

폐배터리 기반 산업용 ESS의 최대 가용전류 추정 및 하한 전압 도달 예측 알고리즘

고정수, 허고운, 임종헌, 임제영, 김동환, 이병국[†]
성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

Maximum Available Current Estimation and Lower Limit Voltage Prediction Algorithm for ESS using Retired Battery

Jeong Soo Ko, Go-woon Heo, Jong-Hun Lim,

Je Yeong Lim, Dong Hwan Kim and Byoung Kuk Lee[†]

Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University

ABSTRACT

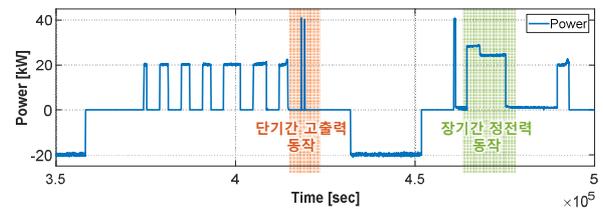
본 논문에서는 폐배터리 기반 산업용 ESS의 안전 동작을 위하여 실시간 최대 가용전류 추정 및 하한 전압 도달 예측 알고리즘을 제안한다. 제안하는 알고리즘은 허용 단자 전압 범위 내에서 사용 가능한 최대 전류를 추정하고, 장기간 정전력 동작에 따른 전류·전압 변화량을 기반으로 하한 전압 도달 시점을 예측한다. 제안하는 알고리즘의 검증을 위하여 산업용 ESS 정전력 프로파일을 기반으로 최대 가용전류 추정 및 하한 전압 도달 시점 예측의 오차를 확인한다.

1. 서론

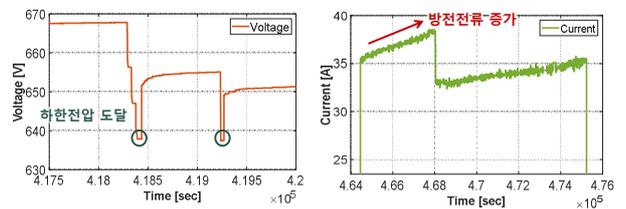
최근 전기자동차 시장의 성장과 리튬 이온 배터리의 사용량 증가로 인해 폐배터리 배출이 증가하고 있으며, 이를 재사용하기 위한 방안이 다양하게 연구되고 있다. 폐배터리를 재사용하기 위하여 ESS (Energy storage system) 등에 구성하는 경우 엄격하게 배터리 단자 전압 허용범위를 넘지 않도록 동작하여야 하고, 해당 범위를 벗어나는 경우 안전 문제가 발생할 수 있다. 특히 폐배터리를 산업용 ESS에 적용할 경우 산업용 중장비 또는 산업 현장의 전력 요구사항을 만족해야 하므로 허용 전압 범위 내에서 사용할 수 있는 최대 전류 및 전력을 추정하는 SOP (State of power) 알고리즘이 필요하다.

기존 연구에서는 배터리 동특성을 반영하여 최대 가용전류를 추정해 전기자동차의 급가속 및 급제동 시 허용 전압 범위를 벗어나지 않도록 제어하는 알고리즘이 제안되었다^[2]. 하지만 제안된 알고리즘은 전기자동차를 대상으로 설계되었으므로 정전력 프로파일을 기반으로 운용되는 ESS의 동작 특성을 반영하지 못하는 한계가 있다. 재사용 배터리를 이용한 산업용 ESS의 경우 그림 1(a)와 같은 정전력 프로파일로 동작하며 그림 1(b)와 같이 단기간에 높은 출력이 요구되면 하한 전압에 도달할 가능성이 존재한다. 또한, 그림 1(c)와 같이 ESS가 장기간 정전력 방전하는 경우 배터리 전압이 감소함에 따라 방전 전류가 증가하기 때문에 ESS의 안전 운용을 위해서는 그림 1과 같은 전력 요구사항 변화에도 단자 전압이 하한에 도달하지 않도록 제어하는 SOP 추정 알고리즘이 필요하다.

