

리튬 2차 전지의 열적 모델링 및 용량 예측에 관한 연구

김종원^{†*} · 조현찬* · 김광선** · 조장군* · 이정수** · 호빈**

*†한국기술교육대학교 전자공학과, **한국기술교육대학교 메카트로닉스공학과

The Study on Thermal Modeling and Charge Capacity Estimation for Lithium Secondary Battery

Jong Won Kim^{†*}, Hyun Chan Cho*, Kwang Sun Kim**,
Jang Gun Jo*, Jung Su Lee** and Bin Hu**

[†]Dept. of Electrical and Electronics Eng, Korea University of Technology and Education.

**Dept. of Mechatronics Eng, Korea University of Technology and Education.

ABSTRACT

In this paper, the intelligent estimation algorithm is developed for residual quantity estimate of lithium secondary cell and we suggest the control algorithm to get battery SOC through thermal modeling of electric cell. Lithium secondary cell gives cycle life, charge characteristic, discharge characteristic, temperature characteristic, self-discharge characteristic and the capacity recovery rate etc. Therefore, we make an accurate estimate of the capacity of battery according to thermal modeling to know the capacity of electric cell that is decreased by various special quality of lithium secondary cell. And we show effectiveness through comparison of value as result that use simulation and fuzzy logic.

Key Words : Lithium secondary cell, Fuzzy Estimator, thermal modeling, FCC

1. 서 론

리튬 2차 전지는 반도체 장비, 이동 통신 장치, 하이브리드 자동차등에 널리 쓰이고 있다. 특히 리튬 2차 전지의 정밀 상태 측정 및 예측, 제어문제는 이것을 장착한 시스템의 효율성까지 관여하므로 최근 중요한 연구 대상이 되고 있다. 리튬 2차 전지의 성능은, 사이클 라이프, 충·방전 특성 곡선, 온도 특성, 자가방전 특성(전하 보존율) 및 용량 회복율 등으로 결정 된다. 전지의 다양한 특성 중, 충·방전 횟수에 따른 사이클 라이프는 전지의 전하 저장 용량(FCC)을 감소시킨다. 또한, 전지의 방전 특성은 비선형적이다. 기존의 리튬 2차 전지의 잔량을 측정하기 위한 방법으로 첫 번째로는 전압을 주파수로 변환하여 주파수에 따라 전압을 모니터링 하는 방법이 있다. 또 다른 방법으로는 사이클 라이프의 카운트하고 전류를 가감하여 수치 연산을 통해

리튬 2차 전지의 잔량을 예측하고 있다. 이러한 방법들은 비선형적인 방전특성과 자가방전 특성, 이온 값과 다른 사이클라이프의 용량감소를 반영하지 못하기 때문에 정확한 잔량의 모니터링이 어렵다[1,2].

본 논문에서는, 이러한 문제점 등을 해결하기 위하여 지능형 FCC(Full Charge Capacity) 추정 알고리즘을 제안하고 전지의 열적 모델링을 통해 배터리 SOC(State of Charge)를 얻는 제어 알고리즘을 제안한다. 또 시뮬레이션을 통해 그 효용성을 검증한다.

또한, 전지의 온도 특성에서 온도에 따라 배터리의 용량이 영향을 받고 배터리의 수명에 따라 용량의 변화가 생긴다[1,2].

이러한 변화는 본 논문에서 제안하는 지능형 알고리즘인 퍼지 estimator와 열적 모델링을 이용하여 사이클 라이프와 온도 등에 의한 전지 용량의 감소를 계산하여 실험한 값과 퍼지 로직에 의한 결과 값을 비교하여 정확한 값을 얻을 수 있다.

[†]E-mail : kamuiai@kut.ac.kr

2. 리튬 2차 전지의 특성

실험을 통하여 일반적인 리튬 2차 전지의 충·방전 특성, 온도 및 사이클 라이프 특성, 자가방전 특성(전하 보존율) 및 용량 회복율 등을 살펴보면 충전은 정전류(Constant Current: CC)로 충전하다가 정전압(Constant Voltage: CV)으로 충전하며, 방전은 방전전압은 일정하게 안정되어 있지 않음을 알 수 있다.

Fig. 1, Fig. 2는 리튬 2차 전지의 충·방전 특성을 나타낸다.

전지는 근본적으로 온도가 올라갈 수록 용량은 증대되지만, 사이클 라이프[Cycle life]는 급격히 떨어진다. 2차 전지는 충·방전을 계속하면서 용량이 줄어든다. 사이클 라이프[Cycle Life]는 초기용량의 80[%] 용량으로 용량이 줄어들었을 때까지의 충 방전 회수로 정의한다. Fig. 3, Fig. 4는 리튬 2차 전지의 온도 특성 및 사이클 라이프를 나타낸다.

