

정적 모델링을 통한 납축전지의 충/방전 특성 연구

안광현, 송진호, 윤선미
충북대학교, 전기공학부

The charge/discharge characteristic study of lead acid battery through static modeling

Kwang-Hyeon Ahn, Jin-ho Song, Seon-mi Yun

The Department of Electrical Engineering, Chungbuk National University

Abstract - 납축전지는 충/방전을 반복함에 따라 전지 내의 화학적인 반응에 의해 그 용량을 잃어버린다. 그러한 과정에서 전지의 용량과 수명을 정확히 평가할 수 있도록 전지를 모델링하는 것이 이 논문의 목적이다. 정적 모델링을 통해 골프카트용 납축전지의 충/방전 특성의 연구 내용을 기술하였다. 정적 모델링 기법은 구성이 비교적 간단하고 결과를 빠르게 예측할 수 있는 장점이 있다. 이 모델링 기법을 통해 전지의 특성을 나타내는 변수들을 도출해내었다. 이러한 과정을 바탕으로 골프카트용 납축전지를 모델링한 후, 시뮬레이션 결과를 실험 데이터와 비교하여 모델링의 정확성을 판단하였다.

그림 2.1에서 E는 전지의 내부전압, v는 전지의 단자전압, C는 전지 내부의 다공질 전극의 과도특성을 나타내는 커패시턴스, R₁ 및 R₂는 전지의 내부저항이다.

그림 2.1의 모델에서 전지 내부전압 E는 온도와 전극에서 활용 가능한 활성물질의 양에 의존하는 것으로 전지의 방전심도(State of Discharge) 또는 충전심도(State of Charge)로 표현할 수 있다. 따라서 전지 내부기전력 E를 방전(또는 충전)전류 I, 시간 t 및 방전심도 SOD 또는 충전심도 SOC의 함수로 나타내는 다음과 같은 식으로 등가화 할 수 있다.

1. 서 론

21세기 정보화 사회에 들어오면서 2차전지의 사용이 증가됨에 따라 장수명, 고성능의 2차 전지의 요구가 강하게 대두되고 있다. 이와 같은 성능의 2차 전지를 개발, 보급하기 위해서는 무엇보다도 2차 전지의 충·방전 특성이 정확하게 모델링 되어 이에 근거한 최적 설계가 이루어 져야 한다. 본 논문에서는 이를 위해 C프로그래밍에 의한 검증결과를 통하여 그 타당성을 입증한다. 본 논문에서는 리튬이차전지를 전기적으로 등가화 하고 전지 내부의 기전력(E)을 방전심도 SOD(또는 충전심도 SOC)함수로 표현하는 모델링 기법을 제안하고자 한다. 먼저 주어진 조건 하에서의 실험 데이터의 분석을 통해 전지의 충/방전 특성을 고려하여 전기적 등가회로를 구성하고 그것을 기반으로 하여 이를 수학적으로 등가화 한다. 이러한 수학적 등가화 방법을 바탕으로 납축전지의 충/방전 특성을 모델링한다. 이렇게 모델링된 납축전지의 특성곡선에 방전 전류, 충전 전류, 온도, 충/방전 사이클에 따른 보정계수를 적용하여 시뮬레이션 된 값과 실험 데이터를 비교하고 정적 모델링의 결과를 기존의 데이터와 비교하여 모델링의 유효성을 검증하였다. 방전 특성은 방전전류 0.05C를 기준 방전곡선으로 하여 시뮬레이션하였으며, 충전 특성은 충전전류 0.5 C를 기준 충전곡선으로 시뮬레이션 하였다.

$$v[i(t), T(t), R(t), t] = E[i(t), T(t), R(t)] - Ri(t) \dots\dots ①$$

$$E[i(t), T(t), t] = \sum_{k=0}^n c_k SOD^k [i(t), T(t), t] + \Delta E(T) \dots ②$$

$$SOD[i(t), T(t), t] = \frac{1}{Q_r} \int_0^t \alpha [i(t)] \cdot \beta [T(t)] \cdot \gamma [R(t)] \cdot i(t) dt \dots ③$$

여기서

SOD : 방전심도(State of Discharge)로서 0~1.0의 값을 갖음.

c_k : 방전심도의 다항식 계수

c₀ : k=0 일 때의 값으로 전지의 개방전압 E에 해당함.

