

# 무인 잠수정의 동작 특성을 고려한 단자전압 기반 리튬이온 배터리 SOC 추정 방안

고정수, 허고운, 임종훈, 임제영, 김동환, 이병국<sup>†</sup>  
성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

## Terminal Voltage-Based SOC Estimation Method for Lithium-ion Batteries Considering the Operational Characteristics of Unmanned Underwater Vehicles

Jeong Soo Ko, Go-woon Heo, Jong-Hun Lim,  
Je Yeong Lim, Dong Hwan Kim and Byoung Kuk Lee<sup>†</sup>  
Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University

### ABSTRACT

본 논문에서는 장기간 동작하는 무인 잠수정용 배터리에 적용하기 위한 단자전압 기반의 SOC 추정 알고리즘을 제안한다. 제안하는 알고리즘은 배터리 분극 전압의 영향이 최소화되는 저전류 운용 구간의 단자전압을 통해 OCV를 실시간으로 도출하고 이를 기반으로 SOC를 추정한다. 제안하는 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 Matlab/Simulink 기반의 시뮬레이션 모델을 구성하여 알고리즘의 유효성을 검증한다.

### 1. 서론

무인 잠수정(Unmanned underwater vehicle, UUV)은 해양 탐사 및 군사 작전 수행 시, 사람이 접근하기 어려운 위험한 환경에서 임무를 수행하기 위한 장기간 동작이 요구된다. 이로 인해 무인 잠수정은 충분한 전력을 안정적으로 공급받아야 하며 이를 위해 높은 에너지 밀도와 전력 밀도를 갖는 리튬이온 배터리가 에너지원으로 사용된다. 무인 잠수정의 안정적인 운용을 위해서는 BMS (Battery management system)를 통한 배터리의 정확한 상태 추정이 필요하다<sup>[1]</sup>. 특히 배터리의 충전상태를 나타내는 SOC (State of charge)는 무인 잠수정의 임무 수행시간을 결정하는데 중요한 요인이므로 높은 SOC 추정 정확도가 요구된다. 하지만 장기간 동작하는 무인 잠수정의 경우, BMS에서 발생하는 오차가 누적되어 동작 시간이 길어질수록 배터리 상태 추정 정확도가 감소하는 문제가 발생한다.

기존 연구에서는 SOC 추정 오차 저감을 위해 EKF (Extended kalman filter) 기반의 SOC 추정 방법이 제안되었다. EKF는 비선형 시스템에서 높은 정확도로 상태 추정이 가능하다는 장점이 있지만, 실제 시스템에 적용하기에는 복잡도가 높고 연산 속도가 느려지는 단점이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 배터리가 휴지 상태에서 안정화된 후 전압을 측정하여 배터리의 충전상태를 파악하는 OCV (Open circuit voltage) 기반의 SOC 추정 방법이 제안되었다<sup>[2]</sup>. 그러나 무인 잠수정의 에너지원으로 사용되는 배터리는 전력을 지속적으로 사용하므로 배터리의 휴지 기간이 거의 존재하지 않아 무인 잠수정의 배터리 SOC 추정 시, 기존의 OCV 기반의 SOC 추정 방법 적용에 한계가 존재한다.

따라서 본 논문에서는 무인 잠수정에 적용하기 위한 단자전압 기반의 SOC 추정 방법을 제안한다. 제안하는 SOC 추정 알

표 1 사용 배터리 셀 사양

Table 1 Specifications of the battery cell used.

