

컨버터와 DC 마이크로그리드 사고 상황의 상호작용을 검증하기 위한 실시간 전력 시뮬레이션 테스트 베드

허경욱¹, 정지훈[†]

Power Hardware-in-the-Loop (PHIL) Simulation Testbed for Testing Electrical Interactions Between Power Converter and Fault Conditions of DC Microgrid

Kyung-Wook Heo¹ and Jee-Hoon Jung[†]

Abstract

Nowadays, a DC microgrid that can link various distributed power sources is gaining much attention. Accordingly, research on fault situations, such as line-to-line and line-to-ground faults of the DC microgrid, has been conducted to improve grid reliability. However, the blackout of an AC system and the oscillation of a DC bus voltage have not been reported or have not been sufficiently verified by previous research. In this study, a 20 kW DC microgrid testbed using a power HIL simulation technique is proposed. This testbed can simulate various fault conditions without any additional grid facilities and dangerous experiments. It includes the blackout of the DC microgrid caused by the AC utility grid's blackout, a drastic load increment, and the DC bus voltage oscillation caused by the LCL filter of the voltage source converter. The effectiveness of the proposed testbed is verified by using Opal-RT's OP5707 real-time simulator with a 3 kW prototype three-port dual-active-bridge converter.

Key words: VSC (Voltage Source Converter), PHIL (Power Hardware-in-the-Loop), DC microgrid, Blackout, DAB (Three-port Dual Active Bridge) converter

1. 서 론

최근 효율적인 에너지 사용이 중요시되면서 그림 1과 같이 신재생에너지와 같이 다양한 분산전원을 연계할 수 있는 DC 마이크로그리드가 주목을 받고 있다^[1]. 이에 따라 DC 마이크로그리드의 사고 상황을 모델링하여 신뢰성을 검증하는 연구가 보고되었다^{[2]-[4]}. 참고문헌 [2]에서는 DC 마이크로그리드의 DC Bus 단 접지 구조에 따라 DC Bus의 선간 단락 및 지락 사고 시 사고 전압, 전류를 모사하여 신뢰성 높은 접지 구조를 제시하였다. 특히, 참고문헌 [3]에서는 DC 마이크로그리드를 연결하

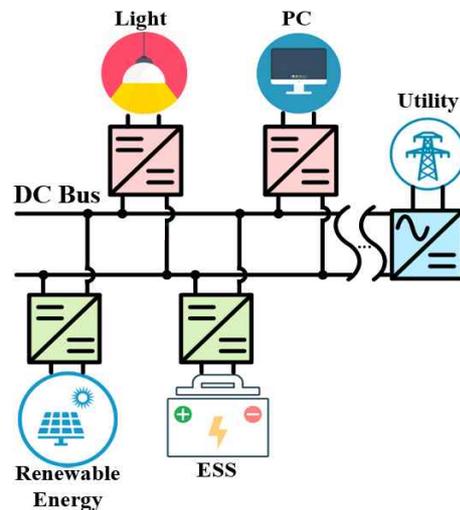


Fig. 1. Conceptual structure of DC microgrid.

는 도선의 길이가 짧아짐에 따라 선간 단락 및 지락 사고 시 발생하는 큰 di/dt 의 사고 전류를 FPGA 기반의

Paper number: TKPE-2021-26-2-11

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: jhjung@unist.ac.kr, Department of Electrical Engineering, UNIST, Korea

Tel: +82-52-217-2140 Fax: +82-52-217-2109

¹ Department of Electrical Engineering, UNIST, Korea
Manuscript received Feb. 2, 2021; revised Feb. 17, 2021;
accepted Feb. 23, 2021

시뮬레이터를 통해 정확하게 모사하였다. 참고문헌 [2], [3]과 달리 참고문헌 [4]에서는 PV, ESS 및 다양한 DC 부하 및 유틸리티 그리드를 포함하는 DC 마이크로그리드를 모델링하였다. 모델링된 DC 마이크로그리드의 과부하 사고 상황에서 핵심부하와 비 핵심부하를 구분하여 비 핵심부하를 그리드와 분리하여 신뢰성을 유지할 수 있음을 검증하였다.

그러나 위의 연구에서 보고되지 않았거나 DC 마이크로그리드에서 충분히 검증되지 않은 사고 상황이 존재한다. 기존 유틸리티 그리드에서는 갑작스러운 과부하 또는 정전으로 인해 그리드의 주파수와 전압이 감소하여 정전에 이를 수 있다^[5]. 그러나 DC 마이크로그리드는 기존 유틸리티 그리드와 연계되는 점을 고려했을 때, 이전 연구에서와 같이 유틸리티 그리드의 사고 상황으로 인한 DC 마이크로그리드에 미치는 영향은 아직 연구되지 않았다. 참고문헌 [6]에서는 전압원 컨버터(Voltage Source Converter, VSC)의 입력단에 구성되는 LCL 필터 또는 LC 필터의 인덕터에 의해 형성되는 우반면의 영점(RHPZ)으로 인해 그리드 시스템이 불안정해질 수 있음을 검증하였다. 그러나 시뮬레이션 기반의 분석으로 인해 실제 상황과 큰 오차를 야기할 수 있다.

