

Analysis on Insulation and Protection Characteristics of Grid Connected ESS in Ground/Short-Circuit Fault

지/단락실증시험에서 MW급 계통연계형 ESS 절연/보호시스템 성능 분석에 관한 연구

Jin-Tae Kim, Seung-Yong Lee, Sang-Jin Park, Han-Ju Cha, Soo-Yeol Kim
김진태, 이승용, 박상진, 차한주, 김수열

Abstract

With recent ESS (Energy Storage System) fire accident, the fault protection performance is becoming more important. However, there has never been any experiments with the protection performance on the faults in the ESS system level. In this study, the effect of AC ground fault and IGBT (Insulated Gate Bipolar mode Transistor) short-circuit failure on MW class ESS was performed experimentally for the first time in the world. First of all, the effect of the AC single line ground fault on battery was analyzed. Moreover, the transient voltage was investigated as a function of the battery capacity and the power level. Finally, the breaking capability and insulation performance of ESS were examined under PCS short-circuit fault condition. Through the tests, it was found that ESS protection system safely blocked the faulty current regardless of the faults, whereas the electronic parts such as IGBT and MC (Magnetic Contactor) were broken by the fault current. Also, the electrical breakdown in ESS resulted from the transient voltage during the protection process.

Keywords: Energy Storage System, ESS, Short-Circuit Fault, Electrical Breakdown, Insulation Performance, Transient Voltage

I. Introduction

미세먼지와 지구온난화 등 다양한 환경문제로 인하여 친환경 에너지원에 대한 관심이 높아지고 있으며, 풍력과 태양광을 활용한 신재생발전이 증가하고 있다 [1]. 신재생에너지는 간헐적이고, 변동성이 높은 에너지 자원으로 관심이 작기 때문에, 발전기 탈락 등 비정상적인 상황에서 계통 주파수 안정도를 저하시킬 수 있다 [2]. 이런 이유로 계통 안정성과 신뢰성을 향상시키기 위하여 반응속도가 빠른 고출력의 리튬이온 기반의 ESS가 신재생에너지 발전원에 적용되고 있다 [3].

최근 들어, 여러 건의 화재가 현장 설치된 ESS에서 발생하고 있으며, 운영 환경 관리 미흡, ESS 통합 제어 체계 부재 및 설비 간 보호 체계 미흡 등 다양한 원인들이 사고를 유발시키는 것으로 알려져 있다 [4]. 이외 사고의 다른 원인으로 고장전류 차단 성능 미흡과 과전압 보호기기의 미동작 등이 거론되고 있으며, 표준 서지전압과 전류파형을 활용하여 보호기기인 SPD (Surge Protection Device)와 RCD (Residual Current Device) 및 배터리와 PCS의 절연 보호 성능을 검토하고 있다 [5]-[8]. 그러나 이러한 검토는 부품 단

품 수준에서 이루어지기 때문에, ESS 설비 전체의 안전성을 확보하기 위해서는 시스템 규모 수준에서 ESS의 차단 보호시스템과 절연 시스템의 성능을 분석하는 것이 필요하다.

본 논문에서는 계통연계형(Grid connected) ESS을 기반으로 전기적 충격에 대한 ESS 보호시스템의 성능을 분석하기 위하여 고장 유형 별 ESS의 차단 보호시스템과 고장전류 차단 과정에서 발생하는 과도전압(Transient voltage)에 대한 절연시스템의 성능을 고찰하고자 한다.

II. 고장 유형 별 실증시험 시나리오 및 실험 방법

ESS 보호시스템 성능은 해석을 통해 분석이 가능하다. 그러나 고장전류 차단 시 발생하는 아크 전압 및 아크 소호 시간 등 차단특성은 해석에 정확하게 반영되기 힘들기 때문에, 차단 과정에서 발생하는 과도전압과 고장전류를 해석적으로 예측하기 매우 어렵다. 이런 이유로 본 논문에서는 AC 1선 지락과 선간 단락 고장을 모의한 후, ESS 보호시스템의 성능을 실험적으로 분석하였다.

