

도심항공교통용 리튬 배터리의 용량 노화 회귀모델 설계 연구

이성준^{*1}, 김우준¹, 김은희¹, 윤한석², 전세홍², 오영식²
 조선대학교¹, 한화에어로스페이스²

A Study on the Design of a Capacity Fade Regression Model of Lithium Batteries for Urban Air Mobility

Seongjun Lee^{*1}, Woojun Kim¹, Eunhee Kim¹, Hanseok Yoon², Sehong Jeon², Youngsik Oh²
 Chosun University¹, Hanwha Aerospace²

ABSTRACT

최근 도시 집중화 현상으로 인한 자동차 중심 교통망의 문제점을 극복하기 위해 도심 내/외를 가로지르는 도심항공교통(UAM)의 연구개발이 진행되고 있다. 본 연구에서는 UAM에 적용되는 배터리 팩의 셀을 대상으로 전류 C-rate, 온도별 장기 사이클링 실험을 수행하였고 실험결과를 분석하여 누적용량, 전류크기, 온도의 특성에 대한 용량 노화 경험 모델을 설계하였다. 또한 설계된 용량 노화 모델을 배터리 관리장치의 노화상태(SOH) 추정 알고리즘에 적용하기 위한 다중회귀 모델을 개발하였다. 추정 정확도를 높이기 위해 중요도가 높은 입력 특성의 거듭제곱과 특성간의 교차항을 새로운 특성으로 추가하였다. 제안된 방법은 메모리를 사용하지 않는 용량 추정 모델로서 배터리관리장치(BMS)의 충전상태(SOC) 추정 및 노화상태(SOH) 추정에 쉽게 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

1. 서론

최근 도시 집중화 현상으로 인한 자동차 중심 교통망의 문제점을 극복하기 위해 도심 내/외를 가로지르는 도심항공교통(UAM)의 연구개발이 진행되고 있다. UAM에 적용되는 배터리 팩은 항공기가 지상에서 이착륙하고, 상공에서 크루즈 이동 동작을 수행하기 위해서 고출력 및 정해진 주행 사이클을 완주할 수 있는 에너지를 공급할 수 있어야 한다. UAM 항공기는 지상이 아닌 도시의 상공에서 주행하기 때문에 안정적인 주행 미션을 수행하기 위해서는 에너지 충전상태인 SOC와 용량의 노화상태를 나타내는 SOH를 정확히 추정할 수 있어야 한다.

배터리 관리 시스템 (Battery Management System, BMS)은 배터리의 과충전, 과방전을 방지하면서 배터리가 사용할 수 있는 남은 용량을 나타내는 충전상태(SOC) 추정, 배터리의 노화상태(SOH) 예측, 사용가능한 전류 또는 전력인 가용 전류/전력(SOP)의 예측 정보를 상위 제어기에 제공해야 한다. 배터리 관리 시스템이 배터리의 충전 상태 및 노화 상태를 정확히 추정하기 위해서는 온도, 전류크기 및 노화에 따른 배터리 내부 파라미터에 대한 분석이 필요하다. 또한 배터리는 사용되는 조건(온도/부하전류 크기 등)에 따라 용량이 노화되는 추세가 달라지므로 배터리의 부하분석 및 부하 프로파일에 대한 실험/분석을 수행해야 한다. 배터리의 충전상태 및 노화상태 추정을 위해 필요한 용량 정보는 배터리의 장기 실험 결과에 기반한 사이클 회수, 전기적

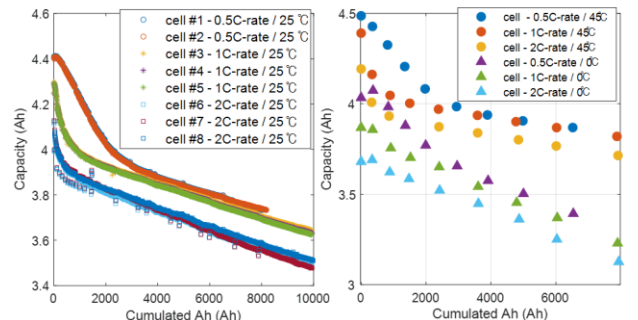
등가회로의 파라미터 변화에 대한 노화 경향성을 나타내는 경험적 모델, 증분용량 분석법(ICA) 등을 적용하여 추정된다^[1,2].

