

# HILS를 활용한 MVDC-LVDC 컨버터의 커패시터 초기충전 방법 검증

고영민\*, 이승호\*, 이종원\*, 박영호\*, 이찬주\*  
HD현대일렉트릭\*

## Verification of Capacitor Initial-Charging Method for MVDC-LVDC Converter Using HILS

Young-Min Go\*, Seung-Ho Lee\*, Jong-Won Lee\*, Young-Ho Park\*, Chan-Joo Lee\*,  
HD Hyundai Electric Co., Ltd\*

### ABSTRACT

본 논문은 MVDC-LVDC 컨버터의 커패시터 초기충전 방법을 검증하기 위한 Hardware-in-Loops-Simulation (HILS) 환경 구축 및 실시간 시뮬레이션에 대해 기술하였다. Typhoon HIL社의 시뮬레이션 툴인 Typhoon HIL Control Center (THCC)를 기반으로 컨버터 시스템을 구성하고, 디지털 시뮬레이터 장비인 HIL606을 연동하여 실시간 시뮬레이션 수행이 가능한 HILS 환경을 구축하였다. 실시간 시뮬레이션을 통해 초기충전 동작 시퀀스를 검증하고, Soft-Switching 적용 시 MV측 초기충전 시 발생하는 돌입전류가 효과적으로 제한되는 것을 확인하였다. 또한 PLECS 시뮬레이션 결과와 비교를 통해 실시간 시뮬레이션의 타당성을 검증하였다.

### 1. 서론

MVDC를 활용한 대용량 전력 공급이 가능해지면서 양방향 전력 연계가 가능한 MVDC-LVDC 컨버터는 안정적인 전력 공급을 위한 차세대 전력망의 핵심 전장품으로 주목받고 있다<sup>[1]</sup>. 하지만, MV급의 전원을 입력 받는 MVDC 컨버터는 초기충전 과정 없이 입력 전원을 투입할 경우 커패시터에 의해 매우 큰 돌입전류가 발생하게 되고 이는 컨버터 소손의 원인이 될 수 있다. 이러한 돌입전류를 억제하기 위해 보조전원을 활용한 초기충전 방법이 제안되었으며<sup>[2]</sup>, 제시된 방법의 타당성을 입증하기 위해서는 하드웨어 장치를 포함한 검증 시험이 수반되어야 한다. 하지만, 검증 시험은 필연적으로 시스템 제작 및 보완점 개선 등의 과정을 거쳐야 하기 때문에 많은 비용과 시간을 소모하게 된다. 이를 최소화하며 초기충전 방법을 사전에 검증할 수 있는 시뮬레이터를 이용한 연구들이 발표되었다<sup>[3],[4]</sup>. 가상환경에서 컨버터의 모델링과 실시간 시뮬레이션을 활용하면 적은 비용과 시간으로 초기충전 방법의 타당성을 검증할 수 있으며, 또한 비정상 및 사고상황을 모사하여 컨버터의 제어적, 전기적 안정성도 확인이 가능하다.

본 논문에서는 MVDC-LVDC 컨버터의 전원 투입 시 발생하는 돌입전류를 제한하기 위한 초기충전 방법의 유효성을 검증하기 위한 실시간 시뮬레이션을 수행하였다. HILS 환경에서 초기충전을 통해 커패시터 측 돌입전류가 억제됨을 확인하고, PLECS 시뮬레이션 결과와 비교하여 그 타당성을 검증하였다.

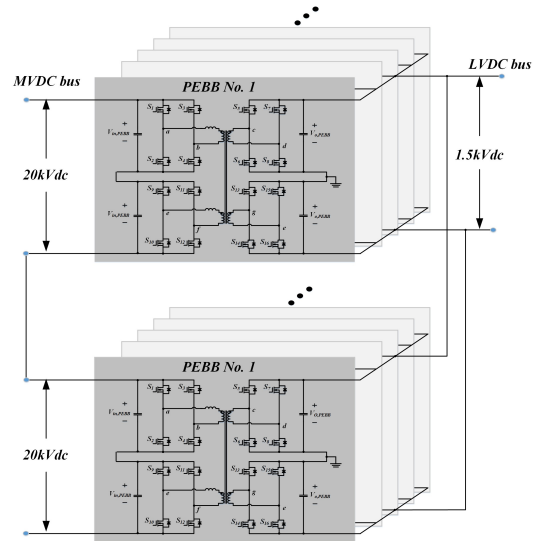


그림1 MVDC-LVDC 컨버터 전체시스템 구성  
Fig.1 MVDC-LVDC Converter Total System Configuration

