

ESS 저장실의 소방시스템 적용을 위한 화재특성분석

이후동*, 태동현*, 김수현**, 박진아**, 최승규**

*한국기술교육대학교 전기공학과, **건양대학교 재난안전소방학과

e-mail : skchoi@konyang.ac.kr

Fire Characteristic Analysis for Application of Fire-fighting System in ESS Storage Room

Hu-Dong Lee*, Dong-Hyun Tae*, Su-Hyun Kim**, Jin-ah Park**, Seung-Kyou Choi**

*Department of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education

**Department of Disaster Safety & Fire fighting, Konyang University

요약

ESS는 재생에너지 보급을 촉진하고 전력계통의 안전성 향상과 전력소비 효율화 등을 위한 수요가 급증하면서 세계 각국에서 미래 신 성장 산업으로 적극 육성하는 분야이다. 국내에서도 정부는 재생에너지 정책을 수립하고 적극적으로 ESS 보급사업을 추진하고 있다. 하지만, 최근 ESS 저장실에 화재가 빈번히 발생하여 ESS에 대한 화재안전과 소방대책이 절실히 요구되고 있다. 이에, 본 논문에서는 에너지저장장치에 대한 화재사례를 확인하여 ESS용 리튬이온 배터리에 대한 화재특성과 ESS의 구성에 따른 저장실의 화재 메커니즘 및 특성을 분석하고, 분석한 결과를 바탕으로 ESS 저장실의 소방시스템 적용 방안을 제시한다.

1. 서론

정부는 2017년에 “재생에너지 3020 이행계획”을 수립하고 정책의 확산을 위하여 재생에너지 지원제도를 적극적으로 추진하고 있다. 이러한 정부의 정책에 따라 재생에너지 보급을 촉진하고 전력계통의 안전성 향상을 위한 전기저장시스템(Energy Storage System, ESS)의 설치가 증가하고 있다. ESS는 교류 발전기에서 생산된 전기나 재생에너지 발전원에서 생산된 전기를 전지(Battery)에 저장하였다가 필요시에 다시 교류 전기로 변환하여 전기를 보내는 장치로서 한전의 주 파수조정용을 시작으로 수요조정 및 피크제어용으로 설치되고 있다. 최근에는 재생에너지 출력안정화용으로 확대되어 사용되고 있으며 마이크로그리드 등 스마트 그리드 신산업의 급성장으로 인하여 ESS 수요가 계속적으로 증가할 것으로 예상된다. 한편, 2020년 2월 현재 1,622개 사업장에 ESS가 보급되어 있으며, 이 중 28개 사업장에서 화재사고가 발생하였다.[1] 이는 사업장기준으로 화재발생 확률이 1.73%에 이르는 것으로, 일반적인 전기시스템의 사고율이 0.5%인 점을 고려하면 매우 높은 수치이다. ESS에 주로 사용되고 있는 리튬이온전지는 고 에너지 밀도를 가지고 있어 과 충전 및 방전, 과 전류, 과열 등에 의한 단락으로 발화위험성이 높을 뿐만 아니라 화재 발생 시 급격한 화재확산과 폭발 등으로 화재진압이 매우 어렵다. 이에 본 논문에서는 ESS 저장실의 화재를 조기에 탐지하고 소화할 수 있는 소방시스템을 적용하기 위한 측면에서 ESS 화재사례와 특성을 분석하고자 한다.

2. ESS 설치현황 및 화재사례 분석

2.1 ESS의 설치현황

ESS는 사업장을 기준으로 2020년 2월 현재 총 1,622개소에 설치되어 있으며 이 중 신재생에너지 연계용으로 897 개소, 피크저감 등 기타 용도로 725개소에서 사용하고 있다. 또한, 정부에서 밝힌 국내 ESS 총용량은 표 1과 같이 2018년 말 현재 약 1,605MW이다. 표 1에서와 같이 출력을 기준으로 피크저감용이 전체의 약 40%이며, 재생에너지 연계용이 약 35.6%로 정부의 신재생에너지 공급의무화제도((Renewable Portfolio Standard), RPS)에 따라 ESS의 보급은 계속하여 증가되고 있다.