시간적 공간적 규모가 큰 그리드의 경우 사고 상황을 실제 그리드에 적용하여 실험적으로 신뢰성을 검증하는 것은 많은 시간이 소요될 뿐만 아니라 경제적이지 못하다. 이러한 그리드의 특성으로 인해 과거에는 컴퓨터 시뮬레이션, 현장 실험 및 독립형 하드웨어 검증을 통한 분석이 주를 이루었다^{[7],[8]}. 컴퓨터 시뮬레이션의 경우가상공간에서 이론적인 모델을 기반으로 하기 때문에 시뮬레이션과 실험 결과 사이에 상당한 오차가 있다. 현장 실험 및 독립형 하드웨어 검증의 경우 실제 규모와 비용 제한으로 인해 특정 환경에 제한하여 검증이 이루어졌다. 특히 실제 전력망의 사고 상황을 모사하는 전력 시험은 시험 그리드와 장비 및 시험자에게 위험할 수 있다.

이러한 한계를 극복하기 위하여, Power Hardware-in-the-Loop(PHIL) 시뮬레이션 개념이 제안되었다^[9]. 가상의 컨버터 모델을 사용하는 오프라인 시뮬레이션과 달리, PHIL 시뮬레이션은 실제 컨버터 하드웨어를 사용하여 다양한 실험 조건을 제공할 수 있다. 또한, 현장 실험이나 독립형 하드웨어 검증에서는 실험할 수 없는 사고 상황을 쉽게 모사할 수 있다. 이러한 장점을 활용하여 그리드의 사고 상황을 모사하기 위한 PHIL 그리드 테스트 베드가 활발히 연구되고 있다. 참고문헌 [10]에서는 AC 그리드의 의도되지 않은 독립 운전 모드(islanding mode)를 모사하는 모델과 다수의 분산전원과 연계된 실제 인버터의 상호작용을 실험적으로 검증하여 테스트 베드로서의 실효성을 확인하였다. 참고문헌 [11]의 경우 사고 상황 시 유틸리티 그리드에 연결된 부하 시 전압조정기(OLTC)의 제어 알고리즘을 검증하기 위

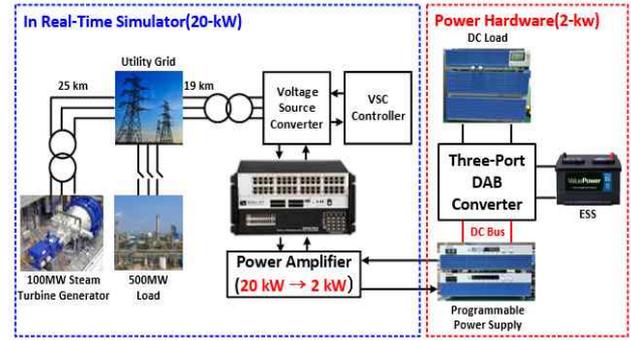


Fig. 2. Conceptual structure of 20-kw DC microgrid PHIL

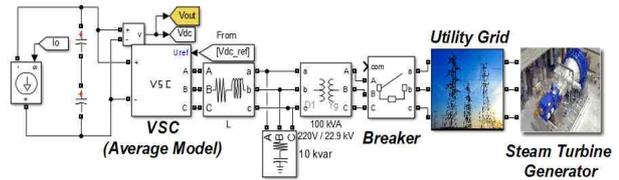


Fig. 3. VSC HIL simulation model.

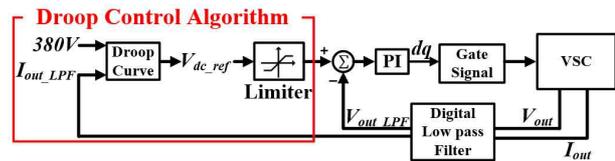


Fig. 4. Block diagram of control algorithm applied to VSC.

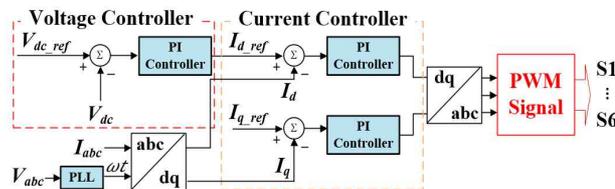


Fig. 5. Block diagram of PI controller used to VSC.

하여 AC 그리드를 모델링하였다. 또한, 전력 증폭기를 통해 실제 모델의 12.66kV의 전력레벨을 173.2V로 축소시켜 AC 그리드에 연계되는 DC 마이크로그리드를 실제 컨버터로 구성하였다. 이로부터 실제 그리드와 유사한 조건에서 부하 시 전압조정기의 제어에 따른 DC 마이크로그리드의 동작을 검증하였다.

본 논문에서는 PHIL 시뮬레이션 기법을 사용하여 DC 마이크로그리드의 사고 상황을 모사할 수 있는 DC 마이크로그리드 테스트 베드를 제안한다. 유틸리티 그리드의 정전 및 급격한 부하 증가로 인한 DC 마이크로그리드의 정전을 가정하여 모델링되며, 이로부터 유틸리티 그리드의 사고 상황에 따른 DC 마이크로그리드의 영향이 분석된다. 또한 VSC의 입력단 필터 인덕터스로 인한 시스템의 불안정성을 DC 버스 전압의 진동으로 모델링하여 진동에 의해 DC 마이크로그리드의 정전으로 이어질 수 있음을 실험을 통해 검증된다. 최종적으로 3 포트 Dual Active Bridge(DAB) 컨버터를 통해 제안하는

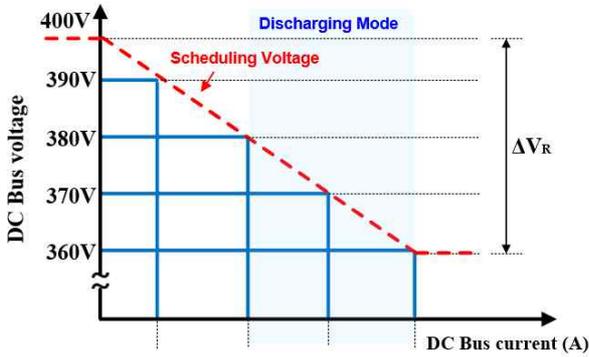


Fig. 6. Droop control of DC bus voltage according to DC bus current.

