

BESS가 연계된 배전계통에서 새로운 재폐로 기법

(New Reclosing Technique in Distribution System with Battery Energy Storage System)

서훈철*

(Hun-Chul Seo)

Abstract

The study concerning about the grid connection of the large-capacity battery energy storage system(BESS) is increasing. However, the protection study which is necessary to maintain the reliability of distribution system has been hardly performed. Therefore, this paper analyzes the effect of reclosing among protection issues in distribution system with BESS and proposes the new reclosing method. To verify the proposed method, the BESS, distribution system, and proposed method are modeled by using EMTP/ATPDraw and the various simulations according to the fault clearing time are performed. The simulation results show that the reclosing in distribution system with BESS is successfully performed by proposed method and the operation of BESS is not affected from reclosing.

Key Words : Battery Energy Storage System, Distribution System, EMTP/ATPDraw, Reclosing

1. 서 론

배터리 전력저장장치(BESS)는 전 세계적으로 시장이 매우 크게 성장할 것으로 전망되고 있으며, 국내에서도 포스코ICT, 현대중공업 등이 BESS 시장에 적극적으로 뛰어들고 있다. 또한 한전 전력연구원도 BESS의 계통 연계와 관련하여 매우 활발하게 연구를 수행하고 있다. 이와 같은 기관들에서 BESS의 계통 연계 시 영향 해석을 위한 연구를 진행 중에 있으나, 이들

대부분은 전력품질 및 BESS의 운용에 관한 연구들이 대부분이며[1-3], 보호 관련 연구는 거의 수행되지 않고 있다.

따라서 본 논문에서는 BESS가 연계되는 배전계통에서 보호관련 이슈 중 재폐로 문제에 대한 영향을 분석하고 대책을 제안하였다. 특히 본 논문에서는 BESS의 용도 중 주파수조정, 최대부하삭감용으로 사용되는 경우를 가정하였다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 배전계통 재폐로와 관련된 일반적인 사항을 논의하고, BESS 연계 시 재폐로에 미치는 영향을 분석하였다. 3장에서는 2장의 분석 결과를 기반으로 새로운 재폐로 방법을 제안하였다. 4장에서는 제안하는 방법을 EMTP/ATPDraw 시뮬레이션을 통하여 검증하였다. 5장은 논문의 결론을 나타내었다.

* Main author : Professor, School of IT Engineering,
Yonam Institute of Digital Technology
Tel : 055-751-2059, Fax : 055-751-2053
E-mail : hunchul12@yc.ac.kr
Received : 2015. 8. 4.
Accepted : 2015. 9. 21.

2. 배전계통 재폐로

2.1 배전계통 재폐로

배전계통에서는 순간고장 시 차단 후 회로를 다시 복구하기 위하여 재폐로기가 사용된다. 재폐로기는 고장전류 차단 후 0.5초에 1차로 동작하며, 고장이 지속되고 있는 경우는 다시 차단 후 15초 후에 2차로 동작하고 그 이후에도 고장이 남아 있다면 영구고장으로 판단하고 영구폐쇄하는 장치이다[4-5].

현재 배전계통에서 사용되고 있는 재폐로 방식은 그림 1과 같이 첫 번째 차단 후 0.5s, 두 번째 차단 후 15s의 무전압 시간을 가지고 있다. 배전계통에서 실제 고장제거 여부의 판단이 어렵고 대부분의 고장이 순간고장이므로 고정된 무전압 시간을 채택하고 있다. 이러한 재폐로 차단기는 무전압 시간이 경과하고 재폐로 되었을 때의 전류를 바탕으로 고장의 제거 여부를 판단하므로 무전압 시간 동안 고장이 제거되었을 경우, 잔여 무전압 시간을 기다려야 하는 단점을 가지고 있다. 만약 고장제거 여부 판단이 가능하다면 무전압 시간을 조정하여 보다 빠른 재폐로가 가능할 것이다. 즉 재폐로 연구에서는 고장제거를 판단하고, 이에 따른 재폐로 순간을 결정하는 것이 가장 중요하다. 송전계통 재폐로에서는 이러한 방향으로 연구가 활발히 수행중이지만, 본 논문의 초점인 배전계통 재폐로에서는 고장제거 여부 판단과 관련된 연구가 거의 수행되지 않고 있다. 따라서 본 논문에서는 고장제거 여부 판단 부분은 생략하고, 현재의 무전압 시간에 기반한 재폐로 방식을 제안하였다.

