

미소 용량 및 재귀 최소제곱 추정 기법을 이용한 리튬이온 배터리의 SOH 추정 기법 연구

박성윤*, 조인호**, 류준형**, 김영미***, 박성백***, 김종훈*

충남대학교 에너지저장변환실험실*, 한국철도기술연구원**, 한국원자력안전기술원***

A Study on SOH estimation for lithium-ion battery based on joint estimation between partial capacity and recursive least square estimation method

Seongyun Park*, Inho Cho**, Joonhyoung Ryu**, Youngmi Kim***, Sungbeak, Park***, Jonghoon Kim*

Chungnam National University*, Korea Railroad Research Institute**, Korea Institute of Nuclear Safety***

ABSTRACT

운송기관의 온실가스 저감을 위해 배터리-수소연료전지 하이브리드 철도추진시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이 중 배터리는 빠른 응답 특성으로 하이브리드 철도추진 시스템의 효율을 극대화 시키기 위해 주요 진원으로 사용되고 있어, 시스템의 안전성 및 신뢰성을 높이기 위해 정확한 열화 추정이 요구되고 있다. 본 논문에서는 사전 모델의 수립이 필요하지 않고 미소 용량 및 폐회로 제어가 가능한 재귀 최소제곱 추정 기법을 이용한 리튬이온 배터리의 SOH 추정 기법을 제안하였으며, 1S18P 배터리 모듈을 통해 열화 추정결과를 검증하였다.

1. 서 론

2015년 파리기후협정에 따라 지구온난화의 가속화를 막기 위해 온실가스 감축을 위해 다양한 노력이 이행되고 있다. 이 중 전체 온실가스 중 내연기관에 의해 발생 되는 온실가스의 양은 약 23%를 차지하는 것으로 나타났다. 따라서, 2030년까지 내연기관을 사용하고 있는 운송기관 중 최소 20%가 온실가스 저감을 위해 전기적 구동 시스템으로 운용되어야 한다^[1]. 하이브리드 자동차(Hybrid electric vehicles; HEVs) 및 전기자동차(Electric vehicles; EVs) 뿐만 아니라 최근 철도시스템의 탄소 배출량 저감을 위해 전기적 구동 시스템이 적용이 요구되고 있다^[2]. 이러한 요구에 따라 배터리와 수소연료전지를 이용한 하이브리드 철도추진시스템의 연구가 활발히 이루어지고 있다.

대용량 배터리는 하이브리드 철도추진시스템의 중요 부품으로 빠른 응답 특성으로 철도차량의 제동 시 발생하는 회생 에너지를 공급받아 에너지의 손실을 최소화하여 철도차량의 운전 효율을 극대화 시킬 수 있다. 대용량 배터리는 높은 출력 밀도, 높은 에너지 밀도 및 비메모리 효과 등의 장점이 있는 반면에, 비선형적 특성으로 인해 배터리 시스템의 안전성 및 신뢰성에 대한 요구가 증가 되고 있다. 배터리 시스템의 안전성 및 신뢰성을 높이기 위해 배터리관리시스템(Battery management system; BMS)의 적용이 필수적으로 요구되고 있으며, 배터리의 상태를 관리하기 위해 충전상태(State-of-charge; SOC) 및 건전성(State-of-health; SOH) 등과 같은 다양한 배터리 상태 지표들이 사용되고 있다^[3]. 배터리의 열화를 나타내는 지표인

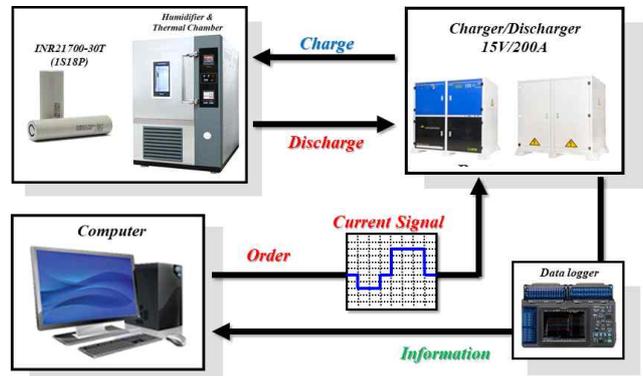


그림 1 배터리 열화를 위한 실험 장비 구성
Fig. 1 Experiment setup for battery cycling

SOH는 하이브리드 철도시스템의 전원 교체 주기를 의미하므로 정확한 열화 상태의 진단이 요구되고 있다.

