

배터리의 용량 및 출력 감소를 추정하는 포괄적 SOH 알고리즘

노태원¹, 김나리¹, 안정훈¹, 김동희², 이병국^{1†}
 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과¹, 동명대학교 전기공학과²

Comprehensive SOH Estimation Algorithm Considering the Changes of Capacity and Power

Tae Won Noh¹, Nari Kim¹, Jung Hoon Ahn¹, Dong Hee Kim² and Byoung Kuk Lee^{1†}
 Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University¹
 Department of Electrical Engineering, Tongmyung University²

ABSTRACT

본 논문은 노화로 인한 배터리의 용량과 최대 출력 변화를 추정하는 알고리즘을 제안한다. 제안하는 알고리즘은 실시간으로 내부저항을 추정하여 배터리의 최대 출력을 예측하고 전하량 대비 개방회로전압의 변화율을 통해 노화된 용량을 계산한다. 개방회로전압 변화율의 정확한 계산을 위하여 앞서 추정된 내부저항을 이용한다. 제안하는 알고리즘의 정확도는 단전지 실험 및 시뮬레이션을 통하여 검증한다.

1. 서론

최근 배터리의 사용 분야가 전기 자동차, 에너지 저장 시스템 등 다양한 영역으로 확대되면서 배터리를 효과적으로 관리하는 것이 중요해지고 있다. 특히 배터리의 노화는 전류 용량 감소와 내부 저항 증가로 인한 에너지 및 최대 출력 성능의 변화를 야기한다. 따라서 노화에 따른 배터리 성능 변화를 정확하게 판단하기 위해 전류 용량과 최대 출력 성능을 포괄적으로 추정하는 SOH (State of Health) 알고리즘이 필요하다.

기존의 알고리즘은 전류 용량의 노화도 (SOH_{energy})를 측정하기 위해 완전 방전 후 충전을 통해 용량을 측정하거나 전하량 변화 대비 OCV (Open Circuit Voltage) 변화율 (dOCV/dQ)을 의미하는 DV (Differential Voltage) 곡선의 변화 양상을 이용한다. 최대 출력 성능을 예측하는 SOH (SOH_{power}) 알고리즘은 실시간으로 내부 저항을 추정하여 SOH_{power}를 계산한다. 그러나 기존 알고리즘은 배터리 성능 진단을 위해 필요한 전류 용량과 출력 성능을 종합적으로 추정할 수 없는 한계를 가진다.

본 논문은 노화에 따라 변화하는 에너지 용량과 최대 출력 성능을 통합하여 판단 할 수 있는 SOH 추정 알고리즘을 제안한다. 제안하는 알고리즘은 실시간으로 내부 저항을 추정하여 SOH_{power}를 추정한다. 이 때, 추정된 내부 저항을 이용해 단자 전압으로부터 OCV의 DV 곡선을 계산하여 SOH_{energy} 추정을 위한 용량 변화 분석의 정확도를 향상시킨다.

2. SOH 추정 알고리즘

2.1 내부 저항을 통한 SOH_{power} 추정

SOH_{power}는 식 (1)과 같이 계산되며, 배터리의 최대 출력 성

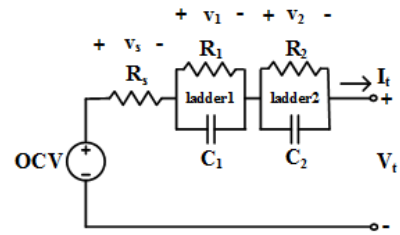


그림 1 배터리 등가 회로 모델
 Fig. 1. The equivalent circuit model of battery.

