

# Droop 제어를 기반으로 한 직류 마이크로그리드의 자율 동작 분석

李知憲\*, 金賢竣\*\*, 韓炳文†

## Autonomous Operation Analysis of DC Microgrid based on Droop Control

Ji-Heon Lee, Hyun-Jun Kim, and Byung-Moon Han

### 요 약

본 논문에서는 분산전원으로 풍력과 태양광, 에너지저장으로 배터리, 직류부하, 그리고 교류연계전력망으로 구성된 직류 마이크로그리드에서 Droop 제어를 기반으로 한 시스템의 자율동작을 분석한 내용에 대해 기술하고 있다. 자율동작의 분석을 위해 먼저 PSCAD/EMTDC 소프트웨어를 이용해 각 분산전원과 배터리의 시뮬레이션 모델을 개발하고 이를 바탕으로 Droop 제어를 검증하였다. 또한 시뮬레이션 결과를 바탕으로 3kW급 DC마이크로그리드의 하드웨어를 제작하여 실제적인 자율동작의 타당성을 분석하였다.

### ABSTRACT

This paper describes the autonomous operation analysis of DC microgrid based on droop control. In order to verify the whole system operation, detailed simulation models for wind power generation, solar power generation, and battery were developed with user-defined models programmed with C-code in PSCAD/ EMTDC software. The simulation results confirm that the DC microgrid with droop control make it feasible to provide power to the load with stable manner. Based on simulation results a prototype of DC microgrid was built and tested in the lab to verify the autonomous operation experimentally. The droop control scheme can suppress the circulating current, and offers each unit to be controlled autonomously without any communication link.

**Key Words** : DC Micro-grid, DC Distribution, Distributed Generation, Energy Storage, Droop Control

## 1. 서 론

화석연료의 고갈과 환경문제로 최근 국내외에서 풍력, 태양광, 연료전지 등과 같은 신재생에너지에 의한 발전에 대해 많은 연구가 진행되어 왔다. 마이크로그

리드는 신재생발전기, 에너지저장, 부하가 결합하여 기존 교류 전력망과 연계된 소규모 전력망을 의미한다.

마이크로그리드에는 신재생발전, 에너지저장, 부하를 교류선로로 연결한 AC 마이크로그리드와 직류선로로 연결한 DC 마이크로그리드로 구분할 수 있다. AC 마이크로그리드는 기존의 배전망을 그대로 활용하는 장점이 있으나, 동기화, 안정도, 무효전력 문제를 야기한다. 반면에 DC 마이크로그리드는 이러한 문제에 대해서는 자유로우나 동작전압의 규격이 설정되어 있지 않고 차단이 용이하지 않은 단점을 갖는다.

그러나 DC 마이크로그리드는 각 전원별로 발생하는

†교신저자 : 정회원, 명지대 전기공학과 교수

E-mail : erichan@mju.ac.kr

\*정회원, 명지대 전기공학과 박사과정

\*\*학생회원, 명지대 전기공학과 석사과정

접수일자 : 2011. 3. 23

1차 심사 : 2011. 5. 2

심사완료 : 2011. 5. 26

전력을 직류-직류-교류, 또는 교류-직류-교류의 2단계 전력변환이 필요 없어 시스템의 비용과 손실이 낮고, 연계단 전압만 관리하여 상태감시도 용이한 장점을 갖는다. 또한 최근 사용이 급증하고 있는 정보통신기기의 경우 내부적으로는 직류전원을 필요로 하여 DC 마이크로그리드에 관한 연구에 많은 관심이 집중되어 있다<sup>[1,2]</sup>.

DC 마이크로그리드가 적절히 동작하기 위해서는 DC 선로에 연결되어있는 풍력, 태양광, 연료전지와 같은 분산전원, 배터리 에너지저장, 직류부하, 그리고 연계전력망 사이의 전력흐름이 관리되고 이에 따라 직류전압을 일정하게 유지하면서 연계용 전력변환기의 제어가 수행되어야 한다.

마이크로그리드의 동작을 제어하는 방법은 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 하나는 중앙제어기를 두고 분산전원, 에너지저장, 부하, 연계전력망의 전력량을 실시간으로 측정하여 운전모드에 따라 알고리즘에 의해 시스템을 제어하는 방식이 있다. 이 방식은 전력량을 측정하기 위한 센서와 측정된 데이터를 중앙제어기로 전송하는 통신망을 필요로 한다<sup>[3,4]</sup>.

다른 하나는 직류선로의 전압을 일정하게 유지하면서 각 컨버터의 전압을 전력의 흡수 또는 방출되는 양에 따라 Droop 제어를 적용하여 자율적으로 시스템을 제어하는 것이다<sup>[5,6,7]</sup>. 이 방식은 각 구성요소 간에 통신을 요하지 않으면서 구현이 간단하여 교류 전력망에 연계된 분산전원이나 AC 마이크로그리드의 동작을 제어하는데 많이 활용되었다. 또한 DC 마이크로그리드의 동작을 제어하는데 활용한 내용이 참고문헌<sup>[5]</sup>에 기술되어 있다. 그런데 이 논문에서는 제어기법에 대한 제시만 되어 있고 실험결과에 대해서는 기술내용이 미비하다.

본 논문에서는 분산전원으로 풍력과 태양광, 에너지저장으로 배터리, 직류부하, 그리고 교류연계전력망으로 구성된 DC 마이크로그리드에서 Droop 제어를 기반으로 한 시스템의 자율동작을 분석한 내용에 대해 기술하고 있다. 자율동작의 분석을 위해 먼저 PSCAD/EMTDC 소프트웨어를 이용해 각 분산전원과 배터리의 시뮬레이션 모델을 개발하고 이를 바탕으로 Droop 제어를 수행하였다. 또한 시뮬레이션 결과를 바탕으로 3kW급 DC마이크로그리드의 하드웨어를 제작하여 실험적으로 시스템의 자율동작을 분석하였다.