[표 1] ESS 설치현황

구분	피크저감용	재생에너지 연계용	주파수조정용	기타	합계
PCS출력 기준(MW)	642 (40.0%)	571 (35.6%) 태양광연계: 487 풍력연계: 84	376 (23.4%)	16 (1.0%)	1,605
배터리용량 기준(MWh)	2,757 (57.8%)	1,859 (38.9%)	103 (2.2%)	54 (1.1%)	4,773

2.2 ESS의 화재사례

ESS를 설치한 사업장 총 1,622개소 중 2017년 5월 이후 2019년 말까지 화재가 발생한 사업장은 표 2와 같이 총 28개소로서 화재 확률이 사업장을 기준으로 1.73%로써 일반적인

전기시스템의 사고율 0.5%에 비하여 매우 높은 것으로 확인되었다. 또한, ESS 사업장의 화재 발생 시, 급격하게 연소가 확대되는 리튬이온 배터리의 특성으로 화재진압이 어려울 뿐만 아니라 적응성이 있는 소화약제가 없어 초기 소화에 실패하였으며, 대부분 화재 최성기로 진행해 관련 시설물이 전소한 것으로 보고되었다.[2]

[표 2] ESS 화재발생현황

연도	~2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	합계
사업장 수	30	47	124	74	268	947	132	1,622
화재건수	-	-	-	-	1	16	11	28
화재발생 확률								1.73%

2.3 ESS의 화재원인 분석

정부는 민관합동 ESS 화재사고 원인 조사위원회를 구성하여 2019년 6월에 ESS 화재 원인을 전기적 충격에 대한 배터리 보호시스템 미흡, 운영환경 관리 미흡, 설치 부주의, ESS 통합 제어 및 보호체계 미흡 등 4가지 요인으로 발표하였다. ESS의 화재원인으로 추정된 4가지 요인을 정리하면 표 3과 같다.[3]

[표 3] ESS 화재원인 분석

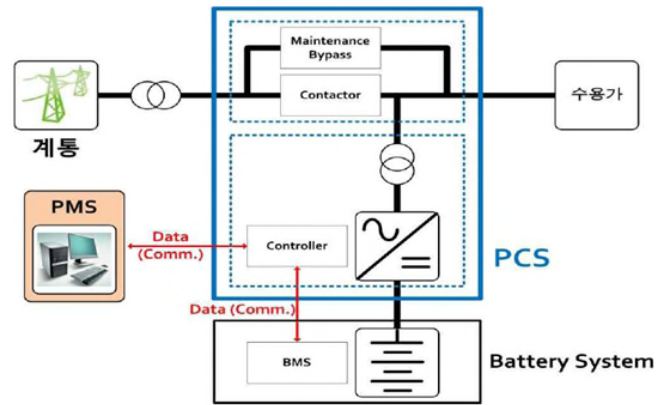
사고요인분류	사고원인(추정)
ESS 시스템 통합 제어 미흡	① BMS/PMS/EMS의 역할 및 우선 제어순위 미비 ② 각 제어 알고리즘의 통합운용관리 기능 미비 ③ 배터리 셀 발판싱 기능(Passive Balancing) 미흡 ④ 만충전 이후 추가 충전에 의한 과충전 ⑤ 각종 에러/경고 발생 시에도 적절한 조치 미흡
PCS 등 배터리 외부로부터 비정상적인 충격, 전압·전류 발생	① PCS IGBT소손(압단락)에 의한 사고전류 발생 ② PCS 리액터 지락에 의한 고전압 노이즈(CMV) 발생 ③ DC측 지락에 의한 절연파괴 및 단/지락사고 유발 ④ 전자파(EM)에 의한 제어장치(BMS) 통신 불량 ⑤ 서지(개폐, 뇌 등)에 의한 고전압노이즈(CMV) 발생
배터리 시스템 설계 및 보호장치 미흡	① 특정 제조공장 및 제조기간의 제품에서 발생 ② 만충전 및 휴지기간 시 발생 ③ 배터리 보호장치, 차단기 등의 설계 미흡 ④ BMS 전장부분 안전설계 미흡 ⑤ SOC 정확도 미비에 의한 과충전 유발 ⑥ DOD 여유분을 고려하지 않아 과충전 초래
시스템 설치 및 운용관리 소홀	① 운/습도관리 부실(결로/누수/염해 등)에 의한 손상 ② 운반(낙하) 및 설치 부주의(역 결선 등)에 의한 배터리 손상 ③ 운영 및 유지보수 기준(점검기준) 미흡 ④ 위기발생 시 대응 매뉴얼 부재 ⑤ 소방기준 및 소화약제의 사용기준 미비

