

누설 및 순환전류에 따른 ESS의 안전성 평가방안에 관한 연구

김지명, 최성문, 김경화, 이나경, 노대석*
한국기술교육대학교

A Study on the Safety Evaluation Method According to Leakage and Unbalanced Current in ESS

Ji-Myung Kim, Sung-Moon Choi, Kyung-Hwa Kim, Na-Kyung Lee, Dae-Seok Rho*
Korea University of Technology and Education

요약 최근, 에너지저장장치(ESS, energy storage system)에서 빈번하게 발생하고 있는 화재사고로 인하여, ESS의 안전기준을 고려한 위험요소 평가 연구가 활발하게 진행되고 있는데, 이 중에서 누설 및 순환전류는 화재사고의 주요 원인 중 하나로 평가되며, ESS 배터리 안전성에 영향을 줄 가능성이 있다. 따라서, 본 논문에서는 IGBT의 기생 커패시턴스, 배터리 기생 커패시턴스, 선로의 절연성능, 계통 공장 및 불평형부하에 의한 누설 및 순환전류 발생 메커니즘을 제시하고, 심각도, 발생도, 검출도로 구성된 위험우선순위(RPN, risk priority number) 평가방안을 제안하여, 다양한 누설 및 순환전류의 발생원인에 의한 ESS의 안전성 평가를 수행한다. 여기서, 심각도는 누설 및 순환전류의 크기에 따라 가중치를 다양하게 적용하며, 발생도는 누설 및 순환전류의 발생빈도를 고려하고, 검출도는 발생된 누설 및 순환전류를 검출 가능성을 바탕으로 평가한다. 또한, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 배전계통부, PCS 부, 배터리부, 불평형 부하부 등으로 구성된 누설 및 순환전류 안전성 평가 모델링을 수행하며, 이를 바탕으로 4가지의 메커니즘에 의한 누설 및 순환전류의 특성을 분석한다. 상기에서 제시한 메커니즘에 의한 누설 및 순환전류 특성과 RPN에 의한 ESS의 안전성을 종합적으로 평가한 결과, 계통 공장 및 불평형부하에 의한 순환전류가 ESS의 안전성에 영향을 줄 가능성이 가장 높으며, 계통 조건에 대한 면밀한 설계 검토 및 모니터링이 요구됨을 알 수 있다.

Abstract Recently, due to the frequent occurrence of fires in energy storage systems (ESSs), related research is actively conducted on risk factor evaluations considering safety standards in ESSs. In particular, leakage and unbalanced current are evaluated as major causes of fires and have the potential to affect the safety of batteries in ESSs. Therefore, this paper proposes a risk priority number (RPN) evaluation method that is composed of severity, occurrence, and detection degree in order to assess the safety level in ESSs. The severity degree is weighted differently depending on the magnitude of the leakage current, the occurrence degree is considered as the frequency of leakage current, and the detection degree is evaluated based on the possibility of detecting leakage current. We also modeled the leakage current based on the distribution system, PCS, battery system, unbalanced load system, etc. We analyzed the characteristics of the leakage current as well. From simulation results based on the proposed model and safety evaluation method, it was confirmed that leakage currents caused by the distribution length and unbalanced load were evaluated as having priority rank in affecting the safety level in ESSs. Therefore, detailed design and monitoring of the distribution system conditions are necessary to ensure the safety in ESSs.

Keywords : Safety Evaluation Method, ESS, Battery, Leakage and Unbalanced Current, Safety Ratings, RPN

본 논문은 2021년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원(20214910100010, (대용량(1MWh 이상) VRFB-ESS 현장 평가(SAT) 기술기준 및 시험평가 기기 개발)과 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 국가과학기술연구회 선행 융합연구사업(No. CPS22131-120)의 지원을 받아 수행되었습니다.

*Corresponding Author : Dae-Seok Rho(Korea University of Technology and Education)

Received August 8, 2023

Revised August 24, 2023

Accepted September 1, 2023

Published September 30, 2023

1. 서론

최근, 환경오염 문제와 기후변화에 대응하기 위하여 도입되고 있는 신재생에너지의 간헐성을 보완하고 전력 소비를 효율화할 수 있는 전기저장장치(energy storage system, ESS)의 수요가 급격하게 증가하고 있다[1-3]. 그러나, 리튬이온전지를 이용한 ESS의 화재사고가 지속적으로 발생하여 국내 ESS 시장에 큰 타격을 주고 있는 실정이다. 이에 따라, 정부에서는 ESS의 안전성 확보를 위하여, 사고원인에 대한 조사를 시행하여 그 원인을 제시하고 있는데, 이중 누설 및 순환전류는 ESS 화재사고의 주요 원인 중 하나로 평가되고 있다[4,5]. 또한, FEMA 방식을 통해 ESS의 각 부품에 대해서 안전성을 평가한 연구는 기존에 제시되고 있지만[6,7], ESS의 전기적인 위험요인에 대해 정량적으로 분석하고 안전성을 평가한 연구는 수행되지 않아, 관련된 연구의 필요성이 증가하고 있다. 따라서, 본 논문에서는 IGBT의 기생 커패시턴스, 배터리 기생 커패시턴스, 선로의 절연성능과 불평형부하에 의한 누설 및 순환전류 발생 메커니즘을 제시한다. 이를 바탕으로, 심각도, 발생도, 검출도로 구성된 위험 우선순위 평가방안(RPN, risk priority number)을 바탕으로, 누설 및 순환전류를 고려한 ESS의 안전성 평가를 수행한다. 여기서, 심각도는 고장 발생시 고객에 미치는 심각성, 발생도는 시스템 고장에 대한 발생 가능성, 검출도는 잠재적 고장에 대한 발견 가능성을 나타낸다.

한편, 각 메커니즘별 누설 및 순환전류의 크기를 평가하기 위하여, 본 논문에서는 실 계통에서 운용되고 있는 ESS 사이트를 대상으로 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 사용하여 배전계통부, PCS부, 배터리부, 순환전류 발생 장치부, 절연성능 장치부 등으로 구성된 누설 및 순환전류의 평가 모델링을 수행한다. 이를 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, 다양한 누설 및 순환전류 가운데, 불평형부하에 의한 순환전류의 RPN이 가장 높은 값으로 평가되어, ESS의 안전성에 악영향을 줄 가능성이 있으므로 계통 조건에 대한 면밀한 설계 검토 및 모니터링이 요구됨을 알 수 있다.