## 2. DC 마이크로그리드

그림 1은 본 연구에서 고려한 마이크로그리드의 구

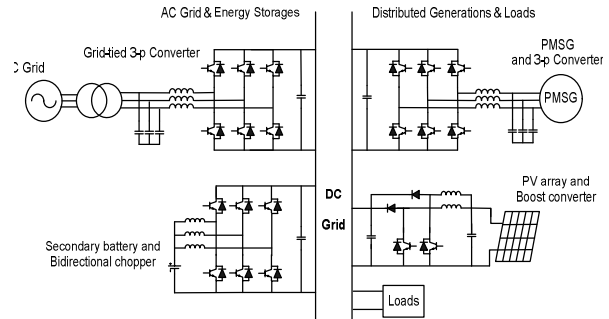


그림 1 DC 마이크로그리드의 구성  
Fig. 1 Configuration of DC Micro-grid

성을 나타낸 회로도이다. 분산전원으로는 풍속과 일사량 및 온도에 따라 출력이 변하는 풍력발전과 태양광 발전을 그리고 에너지저장으로는 배터리를 사용하였다. 또한 부하는 여러 형태가 가능하나 본 연구에서는 가변저항을 사용하여 부하를 통합적으로 모의하였다.

풍력발전은 가용풍속범위가 넓고 증속기가 필요 없는 2kW 용량의 PMSG(Permanent Magnet Synchronous Generator)를 3상 PWM 컨버터에 의해 연계하며 변하는 풍속에 대하여 최대출력점 추적제어기법을 사용하였다. 태양광발전은 DC 출력을 승압하기 위해 무반압기타입의 부스트컨버터를 사용하여 DC 그리드에 연계하며 용량은 1.5kW이다. 일사량과 온도에 따라 출력 특성이 변동하고 이에 따라 효율이 변하므로 마찬가지로 최대출력점 추적제어기법을 사용하였다. 에너지저장용 컨버터는 배터리의 충·방전이 가능하도록 양방향 DC/DC 컨버터를 사용하며 전류리플을 고려하여 3상 Interleaved 컨버터를 사용하였다. 에너지저장은 DC 마이크로그리드에서 전력운용의 안정성을 확보하고 고품질의 전력공급이 가능하도록 한다. 계통연계컨버터는 양방향 3상 PWM 컨버터를 사용하였으며 에너지 저장장치와 함께 Droop 제어를 통해 DC 마이크로그리드의 선로전압을 제어하며 그에 따른 전력관리를 수행하게 된다<sup>[8]</sup>.

## 3. 전력관리 기법

### 3.1 전력흐름

제안하는 DC 마이크로그리드의 각 구성요소들의 전력 흐름도를 그림 2에 나타내었다.

태양광 어레이의 출력전력과 풍력발전기의 출력전력을 분산전원의 출력의 합인  $P_{DG}$ 로 정의하고 이는 식 (1)과 같다.

$$P_{DG} = P_{PMSG} + P_{PV} \quad (1)$$

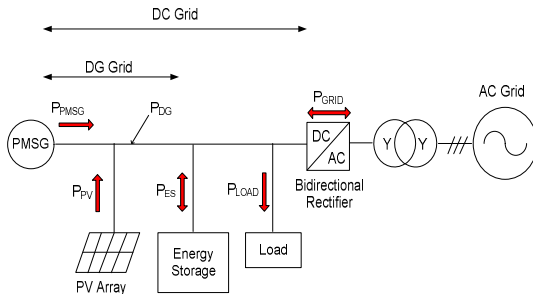


그림 2 전력 흐름도  
Fig. 2 Power Flow of each component

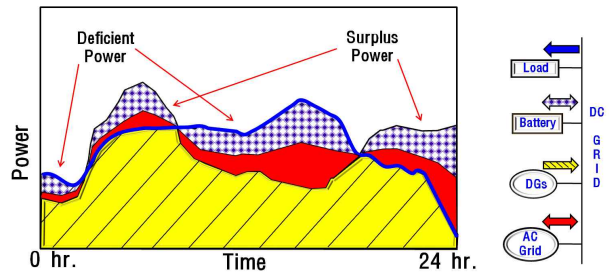


그림 3 전력관리 개념  
Fig. 3 Concept of Energy Management

DG(Distributed Generation) 그리드에 다른 분산전원이 추가되어도 분산전원의 출력은 합으로서 표현하여 전력의 관리를 보다 간편하게 한다. 분산전원에서의 출력은 단방향성으로 계통에서의 전력과 함께 DC 그리드에 전력을 공급하는 주 에너지원의 역할을 담당한다. 분산전원에서의 총 출력과 부하의 소모량의 차이만큼의 용량이 DC 그리드에 유입되며, 에너지 저장장치와 계통연계 컨버터에서 이를 협조적으로 관리하게 된다.

에너지 저장장치에서와 계통연계 컨버터는 DC 그리드에 유입되는 에너지를 관리하므로 전력의 흐름은 양방향성이며, 충전되거나 방전되어야 할 전력은 식(2),(3)과 같다.

$$P_{ES} = (P_{DG} - P_{LOAD}) \times W_{ES} \quad (2)$$

$$P_{GRID} = (P_{DG} - P_{LOAD}) \times W_{GRID} \quad (3)$$

$P_{ES}$ 와  $P_{GRID}$ 는 각각 에너지 저장장치와 계통연계 컨버터가 제어하는 전력의 값이므로 부호에 따라 에너지를 흡수하거나 방출하고, 여기서  $W_{ES}$ 와  $W_{GRID}$ 는 DC 그리드의 총용량 중에서 에너지 저장장치 및 계통연계 컨버터가 담당해야 할 전력의 비율을 나타낸다.

