

# DC 마이크로그리드에서 배터리 에너지 저장장치의 State-of-Charge 기반 계층 제어 기법

김진욱\*, 정원상\*, 이재형\*, 원충연†  
 성균관대학교\*

## Hierarchical Control based on State-of-Charge of Battery Energy Storage System in DC Microgrid

Jin-Wook Kim\*, Won-Sang Jeong\*, Jae-Hyung Lee\*, Chung-Yuen Won†  
 Sungkyunkwan University\*

### ABSTRACT

### 2. 본론

본 논문은 DC 마이크로그리드에서 배터리 에너지 저장 장치의 SoC(State-of-Charge)를 기반으로 한 계층 제어 기법을 제안한다. DC 마이크로그리드의 안정적인 운영을 위해 계층 구조의 제어방식이 필요하다. 제안하는 계층 제어 기법은 2 레벨로 구성된다. 1차 제어에서는 SoC에 의해 드롭 계수가 조정되고 충·방전 전류가 제어되어 SoC 밸런싱이 이루어진다. 2차 제어는 1차 제어에 의해 발생하는 배전망 전압강하를 보상한다. 제안하는 SoC 기반 계층 제어를 적용한 에너지 저장 장치는 일정 SoC 운용범위에서 동작하고 배전망 전압을 일정하게 유지하여 DC 마이크로그리드의 안정적인 전력관리가 가능해진다. 본 논문에서는 PSIM 시뮬레이션을 통해 제안하는 기법의 유효성을 검증하였다.

### 2.1 DC 마이크로그리드 구성

그림 1은 DC 마이크로그리드의 구성을 나타낸다. DC 마이크로그리드는 AC 그리드와 연계되어 있으며 분산전원으로는 MPPT제어를 수행하는 태양광 발전 시스템으로 구성되고 BESS 2대가 연계되었다. 또한 DC 마이크로그리드는 DC 부하에 일정 전력을 공급하고 있다. 태양광 발전으로부터 생산된 전력을 전력변환장치를 통해 수용가에 공급하게 되고 전력이 부족하거나 남는 경우 배터리 에너지 저장 장치가 충·방전 동작을 하여 DC 마이크로그리드의 전력관리를 수행한다.

### 1. 서론

최근 신재생에너지와 연계되는 DC 마이크로그리드에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다. DC 마이크로그리드는 AC 그리드, 분산전원 및 배터리 에너지 저장장치(Battery Energy Storage System, BESS)로 구성되며 전력품질 향상을 위해 다수의 BESS가 연계될 수 있다. DC 마이크로그리드는 계층 구조의 제어방식을 통해 체계적이고 안정적인 전력관리를 수행할 수 있다. 계층 제어는 상위 계층의 제어 출력이 하위 계층의 제어의 입력으로 인가되는 형태로 상위 계층은 하위 계층 제어를 관리 및 감독하는 역할을 수행한다.<sup>[1]</sup>

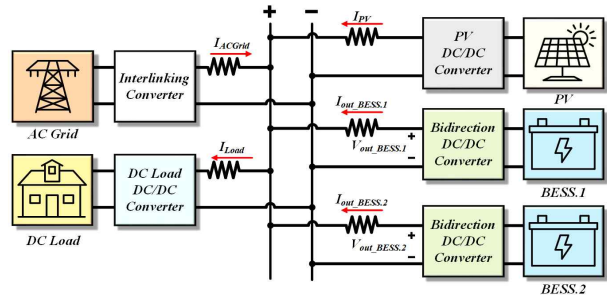


그림 1 DC 마이크로그리드 구성  
 Fig. 1 Configuration of DC Microgrid

### 2.2 1차 제어 레벨 : SoC 기반 드롭 제어

일반적인 드롭 제어에서는 드롭 계수를 고정된 값으로 사용되지만 제안하는 SoC 기반 드롭 제어는 배터리의 SoC 변동에 따라 식 (1), (2)와 같이 드롭 계수( $R_{SoC}$ )가 선정된다. 여기서  $V_{out\_BESS,dev}$ 는 BESS 출력전압의 허용오차,  $I_{out\_BESS,max}$ 는 BESS 출력전류의 최댓값,  $SoC_{max}$ 와  $SoC_{min}$ 는 배터리 SoC의 최댓값 및 최솟값을 나타낸다. 다수의 배터리가 연계된 경우 각각의 SoC에 따라 드롭 계수가 다르게 선정되어 충·방전 전류가 제어되기 때문에 SoC 밸런싱이 이루어진다.

