

리튬이온 전지와 바나듐 레독스 흐름전지의 모델링 비교

홍서현*, 송승호*, 김수연**
 광운대학교*, 한국전력공사 전력연구원**

Comparison of LIB and VRFB Battery Models for Energy Storage Systems

Seo-Hyun Hong*, Seung-Ho Song*, Soo-Yeon Kim**
 Kwangwoon University*, KEPCO Research Institute**

ABSTRACT

본 논문은 단주기 ESS(Energy Storage System, 에너지 저장장치)에 사용되는 리튬이온 배터리(Lithium-Ion Battery, LIB)와 중장주기 ESS에 사용되는 바나듐 레독스 플로우 배터리(Vanadium Redox Flow Battery, VRFB)의 모델링 결과를 비교 분석하였다. 두 종류 배터리의 전기적 등가회로 모델을 MATLAB/Simulink를 사용하여 시뮬레이션 하였고, 각각의 파라미터 차이와 OCV-SOC 특성을 비교하였다.

1. 서론

최근 재생에너지 발전량 비중 목표 확대에 따라 계통 안정화, 신재생에너지의 변동성 대응 등을 위한 에너지 저장장치(ESS)의 중요성이 증가하고 있다. ESS는 사용 시간을 기준으로 단주기와 중장주기로 분류할 수 있으며, 정격 출력으로 수분에서 2시간 미만 제공하면 단주기, 2시간 이상 4시간 미만이면 중주기, 4시간 이상이면 장주기로 분류한다^[1]. 중장주기에 사용되는 VRFB는 긴 수명, 장시간 에너지 저장 가능, 대용량화 용이, 화학적 부반응과 화재의 위험이 없다는 장점이 있다. 본 논문에서는 이러한 VRFB의 모델링과 LIB(Lithium-Ion Battery) 모델링에 필요한 파라미터를 비교하고 OCV-SOC 특성을 확인하였다.

2. 배터리 모델링

2.1 LIB 모델링

리튬이온 배터리의 전기적 등가회로는 그림1과 같이 나타낼 수 있다. RC Ladder Model로 모델링을 하였으며, V_{OCV} 는 개방회로전압(Open Circuit Voltage), $R_{internal}$ 는 배터리의 내부 저항과 전하 전이 저항의 합(Internal Resistance), $R_{diffusion}$ 및 $C_{diffusion}$ 는 확산 현상에 의한 저항(Diffusion Resistance)과 커패시터(Diffusion Capacitance)를 의미한다^[2]. 배터리 임피던스 파라미터는 방전 구간 그래프 초반의 전압이 순간적으로 변화하는 IR drop 구간에서의 전압과 방전 전류로 $R_{internal}$ 계산이 가능하며, 전압의 변화가 느려지는 구간에서 $R_{diffusion}$ 및 $C_{diffusion}$ 계산이 가능하다.

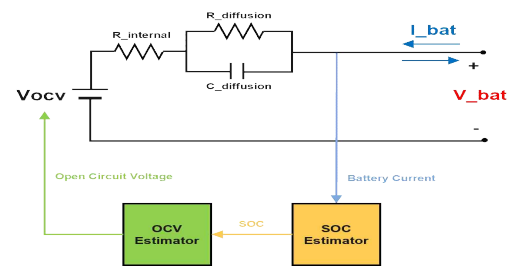


그림 1 리튬이온 배터리 등가모델
 Fig. 1 Lithium-ion battery equivalent model

2.1.1 SOC(State of Charge)

SOC는 전류적산법(Current Integral Method)으로 계산하였다. 본 논문에서는 단일 셀이 아닌 6[kWh]의 모듈을 모델링하였으므로, 직렬로 연결된 셀의 개수 n 을 곱하여 식 (1)과 같이 SOC를 추정한다.

$$SOC(t) = SOC_{initial} + \frac{n \int_0^t I(t) dt}{C} \quad (1)$$

위 식(1)에서 $SOC_{initial}$ 는 초기 SOC, n 은 셀의 개수, I 는 배터리 전류[A], C 는 배터리의 정격 용량[Ah]이다.

