

VPL용 전기저장장치의 기술기준 분석에 관한 연구

이수용, 유현상, 조성덕, 이진호, 김찬혁, 노대석

한국기술교육대학교

e-mail:lsy4570@kopo.ac.kr

A Study on Analysis of Technical Standards in ESS for Virtual Power Line

Soo-Yong Lee, Hyun-Sang You, Sung-Duck Cho, Jin-ho Lee,

Chan-Hyeok Kim, Dae-Seok Rho

Korean University of Technology and Education, **Korea Polytechnics

요 약

최근, 2030 국가 온실가스 감축 기본 로드맵 및 제9차 전력수급 기본계획에 따라 신재생에너지의 보급 속도가 급격히 증가하고 있다. 하지만, 제주도과 같은 일부 지역은 전력설비 인프라의 부족으로 신재생에너지의 출력을 제한시키고 있는 사례가 다수 발생하고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여, 추가적으로 선로를 증설하지 않고 출력제한을 개선시킬 수 있는 가상 전력선로 운영 기술인 VPL(virtual power line) 기술 도입의 필요성이 증가하고 있다. 여기서, VPL의 핵심 설비인 ESS는 한국전기설비규정(KEC)에 따라 분산형 전원 내의 발전설비로 규정되어 있는데, 이차전지, 전력변환장치, 제어, 통신 및 보호설비 등의 기술 기준에 대한 내용이 부재이거나 혼용되어 있는 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 VPL을 배전계통에 안정적으로 도입하기 위하여, 기존의 한국전기설비규정(KEC)과 소방청의 화재안전 기술기준 및 한국전기안전공사의 ESS 기술기준을 분석하여, VPL용 ESS의 이차전지, 전력변환장치, 제어, 통신 및 보호설비와 화재안전기준, 안전, 검사, 점검 등의 내용을 적용하여 제시한다.

1. 서 론

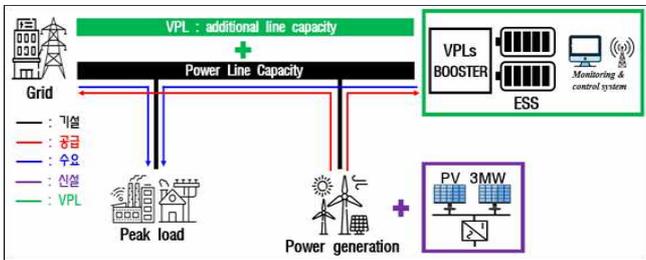
최근, 정부의 탄소중립 정책에 따라 2030년까지 신재생에너지원의 비중을 20%로 확대하기 위해 신재생에너지의 보급 사업이 적극적으로 추진되고 있다. 신재생에너지의 증가에 따라 2020년 1월까지 신재생에너지의 계통연계 신청 용량은 약 14GW에 이르지만, 이중 계통에 접속되지 못하고 대기 중인 용량은 신청 용량의 42%에 해당하는 5.9GW에 이른다. 신재생에너지는 3년 이내에 상업 운전이 가능하지만, 변압기 증설, 라인 신설, 전력케이블 업그레이드 방식 등 기존의 네트워크 강화방식은 신재생에너지의 설치 위치 및 용량에 따라 장기간의 시간과 막대한 비용이 소요되는 어려움이 있어, 가상 전력선로 운영 기술(VPL) 도입의 필요성이 대두되고 있다. VPL은 송·배전 시스템을 추가로 강화/구축하는 대신 계통에 연계된 신재생에너지의 발전측과 수요측에 에너지 저장 시스템(ESS)을 연결하여 기존 전력 계통 인프라의 성능과 신뢰성을 향상시키고, 신재생에너지의 용량 증가에 따른 기존 계통의 네트워크 강화 비용을 줄임으로써 신재생에너지원의 경제성 향상을 기대할 수 있는 기술이다. 이에, 기존에 제정되어 시행 중인 한국전기설비규정(KEC)의 전기저

장장치(ESS) 기술기준과 소방청에서 공고 및 고시한 전기저장시설의 화재안전 기술기준(NFIC 607), 한국전기안전공사의 전기설비 세부 검사·점검 기준을 분석하여 ESS의 이차전지, 전력변환장치, 제어, 통신 및 보호설비와 화재안전기준, 안전, 검사, 점검 등의 내용을 포함한 VPL용 ESS의 기술기준 제정이 필요함을 제안한다.

