

복합형 감지 시스템을 이용한 ESS 화재대응 방안에 관한 연구

김시문, 강종민, 김재훈, 노태완, 박건호, 양규성, 임준혁, 조윤찬, 최승규
건양대학교 재난안전소방학과
e-mail : skchoi@konyang.ac.kr

A Study on the Fire Response Method of ESS using Composite Detection System

Si-moon Kim, Jong-min Kang, Jae-Hoon Kim, Tae-Wan Roh, Gun-Ho Park,
Gyu-Seong Yang, Joon-hyuk Im, Yoon-Chan Cho, Seung-Kyou Choi
Department of Disaster Safety & Fire fighting, Konyang University

요 약

국내 리튬이온배터리 기반 ESS 화재(2022년 2월기준)는 재생에너지 연계용 25건, 피크저감용 7건, 주파수 조정용 2건 등 국내에서 총 34건이 발생하였으며, 화재손실 비용, 안전 재건비용 등 막대한 손실을 초래하였다[9]. 이에 본 논문에서는 현장조사 및 시험실증과정을 바탕으로 전기에너지 저장장치에 대한 화재현황과 ESS용 화재특성을 분석한다. 또한, 분석한 화재특성을 바탕으로 복합형 감지 시스템을 구축하여 감지오류를 구별하고, 감지기들을 통하여 안정성을 강화한다. 이를 통해 화재를 사전에 감지함으로써, 가장 효율적인 정밀안전 시스템으로부터 신뢰할 수 있는 시스템을 구성한다. 추가로 발생할 수 있는 화재를 사전에 예방하고, 시험 및 분석하는 과정을 걸쳐 ESS화재 감지 방안을 제시한다.

1. 서 론

에너지저장장치(ESS, Energy Storage System)는 태양광, 풍력 등에서 발전되거나 전력 계통으로부터 공급된 전력을 배터리에 저장한 후, 필요한 때에 저장된 전력을 부하 전력 계통에 공급할 수 있는 저장장치로, 전력변환장치(PCS, Power Conversion System)와 배터리 등으로 구성된다[1].

신재생에너지 보급을 위한 정부의 2030 정책에 따라 2017년부터 ESS 보급을 적극적으로 추진하고 있어 태양광 및 풍력발전 등 신재생에너지 설비 관련 투자가 확대되고 있으며, 이와 더불어 생산된 에너지를 저장하는 ESS의 수요는 계속 증가하고 있다[2].

ESS 화재는 열 폭주 발생으로 인해 재발화가 발생하여 급격한 연소 확대가 나타나고, 상당한 열량이 방출되어 전실 화재 현상이 발생하는 경우가 대부분이다[3].

또한, 기존의 소화약제의 경우 ESS 화재에 적응성이 없어 소화기 및 자동소화설비 등이 작동하더라도 초기진화가 어렵다.

화재보험협회 통계자료에 의하면 2017년 1건, 2018년 16건, 2019년 11건, 2020년 2건, 2021년 2건, 2022년 2건으로 ESS

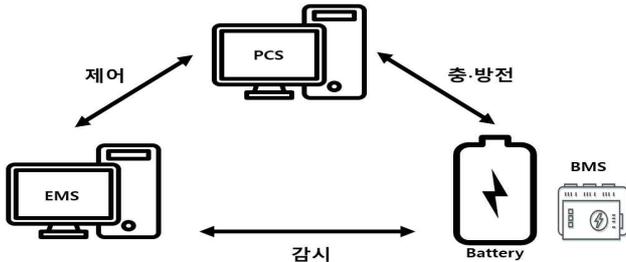
수요와 같이 화재도 증가하고 있으며, 화재 34건 중 충전 후 휴지 중 14건, 점검 중 4건, 충전 중 1건, 기타 화재는 15건이다[3]. 화재 원인 조사결과 일부 보호 체계 미흡, ESS 배터리 셀 단위 결함, 운영·관리를 위한 통합체계 미흡 등이다[4].

이에 본 논문에서는 화재 발생 후 진압 및 현장 대응이 매우 어려운 ESS 화재 진압 및 예방을 위하여 복합형 감지 시스템을 이용한 조기 화재 감지 알고리즘을 제시한다. 또한, 모의 화재 시험으로 ESS 화재에 대응할 수 있는 복합형 감지 시스템의 유용성과 신뢰성을 확인한다.

