

# 독립형 DC 마이크로그리드에 적용 가능한 BESS의 SoC를 기반으로 한 새로운 출력전압 제어기법

NeW Output Voltage Control Scheme Based on SoC Variation of BESS Applicable  
for Stand-alone DC Microgrid

유 승 영\* · 김 현 준\* · 한 병 문†  
(Seung-Yeong Yu · Hyun-Jun Kim · Byung-Moon Han)

**Abstract** - This paper proposes a new output voltage control scheme based on the SoC variation of the battery energy storage system (BESS) applicable for the stand-alone DC microgrid. The proposed control scheme provides relatively lower variation of the DC grid voltage than the conventional droop method. The performance of proposed control scheme was verified through computer simulations for a typical stand-alone DC microgrid which consists of BESS, photo-voltaic (PV) panel, engine generator (EG), and DC load. A scaled hardware prototype for the stand-alone DC microgrid with DSP controller was set up in the lab, and the proposed control algorithm was installed in the DSP controller. The test results were compared with the simulation results for performance verification and actual system implementation.

**Key Words** : Stand-alone DC microgrid, Droop control, State-of-Charge(SoC), Photo-Voltaic(PV) panel, Engine Generator (EG), Battery Energy Storage System(BESS)

## 1. 서 론

신재생에너지원과 배터리에너지저장장치를 결합하여 부하에 전력을 공급하는 소규모 전력망인 마이크로그리드는 상용 전력망이 구비된 지역에서는 이에 연계하여 운전되고, 상용 전력망이 구비되어 있지 않은 오지나 낙도에서는 독립적으로 운전된다. 그동안 국내에서는 낙도의 경우 통상 디젤엔진발전기를 사용하여 수송가에 전력을 공급하였다. 그러나 최근 유가와 환경 문제 때문에 독립형 마이크로그리드의 보급이 점차 확대되고 있다[1], [2].

마이크로그리드는 구성 요소들을 교류로 연결한 AC 마이크로그리드와 직류로 연결한 DC 마이크로그리드로 구분된다. AC 마이크로그리드는 전압과 주파수 제어가 필요하고, 무효전력을 소모하며 재투입 시 동기화 문제를 야기한다. 반면에 DC 마이크로그리드는 전압 제어만 필요하고, 대부분의 신재생에너지원과 배터리에너지저장장치의 경우 직류를 출력하기 때문에 한 번의 전력변환이 요구되어 시스템의 비용과 손실이 낮은 장점을 갖는다[3]-[5]. 따라서 오지나 낙도에 신재생에너지원인 태양광의 보급이 증가할 경우 독립형 DC 마이크로그리드의 보급도 증가할 것으로 보인다.

독립형 DC 마이크로그리드에서 DC Grid 전압을 제어하는 방

법에는 각 분산전원과 배터리에너지저장장치 그리고 부하의 전력을 검출하여 통신망을 통해 중앙제어기로 전송하여 생산, 저장, 소비 전력의 평형을 유지하도록 제어하는 방식이 있으나 고속통신망을 필요로 한다. [6]-[9]에서는 통신망을 이용한 방식이 제안되었다. 그러나 통신망에 장애가 생길 경우 시스템의 오동작에 따른 막대한 경제적 손실이 야기될 수 있다. 또한 통신망 설치 장소의 제한이 있다는 단점을 가진다. 이러한 단점을 보완하기 위해 배터리에너지저장장치의 출력전압을 전력의 흐름에 따라 자율적으로 제어하는 Droop 제어가 제안되어 사용되고 있다. 자율적으로 제어하는 Droop 제어는 간단하며 고속 통신망을 사용하지 않기 때문에 비용이 낮은 장점이 있다.

Droop 제어는 일반적으로 각 분산전원의 출력과 DC Grid사이의 저항 성분에 의해 동작하며 저항 성분은 실제로 삽입하거나 가상의 등가저항을 이용한다[10]-[12]. 저항을 실제로 삽입하게 되면 비용 및 크기의 증가 때문에 비실용적이며 일반적으로 Droop 제어는 가상의 등가저항을 이용한다. Droop 제어의 방법은 출력 DC전류가 증가하게 되면 그 장치의 출력 DC Grid 전압이 등가저항 성분에 의해 떨어지는 방식이다. 또한 출력 DC Grid전압과 출력 DC전류 사이의 균형을 고려하여 등가저항의 값이 적절히 설정되어야 한다[13].

일반적인 Droop 제어 방식을 적용하는 것은 [14]-[16]에 상세하게 설명되어 있다. [14]에서는 배터리에너지저장장치와 분산전원들이 DC Grid 전압에 따라 자율적으로 제어가 수행되며 배터리에너지저장장치의 보호를 위해 SoC(State-of-Charge)에 따른 운전 영역을 설정하여 운영하는 방식이다. 각 기기를 연계하

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Myongji University, Korea.

E-mail : erichan@mju.ac.kr

\* Dept. of Electrical Engineering, Myongji University, Korea  
Received : January 26, 2015; Accepted : June 20, 2016

고 있는 DC Grid전압은 배터리에너지저장장치의 전압제어기를 통해 기준전압으로부터 출력 DC전류와 등가저항을 곱한 값을 감하여 산출된다. 또한 SoC의 운전 영역을 설정하여 이를 벗어나면 등가저항 값을 크게 하여 보호하게 된다. 하지만 출력 DC 전류를 통해 DC Grid 전압을 산출하므로 전류의 변동이 다소 큰 경우 출력되는 DC Grid 전압의 변동도 크게 되고, SoC가 운전 영역을 벗어나서 커진 등가저항 값에 의한 영향이 시스템의 불안정을 유발한다.

[15]는 DC Grid전압을 일반적인 Droop 제어를 적용한 후 기준전압을 보정하는 방식이다. 이 방식의 문제점은 각 분산전원의 출력 전류가 동일하지 않기 때문에 보정된 기준 전압은 각각 다르게 되어 부하에 전달되는 전력에 오차가 발생할 수 있다. 또한 시뮬레이션에서 타당성을 검증 했지만 하드웨어를 통해 진행된 실험결과가 없기 때문에 실질적인 적용에는 별도의 고려가 필요하다.

Droop 제어에서는 등가저항 값에 따라 전압과 전류사이의 특성이 변하게 되는데, 이를 개선하기 위해 [16]에서는 부하의 변동에 따라 등가저항 값을 바꾸는 방식을 제안하였다. 하지만 부하의 변동이 있을 때 등가저항 값의 변화 때문에 과도현상이 크게 나타나는 단점이 있기 때문에 오지와 낙도와 같이 부하의 변동이 잦은 곳에서 적용하기 힘들다.

[17]에서는 계통, 배터리에너지저장장치, 슈퍼 캐패시터, 태양광 발전 및 부하가 연계된 DC 마이크로그리드 운용 전략을 제안하였다. 계통이 DC Grid전압을 제어하고, 계통 고장 시 배터리에너지저장장치가 DC Grid전압을 제어하는 역할을 하게 된다. 운용 전략은 태양광 발전, 슈퍼 캐패시터, 계통, 배터리에너지저장장치 순으로 우선순위를 설정하고 DC Grid전압의 크기에 따라 부하의 전력을 부담하는 구성이 달라진다. 하지만 배터리에너지저장장치의 과충전과 과방전으로부터의 보호 알고리즘이 없으며, 계통 고장 시 배터리에너지저장장치가 DC Grid전압을 제어할 때 과도상태에 대한 언급이 없고, 시뮬레이션 결과도 없어 시스템 운용에 대한 신뢰성을 검증하기 어렵다.

