

독립형 풍력발전 시스템용 축전지 운전 특성 및 노화평가 시험

김희중                      추천홍                      이준현                      송승호 신찬 김동용  
 세방전지(주)              창원대학교              부산대학교              전북대학교              차세대 풍력발전 연구센터

Investigation of Thermal Aging Effect of Battery for Stand-Alone Type Wind Power Generation system.

Hi-Jung Kim,              Chan-Hong Ju,              Jun-Hyun Lee,              Seung-Ho Song, Chan Shinn, Dong-Yong Kim  
 Global & Yuasa Battery Co.   ChangWon Nati'l Univ.   Pusan Nati'l Univ.   Chonbuk Nati'l Univ.

**Abstract** - 대체 에너지(태양광, 풍력등)의 전력저장 시스템으로 널리 사용되는 겔형(Gel Type) 밀폐형 납축전지의 노화 특성 평가 및 충전회로에 관하여 연구하였다. 납 합금을 이용한 기판 주조 기술과 전해액(Gel) 배합 기술이 축전기 성능과 수명을 좌우하며 또한 배터리 충전 시스템에 따른 온도 상승이 치명적인 영향을 미치게 된다. 따라서 본 연구에서는 적외선 열화상 장치를 이용한 내부 열원 추적에 의해 노화정도를 측정하며 축전지 수명시험을 통해 입수한 데이터와 비교 평가하고자 한다. 현재 실험실 추방전 수명시험을 마치고 (주)코원텍이 부안 해상 공원에 설치한 30kW급 풍력발전 시스템에 적용하여 Field Test를 시험중이다.

1. 서론

대체 에너지(태양광 발전, 풍력 발전 및 전력저장시스템 등)용 Gel Type 밀폐형 납축전지(Valve Regulated Lead Acid battery, 이하 VRLA 전지라 칭함)는 납합금을 이용한 기판(grid) 주조(casting) 기술과 전해액인 Gel 배합 기술이 축전지의 성능과 수명을 좌우하며 최적 시스템 운용을 위한 에너지 축전(蓄電) 부문에서는 축전지의 노화(failure) 진행 정도 파악 기술이 가장 핵심 기술이라 하겠다.

현재 세계적으로 대체에너지 시스템용 축전지는 무인(無人)운전과 원격지 컨트롤이 가능하도록 밀폐형 축전지를 적용하고있는 추세이다. 이러한 밀폐형 축전지중 본 연구에서는 특히, 10년 이상의 전지 수명을 가진 Gel Type 밀폐형 연축전지의 Failure Mode에 대해서 검토하고자 한다.

Gel Type 밀폐형 연축전지는 기존의 개방형 액식 연축전지(Flooded type)의 구조와는 달리 전해액을 Gel상으로 고형화시켜 전해액(電解液, Electrolyte)이 누액 되는 현상을 방지하고, 산소재결합(Oxygen recombination) 원리를 이용하여 과충전(過充電, Overcharge)시 양극에서 발생하는 산소를 음극에서 발생하는 수소와 재결합시켜 다시 물로 환원시킴으로서 전해액의 손실을 최소화 시켜 사용 중 정제수의 보충이 필요 없는 무보수(Maintenance free) 전지를 말한다.

이러한 밀폐형 연축전지는 충전 시스템에 따라 수명 및 성능에 치명적인 영향을 미친다. 따라서 최상의 시스템 운용을 위해서는 최적 충전시스템 설계가 필수적이며 이에 따른 적합성 여부는 축전지의 노화정도를 측정하여 평가하므로 다양한 부하조건에 따른 최적 시스템 설계가 가능하다.

이를 위해 본 연구에서는 비파괴 검사 기법의 일종인 적외선 열화상(IR SnapShot Model 525) 측정 장치를 이용하여 VRLA/GEL 전지 내부에서 발생하는 열원을 추적하여 축전지의 노화 진행 정도를 파악하며 이들 결과와 수명 시험을 통해 입수된 정보를 이용하여 충전시스템과 축전지의 노화속도를 비교 평가 하고자한다.

더불어 본 연구에서는 IR 기법을 이용하여 시스템 운용중 축전지의 미세한 열적 동질성을 쉽게 감지할 뿐만 아니라,

전지의 충전·방전 동안에 발생하는 열 발생의 동적인 해석을 통해 재료 내부의 특성 변화를 평가하고자 한다.

