

리튬이온전지를 이용한 전기저장장치의 SAT용 성능평가 알고리즘에 관한 연구

박재범^{1,3}, 김병기², 김미성¹, 노대석^{3*}

¹한국화학융합시험연구원, ²한국에너지기술연구원, ³한국기술교육대학교

A Study on the Site Acceptance Test(SAT) Evaluation Algorithm of Energy Storage System using Li-ion Battery

Jea-Bum Park^{1,3}, Byung-Ki Kim², Mi-Sung Kim¹, Dae-Seok Rho^{3*}

¹Korea Testing & Research Institute, ²Korea Institute of Energy Research

³Korea University of Technology and Education

요약 ESS는 각 제품의 품질 및 안전성이 보장되더라도 현장에서 조립하는 사람 혹은 환경에 따라 완성 품질이 달라지므로, 설치공정의 표준화 및 현장에 설치된 ESS에 대한 안전성 시험평가기술의 개발이 요구되고 있다. 또한, 선진국에서는 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 ESS의 성능을 평가하기 위하여 SAT(Site Acceptance Test)용 평가알고리즘을 제안하였다. 또한, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 ESS의 SAT용 시험장치를 모델링 하고, 이를 바탕으로 30[kW]급 시험장치를 구현하였다. 상기에서 제안한 평가알고리즘을 이용하여 다양한 시뮬레이션과 특성시험을 비교한 결과, 용량 및 Round-trip 효율, Duty-cycle 추종특성, LVRT 특성, Anti-islanding특성에 대한 ESS의 성능을 정확하게 평가할 수 있었고, 모델링에 의한 특성과 시험장치에 의한 특성이 거의 동일하게 나타나, 본 논문에서 제안한 평가알고리즘의 유용성을 확인하였다.

Abstract Recently, standardization of installation progress and technology of site acceptance test(SAT) for energy storage system(ESS) are being required due to performance of ESS depending on working condition and environment even though the quality and safety of each component of ESS is guaranteed. And also, it has been required to perform not only performance testing by H/W equipments but also performance verification by S/W tool, in order to more accurately and reliably validate the performance of the ESS in advanced countries. Therefore, this paper proposes evaluation algorithm for SAT to evaluate performance of ESS and presents modeling of SAT test equipment for ESS by using PSCAD/EMTDC. Furthermore, 30[kW] scaled portable test equipments is implemented based on the proposed algorithm and modeling. From the various simulation and test results, it is confirmed that performance of ESS related to characteristics of capacity and Round-trip efficiency, Duty-cycle efficiency, low voltage ride through(LVRT) and Anti-islanding can be accurately evaluated and that the simulation results of PSCAD/EMTDC are identical to test results of 30[kW] test equipment.

Keywords : Energy Storage System, Factory Acceptance Test, Site Acceptance Test, Round-Trip, Duty-Cycle, Low-Voltage Ride Through, Anti-Islanding, PSCAD/EMTDC

본 논문은 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원의 연구(No.20172410100030)와 한국에너지기술연구원의 연구(No.20182410105070)에 의하여 수행되었음.

*Corresponding Author : Dae-Seok Rho(Korea University of Technology and Education)

Tel: +82-41-560-1167 email: dsrho@koreatech.ac.kr

Received April 30, 2019

Revised June 4, 2019

Accepted June 7, 2019

Published June 30, 2019

1. 서론

최근 세계적으로 전력수급에 어려움을 겪고 있는 상황에서, 단기적으로 전력부족 현상을 해결하며, 장기적으로 전력공급 확충, 전력 수요관리 및 신재생에너지 보급 등을 위하여, 에너지저장시스템(ESS: Energy Storage System)의 보급이 활발하게 진행되고 있다. 특히, 우리나라는 ESS 산업의 활성화를 위하여, 2016년부터 ESS 활용촉진 요금제 도입, ESS 저장전력의 전력시장 거래허용, 풍력·태양광 발전소에 ESS 설치 시 신재생에너지 공급인증서(REC: Renewable Energy Certificate) 가중치 부여 등 집중적인 지원정책을 펼치고 있다. 이러한 ESS는 대부분 현장에서 조립이 완성되는 현장설치 완성형 제품으로 각 제품의 품질 및 안전성이 보장되더라도 현장에서 조립하는 사람 혹은 환경에 따라 제품성능이 달라지므로, 설치공정의 표준화 및 현장에 설치된 ESS에 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, ESS의 성능을 보다 정확하고 신뢰성 있게 검증하기 위하여, H/W에 의한 성능 시험뿐만 아니라 S/W에 의한 성능검증도 요구하고 있는 실정이다 [1-6].

따라서, 본 논문에서는 현장에 설치되어 있는 ESS의 성능을 평가하기 위하여, 용량 및 Round-trip 효율, Duty-cycle 효율, LVRT(Low Voltage Ride Through)특성, Anti-islanding 특성에 대한 SAT용 평가알고리즘을 제안하였다. 또한, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 ESS의 SAT용 시험장치를 모델링 하고, 이를 바탕으로 30[kW]급 이동형 시험장치를 구현하였다. 상기에서 제안한 알고리즘을 이용하여 다양한 시뮬레이션과 특성시험을 수행한 결과, 용량 및 Round-trip 효율, Duty-cycle 추종특성, LVRT 특성, Anti-islanding특성에 대한 ESS의 성능을 정확하게 평가할 수 있었고, 모델링에 의한 특성과 시험장치에 의한 특성이 거의 동일하게 나타나, 본 논문에서 제안한 평가 알고리즘의 유용성을 확인하였다.

2. ESS의 SAT 성능시험 특성 분석

일반적으로 ESS는 배터리, 전력변환장치, 에너지관리 장치 등으로 구성되며, 각각의 장치는 공인시험기관에서 성능과 안전에 대한 입고시험(형식시험) 및 FAT시험을 수행하여 현장에 설치된다. 하지만, 이러한 시험 및 인증을 받은 장치에 대한 품질 및 안전이 보장되더라도, 설치 장소에서 조립하는 작업자, 환경, 등에 따라 ESS의 성능 및 안전성이 달라지게 된다. 또한, 장기간에 걸쳐 운용되는 경우, 각 장치의 열화특성에 의하여 초기의 성능 및 안전은 더욱더 보장받을 수 없게 된다. 즉, 용량 및 Round-trip효율 시험은 시험기관에 입고하여 시험할 당시에는 제조자가 제시한 성능을 만족할 수 있지만, 사용 환경과 운용 시간에 따라 배터리의 용량이 달라질 수 있고, 이로 인해 배터리가 과충전과 과방전의 위험에 노출되어, 사고로 이워질 수 있다.

