실시간 SOH 추정을 위한 전압변동 곡선 추적 알고리즘

김동민, 이종국, 노태원, 이재형, 김소영, 이병국†
성균관대학교 전자전기공학부

Differential Voltage Curve Estimation Algorithm for online SOH Estimation

Dong Min Kim, So Young Kim, Jong Kuk Lee, Tae Won Noh, Jae Hyung Lee, Byoung Kuk Lee†
Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University

ABSTRACT

본 논문에서는 온라인 업데이트 상황에서의 배터리 용량 감소상태를 추정하기 위해 사용되는 전압변동곡선(Differential Voltage; DV)을 실시간으로 추정하는 알고리즘을 개발한다. 동적 전류 특성으로 인한 오차의 최소화를 위해 내부 임피던스 성분에 의한 전압 변동을 고려하는 방법론을 제안하며, 이는 필터링 기법을 통한 파라미터 추정 과정을 포함한다. 본 연구의 타당성은 단전지 전류 프로파일 실험 결과를 기반으로 시뮬레이션을 통하여 검증한다.

1. 서 론

최근 전기자동차와 ESS (Energy Storage System) 등의 구동을 위해 리튬이온배터리의 수요가 증가하면서 배터리 관리 시스템 (Battery Management System; BMS)의 역할이 주목받고 있다. 이에 배터리의 안정성을 보장하기 위해 배터리의 상태 지표를 실시간으로 모니터링하여 시스템을 제어할 필요가 있다. 특히 배터리의 노화도를 나타내는 SOH (State of Health)는 최대 출력 성능과 전류 용량에 밀접하게 관련되어 배터리의 교체시기를 판별함에 있어 매우 중요하게 사용된다.

그림 1의 DV (Differential Voltage) 곡선은 배터리의 노화 경향에 따라 변화를 나타내며 완전 충방전 방식을 통한 데이터 수집 과정 없이 노화 분석이 가능해 SOH 추정에 유용하다. 기존 DV 곡선 활용 SOH 추정 알고리즘은 온라인 상황에서 OCV (Open Circuit Voltage) 측정 시 발생하는 회로 내 전압강하로 인해 SOH 추정 정확도가 현저히 떨어진다. 이에 오차의 최소화를 위해 일정 저전류 프로파일을 인가한 상황에서만 검증이 이루어지고 있다. 즉, 제한된 측정 조건으로 인해서 온라인 상황에서는 적용이 불가능하기 때문에 실효성에 한계가 존재한다.

본 논문은 DV 곡선 활용 SOH 추정 알고리즘을 온라인 상태에서 적용 가능하도록 확장하는 방법을 제안한다. 배터리 모델의 임피던스 성분을 BPF (Band Pass Filter) 등의 신호처리 과정을 통해 실시간으로 추출한다. 추출 파라미터와 순시 측정 데이터로부터 OCV 변화량을 추정하며 이로부터 DV 곡선을 온라인 업데이트한다. 노화에 따른 DV 곡선의 극값 사이길이 변화를 분석하여 SOH를 추정한다. 연구의 타당성은 실제 디바이스 프로파일에 기반한 시뮬레이션을 통하여 검증한다.

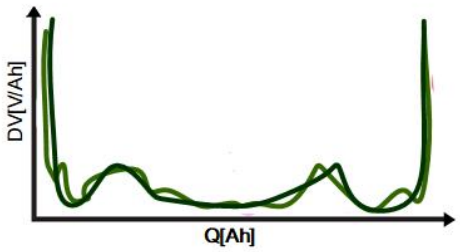

그림 1 다이나믹 전류 profile에 따른 DV 곡선
Fig. 1 DV curve from dynamic current profile

2. 본 론

2.1 등가회로 분석을 통한 DV곡선 분석

화학적 성질을 갖는 배터리의 분석을 용이하게 하기 위해 등가회로 모델로 나타낸다. 리튬이온배터리는 충방전 휴지 시 단자전압이 지수적인 증감 현상을 보이는데 이는 전기회로 상의 RC ladder 형태로 묘사가 가능하다. RC ladder의 수에 따라 정확도와 연산양이 가장 합리적인 수준에서 2차 RC ladder 모델을 채택하였다.

