

차량 SLI용 LFP 배터리의 SOF 추정 알고리즘

노태원, 김재구, 안정훈, 이병국[†]
 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

SOF Estimation Algorithm for LFP-Type SLI Battery of Vehicle

Tae-Won Noh, Jae-Gu Kim, Jung-Hoon Ahn, and Byoung Kuk Lee[†]
 Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University

ABSTRACT

본 논문은 차량 시동 시 발생하는 급격한 배터리 전압강하를 예측하여, SLI용 리튬이온 배터리의 시동가능 여부를 판단하는 SOF 추정 알고리즘을 제안한다. 제시하는 알고리즘은 전압강하를 묘사하는 배터리 등가 저항을 분석하고, 주파수 분석을 이용한 실시간 파라미터 추정을 통해 추정 정확도를 향상시킨다. 알고리즘 정확도는 MATLAB 시뮬레이션으로 검증한다.

1. 서론

차량 시동 시 큰 펄스형 방전 전류가 발생하면서, SLI (Starting-Lighting-Ignition) 배터리의 단자 전압이 급강하 하는 현상이 발생한다. 시동 시 전압강하로 인해 배터리 단자전압이 허용최저전압 이하로 떨어지는 경우 배터리 안전문제가 발생할 수 있기 때문에 차량 재시동이 불가능하다. 특히 ISG (Idle Stop-and-Go) 기능의 도입으로 시동이 잦아지면서 전압강하량을 정확히 예측할 필요성이 강조되고 있다. 따라서 시동 시점의 배터리 전압강하를 예측하여 시동가능성을 판단하는 SOF (State Of Function) 알고리즘이 필요하다.

일정 시간동안의 배터리 최대 출력을 예측하는 SOP (State Of Power) 추정 알고리즘의 경우 순간적으로 발생하는 시동 시점의 전압강하를 예측하기에 부적합하다. 또한 기존의 SOF 알고리즘은 SOC (State Of Charge)별 EIS (Electrochemical Impedance Spectroscopy) 분석 결과를 바탕으로 납산 배터리 등가 회로를 구성한 뒤 시동 시 전압 응답을 예측한다^[1]. 이 알고리즘은 시동 시 발생하는 전압강하와 무관한 주파수 대역까지 분석해야 한다는 단점을 가진다.

본 논문은 리튬이온 배터리의 시동 시 전압강하량 (ΔV_{drop})을 저항을 이용해 표현하고, 최저 허용 단자전압 (V_{limit})과 비교하여 시동가능여부를 예측하는 SOF 추정 알고리즘을 제안한다. 배터리 노화로 변화하는 파라미터를 반영하여 추정 정확도를 향상시키기 위해, ΔV_{drop} 에 영향을 주는 주파수 (ω_{crank})에서의 EIS 분석 결과를 통해 알고리즘을 보정한다.

2. 제안하는 SOF 추정 알고리즘

2.1 알고리즘 구성

2.1.1 시동 시점의 배터리 등가저항 계산

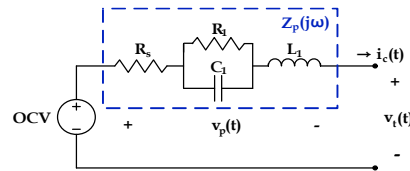


그림 1 배터리 등가 회로 모델
 Fig. 1. The equivalent circuit model of battery.

