

# 모든 부하 조건에서 SoC 밸런싱이 가능한 적응형 드롭 제어 방법

최승현<sup>1</sup>, 김동민<sup>1</sup>, 방지훈<sup>2</sup>, 김성준<sup>1</sup>, 문건우<sup>1</sup>  
 한국과학기술원 전기및전자공학부<sup>1</sup>, 한국과학기술원 미래자동차학제전공<sup>2</sup>

## Adaptive Droop Control Method for SoC Balancing Under All Load Conditions

Seung-Hyun Choi<sup>1</sup>, Dongmin Kim<sup>1</sup>, Jihun Bang<sup>2</sup>, Sungjun Kim<sup>1</sup>, Gun-Woo Moon<sup>1</sup>  
 School of Electrical and Electronical Engineering, KAIST<sup>1</sup>  
 Division of Future Vehicle, KAIST<sup>2</sup>

### ABSTRACT

배터리 에너지 저장장치는 DC 마이크로그리드의 안정성과 경제성을 향상하는데 필수적인 요소이다. DC 마이크로그리드는 다수의 배터리 에너지 저장장치 유닛이 연결되며, 그들의 충전 상태(SoC)는 다양할 수 있다. 이러한 SoC 편차는 전체 전력 용량에 영향을 미치는 문제로 이어질 수 있어, SoC의 균등화가 필요하다. 이전 연구에서는 SoC 변동을 해결하기 위해 SoC 적응형 드롭 제어 방법을 제시했다. 그러나 현재의 제어 방법은 무부하 상태에서 SoC의 균형을 맞출 수 없어, 부하 프로파일에 따라 동작이 제한되는 한계점이 있다. 따라서 본 논문에서는 오프셋 전류를 사용하여 모든 부하 조건에서 SoC의 균형을 맞출 수 있는 새로운 SoC 적응형 드롭 제어 방법을 제안한다. 제안한 제어 방법의 효과는 시뮬레이션과 실험을 통해 검증되었다.

### 1. 서론

친환경적인 방식으로 전력을 생산해야 할 필요성이 증가함에 따라 탄소 배출량이 적은 재생 에너지원이 더욱 널리 보급되고 있다. 태양광과 같은 에너지원은 건물과 전기 자동차와 같이, 전력 소비자와 가까운 위치에서 운영할 수 있다. 이러한 소규모 에너지원과 부하 단위를 마이크로그리드라고 하며, DC와 AC의 두 가지 범주로 나눌 수 있다. DC 마이크로그리드는 그리드 동기화 또는 역률 개선을 위한 추가 회로나 제어가 필요하지 않다는 점에서 AC 마이크로그리드에 비해 상당한 이점이 있다. 그 결과 DC 마이크로그리드를 위해 많은 연구가 진행되었다.

마이크로그리드에서 재생 에너지원의 비율이 높을 경우 재생 에너지원의 간헐적인 특성으로 인해 안정성 문제가 발생할 수 있다. 이러한 문제를 극복하기 위해 배터리 에너지 저장 시스템(BES)이 활용될 수 있다. BES는 잉여 전력을 저장했다가 재생 에너지원의 공급이 부족할 때 저장된 잉여 전력을 활용하게 만들 수 있다. 이는 재생 에너지 생산량이 적은 시기에도 안정적인 에너지 공급을 보장함으로써 마이크로그리드의 신뢰성과 경제성을 향상시킨다. 따라서 BES는 마이크로그리드가 효율적으로 운영될 수 있도록 하는데 중요한 역할을 한다<sup>[1]-[4]</sup>.