20-kW DC 마이크로그리드 테스트 베드의 실효성이 검증된다.

2. 20-kW DC 마이크로그리드 테스트 베드

그림 2는 DC 마이크로그리드의 사고 상황을 모사할 수 있는 테스트 베드를 보여준다. 테스트 베드는 20-kW로 설계된 DC 마이크로그리드 모델과 실제 ESS와 부하가 연계된 3 포트 컨버터 하드웨어로 구성된다.

DC 마이크로그리드는 그리드 내 전원 공급 장애 시 신뢰성을 유지하기 위하여 유틸리티 그리드에 연결되는 것이 일반적이다^[12]. 따라서 DC 그리드와 유틸리티 그리드를 연계하기 위해 VSC가 구성된다. VSC를 통해 유틸리티 그리드의 전력을 공급받아 DC 버스 전압을 제어한다. 그리드 내 사고 상황을 모사하기 위하여 VSC의 지령전압이 모델링된다. 또한, 100MW 증기 터빈 발전기와 500MW 부하를 구성하여 유틸리티 그리드의 정전이 구현된다. 따라서 설계된 모델을 통해 사고 상황에서의 컨버터 동작 검증이 가능하다.

2.1 VSC 모델

그림 3은 모델링된 VSC를 보여준다. 유틸리티 그리드로부터 공급되는 22.9kV의 전압은 60Hz 100kVA 저주파 변압기에 의해 강압되어 선간 전압 실효값 220V가 공급된다. 여기에 입력된 220V의 고조파를 제거하기 위해 입력 LC 필터를 추가하였다.

VSC는 그림 4와 같이 드롭 제어(droop control)에 의해 결정된 지령 전압을 받아 센싱된 출력 전압과 비교하고 그림 5의 내부 PI 제어기에 의해 VSC가 지령 값을 추종하며 DC 버스 전압을 제어하게 된다. PI 제어기는 VSC의 입력단 전류와 DC 버스 전압 제어를 위해 두 개의 제어 루프를 형성한다. 첫 번째 제어 루프단 전압 제어기는 출력 전력 상황에 맞춰 전류 지령치 I_{d_ref} 를 형성하여 출력단 DC 버스 전압을 제어한다. 전압 제어 루프에서 나온 전류 지령치 I_{d_ref} 는 전류 제어루프의 PI 제어기 입력값으로 입력된다. 전류 제어 루프의

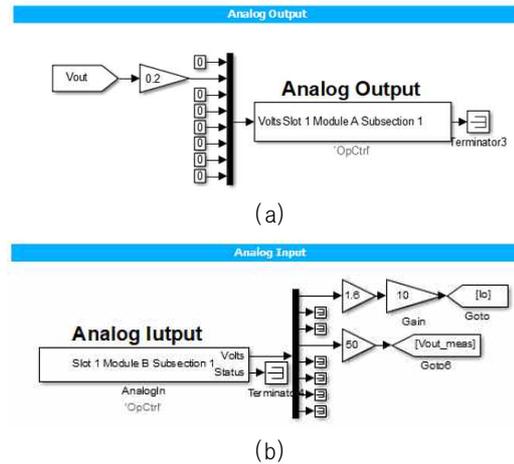


Fig. 7. Analog input and output port models of DC microgrid HIL simulation. (a) Analog output, (b) Analog input.

PI 제어기는 입력된 I_{d_ref} 와 센싱된 3상 전류를 비교해 입력단 3상 전류의 크기를 제어하고 Phase-locked Loop(PLL)를 통해 계산된 3상 계통 전압의 위상을 기준으로 전류의 위상을 제어한다. 이를 통해 VSC의 입력단 전압과 전류를 단위 역률로 제어하고 DC 버스 전압은 최종 제어기에서 계산된 지령전압을 추종하게 된다.

2.2 드롭 제어 모델

DC 마이크로그리드는 다양한 부하와 전원이 DC Bus에 연결되므로 효율적인 전력 관리를 위한 Droop DC-Bus Signaling(DBS) 제어가 적용된다^[13]. 이를 통해 그리드와 연결되어 있는 컨버터가 DC Bus 전압 레벨에 따라 동작하기 때문에 시스템 내의 다른 분산전원과 유기적으로 동작하여 자율 운전을 달성할 수 있는 이점을 가진다.

그림 6은 본 논문에서 구현된 드롭 제어 알고리즘을 보여준다. 그림 6의 DC 버스 전압은 식 (1)에 의해 계산된 V_{dc_ref} 가 VSC의 지령전압으로 입력되어 그리드의 부하 상황에 따라 DC 버스 전압을 제어하게 된다. 380V는 DC 마이크로그리드의 공칭 전압, K_d 는 드롭(droop) 계수, I_o 는 DC 버스에 흐르는 부하전류를 의미한다. 즉, DC 버스에 흐르는 전류가 증가하면 DC 버스 전압이 감소하고 DC 마이크로그리드로 전류가 공급되는 경우 DC 버스 전압이 증가하게 된다. 이로써 VSC에 의해 공칭전압 380V를 가지는 20-kW DC 마이크로그리드가 구현된다.

