

다중 배터리 에너지 저장장치의 충전 상태 균등화를 위한 드롭 제어 방법

최승현¹, 김재상¹, 김재호², 정영훈¹, 문건우¹

한국과학기술원 전기및전자공학부¹, 한국과학기술원 미래자동차학제전공²

Adaptive Droop Control for SoC Balancing of Multiple Battery Energy Storage Systems

Seung-Hyun Choi¹, Jae-Sang Kim¹, Jaeho Kim², Yeonghun Jeong¹, Gun-Woo Moon¹

School of Electrical and Electronical Engineering, KAIST¹

Division of Future Vehicle, KAIST²

ABSTRACT

배터리 에너지 저장장치는 DC 마이크로그리드의 안정성과 경제성을 향상시키기 위해 필수적으로 사용된다. 배터리 에너지 저장장치들은 각각 다른 충전 상태(SoC)를 가질 수 있다. 하지만, 이러한 SoC 편차는 전체 가용 전력 용량을 감소시키는 문제를 유발할 수 있다. 이에 따라 SoC 차이를 줄이기 위해, 기존에는 SoC 적응형 드롭 제어 방법이 연구되었다. 그러나 기존 제어 방법은 제한된 드롭 제어 계인으로 인해, SoC 밸런싱 속도가 느리다는 문제가 있다. 이에 본 논문은 SoC 적응형 비선형 드롭 제어 방법을 제안한다. 제안된 제어 방법은 드롭 계인의 최댓값을 높여, 기존 제어 방법 대비 높은 SoC 밸런싱 속도를 가지게 된다. 제안된 제어 방법의 효용성은 프로토타입 실험을 통해 검증되었다.

1. 서론

친환경적 전력 발전의 중요성이 부각되면서, 탄소 배출이 적은 신재생 에너지원 사용량이 증가하고 있다. 태양광 발전을 포함한 신재생 에너지원들은 건물이나 전기자동차 등에 활용되어, 전력 사용처에 가까운 위치에서 운영될 수 있다. 이런 작은 에너지원-부하 단위들을 마이크로그리드라 칭할 수 있다. 마이크로그리드는 DC 배전과 AC 배전으로 분류할 수 있으며, 이 중 DC 마이크로그리드는 그리드 동기화나 역률 개선을 위한 추가 회로나 제어가 필요 없는 장점을 가지고 있다. 이런 이유로 DC 마이크로그리드의 연구가 다수 진행되고 있다^{[1]~[5]}.

DC 마이크로그리드에서 신재생 에너지원의 비중이 높을 경우, 신재생 에너지원의 전력 간헐성 때문에 안정성 문제가 발생할 수 있다. 이를 극복하기 위해 배터리 에너지 저장장치(Battery Energy Storage System, BES)가 필수적으로 사용된다. BES는 잉여 전력을 보관하고, 신재생 에너지원의 전력 공급이 부족할 때 이를 사용하여, 마이크로그리드의 안정성과 경제성을 높일 수 있다.

마이크로그리드 내의 BES 유닛은 고정형 ESS나 전기자동차 배터리 등 다양하게 존재한다. 또한, 이들 각각의 충전 상태(State of Charge, SoC)는 다를 수 있다. 이러한 SoC의 차이를 고려하지 않고 BES 유닛들의 에너지를 사용하게 되면, 일부 BES 유닛은 먼저 완전 방전되거나 충전될 수 있다. 완전 충전된 BES 유닛은 더 이상 충전할 수 없고, 완전 방전된 BES 유닛은 더 이상 방전할 수 없으므로, 전체 BES의 가용 전력 용량이 감소하게 된다. 전력 공급과 소비의 큰 차이가 발생할 때, BES가 마이크로그리드를 안정화하기 어려울 수 있다.