2. ESS 구성 및 화재 원인·특성 분석

에너지저장장치는 생산 전력을 저장하기 위한 배터리 등의 전력저장원과 전력변환을 위해 필요로 하는 PCS(Power Conditioning System), 기타 전력 시스템 관리를 위한 운영시스템으로 구성되며 그림 1은 ESS의 기술 구성도를 나타낸다[2]. 여기서, PCS는 생산된 직류를 교류로 변환하여 전력 계통에 전력을 공급하거나 반대로 전력 계통으로부터 교류전력을 공급받아 직류로 변환하여 전력을 배터리에 저장하기 위한 것으로, 배터리와 연결되어 정상 동작을 수행할 수 있어야

하고 배터리와 연결되어있는 BMS와 통신하여 BMS에서 제공되는 배터리 전압 정보와 전지잔량을 활용하여 충·방전 동작을 수행한다[2]. EMS(Energy Management System)는 ESS의 컨트롤타워 역할을 하는 장치로 배터리와 PCS의 제어로 충·방전량과 시간을 조정하는 소프트웨어 장치이다[2].



[그림1] ESS의 구성도

ESS 화재 원인은 전기적 충격에 의한 보호 체계 미흡, ESS 배터리의 단위 셀 결함, ESS 운영 및 관리를 위한 통합체계 미흡 등이 원인이다. 민관합동 ESS 화재사고 원인조사 위원회에서 2022년까지의 ESS 화재 34건은 조사하였다. ESS 화재는 전체 34건의 화재 사고 중 5건은 BMS 불량으로 발생, 3건은 부실 공사로 인해 발생, 4건은 운영 중에 발생, 원인이 밝혀지지 않은 것은 22건 발생한 것으로 표 1과 같이 확인되었다.

[표 1] 연도별 국내 ESS 화재 원인 건수

연도	2017	2018	2019	2020	2021	2022
BMS 불량	1	3	-	1	-	-
부실공사	-	3	-	-	-	-
운영 중	-	-	1	1	1	1
원인 조사 중	-	10	10	-	1	1
피해 금액(억 원)	15	278.8	210.2	4.67	13.5	102.35
합	1	16	11	2	2	2

최근 국내에서 발생한 ESS 화재 사례 및 원인은 표 2와 같다. ESS 화재 사례를 살펴보면, 2019년 1월, 울산시 대성산업 가스에서 피크 제어용으로 설치된 ESS에서 발생한 화재로 인명피해는 없었으며, 48억 3400만 원의 재산피해가 발생하였다. 또한, 콘크리트구조 건축물 내부에 ESS를 설치하였고, 2층 배터리실에서 화재가 발생하였다. 감지기, 지구음향장치, 청정소화설비가 작동하였으나 초기진화에 실패하였다[4].

[표 2] 국내 ESS 화재 최근 사례

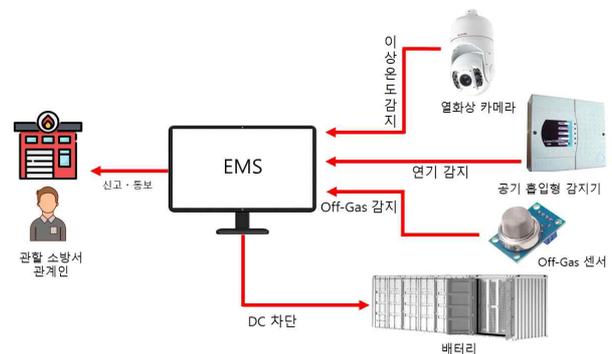
일자	사고 개요
2019.10.27	배터리 충전률(SOC) 95% 운영, 화재 당시 배터리는 방전 대기 중이었음. 22일 실시한 점검에서도 보호장치 정상 작동.
2020.05.27	배터리 충전률(SOC) 95% 운영, 배터리 안전강화 조치가 완료되어 화재 확산시간은 늦었으나 확산 방지는 실패.
2021.03.11	태양광 화재로 언론보도 되었으나, ESS에서 불이 시작됨.
2021.04.06	충전율(SOC)은 90%로 제한. 시설물을 감싸고 있던 철관과 펜스 등 시설물이 10여 미터 떨어진 밧으로 날아가는 등 대형 폭발이 발생한 뒤 전소 화재로 이어짐.
2022.01.12	울산 CLX에 설치된 51MWh규모 ESS. 2018년 11월 준공된 피크부하 감축용 ESS로 확인.
2022.1.17	당시 ESS는 충전율(SOC) 90% 운영 2018년 8월 상업운전 시작. 해당 ESS는 화재 감지 시 자동 동작하는 가스소화설비와 문제를 일으킨 배터리랙으로 화재를 한정시키는 주수식 소화설비, 내부 폭발성 가스를 옥외로 배출하는 배기시설 등을 갖추고 있었다.

