직류 배전 시스템을 위한 전력 변환 모듈의 통합 운전

이희준¹, 신수철², 홍석진¹, 원충연[†]

Integrated Operation of Power Conversion Module for DC Distribution System

Hee-Jun Lee¹, Soo-Choel Shin², Suk-Jin Hong¹, and Chung-Yuen Won[†]

Abstract – It is DC power that Output of renewable energy being recently developed and researched. Also, demand of DC power will expect to proliferate due to increase of digital load. Thus, DC distribution system providing high quality of power and reliability has emerged as a new distribution system. If the conventional distribution systems are substituted by proposed DC distribution system, the output of renewable energy can be connected with distribution systems under minimum power conversion. Therefore, in the event of connection with DC load, it can construct an efficient distribution system. In this paper, the integrated parallel operation of power conversion module for DC distribution system is proposed. Also, this paper proposed modularization of power conversion devices for DC distribution system and power control for parallel operation of large capacity system. DC distribution system consists of three power conversion modules such as AC/DC power conversion module 2 set, ESS module 1 set. DC distribution system controls suitable operation depending on the status of the DC power distribution system and load. Integrated operation of these systems is verified by simulation and experiment results.

Keywords: DC distribution, bidirectional power conversion device, AC/DC PWM converter, DC/DC converter, ESS, parallel operation, power control

1. 서 론

근 전 세계적으로 화석 연료의 고갈과 더불어 유가 급등 등의 문제로 인하여 신재생에너지 시스템의 개발과 보급에 많은 연구가 진행되고 있다. 또한 직류를 필요로 하는 디지털 부하의 급증으로 인하여 높은 품질을 가지는 직류 전력에 대한 수요가 점차 증가할 것으로 전망된다.^[1] 따라서 신재생에너지 시스템에 대한 관심 증가와 함께 이를 효율적으로 계통에 연계시켜 높은 품

질의 전력을 공급할 수 있는 고품질의 배전 계통에 대한 관심도 증가하고 있다. 이러한 관심의 증가로 인하여 양방향 전력 조류가 가능하며, 신재생에너지 및 증가하는 직류 부하와 연계가 용이한 직류 배전 시스템에 대한 많은 연구가 진행되고 있다.^[2]

현재까지 대부분의 배전 시스템을 이루고 있는 교류 배전 시스템은 직류 출력 기반의 신재생에너지 시스템들과 직류 부하들을 고려했을 시 많은 문제점을 가지게 된다. 우선 직류 출력 기반의 신재생에너지 시스템을 교류 배전과 연계 시, 이종의 변환 손실을 필연적으로 가지게 된다. 또한 풍력, 태양광 등과 같은 신재생에너지들은 일기 변화에 따라 생산되는 전력 또한 일정하지 않기 때문에 기존의 계통과 연계 시 전력 품질에 문제가 생길 수 있다. 현재 전력 소비의 많은 부분을 차지하고 있는 IT기기를 포함한 전자기기, 조명설비들 또한 직류의 전력을 필요로 한다. 하지만 교류 배전 계통에서 이 기기들에게 전력을 공급하기 위해서는 역시 이종의 변환 손실이 발생하게 된다.

Paper number: TKPE-2014-19-3-6

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

[†] Corresponding author: woncy@skku.edu, College of Information and Communication Eng. Sungkyunkwan Univ.
Tel: +82-31-290-7115 Fax: +82-31-290-7179

¹ College of Information and Communication Eng.
Sungkyunkwan University

² LG Electronics Co., Ltd

³ Samsung Electro-mechanics Co., Ltd.

