

방전 깊이(DOD)에 따른 리튬 이온 배터리의 에너지 효율에 관한 연구

김승우*, 이성준**, 김정희***, 김종훈*

충남대학교 에너지저장변환실험실*, 조선대학교**, 코엔시스***

A study of the energy efficiency of batteries according to the Depth of Discharge (DOD)

Seungwoo Kim*, Seongjun Lee**, Jeonghui Kim***, Jonghoon Kim*

Chungnam National University*, Chosun University**, Coensys***

ABSTRACT

배터리의 가용 영역에 따른 효율적인 운영 방법을 판단하기 위해 방전 깊이(Depth of Discharge; DOD)에 따라 배터리의 노화 상태 및 에너지를 계산하여 최적의 가용 영역을 판단한다. 배터리의 상태를 판단하기 위한 지표로써 건강 상태(State of Discharge; DOD)와 출력 상태(State of Power; SOP)의 분석을 통해 비교한다. 노화 파라미터 및 DOD에 따른 노화 차이를 반영한 알고리즘 구현 및 배터리팩과 시스템 레벨의 효율적인 운영 방안에 대해 연구한다.

1. 서론

배터리의 친환경성 및 안전성과 같은 특성에 의해 에너지 저장 시스템(Energy Storage System; ESS)과 전기 자동차(Electric Vehicle; EV) 등의 보급이 확산하였고 배터리의 장시간 사용 및 효율적인 운영에 관한 관심도 나날이 커지고 있으며 배터리의 효율적인 운영에 관한 연구가 늘어나고 있다. 배터리의 효율적인 운영을 위한 충·방전의 깊이를 판단하기 위해서는 배터리의 잔존 용량의 지표로써 방전 깊이(Depth of Discharge; DOD)로 나타내며 배터리의 방전 상태를 백분율로 나타낸다. DOD 100%는 배터리의 완전 방전 상태를 의미하며 DOD 0%는 배터리의 완전 충전 상태를 의미한다. 배터리는 충·방전의 깊이에 따라 노화 속도가 달라지기 때문에 기본적으로 배터리의 노화 실험에서는 만충/만방을 통해 배터리의 노화를 가속한다. 만충/만방 사이클은 실험환경에서 배터리의 노화 데이터를 빠르게 얻기 위해 사용되는 방법으로 실제 상업용 배터리의 경우 충·방전에 제한을 두어 사용하게 된다.

본 논문에서는 배터리의 DOD에 따른 노화 시 가장 최적의 충·방전 효율을 가지는 DOD를 찾고 그에 따른 효율을 결과로써 나타낸다. 노화의 판단은 건강 상태(State of Health; SOH)를 지표로써 배터리의 노화 상태를 판단하며 노화 상태 이외에도 배터리의 총 사용 에너지 충전 및 방전 사이클의 깊이에 따라 노화의 속도가 결정된다. 3가지 실험 데이터의 노화 상태 및 측정된 파라미터의 비교를 통해 노화에 가장 큰 영향을 주는 파라미터를 분석한다. 이를 통해 추후에 SOH 예측을 위한 모델을 사용하여 반영된 파라미터에 의해 예측 성능의 향상을 목표로 DOD에 따른 노화 데이터를 분석한다.

2. 배터리 실험 구성

표 1 SAMSUNG INR-18650 25R 배터리 사양
Table 1 Specification of SAMSUNG INR-18650 25R

Type	Specification
Nominal Voltage(V)	3.6
Charge / Max Voltage(V)	CC-CV (4.2±0.05V)
Discharge / Min Voltage(V)	2.5
Dis. Capacity / Standard (mAh)	2,500

DOD에 따른 배터리의 노화 특성 실험을 위해 두 가지 전기적 특성 실험을 진행한다. 실험은 고출력의 특성을 가진 SAMSUNG INR-18650 25R 원통형 배터리 3개를 사용하여 진행된다며 배터리의 사양은 표 1과 같다.