표 1 전체 시스템 및 단일 PEBB 사양  
Table 1 Total System and Single PEBB Specification

$V_{in}$	$\pm 20kV_{dc}$	$V_{in,PEBB}$	$1500V_{dc}$
$V_o$	$\pm 750V_{dc}$	$V_{o,PEBB}$	$\pm 750V_{dc}$
$P_{system}$	2MW	$P_{PEBB}$	80kW

### 2. 본론

#### 2.1 MVDC-LVDC 컨버터의 구성과 초기충전 방법

그림 1은 2MW급의 전력 공급이 가능한 MVDC-LVDC 컨버터의 전체시스템 구성도를 나타낸다. 표 1은 그림 1의 MVDC-LVDC 컨버터의 입력 및 출력 전압, 용량 등의 사양을 명시하고 있다. 그림 1과 같이 MV측은 다수의 PEBB (Power Electronic Building Block)들이 20kV 전원과 직렬로 연결되는 구조이기 때문에 전원을 직접 공급하게 되면 고장전류 수준의 큰 돌입전류가 발생하게 되어 시스템 소손을 야기할 수 있다. 이를 방지하기 위해 MV측 가압 시 Soft-Switching을 적용한 직병렬 구조 DC/DC 컨버터의 초기충전 방법을 제시하였다<sup>[2]</sup>.

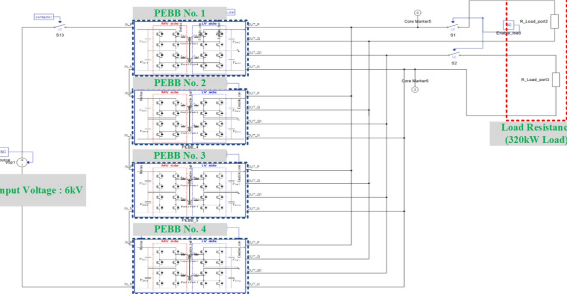
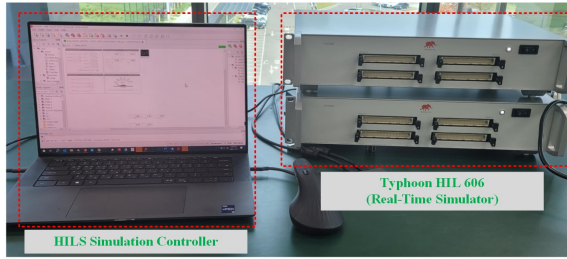


그림2 MVDC-LVDC 컨버터 초기충전 동작 검증용 HILS 환경  
Fig.2 HILS Environment for verifying Initial Charging Method of MVDC/LVDC Converter

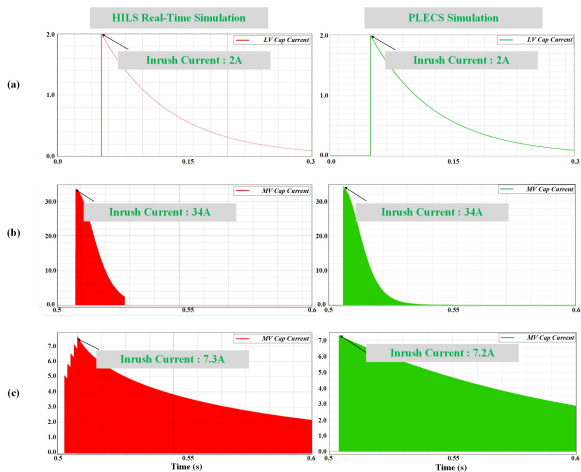


그림3 MVDC/LVDC 컨버터 초기충전 방법 시뮬레이션 결과  
(a) LV측 커패시터 돌입전류 (b) MV측 커패시터 돌입전류  
(c) MV측 커패시터 돌입전류 (제시방법 적용)

Fig.3 Simulation Result of Initial Charging Method for MVDC-LVDC Converter  
(a) LV Side Inrush Current (b) MV Side Inrush Current  
(c) MV Side Inrush Current Using Proposed Initial Charging Method

제시하는 초기충전 방법은 하기와 같은 순서로 진행된다.