따라서 본 논문에서는 독립형 DC 마이크로그리드 시스템의 전압안정도를 향상시키는 알고리즘을 제안한다. 이는 배터리에너지저장장치의 SoC 변동을 이용하여 DC Grid전압을 산출하는 방식이며 기준 DC Grid전압은 기저전압에 SoC와 매개변수를 곱한 값을 더하여 산출한다. 일반적으로 분산전원은 출력이 일정하지 않으므로 배터리에너지저장장치의 출력 DC전류가 SoC에 비해 큰 변화 폭을 갖게 된다. 따라서 제안하는 방식이 출력 DC전류 기반이었던 Droop 제어 방식보다 DC Grid전압 변동이 낮다는 장점을 갖는다. 또한 Droop 제어 방식에서 빈번한 전류 변동에 따른 전압변동이 문제이지만 제안하는 방식은 고정된 매개변수로 인해 안정적이며 SoC의 크기만 고려하기 때문에 제어의 속응성 측면에서 장점이 있다. 본 논문에서는 제안하는 시스템의 동작타당성을 체계적으로 비교 분석하기 위해 PSCAD/EMTDC 소프트웨어를 이용하여 동작과 성능을 검증하였으며, 이를 기반으로 하드웨어 시뮬레이터를 제작하고 실험을 실시하여 실제 독립형 DC 마이크로그리드에 적용 가능성을 확인하였다.

## 2. 독립형 DC 마이크로그리드

그림 1은 대표적인 독립형 DC 마이크로그리드의 구성을 나타낸 것이다. 분산전원으로는 태양광발전과 디젤엔진발전을 사용하였고, 배터리에너지저장장치가 더해져 구성되었다. 태양광발전의 경우 기상조건에 따라 발전량이 불규칙적이므로 수용가에 안정적인 전력을 공급하기 위해 배터리에너지저장장치가 필요하고 태양광발전의 출력이 충분하지 못한 경우를 대비하여 디젤엔진발전기를 결합하였다.

일반적으로 태양광발전의 개방전압은 DC 전압이며 DC Grid의 동작전압보다 낮으므로 승압하기 위해 3상 인터리브 부스트 DC-DC 컨버터를 사용한다. 또한 일사량과 기타요인에 따라 출력이 변동하기 때문에 MPPT (Maximum Power Point Tracking) 제어 기법을 사용한다.

배터리에너지저장장치는 DC Grid의 전압제어를 통해 충/방전 시 승압 또는 강압하여 전체 시스템의 전력을 조절한다. 또한 배터리에너지저장장치의 전류 리플을 낮추기 위해 3상 인터리브 양방향 DC-DC 컨버터를 사용한다[18].

디젤엔진발전기는 3상 교류발전기이므로 3상 AC/DC 컨버터에 의해 DC Grid에 연결된다. 교류부하는 3상 DC/AC 컨버터에 전력을 공급받고 직류부하는 동작전압에 따라 DC Grid에서 직접 받거나 DC/DC 컨버터를 통해 전력을 공급받는다.

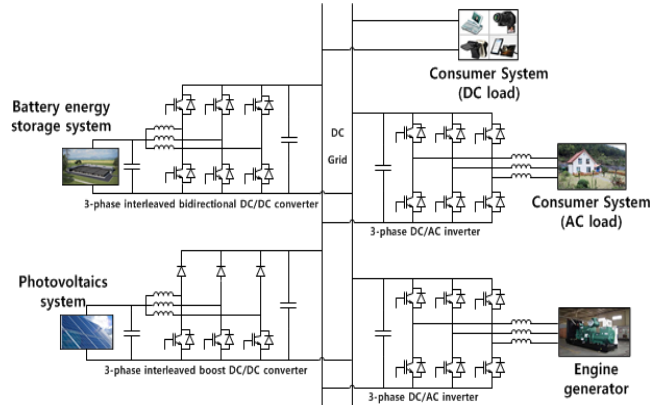
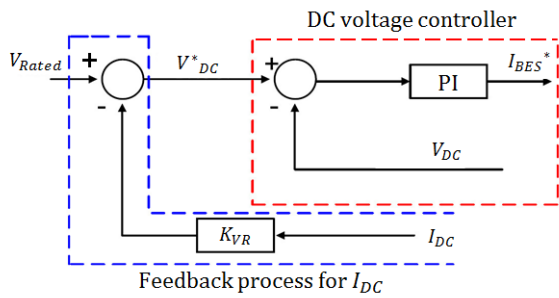


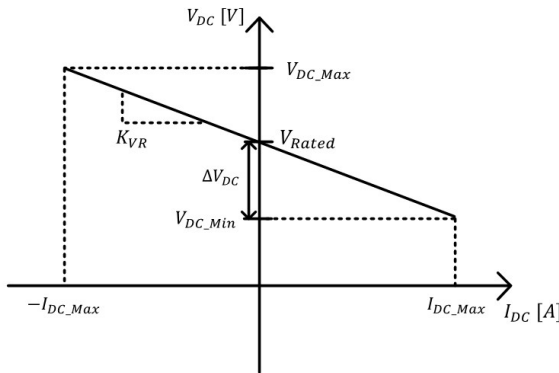
그림 1 독립형 DC 마이크로그리드의 구성  
Fig. 1 Configuration of stand-alone DC microgrid

독립형 DC 마이크로그리드에서는 배터리에너지저장장치의 출력전력을 자율적으로 조절하여 DC Grid의 전압을 유지하는 Droop 제어를 일반적으로 사용하고 있다. Droop 제어기는 그림 2(a)에 보인 것처럼 배터리에너지저장장치의 출력 DC전류를 측정하여 여기에 배터리에너지저장장치의 전류-전압 특성을 나타내는 상수  $K_{VR}$ 를 곱한 결과를 DC Grid 전압의 정격 치에서 감하여 Droop 전압의 기준치를 산출한다. 그림 2(b)는 이러한 관계를 그래프로 나타낸 것이고 이는 식 (1)과 같다.

$$V_{DC}^* = V_{Rated} - (K_{VR} \times I_{DC}) \quad (1)$$



(a)



(b)

그림 2 Droop에 의한 DC 전압제어기: (a) 제어기 구성, (b) Droop 곡선

Fig. 2 DC voltage control by Droop: (a) Controller structure, (b) Droop curve

여기서,  $K_{VR}$ 은 등가저항의 역할을 하여 실제로는 저항이 존재하지 않아도 순환전류는  $K_{VR} \times I_{DC}$  경로가 추가되므로 제거될 수 있다.