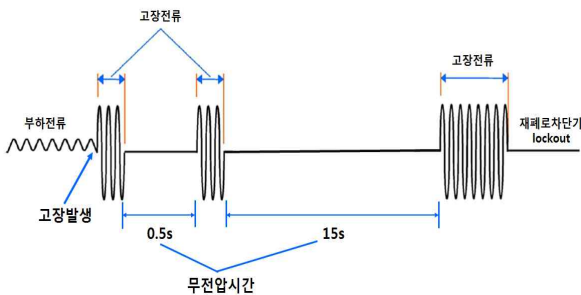


Fig. 1. Reclosing operation in distribution system

2.2 BESS가 배전계통 재폐로에 미치는 영향

BESS를 주파수 조정 및 최대부하삭감 용으로 사용하기 위하여 계통은 고장이 발생한 과도상태가 아닌 정상운전 상태이어야 한다. BESS가 주파수 추종용으로 사용되기 위해서는 계통의 발전량과 부하량에 따른 주파수 변화를 측정하여 부하에 전력 공급 여부를 결정하게 된다. 혹은 최대부하 삭감용으로 사용되기 위해서는 최대부하 시 BESS를 통하여 부하에 전력을 공급하게 된다. 그런데 고장이 발생하면, 전류가 고장점으로 흐르기 때문에 BESS가 연결될지라도 부하로 전류가 흐르지 못한다. 따라서 BESS는 고장 발생시 주파수 추종용 및 최대부하 삭감용으로 사용될 수 없다. 따라서 고장 발생 및 재폐로 이전에 BESS를 분리하여야 한다. 다음 그림 2와 같이 BESS가 배전계통에 연계되어 있다. 이 경우 고장 시 BESS를 회로에서 분리한다면 재폐로 동작은 기존 방식과 동일하게 수행하면 된다. 그 이후 BESS를 배전계통에 다시 연결함으로써 완전한 복구가 가능하며, BESS를 다시 주파수 조정 및 최대부하삭감 용으로 사용할 수 있다[5-6].

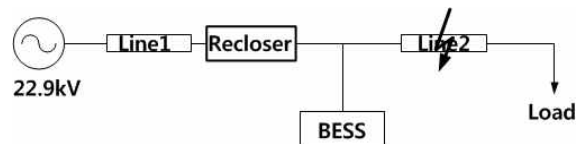


Fig. 2. Distribution system with BESS

이러한 경우에도 기존에 고려하지 않은 추가적인 문제점을 고려하여야 하며, 정리하면 다음과 같다.

- 1) 재폐로 동작 이전 BESS의 차단 성공여부
- 2) 고장제거 및 재폐로 성공 이후 BESS의 재병입 시간

3. BESS를 고려한 새로운 재폐로 기법

BESS가 주파수 조정 및 최대부하삭감 용으로 사용되는 경우 2.2절에서 분석한 문제점을 해결하기 위하여 새로운 재폐로 방법을 제안하였다. 제안하는 방법은 다음 그림 3과 같은 구성을 갖추고 있다. 보호계전

기가 존재하여 입력으로 계통의 전류 $i(t)$ 를 받아 내부 연산을 거쳐 Recloser 및 ESS의 계통연계 차단기에 Open/close 명령을 전달하도록 되어 있다.

