

# 확장칼만필터 기반 주파수 조정용 ESS의 SOC 추정 연구

권순중\*, 최진혁\*\*, 임지훈\*\*, 이성은\*\*, 김종훈\*  
 충남대학교\*, 한전 전력연구원\*\*

## SOC estimation of ESS for frequency regulation based on extended kalman filter

Soon-Jong Kwon, Jin Hyeok Choi, Ji-Hun Lim, Sung-Eun Lee, Jonghoon Kim  
 Chungnam National University, Korea Electric Power Corporation Research Institute

### ABSTRACT

ESS의 데이터에 노이즈가 발생하였을 때 배터리의 상태를 정확하게 추정하는 것은 어려운 부분이며, 부정확한 배터리 상태 추정은 시스템의 안전성 및 신뢰성을 하락시킬 수 있다. 실제 사용되는 시스템의 대부분의 데이터에는 노이즈가 발생하며, 이러한 노이즈를 고려하여 배터리의 상태를 정확하게 파악하는 연구는 매우 중요하다. 본 논문에서는 주파수 조정 용도로 ESS가 사용되었을 때 배터리의 운전 패턴을 생성하고, 입력 데이터에 심각한 노이즈가 발생하였을 때 EKF 알고리즘을 사용하여 배터리의 상태를 정확하게 추정하는 것을 보여준다.

### 1. 서 론

충전 상태(State of Charge, SOC)는 배터리의 수명에 큰 영향을 미치는 요소이다. 리튬이온전지(Lithium Ion Battery, LIB)에서 충전을 한다는 것은 양극에서 산화반응이 일어나 리튬이온이 전해질을 통해 음극으로 이동해 흑연(Graphite)과 환원반응을 하는 것이다. 반대로 방전은 음극에서 산화반응이 일어나고 리튬이온이 양극으로 이동하여 환원반응을 하는 것이다. 과충전/과방전은 리튬이온이 한 쪽의 전극에서 과하게 반응되어 있는 상태이고, 배터리의 수명에 좋지 않은 결과를 초래한다. 따라서 배터리를 적정한 SOC 범위 내에서 사용하는 것은 배터리 수명 유지에 매우 중요하며, SOC를 정확하게 추정하는 것은 시스템의 안전성 및 신뢰성을 향상시킬 수 있다.

현재 배터리의 SOC를 추정하기 위하여 많이 사용되고 있는 방식은 전류적산법이다. 측정되는 전류를 시간에 따라 적산하여 SOC를 계산하는 방식이며, 구현이 간단하지만 개루프 방식으로 연산하기 때문에 오차에 대해서는 보정할 수 없다는 한계점이 있다. 반면 배터리 상태 추정 알고리즘인 확장 칼만 필터(Extended Kalman Filter, EKF)는 폐루프 방식으로 구성되어 발생하는 오차를 실시간으로 보정할 수 있으며, 노이즈가 있는 데이터에서도 정확한 SOC를 추정할 수 있는 기법이다.<sup>[1]</sup>

주파수 조정용 에너지저장장치(Energy Storage System, ESS)는 계통의 주파수를 60Hz로 유지하기 위하여 ESS를 사용하는 것이며, 실제 발전기의 주파수 조정 역할을 일부 대체하여 많은 비용을 절감할 수 있는 운전 시나리오이다. 본 논문에서는 ESS가 주파수 조정 용도로 사용될 때의 운전 패턴을 생성하고, 센서 데이터에 심각한 노이즈가 발생하였을 때 EKF 알고리즘을 사용하여 정확한 SOC를 추정하는 것을 보여준다.