Parameter	Value	Unit
Package type	Pouch	-
Nominal capacity	72	Ah
Nominal voltage	3.68	V
Voltage range	3.0 ~ 4.2	V

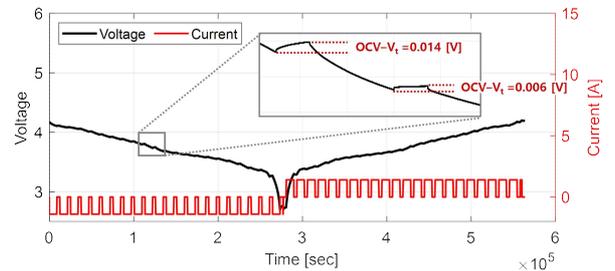


그림 1 저전류 동작에 따른 배터리 단자전압

Fig. 1 Battery terminal voltage under low current operation

고리즘은 무인 잠수정의 호버링 동작 시, 배터리 전류가 매우 낮아지는 특징을 기반으로 설계되었다. 배터리의 저전류 운용 시 단자전압은 OCV로 가정할 수 있으며 이에 따라 배터리의 지속적인 동작에도 단자전압에 기반한 SOC 추정이 가능하다. 제안하는 알고리즘은 SOC 추정 정확도 향상을 위해 측정된 단자전압에서 충방전 전류에 의해 발생하는 분극 전압을 제외하여 OCV로 가정하고 이를 통해 SOC를 추정한다. 제안하는 알고리즘의 성능을 평가하기 위해 Matlab/Simulink 기반의 시뮬레이션 모델을 구성하여 알고리즘의 타당성을 확인한다.

### 2. 단자전압 기반 SOC 추정 알고리즘

#### 2.1 저전류 동작 시 단자전압 기반 SOC 추정

본 논문에서 사용한 배터리 셀은 Routejade 社에서 제공되는 72Ah Pouch 셀을 사용하였으며 자세한 사양은 표 1과 같다. 그림 1은 0.02C의 매우 낮은 전류로 동작할 때 배터리 단자전압을 나타낸다. 그림 1에서 확인할 수 있듯이 배터리에 낮은 전류로 동작할 경우 전류에 의해 발생한 분극 전압이 매우 작아 단자전압과 OCV 간의 차이가 근소하다. 따라서 배터리 사용 시 휴지가 부재하더라도 단자전압을 OCV로 가정하여 SOC 추정이 가능하다. 하지만 전류 크기가 증가할수록 분극

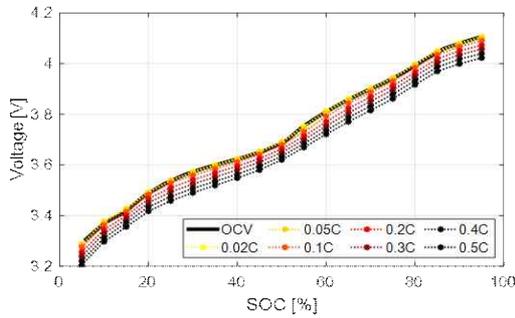


그림 2 정전류 크기에 따른 단자전압과 OCV 비교

Fig. 2 OCV and terminal voltage according to constant current magnitude

표 2 정전류 크기에 따른 단자전압과 OCV 오차

Table 2 Difference between terminal voltage and OCV depending on the constant current magnitude.

C-rate	최대 오차 [mV]	평균 오차 [mV]	SOC 오차
0.02C	5.2	2.7	0.32%
0.05C	11.2	2.9	0.34%
0.1C	24.2	13.8	1.64%
0.2C	41.2	31.3	3.73%
0.3C	56.4	47.0	5.60%
0.4C	73.4	63.8	7.59%
0.5C	88.4	79.7	9.49%

전압의 크기가 증가하므로 단자전압 기반의 SOC 추정 오차가 증가한다. 또한, 아주 낮은 전류로 동작하더라도 전류에 의한 분극 전압은 여전히 발생하기 때문에 측정된 단자전압은 OCV와 유사하지만, 완전히 동일할 수는 없다. 따라서 단자전압 기반 SOC 추정 알고리즘이 적용 가능한 범위의 C-rate를 선정하고 OCV와 유사하도록 단자전압의 보정 과정이 필요하다.