이 문제를 해결하기 위해, SoC가 높은 BES는 더 많이 방전되고 덜 충전되도록 하는 제어 방법이 필요하다. 이를 통해

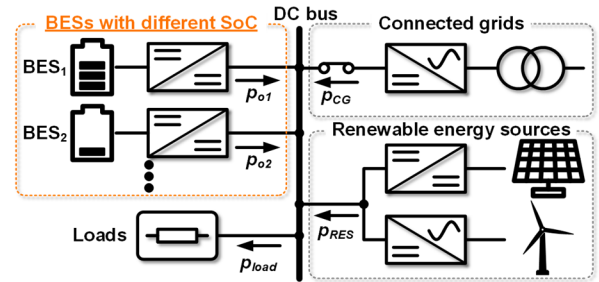


그림 1. DC 마이크로그리드 구성.

BES간의 SoC 차이를 줄일 수 있기 때문에, 이를 SoC 밸런싱 제어라고 부를 수 있다. 이전에는 분산된 BES들 간의 자율적 전력 제어를 위해, SoC 적응형 드롭 제어 방법이 사용되었다^{[3]~[5]}. 그러나, 드롭 제어기의 최대 및 최소 계인의 한계 때문에, SoC 밸런싱 속도에 제한이 생긴다. SoC 밸런싱 속도가 느리면, SoC가 균등화되기 전에 일부 BES 유닛이 먼저 완전 충전되거나 방전될 수 있다.

이러한 문제를 극복하기 위해, 본 연구에서는 SoC 적응형 비선형 제어 방법을 제안한다. 제안된 제어 방법은 최대 드롭 제어기 계인을 높여 SoC 밸런싱 속도를 향상시키는 방법이다. 추가적인 통신 시스템이나 중앙 제어기 없이도 적용 가능하므로, 자율형 DC 마이크로그리드에도 사용할 수 있다. 본 제어 방법의 유효성을 검증하기 위한 프로토타입 실험이 진행되었다.

2. DC 마이크로그리드 시스템

2.1 DC 마이크로그리드 시스템

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

2.2 배터리 에너지 저장장치 제어 시스템

그림 3은 임의의 n 번째 BES 유닛의 DC/DC 컨버터 제어 시스템을 보여준다. 이 논문에서는 출력 전력에 대한 일반화를 위해 단위법을 적용한다. 단위 출력 전력($p_{pu,i}$)은 출력 전력(p_{oi})을 정격 전력($P_{rated,i}$)으로 나눈 값으로 정의된다. 그림에서 볼 수 있듯이, SoC 적응형 드롭 계인(m)과 $p_{pu,i}$ 의

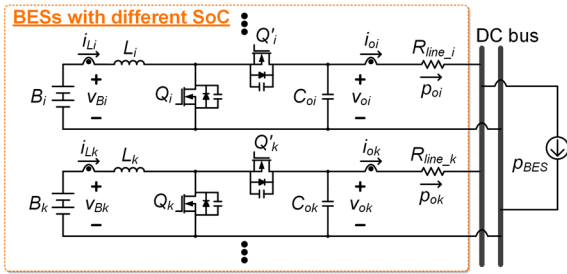


그림 2. BES 기준 등가 DC 마이크로그리드 시스템.

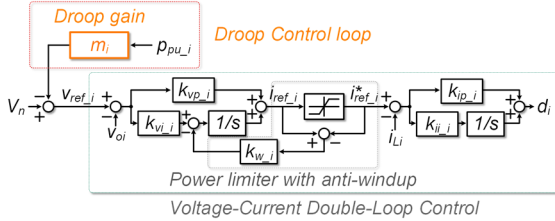


그림 3. BES_i의 DC/DC 컨버터 제어 시스템.

굽에 비례해 출력 전압 레퍼런스가 감소한다. 또한, limiter를 통해 출력 전력이 그 정격을 초과하지 못하도록 제한된다. 그리고 전압-전류 이중-루프 제어를 통해, 출력 전압을 레퍼런스에 맞추어 유지하게 된다.