상기에서 보는 바와 같이 ESS 보급이 확대되고 있는 현실에서 화재발생이 빈번해 짐에 따라 ESS 화재특성에 대한 연구와 함께 ESS 저장실의 화재를 조기에 탐지하여 초기에 소화할 수 있는 효과적인 화재경보 및 소화시스템이 절실히 요구되고 있다.

3. ESS의 화재특성 분석

3.1 ESS의 구성

ESS는 생산된 전기를 배터리에 저장하였다가 전력이 필요할 때 공급하는 설비로 용도에 따라서 주파수조정용, 신재생 연계용, 피크부하저감용 등으로 사용되며, 일반적으로 그림 1과 같이 배터리, BMS(Battery Management System), PCS(Power Conversion System), PMS(Power Management System)로 등으로 구성된다.



[그림 1] ESS의 구성요소

여기서, BMS는 배터리의 상태를 제어하는 장치로 배터리의 전압, 충전상태 등을 모니터링하고 모듈 내 단위 셀 간의 충·방전 정도가 동일해 지도록 조정하는 Cell balancing 뿐만 아니라 배터리의 안전을 위한 과충전 방지 등의 보호기능을 수행하고 보호회로를 통해 과전류 및 단락 시 외부 스위치를 차단하는 기능을 한다. PCS는 전기에너지를 받아 배터리를 충전하거나 전력망으로 저장된 에너지를 방출하기 위해 전기의 특성(교류/직류, 전압, 주파수)을 변환하는 장치이고, PMS는 배터리 및 PCS의 상태를 모니터링 및 제어하고 운영하기 위한 시스템이다. 또한, ESS용 배터리는 대부분 리튬이온배터리(lithium-ion batteries, LIB)를 사용하고 있으며, 리튬이온 배터리의 전기화화 및 물리적 특성으로 폭발의 위험성이 높아 화재에 매우 취약하다.

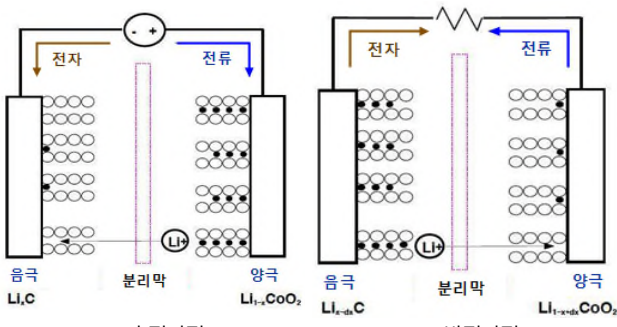
3.2 ESS용 리튬이온 배터리의 화재특성

배터리는 전기화학작용에 의한 산화-환원반응을 통해 화학 에너지를 전기에너지로 변화시키는 장치로서, ESS에는 대부분 리튬이온 배터리가 사용되고 있다. 리튬이온 배터리의 주요 구성요소는 음극(Anode), 양극(Cathode), 전해질(Electrolyte), 분리막(Separator), 케이스 등이며, 표 4에 구성요소에 따른 재료(물질)를 나타내었다.