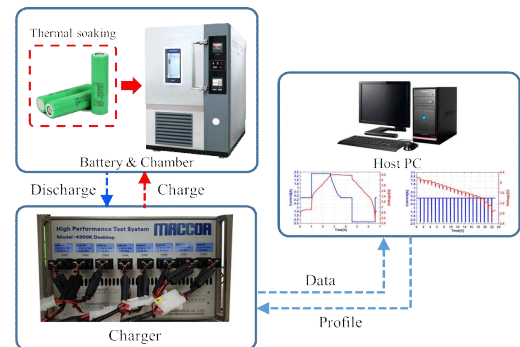


그림 1 배터리의 전기적 특성 실험을 위한 장비 구성

Fig. 1 Experimental equipment setup for electrical characteristic experiment

실험을 위해 사용된 장비는 외기온도를 상온 25°C로 유지하기 위한 챔버와 호스트 PC와 충·방전 사이의 측정 데이터의 기록 및 프로파일 입력을 통해 배터리의 전기적 내부 특성 실험을 수행한다. 실험 장비에 대한 구성은 그림 1과 같다. 실험은 3개의 배터리를 통해 배터리의 노화 용량 및 노화에 따른 전기적 내부 파라미터를 추출한다. 실험에 사용된 3개의 셀은 각각 상한 전압 4.2V, 4.1V, 4.0V로 만충을 진행하고 2.5V로 만방 실험을 진행하여 만충/만방을 1 cycle로 한 번의 Aging 실험에 10 cycle 씩 총 260 cycle의 노화를 진행한다. 10 cycle 전후로 방전 용량 실험 및 개회로 전압(Open Circuit Voltage; OCV) 실험을 통해 배터리의 내부 파라미터를 측정한다.

3. DOD에 따른 에너지 효율

배터리의 상한 전압 4.2V, 4.1V, 4.0V까지 충전한 실험은 4.2V를 DOD 100%로 정의하였을 때 4.1V 실험은 DOD 91.8%, 4.0V 실험은 DOD 78.92% 구간에서의 충·방전을 통해 실험을 진행한다. 본 논문에서 진행한 실험은 상한 전압에서의 DOD 차이가 배터리의 노화에 미치는 영향에 대해서 분석한다.

3.1 배터리의 건강 상태(State of Health; SOH)

SOH는 배터리의 노화 상태를 나타내는 지표로서 노화에 따라 발생하는 파라미터의 변화는 백분율로 배터리의 노화 상태를 간단하게 표현한다. SOH는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$SOH = \frac{C_{current} - C_{aging}}{C_{fresh} - C_{aging}} \quad (1)$$

여기서 $C_{current}$ 는 현재 배터리의 상태, C_{aging} 은 임계값(End-of-Life; EOL) 상태에서의 배터리 상태, C_{fresh} 는 초기 배터리의 상태를 의미한다. EOL이란 배터리의 용량이 초기의 80%에 도달했을 때의 배터리 상태를 의미한다.

3.2 배터리의 전력 상태(State of Power; SOP)

배터리의 출력 상태(State of Power; SOP)는 일반적으로 배터리가 일정 시간 범위 동안 EV를 충전하거나 방전할 수 있는 전력의 가용성을 말한다. 배터리의 SOP는 배터리가 제공할 수 있는 최대 충전 및 방전전력에 대한 지표로서 다양한 작동 조건을 명시적으로 나타내야 한다. SOP는 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{cases} SOP_{charge} = \max(P_{min}, I_{min}^{charge} \cdot V(t + \Delta t)) \\ SOP_{discharge} = \min(P_{max}, I_{max}^{discharge} \cdot V(t + \Delta t)) \end{cases} \quad (2)$$

여기서 SOP_{charge} , $SOP_{discharge}$ 는 충전/방전에 대한 출력 상태를 의미하며 각각의 P_{min} , P_{max} 는 전력 설계를 위한 한계값을 의미한다. $V(t + \Delta t)$ 는 샘플링 타임 동안의 단자 전압을 의미하며 각각의 I_{min}^{charge} 과 $I_{max}^{discharge}$ 는 연속 충전/방전 전류를 의미한다.

3.3 파라미터 추출 방법

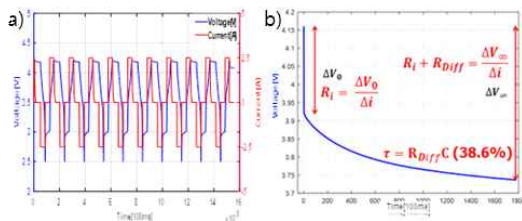


그림 2 전기적 노화 실험 및 파라미터 추출 방법
Fig. 2 Electrical aging experiment and parameter extraction method

그림 2의 a)의 실험 프로파일을 통해 배터리를 노화시키고 b)의 방법을 통해 내부 파라미터를 추출한다.