### 3.2 전력관리 개념

그림 3은 DC 마이크로그리드의 에너지 운용기법에 대한 개념도를 나타낸 것이다. 계통연계 컨버터와 에너지 저장장치에서 균등하게 DC 그리드에 유입되는 전력을 제어하며 부담하고자 하는 용량을 미리 산정하면 컨버터의 용량을 결정할 수 있다.

계통연계 컨버터와 에너지 저장장치는 부하가 공급받고자 하는 전력과 분산전원이 출력하는 전력의 대소차에 의하여 충·방전 동작을 하게 된다. 분산전원으

로부터의 출력이 부하의 소모전력 보다 많으면 계통과 에너지 저장장치로 보내지며, 분산전원에서의 출력이 부족할 경우에는 계통과 에너지 저장장치로부터 전력을 공급받는다.

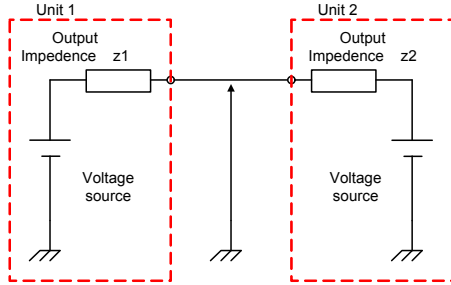
서로 균등하게 전력을 제어하며 에너지 저장장치의 용량을 계통연계 컨버터의 두 배로 하여 계통연계 컨버터의 부담을 줄이도록 하였다. 본 논문에서는 DC 마이크로그리드의 총 용량을 3kW급으로 설정하였으며 따라서 계통연계 컨버터는 1kW, 에너지 저장장치의 용량은 2kW가 되도록 설계하였다.

## 4. Droop 제어기법

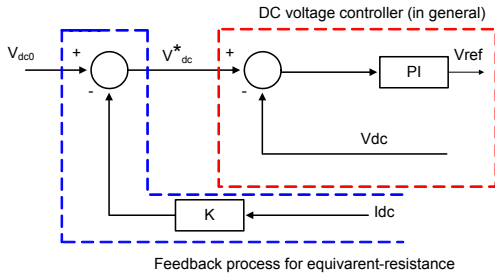
Droop 제어기법을 사용하면 2대 이상의 전력변환기에서 DC 그리드의 직류전압을 제어하게 되며 각 구성요소가 전압제어를 하는데 있어서 센서의 오차, 제어기의 오차, 선로 임피던스에 의해서 제어하는 전압에 차이가 발생하게 되고 이에 따라 DC 그리드에 순환전류가 필연적으로 발생하게 된다. 순환전류는 교류의 무효전력과 유사하여 시스템 전체의 손실과 직결되며, 연계되는 기기에 여러 가지 악 영향을 주고 전력품질을 악화시키므로 이를 억제하기 위한 제어 기법이 반드시 필요하다.

### 4.1 계통연계 컨버터와 에너지 저장장치

계통연계 컨버터와 에너지 저장장치는 DC 그리드 전압제어기를 가지고 있으며, 각 장치의 출력특성은 전압원으로 취급된다. 만일 전압제어에 오차가 존재하면 순환전류가 흐르게 되는데, 이 전류를 쉽게 저감하는 방법은 그림 4(a)와 같이 각 장치의 출력과 DC 그리드 사이에 임피던스성분을 삽입하는 것이다. 그러나 이 방법은 손실, 비용, 크기 측면에서 비현실적이다. 따라서 본 연구에서는 그림 4(b)와 같이 DC 전압제어기에 피드백루프를 추가하였다.



(a) 등가회로



(b) 제어 블록도

그림 4 계통연계 컨버터와 에너지 저장장치의 전압제어  
Fig. 4 Voltage Control of Grid-tied Converter and Energy Storage

출력 DC 전류  $I_{dc}$ 를 검출하여 게인  $K$ 를 곱한 다음 그 결과를 기준 DC 출력전압  $V_{dc}^*$ 를 감하는 방향으로 입력하며 이는 식 (4)와 같다.

$$V_{dc}^* = V_{dc0} - KI_{dc} \quad (4)$$

여기서,  $K$ 는 등가저항의 역할을 하여 실제로는 저항이 존재하지 않아도 순환전류는  $KI_{dc}$  경로가 추가되므로 제거 될 수 있다.

#### 4.2 등가임피던스 $K$ 값의 설계

DC 그리드의 전압은 400V로 설정하였으며 Droop 제어에 의한 전압 변동률은 5%로서  $\pm 20V$ 내에서 3kW를 제어하게 된다. 따라서 계통연계 컨버터와 에너지 저장장치의 등가임피던스는 식 (5), (6)과 같이 정해진다.

$$\Delta V_{dc} = 20[V](5\%), \quad V_{dc\min} = 380[V] \quad (5)$$

$$P_{GRID} = 1.0[kW], \quad K_{GRID} = \frac{\Delta V_{dc} \times V_{dc\min}}{P_{GRID}} = 7.6[\Omega]$$

$$\Delta V_{dc} = 20[V](5\%), \quad V_{dc\min} = 380[V] \quad (6)$$

$$P_{GRID} = 2.0[kW], \quad K_{GRID} = \frac{\Delta V_{dc} \times V_{dc\min}}{P_{GRID}} = 3.8[\Omega]$$