Manuscript received Feb. 4, 2014; accepted Mar. 1, 2014

Fig. 1 Schematic of proposed DC distribution system

직류 배전 시스템은 각각의 기기들마다 사용되는 소용량의 AC/DC 컨버터를 하나의 대용량 AC/DC 컨버터로 통합하여 직류의 전력을 배전하는 시스템이다. 전력 변환 장치의 효율은 대용량으로 갈수록 증가하기 때문에 다수의 소용량 컨버터들을 하나의 대용량 컨버터로 시스템을 구성하여 전체 배전 시스템의 효율 향상을 목표로 하는 것이 직류 배전 시스템의 장점이다. 또한 직류 출력 기반의 신재생에너지 시스템, 직류 전력을 요구하는 전기자동차 및 전자기기와 연계 시 기존의 AC/DC 전력 변환 과정이 제거되어 효율 및 신뢰성이 향상된다.

직류 배전 시스템과 같은 대용량의 전력망을 구성하기 위해서는 다수의 전력 변환 장치들을 모듈화하여 병렬로 연계하는 운전 방법이 일반적으로 사용된다. 다수의 전력 변환 장치들을 모듈화하여 사용하게 되면 시스템을 설계하는데 용이하며, 부품의 단순화, 부품 수의 감소 등을 통하여 비용 절감의 효과 또한 얻을 수 있다. 하지만 두 대 이상의 모듈을 병렬로 구성하면 각 모듈의 센서의 오차, 선로 임피던스의 차이, 전력 반도체 소자의 특성 차이, 각종 소자들의 파라미터 불일치로 인하여 제어 전압에 차이가 발생한다. 이러한 차이는 각 모듈 사이에 순환전류를 야기할 수 있다. 순환전류는 교류 시스템에서의 무효전력과 유사하여 시스템의 손실과 유

사하고, 과전류 또한 야기할 수 있다. 따라서 이를 저감시키기 위한 제어 기법이 반드시 요구된다.^{[3]-[5]}

본 논문에서는 직류 배전 시스템을 위하여 각각 설계된 3개의 전력 변환 모듈을 병렬로 연계하여 구성하였다. 또한 전체 시스템 및 부하의 상태에 따라 적합한 운전을 하도록 시스템을 제어하였다. 직류 배전 시스템을 이루는 3개의 전력 변환 모듈의 통합 운전은 시뮬레이션과 실험 결과를 통하여 검증하였다.

2. 제안된 직류 배전 시스템

2.1 직류 배전 시스템의 구성

그림 1은 본 논문에서 제안된 직류 배전 시스템의 전체 회로도이다. 시스템은 AC/DC 전력 변환 모듈 2개와 ESS(Energy Storage System) 모듈로 이루어져 있다.

AC/DC 전력 변환 모듈은 3상 AC/DC PWM 컨버터와 3병렬 양방향 DC/DC 컨버터가 직렬 구조로 연결되어 있으며, PWM으로 인하여 생기는 입력 전류의 고조파를 저감시키기 위하여 LCL 필터를 적용하였다. 양방향 DC/DC 컨버터는 시스템의 응답성 및 소자의 정격 부피를 줄이기 위하여 3병렬로 구성하였다. AC/DC 전력 변환 모듈은 계통의 3상 교류 전력을 DC-BUS 전압

Fig. 2 Control block of entire proposed DC distribution system

380[V_{dc}]로 변환하거나, DC-BUS의 전력을 3상 교류 계통으로 보내는 역할을 한다.

ESS 모듈은 배터리의 전력을 DC-BUS로 방전하거나, DC-BUS의 전력을 배터리로 충전하는 역할을 한다. 배터리는 48[kWh] 용량의 리튬-폴리머를 사용하였으며, 마찬가지로 시스템의 응답성 및 소자의 정격·부피를 줄이기 위하여 3병렬로 구성하였다. 3개의 모듈의 출력단 DC-Link는 시스템의 대용량화를 위하여 DC-BUS에 병렬로 연결된다.

2.2 직류 배전 시스템의 제어

그림 2는 제안된 직류 배전 시스템의 전체 제어 블록도이다.