2. 배터리 특성 및 측정

2.1 밀폐형 연축전지의 기본이론

밀폐형 연축전지는 그림 1에서 보여주는 바와 같이 기존의 개방형 연축전지(Flooded type)의 구조와는 달리 전해액을 흡수하는 격리판(separator)을 사용한 AGM Type 전지(Absorptive glass mat separator를 사용한 전지)와 전해액을 겔상의 고형화 형태로 만들어 전해액이 누액되는 현상을 방지하고 산소재결합(Oxygen recombination)원리를 이용하여 과충전시 양극에서 발생하는 산소를 음극에서 발생하는 수소와 재결합시켜 다시 물로 환원시킴으로서 전해액의 손실을 최소화 시켜 사용 중 정제수의 보충이 필요없는 무보수(Maintenance free) Gel Type 전지를 말한다.

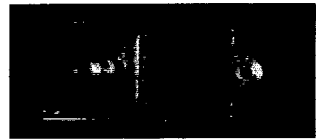
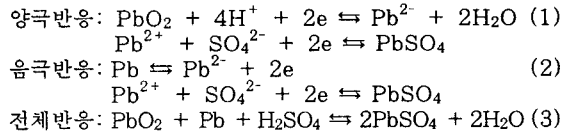


그림 1 축전지 양극과 음극 조립도

연축전지를 밀폐화하기 위해서는 내부에서 발생하는 기체를 전지 내부에서 다시 소모시킴으로써 내부 압력의 상승 및 이로 인한 전해액 고갈을 막을 수 있어야 한다. 연축전지는 충전시 양극에서 황산납이 이산화납(Porous PbO<sub>2</sub>)으로 산화되고, 음극에서는 황산납이 해면상의 납으로 환원된다. 또한 방전(Discharge)시 양극에서는 이산화납이 환원(Reduction)되고 음극에서는 금속납이 산화되어 두 전극 모두 황산납(PbSO<sub>4</sub>)을 생성하게 된다. 이를 일반적인 반응식으로 나타내면 다음과 같다.



또한 양극에서는 충전이 상당히 진행됨에 따라 산소가 발생되며, 충전이 완료될 시점에서는 산소만이 발생되게 된다. 이렇게 발생하는 산소와 수소는 전지 내부 압력의 증가를 야기하며, 이 기체를 외부로 내보내야 하는데 이는 전해액 감소의 원인이 된다. 따라서 밀폐전지는 산소재결합(Oxygen recombination)원리를 이용해 수소와 산소의 재결합 반응을 전지내에서 일으킴으로써 전해액 감소를 억제시키며 결국 수명을 증대시킬 수 있다.

## 2.2 열 발생(Heat evolution)

일반적인 연축전지(lead-acid batteries)와 산소 재결합 반응이 일어나는 VRLA 전지에서 충·방전 과정 동안에 전지 내부에서는 열 발생이 수반된다. 고율(Low rate) 방전 및 연축전지 노화 mode에서는 열발생 효과를 나타낸다. 이러한 효과의 주요 열 원인은 Joule heating과 반응열이다.

즉, Joule heating( $W_s$  또는  $J$ )

$$Q = I \Delta V \Delta t \quad (4)$$

여기서  $I$ 는 A에서 부동 충전 전류(Float charging current)이고,  $\Delta V$ 는 전지 개회로(open circuit) 전압이며,  $\Delta t$ 는 경과 시간이다.

열 발생은 ( $W_s$ )

$$Q = T \Delta S \quad (5)$$

여기서,  $T$ 는 °K와  $\Delta S$ 에서 반응 엔트로피(entropy)이다.

2.23V/cell의 부동 충전 설정 전압과 가스 재결합 현상이 있는 밀폐형 연축전지에서 전지는  $2.23V \times I(A)$ 의 비율로 에너지가 공급되고, 빠져나가는 전기분해 가스(gas)는  $1.48V \times I(A)$ 에너지를 전달한다.

이러한 방법에 의해 부동 충전중 발생하는 에너지의 34%는 열을 발생하기 위하여 전지 내부에 존재한다. 산소 재결합을 하기 위하여 VRLA 전지들은 부동 충전 상태 보다 더 높은 부동 전류(mA/Ah)들을 가진다. 특히, 배출되는 가스(gas)는 없고, 모든 충전 에너지는 전지 내부에 남아있으며, 열로 변환되는 것이다. 한편, VRLA전지는 고온에서 작동될 경우, 열 관리에 대해서 신중한 주의가 필요하다.

VRLA/GEL 전지는 열화상 시스템으로 다른 운용 조건에 따른 온도의 주위 분포를 파악하고 방사·대류·전도를 통하여 열 낭비를 막기 위한 연구 역시 주목받고 있다.