또한, 계통 사고 시 안전을 보장할 수 있는 Anti-islanding시험은 입고시험에서 정임피던스 부하만을 이용하여 수행되지만, 현장시험에서는 ESS가 설치된 실 계통 수용가의 다양한 부하특성을 사용할 수 있어서 정확한 성능을 평가할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 Table 1과 같이 ESS의 용도를 주파수조정용, 신재생연계용, 수요관리용, 비상전원용으로 분류하고, 용도별 기본시험과 성능시험, 안전시험에 대한 SAT 평가항목을 제시한다[7].

Table 1. Classification for SAT

Test classification	Application Test items	FR	Renewable		D/R	Back-up
			Stabilization	Policy		
Foundation	Examination of structure	○	○	○	○	○
	PMS function	○	○	○	○	○
Performance	Round-trip Efficiency	○	○	○	○	○
	LVRT	○	○	○	○	
	Duty-cycle Efficiency	○		○	○	○
	Output Stabilization					○
	Unbalance	○	○	○	○	○
Safety	Response	○	○	○	○	○
	Anti-islanding		○	○	○	○
	Protective device	○	○	○	○	○
	Capacity Efficiency	○	○	○	○	○
	Themer aging	○	○	○	○	○
	Self discharge	○	○	○	○	○

3. ESS의 SAT 성능시험 평가알고리즘

3.1 용량 및 Round-trip 효율시험

일반적으로 시험기관에 입고해서 실시되는 ESS의 용량시험과 Round-trip 효율시험은 제조사에서 지정한 조건에 따라 5회의 충·방전 운전을 수행하고, 이때 연계점(POC: Point of connection)에서 충전되는 에너지와 방전되는 에너지의 양을 측정하는 방식으로 진행된다. 하지만 현장에서 5회에 걸쳐 용량 및 Round-trip 효율 시험을 수행하는 경우, ESS를 정상적으로 가동하지 못하기 때문에, 운용 수익에 대한 손실이 발생할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 현장에서 시험시간을 최소화하기 위하여, 시험 횟수를 2회로 줄이고 용량 시험과 Round-trip 효율시험을 동시에 수행할 수 있는 SAT용 용량 및 Round-trip 효율시험에 관한 평가 알고리즘을 제시한다. 구체적인 시험절차는 다음과 같다.

[STEP 1] 제조사에서 제시한 시험규격에 따라 배터리의 방전종료전압인 최소 SOC(state of charge)까지 방전한다.

[STEP 2] KBIA-10104-03 단체표준의 충전조건(0.5 C-rate)에 따라 충전종료전압인 최대 SOC까지 충전한다. 이때 충전 전력량과 보조기기에서 소비되는 전력량(손실)을 포함한 입력전력량(Wh_i)을 측정한다. 여기서 방전전압 및 방전전류는 단체표준에서 제시한 30초 이내의 일정 시간마다 기록한다[8].

$$Wh_i = \frac{I_{C1} V_{C1} + I_{C2} V_{C2} + I_{C3} V_{C3} + \dots + I_{Cn} V_{Cn}}{\frac{3600}{s}} \quad (1)$$

여기서 Wh_i : 입력 전력량, V_{Cn} : n시간 간격으로 측정된 충전전압 값, I_{Cn} : n시간 간격으로 측정된 충전전류 값

[STEP 3] 최대 SOC인 완충 상태에서 배터리의 안정화를 이루기 위하여, 30분 동안 휴지상태를 유지한다.

[STEP 4] 사용자의 규격(용도)에 명시된 방전조건에 따라 최소 SOC까지 방전한다. 이때 식 (2)와 같이 방전 전력량과 보조기기에서 소비되는 전력량을 포함한 출력전력량(Wh_{Di})을 측정한다.

$$Wh_{Di} = \frac{I_{D1} V_{D1} + I_{D2} V_{D2} + I_{D3} V_{D3} + \dots + I_{Dn} V_{Dn}}{\frac{3600}{s}} \quad (2)$$

여기서 Wh_{Di} : 방전 전력량, V_{Dn} : n시간 간격으로 측정된 방전전압 값, I_{Dn} : n시간 간격으로 측정된 방전전류 값

[STEP 5] 최소 SOC인 완전방전 상태에서 배터리의 안정화를 이루기 위하여, 30분 동안 휴지상태를 유지한다.

[STEP 6] Fig. 1과 같이 [STEP 2]에서 [STEP 4]까지의 충·방전 과정을 2회 반복한다.

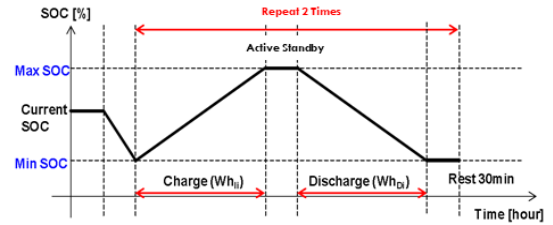


Fig. 1. Pattern of capacity and Round-trip

[STEP 7] ESS의 용량(ESS_{Wh})은 식 (3)과 같이 2회의 방전전력량의 평균값으로 한다.

$$ESS_{Wh} = \frac{\sum_{i=1}^{T_c} Wh_{Di}}{T_c} \quad (3)$$

여기서, ESS_{Wh} : ESS 용량, Wh_{Di} : 시험 횟수별 ESS 방전용량, i : 시험 횟수, T_c : 시험 총 횟수

[STEP 8] 사용전 시험 시에는 [STEP 7]에서 구한 ESS의 용량과 제조사에서 제시한 값(M_{CP})을 비교하여 적정한 범위 이하이면 불합격 처리하고, 적정한 범위이면 [STEP 9]로 진행한다. 한편 사용중 시험 시에는 [STEP 7]에서 구한 ESS의 용량과 제조사에서 제시한 값을 비교하여 배터리의 노화정도를 판단한다.

[STEP 9] ESS의 Round-trip효율은 용량시험 결과를 참조하여 식 (4)와 같이 계산한다.

$$Round-trip_{Eff} = \frac{\sum_{i=1}^{T_c} Wh_{Di}}{\sum_{i=1}^{T_c} Wh_{Fi}} \quad (4)$$

[STEP 10] 상기의 시험결과에 따라 ESS의 용량과 Round-trip효율에 대한 시험성적서를 발급한다.

상기의 알고리즘을 플로우차트로 나타내면 Fig. 2와 같다.

