

리튬이온전지를 이용한 전기저장장치의 SAT용 성능평가 알고리즘에 관한 연구

박재범*, 노대석**

*한국화학융합시험연구원 전력에너지센터

**한국기술교육대학교 전기공학과

e-mail:pjbwwkd@ktr.or.kr

A Study on Performance Evaluation Algorithm of Site Acceptance Test for Energy Storage System Using Li-ion Battery

Jea-Bum Park*, Dae-Seok Rho**

*Korea Testing & Research Institute

**Korea University of Technology and Education

요 약

전기저장장치는 배터리, 전력변환장치, 에너지관리장치 등으로 구성되며, 현장에서 설치, 운용되는 경우, 전기저장장치에 대한 성능과 안전에 대한 현장평가가 필수적으로 요구되고 있다. 또한, 국제전기기술위원회(IEC TC120)에서는 기존의 FAT(Factory Acceptance Test)수준의 평가뿐만 아니라, 현장에서의 안전 및 성능평가에 대한 중요성을 인식하여, 필드단위에서의 시험평가기준에 대한 국제표준이 논의되고 있으며, ESS의 성능을 보다 정확하고 신뢰성 있게 검증하기 위하여, H/W에 의한 성능 시험뿐만 아니라 S/W에 의한 성능검증도 요구하고 있는 실정이다. 따라서 본 논문에서는 현장에 설치되어 있는 전기저장장치의 성능을 평가하고 신뢰성을 검증하기 위하여, SAT(Site Acceptance Test)용 평가 알고리즘을 제안한다. 또한, 전력계통 상용해석프로그램인 PSCAD/ EMTDC를 이용하여 전기저장장치의 SAT용 성능평가 시험장치를 모델링하고, 이를 바탕으로 30[kW]급 SAT용 성능평가 시험장치를 구현한다. 이 시험장치는 배터리와 전력변환장치 등으로 구성된 전기저장장치와 실 계통의 각종 외란을 발생시킬 수 있는 계통모의장치(Grid-simulator), RLC부하를 조합한 단독운전시험장치 등으로 구성된다. 상기에서 제안한 모델링과 30[kW]급 시험장치를 바탕으로 다양한 시뮬레이션과 특성시험을 수행한 결과, 모델링에 의한 결과와 시험장치에 의한 특성이 거의 동일하게 분석되어, 본 논문에서 제안한 평가알고리즘의 유용성을 확인하였다.

1. 서 론

최근, 우리나라는 전기저장장치 산업의 활성화를 위하여, 2016년부터 전기저장장치 활용촉진 요금제 도입, 전기저장장치 저장전력의 전력시장 거래허용, 풍력·태양광 발전소에 전기저장장치 설치 시 신재생에너지 공급인증서(REC: Renewable Energy Certificate) 가중치 부여 등 집중적인 지원정책을 제시하고 있다. 이러한 전기저장장치는 대부분 현장에서 조립이 완성되는 현장설치 완성형 제품으로 각 제품의 품질 및 안전성이 보장되더라도 현장에서 조립하는 사람 혹은 환경에 따라 제품 성능이 달라지므로, 설치공정의 표준화 및 현장에 설치된 전기저장장치에 대한 안전성 시험평가기술의 개발이 요구되고 있다. 또한, 국제전기기술위원회(IEC TC120)에서는 기존의 FAT(Factory Acceptance Test) 수준의 평가뿐만 아니라, 현장에서의 안전 및 성능평가에 대한 중요성을 인식하여, 필드단위에서의 시험평가기준에 대한 국제표준이 논의되고 있으며, 전기저장장치의 성능을 보다 정확하고 신뢰성 있게 검증하기 위하여, H/W에 의한 성능 시험뿐만 아니라 S/W에 의한 성능검증도 요구하고 있는 실정이다[1-2].