본 연구에서는 리튬배터리 셀의 용량 노화모델 설계를 위한 장기 사이클링 실험 결과를 분석하여 누적용량, 전류크기, 온도의 특성 및 이 특성들의 거듭제곱과 교차항을 새로운 특성으로 추가한 다중회귀 모델 설계 방법을 제안한다. 제안된 방법은 고출력 특성을 갖는 리튬배터리 셀을 대상으로 타당성을 검증하였다.

2. 본 문

2.1 용량 노화 모델 설계를 위한 실험 결과

본 연구에서는 상온 0.5C 조건에서 xx Ah의 특정 용량을 갖는 리튬 배터리 셀의 용량 노화 경험모델 설계를 위해 0도, 25도, 45도의 온도 조건과 0.5C, 1C, 2C-rate의 전류 조건에 따라 100% DoD 조건으로 장기간 동안 배터리 셀을 충방전 실험하였다. 이때 셀의 만충, 만방전압은 UAM 배터리 팩 전압 운영범위를 고려하여 셀 제조사에서 제시한 전압 범위 이내로 설정하였다. 그림 1은 장기 사이클 시험시 발생한 용량 감소를 온도, 전류 크기 및 누적용량에 따라 나타난 실험 결과이다.



(a) 25°C 조건의 용량 노화 결과 (b) 0°C/45°C 조건의 용량 노화 결과
 그림1 온도 및 전류 크기별 누적용량에 따른 용량 감소 결과

Fig.1 A Capacity fade according to temperature, Current C-rate and cumulated capacity

2.2 용량 노화 예측을 위한 회귀모델 설계

다중회귀 모델에서 추정하는 종속 변수는 배터리의 용량(y)이고, 누적용량(x1), 전류크기(x2), 온도(x3)를 독립 변수로 설계하는 경우 식 (1)과 같은 회귀 모델로 나타낼 수 있다. 식 (2)는 추정 성능 향상을 위해 앞선 독립 변수간의

교차곱 및 각각의 제곱의 다항 특성을 포함한 다중회귀 모델을 나타낸다. 식 (3)은 앞선 회귀모델식보다 더 고차항을 신규 특성으로 추가한 모델로서 추정된 회귀모델의 계수 파라미터에서 중요도가 낮은 파라미터를 제거한 최적의 회귀모델식을 나타낸다. 다중회귀 모델 설계를 위한 훈련데이터는 그림 1에서 제시한 전체 실험데이터의 75%를 사용하였다. 식 (3)의 회귀모델식은 회귀모델 파라미터를 규제하는 Lasso 회귀를 사용하여 중요도가 낮은 특성을 제외하여 찾은 결과이다. 회귀모델의 상수항 및 회귀 계수는 Python의 sklearn 패키지를 이용하여 추정하였고, 이와 같이 본 연구에서는 용량 추정 모델을 개발하였다.

$$y_1 = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 \quad (1)$$

$$y_2 = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_1^2 + \beta_5 x_1 x_2 + \beta_6 x_1 x_3 + \beta_7 x_2^2 + \beta_8 x_2 x_3 + \beta_9 x_3^2 \quad (2)$$

$$y_3 = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_1^2 + \beta_5 x_1 x_2 + \beta_6 x_1^3 + \beta_7 x_1^2 x_2 + \beta_8 x_1^2 x_3 + \beta_9 x_3^3 \quad (3)$$

2.3 회귀모델 설계 결과

설계된 용량 추정 모델별 성능 비교 검증은 전체 실험데이터의 25%로 설정한 테스트 데이터를 이용하여 수행하였고, 표 1에 수정된 결정계수와 추정 결과의 평균 제곱근 오차 (RMSE) 결과를 나타내었다. 또한 식 (1)~(3)의 회귀 모델별 p-value는 0.05보다 작게 도출되었고, 이는 회귀 모델별 선택한 특성이 추정하고자 하는 용량과 상관성이 있는 것을 의미한다. 회귀 모델 식 (3)은 다른 회귀 모델 대비 고차항이 포함되어 연산량이 다소 많지만 실제값 대비 1% 이내의 오차로 용량을 추정할 수 있음을 확인할 수 있다. 그림 2는 설계된 용량 노화 회귀 모델을 사용한 경우의 전류크기, 온도 및 누적 용량(노화)별 추정 결과를 나타낸다.