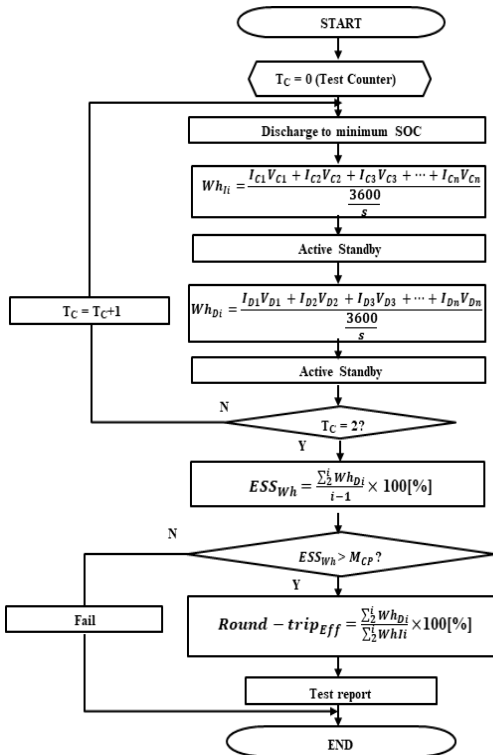


Fig. 2. Capacity and Round-trip test algorithm

3.2 Duty-cycle 효율시험

미국의 전력회사와 우리나라의 전력회사에서 수행되는 주파수조정용 ESS의 Duty-cycle 효율시험은 Fig. 3과 같이 PNNL-22010의 주파수 패턴을 이용하여 진행된다[9]. 이 시험은 주파수조정용 ESS에 대하여 주파수 변동량이 적은 Average패턴(3회)과 변동량이 심한 Aggressive 패턴(2회)으로 구성되며 24시간동안 진행된다. 따라서 SAT용 Duty-cycle 효율시험도 상기의 시험 절차를 따르며 구체적인 평가알고리즘은 다음과 같다.

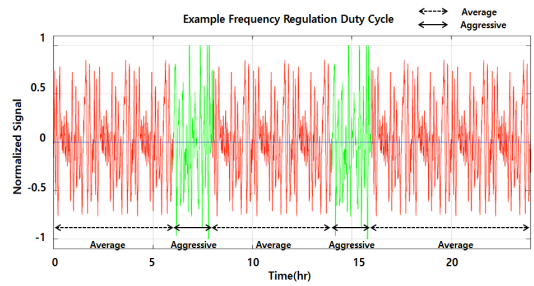


Fig. 3. Pattern of PNNL-22010

[STEP 1] KBIA 단체표준의 충전조건에 따라 충전종료전압인 최대 SOC까지 충전한다.

[STEP 2] 완충 상태에서 일정한 휴지기간 이후에 방전조건에 따라 초기 주파수 조정용 SOC의 상태로 방전을 수행한다.

[STEP 3] PNNL-22010 주파수 변동 패턴에 따라 24 시간 동안 ESS의 충·방전 운전을 수행하고, 전체 충전전력량과 (Wh_c) 방전전력량을 (Wh_D) 구한다.

[STEP 4] 24시간 이후에 초기 주파수조정용 SOC 상태로 만들기 위하여 충전 또는 방전을 수행하고, 보상된 충전전력량 (Wh_{CC}) 또는 방전 전력량 (Wh_{DC})을 계산한다.

[STEP 5] 식 (5)와 같이 ESS의 충·방전 효율을 계산한다. 여기서 24간 이후에 SOC상태가 초기 주파수조정용 SOC보다 큰 경우에는 보상된 방전전력을 고려하고, 작은 경우에는 보상된 충전전력량을 고려한다.

$$Duty Cycle_{Eff} = \frac{Wh_D + Wh_{DC}}{Wh_c + Wh_{CC}} \times 100\% \quad (5)$$

여기서, $Duty Cycle_{Eff}$: Duty-cycle 효율, Wh_c : 전체 충전전력량, Wh_D : 전체 방전전력량, Wh_{CC} : 보상된 충전전력량, Wh_{DC} : 보상된 방전전력량

[STEP 6] [STEP 5]에서 계산된 ESS의 Duty-cycle 효율에 대한 시험성적서를 발급한다.

상기의 알고리즘을 플로우차트로 나타내면 Fig. 4와 같다.

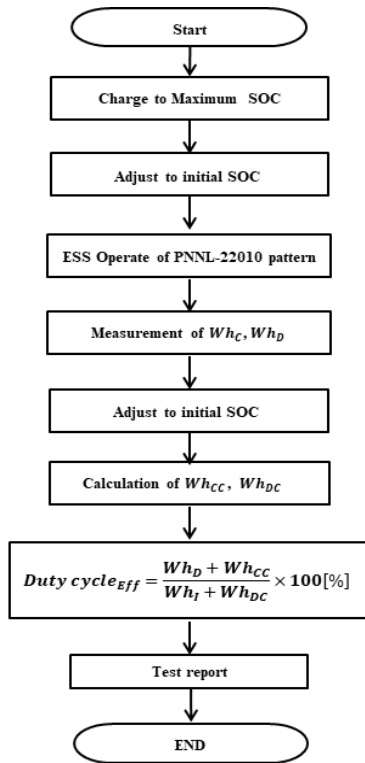


Fig. 4. Duty-cycle algorithm

3.3 LVRT 특성시험

LVRT 특성시험은 ESS가 연계된 배전계통의 순시 전압변동에 대한 ESS의 응답특성을 검증하기 위한 것으로 최근 국외에서는 분산전원의 도입용량이 증가하면서 LVRT에 대한 규제를 강화하고 있다. 하지만 국내에서는 ESS용 LVRT에 대한 명확한 기술기준이 제시되어 있지 않아, IEC 61400-21의 풍력 LVRT 표준을 참조하여 SAT용 LVRT 시험평가 알고리즘을 제시한다. 즉, ESS의 출력이 0.1 ~ 0.3[p.u.]과 0.9[p.u.] 이상인 경우에 대하여, Table 2와 같이 순시 전압강하 조건을 인가하여 ESS의 응답특성을 분석한다. 여기서, VD1부터 VD8까지의 시험을 2회 연속 수행하며, 이에 따른 상세 시험절차는 다음과 같다[10].

Table 2. Instantaneous voltage drop condition of LVRT

Case	Phase voltage value	Time duration (sec)
VD1	0.90±0.05	5±0.25
VD2	0.8±0.05	1±0.05
VD3	0.75±0.05	0.4±0.02
VD4	0.7±0.05	0.35±0.02
VD5	0.65±0.05	0.3±0.02
VD6	0.6±0.05	0.25±0.02
VD7	0.55±0.05	0.2±0.02
VD8	0.00±0.05	0.15±0.02

[STEP 1] 먼저 ESS의 방전 용량에 따른 시험조건을 선택한다. 여기서, 시험조건 A는 ESS의 방전용량이 0.9[p.u.]이상인 경우이고, 시험조건 B는 ESS의 방전용량이 0.1 ~ 0.3[p.u.]인 경우이다.

[STEP 2] 순시전압강하의 크기와 지속시간을 Table 1과 같이 설정하여 ESS에 인가한다. 이때 각 Case마다 휴지시간은 제조사와 협의하도록 한다.

