EV/PHEV용 리튬 이온 이차전지의 펄스 충전 알고리즘의 정성적 해석

이은주, 정다연, 전준영, 신승민, 이병국
성균관대학교 정보통신공학부

The Qualitative Analysis of Lithium-Ion Battery Pulse Charging Algorithms for EV/PHEV

Eun-Ju Lee, Da-Youn Jeong, Joon-Young Jeon, Seung-Min Shin, Byoung-Kuk Lee
School of Information & Communication Engineering, Sungkyunkwan University

ABSTRACT

본 논문에서는 현재 EV/PHEV(전기자동차 및 하이브리드전기자동차)용으로 주목 받고 있는 리튬 이온 이차전지의 충전 알고리즘들 중에서 펄스(Pulse) 충전 알고리즘과 가변 주파수 펄스 충전 알고리즘을 CC/CV(정전류/정전압) 충전 알고리즘과 충전시간과 안정도, 전지 수명 부분에서 비교 및 분석한다. 그 결과 제시되는 펄스 충전 알고리즘의 장점을 기존의 결과론적인 분석에서 나아가 전기적, 화학적 근거를 통해 정성적으로 분석한다.

1. 서론

최근 에너지 고갈과 환경오염 문제가 대두되면서 EV/PHEV에 대한 관심이 높아지고 있다. EV/PHEV의 주 동력원으로 사용되는 리튬 이온 이차전지는 다른 전지와 비교하여 고용량, 고에너지 밀도라는 큰 장점을 갖지만[1] EV/PHEV의 상용화에는 용량, 충전시간, 안정성, 수명 등의 개선이 필요하고, 이차전지를 충전하는 방법인 충전 알고리즘은 충전시간의 감소, 안정성 및 수명의 증가에 큰 영향을 미치기 때문에 리튬이온 이차전지의 충전 알고리즘 연구에 대한 필요성은 날로 증가하고 있다.

따라서 본 논문에서는 리튬 이온 이차전지의 충전 알고리즘 중에서, EV/PHEV용 리튬 이온 이차전지의 충전 알고리즘으로 제안되었던 CC/CV 충전 알고리즘과 펄스 충전 알고리즘의 원리를 설명하고 각각의 충전 알고리즘이 갖는 장점과 한계를 그 원인과 함께 전기적, 화학적 관점에서 분석한다.

2. 본론

2.1 리튬 이온 이차전지의 충전 원리

리튬 이온 이차전지의 전극은 층 구조를 가진다. 양극으로는 주로 $LiCoO_2$(Lithium Cobalt Oxide)을 사용하며, 이는 CoO_2층에 리튬이 결합된 구조를 가진다. 음극에는 흑연(graphite)과 같은 탄소 층을 사용한다. 그림 1에 나타난 것처럼 충전 시에는 양극의 CoO_2층과 결합되어 있던 리튬이 산화되어 리튬이온으로 빠져 나와 전해질을 통과하여 음극에서 탄소 층 사이로 삽입되어 환원된다. 방전 시에는 충전 시와 반대의 반응이 일어난다. 즉 리튬 이온이 양극의 층 구조 사이를 왕복하는 것이 리튬 이온 이차전지의 충·방전 시에 일어나는 전기화학 반응이다[1-2].

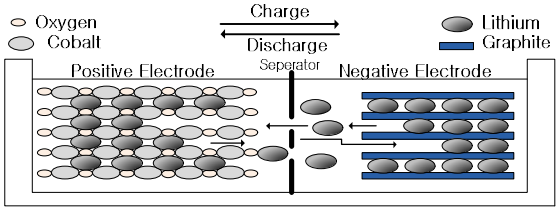

그림 1 리튬 이온 이차전지의 충전 반응 원리
Fig. 1 The charging mechanism of Lithium-ion Battery

2.2 CC/CV 충전 알고리즘

충전 초기에는 정전류 충전을 하다가, 만충전 전압에 도달한 시점에서 정전압 충전으로 전환하여 충전하는 방법이다.

