

MVDC-LVDC 컨버터스테이션 개발을 위한 HILS 환경 구축 및 검증

이종원*, 이승호*, 고영민*, 박영호*, 이찬주*, 윤준희**, 김성민**
 HD현대일렉트릭*, 한양대학교**

Establishment of HILS Environment and Verification for MVDC-LVDC Converter Station Development

Jong-Won Lee*, Seungho Lee*, Young-Min Go*, Young-Ho Park*, Chan-Joo Lee*,
 Jun-Hee Yoon**, Sungmin Kim**
 HD Hyundai Electric Co., Ltd*, Hanyang University**

ABSTRACT

본 논문에서는 MVDC/LVDC 컨버터스테이션의 제어기 및 알고리즘 검증을 위해 실시간 디지털 시뮬레이터를 이용한 Hardware In the Loop Simulation(HILS) 환경을 구축하였다. 다층 구조의 Power Electronics Building Block(PEBB)으로 구성된 컨버터 스테이션의 제어 동작 검증을 위하여 4개의 정밀 모델과 10개의 평균 모델을 구축하였으며 PLECS 시뮬레이션 결과와의 비교를 통하여 HILS 환경을 검증하였다.

1. 서 론

국내에서는 증가하는 전력 소비량, 직류 분산 전원, 직류 부하의 증가에 대응하여 전력망 보강 및 개편에 대한 필요성이 증대되고 있다^[1]. 이에 따라 정부는 안정적이고 효율적인 전력 이용을 위해 교류 송전망과 직류 배전망을 융합한 형태인 MVDC 융합형 AC/DC Hybrid 전력망을 연구개발 중에 있다^[2]. AC/DC Hybrid 배전망의 경우 MVAC, MVDC, LVDC의 각기 다른 계통이 개별 컨버터스테이션을 통하여 양방향 전력 연계가 가능한 유기적인 형태를 띠고 있다. 특히 MVDC/LVDC 컨버터스테이션의 경우 다 수의 PEBB으로 구성되어 있고 시스템 제어기와 다 수의 PEBB 제어기가 복잡한 계층적 구조를 이루고 있다^[3]. 최근 이와 같은 시스템에서 실시간 시뮬레이터를 통해 가상 환경 내에서 제어기 알고리즘 및 부가 기능들을 선제적으로 검증하는 사례가 증가하고 있으며 유관 연구에 대한 관심도 또한 증가하고 있다^[4]. 그림 1과 같이 실시간 시뮬레이션 단계는 총 4가지 단계로 구분된다. 1단계는 시뮬레이터 내에 플랜트와 제어기를 모사하여 HILS 환경에 대한 검증을 하고 2단계에서는 시뮬레이터에 실제 제어기를 연계하여 제어기 내의 알고리즘을 검증을 하는 단계이다. 그리고 3단계에서는 시스템 제어기와 연계하여 마스터/슬레이브 간 연계 성능 검증을 실시하며 4단계에서는 실제 시험과의 정합도를 비교하여 HILS 환경을 개선하는 단계로 구분된다. 본 논문에서는 Quadruple Active Bridge(QAB)구조의 MVDC/LVDC 컨버터스테이션에 대하여 실시간 시뮬레이션 1단계에 해당하는 환경을 구축하였다. 실시간 시뮬레이터 2대를 사용하여 정밀 모델 4개와 평균 모델 10개를 모사하였으며 이를 PLECS 시뮬레이션 결과와 비교하여 구축된 HILS 환경을 검증하였다.

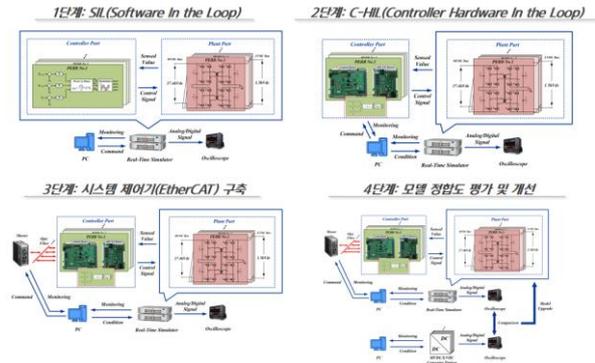


그림1 단계별 실시간 시뮬레이션 시스템 구성도
 Fig.1 Configuration Diagram of Real-Time Simulation System