$$V_{dc_ref} = 380V - K_d I_o \quad (1)$$

2.3 PHIL을 위한 입·출력 포트 설정

전력의 규모가 큰 시스템을 실험실 레벨에서 검증하기에는 시간적 공간적 제약이 존재한다. 따라서 본 논문

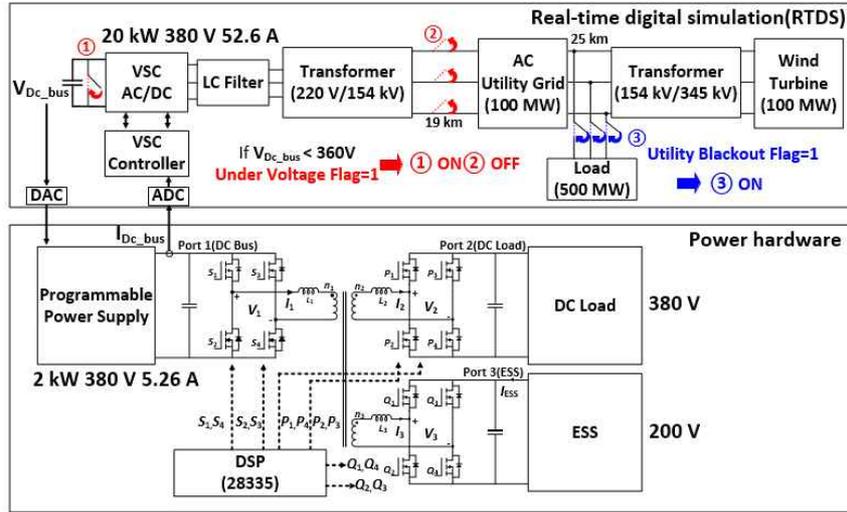


Fig. 8. PHIL simulation schematic including fault model.

에서는 모델링한 20-kW DC 마이크로그리드를 그림 2의 전력 증폭기를 사용하여 실제 2-kW 수준의 전력 변환장치에 매칭하여 출력할 수 있도록 설계하였다. 실시간 시뮬레이터는 OP5707, 전력 증폭기는 PAT500-16T (500V, 16A) 프로그래머블 전원 공급 장치를 사용하였다.

그림 7은 모델링된 DC 마이크로그리드의 입·출력 포트를 보여준다. 그림 7(a)는 실시간 시뮬레이터에서 전원 공급 장치로 입력되는 아날로그 출력포트, 그림 7(b)는 전원 공급 장치에서 실시간 시뮬레이터로 입력되는 아날로그 입력포트를 보여준다. 실시간 시뮬레이터의 아날로그 입·출력 포트는 0-10V의 전압 레벨로 동작한다. 그림 2의 실제 DC 버스 전압이 380V로 동작하기 위하여 그림 7(a)의 V_{out} 변수에 0.2가 곱해져 7.6V의 전압 레벨을 가진 신호로 변환한다. 따라서 최대 500V를 출력할 수 있는 전원 공급 장치에 입력되어 $500 \times 7.6/10 = 380V$ 를 출력하게 된다. 반대로 실제 출력되는 380V DC 버스 전압의 경우 전원 공급 장치로부터 아날로그 입력포트를 통해 7.6V를 입력받는다. 따라서 입력된 값에 50을 곱해줌으로써 모델에서는 실제 380V DC 버스 전압으로 인지하게 된다. 그러나 DC 버스 전류의 경우 20-kW의 전력을 2-kW에 매칭하기 위하여 2-kW 380V 5.26A를 20-kW의 380V 52.6A로 10배 증폭시켜 VSC 모델로 공급되어야 한다. 따라서 실제 최대 부하 시 공급되는 3.2875 V(5.26A)의 신호 레벨에 10을 곱해줌으로써 DC 버스에 흐르는 전류가 52.6A로 매칭된다.

3. 사고 상황 모델링

3.1 정전 모델

모델링된 DC 마이크로그리드의 정전 상황은 지속적인 부하 증가에 의한 정전 상황, 유틸리티 그리드의 사

고 상황에 의한 DC 마이크로그리드의 정전 상황 두 가지로 나뉘며 그림 8의 구조를 가진다.

3.1.1 부하 증가에 의한 DC 마이크로그리드의 정전

그림 3과 같이 모델링된 VSC는 부하량에 따라 그림 6의 드롭 제어에 의해 계산된 DC 버스 지령전압을 공급받아 DC 버스 전압을 제어한다. 이러한 특징을 이용하여 부하량 증가에 의한 DC 마이크로그리드의 정전 상황이 모사된다.

그림 8의 VSC로부터 출력되는 DC 버스 전압을 측정하여 VSC 제어기 내부의 정전 모델로 입력된다. 부하가 지속적으로 증가하여 식 (1)에 의해 DC 버스 전압이 360V(52.6A) 이하로 하강하면 under voltage flag가 트립된다. under voltage flag가 트립되는 순간 그림 8의 스위치 ①, ②에 의해 DC 버스 단을 단락시킴과 동시에 유틸리티 그리드와 분리시켜 DC 버스로의 전력 공급이 차단된다. 최종적으로 프로그래머블 전력 공급 장치의 출력 전압이 0V로 급히 하강하여 부하 증가에 의한 DC 마이크로그리드의 정전 상황이 전개된다.