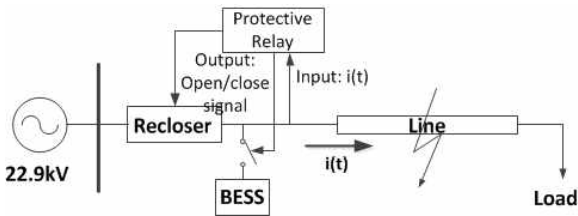


Fig. 3. Configuration of new reclosing technique considering BESS

그림 3의 구성도에서 보호 계전기의 동작 흐름도는 그림 4와 같다. 먼저 전류와 시간을 입력으로 받고, 전류의 실효치(I_{rms})를 구한다. 전류의 실효치가 일정 값 (α) 이상이면 고장으로 판단하고, Recloser 및 BESS에 동시에 open 명령을 내린다. 그림 4의 α 는 고장을 판단할 수 있는 threshold 전류 값이며, 시뮬레이션에서는 1000[A]로 정하였다. 이 값은 고장이 발생했음을 판단할 수 있도록 부하전류보다 크게 설정하며, 계통의 부하전류 및 고장전류에 따라 달라질 수 있다. BESS로부터 계통 고장점에 전류가 유입되는 것을 차단하기 위하여 BESS의 open 동작이 제대로 수행되었는지 확인($I_{rms}=0$ 임을 판단) 하고, 제대로 수행 되었다면 현행 재폐로 시간인 고장차단 후 0.5초에 재폐로를 수행한다. 그 이후 재폐로가 성공적으로 수행되어 계통에 고장전류가 흐르지 않음을 확인한 후 BESS를 다시 재투입한다. 만약 계통에 고장이 존재하여 고장 전류가 흐른다면 다시 Recloser를 open하고 15초 후에 2차 재폐로를 수행한다. 2차 재폐로 이후에도 고장이 남아있다면 영구고장으로 판단하고 Recloser를 lockout한다. 만약 고장이 제거되어 2차 재폐로가 성공하였다면 BESS를 다시 재투입한다.

본 논문에서 제안하는 재폐로 방법에서 재폐로 시간은 기존과 동일하다. 또한 제안하는 방법은 분산전원 계통연계 기술기준에 나타난 바와 같이 이상상황 발생 시 분리하고 재폐로 성공 후 5분 이후 재병입 하도록 하는 것과 유사하다고 할 수 있다 [7]. 그렇지만 차이점은 BESS가 Recloser가 open 동작을 하는 순간

동시에 open되어 계통으로부터 분리되며 이것이 제대로 수행되었는지 확인하는 동작이 포함된다. 또한 분리된 BESS는 재폐로 성공직후 곧바로 다시 투입되는 차이점이 존재한다.

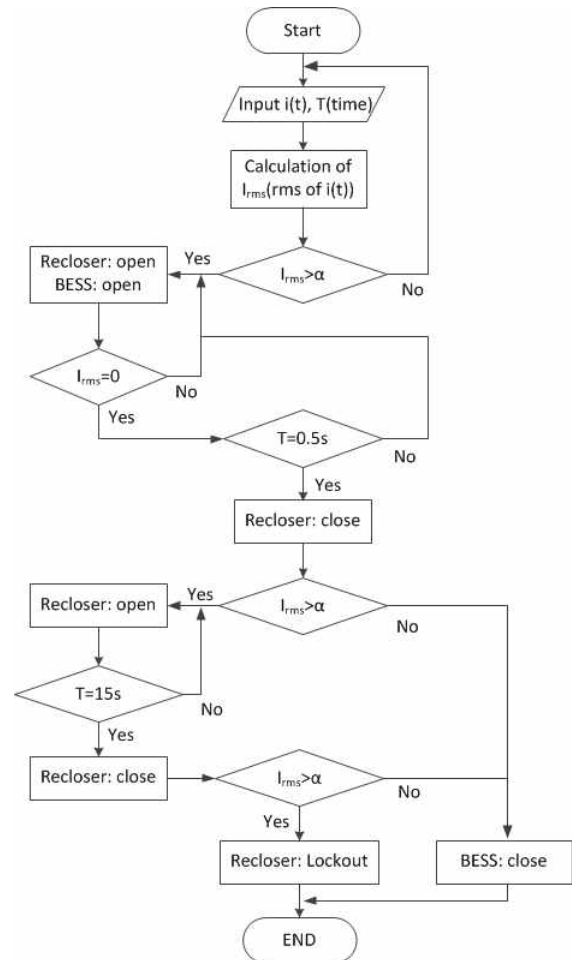


Fig. 4. Flow chart of new reclosing technique considering BESS

4. 시뮬레이션 및 결과 검토

4.1 계통모델

제안하는 방법의 검증을 위한 그림 5와 같이 BESS가 연계된 배전계통 모델을 모의하였다. Line 1과 2는 각각 10km이며, 선종은 ACSR 95mm²이다. BESS의 용량은 1000kWh이며, 1초에 1000kW의 부하가 투입

BESS가 연계된 배전계통에서 새로운 재폐로 기법

되어 최대부하삭감을 위하여 BESS가 방전되는 경우를 가정하였다. BESS 및 배전계통을 포함한 시뮬레이션은 EMTP/ATPDraw를 이용하여 수행하였다[8].

