

직류배전 시스템의 다중 에너지 저장장치 시스템을 위한 적응 드롭 제어

김혜진, 전창윤, 서갑수, 이경준, 조보형
서울대학교 전기정보공학부

Adaptive Droop Control Method for Multiple Energy Storage Systems in DC Distribution System

Hyejin Kim, Chang Yoon Chun, Gab Su Seo, Kyoungjun Lee, Bo Hyung Cho
Department of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University

ABSTRACT

본 논문에서는 직류 마이크로그리드 시스템에서의 분산 에너지 저장장치 시스템을 위한 제어 알고리즘을 제안한다. 각 에너지 저장장치의 전력 분배를 위해 state of charge (SOC)와 배터리 노화에 따른 용량 변화를 고려한 적응 드롭 제어를 제안한다. 각 에너지 저장장치의 SOC에 따라 오프셋 전압을 변화시킴으로써 각 에너지 저장장치 간의 SOC 밸런싱을 유지한다. 또한, 에너지 저장장치의 용량 변화에 따라 드롭 기울기 변수를 변화시켜, 노화에 따른 전력 분배를 유지하도록 한다. 48V 직류배전 시스템의 시뮬레이션을 통해 제안된 제어 방법을 검증한다.

1. 서론

직류배전 시스템은 분산전원과 에너지 저장장치의 연계가 용이하고, 시스템의 효율 향상뿐만 아니라 높은 신뢰성을 제공한다. 직류배전 시스템은 계통 연계 컨버터(GIU), 에너지 저장장치 컨버터(SIU), 분산전원 연계 컨버터(RIU)가 그림 1과 같이 병렬로 연결된 구조를 가지므로 부하 전력 분배 제어가 필수적이다. 특히, 드롭 제어 방식은 고속의 통신이 필요하지 않은 장점을 가지므로 마이크로그리드 제어에 주로 사용된다^[1]. 또한, 신재생에너지와 같은 분산전원이 포함된 마이크로그리드의 경우 안정적인 전력공급을 보장하기 위해 배터리나 슈퍼 커패시터와 같은 분산 에너지 저장장치가 필수적이다. 하지만 각 에너지 저장장치의 state of charge(SOC)가 정확히 일치하지 않으므로, 에너지 저장장치의 출력 전력 균형을 맞추기 위한 제어가 필요하다^[2]. 본 논문에서는 에너지 저장장치 간의 SOC 불균형과 배터리 수명 감소에 따른 용량 변화를 고려한 적응 드롭 제어 방법을 제안하고, 시뮬레이션을 통해 이를 검증한다.

2. 제안된 적응 드롭 제어

본 논문에서는 2개의 SIU가 포함된 직류배전 시스템을 고려한다. SIU의 local controller는 그림 2와 같이 일반적인 드롭 제어를 기본으로 내부 전류 루프와 외부 전압 루프로 제어 블록이 구성된다. SIU 컨버터는 전력 분배 및 에너지 관리를 수행하는 중요한 역할을 하며, 이는 드롭 변수 및 오프셋 전압의 제어를 통해 수행된다. 외부 전압 제어기는 각 SIU의 출력 전압 $v_{o,i}$ 가 전압 지령치 $v_{ref,i}$ 를 추종하도록 하며, 전압 보상을 통해 전류 지령치를 결정한다. $v_{ref,i}$ 는 식 (1)과 같이 구성된다.

$$v_{ref,i} = V_{nom} - k_{d,i}i_{o,i} + \Delta v_{offset,SOC,i} \quad (1)$$

여기서, $k_{d,i}$ 와 $\Delta v_{offset,SOC,i}$ 는 microgrid management unit(MMU)의 출력으로 MMU는 각 SIU로부터 SOC와 용량 정보를 받아 각 변수를 제어한다.