리튬2차 전지의 화학반응에 의하여 용량이 줄어드는 현상을 자가방전(Self-discharge)이라고 하며, "Retention Capacity 또는 Charge Retention"와 "Recovered

Capacity"가 평가 항목으로 장시간 방치 후 어느 정도의 용량이 없어지고 어느 정도의 용량이 남아있나를 표시하는 항목이다. Fig. 5는 리튬 2차 전지를 충전 후 자가 방전 특성을 기록한 특성 곡선을 나타낸다.내며 다시 재충전하였을 때 초기용량 대비 사용가능 용량을 나타내는 Recovery의 특성 곡선이다.

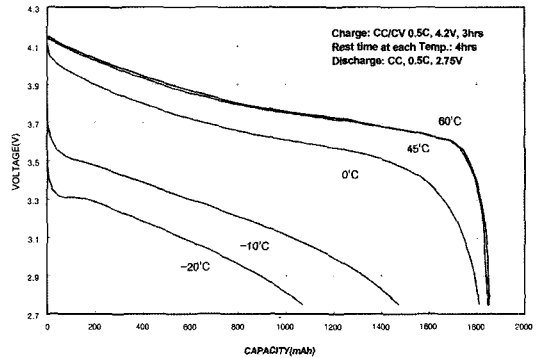


Fig. 3. Temperature characteristic[0.5C].

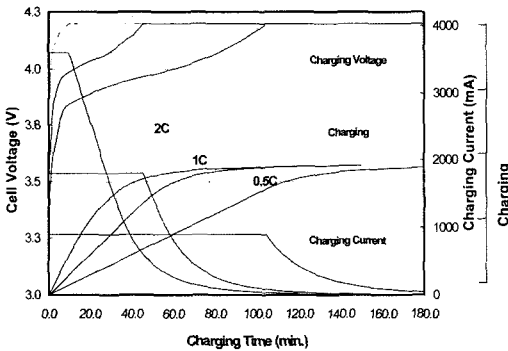


Fig. 1. Charge characteristic.

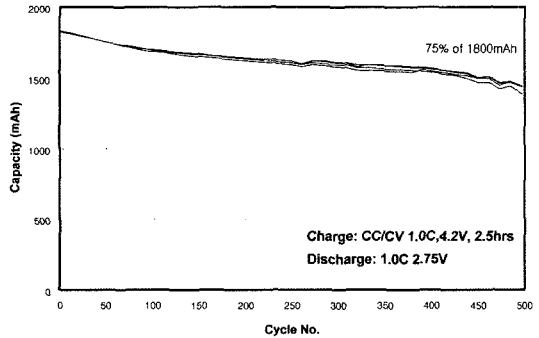


Fig. 4. Cycle life.

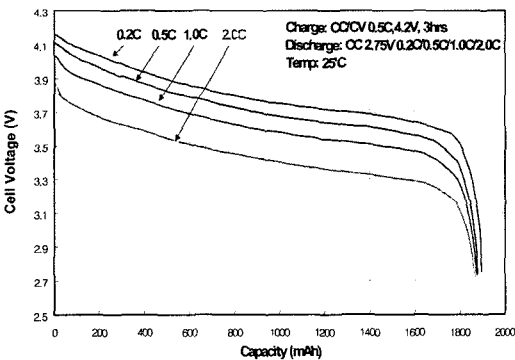


Fig. 2. Discharge characteristic.

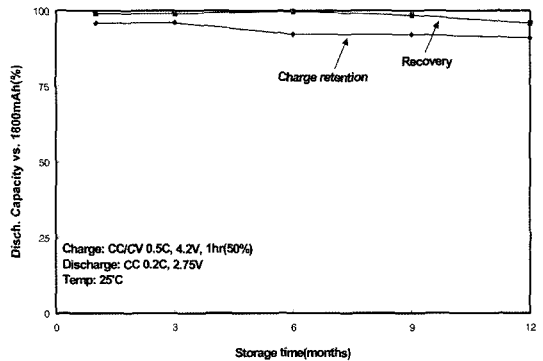


Fig. 5. Electric charge preservation rate and capacity recovery rate.

3. 열적 모델링

배터리 셀을 Fig. 6과 같이 표현했을 때 출력 전압은 식(1)과 같이 됨을 알 수 있다. Voc가 Open Circuit Voltage이고 Vout은 외부 회로의 말단 전압이다[3].