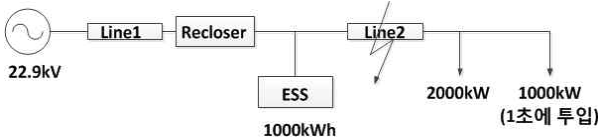


Fig. 5. Distribution system model

4.2 시뮬레이션 조건

그림 5에서 제안한 ESS를 고려한 재폐로 방법을 검증하기 위하여, 고장발생 및 고장제거 조건을 달리하여 표 1과 같이 설정하였다. Case 1은 충전 시 발생하는 고장, Case 2~4는 방전 시 발생하는 고장이다. Case 1~2는 1차 재폐로 모의를 위한 조건이며, Case 3은 2차 재폐로 모의, Case 4는 영구고장 모의를 위한 고장 조건이다. 고장종류는 1선 지락고장이며, 고장저항은 1Ω, 고장발생 위치는 Line2의 5km 지점이다.

원래는 2차 재폐로 시간은 15초이나, 시뮬레이션 상 편의를 위하여 4초로 설정하여 모의하였다. 이것은 Case 3, 4에만 적용된다. 2차 재폐로 성공이후 BESS의 성공적인 동작을 다시 확인하기 위하여 1000kW 부하를 2초에 제거하고, 6초에 다시 투입하는 시나리오를 설정하였다.

Table 1. Simulation conditions

Case	고장발생	고장제거	비고
Case 1	0.7	0.8	충전 시 고장, 1차 재폐로 모의
Case 2	1.2	1.3	방전 시 고장, 1차 재폐로 모의
Case 3	1.2	4	방전 시 고장, 2차 재폐로 모의
Case 4	1.2	-	방전시 고장, 영구고장

4.3 시뮬레이션 결과 및 검토

4.3.1 Case 1의 시뮬레이션 결과

다음 그림 6은 계통전류 파형이다. 0.7초에 고장이 발생하고 0.75초에 고장이 제거된 후 1.25초에 재폐로가 성공적으로 수행되었다. 그림 7은 재폐로 및 BESS 개폐 스위치 신호이다. ‘1’은 close, ‘0’은 open을 의미한다. 1.25초에 재폐로 신호가 발생하여 재폐로가 성공한 후 고장이 제거되었으므로 0.05초 후인 1.3초에 ESS가 재투입된다. 그림 8은 BESS의 SOC 파형이다. 0.75초에 고장이 제거된 후 어떠한 충/방전 동작도 발생하지 않는다. 그 이후 재폐로가 성공하고 BESS가 재투입된 이후 최대부하 상태이므로 BESS의 방전동작이 성공적으로 수행되고 있음을 알 수 있다.

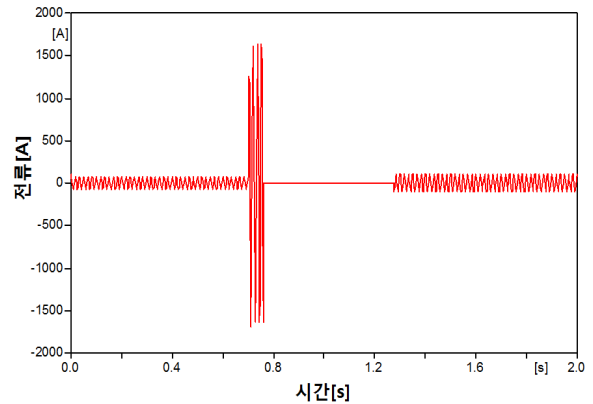


Fig. 6. System current waveform(Case 1)