## 2.3. 열화상 시스템(Thermal video imaging system)

적외선 방사(Infrared radiation)는 가시광선과 마이크로파 방사 사이에 위치한  $0.8 \sim 10000 \mu m$  파장을 가진다. 전지 외부에서 나오는 방사는 강도(Intensity)와 온도에 특별한 관계를 가진다.

block-body 방사의 경우, 그 관계는 다음과 같다.

$$W = \sigma T^4 \quad (6)$$

여기서,  $W$ 는 IR방사에너지( $W \cdot cm^2$ )이다.

$T$ 는 °K에서 절대온도이고,  $\sigma$ 는 Stefan-Boltzmann 상수이다. 물체의 표면의 온도가 높으면 높을수록, IR방사는 더 많아진다. 이 방사의 강도는 표면상태와 물질 성질과 같은 특징에 의존한다. 동일 표면온도에 전지는 동일 IR 방사량을 나타내지 않으며, 방사율( $\epsilon$ )도 동일하지 않으며 다음과 같이 정의된다.

$$\epsilon = 1 - (\tau + \Gamma) \quad (7)$$

$\epsilon$ 는 방사율,  $\tau$ 는 투과율,  $\Gamma$ 는 반사력이다.

예를 들면, 연마한 알루미늄(Al)에 대해서  $\epsilon$  값은 0.09를 나타내며  $PbO_2$ 는 0.20~0.45, 종이는 0.80, 플라스틱(Plastics)에 대해서 0.85~0.91을 나타낸다.

물체의 온도와 방사 사이의 관계는 아래와 같이 정의된다.

$$W = \epsilon \sigma T^4 \quad (8)$$

$\epsilon$ 는 방사율,  $\sigma$ 는 Stefan-Boltzmann 상수,  $T$ 는 절대온도(°K)를 나타낸다.

열화상 시스템은 물체의 각각의 점에서 방사되는 IR에너지를 감지하고, 온도값으로 변환하며, 온도가 다르면 색깔의 차이로 표현하여 화면으로 나타낸다. 이러한 시스템의 광자(光子) 탐지기는 IR 에너지를 흡수하고, 원자 상태와 반도체 감지기 내부에 자유 전자에 영향을 준다. 주어진 에너지가 자유 전자를 방출하고, 충전하기 위하여 필요하다. 일반적으로 탐지기 반응은 광자 파장에 의존하며 일반적인 IR 방사 탐지기는 Si, InAs, InSb이다.

Hg, Cd, Te 원소는 IR 온도 기록을 위하여 사용된 대기( $3 \sim 5 \mu m$ 와  $8 \sim 14 \mu m$ )의 2개의 주요한 스펙트럼 창(windows)을 가진다.

IR 열화상 시스템은 전형적으로 다음과 같이 구성한다.

1. 실리콘 창/렌즈, 선(line) 스캔(scan), 회전 거울 광학
2. 광자 반도체, 예를 들면 IR 방사를 전기 충전으로 바꾸는 InSb SPRITE 탐지기는 아르곤 가스로  $-187^\circ C$ 로 낮출 수 있다.
3. 전자 신호 증폭기, 변환기
4. 열화상 처리 과정 및 화면 장치

## 2.4 배터리 충전기 설계 및 구현

최장기간 48시간동안 바람이 불지 않을 때에도 부하에 전력을 공급할 수 있도록 배터리 용량을 1200Ah로 하였다. 또한 직류단 배터리 전압을 264V로 하였고 120개의 2.2V셀을 모두 직렬로 연결하여 배터리 배크를 구성하였다.

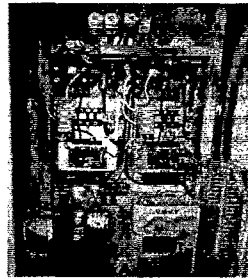


그림 2 배터리 충전회로



그림 3 배터리실 내부

그림 2와 그림 3은 설치된 배터리 충전회로와 배터리의 사진이며, 그림 4는 충전회로의 회로도를 나타내고 있다.

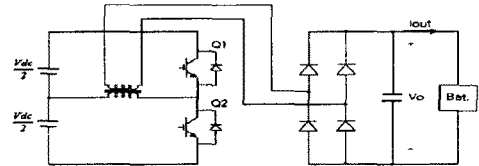


그림 4 배터리 충전회로

배터리의 단자전압을 감시하여 고전압 설정치 보다 높은 경우 발전기 연결 스위치를 차단하여 충전을 정지하며 저전압의 경우에도 배터리를 보호하기 위해 인버터 가동을 중단한다.