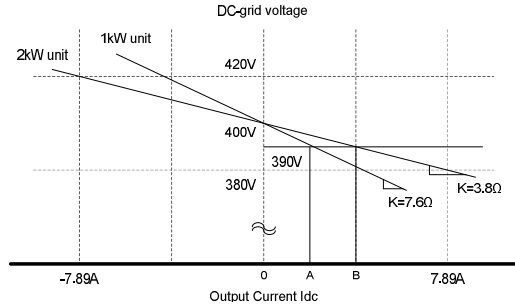
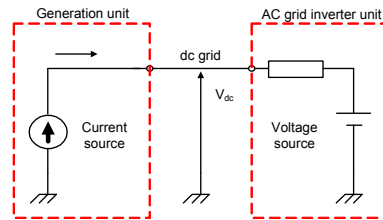
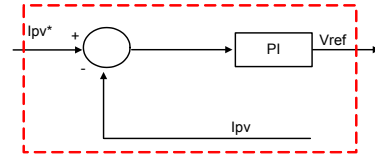


그림 5 DC 그리드의 전압-전류 특성

Fig. 5 Characteristic of Voltage-Current of DC Grid



(a) 등가회로



(b) 제어 블록도

그림 6 분산전원의 출력제어

Fig. 6 Control of Distributed Generation

여기서  $\Delta V_{dc}$ 는 전압의 변동분,  $V_{dc\min}$ 은 DC 그리드의 최저전압,  $P$ 는 전압제어장치의 정격용량을 나타낸다. 이 때, DC 그리드의 전압과 계통연계 컨버터, 에너지 저장장치의 출력전류의 Droop 곡선은 그림 5와 같이 표현되며 2개의 사선으로 둘러싸인 영역이 등가저항과 정격용량의 관계를 나타낸 것이다. 예를 들어 DC 그리드전압이 390V에 달하면 전압제어장치의 출력전류는 A Point, B Point로 결정되며 이때의 전류값은 식 (7),(8)과 같이 계산된다.

$$I_{dc2k} = (400 - 390)/3.8 = 2.6A \quad (7)$$

$$I_{dc1k} = (400 - 390)/7.6 = 1.3A \quad (8)$$

#### 4.3 분산전원의 제어

태양광 발전과 풍력발전의 제어는 그림 6에 보인 바와 같이 전류원으로 취급하여 제어를 수행한다. 각 장

치는 MPPT 제어기에서 설정한 기준 직류전류에 대해 출력전류를 공급하는 방식으로 각 장치를 전류원으로 표현하므로 순환전류가 발생하지 않게 된다.

따라서 DC 그리드의 전압은 이 전압을 제어하는 장치에 의해 설정된다. 예를 들면 하나의 발전장치와 하나의 교류연계장치가 DC 그리드에 결합되어 있을 때 등가회로는 그림 6(a)와 같다. 만일 분산전원의 출력이 10A이고 교류연계장치의 등가저항이 0.5Ω 이면 DC 그리드의 전압은 식(9)와 같이 계산된다.

$$V_{dc} = 400 + 0.5 \times 10 = 405 [V] \tag{9}$$

#### 4.4 DC 마이크로그리드의 제어

제안하는 DC마이크로그리드 시스템에 포함된 구성 요소들의 제어 블록도를 그림 7에 나타내었으며 앞서 설명했던 내용들을 상세하게 정리하고자 한다.

Grid-tied Converter는 교류계통으로부터 DC 그리드로 또는 역으로 전력을 전달하며 DC 그리드의 Droop 제어를 수행한다. 실측 DC 전압과 Droop 레퍼런스를 DC Voltage Controller를 통과시키고 생성된 전류 레퍼런스와 계통의 dq변환된 d축 전류를 Current Controller를 거치게 하여 3상 PWM 컨버터의 게이트 펄스를 생성해낸다.

PV Array는 모듈 20개를 직렬로 연결하여 구성하였고, 최대 1.5kW를 출력한다. PV Array Converter의 MPPT제어 기법은 안정적이고 구현이 용이한 P&O(Perturbation & Observation)기법을 적용하였다. 최대출력점을 추적하여 전류제어기의 기준전류  $I_{pv}^*$ 를 발생하고 전류제어기는 실측전류  $I_{pv}$ 가 기준전류를 추종하게 하며 이때 DC 그리드전압이 최대값을 넘지 않도록 기준전류  $I_{pv}^*$ 를 제한한다<sup>[9]</sup>.

PMSG Converter는 정격 2kW로서 블레이드의 출력 계수가 최대 일 때 기계적 출력은 최대가 되고 이에 따른 각속도를 추종하는 방식으로 최대출력제어를 수행한다. 컨버터의 속도제어기는 풍력터빈의 각속도  $w$ 가 생성된 속도기준신호  $w^*$ 를 추종하도록 토크기준전류  $I_{wq}^*$ 를 발생한다. 이때 DC 그리드전압이 최대값을 넘지 않도록 리미터를 두어 기준전류  $I_{wq}^*$ 를 제한한다.

Energy Storage Converter는 양방향 컨버터로서 DC 그리드의 Droop 제어를 수행한다. 실측 DC 전압과 Droop 레퍼런스를 DC Voltage Controller를 통과시키고 생성된 전류 레퍼런스와 배터리의 전류를 Current Controller로 보내어 게이트 펄스를 생성한다.