AC/DC 전력 변환 모듈은 초기 기동을 위한 초기 충전 회로가 포함되어 있으며, 3상의 교류 전력을 제어하기 위하여 좌표변환 이론을 적용하였다. 이를 통하여 변환된 2상의 d-q축 전압 및 전류를 이용하여 3상 AC/DC PWM 컨버터의 정상분 전압을 이용한 위상 검출, 역률제어, 전류제어, 전압제어를 수행한다. 3상 AC/DC PWM 컨버터에 의하여 승압된 DC 전압은 3병렬 양방향 DC/DC 컨버터에 의하여 DC-BUS 전압

Fig. 3 Equivalent circuit of output terminal of system

380[V]로 제어되며, 이를 위하여 전압, 전력제어가 수행된다.

ESS 모듈은 리튬-폴리머 배터리의 충전·방전을 수행한다. 방전 시에는 전력제어, 전압제어를 통하여 배터리의 전압을 DC-BUS로 승압하여 전력을 공급한다. 충전 시에는 Limit를 설정한 전압제어기와 전류제어기를 병렬로 사용하여 CC(Constant Current)-CV(Constant Voltage)제어를 수행한다.

3. 병렬 운전 제어 기법

3.1 병렬 운전 제어 원리

그림 3은 제안된 직류 배전 시스템의 출력단의 등가 회로로써, 시스템의 출력단은 각 모듈의 출력 전압, 선로 임피던스, 부하로 표현할 수 있다. 각 모듈의 출력 전압에 대한 방정식은 다음 식 (1)~(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_1 = (Z_1 + Z_L)i_1 + Z_L i_2 + Z_L i_3 \quad (1)$$

$$V_2 = (Z_2 + Z_L)i_2 + Z_L i_1 + Z_L i_3 \quad (2)$$

$$V_3 = (Z_3 + Z_L)i_3 + Z_L i_1 + Z_L i_2 \quad (3)$$

식 (2)~(3)을 연립하여 Z_2 , Z_3 , Z_L 에 대한 식으로 정리한 후, 이를 식 (1)에 대입하면 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_1 = (Z_1 + Z_L)i_1 + Z_L \frac{Z_L(V_3 - Z_L i_1) - (Z_3 + Z_L)(V_2 - Z_L i_1)}{Z_L^2 - (Z_2 + Z_L)(Z_3 + Z_L)} + Z_L \frac{Z_L(V_2 - Z_L i_1) - (Z_2 + Z_L)(V_3 - Z_L i_1)}{Z_L^2 - (Z_2 + Z_L)(Z_3 + Z_L)} \quad (4)$$

식 (4)를 i_1 에 대하여 정리하면 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다. i_2 , i_3 또한 i_1 을 구한 방법으로 동일하게 구하면 식 (6), (7)과 같다.

$$i_1 = \frac{V_1 \{ Z_L^2 - (Z_2 + Z_L)(Z_3 + Z_L) \} + Z_L (V_2 Z_3 + V_3 Z_2)}{(Z_1 + Z_L) \{ Z_L^2 - (Z_2 + Z_L)(Z_3 + Z_L) \} + Z_L^2 (Z_2 + Z_3)} \quad (5)$$

$$i_2 = \frac{V_2 \{ Z_L^2 - (Z_1 + Z_L)(Z_3 + Z_L) \} + Z_L (V_1 Z_3 + V_3 Z_1)}{(Z_2 + Z_L) \{ Z_L^2 - (Z_1 + Z_L)(Z_3 + Z_L) \} + Z_L^2 (Z_1 + Z_3)} \quad (6)$$

$$i_3 = \frac{V_3 \{ Z_L^2 - (Z_1 + Z_L)(Z_2 + Z_L) \} + Z_L (V_1 Z_2 + V_2 Z_1)}{(Z_3 + Z_L) \{ Z_L^2 - (Z_1 + Z_L)(Z_2 + Z_L) \} + Z_L^2 (Z_1 + Z_2)} \quad (7)$$