한편, 2019년 1월 완도군 태양광 ESS에서 발생한 화재로 인명피해는 없고, 12억 3천만원의 재산피해가 발생하였다.

화재 사례에 따른 ESS 화재 특성을 분석하면, 충전율(SOC)이 높을 때 발생하며, 보호장치가 작동되었으나 확산을 방지하지 못하였고, 소화설비가 작동하였으나 열 폭주 및 재발화로 인해 초기 진압에 실패하였으며, 리튬이온배터리의 적층 구조로 인해 연소가 확대되었다. ESS를 보관 및 관리하는 건물 화재의 대부분이 취약한 조립식 패널구조로 되어있어, 화재 확산이 매우 빨라 전소됨으로 이에 대한 화재 대응 방안이 요구된다.

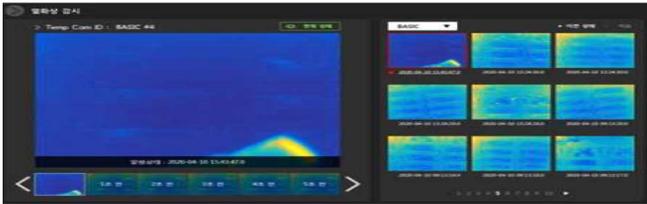
3. 복합형 화재 감지 시스템을 이용한 ESS 화재 감지 방안

ESS 화재에 대응하기 위하여 본 논문에서는 그림 2와 같이 복합형 화재 감지 시스템을 이용한 EMS 화재 제어 시스템 구성을 제시한다.



[그림 2] 복합형 감지 시스템 구성도

복합형 감지 시스템을 구체적으로 설명하면, 열 감지는 배터리 온도 상승에 의한 화재에 감지하기 위하여 적외선 열화상 카메라를 적용한다. 열화상카메라는 그림 3과 같이 열의 지속적인 감시로 평균적인 발열 상황을 영상과 데이터로 획득하여 데이터를 EMS에 전송하고 관리자가 실시간으로 화면을 통해 발열 상황 및 지점을 확인할 수 있도록 한다. EMS와 연결한 열화상카메라는 열 폭주 이전에 가장 먼저 배터리의 과열을 감지할 수 있으며, 화재 확산을 방지하는 조기 대응 장치이다[5].

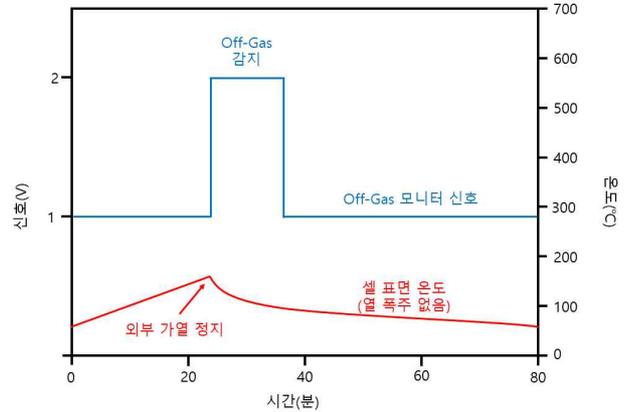


[그림 3] 열감지기

또한, EMS에 전송된 열 상승 이벤트나 불규칙한 발열 지점, 임계치를 초과한 값 등의 데이터를 관리자 및 관할 소방관서에 통보하여 ESS 화재에 대응할 수 있다.

EMS와 연결한 공기흡입형 감지기는 일반적인 감지기와 같이 화재 시 발생하는 연기뿐만 아니라 보이지 않는 연기를 감지함으로써 화재에 대한 조기 감지가 가능하다. 일반적인 연기는 6~20%obs/m 범위 내의 연기를 말하지만, 보이지 않는 연기는 0.045~3%obs/m 이내의 연기를 말한다. 감지 원리는 기계식 흡입팬으로 공기를 모은 후 연기의 포함 여부를 체크하는 능동적 시스템이다[6].