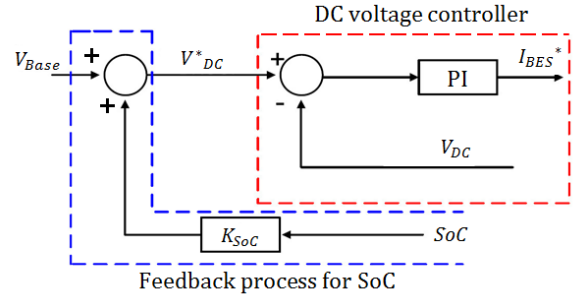
DC Grid 전압을  $V_{DC}$ 로 하였을 때  $K_{VR}$ 는 전압변동률  $\Delta V_{DC}$ 와 배터리에너지저장장치의 정격용량  $P_{BESS}$ 에 따라 식 (2)와 같이 정해진다.

$$K_{VR} = \frac{\Delta V_{DC} \times V_{DC\_Min}}{P_{BESS}} \quad (2)$$

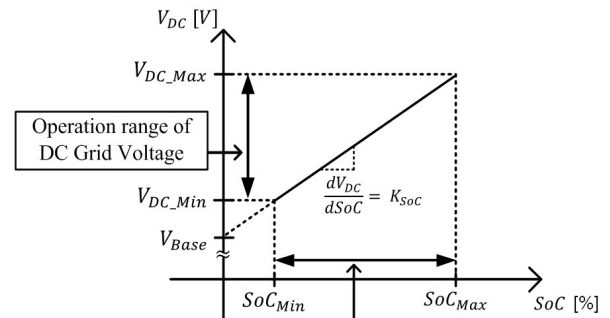
### 3. 독립형 DC 마이크로그리드의 동작 제어

#### 3.1 BESS DC 전압제어 기법

본 논문에서 제안하는 DC 전압 제어기법은 그림 3(a)에 보인 바와 같이 배터리에너지저장장치의 SoC를 검출하여 계인 값을 곱한 결과를 기저 전압에 더하는 방식이며 그 원리는 그림 3(b)와 같고 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다. 계인 값과 기저전압 값을 도출하기 위해 배터리에너지저장장치의 SoC의 운용범위와 DC Grid 전압의 동작범위를 이용한다. 식 (4)와 같이 배터리의 SoC



(a)



(b)

그림 3 제안하는 DC 전압 제어기: (a) 제어기 구성, (b) 제어 곡선  
Fig. 3 Proposed DC voltage control: (a) Controller structure, (b) Control curve

가 최대일 때 출력 DC Grid전압의 크기가 최대가 되고 식 (5)와 같이 배터리의 SoC가 최소일 때 출력 DC Grid전압의 크기가 최소가 된다. 식 (4)와 식 (5)를 연립하게 되면 식 (6)과 같이 나타난다. 따라서 전압변동률을 고려하여 도출된 DC Grid 전압의 동작범위와 SoC의 운용범위를 설정하게 되면 기저전압  $V_{Base}$ 와 계인 값  $K_{SoC}$ 을 도출할 수 있다.

$$V_{DC}^* = V_{Base} + (SoC \times K_{SoC}) \quad (3)$$

$$V_{DC\_Max}^* = V_{Base} + (SoC_{Max} \times K_{SoC}) \quad (4)$$

$$V_{DC\_Min}^* = V_{Base} + (SoC_{Min} \times K_{SoC}) \quad (5)$$

$$V_{DC\_Max}^* - V_{DC\_Min}^* = (SoC_{Max} - SoC_{Min}) \times K_{SoC} \quad (6)$$

DC Grid 정격 전압이 400V이고 전압변동률이 5%면 DC Grid 전압 동작범위의 최저치는 380V 최고치는 420V로 정해진다. 또한 에너지 저장장치 SoC의 운용범위를 20%에서 90%로 가정하면 DC Grid 전 최종 제어는 식 (7)과 같이 나타난다.

$$V_{DC}^* = 368.57 + (SoC \times 0.57) \quad (7)$$

제안하는 제어 방식에서 필요로 하는 SoC 값을 구하기 위해서는 식 (8)에 보인 전류적산법을 이용하여 배터리의 SoC를 추정한다.

$$SoC = SoC^* - \frac{1}{C_e} \int i_{ic} dt \quad (8)$$

여기서,  $SoC^*$ 는 초기 SoC를 나타내고  $C_e$ 는 배터리의 총용량이며  $i_{ic}$ 는 배터리 방전전류를 나타낸다.

### 3.2 BESS 제어 안정도 분석

그림 4는 배터리에너지저장장치의 출력전압을 제어하는 제어기의 블록선도를 나타낸 것이다. 전압제어루프에 전류제어루프가 내재되어 있는 구조로 되어 있다.

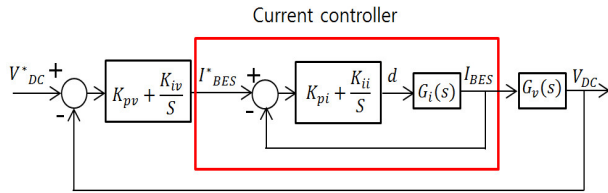


그림 4 전압제어기 폐루프 블록선도  
Fig. 4 Voltage controller closed-loop block diagram

그림 5는 배터리에너지저장장치의 컨버터 소신호 모델링을 위한 등가회로를 나타낸 것이다. 각 변수의 값과 PI제어기의 상수는 표 1과 같다.

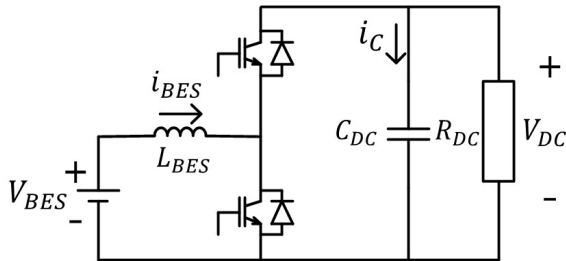


그림 5 배터리에너지저장장치의 컨버터 등가회로  
Fig. 5 Equivalent circuit of the BESS converter

양방향 초퍼의 소신호 모델을 이용하여 방전과 충전 시 전류 제어의 전달함수  $G_i(s)$ 를  $i_{BES}(s)$ 와  $d(s)$ 의 관계로 표시하면 아래 식과 같다.

$$G_i(s) = \frac{i_{BES}(s)}{d(s)} = \frac{V_{DC}}{sL_{BES}} \quad (9)$$

식 (9)의 전류제어의 전달함수  $G_i(s)$ 와 PI제어를 포함한 전류 제어기의 폐루프 전달함수  $G_{ci}(s)$ 는 표 1의 파라미터를 대입하면 식 (10)과 같이 구할 수 있다.

$$G_{ci}(s) = \frac{400s + 40000}{0.004s^2 + 400s + 40000} \quad (10)$$

표 1 양방향 초퍼의 회로와 PI 제어 파라미터

Table 1 Circuit and PI control parameter for bidirectional chopper

| Items     | Parameter |
|-----------|-----------|
| $V_{DC}$  | 400[V]    |
| $L_{BES}$ | 4[mH]     |
| $C_{DC}$  | 2200[μF]  |
| $D$       | 0.5       |
| $R_{DC}$  | 50[Ω]     |
| $K_{pi}$  | 1         |
| $K_{ii}$  | 100       |
| $K_{pv}$  | 0.5       |
| $K_{iv}$  | 10        |

전류제어기의 폐루프 전달함수  $G_{ci}(s)$ 의 보드선도를 그리게 되면 그림 6과 같은 결과를 얻을 수 있다. 그림 6을 보면 충분한 위상 마진이 있기 때문에 전류제어기는 안정함을 알 수 있다