본 논문은 순간적인 전압변화를 분석하기 위해 인덕턴스 성분 (L_1)이 포함된 배터리 등가 회로 모델 (그림 1)을 선정하였다. 시동 전류 프로파일 (i_c)은 t_c 에서 최대 방전전류 (I_0)을 가지는 1차 함수로 근사하였으며, R_{crank} 는 t_c 에서 v_p 와 i_c 의 관계를 이용해 계산한다.

$$i_c(t) = \frac{I_0}{t_c} t \tag{1}$$

$$v_p(t) = \frac{I_0}{t_c} \times \left\{ L_1 + (R_s + R_1)t - C_1 R_1^2 \left(1 - e^{-\frac{t}{R_1 C_1}} \right) \right\} \tag{2}$$

$$R_{crank} = \frac{1}{t_c} \times \left\{ L_1 + (R_s + R_1)t_c - C_1 R_1^2 \left(1 - e^{-\frac{t_c}{R_1 C_1}} \right) \right\} \tag{3}$$

그림 2는 LFP 배터리의 SOC 별 파라미터와 R_{crank} 를 나타낸다. R_{crank} 는 SOC에 따라 변화하며, 배터리 노화에 따른 파라미터 변화의 영향을 받는다.

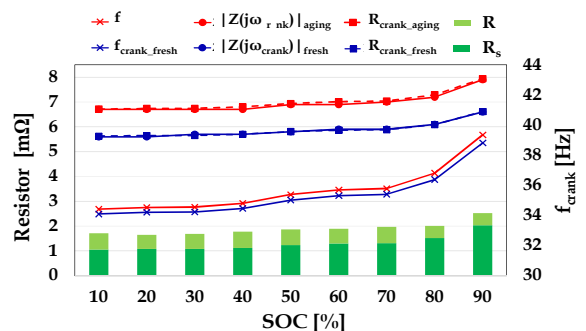


그림 2 LFP 배터리 파라미터와 R_{crank} 변화
 Fig. 2. The parameter of LFP battery and R_{crank} variation.

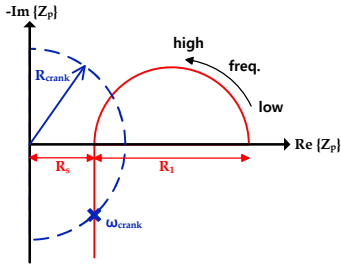


그림 3 LFP 배터리 임피던스 스펙트럼과 ω_{crank}
Fig. 3. Impedance spectrum of LFP battery and ω_{crank} .

2.1.2 ΔV_{drop} 계산 및 SOF 추정

식 (3)을 이용해 SOC에 따른 R_{crank} look-up-table을 구성한다. 이를 이용하면 I_{ω} 정보를 바탕으로 시동 순간의 배터리 단자전압을 계산하고 V_{limit} 와 비교하여 시동가능여부를 판단하는 SOF를 추정할 수 있다.

$$\Delta V_{drop} = R_{crank} \times i_c(t_c) = R_{crank} \times I_{\omega} \quad (4)$$

$$SOF = \begin{cases} 1, & v(t_0) - \Delta V_{drop} > V_{limit} \\ 0, & v(t_0) - \Delta V_{drop} \leq V_{limit} \end{cases} \quad (5)$$

2.2 EIS 분석을 이용한 알고리즘 보정

SOF 추정 시, 실시간으로 변화하는 배터리 파라미터를 반영하기 위해 EIS 분석을 기반으로 R_{crank} 를 업데이트 한다^[1]. 이때, 그림 3과 같이 $|Z_p(j\omega)|$ 가 R_{crank} 와 같은 크기를 가지도록 하는 ω_{crank} 를 계산함으로써 EIS 분석을 위한 주파수 범위를 간소화 할 수 있다.

$$|Z_p(j\omega_{crank})| \approx \left\{ (\omega_{crank} L_1)^2 + R_s^2 + 2 \frac{L_1}{C_1} \right\}^{\frac{1}{2}} = R_{crank} \quad (6)$$

$$(1 \gg \omega^2 R_1)$$

그림 2를 보면, 배터리 노화로 인해 내부 파라미터 값이 변화하여도 노화 이전의 ω_{crank} 를 이용해 추정된 임피던스 값이 R_{crank} 대비 큰 오차를 가지지 않는 것을 알 수 있다.