[표 4] 리튬이온 배터리의 구성요소

구성요소	재료(물질)
양극(Anode)	리튬코발트 산화물, 알루미늄 호일
음극(Cathode)	흑연, 구리 호일
분리막(Separator)	다공성 폴리에틸렌 또는 폴리프로필렌 필름
전해액(Electrolyte)	LiCoO ₂ (코발트산리튬), LiNiO ₂ (니켈산리튬), LiMn ₂ O ₄ (스피넬형리튬망간산화물), LiFePO ₄ (인산철리튬)과 유기용매 (EC, PC, DMC, DEC 등)의 혼합물
케이스(Enclosures)	Hard case: 니켈도금강, 알루미늄 Soft pouch: 알루미늄호일+다층적층필름 (Nylon, PA,PBT, PP, PE 등)

리튬이온 배터리의 충·방전은 그림 2와 같이 양극과 음극 간을 리튬이온이 이동하여 삽입(doping) 또는 탈리(undoping)하여 전자를 주고받는 원리이다. 즉, 충전 시에는 양극활물질인 LiCoO₂에서 탈리된 리튬이온과 전자가 각각 전해질과 외부 도선을 통하여 음극으로 이동하여 탄소 내에서 다시 결합하게 되며, 방전 시에는 충전된 두 개의 전극활물질의 전위차에 의해 양극활물질이 환원되고 음극활물질이 산화되는 반응이다.



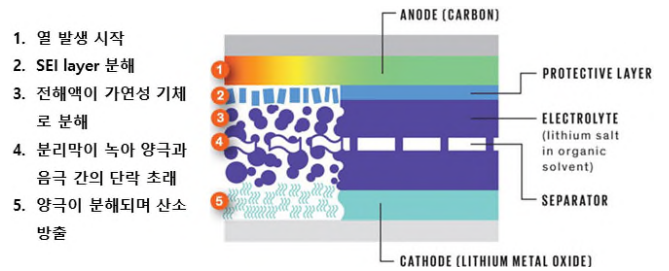
[그림 2] 리튬이온 배터리의 충·방전

리튬이온 배터리의 화재원인 및 위험성은 전기화학작용에 의한 산화·환원반응과 내부·외부적 물리적 요인으로 리튬이온 배터리의 전해질과 전해질 첨가제가 약 60℃ 부근에서 분해되기 시작해 약 100℃까지 상승하면 분리막 내부에서 발열이 발생되어 단락이 발생하는 열적위험, 배터리의 정상적인 작동전압 이상으로 충전되는 현상으로 충전기 또는 보호회로의 오동작으로 인해 분리막을 찢고 배터리 내부단락을 발생시키는 과 충전, 배터리의 방전 제한전압 이하까지 방전되어 전해액에 녹아 구리 금속이온이 배터리 내에서 분리막을 뚫고 내부단락을 일으키는 과 방전, 배터리 내부의 리튬이온이 단위시간당 많은 전하량이 방전되는 경우 배터리 각 셀의 방열보다 발열이 더욱 높아지는 고 전류, 그리고 제조공정 중 이물질이 배터리 내부로 침투하거나 비정상적인 석출물 발생으로 인한 내부단락 등이다.

리튬이온 배터리는 휴대형 IT기기들을 중심으로 발전되었으며, 현재에는 전기자동차, 전력저장장치, 국방 및 의료용도 등으로 그 활용범위가 광범위하게 넓어지고 있다. 하지만, 리튬이온 배터리의 물리적 손상과 진압 및 온도 등 비정상적인 내부 에너지 변환에 따라 양극, 음극, 전해질 등의 각 구성요소에서의 화학반응으로 인해 화재 및 폭발의 위험성이 매우 높다.

