

축전지 관리시스템(BMS)을 위한 건강상태(SOH) 진단방법

金孝城[†]

Diagnosis of State Of Health(SOH) for Battery Management System(BMS)

Hyosung Kim

요 약

현대사회에서 축전지라 불리우는 2차 전지는 그 용도가 중요하지만, 비선형적이고 다양한 파라메타에 따른 복잡한 특성 때문에 그 사용법에 있어서 발전에 제한을 받아왔다. 각 축전지 셀의 건강상태(SOH)를 실시간으로 정확히 파악하는 것은 장비의 안정된 운전과 원활한 관리를 위하여 필수적이다. 본 논문에서는 축전지의 내부컨덕턴스를 측정하는 간접적인 방법에 의하여 장비의 운전이나 축전지의 수명에 영향을 주지 않고 납축전지의 건강상태(SOH)를 실시간으로 진단하는 방법을 제시하고, 실제로 120개의 납축전지에 대한 컨덕턴스 자료에 의하여 건강상태를 진단하고 교체시기를 판단한다.

ABSTRACT

Although secondary batteries, called rechargeable batteries, are very important energy elements in modern society, their application is hindered by the typical nonlinear and irreversible characteristics. Precise monitoring of the state of health (SOH) for each battery cell on line is crucial for stable operation and proper management of them. This paper proposes diagnostic method of the SOH for a battery cell on line without interruption on its operation nor bad effect on its life. This paper practically diagnoses on 120 industrial batteries and provides some guide lines to decide whether to exchange or not.

Keywords: Rechargeable battery, Conductance, State of Health (SOH), Battery management system (BMS).

1. 서 론

전지에는 한번 사용하면 폐기해야 하는 1차 전지와 납축전지와 같이 재충전을 통하여 반복적으로 사용 가능한 2차 전지가 있다. 2차 전지는 통상적으로 축전지라고도 불리우며 가역적인 특성 때문에 다양한 전기 및 전자 장비에서 그 용도가 중요하지만, 비선형적이고 다양한 인수에 따른 복잡한 특성 때문에 기술적인 접근이 용이하지 않으며^[1], 축전지의 화학적 구성에 따

라 그 사용법이 편이하게 달라서 폭넓은 기술적 응용에 제한을 받고 있다^[2].

각 축전지 셀의 건강상태(SOH)를 실시간으로 정확히 파악하는 것은 장비의 안정된 운전과 원활한 관리를 위하여 필수적이다. 본 논문에서는 축전지의 정격 충전용량에 대한 실제 축전지의 충전가능용량을 축전지의 건강상태(SOH)라고 정의한다. 축전지의 건강상태(SOH)를 진단하기 위한 기존의 방법은 완충전된 축전지를 일정한 방전전류로 일정한 조건, 예를 들어 12V 납축전지의 경우 10.5V의 방전종지전압에 이르기까지 방전시키면서 총 방전 전하량을 측정하는 것이었다^[3]. 이러한 방법은 장비의 운전 중에 실시하기 어려울 뿐만 아니라, 방전실험 자체가 축전지의 수명을

[†]교신저자 : 정회원, 국립공주대학 전기전자공학부 교수
E-mail : hyoskim@kongju.ac.kr
접수일자 : 2006. 9. 1 1차 심사 : 2006. 10. 7
심사완료 : 2006. 10. 12

단축시키는 문제를 갖고 있다.

이러한 문제점을 개선하기 위하여 축전지의 내부컨덕턴스를 측정하여 건강상태를 간접적으로 평가하고자 하는 연구가 있다^[4-6] 또한 IEEE 기술기준위원회에서는 IEEE Std 1188-1996의 기술기준을 통하여 납축전

지의 내부임피던스를 측정함으로써 간접적이고 비파괴적인 방법으로 납축전지의 교체시기를 판단할 수 있는 방법을 추천하였다^[7].