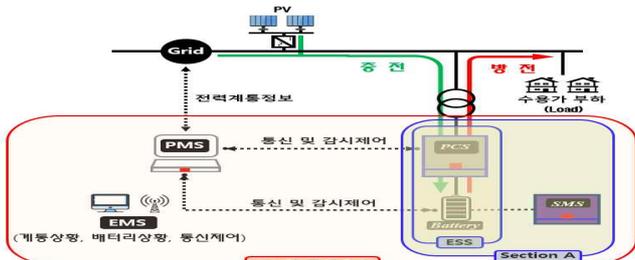
2. VPL의 운용 특성

VPL은 그림 1과 같이 VPL 송배전 시스템을 추가로 강화/구축하는 대신 계통에 연계된 신재생에너지의 발전측과 수요측에 에너지저장시스템(ESS)을 연결하여 기존 전력계통 인프라의 성능과 신뢰성을 향상시키고, 신재생에너지의 용량 증가에 따른 기존 계통의 네트워크 강화 비용을 줄임으로써 신재생에너지의 경제성 향상을 기대할 수 있는 기술이다. VPL의 구성 요소는 그림 2와 같이 배터리, 배터리관리장치, 전력변환장치, 전력관리장치, 에너지관리시스템, 안전관리시스템 등으로 나타낼 수 있다. 여기서, 배터리(Battery)는 에너지를 저장하는 매체이며, 필요시 방전을 통해 전력을 공급

하고, 배터리관리장치(BMS)는 배터리의 충·방전 상태 등을 외부 인터페이스에 제공하고, 과충전/과방전 등의 보호 기능을 수행하는 시스템이다. 그리고, 전력변환장치(PCS)는 생산된 전력이 배터리에서 충·방전하기 위해 전기의 특성 등을 변환하는 역할을 수행하고, 전력관리장치(PMS)는 배터리 및 PCS 상태에 대한 모니터링과 PCS를 제어하는 역할을 수행하며, ESS 모니터링 및 제어 운영을 위한 시스템이다. 또한, 에너지관리시스템(EMS)은 ESS 운영에 필요한 태양광 발전량, ESS 충·방전량, ESS 설비 및 운전 현황 등을 모니터링하고, ESS가 최적의 운전을 할 수 있도록 제어하고 운영하며, 안전관리시스템(SMS)은 VPL의 안전관리 및 위해 요인을 찾아내 이를 분석하고 사고를 예방하기 위해 설계된 관리시스템이다.



[그림 1] VPL 개념도



[그림 2] VPL의 구성

3. VPL용 ESS의 기술기준 분석

3.1 한국전기설비규정(KEC)

전기저장장치(ESS)의 화재 확산 방지를 위한 전기설비기술기준의 판단기준은 그림 3과 같은데, 2021년 1월 한국전기설비규정(KEC)이 제정되어 5차례 개정을 거쳐 시행되고 있다. 이에, ESS의 기술기준도 그림 4와 같이 개정되어 시행 중에 있다.