[STEP 3] 인가된 전압의 크기와 지속시간에 따라 ESS의 운전 여부를 판단한다. 만약 지속시간 이상으로 운전하고 있으면 [STEP 4]로 진행하고, 탈락되어 정지하면 [STEP 5]로 진행한다.

[STEP 4] [STEP 2]와 [STEP 3]의 과정을 2회 연속 수행한 후, [STEP 6]으로 진행한다.

[STEP 5] [STEP 2]와 [STEP 3]의 과정을 3회 연속 시험하여, 탈락되는 경우에는 실패로 판단하여 성적서를 발급한다.

[STEP 6] 시험조건 A와 B에 대하여 통과여부를 판단하여, 모두 통과 한 경우에는 LVRT 특성시험 성적서를 발급한다.

상기의 알고리즘을 플로우차트로 나타내면 Fig. 5와 같다.

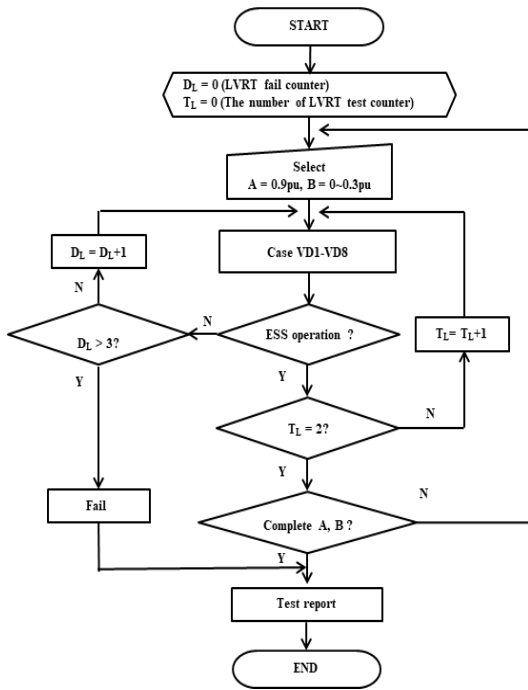


Fig. 5. LVRT test algorithm

3.4 Anti-islanding 시험

일반적으로 시험기관에서 수행되는 Anti-islanding 시험은 단체표준 KS C IEC 62116에 따라 입·출력 조건을 3가지로 분류하고, 정입피턴스 부하의 유·무효전력 비에 따라 총 47개의 Anti-islanding 조건을 모의하며 진행된다. 하지만, ESS가 연계된 실 계통의 수용가는 여러 종류의 부하가 혼재하므로, 수용가 부하를 이용하여 Anti-islanding 조건을 실 계통 운용조건에 근접하도록 Anti-islanding 현장시험 평가알고리즘을 제안한다. 여기서, Table 3은 ESS의 출력용량 조건을 나타낸 것이고, Table 4는 Table 3의 조건 A에서 RLC 부하의 유효전력과 무효전력의 비를 나타내고, Table 5는 조건 B와 C에 대하여 RLC 부하의 유효전력과 무효전력의 비를 나타내며, 이에 따른 상세 시험절차는 다음과 같다[11].

Table 3. Output condition of ESS

Condit ion	Output	Input voltage(DC)
A	Rated power	Rated voltage of battery
B	Rated power 50~60%	
C	Rated power 25~33%	

Table 4. Test condition of Anti-islanding A

Ratio of the active power to the reactive power of POC with ESS		
0.-5	0, 0	0.+5

Table 5. Test condition of Anti-islanding B&C

Ratio of the active power to the reactive power of POC with ESS		
-10.+10	0, 0	+10.+10
-10.-10		+10.-10

[STEP 1] 먼저 ESS의 출력용량에 따른 시험조건을 선택한다. 여기서 시험조건 A는 [STEP 2]로 진행하고, 시험조건 B와 C는 [STEP 6]로 진행한다.

[STEP 2] 시험조건 A에 대한 Quality Factor(Q_f)를 식 (6)과 같이 설정한다. 여기서 Q_f 는 역률 1의 조건을 만족하는 정수이다.

$$Q_f = \frac{\sqrt{Q_L \times Q_C}}{P_R} \quad (6)$$

여기서 Q_L : L에서 발생하는 무효전력, Q_C : C에서 발생하는 무효전력, P_R : R에서 소비하는 유효전력

[STEP 3] RLC부하에 대한 유·무효전력의 비를 Table 3과 같이 설정하여 시험을 진행한다. 이때 RLC부하와 수용가의 부하를 이용하여 유·무효전력의 비를 설정한다.

[STEP 4] [STEP 3] 시험조건에 따라 ESS의 운전여부를 판단한다. 만약 0.5이내에 ESS가 정지하면 [STEP 6]로 진행하고, 계속 운전하면 [STEP 5]로 진행한다.

[STEP 5] [STEP 2]에서 [STEP 4]까지의 과정을 3회 이상 계속 운전하는 경우에는 실패로 판단하여 시험성적서를 발급한다.

[STEP 6] 시험조건 B/C에 대한 Quality Factor를 식 (3)와 같이 설정하고, ESS정격 출력 전력에

대한 유효전력과 무효전력의 비율 Table 4와 같이 설정하여 [STEP 3] ~ [STEP 5]까지의 과정을 반복한다.

[STEP 7] 시험조건 A와 B/C에 대하여 통과여부를 판단하여, 모두 통과 한 경우에 대하여 Anti-islanding 특성시험 성적서를 발급한다.

상기의 알고리즘을 플로우차트로 나타내면 Fig. 6과 같다.

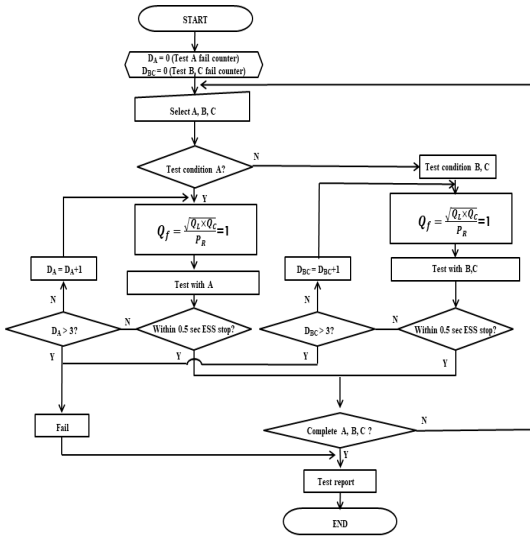


Fig. 6. Anti-islanding test algorithm

4. 30kW급 ESS SAT용 시험장치의 모델링 및 구현

4.1 PSCAD/EMTDC에 의한 SAT용 시험장치의 모델링

PSCAD/EMTDC를 이용하여, ESS, 계통모의장치 및 Anti-islanding 시험장치 등으로 구성된 SAT용 시험장치를 모델링하면 Fig. 7과 같다. 여기서 A부분은 한전 22.9kV 계통, B는 수용가 부하, C는 계통모의장치, D는 모의 RLC 부하, E는 ESS를 나타낸 것이다. 즉, 한전 22.9[kV]계통은 주변압기(45/60[MVA], 154/22.9 [kV])와 고압배전선로로 구성되며, 수용가 부하는 정전력 특성을 가진 부하로 구성한다. 또한, 계통모의장치는 제어부와 인버터부로 구성되며, 제어부에서는 목표표 하는