Article Information

Manuscript Received February 24, 2020, Revised March 31, 2020, Accepted April 7, 2020, Published online June 30, 2020

J. Kim, S. Park and S. Kim are with KEPCO Research Institute, Korea Electric Power Corporation, 105 Munji-ro Yuseong-gu, Daejeon 34056, Republic of Korea.

S. Lee is with Department of Electrical Engineering, Seoul National University, 1 Gwanak-ro Gwanak-gu, Seoul 08826, Republic of Korea.

H. Cha is with Department of Electrical Engineering, ChungNam National University, 99 Daehak-ro Yuseong-gu, Daejeon 34134, Republic of Korea.

Correspondence Author: Soo-Yeol Kim (sy.k@kepco.co.kr)

ORCID: 0000-0001-5723-7234 (J. Kim); 0000-0002-4280-0220 (S. Lee); 0000-0002-4109-6083 (S. Park); 0000-0002-9185-6124 (H. Cha); 0000-0001-5334-0891 (S. Kim)



This paper is an open access article licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International Public License.

To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>

This paper, color print of one or more figures in this paper, and/or supplementary information are available at <http://journal.kepco.co.kr>.

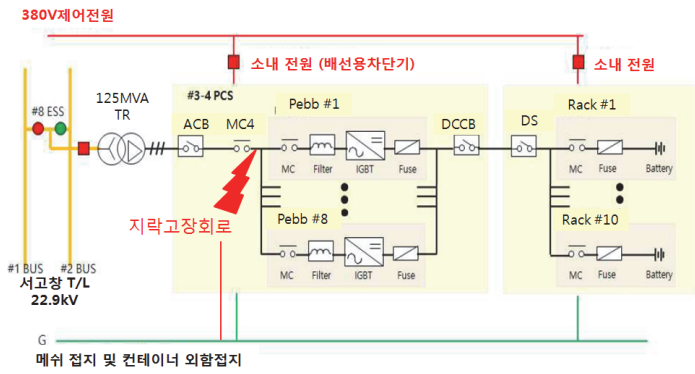


Fig. 1. AC 1선 지락 실증시험을 위한 전기적 고장 모의 회로도.

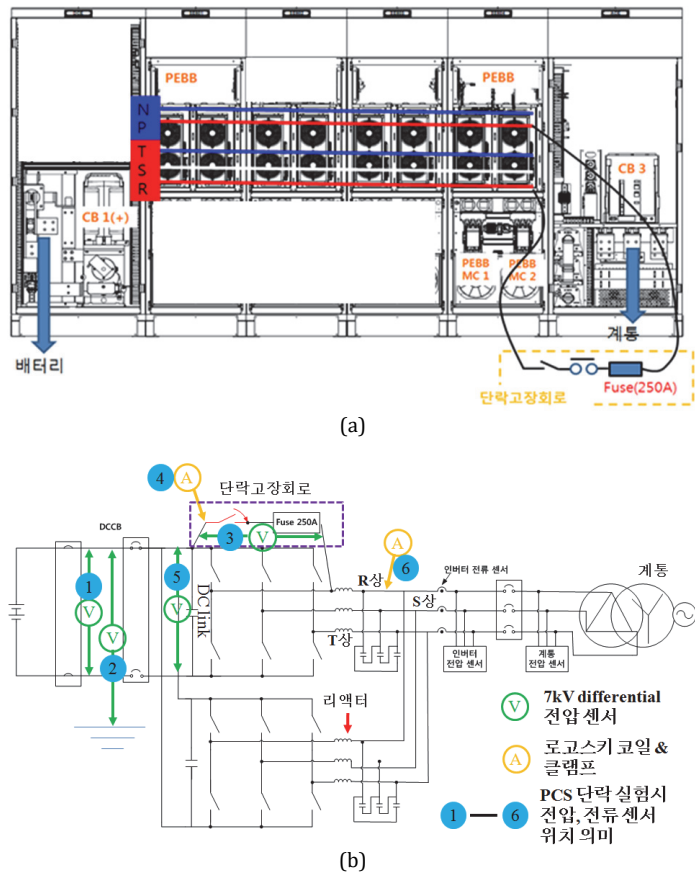


Fig. 2. PCS 단락 실증시험을 위한 고장 모의와 전기적 특성 계측 위치.