4. 실험 결과

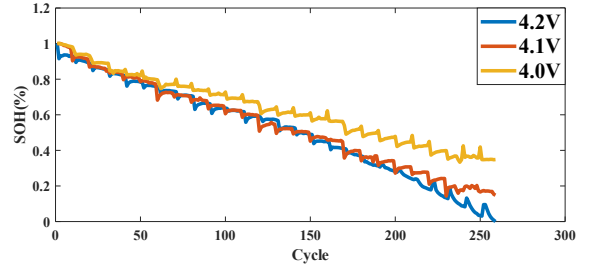


그림 3 배터리의 상한 전압별 노화에 따른 배터리의 SOH 변화 비교
Fig. 3 Comparison of changes in SOH of batteries due to aging by upper voltage of batteries

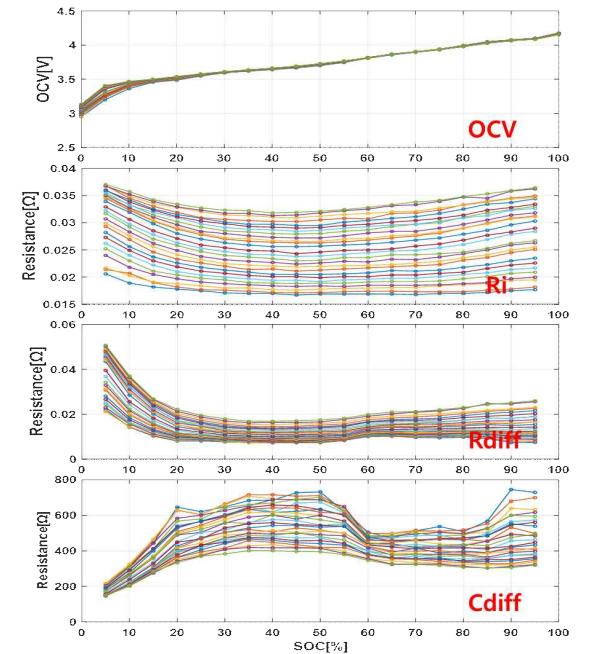


그림 4 배터리 노화에 따른 OCV 및 내부 저항
Fig. 4 OCV and internal resistance due to battery aging

그림 3은 실험으로 추출된 배터리의 용량을 SOH로 측정된 그래프다. 4.2V 배터리가 임계점에 도달한 260 cycle까지 노화를 진행한다. 진행 결과는 4.2V와 4.1V 배터리는 거의 비슷한 경향성을 띠지만 4.0V 배터리는 노화가 느리게 발생하는 것을 확인할 수 있다.

그림 4는 실험으로 추출된 파라미터로서 배터리의 방전 용량, OCV, R_i , R_{diff} 및 C_{diff} 이며 배터리의 노화 상태를 가장 직관적으로 반영한 파라미터이다. 배터리의 내부 파라미터는 OCV 실험의 SOC 5% 단위 방전 전류 구간에서 추출되며 SOC 100%, 0% 구간은 파라미터 측정의 어려움으로 인해 제외한다. 그림 5는 배터리 노화 실험 260 cycle에 따른 SOC 구간별 (95%, 50%, 5%) 내부 저항의 변화에 대한 그래프다. SOC 중 가장 안정적인 저항을 추출하기 위해 분석하였으며 비교를 통해 증가하는 값이 선형적인 SOC 95%, 50%가 가장 분석에 적합하다고 판단된다. SOC 95%와 SOC 50%를 비교 시 R_{diff} 의 차이가 가장 크게 나타나며 R_i 의 경우 세 SOC 모두 비슷한 경향성을 가지며 증가하는 것을 알 수 있다. 또한, 낮은 SOC 구간에서의 배터리 운영은 배터리팩의 높은 저항으로 인한 온도 상승 및 배터리 열화에 큰 영향을 줌으로 배터리 운영 조건에 적합하지 않다.