전압의 오차를 줄이고 응답특성도 빠르게 하기 위하여 PI제어 알고리즘을 이용하고, 인버터 부에서는 계통모의 장치 제어부에서 생성된 DC 출력을 120°의 위상차를 갖는 3상의 AC출력으로 변환하도록 구성한다. 한편, 모의 부하는 정임피던스 특성을 가진 RLC 부하로 구성하고, ESS는 전류제어알고리즘을 적용하여 유효전력과 무효전력을 서로 독립적으로 제어할 수 있도록 구성한다 [12-13].

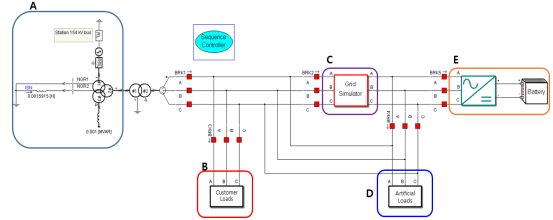


Fig. 7. Entire modeling of portable test equipment for ESS

4.2 30kW급 SAT용 시험장치의 구현

현장에 설치되어 있는 ESS의 성능평가를 수행하기 위하여, 본 연구에서 제안한 SAT용 시험장치는 Fig. 8과 같이 계통모의장치, Anti-islanding 시험장치, 수배전반, 계측장치반으로 구성한다. 여기서, 계통모의장치는 계통에서 발생하는 각종 외란(Sag, Swell, Interruption, Harmonic)을 모의할 수 있는 장치로서, 현장에서 발생 가능한 노이즈를 차단하는 노이즈컷 변압기와 현장의 전압 계급에 따라 유연하게 대응할 수 있는 가변형 변압기로 구성한다. 또한, Anti-islanding 시험장치는 합성부하와 제어장치로 구성되는데, 합성부하는 수용가 부하와 모의부하를 조합하여 30[kVA]급으로 구성한다. 한편, 수배전반은 보호협조 장치와 모니터링 장치로 구성되며, 계측장치반은 Fig. 8의 점선과 같이 계통모의장치의 1차측과 2차측, Anti-islanding 시험장치의 1차측과 2차측 그리고 ESS의 DC측에 설치하며, 시험에 필요한 전압, 전류 등과 같은 데이터를 수집하는 역할을 수행한다.[12-14]

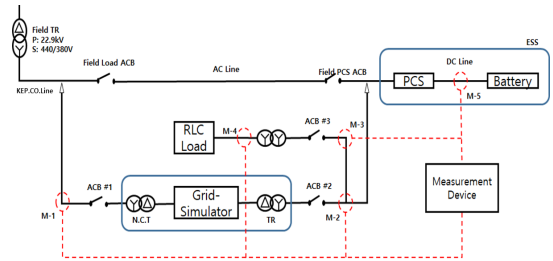


Fig. 8. Configuration of portable test equipment for ESS

5. 시뮬레이션 및 시험 특성분석

5.1 시뮬레이션 조건

본 논문에서 제안한 ESS의 SAT용 시험평가 알고리즘의 유용성을 확인하기 위하여, ESS의 SAT용 시험장치의 모델링과 30[kW]급 SAT용 시험장치를 이용하여, 용량 및 Round-trip 효율, Duty-cycle 효율, LVRT, Anti-islanding 시험을 수행한다. Table 6은 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 Table 2의 전압과 지속시간을 적용한다. 그리고, Anti-islanding 시험은 7[kW]의 출력으로 운전되고 있는 경우를 상정한다.

Table 6. Simulation conditions

Capacity /Round-trip	Charging/Discharging rate	1 C-rate
	Number of Cycle	2 Cycle
Duty-cycle	Pattern	PNNL-22010 (Average 2h)
LVRT	Voltage drop[p.u.]	0, 0.55, 0.6, 0.65, 0.7, 0.75, 0.8, 0.9
	Duration time초	0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35, 0.4, 1, 5
Anti-islanding	ESS Output 25%~33%	ESS Output 7[kW]

5.2 PSCAD/EMTDC에 의한 특성분석

5.2.1 용량 및 Round-trip 효율시험

상기의 시뮬레이션 조건에 따라 용량 및 Round-trip 효율시험을 수행하면 Fig. 9와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, Fig. 9(a)는 ESS의 충·방전 운전과 휴지기간 동안의 유효전력을 나타내고, Fig. 9(b)는 ESS의 누적 에너지 지양(SOC)을 나타낸 것이다. 즉, ㉠구간은 ESS를 1C-rate로 충전종료전압까지 충전한 구간의 SOC 특성을 나타내며, 이때 충전전력량은 약 31.25[kWh]로 산정되었다. 또한, ㉢구간은 ESS를 1C-rate로 방전종료전압까지 방전한 구간의 SOC 특성을 나타내며, 이때 방전전력량은 약 28.8[kWh]로 산정되었다. 한편, ㉡, ㉣, ㉤, ㉥구간은 ESS의 충·방전 운전 후 30분의 휴지시간을 나타낸다. 따라서, ESS의 용량은 방전량을 기준으로 산정하면 28.8[kWh]이고, Round-trip 효율은 충전량 대비

방전량을 계산하면 약 92.16[%]가 산정됨을 확인하였다.

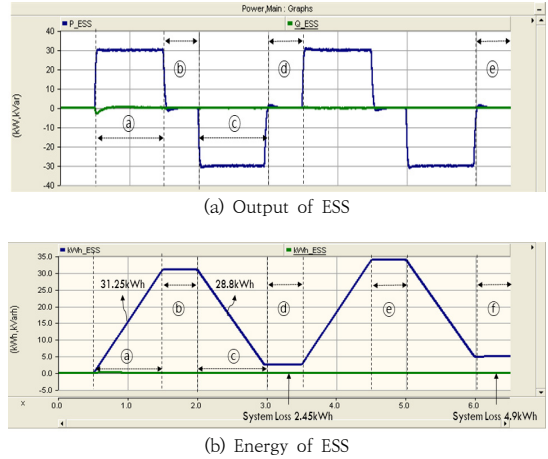


Fig. 9. Characteristic of Capacity and Round-trip

5.2.2 Duty-cycle 추종 특성시험

상기의 시뮬레이션 조건에 따라 Duty-cycle 효율시험을 수행하면 Fig. 10과 같다. 여기서, Fig. 10(a)는 PNNL-22010에서 제시한 주파수 패턴을 PSCAD/EMTDC를 이용하여 제어신호로 변환한 것을 나타내며, 총 1,800개의 신호가 4초 간격으로 출력되도록 상정하였다. 또한, Fig. 10(b)는 ESS의 충·방전 운전을 나타낸 것으로, Fig. 10(a)의 제어신호에 따라 ESS의 출력이 추종되고 있음을 확인 하였다.