식 (5)~(7)를 통하여 각 모듈의 출력 전류는 각 모듈의 선로 임피던스, 부하, 출력 전압에 의해 정해지는 것을 알 수 있다. 따라서 각 모듈의 출력 전압을 제어함으로써 각 모듈의 출력 전류를 제어할 수 있고, 일정 DC-BUS 전압 하에 전류를 제어하는 것은 전력을 제어하는 것임을 알 수 있다. 실제로 직류 출력의 전압원을 병렬로 연계하면 작은 전압 차이에도 큰 전류가 흐르므로, 제안된 시스템의 출력단에서도 거의 일정한 DC-BUS 전압 하에 큰 전류를 제어할 수 있다. 본 논문에서 제안된 시스템은 AC/DC 전력 변환 모듈 1이 DC-BUS의 전압을 고정하고 있으며, 나머지 AC/DC 전력 변환 모듈 2와 ESS 모듈이 병렬로 연계되면 전압을 가변하여 출력을 제어한다.^[6]

3.2 Power reference point tracking 기법을 이용한 전력 제어

Fig. 4 Power reference point tracking power controller

그림 4는 간단한 형태의 전력 제어기이다. Power reference point tracking 전력 제어기는 전력 지령과 실제 전력의 오차를 통하여 전력을 추종한다. 전력 변환 장치의 용량은 정해져 있으므로, 전력 지령과 실제 전력의 오차는 일정 상수를 통하여 일정 범위 안으로 제한이 가능하다. 이 값은 실제 전압에 더해져 전력 제어기의 출력 값이 되며, 전압 제어기의 지령 값으로 입력된다.

$$V_{CBB}^* = V_{CBB, fdb} + K_1(P^* - P_{fdb}) \quad (8)$$

전력 제어기의 출력 값은 위 식 (8)을 통하여 정해진다. 전력 지령이 실제 전력보다 큰 경우 현재 전압 값보다 큰 값을 전압 지령으로, 실제 전력이 전력 지령보다 큰 경우 현재 전압 값보다 작은 값을 전압 지령으로 입력한다.^[6]

3.3 CC-CV 제어

그림 2는 ESS 모듈의 제어블록도를 포함한다. ESS 모듈의 충전 시, 전압 제어기의 Limit는 Max 1, Min 0로 설정하였고, 전류제어기의 Limit는 Max 0, Min -1로 설정하였다.

충전 초기에는 전력 변환 장치가 동작하여도 배터리의 전압은 바로 지령 전압에 도달하지 않는다. 따라서 전압 제어기의 출력은 서서히 증가한다. 또한 Duty가 증가하므로 배터리로 충전되는 전류는 점점 증가하게 된다. 이에 따라 배터리로 충전되는 전류가 지령 전류보다 커지면, 전류 제어기는 음의 값을 출력한다. 전류 제어기가 음의 값을 출력하게 되면 Duty는 감소하고, 배터리로 충전되는 전류는 감소하여 지령 전류의 크기를 유지하게 된다. 이러한 과정을 통하여 전력 변환 장치는 일정한 전류로 충전을 하는 CC 제어가 수행하게 된다.

CC 제어를 통하여 배터리의 전압이 서서히 지령 전압에 도달하게 되면 전압 제어기의 출력은 점차 감소한다. 또한 Duty가 감소하므로 배터리로 충전되는 전류도 점점 감소하게 되고, 전류 제어기의 출력은 점차 0에 수렴한다. 따라서 전류 제어기의 영향이 사라지게 되어 지령 전압으로 배터리를 충전하는 CV 제어가 수행된다.^[7]

4. 직류 배전 시스템의 통합 운전^[8]

Fig. 5 Power flow of ESS separation mode

Fig. 6 Power flow of ESS discharge mode

4.1 ESS 분리 모드

그림 5는 ESS 분리 모드로서, 시스템이 배터리의 충전이 필요 없다고 판단하여 ESS 모듈이 DC-BUS와 연계되지 않은 상태이다. 그림 5(a)는 ESS 분리 모드 1로써, 부하의 요구 전력이 50[kW] 미만이므로 AC/DC 전력 변환 모듈 1개만 동작하여 부하를 담당하는 모드이다. 그림 5(b)는 ESS 분리 모드 2로써, 부하의 요구 전력이 50[kW]~100[kW]이므로 AC/DC 전력 변환 모듈 2개가 동작하여 부하를 담당하는 모드이다. 이때에는 DC-BUS에 2개의 전력 변환 장치가 연계되므로, 추가적인 전력 제어가 수행되어야 한다.