전류 크기에 따른 단자전압을 확인하기 위해 C-rate를 가변하여 정전류 인가 실험을 진행하였다. 실험 전류 조건은 0.02~0.5C이며 실험을 통해 측정된 단자전압과 OCV는 그림 2에 나타나며 자세한 오차는 표 2와 같다. 표 2에 나타난 바와 같이 각 전류 조건에서 측정된 단자전압을 OCV로 가정하였을 때 발생하는 SOC 추정 오차는 0.02C 조건에서 약 0.32%, 0.5C 조건에서는 약 9.49%로 전류 크기가 증가할수록 추정 오차 또한 증가함을 확인하였다. 이때 단자전압과 OCV 간의 오차는 분극 전압에 의해 발생하며, 분극 전압은 직렬 저항 성분과 전류에 의해 발생하는 Ohmic 분극과 전극 특성에 관련된 활성화 분극 및 농도 분극으로 구분된다. 따라서 측정된 단자전압에서 내부저항에 의한 분극 전압 성분을 보정하여 SOC 추정 오차 저감이 가능하다.

이러한 단자전압 보정 방법을 기반으로 0.5C 인가 시 측정된 단자전압을 보정한 결과는 그림 3과 같다. 그림에서 확인할 수 있듯이 단자전압 보정 전 OCV와 단자전압의 평균 오차는 79.7 mV, SOC 오차는 약 9.49%이지만 단자전압 보정 후 평균 0.85%의 높은 SOC 추정 정확도를 나타내었다. 따라서 내부저항에 기반한 단자전압 보정으로 0.5C 이하의 전류로 동작할 때 단자전압을 OCV로 간주할 수 있음을 확인하였다. 하지만 실제 무인 잠수정 운용 시, 저전류 동작뿐만 아니라 그림 4와 같이 단기간에 높은 전류로 동작하는 상황도 발생하며, 이로 인해 발생한 분극 전압은 SOC 추정 정확도를 저하시킬 수 있다. 따라서 순간적인 높은 전류에 의해 발생하는 SOC 추정 오차를 보완할 필요가 있다.