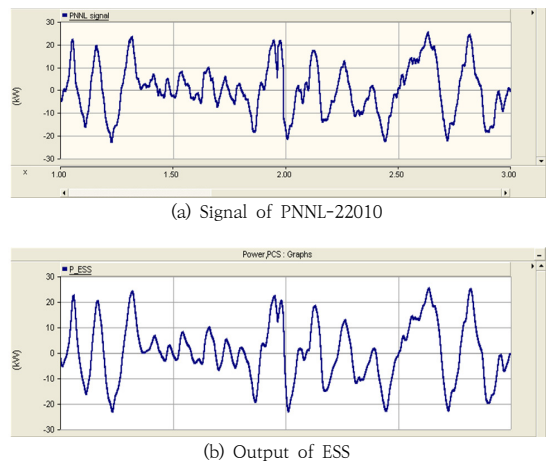
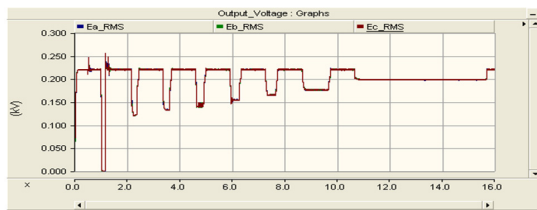


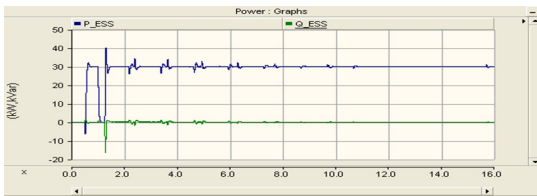
Fig. 10. Characteristic of Duty-cycle

5.2.3 LVRT 시험

상기의 시뮬레이션 조건에 따라 LVRT시험을 수행하면 Fig. 11과 같다. 여기서, Fig. 11(a)는 계통모의장치의 출력 파형으로 목표로 하는 전압과 지속시간을 나타낸 것이다. 또한, Fig. 11(b)는 ESS의 유효전력을 나타낸 것으로, VD1 조건에서는 ESS의 출력이 0[p.u.]까지 감소하지만, 계통에서 탈락되지 않고, 휴지시간동안 출력이 회복됨을 알 수 있었다. 그리고 VD2에서 VD8까지의 조건에서는 ESS의 출력에 약간의 노이즈가 발생하지만, 계통과 연계되어 안정적으로 운전되고 있음을 확인할 수 있었다.



(a) Output of Grid-simulator

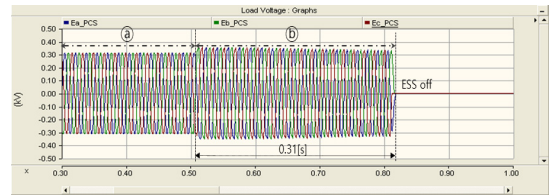


(b) Output of ESS

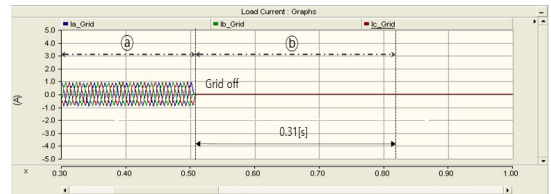
Fig. 11. Characteristic of LVRT

5.2.4 Anti-islanding 시험

상기의 시뮬레이션 조건에 따라 Anti-islanding 시험을 수행하면 Fig. 12와 같다. 여기서, Fig. 12(a)의 ㉠, ㉡ 구간은 Anti-islanding을 모의하기 전과 후의 ESS의 출력을 나타낸 것이고, Fig. 12(b)는 계통에서 공급되는 전류를 나타낸다. 즉, Fig. 12(b)의 ㉠구간은 Anti-islanding의 조건을 맞추기 위하여, ESS의 출력과 모의 RLC 부하를 일정한 값으로 조정하는 특성을 나타내는데, 오차 값이 정격전류의 10% 미만이 되도록 제어한 것이다. 또한, ㉡구간은 계통의 전원을 차단시켜 Anti-islanding을 완전히 모의한 경우의 계통에서 공급되는 전류인데, 이 구간에서 ESS는 약 0.31초 동안 운전이 지속된 후 정지하는 것을 알 수 있었다. 따라서 ESS가 분산전원 계통연계 기술기준(0.5초 이내)에 부합하는 Anti-islanding 방지특성을 가지고 있음을 확인할 수 있었다.



(a) Output voltage of ESS



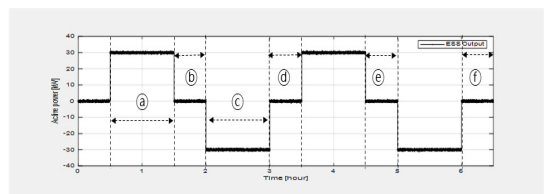
(b) Current of distribution system

Fig. 12. Characteristic of Anti-islanding

5.3 30kW급 SAT용 시험장치에 의한 특성분석

5.3.1 용량 및 Round-trip 효율시험

시뮬레이션과 동일한 시험조건에 따라, 30[kW]급으로 구성된 ESS의 용량 및 Round-trip 효율시험에 대한 출력시험을 수행하면 Fig. 13과 같다. 여기서, Fig. 13(a)는 ESS의 충·방전 운전과 휴지시간에 대한 유효전력을 나타내고, Fig. 13(b)는 ESS의 누적 에너지량을 나타낸 것이다. 즉, ㉠구간은 ESS를 1C-rate로 충전종료전압까지 충전한 구간의 SOC 특성을 나타내며, 이때 총 충전전력량은 약 31.38[kWh]로 산정되었다. 또한, ㉡구간은 ESS를 1C-rate로 방전종료전압까지 방전한 구간의 SOC특성을 나타내며, 이때 총 방전전력량은 약 28.69[kWh]로 산정되었다. 한편, ㉢, ㉣, ㉤, ㉥구간은 ESS의 충·방전 운전 후 30분의 휴지시간을 나타낸다. 따라서, ESS의 용량은 방전량을 기준으로 산정하면 28.69[kWh]이고, Round-trip 효율은 충전량 대비 방전량을 계산하면 약 91.4[%]가 산정되어, PSCAD/EMTDC에 의한 시뮬레이션 값과 시험에 의한 값이 유사함을 알 수 있었다.



