

CC-CV 충전에서의 고속저온충전에 대한 연구

조신영, 백제일, 문건우
한국과학기술원 (KAIST)

Research on Fast-charge with Low Battery Temperature in CC-CV Charging

Shin-Young Cho, Jae-Il Back, and Gun-Woo Moon
KAIST (Korea Advanced Institute of Science and Technology)

ABSTRACT

본 논문은 CC-CV충전의 충전특성과 열특성을 분석하고 이를 바탕으로 CC-CV충전에서 고속저온충전을 위한 최적 충전전류를 제안한다.

1. 서론

배터리를 전력원(Power source)으로 사용하는 기기와 장비가 점점 증가하고 있고, 배터리 사용시간을 늘리기 위해 배터리용량도 점점 증가하고 있다. 하지만 대용량의 배터리는 긴 충전시간 때문에 많은 사용자들은 배터리용량의 일부분만 충전하는 경우가 많다. 그러므로 사용자들이 대용량 배터리용량을 최대한 효율적으로 사용할 수 있도록 고속충전이 요구된다. 하지만 고속충전은 배터리의 온도를 매우 높게 하고 이러한 배터리온도의 상승은 배터리 최대허용온도를 넘을 수 있으며, 열폭주(Thermal runaway)를 일으킬 수 있다. 또한 배터리의 열이 균일하게 발생하는 것이 아니기 때문에 배터리를 손상시킬 수 있으며, 기온이 높을수록 이러한 가능성은 더욱 증가한다.

지금까지 새로운 많은 충전방법들 제시되었다. 하지만 그러한 방법들은 매우 복잡한 알고리즘을 가지고 있어서 구현이 어려우면서 비싸다. 반면, CC-CV충전은 간단하면서 구현이 쉽다. 이러한 이유로 CC-CV충전은 가장 널리 사용되고 있다. 본 논문에서는 CC-CV충전에서 충전특성과 열특성을 분석하고 이를 바탕으로 CC-CV충전에서 고속저온충전을 위한 최적충전전류를 제안한다. 그러므로 배터리온도상승을 최소화 하면서, 사용자가 배터리의 용량을 안전하고 효율적으로 사용할 수 있게 한다.

2. 배터리 특성

2.1 실험조건

CC-CV충전 알고리즘의 가장 중요한 요소는 CC구간 충전전류(I_{CC}), 최대 배터리전압(V_{max}), 그리고 CV구간 최종충전전류(I_{CV_end})이다. 최대 배터리전압(V_{max})은 배터리특성에 의하여 이미 결정되어 있고, 배터리의 CV구간 최종충전전류는 약 1/40C정도 작은 전류를 통상적으로 사용한다. 그러므로 CC-CV충전 알고리즘은 CC구간의 충전전류(I_{CC})에 의하여 결정된다.

본 논문에서는 충전실험을 위해 삼성 갤럭시 노트2 배터리(용량: 3100mAh, 최대 배터리전압: 4.3V, 최소 배터리전압: 3.4V)이 사용되고, 매우 작은 충전전류를 통해 그림1에서 OCV(Open circuit voltage, V_{oc})와 SOC(State of charge)의 관계를 실험을 통해 얻었다. 그림1의 경사는 Region 1, Region 3, 그리고 Region 2순으로 급하며, Region 1