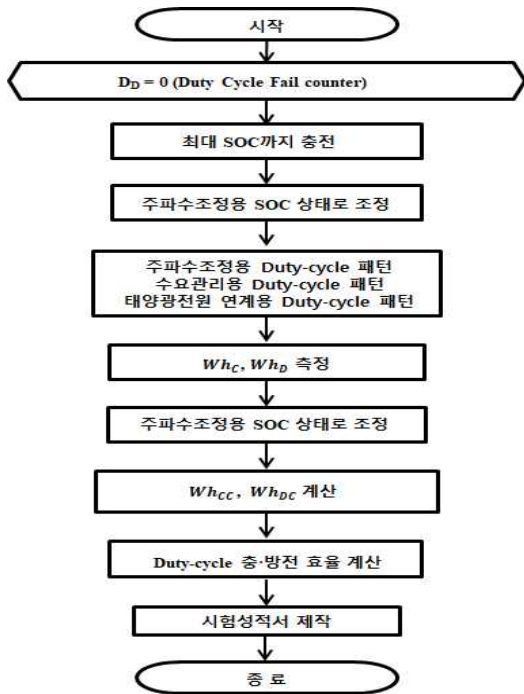
따라서 본 논문에서는 현장에 설치되어 있는 전기저장장치의 성능 및 안전에 대한 SAT(Site Acceptance Test)시험을 다양하게 평가하기 위하여, SAT용 평가알고리즘을 제안하였다. 또한, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 전기저장장치의 SAT용 성능평가 시험장치를 모델링 하고, 이를 바탕으로 30[kW]급 SAT용 성능평가 시험장치를 구현하였다. 상기에서 제안한 알고리즘을 이용하여 다양한 시뮬레이션과 특성시험을 수행한 결과, 전기저장장치의 성능을 정확하게 평가할 수 있었고, 모델링에 의한 특성과 시험장치에 의한 특성이 거의 동일하게 나타나, 본 논문에서 제안한 평가알고리즘의 유용성을 확인하였다.

2. 전기저장장치의 SAT용 성능평가 알고리즘

2.1 Duty-Cycle 효율 시험

미국의 전력회사와 우리나라의 전력회사에서 수행되는 주파수조정용 전기저장장치의 Duty-cycle 효율시험은 PNNL-22010의 주파수 패턴을 이용하여 진행된다. 이 시험은 주파수조정용

전기저장장치에 대하여 주파수 변동량이 적은 Average패턴(3회)과 변동량이 심한 Aggressive 패턴(2회)으로 구성되며 24시간동안 진행된다. 구체적인 시험절차는 다음과 같다.



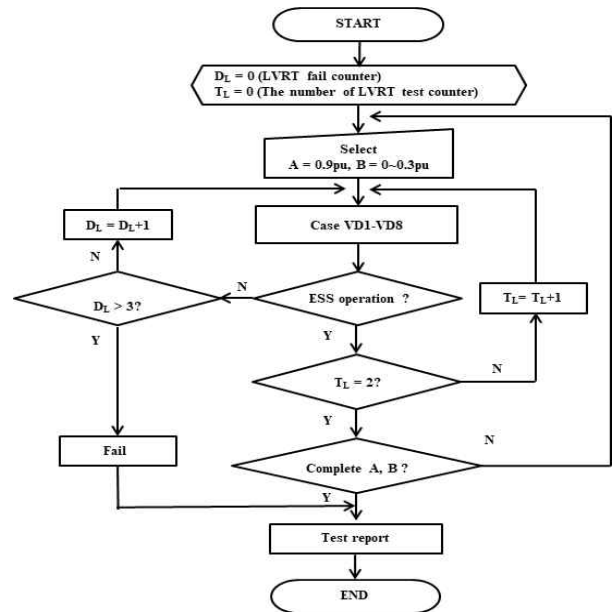
[그림 1] Duty-Cycle 효율시험 알고리즘

2.2 LVRT 특성시험

LVRT 특성시험은 전기저장장치가 연계된 배전시스템의 순시 전압변동에 대한 전기저장장치의 응답특성을 검증하기 위한 것으로 최근 국외에서는 분산전원의 도입용량이 증가하면서 LVRT에 대한 규제를 강화하고 있다. 하지만 국내에서는 전기저장장치용 LVRT에 대한 명확한 기술기준이 제시되어 있지 않아, IEC 61400-21의 풍력 LVRT 표준을 참조하여 SAT용 LVRT 시험평가 알고리즘을 제시한다. 즉, 전기저장장치의 출력이 0.1 ~ 0.3[p.u.]와 0.9[p.u.] 이상인 경우에 대하여, 표 1과 같이 순시 전압강하 조건을 인가하여 전기저장장치의 응답특성을 분석한다. 여기서, VD1부터 VD8까지의 시험을 2회 연속 수행하며, 구체적인 시험절차는 다음과 같다.