$$R_{SoC\_Discharge} = \frac{V_{out\_BESS,dev}}{I_{out\_BESS,max}} \left( \frac{SoC_{max} - SoC_{min}}{SoC - SoC_{min}} \right) \quad (1)$$

$$R_{SoC\_Charge} = \frac{V_{out\_BESS,dev}}{I_{out\_BESS,max}} \left( \frac{SoC_{max} - SoC_{min}}{SoC_{max} - SoC} \right) \quad (2)$$

다수의 컨버터가 병렬로 연결될 경우 컨버터 사이에서 순환 전류가 발생한다. 컨버터간의 통신 없이 순환전류를 저감하기 위해 드롭 제어가 사용된다. 다수의 BESS가 연계된 경우 배터리의 효율적인 에너지 관리를 위해 SoC 밸런싱이 필요하다. 기존 SoC 기반 계층 제어 기법은 배터리의 방전 동작만을 고려하였다.<sup>[2]</sup> 기존 기법을 충전 동작에 적용 시 높은 SoC 상태에서 많은 충전 전류가 유입되어 과충전 문제가 나타난다.

본 논문에서 제안하는 SoC 기반 계층제어 기법은 2단계의 계층구조를 가진다. 1차 제어는 SoC에 따라 드롭 계수를 조정하여 출력전류를 제어하기 때문에 충·방전 동작에서 BESS가 SoC 운용 범위 내에서 동작하여 과충전 및 과방전을 방지한다. 또한 다수의 BESS의 SoC 밸런싱이 가능해진다. 2차 제어는 1차 제어에 의해 나타나는 배전망 전압강하를 보상함으로써 DC 마이크로그리드의 배전망 전압을 안정적으로 유지한다.

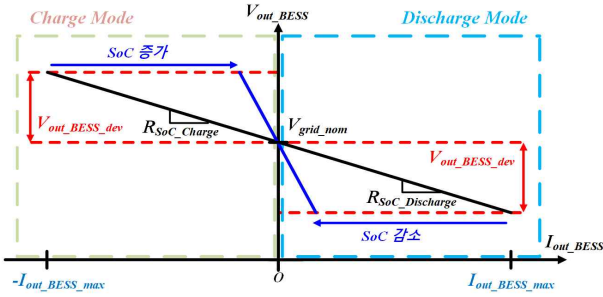


그림 2 배터리 에너지 저장장치의 SoC 기반 드롭 곡선  
Fig. 2 Droop curve based on SoC of BESS

배터리 에너지 저장장치의 충·방전 동작 시 SoC에 의해 변화하는 드롭 곡선은 그림 2와 같이 나타난다. 충전 시 배터리에 유입되는 충전전류에 의해 SoC가 증가하게 되면 드롭 계수가 증가한다. 이 경우  $SoC_{max}$ 에 가까워질수록 유입되는 충전전류가 감소하여 과 충전을 방지할 수 있다. 또한 방전 동작에서 배터리의 SoC가 감소하면 드롭 계수가 증가하고 배터리의 방전 전류가 감소되어 과 방전을 방지할 수 있다.

### 2.3 2차 제어 레벨 : 전압 보상 제어

DC 마이크로그리드의 계층 제어구조에서 2차 제어는 1차 제어에 의해 나타나는 배전망 전압강하 문제를 해결한다. 2차 제어는 실제 배전망 전압을 지속적으로 측정하여 공칭 전압과 오차가 발생할 경우 1차제어의 지령 값을 조정하여 배전망 전압을 일정하게 유지한다. 2차 제어기의 리미터 값은  $V_{out\_BESS\_dev}$ 으로 설정하였다. 그림 3은 제안하는 1, 2차 제어를 포함한 계층 제어 블록도를 나타낸다.