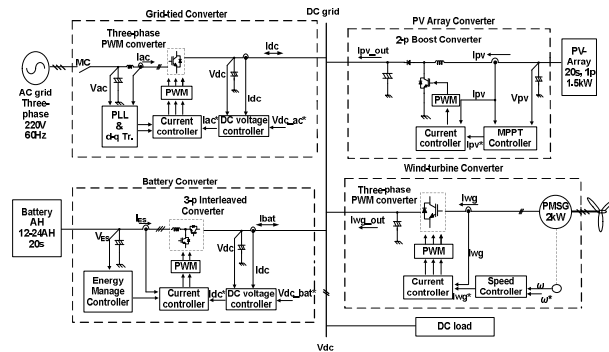


그림 7 컨버터 제어 블록도  
Fig. 7 Control Block of DC Micro-grid

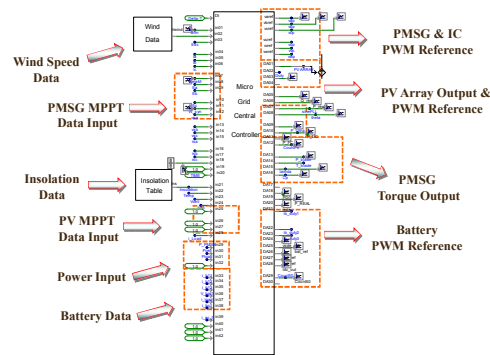


그림 8 MGCC (Micro Grid Central Controller)  
Fig. 8 MGCC (Micro Grid Central Controller)

### 5. 시뮬레이션 분석

제시하는 DC 마이크로그리드 제어의 타당성을 검증하기 위하여 PSCAD/ EMTDC 소프트웨어를 사용하여 시뮬레이션 실험을 하였다. 실제와 유사한 성능의 검증을 위해서는 반드시 분산전원들의 특성이 시뮬레이션 안에 반영되어야 하며 이를 위해 분산전원들을 PSCAD/ EMTDC 내부에 모델링하였다<sup>[10,11]</sup>.

그림 8은 시뮬레이션에 사용된 MGCC (Micro Grid Central Controller)이다. 전력회로와 PWM 펄스 발생부를 제외한 제어 알고리즘을 C-언어로 구성하고 코딩된 파일과 MGCC는 시뮬레이션 상에서 서로 연계되어 동작한다. MGCC의 왼쪽편은 신호들의 입력 측으로서 PMSG의 출력을 위한 풍속 데이터와 태양광 어레이의 출력을 위한 일사량 데이터, 모니터링을 위한 구성요소들의 계산된 전력값과 Droop 제어를 위한 데이터를 입력받는다. 오른쪽은 디지털 출력 단자로서, 분산전원들의 출력과 컨버터의 PWM 기준신호를 실시간으로 내보낸다. 표 1은 시뮬레이션에 사용된 구성

표 1 구성요소들의 파라미터  
Table 1 Parameter of Each Component

계통연계 컨버터	$C_{DC}$	$L_F$	$C_F$	변압기	
	1650[uF]	3[mH]	2.0[uF]	220 : 220	
PMSG	정격용량	정격전압	정격 회전속도	정격 주파수	
	2[kW]	220[V]	1200[rpm]	60 [HZ]	
PV Array	정격 용량	모듈 수	$I_{MPPT}$	$C_{PV}$	$L_{PV}$
	1.5[kW]	20	4.75[A]	270[uF]	2[mH]
Battery	정격 전압	내부 저항	$L_{BAT}$	$V_{MAX2}$	$V_{MIN2}$
	120[V]	0.11[Ω]	2[mH]	120[V]	80[V]

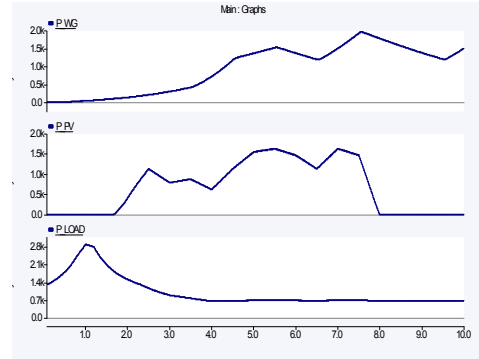
표 2 시뮬레이션 점검 항목  
Table 2 Check Point of Simulation

Droop 제어 시뮬레이션 확인 사항	
1	에너지 저장장치의 충·방전 천이동작
2	교류연계장치의 충·방전 천이동작
3	일정 전압에서의 전력 부담율
4	계통전류의 고조파 함유율
5	공통 DC단의 전압 과도현상
6	총 용량 대비 DC 전압의 비율

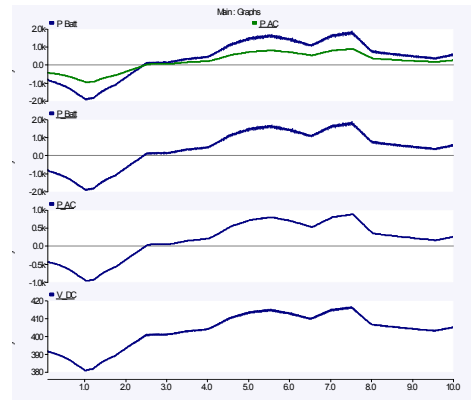
요소들의 파라미터이며 시뮬레이션을 통해 확인하고자 하는 사항들을 표 2에 나타내었다. DC 마이크로그리드 운영 중 발생할 수 있는 모든 상황에 대해 제안하는 기법의 타당성 검증이 목적이며 또한 발생할 수 있는 과도현상도 체크해 보아야 한다. 이를 위해 타당한 시나리오를 가정하고 6초간 시뮬레이션을 수행하였다.