### 2. EKF 알고리즘 기반 FR용 ESS의 SOC 추정

#### 2.1 배터리 SOC 추정을 위한 확장칼만필터

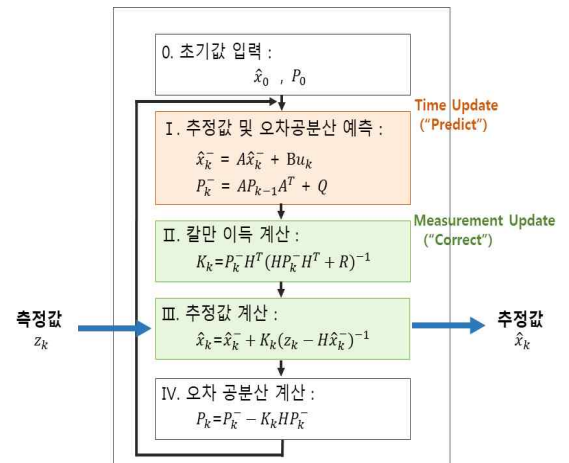


그림 1 칼만필터 알고리즘의 동작 흐름도  
 Fig. 1 Operation flow of Kalman Filter Algorithm

칼만 필터는 선형적 움직임을 가지는 대상을 재귀적 기법으로 추정하는 확률 이론에 기반한 예측시스템으로, 노이즈를 포함한 데이터가 입력되었을 때 노이즈를 고려하여 정확한 추정이 가능한 알고리즘이며 그림 1과 같은 흐름으로 동작한다. 하지만 칼만필터는 선형시스템을 대상으로 설계한 알고리즘이기 때문에 비선형시스템에는 적용하기 어렵다는 한계점을 지니고 있다. 대부분의 시스템은 비선형 특성을 보이기 때문에, 이를 해결하기 위하여 개발된 알고리즘이 확장 칼만 필터이다.<sup>[2]</sup>

배터리 SOC 추정을 위한 EKF 알고리즘에서 상태 방정식은 식 (1),(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$x_{k+1} = f(x_k, u_k) + v_k \tag{1}$$

$$y_k = g(x_k, u_k) + w_k \tag{2}$$

$$f(x_k, u_k) = \begin{pmatrix} SOC + \frac{dt}{C_p} i_k \\ V_{diff} e^{-\frac{dt}{R_1 C_1}} + (1 - e^{-\frac{dt}{R_1 C_1}}) R_1 i_k \end{pmatrix} \tag{3}$$

$$g(x_k, u_k) = V_k = V_{OCV}(SOC) + V_{diff} + R_0 i_k \tag{4}$$

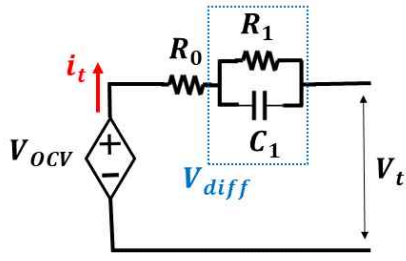


그림 2 배터리 등가회로 모델  
Fig. 2 Equivalent circuit model of battery

여기에서 백색 가우스 잡음을 의미하는  $v_k$ 와  $w_k$ 는 노이즈 공분산 행렬  $Q$ 와  $R$ 로 표현할 수 있으며, 상태전이 행렬  $f(x_k, u_k)$ 와  $g(x_k, u_k)$ 는 식 (3),(4)와 같이 나타낼 수 있다. 본 논문의 알고리즘에서 사용되는 배터리 등가회로 모델은 그림 2와 같이 직렬저항  $R_0$ 에 1개의  $R-C$  병렬회로가 직렬로 연결된 형태를 사용하였다. 이때 알고리즘을 비선형시스템으로 표현하기 위하여 상태방정식을 편미분하게 되고, 식 (5),(6)과 같은 자코비안 행렬로 표현할 수 있다.<sup>[1]</sup>

$$A = \frac{\partial f}{\partial \hat{x}_k^+} = \begin{bmatrix} 1 \\ -\frac{dt}{R_1 C_1} \end{bmatrix} \quad (5)$$

