

산업용 연축전지의 잔존용량 산출 알고리즘(Algorithm)에 관한 연구

임규령, 전순용
 동양대학교 정보대학원 제어계측공학과

STUDY ON ALGORITHM FOR CALCULATION REMAINING CAPACITY OF INDUSTRIAL LEAD-ACID BATTERY

Gyu-Ryeong Lim, Soon-yong Chun

Dept. of Control & Instrumentation Engineering, Graduate School of information Dongyang U

Abstract - The proposed algorithm has produced the rules of relationship between the load voltage, current, discharging electric power and ampere-hours, electric power capacity of battery on the basis of the data. Which were acquired through the battery discharging experiment that is defined by the battery's ambient temperature and various load conditions. Especially, by calculating the parameter of second order polynomial equation relation between the remaining capacity and the electric power, the algorithm is proposed adapting for the discharging pattern. And as the depth of discharging is increasing, the calculation-method of electric power is applied to decrease the accumulated error in the calculation method of capacity accumulation. Also, the proposed algorithm has compensated the temperature considering the capacity change of battery to the temperature.

1. 서 론

산업용 연축전지는 축전지 중에서 가장 오래 된 전지로서 비교적 싼 가격으로 전지 제조가 가능하고 기술완성도가 높은 전지이다. 이러한 연 축전지는 자동차, 지게차, 비상전원 공급장치, 전기자동차, 태양전지, 발전용 등 다양한 부분에 적용되고 있다. 전기자동차에 사용되는 전지는 높은 저장능력을 필요로 하며 고(高)에너지와 고(高)전력밀도 외에도 장(長)수명, 고(高)충전효율을 추구하는 기술 개발이 계속되어왔다. 축전지 특성 파라미터 인식 그리고 축전지 각 셀 반응의 균일성 등은 이러한 연구에 있어 중요한 요소들로 볼 수 있다.^[1] 그러나 축전지의 전극재료, 제조기술 그리고 축전지와 관련된 실제 주변 사용환경이 다르기 때문에 방전전류, 방전심도, 사이클 수명과 같은 많은 요인이 축전지 잔존용량에 직접적으로 영향을 주게된다. 따라서 축전지를 사용하는 산업용 전동 시스템의 전기적 성능개선에 있어서 축전지의 잔존용량을 정확히 산출하는 것은 매우 중요한 사항이라고 말할 수 있다. 연축전지의 잔존용량 측정은 개회로 전압, 단자전압, 전해액 비중, 용량(AH ; Ampere hour) 측정 등과 같은 여러 방법들이 사용되어 왔으나 축전지의 전기 화학적인 복잡성 때문에 각 방법들은 실제적인 적용에 어려움이 있었다. 따라서 잔존용량 산출 알고리즘의 개발을 위해 축전지의 방전실험을 통해 전압, 전류, 온도 등의 DB를 구축하여 이러한 데이터를 토대로 용량(AH), 전력량(WH), 전력(W)과의 관계 규칙을 산출하고 해석하여 부하와 온도변화 등을 스스로 인식하고 축전지 잔존용량을 산출하는 개선된 알고리즘(algorithm)을 제안하였다.

2. 충전상태 측정

일반적으로 축전지의 충전상태(SOC : State of charge)를 정의하면 식(1)과 같다.

$$SOC = (Cr/Ct)100\% \text{-----(1)}$$

Cr : 잔존용량, Ct : 전체용량

Cr, Ct가 방전에 따른 미지수이므로 더 실제적인 정의는 식(2)와 같다.

$$SOC_1 = (1-Cu/Ct_1)100\% \text{-----(2)}$$

Cu : 만 충전 상태에서부터 사용된 용량

Ct₁ : 주어진 전류 I 에서의 전체용량

SOC₁ : 주어진 전류 I 에서의 SOC

충전상태를 측정하는 방법에는 전해액의 비중, 정상상태 개로 전압, 임피던스와 같은 항목을 직접 측정하는 방법 등이 있고, 간접적인 방법으로는 축전지의 모델을 이용하여 측정할 수 있다.

