

Power Hardware-in-the-Loop Simulation을 이용한 1-MVA급 다채널 전기자동차 충전기 동작 신뢰성 검증 Test-bed 개발

임재욱, 허경욱, 정지훈
울산과학기술원 전기전자공학과

Development of a Test-bed Using Power Hardware-in-the-Loop Simulation for a 1-MVA Multi-Channel Electric Vehicle Charger

Jae-Wook Lim, Kyoung-Wook Heo, Jee-Hoon Jung

Department of Electrical Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology(UNIST)
Ulsan, Republic of Korea

ABSTRACT

본 논문에서는 Power hardware-in-the-Loop (PHIL) 시뮬레이션을 이용하여 1-MVA급 다채널 전기자동차 충전기 시스템 동작 신뢰성 검증을 위한 Test-bed를 제안한다. 제안한 Test-bed는 22.9 kV AC 배전 계통과 1-MVA 다채널 전기자동차 충전기 시스템을 연계한 구조를 갖는다. PHIL 모의시험 Test-bed는 인터페이스 알고리즘인 Ideal Transformer Method(ITM)를 이용하여 1-MVA급 다채널 전기차 충전기 시스템을 2-kW로 Scale-down하여 제작되었다. 이를 통해 제한된 실험 환경에서 실제 계통과 연계된 1-MVA 충전기 시스템의 다채널 컨버터 제어 동작을 시험할 수 있다. 최종적으로 제안된 Test-bed는 실시간 시뮬레이터 Opal-RT OP5700과 Power Interface, 그리고 1-kW Quadruple-Active-Bridge(QAB) 컨버터 2대를 사용하였으며, Scaling 정상동작과 지락 시 제어동작 실험을 통해 Test-bed의 실효성을 검증한다.

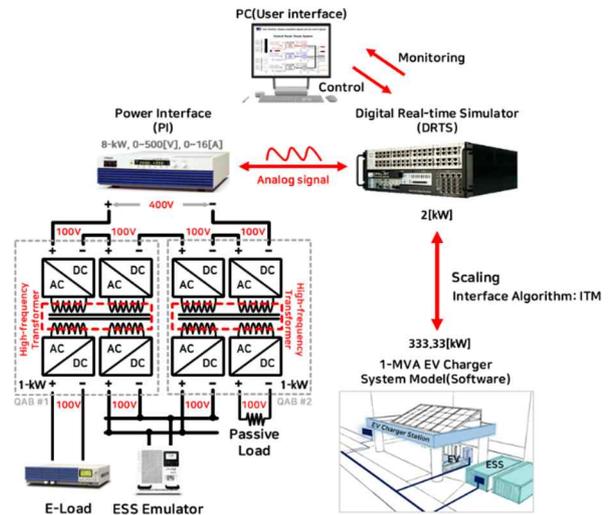


그림 1 제안하는 PHIL 시뮬레이션 시스템 구성
Fig. 1 Configuration of the proposed PHIL simulation system

1. 서 론

최근 전기 자동차 수요가 급증함에 따라 대용량 충전시설의 AC 배전 계통 간 연계도 늘고 있다. 그러므로 전력 계통과 연계된 다양한 상황 및 사고에 대응할 수 있어야 한다. 일반적으로 전력 계통의 기술적 이슈를 검증하고 분석하기 위해 디지털 시뮬레이션을 사용한다. 특히 전력 계통 내에서 전력변환장치의 동특성 및 제어 동작을 연구하기 위해 상세하게 모델링할 수 있다. 그러나 모델링의 어려움과 실용성에 어려움이 있기 때문에 간단히 유효전력 P와 무효전력 Q의 형태로 모델링한다. 그러나 단순화된 전력변환장치 모델은 한계가 있다. 실제 현장 전력변환장치에서 발생하는 예상치 못한 전력 제어 및 동적 특성 문제가 나타나지 않을 수 있다. 따라서 이를 극복하기 위해 Power Hardware-in-the-loop 시뮬레이션 개념이 도입되었다.