BES 유닛으로는 고정식 에너지 저장(ESS) 장치 또는 전기 자동차 배터리 등 다양한 종류가 있다. 또한 이 유닛들 간의 각 충전 상태(SoC)는 서로 다를 수 있다. 이러한 SoC 차이를 고려하지 않고 BES 장치에 저장된 에너지를 활용하면 일부 BES 장치가 완전히 방전되거나 먼저 충전될 수 있다. BES 유닛의 SoC가 최대 또는 최소 SoC 수준에 도달하면 더 이상 충전 또는 방전할 수 없으므로 전체 BES의 가용 전력 용량이

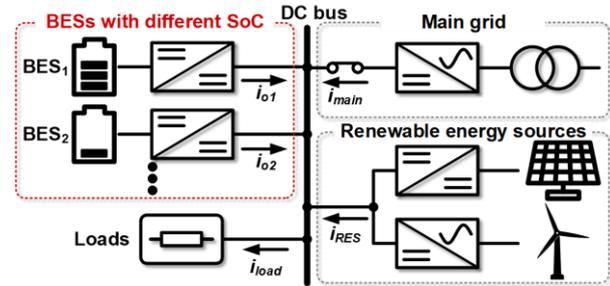


그림 1. DC 마이크로그리드 구성.

감소하게 된다. 결과적으로 SoC 편차로 인해, 마이크로그리드의 안정성 및 경제성이 악화될 수 있다.

이러한 문제를 해결하려면 BES 유닛 간의 SoC 균등화가 필수적이다. 이를 위해, 이전에는 이중-사분면 SoC 적응형 드롭 제어 방법이 제시되었다<sup>[3]</sup>. 그러나 이러한 방법은 무부하 상태에서는 SoC 밸런싱이 불가능하며 부하 프로파일에 따라 SoC 밸런싱이 달성된다는 보장이 없다. 또한 통신을 활용하여 오프셋 전압을 인가하는 제어 방법이 제시되었다. 이 방법은 기존 제어 방법 대비 SoC 밸런싱 속도와 정확도가 향상된다는 장점이 있다. 하지만 이 방법은 추가적인 통신 시스템을 구현하기 위해, 시스템 비용과 복잡도가 올라가는 한계점이 있다<sup>[4]</sup>.

이러한 문제를 극복하기 위해, 본 연구에서는 전 부하 영역에서 SoC 밸런싱이 가능한 비통신 SoC 적응형 드롭 제어 방법을 제안한다. 제안된 제어 방법은 SoC에 따라 오프셋 전류를 조절한다. 또한 본 원고는 SoC에 대한 오프셋 전류 조절 파라미터를 분석한다. 제안된 제어 기법은 추가적인 통신 시스템이나 비용 없이도 적용 가능하며, 실용적으로 사용될 수 있다. 본 제어 방법의 유효성을 검증하기 위한 분석 및 프로토타입 시뮬레이션이 진행되었다.

### 2. SoC 밸런싱 드롭 제어 방법

#### 2.1 DC 마이크로그리드 시스템

그림 1은 BES 유닛들이 포함된 DC 마이크로그리드를 나타내며, 그림 2는 BES 유닛들을 중심으로 한 DC 마이크로그리드의 등가 모델을 보여준다.  $i_{BES}$  값이 음수일 경우, 마이크로그리드 내 전력 공급이 부하보다 큰 상태를 나타낸다. 따라서, BESs는 잉여 전력을 받아야 한다. 반대로,  $i_{BES}$  값이 양수일 경우, 전력 공급이 부하보다 작은 상태를 의미하므로, BESs는 부족한 전력을 공급해야 한다.

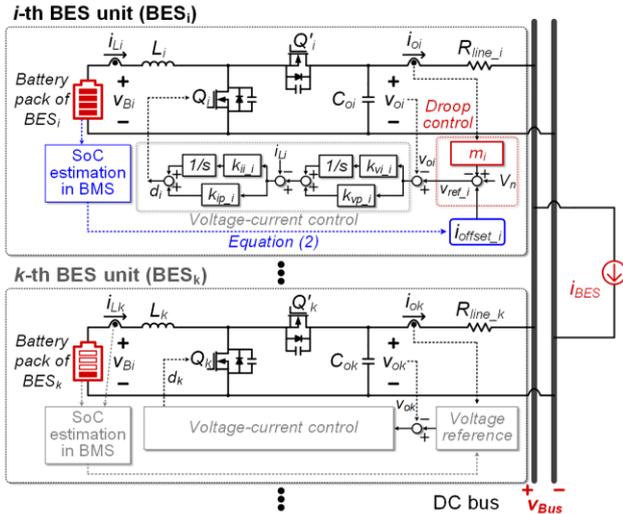


그림 2. 제안된 BES<sub>i</sub>의 DC/DC 컨버터 제어 시스템.

