

고용량 배터리 팩의 안전성 평가를 위한 안전 운용 영역 기반 SOS 알고리즘 연구

이평연, 이성준, 김종훈
충남대학교

Study of State-of-safety(SOS) algorithm based on State-of-area(SOA) for safety evaluation of high-energy battery pack

Pyeong-Yeon Lee, SungJun Lee, Jonghoon Kim
Chungnam National University

ABSTRACT

많은 연구들에서 배터리 셀에 대한 성능 및 안전성 평가를 진행하고 있으며, 배터리 팩에서도 동일한 방식으로 안전성 평가를 진행한다. 하지만, 배터리 팩은 다수의 셀로 구성되어 있기 때문에 셀간 불균형 등 배터리 팩에서 발생하는 성능 저하 요소들이 존재하며, 단일 셀과 동일하게 평가하기에는 한계점이 존재한다. 따라서 본 연구에서는 고용량 배터리 팩의 안전성 평가를 위해 배터리 상태 지표(State-of-x; SOx)의 융합을 토대로 안전 운용 영역 결정 및 SOS(State-of-safety) 알고리즘을 제안한다.

1. 서론

ESS(Energy storage system)는 배터리를 보다 안전하고 효율적으로 운용하기 위해 다양한 배터리 상태 지표(SOx; State-of-x)의 연구가 진행되고 있다. 최근 ESS 화재 이슈로 인해 배터리 상태 지표 중 배터리의 안전 상태를 나타내는 SOS(State-of-safety)가 중요해지고 있다. SOS는 많은 연구들에서 위험도, 안전 운용 영역(State-of-area; SOA), 남용의 반비례 관계 등을 기반으로 정의되고 있다^[1]. 첫 번째 방법은 Ashtiani^[1]가 제안한 심각도(Severity), 가능성(Likelihood), 제어(Control) 기반 HMRMA(Hazard modes and risk mitigation analysis)를 활용하여 위험도를 산출하는 연구가 진행되고 있다. 두 번째 방법은 전압과 온도를 고려한 SOA 기반 SOF(State-of-function)가 제안되었으며, 이의 지표는 부하 요구 출력 대비 배터리가 공급 가능한 출력을 낼 수 있지를 의미하는 상태 지표를 의미한다. 마지막으로, 남용 상황의 반비례로 정의하는 연구도 있으며, 온도, 전압, 전류 내부 저항 등을 통해 남용이 발생할 수 있는 인자의 함수를 설계하여 SOS를 제안하고 있다. 종합적으로 살펴보면, SOS 연구들은 배터리가 운용되는 안전 운용 영역, 위험도 등을 기반으로 안전과 관련된 함수를 도출한다. 하지만, 이의 연구들은 모두 단일 셀에서 안전을 진단하는 방법이며, ESS와 같이 다수의 셀로 구성되어 있는 어플리케이션에서는 한계를 가지고 있다. 대표적으로 셀간 불균형이 있으며, 이의 불균형은 배터리 팩의 성능에 영향을 미치게 된다. 따라서, 단일 셀 기반 기존 안전 지표는 배터리 팩 적용에 한계점을 가질 수 있다. 본 연구에서는 배터리 팩의 안전도를 산출하기 위해 배터리 팩 관점의 성능 저하 지표인 불균형을 고려한 안전 상태 지표를 제안한다.

2. 제안된 안전 운용 영역 기반 SOS 알고리즘

2.1 안전 운용 영역 기반 SOS 정의 및 설계

본 연구에서 제안하는 SOS 알고리즘의 정의는 안전 운용 영역 외의 구간을 불안전 영역으로 정의한다. 제안하는 SOS 진단 방법은 SOC(State-of-charge), SOH(State-of-health), SOB(State-of-balance)를 활용하여 안전 운용 영역을 정의하고 이 외 구간을 불안전 영역으로 설정하여 SOS를 산출한다. SOC, SOH, SOB는 모두 0~1(또는 0~100%)까지의 범위를 가지며, SOS도 0~1(또는 0~100%)까지의 범위를 가진다. 본 연구에서 제안하는 SOS는 값이 0이면 안전한 상태, SOS가 1(또는 100%)이면 불안정한 상태로 정의되며, SOS가 1에 가까워질수록 배터리 시스템에 요구되는 부하를 감당할 수 없는 상태를 의미한다. 배터리 안전 지표(SOS)를 산출하기 위한 식은 식 (1)~(4)와 같다.