PHIL 시뮬레이션은 Power Interface(PI)와 Digital Real-time Simulator(DRTS)를 통해 디지털 시뮬레이션과 하드웨어를 결합한 시뮬레이션 기법이다. 이 기법은 디지털 시뮬레이션으로 모델링한 가상 그리드와 실제 전력 하드웨어를 결합하여 실제 전력변환장치의 예상치 못한 제어 동작과 동특성을 모의시험 할 수 있으며, 전력 계통의 극한 상황을 모사할 수 있다^[1]. 이를 통해 전력변환장치의 동특성 및 제어 영향을 분석하는 것이 가능해져 실제 상황에서 발생할 수 있는 예상치 못한 문제들을 사전에 예측할 수 있다는 장점이 있다.

최근 PHIL 시뮬레이션을 이용한 Test-bed 연구에서, AC 계통과 DC 계통에서 발생할 수 있는 사고 상황을 모사하였다^[1]. 적용된 인터페이스 알고리즘은 Ideal Transformer Method(ITM)이며, 2-kW급 전력변환장치를 20-kW급으로 Scaling 하였다. 하지만 적용된 Power Scaling에 대한 원리 설명 부재로 Test-bed 확장성이 좋지 못하다.

본 논문에서는 PHIL을 이용하여 그림 1과 같이 1-kW급 QAB 컨버터 2대와 가상으로 모델링 된 1-MVA급 다채널 전기차 충전 시스템을 연계하여 다채널 컨버터 제어 동작 및 동특성을 분석할 수 있는 Test-bed를 제안한다. 이 Test-bed에 적용된 ITM은 실제 저용량 전력 하드웨어를 가상 모델에서 대용량의 전력 하드웨어로 Power Scaling이 가능하기 때문에 제한된 실험 환경에서 대용량 전력변환장치의 제어 동작과 동특성을 실험할 수 있다. 그리고 PI의 Constant Current(CC) 제어를 고려한 ITM의 Scaling 기법 원리를 기술하여 Test-bed의 확장성을 높였다. 이를 바탕으로 실제 AC 배전 계통에서 발생할 수 있는 Fault 사고를 PHIL 시뮬레이션으로 모사하여 다채널 컨버터 제어 동작을 검증한다. 최종적으로 1-kW급 QAB 컨버터 2대를 이용하여 제안하는 Test-bed의 실효성을 검증하고자 한다.

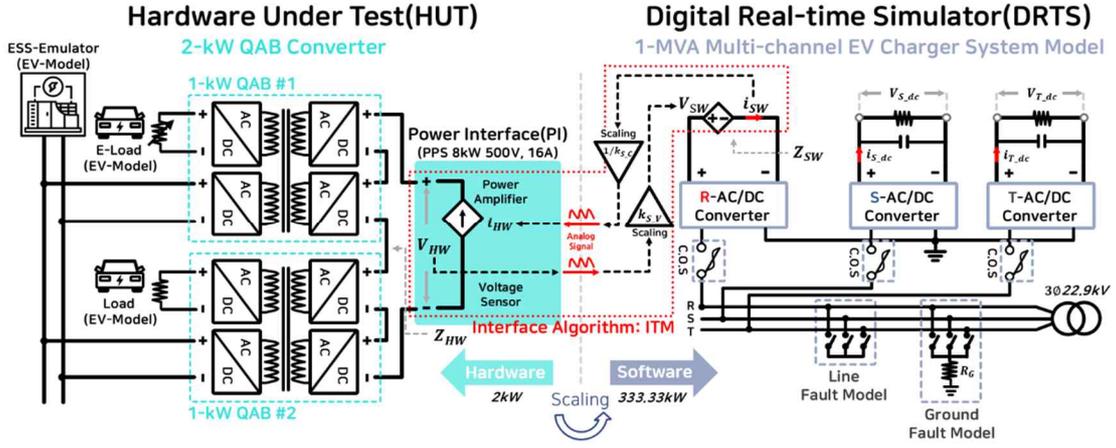


그림 2 제안하는 1-MVA 다중 채널 전기 자동차 충전기 시스템 PHIL 시뮬레이션 Test-bed 구조
 Fig. 2 Structure of the proposed 1-MVA Multi-Channel Electric Vehicle Charger system PHIL simulation test-bed

2. 본 문

2.1 제안하는 Test-bed의 구조 및 동작 원리

2.1.1 PHIL 시스템의 Hardware 구성 및 동작 원리

제안하는 Test-bed의 하드웨어는 DRTS, PI, 전력 하드웨어로 구성된다. DRTS는 전력 하드웨어로부터 받은 전압 정보를 기반으로 가상 모델에 대입하여 실시간으로 연산하며, 연산된 전류 값은 아날로그 신호 형태로 변환되어 실시간으로 PI의 출력을 제어한다. PI는 전력 증폭기와 센서로 구성되며, 전력 하드웨어와 가상 모델을 연계하는 역할을 수행한다.