이에 따라 축전지의 임피던스나 컨덕턴스를 측정하는 장비에 관한 연구도 활발히 연구되어서 측정기술에

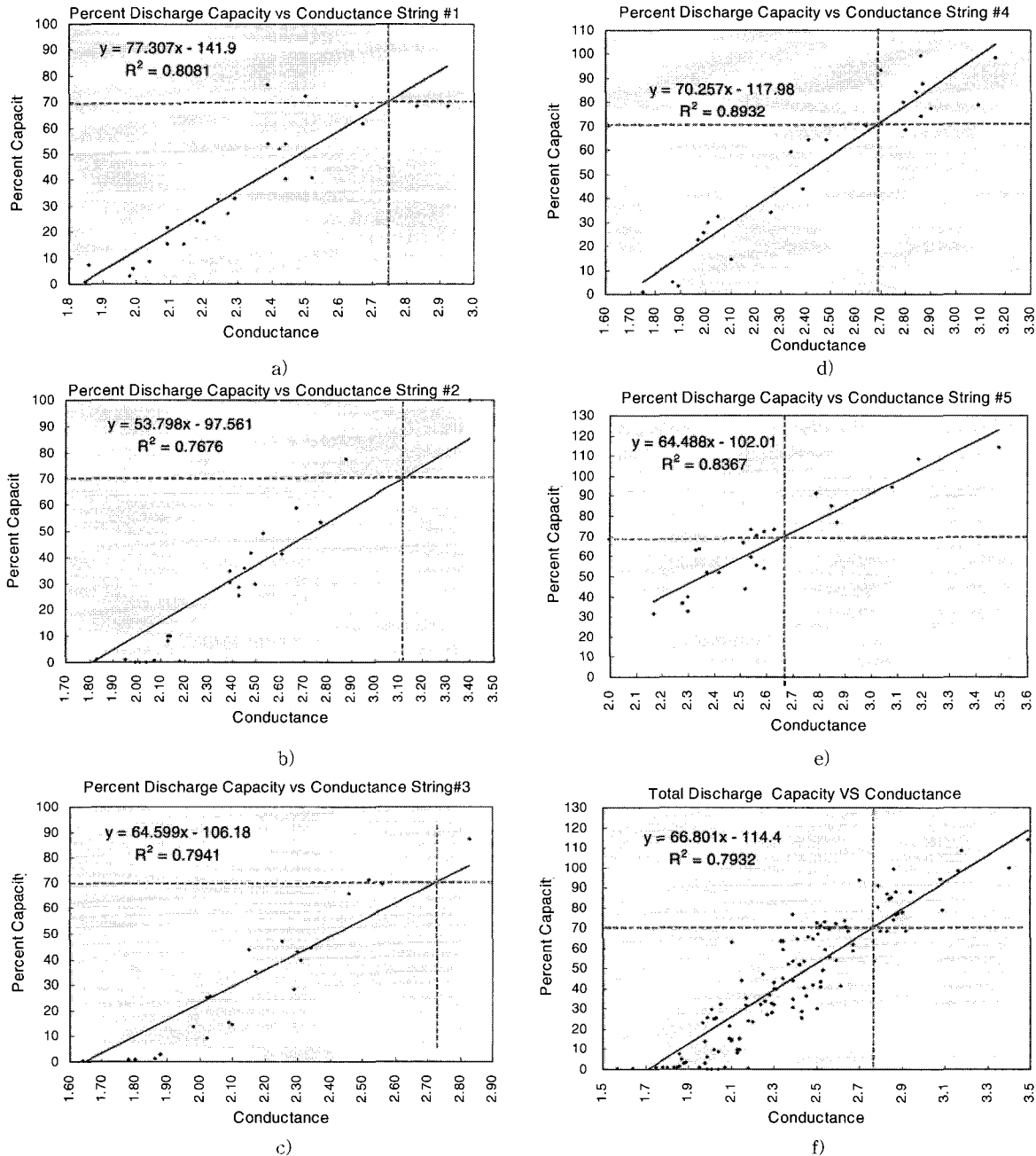


그림 1 5개 납축전지 그룹의 컨덕턴스와 건강상태(SOH)의 상관관계; a) 1그룹, b) 2그룹, c) 3그룹, d) 4그룹, e) 5그룹, f) 총합.

Fig. 1 Correlation between conductance and SOH of 5 lead acid battery groups; a) group 1, b) group 2, c) group 3, d) group 4, e) group 5, f) total battery cells.

서도 상당한 발전이 이루어 졌다^[8,9]. 축전지의 내부임피던스는 축전지의 건강상태와 반비례적인 관계를 갖는 반면 축전지의 컨덕턴스는 상대적으로 비례관계를 보이므로 축전지의 건강상태를 시각적으로 판단하기에 좋은 점이 있다.

축전지의 컨덕턴스가 축전지의 건강상태(SOH)와 관련성이 높기는 하지만, 동일한 제조사에서 생산한 동일한 정격의 축전지 그룹이라 하여도 같은 SOH에 대한 초기 컨덕턴스값 자체에는 각기 상당한 편차가 존재한다. 더욱이 비슷한 초기 컨덕턴스를 갖는 축전지들도 초기충전이나 초기운전조건 등이 달라짐에 따라, 축전지의 운전초기에 동일한 SOH에 대하여 상당히 다른 컨덕턴스 값으로 편이하기도 한다^[5]. 따라서 SOH를 평가하기 위한 기준컨덕턴스는 운전조건을 같이 하는 축전지 그룹에 따라 상당히 차이가 발생한다.