그림 9(a)는 위에서부터 PMSG, PV Array의 출력을 나타내며 입력되는 일사량 데이터와 풍속 데이터에 따라서 출력이 가변되고 있으며 MPPT제어가 수행되고 있음을 보여준다. 세 번째 그래프는 부하의 소모전력을 나타내며 안정적으로 공급되고 있음을 확인하였다.

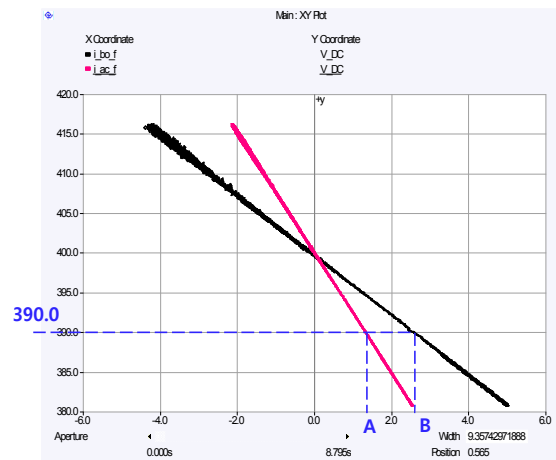
그림 9(b)는 교류계통, 배터리의 전력과 DC 그리드의 전압을 나타낸다. 앞서 용량 산정에서 에너지 저장 장치의 용량이 계통연계 컨버터의 용량보다 두 배 높게 설정되었으며 결과 그래프에서 정확히 전력을 부담하고 있음을 확인할 수 있다. DC 마이크로그리드의 용량은 총 3kW이며 잉여전력이 총 용량만큼 생산되었을 때 DC 그리드의 전압이 420V 근처에서 제어되며 부족전력이 총 용량만큼 발생하였을 때 DC 그리드의 전압이 380V 근처에서 제어되는 것을 확인하였다. 정확하게 전력을 각각의 컨버터가 부담하는 지 확인하기 위하여 그림 9(c)에 계통연계 컨버터와 에너지 저장 장치의 Droop 특성 그래프를 나타내었다. 표시된 Point A, B는 DC 그리드의 전압이 390V일 때 배터리 컨버



(a) PMSG, PV ARRAY, 부하 전력



(b) 교류계통, 배터리의 전력과 DC 그리드 전압



(c) Droop 곡선

그림 9 시뮬레이션 결과  
Fig. 9 Simulation Results

터와 계통연계 컨버터의 감당 전류를 나타내며 설정된 용량에 따라서 DC 그리드의 Droop 제어가 원활히 수행되고 있음을 보인다.

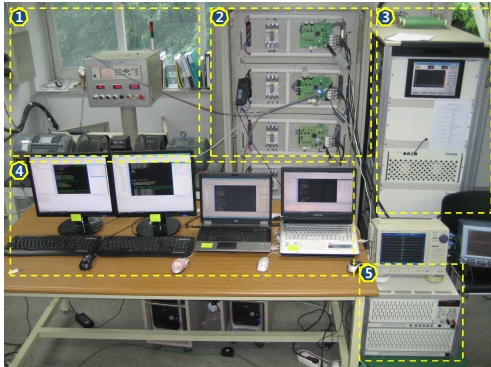


그림 10 구축된 실험환경  
Fig. 10 Hardware Experimental Set-up

앞서 표 2에서 확인하고자 하였던 사항들은 모두 검증이 되었으므로 제안하는 운용기법은 어느 상황에서도 DC 그리드를 안정적으로 운용이 가능하며 직류부하에 고품질의 전력을 공급할 수 있음이 모의실험에서 검증되었다.

### 6. 하드웨어 실험

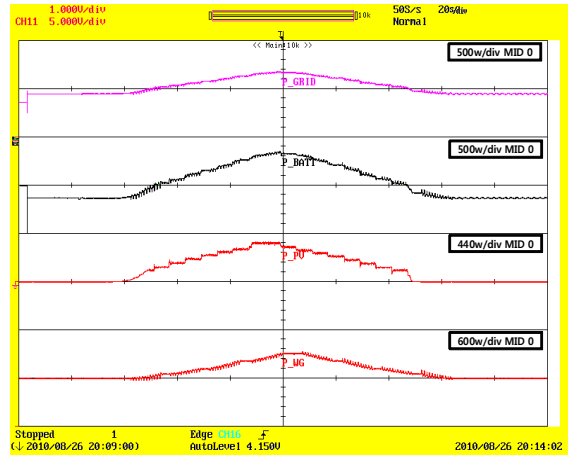
그림 10은 3kW급 DC 마이크로그리드 통합 실험을 위해 구축된 실험환경이다. 구비된 PV Array 시뮬레이터의 용량은 2kW, 풍력발전 시뮬레이터의 용량은 1.6kW이며 부하는 600W의 기저부하와 2.4kW의 가변 부하를 사용하였다. 실험에 사용된 분산전원들은 모두 임의의 일사량이나 풍속에 대해서 출력의 변동을 줄 수 있으므로 실제 환경에서의 특성 적용이 가능하다.

번호 순서대로 풍력발전 시뮬레이터, 3kW급 DC 마이크로그리드 장치, PV Array 시뮬레이터, 컨버터 구동용 PC, 가변 직류부하이며 DC 마이크로그리드 장치 밑에 18AH-220 용량의 납산 배터리가 들어있다. 구축된 DC급전 시스템의 최대, 최소 용량을 식 (10), (11)에 나타내었다.