3. 연축전지의 DB구축 실험

본 연구는 축전지의 수명상태와 주변온도, 부하조건에 따른 축전지의 방전 특성에 대한 DB구축을 위해 각 계절별 방전환경 변화에 따른 방전특성을 얻기 위한 실험을 수행하였으며, 본 실험에서 얻고자하는 축전지에 대한 주요한 정보는 크게 다음의 3가지이다.

- 첫째 부하의 변화가 방전특성에 미치는 영향
- 둘째 주변의 온도 변화가 방전특성에 미치는 영향과 보상방법
- 셋째 단자전압, 전류, 방전용량과 방전전력량의 관계규칙 산출

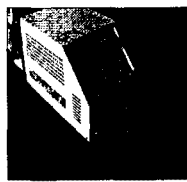


그림1. 실험용 축전지.

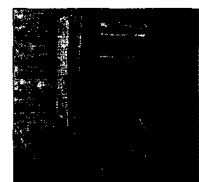


그림 2. 방전용 부하.

본 방전특성실험에서 축전지의 방전을 위한 충전은 그림 1 과 같이 20kHz, 6kVA급 충전기 1대를 이용하였으며 그림 2 는 방전용 부하로서 방전전류와 방전 종지전압을 자동으로 설정할 수 있도록 고안된 장치이다. 또한 실험에 사용한 축전지는 대표적인 산업용 운반수송장치인 전동지게차에 사용되는 대용량 연축전지(630AH)이다. 방전특성 실험에서 수행한 측정항목은 축전지의 단자전압, 비중, 축전지 주변온도, 부하전류이다. 표 1 은 실험결과를 요약한 것이며, 그림 3 은 축전지 단자전압과 전류와의 관계를 보여주며 방전전류가 클수록 부하단자 전압이 낮게 나타난다. 이는 축전지 내부저항에 의한 전압강하의 증가로 인한 것임을 알 수 있다.

그림 4 는 각 부하별 방전중의 모든 용량(AH)에 대한

전력량(WH)을 나타내며 용량 AH를 C 라 두면 식(3)과 같은 관계식을 갖는다.

$$WH = -0.0234 C^2 + 51.0977 C - 73.8498 \text{ -----(3)}$$

이것은 방전용량 C로부터 방전전력량 WH를 산출할 수 있음을 보여준다. 그림 5는 부하에 따라 방전 가능한 용량을 나타내며 방전중의 전압변화는 일반적으로 방전이 진행됨에 따라 서서히 하강하다가 어느 한도에 이르면 급격하게 하강한다. 이것은 부하변화가 심한 경우 그 값이 크게 변하므로 정확한 잔존용량을 산출하기가 매우 까다로워짐을 알 수 있다.

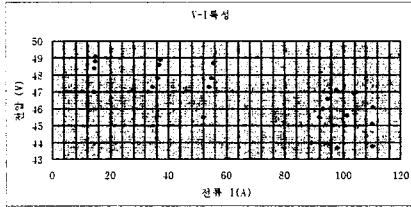


그림 3. V-I 특성.

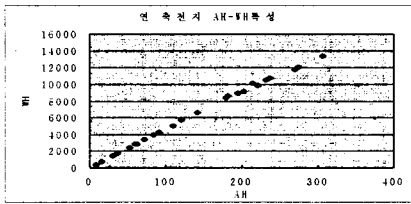


그림 4. AH-WH 특성.

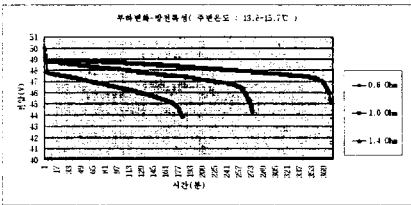


그림 5. 부하변화에 대한 방전 특성

4. 제안된 잔존용량 산출 알고리즘(Algorithm)