표 1 다중 특성을 반영한 회귀 모델별 추정 성능

Table 1 Estimation performance by regression model with multiple features

회귀모델식	Adjust-R ²	p-value	RMSE
Eq. (1)	0.907	All p-values <0.05	0.076Ah (1.93%)
Eq. (2)	0.975	All p-values <0.05	0.045Ah (1.13%)
Eq. (3)	0.987	All p-values <0.05	0.035Ah (0.87%)

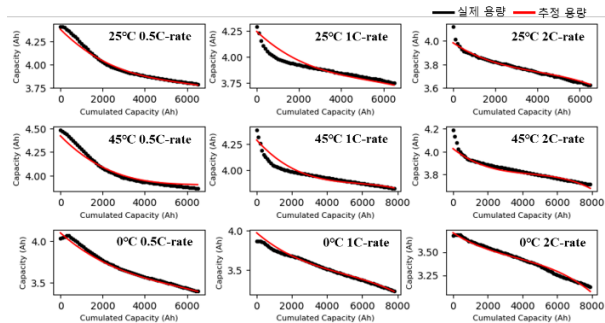


그림2 누적용량, 온도, 전류 크기별 회귀모델의 용량 추정 결과
Fig.2 Estimation result of the capacity-fade regression model by cumulated capacity, temperature and current

2.4 회귀모델 활용 방안

배터리 팩의 용량을 추정하는 방법으로 사이클 회수에 따른 용량 감소 결과의 경험식을 사용할 수 있고, 용량 노화 경험 모델을 설계하기 위해서는 배터리 팩의 다양한 동작 조건에 따른 사이클링 시험 및 이에 대한 결과분석이 필요하다. 이러한 용량 노화 분석결과는 특업 테이블을 이용하여 알고리즘에 쉽게 적용할 수 있다. 하지만 본 연구와 같이 다양한 입력 특성에 따른 용량 노화 결과를 특업 테이블로 반영하는 경우 배터리 관리장치에 사용되는 MCU의 메모리 사용이 많은 단점이 있다. 따라서 제안된 회귀 모델은 메모리 사용을 줄이면서 용량을 추정할 수 있는 모델로 사용될 수 있다.

3. 결론

본 연구에서는 xx Ah 용량을 갖는 리튬 배터리 셀의 전류 C-rate, 온도별 장기 사이클링 실험 데이터를 바탕으로 배터리 셀의 용량 노화를 추정할 수 있는 다중 회귀모델 설계 방법을 제안하였다. 용량 노화 모델의 입력은 실험 데이터에서 확보된 누적용량, 전류크기 및 온도의 특성과 앞선 특성의 거듭제곱과 교차항의 다항 특성을 반영하였다. 본 연구의 경우에는 Lasso 회귀를 사용하여 추정 성능을 유지하면서 연산량을 줄일 수 있는 다항 특성을 찾는 방법을 적용하였다. 본 연구에서 제시한 회귀 모델은 메모리를 사용하지 않는 용량 추정 모델로서 배터리관리장치(BMS)의 용량 추정 알고리즘에 쉽게 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

향후에는 배터리 셀이 추가 노화된 경우에 대한 회귀 모델의 타당성을 분석할 예정이고, 용량 노화 회귀모델 설계 시간의 단축 및 정확도를 향상시킬 수 있는 연구를 진행할 예정이다.

본 과제(결과물)는 2024년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신사업의 결과입니다.(2021RIS-002)
이 성과는 2023년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2021R1F1A1 063150)

참고 문헌

- [1] Apoorva Roy, Hamidreza Movahedi, Jason B. Siegel, Anna G. Stefanopoulou, Empirical Modeling of Degradation in Lithium-ion Batteries and Validation in Complex Scenarios, IFAC-PapersOnLine, Volume 56, Issue 3, 2023, Pages, 457-462.
- [2] Jung, Chulwon, and Woongchul Choi, "Rapid Estimation of Battery Storage Capacity through Multiple Linear Regression" *Batteries* 9, no. 8: 424., 2023.