국내 ESS 안전성 법령 및 기준	
IV. 주요 개정 내용	3
1. 전기저장장치 설치 및 안전 강화	3
● 제205호 1항(신설) / 리튬배터리 방화벽	3
● 제205호 2항(개정) / 온·습도 유지기준 마련	5
● 제205호 2항(신설) / 인화성유체 방화벽 기준 마련	7
● 제205호 2항(신설) / 필리히지 기준 마련	8
● 제205호 2항(신설) / 제타전력 기준 마련	10
● 제205호 2항(신설) / 차량 충돌방지 기준 마련	11
● 제205호 2항(신설) / 가연성유체 방화벽 기준 마련	12
● 제205호 2항(신설) / 외부 방화벽 설치기준 마련	13
● 제205호 2항(신설) / 화재발생 시 화재 위험도	14
● 제205호 2항(신설) / 화재발생 시 화재 위험도	15
● 제205호 2항(신설) / 화재발생 시 화재 위험도	16
● 제205호 2항(신설) / 화재발생 시 화재 위험도	17
● 제205호 2항(신설) / 화재발생 시 화재 위험도	18
● 제205호 2항(신설) / 화재발생 시 화재 위험도	19
2. 전기저장장치 화재 발생 요인 강화	21
● 제208호(신설) / 리튬 배터리 20kWh 이상 적용	21
● 제208호 1항(신설) / 화재에 대한 추가 시설요건 마련	22
● 제208호 1항(신설) / 화재발생 내 안전 위험도	23
● 제208호 1항(신설) / 화재 발생 시 위험도	24
● 제208호 1항(신설) / 화재 발생 시 위험도	25
3. 전기저장장치 화재 시설 요건 마련	27
● 제208호 2항(신설) / 화재에 대한 시설요건 마련	27
● 제208호 2항(신설) / 화재에 대한 시설요건 마련	28

2018. 12.

[그림 3] 전기설비기술기준의 판단기준

510 전기저장장치	512.2 제어 및 보호장치 등
511 일반사항	512.2.1 충전 및 방전 기능
511.1 시설장소의 요구사항	512.2.2 제어 및 보호장치
511.2 설비의 안전 요구사항	512.2.3 계측장치
511.3 옥내전로의 대지전압 제한	512.2.4 접지 등의 시설
512 전기저장장치의 시설	513 특정 기술을 이용한 전기저장장치의 시설
512.1 시설기준	513.1 적용범위
512.1.1 전기배선	513.2 시설장소의 요구사항
512.1.2 단자와 접속	513.2.1 전용건물에 시설하는 경우
512.1.3 지물의 시설	513.2.2 전용건물 이외의 장소에 시설하는 경우
	513.3 제어 및 보호장치 등

[그림 4] KEC 전기저장장치 기술기준

하지만, ESS의 현 한국전기설비규정(KEC)은 5장 분산형 전원설비 내 '510 전기저장장치'에 제시되어있고, 5장에서 제시하는 분산형 전원은 송전망의 배전 시설을 간편화하고 효율성을 높이기 위해 태양광, 풍력 등과 같은 신재생에너지 자원을 이용하는 소규모 발전설비를 말하고 있으며, ESS도 발전설비에 포함하고 있다. 현재 5장에서 ESS를 구성하고 있는 요소(전력변환장치, 이차전지)에 대한 내용이 부재이거나 혼용되어 있으므로 이에 대한 재배치와 요소별 규정이 필요하여 ESS의 기술기준이 표 1과 같이 개정될 예정이다.

