

듀얼 슬라이딩 모드 관측기를 사용한 하이브리드 자동차용 리튬 배터리의 수명 예측 기법

김 일송, 이 진국
충주대학교

The state-of-Health estimation technique using dual sliding mode observer for hybrid electric vehicle lithium battery

il-song Kim, Chin-Gook Lhee
Electrical Engineering, Chung-Ju National University

Abstract - 하이브리드 자동차용 리튬 배터리의 수명을 예측하기 위한 듀얼 슬라이딩 모드 관측기를 설계하는 방법에 대해서 논의한다. 단순화된 R-C 모델을 사용하여 리튬 배터리를 전기적으로 모델링하고, 듀얼 슬라이딩 모드 관측기를 설계하는 방법에 대해서 순차적으로 서술한다. 제안된 시스템의 구조는 단순하고 구현이 쉬운 장점이 있으며, 외란에 대해서 강인하다는 특징도 가지고 있다. Lyapunov 조건에 의한 관측기의 수렴성이 증명되고 시스템의 성능은 UDDS(Urban dynamometer driving schedule) 시험에 의해서 입증되었다. 제안된 시스템은 실제 주행 상황에서도 짧은 계산시간과 뛰어난 추적 성능을 보여주었다.

1. 서 론

환경친화적이고 높은 연비 때문에 하이브리드 자동차(Hybrid Electric Vehicle : HEV)는 새로운 운송수단으로서 각광을 받고 있다. HEV의 구성은 엔진과 전기 모터 그리고 충전 가능한 배터리로 이루어져 있다. 배터리는 모터에 전력을 공급하기 위해 방전되거나, 브레이크 시 회생되는 에너지로 충전되어진다. 충/방전을 계속하여 배터리를 사용하게 되면, 사용가능한 용량이 감소하고 내부 저항이 커져서 최대 출력도 줄어들게 된다. 따라서 배터리의 최적 사용을 위해서는 배터리의 상태를 추정하고 예측하는 것이 매우 중요하다. 본 연구에서는 배터리의 전기적인 모델링을 이용하여 배터리의 상태와 수명을 예측하는 방법에 대해서 논의한다. 배터리의 수명을 예측하기 위해서 비선형 제어이론인 슬라이딩 모드 관측기를 사용하였다. 빠른 응답 상태를 가진 내부 변수와 긴 응답 특성을 가지는 변수를 분리하여 이중 루프로 구성된 듀얼 슬라이딩 모드 관측기를 구성하여 원하는 특성을 얻어내도록 설계되었다. Lyapunov 방정식을 이용하여 관측기의 수렴성이 증명되었고 UDDS (Urban Dynamometer Driving Schedule) 시험을 통해서 제안된 시스템의 우수성이 입증되었다.

2. 배터리 모델링

배터리의 상태를 Simulation 하기 위해서는 배터리의 동적 모델링이 필요하게 된다. 이 모델은 배터리 충/방전 시험데이터로부터 구축되는데 개방전압 (Open circuit voltage : OCV) 측정에서부터 얻어지게 된다. OCV는 안정상태(rest state)시 배터리 내부 화학물질의 상태를 보여주는 가장 기초적인 데이터가 된다. 그림 1에 +55 °C 에서 -30 °C 의 온도변화에 대한 리튬 폴리머 전지(Li-PB)의 OCV 대비 SOC 값을 표시해 주고 있다. OCV와 SOC는 비선형적인 커브를 보여주고 있다. 따라서 비선형의 R-C(Resistor Capacitor) 모델을 사용하였는데 1) OCV 대비 SOC의 비선형성을 표현하기 위해 SOC Z의 함수로 이루어진 비선형 전압원 $V_{oc}(Z)$, 2) 분극현상(Polarization effect)을 표현하기 위한 분극 커패시턴스 C_p , 3) 충/방전 전류에 의한 확산(Diffusion) 현상을 나타내기 위한 확산저항 R_p , 5) 옴(Ohmic) 저항 R_t 와 단자 전압 V_t 로 표시된다. 그림 2 에 배터리의 회로 모델이 나타나 있다.