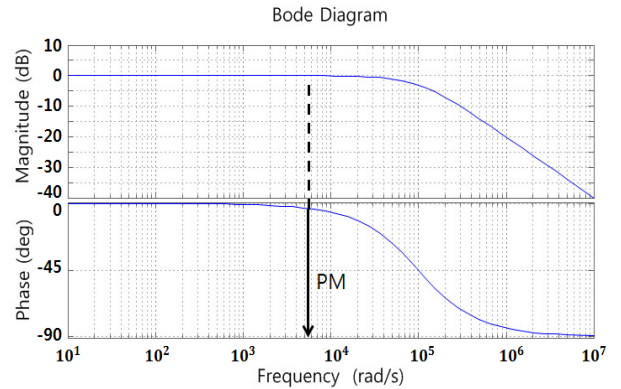


그림 6 전류제어기 폐루프 전달함수의 보드선도  
Fig. 6 Bode diagram of current controller closed-loop transfer function

양방향 초퍼의 소신호 모델을 이용하여 방전과 충전 시 전압 제어의 전달함수  $G_v(s)$ 를  $v_{DC}(s)$ 와  $i_{BES}(s)$ 의 관계로 표시하면 아래 식과 같다.

$$G_v(s) = \frac{v_{DC}(s)}{i_{BES}(s)} = \frac{(1-D) - \frac{sL_{BES}}{(1-D)R_{DC}}}{sC_{DC} + \frac{2}{R_{DC}}} \quad (11)$$

식 (11)의 전압제어의 전달함수  $G_v(s)$ 와 PI제어 및 전류제어기를 포함한 전압제어기의 폐루프 전달함수  $G_{cv}(s)$ 는 표 1의 파라미터를 대입하면 식 (12)와 같이 구할 수 있다.

$$G_{cv}(s) = \frac{-0.032s^3 + 96.16s^2 + 11936s + 200000}{0.0000088s^4 + 0.8482s^3 + 200.2s^2 + 13536s + 200000} \quad (12)$$

전류제어기를 포함한 전압제어기의 폐루프 전달함수  $G_{cv}(s)$ 는 그림 7과 같이 보드선도를 얻을 수 있다. 이 보드선도에서 충분한 위상 마진과 게인 이득 마진이 있기 때문에 전압제어기는 안정함을 알 수 있다.

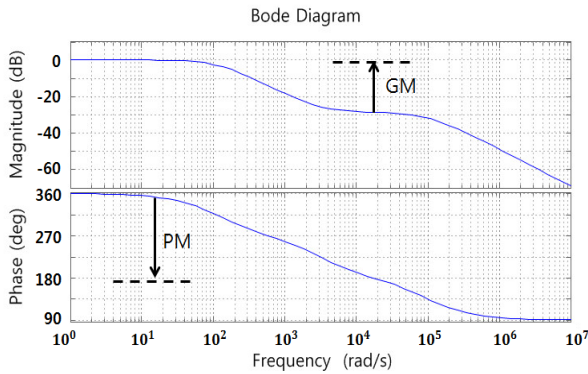


그림 7 전압제어기 폐루프 전달함수의 보드선도  
 Fig. 7 Bode diagram of voltage controller closed-loop transfer function

### 3.3 시스템 동작모드

본 논문에서 엔진발전에 의한 전력생산을 최소화 하는 것이 목적이기 때문에 배터리에너지저장장치의 SoC가 20%에 도달하기 전에는 엔진발전을 가동하지 않고, 배터리에너지저장장치의 SoC가 20%에 도달하여 DC Grid전압이 최저치에 도달하면 엔진발전을 최대출력으로 가동하여 부하에 전력을 공급하고 배터리에너지저장장치를 충전한다. 태양광발전은 SoC가 20%에서 90%인 영역에서 MPPT(Maximum Power Point Tracking) 제어를 통해 생산된 전력을 부하에 공급 하고 잉여전력은 배터리에너지저장장치에 공급한다[19]. 그러나 일조량이 강하여 태양광발전의 생산량이 평균보다 많고 수용가의 전력소모가 적을 경우 배터리의 SoC가 상한치인 90%에 도달함에 따라 DC Grid 전압이 상한치에 도달하면 배터리에너지저장장치의 보호를 위해 태양광발전의 출력을 인위적으로 저감한다.

그림 8(a)은 배터리에너지저장장치의 SoC에 따른 3가지 동작모드를 나타낸 것이다. 모드 1은 배터리의 SoC가 20%와 90%사이에 있을 때 태양광발전은 MPPT제어를 통한 최대출력인 MP\_MODE로 동작하고 엔진발전은 가동하지 않는다. 모드 2는 배터리를 보호하는 구간으로써 SoC가 90%에 도달했을 때 태양광발전은 MP\_MODE에서 저출력모드인 RP\_MODE로 전환하고 엔진발전은 가동하지 않는다. 모드 3은 배터리 SoC가 20%에 도달하였을 때 태양광 발전은 MP\_MODE로 동작하고 엔진발전은 최대출력으로 동작한다.

그림 8(b)은 SoC가 시간에 따라 변동하는 것을 가상한 곡선으로 SoC가 하한치 20%에 도달하면 엔진발전을 가동하고 SoC가

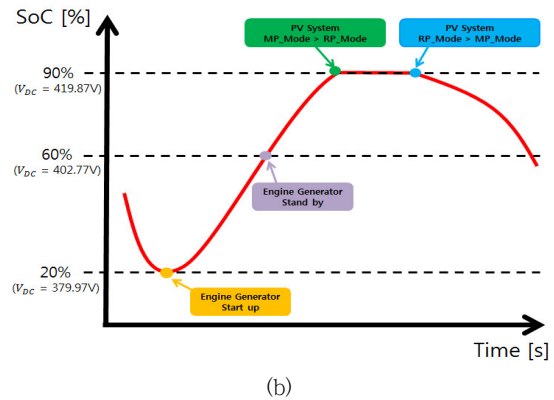
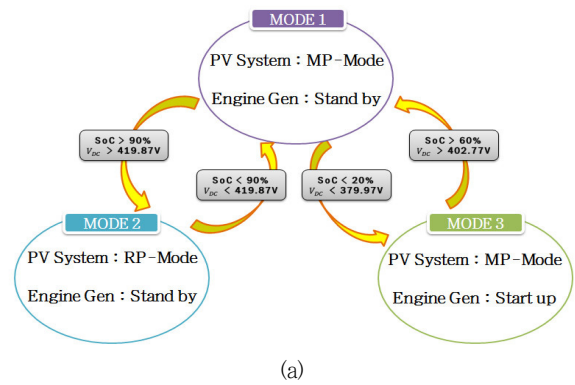


그림 8 SoC 변동에 따른 시스템 동작모드: (a) 상태전이도, (b) SoC 동작범위  
 Fig. 8 System Operation MODE with respect to SoC variation: (a) State transition, (b) SoC operation range

60%에 도달하기까지는 태양광발전과 엔진발전이 병렬로 가동하며 SoC가 60%에 도달하면 엔진발전은 가동을 중단하고 배터리는 태양광발전에 의해서만 충전된다. 그리고 SoC가 상한치인 90%에 도달하면 태양광발전의 출력을 저감하고 부하가 증가하여 SoC가 다시 감소하기 시작하면 태양광발전은 최대출력으로 동작한다.

### 4. 시뮬레이션에 의한 검증

제안하는 제어방식을 그림 1에 보인 독립형 DC 마이크로그리드 구성을 대상으로 PSCAD/EMTDC를 이용하여 모의실험을 수행하였다. 태양광발전에 사용된 태양전지는 등가회로를 기반으로 도출된 동특성 방정식을 C코드로 모델링을 하였다. 배터리에너지저장장치에 사용된 리튬-폴리머 배터리는 등가회로를 기반으로 도출된 Shepherd 모델을 사용하였다[20]. 엔진발전은 엔진의 속도와 토크 특성을 간단히 모델링하여 내장된 발전기모델과 결합하여 사용하였다.