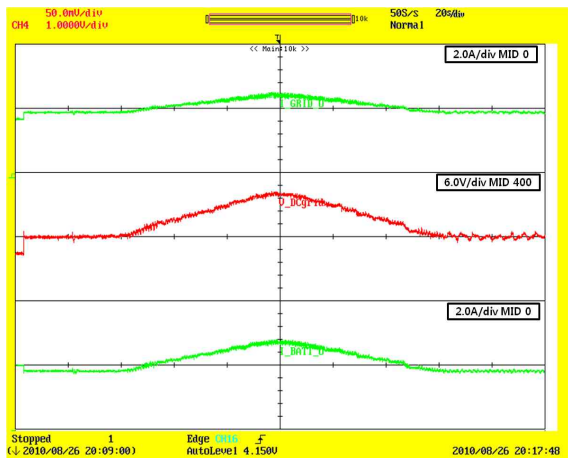
$$\text{분산전원}(1.6kW + 2.0kW) - \text{기저부하}600W = 3kW \gg DC 420V \quad (10)$$

$$\text{분산전원 } 0kW - \text{부하}(600W + 2400W) = -3kW \gg DC 380V \quad (11)$$

그림 11에 통합실험 |의 결과를 나타내었으며 먼저 DC 그리드에 잉여전력이 공급되고 있는 상황에 대해 수행하였다. 분산전원 시뮬레이터들의 출력을 변동시켜 최대 3kW가 출력될 때까지 전력을 공급하고 다시 출력을 감소시켜 전압제어장치에서의 Droop제어를 검



(a) 교류계통, 배터리, PV Array, PMSG의 출력



(b) 교류계통 출력전류, DC 그리드 전압, 에너지 저장장치 출력전류

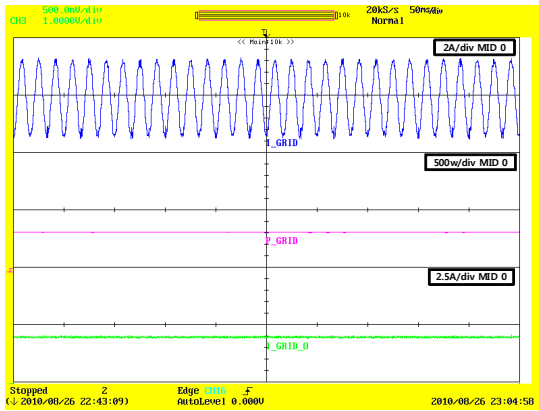
그림 11 통합 실험 결과 |  
Fig. 11 Experiment Result |

증하였다.

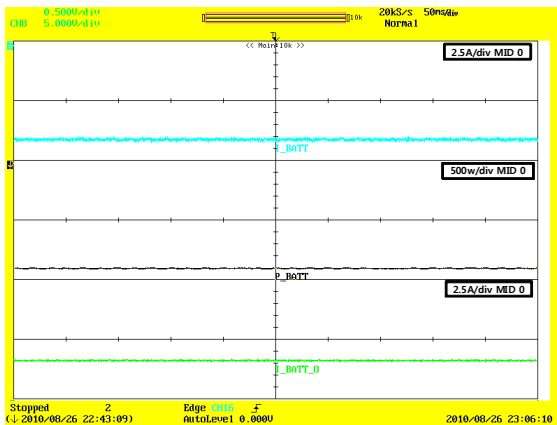
그림 11(a)는 순서대로 교류계통, 배터리, PV Array, PMSG의 출력을 나타내며, 설정한 대로 계통연계 컨버터에서 제어되는 전력은 에너지 저장장치에서 제어되는 전력의 1/2임을 확인하였다. PV Array와 PMSG에서는 MPPT제어를 수행하면서 설정된 시나리오대로 최대 3kW의 전력을 DC그리드에 공급하고 있다. 분산전원에서 출력이 공급되기 전에 기저부하의 전력공급은 교류연계장치와 배터리 컨버터에서 감당하다가 분산전원의 출력이 발생하면 반대로 전류의 부호가 바뀌면서 전력이 흡수되었다. 그림 11(b)는 교류연계장치 출력전류, DC 그리드 전압, 배터리 컨버터 출력전류를

나타낸다. 전력파형과 마찬가지로 교류연계장치의 출력전류는 배터리 컨버터의 출력전류의 1/2이며 DC 그리드의 전압은 최대 3kW일 때 약 420V에서 제어되고 있음을 확인하였다.

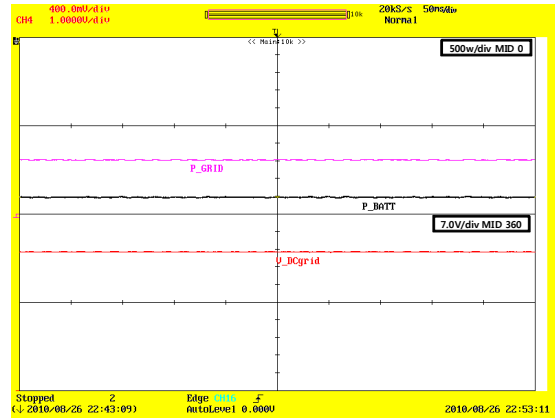
그림 12에 통합실험 II의 결과를 나타내었으며 DC 그리드에 부족한 전력이 발생한 상황이다. 분산전원에서 출력은 없으며 부하의 수요전력은 최대 3kW에서 실험을 수행하였다. 그림 12(a)는 교류연계장치의 전류, 전력, 출력전류이다. 3kW의 부하에 대해 1kW를 감당하고 있으며, 이에 필요한 전류를 출력하고 있음을 확인할 수 있다. 그림 12(b)는 에너지 저장장치의 전류, 전력, 출력전류를 나타낸다. 3kW의 부하에 대해 2kW를 감당하고 있으며 이에 필요한 전류를 출력하고 있다. 그림 12(c)는 교류연계장치 전력, 배터리 컨버터 전력, DC 그리드 전압이다. 설정된 전력 분배치 만큼 전압제어장치가 서로 전력을 균등하게 감당하고 있는 것을 확인할 수 있고 3kW의 부족전력에 대해 DC 그리드의 전압은 약 380V에서 제어되고 있음을 보였다.