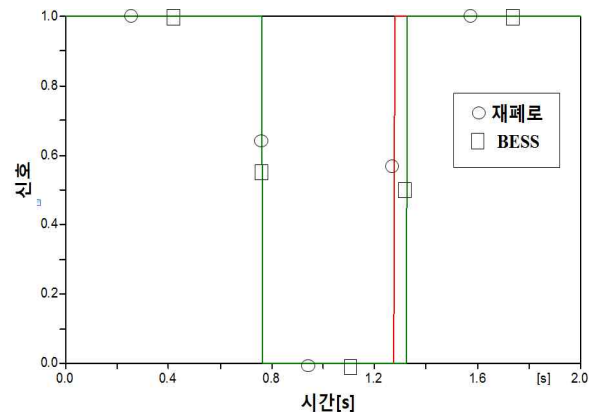


Fig. 7. Open/close signal of recloser and BESS (Case 1)

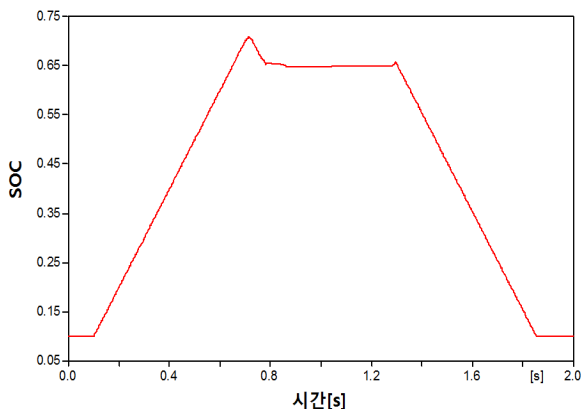


Fig. 8. SOC waveform(Case 1)

4.3.2 Case 2의 시뮬레이션 결과

그림 9는 Case 2의 계통전류 파형이다. 1.2초에 고장이 발생하고 1.25초에 성공적으로 고장이 제거된 이후 0.5초 이후인 1.75초에 재폐로가 성공적으로 수행되었음을 알 수 있다. 그림 10은 재폐로 및 ESS 개폐 스위치 신호이다. 1.25초에 동시에 open 된 이후 1.75초에 재폐로가 수행되고, 그 이후 재폐로가 성공적임을 확인하고 ESS가 재투입됨을 알 수 있다. 그림 11은 SOC 파형이다. 1초에 1000kW 부하가 투입되어 ESS는 방전동작을 수행하며, 1.2초에 고장이 발생된 이후 ESS가 계통으로부터 분리되므로 어떠한 충/방전 동작도 발생하지 않는다. 1.75초에 재폐로가 성공하고 ESS가 재투입 된 이후 ESS는 1000kW 부하가 여전히 연결되어 있으므로 다시 방전동작을 수행한다.

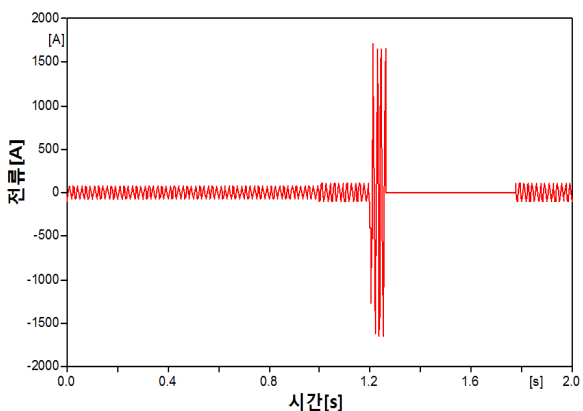


Fig. 9. System current waveform(Case 2)

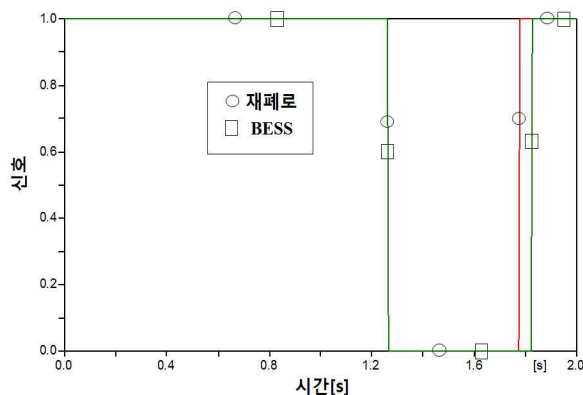


Fig. 10. Open/close signal of recloser and BESS (Case 2)