배터리 단자전압은 비교적 일정한데 반하여 발전기에서 출력되는 전압의 크기는 바람의 변화에 따라 수시로 변동하므로 낮은 입력전압에서도 충전이 가능하도록 승압이 가능한 스위칭 컨버터를 사용하였다. 충전기 모듈 한 개의 주회로 구성은 그림 4에 보인 것과 같다. 하프브리지 푸시-풀 컨버터 구조로서 출력 전류의 스위칭 리플 주파수가 2배 증가하는 효과를 가져오게 된다. 고전압에 유리하여 대용량화가 용이하며 부품수가 적고 스위칭 소자의 스트레스가 적은 특징이 있다. 변압기에 의해 입출력 전압사이의 절연이 확보되며, 변압기의 누설 인덕턴스를 조절하여 추가적인 필터 인덕터 없이도 동작이 가능하다. 발전기 출력을 정류한 직류 입력전압이 121V에서 283V까지 폭 넓게 변화해도 배터리에 일정한 직류 전압을 유지하며 충전할 수 있도록 변압기 권선비를 설계하였고 스위칭 듀티를 조절한다. 일시적인 과부하 내량을 크게 하여 바람이 불 때 발전된 전력을 효과적으로 충전할 수 있게 하였으며 충전기를 모듈화하여 직-병렬 회로의 확장에 대응이 용이하도록 하였다. 보호기능으로서의 충전전류

를 감시하는 과전류 방지기능, 스위칭 소자의 방열판 온도를 감시하는 과열 방지 기능 등을 갖추고 있다. 그림 5은 입력전압 150V, 출력전압 130V일 때의 충전 전류를 측정 한 것이다.

표 1. 배터리 충전기 사양

정격 출력 전압	132V
정격 출력 전류	45A
입력 전압 범위	121 ~ 283V
스위칭 주파수	30kHz

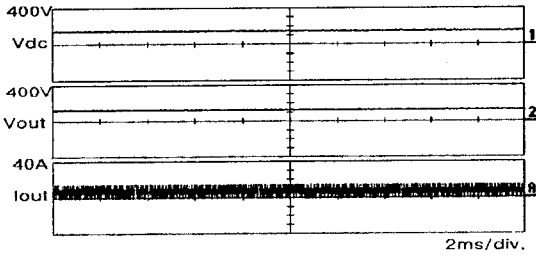


그림 5 배터리 충전기의 입력전압, 출력전압, 출력전류

### 3. 시험 결과

#### 3.1 시험 내용 : 정전압 고온 가속 수명 시험

55°C의 수조에 시료 전지를 침적후 전지당 2.23V/cell로 충전 전압을 독일 Digatron사의 50A-18V용 충전기를 이용하여 연속 충전한다. 그리고 4주마다 충전회로를 차단 후 10시간을 정격 용량 시험(C<sub>10</sub>, Capacity Test)을 실시하며 정격 용량(Nominal Capacity)의 80% 이하로 잔존 용량이 나타날 때를 수명 종료로 판정한다.

#### 3.2 시험 결과

표 2. 용량 시험 결과

Test Period	Cell(C <sub>10</sub> Capacity)%				Test Period	Cell(C <sub>10</sub> Capacity)%			
	1	2	3	4		1	2	3	4
-	107	105	108	107	17주	102.5	95.3	97.8	96.9
1주	116	113	121	121	19주	93	90	93	100
2주	108	108	118	117	21주	98	91	94	102
3주	100	98	113	113	25주	94	89	92	99
4주	103	95	109	108	29주	92	82	95	61
5주	103	93	110	111	37주	86	81	92	90
6주	103	93	110	111	41주	76	76	83	83
7주	103	93	110	112	49주	74	73	68	81
9주	110	103	110	118	-	-	-	-	-
13주	107	97	105	111	-	-	-	-	-
15주	101	97	101	106	-	-	-	-	-