2. 누설 및 순환전류 발생 메커니즘

2.1 PCS측 누설전류 발생 메커니즘

일반적으로 신재생에너지 전원의 출력 안정화, 수요관리 및 주파수 조정 등 다양한 목적으로 설치되는 ESS는

AC전원부(연계용 변압기, 보호 장치), PCS부(필터, PCS 변압기, IGBT, DC 커패시터), 배터리부(배터리, 보호 장치) 등으로 구성된다. 여기서, PCS측의 IGBT는 전력 변환을 목적으로 2~4[kHz]의 고주파로 스위칭하며, 이로 인한 온도상승을 억제하기 위해 방열판(heatsink)에 설치된다. 하지만, Fig. 1과 같이 방열판과 IGBT 사이에 존재하는 기생 커패시턴스에 의하여, IGBT의 고주파 스위칭에 의한 누설전류가 발생할 수 있다. 또한, 방열판과 IGBT 사이에 존재하는 기생 커패시턴스에 의한 누설전류(i_{leak})는 Eq. (1)과 같이, 시간에 따른 IGBT 스위칭의 전압 변화량(dv/dt)과 기생 커패시턴스(C_{stray})에 의해 산정된다. 따라서, 배터리측의 DC 전압의 크기와 방열판의 구조에 따라 누설전류의 크기에 큰 영향을 미친다[8,9].

$$i_{leak} = C_{stray} \frac{dv}{dt} \quad (1)$$

where, i_{leak} : leakage current, C_{stray} : stray capacitance, v : PCS voltage, t : time

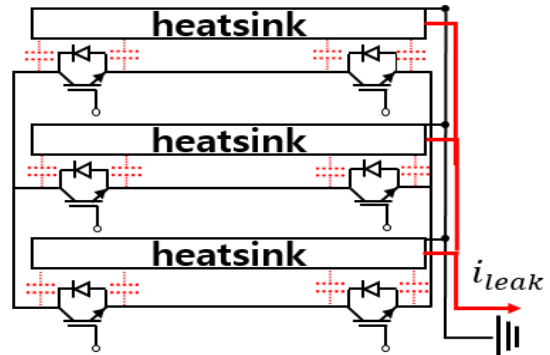


Fig. 1. Mechanism of leakage current by stray capacitance at IGBT

2.2 배터리측 누설전류 발생 메커니즘

배터리측 기생 커패시턴스($C_{str, bat}$)는 배터리와 외함 사이에 존재하며, 배터리의 용량 및 구성에 따라 변동되는 특성이 있다[10]. 즉, 한정된 컨테이너 공간내부에 대용량 배터리를 설치하기 위하여 배터리 모듈을 직병렬로 조합하는 경우, 배터리 기생 커패시턴스가 수백 nF에서 수 uF까지 발생할 수 있다. 즉, 대용량 ESS의 배터리 구성에 따른 기생 커패시턴스를 등가회로로 나타내면 Fig. 2와 같다. 여기서, ESS 배터리부의 전체 기생 커패시턴스 값은 각 모듈의 기생 커패시턴스($C_{11} \sim C_{mn}$)의 대수적인 합으로 산정된다.

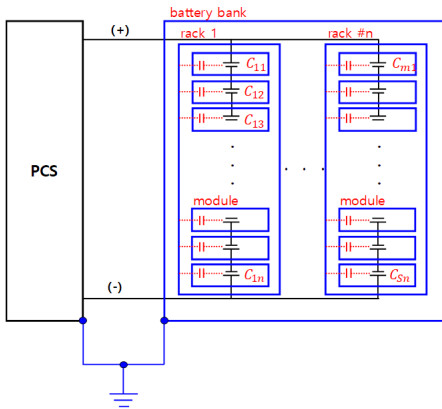


Fig. 2. Equivalent circuit of stray capacitance for battery in ESS

2.3 절연성능에 따른 누설전류 발생 메커니즘

절연성능 저하에 따른 누설전류는 선로와 전기설비의 절연성능 저하로 발생할 수 있다. 먼저, 선로의 경우, 절연성능은 가설 시 전선 피복의 손상이나 전선 접속부 및 전기기기 연결부의 노출에 의하여 악화될 수 있다. 또한, 전선은 장기간 사용 시, 운용 환경에 따라 열열화, 열변형, 오일이나 약품에 의한 열화, 내후성 열화, 저온 환경에서 균열이 발생하여 절연성능이 저하될 수 있으며, 절연성능 저하에 따라 누설전류가 발생할 수 있다. 한편, 수용가 측 전기설비의 고장 및 취급 부주의로 인해 누설전류가 발생할 경우, 인체 보호를 위하여 누전차단기가 동작하지만, 전기설비기술기준에 따라 30[mA] 이하의 정격감도 전류에서는 동작하지 않으므로 항상 누설전류가 존재할 수 있다. 상기의 메커니즘에 의한 누설전류의 흐름을 나타내면 Fig. 3과 같은데, Fig. 3의 ①은 선로의 절연성능 저하로 인한 누설전류이며, 그림 3의 ②는 수용가 측 전기설비의 고장 및 취급 부주의로 인한 누설전류를 나타낸다.

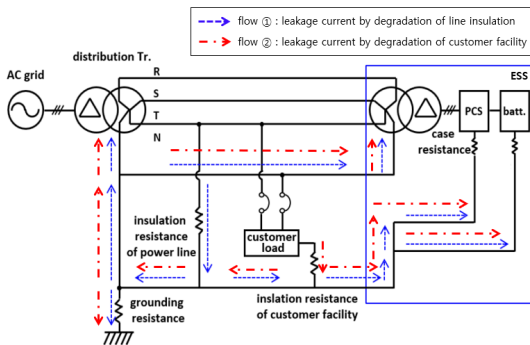


Fig. 3. Flow of leakage current by insulation degradation

2.4 불평형부하에 의한 순환전류 발생 메커니즘

우리나라는 22.9[kV] 공통 중성선 다중접지 3상 4선식 방식을 채택하고 있는데, 이러한 방식은 단상 및 3상 부하 모두에 전력을 공급할 수 있지만, 단상부하에 의해 불평형부하가 발생하여 중성선에 불평형 전류가 흐르게 된다. 또한, 부하의 크기가 크지 않은 농어촌지역의 경우, 계통의 선로공장이 40[km]를 초과하는 장거리 선로도 존재하는데, 선로공장이 길어질수록 불평형부하에 의한 중성선의 순환전류는 더욱 커질 가능성이 있다. 한편, 특고압을 수전 받는 수용가용 주변압기는 대부분 Δ -Yg 또는 Δ - Δ 결선방식이 채용되고 있지만, 태양광 전원이 연계된 변압기의 경우, 분산전원 연계 기준에 따라 Yg- Δ 방식 또는 Yg-Yg 결선방식을 사용하고 있으며, 변압기의 철심 구조도 5각 철심이 아닌 3각 철심 방식이 적용되고 있다[11]. 따라서, 변압기 결선방식과 철심구조에 의하여, 계통 공장과 불평형부하에 의해 발생하는 중성선 전류(I_{n1})는 Fig. 4와 같이, 대부분 배전용 변전소의 주변압기(I_{n2})로 순환하게 되지만, 일부 전류는 누설전류의 형태로 ESS의 연계용변압기(I_{n3})에 유입될 가능성이 있다.