기존의 축전지시스템의 운전에 있어서의 잔존(殘存)용량은 축전지 전류의 시간적분에 의해 구한다. 축전지의 단자전압은 방전시의 전압과 충전시의 전압이 다르고 충전중, 방전중 시시각각 전압이 변화하기 때문에 잔존전력량을 단지 전력과 시간과의 곱으로 파악할 수 없다. 또한, 만(滿)충전 시에 있어서 방전가능 전력량은 열화(劣化)에 의한 축전지용량의 감소, 저항의 증가 등에 의해 감소한다. 따라서, 열화에 의한 방전가능 전력량의 감소를 파악하면서 축전지시스템의 관리를 행한 것이 바람직하다. 축전지의 방전용량(AH)과 방전전력량(WH)과의 관계는 2차 식으로 근사화 할 수 있으며 만 충전 상태에서 방전개시, 방전종료 및 방전중의 임의의 시점에 있어서 방전용량(AH) 및 방전전력량(WH)의 근사 식을 구하고 방전용량(x)과 방전전력량과의 사이(y)는 2차식, 즉 $y = Ax^2 + Bx$ 로 근사 관계식을 찾아내고 방전용량으로부터 방전전력량의 근사 값을 구한 다음 그 값을 방전가능 전력량으로부터 공제한 것에 의해 잔존전력량을 얻는다. 즉, 축전지시스템의 운전 중에는 항상 잔존전력량이 산출되고 잔존용량이 최종여유 용량 ΔWh 에 도달하면 방전은 종료한다. 방전용량의 값은 식(4)와 같이 방전단계에서 방전전류의 크기(I)의 시간적분 에 의해 구한다.

$$\text{방전용량 } X = \int I \cdot dt \text{ -----(4)}$$

또한 만 충전 상태에서 방전을 행한 시점에서는 새로운

근사 식의 계수를 구하여 잔존전력량(WH)을 구하면 주변온도의 변화뿐만 아니라 열화에 의한 만 충전시의 방전가능 전력량의 감소를 파악함으로써 정밀도를 높여 열화에 의한 오차를 피할 수 있다.

Load(Ω)	I(A)	V(V)	t(h)	P=VI(W)	t(Ah)	Temp.(℃)
0.4	110.3	46.1	1	5085	110	21.5
	110.2	45.8	2	4970	220	
	110.1	43.8	2.78	4822	306	
0.5	104.4	47	0.5	4907	52	19.0
	103.8	46.9	0.6	4868	62	
	101.3	43.7	2.75	4619	203	
0.6	97.9	47.1	0.86	4606	84	15.7
	94.7	46.6	1.5	4413	142	
	93.1	46	1.7	4283	196	
1	55.5	48.7	0.15	2703	8	14.5
	54.7	47.8	2.21	2615	121	
	54	47.3	3.31	2554	179	
1.4	37.2	48.9	0.97	1819	36	13.8
	37	48.6	1.93	1798	71	
	36.5	47.8	4.97	1745	181	
3.4	15	49.1	1.03	737	15	7.0
	14.8	48.8	2.06	722	30	
	14.5	48.4	4.08	702	59	
	14.3	47	6.36	672	91	

표 1. 방전특성 실험 데이터

$$\text{잔존용량 } J_{Ah} = Q - \int I \cdot dt \approx Q - \sum(I_T + I_{T-1}) \Delta t / 2 \text{ -----(5)}$$

$$\text{잔존전력량 } J_{Wh1} = [P - A(Q - J_{Ah})^2 - B(Q - J_{Ah})] \times M \text{ -----(6)}$$

Q : 잔존용량 정수, M : 방전심도 상수

P : 방전가능전력량, 잔존전력량 정수

그러나 방전 전력량을 추정하는데 있어서 용량적산방식은 방전심도가 깊은 영역에서 전류, 전압의 오차가 누적되어 커지고 전력연산방식은 방전심도가 낮은 영역에서 오차가 크다. 이러한 오차를 줄이기 위해 식 (6)와 (8)에서 처럼 방전심도 상수M을 삽입하여 방전심도 50%이전에는 용량누적 연산방식의 비중을 크게 하고 그 이후는 전력연산방식의 비중을 증가시켜 실제 시스템구현에 있어서 누적오차를 줄이도록 한다.