A. AC 1선 지락 실증 시나리오 및 실험 방법

AC 1선 지락 실증시험은 TABLE 1에 기술된 시나리오에 따라 수행되었으며, AC 차단기와 케이블로 구성된 별도의 지락 고장회로가 Fig. 1에서 볼 수 있는 있는 바와 같이 지락 고장점을 만들기 위하여 PCS 2차측 출력부와 MC 사이에 삽입되었다. 랙 수(1-10개)와 ESS 출력(1-1,000 kW)에 따른 AC 1선 지락 시험이 차단 과정에서 발생하는 과도전압에 대한 배터리 용량과 출력 영향을 분석하기 위하여 수행되었다. 각 실험 조건에서 측정된 CMV (Common Mode Voltage)는 최대값을 의미하며, CMV는 1개 랙의 10 kW 출력

TABLE 1
AC 1선 지락 실증시험 시나리오

순서	내용
1	AC 1선 지락 모의를 위한 고장점 선정
2	고장점에 별도의 지락 고장회로 설치
3	SOC 58% 및 ESS 충전모드 운전
4	지락 고장회로를 통한 지락 고장 투입
5	ESS 지락 보호 동작 : MC4, DC 차단기 동작 확인
6	배터리 절연 성능 분석을 위한 NMV, CMV 분석

TABLE 2
PCS PEBB IGBT 단락 실증시험 시나리오

순서	내용
1	PCS 단락 모의를 위한 고장점 선정
2	고장점에 별도의 PCS 단락 고장회로 설치
3	SOC 58% 및 ESS 충전모드 운전
4	단락 고장회로를 통한 고장 투입
5	ESS의 단락 보호 동작 확인 : MC4, DC 차단기 동작
6	CMV, NMV, 고장전류 확인

TABLE 3
단락 고장 회로에서 PCS와 배터리 전압 계측 위치

순서	내용
1	배터리 NMV 전압
2	배터리 CMV 전압(P+CMV, P-CMV)
3	단락 고장회로 전압(P+CMV)
4	DC link NMV 전압

TABLE 4
단락 고장 회로에서 고장전류 계측 위치

순서	내용
1	배터리 (+) 단자
2	배터리 (-) 단자
3	단락 고장회로
4	단락 고장회로의 MC
5	DC link의 (+) 단자
6	PCS 2차측 R상

조건에서 도출된 값을 기준으로 정규화 표현되었다. 7 kV 고전압 절연 프로브를 배터리의 CMV와 NMV (Normal Mode Voltage) 분석을 위하여 DS (Disconnecting Switch)와 PCS의 DC 차단기 사이에 설치하였다.

B. PCS 선간 단락 실증 시나리오 및 실험 방법

PCS의 PEBB (Power Electronic Building Block) IGBT 선간 단락 실증시험은 TABLE 2에 기술된 시나리오에 따라 진행되었다. 선간 단락 시험은 1 MW 출력 조건에서 500 kW 배터리를 활용하여 수행되었고, Fig. 2(a)에서 확인할 수 있는 바와 같이 fuse와 MC로 구성된 별도의 단락 고장회로가 단락 고장점을 만들기 위하여 PCS의 DC link (+) 단과 AC 측 R상 사이에 삽입되었다. 로고스키 코일 (2, 12, 30, 100 kA 정격)과 전류 클램프 및 7 kV 고전압 프로브가

