

DC 마이크로그리드의 Power HIL 모의 테스트를 위한 전력 시스템 모델링 및 제어 알고리즘에 관한 연구

허경욱, 최현준, 이준영, 심주영, 정지훈
울산과학기술대학원 (유니스트)

Study on Modeling and Control Algorithm of DC Microgrid for Power Hardware-in-the-Loop (PHIL) Test

Kyoung-Wook Heo, Hyun-Jun Choi, Jun-Young Lee, Ju-Young Sim, Jee-Hoon Jung
Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST)

ABSTRACT

본 논문에서는 실시간 시뮬레이터를 이용하여 DC 전력시스템의 모델링하고, Power Hardware-in-the-Loop (PHIL) 모의 테스트를 통해 DC 마이크로그리드에 적용 가능한 컨버터의 전력제어 알고리즘의 실효성을 검증하고자 한다. PHIL 모의시험 테스트 기법을 이용해 DC 마이크로그리드의 자율운전을 모사할 수 있는 Test-Bed를 제안하고자 한다. 이를 통해 부하변화에 따른 운전 모드, 사고 상황 대처 알고리즘 등 DC 마이크로그리드에 연계된 전력변환장치의 전력제어 방법 및 실효성을 검증을 하고자 한다. 모의시험과 3 kW급 컨버터 시작품을 이용하여 제안하는 DC 마이크로그리드의 시험환경을 검증하고 전력제어 알고리즘의 신뢰성 및 안정성을 검증한다.

1. 서론

최근 신재생 에너지원 및 분산전원의 계통 연계 시 에너지 효율이 중요시되면서 DC 마이크로그리드에 대한 관심이 증가하고 있다. 그리드의 경우 전력량이나 규모가 크기 때문에 최적 운영방법 및 사고 상황 등을 실제로 구현하여 검증하기 힘들다. 이로 인해 기존의 AC 그리드의 경우 그리드의 모델링에 대한 연구가 진행되어 왔지만 DC 그리드의 Power Hardware-in-the-Loop (PHIL) 모델링 및 자율운전 등에 대한 연구는 AC에 비하여 매우 적은 상황이다^[1].

그리드의 신뢰성을 테스트하기 위해 다양한 부하상황에서 시스템을 동작하게 되는데 이러한 시험은 시간과 공간적 제약이 따르고 위험한 전력 시험이 동반되기도 한다. 이러한 문제를 극복하기 위해 PHIL 모의시험이 제안되었다. PHIL 모의시험은 전력 시스템을 실시간으로 모사하고 시뮬레이터로 모사된 가상의 전력 시스템은 ESS(Energy Storage System), 전력변환장치와 함께 동작하면서 DC 마이크로그리드의 동작 테스트를 수행할 수 있다. 전력인터페이스 장치를 통해 전력시스템의 결과를 실제 전력으로 출력하여 실제 그리드를 모사하는데 유용하다^[2]. 따라서 PHIL 모의시험을 통해 실험실 레벨에서 DC 마이크로그리드를 구현할 수 있다. 구현된 그리드에 ESS 및 다른 DC계통을 연계하여 Test-Bed를 구축할 수 있다. 일반적으로 Test-Bed는 DC Bus Signaling (DBS) 제어를 기반으로 그리드의 안정성을 검증하게 된다. DBS 제어의 경우 그리드 구성요소 간 통신이 필요하지 않고, 전압의 레벨을 통신 수단으로 사용하기 때문에 비교적 간단하게 그리드 내 전력의 흐름

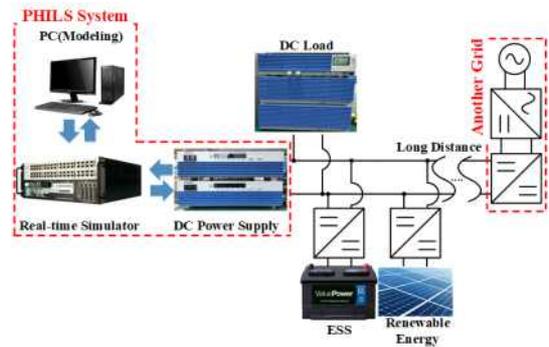


그림 1 PHIL 모의시험 시스템 구성
Fig. 1 Conceptual Diagram of PHIL Simulation System

을 알 수 있으며, 이를 통해서 구성요소 간의 긴밀한 상호작용이 가능하고 나아가 자율적으로 시스템을 제어할 수 있다. 본 논문에서는 PHIL 모의시험 기법을 이용하여 DC 마이크로그리드 (20kW)를 모델링하고, ESS의 연계를 통해 그리드를 구현한다. 실제 그리드 상황을 가정하여 실제 컨버터를 이용한 3 kW급 DC 마이크로그리드와의 연계를 통해 Test-Bed를 구축한다. 최종적으로 DBS 제어의 적절성과 DC 마이크로그리드의 안정성을 시험하고자 한다.