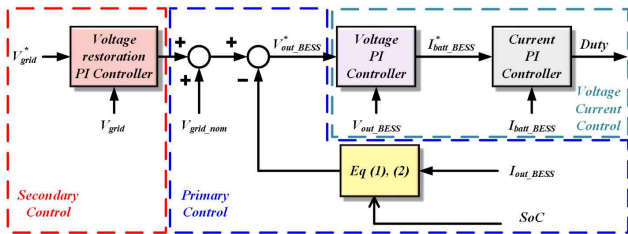
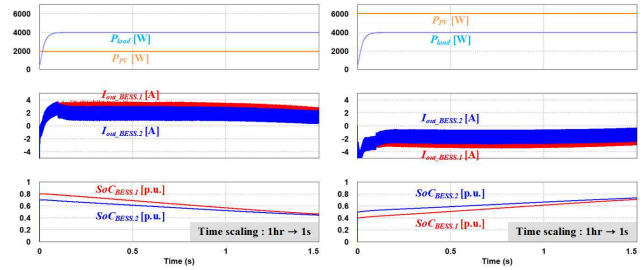


그림 3 제안하는 계층 제어 블록도  
Fig. 3 Proposed hierarchical control block diagram

## 3. 시뮬레이션

제안하는 기법을 증명하기 위해 그림 1의 구성을 기반으로 DC 마이크로그리드의 공칭전압을 380V로 선정 후 PSIM을 이용하여 시뮬레이션을 진행하였다. 그림 4 (a)는 부하에 요구되는 전력보다 태양광발전으로 생산되는 전력이 낮은 경우로 BESS는 방전동작을 하게 된다. 제안된 기법에 의해 BESS는 SoC 운용범위인  $SoC_{max}$ (80%)와  $SoC_{min}$ (40%) 내에서 SoC 밸런싱을 이루며 과방전을 방지하는 것을 확인할 수 있다. 그림 4 (b)는 태양광 발전 전력이 부하에 요구되는 전력보다 높아 BESS가 충전동작을 하는 경우를 나타내며 SoC에 따라 드롭 계수가 변화하여 SoC 밸런싱이 이루어지는 것을 시뮬레이션 결과 파형을 통해 확인할 수 있다.



(a) 방전 동작 (b) 충전 동작  
그림 4 충·방전 동작 시뮬레이션 결과  
Fig. 4 Simulation results of charge and discharge operation

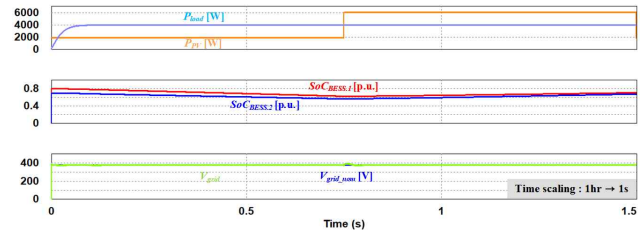


그림 5 BESS 동작 변화 시뮬레이션 결과  
Fig. 5 Simulation results of operation change in BESS

그림 5는 태양광 발전 전력의 변화로 BESS의 동작 모드가 바뀌는 경우이다. 0.75초에서 BESS의 동작모드가 바뀌어도 드롭 계수의 변화에 의한 SoC 밸런싱 동작과 2차 제어에 의해 일정하게 유지되는 배전망 전압을 확인할 수 있다.

## 4. 결론

본 논문에서는 DC 마이크로그리드에서 배터리 에너지 저장장치의 SoC 기반 계층 제어를 제안하였다. 제안된 계층제어의 1차 제어에 의해 배터리 에너지 저장장치가 SoC 운용범위 내에서 동작하며 SoC 밸런싱 동작이 수행된다. 또한 1차 제어에 의한 배전망 전압강하 문제를 2차 제어에 의해 배전망 전압을 안정적으로 유지한다. PSIM을 이용한 시뮬레이션 결과를 통해 제안된 기법을 증명하였다.

이 논문은 2019년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2019R1A2C2007216)

## 참고 문헌

[1] J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, J. Matas, L. G. de Vicuna and M. Castilla, "Hierarchical Control of Droop-Controlled AC and DC Microgrids—A General Approach Toward Standardization," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 58, no. 1, pp. 158–172, Jan. 2011.

[2] Xiaoliang Yang, Fen Tang, Xuezhi Wu and Xinmin Jin, "Hierarchical control strategy of grid-connected DC microgrids," 2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia), Hefei, 2016, pp. 3723–3727.