- Step 1 : 보조전원을 이용한 LV측 커패시터 초기충전
- Step 2 : Soft-Switching에 의한 MV측 커패시터 초기충전
- Step 3 : MV측 입력 전원 연결 및 보조 전원 탈락

## 2.2 HILS 실시간 시뮬레이션

참고문헌 [2]에서 제안한 초기충전 방법을 검증하기 위해 HIL606 실시간 시뮬레이션 장비를 활용하였다. 그림 2와 같이

PEBB 4개를 직병렬로 연결한 MVDC-LVDC 컨버터의 HILS 환경을 구축하고, 실시간 시뮬레이션이 가능하도록 HIL606 2대를 연동하였다. PEBB의 사양은 표 1과 동일하며, 200V<sub>dc</sub> 보조전원을 LV측 초기충전을 위하여 사용했다. 또한, HILS에서 모사한 컨버터와 동일 사양의 컨버터를 PLECS에 구축하여 시뮬레이션 결과를 비교하고 그 유효성을 검증하였다.

그림 3은 Step 1. 및 Step 2. 과정의 LV/MV측 돌입전류에 대한 실시간 시뮬레이션과 PLECS 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 그림 3의 (a)와 같이 Step 1. 과정의 LV측 초기충전 시 발생하는 돌입전류는 약 2A 정도의 전류가 흐르게 된다. 그림 3의 (b)는 Step 2. 과정에서 [2]의 방법을 적용하지 않았을 때 MV측 커패시터에서 발생하는 돌입전류를 보여주며, Soft-Switching 없이 MV 측 커패시터를 충전하기 때문에 약 34A 이상의 큰 돌입전류가 흐르게 된다. 이에 반해, Soft-Switching이 적용된 초기충전 방법을 적용할 경우, 그림 3의 (c)와 같이 MV측 커패시터 돌입전류가 최대 7.2A, 약 80% 정도 감소하는 것을 확인할 수 있다.

HILS를 활용한 MVDC-LVDC 컨버터의 실시간 시뮬레이션 결과 초기충전 방법을 적용하여 MV측 커패시터를 충전할 경우, 돌입전류 억제 효과가 우수함을 실시간 시뮬레이션을 통해서 확인할 수 있으며, PLECS 시뮬레이션과 비교하여 그 타당성을 검증하였다.

## 3. 결론

본 논문에서 MVDC-LVDC 컨버터 시스템의 초기충전 방법을 검증하기 위해 HILS 환경을 구축하고, HIL606 장비와 연동한 실시간 시뮬레이션을 통해 돌입전류가 80% 정도 감소하는 것을 확인하였으며, PLECS 시뮬레이션과 그 결과를 비교하여 억제됨을 확인하여 제시된 초기충전 방법의 유효성을 검증하였다. 추후 실제 MVDC-LVDC 컨버터의 PEBB 제어용 MCB 보드를 연동하여 보다 실증적인 사전검증이 가능한 HILS 환경을 구축하고 시뮬레이션 테스트를 수행할 예정이다.

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.  
[No.20225500000100]

## 참고 문헌

- [1] 박영호, 박영민, 이승용, 이승호, 김지홍, 이찬주. (2023). MVDC와 LVDC를 연계하는 MW급 컨버터 설계 시 전력회로 토폴로지의 고찰. 전력전자학회 학술대회 논문집.
- [2] 이승호, 이종원, 박영호, 이찬주, 윤준희, 김성민. (2024). ISOP 구조를 갖는 MV급 DC/DC 컨버터의 초기충전 방법. 대한전기학회 학술대회 논문집.
- [3] 차일호, 서영태. (2018). Typhoon HIL 실시간 시뮬레이션 시스템의 구조적 장점과 마이크로그리드 응용사례. 전력전자학회지, 23(6), 34-40.
- [4] 이종원, 이승호, 고영민, 박영호, 이찬주, 윤준희, 김성민. (2024). MVDC-LVDC 컨버터스테이션 개발을 위한 HILS 환경 구축 및 검증. 전력전자학회 학술대회 논문집.