[표 1] LVRT 전압강하 및 지속시간 조건

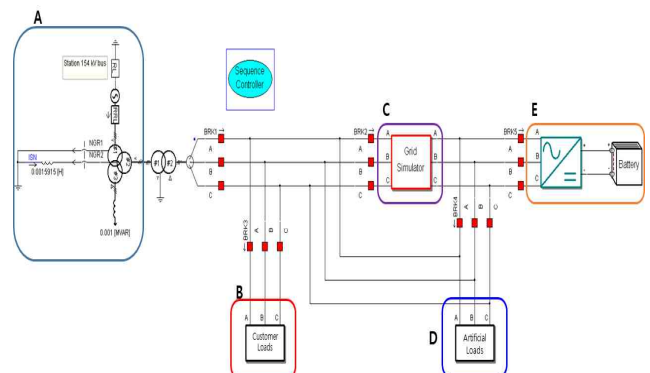
Case	상간전압 크기	지속시간 (초)
VD1	0.00±0.05	0.15±0.02
VD2	0.55±0.05	0.2±0.02
VD3	0.6±0.05	0.25±0.02
VD4	0.65±0.05	0.3±0.02
VD5	0.7±0.05	0.35±0.02
VD6	0.75±0.05	0.4±0.02
VD7	0.8±0.05	1±0.05
VD8	0.90±0.05	5±0.25



[그림 2] LVRT 특성시험 알고리즘

3. PSCAD/EMTDC를 이용한 SAT용 성능평가 시험장치의 모델링

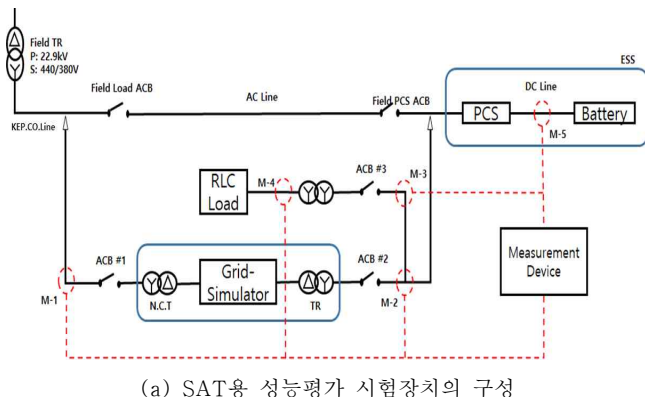
PSCAD/EMTDC를 이용하여, 전기저장장치, 계통모의장치 및 Anti-islanding 시험장치 등으로 구성된 전체 SAT용 성능평가 시험장치를 모델링하면 그림 3과 같다. 여기서 A부분은 한전 22.9kV 계통, B는 수용가 부하, C는 계통모의장치, D는 모의 RLC 부하, E는 전기저장장치를 나타낸 것이다. 즉, 한전 22.9[kV]계통은 주변압기(45/60[MVA], 154/22.9 [kV])와 고압 배전선로로 구성되며, 수용가 부하는 정전력 특성을 가진 부하로 구성한다. 또한, 계통모의장치는 제어부와 인버터부로 구성되며, 제어부에서는 목표로 하는 전압의 오차를 줄이고 응답특성도 빠르게 하기 위하여 PI제어 알고리즘을 이용하고, 인버터부에서는 계통모의장치 제어부에서 생성된 DC 출력을 120°의 위상차를 갖는 3상의 AC출력으로 변환하도록 구성한다. 한편, 모의 부하는 정임피던스 특성을 가진 RLC 부하로 구성하고, 전기저장장치는 전류제어알고리즘을 적용하여 유효전력과 무효전력을 서로 독립적으로 제어할 수 있도록 구성한다.