$$SOA = \frac{P - P_d}{P_{max} - P_d} \tag{1}$$

$$P = P' \times SOB \tag{2}$$

$$P' = P_{max}(f(SOC)) \times SOH \tag{3}$$

$$SOS = 1 - SOA \tag{4}$$

식 (1)~(3)에서 P 는 현재 배터리의 출력을 의미하며, P_d 는 부하가 요구하는 출력, P_{max} 는 SOC에 따른 배터리 가용 최대 출력을 의미한다. 기존 안전 지표 산출 방식은 배터리 최대 출력에 SOC와 SOH만을 적용하였지만, 본 연구에서는 배터리 팩 관점에서 셀간 불균형의 영향을 고려하기 위해 SOB를 고려하였으며, 산출된 상태 지표를 통해 SOA를 산출하게 된다. 마지막으로 식 (4)를 통해 SOS를 산출하게 된다.

2.2 SOS 알고리즘 설계를 위한 SOx 알고리즘 설계

SOS 알고리즘을 설계하기 위해 우선적으로 SOx의 구현이 필요하다. 본 연구에서 사용된 상태 지표는 SOC, SOH, SOB, SOP를 사용하였다. 첫 번째로 SOC는 확장칼만필터(Extended Kalman filter)를 사용한 SOC 추정 방법을 사용하였으며, SOH는 기존 연구에서 진행된 미소 용량 기반 알고리즘을 사용하였다. 또한, 배터리 팩에 적용되는 SOS 알고리즘이기 때문에 불균형을 확인이 필요하며, 배터리 팩 내 셀간 전압 편차를 사용하는 것이 아닌 용량을 통한 SOB를 적용하였다. 셀 전압 편차의 경우 배터리 팩 내 BMS(Battery management system)에서

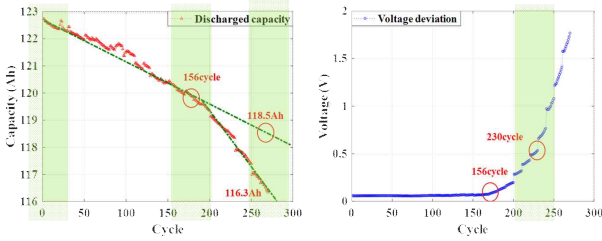


그림 1 SOS 진단 알고리즘 적용을 위한 지점 선정
Fig. 1 Selection of point for SOS diagnosis algorithm

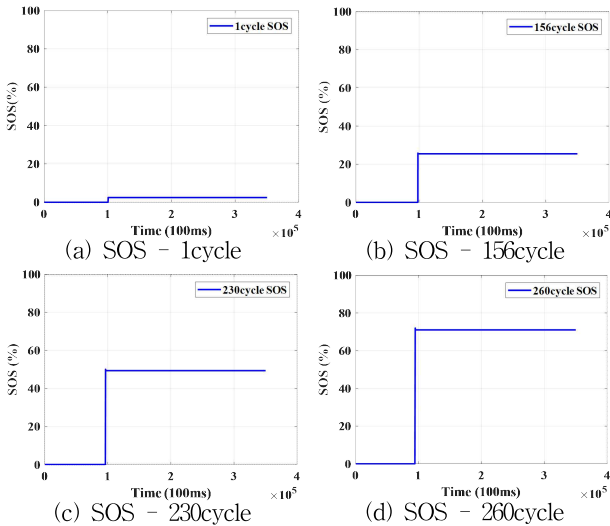


그림 2 고용량 배터리 팩의 노화별 SOS 알고리즘 결과
Fig. 2 SOS algorithm results of battery pack by degradation

셀 밸런싱 기능의 동작 시 전압 편차가 줄어드는 현상이 있어, 셀간 전압 편차가 회복될 수 있다. 또한, SOC를 통해 불균형을 확인하는 방식도 있지만, 단일 셀의 SOC 추정이 필요하여 많은 계산 성능이 필요하게 된다. 따라서, 본 연구에서는 SOS 진단을 위해 용량 불균형을 고려한 불균형 지표를 반영한다. SOS 진단 알고리즘의 순서는 다음과 같으며, SOS는 충전 구간에서 산출된다. 첫 번째로, 충전 중 3.6~3.8V의 미소 영역에서 SOH를 산출하게 된다. 두 번째는 배터리 팩 내 셀 전압 3.6~3.7V에서 산출한 미소 용량을 통해 SOB를 추출하게 된다. 세 번째는 배터리 모델 기반 최대 전류를 계산하여 최대 전류와 전압의 곱을 통해 SOP를 산출하게 되며, 마지막으로 부하의 최대 출력을 설정하고 SOS를 산출한다.

