

연축전지의 SOC 측정에 관한 연구

이인환, 김명수, 홍순찬
단국대학교 전자전기공학과

A Study on SOC Measurement of Lead Storage Batteries

In-Hwan Lee, Myeong-Soo Kim, and Soon-Chan Hong
Dept. of Electronics and Electrical Eng., Dankook University

ABSTRACT

Recently, researches on SOC(State Of Charge) of batteries are being increased. Techniques of measuring the battery SOC is essential to researches on increasing cycle life of batteries and to electric vehicle battery charging systems^[1]. The surface charge phenomenon of lead storage batteries and the needs of SOC measuring techniques are considered. Features of SOC measuring techniques that have been recently developed are also considered.

1. 서 론

연축전지의 Surface Charge 현상 때문에 축전지의 단자 전압 레벨을 SOC 레벨로 간주하는 것은 불가능하다. Surface Charge는 연축전지에만 존재하는 현상이며, 미소 방전된 배터리가 dead 상태로 보이거나 미소 충전된 축전지가 만충전된 상태로 보이는 현상으로서 SOC와 단자전압의 관계가 비선형이 되는 원인이 된다^[2].

연축전지에서 전기를 저장하거나 방출하는 전기화학적 반응은 전극물질과 전해액이 접촉하는 부분에서만 발생된다. 축전지가 충전될 때 전하가 전극의 표면에 축적된 후 전극 내부로 확산되는데 그 확산속도는 액체인 전해액에서 전하를 운반하는 이온보다 속도가 느리다. 충전이 진행될수록 더욱 많은 전하가 전극의 표면에 축적되며 충전전류가 클수록 증가되고 축전지의 단자전압이 빠른 속도로 상승한다. 상기와 같은 Surface Charge 현상으로 인하여 SOC와 선형적인 관계를 갖는 Open Circuit Voltage(V_{oc})를 외부에서 측정하는 것은 불가능하게 된다. 만약 축전지를 충전할 때 축전지의 단자전압을 기준으로 충전을 수행하게 되면 축전지는 항상 부족충전 또는 과충전 상태로 있게 되어 축전지의 수명은 감소될 것이다. 따라서 축전지의 V_{oc} 또는 SOC를 측정하는 기법들이 필요하게 된다.

2. 충전 알고리즘의 개발과 SOC

기존의 정전압(Constant Voltage), 정전류(Constant Current) 충전방식 또는 상기 방식들을 조합한 충전방식

들에 비하여 축전지의 수명을 현저히 향상시킬 수 있는 멀티스텝 충전방식들이 연구되고 있다^[3]. 멀티스텝 충전방식은 각 스텝별로 서로 다른 크기의 전류를 축전지에 주입하거나 펄스 형태의 전류를 주입하여 충전하는 방식으로서 초기 단계 충전전류의 크기 및 시간이 축전지 극판의 화학적 반응에 큰 영향을 끼쳐 축전지의 수명을 증대시키는 것으로 알려져 있다. 멀티스텝 충전방식의 알고리즘에 있어서 각 단계별 충전전류의 크기 및 지속시간은 SOC를 포함한 축전지의 제반 상태들을 기준으로 설정되며 축전지의 종류와 적용 분야에 따라 다르게 된다. 그러나 축전지를 가장 빠르게 충전하면서도 수명을 극대화시키기 위해 가장 정확하고 비용이 적게 드는 SOC 측정 방법을 개발하는 것은 공통적인 요구사항이다. 그러나 축전지는 주위온도, 사용연한 및 운전점 등에 의해서 동작특성이 변화되므로 SOC를 정확하게 추정하는 것은 매우 어려운 과제가 되고 있다.

3. 직접적인 SOC 측정 방법

3.1 Discharge Method

축전지를 실제로 완전히 방전시켜 초기상태의 SOC를 측정하는 방법으로서 가장 신뢰할만한 SOC를 측정할 수 있으나 실시간으로 SOC가 요구되는 시스템에는 적용이 불가능하다.