2.1.2 OCV(Open Circuit Voltage)

OCV는 네른스트 방정식(Nernst Equation)을 이용하여 계산하였으며, SOC와 마찬가지로 셀의 개수 n 을 곱한 식(2)를 이용하여 OCV를 추정한다.

$$OCV(t) = n \left\{ E_{cell_eq_50\%SOC} + \frac{RT}{nF} \ln \frac{SOC}{1-SOC} \right\} \quad (2)$$

위 식(2)의 $E_{cell_eq_50\%SOC}$ 은 셀 평형 전위로 3.6[V]이다. R 은 기체 상수, F 는 패러데이 상수, T 는 주위 온도[K]를 의미한다.

2.2 VRFB 모델링^[3]

바나듐 레독스 플로우 배터리는 그림2와 같은 펌프와 자가방전을 고려한 전기적 등가회로로 나타낼 수 있다. 모델링에 필요한 파라미터 V_{OCV} 는 개방 회로 전압, $R_{resistive}$ 는 전해질 용액 저항(Electrolyte Solution Resistance), $R_{reaction}$ 은 전하 전달 저항(Charge Transfer Resistance), $C_{electrode}$ 는 2개의 전극 사이에 형성된 커패시터를 의미한다.

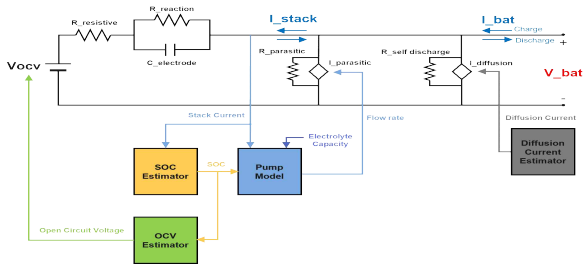


그림 2 바나듐 레독스 플로우 배터리 등가모델
Fig. 2 Vanadium Redox Flow battery equivalent model

2.2.1 Electrolyte Flow Rate

펌프 손실 및 제어 회로의 손실을 구현하기 위해 전류원 $I_{parasitic}$ 과 션트 저항 $R_{parasitic}$ 을 계산한다. $R_{parasitic}$ 은 펌프 내부 저항과 보조 제어 회로 저항으로 구할 수 있고, $I_{parasitic}$ 즉, 유량(Flow rate)은 식(3)을 통해 구할 수 있다.

$$Q = \frac{I}{N \times SOC} \quad (3)$$

$$N = n_e \times c \times F \quad (4)$$

위 식에서 각각 Q 는 전해액 유량[cm^3sec^{-1}], I 는 스택 전류[A], N 은 전해액 용량[$Ascm^{-3}$], n_e 는 전달된 전자수/mol, c 는 바나듐 농도[$molL^{-1}$], F 는 패러데이 상수를 의미한다.

2.2.2 SOC(State of Charge)

바나듐 레독스 플로우 배터리도 6[kWh]의 스택을 모델링 하였으므로 셀의 개수 n 을 곱하여 식 (4)와 같이 전류적산법으로 SOC를 추정한다.

$$SOC(t) = SOC_{initial} + \frac{n \int_0^t I(t) dt}{F \times v \times c} \quad (4)$$

위 식(4)에서 $SOC_{initial}$ 는 초기 SOC, n 은 셀의 개수, v 는 각 탱크의 전해액 부피[L]이다.

2.2.3 OCV(Open Circuit Voltage)

OCV 또한 셀의 개수 n 을 곱해 전체 스택의 OCV를 식 (5)와 같이 추정할 수 있다.

$$OCV(t) = n \left\{ E_{cell,eq,50\%SOC} + \frac{2RT}{F} \ln \frac{SOC}{1-SOC} \right\} \quad (5)$$

위 식 (5)의 $E_{cell,eq,50\%SOC}$ 은 셀 평형 전위로 1.4[V]이며, R 은 기체 상수, F 는 패러데이 상수, T 는 주위 온도[K]를 의미한다.