따라서 본 논문에서는 산업용 ESS의 정전력 프로파일을 기반으로 산업용 기기 사용 시 발생할 수 있는 고전력 방전에 대한 최대 가용전류 추정 알고리즘과 산업 현장에서 지속적인 전



(a) ESS 정전력 프로파일



(b) 단기간 고전력 동작

(c) 장기간 정전력 동작

그림 1 제안하는 알고리즘의 필요성

Fig. 1 Necessity of proposed algorithm : (a) Constant power profile of ESS (b) High power operation of short-term (c) Constant power operation of long-term

력 요구에 대한 하한 전압 도달 시점 예측 알고리즘을 제안한다. 제안하는 알고리즘의 유효성을 검증하기 위해 산업용 ESS 정전력 프로파일을 기반으로 최대 가용전류 추정 및 하한 전압 도달 시점을 예측하고 정확도를 검증하였다.

2. 정전력 동작 기반 ESS의 SOP 추정 알고리즘

2.1 배터리 동특성을 반영한 최대 가용전류 추정

본 논문에서는 배터리 등가회로 기반으로 도출한 전압 방정식에 배터리 동특성을 반영하여 하한 전압에 도달하지 않는 최대 가용전류 추정 방법을 제안한다. 알고리즘에 사용된 등가회로는 배터리의 내부 저항 R_s 와 분극 전압 영향을 고려한 1차 RC-ladder로 구성되어 있다. 최대 가용전류 추정에 앞서 배터리 등가회로 전압 방정식 (1), (2)를 통해 기준시간 Δt 동안 단자 전압이 하한에 도달하도록 하는 정전류 I_{lower} 를 도출하였다.

$$v(t + \Delta t) = V_{lower} = OCV(t) - I_{lower}R_s(t + \Delta t) - V_1(t + \Delta t) \quad (1)$$

$$V_1(t + \Delta t) = V_{init}e^{-\frac{\Delta t}{R_1C_1}} + I_{lower}R_1(1 - e^{-\frac{\Delta t}{R_1C_1}}) \quad (2)$$

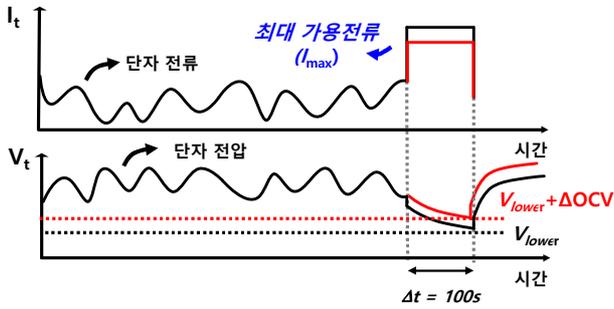


그림 2 최대 가용전류 I_{max} 의 도출 방법
Fig. 2 Derivation of maximum available current I_{max}

식 (1), (2)를 통해 나타낸 단자 전압이 하한 전압에 도달하는 정전류 I_{lower} 를 도출한 후, 이를 간단히 정리해 (3)과 같이 나타낼 수 있다. 식 (3)은 배터리 등가회로의 RC-ladder의 시정수 $R_s C_1$ 이 기준시간 Δt 에 비해 매우 크고 기준시간 동안 내부 저항 R_s 이 변화하지 않는 가정 아래 도출이 가능하다. 하지만 I_{lower} 가 인가되는 기준시간 Δt 동안에도 OCV의 변화량이 존재하므로 이를 고려하여 하한 전압에 도달하는 정전류 I_{lower} 를 (4)와 같이 구할 수 있다.

$$I_{lower} = \frac{OCV(t) - V_{init} - V_{lower}}{R_s(t)} \quad (3)$$

$$I_{lower} = \frac{OCV(t) - \Delta OCV - V_{init} - V_{lower}}{R_s(t)} \quad (4)$$