표 2는 시뮬레이션에 사용한 엔진발전, 태양광발전, 배터리에

너지저장, 부하의 전기적 특성을 나타낸 것이다. 부하의 평균 사용전력은 3KW, 최대 사용전력은 4KW로 가정하였고, 배터리에너지저장장치의 경우 부조일수는 2일, 운용범위는 20%에서 90%, 배터리 평균사용시간은 8시간, 배터리전압은 250V로 가정하여 용량을 산정하였지만 시뮬레이션 시간 내에 각 모드 간 SoC에 따라 전환되는 특성을 보여주기 위해 실제 용량의 1/10인 6KWh로 산정하였다. 태양광발전의 경우 출력특성은 온도, 먼지와 이물질, 모듈별 배전 손실을 고려하여 80%의 효율로 가정하여 6KW로 정하였다. 엔진발전은 수송가의 최대전력을 고려하여 4KW로 정하였다.

표 2 주요 요소의 정격 파라미터

Table 2 Rated Parameter for Major Components

|                 |             |               |               |            |                     |
|-----------------|-------------|---------------|---------------|------------|---------------------|
| Li-poly Battery | Rated power | Rated Voltage | Rated Current | $L_{BAT}$  | Internal Resistance |
|                 | 6[kWh]      | 250[V]        | 24[Ah]        | 4[mH]      | 0.00046[Ω]          |
| PV              | Rated power | Rated Voltage | Rated Current | $L_{PV}$   | $C_{PV}$            |
|                 | 6[kW]       | 350[V]        | 17[A]         | 3[mH]      | 260[μF]             |
| EG              | Rated power | Rated Voltage | Rated Current | Rated RPM  | Rated Frequency     |
|                 | 4[kW]       | 220[V]        | 10[A]         | 1714[rpm]  | 400[Hz]             |
| Load            | Rated power | Rated Voltage | Rated Current | $L_{Load}$ | Rated Frequency     |
|                 | 3[kW]       | 220[V]        | 8[A]          | 3[mH]      | 60[Hz]              |

표 3 시뮬레이션에 의한 검토 항목

Table 3 Checking Items by Simulation

| Section | Checking Point  |
|---------|---|
| A       | Battery discharging mode                                |
| B       | SoC Limit Control of EG operation (Stand-by → Start-up) |
| C       | Battery charging mode (by EG maximum power operation)   |
| D       | SoC Limit Control of EG operation (Stand-by → Start-up) |
| E       | Battery charging mode (by PV MP_MODE operation)         |
| F       | SoC Limit Control of PV operation (MP_MODE → RP_MODE)   |
| G       | Battery discharging mode (by PV RP_MODE operation)      |
| H       | SoC Limit Control of PV operation (RP_MODE → MP_MODE)   |
| I       | Battery discharging mode (by PV MP_MODE operation)      |

전체 시뮬레이션은 23초 동안 실시하였다. 부하의 전력량은 임의로 설정했으며, 태양광 발전은 8초 이후로 일조량에 따른 출력 전력이 있다고 가정하였다. 또한 그림 8에 보인 모드전환의 과정이 잘 반영되도록 시뮬레이션을 실시하였으며 표 3에는 시뮬레이션을 통해 점검해야 하는 내용들을 나타내었다.

그림 9는 위의 시나리오를 기반으로 한 시뮬레이션 결과과형을 나타낸 것이다. 위에서부터 부하, 태양광 발전, 엔진 발전, 배터리에너지저장장치의 전력을 나타내며 SoC, 배터리에너지저장장치의 출력 전류, DC Grid전압을 순서대로 나타내었다.

초기 SoC를 25%로 설정하여 시뮬레이션을 진행한 구간 A는 모드 1상태로 태양광 발전의 동작은 MP\_MODE지만 8초 이후에 일조량이 발생한다고 가정 했으므로 출력 전력이 0kW이며 엔진 발전도 SoC의 운용 범위 중 하한치에 도달하지 않아 발전하지 않고 있다. 따라서 분산전원의 총 출력 전력이 0kW이기 때문에 부하에 필요한 전력의 100%를 배터리에너지저장장치가 부담하고 있고 이에 따라 SoC는 25%에서 20%까지 감소하고 있다. 또한 DC Grid 전압은 SoC변동에 의해 385V에서 최저 전압인 380V까지 감소하고 있다.

구간 B는 100% 부하의 전력을 부담하고 있던 배터리에너지저장장치가 SoC 하한치인 20%에 도달하여 비상사라 판단되기 때문에 모드 1에서 모드 3으로 모드전환이 동작되는 구간이며 모드 전환이 매끄럽게 이루어지는 것을 볼 수 있다. 엔진발전은 최대 출력으로 발전하기 시작하며, 태양광 발전은 구간 A와 같이 MP\_MODE지만 일사량이 없으므로 출력 전력은 0kW이다.

구간 C는 모드 3으로 동작하는 구간이며 엔진발전이 최대 출력인 4kW로 발전하고 있다. 최대 출력으로 발전하고 있는 엔진 발전에 의해 배터리에너지저장장치가 충전모드로 전환되어 SoC는 20%에서 60%까지 증가하고 있으며 DC Grid 전압은 380V에서 SoC가 60% 일 때의 전압 403V까지 증가하고 있다.

구간 D는 SoC가 60%에 도달하게 되면 배터리에너지저장장치가 안정적이라고 판단되어 모드 3에서 모드 1로 모드 전환이 동작되는 구간이다. 엔진발전은 비상시에만 발전하기 때문에 안정적이라고 판단되면 가동을 중지하게 된다.

구간 E는 태양광 발전이 이전의 구간과 같이 MP\_MODE로 동작하고 있고 8초 이후에 발생하는 일조량에 의해 전력 생산이 시작되는 구간이다. 9.5초 전까지 전력 생산량이 부하 전력에 미치지 못해 배터리에너지저장장치는 방전모드로 동작하고 있지만 9.5초 이후 일조량의 계속된 증가로 인해 생산되는 전력도 증가하여 부하의 전력을 부담하고 있던 배터리에너지저장장치가 충전모드로 전환 되는 것을 볼 수 있다. 이에 따라 SoC도 9.5초까지는 감소하지만 그 이후에는 다시 증가하는 것을 볼 수 있다.

구간 F는 SoC의 상한치 90%가 되었을 때 모드 1에서 모드 2로 모드 전환이 발생하는 구간이다. 태양광 발전의 MP\_MODE로 인해 배터리에너지저장장치가 과충전이 될 수 있기 때문에 저출력 모드인 RP\_MODE로 모드전환을 실시하고 있다. 이에 따라 배터리에너지저장장치가 충전모드에서 방전모드로 전환 되는 것을 볼 수 있다.

