

# 등가회로 모델링 구성에 따른 확장칼만필터(EKF) 기반 SOC 추정 성능 비교분석

이현준<sup>1</sup>, 박종후<sup>1</sup>, 김종훈<sup>2</sup>  
 숭실대학교<sup>1</sup>, 조선대학교<sup>2</sup>

## Comparison of equivalent-circuit-model based SOC estimation using the EKF

Hyun jun Lee<sup>1</sup>, Jong hoo Park<sup>1</sup>, Jong hoon Kim<sup>2</sup>  
 Soongsil University<sup>1</sup>, Chosun University<sup>2</sup>

### ABSTRACT

본 논문에서는 LiCoO<sub>2</sub> 원통형(cylindrical)셀을 확장칼만필터(extended Kalman filter; EKF) 추정알고리즘에 적용 시 등가회로모델 차이에 따른 SOC(State of charge) 추정성능의 비교 분석을 진행하였다. 첫 번째, 등가회로 모델의 성능을 좌우하는 RC ladder의 개수에 따른 SOC 추정성능의 차이를 비교하였고, 두 번째, 모델 단순화에 따른 불가피한 모델의 에러를 줄이고자 사용되는 노이즈 모델(noise model) 및 데이터 리젝션(data rejection)의 유무에 따른 SOC 추정성능을 비교분석 하였다.

### 1. 서론

화석 에너지의 고갈 및 환경오염에 따른 문제점을 해결하기 위해 환경 친화적인 에너지원으로 사용되고 있는 배터리에 많은 관심이 집중되고 있다. 특히, 에너지밀도가 높고 고전압 어플리케이션 구축이 용이한 리튬이차전지에 대한 수요가 점차 증가하고 있다<sup>[1]</sup>.

리튬이차전지의 효율적 운용을 위해서는 배터리 관리시스템(battery management system; BMS) 구축이 필수적이다<sup>[1]</sup>. 특별히, 수시로 충전과 방전을 반복하는 전기자동차의 주행특성상 배터리 충전상태(SOC)의 정확한 모니터링이 요구된다. 이를 위해 전 세계적으로 진류적산법, heuristic 방법, adaptive 방법의 활발한 연구가 진행되고 있다.

본 논문에서는 LiCoO<sub>2</sub> 원통형(cylindrical)셀을 확장칼만필터(extended Kalman filter; EKF) 추정알고리즘에 적용 시 등가회로모델 차이에 따른 SOC 추정성능의 비교분석을 진행하였다. 첫 번째, 등가회로 모델의 성능을 좌우하는 RC ladder의 개수에 따른 SOC 추정성능의 차이를 비교하였고, 두 번째, 모델 단순화에 따른 불가피한 모델의 에러를 줄이고자 사용되는 노이즈 모델(noise model) 및 데이터 리젝션(data rejection)의 유무에 따른 SOC 추정성능을 비교분석 하였다.

### 2. 전기적 등가회로 모델링

그림 1은 RC ladder 개수에 따른 전기적 등가회로 모델을 나타낸다. 등가회로 모델 구성 시 배터리의 전하 전달 현상은 빠른 응답 속도를 가지고 있으므로 단순저항으로 표현할 수 있다. 확산(diffusion) 현상은 R과 C의 병렬연결인 RC ladder로 표현되며, RC ladder의 개수(n) 증가 시 n<sup>2</sup>에 반비례하는 방향으로 저항의 크기가 작아지며 이로 인해 RC ladder의 시정수 크기 및 커패시턴스의 영향이 줄어든다. 그러므로 RC ladder의

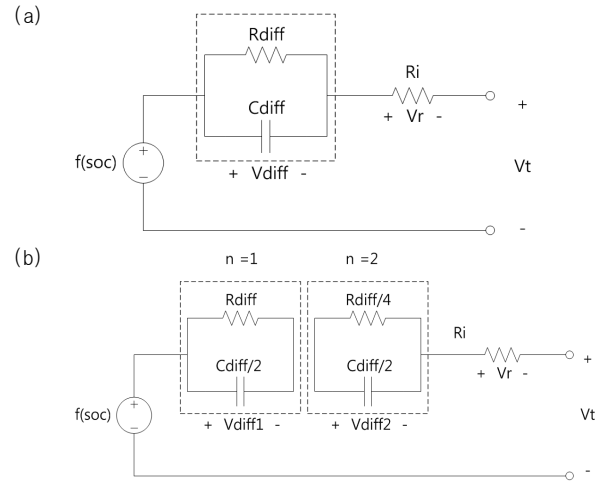


그림 1. 전기적 등가회로 모델; (a) RC-ladder 1개, (b) RC-ladder 2개

개수 증가에 따라 커패시턴스의 영향이 점차 줄어들어 저항의 단순화가 가능하다<sup>[2]</sup>. 본 논문의 최종 목적을 위해 RC ladder의 개수를 1개 및 2개로 선택하여 전기적 등가회로 모델링을 표현하였고(그림1) 이를 바탕으로 등가회로모델 기반 확장칼만필터(EKF)의 state equation 및 measurement equation을 구현하였다.