기존의 연구에는 다양한 건전성 지표(Health Indicators; HIs)^[4-6] 및 이중확장칼만필터(Dual extended Kalman filter; DEKF)^[7]를 이용한 배터리 열화 추정 방법이 활발히 연구됐다. 하지만, 건전성 지표는 사전 모델 수립이 요구되며, 이중확장칼만필터는 전압기반의 측정방정식으로 인해 정확한 용량을 대변하기에 어려움이 있다.

따라서, 본 논문에서는 배터리 시스템의 열화를 추정하기 위해 사전 모델의 수립이 필요하지 않은 미소 용량 기법과 폐회로 제어가 가능한 재귀 최소제곱 추정 방법을 적용하여 배터리의 열화 상태 추정 방법을 제안하였다. 1S18P 배터리 병렬 모듈을 이용하여 실험을 진행하여 제안한 방법의 열화 추정 정확도를 검증하였다.

본 논문의 2장에서는 실험 장비 소개와 실험 조건에 대해 소개하며, 3장에서는 미소 용량 및 재귀 최소제곱법 추정 방법에 대해 설명하며 배터리의 용량 추정결과를 나타냈다. 4장에서는 결론 및 추후 연구 내용에 대해 서술하였다.

2. 실험 소개

리튬이온 배터리의 열화 실험을 위해 사용된 실험 장비를 그림 1에 나타냈다. 사용된 배터리는 INR 21700-30T이며,

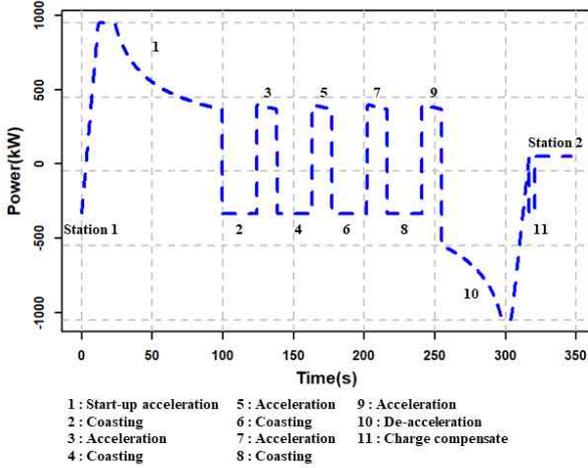


그림 2 배터리-수소연료전지 하이브리드 철도추진시스템 배터리 부하 프로파일
Fig 2 Battery and fuel-cell hybrid railroad propulsion system load profile

1S18P로 구성하였다. 배터리 충/방전기는 IGBT700-15V200A가 사용됐으며, 철도차량의 운용 환경 조건을 유지하기 위해 환경 챔버는 45±2℃로 유지되었다. 데이터 수집을 위한 데이터 로거와 충/방전 동작의 제어 및 데이터 처리를 위한 메인 컴퓨터로 구성하였다. 그림 2는 한국철도기술연구원에서 제공받은 배터리-수소연료전지 하이브리드 철도추진시스템의 배터리 요구 부하이다. 하이브리드 철도차량은 초기 가속 구간과 코스팅(Coasting) 구간(2, 4, 6, 8) 가속구간(3, 5, 7, 9) 및 회생 제동을 이용한 전력 보상 구간(10), 출발역과 도착역 사이의 배터리 충전상태를 동일하게 설정하기 위한 충전 보상 구간으로 구성 되어있다. 사전 연구를 통해 배터리는 가장 열화가 적게 진행될 것이라고 예상되는 SOC 50% 구간(단자 전압 3.79V)에서 실험이 진행됐다.

3. 미소 용량 및 재귀 최소제곱법

본 장에서는 배터리-수소연료전지 하이브리드 철도차량의 배터리 시스템 열화 추정을 위해서 미소 용량 및 재귀 최소제곱법을 제안하였다.

미소 용량 기법은 특정 시간 영역에서 SOC 변화량과 측정된 전류 적산량을 통해 배터리 시스템의 전체 용량을 계산하는 비례식으로 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다^[8].

$$Q = \frac{T_s \sum_{k=k_1}^{k_2} i(k)/3600}{SOC(k_2) - SOC(k_1)} \quad (1)$$

Q 는 배터리의 용량, k_2 , k_1 은 특정 시간, T_s 는 샘플링 주기, $i(k)$ 는 k 시간에서의 전류를 의미한다. 재귀 최소제곱 추정 방법의 적용을 위해 식 (1)을 분해하면 식 (2)-(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$q = T_s \sum_{k=k_1}^{k_2} i(k)/3600 \quad (2)$$