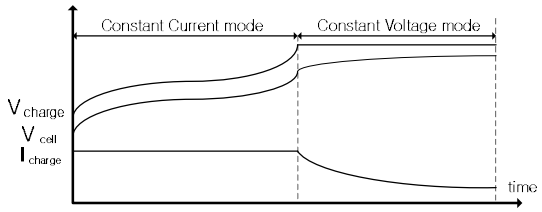

그림 2 CC/CV 충전 알고리즘의 전압, 전류 파형
Fig. 2 Voltage & Current waveform of CC/CV charging algorithm

그림 2에 CC/CV 충전 알고리즘의 충전 전압과 전지 전압, 충전 전류의 변화를 나타내었다. 정전압 충전 구간에서는 전지 전압이 충전 전압으로 수렴하고 충전 말미로 가면서 충전 반응이 가능한 전극의 표면과 이온 농도가 감소한다[2]. 이에 따라 충전 전류는 지수적으로 감소하게 되는데, 충전 전류가 일정한 값으로 저하된 것을 검출하여 충전을 종료한다.

2.2.1 안정성과 전지 수명의 보장

CC/CV 충전 알고리즘은 초기에 일정한 전류로 충전하므로 충전시간을 단축 할 수 있으며 과대한 충전 전류가 발생할 염려가 없고, 충전 전압이 최대 충전 전압(4.2[V])[1]을 넘길 염려가 없어 안정성과 전지 수명의 보장을 최대화 할 수 있다.

2.2.2 충전 시간의 한계

CC/CV 충전시, 정전류 충전 구간에서는 SOC(State of Charge)가 60~70% 증가하고 정전압 충전 구간에서는 30~40% 증가하게 된다[1]. 그런데 정전압 충전 구간에서의 충전 시간은 너무 길어 SOC가 정전류 충전 구간보다 적게 증가하는 정전압 충전 구간에서 많은 시간을 소비한다는 단점을 가진다.

2.3 펄스 충전 알고리즘

일정한 전류를 가하는 대신에 전지의 충전 전압, 충전 전류의 최대치 이상의 전압, 전류를 펄스 형태로 가함으로써 전지 내에서 일어나는 충전시의 화학반응 과정을 조정하여 충전 과정의 효율을 높이고 충전 시간을 단축하고자 하는 방식이다.

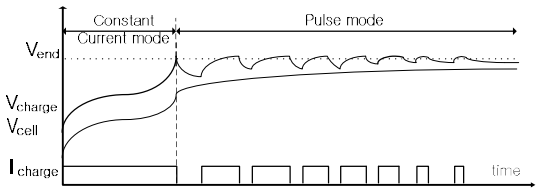

그림 3 펄스 충전 알고리즘의 전압, 전류 파형

Fig. 3 Voltage & Current waveform of pulse charging algorithm

그림 3에 나타낸 것과 같이 펄스 충전 알고리즘에서는 일정한 전류를 가하여 전지 전압이 만충전 전압에 도달하면 충전을 중단하고 그 뒤 전지 전압이 감소하면 다시 충전 전류를 가하는 과정을 반복하여 전지 전압이 일정한 시간 동안 만충전 전압에 머물러 있게 되면 충전을 종료한다. 펄스 충전 방식은 충전 시간을 단축할 수 있는 반면, 과전압이 가해지기 때문에 전지의 열화를 유발하고 수명을 단축시킬 수 있는 위험이 있다. 따라서 충전 종료시점의 결정과 최대전압규제가 중요하다.

2.3.1 휴지기간(rest period)의 존재

펄스 충전 알고리즘에서는 그 방법의 특성상 충전을 중단하는 기간인 휴지기간이 존재한다. 휴지기간은 일정한 전류를 계속 가하여 충전할 때 나타나는 이온농도의 불균형 현상을 해소한다.