(a) 교류연계장치의 전류, 전력, 출력전류



(b) 배터리 컨버터의 전류, 전력, 출력전류



(c) 교류연계장치 전력, 배터리 컨버터 전력, DC 그리드 전압

그림 12 통합 실험 결과 II  
Fig. 12 Experiment Result II

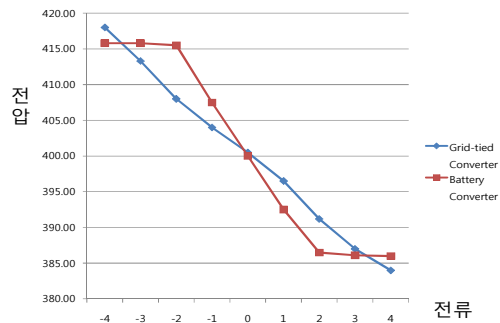


그림 13 Droop 특성  
Fig. 13 Droop Characteristic

실험결과를 토대로 그림 13에 계통연계 컨버터와 에너지 저장장치의 Droop 특성 그래프를 나타내었다. 시뮬레이션에서와 동일한 특성을 하드웨어 실험에서도 얻을 수 있었다.

## 7. 결 론

본 논문에서는 직류 마이크로그리드에서 Droop 제어를 기반으로 한 시스템의 자율동작을 분석한 내용에 대해 기술하였다. 분산전원을 이용한 소용량 DC마이크로그리드시스템의 Droop 제어에 의한 시스템의 Autonomous Operation은 각 구성요소들 간의 통신을 요구하지 않으면서 DC마이크로그리드에서 필연적으로 발생하는 순환전류를 억제하여 이로 인해 높은 안정성과 신뢰성을 보인다. 따라서 DC 선로에 다른 전원이거나 부하가 추가되어도 동작에 영향을 받지 않으며, 연



계되어 있는 교류계통에 사고가 발생하여도 안정적인 전력운용이 가능하다.

이 논문 또는 저서는 2010년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(R1A5A003-2010-0026283)

### 참 고 문 헌

[1] D. Salomonsson, L. Sode, A. Sannino, "An Adaptive Control System for a DC Microgrid for Data Centers", *Industry Applications Conference, 2007*, Sept. 23-27.

[2] H. Kakigano, Y. Miura, T. Ise, R. Uchida "DC Micro-grid for Super High Quality Distribution -System Configuration and Control of Distributed Generation and Energy Storage Devices-", *IEEE PESC'06*, 2006, June 18-22.

[3] Bi. Rui, Ding. Ming, Xu. Ting Ting, "Design of common communication platform of microgrid", *Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*, 2010, June 16-18.

[4] A. Ruiz-Alvarez, A. Colet-Subirachs, O. Gomis-Bellmunt, J.M. Fernández -Mola, J. López-Mestre, A. Sudria-Andreu, "Design, management and comissioning of a utility connected microgrid based on IEC 61850", *Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe)*, 2010, Oct. 11-13.

[5] Y. Ito, Y. Zhongqing, H. Akagi, "DC microgrid based distribution power generation system", *Power Electronics and Motion Control Conference*, Vol. 3, pp. 1740-1745, 2004, Aug 14-16.

[6] F. Katiraei, R. Iravani, P. Lehn, "Micro-grid autonomous operation during and subsequent to islanding process", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 20, No. 1, 2005, Jan.

[7] P. Piagi, R.H. Lasseter, "Autonomous control of microgrids", *Power Engineering Society General Meeting*, 2006, Oct.

[8] P. Biczal, "Power Electronic Converters in DC Microgrid", *IEEE CPE'07 (Compatibility in Power Electronics 2007)*, Gdynia, Poland, 2007, May 29-June 01,

[9] Jong-Hyoung Park, Heung-Geun Kim, Eui-Cheol Nho, and Tae-Won Chun, "Power Conditioning System for a Grid Connected PV Power Generation Using a Quasi-Z-Source Inverter", *Journal of Power Electronics*, Vol. 10, No. 1, pp. 79-84, 2010.

[10] Sheldon S. Williamson, S. Chowdary Rimmalapudi, Ali Emadi, "Electrical Modeling of Renewable Energy Sources and Energy Storage Devices", *Journal of Power Electronics*, Vol. 4, No. 2, pp. 117-126, 2004.

[11] Ji-Heon Lee, Hyun-Jun Kim, Byung-Moon Han, Yu-Seok Jeong, Hyo-Sick Yang and Han-Ju Cha, "DC Micro-grid Operational Analysis with a Detailed Simulation Model for Distributed Generations," *Journal of Power Electronics*, Vol. 11, No. 3, pp. 350-359, 2011.

### 저 자 소 개



**이지헌(李知憲)**

1983년 12월 19일생. 2008년 명지대 전기공학과 졸업. 2008년~2010년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2010년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.



**김현준(金賢竣)**

1985년 11월 12일생. 2011년 명지대 전기공학과 졸업. 2011년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.



**한병문(韓炳文)**

1976년 서울대 전기공학과 졸업. 1988년 미 아리조나 주립대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). Westinghouse 중앙연구소 선임연구원. 현재 명지대 전기공학과 교수. 당 학회 회장.