3.1.2 유틸리티 그리드의 사고 상황에 따른 DC 마이크로그리드의 정전

유틸리티 그리드의 사고 상황에 따른 DC 마이크로그리드의 영향을 분석하기 위하여 유틸리티 그리드의 사고 상황이 모델링된다. 그림 8의 유틸리티 그리드는 3상 100MW의 전원으로 모사되어 19km 떨어진 지점에서 220V/154kV 변압기에 의해 20-kW DC 마이크로그리드와 연계된다. 또한, 유틸리티 그리드의 전력 공급을 돕기 위하여 유틸리티 그리드로부터 25km 떨어진 지점에서 154kV/345kV 변압기에 의해 100MW의 증기 터빈 발전기가 추가로 연계된다. 그러나 utility blackout flag가 트립되는 순간 스위치 ③에 의해 500MW의 부하가

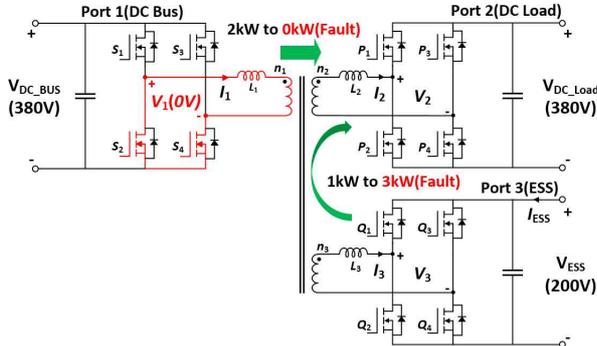


Fig. 9. Schematic and operation of three-port DAB converter.

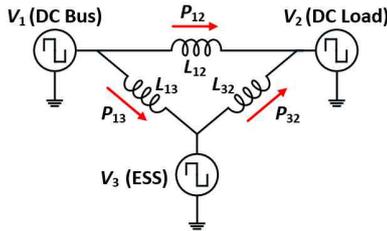


Fig. 10. Equivalent circuit diagram of three-port DAB converter.

투입되어 유틸리티 그리드와 증기 터빈 발전기에 의한 공급량보다 부하량이 커진다. 따라서 참고문헌 [5]와 같이 유틸리티 그리드의 주파수와 전압이 하강하는 상황이 모사된다.

3.2 진동 모델

VSC의 입력단에 구성되는 LCL 필터 또는 LC 필터의 L에 의해 VSC 개루프 전달함수에 우반면 영점 (RHPZ)을 형성한다. 따라서 위상 여유 부족으로 인해 10kHz 이하의 주파수를 가지는 DC 버스 전압의 진동이 발생할 수 있다^[6]. 이를 구현하기 위하여 드롭 제어에 의해 계산된 식 (1)에 $Asin(\omega t)$ 의 정현파 신호가 더해진다. 따라서 사고 상황 시 VSC는 식 (2)를 추종하며 DC 버스 전압을 제어함으로써 진동이 모사된다. 본 논문에서는 프로그래머블 전력 공급 장치의 성능 한계로 약 4Hz $4\sin(25t)$ 의 정현파의 진동으로 모사하였다. 비록 참고문헌 [6]의 진동 주파수와 차이가 있지만 4Hz DC 버스 전압 진동 모델링을 통해 DC 마이크로그리드에서 진동이 미치는 영향이 실험적으로 검증된다.

$$V_{dc_ref_oscillation} = 380V - K_d I_o + Asin(\omega t) \quad (2)$$

4. 테스트 베드 검증을 위한 3 포트 DAB 컨버터의 동작원리

그림 9는 그림 2에 구성된 3 포트 DAB 컨버터를 보여준다. 이러한 구조를 통해 사고 상황 시 DC 버스와



Fig. 11. 20-kW DC microgrid testbed using PHIL simulation.

TABLE I
THREE-PORT CONVERTER SPECIFICATIONS

Parameters	Value
Turn ratio	30 : 30 : 16
Port 1 voltage	$V_{DC_BUS} = 380$ [V]
Port 2 voltage	$V_{DC_Load} = 380$ [V]
Port 3 voltage	$V_{ESS} = 200$ [V]
Coupling inductance	$L_1 = 237.8$ [μH]
	$L_2 = 91.36$ [μH]
	$L_3 = 15.7$ [μH]
Switching frequency	$f_{sw} = 20$ [kHz]

DC 부하, 그리고 ESS의 상호작용을 검증할 수 있다. 3 포트 DAB 컨버터는 x_1, x_4 와 x_2, x_3 가 짝을 이루어 50%의 시비율로 상보적으로 동작한다^[14]. 이로 인해 각 포트에 입력되는 전압은 구형파의 형태로 입력된다. 따라서 그림 9의 구조는 그림 10과 같이 델타 결선의 등가회로로 나타낼 수 있다. L_{xy} 는 x 포트와 y 포트 사이의 포트 간 등가 인덕턴스를 의미하며 식 (3), (4), (5)와 같이 표현된다. 또한, 3 포트 DAB 컨버터의 포트 간 전력 전달은 식 (6), (7), (8)과 같이 표현할 수 있다. P_{xy} 는 x 포트에서 y 포트에 전달되는 전력, ϕ_{12} 는 포트 1 레그 전압에 대한 포트 2 레그 전압의 위상차, ϕ_{13} 는 포트 1 레그 전압에 대한 포트 3 레그 전압의 위상차, ϕ_{32} 는 포트 3 레그 전압에 대한 포트 2 레그 전압의 위상차를 나타낸다.

$$L_{12} = (L_1 L_2 + L_1 L_3 + L_2 L_3) / L_3 \quad (3)$$

$$L_{13} = (L_1 L_2 + L_1 L_3 + L_2 L_3) / L_2 \quad (4)$$

$$L_{32} = (L_1 L_2 + L_1 L_3 + L_2 L_3) / L_1 \quad (5)$$

$$P_{12} = \frac{\phi_{12}(\pi - \phi_{12})}{2\pi^2 L_{12} f_{sw}} V_{DC_Bus} V_{DC_Load} \quad (6)$$