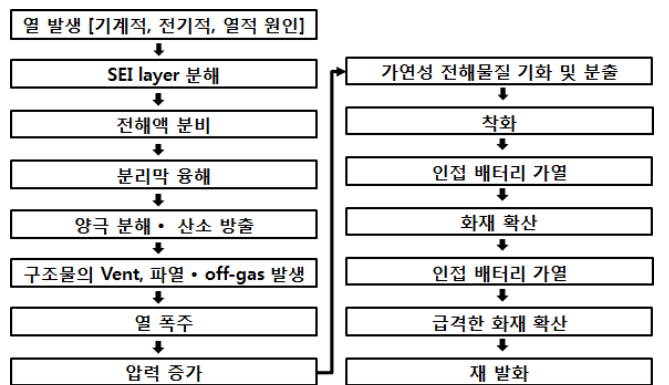
3.3 ESS 저장실의 화재특성

ESS 화재 원인은 배선상 문제에 의한 외부 단락, 관통, 물리적 외력에 의한 파괴 등의 기계적 결함과 내부 단락, 과 충전, 과 방전 등의 전기적 결함 및 과열, 내부 과전류에 의한 단락, 배터리 노화 등의 열적 요인으로 열이 발생되어 약 100℃에서 SEI layer와 전해액이 가연성 기체로 분해, 약 200~300℃에서 분리막이 녹아 단락되어 산소 등(off-gas)의 가스가 방출되면서 그림 3과 같이 ESS용 리튬이온 배터리에 열 폭주가 발생한다.[4]



[그림 3] ESS용 리튬이온 배터리의 열 폭주

열 폭주에 의해 진행되는 ESS 저장실의 화재 메커니즘은 그림 4와 같이 분리막이 용해 되어 구조물의 Vent 또는 과열로 off-gas 발생되며 열 폭주가 진행, 착화되고 급격하게 화재가 확산, 재 발화하는 과정을 반복하게 된다.



[그림 3] ESS 저장실의 화재 메커니즘

상기의 화재 메커니즘에 의한 ESS 저장실의 화재 위험성은 다량의 배터리가 연속적으로 배치되고 설치되기 때문에

화재 발생 시, 리튬이온 배터리의 전기화학 및 물리적 특성으로 하나의 배터리 셀에서 발화되면 인접된 셀로 확산되어 열 폭주로 발전되고 연속적인 재 발화를 일으켜 저장실의 구조물을 전소시키는 양상으로 발전해 화재진압이 매우 어려운 특성이 있다.

4. ESS 저장실의 소방시스템 적용 방안

4.1 ESS 저장실의 화재양상

ESS 화재사태를 분석하면 저장실의 리튬이온 배터리가 가지고 있는 에너지가 모두 소진될 때까지 지속적으로 연소하는 화재양상 보이며, 화재 최성기에 진입하면 화염이 강하여 물이나 폼을 다량으로 방수하여도 비산하여 화재 진압이 거의 불가능 한 것으로 확인되었다. 또한, 인력에 의한 화재진압은 감전과 배터리 내 급수성 물질 및 가연성 가스 발생으로 인한 폭발적 연소를 우려하여 적극적인 주수소화가 이루어지지 못하는 어려움이 있다. 또한, ESS 저장실의 화재양상을 분석하면, 리튬이온 배터리의 전기화학적 특성으로 인해 일반 화재(A급), 유류화재(B급), 전기화재(C급)의 화재양상을 모두 갖고 있다. 구체적으로 분리막, 파우치 등의 플라스틱 재질로 인해 A급 일반 가연물 화재의 특성 있고, 인화성 액체에 해당하는 유기용매인 전해액으로 인해 B급 유류화재의 특성을 가지며, 자체적으로 점화원으로 작용할 수 있는 충전된 전기 에너지를 가지고 있어 C급 전기화재의 특성도 있다. 이러한 A, B, C급의 특성을 복합적으로 갖고 있는 ESS 저장실의 화재양상으로 인하여 화재 최성기로 진행하면 소방시스템에 의한 화재대응이 매우 어렵다. 따라서 화재발생 초기에 화재를 탐지하고 소화할 수 있는 ESS 저장실에 적합한 자동 화재탐지 및 소화시스템을 선정하여 적용해 주변으로 연소가 확대되지 않도록 방지하는 것이 중요하다.