3. 제안된 제어 방법

3.1 제안된 제어 방법의 컨셉

DC 마이크로그리드의 버스 전압은 일반적으로 공칭 전압의 10% 이내로 유지되어야 한다. 따라서 드롭 제어에 의한 버스 전압 변동도 마진을 고려하여 약 5% 이내로 제한되어야 한다. 기존 제어 방법은 이런 요구사항을 만족시키기 위해 최대 드롭 계인을 제한한다. 이 드롭 계인의 제한은 SoC에 따른 드롭 계인의 차이를 줄여, BES 유닛의 SoC에 따른 출력 전력 차이를 줄인다. 그 결과 SoC 밸런싱 속도가 감소하게 된다.

이런 문제를 해결하기 위해 제안된 방법은, 그림 4와 같이, 비선형 드롭 제어 방법을 도입한다. 제안된 제어 방법은 버스 전압 변동을 기존 제어와 동일하게 유지하면서도, 비선형성을 이용해 SoC에 따른 드롭 계인의 변화량을 크게 만든다. 이에 따라, SoC 밸런싱 속도를 향상시킬 수 있다. SoC 밸런싱 속도는 실험 결과를 통해 기존 제어 방법과 정량적으로 비교되었다.

3.2 안정도 분석

DC 마이크로그리드 내에서 정전력 특성을 가진 부하는 음의 임피던스를 가지므로 마이크로그리드를 불안정하게 만드는 요소다. 그러므로, 마이크로그리드의 안정성을 유지하기 위해 배터리 에너지 저장장치는 정전력 부하 조건에서도 안정적으로 작동해야 한다. 일반적으로 DC 마이크로그리드의 안정성 분석에는 소신호 기반 안정성 분석 방법이 널리 사용된다. 여러 소신호 안정성 분석 방법 중에서도 Middlebrook 안정성 분석 방법은 가장 보수적인 방법 중 하나로, 높은 안정성이 필요한 시스템에서 주로 사용된다.

Middlebrook 안정성 분석 방법은 시스템을 크게 소스 서브시스템과 부하 서브시스템으로 나눈다. 이 방법에서 소스 서브시스템의 출력 임피던스(Z_{oi})가 부하 서브시스템의 입력 임피던스(Z_{load})에 비해 낮아야 시스템이 안정하다고 판단된다. 이 논문에서는 소스 서브시스템을 BES_i로, 부하를 정전력 부하로 가정한다.

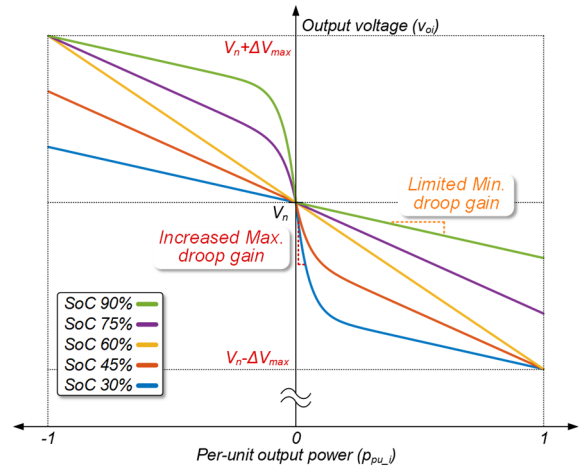


그림 4. 제안된 제어 방법의 특징.

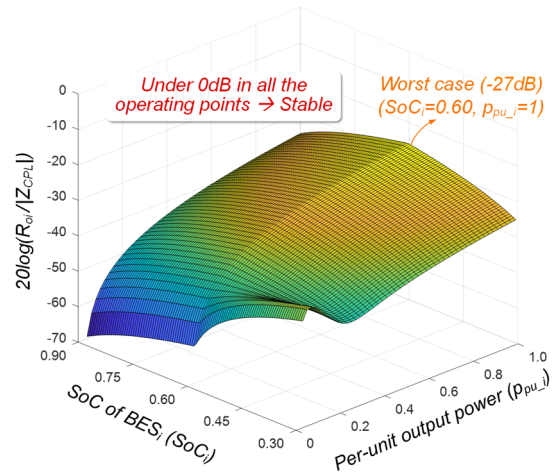


그림 5. 제안된 제어 방법 적용 안정도 분석 결과.