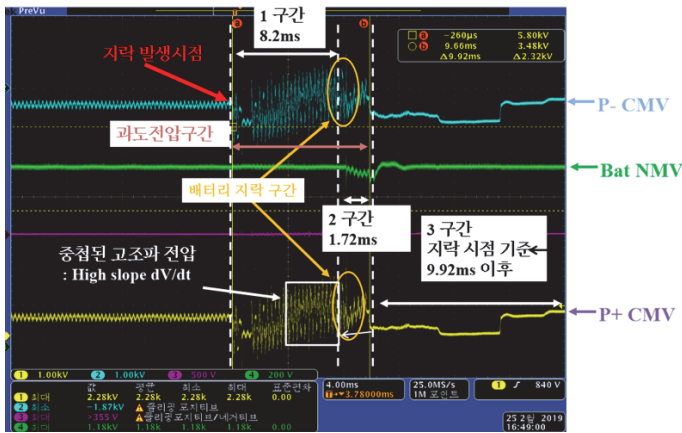


Fig. 3. AC 1선 지락 조건에서 배터리 절연시스템 상태 추정을 위한 과도 전압.

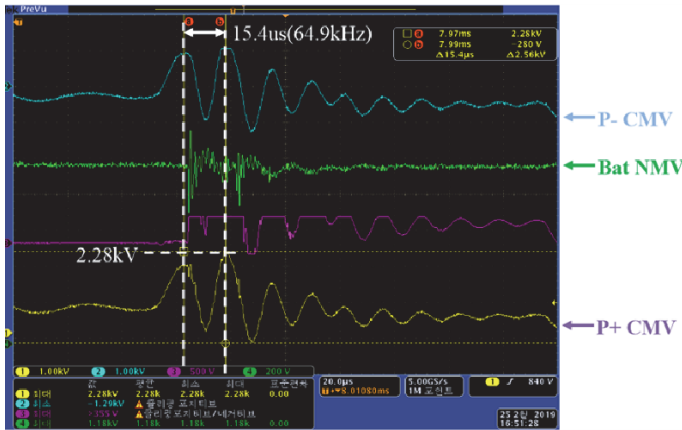


Fig. 4. 기생커패시턴스와 인덕턴스에 영향을 받는 AC 고조파 성분의 주파수와 최대전압.

계통과 배터리로부터 고장점으로 유입되는 고장전류와 과도전압을 계측하기 위하여 Fig. 2(b)에서 볼 수 있는 바와 같이 1-6 번 위치에 설치되었다. PCS와 배터리의 접지는 메쉬 형태이며, 설비의 380 V 제어전원과 계측기의 접지는 시험 중 전원상실을 고려하여 별도로 접지를 구성하였다. 실험에 사용된 DC 차단기는 순시특성을 가지는 모델로 선정하였다.

III. 고장 유형 별 ESS 보호시스템 성능 분석

A. AC 1선 지락에서 ESS 절연/차단 보호 성능 분석

AC 1선 지락 조건에서 고장전류 차단 성능과 차단 과정에서 발생하는 과도전압에 의한 배터리 절연성능을 고찰하기 위하여 배터리의 CMV와 NMV 전압을 분석하였다.

Fig. 3은 AC 1선 지락 전 후의 배터리 전압을 나타내며, AC 1선 지락 전, 배터리 전압은 500 V를 유지하였다. AC 1선 지락 후, 배터리의 CMV와 NMV 전압은 고장전류가 차단되는 25 ms 동안 ESS의 보호동작과 고장에 따른 영상전압으로 인해 과도상태를 보

TABLE 5

배터리 용량과 출력에 따른 CMV 비교

순서	운전모드	랙수	출력 [kW]	CMV [PU]
1	방전	1	10	1
2	충전	1	10	1
3	방전	1	120	1
4	충전	1	120	1.01
5	방전	2	10	1.05
6	충전	5	10	1.11
7	방전	10	100	1.21
8	방전	10	1,000	1.24
9	방전	10	1	1.17

였다.