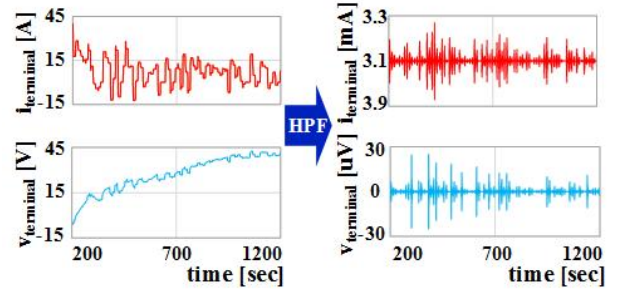


그림 2 단자 전압/전류의 필터링
 Fig. 2. The filtering of terminal voltage and current.

$$SOH_{power} = \frac{R_{EOL*} - R_s}{R_{EOL} - R_{fresh}} \times 100 [\%] \quad (1)$$

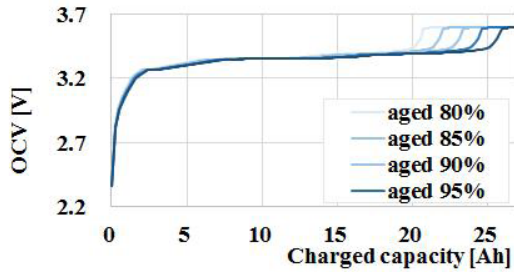
* R_{EOL} : 노화로 인해 최대 출력이 80%로 감소하는 R_s

능이 최대 허용 단자 전압에 대한 전류 크기로 결정되는 것을 고려할 때 출력 성능 판단의 지표로 사용할 수 있다. 제안하는 알고리즘은 단자 전류 (I_t)에 대한 단자 전압 (V_t)의 급격한 변화를 결정하는 R_s (그림 1)를 통해 SOH_{power}를 추정한다. R_s는 그림 2와 같이 고주파 통과 필터를 통해 추출된 V_t와 I_t의 고주파 성분 (I_{filt}, V_{filt})을 이용하여 추정 된다.

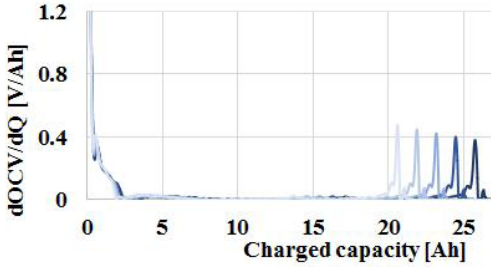
$$R_s = \frac{V_{filt.}}{I_{filt.}} \quad (2)$$

2.2 DV 곡선을 통한 SOH_{energy} 추정

SOH_{energy}는 DV 곡선의 노화 특성을 이용해 식 (3)과 같이 계산할 수 있다. DV 곡선의 극점은 그림 3처럼 노화가 진



(a) OCV curve



(b) DV curve

그림 3 노화에 따른 OCV와 DV 곡선 변화
Fig. 3. OCV and DV curve following the aging.

$$SOH_{power} = \frac{R_{EOL} - R_s}{R_{EOL} - R_{fresh}} \times 100 [\%] \quad (3)$$

* C_{EOL} : 노화로 인해 전류 용량이 C_{fresh} 대비 80%로 감소한 C

행될수록 낮은 잔존 용량 영역으로 이동하는 경향을 가진다^[1]. 본 알고리즘은 DV 곡선의 극점 위치를 실시간으로 추정하고 C와의 관계를 look up table로 구성하여 SOH_{energy} 를 추정한다.

2.3 R_s 정보를 이용한 DV 곡선의 정확도 향상

DV 곡선을 추출하기 위해 V_t 의 변화량 (ΔV_t)으로부터 OCV의 변화량 (ΔOCV)을 추출해야 한다. ΔOCV 는 식 (4)와 같이 ΔV_t 와 임피던스 전압의 변화량으로 표현된다. 이 때, 전압의 샘플링 주파수가 매우 크다고 가정하면 상대적으로 긴 시정수를 가지고 변화하는 RC ladder의 전압은 서로 상쇄될 수 있다. 따라서 ΔOCV 는 ΔV_t 와 ΔV_s 의 차이로 표현할 수 있으며 ΔV_s 는 R_s 를 이용해 식 (5)로 계산된다.