본 논문에서는 축전지의 내부컨덕턴스를 측정하는 간접적인 방법에 의하여 장비의 운전이나 축전지의 수명에 영향을 주지 않고 납축전지의 건강상태(SOH)를 실시간으로 진단하는 실제적인 방법을 제시하고, 실제로 120개의 납축전지에 대한 컨덕턴스 자료^[5]에 의하여 건강상태를 진단하고 교체시기를 판단한다.

2. 축전지의 컨덕턴스와 SOH

2.1 컨덕턴스와 SOH의 상관관계

그림1은 각각 24개의 48V 납축전지로 구성된 5개 축전지 그룹의 컨덕턴스와 SOH 간의 상관관계 그래프를 보인다. 이 축전지들은 전화국에서 약 5년 내지 6년간 사용된 48V/1000Ah 규격의 valve regulated lead acid (VRLA) absorbed glass mat (AGM) 타입으로서 총 120개의 셀로 구성되어 있다^[5].

도표상에 점으로 찍혀진 부분은 각 축전지의 컨덕턴스 값과 실제방전실험을 통해 얻은 SOH값(%)이다. 측정점들의 중심을 가로 지르는 실선은 최소자승법으로 구한 추세선 (regression line)으로서 축전지들의 컨덕턴스와 SOH 간의 상관 함수관계를 나타낸다. 각 그룹 축전지들의 컨덕턴스와 SOH의 상관계수는 대략적으로 0.8정도이다. 상관계수가 1인 경우, 모든 측정점들은 추세선과 완전히 일치할 것이다.

접선으로 표시된 수평선은 축전지의 불량여부를 판단하기 위한 기준으로, 본 논문에서 건강상태(SOH)가 70%인 값을 기준으로 하였다. 참고적으로 IEEE 1188-1996 에서는 SOH가 80%인 값을 납축전지 교체의 기준으로 추천한다. SOH가 50%인 납축전지는 1년

이내에 SOH가 20%이하로 급격히 감소할 가능성이 높으므로 위험의 요인이 매우 크다^[4].

만일 각 축전지그룹에서 추세선 자료를 확보하여 SOH가 70%에 해당하는 기준컨덕턴스 값을 정확히 알고 있다면, 컨덕턴스에 의한 축전지의 불량여부 판단 결과는 표1과 같게 될 것이다.

표1에서 양호판정 성공률은 실제로 70%이상의 SOH 값을 가지고 있는 축전지 중에서 기준컨덕턴스에 의하여 양호로 판정된 축전지의 비율을 의미한다. 한편 불량판정 성공률은 실제로 70% 미만의 SOH값을 가지고 있는 축전지 중에서 기준컨덕턴스에 의하여 제대로 불량으로 판정된 축전지의 비율을 의미한다. 전체판정 성공률은 실제 양호한 축전지 및 실제 불량한 축전지가 기준컨덕턴스에 의하여 각기 제대로 양호 및 불량으로 판정된 비율을 의미한다. 전체판정성공률이 90%로서 축전지 내부컨덕턴스에 의한 건강상태 판정법은 이론적으로 상당히 실용성이 있는 것으로 사료된다.

표 1 추세선에 따른 기준컨덕턴스에 의한 SOH 판단 결과
Table 1 SOH decision result according each reference conductance from each regression line

축전지 그룹	컨덕턴스 기준(kS/%)	양호판정 성공률(%)	불량판정 성공률(%)	전체판정 성공률(%)
1	2.74 / 87.6	0	91	83
2	3.11 / 84.8	50	100	96
3	2.73 / 84.8	50	100	96
4	2.68 / 86.2	90	93	92
5	2.67 / 85.1	64	100	83
전체	2.76 / 86	67	97	90

표1에 보이지는 않았으나 실패율은 100-성공율(%)로 계산하면 된다. 양호판정 실패율은 아직도 사용할 수 있는 건강한 축전지를 폐기하는 결과를 초래하므로 축전지관리의 비용부담 (cost overhead) 요인이 된다. 한편 불량판정 실패율은 필요한 상황에서 축전지가 동작하지 못하는 사고로 연결될 가능성을 높이므로 사고부담 (risk overhead) 요인이 된다.