3.2 Current Integration Method

Current integration 방식은 축전지의 용량을 Ampere-hour로 정의하여 축전지에 유입 또는 유출되는 전류를 적분하여 계산하는 방법이다.

$$Q(t) = Q(0) - \frac{\eta}{Q_0} \int_0^t (I_B(\tau) - I_{loss}(\tau)) d\tau \quad (1)$$

식(1)에서 Q 는 SOC를 나타내는 변수, Q_0 는 Ampere-hour로 표시되는 공칭용량, η 는 충전효율(Coulombic efficiency), I_B 는 축전지의 전류, I_{loss} 는 극판에 도달하지 못하는 손실전류를 나타낸다. Current integration 방식은 초기치 문제 및 측정오차의 누적 그리고 충전효율 η 및 I_{loss} 가 결정되어야 하는 단점이 있다.

3.3 Open Circuit Voltage Measuring Method

Open Circuit Voltage와 SOC 사이에 선형적인 관계가

있음은 잘 알려진 사실이다. 그러나 Open Circuit Voltage의 정확한 측정은 충전 또는 방전 후 수 시간의 방치시간(Relax time)이 경과해야 가능하므로 실시간 SOC의 측정이 요구되는 시스템에서는 적용이 불가능하다.

3.4 Gravity Measuring Method

충전지 전해액의 비중과 SOC간 선형적인 관계가 있으며 가장 널리 사용되고 있는 방법이지만 무보수형(Maintenance-Free) 충전지에는 사용할 수 없다.

4. SOC 추정기법

충전지 전류와 전압만을 측정하여 SOC를 추정하는 방법들로서 충전지 내부 임피던스 및 전압을 모델링하여 SOC를 추정하는 방법들이다. 그림 1에서 C는 coup de fouet 현상을 표현한 것으로서 충전지 방전 시 초기 단자전압이 일시적으로 다운되었다가 회복되는 현상을 분극 캐패시터 C로 모델링한 것이다. 이 모델링은 현재 연속충전지 내부의 상태변수를 추정하는 기법의 연구에 널리 적용되고 있으며 충전지 방전은 식 (2)를 적용하고 충전은 식 (3)을 적용한다.

$$\dot{V}_p = -V_p \frac{1}{R_d C} + V_{oc} \frac{1}{R_d C} - I_b \frac{1}{C}, \quad V_p \leq V_{oc} \quad (2)$$

$$\dot{V}_p = -V_p \frac{1}{R_c C} + V_{oc} \frac{1}{R_c C} - I_b \frac{1}{C}, \quad V_p \geq V_{oc} \quad (3)$$

$$I_b = \frac{V_p - V_{oc}}{R_b} \quad (4)$$

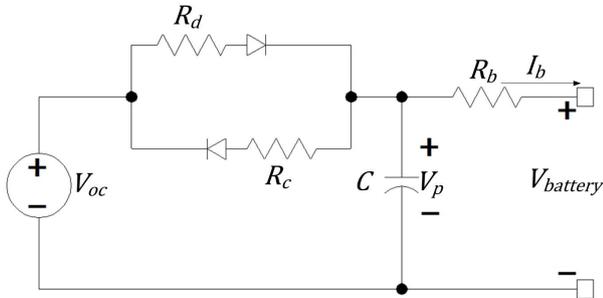


그림 1 분극 캐패시터가 있는 연속충전지 모델
Fig. 1 Lead storage battery model with polarization capacitor