3.1 시뮬레이션 검증

SOC 50% (그림 2)에서 $L_1=25.8 \mu\text{H}$, $C_1=1.4 \text{ MF}$ 일 때 ΔV_{drop} 을 예측한다. 시동 전류 프로파일은 그림 5와 같으며^[2], 식 (3), (4)을 이용해 R_{crank} 와 ΔV_{drop} 을 추정할 수 있다. 알고리즘을 통해 계산된 ΔV_{drop} 은 시동 시 발생하는 전압강하량과 동일함을 확인할 수 있다.

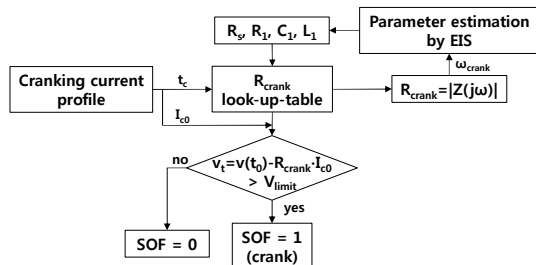


그림 4 SOF 추정 알고리즘 순서도
Fig. 4. Flow chart of SOF estimation algorithm.

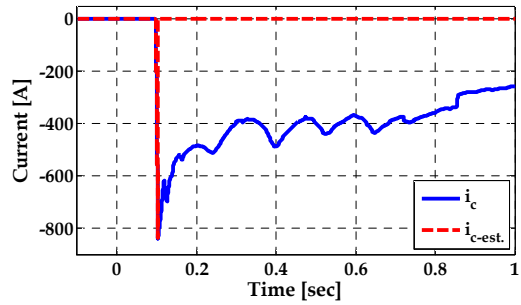


그림 5 시동 전류 프로파일 (i_c)
Fig. 5. Cranking Current Profile (i_c).

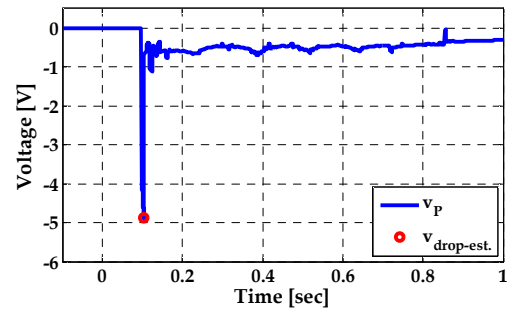


그림 6 시동으로 인한 배터리 임피던스 전압 (v_p) 응답
Fig. 6. Impedance voltage response (v_p) for cranking.

4. 결론

본 논문에서는 배터리 등가회로를 기반으로 ΔV_{drop} 을 모사하는 R_{crank} 를 정의하고 SOF를 판단하는 알고리즘을 제안하였다. 시간영역에서의 전류, 전압관계로 정의된 R_{crank} 는 ΔV_{drop} 를 예측하며 SOF를 추정한다. 배터리 노화로 변화하는 R_{crank} 는 EIS 분석을 이용한 실시간 파라미터 추정을 통해 업데이트된다. 이 때, R_{crank} 를 결정하는 주파수 ω_{crank} 를 계산하여 EIS 분석의 측정 및 연산 부담을 감소시킨다. 제시한 알고리즘의 ΔV_{drop} 추정 정확도를 MATLAB 시뮬레이션을 이용해 검증하였다.

이 논문은 2015년도 산업통상자원부의 재원으로 한국산업기술평가위원회의 지원을 받아 수행한 녹색산업선도형이차전지기술개발 사업(No.10053711)입니다.

참고 문헌

- [1] Blanke, Holger, et al. "Impedance measurements on lead-acid batteries for state-of-charge, state-of-health and cranking capability prognosis in electric and hybrid electric vehicles." *Journal of Power Sources*, vol. 144, no. 2, pp. 418-425, June. 2005.
- [2] Sabatier, Jocelyn, et al. "A fractional order model for lead-acid battery cranking estimation." *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, vol. 15, no. 5, pp. 1308-1317, May. 2010.