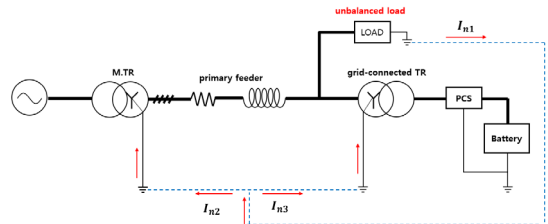


Fig. 4. Mechanism of unbalanced current by unbalanced load

3. 누설 및 순환전류를 고려한 ESS의 안전성 등급 평가 방안

3.1 누설 및 순환전류 특성

ESS는 배터리 랙, PCS의 외함, 연계용 변압기의 중성선을 공통으로 접지하여 설치된다. 따라서, 상기에서 제시한 메커니즘에 의해 발생한 누설 및 순환전류는 Fig. 5와 같이, 공통접지를 통하여 ESS의 접지선으로 유입될 가능성이 있다. 이때, 누설전류(①)와 순환전류(②)는 태양광전원이 설치된 사이트의 대지전위에 따라, 대지로 모두 흘러 들어가지 않고 PCS와 배터리의 외함으로 유입된다. 즉, 외함으로 유입되는 누설전류는 전기설비기

솔기준의 기준치(1[mA])를 초과하여 사용자의 안전 및 설비에 문제점을 야기시킬 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 상기에서 제시한 누설 및 순환전류 발생 메커니즘을 바탕으로 누설 및 순환전류의 위험성을 정량적으로 평가하기 위하여, 다양한 상정 시나리오별 안전성 평가방안을 제시한다.

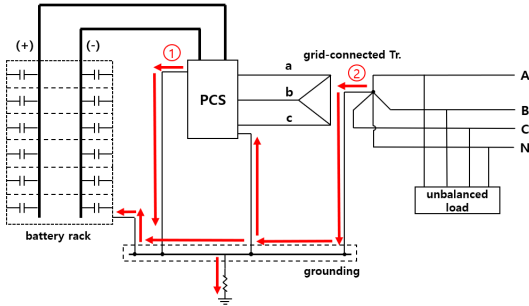


Fig. 5. Concept of leakage current flow into the battery side

3.2 누설 및 순환전류에 의한 안전성 평가방안

대상 시스템의 안전성을 평가하기 위해서는 설비를 구성하고 있는 다양한 요소들에 대한 위험성을 분석해야 하는데, 일반적으로 RPN(risk priority number) 방식이 가장 많이 사용되고 있으며, 심각도(severity, S), 발생도(occurrence, O), 검출도(detection, D)를 고려하여 산정된다. 여기서, 심각도는 고장 발생시 고객에 미치는 심각성, 발생도는 시스템 고장에 대한 발생 가능성, 검출도는 잠재적 고장에 대한 발견 가능성을 나타낸다 [12]. 또한, 각 요소에 대한 위험등급은 Fig. 6과 같이 나타낼 수 있는데, 낮은 등급일수록 위험에서 안전하고, 높은 등급일수록 위험에 노출될 확률이 증가하는 것을 의미한다.

RPN(S*O*D)	RPN rating											
severity(S)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	(nearly impossible)	(failure almost inevitable)
occurrence(O)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	(no effect)	(hazardous effect)
detection(D)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	(almost certain)	(absolute uncertainty)

Fig. 6. Chart of RPN

한편, 상기에서 제시한 평가방안은 등급에 대한 분류 기준이 많고 운용함에 있어 다소 복잡하며, 심각도(S), 발

생도(O), 검출도(D)가 각각 동일한 가중치를 갖는 한계점이 있으므로 본 논문에서는 Fig. 7과 같이 실제 상황에 적합한 위험등급으로 분류한다. 먼저, 누설전류의 심각도는 상기에서 제시한 누설 및 순환전류 발생 메커니즘에 따라 배터리측으로 유입되는 누설 및 순환전류의 크기에 따라 평가한다. 여기서, 심각도는 IEC 60479를 바탕으로 누설 및 순환전류의 크기에 따라 높은 가중치를 적용하여 위험등급을 “very low”, “low”, “medium”, “high”, “very high”의 5가지로 분류한다. 즉, 누설전류의 크기가 한국전기설비규정값(1[mA]) 이하이면 “very low”로 평가하고, 1[mA]보다 크고 이탈한계 전류(9[mA])보다 작으면 “low”로, 9[mA]보다 크고 불수전류(25[mA])보다 작으면 “medium”으로, 25[mA]보다 크고 심실세동 전류(60[mA])보다 작으면 “high”로, 60[mA]보다 크면 “very high”로 평가한다.

또한, 누설전류의 발생도는 누설전류의 발생빈도를 바탕으로 평가하며, IGBT 스위칭 및 배터리 기생 커패시턴스에 대한 발생도는 ESS의 충·방전시에만 발생하므로 “medium”, 절연성능 저하에 대한 발생도는 오랜 기간에 걸쳐 일어나므로 “low”, 불평형부하에 대한 발생도는 상시 존재하므로 “high”로 분류한다. 한편, 검출도(D)는 누설전류의 측정 가능성을 바탕으로 평가되지만, 대부분 IMD에 의하여 검출되므로 IGBT의 기생 커패시턴스, 배터리의 기생 커패시턴스, 선로의 절연성능, 불평형부하에 대한 검출도를 일정 값으로 분류한다. 한편, RPN에 의한 누설 및 순환전류에 대한 ESS의 안전성은 상기의 평가방안을 기준으로 심각도, 발생도, 검출도의 위험등급을 결정하고, 이를 바탕으로 정량화하여 종합적으로 판단한다. 여기서, 심각도의 위험등급은 “very low”, “low”, “medium”, “high”, “very high”로 분류되므로 심각도의 값을 1~7로 하고, 발생도의 위험등급은 “low”, “medium”, “high”로 분류되므로 발생도의 값을 2~5로 상정한다. 또한, 검출도의 위험등급은 동일한 값이므로 3으로 한다.