4.2 ESS 방전 모드

그림 6은 ESS 방전 모드로서, 시스템이 배터리의 방전이 필요하다고 판단하여 ESS 모듈이 DC-BUS에 연계되어 DC-BUS에 전력을 공급하는 상태이다. 그림 6(a)는 ESS 방전 모드 1로써, 부하의 요구 전력이 100[kW]~140[kW]이므로 AC/DC 전력 변환 모듈 2개와 ESS 모듈이 동작하여 부하를 담당하는 모드이다. 그림 6(b)는 ESS 방전 모드 2로써, 1개 또는 2개의 AC/DC 전력 변환 모듈이 동작하여 부하를 담당하던 중, 고장 및 수리 등의 이유로 DC-BUS에서 분리시켜야 할 때, ESS 모듈이 동작하여 부하를 담당하는 모드이다. ESS 분리 모드는 항상 2개 이상의 전력 변환 장치가 DC-BUS에 연계되므로, 추가적인 전력 제어가 수행되어야 한다.

Fig. 7 Power flow of ESS charge mode

Fig. 8 Simulation waveforms of ESS separation mode

4.3 ESS 충전 모드

그림 7은 ESS 충전 모드로서, 시스템이 배터리의 충전이 필요하다고 판단하여 ESS 모듈이 DC-BUS의 전력을 배터리로 충전하는 모드이다. 그림 7(a)는 ESS 충전 모드 1로써, 부하의 요구 전력과 배터리의 충전 전력의 합이 50[kW] 미만이므로 AC/DC 전력 변환 모듈 1개만 동작하여 배터리와 부하에 전력을 공급하는 모드이다. 그림 7(b)는 ESS 충전 모드 2로써, 부하의 요구 전력과 배터리의 충전 전력의 합이 50[kW]~100[kW]이므로 2개의 AC/DC 전력 변환 모듈이 동작하여 배터리와 부하에 전력을 공급하는 모드이다.

5. 시뮬레이션 결과

표 1은 시뮬레이션에 적용한 제안된 직류 배전 시스템의 파라미터 값이다. 제안된 직류 배전 시스템의 병렬

Table 1 Parameter of the DC distribution system

Parameters			Value
System Capacity			150[kW]
AC/DC Power Conversion Module	3 Phase Bidirectional AC/DC PWM Converter Capacity		60[kVA]
	Bidirectional DC/DC Converter Capacity		50[kW]
ESS Module Bidirectional DC/DC Converter Capacity			50[kW]
Switching Frequency	3 Phase AC/DC PWM Converter		5[kHz]
	AC/DC Connected Bidirectional DC/DC Converter		
	ESS Module Bidirectional DC/DC Converter		
LCL Filter	3 Phase Bidirectional AC/DC PWM Converter	L_g	120[μ H]
		C_f	50[μ F]
		L	500[μ H]
DC-Link Capacitance	3 Phase AC/DC PWM Converter		10.2[mF]
	AC/DC Connected Bidirectional DC/DC Converter		20.4[mF]
	ESS Module Bidirectional DC/DC Converter	Battery	27.2[mF]
		DC-BUS	10.2[mF]
L Filter Inductance	AC/DC Connected Bidirectional DC/DC Converter		700[μ H]
	ESS module Bidirectional DC/DC Converter		1.8[mH]

운전 및 통합 운전을 검증하기 위하여 PSIM을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 전력 변환 장치들은 각각의 용량에 맞게 설계되었으며 실험에 적용할 파라미터 값을 그대로 적용하였다. 또한 실험에 적용될 제어 및 시퀀스를 적용하여 제어기의 성능 및 운전 시퀀스를 검증하였다. 그림 8은 직류 배전 시스템의 ESS 분리 모드를 나타내는 시뮬레이션 파형이다. 그림 8(a)는 부하 요구 전력이 0[kW]~50[kW]이므로 1개의 AC/DC 전력 변환 모듈만 사용하였다.