EMS와 연결한 Off-가스 감지기는 Off-가스 배출을 감지하는 것으로, ESS 화재 발생 시 가장 먼저 배출되는 전조현상이다. 이를 감지하여 열 폭주 사고를 예측하고 충분한 대응 시간을 확보하는 장치이다[7]. 그림 4는 18650 셀에 대한 오버히트 실험으로 셀 부근에 Off-가스 센서를 설치한 뒤 셀 표면 온도가 분당 5도씩 상승하도록 오버히트 상태를 모의하여 센서의 동작, 셀 전압 및 셀 표면의 온도 등의 결과이다. Off-가스 검출 후 셀의 열적 Abuse 상태를 제거한 결과, 실험에서의 열 폭주 발생 시각 경과 후에도 열 폭주는 발생하지 않았고, 셀 표면의 온도가 안정화되었다. Off-가스 검출 후, 셀의 전압 부하를 모두 차단하면 열 폭주를 회피할 수 있다. 전용 룸 또는 컨테이너 타입의 ESS에 적용하는 경우, Off-가스 센서를 랙 별로 1개씩 설치하며, 통로에는 기준을 잡기 위한 센서를 3개 설치하여 Off-가스 검출 에러를 줄인다[8].



[그림 4] Off-가스 센서의 열 폭주 조기 경고 특성

본 논문에서 제시하는 ESS 화재 대응용 복합형 감지 시스템은 기존 EMS에 열화상카메라, 공기흡입형 감지기, Off-가스 센서를 적용해 열 폭주 이전에 배터리 이상 반응을 감지하고, 화재 확산을 방지한다. 또한, 실시간 조회, 설비 제어, 경고 조회 등이 가능한 별도의 시스템을 구축하여 ESS 시스템의 열 폭주 온도를 분석하여 일정한 패턴을 벗어난 이벤트에 대해서는 감시를 통해 단계별로 경고, 차단하여 화재로 발전하지 않도록 예방한다[5].

5. 결 론

민관합동 ESS 화재사고 원인조사 위원회에 따르면 2022년까지 ESS 화재는 총 34건이다. 화재 원인은 PCS 제조, 배터리, ESS 설계, 시공, 설치상의 문제점, 운전, 사용상의 전기적 및 환경적 요인 등 복합적 원인으로 밝혀졌으며, 초기 진압에 실패할 시, 화재가 전소까지 이어지는 화재 특성이 있다[3]. 따라서 본 논문에서는 조기에 화재를 감지하고 예방할 수 있도록 EMS와 연동으로 배터리의 이상 현상을 감지하여 관계자에게 통보 및 전력 설비를 차단할 수 있는 복합형 화재 감지 시스템을 제시하였다.

제안한 복합형 화재 감지 방안은 열화상카메라를 통하여 배터리 온도를 실시간으로 확인하며, 공기흡입형 감지기로 미세한 연기를 체크하고 Off-가스 감지기를 이용하여 열 폭주 전조현상을 예측할 수 있다[5].

이에 본 논문에서는 화재 발생 후 진압 및 현장 대응이 매우 어려운 ESS 화재 진압 및 예방을 위하여 복합형 감지 시스템을 이용한 조기 화재 감지 알고리즘을 제시하고, 모의 화재 시험으로 ESS 화재에 대응할 수 있는 복합형 감지 시스템의 유용성과 신뢰성을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 교육부와 한국연구재단의 재원으로 지원을 받아 수행된 3단계 산학협력 선도대학 육성사업(LINC 3.0)의 연구결과입니다(NTIS 과제번호. 1345356198).

참고문헌

- [1] 에너지저장장치(ESS)의 안전성 확보를 위한 화재요인 분석 및 표준 안전기준 개발방향 연구 ; 장홍제, 송대승, 김진용, 김석진, 장태현
- [2] 이봉우. "ESS시스템의 화재원인 분석과 해결 방안 연구." 국내석사학위논문 한양대학교 공학대학원, 전기공학전공 2020.2 서울
- [3] 2019. 6. 민관합동 ESS 화재사고 원인조사 위원회 ESS 화재사고 원인조사 결과 보고서
- [4] 에너지 저장장치 화재의 확대 요인에 관한 연구-서울시립대학교 도시과학대학원방재공학과 방재공학전공 문기현
- [5] 에너지 저장장치의 화재 예방을위한성능 최적화 기술 연구-전주대학교 문화산업대학원 탄소나노부품소재공학과 한상철
- [6] 김수현. "전기저장시설의 화재안전기준(NFSC 607) 제정(안)에 대한 분석." 국내석사학위논문 서울시립대학교 도시과학대학원, 2021. 서울
- [7] 백지훈-리튬-이온 전지 시스템의 화재예방을 위한조기 감지 방법에 관한 연구-전남대학교 산업대학원전자컴퓨터 공학과
- [8] 이주광_off-가스 조기 검출에 의한 ESS 화재예방 방안
- [9] 리튬이온배터리 기반 전기에너지저장장치의 실시간 모니터링 관련 안전기술 분석"; 우필성, 김재현, 송길목