[표 1] 전기저장장치 개정(안)과 제·개정 사유

순번	개정(안)	제·개정 사유
1	512.1.4 제어, 감시 및 보호장치 가. 긴급상황이 발생하였을 때 전기저장장치를 자동 및 수동으로 정지시킬 수 있는 비상정지장치를 설치하여야 하며, 자동 비상정지는 5초 이내로 동작하여야 한다.	비상정지 작동 시간을 강조하기 위하여 하나의 문장을 나누워서 표현(ESS 화재원인 조사단 안전대책)
2	512.1.5 전용건물에 시설하는 경우 (2) 이차전지는 벽면으로부터 0.3m 이상 이격하여 설치하여야 한다. 다만, 옥외의 전용 컨테이너 및 인클로저는 제조사가 정하는 적정 거리를 이격한 경우에는 예외로 할 수 있으며, 컨테이너 및 인클로저의 면적은 42㎡ 이하여야 한다. (5) 이차전지, 전력변환장치, 배전반 등은 침수의 우려가 없도록 하며, 지표면에서부터 최소 0.3m 이상 높이에 설치하여야 하며, 염전 또는 간척지 등에 시설하는 경우 지표면에서 최소 0.6m 이상 높이에 설치하여야 한다.	이차전지가 시설되는 전용건물의 최대 면적 제한 및 침수사고를 방지하기 위한 최소 설치 높이 제시, 면적 기준 NFPA 855 의 4.4.3.2에 제시된 W(162m)×D(26m)를 계산한 42㎡으로 규정 침수사고를 방지하기 위해 화재보험협회 KFS 1211(사업장 침수위험지수 평가기준) 내용 인용
3	512.1.6 전용건물 이외의 장소에 시설하는 경우 다. 이차전지 랙과 랙 사이는 1m 이상 이격하고, 랙과 벽면 사이는 전면부의 경우 1m 이상, 측면과 후면부의 경우 0.8m 이상 이격 하여야 한다.	산업계 요구사항을 반영하여, 안전에 심각한 우려가 없는 이격거리로 완화(랙과 측/후면부 이격 1m → 0.8m)
4	512.3.2 설비의 안전 요구사항 1. 흐름 전지 시스템의 회로는 다른 부위의 도전부와 절연되어야 하며, 최소 절연저항은 공칭전압의 100kV 이상이어야 한다. 2. 전해질과 접촉하는 부품은 내부 식성 및 내구성을 갖추어야 한다.	흐름 전지만의 특성을 요구하는 안전 사항을 국제표준(KS C IEC 62932-2-2의 '5.5.5 누설전류)를 근거로 하여 제시함.

순번	개정(안)	제·재정 사유
5	512.3.3 전해질 유출 방지 및 중화장치 전해질은 유출이 없도록 밀봉하고 유해가스로 인한 사고를 방지하기 위해 다음과 같은 장치를 시설하여야 한다. 다. pH 5.0~9.0 사이의 전해질 유출물을 중화할 수 있는 중화장치를 시설하여야 한다.	흐름 전지의 안전 특성(전해 질 유출)과 관련된 유출 방지 및 중화장치 설치 요건을 규정(KS C IEC 62932-2-2의 '5. 안전 요구사항', '5.5.2 전해 질 누출 감지', NFPA 855의 '4.14 Spill control', '4.15 Neutralization')
6	513.1.1 설치장소의 요구사항 이동형 전기저장장치를 동일한 장소에 사용하는 경우 기간은 30일을 초과할 수 없다. 다만, 30일을 초과하는 경우 512에 따라 시설하여야 한다. 이동형 전기저장장치는 공공도로, 건물, 가연성 물질, 위험 물질, 물 건이 적층된 장소로부터 최소 3m 이상 이격하여야 한다.	대부분 NFPA 855, IFC 2021 내용을 인용함 이동형 전기저장장치를 사용할 수 있는 기간(30일)을 규정. 30일 초과하여 사용(방전)하는 경우, 고정형 전기저장장치의 요건을 따르도록 규정
7	513.3.2 설비의 안전 요구사항 이동 시 충격진동을 계속할 수 있는 장치를 시설하여 진동 속도는 2.8mm/s 이하여야 하며 진동 임계치는 3G 이하가 되도록 유지하여야 한다.	이동형 전기저장장치의 안전 확보를 위한 요건을 규정, 이동 중 충격진동의 최소화를 위한 충격기록계 시설 및 기준치 유지에 관한 요건 규정 (ISO 10816)

3.2 소방청의 화재안전 기술기준

전기저장시설의 화재 예방 및 화재 발생 시 초기소화 능력을 향상시키기 위해 소방청에서는 2022년 2월에 소방관계법규의 「화재예방, 소방시설 설치·유지 및 안전관리에 관한 법률」 시행령에 따라 그림 5와 같이 전기저장시설을 특정소방대상물로 지정하고 있다. 이는 소방시설 설치 의무가 없는 전기저장시설을 특정소방대상물 중 화재 위험 특성이 유사한 발전시설로 지정하고, 화재 시 조기 진압이 가능한 스프링클러 설비 등 소방시설 설치 의무화로 초기소화 및 화재경보성능 등 화재안전도를 대폭 향상하고 화재 안전성 및 신뢰도 향상을 통한 안전 확보가 가능해져 건축주 및 건축물 사용(이용)자에게 안전한 환경을 제공하는데 목표를 두고 있다. 한편, 전기저장시설(ESS)의 소방시설 등 설치기준의 국내·외 및 유사 입법사례를 보면 그림 6과 같다.