RPN(S*O*D)	RPN rating				
severity(S)	very low	low	medium	high	very high
occurrence(O)		low	medium	high	
detection(D)	same rating				

Fig. 7. Proposed RPN chart

4. PSCAD/EMTDC를 이용한 ESS의 모델링

4.1 배전계통부

PSCAD/EMTDC를 이용하여 배전계통부의 모델링을 수행하면 Fig. 8과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 배전용 변전소의 주변압기는 3권선 Yg-Yg- Δ 결선방식이며, 3차 권선은 제 3고조파를 제거하기 위하여 델타 결선방식을 채용하고 있다. 또한, 주변압기 2차측의 중성점에 배전계통의 지락전류를 제한하기 위한 0.6[Ω]의 NGR이 설치되는 것으로 상정한다[6]. 그리고 배전선로는 3상 4선식의 π 형 등가회로이며, 선종은 ACSR 160[mm²]로 상정한다.

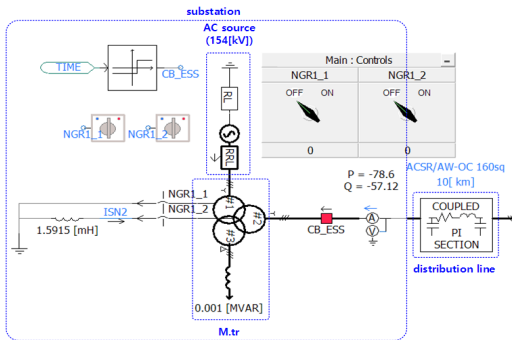


Fig. 8. Modeling of distribution system section

4.2 PCS부

배터리의 충·방전 기능을 가진 PCS는 Fig. 9와 같이, DC 전로, 퓨즈, DC-Link 커패시터, IGBT 모듈, L-C 필터, 기생 커패시턴스 등으로 구성된다. 여기서, DC 전로는 배터리 랙간의 전선과 PCS간의 전선으로 구성되며, DC-Link 커패시터는 IGBT의 스위칭 동작에 의한 DC 측의 전압을 안정시키는 역할을 수행한다. 또한, L-C 필터는 변환된 AC 전원의 고조파 및 노이즈를 제거하는 역할을 수행하며, IGBT 모듈은 DC 전원을 120[°] 위상차를 갖는 3상 AC로 변환한다. 한편, IGBT와 방열판 사이에 존재하는 기생 커패시턴스는 각 IGBT에 병렬로 구성되어 모델링한다.

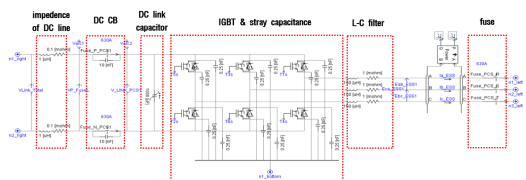


Fig. 9. Modeling of PCS section

4.3 배터리부

PSCAD/EMTDC를 이용하여 배터리부를 모델링하면, Fig. 10과 같이 나타낼 수 있다. 배터리부는 배터리 랙의 병렬연결로 구성되며, 하나의 배터리 랙은 70[kWh]의 용량을 가지고 랙 퓨즈, 기생 커패시턴스, S/G 임피던스로 구성된다.

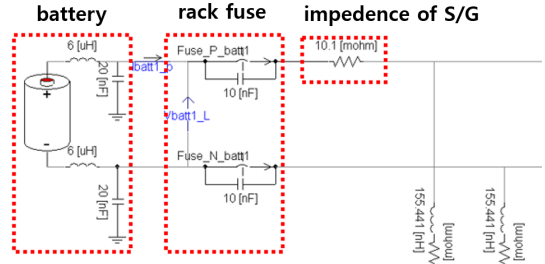


Fig. 10. Modeling of battery section

4.4 순환전류 발생 장치부

고압선로에서 3상 부하와 불평형 조건을 모의하기 위한 수송가부하를 PSCAD/EMTDC를 이용하여 모델링하면 Fig. 11과 같다. 여기서, 정전력 제어기는 정전력부하의 제어를 위하여, 부하의 순시값과 목표포 하는 부하의 편차에 대해, PI제어를 통해 목표값을 추종할 수 있다.

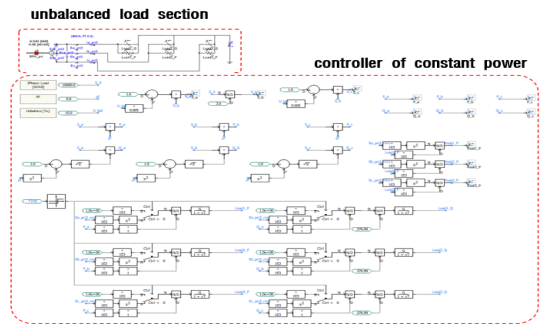


Fig. 11. Modeling of unbalanced load

4.5 절연성능 장치부

배전선로 및 부하설비의 절연성능 저하에 의한 누설전류를 모의하기 위하여, 절연성능 장치부를 모델링하면 Fig. 12와 같다. 여기서, 선로와 전기설비의 절연저항은 전로의 열화 및 접속불량이나 부하설비의 절연성능 저하에 의해 감소하며, 누설전류는 절연저항 감소에 따라 발생하게 된다.

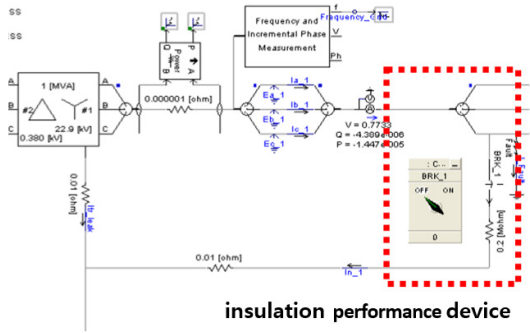


Fig. 12. Modeling of insulation performance device

4.6 전체 시스템

상기의 각 요소별 모델링을 바탕으로 배전계통부, PCS부, 배터리부, 순환전류 발생 장치부, 절연성능 장치부 등으로 구성된 전체 시스템은 Fig. 13과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 배터리의 용량과 방열판 설계에 따라 변동되는 기생 커패시턴스의 값은 실증사이트의 데이터를 바탕으로 배터리 및 PCS부 기생 커패시턴스의 모델링에 적용한다.