식 (4)의 I_{lower} 는 기준시간 이후 하한 전압에 도달하는 정전류를 의미하므로 단자 전압 허용범위 내에서 ESS를 운용하기 위한 최대 가용전류 I_{max} 는 I_{lower} 보다 반드시 작아야 한다. 따라서 최대 가용전류 I_{max} 를 구하기 위해 Δt 이후 단자 전압을 하한 전압에 ΔOCV 를 더한 전압값으로 가정한다. 최대 가용전류 I_{max} 의 정의와 도출 방법은 그림 2와 같다. 그림 2에 나타난 과정을 통해 구한 최대 가용전류 I_{max} 는 (5)와 같이 나타낼 수 있으며 이때 최대 가용전류 I_{max} 는 I_{lower} 보다 항상 작은 값을 추정한다. 따라서 I_{max} 에 의한 OCV 변화량 또한, I_{lower} 에 의한 OCV 변화량보다 항상 작으므로 추정한 I_{max} 가 인가될 때 배터리의 허용 전압 범위를 초과하지 않는 안전 동작이 가능하다.

$$I_{max} = \frac{OCV(t) - \Delta OCV - V_{init} - (V_{lower} + \Delta OCV)}{R_s(t)} \quad (5)$$

2.2 정전력 구동 환경 하한 전압 도달 시점 예측

장시간 동안 정전력 동작하는 산업용 ESS는 지령 전력을 유지하기 위해 방전 동작 시 단자 전압의 감소에 따라 운용하는 단자 전류가 증가하게 되어 2.1과 같이 정전류를 이용한 하한 전압 도달 시점 추정에 한계를 갖는다. 따라서 현재의 단자 전압에 따른 단자 전류 변화량 추정을 통해 하한 전압 도달 시점을 예측하는 알고리즘을 제안한다.

그림 3은 산업용 ESS의 정전력 프로파일에 기반하여 하한 전압 도달 시점을 예측하기 위한 제안 알고리즘의 동작 과정을 나타낸다. 그림 3에 나타난 것과 같이 과정 ①에서 t_1 의 단자 전압과 전류를 통해 기준시간 Δt 이후 시점인 t_2 의 전압 및 전류를 예측할 수 있다. t_2 에서의 예측 단자 전압 V_{est} 은 2.1의 SOP 알고리즘과 동일하게 내부 저항과 1차 RC-ladder로 구성

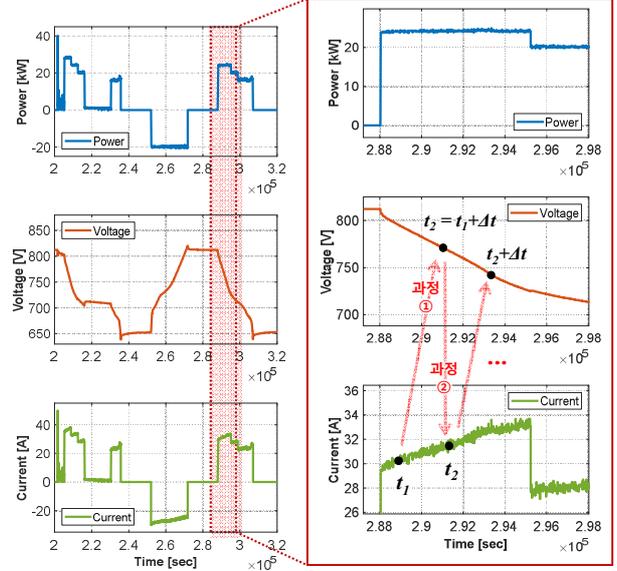


그림 3 하한 전압 도달 시점 예측 알고리즘의 동작 과정
Fig. 3 Process of the lower limit voltage arrival time prediction algorithm

된 배터리 등가회로를 통해 추정할 수 있다. 따라서 현재 전류 I_{pst} 가 일정 시간 Δt 동안 정전류로 인가된다고 가정할 때 t_2 의 단자 전압 V_{est} 은 (6)과 같이 나타난다. 이후 그림 3에 나타난 과정 ②는 ESS가 정전력으로 동작함을 이용하여 추정한 단자 전압과 지령 전력을 통해 t_2 의 단자 전류 I_{est} 를 추정할 수 있다. 본 논문에서는 추정 정확도를 고려하여 Δt 를 1초로 설정했다.

$$V_{est} = OCV(t) - I_{pst} R_s(t + \Delta t) - V_1(t + \Delta t) \quad (6)$$

제안하는 알고리즘은 (6)에 의해 현재 시점을 기준으로 60분 이내 하한 전압 도달 가능성을 판단한다. 60분 이내 하한 전압에 도달할 가능성이 존재하면 하한 전압에 도달하는 예상 시간을 계산하여 ESS의 동작 한계점을 표시한다.