그림 8(b)는 부하 요구 전력이 0[kW]~100[kW]이므로 2개의 AC/DC 전력 변환 모듈을 사용하였다. 그림 8(a), (b) 모두 10[kW]의 부하가 순차적으로 연계되는 상황을 시뮬레이션 한 결과이다. 부하의 변동에도 DC-BUS 전압의 변동은 거의 없는 것을 확인할 수 있다.

그림 9는 직류 배전 시스템의 ESS 방전 모드를 나타내는 시뮬레이션 파형이다. 그림 9(a)는 부하 요구 전력이 0~150[kW]이므로 AC/DC 전력 변환 모듈 2개와 ESS 모듈을 사용하였다.

(a) ESS discharge mode 1

(b) ESS discharge mode 2

Fig. 9 Simulation waveforms of ESS discharge mode

(a) ESS charge mode 1

(b) ESS charge mode 2

Fig. 10 Simulation waveforms of ESS charge mode

그림 9(b)는 ESS 분리 모드 2 상황에서 AC/DC 전력 변환 모듈 2가 고장으로 DC-BUS에서 분리되는 상황을 모의한 시뮬레이션 결과이다. AC/DC 전력 변환 모듈 2가 DC-BUS에서 분리되는 순간 ESS 모듈이 바로 DC-BUS에 연계되어 AC/DC 전력 변환 모듈 2가 분담하고 있던 50[kW] 용량의 부하를 감당하는 것을 알 수 있다. 부하의 변동 및 전력 변환 모듈의 고장으로 인한

Fig. 11 Hardware configuration

분리 및 투입에도 DC-BUS 전압의 변동은 거의 없는 것을 확인할 수 있다.

그림 10은 직류 배전 시스템의 ESS 충전모드를 나타내는 시뮬레이션 파형이다. 그림 10(a)는 부하와 충전 전력의 합이 AC/DC 전력 변환 모듈 1개가 감당할 수 있는 전력이므로, 1개의 AC/DC 전력 변환 모듈만 동작하여 부하 및 배터리에 전력을 공급한다. 그림 10(b)는 부하와 충전 전력의 합이 AC/DC 전력 변환 모듈 1개가 감당할 수 있는 범위를 초과하므로, 2개의 AC/DC 전력 변환 모듈이 동작하여 부하 및 배터리에 전력을 공급한다. 부하의 변동이나 배터리의 충전 상황에도 DC-BUS 전압의 변동은 거의 없는 것을 확인할 수 있다.

6. 실험 결과

그림 11은 제안된 직류 배전 시스템의 하드웨어 구성이다. 각 전력 변환 모듈은 스택 안에 집적되어 있으며, 리튬-폴리머 배터리는 스택 밖에 위치한다.

각 전력 변환 모듈의 출력단은 DC-BUS에 병렬로 연결되어 있으며, DC-BUS와 부하는 ACB(Air Circuit Breaker)로 분리되어 있다. 각 전력 변환 장치는 TMS320F28335로 제어하며, 3개의 모듈을 총괄 제어하는 Master 제어기가 추가로 구성되어 있다. 실제 AC/DC 전력 변환 모듈과 ESS 모듈의 정격 용량은

(a) ESS separation mode 1

(b) ESS separation mode 2

(c) Circulating current without power controller

(d) Circulating current without power controller

Fig. 12 Experimental waveforms of ESS separation mode

50[kW]이지만, 부하 SET의 한계로 인하여 각 전력 변환 모듈의 정격을 축소하여 각 동작 모드에 대한 시퀀스를 검증하였다. 부하 SET는 7.2[kW]급 8개의 부하가 Step으로 인가되도록 구성되어있다.