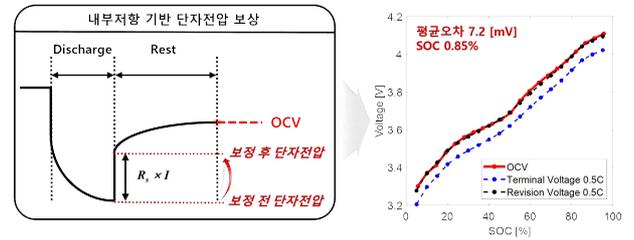


그림 3 SOC 추정오차 저감을 위한 단자전압 보정

Fig. 3 Terminal voltage correction for reducing SOC estimation error

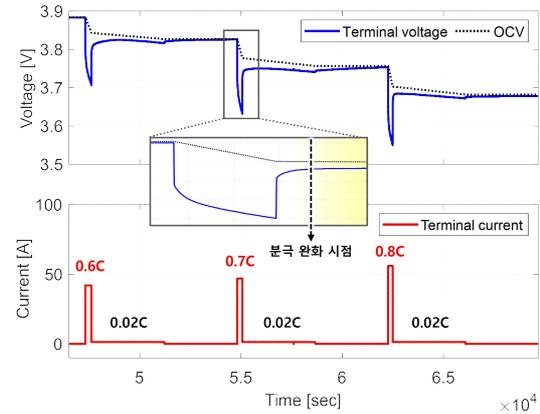


그림 4 순간적인 고전류 동작에 의해 발생하는 분극 전압

Fig. 4 Polarization voltage caused by high current

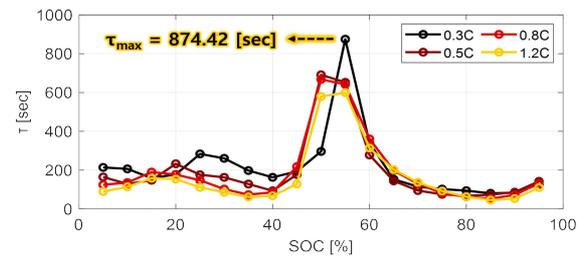


그림 5 C-rate에 따른 시정수 추출 결과

Fig. 5 Results of time constant according to C-rate

## 2.2 분극 완화 시점 설정을 통한 SOC 추정 보완

배터리가 순간적인 고전류로 동작할 경우, 높은 전류에 의해 전극 표면과 전해질 사이에 분극 전압이 발생하며 이는 저전류 동작 구간에서 점차 완화되어 전기적 평형 상태로 돌아간다. 하지만 이 과정에서 단자전압은 분극 전압을 포함하고 있으므로 저전류로 동작하더라도 OCV와 큰 편차가 존재해 제안하는 알고리즘의 추정 성능을 저하시킨다. 따라서 단자전압 기반 SOC 추정이 가능한 분극 전압 완화 시점을 파악해야 한다. 분극 전압이 완화되는 시점을 확인하기 위해 먼저 배터리 등가회로 파라미터를 추출하였다. 본 논문에서 사용한 배터리 등가회로는 1차 RC-ladder 모델이며, 이때 분극 전압의 동특성을 파악하기 위해 RC ladder의 시정수를 그림 5와 같이 나타내었다.

그림 5의 시정수는 SOC 구간에 따라 다른 양상을 보이며, 이는 C-rate에 따라 일정한 경향을 유지함을 확인할 수 있다. 따라서 분극 완화 시점은 SOC 전 구간에서 나타나는 가장 큰 시정수를 기반으로 도출할 수 있으며, 이를 통해 단자전압 기반 SOC 추정 알고리즘 동작 시점을 설정할 수 있다. 식 (1)은 시정수 최대값을 기반으로 도출한 분극 전압 완화시간을 나타

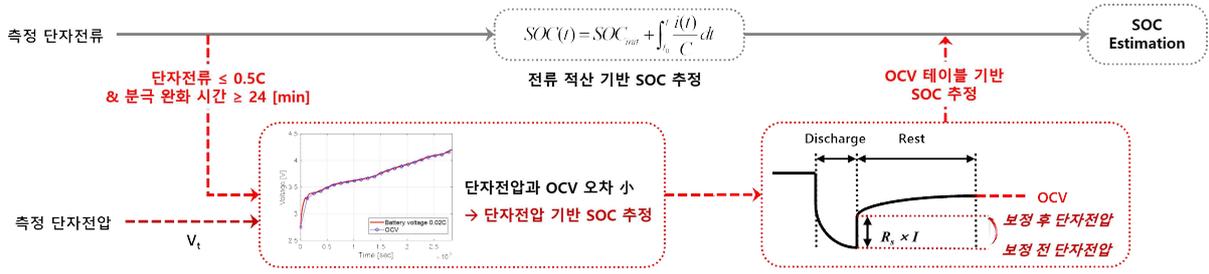


그림 6 제안하는 단자전압 기반 SOC 추정 알고리즘  
Fig. 6 Proposed terminal voltage-based SOC estimation algorithm

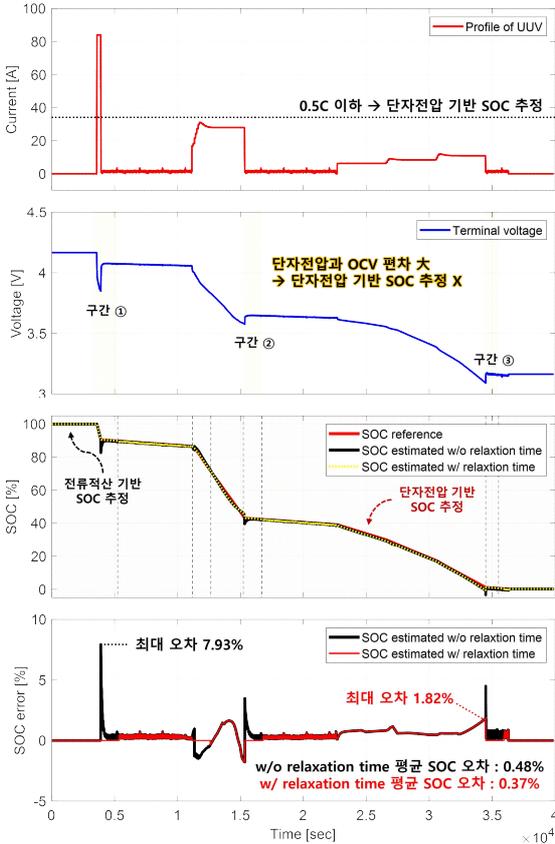


그림 7 제안하는 SOC 추정 알고리즘 검증 결과  
Fig. 7 Validation results of the proposed SOC estimation algorithm