그림 5는 소스 서브시스템과 부하 서브시스템의 DC 값의 비율을 dB 단위로 나타낸 것이다. 그림에서 보듯, SoC가 0.6이고 최대 출력 전력($p_{pu}=1$) 상태일 때 가장 높은 값을 가진다. 그러나 이 지점에서 1보다 값이 작아 전반적으로 시스템이 안정하다고 볼 수 있다.

4. 실험 결과

실험 검증을 위해 SoC가 다른 두 개의 BES들 (BES₁, BES₂)가 병렬로 연결된 마이크로그리드 프로토타입을 구축했다. DC 버스에는 마이크로그리드에 전력을 공급하는 source와 부하가 연결되어 있다.

먼저, 두 BESs의 SoC 편차가 최대라고 가정했다 (SoC₁=0.9, SoC₂=0.3). 그림 6(a), 그림 6(b)는 이 조건에서 기존 제어 방법과 제안된 제어 방법의 BES₁, BES₂의 출력 전력을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이, 전력 공급이 부하보다 클 때 ($i_{BES}<0$), SoC가 더 높은 BES₁이 더 적은 전력을 받는다. 반대로, 부하가 전력 공급보다 클 때 ($i_{BES}>0$), SoC가 더 높은 BES₁이 더 많은 전력을 출력한다. 하지만, 기존 제어 방법은 두 BESs 간의 출력 전력 차이가 최대 1.14A로 크지 않다. 반면, 제안된 제어 방법은 최대 전력 차이가 1.90A로 훨씬 크다. 이는 제안된 제어 방법이 약 66% 더 빠른 SoC 밸런싱 속도를 가진다는 것을 보여준다.

SoC 편차가 비교적 작은 경우 (SoC₁=0.7, SoC₂=0.5)에도

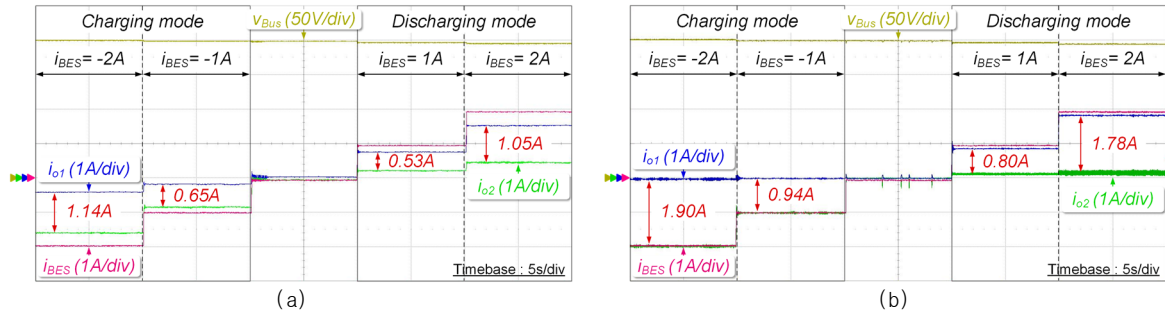


그림 6. SoC 편차 최대 (SoC₁=0.9, SoC₂=0.3)의 실험 파형. (a) 기존 제어 방법, (b) 제안된 제어 방법.