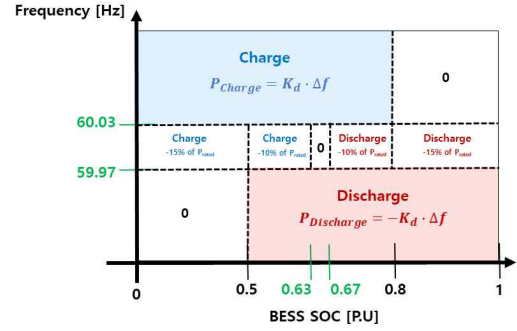
$$H = \frac{\partial f}{\partial \hat{x}_{k+1}^-} = \begin{bmatrix} \frac{\partial V_{OCV}}{\partial SOC} |_{\hat{x}_{k+1}^-} & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\hat{x}_0 = \begin{bmatrix} SOC \\ V_{diff} \end{bmatrix}, \quad u_k = i_k, \quad z_k = V_k \quad (7)$$

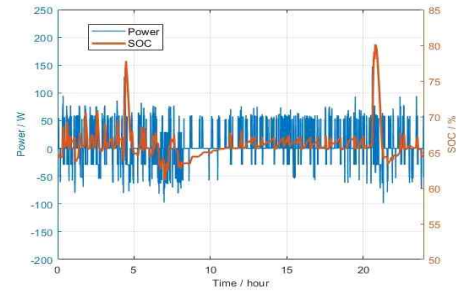
이렇게 구성된 알고리즘에 입력으로 식 (7)과 같은  $\hat{x}_0, u_t, z_k$ 가 주어졌을 때, EKF 알고리즘의 SOC 추정이 진행된다. 이때  $u_k$ 는 시험 전류를 뜻하며,  $z_k$ 는 센서를 통해 측정되는 배터리의 전압이다. 알고리즘은 현재 시간에서 예측값  $\hat{x}_k^-$ 을 계산하고 이때의 오차공분산  $P_k^-$ 는 노이즈 공분산 행렬  $Q$ 를 고려하여 계산된다.  $P_k^-$ 는 칼만게인  $K_k$ 를 계산하기 위해 사용되는데 이때  $K_k$ 는 추정값  $\hat{x}_k$  계산에 중요한 역할을 한다.  $K_k$ 는 알고리즘이 동작함에 따라 계속 변화하게 되는데,  $K_k$ 가 클수록  $\hat{x}_k$ 는 측정값  $z_k$ 에 의존하여 계산되어지고,  $K_k$ 가 작아질수록  $\hat{x}_k$ 는 예측값  $\hat{x}_k^-$ 에 비중을 두고 계산되어진다.<sup>[2]</sup> 알고리즘에서 예측한 값이 실제 측정된 값과 차이를 크게 보일 경우 알고리즘은 다음 시간의 오차공분산  $P_k$ 에 이를 반영하여 오차를 보정한다. 측정값에 노이즈가 심하여 신뢰할 수 없다고 판단될 경우  $K_k$ 는 0에 가까운 값으로 수렴하여 측정값의 영향을 크게 줄이고, 예측값의 비중을 키워 노이즈를 고려한 추정을 진행한다. 이렇게 칼만게인이 조정되며, 오차 및 노이즈를 고려한 배터리 상태 추정을 하기 때문에 EKF 알고리즘은 높은 정확도를 가지게 되며, 매 시간에 따라 알고리즘 내부 상태 변수가 연산되기 때문에 실시간 추정이 가능하게 된다.

이번 논문에서는 실제 운전 패턴에서 EKF 알고리즘이 어느 정도의 SOC 추정 성능을 보이는지 분석하기 위하여 주파수 조정용 ESS의 운전패턴에 적용하여 배터리의 SOC를 추정한다. 또한 운전 패턴에 심각한 노이즈가 발생하였을 때 EKF가 제대로 배터리의 상태를 추정할 수 있는지 보여준다.