구성한 배터리 모델과 단자 전류 등의 측정 데이터를 바탕으로 각 저항에 인가되는 전압의 크기를 계산할 수 있다. 그림 2에서와 같이 순수한 OCV를 구하기 위해서는 단자전압으로부터 오차 성분인 전압 V_s, V_1, V_2을 계산하여 제거해야 한다. 계산한 전압과 단자 전압을 통해 OCV의 변화량을 구할 수 있으며 단자 전류의 적산을 통해 구한 전류 용량의 변화량과 함께 DV 곡선 추출에 사용한다.

$$DV = \frac{\Delta OCV}{\Delta Q} \tag{1}$$

$$\Delta OCV = \Delta V_t - \Delta V_s - \Delta V_1 - \Delta V_2 \tag{2}$$

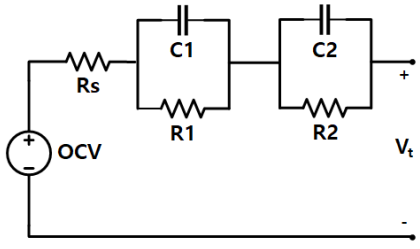

그림 2 2-nd RC ladder 배터리 등가 회로 모델
Fig. 2 2-nd RC ladder battery equivalent circuit model

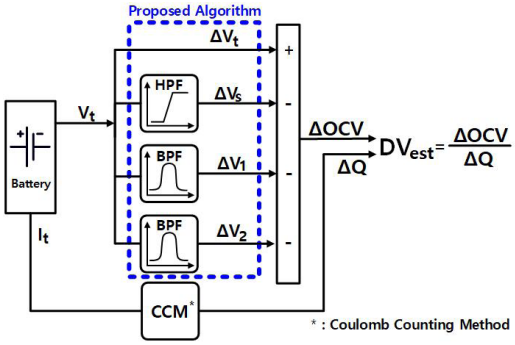

그림 3 제안하는 알고리즘의 블록 다이어그램
Fig. 3 Block diagram of proposed algorithm

2.2 주파수 분석을 통한 임피던스 전압 소거

배터리 모델의 내부 저항을 추출하여 임피던스 전압을 구할 수 있다. 이 과정은 총 세 단계에 걸쳐 진행한다.

R_s의 경우, 주파수와 저항의 크기가 무관하여 단자 전압과 전류의 급격한 변화를 묘사한다. 이에 HPF (High Pass Filter)를 통해 고주파 신호를 인가하였을 때의 단자 전압, 전류의 변화량을 측정하여 R_s를 추출하고 식(3)과 같이 ΔV_s를 소거한다.

$$\Delta V_s = V_{s,k} - V_{s,k-1} = R_{s,k} \cdot i_{s,k} - R_{s,k-1} \cdot i_{s,k-1} \quad (3)$$

$$R_s = \frac{(\Delta V_t)_{HPF}}{(\Delta i_t)_{HPF}} \quad (4)$$

RC ladder의 임피던스에서 저항성분은 식(5)와 식(6)에 의해 주파수, 저항, 커패시턴스에 반비례한다.

$$Z_{R_n C_n} = \frac{R}{1+\omega^2\tau_n^2} - \frac{j\omega R\tau_n}{1+\omega^2\tau_n^2} \quad (5)$$

$$\tau_n = R_n C_n \quad (6)$$

ΔV_1은 BPF (Band Pass Filter)를 통해 추출한다. 식(5)에 의해 동일한 주파수 범위 내에서 ladder별 저항성분의 변화량은 다르다. 이에 BPF를 통하여 R_2를 소거해주어 R_1을 추출한다. 여기에 순시적성분인 R_s를 차감해 준 후, 식(3)에 의해 ΔV_1을 추출해 소거할 수 있다.

ΔV_2의 경우 τ_2는 τ_1 대비 1000배 수준으로 단자 전압에 주는 영향이 현저히 작은 수준이다. 따라서 ΔV_2의 소거 과정을 생략하더라도 결과에 주는 영향이 미미하였다.

