

배터리 등가회로모델의 실시간 모델링 방법 개선

김재구, 안정훈, 이병국[†]
 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

Online Modeling Method Enhancing for Battery Equivalent Circuit

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

ABSTRACT

본 논문은 리튬 이온 배터리의 실시간 등가회로 모델링의 정확도 개선을 위한 방법을 제안한다. 기존의 실시간 변수 추출 방법은 다수의 비선형 변수를 포함한 2차 RC ladder 모델을 기반의 변수 추출이 어렵다. 개선된 방법은 오프라인 변수 추출 결과를 기준값으로 저항성분을 실시간으로 추정하여 보정하는 방법을 사용한다. 각 실시간 모델링 방법별로 배터리 모델을 완성하고 단자 전압을 재현하여 정확도를 검증한다.

1. 서 론

정확한 BMS 구동을 위해 배터리의 정확한 상태측정은 필수적인 요소이며 이를 위해 정확한 배터리 모델의 완성이 중요시된다. 온도나 배터리 노화에 따라 초기 배터리에 대비해 변동되는 내부 변수값은 BMS의 정확도를 하락시키고, 이를 방지하기 위해 실시간으로 변수를 추출하는 배터리 모델링 방법이 활발히 연구되고 있다. 실시간 배터리 모델링에는 대표적으로 1차 RC ladder 모델을 기반으로 한 Recursive Least Square (RLS) Filter^[1]와 Extended Kalman Filter (EKF)^[2]가 사용된다. RLS 필터는 수렴속도가 빠르고 계산량이 적은 장점을 가지고, EKF는 칼만 필터에 자코비안 행렬을 사용하여 비선형 모델에 쉽게 적용시킬 수 있다. 하지만 두 가지 방식 모두 일반적으로 1차 RC Ladder 모델에 비해 정확도가 높은 2차 RC Ladder 모델로 발전시켜 적용할 경우 5개로 늘어난 모델 변수에 의해 추출에 어려움이 따른다.

본 논문에서는 EKF 알고리즘을 기반으로 2차 RC Ladder 모델로 실시간 변수 추출을 확장한 모델링 방법을 제안한다. 오프라인 실험을 통해 초기 배터리 변수의 기준값을 추출하고, 커패시턴스 성분은 기준값으로 고정한 뒤 저항성분만을 실시간으로 추출하여 모델을 보정한다. 제안하는 실시간 모델링 방법의 정확도는 시뮬레이션과 단전지 실험을 통해 검증한다.

2. 본 론

2.1 실시간 파라미터 추출법

기존의 1차 RC Ladder 모델을 기반으로 하는 RLS 필터와 EKF를 구현하여 시뮬레이션을 통해 가상의 1차 RC Ladder 모델의 변수를 재추정한다. 결과는 표 1과 같다.

표 1 기존 방법을 통한 가상 배터리 추정 결과

Table 1 Estimation of parameter reference by existing method

	R_s (0.05[Ω])	R_d (0.01[Ω])	C_d (50[F])
RLS 1차 RC ^[1]	0.05048[Ω]	0.009497[Ω]	46.53[F]
EKF 1차 RC ^[2]	0.04929[Ω]	0.009628[Ω]	53.69[F]