2. 본 론

2.1 MVDC/LVDC 컨버터스테이션 전체 시스템 및 단일 PEBB 포트 별 전력 전달 분석

그림 2는 본 논문의 MVDC/LVDC 컨버터스테이션의 전체 시스템 구성도로 입·출력이 바이폴 구조로 구성되어 있으며 다 수의 PEBB이 상·하측에 각각 직·병렬로 연결되는 구조이다. 단일 PEBB인 QAB 컨버터는 MV측과 LV측이 각각 두 개의 포트 구성되어 있으며 포트 별 인덕턴스와 스위칭 출력 전압으로 전력 전달 경로를 등가화 한 delta model에 따라 수식 (1)과 같이 정의할 수 있다.

$$\vec{P} = \begin{bmatrix} P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{12} - P_{23} - P_{24} \\ P_{13} + P_{23} - P_{34} \\ P_{14} + P_{24} + P_{34} \end{bmatrix} \quad (1)$$

각 포트 별 변압기의 턴 비가 1:1:1 및 컨버터 PWM 기법을 Single Phase Shift(SPS)를 사용하는 경우에서 제 1고조파만 고려하고 테일러급수를 적용하여 근사화 한다면 포트 간 전력의 크기는 수식 (2)와 같이 정의 된다^[5].

$$P_{ij} \approx \frac{V_i V_j \phi_{ij}}{(1/4)\pi^3 f_{sw} L_{ij}}, \quad i, j \in [1, 4] \quad (2)$$

따라서 각 포트 간 전력 전달은 입·출력 전압, 스위칭 주파수, 포트 간 등가 인덕턴스가 고정일 때 포트 간 위상 차이로 발생됨을 알 수 있다.

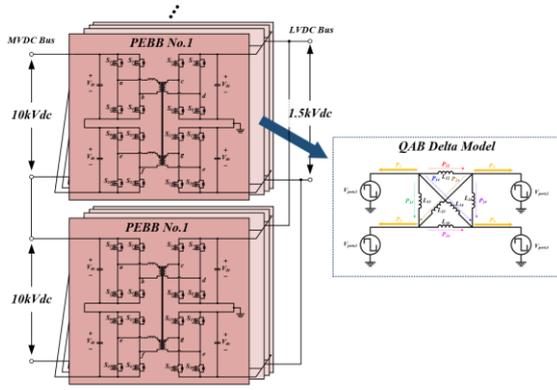


그림2 MVDC/LVDC컨버터스테이션 전체시스템 구성 및 단일 QAB Delta Model
Fig.2 MVDC/LVDC Converter Station Total System Configuration with Single QAB Delta Model

2.2 HIL 시뮬레이션 구성 및 결과

표 1 전체 시스템 및 단일 PEBB 사양

Table 1 Total System and Single PEBB specification

P_{total}	1.1MW	n	14EA
V_{in}	$\pm 10kV$	V_{out}	$\pm 750V$
P_{PEBB}	80kW	$V_{port,i}, i \in [1,4]$	750V

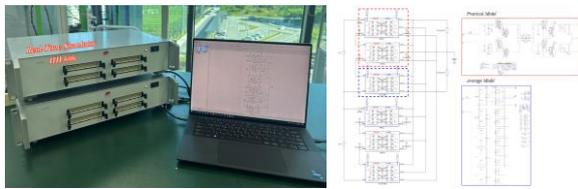
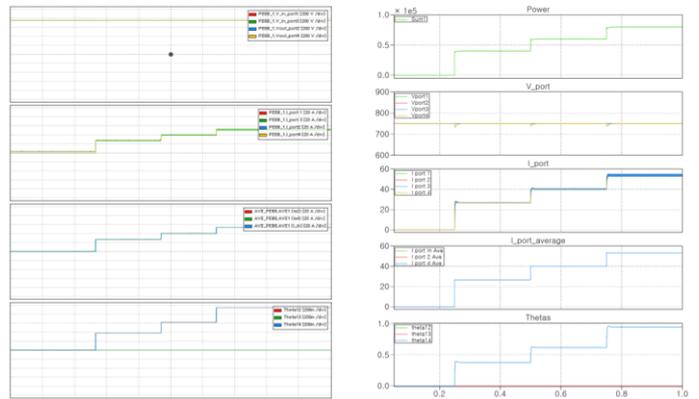