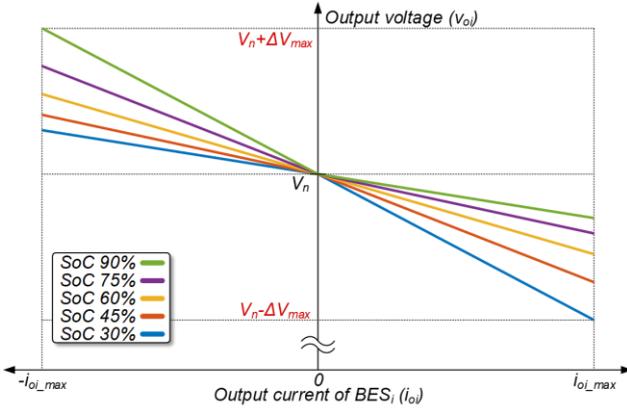


그림 3. 기존 제어 방법의 특징.

## 2.2 기존 제어 방법

여러 BES 유닛 중, 임의의  $i$ 번째 BES 유닛을  $BES_i$ 라고 명명한다. 기존 이중-사분면 SoC 드롭 제어 방법을 이용하면,  $BES_i$ 의 출력 전압 ( $v_{oi}$ )은 수식 (1)와 같이 결정된다.

$$v_{oi} = V_n - m_i i_{oi} \quad (1)$$

여기서  $m$ 는  $BES_i$ 의 드롭 제어의 gain을 나타내며, SoC에 따라 조절되는 적응형 게인이 사용된다.

기존 제어 방법의 주요 특징은 그림 3을 통해 확인할 수 있다. 방전 시, SoC가 높을수록  $m_i$ 가 작아지며, 충전 시에는 SoC가 높을수록  $m_i$ 가 큰 값을 가진다. 기존 제어 방법은 무부하 상태에서, SoC에 관계없이 모두 같은 출력 전류가 0인 동작점을 가져, SoC 밸런싱이 이뤄지지 않는다.

## 2.2 제안된 제어 방법의 컨셉

기존 제어 방법과 달리, 제안된 제어 방법에는 오프셋 전류가 사용된다. 제안된 제어 방법을 이용하면,  $BES_i$ 의 출력 전압 ( $v_{oi}$ )은 수식 (2)와 같이 결정된다.

$$v_{oi} = V_n - m_i (i_{oi} - i_{offset_i}) \quad (2)$$

여기서  $m$ 는  $BES_i$ 의 드롭 제어의 gain이며, 기존 제어 방법과 달리 상수가 사용된다.  $i_{offset_i}$ 는 제안된 제어 방법이 추가한 오프셋 전류이다. 이 오프셋 전류는 SoC에 따라 조절되며, 다음

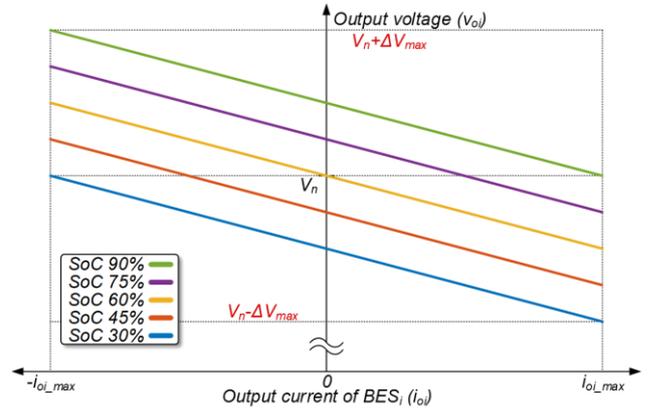


그림 4.  $n=1$ 이 사용된 제안된 제어 방법의 특징.