그림 12는 직류 배전 시스템의 ESS 분리 모드를 나타내는 실험 파형이다. 그림 12(a)와 (b)는 각각 ESS 분리 모드 1, 2에 대한 실험 파형이다. ESS 분리 모드에서는 시뮬레이션과 동일하게 부하가 순차적으로 투입되어도 일정 DC-BUS 전압이 유지되는 것을 확인할 수 있다. 그림 12(c)는 전력제어기를 사용하지 않았을 때 발생하는 각 모듈 사이에 흐르는 순환전류에 대한 파형이며, 12(d)는 전력 제어기를 통하여 전력이 제어됨을 보여주는 파형이다.

전력 지령을 통하여 자유로운 전력 제어가 가능함을 파형을 통하여 알 수 있다. 각 모듈의 정격은 그림 12(a)에서는 28.8[kW], 그림 12(b)에서는 21.6[kW]로 가정되었다.

(a) ESS discharge mode 1

(b) ESS discharge mode 2

Fig. 13 Experimental waveforms of ESS discharge mode

(a) ESS charge mode 1

(b) ESS charge mode 2

Fig. 14 Experimental waveforms of ESS charge mode

그림 13은 직류 배전 시스템의 ESS 방전 모드를 나타내는 실험 파형이다. 그림 13(a)는 ESS 방전 모드 1에 대한 실험 파형이며, 그림 13(b)는 ESS 방전 모드 2에 대한 파형이다. 그림 13에서 각 모듈의 정격은 21.6[kW]로 가정되었다. ESS 방전 모드 또한 시뮬레이션과 동일하게 부하가 순차적으로 투입되거나 전력 변환 모듈이 DC-BUS에서 분리 및 연계는 상황에도 일정한 DC-BUS 전압이 유지되는 것을 확인할 수 있다.

그림 14는 직류 배전 시스템의 ESS 충전 모드를 나타내는 실험 파형이다. 그림 14(a)는 ESS 충전 모드 1에 대한 실험 파형이며, 그림 14(b)는 ESS 충전 모드 2에 대한 실험 파형이다. 실제 배터리의 충전시간을 고려하여 실험 시간 내에 CC-CV 모드가 관측될 수 있도록 CC, CV를 임의로 설정하였으며, 그림 14에서 전력 변환 모듈의 정격은 21.6[kW]으로 가정되었다. 또한 ESS 모듈은 DC-BUS로 전력을 공급하는 방향이 양의 방향으

로 기준을 잡았으므로, 충전 시 ESS 모듈의 전류 방향은 음의 방향이다. ESS 충전 모드 역시 시뮬레이션과 동일하게 배터리의 충전 전 상황에서도 일정한 DC-BUS 전압이 유지됨을 확인할 수 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 직류 배전 시스템을 위한 전력 변환 모듈의 통합 운전에 대하여 제안하였다. 제안하는 시스템은 시스템의 대용량화를 위하여 병렬로 연결되어 있고, 이에 따라 추가적인 전력 제어 기법이 요구된다. 따라서 병렬 운전을 위한 전력 제어 기법에 대하여 제안하였으며, 이를 이용한 시스템의 운전 모드를 확립하였다. 병렬 운전 제어 기법 및 시스템의 운전 모드는 시뮬레이션 및 실험을 통하여 검증하였다. 본 시스템은 빌딩과 같은 곳에 적용이 가능하며, 병렬로 연결되는 전력 변환 모듈을 증가시킨다면 시스템의 용량을 더욱 증가시킬 수 있을 것이다.