그림3 HILS 시스템 구성
Fig.3 MVDC/LVDC Converter Station Total System Configuration

그림 3의 HIL 환경 구성과 같이 실시간 시뮬레이터는 Typhoon HIL사의 HIL606 2대를 이용하였다. 본 논문에서는 실시간 시뮬레이션 1단계인 Simulation in the Loop(SIL)로 실시간 시뮬레이터 내에 플랜트와 제어기를 모사하였다. 또한 시뮬레이터 내부 설정으로 시뮬레이션 스텝은 $0.5\mu s$ 로 설정하였으며 표 1과 같이 전체 시스템 용량은 1.1MW로 80kW PEBB를 7개씩 총 14개인 바이폴 구조 배치하였다. 실시간 시뮬레이터 한 대당 모사한 모델 수는 추후 적용 예정인 바이패스 및 보호 회로 등 추가 기능에 대한 연산량 여유 확보 및 시뮬레이터 한 대당 전류원 개수 제한 등을 고려하여 정밀 모델 개수는 2개, 평균 모델은 5개로 모사하였다. 정밀 모델의 경우 각 포트의 전압과 전류를 센싱 받아 수식 (2)와 같이 출력 측에서 필요한 전력 크기만큼 포트 간 위상을 가변 하여 출력 전압을 일정하게 유지하도록 제어하였다. 평균 모델의 경우 정밀 모델로부터 포트 별 전압, 제어기 출력의 위상 정보를 전달받아 수식적으로 계산하여 가변 전류원의 입력으로 설정하여 타 PEBB과 동일한 출력을 낼 수 있도록 설정하였다.

그림 4는 실시간 시뮬레이션과 고정 시간 시뮬레이션인 PLECS 시뮬레이션 결과이다. PLECS 시뮬레이션 구성은 표 1의 사양과 그림 3에서의 HILS 시뮬레이션 구성과 동일하게 구축하였다. 또한 LV측 부하에 걸리는 포트 별 전압이 각각 750V로 목표치와 동일하게 제어되고 포트 간 위상 차이 또한 두 시뮬레이션 결과가 동일함을 확인하였으며 부하 변동에도 목표 전압을 추종하는 것을 확인하였다.



(a) HILS Result (b) PLECS Result
그림4 실시간 시뮬레이션 및 고정 시간 시뮬레이션 결과 비교
Fig.4 Comparison of Real Time and Fixed Time Simulation Result

3. 결론

본 논문에서는 MVDC/LVDC 컨버터스테이션 개발을 위해 구축된 HILS 환경 검증을 위하여 단일 PEBB의 전력 전달 분석과 전체 시스템의 실시간 시뮬레이션 및 고정 시뮬레이션의 결과 비교를 통해 실시간 시뮬레이션 1단계인 SIL환경 검증을 완료하였다. 이를 통해 SIL 내 모사된 플랜트에 대한 검증을 완료하였으며 후속 연구에서는 실시간 시뮬레이터 2대를 추가 도입하여 14개의 PEBB를 추가로 모사를 통해 총 2MW급의 $\pm 20kV$ 시스템을 구축하고 실시간 시뮬레이션 2~4단계에 해당하는 실물 제어기와의 연계 및 시스템 보호/바이패스 회로를 추가하고 EtherCAT을 적용하여 시스템 제어기 및 PEBB 제어기의 알고리즘을 검증 예정이다.

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.
[No. 2022550000100]

참고 문헌

- [1] 산업통상자원부, “제 10차 전력수급기본계획(2022~2036)”, Jan, 2023.
- [2] 이금정. (2021). 차세대 AC-DC Hybrid 배전 네트워크 R&D사업의 추진전략 및 비전. 전기의세계, 70(10), 9-13.
- [3] 박영호, 박영민, 이승용, 이승호, 김지훈, 이찬주. (2023). MVDC와 LVDC를 연계하는 MW급 컨버터 설계 시 전력회로 토폴로지의 고찰. 전력전자학회 학술대회 논문집.
- [4] 차일호, 서영태. (2018). Typhoon HIL 실시간 시뮬레이션 시스템의 구조적 장점과 마이크로그리드 응용사례. 전력전자학회지, 23(6), 34-40.
- [5] Y. Chen, P. Wang, H. Li and M. Chen, "Power Flow Control in Multi-Active-Bridge Converters: Theories and Applications," 2019 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Anaheim, CA, USA, 2019, pp. 1500-1507