### 3. 확장칼만필터(EKF) 방정식

$$\begin{bmatrix} SOC_k \\ V_{diff,k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 - \frac{\Delta t}{C_{diff} \cdot R_{diff}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} SOC_{k-1} \\ V_{diff,k-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\Delta t}{C_n} \\ \frac{\Delta t}{C_{diff}} \end{bmatrix} i_{k-1} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} SOC_k \\ V_{diff,k1} \\ V_{diff,k2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 - \frac{\Delta t}{C_{diff} R_{diff}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 - \frac{4 \Delta t}{C_{diff} R_{diff}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} SOC_{k-1} \\ V_{diff,k1-1} \\ V_{diff,k2-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\Delta t}{C_n} \\ \frac{2 \Delta t}{C_{diff}} \\ \frac{2 \Delta t}{C_{diff}} \end{bmatrix} i_{k-1} \quad (2)$$

식 (1), (2)는 RC ladder의 개수가 1개 및 2개일 경우 확장칼만필터의 state equation을 나타낸다.

$$V_k = h_k(OCV, V_{diff}) - R_k i_k = OCV - V_{diff} - R_k i_k \quad (3)$$

$$V_k = h_k(OCV, V_{diff1}, V_{diff2}) - R_k i_k = OCV - V_{diff1} - V_{diff2} - R_k i_k \quad (4)$$

식 (3), (4)는 RC ladder의 개수가 1개 및 2개일 경우 확장 칼만필터의 measurement equation을 나타낸다.

#### 4. 노이즈 모델(Noise model)

배터리의 전기화학적 특성을 구현하기 위해 단순화된 전기적 등가회로 모델 사용 시 불가피한 모델의 추정에러가 발생한다. 확장칼만필터의 SOC 추정성능은 칼만게인( $K_k$ )으로 결정되며,  $K_k$ 는 측정오차 분산(measurement error covariance;  $R_k$ )의 함수이다. 즉, 측정오차 분산의 값에 따라 칼만게인의 값이 결정된다. 이를 착안해, 모델 단순화에 따른 오차를 줄이기 위해 2개의 조건에서 노이즈 모델(noise model)을 사용하는데 이는 위에서 언급한 측정오차 분산의 값을 임의로 조정하여 궁극적인 SOC 추정성능을 높이는데 그 목적이 있다. 배터리 C rate 대비 고전류 유입 시 모델오차가 있으므로 전류 크기별 측정 노이즈 모델을 적용한다(식 (5) (6)). 식(7)은 배터리의 다이내믹 특성을 고려한 다이내믹에 의한 측정 노이즈 모델을 나타낸다. 마지막으로 식 (8)은 데이터 리젝션 기술을 나타내며, 모델에러가 증가하는 영역의 실험데이터를 추정알고리즘에 적용하지 않는 개념이다. 즉, 측정오차 분산의 무한대 값을 곧 칼만게인의 값이 0임을 의미한다.<sup>[3]</sup>

$$R_{k+1} = R_k \text{ reliable current } (|i| < 5A) \quad (5)$$

$$R_{k+1} = R_k [1 + G_i (|i| - 5A)] \text{ unreliable current } (|i| < 5A)$$

$$G_i = 2A^{-1} \quad (6)$$

$$R_{k+1} = R_k [1 + G_{step} \cdot (step\_time)]$$

$$G_{step} = 0.1sec^{-1}$$

(7)

$$R_k = \infty \text{ for reject time } (\Delta I > 5A) \quad (8)$$

$$reject\ time = 10ms$$

#### 5. 실험결과

본 논문에서는 RC ladder의 개수 및 노이즈모델과 데이터 리젝션의 사용유무에 따른 SOC 추정성능을 비교분석 하였다. 그러므로 4개의 조건으로 실험을 진행하였다. 실험을 위해 1.3Ah 원통형 리튬이차전지를 사용하였고 이를 축소된 하이브리드 자동차용 전류프로파일에 적용하여 충방전 전압데이터를 확보하였다.