ΔE(T) : 기준온도에 대한 전압보상 값 [V]

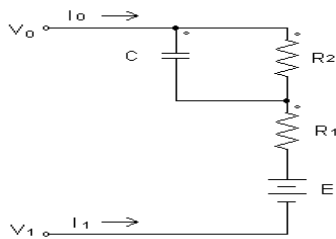
Q_r : 기준 방전전류에 대한 방전용량 [mAh]

T : 전지 온도 [K]

2. 본 론

2.1 납축전지 등가모델

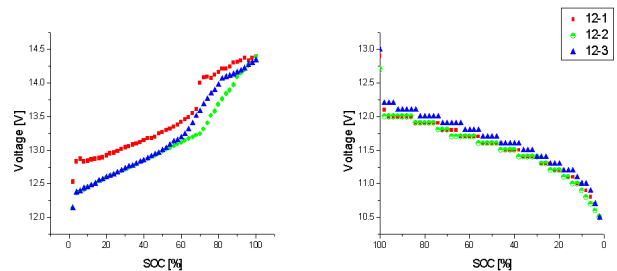
일반적으로 납축전지의 특성은 충·방전 및 사이클 데이터로 표현되는 데, 이들은 전지의 단자전압, 충·방전 전압/전류, 사이클 등으로 구성된다. 납축전지의 충방전 및 사이클 특성을 만족하는 시험평가모델에는 다음의 그림과 같은 전지 내부전압, 내부저항 및 내부 커패시턴스로 구성되는 전기적 모델이 고려될 수 있다.

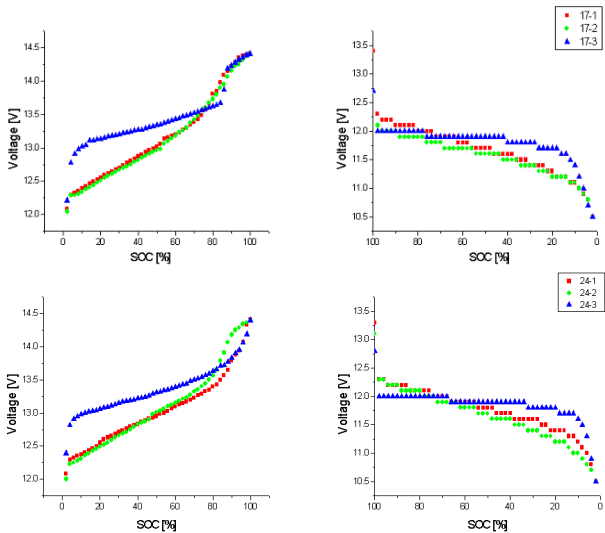


<그림 2.1> 납축전지의 전기적 등가 모델

2.2 실험

충/방전 실험은 골프장에서 사용되었던 골프 카트용 납축전지에 대해서 실시하였다. 골프 카트용 납축전지의 용량은 120Ah(5HR), 정격전압은 12V이다. 12개월 사용된 배터리 3cell, 17개월 사용된 배터리 3cell, 24개월 사용된 배터리 3cell을 동일 조건 하에 실험하였다. 충전은 중기전압을 14.5V로 하여 일반충전기로 실시했다. 방전 조건은 정전류 방전(0.05C), 중기전압 10.5V로 설정하였다. 위의 실험을 통해서 충/방전 특성 그래프를 얻을 결과는 아래와 같다.





〈그림 2.2〉 사용기간별 평균 충/방전 그래프

2.3 정적 모델링

납축전지의 정적 특성 모델링하는 방법으로 충/방전 특성을 모델링 하였다. 주어진 조건 하에서의 실험 데이터의 분석을 통해 전지의 충/방전 특성을 고려하여 전기적 등가회로를 구성하고 그것을 기반으로 하여 이를 수학적으로 등가화 한다. 수학적 등가화 방법을 바탕으로 납축전지의 충/방전 특성을 모델링 한다. 정적 모델링 구현은 동적 모델링의 구현보다 비교적 간단하고 전지의 효율이나 용량, 수명 등을 평가하는데 유용하다. 하지만 2차전지의 내부저항은 실제로 SOC에 따라 변하므로 동적 특성을 고려하지 않는 정적 모델링의 정확성은 다소 떨어진다. 본 논문에서는 실험에 이용되는 배터리의 내부저항을 각각 구한 후, 그 값의 평균치를 정적 특성으로 고려했다.

2.3.1 방전특성

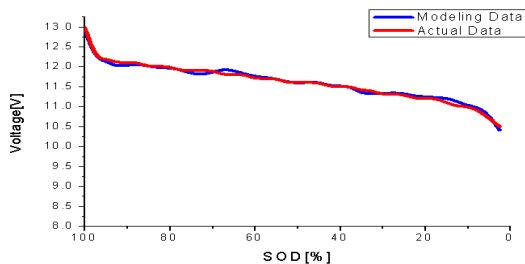
방전특성에 대한 모델링에서는 1cycle, 20°C의 상온에서 0.05C방전전류를 기준으로 하여 식(2)의 SOD의 계수인 c_k 를 구하고, 이것을 바탕으로 방전특성곡선을 모델링 할 수 있다.

먼저 (1),(2),(3)식에서 $v(i(t), T(t), R(t), t)$ 는 방전전류, 온도, 충·방전 cycle에 따라 시간 함수로 나타내어진 단자전압의 값이며 실험데이터의 전압을 의미한다. $R(i(t))$ 항에서 $i(t)$ 는 방전 전류이며 R 값은 특성실험에서 얻어진 데이터의 평균값으로 22.4mΩ이 되었다.