3. 시뮬레이션 결과

리튬이온 배터리 모듈과 바나듐 레독스 플로우 배터리 스택 모델의 사양은 표1과 같으며 동일한 6kWh 용량으로 시뮬레이션을 하였다. $0 < SOC < 0.2$ 구간에서 리튬이온 배터리는 40[V]에서 45.3[V]까지, 바나듐 레독스 플로우 배터리는 25[V]에서 27.3[V]까지 OCV가 상승한다. $0.8 < SOC < 1$ 구간에서는 리튬이온 배터리는 47.7[V]에서 54[V]까지, 28.3[V]부터 31[V]까지 상승한다. 각 구간에서 리튬이온 배터리의 전압 변화가 더 큰 것을 확인하였다.

표 1 리튬이온 배터리와 바나듐 레독스 플로우 배터리 모델
Table 1 Specifications of LIB and VRFB Module

Battery	LIB	VRFB
Battery Energy	6[kWh]	6[kWh]
Battery Capacity	120[Ah]	214[Ah]
Nominal Voltage	48[V]	28[V]
Voltage Range	40~54[V]	22~32[V]

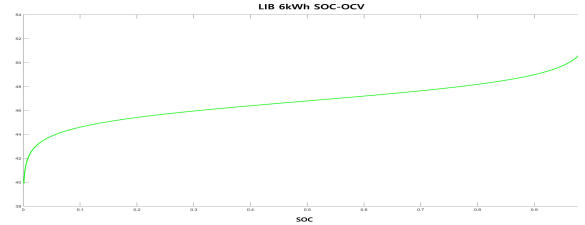


그림 3 리튬이온 배터리 SOC-OCV 곡선
Fig. 3 SOC-OCV curve of LIB

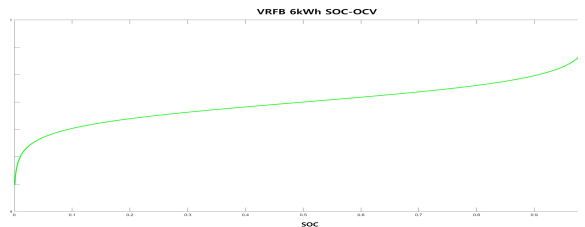


그림 4 바나듐 레독스 플로우 배터리 SOC-OCV 곡선
Fig. 4 SOC-OCV curve of VRFB

4. 결론

본 논문에서는 LIB와 VRFB 모듈을 모델링 하는데 필요한 파라미터와 SOC, OCV 추정 식을 비교하였다. 또한 각 배터리의 충방전 시뮬레이션을 통해 SOC-OCV 곡선의 차이점을 확인할 수 있었다. 실증 실험을 진행하지 못해 각 바나듐의 농도를 측정할 수 없어 자가방전을 고려하지 않았으나 바나듐 이온의 확산으로 인한 자가방전은 OCV에 영향을 미친다. 추후 확산 전류와 자가방전 저항으로 자가방전을 구현한다면 더 정확한 시뮬레이션 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구는 한전 전력연구원의 연구비 지원(R22EA06, 상용 ESS 실증 및 성능평가 기준 개발)에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] 이상균, 장재원, “전기화학적 배터리 기반 중장주기 에너지 저장기술 개발 동향 및 미래 전망”, 544, pp.46-59, 2023.
- [2] 이종학, 김수홍, 김태형, 김상현, 권병기, “BESS용 리튬 배터리의 인피던스 모델링”, 전력전자학회 학술대회 논문집, pp.109-110, 2011.
- [3] Ankur Bhattacharjee, Hiranmay Saha, “Design and experimental validation of a generalised electrical equivalent model of Vanadium Redox Flow Battery for interfacing with renewable energy sources”, Journal of Energy Storage, Volume 13, pp.220-232, 2017.