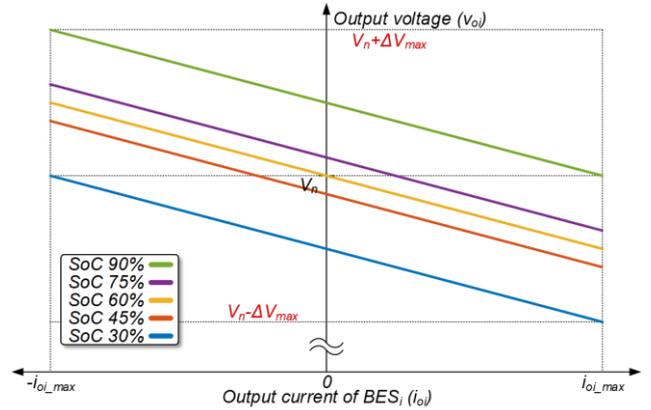


그림 5.  $n=2$ 이 사용된 제안된 제어 방법의 특징.

수식 (2)와 같다.

$$i_{offset_i} = \begin{cases} I_{offset_{i,max}} \cdot \left( \frac{SoC_i - SoC_{nom}}{SoC_{max} - SoC_{nom}} \right)^n, & SoC_i \geq SoC_{nom} \\ I_{offset_{i,max}} \cdot \left( \frac{SoC_{nom} - SoC_i}{SoC_{nom} - SoC_{min}} \right)^n, & SoC_i < SoC_{nom} \end{cases} \quad (3)$$

여기서  $SoC_{nom}$ 은  $BES_i$  배터리의 노미널 SoC를 의미한다. 또한  $SoC_{max}$ 와  $SoC_{min}$ 은 각각 최대 및 최소 SoC를 의미하며,  $I_{offset_{i,max}}$ 는 오프셋 전류의 최대 값을 나타낸다. 이 논문에서는  $SoC_{nom}$ 이 0.6,  $SoC_{min}$ 은 0.3,  $SoC_{max}$ 는 0.9로 가정되었다.

위 수식에서 볼 수 있듯이, 오프셋 전류  $i_{offset_i}$ 는  $BES_i$ 의 실시간 SoC ( $SoC_i$ )에 따른 함수이다. 이 SoC는 배터리 관리 시스템을 통해, 실시간으로 추정될 수 있으므로,  $i_{offset_i}$  또한 실시간으로 계산될 수 있다.

제안된 제어 방법의 특징은 그림 4와 그림 5를 통해 확인할 수 있다. 기존 제어 방법과 달리, 오프셋 전류를 가지며, 무부하시에도 SoC에 따라 충전 및 방전이 가능하다.

## 2.3 제안된 제어 방법의 파라미터 설계

수식 (3)에서, 오프셋 전류를 결정하기 위해  $I_{offset_{i,max}}$ 와  $n$  두 가지의 파라미터가 설계되어야 한다. 먼저  $I_{offset_{i,max}}$ 는 전반적인 SoC 밸런싱 속도를 결정한다. 오프셋 전류의 차이가 클수록 SoC 밸런싱 속도가 빠르기 때문이다.