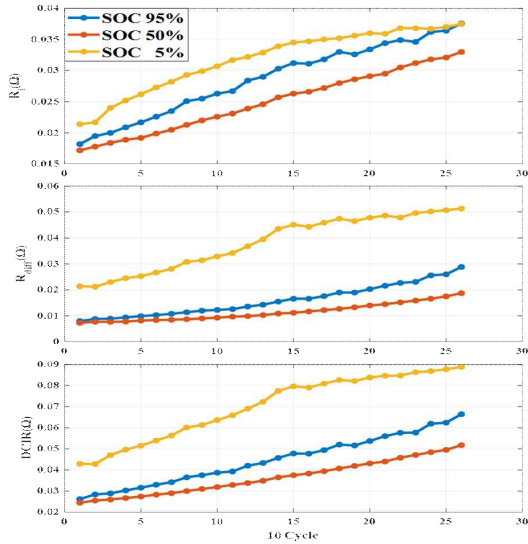


그림 5 배터리 노화 cycle에 따른 SOC 구간별 (95%, 50%, 5%) 내부 저항 (R_i , R_{diff} , $DCIR$) 측정

Fig. 5 Measurement of internal resistance (R_i , R_{diff} , $DCIR$) by SOC section (95%, 50%, 5%) by battery aging cycle

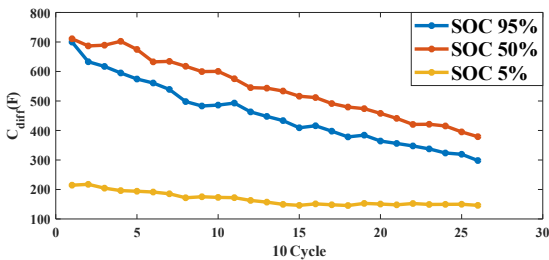


그림 6 배터리 노화 cycle에 따른 SOC 구간별 (95%, 50%, 5%) C_{diff} 측정

Fig. 6 Measurement of C_{diff} by SOC section (95%, 50%, 5%) by battery aging cycle

그러므로 중간 영역과 높은 영역의 SOC로 선정하고 이후 두 SOC 95%, 50%를 사용하여 배터리의 SOH를 계산한다. 그림 6은 배터리 노화 실험 260 cycle에 따른 SOC 구간별 (95%, 50%, 5%) C_{diff} 의 비교를 위한 그래프이다. 내부 저항들과는 다르게 감소하는 경향을 보이기 때문에 내부 저항과 분류 하였다. R_{diff} 값과는 반대의 경향을 보인다. 이는 전류 인가할 때의 저항을 시정수에 의해 R_{diff} 와 C_{diff} 가 각각 나뉘기 때문에 두 값은 반대되는 경향성을 가지게 된다. C_{diff} 는 R_{diff} 와는 반대되는 경향성을 가지지만 다른 파라미터에 비해 변동이 심하므로 분석값으로는 적절하지 않다.

5. 결론

본 논문에서는 DOD에 따른 효율적인 운영 방법에 대한 분석을 위해 고출력 리튬이온 배터리를 실험하여 노화 상태를 측정한다. 측정된 배터리의 방전 용량 및 내부 파라미터는 DOD가 클수록 더 빨리 노화가 진행됨을 용량 기반의 SOH를 측정하여 판단하였으며 노화 실험 사이클 사이에 진행된 OCV 실험을 통해 SOC 5% 간격의 내부 파라미터를 측정하여 SOC 구간별 파라미터의 변화를 분석하였으며 이를 통해 Low SOC

구간의 파라미터는 노화에 따른 변동이 심하므로 사용하기 적절하지 않다고 판단된다. 특히 이러한 경향은 OCV와 R_{diff} 두 드리지게 발생하며 R_i 는 비교적 다른 SOC 구간과 비슷한 경향성을 가지고 변하는 것을 확인할 수 있다. 이후 퓨처 워크로서 노화 파라미터 및 DOD에 따른 노화 차이를 반영한 알고리즘 구현 및 배터리팩의 효율적인 운영 방안에 대해 진행할 것이다.

이 논문은 한국전력공사의 2019년 선정 기초연구개발과제 (과제번호 R19XC01-45), 코엔시스의 연구비 지원에 의한 연구결과입니다.

참고 문헌

- [1] M.J. Esfandyari, "A new approach to consider the influence of aging state on Lithium-ion battery state of power estimation for hybrid electric vehicle", Energy, Volume 176, 1 June 2019, Pages 505-520, 2019, March.
- [2] Linlin Fang, "Online Estimation and Error Analysis of both SOC and SOH of Lithium-ion Battery based on DEKF Method", Energy Procedia, Volume 158, February 2019, Pages 3008-3013
- [3] Kun Qian, "State-of-health (SOH) evaluation on lithium-ion battery by simulating the voltage relaxation curves", Electrochimica Acta, Volume 303, 20 April 2019, Pages 183-191