$$\Delta z = SOC(k_2) - SOC(k_1) \quad (3)$$

$$\tilde{z} = Q \times \Delta z \quad (4)$$

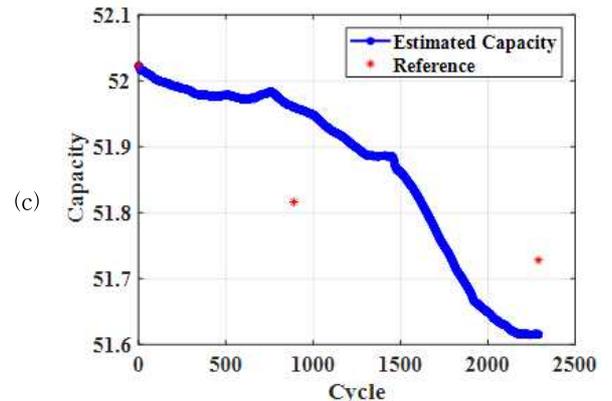
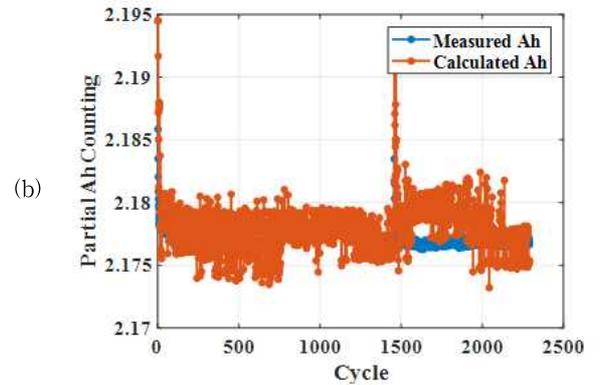
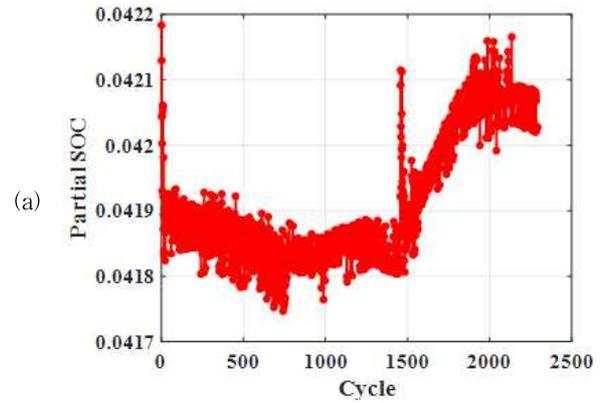


그림 3 미소 용량 및 재귀 최소제곱 추정 방법을 이용한 배터리 모듈(1S18P)의 용량 추정결과

Fig 3 The capacity estimation result for battery module(1S18P) by the partial capacity with recursive least square estimation method

q, \tilde{z} 는 k_1 과 k_2 구간에서 측정된 전류적산량, 배터리의 용량과 SOC 변화량에 의해 계산되는 전류적산량을 의미한다. 망각 계수가 포함된 재귀 최소제곱법을 적용하여 식을 다시 정리하면 식 (5)-(8)로 아래와 같이 정리할 수 있다.

$$e = y - x^T \theta \quad (5)$$

$$K = \frac{Px}{\lambda + x^T Px} \quad (6)$$

$$P = \frac{P - KxP}{\lambda} \quad (7)$$

$$\theta = \theta + Ke \quad (8)$$

표 1 재귀 최소제곱 추정 방법의 튜닝 파라미터

Table 1 The tuning parameter for recursive least square method

Initial error covariance		Forgetting factor	
P	1	λ	0.99

표 2 미소 용량 및 재귀 최소제곱 추정 방법을 이용한 배터리 모듈 (1S18P) 용량 추정결과

Table 2 Battery capacity estimation result through the proposed method

Cycle	Measured capacity (Ah)	Estimated capacity (Ah)	Error (%)
0	52.023	-	
890	51.816	51.959	-0.276
2,290	51.728	51.615	0.218