구간 G는 배터리에너지저장장치를 보호하기 위한 모드 2에서의 동작이며 태양광 발전은 전체 부하량의 평균 전력량인 3kW

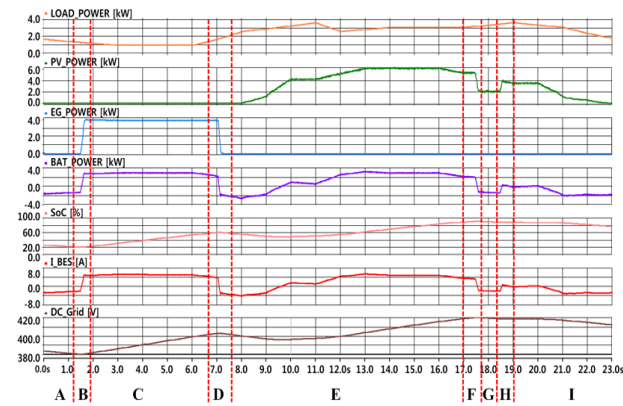


그림 9 제안하는 방식을 적용한 시뮬레이션 결과  
 Fig. 9 Simulation results by Proposed method

보다 낮은 2kW로 발전하고 있다. 배터리에너지저장장치는 방전 모드이며 SoC가 90% 아래로 떨어질 때 까지 RP\_MODE는 유지되고 있다. 이때의 동작 DC\_Grid전압은 최대 동작 전압인 420V이다.

구간 H는 SoC 상한치 90% 이하로 떨어져서 모드 2에서 모드 1로 모드전환을 실시하고 있다. 모드전환이 매끄럽게 되고 있으며 전압변동상태 없이 420V보다 약간 낮은 전압에서 동작되고 있다.

구간 I는 구간 E와 같이 태양광 발전은 MP\_MODE로 동작하고 있고, 일조량이 서서히 감소함에 따라 배터리에너지저장장치는 방전모드가 된다. 따라서 SoC는 서서히 감소하고 이에 따라 DC\_Grid전압도 서서히 감소하게 된다.

앞서 표3에서 시뮬레이션을 통해 점검해야 하는 항목들은 그림 9에 보이는 바와 같이 모두 검증이 되었다. 배터리에너지저장장치의 SoC는 운용 범위인 20%와 90%사이에서 운전되고 있으며, SoC변동에 따라 DC\_Grid 전압 또한 380V와 420V사이에서 제어되고 모드 전환 시 매끄러운 모드 전환을 통해 안정성을 확인할 수 있다. 또한 SoC가 하한치인 20%와 상한치인 90%에 도달했을 때의 배터리에너지저장장치의 보호가 효과적으로 이루어져 안정적인 운영이 가능함을 입증하였다.

그림 10은 독립형 DC 마이크로그리드의 운영 전략 중 가장 유사한 [14]의 Droop방식과 제안한 방식의 DC\_Grid전압을 비교한 시뮬레이션 결과이다. 위에서부터 배터리에너지저장장치의 전력, SoC, Droop방식을 적용한 DC\_Grid전압, 제안한 방식을 적용한 DC\_Grid전압이다. 그림 9의 시뮬레이션과 동일한 배터리에너지저장장치의 전력을 기준으로 제안한 방식과 Droop방식의 DC\_Grid 기준전압을 산출하였다. 제안한 방식을 적용한 DC\_Grid전압은 배터리에너지저장장치의 SoC를 검출하고  $K_{SoC}$ 를 산출하여 DC\_Grid전압 식을 통해 나타내었고, 기존 Droop방식을 적용한 DC\_Grid전압은 배터리에너지저장장치의 출력 전류를 검출하고  $K_{I_{TL}}$ 를 산출하여 DC\_Grid전압 식을 이용해 나타내었다.

Droop 방식을 적용한 DC\_Grid전압은 배터리 출력 전류를 통해 DC\_Grid전압을 산출하기 때문에 배터리에너지저장장치의 전

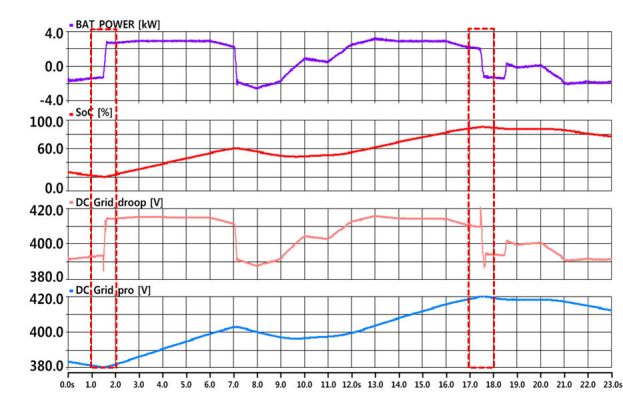


그림 10 Droop 제어와 제안하는 제어의 DC\_Grid 전압 시뮬레이션 결과 비교

Fig. 10 Simulation result comparison of Grid DC voltage by droop control and proposed control

력 파형과 흡사하고 제안하는 방식을 적용한 DC\_Grid전압은 SoC를 통해 DC\_Grid전압을 산출하기 때문에 SoC 파형과 일치한다. DC\_Grid전압은 두 방식 모두 설정된 동작범위인 380V와 420V 사이에서 동작하고 있다.

그림 10에 SoC가 하한치 20%에 도달하고 상한치 90%에 도달하여 모드 전환이 동작되는 구간이 표시되어있다. 1초와 2초 사이에 SoC가 하한치 20%에 도달하게 되는데, 이 때 배터리에너지저장장치의 보호를 위해 모드 전환을 하게 된다. Droop 방식은 엔진발전의 가동을 위해 등가저항의 크기조절을 통해 DC\_Grid전압을 변화시킨다. 따라서 짧은 순간 385V로 감소했다가 415V까지 약 30V의 전압이 변하며 최대 7.5% 전압변동률이 생기게 된다. 반면에 제안하는 방식은 SoC가 하한치에 도달하게 되면 DC\_Grid전압도 하한치에 도달하게 되어 엔진발전이 가동되기 시작한다. 또한 모드 전환이 일어날 때 매개변수  $K_{SoC}$ 가 변하지 않으므로 DC\_Grid전압의 값이 급변하지 않는다.

17초와 18초 사이에 SoC는 상한치 90%에 도달하게 되어 배터리에너지저장장치의 보호를 위해 모드 전환을 하게 된다. 이 때 Droop 방식은 모드 전환을 위해 등가저항을 크게 조절하여 DC\_Grid전압을 변화시킨다. 등가저항 값이 커지면 DC\_Grid전압의 크기가 420V로 증가했다가 385V까지 약 35V의 변동이 크게 존재하며 최대 8.75%의 전압변동률이 생긴다. 반면에 제안하는 방식은 SoC가 증가하다가 상한치에 도달하면 DC\_Grid의 최대 동작전압인 420V에 도달하여 태양광 발전의 모드가 매끄럽게 전환된다.

독립형 DC 마이크로그리드의 시스템의 규모가 증가하게 되면 이러한 전압변동현상에 의해 DC\_Grid전압은 동작범위를 벗어날 수 있으며 이는 안정성의 문제와 직결될 수 있다. 반면에 제안하는 방식은 매개변수  $K_{SoC}$ 가 고정되어있기 때문에 전압변동현상이 존재하지 않는다. 따라서 Droop 방식에 비해 제안하는 방식이 안정도가 높으며 시스템 규모의 관계없이 독립형 DC 마이크로그리드에 적용할 수 있다.

