

태양광연계 ESS용 리튬이온전지의 운용환경변화에 따른 수명예측방안에 관한 연구

임민규^{***}, 정재범^{***}, 김남현^{*}, 김현재^{*}, 노대석^{**}

^{*}한국산업기술시험원

^{**}한국기술교육대학교

e-mail:mingyulim@ktl.re.kr

A Life Cycle Estimation Method of Li-ion Battery Considering the Operation Environment in ESS with PV System

Min-Gyu Lim^{***}, Jae-Beom Jung^{**}, Nam-Hyun Kim^{*}, Hyun-Jae Kim^{*}, Dae-seok Rho^{**}

^{*}Korea Testing Laboratory

^{**}Korea University of Technology and Education

요약

최근 정부에서는 잇따른 ESS(energy storage system) 화재사고의 후속조치로 22년 5월 ESS 안전 강화대책을 제시하고, 기존의 배터리 충전을 제한을 보증수명 용량 이하로 사용하도록 제한하는 조치를 취했다. 보증수명은 배터리가 열화되는 것을 감안하여 배터리 제조사가 사용자에게 보증하는 ESS 설비의 보증기간까지의 배터리 용량을 의미하며, 이러한 조치는 사용상 열화가 배터리의 안전성과 성능에 끼치는 영향이 크다는 것을 반증한다. 소형배터리 및 원통형 배터리의 열화에 대한 연구는 꾸준히 진행되어 왔으나, 화재폭발 등의 취급상 사유로 상용화된 중대형배터리를 이용한 열화에 대한 연구는 부족한 실정이다. 본 논문에서는 온도에 의한 가속수명시험에 가장 널리 사용되는 아레니우스 모형을 이용해 수명을 예측하고, 실제 태양광연계용 ESS 출력 패턴을 중대형배터리 모듈에 적용해 사이클 수명 시험을 진행하여 온도에 따른 열화특성을 제시한다. ESS 제조사가 권장하는 온도 사양인 23℃와 비정상 고온인 50℃를 기준으로 사이클 수명 시험을 진행한 결과, 상온 사이클 대비 고온 사이클 시험이 3.5배 가량 열화가 가속된 결과를 얻어, 배터리가 고온환경 노출 시 열화 가속을 방지하기 위한 운용환경 관리의 필요성을 검증하여 본 논문의 유효성을 확인할 수 있었다.

2. 태양광연계용 ESS 운용 특성 분석

1. 서론

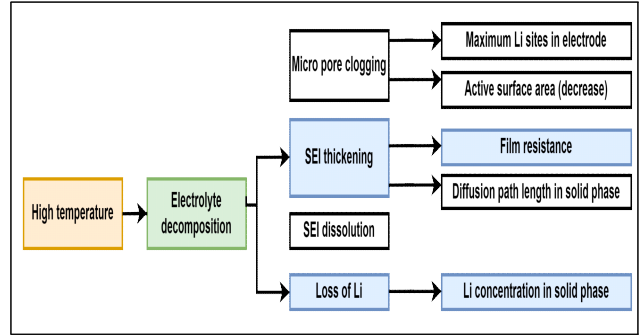
최근 국내 ESS 시장은 잇따른 화재로 인해 침체되어있었으나 세계 여러 국가들이 탄소 중립을 선언하면서 신재생에너지 발전원은 더 늘어날 전망이다. 이에 따라 ESS의 수요도 증가될 것으로 예상된다. 정부가 청정에너지 전환을 가속화하기 위해 분산에너지 설치를 의무화하겠다는 의지가 있는 만큼 ESS 시장 전망은 긍정적으로 보인다. 22년 5월 정부는 ESS 화재사고의 후속조치로 ESS 안전 강화대책을 발표하였다. 주요 내용으로는 기존의 배터리 충전을 제한을 보증수명 용량 이하로 사용하도록 하는 제한하는 것이다. 보증수명은 배터리가 열화되는 것을 감안하여 제조사가 사용자에게 보증하는 ESS 설비의 보증기간까지의 배터리 용량을 의미하며, 이러한 정부 정책은 배터리의 열화가 안전성과 성능에 끼치는 영향이 크다는 것을 반증한다. 본 논문에서는 온도에 의한 가속수명시험에 가장 널리 사용되는 아레니우스 모형을 이용해 수명을 예측하고, 태양광연계용 ESS 출력 패턴을 적용해 사이클 수명 시험을 진행하여 온도에 따른 열화특성을 확인한다.