(a) Output of ESS

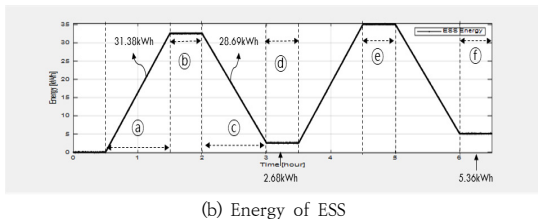


Fig. 13. Characteristic of Capacity and Round-trip

5.3.2 Duty-cycle 추종 특성시험

시뮬레이션과 동일한 시험조건에 따라, Duty-cycle 효율시험 특성을 분석하면 Fig. 14와 같다. 여기서, Fig. 14(a)는 PNNL-22010에서 제시한 주파수 패턴을 Excel을 이용하여 제어신호로 변환한 것을 나타내며, 총 1,800개의 지령치가 4초 간격으로 출력되도록 상정하였다. 또한, Fig. 14(b)는 ESS의 충·방전 운전 특성을 나타낸 것으로, Fig. 14(a)의 제어신호에 따라 ESS의 출력이 추종되고 있음을 확인 하였다.

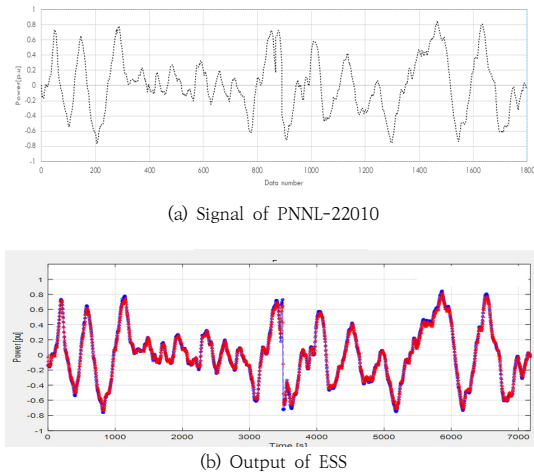


Fig. 14. Characteristic of Duty-cycle

5.3.3 LVRT 시험

시뮬레이션과 동일한 시험조건에 따라, VD1조건인 LVRT시험을 수행하면, ESS가 지정된 전압과 지속시간을 유지하지 못하고 탈락하는 현상이 발생하였다. 이것은 현재 국내에서 ESS의 LVRT 기술기준이 없기 때문에 ESS가 LVRT에 대한 제어기능을 수행하지 못한 것이라 평가된다. 따라서 시험 조건에서 VD1조건을 제외한 나머지 구간에 대한 LVRT시험을 수행하면 Fig. 15와 같다. 여기서, Fig. 15(a)는 계통모의장치의 출력 파형으로

목표로 하는 전압과 지속시간을 나타낸 것이다. 또한, Fig. 15(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.

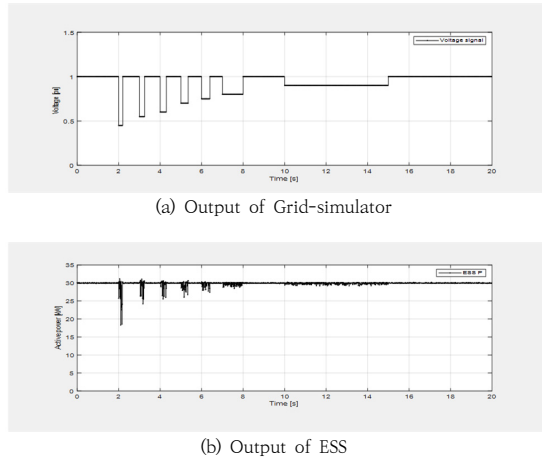


Fig. 15. Characteristic of LVRT

5.3.4 Anti-islanding 시험

시뮬레이션과 동일한 조건에 따라 Anti-islanding 제어특성을 나타내면 Fig. 16과 같다. 여기서, Fig. 16(a)의 ㉠, ㉡ 구간은 Anti-islanding을 모의하기 전과 후의 ESS의 출력을 나타낸 것이고, Fig. 16(b)는 계통에서 공급되는 전류를 나타낸다. 즉, Fig. 16(b)의 ㉠ 구간은 Anti-islanding의 조건을 맞추기 위하여 ESS의 출력과 모의 RLC 부하를 일정한 값으로 조정하는 특성을 나타내는데, 오차 값이 정격전류의 10% 미만이 되도록 제어한 것이다. 또한, ㉡ 구간은 계통의 전원을 차단시켜 Anti-islanding을 완전히 모의한 경우의 계통에서 공급되는 전류인데, 이 구간에서 ESS는 약 0.49초 동안 운전이 지속된 후 정지되는 것을 알 수 있었다. 따라서 PSCAD/EMTDC와 시험장치에 의한 Anti-islanding 특성이 약 0.18초 정도의 차이가 발생하지만, 두 경우 모두 계통전원 차단 후 0.5초 이내에 ESS가 계통에서 탈락되어, 계통연계 기술기준에 만족함을 확인할 수 있었다.

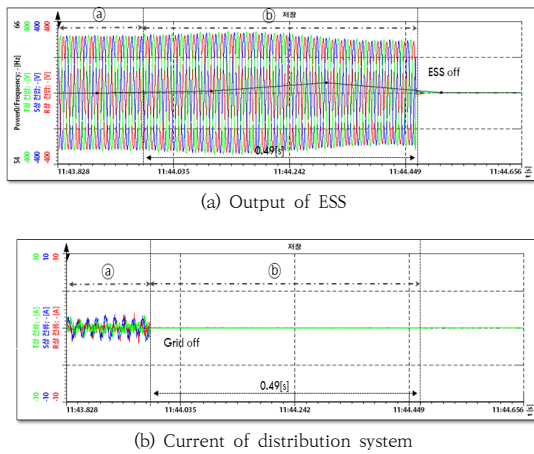


Fig. 16. Characteristic of Anti-islanding

6. 결론

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. 이에 대한 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) PSCAD/EMTDC의 모델링을 이용하여, 용량 및 Round-trip 효율에 대한 시험특성을 분석한 결과, ESS가 정해진 용량과 시간동안 정확하게 충·방전 운영을 수행하였으며, 이때 ESS의 용량은 약 28.8[kWh]이고, Round-trip 효율은 약 92.16[%]임을 확인할 수 있었다. 또한, 실제 30[kW]급 시험장치를 이용하여, 동일한 조건으로 시험을 수행한 결과, ESS의 용량은 약 28.69[kWh]이고, Round-trip 효율은 약 91.4[%]임을 알 수 있었다. 따라서 PSCAD/EMTDC에 의한 시뮬레이션 값과 시험에 의한 값이 유사함을 알 수 있었다.