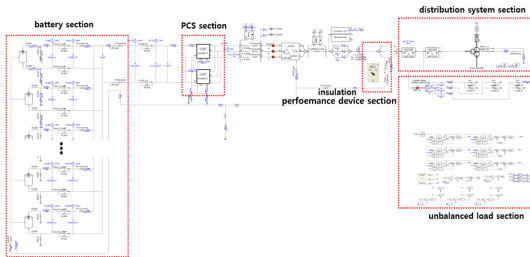


Fig. 13. Modeling of entire system

5. 시뮬레이션 결과 및 분석

5.1 시뮬레이션 조건

누설 및 순환전류에 대한 ESS의 안전성 등급을 평가하기 위하여, PCS, 배터리 등의 시뮬레이션 조건은 실제 사이트에서 측정된 값을 바탕으로 Table 1과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 배터리부는 0.7[kV], 1[kAh]의 배터리 랙을 15개 병렬로 연결하여 1.05[MWh]의 용량을 가지며, 각 배터리 랙의 내부 인덕턴스 및 내부 저항은 제조사의 값을 바탕으로 각각 6[uH], 152.6[mΩ]으로 상정한다. 또한, 배터리 및 DC 전로의 기생 커패시턴스는

10[nF], 15[nF], 20[nF], IGBT의 기생 커패시턴스는 0.5[nF], 1[nF], 1.5[nF], 절연 성능은 1[MΩ], 20[MΩ]으로 상정한다. 한편, 선로 공장은 5[km], 10[km], 15[km]이며, 불평형 부하의 용량은 10[MVA], 불평형율은 5%, 15%, 30%, 접지 저항은 1[Ω], 30[Ω], 배터리와 PCS의 외함 저항은 각각 8[Ω], 3.52[Ω]으로 상정한다.

Table 1. Simulation conditions

	item	contents
battery rack	voltage[kV]	0.7
	capacity[kAh]	1
	internal inductance[uH]	6
	internal resistance[mΩ]	152.6
stray capacitance	battery & DC line[nF]	10, 20
	IGBT[nF]	1, 2
secondary line	insulation resistance[MΩ]	1, 20
grid section	line length[km]	5, 15
	customer load[MVA]	10
	unbalanced rate[%]	5, 15
ESS section	grounding resistance[Ω]	1, 30
	resistance of battery case[Ω]	8
	resistance of PCS case[Ω]	3.52

한편, 본 논문에서 제시한 누설 및 순환전류 발생 메커니즘과 시뮬레이션 조건을 바탕으로 상정 시나리오를 나타내면 각각 Table 2와 Table 3과 같다. 여기서, Table 2는 IGBT 및 배터리의 기생 커패시턴스와 절연 성능에 따른 누설전류 발생 시나리오이며, Case 1 ~ Case 4는 IGBT측 기생 커패시턴스, Case 5 ~ Case 8은 배터리측 기생 커패시턴스, Case 9 ~ Case 12는 절연내력에 따른 누설전류의 발생 조건을 상정한 것이다. 또한, Case 1 ~ Case 12의 시나리오에서 접지저항은 공통적으로 1[Ω]과 30[Ω]을 상정한다.

한편, Table 3은 불평형부하에 따른 순환전류 발생 시나리오를 나타내며, Case 13 ~ Case 16은 NGR이 설치된 경우의 선로 공장과 불평형부하에 의한 순환전류 발생 조건을 나타내고, Case 17 ~ Case 20은 NGR이 설치되지 않은 경우의 선로 공장과 불평형부하에 의한 순환전류 발생 조건을 나타낸다. 또한, 본 논문에서는 ESS로 유입되는 누설 및 순환전류가 가장 크게 예상되는 Case 4, Case 8, Case 12, Case 16에 대해 상세하게 누설 및 순환전류 특성을 제시한다.

Table 2. Scenarios of leakage current by stray capacitance and insulation performance

Case	stray capacitance [nF]	insulation resistance[MΩ]	grounding resistance[Ω]	reference
Case 1	1	-	1	stray capacitance of IGBT
Case 2	1	-	30	
Case 3	2	-	1	
Case 4	2	-	30	
Case 5	10	-	1	stray capacitance of battery
Case 6	10	-	30	
Case 7	20	-	1	
Case 8	20	-	30	degradation of line insulation
Case 9	-	20	1	
Case 10	-	20	30	
Case 11	-	1	1	
Case 12	-	1	30	

Table 3. Scenarios of leakage current by unbalanced load

Case	line length[km]	unbalanced load rate[%]	NGR
Case 13	5	5	installed
Case 14	5	15	
Case 15	15	5	
Case 16	15	15	
Case 17	5	5	uninstalled
Case 18	5	15	
Case 19	15	5	
Case 20	15	15	

5.2 누설 및 순환전류 특성

5.2.1 IGBT측 기생 커패시턴스에 의한 누설전류 특성

상기의 시뮬레이션 조건을 바탕으로 가장 가혹한 조건인 Case 4의 누설전류 특성을 나타내면 Fig. 14와 같다. 여기서, Fig. 14의 ①번 누설전류는 IGBT의 스위칭과 기생 커패시턴스에 의해 20.4[mA]가 발생되며, PCS측으로 유입되는 ②번 누설전류는 13.1[mA]로 산정된다. 또한, 배터리와 접지측으로 유입되는 누설전류는 Fig. 14의 ③번, ④번과 같이, 각각 5.8[mA], 1.54[mA]이고, 계통에서 유입되는 ⑤번 누설전류는 0으로 산정된다. 한편, 상기와 동일한 방식으로 Case 1 ~ Case 4의 누설전류 특성을 종합적으로 나타내면 Table 4와 같다. 여기서, ①번 누설전류에 대하여 Case 1과 Case 4를 비교하면, IGBT의 기생 커패시턴스의 크기에 따라 303% 정도 증가함을 알 수 있고, 배터리의 외함으로 유입되는 ③번 누설전류는 966% 정도 증가함을 알 수 있다.

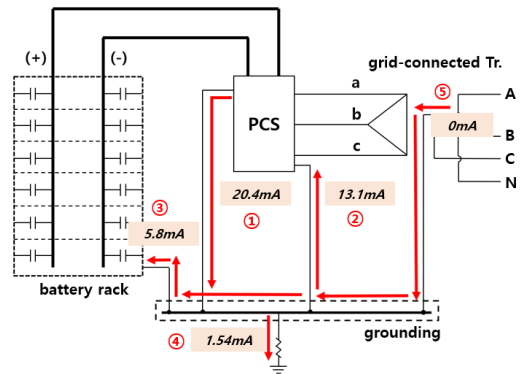


Fig. 14. Characteristics of leakage current by stray capacitance at IGBT(Case 4)

Table 4. Characteristics of leakage current by stray capacitance at IGBT

	leakage current[mA]				
	IGBT (①)	PCS (②)	battery (③)	grounding (④)	grid (⑤)
Case 1	7.01	1.3	0.6	4.8	0
Case 2	7.04	4.51	1.98	0.52	0
Case 3	21.4	4.47	1.97	15.7	0
Case 4	20.4	13.1	5.8	1.54	0