2.1 태양광연계용 ESS 운용환경 분석

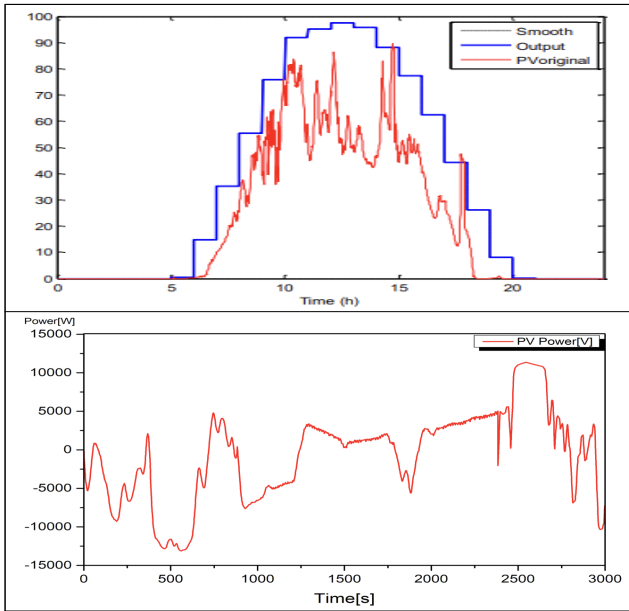
태양광에너지는 전 세계적으로 가장 빠르게 증가하고 있는 신재생 에너지원이다. 그러나 태양광 발전은 출력조정이 불가능하고 간헐성이 크기 때문에 출력을 예측하기가 어려워 계통 내 비중이 증가 할 경우 수급 불균형을 야기하기 쉬우며 이로 인한 주파수 및 전압 불안정을 발생시킬 가능성이 높아진다[1,2]. 신재생 발전기의 출력제한을 최소화하면서 계통 안정성을 유지하기 위해 ESS와 연계해서 사용하는 것이 일반적이다[1]. 정부에서 발표한 ESS 사고원인 조사결과에 언급된 것처럼 화재를 예방하기 위해서는 운영환경에 대한 관리가 중요하다. 태양광연계용 ESS 사이트의 경우 개인사업자가 운영하는 경우가 많아 현장 관리가 제대로 되지 않아 주파수조정용이나 피크저감용에 비해 열악한 편이다. 특히 공조시스템이 적절하게 설계되어 있지 않거나, 공조시스템이 고장이 났는데 수리가 되지 않은 상태로 운용이 되는 등 내부 온도 관리에 문제가 있는 곳이 많다. 태양광연계용 ESS의 고온환경 노출 위험도에 대한 특성을 시험설계에 반영한다.

2.2 태양광연계용 ESS 출력 특성 분석

태양광연계용 ESS는 전기요금에 저렴한 시간에 충전하고 전기요금이 비싼 시간에 방전하여 비용을 절감하는 것으로 최대 부하를 줄여서 부하 패턴을 완만하고 평평한 형태로 만드는 것이 일반적이며, [그림 1]과 같이 태양광은 출력이 불규칙하고 변동이 심하여 ESS를 이용해 평탄화(Smoothing)을 수행함으로써 출력 변동성 및 발전량의 간헐성을 완화할 수 있다[2]. 사이클 수명 시험에 적용할 패턴은 [그림 1]의 아래 그림과 같이 태양광 출력 패턴 일부를 발췌하여 사용한다.



[그림 2] 고온 노출에 따른 열화 흐름[3]



[그림 1] 태양광연계용 ESS 출력 파형

3. ESS용 리튬이온전지의 운용환경 변화에 따른 수명 예측

3.1 리튬이온전지의 고온 열화 특성

배터리가 고온에서 충전 시 상변이가 지속적으로 발생함에 따라 전극이 붕괴되는 현상이 나타나고 이러한 상변화는 전극물질을 노화시키며, 이는 배터리 용량감소에 영향을 미친다[3]. 뿐만 아니라 고온에서는 분자의 운동이 활발해지고 분자 사이의 결합력이 약해짐으로서 전해질의 분해가 촉진되어 SEI층 생성이 빨라진다. SEI층은 충전 시 리튬이온이 음극으로 넘어가고, 음극전해액 내의 첨가물이 부반응을 일으켜서 넘어온 리튬이온과 반응하여 만들어진 얇은 고체 막이다. SEI는 리튬 이온이 이동하는 길인 전해질의 추가 분해 반응을 방지하고 리튬 이온만이 전해질을 이동할 수 있도록 만들어주는 역할을 한다. [그림 2]는 SEI층이 두꺼워지면 배터리 내부임피던스 증가, 리튬이온양의 감소가 되고 이는 배터리 용량 감소로 이어지는 열화 흐름을 표현하였다.