그림 4에서 단자전압을 통해 추출한 DV 곡선과 임피던스 전압을 소거하여 추출한 DV 곡선을 각각 비교하였다.

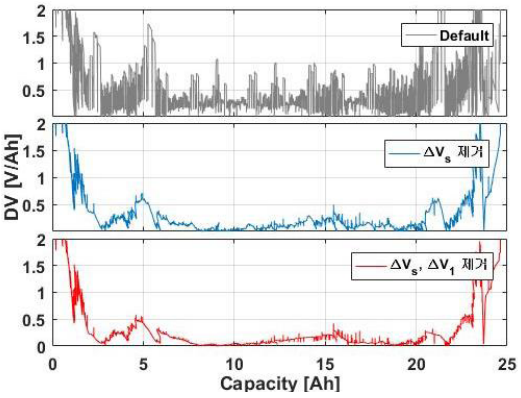

그림 4 임피던스 전압 성분을 제거해 보정한 DV 곡선
Fig. 4 DV curve corrected by removing impedance voltage

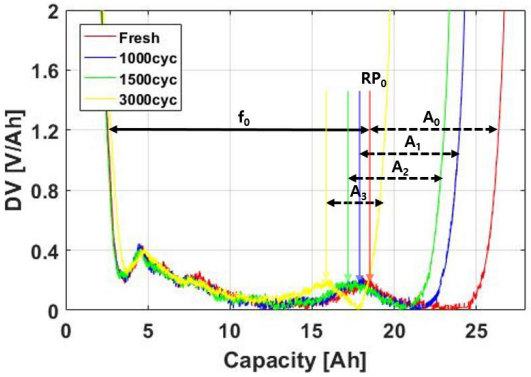

그림 5 제안 알고리즘을 적용한 노화 상태에 따른 DV 곡선
Fig. 5 DV curve according to the aging state using the proposed algorithm

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

Cycle 수	fresh	1000	1500	3000
SOH 기준값 [%]	100	68.84	56.89	10.81
SOH 추정값 [%]	100	68.40	58.53	12.99
오차 [%]	0	0.44	1.64	2.18

2.3 알고리즘 적용 시뮬레이션 결과 비교

알고리즘 검증을 위하여 4가지의 노화상태에 따른 LiFePO4 배터리 (PNE, 25Ah)를 이용하여 실험하였다. 시뮬레이션은 UDDS 전류 프로파일을 사용한다.

그림 5와 같이 추출한 DV 곡선에 SOH 추정 알고리즘을 적용해 SOH를 추정하였다 [1]. 기준값과의 비교를 위해 SOH 산출 방식에 EOL에서의 SOH를 0으로 하도록 변환하였다.

$$SOH_n = \frac{A_n + f_n - C_{EOL}}{C_{fresh} - C_{EOL}} \quad (6)$$

* C_{EOL}: 노화로 인한 배터리의 용량이 C_{fresh} 대비 70%로 감소한 용량

표 1은 제안하는 알고리즘의 SOH 추정 오차를 나타낸다. 오프라인 상태에서 총 용량을 측정하여 구한 SOH 기준값에 비해 평균 1.42% 정도의 오차로 높은 정확도를 가진다.

3. 결 론

본 논문은 배터리 등가모델 내의 임피던스 전압 성분으로 인한 오차를 제거하여 DV곡선을 추출하고 이를 활용하여 온라인 상태에서 적용 가능한 SOH추정 알고리즘을 제안하였다. 구현한 알고리즘은 기존 알고리즘 대비 평균 1.42%의 오차로 SOH를 추정하였다. 이를 통해 온라인 상황에서도 배터리의 노화에 따른 성능을 정확하게 판단할 수 있을 것으로 기대한다.

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

참 고 문 헌

[1] M. Berecibar, M. Garmendia et al, “State of health estimation algorithm of LiFePO4 battery packs based on differential voltage curves for battery management system application,” Energy, vol. 103, pp. 784 796, 2016.