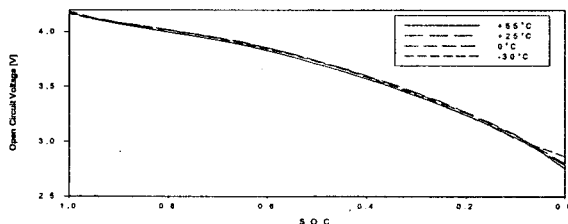


그림 1 리튬 전지의 온도 변화시 개방전압 대비 SOC 커브
Fig. 1 OCV versus SOC over temperature variation of lithium battery

배터리 단자 전압 방정식은

$$V_t = IR_t + V_p + V_{oc}(Z) \tag{1}$$

로 주어진다. SOC는 셀의 공칭용량(nominal capacity) 대비 잔존 용량으로 정의되며, 잔존 용량은 상온에서 C/30 비율로 셀에서 방전 가능한 Ah값이다. SOC의 수학적인 관계식은 아래와 같다.

$$Z(t) = Z(0) + \int_0^t \frac{I(\tau)}{C_n} d\tau \tag{2}$$

Z(t)는 SOC이고 C_n 은 셀의 공칭 용량이다.

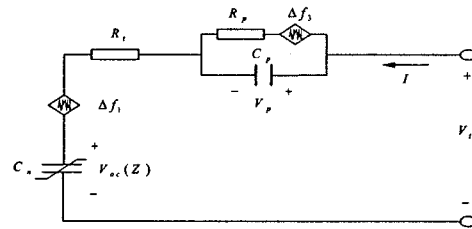


그림 2 리튬 전지 회로 모델링
Fig. 2 Lithium Battery dynamic model structure

SOC Z의 시간 미분에 대한 관계식은

$$\dot{Z} = \frac{I}{C_n} = \frac{1}{R_p C_n} (V_t - V_{oc}(Z) - V_p) = a_1 V_t - a_2 V_{oc}(Z) - a_2 V_p \tag{3}$$

분극 커패시턴스 V_p 에 대한 관계식은

$$\dot{V}_p = -\frac{1}{R_p C_p} V_p + \frac{I}{C_p} = -a_1 V_p + b_2 I \tag{4}$$

(1)에서 단자 전압에 대한 미분 방정식은

$$\begin{aligned} \dot{V}_t &= V_{oc}(\dot{Z}) + \dot{V}_p = \frac{1}{C_n} - \frac{1}{R_p C_p} (V_t - V_{oc}(Z) - IR_t) + \frac{I}{C_p} \\ &= -a_1 V_t + a_1 V_{oc}(Z) + b_1 I \end{aligned} \tag{5}$$

이 모델은 간략화된 모델이므로 실제 셀 데이터와 오차를 가지게 된다. 에러에 대한 $\Delta f_1, \Delta f_2, \Delta f_3$ 항을 모델링에 추가하면 최종 모델링 수식은

$$\begin{aligned} \dot{V}_t &= -a_1 V_t + a_1 V_{oc}(Z) + b_1 I + \Delta f_1 \\ \dot{Z} &= -a_2 V_{oc}(Z) - a_2 V_p + a_2 V_t + \Delta f_2 \\ \dot{V}_p &= -a_1 V_p + b_2 I + \Delta f_3 \end{aligned} \tag{6}$$

3. 듀얼 슬라이딩 모드 관측기 설계

듀얼 슬라이딩 모드 관측기 설계는 응답 특성이 빠른 SOC Z 에 대한 관측기 설계와 느린 특성을 가지는 용량 C_n 과 저항 R_t 관측기 설계로 나누어진다. 그림 3에 보이는 것처럼 내부 루프에 빠른 응답 특성의 SOC 추정기가 위치하고 외부 루프에 느린 응답특성을 가지는 C_n 과 R_t 추정기가 위치하게 된다.

SOC 추정을 위한 관측기 설계는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{V}}_t &= -a_{11} \hat{V}_t + a_{12} V_{oc}(\hat{Z}) + b_1 I + L_1 \text{sgn}(V_t - \hat{V}_t) \\ \dot{\hat{Z}} &= -a_2 V_{oc}(\hat{Z}) + a_2 \hat{V}_p + b_2 I + L_2 \text{sgn}(\{ \frac{L_1}{a_{12} k} \text{sgn}(e_r) \}_{eq}) \end{aligned}$$

$$\dot{\hat{V}}_p = a_3 V_{oc}(\hat{Z}) - a_3 \hat{V}_p + b_3 I + L_3 \operatorname{sgn}\left(\left[\frac{L_2}{a_2} \operatorname{sgn}\left\{\frac{L_1}{a_1 k} \operatorname{sgn}(e_y)\right\}\right]_{eq}\right) \quad (7)$$

수렴하기 위한 관측기 이득 범위는

$$\begin{aligned} L_1 &> |\Delta f_1| \\ L_2 &> |\Delta f_2| \\ L_3 &> |\Delta f_3| \end{aligned} \quad (8)$$

관측기 이득 L_1, L_2, L_3 의 크기는 크게 하면 할수록 수렴 가능성이 커지지만 채터링 현상이 더욱 커져서 안정성이 저하될 수 있기 때문에 어느 정도의 trade off는 필요하게 된다.