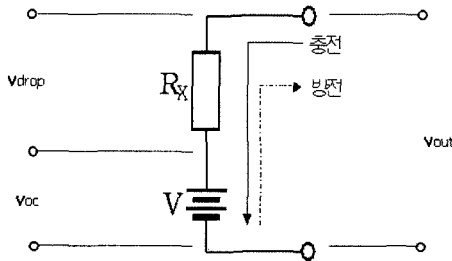


Fig. 6. Cell Potential.

$$V_{out} = Voc - V_{cell} \quad (1)$$

셀 전위는 에너지 소스로 표현되지 않고 배터리 전극과 전해질을 구성하는 물질의 성질에서 물리적, 화학적 변화를 위한 방전 시 배터리 내부의 전압강하로 표시된다[6].

전체의 셀 전위는 η_{ohm} (Ohmic Overpotential), η_s (Surface Overpotential), η_c (Concentration Overpotential)의 3부분으로 나눌 수 있다.

그러면 셀 전위는 식(2)와 같이 표현된다.

$$V_{cell} = \eta_{ohm} + (\eta_{s,a} - \eta_{s,c}) + (\eta_{c,a} - \eta_{c,c}) \quad (2)$$

Fig. 6의 기본 회로에서 $\eta_{ohm} + (\eta_{s,a} - \eta_{s,c}) = r(i, T)i = V_{drop}$ 과 같이 되며 Concentration Potential는 식(3)과 같이 됨을 알 수 있다.

$$\eta_{c,a} - \eta_{c,c} = \frac{RT}{nF} \ln \frac{C_{r,a}^b C_{o,c}^b}{C_{r,a}^s C_{o,c}^s} = -\lambda \ln [1 - b_1(i, T) c^{b_2(i, T)}] \quad (3)$$

식(2), 식(3), 식(4)에서 Vcell의 식을 구하면 다음과 같다.

$$V_{cell} = r(i, T)i - \lambda \ln(1 - b_1(i, T)RC^{b_2(i, T)}) \quad (4)$$

온도에 따른 배터리 특성 변화와 배터리 노화에 따른 특성 변화의 모델링은 다음과 같다.

$$\Phi = \Phi_{ref} \exp \left[\frac{E_a(\Phi)}{R} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right]$$

$$r_f(n, T) = kn \exp \left(-\frac{e}{T} + \psi \right) \quad (5)$$

Φ 는 전해질의 전도율에 대한 확산 계수로 일반적 변수이다. r_f 는 표면 전극에 생성된 필름의 저항이고 Δr_f 는 Δc 에 비례한다. k 는 상수 $e=E_a$ 와 관련된 한 사이클 노후 정도이다.

$\psi = \frac{E_a}{T_{ref}}$ 와 T는 이전 사이클에 실험된 배터리의 온도이다. 열적 모델링의 결과적 수식은 다음과 같다. 전체 저항은 다음과 같고

$$r_n = r_0 + r_f = r_0 + kn \exp \left(-\frac{e}{T} + \psi \right) \quad (6)$$

식(1)과 식(5)에서 Vout은 다음과 같이 표현된다.

$$V_{out} = Voc - r_n(i, T)i + \lambda \ln(1 - b_1(i, T)c^{b_2(i, T)}) \quad (7)$$

$$V_{cut_off} = Voc_{int} - r_n(i, T)i + \lambda \ln(1 - b_1(i, T)FCC_n^{b_2(i, T)}) \quad (8)$$

식(6), 식(8)에서 FCC는 식(9)로 구해지며

$$FCC_n = \left\{ \frac{1}{b} \left[1 - \exp \left(\frac{r_n i - (VOC_{int} - V_{cut_off})}{\lambda} \right) \right] \right\}^{\frac{1}{b_2}} \quad (9)$$

Vdrop은 식(5)과 식(6)으로부터 다음과 같이 유도할 수 있다

$$V_{drop} = \left[r_0 + kn \exp \left(-\frac{e}{T} + \psi \right) \right] i \quad (10)$$

4. 지능형 용량 예측 알고리즘

4.1. 퍼지 알고리즘

퍼지 알고리즘을 적용하기 위하여 알맞은 언어적 변

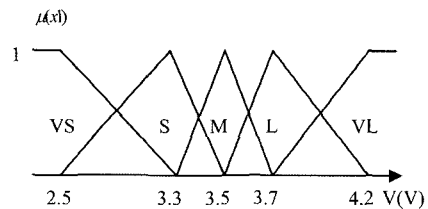


Fig. 7. V of membership function.