5.2.2 배터리측 기생 커패시턴스에 의한 누설전류 특성

배터리측 기생 커패시턴스에 의해 발생하는 누설전류 중 가장 가혹한 조건인 Case 8의 누설전류 특성을 나타내면 Fig. 15와 같다. 여기서, Fig. 15의 ①번 누설전류는 배터리의 기생 커패시턴스 의해 1.77[mA]가 발생되며, PCS측으로 유입되는 ②번 누설전류는 1.14[mA]로 산정

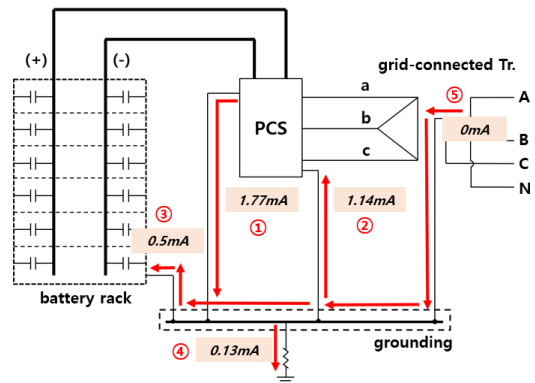


Fig. 15. Characteristics of leakage current by stray capacitance at battery(Case 8)

Table 5. Characteristics of leakage current by stray capacitance at battery

	leakage current[mA]				
	IGBT (①)	PCS (②)	battery (③)	grounding (④)	grid (⑤)
Case 5	0.68	0.13	0.06	0.46	0
Case 6	0.67	0.44	0.19	0.05	0
Case 7	1.78	0.35	0.15	1.26	0
Case 8	1.77	1.14	0.5	0.13	0

된다. 또한, 배터리와 접지측으로 유입되는 누설전류는 Fig. 15의 ③번, ④번과 같이, 각각 0.5[mA], 0.13[mA]이고, 계통에서 유입되는 ⑤번 누설전류는 0으로 산정된다. 한편, 상기와 동일한 방식으로 Case 5 ~ Case 8의 누설전류 특성을 종합적으로 나타내면 Table 5와 같다. 여기서, ①번 누설전류에 대하여 Case 5와 Case 8을 비교하면, 배터리의 기생 커패시턴스의 크기에 따라 265% 정도 증가함을 알 수 있고, 배터리의 외함으로 유입되는 ③번 누설전류는 833% 정도 증가함을 알 수 있다.

5.2.3 절연성능에 저하에 의한 누설전류 특성

절연성능 저하에 의해 발생하는 누설전류 중 가장 가혹한 조건인 Case 12의 누설전류 특성을 나타내면 Fig. 16과 같다. 여기서, Fig. 16의 ⑤번 누설전류는 절연성능 저하에 의해 1.57[mA]가 발생되며, PCS측으로 유입되는 ②번 누설전류는 1[mA]로 산정된다. 또한, 배터리와 접지측으로 유입되는 누설전류는 Fig. 16의 ③번, ④번과 같이, 각각 0.44[mA], 0.11[mA]이고, PCS의 스위칭에 의해 발생하는 ①번 누설전류는 0으로 산정된다. 한편, 상기와 동일한 방식으로 Case 9 ~

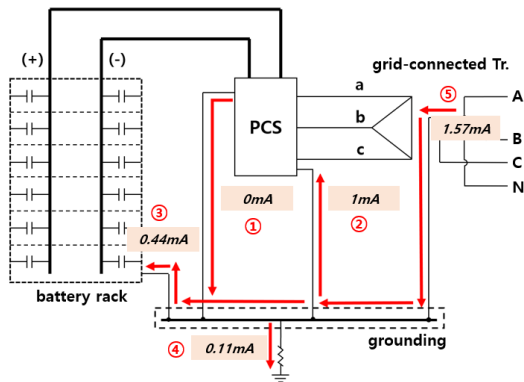


Fig. 16. Characteristics of leakage current by insulation degradation(Case 12)

Table 6. Characteristics of leakage current by insulation degradation

	leakage current[mA]				
	IGBT (①)	PCS (②)	battery (③)	grounding (④)	grid (⑤)
Case 9	0	0.01	0.004	0.037	0.05
Case 10	0	0.03	0.013	0.003	0.05
Case 11	0	0.33	0.14	1.19	1.69
Case 12	0	1	0.44	0.11	1.57

Case 12의 누설전류 특성을 종합적으로 나타내면 Table 6과 같다. 여기서, ⑤번 누설전류에 대하여 Case 9와 Case 12를 비교하면, 절연성능 저하에 따라 3,380% 정도 증가함을 알 수 있고, 배터리의 외함으로 유입되는 ③번 누설전류는 11,000% 정도 증가함을 알 수 있다.

5.2.4 불평형부하에 의한 순환전류 특성

불평형부하에 의해 발생하는 순환전류 중 가장 가혹한 조건인 Case 16의 순환전류 특성을 나타내면 Fig. 17과 같다. 여기서, 전체 순환전류는 43.1[A]가 발생하는데, 35.8[A]가 계통측으로 흘러 들어가고, Fig. 17의 ⑤번과 같이 ESS용 연계변압기로 유입되는 누설전류는 7.35[A]이고, ②번과 같이 PCS측으로 유입되는 누설전류는 1.49[A]로 산정된다. 또한, 배터리와 접지측으로 유입되는 누설전류는 Fig. 17의 ③번, ④번과 같이, 각각 0.65[A], 5.21[A]로 산정된다. 한편, 상기와 동일한 방식으로 전체 Case별 순환전류의 특성을 나타내면 Table 7과 같다. 여기서, Table 7(a)는 NGR이 설치된 경우를 나타내며, 선로의 공장과 부하불평형율이 증가함에 따라 전체 순환전류의 크기는 11.7[A]에서 43.1[A]로, 배터리로 유입되는 ③번 누설전류의 크기는 0.05[A]에서 0.65[A]로 증가함을 알 수 있다. 또한, Table 7(b)는 NGR이 설치되지 않은 경우를 나타내며, 선로의 공장과 부하불평형율이 증가함에 따라 전체 순환전류의 크기는 11.7[A]에서 42.8[A]로, 배터리로 유입되는 ③번 누설전류의 크기는 0.05[A]에서 0.53[A]로 증가함을 알 수 있다. 즉, NGR의 설치유무에 따라 ESS측으로 유입되는 순환전류는 최대 1.35[A] 정도 차이가 나지만, 배터리로 유입되는 순환전류는 최대 0.1[A] 정도 차이가 발생하므로 NGR 설치 유무는 누설전류 크기에 미치는 영향이 상대적으로 크지 않음을 알 수 있다.