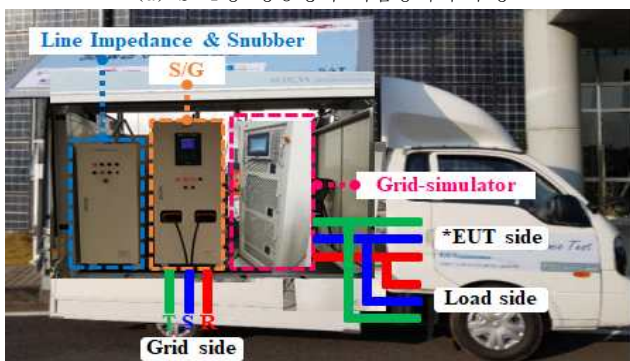
[그림 3] SAT용 성능평가 시험장치 모델링

4. 30kW급 SAT용 성능평가 시험장치의 구현

현장에 설치되어 있는 전기저장장치의 성능평가를 수행하기 위하여, 본 연구에서 제안한 SAT용 시험장치는 그림 4(a)와 같이 계통모의장치, 단독운전방지 시험장치, 수배전반, 계측장치 반으로 구성한다. 여기서, 계통모의장치는 계통에서 발생하는 각종 외란(Sag, Swell, Interruption, Harmonic 등)을 모의할 수 있는 장치로서, 현장에서 발생 가능한 노이즈를 차단하는 노이즈컷 변압기와 현장의 전압 계급에 따라 유연하게 대응할 수 있는 가변형 변압기로 구성한다. 또한, 단독운전방지 시험장치는 합성부하와 제어장치로 구성되는데, 합성부하는 수용가 부하와 모의부하를 조합하여 30[kVA]급으로 구성한다. 한편, 보호 및 계측제어장치는 보호장치와 모니터링 장치, 계측장치로 구성되며, 그림 4(a)의 점선과 같이 계통모의장치의 1차측과 2차측, 단독운전방지 시험장치의 1차측과 2차측 그리고 전기저장장치의 DC측에 설치하며, 시험에 필요한 전압, 전류 등과 같은 데이터를 수집하는 역할을 수행한다. 한편, 상기의 구성도를 바탕으로 실제 제작한 30[kW]급 전기저장장치의 SAT용 성능평가 시험장치의 외형도는 그림 4(b)와 같다.



(a) SAT용 성능평가 시험장치의 구성



(b) SAT용 성능평가 시험장치의 외형도
[그림 4] 전기저장장치의 SAT용 성능평가 시험장치

5. 시뮬레이션 결과 및 분석

5.1 시뮬레이션 조건

전기저장장치의 SAT용 시험평가 알고리즘의 유용성을 확인하기 위하여, 전기저장장치의 SAT용 성능평가 시험장치의 모

델링과 실제 30[kW]급 SAT용 성능평가 시험장치를 이용하여, 용량 및 Round-trip 효율, Duty-cycle 효율, LVRT 시험을 수행한다. 표 2는 각 시험조건을 상세하게 나타낸 것으로, 용량 및 Round-trip 효율시험은 1 C-rate 충·방전률로 2회 진행하는 것으로 상정하며, Duty-cycle 효율시험은 PNNL-22010의 Average(2시간) 패턴을 사용한다. 또한, LVRT 시험은 표 6-2의 전압과 지속시간을 적용한다.

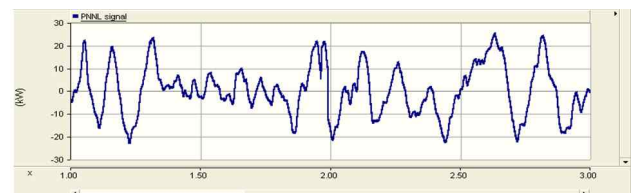
[표 2] SAT용 시험평가를 위한 시뮬레이션 조건

Duty-cycle	패턴	PNNL-22010
LVRT	순시 전압 강하[p.u.]	0, 0.55, 0.6, 0.65, 0.7, 0.75, 0.8, 0.9
	지속시간 [s]	0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35, 0.4, 1, 5