e, y, x, θ, K, P 는 측정된 전류적산량과 계산된 전류적산량의 오차, 측정된 전류 적산량, SOC 변화량, 배터리 시스템 용량, 재귀 최소제곱법의 게인, 오차공분산 행렬을 의미한다. 식 (8)에서 확인할 수 있듯이 배터리 시스템의 용량이 재귀 최소제곱 추정 방법을 통해 미리 다음 사이클의 용량을 추정하게 되며, 추정된 용량 값이 배터리 시스템의 SOC 추정에 영향을 미치게 된다. 배터리 열화 추정의 정확도를 높이기 위해 부하 프로파일 중에서 가장 긴 시간동안 단방향 전류가 흐르는 구간 1번을 이용하여 배터리 시스템의 열화 추정하였으며, 표 1은 재귀 최소제곱 추정 방법의 튜닝 파라미터를 나타냈으며, 튜닝 파라미터로는 오차공분산의 초기값과 망각 계수를 표 1과 같이 설정하였다. 제안한 방법을 적용한 배터리 모듈(1S18P)의 용량 추정 결과를 그림 3과 같이 나타냈다. 그림 3-(a)는 적응확장 칼만필터에 의해 추정되는 구간 1번의 시작 SOC와 구간 1번의 끝 SOC의 차이를 사이클 별로 나타냈으며, 그림 3-(b)에서는 구간 1번에서 측정된 전류 적산량과 제안하는 방법에 의해 계산된 전류적산량의 비교를 나타냈다. 그림 3-(c)는 제안한 방법에 의해 계산되는 배터리 모듈의 용량과 실제 측정된 배터리 모듈의 용량을 나타냈으며, 그 결과는 표 2에 나타났다. 표 2에서 나타난 것과 같이 제안한 방법의 배터리 용량 추정결과는 $\pm 0.3\%$ 이내의 우수한 정확도를 나타냈다.

4. 결론 및 추후연구내용

본 논문에서는 배터리의 동작에 따른 열화 추정을 통해 효과적인 배터리 시스템의 관리를 위한 배터리 시스템의 용량, SOH 추정 기법을 소개하였다. 제안한 방법은 기존의 건전성 지표와는 달리 사전에 상관관계를 성립하지 않고 적용할 수 있는 미소 용량 기법을 적용하였으며, 이중확장칼만필터의 전압 기반 측정방정식의 적용이 아닌 측정된 전류 적산량을 통해 실제 배터리 용량을 추정하였다. 더불어, 제안한 방법은 이중확장칼만필터에 비해 단순화된 식을 적용하므로 빠른 연산속도를 제공할 수 있다. 하지만, 본 논문에서 제안하는 방법의 정확도를 높이기 위해서는 높은 정확도의 배터리 충전상태 추정 알고리즘이 요구된다. 따라서 신뢰성 높은 배터리 상태 추정 알고리즘을 구현하기 위해서는 충전 상태(SOC)와 건전성(SOH) 추정 알고리즘의 병렬적인 고도화 연구가 요구된다.

이 논문은 원자력안전위원회의 재원으로 한국원자력안전재단의 지원을 받아 수행한 원자력안전연구사업(No. 1805006)과 국토교통부에서 시행한 철도기술연구사업 “수소연료전지 하이브리드 동력시스템(1.2MW 이상)을 적용한 철도차량 추진시스템 최적화 및 운용 기술개발” 1세부 철도차량용 배터리 시스템의 화재 예방 및 진단기술 연구(20RTRP-B146008-03)의 연구결과입니다.

참 고 문 헌

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2014: mitigation of climate change: working group III contribution to the IPCC fifth assessment report. Cambridge: Cambridge University Press; 2015.
- [2] 우종혁, 한정호, 이주(2014), “ESS 적용에 따른 도시철도차량의 회생 에너지 이용률 향상 연구,” 전기학회논문지, 제 63권, 제 9호, pp. 1306-1311.
- [3] L. Lu, X. Han, J. Li J. Hua and M. Ouyang, “A review on the key issue for lithium-ion battery management in electric vehicles”, Journal of Power Source, vol. 226, pp. 272-288, Mar, 2013.
- [4] Y. Zhou, M. Huang, Y. Chen, Y. Tao, “A novel health indicator for on-line lithium-ion batteries remaining useful life prediction”, Journal of Power Source, vol. 321, pp. 1-10, July, 2016.
- [5] Q. Zhao, X. Qin, H. Zhao, and W. Feng, “A novel prediction method based on the support vector regression for the remaining useful life of lithium-ion batteries”, Microelectronics Reliability, vol. 85, pp. 99-108, Jun. 2018.
- [6] R. Xiong, Y. Zhang, and J. Wang, “Lithium-Ion Battery Health Prognosis Based on a Real Battery Management System Used in Electric Vehicles”, Transactions on Vehicular Technology, vol. 68, pp. 4110-4121, May, 2019.
- [7] N. Wassiliadis, J. Adermann, A. Frericks, M. Pak, “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, vol. 19, pp. 73-87, Jul. 2018.
- [8] T.S. Kim, Y. Wang, H. Fang, Z. Sahinoglu, T. Wada, S. Hara and W. Qiao, “Model-based condition monitoring for lithium-ion batteries”, Journal of Power Source, vol. 295, pp. 16-27, Nov, 2015.