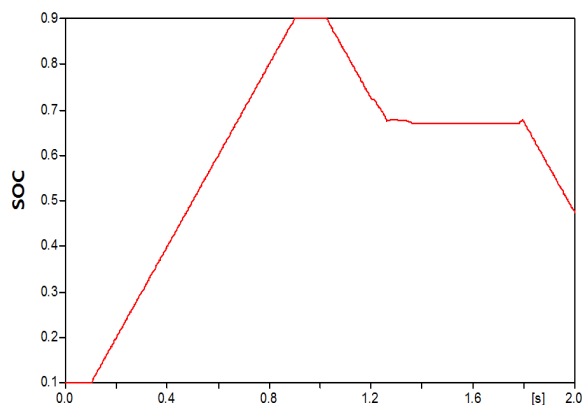


Fig. 11. SOC waveform(Case 2)

4.3.3 Case 3의 시뮬레이션 결과

그림 12는 Case 3의 계통전류 파형이다. 1.2초에 고장이 발생하고 1.25초에 고장이 제거된다. 0.5초 후인 1.75초에 재폐로를 시도하나 여전히 고장이 존재하므로 다시 Open 동작을 수행한다. 4초 이후인 5.75초에 2차 재폐로를 시도하고 이때는 고장이 제거된 상태이므로 다시 정상상태 파형이 나타남을 알 수 있다. 6초에 1000kW 부하가 재투입되어 정상상태 전류가 다소 증가한다. 그림 13은 재폐로 및 ESS 투입 신호이다. 고장이 발생하고 1.25초에 두 신호가 동시에 제거된다. 1.75초에 재폐로를 시도하나 고장이 존재하고 있으므로 다시 open 신호가 발생하며, 이 때 ESS의 재투입 신호는 발생하지 않고 있다. 5.75초에 2차 재폐로 이후 재폐로가 성공적으로 수행됨을 확인한 이후 ESS의 재투입신호가 발생한다.

BESS가 연계된 배전계통에서 새로운 재폐로 기법

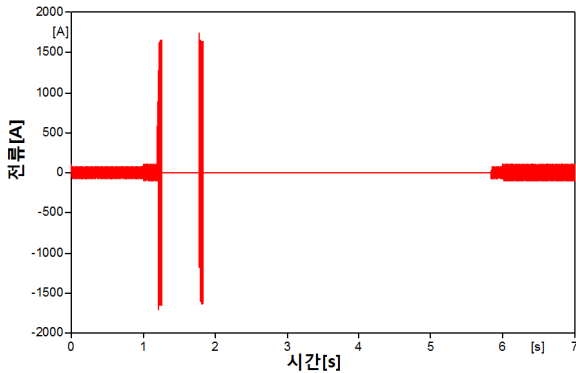


Fig. 12. System current waveform(Case 3)

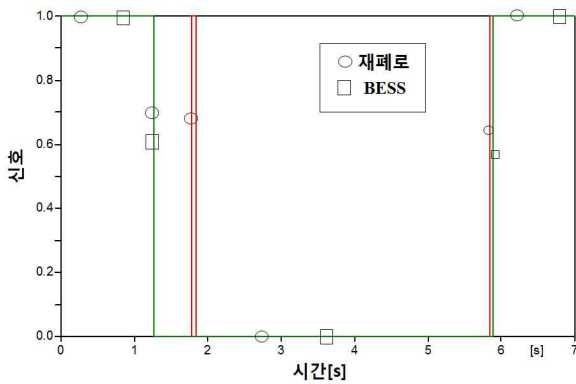


Fig. 13. Open/close signal of recloser and BESS (Case 3)