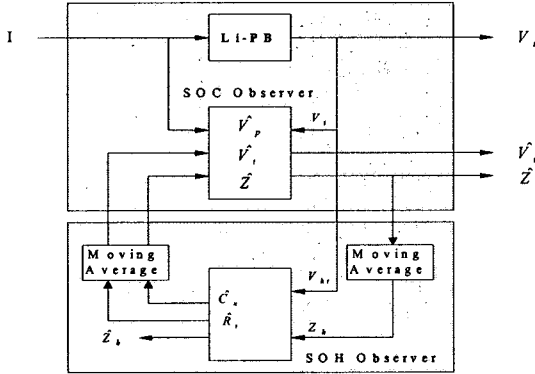


그림 3 SOC와 SOH 추정을 위한 듀얼 슬라이딩 관측기의 구조
Fig. 3 Dual sliding mode observer for SOC and SOH estimation

셀의 용량 C_n 을 추정하기 위해 용량이 다음과 같이 변한다고 하면

$$C_n(t) = C_{n0} - \alpha t \quad (9)$$

C_{n0} 는 초기 용량이고, α 는 용량 감퇴율이다. 미분을 취하면

$$\dot{C}_n = -\alpha + \Delta f_c \quad (10)$$

SOC Z 의 필터링 된 값을 Z_h 라 하면, 미분 값은

$$\dot{Z}_h = \frac{I}{C_n} + h_1 \operatorname{sgn}(Z_h - \hat{Z}_h) \quad (11)$$

오차 $e_{zh} = Z_h - \hat{Z}_h$, $e_c = C_n - \hat{C}_n$ 를 정의하면 다음과 같이 오차 방정식이 얻어진다.

$$\dot{e}_{zh} = I \cdot \left(\frac{1}{C_n} - \frac{1}{\hat{C}_n}\right) + \Delta f_z - h_1 \operatorname{sgn}(e_{zh}) \quad (12)$$

Lyapunov 함수를 $V_{zh} = \frac{1}{2} \cdot e_{zh}^2$ 로 정의하자. $h_1 > |\Delta f_z|$ 로 선정하면 \dot{e}_{zh} 와 e_{zh} 의 부호는 반대가 된다. 따라서 $\dot{V}_{zh} = e_{zh} \dot{e}_{zh} < 0$ 이 되어 \dot{e}_{zh}, e_{zh} 는 0이 되게 되어 주어진 관측기의 오차방정식은 0으로 수렴하게 된다. 등가제어 이론에 의하여

$$\left(\frac{1}{C_n} - \frac{1}{\hat{C}_n}\right) = \frac{h_1}{I} \operatorname{sgn}(e_{zh}) \quad (13)$$

(10), (11)을 (13)으로 정리하면

$$\operatorname{sgn}(C_n - \hat{C}_n) = -\operatorname{sgn}\left(\frac{1}{C_n} - \frac{1}{\hat{C}_n}\right) = \operatorname{sgn}\left\{-\frac{h_1}{I} \operatorname{sgn}(e_{zh})\right\}_{eq} \quad (14)$$

비슷한 방법으로 용량 C_n 에 대한 관측기 방정식은

$$\dot{\hat{C}}_n = -\alpha + h_2 \operatorname{sgn}(C_n - \hat{C}_n) \quad (15)$$

C_n 에 대한 오차방정식은

$$\dot{e}_c = \Delta f_c - h_2 \operatorname{sgn}(e_c) \quad (16)$$

$h_2 > |\Delta f_c|$ 로 선정하면, \dot{e}_c 와 e_c 의 부호는 반대가 되어 오차방정식은 0으로 수렴하게 된다. 용량에 대한 관측기 방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$\dot{\hat{Z}}_h = \frac{I}{C_n} + h_1 \operatorname{sgn}(e_{zh}) \quad (17)$$

$$\dot{\hat{C}}_n = -\alpha + h_2 \operatorname{sgn}\left\{-\frac{h_1}{I} \operatorname{sgn}(e_{zh})\right\}_{eq} \quad (18)$$

저항 R_t 예측도 비슷한 방법으로 설계할 수 있다.

$$\dot{R}_t = R_{t0} + \beta t \quad (19)$$

R_{t0} 는 초기 저항이고, β 는 저항 증가율이다.