$$\begin{aligned} \Delta OCV &= \{V_t(k) - V_t(k-1)\} + \{V_s(k) - V_s(k-1)\} \\ &\quad + \{V_{ladder}(k) - V_{ladder}(k-1)\} \\ &\approx \Delta V_t + \Delta V_s \end{aligned} \quad (4)$$

$$\Delta V_s = R_s(k)I_t(k) - R_s(k-1)I_t(k-1) \quad (5)$$

2.3 정확도 검증을 위한 시뮬레이션

알고리즘의 검증을 위해 LiFePO₄ 배터리 (Top 전지, 27 Ah, 2.0~3.7 V)를 이용한 단전지 실험 결과를 기반으로 4가지 노화 상태를 의미하는 simulink 배터리 모델 (B1~B4)을 구성한다. 시뮬레이션은 UDDS 전류 프로파일을 통해 진행된다. 제안하는 알고리즘은 그림 4와 같이 R_s 를 실시간으로 추정하며 그를 통해 SOH_{power} 의 판단이 가능하다. 추정된 R_s 를 통해 보정된 DV 곡선은 단지 전압을 이용한 DV 곡선 대비 높은 정확도를 가지며 (그림 5) 이를 이용하여 SOH_{energy} 추정 정확도를 향상시킨다. 본 알고리즘은 표 1과 같이 0.74% 이내의 높은 정확도

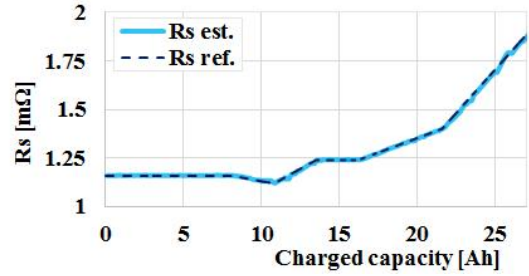


그림 4 제안한 알고리즘을 통한 R_s 추정 결과
Fig. 4. R_s estimation through the proposed algorithm.

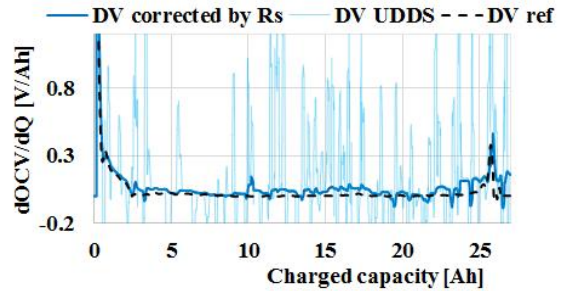


그림 5 R_s 를 이용한 DV 곡선의 보정 결과
Fig. 5. The correction of DV curve by R_s estimation.

표 1 제안하는 SOH 알고리즘의 추정 오차율
Table 1 The error rates of the proposed SOH algorithm

	B1	B2	B3	B4	오차율
SOH_{energy_ref}	100.00%	70.00%	55.00%	40.00%	0.51%
SOH_{energy_est}	100.19%	69.26%	54.82%	39.82%	
SOH_{power_ref}	100.00%	56.00%	28.00%	16.00%	0.74%
SOH_{power_est}	100.13%	56.27%	27.15%	16.30%	

를 가지며 전류 용량과 최대 출력 성능에 관한 배터리 성능 진단 요소를 종합적으로 제공한다.

3. 결론

본 논문은 노화에 따라 변화하는 배터리의 성능을 진단하기 위해 전류 용량과 최대 출력 성능 변화를 종합적으로 진단하는 SOH 추정 알고리즘을 제안한다. 제안하는 알고리즘은 배터리의 노화도를 0.74% 이내의 높은 정확도로 추정하며 배터리의 성능 진단에 필요한 정보를 종합적으로 제공할 수 있다.

이 논문은 2015년도 산업통상자원부의 재원으로 한국산업기술평가관리원의 지원을 받아 수행한 녹색산업선도형이차전지기술개발 사업(No.10053710)입니다.

참고 문헌

- [1] L. Wang, C. Pan, L. Liu, Y. Cheng and X. Zhao, "On board state of health estimation of LiFePO₄ battery pack through differential voltage analysis," *Applied Energy*, vol. 168, pp. 465-472, Apr. 2016.