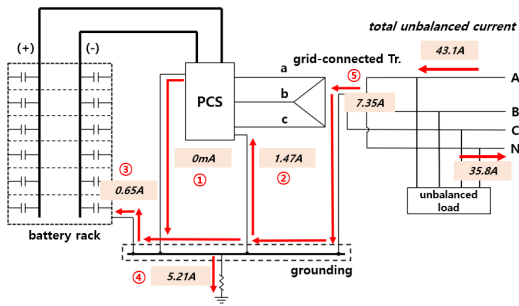


Fig. 17. Characteristics of leakage current by unbalanced load(Case 16)

Table 7. Characteristics of leakage current by unbalanced load

(a) with NGR

	leakage current[A]					
	total	unbalanced current	grid(⑤)	PCS (②)	battery (③)	grounding (④)
Case 13	11.7	11.1	0.61	0.12	0.05	0.43
Case 14	35	32	3.1	0.36	0.27	2.22
Case 15	14.3	11.9	2.44	0.49	0.21	1.73
Case 16	43.1	35.8	7.35	1.49	0.65	5.21

(a) without NGR

	leakage current[A]					
	total	unbalanced current	grid(⑤)	PCS (②)	battery (③)	grounding (④)
Case 17	11.7	11.1	0.61	0.12	0.05	0.43
Case 18	35	33	1.8	0.36	0.16	1.29
Case 19	14.2	12.2	2	0.46	0.17	1.42
Case 20	42.8	37	6	1.22	0.53	4.28

5.3 누설 및 순환전류에 대한 ESS의 안전성 평가

3.2장에서 제시한 안전성 등급 평가방안과 5.2장의 시뮬레이션 결과를 바탕으로, 발생원인별 누설 및 순환전류의 심각도를 평가하면 Table 8과 같다. 여기서, IGBT측 기생 커패시턴스에 의해 배터리측으로 유입되는 누설전류는 0.6 ~ 5.87[mA]이므로, 심각도는 1~2점으로 평가된다. 또한, 배터리 기생 커패시턴스에 의해 배터리측으로 유입되는 누설전류는 0.13 ~ 1.14[mA]이므로, 심각도는 1~2점으로 산정되고, 절연내력 저하에 의해 배터리측으로 유입되는 누설전류는 0.004 ~ 0.44[mA]이므로, 심각도는 모든 Case에 대하여 1점으로 평가된다. 한편, 불평형부하에 의해 배터리측으로 유입되는 순환전류는 50 ~ 650[mA]이므로, 심각도는 5~7점으로 산정된다.

Table 8. Evaluation of severity degree for leakage and unbalanced currents

items	Case	I_{bat} (mA)	S
stray capacitance of IGBT	1	0.6	1
	2	1.98	2
	3	1.97	2
	4	5.8	2
stray capacitance of battery	5	0.13	1
	6	0.44	1
	7	0.35	1
	8	1.14	2
degradation of line insulation	9	0.004	1
	10	0.013	1
	11	0.14	1
	12	0.44	1
unbalanced load	13	50	5
	14	270	7
	15	210	7
	16	650	7
	17	50	5
	18	160	7
	19	170	7
	20	530	7

또한, 누설 및 순환전류의 발생도는 Table 9와 같이, 발생빈도를 바탕으로 평가되며, IGBT의 스위칭 및 배터리 기생 커패시턴스에 대한 발생도는 ESS의 충·방전 시에만 발생하므로 3의 값으로 평가되며, 절연성능 저하에 대한 발생도는 오랜 기간에 걸쳐 일어나므로 2의 값으로 산정된다. 한편, 불평형부하에 의해 발생하는 순환전류의 발생도는 상시 존재하므로 높은 가중치 값인 5로 평가된다.

Table 9. Evaluation of occurrence degree for leakage and unbalanced currents

items	criteria of occurrence	occurrence degree
stray capacitance of IGBT	charging and discharging in ESS	3
stray capacitance of battery	charging and discharging in ESS	3
degradation of line insulation	long term degradation	2
unbalanced load	operation characteristics of distribution system	5

한편, 검출도(D)는 누설전류의 측정 가능성을 바탕으로 평가되지만, 대부분 IMD에 의하여 검출되므로 IGBT의 기생 커패시턴스, 배터리의 기생 커패시턴스, 선로의 절연성능, 불평형부하에 대한 검출도를 동일한 값(3)으로 평가된다. 따라서, 상기의 3.2절에서 제안한 RPN 방식을 바탕으로 누설 및 순환전류에 의한 ESS의 안전성을 평가하면 Table 10과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, IGBT의 기생 커패시턴스에 의한 누설전류의 RPN 값은 9 ~ 18점으로 평가되며, 4가지 Case에 대한 합은 63점으로 산정된다. 또한, 배터리 기생 커패시턴스에 의한 누설전류의 RPN 값은 9 ~ 18점으로 평가되며, 4가지 Case에 대한 합은 45점으로 산정된다.

한편, 절연내력 저하에 의한 누설전류의 RPN 값은 6점으로 평가되며, 4가지 Case에 대한 합은 24점으로 산정된다. 마지막으로 불평형부하에 의한 순환전류의 RPN 값은 75 ~ 105점으로 평가되며, 4가지 Case에 대한 합은 390점으로 산정된다. 즉, IGBT의 기생 커패시턴스에 의해 발생된 누설전류는 배터리측 기생 커패시턴스와 절연 성능저하에 의해 발생된 누설전류보다 ESS의 안전성에 악영향을 줄 가능성이 높으므로, IGBT와 방열판의 설계를 자세하게 검토할 필요가 있다. 또한, 불평형부하에 의한 순환전류는 ESS의 안전성에 악영향을 줄 가능성이 높으므로, 계통 조건에 대한 면밀한 설계 검토 및 모니터링이 요구됨을 알 수 있다.

Table 10. Safety evaluation characteristics of leakage and unbalanced currents

items	Case	S	O	D	RPN	total
stray capacitance of IGBT	1	1	3	3	9	63
	2	2	3	3	18	
	3	2	3	3	18	
	4	2	3	3	18	
stray capacitance of battery	5	1	3	3	9	45
	6	1	3	3	9	
	7	1	3	3	9	
	8	2	3	3	18	
degradation of line insulation	9	1	2	3	6	24
	10	1	2	3	6	
	11	1	2	3	6	
unbalanced load	12	1	2	3	6	390
	13	5	5	3	75	
	14	7	5	3	105	
	15	7	5	3	105	
	16	7	5	3	105	
	17	5	5	3	75	
	18	7	5	3	105	
	19	7	5	3	105	
20	7	5	3	105		