파라미터  $n$ 은 SoC 동작 영역에 따른, 오프셋 전류 편차를 조절한다. 그림 4와 그림 5는 각각  $n=1$ ,  $n=2$ 가 사용될 때의 제안된 제어 방법의 특징을 나타낸다.  $n=1$ 인 경우, SoC에 따른 오프셋 전류의 편차가 균일하다. 반면,  $n=2$ 인 그림 5는 SoC가  $SoC_{nom}$ 와 가깝다면 특성 차이가 크지 않지만, 대신 SoC가

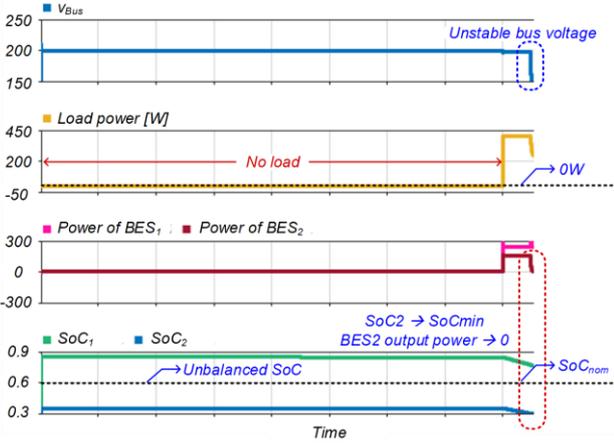


그림 6. 기존 제어 방법의 배터리 에너지 저장장치 동작.

SoC<sub>nom</sub>에서 멀어질수록 오프셋 전류가 크게 차이 나게 된다. 그림 6에서 SoC의 변동에 따른 오프셋 전류 편차를 확인할 수 있다. 앞서 설명되었듯이, n이 높은 값을 가지면, SoC가 SoC<sub>nom</sub>으로부터 멀어질수록 오프셋 전류 편차가 커진다. n에 높은 값이 사용되면, SoC가 노미널 값에 가까워 SoC 밸런싱이 필요하지 않은 배터리들의 불필요한 충방전을 방지한다. 또한 SoC가 SoC<sub>min</sub>, SoC<sub>max</sub>와 가까운 BES 유닛들의 과방전 및 과충전을 막는데 효과적이다.

### 3. 검증 결과

#### 3.1 기존 제어 방법

기존 및 제안된 제어 방법의 검증을 위해, MATLAB/Simulink를 통한 검증이 진행되었다. 그림 6은 기존 제어 방법의 SoC 밸런싱 동작을 보여준다. 두 배터리 유닛이 각각 초기 0.85, 0.35의 초기 SoC를 갖는다. 그림에서 볼 수 있듯, 초기 무부하 상태에서는 SoC 밸런싱이 이뤄지지 않는다. 이후 중부하 동작이 되면, 출력 전력 차이로 인해 SoC의 편차가 줄어든다. 하지만, 둘 중 하나의 배터리가 먼저 완전 방전되어 (SoC=0.3), 부하에 충분한 전력을 제공하지 못한다. 결과적으로, 버스 전압이 정상적으로 유지되지 못할 수 있다.

#### 3.2 제안된 제어 방법 (n=1)

기존 제어 방법과 동일한 초기 상태 및 부하 프로파일을 갖고, 제안된 제어 방법의 동작이 검증된다. 제안된 제어 방법은 기존과 달리, 무부하 상태에서도 배터리 간 상호 전력 교환을 통해 SoC 밸런싱이 달성된다. 결과적으로 모든 배터리가 먼저 완전 방전되지 않고, 안정적으로 DC 버스 전압을 유지할 수 있다. 이러한 동작은 일반적인 부하 프로파일에서는 에너지 전달 횟수가 추가되어 비효율적일 수 있다. 하지만 무부하 동작이 주요한 부하 프로파일에서는 제안된 제어 방법이 전력망의 안정성을 향상시킬 수 있는 방법으로 사용될 수 있다.

#### 3.3 제안된 제어 방법 (n=2)

제안된 제어 방법의 파라미터 n을 2로 변경하면, SoC 편차가 작을 때의 전력 편차를 줄일 수 있다. 그림 8에서, SoC<sub>nom</sub>에 가까워지면 상호 전력 전달량이 작아진다. 이러한 동작은 완충, 완전 방전의 가능성이 낮은 배터리 간의 전력 전달을 막아, 순환 전류로 인한 에너지 손실을 저감할 수 있다.