우선, CMV 전압은 AC 1선 지락 발생 시점부터 배터리 지락 발생 전까지의 8.2 ms 동안 상승하였으며, 이 특성은 지락전류에 의한 영상전압과 R,S,T3상 중 1상 지락에 따른 IGBT 출력 불균형에 의해 나타났다. 정현파 형태의 AC 고조파 성분이 Fig. 4에서 볼 수 있는 것처럼 상승하는 과도전압에 중첩되었으며, 이때 AC 고조파 성분의 주파수와 최대전압은 64.9 kHz와 2.28 kV이었다. AC 고조파 특성은 PCS의 스위칭 및 보호동작의 영향 보다는 ESS에 존재하는 기생 커패시턴스와 인덕턴스 및 차단 중 발생하는 아크와 관련이 있는 것으로 분석되었다. 이러한 AC 고조파 성분이 중첩된 과도전압이 배터리에 절연파괴를 일으켰으며, 아크로 인한 지락에 의해 CMV가 감소했다가 다시 상승하는 특성을 보였다.

본 실험결과로부터 ESS의 차단 보호시스템은 AC 1선 지락에 의한 고장전류를 안전하게 차단할 수 있음을 확인하였다. 그러나 차단과정에서 발생한 AC 고조파 성분이 중첩된 과도전압은 배터리의 절연매질인 공기와 고체절연물에 의해 형성된 실제 절연내력보다 낮은 전압임에도 불구하고 배터리의 절연파괴를 일으켰다 [9].

배터리의 과도전압이 AC 1선 지락 조건에서 발생한 배터리의 절연파괴를 분석하기 위하여 배터리 용량과 출력에 따라 분석되었다. 배터리 용량과 출력에 따라 정리된 TABLE 5에서 확인할 수 있는 바와 같이 랙이 1개 사용된 조건에서 AC 1선 지락이 발생하면, CMV 전압은 운전모드 및 출력에 관계없이 전압이 거의 동일하였다. 랙이 10개 사용된 조건에서 CMV 전압은 출력이 증가함에 따라 상승하는 특성을 보였다. 또한, 동일 출력 조건에서 CMV 전압은 운전모드에 관계없이 랙 수가 증가할수록 상승하였다. 본 실험 결과로부터 고출력 ESS에서 고장 발생 시 절연파괴 가능성이 높음을 확인할 수 있었다 [10].

B. PCS 선간 단락에서 ESS 절연/차단 보호 성능 분석

본 절에서는 단락 상황에서 고장전류에 대한 ESS 차단 보호 성능을 고찰하고, 과도전압에 대한 PCS와 배터리 절연 성능을 분석하기 위하여 설비 내 주요 부분의 고장전류와 CMV 전압을 관찰 하였다.

Fig. 5는 단락 고장 전 후의 고장전류와 CMV 전압을 보여주며, 배터리의 양단 전압과 DC link 전압은 단락 고장 전 동일하였다. 단락 고장 후, 고장전류는 특정 부위로 집중된 후, 30 ms 이내 ESS의 보호동작에 의해 차단되었으나, 그 과정에서 과도전압이 발생하였다. IGBT 출력은 고장전류에 대한 PCS과전류 보호 동작에 의해 단락 고장 발생시점으로부터 8 ms 이내 정지하였고, 이 과정

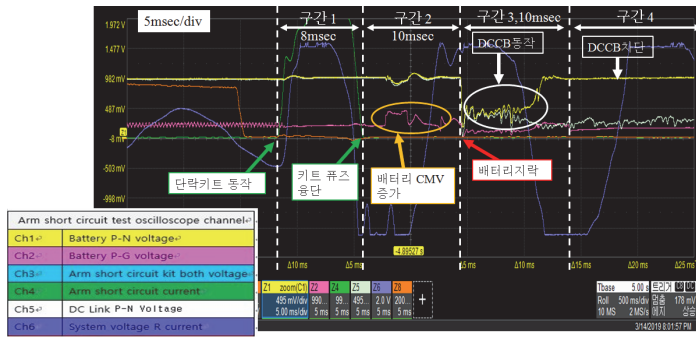


Fig. 5. AC 1선 지락 조건에서 배터리 절연시스템 상태 추정을 위한 과도 전압.

에서 매우 큰 고장전류가 내부 임피던스 차이로 인해 계통과 배터리로부터 유입하였다. 이로 인하여, IGBT 소손 발생과 함께, 배터리와 DC link가 DC 차단기 보호동작에 의해 순간적으로 분리되었으며, 이 과정에서 상승한 CMV로 인하여 절연파괴가 PCS와 배터리 순서대로 발생하였다.