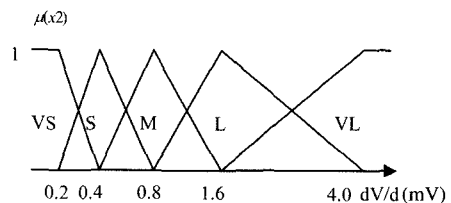


Fig. 8. dV of membership function.

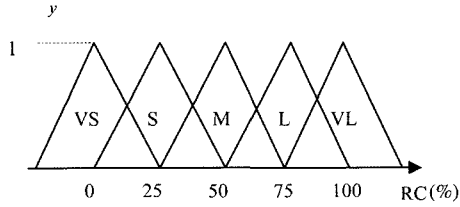


Fig. 9. RC of membership function.

수로 크리슘 입력을 변환 하고 2개의 입력과 1개의 출력으로서, V, dV는 입력이고 RC는 출력이다. 각 입력과 출력의 소속 함수는 Fig. 7과 Fig. 8, Fig. 9로 나타낸다.

Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9의 언어적 변수는 Table 1로 정의한다.

Table 1. declaration of inguistic variables for fuzzy logic

변수	VS	S	M	L	VL
정의	Very Small	Small	Medium	Large	Very Large

4.2. 퍼지화기(Fuzzifier) 퍼지 룰(Fuzzy rules) 및 퍼지 추론(Fuzzy Inference)

Table 2는 출력 RC에 대한 퍼지 룰을 나타낸다. 퍼지 근사 추론(Fuzzy Approximate Reasoning)은 맘다니의 최소-최대 연산법(Mamdani's Max-min compositional rule)을 사용하여 퍼지 로직 알고리즘을 적용하였다[4,5].

Table 2. Fuzzy rules.

RC	V					
	VS	S	M	L	VL	
dV	VS	S	M	L	VL	VL
	S	VS	S	M	L	VL
	M	VS	S	M	L	L
	L	VS	S	M	L	L
	VL	VS	S	S	M	L

4.3. 비퍼지화(defuzzifier) 및 퍼지 Estimator

비퍼지화를 이용하여 잔량(Remain Capacity) 출력을 얻기 위하여, 다음과 같이 단순 무게 중심법(Simplified Center Of Gravity)을 사용하였다[4,5].

$$y^{*COG} = \frac{\sum_{i=1}^5 \mu(y_i) \times y_i}{\sum_{i=1}^5 \mu(y_i)}$$

퍼지 estimator는 리튬2차 전지의 노후 정도를 판단하기 위해 열적 방정식을 통한 배터리 특성을 계산하여 얻을 수 있다.

배터리의 조건에 따라 달라지는 용량을 알아내어 감소된 용량과 현재 총 용량을 알고 이는 정확한 SOC를 구할 수 있게 한다.

5. 컴퓨터 시뮬레이션 결과

열적 모델링을 통한 배터리의 특성 변화에 대한 시뮬레이션 결과를 다음과 같이 얻을 수 있다. 다음 그림은 온도와 전류에 대한 출력 전압 값을 보여준다.

FCC에 대한 전류는 전압의 변화에 큰 영향이 없을 수 있다. 한편 Fig. 12에서 보듯이 사이클 횟수에 따른 FCC의 변화는 배터리 노후화에 따른 그 값을 알게 된다. 이 그림은 Fig. 4와 비교해 볼 수 있는데 아직은 실제 실험 결과값과 비슷한 모양을 보이거나 오차가 있음을 알 수 있다.

이 오차는 실험과 시뮬레이션을 반복하여 수정할 수

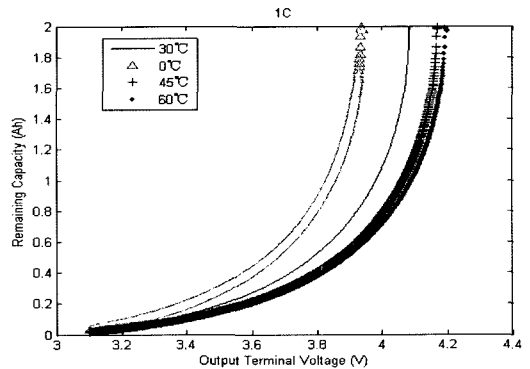


Fig. 10. Simulation for temperature.