$$\text{방전심도 } DOD = dWh/P, M = 1 - DOD \text{ -----(7)}$$

$$\text{잔존전력량 } J_{Wh2} = [P - A_2(dVI)^2 - B_2(dVI)] \times (1 - M) \text{ -----(8)}$$

$$\text{방전전력 } dVI = V \cdot I \text{ -----(9)}$$

$$\text{방전심도에 따른 누적오차를 줄인 잔존 전력량은 : } J_{Wh} = J_{Wh1} + J_{Wh2} \text{ -----(10)}$$

방전 중 중간시점의 방전용량 dAH, 소비전력량 dWH, 방전전력 dVI가 데이터로 저장되며, 방전 종료될 때와 중간시점의 방전용량과 방전전력량, 방전전력과 방전전력량에 의해 근사 식 계수를 각각 구하고 만 충전시 또는 방전종료 시에는 잔존용량정수 Q, 잔존전력량 정수 P, 전력정수 W, 계수 A₁, A₂, B₁, B₂가 갱신(更新)되어 기억된다. 방전초기에서는 축전지 온도 T₁을 Sampling하여 T[℃]에서의 잔존용량정수 Q를 온도보상 값 Q(T₁)으로 조정하여 계산함으로써 온도 변화에 따른 잔존용량 오차를 줄이도록 하였다. 온도 T₁[℃]에서 보상된 잔존용량 정수는 식(11)으로 표현된다.

$$Q(T_1) = Q(T) / (1 + 0.005(T - T_1)) \text{ -----(11)}$$

$J_{Wh} > \Delta Wh$ 방전 가능상태, $J_{Wh} = \Delta Wh$: 방전종료
그림 7은 앞서 제안한 잔존(殘存)용량 산출 흐름선도를 나타낸다.

5. 사례연구 및 고찰

연 축전지 방전 실험에서 부하를 변화시키면서 동일한 실험을 반복하여 얻은 데이터에서 MATLAB의 Curve Fitting 함수로 그림 6과 같은 곡선 결과를 얻었다. 즉, 부하변화에 따라 방전전력의 범위가 결정되고 그에 따른 방전용량이 그림 6의 (a)~(f)와 같이 VI-AH곡선에

따라 결정되고 그림 8 과 같이 전 범위의 AH-WH관계 곡선으로부터 근사 식을 구할 수 있으며 이것은 임의의 시점에서의 임의의 축전지의 잔존전력량을 결정하는 근사 식의 계수를 얻을 수 있었으며 실험 데이터로부터 VI-AH 관계 계수를 찾아서 산출 식에 적용함에 의해 방전용량을 구하여 실험 값과 비교 검증하였다.

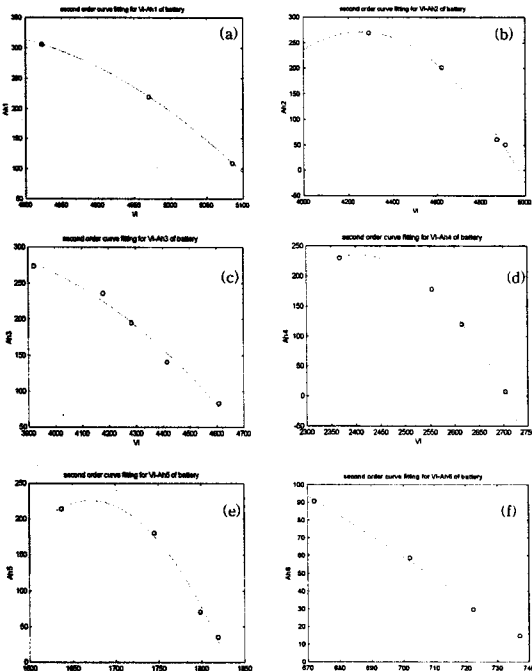


그림 6. 축전지의 VI-AH 관계 2차 근사 곡선(a)-(f) (by MATLAB) ---- : 계산값, ○ : 실험값

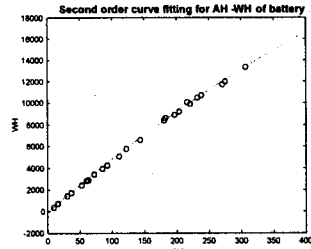


그림 8. 축전지의 AH-WH 관계2차 근사 곡선

실제 시스템 구현에 있어서 만(滿)충전 용량 계수Q, P, 및 근사화 계수A₁, A₂, B₁, B₂는 항상 최근에 저장된 방전이력(履歴) 데이터에 의해 스스로 계산할 수 있으므로 열화에 의한 축전지의 변화에도 적용하게되는 정밀도가 개선된 잔존용량 산출 방법이다.