3.2 아레니우스 모형을 이용한 수명 예측

시험에 앞서 고온에서 사이클 수명 시험 진행 시 가속 등가 시간 t_{SER} 을 산출하기 위해 다음과 같이 수식을 계산한다. [표 1]과 같이 가속 열화시간 t_{AG} 는 600일로 선정하고, 1일 1사이클을 수행하는 ESS 현장에 대입하면 총 600사이클을 수행하는 것으로 볼 수 있다. 활성화에너지 ϕ 는 물질에 따라 변경될 수 있는 변수로, 본 논문에서는 고성능 양극재인 NMC 사용에 따라 문헌자료 기반으로 0.5eV를 대입하도록 한다.[4] 일반 사용온도 T_{SER} 은 ESS 제조사가 권장하는 온도사양인 23°C를 적용하여 절대온도인 296.16K로 나타내고, 가속 노화 온도 T_{AG} 는 ESS 화재사고 사이트에서 HVAC이 고장났을 때 배터리 최대온도인 50°C로 선정하여 절대온도 323.16K를 대입한다. 상기의 변수값을 식 1)에 대입하면, 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$t_{SER} = t_{AG} \exp\left(\left(\frac{\phi}{K}\right) \times \left(\frac{1}{T_{SER}} - \frac{1}{T_{AG}}\right)\right) \quad (\text{식 1})$$

$$\begin{aligned}
 t_{SER} &= 600 \exp\left(\left(\frac{0.5eV}{8.617 \times 10^{-5} eV}\right) \times \left(\frac{1}{296.16} - \frac{1}{323.16}\right)\right) \\
 &= 3082 \text{ days} = 8.56 \text{ years}
 \end{aligned}$$

[표 1] 아레니우스 모형을 이용한 수명 예측 조건

구분	파라메타	값
t_{SER}	열노화 수명	-
t_{AG}	가속시험 일수	600일
T_{SER}	사용온도	273.16°C + 23°C = 296.16°C
T_{AG}	가속열화 온도	273.16°C + 50°C = 323.16°C
e	활성화에너지	0.5eV
K	계수	8.617 x 10 ⁻⁵ eV

상기의 예측 결과에 따라 50°C의 온도에서 600사이클을 수행하면, 23°C 기준 총 3082사이클의 가속 등가시간을 구할 수 있고, 이는 약 8.56년의 ESS 사용연수에 따른 열화가 진행되

있음을 의미한다. 다만, 상기 변수 중 활성화에너지의 경우 문헌자료에 따라 산정한 값으로 실제 값과 차이가 있을 수 있으므로, 향후 시험결과에 따라 일부 보정될 수 있음에 유의한다.

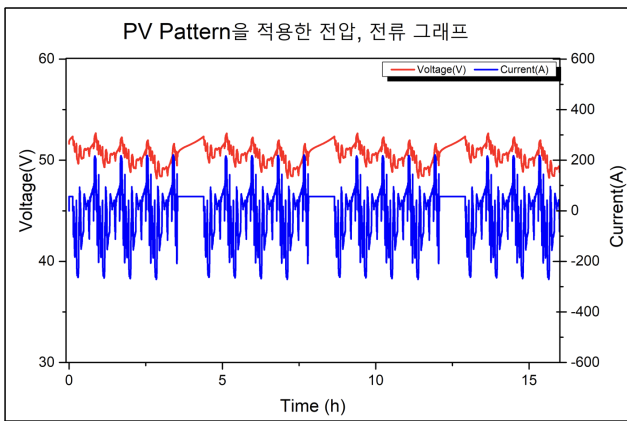
4. ESS용 리튬이온전지 가속열화 특성 분석

4.1 시험설계 및 절차

본 논문에서는 리튬이온 배터리의 수명을 예측하는 방법으로 가장 많이 사용되는 배터리의 방전용량을 기준으로 정격용량과 비교하여 열화를 확인하였다.

$$SOH(\%) = \frac{\text{discharge capacity (Ah)}}{\text{rated capacity (Ah)}} \times 100 \quad (\text{식 2})$$