그 다음, (3)식에서 $i(t)$ 는 정전류이므로 SOD에 관한 식을 간편화할 수 있다. (3)식을 정리하면 $SOD = \frac{\alpha\beta\gamma}{Q_r} \times I \times t$ 의 형태가 된다. 이때 Q_r 은 배터리의 용량이고 α 는 방전전류에 대한 용량보정계수, β 는 방전전류에 대한 온도보정계수, γ 는 싸이클 보정계수이며 t 는 방전시간이다.

(1)식에서 단자전압과 전류, 내부저항을 알면 내부기전력 E 를 구할 수 있으므로 (3)식에 의해 구한 SOD와 단자전압을 (2)식에 대입하여 SOD의 계수 c_k 를 구한다. 기준 온도(상온)에서 기준 방전전류에 대한 방전특성곡선이므로 $\alpha=1, \beta=1, \Delta E(T)=0$ 으로 된다.

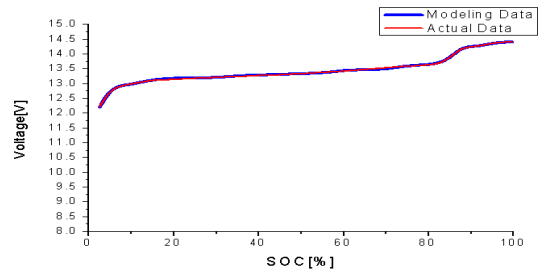
위의 과정을 프로그래밍 과정을 통해 계산한 결과와 실제 데이터를 아래의 그림2.3.1에 도시하였다.



〈그림 2.3.1〉 방전 특성 곡선

2.3.2 충전특성

충전특성에 대한 모델링에서는 방전특성 모델링에서와 같은 방식으로 충전특성 곡선을 얻을 수 있다. 하지만 x축이 충전심도인 SOC(State of Charge)로 표현되고 계산 시 초기전압을 10.5V로 설정해야한다. 아래의 그림 2.3.2에서 볼 수 있듯이 방전특성 곡선과 달리 완전히 충전된 상태로 향할수록 단자전압이 증가한다. SOC에 대한 단자전압은 충전 초기에 급격히 상승하고 당분간은 완만히 상승을 계속하며, SOC 약 85% 부근에서는 급격히 단자전압 상승률이 높아진다. 그림2.3.2에는 100%이상 부분이 표현되지 않았지만 실제로는 계속 충전하게 되어 100%가 넘어가면 Gas가 발생하고 그 후 상승률이 둔화되어 일정 전압에 도달하게 된다. SOC 100% 이상까지 충전하지 않은 이유는 과충전이 납축전지의 열화를 가속화시키기 때문이다. 실험 결과에 의하면 사용기간이 길수록, 즉 열화가 많이 진행된 배터리일수록 충전 초기나 충전 후반부에서의 기울기 변화가 급격하다. 이는 그림2.2에서 확인할 수 있다. 아래의 그림 2.3.2에서 프로그래밍에 의한 모델링 값과 실제 단자전압 값을 비교할 수 있다.



〈그림 2.3.2〉 충전 특성 곡선

3. 결 론

본 논문에서는 SOC, SOD를 이용하여 연축전지의 충·방전 특성을 모델링하였다. 제안된 연축전지의 등가 모델은 전지의 특성을 정확하게 표현할 수 있으며 구성하기가 쉽고 빠르게 결과를 도출할 수 있다. 이 모델링 기법은 다른 전지에도 가능하며 다른 2차전지에도 적용이 가능하다. 2차전지를 전기적으로 모델링하고 충/방전 특성을 파악하는 것은 2차전지의 효율적인 사용을 위해서 중요한 과정이다. 이러한 과정을 더 정확하게 하기 위해서는 열화정도가 다양한 많은 납축전지에 대해 실험할 필요가 있다. 모델링된 데이터와 실제 데이터 사이에 다소 오차가 존재하는데 앞으로 보정계수를 명확히 계산하여 오차를 줄이는 것이 중요하다. 또한 충/방전 특성을 중점적으로 연구하였지만 온도에 대한 영향과 수명특성 및 자기방전 등에 대해서도 많은 연구가 필요하다.

【참 고 문 헌】

- [1] R. Rao, S. Vrudhula, and D. Rakhmatov, "Analysis of Discharge Techniques for Multiple Battery Systems", Proc. 2003 Int'l Symp. Low Power Electronics and Design, ACM Press, 2003, pp. 44-47.
- [2] D. Linden and T. Reddy, "Handbook of Batteries", 3rd ed., McGraw-Hill, 2001.
- [3] M. Pedram and Q. Wu, "Design Considerations for Battery-Powered Electronics," Proc. 36th ACM/IEEE Design Automation Conf., ACM Press, 1999, pp. 861-866.
- [4] L. Benini et al., "Discrete-Time Battery Models for System-Level Low-power Design," IEEE Trans. VLSI Systems, vol. 9, no.5, 2001, pp. 630-640.
- [5] C.F. Chiasserini and R.R. Rao, "Energy Efficient Battery Management," IEEE J. Selected Areas in Comm., vol. 19, no. 7, 2001, pp. 1235-1245