그림 2는 실제 측정된 배터리의 단자전압과 확장칼만필터 기반 SOC 추정알고리즘을 적용한 모델단자전압의 차이를 나타낸다. 그림 2의 실험결과를 구체적으로 확인하기 위하여 모델에러의 오차평균을 계산하였고 이를 표 1에 나타내었다. (a) (c) 및 (b) (d)의 비교분석을 토대로, RC ladder의 개수가 1개인 경우보다 2개일 경우 SOC 추정성능이 향상됨을 확인할 수 있다. 더불어 (a) (b) 및 (c) (d)의 비교분석을 토대로 노이즈 모델과 데이터 리젝션 사용 시 SOC 추정성능이 향상되었다. 이를 통해 RC ladder의 개수가 증가할수록, 노이즈 모델/데이터 리젝션(N/D)을 사용할수록 SOC 추정성능이 향상됨을 결론지을 수 있다. 그렇지만, RC ladder의 개수가 증가할수록

추정알고리즘의 복잡성이 더해지므로, RC ladder의 개수를

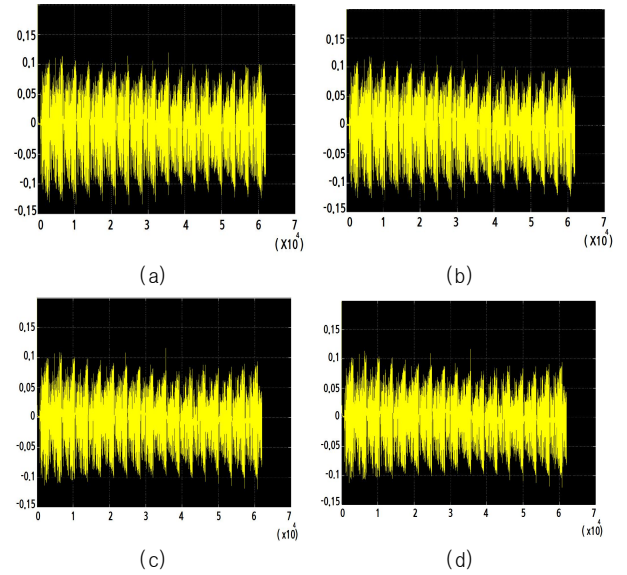


그림 2 배터리 단자전압 추정오차(실제데이터-모델추정전압) 결과; (a) RC-ladder 1개, N/D 사용, (b) RC-ladder 1개, N/D 미사용, (c) RC-ladder 2개, N/D 사용, (d) RC-ladder 2개, N/D 미사용

표 1 배터리 단자전압 추정의 오차평균

(a)	0.02248V	(b)	0.02266V
(c)	0.01783V	(d)	0.01789

최대한 줄이되 불가피하게 발생하는 모델에러를 노이즈 모델과 데이터 리젝션을 사용하여 제거하는 것이 최상의 방법이다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 확장칼만필터 기반 SOC 추정알고리즘 적용 시 사용되는 전기적 등가회로 모델의 구성(RC ladder 개수) 및 모델 단순화에 따른 모델에러의 제거능력(노이즈 모델 및 데이터 리젝션)등 다양한 SOC 추정성능을 비교분석 하였다. RC ladder의 개수가 증가할수록, 노이즈 모델 및 데이터 리젝션을 사용할수록 추정성능이 향상됨을 확인하였다. 하지만, 추정알고리즘은 모델 단순화에 따른 알고리즘의 간결화가 반드시 요구되며, 이에 발생하는 모델에러를 노이즈 모델 및 데이터 리젝션을 사용하여 제거하는 상호보완의 연구가 필요하다.

본 연구는 2014년도 산업통상부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제(No.20144030200600)입니다.

#### 참고 문헌

- [1] 장기욱, 김혁진, 정교범, “배터리 모델링 및 SOC 추정기법 비교 연구”, 전력전자학회, 전력전자학술대회논문집, 2010. 07, 87-88
- [2] 남완용 “축소차원 칼만 필터링을 이용한 리튬이온 배터리 SOC 추정 방법”, 서울대학교 대학원 석사학위논문, 전기·컴퓨터 공학부, 2006
- [3] 김종훈, 전창운, 허인녕, 조보형, 김병재, “OCV 히스테리시스 특성을 이용한 확장 칼만 필터 기반 리튬 폴리머 배터리 SOC 추정”, 전력전자학회, 전력전자학술대회논문집,