“이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2011-0015584)”

“본 연구는 2014년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.
(No. 20104010100630 -12-1-000)”

References

- [1] Dong Dong, Fang Luo, Xuning Zhang, Dushan Boroyevich, Paolo Mattavelli, “Grid-Interface Bidirectional Converter for Residential DC Distribution Systems-Part 1 : High-Density Two-Stage Topology”, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 28, No. 4, pp. 1655-1666, Apr, 2013.
- [2] Dong Dong, Fang Luo, Xuning Zhang, Dushan Boroyevich, Paolo Mattavelli, “Grid-Interface Bidirectional Converter for Residential DC Distribution Systems-Part 2 : AC and DC Interface Design With Passive Components Minimization”, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 28, No. 4, pp. 1667-1679, Apr, 2013.
- [3] Chul-Ho Jung, Soo-Cheol Shin, Hee-Jun Lee, Tae-Bok Jung, Chung-Yuen Won, Young-Real Kim, “Control Method for Reduction Circulating Current in Parallel Operation of DC Distribution System for Building

Applications", IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), pp. 1389-1393, Oct. 2012.

- [4] Guerrero, J. M, "Hierarchical Control of Droop-Controlled AC and DC Microgrids - A General Approach Toward Standardization", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Volume. 58, Issue. 1, pp. 158-172, 2011.
- [5] Soo-Cheol Shin, Hee-Jun Lee, Young-Ho Kim, Jung-Hyo Lee, Taeck-Kie Lee, Chung-Yuen Won, "Power Control Method for Reducing Circulating Current in Parallel Operation of DC Distribution System", The Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol. 8, No. 5, pp. 1212-1220, Sep, 2013.
- [6] Dong-Woo Han, Hee-Jun Lee, Soo-Cheol Shin, Chung-Yuen Won, Hack-Seong Kim, "Power Control Method of Multi-Parallel DC Distribution System", on Power Electronics Annual Conference, pp. 55-56, Jul, 2013.
- [7] Seok-Jin Hong, Soo-Cheol Shin, Hee-Jun Lee, Hack-Seong Kim, Chung-Yuen Won, "DC distribution system integrated BESS for commercial building applications" IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013 IEEE International Symposium on, pp. 1-6, May, 2013.
- [8] Dong-Woo Han, Soo-Cheol Shin, Hee-Jun Lee, Chung-Yuen Won, Taeck-Kie Lee, "Integrated Operation of DC Distribution System for Building Application", on Power Electronics Annual Conference, pp. 57-58, Jul, 2013.

이희준(李義俊)

1982년 9월 30일생. 2008년 순천향대 졸업. 2011년 성균관대 대학원 메카트로닉스 협동과정 졸업(석사). 현재 동 대학원 전자전기컴퓨터공학과 박사과정.

신수철(申守澈)

1977년 2월 27일생. 2004년 수원대 전기전자공학부 졸업. 2006년 성균관대 대학원 에너지시스템공학과 졸업(석사). 2014년 성균관대 대학원 전기전자컴퓨터공학과 졸업(공학박사). 2006년~2010년 (주)효성중공업 연구소 선임연구원. 2014년~현재 LG전자 VC연구소 전력전자연구파트 선임연구원.

홍석진(洪錫進)

1985년 11월 11일생. 2012년 안양대 전기전자공학과 졸업. 2014년 성균관대 대학원 메카트로닉스공학협동과정 졸업(석사). 2014년~현재 성균관대 태양광시스템공학 협동과정 박사과정.

원충연(元忠淵)

1955년 5월 10일생. 1978년 성균관대 공대 전기공학과 졸업. 1980년 서울대 공대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 서울대 공대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1991년 12월~1992년 12월 미국 테네시 주립대학 전기공학과 방문 교수. 1998년~현재 한국철도기술연구원 심사위원. 2006년~2009년 한국전력공사 PQ 심사위원. 2006년~2009년 차세대 첨단도시철도시스템(한국건설교통기술 평가원) 기술개발사업 운영위원. 2006년~현재 (주)로템 기술자문위원. 2010년~2012년 도시철도 공사 기술검증위원. 2007년~현재 삼성전기 에너지파워 연구센터장. 2011년~2013년 직류표준화 연구회 회장. 2010년 당 학회 회장. 현재 성균관대 정보통신대학 교수.