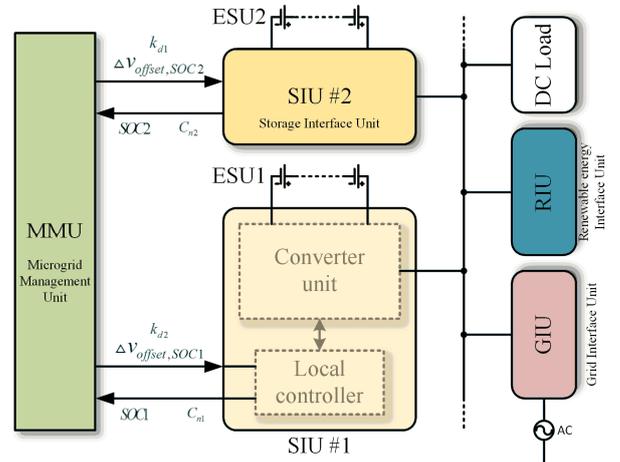


그림 1 직류배전 기반의 분산 에너지 저장장치 시스템
Fig. 1 Distributed energy storage system in DC distribution system

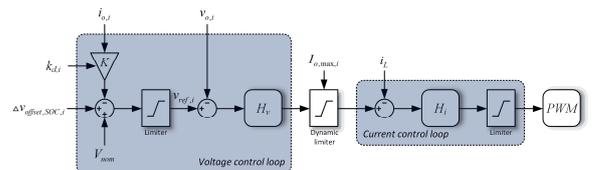


그림 2 SIU의 local controller 제어 블록 다이어그램
Fig. 2 Control block diagram of local controller in SIU

2.1 SOC 불균형에 따른 적응 드롭 제어

식 (1)의 오프셋 전압 $\Delta v_{offset,SOC,i}$ 는 각 ESU의 SOC가 같아지도록 설정된다. 오프셋 전압을 결정하기 위해서는 우선 SOC 추정 알고리즘 구현이 필요하다. 본 논문에서는 식 (2)와 같은 coulomb counting에 기반 한 추정 알고리즘을 이용한다.

$$SOC_i = SOC_{i,\infty} - \frac{1}{C} \int i_{bat,i} dt \quad (2)$$

그림 3(b)에서 볼 수 있듯이, SOC1이 SOC2보다 큰 경우, SIU1의 전압 지령치가 $\Delta v_{offset,SOC,1}$ 만큼 상승하여 부하 분담률이 증가하고 SIU2의 전압 지령치는 $\Delta v_{offset,SOC,2}$ 만큼 감소하여 부하 분담률이 감소한다. 그리고 SOC1과 SOC2의 오차가 줄어들

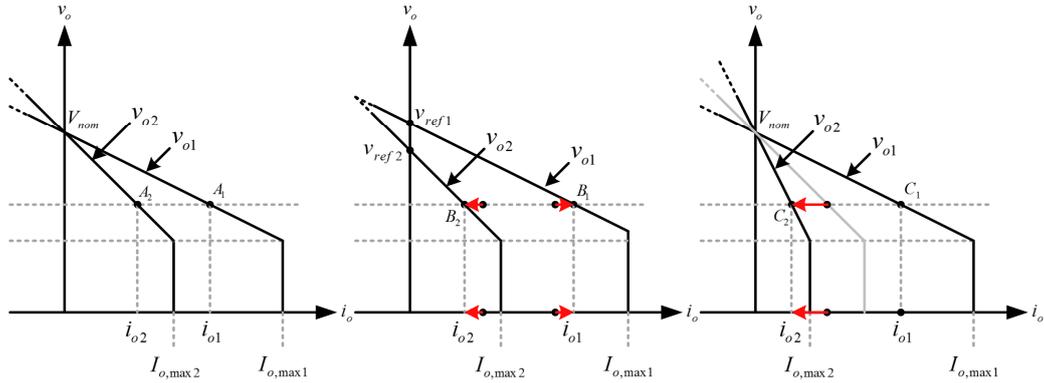


그림 3 제안된 방법의 V-I 특성곡선. (a) 일반적인 드롭 제어. (b) SOC 오차 발생 경우. (c) 용량 변화 경우.
Fig. 3 V-I characteristics. (a) for conventional method. (b) for different SOC. (c) variation of life cycle.

들에 따라 각 SIU의 전압 지령치는 그림 3(a)와 같이 동일해진다. SOC 오차에 따른 오프셋 전압은 다음과 같이 구성된다.

$$\Delta v_{offset, SOC, i} = (k_p + k_i/s)(SOC_i - SOC_j) \quad (3)$$

2.2 에너지 저장장치 용량 변화에 따른 적응 드롭 제어

식 (1)의 드롭 기울기 변수 $k_{d,i}$ 는 에너지 저장장치의 노화를 고려해 결정된다. 에너지 저장장치의 용량이 감소하면 이를 고려한 전력 분배가 이루어져야 한다. 노화에 의해 ESU2의 용량이 감소할 경우, SIU2의 k_{d2} 가 증가하여 그림 3(c)와 같이 부하 분담률이 감소하게 된다. 이를 통해 에너지 저장장치의 수명을 최대한 길게 유지할 수 있다. 드롭 기울기 변수는 다음과 같이 구성된다.

$$k_{d,i} = k_{d,0} \frac{C_{n,0}}{C_{n,i}} \quad (4)$$

이 때, $k_{d,0}$ 는 초기 드롭 기울기, $C_{n,0}$ 는 초기 에너지 저장장치의 용량을 나타낸다.