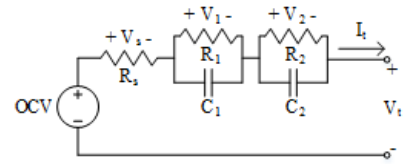


그림 1 2차 RC Ladder 모델
 Fig. 1 Secondary RC Ladder model

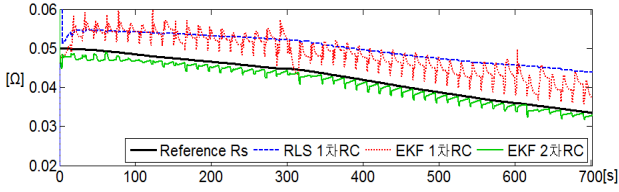
2.1.1 EKF 기반의 2차 RC Ladder 모델 변수 추출

2차 RC Ladder 모델은 그림 1과 같이 임피던스 네트워크가 다섯개의 변수로 표현된다. EKF를 사용하여 다섯 개의 변수를 직접적으로 추출할 경우 1차 RC Ladder에 비해 늘어난 변수의 개수에 의해 실시간 추출이 어려워진다. 기존의 연구에 따르면 커패시턴스의 값은 노화 조건에 따라 미비하게 변화한다.^[3] 이를 근거로 오프라인 실험을 통해 추출한 초기 배터리의 다섯개 변수값을 기준값으로 설정하고, 두 개의 C_1 , C_2 커패시턴스 기준값을 EKF 모델에 입력한 뒤 세 개의 R_s , R_1 , R_2 저항값을 실시간으로 추출하여 기준값에 대한 보정을 해준다. EKF에 2차 RC Ladder 모델을 사용하기 위한 수식 모델은 식(1) (5)와 같다. x 는 모델의 변수 행렬로써 1, 2차 RC 네트워크에 걸리는 각각의 전압과 시정수 및 직렬성분 저항이 포함된다. \hat{x} 는 입력값에 따른 변수의 추정값에 해당하고, z 는 EKF의 입력정보로써 OCV에 단자전압 V_t 를 빼준 임피던스 네트워크의 총 전압으로 구성된다.

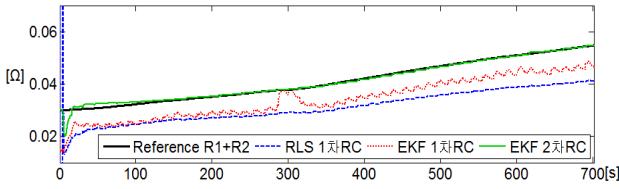
$$x = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5]^T = \left[V_1, \frac{1}{R_1 C_1}, V_2, \frac{1}{R_2 C_2}, R_s \right]^T \quad (1)$$

$$\dot{x} = [\dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{x}_3, \dot{x}_4, \dot{x}_5]^T = \left[-x_2 x_1 + \frac{I_t}{C_1}, 0, -x_4 x_3 + \frac{I_t}{C_2}, 0, 0 \right]^T \quad (2)$$

$$\hat{x} = x + dt \cdot \dot{x} \quad (3)$$



(a) Rs 지령값 추정 결과



(b) R1+R2 지령값 추정 결과

그림 2 모델링 방법별 실시간 추출 결과

Fig. 2 Real-time parameter extraction by modeling methods

$$z = h(x) = OCV - V_t = V_s + V_1 + V_2 \quad (4)$$

$$H = \left[\frac{\partial h}{\partial x_1}, \frac{\partial h}{\partial x_2}, \frac{\partial h}{\partial x_3}, \frac{\partial h}{\partial x_4}, \frac{\partial h}{\partial x_5} \right] = [1, 0, 1, 0, 0] \quad (5)$$

2.1.2 시뮬레이션 검증

가상의 2차 RC Ladder 모델 배터리를 설정하고 기존 방법과 제안하는 방법의 시뮬레이션 검증을 실시한다. 변수값이 배터리 SOC에 따라 변화하는 가상의 배터리를 모의하고 전류 프로파일을 인가하여 단자전압을 정보를 얻는다. 획득한 단자전압 정보에 10mV~10mV의 범위를 갖는 노이즈를 추가하고 1mV로 반올림하여 단전지 실험의 조건과 일치시킨다. 초기값을 실제값의 2배로 설정한 뒤 변수 추정을 시작하고, 그림 2는 변수 추정 결과로서 기존의 방법보다 제안하는 방법의 변수 추출 정확도가 더 높은 것을 확인할 수 있다.

2.2 단전지 실험 결과

단전지 평가에 대표적으로 쓰이는 Highway Fuel Economy Test (HWFET) 및 Urban Dynamometer Driving Schedule (UDDS) 프로파일을 단전지에 인가한 뒤 각 모델링 방법을 통해 실시간으로 배터리 모델을 완성한다. 완성된 모델에 다시 동일한 프로파일을 인가한 뒤 단전지 단자전압과 모델 단자전압을 비교하여 정확도를 비교 검증한다. 실험 결과는 그림 3, 4와 같으며 그림 5와 같이 기존의 방법보다 최대 오차율은 각각 57.7% 및 54.3% 감소하였고, 평균오차율은 각각 46.4% 및 47.6% 감소하였다.