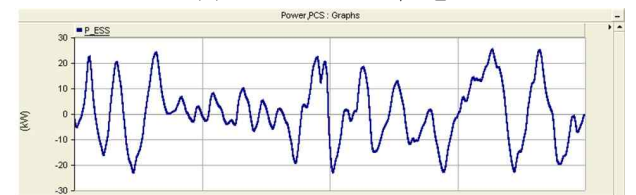
5.2 PSCAD/EMTDC에 의한 특성분석

(1) Duty-cycle 추종 특성시험

상기의 시뮬레이션 조건에 따라 Duty-cycle 효율시험을 수행하면 그림 5와 같다. 여기서, 그림 5(a)는 PNNL-22010에서 제시한 주파수 패턴을 PSCAD /EMTDC를 이용하여 제어신호로 변환한 것을 나타내며, 총 1,800개의 신호가 4초 간격으로 출력되도록 상정하였다. 또한, 그림 5(b)는 ESS의 충·방전 운전을 나타낸 것으로, 그림 5(a)의 제어신호에 따라 ESS의 출력이 추종되고 있음을 확인 하였다.



(a) PNNL-22010 시그널



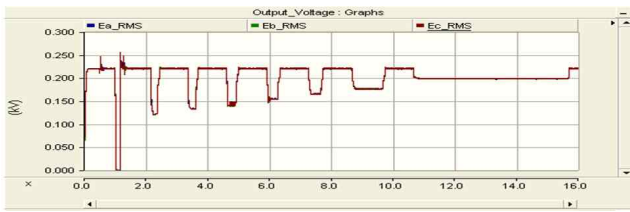
(b) ESS 출력

[그림 5] Duty-cycle 특성

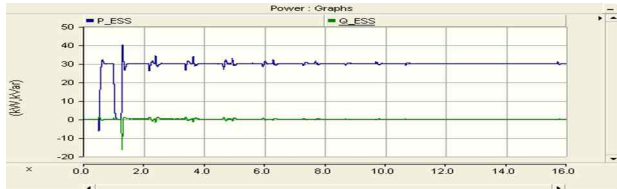
(2) LVRT 시험

상기의 시뮬레이션 조건에 따라 LVRT시험을 수행하면 그림 6과 같다. 여기서, 그림 6(a)는 계통모의장치의 출력 파형으로 목표로 하는 전압과 지속시간을 나타낸 것이다. 또한, 그림 6(b)는 ESS의 유효전력을 나타낸 것으로, VD1 조건에서는 ESS의 출력이 0[p.u.]까지 감소하지만, 계통에서 탈락되지 않고, 휴지 시간동안 출력이 회복됨을 알 수 있었다. 그리고 VD2에서 VD8 까지의 조건에서는 ESS의 출력에 약간의 노이즈가 발생하지만, 계통과 연계되어 안정적으로 운전되고 있음을 확인할 수 있

었다.



(a) Grid-simulator 출력

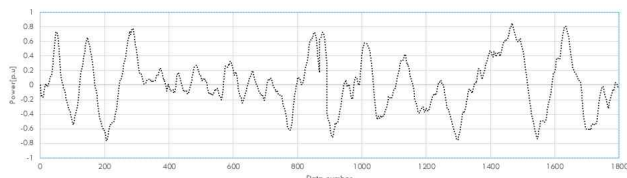


(b) ESS 출력
[그림 6] LVRT 특성

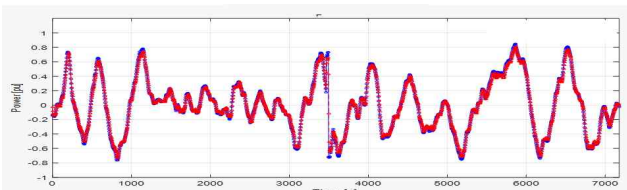
5.3 30kW급 SAT용 시험장치에 의한 특성분석

(1) Duty-cycle 추종 특성시험

시뮬레이션과 동일한 시험조건에 따라, Duty-cycle 효율시험 특성을 분석하면 그림 7과 같다. 여기서, 그림 7(a)는 PNNL-22010에서 제시한 주파수 패턴을 Excel을 이용하여 제어신호로 변환한 것을 나타내며, 총 1,800개의 지령치가 4초 간격으로 출력되도록 설정하였다. 또한, 그림 7(b)는 ESS의 충·방전 운전 특성을 나타낸 것으로, 그림 7(a)의 제어신호에 따라 ESS의 출력이 추종되고 있음을 확인 하였다.