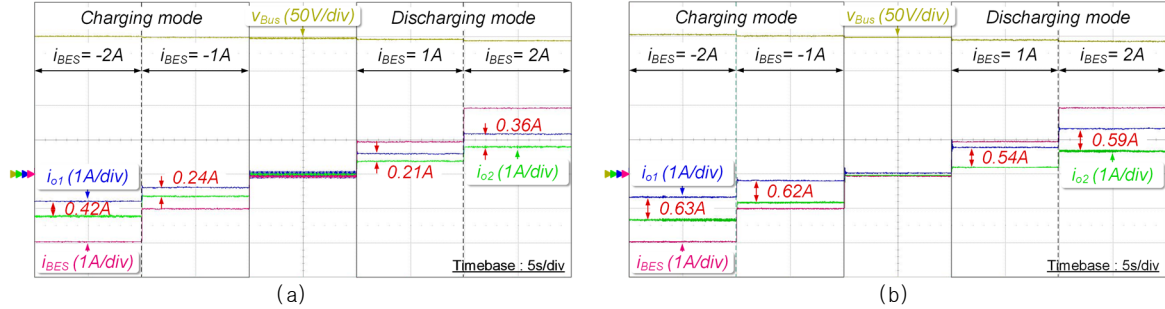


그림 7. SoC 편차 작은 상황 (SoC₁=0.7, SoC₂=0.5)의 실험 파형. (a) 기존 제어 방법, (b) 제안된 제어 방법.

동일한 방식으로 SoC 밸런싱 속도를 분석했다. 그림 7(a), 그림 7(b)는 이 조건에서 기존 제어 방법과 제안된 제어 방법의 BES₁, BES₂의 출력 전력을 나타낸다. SoC 편차가 작아도 제안된 제어 방법을 사용할 때 BESs 간의 전력 편차가 크다는 것을 확인할 수 있다. 따라서 제안된 제어 방법은 큰 SoC 편차와 작은 SoC 편차의 조건에서 모두 높은 SoC 밸런싱 속도를 보여준다는 것을 증명했다.

그림 8은 제안된 제어 방법을 사용했을 때의 SoC 밸런싱 실험 결과를 보여준다. 초기에는 SoC 편차가 38%로 출력 전력의 차이가 크지만, SoC 균등화 제어로 인해 점차 SoC 차이가 줄어든다. 결과적으로 SoC 편차가 4% 이내로 작아지는 것을 확인할 수 있다.

5. 결론

배터리 에너지 저장장치 (BES)는 DC 마이크로그리드를 안정화하는데 필수적인 역할을 한다. 이러한 BES들의 전력 용량을 최대한 활용하기 위해서는 SoC 균등화 드롭 제어 방법이 사용될 수 있다. 그러나 기존의 제어 방법은 최대 및 최소 드롭 계인의 제한으로 인해 SoC 균등화 속도가 느리다는 문제가 있다. 이를 해결하기 위해 본 논문에서는 최대 드롭 계인을 높여 사용할 수 있는 새로운 SoC 적응형 비선형 드롭 제어 방법을 제안한다. 이 제안된 제어 방법을 통해 추가적인 시스템이나 통신 없이도 빠른 SoC 균등화를 이룰 수 있다. 제안된 제어 방법의 효과는 프로토타입 실험을 통해 확인하였다.

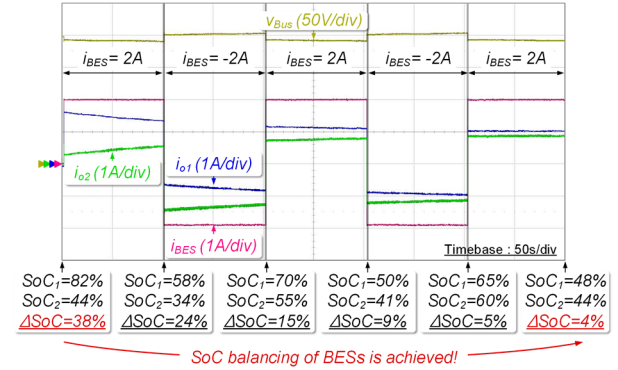


그림 8. 제안된 제어 방법의 SoC 밸런싱 동적 실험 파형.

이 성과는 2023년도 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, "State-of-Charge Balance Using Adaptive Droop Control for Distributed Energy Storage Systems in DC Microgrid Applications," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 61, no. 6, pp. 2804-2815, Jun. 2014.
- [4] 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.
- [5] 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.