낸다. 예를 들어, 시정수 최대값이 874.42초일 경우 분극 전압 완화를 위해 필요한 시간은 (1)에 의해 약 24분임을 알 수 있다. 따라서 배터리가 낮은 전류로 동작하더라도 24분 이상의 지속적인 동작 이후 단자전압 기반 SOC 추정 방안을 적용할 수 있다.

$$T_{polar} = \tau_{max} \left( \frac{1}{1 - \frac{1}{e}} \right) \quad (1)$$

이러한 보완 방안을 적용한 SOC 추정 알고리즘의 동작은 그림 6과 같이 나타낼 수 있다. 제안하는 알고리즘은 배터리의 단자전류가 0.5C 이하로 유지되면서 24분 이상 지속할 경우, 단자전압을 기반으로 SOC를 추정하고 이외의 조건에서는 전류적산을 기반으로 SOC를 추정하여 장기간 동작에서 발생하는 전류적산의 누적오차를 저감할 수 있다.

### 3. 제안하는 SOC 추정 알고리즘 검증

제안하는 SOC 추정 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 그림 7과 같이 배터리가 지속적으로 동작하는 무인 잠수정 프로파일을 기반으로 시뮬레이션을 진행하였다. 해당 프로파일은 무인 잠수정의 동작을 모사하여 장시간에 걸쳐 낮은 전류로 동작하는 구간을 포함한다. 그림 7의 단자전압 파형에 나타나는 구간 1~3에서 높은 전류로 동작한 이후 발생하는 분극 전압을 확인할 수 있다. 해당 구간에서는 전류에 의해 발생한 분극 전압이 완화되지 않아 단자전압 기반의 SOC 추정 알고리즘의 적용 시 SOC 추정 오차가 증가한다. 따라서 분극 전압이 완화되지 않은 구간 1~3은 전류적산을 기반으로 SOC를 추정하여 알고리즘의 추정 성능을 보완하였다. SOC 추정 보완 방안을 적용하기 이전에는 분극 전압에 의해 최대 7.93%의 추정 오차가 발생하였다. 분극 전압 완화시간을 기반으로 SOC 추정 보완 결과, 최대 추정오차는 약 1.82%로 감소하였으며, 평균 추정오차는 0.48%에서 0.37%로 저감되었다.

### 4. 결론

본 논문은 배터리가 지속적으로 동작하는 무인 잠수정에 적용하기 위한 단자전압 기반 SOC 추정 알고리즘을 제안하였다. 제안하는 알고리즘은 저전류 동작 시 배터리의 단자전압을 OCV로 간주하여 SOC를 추정하며, 추정 성능 향상을 위해 배터리 내부저항을 이용해 단자전압 보정을 진행한다. 또한, 분극 전압에 의한 SOC 추정 성능 저하를 해결하기 위해 시정수를 기반으로 분극 전압 완화시간을 선정하고 단자전압 기반 SOC 추정이 가능한 시점을 파악하였다. 제안하는 SOC 추정 알고리즘의 검증은 무인 잠수정 프로파일을 기반으로 진행하였으며 SOC 추정 결과 평균 오차 0.84%의 높은 정확도로 제안하는 알고리즘의 유효성을 확인하였다.

### 참고 문헌

[1] C. Deutsch, et al. "Energy Management Strategies for Fuel Cell-Battery Hybrid AUVs," 2020 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles Symposium (AUV), St. Johns, NL, Canada, 2020, pp. 1-6  
[2] J. Meng et al., "An Overview and Comparison of Online Implementable SOC Estimation Methods for Lithium-Ion Battery," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 54, no. 2, pp. 1583-1591, March-April 2018