나. 제·개정 내용
○ 전기저장시설을 특정소방대상물 중 발전시설로 지정(안 발표 2) - (현행) 전기저장시설은 특정소방대상물에 해당하지 않음 → (개정안) 발전시설 중 전기저장시설로 지정
○ 전기저장시설의 스프링클러 등 소방시설 설치 의무화(안 발표 5) - (현행) 소방시설 설치대상 아님 → (개정안) 소화기구, 스프링클러설비, 자동화재속보설비, 자동화재속보설비 설치 의무화
○ 전기저장시설을 건축허가등의 동의대상물 범위에 추가(안 제12조제1항)
○ 스프링클러설비 설치면제 대상 중에서 전기저장시설 제외(안 발표 6) - 전기저장시설 화재에 소화적용성이 있는 스프링클러설비가 제외되지 않도록 규정 보완

[그림 5] 전기저장시설의 특정소방대상물 지정 제·개정문

	NFPA 855	FMDS 053	IFC 2018
주요내용	KFS 412	NFPA 855	FMDS 053
방화구획	1시간	○	○
기초면적	20 kWh 1	○	○
벽/그룹 용량제한	250 kWh 1	○	50 kWh 1
방화벽	600 kWh 1	○	○
방화벽	상대규모 화재시험만 만족 시	상대규모 화재시험 및 위험경감분석만 만족 시	상대규모 화재시험 및 위험경감분석만 만족 시
벽체간이격거리	0.9m 이상	○	○
방화	공공소방대 접근이 불가능할 경우	○	○
방기설비	연소제한등급이 20% 초과하지 않도록, 해당면적기준 1.1L/m ² /hr	○	○
스프링클러	12.2 LPM/m ² (상대규모 화재시험을 통한 진동시 반영치)	○	○
스프링클러 방호장치	230 m ² L	230 m ² L	NFPA 13에 부합하게 설치
구조체	유용성의 영향을 받지 않음 (상대규모 화재시험을 통한 진동)	○	스프링클러를 사용할 수 있는 경우에만 진동
충돌보호	차량 충돌보호장치	○	○
이격	방화벽, 위험물 저장탱크와 이격	○	공공도로, 위험물 저장탱크와 5m 이상 이격
대피로나	방화벽의 급속류	○	○
계단	1시간 내화성능을 갖는	○	○
간이격	6m 이상 이격	○	○

[그림 6] ESS 화재 관련 국내의 기준 비교

미국방화협회(national fire protection association, NFPA 855)에서는 배터리 에너지저장시스템에서 열 폭주 화재 전과를 평가하기 위한 테스트 방법인 UL 9540A는 셀 수준에서 시작하여 모듈 수준, 장치 수준 및 설치 수준으로 진행되는 점진적 화재 테스트 방법을 개발하였다. 또한, 실 대규모 화재시험 및 위험경감분석 만족 시 용량 제한을 완화하고 1시간 내화성능을 갖는 바닥, 벽, 천장 등으로 구획하였다. 그리고, 랙 및 벽체 간 이격 거리는 0.9m 이상, 스프링클러 살수 밀도는 12.2LPM/m², 방호면적은 230m² 이하로 규정하고 있다. 국제화재코드(international fire code, IFC 2018)에서는 실 대규모 화재시험 및 위험경감분석 만족 시 용량 제한을 완화하고 있다. 1시간 내화성능을 갖는 바닥, 벽, 천장 등으로 구획해야 하며, 랙/그룹은 50kWh 이하로 용량을 제한하고 있다.