전력 하드웨어는 Quadruple-Active-Bridge(QAB) 컨버터 2대가 직렬로 연결되어 있으며, 각 포트는 Constant Voltage(CV) 제어가 적용되어, 100V로 제어된다. 그리고 QAB 컨버터의 각 포트는 주 변압기에 결합되어, 각 포트의 레그 간 전압 위상 차에 따라 전력 흐름을 제어할 수 있다. 따라서 외부 계통 사고 시에도 연결된 ESS로부터 부족한 전력을 보상받아 부하와 연결된 포트의 전압을 일정하게 유지할 수 있다.

2.1.2 PHIL 시스템의 Software 구성 및 동작 원리

제안하는 Test-bed의 소프트웨어 구성은 그림 2와 같이 가상 모델로 구성된다. 가상 모델은 1-MVA급 다채널 전기자동차 충전기 시스템과 Fault 모델로 구분된다. 먼저 그림 2와 같이 충전기 시스템은 3상 22.9 kV AC 배전 계통과 상별로 333.33 kW의 다채널 충전기가 연결되어 있다. 그리고 상별로 모델링 된 AC/DC 컨버터는 입력 AC 전압 13.2 kV를 출력 DC 전압 20 kV로 변환한다. 특히 전력 하드웨어와 연결되는 R상 AC/DC 컨버터 모델은 CC 제어가 적용되었다. 따라서 CC 제어에 의해 출력된 전류 i_{SW} 는 i_{HW} 로 scale-down 되어, PI를 통해 전력 하드웨어로 출력된다. 그리고 AC 배전 계통에 구현된 Fault 모델을 통해, 선간 사고, 지락 사고, C.O.S 사고 상황을 모사할 수 있다.

2.2 PHIL 시뮬레이션 ITM Scaling 기법

2.2.1 인터페이스 알고리즘

인터페이스 알고리즘은 PHIL 시뮬레이션의 하드웨어 시스템과 소프트웨어 시스템을 결합하는 방법이다. 인터페이스 알고리즘은 PHIL 시뮬레이션의 정확도와 안정도에 영향을 주기 때문에 구현하고자 하는 시스템의 특성에 따라 인터페이스 알고리즘을 적절히 선택해야 한다^[2]. 여러 인터페이스 알고리즘

중에서, ITM은 정확도 및 구현 난이도에서 이점이 있으며, scaling이 쉽다는 장점이 있다^[2]. 본 논문에서는 PHIL 시스템의 정확도와 전압 및 전류의 Scaling을 고려하여 ITM을 선택하였다. 그림2의 전압 및 전류 Scaling 상수 $k_{S,V}$, $k_{S,C}$ 를 통해 제한된 PI의 출력 범위 내에서 전압 및 전류를 Scaling 할 수 있다.

동작 원리는 가상 모델의 i_{SW} 가 $1/k_{S,C}$ 배 되어 i_{HW} 로 출력된다. 그리고 전력 하드웨어의 입력 임피던스 Z_{HW} 에 의해 전력 하드웨어의 입력 전압 V_{HW} 가 형성되고, V_{HW} 가 $k_{S,V}$ 배 되어, 가상 모델 내의 V_{SW} 로 feedback된다.