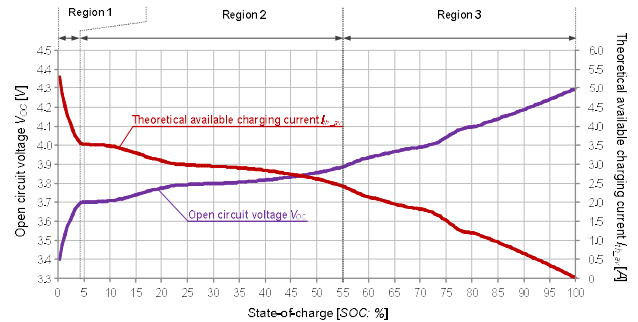


그림 1. OCV와 이론적인 최대충전 가능전류

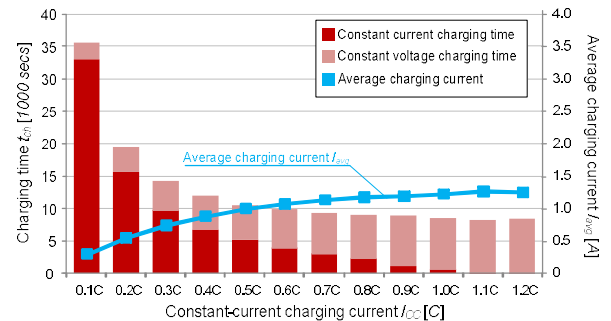


그림 2. 다양한 CC 구간 충전전류에 따른 충전시간과 평균전류

의 매우 급한 경사는 작은 충전전류에도 배터리 전압이 빠르게 상승하고 배터리 용량 중에서 매우 작은 부분은 차지함을 나타낸다. 최대전압(4.3V)과 OCV를 함께 고려하면 이론적인 충전이 가능한 최대전류를 얻을 수 있다. 배터리가 충전됨에 따라 이론적인 최대충전 가능전류($I_{th,av}$)는 그림1에서처럼 점점 작아지게 되며, 실제로 분극(Polarization)에 의한 부분까지 고려한다면 최대충전 가능전류는 실제로는 더 작아진다. 그러므로 CC구간의 충전전류를 0.1C(0.31A)부터 이론적인 최대충전 가능전류보다 작은 1.2C(3.72A)까지 변화하면서, 배터리의 충전특성과 열특성을 분석하고, 충전시간(t_{ch})과 충전에 의해 상승한 온도(Rising temperature, T_{rising_bat})를 고려하여 고속저온충전을 위한 최적충전전류를 제안한다.

2.2 충전특성

다양한 CC구간 충전전류(I_{CC})에 따른 충전시간(t_{ch})과 평균전류(I_{avg})를 그림2에 나타냈다. CC구간의 충전전류(I_{CC})가 작을수록 충전량이 작아져서 최대 배터리전압(V_{max})까지 도달하는 시간이 점점 길어지지만, 작은 전류에서 CV최종충전전류(I_{CV_end})까지 도달하는 시간이 짧아지기 때문에

상대적으로 CC구간에 비하여 CV구간이 짧다. 반면, CC구간의 충전전류(I_{cc})가 클수록 배터리가 빠르게 전압이 상승하며, 배터리의 저항성분에 의한 IR drop과 분극에 의한 전압이 CCV(Closed circuit voltage)를 더욱 증가시켜서 최대 배터리전압(V_{max})에 빠르게 도달하게 된다. 그러므로 CC구간이 짧아지고 CV구간에 들어가게 된다. CV구간에 들어갈 때, CC구간의 충전전류(I_{cc})가 컸기 때문에 CV구간의 최종충전전류(I_{CV_end})까지 도달하는 기간이 길어져서 CV구간의 시간이 상대적으로 증가한다.

하지만 CC구간과 CV구간을 모두 고려한 충전시간(t_{ch})은 큰 CC구간의 충전전류를 사용했을 때, 평균전류가 더 크기 때문에 고정된 배터리용량에서 식(1)에 의해 충전시간이 짧다.

$$\text{배터리용량}(Q) = \text{평균전류}(I_{avg}) \times \text{충전시간}(t_{ch}) \quad (1)$$

여기서 주목할 점은 큰 CC구간의 충전전류(I_{cc})를 사용하면 충전시간이 짧아질 것이라는 일반적인 예상과 달리, CC구간의 충전전류가 점점 증가하여도 더 이상 충전시간이 짧아지지 못하고 포화(Saturation)된다는 것이다. 이러한 현상은 큰 충전전류를 가지는 CC구간이 점점 짧아지고 상대적으로 작은 충전전류를 가지는 CV구간이 점점 늘어나면서 충전시간의 감소가 둔화되기 시작한다. 그러다가 매우 큰 1.1C 정도의 CC구간 충전전류(I_{cc})에 의하여 충전되면서 배터리의 저항성분에 의한 IR drop과 분극에 의한 전압 때문에 매우 빠르게 최대 배터리전압(V_{max})에 도달하면서, 단시간 안에 CC구간이 Region 1에서 끝나고, 대부분에 충전시간(t_{ch})을 CV구간에서 보내게 되면서 유사한 충전전류가 유사한 충전시간(t_{ch})을 가지게 되면서 충전시간이 포화된다. 0.1C에서 0.5C까지 작은 CC구간의 충전전류(I_{cc})가 사용되면 충전시간(t_{ch})은 급격히 큰 폭으로 감소하지만 0.5C-1.2C까지 큰 CC구간의 충전전류(I_{cc})가 사용되면 충전시간(t_{ch})은 큰 차이가 없다. 또한 배터리 충전이 끝난 후에 동일한 전류로 방전(4.3V-3.2V)하여도 거의 동일한 방전량을 가지는 것으로 볼 때, CC구간의 충전전류(I_{cc})는 충전량과 관계가 없이 거의 동일하다(그림3).