4.1 Optimization / Kalman Filter Method

그림 1의 소자들을 기반으로 상태변수들을 식 (5)와 같이 정의한 후 추정식 (7)을 산출한다. 식(7)에서 $\hat{q}_1 \sim \hat{q}_5$ 는 충전지 내부 소자 추정치들을 포함하는 다항식들을 대표하는 파라미터들이며 SOC와 선형 관계인 V_{oc} (Open circuit voltage), 2차식으로 전개된 전류profile의 profile 계수(식 (6)의 a, b, c)들이 포함된다. 식(8)의 $y(t)$ 는 측정된 단자전압이며 $\hat{y}(t)$ 는 단자전압의 추정치이다. 식(7)의 추정치들은 식(8)의 결과를 최소화시켜 얻어지며, 그 중에서 Open circuit voltage인 v_{oc} 를 식 (9)에 대입하여 SOC를 추정한다. 이 방법은 측정된 전류

profile의 2차항 계수 c 가 반드시 0이 아니어야 식 (7)이 유효하다는 전제조건과 충전지 전류 I_b 의 변화와 주기성을 이용해야 하므로 충전지 전류의 변화가 적은 경우 적용하기 어려운 단점이 있다.

$$x_1 = V_p; x_2 = \frac{1}{R_d C}; x_3 = \frac{V_{oc}}{R_d C}; x_4 = \frac{1}{C}; x_5 = R_b \quad (5)$$

$$I_b(t) = a + b(t - t_0) + c(t - t_0)^2 \quad (6)$$

$$\hat{y}(t) = \hat{q}_1 + \hat{q}_3(t - t_0) + \hat{q}_4(t - t_0)^2 + \hat{q}_5 e^{-\hat{q}_2(t - t_0)} \quad (7)$$

$$F(t) = \int_{t_0}^t [y(t) - \hat{y}(t)]^2 dt \quad (8)$$

$$SOC(\%) = S(t) = \frac{v_{oc}(t) - b}{a} \quad (9)$$

4.2 Observability Gramian Method

Observability Gramian method에서는 식 (10)과 같이 정의된 $n \times n$ Gramian 매트릭스의 역행렬이 존재해야 충전지 내부 상태변수들의 관측이 가능하다. 이 방법은 식 (6)의 계수 c 가 0이면 Gramian M 의 역행렬이 존재하지 않으므로 상태변수 관측이 불가능하다. 그 외에 상태변수들을 추정하는 알고리즘은 Optimization method와 거의 동일하다.

$$M(t_0, t_f, x_{20}) = \int_{t_0}^{t_f} \Phi^T(t_0, t_f, x_{20}) C^T(t) \Phi(t_0, t_f, x_{20}) dt \quad (10)$$

이외에도 SOC를 추정하는 기법으로서 Electrochemical Impedance Spectroscopy, 슬라이딩 관측기 그리고 coup de fouet 현상을 이용하여 추정하는 방식들이 있다.

5. 결론

본 연구에서는 충전지 관리 핵심기술로 부각될 SOC 추정 기법의 필요성 및 기법들의 특징에 대해 고찰하였다. SOC를 직접 측정하는 방법은 비교적 정확한 값을 알아 낼 수 있으나 적용분야에 한계가 있고 그 측정 기법도 많지 않다. 따라서 향후 간접추정법에 대한 연구가 더욱 활성화될 것으로 예상되며 충전지의 모델링 기법은 더욱 고도화되어 보다 정확한 측정과 충전방식이 가능하게 될 것이다. 충전지들에 대한 보다 정확한 정보와 충전지 관리 시스템의 발전은 미래의 전력 관리망의 발전에 큰 이바지를 하게 될 것으로 전망된다.

참고 문헌

- [1] 백요한, 강태환, 오성민, 오정훈, 조형연, "DC 배전망에서의 전기자동차 급속 충전 시스템", 전력전자학회 추계학술대회 논문집, pp. 211-212, 2010.
- [2] Ahmed Fasih and Giorgio Rizzoni, "Modeling and Fault Diagnosis of Automotive Lead-Acid Batteries", The Ohio State University. Department of Electrical and Computer Engineering Honors Theses; April 2, 2006.
- [3] Matthew A. Keyser, Ahmad Pesaran, and Mark M. Mihalic, and Bob Nelson, "Charging Algorithms for Increasing Lead Acid Battery Cycle Life for Electric Vehicles", 17th Electric Vehicle Symposium, Canada, pp. 16-18, 2000.