용량 예측과 비슷한 방법으로, 관측기 방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$\dot{\hat{V}}_{ht} = -a_1 \hat{V}_{ht} + a_1 V_{oc}(Z_h) + \left(\frac{1}{C_n} + \hat{R}_t a_1 + b_2\right) I + h_3 \operatorname{sgn}(V_{ht} - \hat{V}_{ht}) \quad (20)$$

$$\dot{\hat{R}}_t = \beta + h_4 \operatorname{sgn}(R_t - \hat{R}_t) = \beta + h_4 \operatorname{sgn}(e_R) \quad (21)$$

그림 4와 5에 제안된 시스템을 사용한 UDSS 사이클로 시험한 결과를 보여주고 있다. 추정된 용량과 저항값의 궤적은 항상 채터링을 가지고 실제 값에 추종되고 있다. 채터링의 크기는 샘플링 시간에 의존한다.

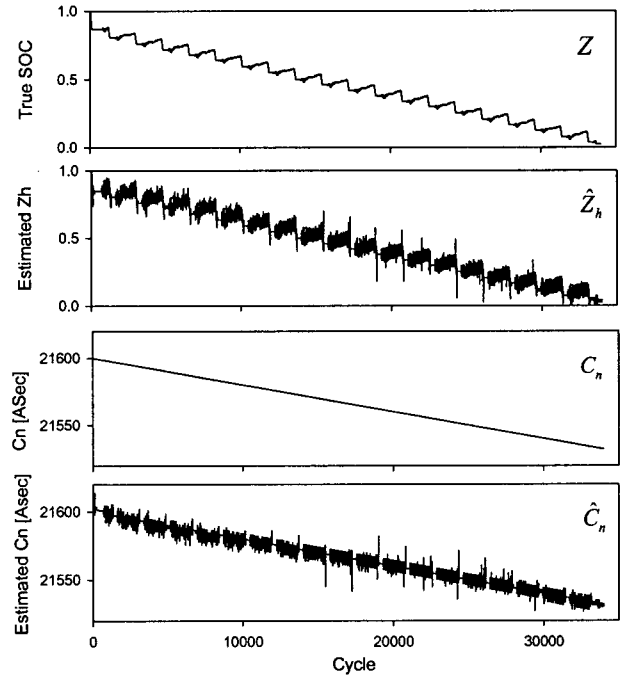


그림 4. 용량 C_n 추정에 대한 시험 결과
Fig. 4 Simulation result for capacity C_n estimation

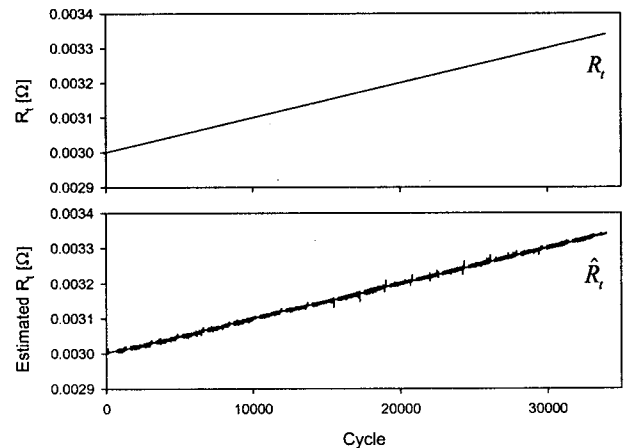


그림 5. 저항 R_t 추정에 대한 시험 결과
Fig. 5 Simulation result for resistance R_t estimation

4. 결론

리튬 폴리머 전지의 수명과 저항을 예측하기 위한 듀얼 슬라이딩 모드 관측기를 설계하는 방법이 소개되었다. 제안된 시스템의 성능은 UDSS 사이클 시험에 의해 입증되었다. 파라미터 오차는 대부분의 운행 조건에서 3% 이내로 제한되었으며, 이는 실제 주행에 적용할 수 있는 수준이다.