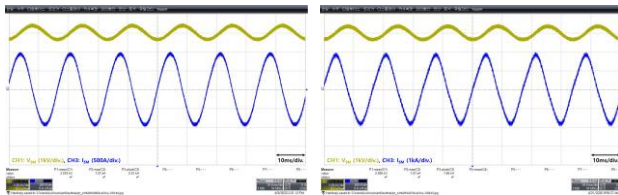
그림 3. 전류 DC 오프셋 및 스위칭에 따른 서브모듈 전압 제어

### 2.2 절 서브모듈 시험장치 제어

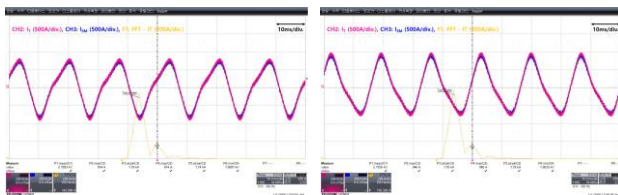
제한한 서브모듈 시험장치의 제어는 간단하게 구성된다. 그림 2에서 제시한 시험장치의 파워 스테이지에서 MMC의 암전류에 해당하는 시험장치 전류의 정현파 지령에 2차 고조파 및 DC 오프셋을 추가하여 생성한다. 서브모듈 커패시터 양단에 인가되는 전압은 시험장치 전류의 DC 오프셋을 조절하여 제어한다. 시험장치 초기 기동 시 서브모듈 커패시터 양단에 시험 전압 레벨이 확보되면, 커패시터의 전하 균형에 의해 미세한 전류 오프셋 조절을 통해 추가 전력 없이 전압을 유지하며 전류가 제어된다. 실제 HVDC 시스템에서 MMC의 제어로 인하여 각 서브모듈에 다양한 스위칭 패턴이 적용되며, 서브모듈의 스위칭은 서브모듈 커패시터를 통해 흐르는 전류를 불연속적으로 만든다. 이러한 불연속 커패시터 전류 생성에 따라 그림 3과 같은 동작모드를 나타내며, 전류 오프셋과 스위칭 패턴에 의한 불연속 전류 간의 전하 균형에 의해 전압을 제어할 수 있다. 서브모듈에 인가되는 스위칭 패턴은 MMC 전압 밸런싱 알고리즘에 의해 불규칙한 패턴을 나타내므로 스위칭 시간과 횟수를 조절할 수 있도록 제어를 구성한다. 또한, MMC 제어 알고리즘에 의해 2차 고조파가 포함된 전류가 서브모듈을 통해 흐르며, 이는 MMC의 인버터 모드 동작과 정류기 모드 동작에 따라 그 형태가 달라지므로, 이를 고려한 모드별 2차 고조파를 주입한다.

### 2.3 절 서브모듈 시험장치 검증 및 시험

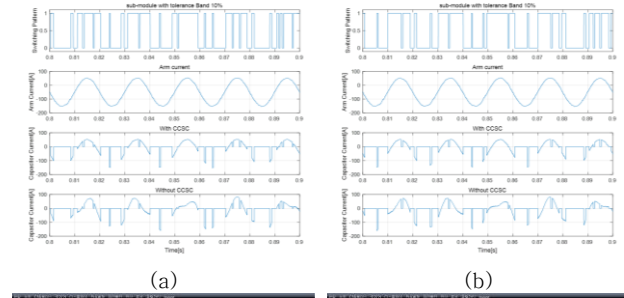
전압형 HVDC 시스템에 적용된 MMC의 서브모듈을 위한 3kV, 1000A급 시험장치 검증을 위해 정격시험을 수행한다. 시험 전류에 2차 고조파 주입 여부에 관계없이 정격 조건에서 동작과 MMC 모드별 2차 고조파 주입 전류 구현을 검증한다.



(a) 2차 고조파 미포함 (b) 2차 고조파 포함  
그림 4. 서브모듈 정격시험 (3kV, 1000A)



(a) 인버터모드 운전 (b) 정류기모드 운전  
그림 5. MMC 모드별 서브모듈 전류 2차 고조파 주입



(a) (b)  
(c) (d)  
그림 6. 서브모듈 스위칭 패턴 분석 및 스위칭 패턴 구현

HILS를 통해 분석된 MMC의 동작 중 서브모듈 스위칭 패턴을 통해 시험장치를 통해 스위칭이 포함된 전류 구현을 검증한다.

## 3. 결론

본 논문은 전압형 HVDC 시스템에 적용된 MMC의 서브모듈을 위한 3kV, 1000A급 시험장치를 제안한다. 제한한 시험장치는 서브모듈 전류의 2차 고조파, DC 오프셋 및 서브모듈의 스위칭 패턴을 포함하여 실제 동작환경과 매우 유사한 조건에서 시험할 수 있다. 제한한 시험장치의 구성 및 제어를 나타내고, 3kV, 1000A 정격 조건에서의 시험장치 동작 및 MMC 모드별 고조파 주입 시험 결과를 제시한다. 또한, HILS를 통해 모의된 서브모듈 스위칭 패턴을 모사하여, 제안한 시험장치의 유효성을 검증한다.

본 연구는 산업통상자원부 (MOTIE)와 한국에너지기술연구원 (KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.  
(No. 20171210201100)

## 참고 문헌

- [1] IEC 62501: 'Voltage sourced converter (VSC) valves for high-voltage direct current (HVDC) power transmission - electrical testing' (IEC, Switzerland, 1.0 edn.).
- [2] CIGRE Working Group B4.48: 'Components testing of VSC system for HVDC applications' (CIGRE, France, 2011).
- [3] J. H. Jung, E. C. Nho, Y. H. Chung, S. T. Baek, and J. H. Lee, "Test circuit for MMC-based VSC valves in HVDC power station," IET Power Electronics, vol. 53, Issue 4, pp. 272-273, Feb. 2017.
- [4] C. Y. Oh, K. R. Kim, H. S. Kim, J. P. Lee and T. J. Kim, "Development of Submodule Test Equipment for MMC-Based VSC-HVDC System," in 2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Baltimore, USA, Sep. 2019, pp. 1088-1092.