2. DC 마이크로그리드 구조

제안하는 PHIL 모의시험 시스템은 그림 1과 같이 AC/DC컨버터로 모델링 된 380V DC 마이크로그리드, 프로그래머블 DC전원공급장치로 구성된다.

전력 배전 시스템은 AC를 사용하기 때문에 양방향 AC/DC 컨버터는 DC 마이크로그리드와 AC그리드 간 상호 작용을 담

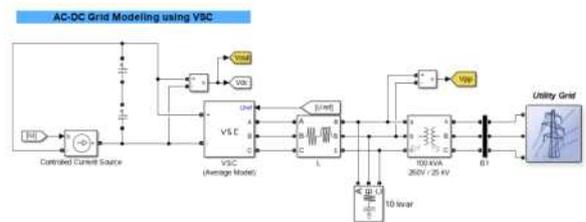


그림 2 PHIL AC/DC 컨버터 모델링
Fig. 2 PHIL AC/DC Converter Modeling

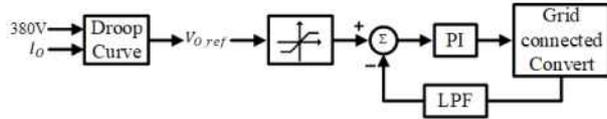


그림 3 PHIL AC/DC 컨버터 모델링에 적용된 전력제어 알고리즘
Fig. 3 Algorithm applied to PHIL AC/DC converter Modeling

당한다. 또한 양방향 AC/DC 컨버터는 DC 마이크로그리드의 Bus 전압을 조절한다. 이를 위해 AC/DC 컨버터를 모델링하여 그림 2와 같이 구성하였다. 그러나 본 논문에서는 실험실의 설비적 한계로 인해, AC 그리드에서 전력을 주는 방향만 고려하여 시스템을 구성하였다. 그림 3은 모델링 한 AC/DC 컨버터에 적용된 알고리즘이다. DBS 제어를 통해 DC Bus의 전압의 변화에 따른 그리드의 동작을 가능하게 한다.

ESS 시스템의 경우 충·방전을 위해 양방향 DC/DC 컨버터로 Current-Fed Dual Active Bridge (CF-DAB) 컨버터를 사용했다. CF-DAB 컨버터는 전압 이득을 1로 만들 수 있으며 이로 인해 ZVS(Zero Voltage Switching)영역에서 스위치가 동작할 수 있게 한다. 또한 입력단의 인덕터 필터로 인해 작은 전류 리플을 달성할 수 있어서 ESS가 충·방전을 하는데 유리하다. 따라서 구성된 ESS와 그리드를 연결하는 컨버터로 CF-DAB 컨버터를 선정했으며 그림 4와 같다.

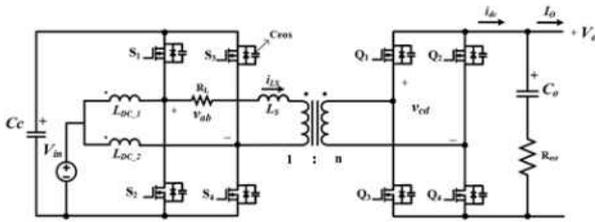


그림 4 Current Fed DAB 컨버터 회로도
Fig. 4 Circuit Diagram of Current-Fed DAB Converter

그리드 탈락 시(정전 및 자연재해 등) 타 그리드로부터 에너지를 공급받기 위해 본 논문에서는 AC/DC 컨버터 및 DC/DC 컨버터를 그림 1과 같이 구성하였다. AC/DC 컨버터는 SPWM 기법을 이용한 양방향 Boost 컨버터로 구성했다. 양방향 Boost 컨버터는 단위 역률로 동작하여 계통 연계 시 무효전력을 감소시킬 수 있는 이점을 가진다. DC/DC 컨버터는 Voltage-Fed Dual Active Bridge(VF-DAB) 컨버터로 구성되었다. VF-DAB 컨버터는 소프트 스위칭이 가능하며 연속적인 양방향 전력 제어를 할 수 있다.

DC 부하의 경우 전자 부하를 사용하여 상황에 맞춰 전류를 제어할 수 있도록 구성하였다.