### 5. 실험을 통한 결과 분석

그림 11은 제안하는 제어방식의 우수성을 실험적으로 비교분석하기 위해 실험실에 제작 및 설치한 독립형 DC 마이크로그리드의 하드웨어를 보인 것이다. 실험결과를 시뮬레이션결과와 상호비교하기 위해 실험 시나리오를 시뮬레이션과 동일하게 진행하였으며 실험 지속시간은 총 85초간으로 하였다. 구성요소의 정격 용량도 시뮬레이션과 동일하게 태양광발전은 PV 시뮬레이터를 6KW로 시간에 따라 출력을 변동하였고 엔진발전은 5kW 용량의 모터-제너레이터 세트와 구성된 엔진발전 시뮬레이터를 최대출력을 4kW로 고정하였다. 배터리에너지저장장치는 3.31KWh 용량의 리튬-폴리머 배터리를 사용하였고 SoC 및 기타 정보는 BMS를 통해 CAN 통신을 사용하여 정보를 송신하였으며 기본 사양 정보는 표 4에 나타내었다. 부하는 3상 저항부하를 사용하였고 시뮬레이션과 같이 시간에 따라 전력 사용량을 다르게 하여 실험을 실시하였다. 또한 짧은 시간 동안 시뮬레이션과 동일하게 결과를 분석하기 위해 SoC 운용 범위를 달리하여 실험을 진행하였다. SoC의 상한치는 50.8%, 하한치는 49.2%로 설정하였고 SoC변화를 보이기 위해 확대하여 관찰하였다.

그림 12에 실험 결과파형을 나타내었다. 위에서부터 부하, 태양광 발전, 엔진 발전, 배터리에너지저장장치의 전력을 나타내며 SoC, 배터리에너지저장장치의 출력 전류, DC Grid전압을 순서대로

표 4 배터리에너지저장장치의 사양

Table 4 Specifications of BESS

| Items           | Parameter  |
|-----------------|------------|
| Nominal Voltage | 207[V]     |
| Capacity        | 16[Ah]     |
| AC-IR           | 1.1[mΩ]    |
| C-Rate          | 8[C]       |
| Energy Density  | 146[Wh/kg] |
| Chemistry       | HP NMC     |

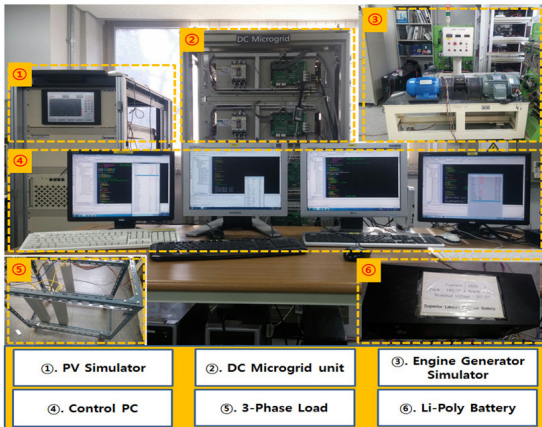


그림 11 축소모형 하드웨어 실험장치

Fig. 11 Scaled hardware set-up for experiment

로 나타내었다. 부하 전력은 시뮬레이션과 동일한 시나리오로 진행되고 있는 것을 볼 수 있으며, 시간에 따라 가변적이지만 과도 상태 없이 DC Grid로부터 안정적으로 전력을 공급받는 것을 확인할 수 있다. 태양광 발전은 시뮬레이터에 입력된 일사량 데이터에 의해 출력이 변동되고 있으며 MP\_MODE와 RP\_MODE의 제어가 원활히 수행되는 것을 볼 수 있다. 또한 엔진발전은 비상시 가동 될 때 최대출력으로 일정하게 발전하고 있는 것을 볼 수 있다. 시뮬레이션에서 점검하고자 했던 내용들을 구간에 따라 실험에서도 동일하게 확인할 수 있었고, 이를 통해 실제 독립형 DC 마이크로그리드의 적용이 가능할 수 있음을 확인하였다.

또한 SoC와 DC Grid전압의 파형 패턴이 같은 것으로 보아 SoC에 따른 DC Grid전압의 제어가 수행되고 있는 것을 볼 수 있다. SoC에 따른 DC Grid전압이 동작 범위 내에 유지되면서 상

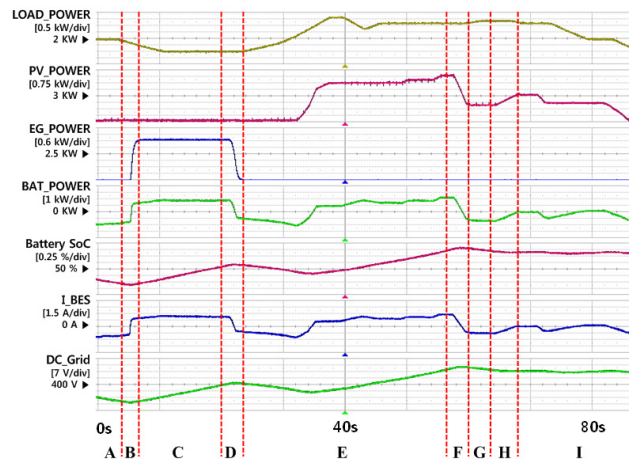


그림 12 제안하는 방식을 적용한 실험 결과

Fig. 12 Experiment results with Proposed method

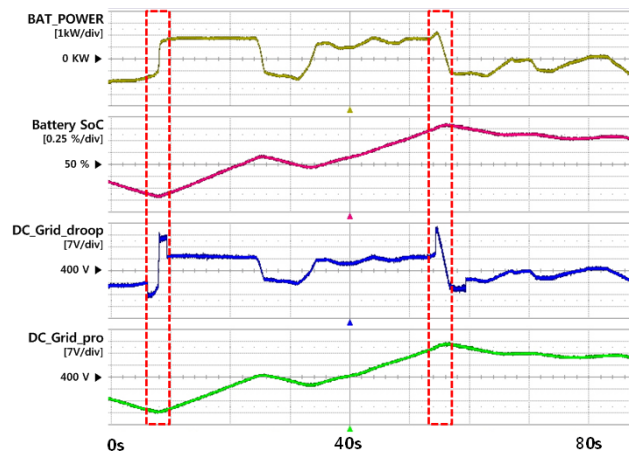


그림 13 Droop 제어와 제안하는 제어의 DC Grid 전압 실험 결과 비교

Fig. 13 Experiment result comparison of Grid DC voltage by droop control and proposed control



한치와 하한치에 도달했을 때, 분산전원의 모드 전환을 통해 배터리에너지저장장치의 보호도 효과적으로 되고 있는 것을 볼 수 있다.

그림 13에는 [14]에서의 Droop 방식과 본 논문에서 제안하는 방식의 DC Grid기준전압을 비교한 실험 결과가 나타나있다. 6초와 10초 사이, 53초와 57초 사이 모드 전환이 발생할 때의 전압 변동현상을 확인 할 수 있다. 시뮬레이션과 같이 Droop 방식 경우 등가저항 값이 변하게 되어 전압변동현상이 존재하는 반면에 제안하는 방식은 안정적으로 모드 전환 하는 것을 볼 수 있다.