소방청은 전기저장시설의 화재가 지속적으로 발생함에 따라 화재 특성과 설치환경을 종합적으로 고려한 「전기저장시설의 화재안전 기술기준」 제정안을 2022년 2월 7일자로 공포하고, 2월 25일부터 시행하였다. 이는 2021년 8월 「화재 예방, 소방시설 설치·유지 및 안전관리에 관한 법률 시행령」 개정 안이 공포되어 일정 규모 이상의 전기저장시설이 특정소방대상물에 포함됐고, 그 시설에 적용하는 소방시설 및 안전시설 등에 대한 세부 설치기준을 발표하였다. 제정안의 주요 내용은 첫 번째 전기저장시설 및 관련 장치에 관한 용어들을 정의하고 스프링클러 설비는 전기저장시설 소화에 적합하도록 ‘바닥면적(바닥면적이 230m² 이상인 경우에는 230m²) 1m²에 분당 12.2리터 이상의 수량을 30분 이상 방수할 수 있도록 했다. 두 번째로 옥외형 전기저장시설로서 스프링클러 설비의 설치가 어려운 경우 ‘배터리용 소화장치’를 설치하거나, 공인된 시험기관에서 화재 안전 성능을 인정받은 경우에는 스프링클러를 설치하지 않을 수 있도록 특례 조항도 마련했다. 세 번째로 전기저장시설에 적합한 화재감지기의 종류를 정하고, 건축물과 분리되었거나 따로 설치된 옥외형 전기저장시설의 자동화재 속도설비는 수신반 없이 속

보기에 감지기를 직접 연결하는 방식으로 설치할 수 있도록 했다. 네 번째로 소방대의 원활한 소방 활동을 위해 전기저장시설은 지면으로부터 지상 22m 이내, 지하 9m 이내로 설치해야 하며, 벽체·바닥·천장은 건축물의 다른 부분과 방화구획을 해야 한다. 이에 전기저장시설의 화재 사고 예방 및 피해확산 방지를 위해 특정소방대상물 중 발전시설로 지정하고 화재 시 조기 진압이 가능한 스프링클러 설비 등 소방시설 설치를 의무화해 화재 안전성의 강화가 예상된다. 한편, 스프링클러 설비의 방수 밀도, 수원 산정을 위한 예상 지속시간, 스프링클러 헤드의 국내·외를 비교하면 표 2와 같다.

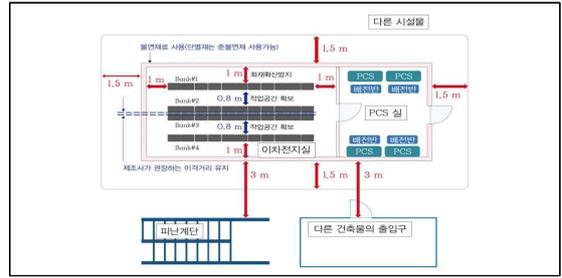
[표 2] 국내의 기술기준 요약

구분	NFSC 607(개정안)	NFPA 855	FM Data sheet 0533	UL 9540A
방수밀도	바닥면적 230㎡기준 12.2/min이상	바닥면적 230㎡기준 12.2 mm/min 이상	바닥면적 230㎡기준 12.2mm/min이상	6.1m x 6.1m 시험실에 12.2mm/min이상
수원 산정을 위한 예상 지속시간	최소 30분	화재위험도 등급 Extra Hazard I 에 해당되어 90분~120분	ESS액의 수에 45분을 곱한 시간	실증시험의 시험종료 조건에 해당하는 시간 또는 실증시험의 성능 요건을 만족하는 시간
스프링클러헤드	NFSC 607이외 설치기준에 관한 사항은 NFSC 103 준용	NFPA 855이외 설치기준에 관한 사항은 NFPA13 준용	-	의뢰자의 특별한 지정 이 없는 한 공칭 작동 온도 93°C, K160