표 1 동작 모드에 따른 PHIL 시스템 동작
Table 1 PHIL System operation depending on operation mode

	모드 I (387-380V)	모드 II (380-373V)	모드 III (373-366V)	모드 IV (366-360V)	모드 V (<360V)
PHIL	주 그리드 동작	주 그리드 동작	주 그리드 동작	그리드 탈락	그리드 탈락
ESS	충전/대기	충전/대기	방전/대기	주 그리드 동작	대기
타 그리드	대기	대기	대기	대기	주 그리드 동작
재생에너지	발전/대기	발전/대기	발전/대기	발전/대기	대기

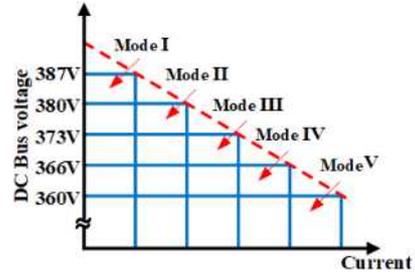


그림 5 DC Bus 전압에 따른 동작 모드
Fig. 5 Operation mode depending on DC Bus voltage

3. DC 마이크로그리드 Test-Bed 동작 원리

DC 마이크로그리드의 전력 균형 및 안정적인 동작을 위해서 DC Bus 전압을 이용한 DBS 제어를 적용하였다. 따라서 그리드 구성요소 간 통신이 필요하지 않고 비교적 간단하게 그리드 내 전력을 제어 할 수 있다^[3].

ESS와 타 그리드 연계를 기반으로 한 제안하는 DC 마이크로그리드 전력제어 알고리즘은 그림 5 및 표1과 같이 요약할 수 있다. 동작 모드는 모드 I부터 모드 V까지 다섯 가지 모드로 나눌 수 있으며 각각의 모드는 서로 다른 DC Bus 전압에 의해 구분된다. DC 마이크로그리드의 공칭 전압은 380 V이고, 서로 다른 DC Bus 전압은 다른 동작모드를 의미한다.

$$V_{O_ref} = 380V - K_d I_O \quad (1)$$

식 (1)에 의해 DC Bus 전압이 변하게 되고, 즉 부하의 상황에 따라서 모드가 나뉜다. V_{O_ref} 는 DC Bus 전압을 의미하고, K_d 는 드롭(Droop) 계수, I_O 는 DC Bus에 흐르는 전류를 의미한다. I_O 의 변화에 따라 DC Bus 전압이 변하고, 모드가 나뉘게 된다.

모드 I : DC Bus 전압 = 387V-380V. 모드 I 구간에서는 PHIL 시스템에서 일정한 전압을 유지하며 그리드에 전원을 공급한다. 만약 신재생에너지가 발전하게 되면, 그리드 전압이 올라가게 되고, ESS가 충전을 할 수 있게 된다. 만약 ESS가 SOC에 도달하여 최대 충전을 하게 되면 더 이상 충전할 수 없게 되고 따라서 DC Bus 전압이 387V까지 상승하게 되며, 버스 전압이 387V 이상 시 과전압 보호회로가 작동하게 된다.

모드 II : DC Bus 전압 = 380V-373V. 모드 II 구간에서는 PHIL 시스템에서 일정한 전압을 유지하며 그리드에 전원을 공급한다. 이 모드에서는 재생 에너지가 발전을 하고 있으며, 이 구간에서는 DC 부하에 의해 전류가 변하게 된다. 만약 소모하는 부하보다 재생에너지의 발전량이 크게 되면 ESS가 충전 동작을 하고, 재생에너지의 발전량과 그리드에서 보내는 전력의 합이 부하에서 원하는 전력보다 작아질 경우 DC Bus 전압이

부하에 따라서 373V까지 감소하게 되고 모드 III로 전환된다.

모드 III : DC Bus 전압 = 373V-366V. 모드 III 구간에서는 타 그리드는 대기상태이며, PHIL 시스템에서 일정한 전압으로 그리드에 전원을 공급한다. 이 경우 ESS의 상황에 따라서 ESS는 방전 및 재생에너지를 발전하여 그리드의 에너지 공급을 도와준다. 모드 III의 경우 부하가 점점 증가하며, PHIL의 모델링한 그리드는 52.6A (실제 부하단 : 7A)를 공급하고 있다. 만약 부하가 증가하여 DC Bus의 전압은 366V까지 감소하게 되면 모드 IV로 전환된다.

모드 IV : DC Bus 전압 = 366V-360V. 모드 IV 구간에서는 366V 도달 시, PHIL 시스템이 주 그리드에서 탈락하게 되고 ESS가 366V의 일정한 전압을 공급하며 주 그리드 역할을 하게 된다. 부하는 7A를 유지하며 재생에너지는 발전에 따라 그리드에 에너지 공급을 지원한다. 부하 상황에 따라서 DC Bus의 전압이 360V에 도달하게 되면 모드 V로 전환된다.

모드 V : DC Bus 전압 < 360V. 모드 V 구간에서는 DC Bus 전압이 360V 도달 시 PHIL 시스템으로부터 전력 전달이 끊어지게 되고, 타 그리드에서 PHIL 시스템으로부터 탈락된 그리드를 제어한다. AC/DC 컨버터 및 DC/DC 컨버터가 동작하여 주 그리드를 연계하고 380V의 일정한 전압을 공급하며, 메인 그리드가 다시 연결되기 전까지 주 전압원으로써 동작하게 된다.