2.2.2 인터페이스 알고리즘의 ITM Scaling 기법

전력 하드웨어를 Scaling을 통해 가상 모델에서 대용량 전력 하드웨어로 모사할 수 있다. 그림 2에서 전력 하드웨어 1-kW급 QAB 컨버터 2대의 정격 용량과 정격 출력 전압 및 전류, 입력 임피던스는 각각 P_{HW} , V_{HW} , I_{HW} , Z_{HW} 정의하며, 가상 모델에서 Scaling된 333.33-kW급 QAB 컨버터의 정격 용량과 정격 출력 전압 및 전류, 입력 임피던스는 각각 P_{SW} , V_{SW} , I_{SW} , Z_{SW} 로 정의된다. scaling 관계를 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} k_{S,P} &= \frac{P_{SW}}{P_{HW}} = \frac{333.33kW}{2kW} = 166.67 \\ k_{S,V} &= \frac{V_{SW}}{V_{HW}} = \frac{20kV}{400V} = 50 \\ k_{S,C} &= \frac{I_{SW}}{I_{HW}} = \frac{k_P}{k_V} = \frac{166.67}{50} = 3.33 \end{aligned} \quad (1)$$

(1)에서, $k_{S,P}$, $k_{S,V}$, $k_{S,C}$ 는 각각 전력 하드웨어와 가상 모델 간 용량, 전압, 전류의 Scaling 비율 상수이다. 이상적인 변압기 특성에 의해 하드웨어의 전류 변동률과 소프트웨어의 전류 변동률은 같다. 따라서 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{|\Delta I_{SW}|}{|I_{SW}|} = \frac{|\Delta I_{HW}|}{|I_{HW}|} \rightarrow \frac{|\frac{\Delta V_{SW}}{Z_{SW}}|}{|I_{SW}|} = \frac{|\frac{\Delta V_{HW}}{Z_{HW}}|}{|I_{HW}|} \quad (2)$$

(2)에서, ΔI_{SW} , ΔI_{HW} 는 각각 가상 모델의 전류 변화량, 전력 하드웨어의 전류 변화량이다. 그리고 ΔV_{SW} , ΔV_{HW} 는 각각 가상 모델의 전압 변화량, 전력 하드웨어의 전압 변화량이다. (2)를 바탕으로 Z_{SW} 와 Z_{HW} 의 스케일링 비율을 (3)과 같이 정의할 수 있다.



그림 3 제안하는 PHIL 시뮬레이션 Test-bed 구성
Fig. 3 Proposed PHIL Simulation Test-bed Configuration

$$\frac{k_{S_V} \cdot \Delta V_{HW}}{Z_{SW} \cdot I_{HW}} = \frac{\Delta V_{HW}}{I_{HW}} \rightarrow Z_{SW} = \frac{k_{S_V}}{k_{S_C}} \cdot Z_{HW} \quad (3)$$

(3)을 통해, 전력 하드웨어의 입력 임피던스와 가상 모델의 입력 임피던스의 Scaling 비율을 구할 수 있다. 따라서 본 Test-bed의 임피던스의 스케일링 비율 k_{S_V}/k_{S_C} 는 15이므로, 전력 하드웨어 입력 임피던스는 가상 모델에서 15배가 된다.

3. 실험 결과

본 논문에서 제안하는 PHIL 시뮬레이션 Test-bed를 이용하여 정상상태 Power Scaling 동작 확인과 지락 사고 시 전기 자동차의 입력전압 400 V와 부하(전기 자동차) 전압 100 V 제어 성능 시험을 통해 Test-bed의 실효성을 검증하고자 한다. 실험구성은 그림 3과 같이 DRTS, PI, QAB Converter 2대, E-load, Load, ESS-Emulator, PC로 구성한다. 그림 4와 그림 5의 (a)는 AC/DC 컨버터의 입력전압, (b)는 AC/DC 컨버터의 출력전류, (c)는 AC/DC 컨버터 출력전압, (d)는 AC/DC 컨버터 출력전류, (e)는 QAB 컨버터 포트 별 전압 및 전류, (f)는 QAB 컨버터의 포트 별 변압기 전압 파형이다. 그리고 (a), (b), (c), (d)의 R상, S상, T상 파형은 각각 빨간색, 파란색, 검은색이다.