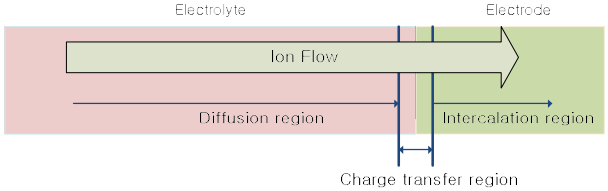

그림 4 충전 과정에서 나타나는 반응 구간

Fig. 4 The reaction region in the charging mechanism

그림 4에 나타낸 것처럼 충전 시 이온이 이동하는 과정에서는 확산구간(Diffusion region)과 전하전달구간(charge transfer region), 그리고 삽입구간(Intercalation region)의 세 구간이 나타난다. 이 중, 전하전달구간에서 일어나는 전해질과 전극 사이의 실질적 화학반응이 리튬이온의 산화 반응보다 느리게 일어난다면 양 전극간의 이온농도가 불균등해진다. 이로 인해 전지의 열화 및 분극현상과 전극에 결정이나 가스가 형성되는 반응이 일어나고 전지의 용량과 수명을 감소시키는 등의 충전 효율 감소를 유발한다[2]. 휴지기간은 리튬이온이 고르게 확산, 분배되어 음극에서 환원될 시간을 줌으로써 전극에서의 분극 현상을 저지하고, 이온농도의 불균형으로 인한 현상을 최소화 할 수 있다[3-4]. 또한 펄스 충전 시 휴지기간일 때 충전 도중에 전지의 전압을 측정할 수 있기 때문에 충전의 제어가 더 용이하다.

2.3.2 충전 시간의 단축

정전압 구간이 있는 CC/CV 충전 알고리즘과는 달리 펄스 충전 알고리즘은 정전류 구간이 반복되어 빠른 충전 속도를 얻을 수 있다. 또한 전지의 충전 속도는 전기화학적인 면에 의해서도 영향을 받기 때문에 휴지기간의 존재로 인하여, 전지의 충전 속도와 충전 효율도 더 증가하게 된다.

2.4 가변 주파수 펄스 충전 알고리즘

기존의 고정 주파수 펄스 충전 알고리즘과 원리와 과정은 같지만 가하는 충전 전압의 주파수를 충전 상태에서의 최적 주파수($f_{optimal}$)로 변화시키면서 충전하는 방법이다. 충전 전류를 주파수를 다르게 하여 가함으로서 충전시간을 좀 더 단축하고 전지의 열화현상을 감소시켜 충전 효율을 높일 수 있다.[3]

2.4.1 내부 임피던스의 최소화와 충전 효율의 증가

전지의 내부 임피던스는 충전 시 전지의 열화 현상을 일으켜 에너지 손실의 원인이 된다. 또한 이차전지를 반복해서 충·방전함에 따라 증가한다. 최적 주파수로 충전함으로써 소 신호 모델에서 해석할 때 주파수에 따라 변동하는 리액턴스 성분들로 구성된 내부 임피던스를 최소화 할 수 있다[6]. 이는 충전시의 화학적 에너지와 전기적 에너지간의 전환에서 발생하는 에너지 손실이 최소화 되고, 가장 좋은 충전 효율을 얻을 수 있음을 의미한다.[3],[5]

3. 결론

본 논문에서는 EV/PHEV에 적합한 충전 알고리즘의 분석을 위하여 CC/CV 충전 알고리즘과 펄스 충전 알고리즘의 장단점을 비교 및 분석하였다. 실험 결과의 분석과 전기적 관점으로만 해석되던 충전 알고리즘을 전기적 관점에 화학적 관점을 더하여 재해석 하였고 각 충전 알고리즘이 가지는 특성의 원리를 정성적으로 분석하였다. 따라서 본 논문은 EV/PHEV용 리튬 이온 이차전지의 효율적인 충전 알고리즘의 선택 및 알고리즘의 개선을 위한 기반 자료로서 활용이 가능할 것으로 생각한다.

참 고 문 헌

[1] (주)동역메카트로닉스연구소 기술정보분석팀 편저 : 2차전지와 배터리 충전장치 설계 First edition, 국제테크노정보연구소, Inc. pp. 27-66, 2006.

[2] R.C.Cope and Y. Podrazhansky, "The art of battery charging," in 14th Annu. Battery Conf. on Applications and Advances,1999, pp.233-235.

[3] L. R. Chen, "A design of optimal pulse charge system by variable frequency technique", IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 54, no.1, pp.398-405, Feb. 2007.

[4] Z. Jiang and R. A. Dougal, "Synergetic control of power converters for pulse current charging of advanced batteries from a fuel cell power source,"IEEE Trans. Power Electron., vol. 19, no. 4, pp. 1140-1150, Jul. 2004.

[5] D. Qu, "The ac impedance studies for porous MnO_2 cathode my means of modified transmission line model," J. Power Source, vol. 102, pp. 270-276, Dec.2001.

[6] F. Huet, "A review of impedance measurements for determination of the state-of-charge or state-of-health of secondary batteries," J. Power Source, vol. 70, no. 1, pp.59-69, Jan. 1998.