6. 결론

본 논문에서는 연 축전지의 방전실험을 통해 전압, 전류, 온도 등의 DB를 구축함으로써 용량, 전력량, 전력과의 관계규칙을 구하여 잔존용량을 산출하는 알고리즘을 제안하였다. 본 연구에서 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다. 본 논문에서 제안한 알고리즘을 적용한 결과의 오차가 ±1% 이내로서 기존 ±5% 수준인^[5] 잔존 용량 산출 방식에 비해 개선되었다.

첫째 최근에 저장된 방전이력(履歴) 데이터 값과 현재의 방전중의 전압, 전류 데이터를 근거로 잔존용량과 잔존 전력량의 2차 근사 식의 계수를 스스로 계산함으로써 방전패턴에 적용하는 알고리즘을 제시하였다. 둘째 용량 누적 연산방식의 시간에 따른 누적오차를 감소시키기 위해 방전 심도에 따라 전력연산 방식을 병행 적용하여 오차를 개선하였다. 셋째 온도에 대한 용량변화를 고려하여 온도보상을 수행하고 항상 최근의 방전이력 데이터가 저장되어 계산되므로 열화에 의한 축전지의 변화를 관찰할 수 있는 방식을 제시하였다.

(참 고 문 헌)

[1]Han Xiaodong, Du Yu, Chen Quanshi, "Automatic monitoring system of traction battery for electric vehicle" Tsinghua University (1998)

[2]전순용 외, "고주파스위칭방식의 고효율 충전기 개발에 관한 최종보고서", 산업자원부 (1999)

[3]C.C. Chan, E.W.C.LO, Shen Weixiang, "An overview of Battery Technology in Electric Vehicles" University of Hong kong, China (1998)

[4]C.W.De Kreuk, P.J. Van Duin, "A computer model for the determination of the residual capacity of(lead-acid) batteries", The 11th International Electric Vehicle Symposium Second Volume Sessions 11-01, Italy (1992)

[5]Chaolei Xin, Xiaomin Sun, Guoguang Qi, "Development of Intelligent Controller for Electric Bicycle with Levelling Charging and Practical Battery SOC Tracing Algorithm", Tsinghua University, China (1998)

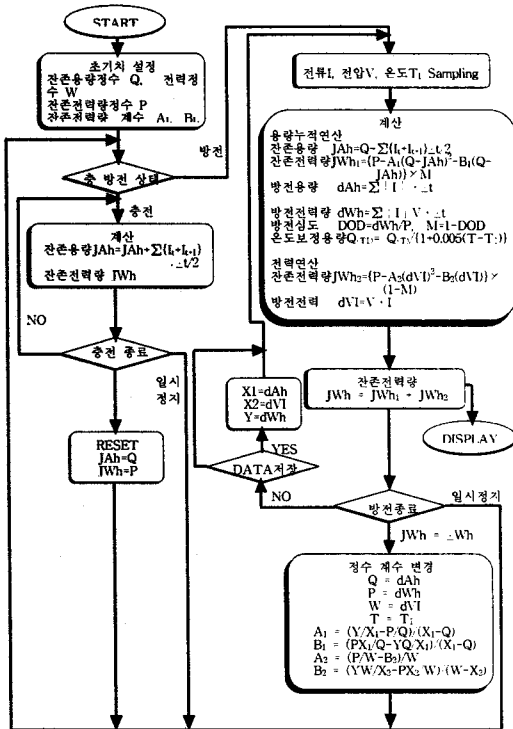


그림 7. 잔존(殘存)용량 산출 흐름선도