4. 실험 결과

전력 제어 알고리즘을 포함한 DC 마이크로 그리드는 그림 6과 같이 실시간 시뮬레이터, 프로그래머블 DC 전원공급장치, DC 부하, ESS, 그리고 컨버터로 구성된다. 단, 본 연구에서는 단방향 DC 전원공급장치를 사용했기 때문에, ESS의 방전만을 고려하여 실험을 진행하였다. 시뮬레이션의 경우 20 kW 그리드를 모델링 하였으며 실제 7 A의 부하를 52.6 A에 맞추어 실험을 진행하였다.

그림 7에서 모드 III의 경우 주 그리드에서 2 A의 전류를 공급하며 380 V를 유지한다. 부하의 증가에도 불구하고 재생에너지의 에너지 공급에 의해 주 그리드의 에너지 공급이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 부하가 지속적으로 증가하여 최대 부하(7 A)에 도달하게 되면 그리드가 366 V로 제어된다. 그림 8을 통해 볼 수 있듯 만약 DC 부하가 그리드에서 줄 수 있는 부하보다 많은 전력을 요구하면 결국 DC Bus 전압이 360 V보다 낮아져 PHIL 모의시험 장치는 시스템으로부터 탈락되어 모드 V로 전환된다. 이 때, 타 그리드에서 일정한 전압을 공급하며 360 V보다 낮은 DC Bus 전압을 380 V로 제어한다.



그림 6 PHIL 가상 DC 마이크로그리드 Test-Bed
Fig. 6 PHIL Virtual DC Microgrid Test-Bed

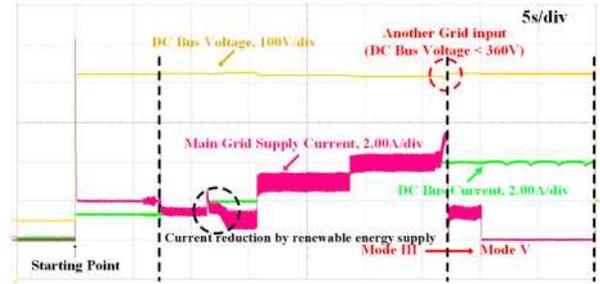


그림 7 PHIL 시스템 파형(모드 III → 모드 V)
Fig. 7 PHIL System waveform(Mode III → Mode V)

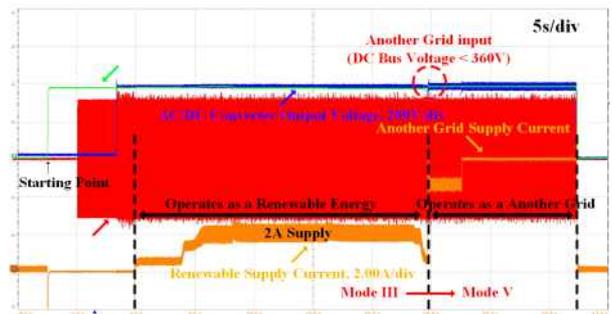


그림 8 타 그리드 & 재생에너지 파형(모드 III → 모드 V)
Fig. 8 Another Grid & Renewable Energy waveform (Mode III → Mode V)

5. 결론

본 논문에서는 PHIL 모의시험 기술을 통해 DC 마이크로 그리드의 자율운전을 모사할 수 있는 Test-Bed를 제안하고, 그리드 구성요소 간의 DBS 제어에 대해 연구하였다. 최종적으로 전력 제어 알고리즘을 이용한 PHIL 실시간 모의시험과 3 kW 급 컨버터 시작품을 통해 주 그리드가 정전 및 과부하 등의 이유로 탈락 시 타 그리드에서 탈락된 그리드의 전력을 제어할 수 있음을 실험적으로 확인하여 그리드의 신뢰성 및 안정성의 향상에 대한 가능성을 검증하였다.

이 논문은 2019년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 중견연구사업임 (NRF-2019R1A2B5B01069665)

참고 문헌

- [1] 오세승, (2013). 마이크로그리드 구현을 위한 PHILS 기술. 전력전자학회지, 18(6), 31-36.
- [2] M. Prodanovic, A. Rodríguez-Cabero, M. Jiménez-Carrizosa and J. Roldán-Pérez, "A rapid prototyping environment for DC and AC microgrids: Smart energy integration Lab (SEIL)," 2017 IEEE Second International Conference on DC Microgrids (ICDCM), Nuremburg, 2017, pp. 421-427.
- [3] K. Sun, L. Zhang, Y. Xing and J. M. Guerrero, "A Distributed Control Strategy Based on DC Bus Signaling for Modular Photovoltaic Generation Systems With Battery Energy Storage," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 26, no. 10, pp. 3032-3045, Oct. 2011.