본 실험결과로부터 단락 고장전류는 ESS의 보호 알고리즘과 차단 보호시스템에 의해 안전하게 차단될 수 있음을 확인하였다. 그러나 IGBT가 매우 큰 고장전류에 의해 소손되었을 뿐 만 아니라 절연파괴가 PCS와 배터리에서 차단 과정 중 발생한 과도전압에 의해 발생하였다.

IV. Conclusion

본 논문에서는 ESS 보호시스템의 차단과 절연성능을 분석하기 위하여 계통연계형 ESS를 기반으로 운전 조건에서 AC 1선 지락과 PCS 단락 고장을 모의한 후, ESS의 보호 및 절연 보호 동작을 실험적으로 분석하였다.

(1) ESS의 보호시스템은 AC 1선 지락으로 인한 고장전류를 안전하게 차단하였으나, 절연시스템은 차단 과정 중 발생한 AC 고조파 성분이 포함된 과도전압에 의해 파괴되는 것을 확인하였다.

(2) 과도전압은 배터리 용량과 출력이 증가함에 따라 상승하였으며, 배터리 절연설계에 용량과 출력 증가에 따라 상승하는 과도전압에 상응하는 전압이 고려되어야 함을 확인하였다.

(3) PCS 단락 고장에 대하여 ESS 보호시스템은 고장전류를 안전하게 차단하였으나, 이 과정에서 IGBT 등 전자 부품이 매우 큰 고장전류에 의해 파손되었다.

본 연구를 통하여 ESS 보호시스템의 고장전류 차단 차단과정에서 부품 소손 및 절연파괴 문제가 발생할 수 있음을 확인하였다. 계통연계형 ESS의 안정적인 운영을 위해서는 본 실험적 연구를 통하여 확인된 문제들의 정확한 분석을 통하여 절연파괴 방지를 위한 추가적인 연구 및 보완된 ESS 시스템 개발이 필요할 것으로 사료된다.

Acknowledgment

This work was supported by Korea Electric Power Corporation. 본 연구는 한국전력공사가 지원하였음.

References

- [1] H. Zhao, Q. Wu, H. Xu, C.N. Rasmussen, "Review of Energy Storage for Wind Power Integration Support," *Applied Energy*, Vol. 137, pp. 545-553, Jan. 2015, Available: <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.04.103>.
- [2] Yichuan Niu, Surya Santoso, "Sizing and Coordinating Fast and Slow Response Energy Storage Systems to Mitigate hourly Wind Power Variation," *IEEE Trans. on Smart Grid*, Vol. 9, No. 2, pp. 1107-1117, Mar. 2017, Available: <http://doi.org/10.1109/TSG.2016.25775549>.
- [3] K.C. Divya, Jacob Ostergaard, "Battery Energy Storage Technology for Power Systems- an Overview," *Electric Power Systems Research*, Vol. 79, Issue 4, pp. 511-520, Apr. 2009, Available: <http://doi.org/10.1016/j.epr.2008.09.017>.
- [4] 박상진, "ESS 운영 현황 및 계획", 한국전력공사, 2016.
- [5] "Standard for safety, batteries for use in Light Electric Rail(LER) Application and Stationary Application," UL-1973, 2017.
- [6] 이복희, 박희열, 신건진, "RCD와 SPD의 접속 위치에 따른 보호협조", *KIEE*, Vol. 27, No. 3, Mar. 2013, Available: <http://dx.doi.org/10.5207/JIEIE.2013.27.5.095>.
- [7] "Standard for Surge Protection Device," UL-1449, 2014.
- [8] "전기전자시스템용 전력변환장치의 성능시험 요구사항," SCSF-025-4, 2nd edition, 2015.
- [9] 임기조, "절연물 가속 열화", *유전체 공학론*, 한국, pp. 154-163.
- [10] Nicholas A, Krall, Alvin W, Trivelpiece, "Principle of Plasma physics," 2nd edition, USA, McGraw-Hill, pp. 353-362.