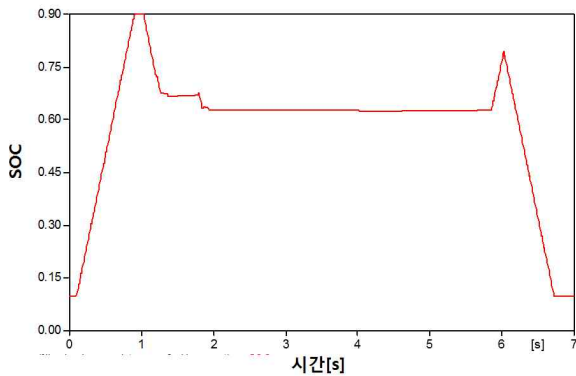


Fig. 14. SOC waveform(Case 3)

그림 14는 SOC 파형이다. 1초에 1000kW 부하가 투입되고 방전 동작을 수행한다. 1.25초에 분리된 이후 무전압 시간 및 1차 재폐로 시도 시에도 어떠한 충/방전 동작도 수행하지 않으므로 SOC의 변화가 없다. 5.75초에 2차 재폐로가 성공하고, ESS가 재투입된 이

후 ESS는 충전동작을 수행한다. 6초에 1000kW 부하가 재투입되므로 방전동작을 수행함을 알 수 있다. 따라서 완전히 정상상태로 복구되었음을 알 수 있다.

4.3.4 Case 4의 시뮬레이션 결과

그림 15는 계통전류 파형이다. 1.2초에 고장이 발생된 이후 1.75초에 1차 재폐로를 시도하고, 5.75초에 2차 재폐로를 시도한다. 그렇지만 영구고장이므로 다시 회로는 차단됨을 알 수 있다.

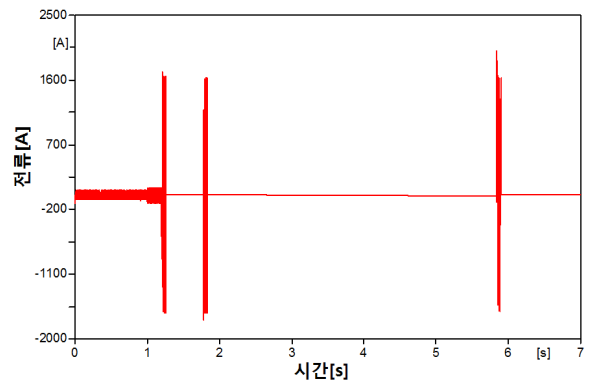


Fig. 15. System current waveform(Case 4)

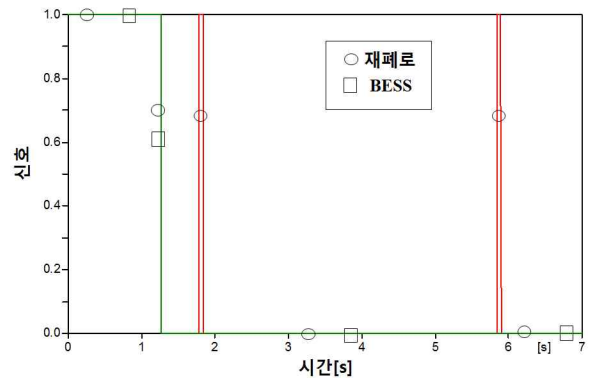


Fig. 16. Open/close signal of recloser and BESS (Case 4)

그림 16은 재폐로 및 ESS 투입 신호이다. 1.2초에 고장이 발생하고, 1.25초에 동시에 차단된다. 1.75초 및 5.75초에 재폐로를 시도하나 고장이 존재하므로 다시 open 신호가 발생한다. 영구고장인 상태이므로 재폐로 과정 중에 ESS 투입 신호는 발생하지 않는다. 그림 17은 SOC 파형이다. 1.2초 이전에 충/방전 동작을

정상적으로 수행하고 있다. 고장이 1.2초에 발생하고 1.25초에 고장이 제거된 이후 어떠한 충/방전 동작도 발생하지 않는다. 1.75초 및 5.75초에 재폐로를 시도하는 순간에 방전동작을 수행하려고 시도하지만, 곧 회로가 다시 차단되므로 어떠한 충/방전 동작도 수행하지 않는다.