70%의 SOH 선과 추세선의 교점에 의하여 결정되는 기준 컨덕턴스 값은 납축전지 그룹에 따라 조금씩 차이가 있는 것을 볼 수 있다. 이는 서론에서 언급한 바와 같이 같은 제조사에서 출고한 같은 종류의 납축전지라 하여도 그룹의 운전조건과 충방전 회로의 특성에 따라 컨덕턴스의 분포가 달라지는 것으로 사료된다.

각 축전지 그룹의 추세선에서 볼 때, 100%의 SOH에서의 컨덕턴스 값에 대한 70%의 SOH에서의 컨덕턴

스 값의 백분율은 각 축전지 그룹에 따라 84.8-87.6%로서 약간의 차이가 존재한다. 그러나 모든 축전지를 종합한 추세선에서 볼 때, 70%의 SOH에 대한 기준 컨덕턴스 값은 100%의 SOH에 대한 컨덕턴스에 비하여 86%의 값을 갖는 것을 알 수 있다.

2.2 기준컨덕턴스의 결정방법

앞 절에서 서술한 추세선에 따른 기준컨덕턴스에 의한 축전지의 불량여부 판단은 이상적인 경우로서 실제적이지 못하다. 왜냐하면 각 축전지 그룹마다 추세선을 구하기 위해서는 각 그룹 내의 모든 축전지들에 대하여 방전시험을 수행하여야 하기 때문이다. 이는 축전지의 수명에 영향을 줄 뿐만 아니라, 현장의 축전지 관리자에게 상당한 기술적 숙련과 복잡한 업무가 요구되며, 온라인으로 운영되는 축전지의 경우는 적용될 수 없다.

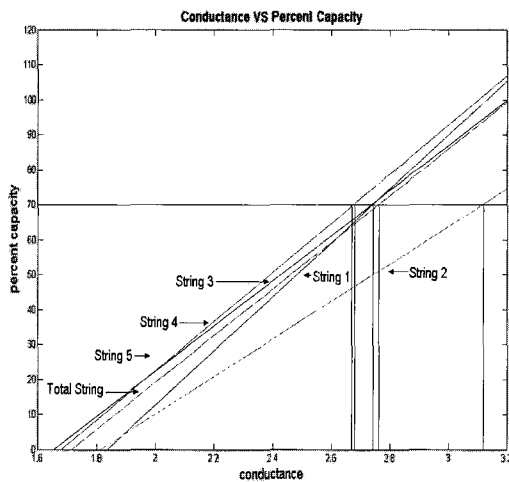


그림 2 각 그룹에 따른 추세선의 차이
Fig. 2 Regression lines from each battery group.

여러 축전지그룹을 운영하는 경우 대표적인 한 그룹에 대하여 추세선을 구해서 기준컨덕턴스를 도출하는 방법도 있으나^[4], 그림 2와 같이 각 그룹에 따른 추세선의 편차가 심한 경우 적용될 수 없다.

따라서 실시간으로 각 축전지그룹에 적절히 적용될 수 있는 기준컨덕턴스를 결정하는 방법을 개발하여야 한다. 본 논문에서는 기준컨덕턴스를 추정하는 기초적인 방법으로 다음의 3가지 방법을 제시하고 평가결과를 비교한다.

- ① 각 축전지 그룹마다 그룹 내의 최대 컨덕턴스 값을 100%의 컨덕턴스로 가정하여 기준으로 적용.
- ② 모든 그룹 중에서 가장 큰 컨덕턴스 값을 100%

의 컨덕턴스로 가정하여 공통기준으로 적용.

- ③ 각 축전지 그룹의 최대 컨덕턴스 값을 평균한 값을 100%의 컨덕턴스로 가정하여 공통기준으로 적용.

축전지 전체의 추세선에 따른 경향을 볼 때 남축전지의 70% SOH에 해당하는 기준컨덕턴스는 약 86%이므로, 위의 기준컨덕턴스에 86%를 적용하여 각 축전지그룹의 양부 판정기준으로 한다.

3. SOH 평가결과

표2에 제안된 방법에 따른 SOH평가결과를 보인다. 표2에서 기준오차는 각 방법에 따라 추정된 기준컨덕턴스와 추세선에 따른 이상적인 기준컨덕턴스간의 차이로서 다음 식과 같이 정의 한다.

$$\text{기준오차} = \frac{\text{추정된기준컨덕턴스} - \text{이상적인기준컨덕턴스}}{\text{이상적인기준컨덕턴스}} \times 100[\%]$$

종합적으로 볼 때, 컨덕턴스의 기준오차가 가장 작은 ③의 방법이 전체판정성공률 89%로서 가장 좋은 결과를 보인다. 이는 표1의 이상적인 경우인 90%에 비하여 1%의 차이 밖에 없는 좋은 결과이다.