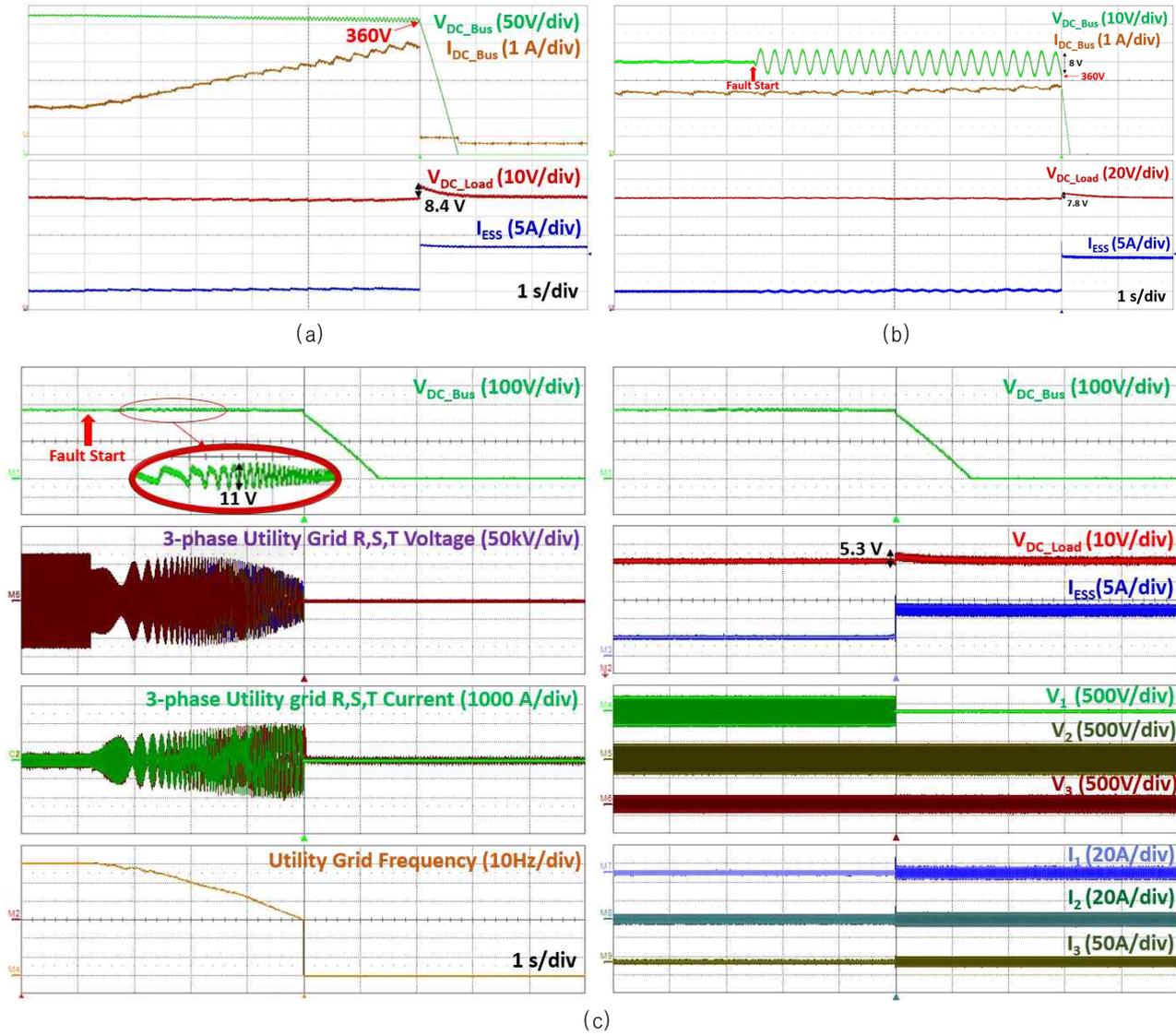


Fig. 12. Experimental waveforms under fault conditions. (a) Drastic load increment, (b) Oscillation, (c) Utility grid blackout.

$$P_{13} = \frac{\phi_{13}(\pi - \phi_{13})}{2\pi^2 L_{13} f_{sw}} V_{DC_Bus} V_{ESS} \quad (7)$$

$$P_{32} = \frac{(\phi_{12} - \phi_{13})(\pi - (\phi_{12} - \phi_{13}))}{2\pi^2 L_{23} f_{sw}} V_{DC_Load} V_{ESS} \quad (8)$$

본 논문에서는 제안하는 20-kW 마이크로그리드 테스트 베드의 실효성을 검증하기 위하여 사고 상황 시 정전되는 경우 3 포트 DAB 컨버터에 의해 ESS가 UPS로 동작하는 상황이 가정된다.

DC 마이크로그리드가 정상 동작 시에는 3 포트 DAB 컨버터의 위상 제어에 의해 DC 버스로부터 2-kW 전력이 DC 부하로 공급되고 ESS에 의해 1-kW의 전력이 DC 부하로 공급되어 총 3-kW의 전력이 공급된다. 그러나 사고 상황에 의해 DC 마이크로그리드 정전으로 이어지는 경우 DC 버스 전압이 급하강하여 공급되는 전력이 급감하게 된다. 이를 보상하기 위하여 DC 버스 전

압이 360V 이하로 하강하는 순간 그림 9와 같이 DC 버스 측 포트 스위치 S_2 , S_4 를 켜 DC 마이크로그리드로부터의 전력을 차단함과 동시에 ESS가 3-kW의 전력을 공급하게 된다.

5. 실험

제안하는 20-kW 마이크로그리드의 실효성을 검증하기 위하여 그림 11과 같이 실시간 시뮬레이터(OP5707), 프로그래머블 전력 공급 장치(PAT500-16T), 그리고 ESS(MWBFP3-1250-C02)와 DC 부하를 포함하는 3 포트 DAB 컨버터를 이용하여 실험을 수행하였다. 표 1은 3 포트 컨버터의 사양을 보여준다.