4.1 ESS 저장실의 소방시스템 적용

ESS 저장실의 화재에서 발생하는 염화수소, 메탄, 에탄, 에틸렌, 프로필렌 등의 가연성 가스가 화재 및 폭발의 주요 원인이며, 최선의 화재 진압방안은 배터리를 냉각시켜 화재 시에 발생하는 가연성가스 생성을 억제하는 냉각소화 방법이다. 하지만, ESS 저장실 구조의 특성상 소화약제가 배터리 랙 내부로 침투하기 어려워 화재진압이 곤란하고, 적응성 있는 적절한 소화약제가 없는 관계로 화재 진압에 어려움이 있다.

ESS 저장실의 소방시스템은 현재 일관된 설치 기준이 없는 관계로 분말소화기와 고체애어로졸식 자동소화장치, 캐비닛형 자동소화장치(HFC-125, HFC-227), 청정소화약제설비의 가스계 자동소화설비가 일부 설치되어 있었으며, 유일하게 한 개소에 옥내소화전과 화재 감지 및 스프링클러설

비 연동을 위한 교차회로방식의 화재감지기가 설치되어 있었다. 하지만, 초기소화를 위해 설치한 분말소화기는 ESS 화재진압에 효과가 거의 없었고, 전역에 방출하는 가스계 자동소화설비와 스프링클러설비의 기동용으로 설치한 교차회로 감지기는 리튬이온 배터리의 연소특성상 연기 또는 열의 감지단계에서는 이미 화재가 성장하여 소화약제가 방사되었으나 화재를 진압하지 못하였다. 따라서 효과적인 ESS 저장실의 소방시스템 적용은 리튬이온 배터리의 열 폭주 발생 이전, 초기에 화재를 탐지할 수 있도록 off-gas 감지기를 소화설비 연동용으로 도입하고 초기 소화용 가스계 소화설비는 화재가 탐지된 ESS 랙 내부에 국부적으로 직접 분사하는 방식을 적용하며, 본격 화재를 대비하여 충분한 살수밀도와 방사시간을 갖는 스프링클러설비를 적용하여야 한다.

5. 결 론

ESS는 신재생에너지의 출력안정 보완, 전력소비 효율화 등을 위한 수요가 급증하면서 세계 각국에서 미래 신 성장 산업으로 적극 육성하는 분야이다. 국내에서도 정부는 재생에너지 정책을 수립하고 적극적으로 ESS 보급사업을 추진하고 있다. 하지만, 최근 ESS 저장실에 화재가 빈번히 발생하여 ESS에 대한 화재안전과 소방대책이 절실히 요구되고 있다.

이에, 본 논문에서는 에너지저장장치에 대한 화재사태를 확인하여 ESS용 리튬이온 배터리에 대한 화재특성과 ESS의 구성에 따른 화재특성 및 저장실의 화재 메커니즘에 대하여 분석하였다. 또한 분석한 결과를 바탕으로 ESS 저장실의 off-gas 감지기를 이용한 초기 화재탐지 방안과 ESS 랙 내부에 국소적으로 직접 분사하는 가스계소화설비의 초기소화방안과 본격 화재를 위한 충분한 살수밀도와 방사시간을 갖는 스프링클러설비의 소방시스템의 적용방안을 제시하였다.

향후, ESS 저장실에 적용 할 소방시스템의 성능실험과 실증을 수행할 예정이며, 본 연구가 ESS 저장실의 화재로 인한 인명과 재산피해 등의 사회적 손실을 줄이는데 기여할 것으로 기대한다.

참고문헌

- [1] 한국전기안전공사, 소방청, 화재예방, 소방시설 설치유지 및 안전관리에 관한 법률 시행령 규제영향분석, 2020
- [2] 산업부, ESS 사고원인 조사결과 및 안전강화 대책 발표, 2019. 09
- [3] 대한전기학회, 에너지저장장치(ESS)의 이론적 분석을 통한 안전성 개선방안 연구, 2019. 12
- [4] 화재보험협회 방재시험연구원, 에너지저장장치의 화재안전대책에 관한 연구, 2019. 06