## 2.2 주파수조정용 ESS의 운전패턴 생성



(a) FR ESS의 운전 알고리즘



(b) 계통 주파수가 입력되었을 때 FR 운전 결과

그림 3 주파수 조정 ESS의 운전패턴

Fig. 3 Operation pattern of ESS for frequency regulation

주파수 조정(Frequency Regulation)을 위한 ESS는 국내에서 사용하는 기준 주파수인 60Hz( $f_{ref}$ )를 유지하기 위해서 ESS를 사용하는 것을 말하며, 그림 3-(a)와 같은 알고리즘으로 동작하게 된다. 계통의 부하에 따라 계통의 주파수  $f$ 는 변화하게 되고, 부하의 증가로 계통 주파수가 59.97Hz이하로 낮아지게 될 때에는 ESS를 방전하여 계통에 전력을 공급하고, 부하의 감소로 주파수가 60.03Hz이상으로 상승할 때에는 ESS에 전력을 충전하여 주파수를 유지하는 운전을 한다. 주파수가 운영범위인  $\pm 0.03$ Hz이내일 때에 ESS의 SOC가  $\pm 2\%$ 를 벗어나 있을 경우 SOC를 운영 범위 내로 유지하는 운전을 한다. SOC 회복 운전을 위한 ESS의 출력은 SOC 상태에 따라 정격 출력의 10%또는 15%를 방전한다. 주파수 변화량에 대해 ESS의 출력을 결정하는 Droop계수는 식 (8)로 나타낼 수 있고, 이때 비례계수  $K_d$ 는 식 (9)로 표현할 수 있다. 주파수 조정을 위해 ESS가 나타내는 최종 출력은 주파수의 차이에 비례계수  $K_d$ 를 곱하여 계산할 수 있고, 식 (10)과 같이 나타내어진다.<sup>[3]</sup>

$$Droop = \frac{\Delta f / f_{ref}}{\Delta P / P_{rated}} \quad (8)$$

$$K_d = \frac{\Delta P}{\Delta f} \quad [W / Hz] \quad (9)$$

$$P_{ESS} = K_d \cdot \Delta f [W] \quad (10)$$

이러한 알고리즘에 계통의 주파수가 입력이 되었을 때에 ESS의 배터리가 나타내는 출력과 SOC는 그림 3-(b)에서 확인할 수 있으며, 이 운전 패턴을 사용하여 EKF의 SOC 추정성능을 검증하였다.

### 2.3 노이즈가 있는 FR ESS 운전패턴의 SOC 추정

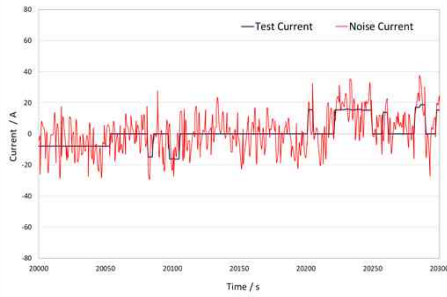
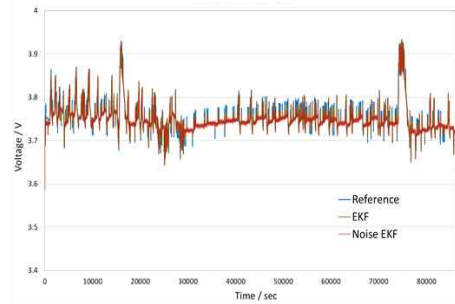


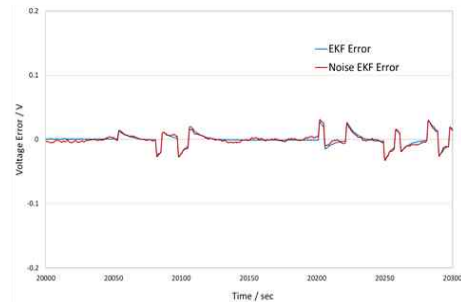
그림 4 FR ESS의 운전패턴에 발생한 노이즈  
Fig. 4 Noise generated in the pattern of FR ESS

그림 4는 FR ESS에서 사용되는 전류 센서에 심각한 노이즈가 발생하였을 때의 결과를 보여주고 있다. 이러한 노이즈 전류를 그대로 사용하여 전류적산법으로 SOC를 계산하였을 때에는 실제 SOC와 비교하였을 때 큰 오차를 보이게 된다. 운용되는 SOC 영역은 배터리의 수명에 큰 영향을 미치므로 부정확한 SOC 계산을 통해 적절하지 않은 SOC영역에서 ESS를 사용할 경우 시스템의 수명에 좋지 않은 영향을 미칠 수 있다.