모드 1에서 모드 3으로 전환되는 과정인 6초와 10초 사이에서 Droop 방식을 적용한 DC Grid 전압은 390V에서 415V까지 변하며 전압변동률은 6.25%가 나타난 것을 볼 수 있다. 또한 모드 1에서 모드 2로 전환되는 과정인 53초와 57초 사이에서 420V에서 390V까지 변하며 전압변동률은 7.5%가 나타난 것을 볼 수 있다. 반면에 제안하는 방식은 매끄러운 모드 전환이 수행되며 이를 통해 Droop 방식보다 안정적임을 검증하였다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 독립형 DC 마이크로그리드의 안정적인 동작을 위해 DC Grid의 출력전압을 조절하는데 배터리에너지저장장치의 SoC를 기반으로 출력전압을 조절하는 방식을 제안하였다.

제안하는 제어방식의 우수성을 분석하기 위해 태양광발전, 연진발전, 배터리에너지저장, 부하로 이루어진 대표적인 독립형 DC 마이크로그리드에 대해 PSCAD/EMTDC를 이용하여 시뮬레이션을 실시하고 그 결과를 비교하였다. 또한 하드웨어 구현 가능성을 평가하기 위해 실험실에 축소모형의 독립형 DC 마이크로그리드와 제어기를 설치하고 시뮬레이션의 시나리오와 동일하게 실험을 실시하여 제안하는 제어와 Droop 제어의 성능을 비교분석하였다.

제안하는 제어방식은 Droop 제어방식에 비해 출력전압의 변동폭이 좁고 완만한 우수한 결과를 얻을 수 있었다. 이러한 장점을 고려할 때 제안하는 제어방식은 독립형 DC 마이크로그리드에 많은 적용이 가능할 것으로 보인다.

## 감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20151210200080), (No. 20134030200310)

## Reference

[1] Nanfang Yang, Damien Paire, Fei Gao, Abdellatif Miraoui, Weiguo Liu, "Compensation of droop control using common load condition in DC microgrids to improve

voltage regulation and load sharing," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 64, Jan. 2015, Pages 752 - 760.

[2] Pratt, A. Kumar, P. Aldridge, T.V., "Evaluation of 400V DC distribution in telco and data centers to improve energy efficiency," in Telecommunications Energy Conference, 2007. INTELEC 2007. 29th International, vol, no, pp.32-39, Sept. 30 2007-Oct. 4 2007.

[3] Guerrero, J.M. Vasquez, J.C. Teodorescu, R., "Hierarchical control of droop-controlled DC and AC microgrids — a general approach towards standardization," in Industrial Electronics, 2009. IECON '09. 35th Annual Conference of IEEE, vol. no, pp. 4305-4310, 3-5 Nov. 2009.

[4] Kakigano, H.; Miura, Y.; Ise, T., "Low-Voltage Bipolar-Type DC Microgrid for Super High Quality Distribution," in Power Electronics, IEEE Transactions on, vol. 25, no. 12, pp. 3066-3075, Dec. 2010

[5] Kakigano, H.; Nomura, M.; Ise, T., "Loss evaluation of DC distribution for residential houses compared with AC system," in Power Electronics Conference (IPEC), 2010 International, vol., no., pp.480-486, 21-24 June 2010

[6] Rui Bi, Ming Ding, Ting Ting Xu, "Design of common communication platform of microgrid," in Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), 2010 2nd IEEE International Symposium on, vol, no, pp. 735-738, 16-18 June 2010.

[7] S. Anand, B. G. Fernandes and J. Guerrero, "Distributed Control to Ensure Proportional Load Sharing and Improve Voltage Regulation in Low-Voltage DC Microgrids," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 28, no. 4, pp. 1900-1913, April 2013.

[8] X. Lu, J. M. Guerrero, K. Sun and J. C. Vasquez, "An Improved Droop Control Method for DC Microgrids Based on Low Bandwidth Communication With DC Bus Voltage Restoration and Enhanced Current Sharing Accuracy," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 29, no. 4, pp. 1800-1812, April 2014.

[9] A. Tuladhar and H. Jin, "A novel control technique to operate DC/DC converters in parallel with no control interconnections," Power Electronics Specialists Conference, 1998. PESC 98 Record. 29th Annual IEEE, Fukuoka, 1998, pp. 892-898 vol.1.

[10] C. Jamerson, T. Long and C. Mullett, "Seven ways to parallel a magamp," Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1993. APEC '93. Conference Proceedings 1993., Eighth Annual, San Diego, CA, 1993, pp. 469-474.

[11] I. Batarseh, K. Siri and H. Lee, "Investigation of the output droop characteristics of parallel-connected DC-DC converters," Power Electronics Specialists Conference,

- PESC '94 Record., 25th Annual IEEE, Taipei, 1994, pp. 1342-1351 vol. 2.
- [12] Y. Ito, Y. Zhongqing and H. Akagi, "DC microgrid based distribution power generation system," Power Electronics and Motion Control Conference, 2004. IPERC 2004. The 4th International, Xi'an, 2004, pp. 1740-1745 Vol.3.
- [13] B. T. Irving and M. M. Jovanovic, "Analysis, design, and performance evaluation of droop current-sharing method," Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2000. APEC 2000. Fifteenth Annual IEEE, New Orleans, LA, 2000, pp. 235-241 vol.1.
- [14] Hyun-Jun Kim, Tae-Hee Han, Byung-Moon Han, "Operation analysis of stand-alone DC micro-grid with coordinated droop control," in ECCE Asia Downunder (ECCE Asia), 2013 IEEE, vol, no, pp. 692-698, 3-6 June 2013.
- [15] Z. Ma and W. Jiang, "An adaptive droop voltage control for DC microgrid systems," The 26th Chinese Control and Decision Conference (2014 CCDC), Changsha, 2014, pp. 4512-4517.
- [16] A. Khorsandi, M. Ashourloo, H. Mokhtari and R. Iravani, "Automatic droop control for a low voltage DC microgrid," in IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 10, no. 1, pp. 41-47, 1 7 2016.
- [17] F. Zhang et al., "Power management strategy research for DC microgrid with hybrid storage system," DC Microgrids (ICDCM), 2015 IEEE First International Conference on, Atlanta, GA, 2015, pp. 62-68.
- [18] Prasad, A.R. Ziogas, P.D. Manias, S, "Analysis and design of a three-phase offline DC-DC converter with high-frequency isolation," in Industry Applications, IEEE Transactions on, vol. 28, no. 4, pp. 824-832, Jul/Aug 1992.
- [19] Hussein, K.H. Muta, I. Hoshino, T. Osakada, M., "Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions," in Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-, vol. 142, no. 1, pp. 59-64, Jan 1995.
- [20] Kyeung-cheol Bae, Seong-Chon Choi, Ji-Hwan Kim, Chung-Yuen Won, Yong-chae Jung, "LiFePO4 dynamic battery modeling for battery simulator," in Industrial Technology (ICIT), 2014 IEEE International Conference on, vol, no, pp. 354-358, Feb. 26 2014-March 1 2014.

## 저 자 소 개



### 유 승 영 (Seung-Yeong Yu)

1990년 10월 23일생. 2015년 명지대 전기공학과 졸업. 2015년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정

E-mail : dbtmddud90@naver.com



### 김 현 준 (Hyun-Jun Kim)

1985년 11월 12일생. 2011년 명지대 전기공학과 졸업. 2011년~현재 동 대학원 전기공학과 석·박사과정 통합과정

E-mail : inverter1112@naver.com



### 한 병 문 (Byung-Moon Han)

1976년 서울대 전기공학과 졸업. 1988년 미 아리조나주립대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 미 Westinghouse중앙연구소선임연구원. 현재 명지대 전기공학과 교수.

E-mail : erichan@mju.ac.kr