3. 시뮬레이션 결과

제안된 적응 드롭 제어 방식을 검증하기 위해 Matlab/Simulink 기반의 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 1의 직류배전 시스템은 직류 링크 전압이 45V~51V 내에서 제어 되도록 설계되었다. 각 ESU의 초기 조건은 각각 80%와 60% 이고, 첫 번째 ESU의 초기용량은 두 번째 ESU의 초기용량의 2배로 설정하였다. 그림 4는 SOC 오차 발생 시 제안된 적응 드롭 제어를 적용했을 때의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. SOC가 큰 SIU가 SOC가 작은 SIU에 비해 더 큰 전력을 전달하고 있음을 볼 수 있다. 따라서 시간이 지남에 따라 각 ESU의 SOC 차이가 줄어든다. 그림 5는 두 번째 ESU의 용량이 절반으로 감소했을 때의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 용량 변화에 따라 SIU2의 부하 분담률이 감소하고, 이를 GIU와 SIU1이 보상한다.

4. 결론

본 논문에서는 에너지 저장장치의 SOC와 노화에 따른 용량 변화를 고려한 적응 드롭 제어 방식을 제안하였다. 에너지 저장장치의 SOC 차이에 따라 오프셋 전압을 변화시킴으로써 각 SIU의 부하 분담을 조절한다. SOC가 큰 SIU는 더 큰 전력을 전달하고 SOC가 작은 SIU는 적은 전력을 전달함으로써 각 에너지 저장장치의 SOC가 같아지도록 제어된다. 또한, 에너지

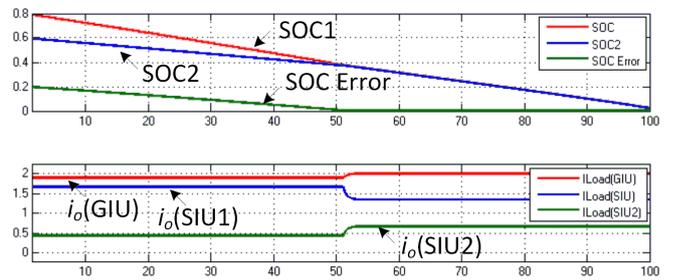


그림 4 SOC 오차 발생 경우의 시뮬레이션 결과

Fig 4 Simulation results for SOC difference

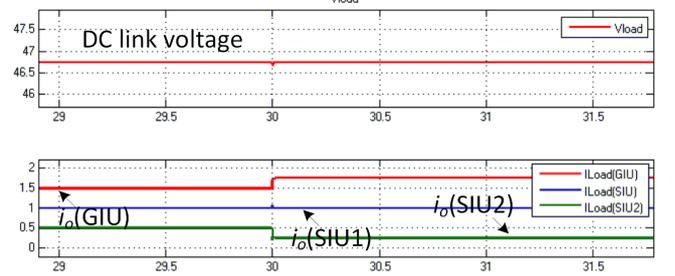


그림 5 용량 변화 경우의 시뮬레이션 결과

Fig 5 Simulation results for capacity variation

저장장치의 노화에 따른 용량 변화를 고려하여 드롭 기울기 계수를 변화시켜 노화에 따라 부하 분담을 조절한다. 시뮬레이션 결과를 통해 제안된 방법을 검증하였다.

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지 기술 평가원(KETEP)과 산업평가관리원의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다.(No. 2011T100100025)

참고 문헌

- [1] 백종복, 신재생 에너지원과 에너지 저장장치가 연계된 직류 배전 시스템의 제어 및 안정도 해석, 박사학위논문, 서울대학교, 2014.
- [2] T. Dragicevic, J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, and D. Skrlec, "Supervisory control of an adaptive droop regulated DC microgrid with battery management capability", *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 2, pp. 695 706, Feb. 2014 .