1.2 열특성

배터리의 온도는 식(2)와 같이, 저항성분, 엔트로피, 그리고 주변으로 열전달에 의한 열균형에 의하여 배터리 상승온도가 결정된다.

$$C_{bat} \frac{dT_{bat}}{dt} = Q_p + Q_s - Q_B \quad (2)$$

여기서, C_{bat} , T_{bat} , Q_p , Q_s , 그리고 Q_B 는 배터리의 열용량, 온도, 저항성분에 의한 열, 엔트로피에 의한 열, 주변으로의 열전달을 나타낸다. 충전할 때, Q_p 는 양의 값을 가지며 Q_s 는 음의 값을 가진다. Q_p 는 충전전류의 제공에 비례하고 Q_s 는 충전전류에 비례한다. CC구간의 충전전류(I_{cc})를 점점 크게 할수록 최대상승온도(T_{max})는 엔트로피에 의한 흡열반응과 주변으로의 열전달에도 불구하고, 충전전류에 제공비례하는 저항성분에 의한 열때문에 점점 증가한다(그림4). 하지만 배터리의 1.1C 정도의 큰 CC구간 충전전류(I_{cc})를 사용하면 앞서 말한 것처럼, 매우 짧은 CC구간을 보내고 대부분의 CV구간동안 유사한 충전전류로 충전되면서 동일한 충전시간(t_{ch})과 최대상승온도(T_{max})를 가지게 된다.

1.3 저온고속충전을 위한 최적의 충전전류

CC구간의 충전전류(I_{cc})를 가변하면서 CC-CV충전의 충전시간(t_{ch})과 최대상승온도(T_{max})를 실험하고 분석하였다.

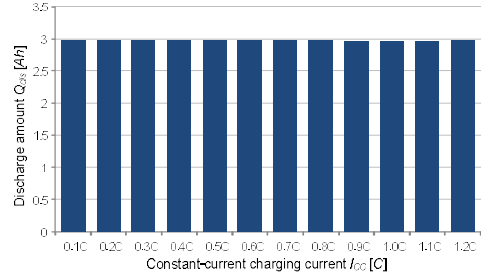


그림 3. 다양한 CC 구간 충전전류에 따른 방전량

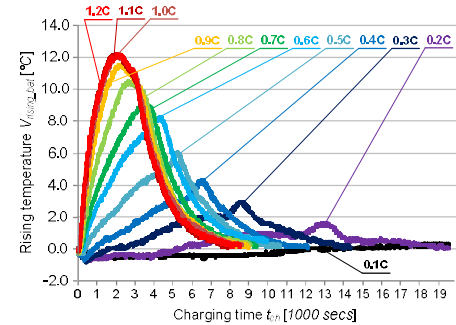


그림 4. 다양한 CC 구간 충전전류에 따른 배터리 상승온도

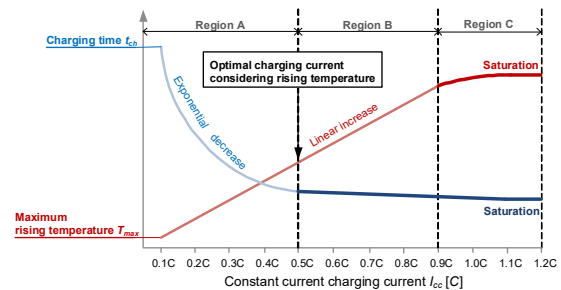


그림 5. 다양한 CC 구간 충전전류에 따른 충전시간과 최대상승온도

충전시간(t_{ch})이 최대상승온도(T_{max})에 비해 먼저 포화되기 때문에, 충전시간(t_{ch})이 포화되기 시작할 때의 CC구간의 충전전류(I_{cc})를 이용하게 되면, 그림5에서 보는 것처럼 충전시간(t_{ch})은 짧게 하면서 상대적으로 작은 최대상승온도(T_{max})를 가지면서 충전할 수 있다. 이러한 고속저온충전에 최적화된 충전은 배터리의 안전성을 향상시키며 충전기의 제작비용과 스트레스를 저감하며 경제성도 향상시킬 수 있다.

3. 결론

본 논문은 CC구간의 충전전류를 가변하면서 CC-CV충전의 충전특성과 열특성을 분석하였다. 매우 큰 전류로 충전하여도 충전시간이 더 이상 짧아지지 않고 포화됨을 보였고 최대상승온도의 포화도 같이 고려하여 CC-CV충전에서 고속저온충전을 위한 최적 충전전류가 있음을 증명하였다.

참고 문헌

- [1] Chen, Min, and Gabriel A. Rincón-Mora, "Accurate, Compact, and Power-Efficient Li-Ion Battery Charger Circuit," *Circuits and Systems II Express Briefs, IEEE Transactions on*, vol.53, no.11, pp.1180-1184, Nov. 2006
- [2] K. Onda, T. Ohshima, M. Nakayama, K. Fukuda, and T. Araki, "Thermal behavior of small lithium-ion battery during rapid charge and discharge cycles," *Journal of Power Sources*, vol. 158, no. 1, pp. 535, Jul. 2006