그림 4는 R상 정상상태의 1-MVA 충전기 시스템 동작 파형을 나타낸다. 특히 R상 QAB 컨버터 2대의 입력 포트는 CV 제어를 수행하므로 가상 모델의 R상 컨버터 AC/DC 컨버터는 CC 제어하여 16.5 A의 가상 전류를 $1/k_{S_C}$ 배만큼 Scale-down 하여 PI를 통해 5 A가 QAB 공급됨을 확인할 수 있다. 그리고 입력되는 전력 2 kW에 비해 부하에서 소모하는 전력(700 W*QAB 2대)이 작기 때문에 ESS는 약 -6 A로 충전되고 있음을 확인할 수 있다. 이는 ESS 및 부하 포트 레그 전압이 QAB 입력 포트 레그 전압보다 앞서 있는 것으로부터 알 수 있다.

그림 5는 R상 지락 시 1-MVA 충전기 시스템 동작 파형을 나타낸다. R상에 지락이 발생한 후, 3상 입력 전압에 Sag가 발생하며, 이에 따라 3상 입력 전류가 증가했다. 하지만 AC/DC 컨버터 제어에 의해 20 kV 및 16.5 A로 일정하게 제어하므로 실제 Scale-down 한 QAB 컨버터의 정상 동작을 확인하였다.

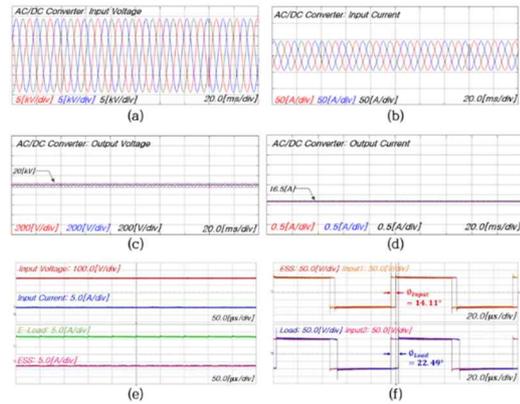


그림 4 R상 정상상태 1-MVA 충전기 시스템 동작 파형
Fig. 4 1-MVA charger system operation waveform at steady state of R phase

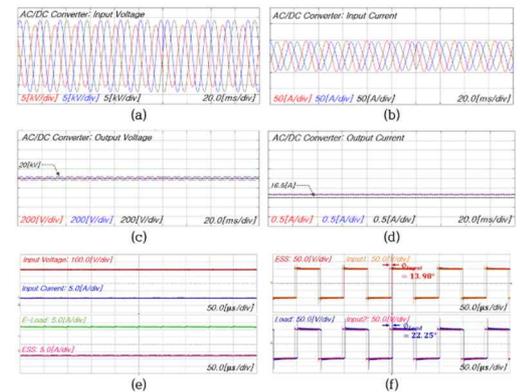


그림 5 R상 지락 시 1-MVA 충전기 시스템 동작 파형
Fig. 5 1-MVA charger system operation waveform at R phase ground fault

4. 결론

본 논문에서는 전기자동차 충전기 시스템의 신뢰성 및 안정성을 검증하기 위해 PHIL 시뮬레이션 Test-bed를 제안하고, 이를 통해 정상상태 및 지락 상태에서의 제어 성능 및 Power Scaling 동작을 확인하였다. 실험 결과, Test-bed가 정상 동작하며, 지락 상황에서도 일정한 제어가 가능함을 확인하였다. 따라서 전기자동차 충전기 시스템의 신뢰성 및 안정성 검증을 위해, PHIL 시뮬레이션 Test-bed를 활용하는 것이 적절하다는 결론이 도출되었다. 또한 이 연구를 통해 PHIL 시뮬레이션 Test-bed가 전기자동차 충전기 시스템 검증에 유용하게 활용될 수 있음을 보여주었다.

본 연구는 산업통상자원부(MOITE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No.20193810100010)

참고 문헌

[1] K. -W. Heo and J. -H. Jung, "DC Microgrid Testbed for Testing Operation between Power Converter and DC Microgrid under Fault Situations using PHIL Simulation Technique," 2021 24th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Gyeongju, Korea, Republic of, 2021, pp. 1014-1018

[2] W. Ren, M. Steurer and T. L. Baldwin, "Improve the Stability and the Accuracy of Power Hardware-in-the-Loop Simulation by Selecting Appropriate Interface Algorithms," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 44, no. 4, pp. 1286-1294