그림 12(a)는 급격한 부하 증가에 따른 DC 정전 상황 시 DC 버스 전압, DC 버스 전류, DC 부하 전압 및 ESS 전류 파형을 보여준다. DC 부하의 부하량 증가로 인해 DC 버스 전류가 지속적으로 증가한다. 그러나 DC

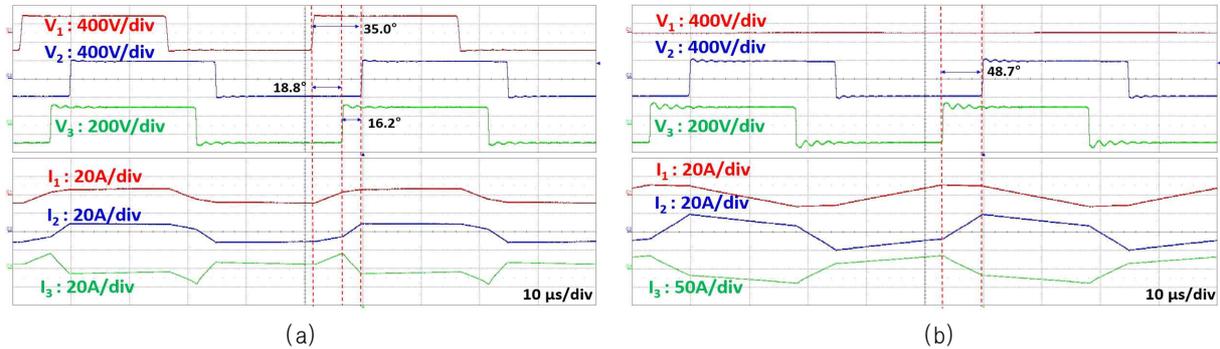


Fig. 13. Experimental steady-state waveforms of leg voltage and coupling inductor current of the three-port DAB converter. (a) Normal case, (b) Fault case.

버스 전압이 360V(약 5A)에 도달 시 DC 버스 전압이 붕괴되어 20-kW DC 마이크로그리드에 정전이 발생한다. 이로부터 모델링한 드롭 제어와 정전 모델에 의해 정전 상황이 전개되며 프로그래머블 전원 공급 장치를 통해 20-kW(52.6A) 전력이 3-kW(5A)에 매칭되는 것을 알 수 있다. 또한, 정전 순간에 ESS 전류가 5A에서 17A로 증가하며, DC 부하 전압은 8.4V 오버슈트로 380V로 유지되는 것으로 보아 3 포트 DAB 컨버터에 의해 ESS가 UPS로서 정상 작동함을 알 수 있다.

그림 12(b)는 DC 버스 전압의 진동 상황 시 DC 버스 전압, DC 버스 전류, DC 부하 전압 및 ESS 전류 파형을 보여준다. 모델링한 것과 같이 VSC가 식 (2)의 지령 전압을 추종하여 DC 버스 전압이 4V, 4Hz로 진동하는 것을 알 수 있다. 또한, 부하 증가 시 최대 부하 상황이 아님에도 불구하고 진동에 의해 360V에 도달하여 정전 상황으로 이어지는 것을 확인할 수 있다. 실제 10kHz 이하의 진동이 있으나 프로그래머블 전력 공급 장치의 성능 한계로 인하여 4Hz의 진동으로 모사하였다.

그림 12(c)는 갑작스러운 500MW의 큰 부하가 유틸리티 그리드에 연결되는 상황의 실험 파형을 보여준다. 그림 12(a), (b)의 실험과 달리 정상 상태에서 DC 마이크로그리드로부터 1kW, ESS로부터 1kW의 전력을 공급받는다. 유틸리티 그리드의 3상 전압, 전류, 주파수는 실시간 시뮬레이터로부터 출력된 신호이다. 500MW의 부하가 유틸리티 그리드에 연계되는 순간 유틸리티 그리드의 전압과 전류가 왜곡되며 주파수가 감소된다. 이는 참고문헌 [5]와 일치한다. DC 버스 전압은 사고 상황에도 불구하고 VSC에 의해 제어되어 전압 붕괴 없이 11V(2.9%)의 리플만 관측된다. 그러나 사고 상황 4초 이후에 유틸리티 그리드의 주파수가 30Hz까지 떨어져 DC 버스 전압이 붕괴된다. 이때, 3 포트 DAB의 1차 측 레그 전압이 0V, ESS 전류가 5A에서 13A로 증가한 것으로 보아 ESS가 UPS로서 정상 동작함을 알 수 있다. 따라서 DC 부하의 전압은 5.3V의 오버슈트를 가지며 380V로 유지된다.