3. 제안하는 ESS용 SOP 추정 알고리즘의 검증

제안하는 알고리즘의 검증을 위하여 그림 4와 같이 testbed를 구성하여 산업용 ESS 정전력 실험을 구성하였다. 해당 산업용 ESS를 구성하는 배터리의 사양은 표 1과 같으며 그림 5에 나타난 정전력 프로파일을 기반으로 최대 가용전류 추정 및 하한 전압 도달 시점을 예측하였다. 본 논문에서는 그림 5의 산업용 ESS 정전력 프로파일의 임의의 구간을 선정하여 2.1과 2.2에서 제안하는 알고리즘의 유효성을 검증한다.

제안하는 알고리즘의 최대 가용전류 추정 결과는 그림 6과 같다. 제안하는 최대 가용전류 추정 알고리즘의 기준시간이 100초로 설정되었으므로 하한 전압에 도달하기 100초 이전 시점부터 최대 가용전류 추정값이 감소함을 확인하였다. 또한, 배터리의 단자 전압이 하한에 도달하는 시점과 최대 가용전류 추정값이 0 [A]에 도달하는 시점이 동일함을 확인하였다.

그림 7은 제안하는 하한 전압 도달 시점 예측 알고리즘의 결과를 나타낸다. 그림 7(a)는 현재 시점 기준 60분 이내 하한 전압에 도달하는 구간이며 그림 7(b)는 60분 이내 하한 전압에 도달하지 않는 구간이다. 그림 7(a)는 하한 전압 도달 가능성이

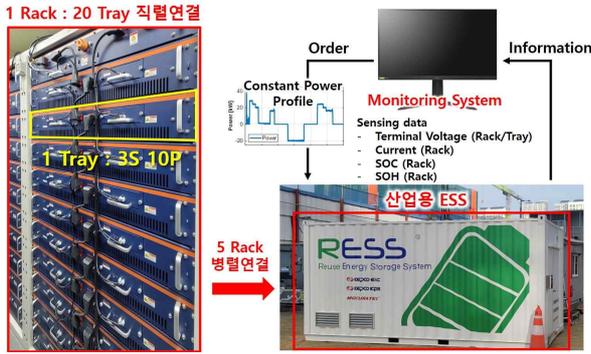


그림 4 산업용 ESS 정전력 실험 testbed
Fig. 4 Industrial ESS constant power experiment testbed

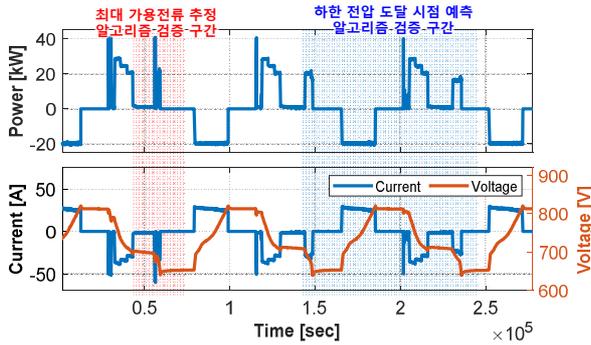


그림 5 산업용 ESS의 정전력 동작 프로파일
Fig. 5 Profile of constant power for industrial ESS

표 1 산업용 ESS의 배터리 사양
Table 1 Battery specifications for industrial ESS

Parameter	Value	Unit
Nominal Capacity	58.4	Ah
Nominal Voltage	3.6	V
Voltage Range	2.5 - 4.2	V
Maximum Current	75	A
Rack Configuration	200S 3P	-

있다고 판단하므로 도달 시점을 예측하였으며, 제안 알고리즘을 통해 하한 전압 도달 시점을 44분 28초 이후로 예측하였다. 해당 구간에서 실제 하한 전압에 도달한 시점은 45분 49초로 예측 시점과 2.91%의 낮은 오차를 확인해 ESS의 안전 운용을 위한 알고리즘의 유효성을 확인하였다.