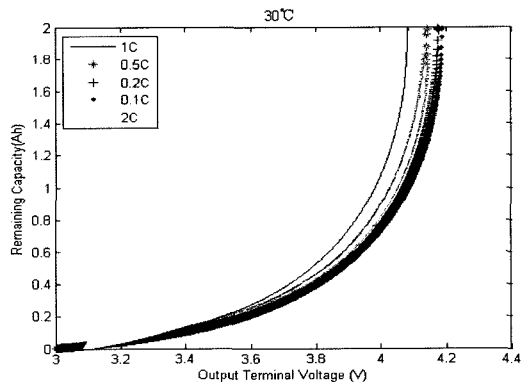


Fig. 11. Simulation for current.

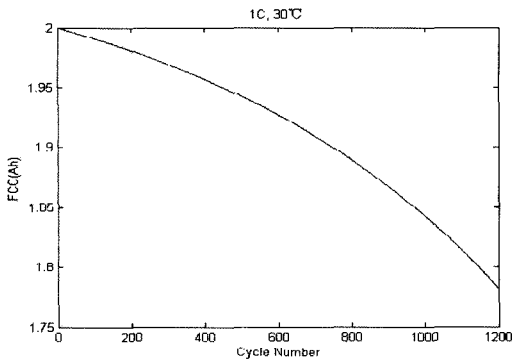


Fig. 12. FCC according to aging effect.

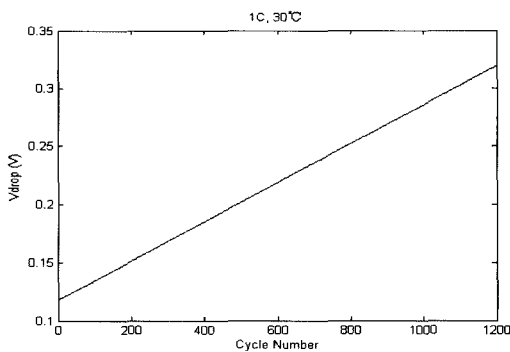


Fig. 13. Simulation of Vdrop.

있을 것이며 또한 개선된 시뮬레이션 결과는 추후 실제 시스템에 적용 시 그 효과가 입증될 수 있을 것이다.

상기와 같은 열적 모델링을 시뮬레이션 하여 배터리 특성을 파악한 후 퍼지 알고리즘에 적용된다면 더 정확한 FCC를 얻을 수 있고 이는 배터리의 충방전 정도인 SOC의 오차를 줄일 수 있다.

6. 결 론

리튬2차 전지가 가지고 있는 비 선형적인 방전 특성과 충방전을 통한 사용횟수의 증가와 자가방전 특성에 의해서 리튬2차 전지의 진하 추적 공간이 감소하여 실제 전지가 가지고 있는 용량을 제대로 표시할 수 없었

다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 극복하기 위하여 퍼지 알고리즘과 열적 모델링을 통하여 배터리의 잔량을 예측한다. 지능형 FCC 예측 알고리즘에서 단독적으로 열적 모델링을 고려하지 않고 오직 퍼지 알고리즘을 이용한다면 SOC의 정확성이 떨어지고 배터리 제어에 있어 오차값은 효율성에 영향을 미친다. 퍼지알고리즘에 열적 모델링을 적용하여 시뮬레이션 결과를 나타내어 그 효율성을 살펴 보았다. 본 논문에서는 시뮬레이션의 결과를 사용하여 얻은 일정 특성 곡선을 나타내는 연구의 제한점이 있고 다소 발생된 오차에 대해서 보다 정확도가 높은 시스템을 제작하여 실험을 반복적으로 시행한다. 앞으로의 연구 방향은 정전류 부하와 실제 변화되는 부하를 사용하여 반복적인 실험을 통한 시뮬레이션의 정확도를 높이고 이를 이용한 지능형 용량 예측 알고리즘의 정확도를 동시에 높이는 구체적인 연구를 시도할 것이다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 연구결과로 수행되었음.

참고문헌

1. Samsung SDI, Performances of the Cylindrical Li-ion ICR18650-18, 2000.
2. Byung-woo Jung, Intelligent Start Module Design for Lithium-ion Battery, FIP2003, ISSN7-302-06299-4, 2003.
3. Peng Rong, An Analytical Model for Predicting the Remaining Battery Capacity of Lithium-Ion Batteries, TVLSI-00029, 2003.
4. Mohammad Jamshidi, Fuzzy Logic Control, Prentice Hall, 1993.
5. Valluru B. Rao and Hayagriva V.Rao, C++ neural networks and Fuzzy Logic, MIS press,1993.
6. C.R. Pals, J.S. Newman, "Thermal modeling of the lithium/polymer battery. I.discharge behavior of a single cell," J. Electrochem. Soc., Vol 142, No. 10, pp. 3274-81, October 1995.