그림 13은 정상 상황 및 사고 상황에서 3 포트 컨버터의 포트별 레그 전압과 커플링 인덕터 전류 파형을

보여준다. 정상 상황 시 1차 측과 2차 측 레그 전압의 위상차는 35°, 2차 측과 3차 측 레그 전압의 위상차는 16.2°를 가지며 각각 2-kW, 1-kW의 전력을 부하로 공급한다. 그러나 사고 상황 시 1차 측 레그 전압이 0이 됨과 동시에 2차 측과 3차 측 레그 전압의 위상차가 16.2°에서 48.7°로 증가하여 ESS에 의해 3-kW의 전력이 공급됨을 확인할 수 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 PHIL 기법을 통해 DC 마이크로그리드의 사고 상황을 모사할 수 있는 테스트 베드를 제안한다. VSC와 드롭 제어를 모델링하여 380V의 공칭전압을 가지는 20-kW DC 마이크로그리드를 가상으로 구현하였다. 또한, DC 버스의 갑작스러운 부하 증가로 인한 정전, 유틸리티 그리드의 과부하에 의한 정전, DC 버스 전압의 진동 사고 상황이 모델링되고 모의시험 가능성을 보였다. 최종적으로 3 포트 DAB 컨버터 시작품을 통해 제안하는 테스트 베드의 실효성을 검증하기 위한 실험이 수행되었다. 드롭 제어에 기반하여 DC 버스 전압이 변동되었으며 360V 이하 시 DC 마이크로그리드의 정전 상황이 전개되는 것을 확인하였다. AC 정전의 경우 [5]에서 보고된 유틸리티 그리드의 정전 상황을 정확하게 모사하여 유틸리티 그리드 정전으로 인한 DC 버스 전압의 리플을 관찰하였다. 진동 상황의 경우 최대 부하 상황이 아님에도 불구하고 진동에 의해 정전으로 이어짐을 확인하였다. 또한, 사고 상황에서 ESS가 UPS로서의 동작하는 예시를 통해 제안하는 테스트 베드가 컨버터와의 상호작용 할 수 있음을 확인하였다. 이들 결과로부터 제안하는 DC 마이크로그리드용 PHIL 테스트 베드의 실효성이 검증되었다.

본 연구는 한국전력공사의 2018년 착수 사외공모 기초연구 과제 연구비에 의해 지원되었음. (과제번호: R18XA06-72)

References

- [1] H. Choi and J. Jung, "Enhanced power line communication strategy for DC microgrids using switching frequency modulation of power converters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 32, No. 6, pp. 4140-4144, Jun. 2017.
- [2] D. Kumar, F. Zare, and A. Ghosh, "DC microgrid technology: System architectures, AC grid interfaces, grounding schemes, power quality, communication networks, applications, and standardizations aspects," *IEEE Access*, Vol. 5, pp. 12230-12256, 2017.
- [3] M. Vygoder, M. Milton, J. Gudex, R. Cuzner, and A. Benigni, "A hardware-in-the-loop platform for DC protection," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, Aug. 2020.
- [4] V. Nougain and B. K. Panigrahi, "An integrated power management strategy of grid-tied DC microgrid including distributed energy resources," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 16, No. 8, pp. 5180-5190, Aug. 2020.
- [5] M. B. Djukanovic, D. P. Popovic, D. J. Sobajic, and Y. H. Pao, "Prediction of power system frequency response after generator outages using neural nets," *IEEE Proceedings on Generation Transmission and Distribution*, Vol. 5, pp. 389-398, 1993.
- [6] L. Li, P. Wei, H. Xiao, W. Deng, and L. Kong, "Analysis of DC voltage oscillation mechanism in AC/DC hybrid distribution system," *The Journal of Engineering*, pp. 1511-1517, 2019.
- [7] T. Strasser, M. Stifter, F. Andr n, and P. Palensky, "Co-simulation training platform for smart grids," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 29, No. 4, pp. 1989-1997, Jul. 2014.
- [8] V. Salas, P. J. Deborra, and E. Olias, "Field analysis of commercial PV inverters in the 5 kW power range with respect to MPPT effectively," in *2009 13th European Conference on Power Electronics and Applications, Barcelona*, pp. 1-7, 2009.
- [9] J. Wang, Y. Song, W. Li, J. Guo, and A. Monti, "Development of a universal platform for hardware in-the-loop testing of microgrids," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 10, No. 4, pp. 2154-2165, 2014.
- [10] A. F. Hoke, A. Nelson, S. Chakraborty, F. Bell, and M. McCarty, "An islanding detection test platform for multi-inverter islands using power HIL," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 65, No. 10, pp. 7944-7953, Oct. 2018.
- [11] M. V. Gururaj and N. P. Padhy, "A novel decentralized coordinated voltage control scheme for distribution system with DC microgrid," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 14, No. 5, pp. 1962-1973, May 2018.
- [12] A. Werth, N. Kitamura, and K. Tanaka, "Conceptual study for open energy systems: Distributed energy network using interconnected DC nanogrids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 6, No. 4, pp. 1621-1630, Jul. 2015.
- [13] Y. W. Kim, M. H. Kwon, S. Y. Park, M. K. Kim, D. K. Yang, S. W. Choi, and S. J. Oh, "Development of 80 kW bi-directional hybrid-SIC boost-buck converter using droop control in DC nanogrid," *The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 22, No. 4, pp. 360-368, Aug. 2017.
- [14] H. J. Choi and J. H. Jung, "Practical design of dualactive bridge converter as isolated bi-directional power interface for solid state transformer applications," *Journal of Electrical Engineering & Technology*, Vol. 11, No. 5, pp. 1266-1273, Sep. 2016.



허경욱(許慶旭)

1994년 1월 31일생. 2019년 금오공대 전자공학부 졸업. 2019년~현재 울산과학기술원 전기전자공학과 석·박통합과정.



정지훈(鄭智勳)

1977년 3월 2일생. 2000년 포항공대 전자전기공학과 졸업. 2002년 동 대학원 전자컴퓨터공학부 졸업(석사). 2006년 동 대학원 전자컴퓨터공학부 졸업(공학박). 2006년~2009년 삼성전자 책임연구원. 2009년~2010년 Texas A&M University at Qatar 박사후연구원. 2011년~2012년 한국전기연구원 선임연구원. 2013년~현재 울산과학기술원 전기전자공학과 부교수. 당 학회 학술이사.