4. 결론

본 논문은 폐배터리를 재사용한 산업용 ESS의 안전 동작을 위해 최대 가용전류 추정 및 하한 전압 도달 시점 예측 알고리즘을 제안한다. 제안하는 최대 가용전류 추정 알고리즘은 기준시간 100초 동안의 OCV 변화량을 고려하여 단자 전압 허용범위 이내에서 사용 가능한 최대 전류를 추정한다. 또한, 제안하는 하한 전압 도달 시점 예측 알고리즘은 ESS의 장시간 정전력 동작에 대한 단자 전압 및 전류 변화량을 반영하여 60분 이내 하한 전압 도달 가능성을 판단하고 그 시점을 예측한다. 제안 알고리즘의 유효성을 확인하기 위해 산업용 ESS의 정전력 프로파일을 기반으로 하한 전압에 도달하기 100초 이전 최대 가용전류가 감소함을 확인하였으며, 하한 전압에 도달하는 시간을 2.91%의 정확도로 예측하였다. 제안하는 알고리즘을

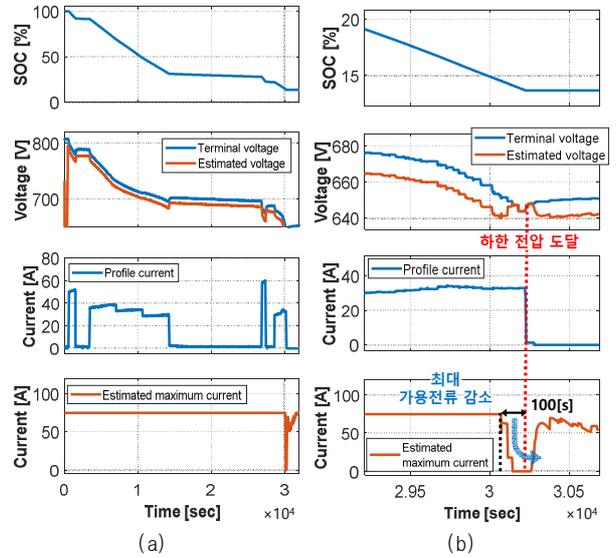


그림 6 제안하는 최대 가용전류 추정 알고리즘의 결과
Fig. 6 Result of maximum available current estimation algorithm

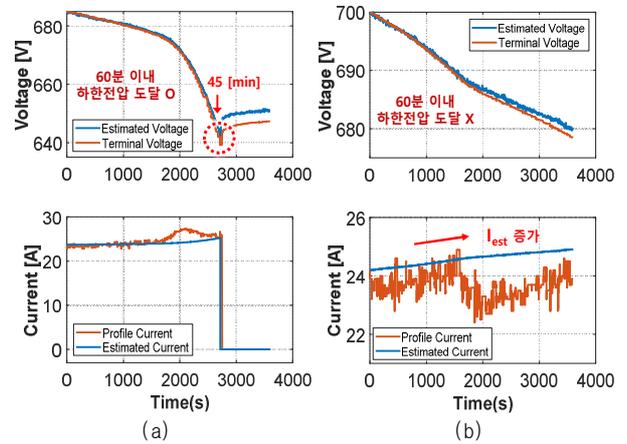


그림 7 제안하는 알고리즘의 하한 전압 도달 시점 예측 결과
Fig. 7 Result of prediction of lower limit voltage arrival time algorithm

통해 단자 전압 허용범위 이내에서 ESS의 가용에너지를 극대화할 수 있다.

이 논문은 정부(방위사업청)의 재원으로 국방과학연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(UE231124TD)

참고 문헌

[1] S. Jinlei, P. Lei, L. Ruihang, M. Qian, T. Chuanyu and W. Tianru, "Economic Operation Optimization for 2nd Use Batteries in Battery Energy Storage Systems," in IEEE Access, vol. 7, pp. 41852-41859, 2019

[2] R. Xiong, H. He, F. Sun, X. Liu and Z. Liu, "Model Based State of Charge and Peak Power Capability Joint Estimation of Lithium-ion Battery in Plug-in Hybrid Electric Vehicles", J. Power Sources, vol. 229, pp. 159-169, 2013, May.