(a) PNNL-22010 시그널

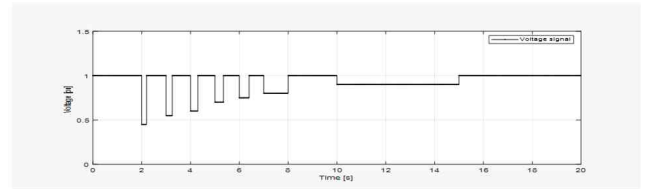


(b) ESS 출력
[그림 7] Duty-cycle 특성

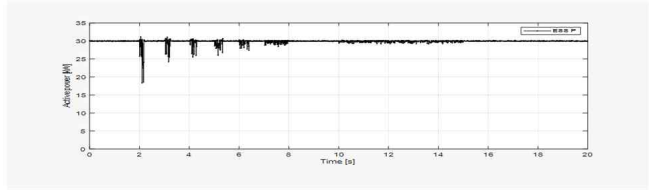
(2) LVRT 시험

시뮬레이션과 동일한 시험조건에 따라, VD1조건의 LVRT시험을 수행하면, ESS가 지정된 전압과 지속시간을 유지하지 못하고 탈락하는 현상이 발생하였다. 이것은 현재 국내에서 ESS의 LVRT 기술기준이 없기 때문에 ESS가 LVRT에 대한 제어 기능을 수행하지 못한 것이라 평가된다. 따라서 시험 조건에서 VD1조건을 제외한 나머지 구간에 대한 LVRT시험을 수행하면 그림 8과 같다. 여기서, 그림 8(a)는 계통모의장치의 출력 파형

으로 목표로 하는 전압과 지속시간을 나타낸 것이다. 또한, 그림 8(b)는 ESS의 유효전력을 나타낸 것으로 약간의 노이즈가 발생하지만, 계통과 연계되어 안정적으로 운전되고 있음을 알 수 있었다. 따라서 VD1조건을 제외한 VD2에서 VD8까지의 조건에서 PSCAD/EMTDC에 의한 특성과 시험에 의한 특성이 일치하여, LVRT시험 알고리즘의 유용성을 확인할 수 있었다.



(a) Grid-simulator 출력



(b) ESS 출력
[그림 8] LVRT 특성

6. 결 론

본 논문에서는 현장에 설치되어 있는 ESS의 성능을 평가하고 신뢰성을 검증하기 위하여, SAT용 평가알고리즘을 제안하였다. 또한, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 ESS의 SAT용 시험장치를 모델링 하고, 이를 바탕으로 30[kW]급 이동형 시험장치를 구현하여, 다양한 시뮬레이션과 특성시험을 수행하였다. 먼저 PSCAD/EMTDC의 모델링을 이용하여, Duty-cycle 효율시험과 LVRT에 대한 시험특성을 분석한 결과, PNNL-22010의 제어신호에 따라 ESS의 출력이 정확하게 추종되며, 계통모의장치가 LVRT 시험조건의 목표로 하는 전압과 지속시간을 구현할 수 있음을 확인하였다. 또한, 30[kW]급 시험장치를 이용하여, 동일한 조건에서 시험을 수행한 결과, PSCAD/EMTDC에 의한 시뮬레이션 값과 시험에 의한 값이 동일한 특성을 나타냄을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] 노대석외 2인, “30kW급 ESS용 이동형 성능평가 시험장치의 구현 및 특성분석”, 전기학회논문지, 제 67권, 6호, pp. 715-723, 2018.
- [2] 노대석외 4인, “30kW급 ESS용 이동형 성능평가 시험장치의 특성 분석”, 산학기술학회 춘계학술대회 논문집, 제 19권, 1호, pp. 226-229, 2018.