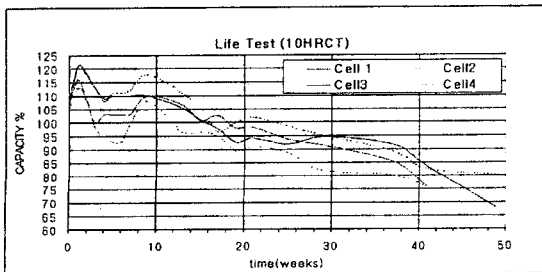


그림 6 용량 감소 추세

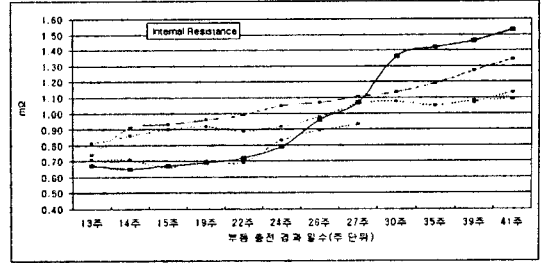


그림 7 내부 저항 증가 추세

<시험전 축전지>

<수명 종료 전지>

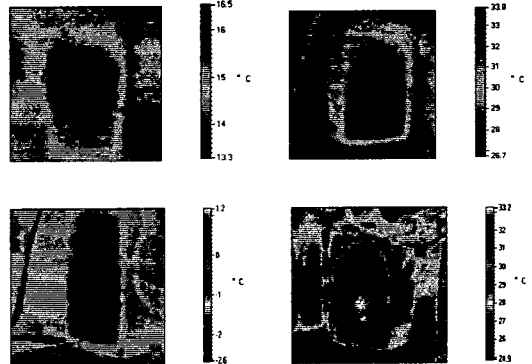


그림 8 시험 전후의 배터리 열화상 사진 비교

### 4. 결론

실험실적 고온 가속 수명 시험 결과, 축전지 정격 용량의 80%이하로 용량이 감소되는 시점에서 전지의 내부 저항은 초기 신형 전지 대비하여 약 2배가 증가(07→1.4)하였으며 이때 발생하는 전지 표면 온도 역시 초기 상태 대비 약 2배가 증가하였다.

한편, VRLA/GEL 전지의 주요 발열 부위는 전지 중앙 부위로 Gel Electrolyte가 발열로 Dry-out 되며 온도 상승 요인으로 작용한 것으로 추정된다.

본 연구는 풍력 발전 및 태양광 발전 시스템의 에너지 저장용으로 사용할 축전지를 대상으로 Field와 유사한 방전 및 정전압 충전 시스템을 적용한 실험을 시행하였으며 또한 실제 Field에 설치한 밀폐형 연축전지를 이용하여 주기적으로 내부 저항, 용량 및 IR 촬영을 통해 본 실험과의 상관 관계를 규명하는 실험을 진행중이다. 이러한 축전지의 열화 과정을 수집하여 밀폐형 연축전지의 Failure Mode 규명을 이용할 것이다.

또한 세계적으로 밀폐형 연축전지는 Field 설치 및 운용중 열등셀의 판별이 곤란하여 실제 부하 Test전까지는 사용 축전지의 교체 시기 여부를 판단 할 수 없다. 그러나 본 연구의 평가 기법을 이용하여 밀폐형 연축전지의 운용중 발생하는 열등셀의 판별을 통해 각종 대체 에너지 시스템에 적당한 최적 충전시스템 설계와 더불어 원활한 운용에 기여하고자 한다.

본 연구는 (00-지역-03)한국전력공사지원에 의하여 기초전력공학 공동연구소 주관으로 수행되었음.

[참 고 문 헌]

- [1] Y. Nagai, Y. Tomokuni and T. Matsui, "Proceedings of the 9th Int'l Telecom Energy Conference," IEEE, pp.640~647, 1987.
- [2] Warren F. Gillian, David M. Rice, Grid alloy age-hardening and its effect on battery manufacturing process, The battery man, pp.16~20, 1992.
- [3] D. J. Spirers and A. D. Rasinkoski, "Gelled -electrolyte lead/acid batteries for stationary and traction application," Journal of Power source, Vol. 40, pp.187~193, 1992.
- [4] Albert. S. Birks, Nondestructive Testing Handbook, Vol. 7, pp. 366~368, 1987.
- [5] Matthew A. Keyser, "Charging Algorithms for Increasing Lead Acid Battery Cycle Life for Electric Vehicles", in 17th Electric Vehicle Symposium, 2000.
- [6] Hebert Giess, "Investigation of thermal phenomena in VRLA/AGM stationary lead /acid batteries with a thermal video imaging system", Journal of Power source, Vol. 67, pp.49~59, 1997.
- [7] 신 찬, 김지언, 송승호, 노도환, 김동용, "30KW급 수직/수평축 통합형 풍력발전시스템 개발", 대한전기학회 춘계학술대회, pp. 470~472, 2001.
- [8] 고석철, 이 재, 임성훈, 강형곤, 한병성, "풍력발전의 전력저장을 위한 배터리 충전회로에 관한 수학적 모델링", 대한전기학회 추계학술대회, pp. 301~304, 2001.
- [9] 송승호, 노도환, 김동용, 신찬, 오영진, 김성주, 이래철, "소형 풍력 발전시스템의 연속 독립운전을 위한 전력 저장 및 변환장치의 설계 및 구현", 대한전기학회 추계학술대회, pp. 343~345, 2001.