### 4. 결론

배터리 에너지 저장장치 (BES)는 DC 마이크로그리드를 안정화하는데 필수적인 역할을 한다. 이러한 BES들의 전력 용량을 최대한 활용하기 위해서는 SoC 균등화가 필요하다. 본 논문에서는 오프셋 전류를 조절하여, 전 부하 조건에서 SoC

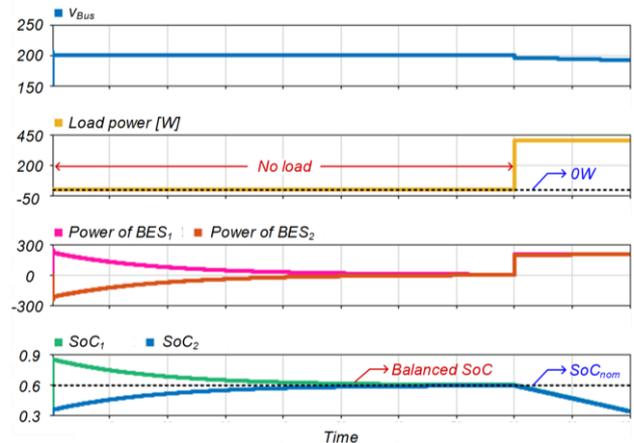


그림 7. 제안된 제어의 배터리 에너지 저장장치 동작 (n=1).

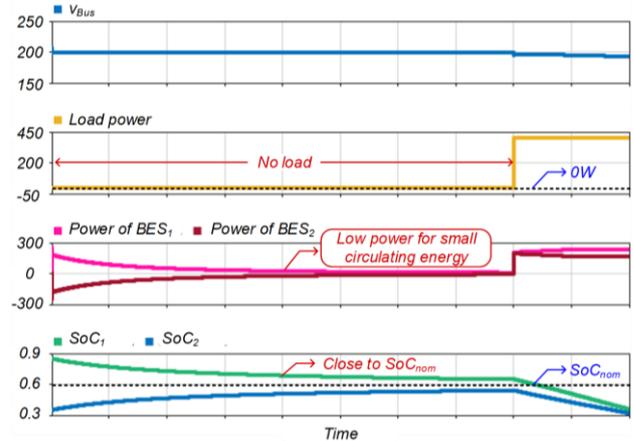


그림 8. 제안된 제어의 배터리 에너지 저장장치 동작 (n=2).

밸런싱이 가능한 제어 방법을 제안한다. 또한 제안된 제어 방법에 추가 도입된 파라미터는 효율성 및 안정성을 더 효과적으로 높일 수 있다.

이 성과는 2024년도 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2021R1A5A1031868)

### 참고 문헌

- [1] T. Morstyn, A. V. Savkin, B. Hredzak, and V. G. Agelidis, "Multi-Agent Sliding Mode Control for State of Charge Balancing Between Battery Energy Storage Systems Distributed in a DC Microgrid," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 9, no. 5, Sep. 2018.
- [2] T. Dragičević, X. Lu, J. Vasquez, and J. Guerrero, "DC Microgrids-Part 1: A Review of Control Strategies and Stabilization Techniques," *IEEE Trans. Power Electronics*, vol. 31, no. 7, pp. 4876-4891, Jul. 2016.
- [3] X. Lu, K. Sun, J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, and L. Huang, "Double-Quadrant State-of-Charge-Based Droop Control for Distributed Energy Storage Systems in Autonomous DC Microgrids," *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 6, no. 1, pp. 147-157, Jan. 2015.
- [4] K. D. Hoang and H.-H. Lee, "Accurate Power Sharing With Balanced Battery State of Charge in Distributed DC Microgrid," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 66, no. 3, pp. 1883-1893, Mar. 2019.