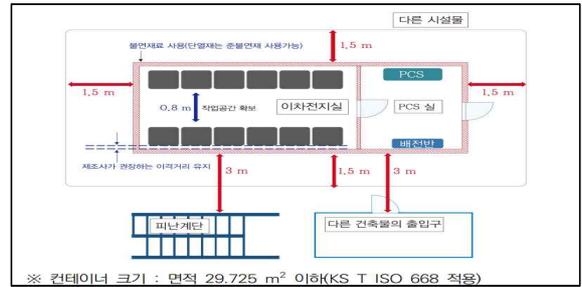
3.3 한국전기안전공사의 기술기준

한전전기안전공사 공고 제2021-1호로 "전기안전관리법 제 18조 및 "전기설비 검사 및 점검의 방법 절차 등에 관한 고시 제25조에 따라 전기설비 검사·점검기준을 제정·공고하게 되었다. 제정 이유는 한국전기설비규정(KEC) 전면 시행(2021.1.1)에 따라 법 제8조부터 제15조 및 전기사업법 제63조에서 규정하는 전기사업용 전기설비, 자가용 전기설비, 일반용 전기설비의 검사·점검에 대한 기준을 제시하기 위해 제정했으며 한국전기안전공사에서 사용전검사 시 적용하고 있다. 주요 내용은 KEC 전면 시행에 따라 검사·점검기준 적용 원칙을 규정하고 있으며, 고시에서 정하는 설비별 검사 항목, 검사 세부 종목별 검사점검기준 그리고 외관검사, 시험 측정분석에 의한 전기설비 검사·점검 항목과 세부 판단기준을 담고 있고, 전기기계 기구의 안전성을 확보하기 위한 적합성 확인 방법과 세부 기준을 담고 있다. 한편, 710절 전기저장장치에서 이차전지를 벽면으로부터 1m 이상 이격시켜야 한다. 다만, 옥외의 전용 컨테이너는 제조사가 제시한 적정 거리를 이격한 경우(ESS 전용 컨테이너 면적은 KS T ISO 668 및 해양수산부 고시 2016-217호에 따른 29.725 m² 이하로 제한하는 기준을 준용한다. 다만, 컨테이너의 면적은 벽체의 중심을 기준으로 적용한다.)에는 예외로 규정하고 있지만 전기설비규정(KEC)과 상이하다. 또한, 전기저장장치 시설장소는 주변 시설(도로, 건물, 가연물질, 이차전지를 시설하는 컨테이너 등)로부터 1.5 m 이상 이격하고, 다른 건물의 출입구나 피난 계

단 등 이와 유사한 장소로부터는 3m 이상 이격하여 시설하여야 한다.



[그림 7] 전용건물(옥외) 설치 시 이격거리



[그림 8] 전용건물(옥외) 컨테이너에 설치 시 이격거리

4. 결 론

VPL의 핵심 설비인 ESS는 한국전기설비규정(KEC)에서는 분산형 전원 내의 발전설비로 규정하고 이차전지, 전력변환장치, 제어, 통신 및 보호설비 등의 기술 기준에 대한 내용이 부재이거나 혼용되어 있다. 또한, 소방청에서는 화재안전 기술기준(NFTC 607)을 제·개정하여 ESS의 화재에 관련된 기술기준을 소방청 공고 및 고시에 따라 시행하고, 한국전기안전공사에서는 전기설비 세부 검사·점검 기준에 ESS의 기술기준이 제정되어 있다. 따라서, 본 논문에서는 한국전기설비규정(KEC)과 화재안전 기술기준 및 한국전기안전공사의 ESS 기술기준을 분석하여 ESS의 이차전지, 전력변환장치, 제어, 통신 및 보호설비와 화재안전 기술기준, 안전, 검사, 점검 등의 내용을 포함한 VPL용 ESS의 기술기준 제정이 필요함을 제안한다.

참고문헌

[1] 김병기 외 3인, "대용량 태양광발전이 연계된 배전계통의 수송가전압 특성해석에 관한 연구", 전기학회논문지, 제 62권 제1호, pp. 29-36, 1월, 2013년.