6. 결론

본 논문에서는 ESS 화재 원인 중 하나로 거론되고 있는 누설 및 순환전류의 발생 메커니즘을 제시하고, RPN 평가 모델링을 제안하여 다양한 누설 및 순환전류의 발생원인에 의한 ESS의 안전성 평가를 수행한다. 이에 대한 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 누설 및 순환 전류에 대한 발생 메커니즘 및 평가 방안은 기존의 연구에서 제시된 바가 있지만, 본 논문에서는 이들의 발생 메커니즘을 보완하고 구체적인 해석을 통해 새로운 안전성 평가방안인 RPN 방식에 따라 4가지 발생 메커니즘에 대한 구체적인 안전성 평가를 수행한다.
- (2) IGBT의 기생 커패시턴스에 의한 누설전류의 RPN 값은 9 ~ 18점으로 평가되며, 4가지 Case에 대한 합은 63점으로 산정된다. 또한, 배터리 기생 커패시턴스에 의한 누설전류의 RPN 값은 9 ~ 18점으로 평가되며, 4가지 Case에 대한 합은 45점으로 산정된다.
- (3) 절연내력 저하에 의한 누설전류의 RPN 값은 6점으로 평가되며, 4가지 Case에 대한 합은 24점으로 산정된다. 마지막으로 불평형부하에 의한 순환전류의 RPN 값은 75 ~ 105점으로 평가되며, 4가지 Case에 대한 합은 390점으로 산정된다.
- (4) IGBT의 기생 커패시턴스에 의해 발생된 누설전류는 배터리측 기생 커패시턴스와 절연 성능저하에 의해 발생된 누설전류보다 ESS의 안전성에 악영향을 줄 가능성이 높으므로, IGBT와 방열판의 설계를 자세하게 검토할 필요가 있다.
- (5) 불평형부하에 의한 순환전류는 ESS의 안전성에 악영향을 줄 가능성이 높으므로, 계통 조건에 대한 면밀한 설계 검토 및 모니터링이 요구됨을 알 수 있다.
- (6) 본 논문에서 제시한 안전성 평가방안은 심각도, 발생도, 검출도에 의해 누설 및 순환전류의 안전성을 정량적으로 제시하였다. 향후에는 ESS를 안전하게 운용하기 위한 관점에서 본 논문에서 평가한 누설 및 순환전류의 안전성을 고려하여 개선방안을 제시하는 연구를 수행하고자 한다.

References

- [1] H. Lee, Will the use of renewable energy in the enterprise expand : 185 companies worldwide including Google GM Apple_Government, October Green Support for joining RE100, including the introduction of a new system, Journal of Electrical World Monthly Magazine, pp. 25-28, 2019.8.
- [2] S. Y. Lim, S. Y Park, S. H. Yoo, "The Economic Effects of the New and Renewable Energil2es Sector", Journal of Energy Engineering, vol. 23, no. 4, pp. 31-40, 2014.12.
DOI: <https://doi.org/10.5855/ENERGY.2014.23.4.031>
- [3] S. J. Park, S. M. Park, J. H. Lee, ESS utilization and related PCS technology, The Korean Institute of Electrical Engineers, pp. 12-18, 2017.1.
- [4] K. M. Park, J. H. Kim, J. Y. Park, S. B. Bang, "A Study on the Fire Risk of ESS through Fire Status and Field Investigation", FIRE SCIENCE AND ENGINEERING, vol. 32, no. 6, pp. 91-99, 2018.12.
DOI: <https://doi.org/10.7731/KIFSE.2018.32.6.091>
- [5] H. J. Jang, T. S. Song, J. Y. Kim, S. J. Kim, T. H. Jang "Study on Analysis of Fire Factor and Development Direction of Standard/safety Requirement to Keep Safety for Energy Storage System (ESS)", Journal of Standards, Certification and Safety, vol. 3, no. 9, pp. 25-49, 2019.9.
DOI: <http://doi.org/10.34139/JSCS.2019.9.3.25>
- [6] D. H. Kim, S. C. Kim, J. S. Park, E. J. Kim, E. S. Kim "Analysis of Risk Priority Number for Grid-connected Energy Storage System", Journal of the Korean Society of Safety, vol. 31, no. 2, pp. 10-17, 2016.04.
DOI: <https://doi.org/10.14346/JKOSOS.2016.31.2.10>
- [7] KS A IEC 60812 ESS, "Guidelines for failure mode and effects analysis(FMEA) of EES System"
- [8] TOSHIBA, "Inverter Application Manual Leakage Current"
- [9] H. Muhsen, S. Hiller, J. Lutz "Three-phase voltage source inverter using SiC MOSFETs-Design and Optimization", 17th European Conference on Power Electronics and Applications, 2015
- [10] Ministry of Trade, Industry and Energy, "Electro Technical Regulation in Korea," 2021.
- [11] Ministry of Trade, "Notice on duties of electrical safety manager," 2016
- [12] J. M. Yoo, D. G. Ahn, J. S. Jang, "Review of FMEA", Journal of Materials Research and Technology, vol. 19, no. 4, pp. 318-333, 2019.12.
DOI: <http://dx.doi.org/10.33162/JAR.2019.12.19.4.318>

김 지 명(Ji-Myung Kim)

[정회원]



- 2020년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2022년 2월 : 동대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2022년 3월 ~ 현재 : 동대학원 전기공학과 박사과정 재학 중

〈관심분야〉

전력 및 배전계통, 신재생에너지, 전기저장장치

최 성 문(Sung-Moon Choi)

[정회원]



- 2020년 2월 : 호원대학교 전기공학과 (공학사)
- 2022년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학석사)
- 2022년 2월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기공학과 박사과정 재학 중

〈관심분야〉

배전계통 운용, ESS, 마이크로그리드, 신재생에너지

김 경 화(Kyung-Hwa Kim)

[정회원]



- 2021년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2023년 2월 : 동대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2023년 3월 ~ 현재 : 동대학원 전기공학과 박사과정 재학 중

〈관심분야〉

전력 및 배전계통, 신재생에너지, 전기저장장치

이 나 경(Na-Kyung Lee)

[준회원]



- 2023년 2월 : 동대학원 전기공학과 (공학사)
- 2023년 3월 ~ 현재 : 동대학원 전기공학과 석사과정 재학중

<관심분야>

LVDC 배전계통, 분산전원연계, 전력품질해석

노 대 석(Dae-Seok Rho)

[종신회원]



- 1985년 2월 : 고려대학교 전기공학과 (공학사)
- 1987년 2월 : 동대학원 전기공학과 (공학석사)
- 1997년 3월 : 일본 북해도대학교 대학원 전기공학과 (공학박사)
- 1987년 3월 ~ 1998년 8월 : 한국 전기연구원 선임연구원
- 1999년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기전자통신 공학부 교수

<관심분야>

전력/배전 계통, 분산전원연계, 전력품질해석