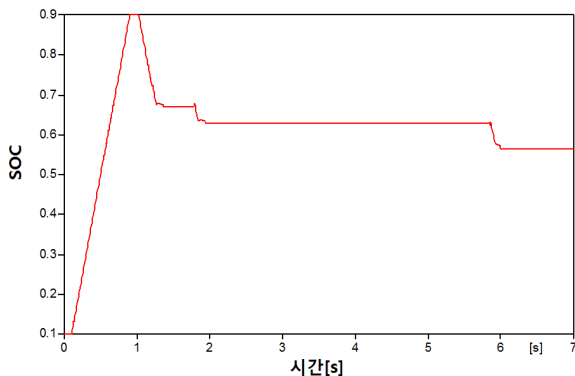


Fig. 17. SOC waveform(Case 4)

5. 결 론

본 논문에서는 BESS의 다양한 용도 중 주파수 조정 및 최대부하삭감 용으로 사용되는 경우에 초점을 맞추어 BESS가 연계된 배전계통에서 재폐로 영향을 분석하고 이에 대한 대책으로 새로운 재폐로 방법을 제안하였다. 제안하는 방법은 기존의 재폐로 절차에 BESS의 분리 및 이를 확인하는 과정, 재폐로 성공 이후 BESS를 재투입 하는 과정이 추가되었다.

제안하는 BESS를 고려한 재폐로 방법을 검증하기 위하여 EMTP/ATPDraw를 이용한 시뮬레이션을 수행하였다. BESS의 충전 혹은 방전 중 고장발생 시, 고장제거 시간 등을 달리하며 시뮬레이션을 수행하였고, 제안하는 방법에 따라 시뮬레이션 수행 시 재폐로 순간 및 ESS의 재투입 순간에 서지 등 계통에 영향을 미칠만한 과도현상은 발생하지 않고 재폐로가 성공적으로 수행되었으며, BESS의 분리 및 재투입이 원활히 수행됨을 확인할 수 있었다.

향후 BESS가 다른 용도로 사용되는 경우의 재폐로 혹은 BESS가 연계된 배전계통에서 보호협조 등에 관한 연구를 지속적으로 수행할 예정이다.

References

- [1] Sekyung Han, Soohee Han, and Kaoru Sezaki, "Development of an optimal vehicle-to grid aggregator for frequency regulation", IEEE Trans on Smart Grid, Vol. 1, No.1, pp.65 - 72, Jun 2010.
- [2] Ioannis Hadjipaschalis, Andreas Poullikas, Venizelos Efthimiou, "Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications", Renewable and Sustainable Energy Reviews Vol. pp. 1513-1522, 2009.
- [3] Hun-Chul Seo, "Analysis of Surge in Distribution system and ESS due to Direct Lightning in Distribution System with ESS using EMTP", Journal of KIEE, Vol. 29, No. 2, February 2015.
- [4] Yun-Tae Ko, Hun-Chul Seo, Sang-Bong Rhee, Chul-Hwan Kim, Jae-Chul Kim, Ok-Bae Hyun, "A Novel Reclosing Scheme in Distribution System using Carrier Signal", Trans. KIEE. Vol. 58, No. 11, NOV, 2009.
- [5] Hun-Chul Seo, Chul-Hwan Kim, Sang-Bong Rhee, "A Study on the Reclosing Operation of Distribution System considering the ESS", KIEE Summer Conference 2015.
- [6] Hun-Chul Seo, Sang-Bong Rhee, Chul-Hwan Kim, "Analysis of Effects from ESS in Reclosing of Distribution System", KIEE Spring Conference 2015.
- [7] KEPCO, "Technical Standard for Interconnecting Distributed Generation with Distribution System", 2015.
- [8] Jun-Hyeok Kim, Soon-Jeong Lee, Eung-Sang Kim, Seul-Ki Kim, Chul-Hwan Kim and László Prikler, "Modeling of Battery for EV using EMTP/ATPDraw", Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol. 9, No. 1, pp. 98-105, Jan 2014.

◇ 저자소개 ◇



서훈철(徐熏徹)

2004년 성균관대 정보통신공학부 졸업.
2006년 동 대학원 전자전기공학과 졸업 (석사).
2013년 동 대학원 전자전기컴퓨터공학과 졸업(박사).
2006년 9월~2009년 8월 기초전력연구원 연구원.
2013년 9월~2014년 1월 영남대학교 박사후연구원.
2014년 3월~현재 연암공업대학 조교수.