3. 결론

본 논문에서는 2차 RC Ladder 모델을 기반으로 배터리의 실시간 모델링의 정확도를 높이는 방법을 제안하였다. 변수항이 다수 포함된 2차 RC Ladder 모델에 실시간 변수 추출법을 적용하기 위해 초기 배터리의 오프라인 실험 결과를 기준으로 커패시턴스값을 고정하여 추출할 변수를 저항성분 세 개로 축소한 뒤 EKF를 통해 저항값을 추출한다. 단전지 실험 결과 기존의 방법과 비교하여 최대 오차율과 평균 오차율이 절반으로 감소하였다. 이 연구를 통해 실시간으로 더 정확도 높은 배터리의 모델 완성 및 실시간 상태 추정을 기대할 수 있다.

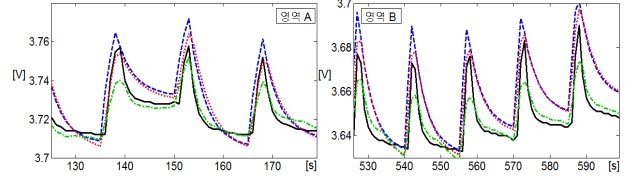
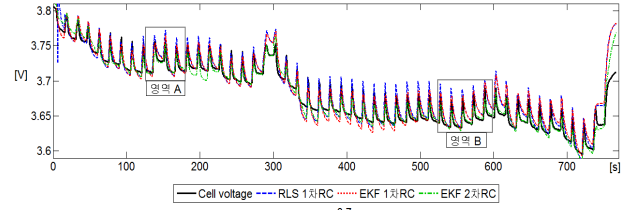


그림 3 HWFET 프로파일 전압 비교 및 구간 확대
Fig. 3 HWFET profile result of voltage comparison

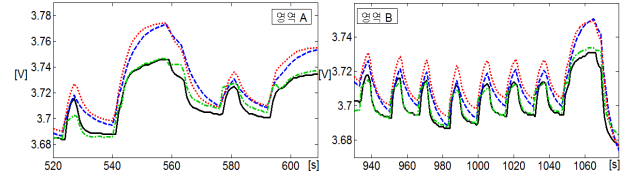
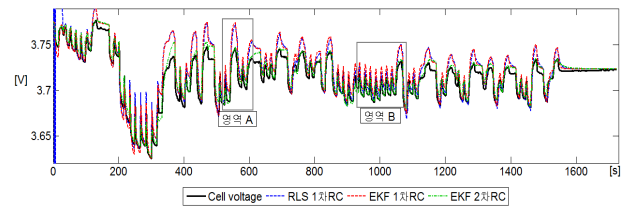


그림 4 UDDS 프로파일 전압 비교 및 구간 확대
Fig. 4 UDDS profile result of voltage comparison

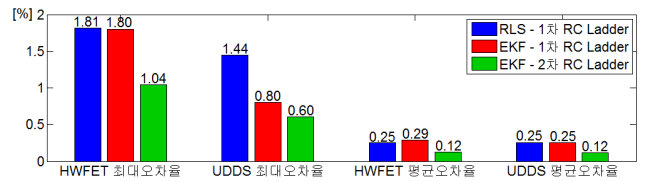


그림 5 단전지 실험 결과 최대 오차율 및 평균 오차율
Fig. 5 Result of cell voltage experiment

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

참고 문헌

- [1] R. Xiong, F. Sun, X. Gong, C. Gao, "A data driven based adaptive state of charge estimator of lithium ion polymer battery used in electric vehicles", Applied Energy, Vol. 113, No. 1, pp. 1421-1433, 2014.
- [2] R. D. Anderson, Y. Zhao, X. Wang, X. G. Yang, Y. Li, "Real Time Battery Power Capability Estimation", American Control Conference, June. 2012, pp. 592-597.
- [3] S. Sepasi, R. Ghorbani, B. Y. Liaw "SOC Estimation for Aged Lithium Ion Batteries Using Model Adaptive Extended Kalman Filter", Transportation Electrification Conference and Expo, June. 2013, pp. 1-6.