노이즈 전류를 EKF 알고리즘에 사용했을 때 EKF의 SOC 추정결과는 그림 5-(a)에서 보여주고 있다. 배터리의 실제 SOC는 입력전류에 노이즈가 없을 때 전류적산법을 이용해 계산한 SOC이며, 노이즈 전류가 입력되어도 EKF가 실제 SOC를 정확히 추정하는 것을 확인할 수 있다. 반면 노이즈 전류가 입력되었을 때 전류적산법으로 계산한 SOC는 큰 오차를 보이고 있다. 이러한 오차는 그림 5-(b)에서 확인할 수 있으며, EKF의 SOC 추정 오차는 3% 이내인 반면, 전류적산법으로 계산한 SOC는 부정확한 결과를 보이고 있다. 그림 15-(c)는 EKF를 이용한 전압 추정결과를 보여주며, 그림 15-(d)는 입력 전류에 노이즈가 있을 때와 없을 때의 전압 추정 결과를 보여준다.



(c) FR ESS의 운전 알고리즘



(d) FR ESS의 운전 알고리즘

그림 5 EKF기반 배터리 상태추정 결과  
Fig. 5 EKF based state estimation results of battery

전압 추정 결과를 보았을 때 전체적으로 실제 전압을 EKF 알고리즘이 잘 추정해 가는 것을 확인할 수 있으며, 입력 전류에 노이즈가 있을 때 전압 추정의 오차는 약간의 불안정한 형태를 보이지만, 노이즈가 없을 때의 추정결과와 큰 차이를 보이지는 않는 것을 알 수 있다. 전압 추정은 SOC 추정에 큰 영향을 미치지 않기 때문에 정확한 전압 추정은 알고리즘의 성능에 중요한 부분이다.

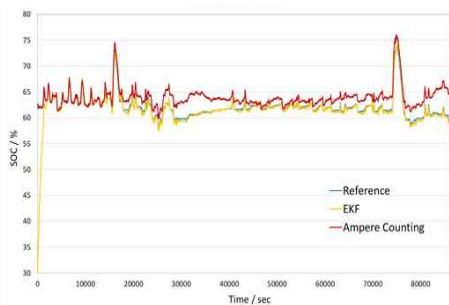
### 3. 결론

이번 논문에서는 주파수 조정용 ESS의 운전 패턴에 심각한 노이즈가 발생하였을 때, EKF 알고리즘을 통해 배터리 상태를 정확하게 추정하는 것을 보여 주었다. 입력 전류의 노이즈에 전류적산법을 사용해 계산한 SOC는 부정확한 결과를 보인 반면, EKF 알고리즘을 사용해 추정한 SOC는 3%이내의 추정오차를 보였으며, 전압 추정에서도 실제 전압을 정확히 추정하는 것을 보여주었다.

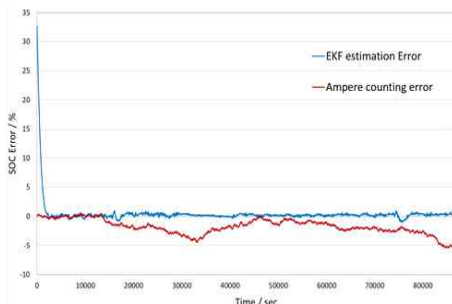
본 연구는 한전 전력연구원의 연구비지원(R17TA08, 20Ah급 ESS용 망간 수계전지 개발)에 의해 수행되었습니다.

### 참고 문헌

- [1] Nikolaos W., Jorn A., Alexander F., "Revisiting the dual extended Kalman filter for battery state-of-charge and state-of-health estimation: A use-case life cycle analysis", Journal of Energy Storage, 19, 73 - 87, 2018.
- [2] 김성필, "칼만필터의 이해", 아진, 2010.
- [3] 윤준영, 유가람, 국경수, 노도환, 장병훈, "전력계통 주파수 조정을 위한 SOC 기반의 배터리 에너지저장장치 제어전략", 전기학회논문지, 63(5), 622-628, 2014.



(a) EKF기반 FR ESS의 SOC 추정 결과



(b) EKF와 전류적산법의 SOC 추정 오차 비교