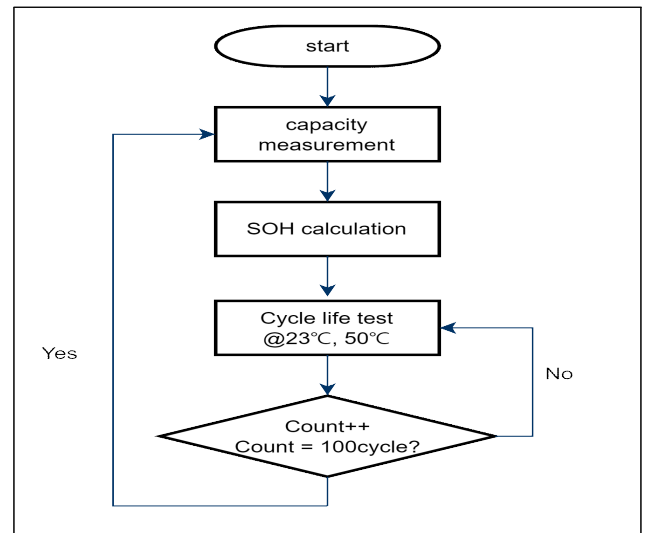
열화시험 전 SOC 100% 상태(만충; Fully-charged)에서 SOC 0%(만방; Fully-discharged)를 수행해 용량을 측정하며 측정용량은 방전용량을 기준으로 한다. SOH는 (식 2)와 같이 측정용량을 정격용량으로 나눈값에 100을 곱해 계산하며, 정격용량은 189Ah를 기준으로 한다. 사이클 수명 시험은 그림1과 같이 실제 태양방 출력패턴을 적용하며, 패턴 수행 시 배터리 온도증가를 고려하여 [그림 3]과 같이 SOC 50%로 충전 후 패턴 4회를 수행하고 다시 SOC 50%로 충전해서 패턴을 반복한다.



[그림 3] 태양광 패턴을 적용한 전압, 전류 그래프

[그림 4]와 같이 패턴 100회가 완료되면 23도로 온도평준화를 시킨 후 용량측정을 수행하고, 용량측정이 완료되면 방전용량을 기준으로 SOH를 계산해 열화정도를 확인하고 온도 시험 조건(23°C/50°C)에 따라 온도평준화를 시킨 후 사이클 시험을 재개한다. 온도평준화는 셀 내부까지 온도가 균일하게 분포되어야 하므로 최소 4시간 이상 진행한다. 사이클 시험은 장기간 진행할 경우 특정 셀의 열화로 인해 다른 셀과의 전압차이가 발생해 모듈 전압만으로 종지조건을 설정할 경우

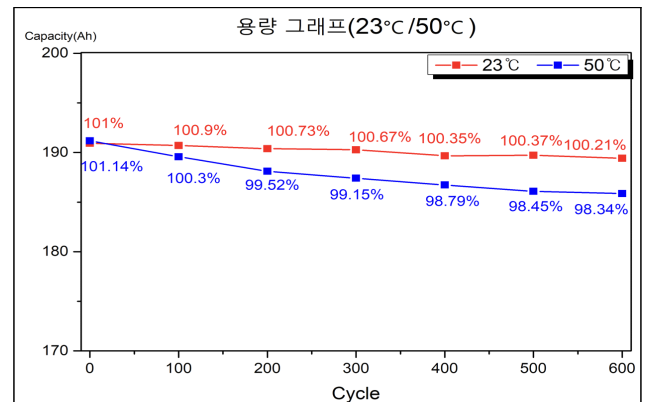
화제가 발생할 수 있는 위험성이 있어 모듈 내 전압 센서를 사이클시험을 위한 증방전기와 연동하여 셀의 최대전압과 최소전압을 설정하여 위험성을 최소화한다. 모듈의 구조상 사이드플레이트를 열지 않고서는 전압 센서를 연결하기 어려워 본 시험에서는 사이드플레이트를 연 상태로 시험을 진행하여 온도평준화가 더 빠르게 이루어질 수 있는 점은 참고해야한다. 한편, 시험 데이터의 신뢰성을 확보하기 위해 본 시험에 사용된 계측기는 모두 공인시험교정기관에서 교정을 받은 유효기간 내의 장비를 사용한다.



[그림 4] 사이클 수명 시험 흐름도

4.2 시험결과 및 열화특성 분석

[그림 5]는 ESS용 리튬이온배터리 모듈을 대상으로 태양광 출력패턴을 적용하여 사이클 수명 시험을 600cycle까지 진행하여 온도에 따른 용량 감소를 나타낸 그래프이다. Fresh 배터리는 정격용량보다 1%이상의 용량마진을 가지는 것이 일반적이며, 두 개의 모듈 다 시험 전 101%정도의 용량을 가지고 있었다. 23°C 시험의 경우 600cycle이 진행되었음에도 불구하고 정격용량 이하로 줄어들지 않았음을 확인했다.