표 2 제안된 방법에 따른 SOH평가결과
Table 2 SOH Evaluation Result According to The Proposed Method

평가 방법	그룹	기준오차 (%)	양호판정 성공률(%)	불량판정 성공률(%)	전체판정 성공률(%)
①	1	-8.4	0	77	71
	2	-6.1	50	100	96
	3	-11.0	100	91	92
	4	1.5	80	93	88
	5	12.4	27	100	67
	전체	7.9	52	92	83
②	1	9.5	0	91	83
	2	-3.5	50	100	96
	3	9.9	0	100	92
	4	11.9	20	93	67
	5	12.4	27	100	67
	전체	9.4	22	98	81
③	1	-0.8	0	91	92
	2	-12.6	100	95	96
	3	-0.5	50	100	92
	4	1.4	80	93	67
	5	1.8	64	100	67
	전체	3.4	67	96	89

②의 방법은 ③의 방법에 비하여 전체적으로는 판정 성공률이 8%정도 떨어지지만 불량판정성공률은 98%

로서 오히려 이상적인 경우보다 더 좋은 결과를 보인다. 이는 전반적으로 기준컨덕턴스를 높게 잡아줌으로써 가능해 지는 것이다. 이러한 판정법은 축전지 관리에 있어서 비용부담(cost overhead)을 감수하더라도 사고부담(risk overhead)을 줄이고자 하는 경우 채택하면 좋을 것이다.

4. 결 론

본 논문에서는 축전지의 내부 컨덕턴스 값에 의한 납축전지의 SOH판단방법을 제시하였고, 기준 컨덕턴스를 결정하는 실제적인 몇 가지 방법들을 제안하고 결과를 비교하였다. 제안된 축전지 건강상태 진단방법을 검증하기 위하여, 약 5년 내지 6년간 사용된 48V/1000Ah 규격의 VRLA/AGM 타입의 납축전지 120개에 대한 컨덕턴스 값 및 충전용량 데이터^[5]를 사용하여 분석을 수행하였다. 제안된 SOH진단방법에 따른 축전지관리시스템의 비용부담적인 측면과 사고부담적인 측면을 고찰하였으며, 진단오류를 줄이기 위한 기준컨덕턴스 설정 방법과 사고부담을 줄이기 위한 기준컨덕턴스 설정 방법을 도출하였다.

본 연구는 (주) 씨엠파트너의 지원에 의하여 연구되었으며 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] Eckhard Karden, Using low-frequency impedance spectroscopy for characterization, monitoring, and modelling of industrial batteries, Doctoral thesis at RWTH Aachen University (ISEA), Shaker Verlag 2002.

[2] G. Helles, "Rechargeable Batteries: Basics, Pitfalls, and Safe Recharging Practices," Application Note 3501, Dallas MAXIM Semiconductor, March 21, 2005: <http://www.maxim-ic.com/an3501>.

[3] U Charge™ Family Datasheet, Valance Technology, Inc.: <http://www.valance.com>

[4] D. Feder, T. Croda, K. Champlin, M. Hlavac, "Field and Laboratory Studies To Assess the State Of Health Of Valve Regulated Lead Acid Batteries," Proceeding of 14th International Telecommunications Energy Conference, pp.218-233, 1992.

[5] M. Hlavac, D. Feder, "VRLA Battery Conductance Monitoring," Proceeding of 18th International Telecommunications Energy Conference, pp.632-639, 1996.

[6] M. Kniventon, A. I. Harrison, "Impedance/ Conductance Measurements as an Aid to Determining Replacement Strategy," Proceeding of 20th International Telecommunications Energy Conference, pp.297-301, 1998.

[7] IEEE Recommended Practice for Maintenance, Testing and Replacement of Valve Regulated Lead Acid (VRLA) Battery for Stationary Application, IEEE Std 1188-1996, 1996.

[8] K. S. Champlin, "Method and Apparatus for Measuring Complex Impedance of Cells and Batteries," United States Patent No. 6,002,238, Dec. 14. 1999.

[9] C. O. Yoon, Y. Barsukov, J. H. Kim, "Method and Apparatus for Measuring Battery Capacity Using Voltage Response Signal Based on Pulse Current," United States Patent No. 6,118,275, Sep. 12. 2000.

저 자 소 개



김효성(金孝城)

1958년 10월 20일생. 1981년 서울대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 충북대 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1996년~1997년 일본 오까야마대학 방문교수. 2000년~2001년 덴마크 Aalborg대학 방문교수. 1987년~현재 국립공주대학 전기전자공학부 교수. 당 학회 편집위원.