(2) PSCAD/EMTDC의 모델링을 이용하여, Duty-cycle 효율시험에 대한 시험특성을 분석한 결과, PNNL-22010의 제어신호에 따라 ESS의 출력이 정확하게 추종되고 있음을 알 수 있었다. 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.

(3) PSCAD/EMTDC의 모델링을 이용하여, LVRT에 대한 시험특성을 분석한 결과, 계통모의장치가 목표로 하는 전압과 지속시간을 구현할 수 있음을 확인하였고, 모든 조건에서 ESS가 계통에 연계되어 안정적으로 운전되고 있음을 확인할 수 있었다. 또한, 30[kW]급 시험장치를 이용하여, 동일한 조건에서 시험을 수행한 결과, ESS가 VD1조건에 지정된 전압과 지속시간을 유지하지 못하고 탈락하는 현상이 발생하였다. 따라서 VD1조건을 제외한 나머지 구간에 대한 시험을 진행한 결과, PSCAD/EMTDC에 의한 시뮬레이션 값과 시험에 의한 값이 동일한 특성을 나타냄을 알 수 있었다.

(4) PSCAD/EMTDC의 모델링을 이용하여, Anti-islanding에 대한 시험특성을 분석한 결과, ESS가 Anti-islanding 조건에서 약 0.31초 동안 운전이 지속된 후 정지함을 알 수 있었다. 또한, 30[kW]급 시험장치를 이용하여, 시뮬레이션과 동일한 조건에서 시험을 수행한 결과, ESS가 약 0.49초 동안 운전이 지속된 후 정지함을 알 수 있었다. 따라서 PSCAD/EMTDC와 시험장치에 의한 Anti-islanding 조건에서의 지속시간이 약 0.18초 정도 차이가 발생하지만, 분산전원 계통연계 기술기준인 0.5초 이내에 ESS가 계통에서 탈락되어, Anti-islanding에 문제가 없음을 확인하였다.

References

- [1] Eung-Sang Kim, "Microgrid and ICT Technology", The Proceedings of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, vol. 29, no. 4, pp. 12-25, 2015. 7.
- [2] IEEE 1547.1, "IEEE Standard conformance Test Procedures for Equipment Interconnecting Distributed Resources with Electric Power System", June, 2005.
- [3] IEEE 1547. 6, "IEEE Standard conformance Test Procedures for Equipment Interconnecting Distributed Resources with Electric Power System", June, 2009.
- [4] IEC 61000-4-11, "Voltage dips, short interruptions and voltage variation immunity test", 2014.
- [5] IEC 62933-2-1, "Electrical energy storage(EES) systems - Part 2-1: Unit parameters and testing methods - General specification", 2017.
- [6] IEC 62933-5-1, "Electrical energy storage(EES) systems - Part 5-1: Safety considerations for grid-integrated

EES systems - General", 2017.

- [7] SGSF-025-5-x "Electrical energy storage system- Part x Site acceptance test method", 2019.
- [8] SPS-C-KBIA-10104-03-7312 "Secondary lithium- ion battery system for battery energy storage systems-performance and safety requirements, 2018
- [9] PNNL-22010 (2012, Protocol for Uniformly Measuring and Expressing the Performance of Energy Storage Systems)
- [10] IEC 61400-21 "Wind turbines-Part 21 Measurement and assessment of power quality characteristics of grid connected wind turbines", 2008.
- [11] IEC 62116 "Utility-interconnected photovoltaic inverters - Test procedure of islanding prevention measures", 2014
- [12] Min-Kwan Kang, Sung-Sik Choi, Jae-Beom Park, Yang-Hyeon Nam, Eung-Sang Kim, Dae-Seok Rho, "A Study on the Modeling Method of Performance Evaluation System for MW Scaled Energy Storage System Using the PSCAD/EMTDC", The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers, vol. 66, no. 6, pp. 885-891, 2017. 6.
DOI: <http://doi.org/10.5370/KIEE.2017.66.6.885>
- [13] Jea-Bum Park, Mi-Sung Kim, Dae-Seok Rho, "Characteristic Analysis and Implementation of 30kW Portable Test Equipment for Performance Evaluation in Energy Storage System", The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers, vol. 67, no. 6, pp. 715-723, 2018. 6.
DOI: <http://doi.org/10.5370/KIEE.2018.67.6.715>

박 재 범(Jea-Bum Park)

[중신회원]



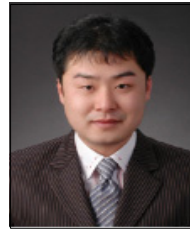
- 2011년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공 학과(공학사)
- 2014년 2월 : 동대학원 전기전자 통신공학과 졸업(공학석사)
- 2014년 3월 ~ 현재 : 동대학원 전기전자통신공학과 박사과정
- 2017년 10월 ~ 현재 : 한국화학융합시험연구원/책임연구원

<관심분야>

배전계통 운용, 신재생에너지, ESS

김 병 기(Byeong-Ki Kim)

[정회원]



- 2008년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 졸업(공학사)
- 2012년 2월 : 동대학원 전기전자 통신공학과 졸업(공학석사)
- 2015년 8월 : 동대학원 전기전자 통신공학과 졸업(공학박사)
- 2016년 10월 ~ 현재 : 한국에너지기술연구원/ 선임연구원 재직중

<관심분야>

배전시스템 운용, 분산전원 연계, 전력품질 해석

김 미 성(Mi-Sung Kim)

[정회원]



- 1988년 ~ 1994년 : 연세대학교 금속공학과 연구조교
- 1994년 8월 : 조선대학교 에너지 자원공학(공학박사)
- 1994년 5월 ~ 2010년 7월 : 에너지관리공단 신재생에너지센터 부장
- 2013년 2월 ~ 현재 : 한국화학융합 시험연구원/수석 연구원

<관심분야>

ESS, 분산전원연계

노 대 석(Dae-Seok Rho)

[중신회원]



- 1985년 2월 : 고려대학교 전기공 학과 (공학사)
- 1987년 2월 : 동대학원 전기공학과 (공학석사)
- 1997년 3월 : 일본 북해도대학교 대학원 전기공학과(공학박사)
- 1987년 3월 ~ 1998년 8월 : 한국 전기연구소 연구원/선임연구원
- 1999년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기전자통신 공학부 교수

<관심분야>

전력/배전 계통, 분산전원연계, 전력품질해석