2.3 제안된 SOA 기반 SOS 알고리즘 검증

노화가 진행된 배터리 팩(24S1P) 데이터를 활용하여 SOS 알고리즘의 성능을 확인하였다. 한 cycle은 만충전과 만방전으로 정의되며, 충전은 CC-CV(Constant current-constant voltage) 방식으로 설정하고 방전은 CC 방식으로 설정하여 전류는 1/3C-rate로 설정하였다. 총 260cycle 실험된 배터리 팩을 통해 SOS 추출하였다. SOS를 추출하기 위해 선정된 cycle은 초기, 셀간 전압 편차가 발생하는 시점, 셀 운영 최소 전압(2.7V)에 도달하는 시점, 마지막 260cycle에서 SOS 성능을 확인하였다. SOS 성능을 확인하기 위한 포인트는 그림 1과 같다. 또한, 배터리 초기 최대 출력이 24.192kW이기 때문에 부하 최

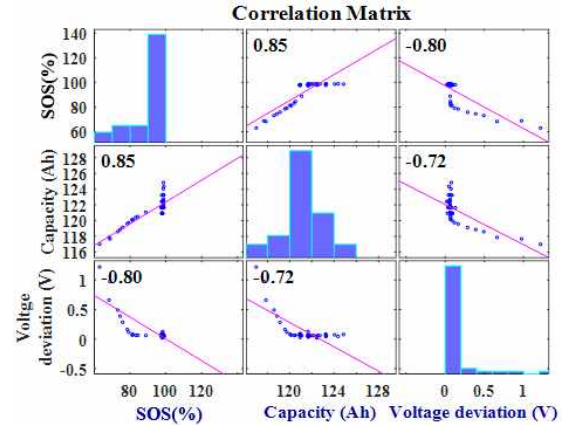


그림 3 SOS, 방전 용량, 전압 편차의 상관 관계
Fig. 3 Correlation analysis of SOS, discharged capacity, and voltage deviation

대 출력은 22kW로 가정하여 SOS 성능을 확인하였다. 배터리 팩 최대 출력이 부하의 최대 출력을 만족할 수 없다면 SOS는 100%로 안전에 이상이 있음을 의미한다. 그림 2는 노화 정도와 셀간 불균형에 따른 SOS 추정 성능을 나타내고 있다. 배터리 팩의 노화 및 셀간 전압 편차 정도에 따라 SOS가 달라짐을 확인할 수 있다. 초기 셀간 전압 편차가 적은 경우에는 SOS가 10% 이내에 있음을 확인할 수 있지만, 셀간 편차가 발생하기 시작한 시점부터 급격하게 SOS가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이의 의미는 배터리의 노화가 진행될수록 부하의 요구 출력을 만족하지 못해 안전도가 떨어지고 있음을 의미한다. 마지막으로 SOS 지표가 노화에 따른 용량 변화와 셀간 전압 편차의 영향을 내포하고 있는지 확인하기 위해 그림 3과 같이 상관 분석을 수행하였다. 상관 분석 결과, SOS 노화의 관계는 상관 계수가 0.8 이상으로 SOS와 관계가 있음을 확인하였다.

3. 결론

본 연구는 배터리의 충전 상태를 나타내는 SOC, 배터리의 수명 상태를 나타내는 SOH, 배터리의 가용 전력을 나타내는 SOP, 배터리 팩 내 불균형을 나타내는 SOB를 활용하여 부하 최대 출력에 따른 SOS를 제안한다. SOS는 배터리 최대 전력 대비 부하 최대 전력으로 정의하고 있으며, 부하 최대 전력을 배터리 최대 전력이 만족하지 못하는 경우, SOS는 100%로 계산되게 된다. 이 SOS는 0~100%까지의 값을 가지고 있으며, SOS가 낮을수록 전압 편차가 적음을 확인하였다.

본 논문은 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국 에너지기술평가원의 지원(RS-2024-00398346, ESS 빅데이터 기반 O&M 및 자산관리 기술인력 양성)과 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원(No. 20016167, 전기자동차 배터리의 내부 상태, 폭발 위험, 잔존 수명, 교체 시기를 예측하는 배터리 안전 진단 시스템(BDS) SoC 개발)에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] Cyrus, Ashtiani, et al. "Analysis of battery safety and hazards' risk mitigation", ECS Transactions, Vol. 11, No. 19, 1, 2008