[그림 5] 열화에 따른 온도별 용량 그래프

상기의 시험결과를 바탕으로 환경온도에 따른 방전용량 및 SOH를 나타낸 상세 결과는 [표 2]와 같다. 상온에서는 초기 용량 대비 600cycle은 1.51Ah 감소하였고, 고온에서는 초기용량 대비 600cycle은 5.3Ah 감소하였다. 또한, 상온에서는 100cycle 마다 용량기준 평균 0.25Ah, SOH 기준 0.13% 감소하였고, 고온에서는 100cycle마다 용량 기준 평균 0.88Ah, SOH 기준 0.46% 감소하였다.

[표 2] Cycle에 따른 용량 및 SOH 측정 결과

구분	Cycle	용량(Ah)	SOH(%)
23°C	0(초기)	190.92	101.01
	100	190.70	100.90
	200	190.38	100.73
	300	190.27	100.67
	400	189.66	100.35
	500	189.71	100.37
	600	189.41	100.21
50°C	0(초기)	191.17	101.14
	100	189.57	100.30
	200	188.11	99.52
	300	187.41	99.15
	400	186.73	98.79
	500	186.08	98.45
	600	185.87	98.34

[표 3]과 같이 상온은 600cycle 동안 0.791%의 용량감소가 있었고 고온에서는 2.772%의 용량감소가 있었다. 상온 대비 고온 사이클 시험의 경우 3.5배 가량 열화가 가속되었고, cycle 횟수가 증가함에 따라 열화 편차가 더 심해지는 것을 알 수 있다. 많은 논문에서 연구된 것처럼 상온에서의 열화는 600cycle 동안 1% 미만의 용량감소가 보여주듯이 매우 느리게 진행되는 것을 확인했다.

[표 3] Cycle에 따른 용량 감소율 결과

구분	Cycle	용량(Ah)	reduction ratio(%)
23°C	0(초기)	190.92	0.791
	600	189.41	
50°C	0(초기)	191.17	2.772
	600	185.87	

5. 결 론

본 논문에서는 국내 ESS에 가장 널리 사용되는 파우치형 모듈을 대상으로, 환경온도에 따른 열화도를 예측하고, 태양광 출력 패턴을 적용한 사이클 수명 시험을 수행하여 온도에 따른 열화 특성을 확인하였다. 상온에서는 100cycle마다 용량 기준 평균 0.25Ah, SOH 기준 0.13% 감소하였고, 고온에서는 100cycle마다 용량 기준 평균 0.88Ah, SOH 기준 0.46% 감소하였다. 상온에서는 초기용량 대비 600cycle은 1.51Ah 감소하였고, 고온에서는 초기용량 대비 600cycle은 5.3Ah 감소하였다. 위의 내용처럼 상온에서의 열화는 매우 느리게 진행되어 cycle이 증가할수록 고온에서의 열화 편차가 더 심해지는 것을 확인할 수 있었다. 고온열화에 따른 전극구조변화, SEI층 두께 증가는 용량감소로 이어지고 되돌아오지 않는 비가역적 전기화학적 반응이므로 배터리가 고온환경 노출 시 열화가속을 방지하기 위한 운용환경 관리의 필요성을 본 논문을 통해 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2021년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행 중인 ‘(20215910100030)ESS 설치공간의 화재·차단시스템 및 유지관리 가이드라인 개발’ 과제의 일환으로 진행된 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Sungwoo Lee, “A Study on the Estimation of Optimal ESS Capacity Considering REC Weighting Scheme”, The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 67, No. 8, pp. 1009~1018, 2018
- [2] P. Denholm and M. Hand, “Grid flexibility and storage required to achieve very high penetration of variable renewable electricity,” Energy Policy, vol. 39, pp. 1817-1830, Nov. 2011.
- [3] Arora, P.; White, R.E.; Doyle, M. Capacity fade mechanisms and side reactions in lithium-ion batteries. J. Electrochem. Soc. 1998, 145, 3647 - 3667.
- [4] Jae-Beom Jung, A Study on Relationship of Operation Temperature of Li-ion Battery for Safety Enhancement in ESS, Journal of The KIEE Fall Conference, 1892-1893, Jul. 2021.