Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 21, No. 4 pp. 568-574, 2020

https://doi.org/10.5762/KAIS.2020.21.4.568
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

SPD를 이용한 리튬이온전지용 전기저장장치의 보호방안에 관한 연구

황승욱, 이후동, 태동현, 노대석*
한국기술교육대학교 전기공학과

A Study on Protection Method of Energy Storage System for Lithium-ion Battery Using Surge Protection Device(SPD)

Seung-Wook Hwang, Hu-Dong Lee, Dong-Hyun Tae, Dae-Seok Rho*
Department of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education

요 약 최근, 신재생에너지원의 출력 안정화, 수요관리 및 주파수 조정 등 다양한 기능을 가지고 있는 전기저장장치(energy storage system, ESS)의 설치가 매년 증가되고 있다. 그러나, 2017년 8월에 발생한 고창 전력시험센터의 ESS 화재를 시작으로 경산 변전소, 군산 태양광발전소 등 현재까지 총 29건의 화재사고가 발생하여 많은 재산피해가 보고되고 있다. 이러한 전기저장장치의 화재사고는 전기저장장치의 용량이나 계절과는 무관하게 발생되고 있으므로, ESS의 화재원인을 정확하게 파악하고 안전성을 확보하기 위하여 ESS의 사고특성에 대한 분석이 요구되어지고 있다. 따라서, 본 논문에서는 ESS의 사고특성을 분석하고 안전성을 확보하기 위하여, 전력계통 상용해석 소프트웨어인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 ESS의 모델링을 수행한다. 다양한 시나리오를 기반으로 ESS의 단락사고특성을 확인한 결과, 높은 사고전류로 인하여 보호기기인 퓨즈가 동작하고, 매우 큰 CMV(common mode voltage)가 발생하여 ESS의 절연이 파괴될 가능성이 있음을 확인할 수 있었다. 또한, 이러한 문제점을 극복하기 위하여, ESS의 배터리측과 PCS측에 각각 SPD를 설치한 경우, DC측 전로에서 발생하는 CMV가 3[kV] 이내로 크게 감소되어 ESS의 절연파괴를 방지할 수 있음을 확인하였다.

Abstract Recently, the installation of energy storage systems (ESSs) that have a range of functions, such as power stabilization of renewable energy sources, demand control, and frequency regulation, has been increasing annually. On the other hand, since the fire accident of ESS occurred at Gochang Power Test Center in August 2017, 29 fire accidents with significant property losses have occurred, including the Gyeongsan substation and Kunsan PV power plant. Because these fire accidents of ESS are arisen regardless of the season and capacity of ESS, an analysis of the fault characteristics in ESS is required to confirm the causes of the fire accidents accurately and ensure the safety of the ESS. This paper proposes the modeling of ESS using PSCAD/EMTDC S/W to identify the fault characteristics and ensure the safety of the ESS. From the simulation results of fault characteristics based on various scenarios, it is clear that the insulation of ESS may be breakdown due to the largely occurring CMV (common mode voltage). Furthermore, the CMV between the PCS and battery can be reduced, and the insulation breakdown of ESS can be prevented if an SPD (surge protect device) is installed in the battery and PCS sides, respectively.

Keywords : ESS, Fire Accidents, Battery, PCS, Fault Characteristics, SPD, Fuse, CMV, PSCAD/EMTDC

본 논문은 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 연구(No.20182410105070)와 한국에너지기술평가원의 연구(No.20191210301940)에 의하여 수행되었음.
*Corresponding Author : Dae-Seok Rho(Korea University of Technology and Education)
email: dsrho@koreatech.ac.kr
Received January 30, 2020 Revised February 27, 2020
Accepted April 3, 2020 Published April 30, 2020

1. 서론

최근, 신재생에너지원의 출력 안정화, 수요관리 및 주파수 조정 등 다양한 기능을 가지고 있는 전기저장장치(energy storage system, ESS)의 설치가 급격하게 증가되고 있다[1-4]. 그러나, 2017년 8월에 발생한 고창 전력시험센터의 ESS 화재를 시작으로 경산 변전소의 F/R용 ESS, 군산 태양광발전연계용 ESS, 등 현재까지 총 29건의 화재사고가 발생하여 많은 재산피해가 보고되고 있다. 이러한 전기저장장치의 화재사고는 전기저장장치의 용량이나 계절과는 무관하게 발생되고 있으므로, ESS의 화재원인을 정확하게 파악하고 안전성을 확보하기 위하여, ESS의 사고특성에 대한 분석이 요구되어지고 있다[5-7]. 따라서, 본 논문에서는 ESS의 사고특성을 분석하고 안전성을 확보하기 위하여, 전력계통 상용해석 소프트웨어인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 ESS의 모델링을 수행한다. 다양한 시나리오를 기반으로 ESS의 단락사고특성을 확인한 결과, 높은 사고전류로 인하여 보호기기인 퓨즈가 동작하고, 매우 큰 CMV (common mode voltage)가 발생하여 ESS의 절연이 파괴될 가능성이 있음을 확인할 수 있었다. 또한, 이러한 문제점을 극복하기 위하여, ESS의 배터리측과 PCS측에 각각 SPD를 설치한 경우, DC측 전로에서 발생하는 CMV가 크게 감소되어 ESS의 절연파괴를 방지할 수 있음을 확인하였다.

2. ESS의 보호기기 특성분석

일반적으로, ESS는 병렬연결된 여러 대의 배터리 랙과 충·방전을 수행하는 PCS, 연계용변압기, 보호기기 등으로 구성되며, Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다. 이 그림에서와 같이, ESS의 보호기기들은 과전류나 서지의 유입 그리고 단지락 사고 등에 대한 보호를 위하여, 각 장치들 사이의 전로에 설치되며, 주로 퓨즈와 차단기가 이용되고 있다. 그러나, 배터리 랙측 또는 PCS측에서 사고가 발생하는 경우, 사고전류는 계통전원과 배터리에서 공급되며, 특히 DC 전로부분에서 사고가 발생하는 경우 매우 큰 사고전류가 발생할 수 있다. 이때, 사고전류의 차단을 위하여 설치된 퓨즈 또는 차단기가 동작하는 경우, 순간적으로 매우 큰 개폐서지에 의하여 CMV가 발생할 수 있다. 이러한 경우, 절연강도가 약한 부분에서 절연이 파괴되어, 2차 사고를 유발하여 ESS의 화재로 진행될 가능성이 추정되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 서지보호장치인 SPD를 이용하여, ESS의 보호기기 동작 시 DC측 전로에서 발생할 수 있는 CMV 전압을 제한시킴으로써 ESS의 사고를 미연에 방지할 수 있는 방안을 제시하고자 한다[8-10].

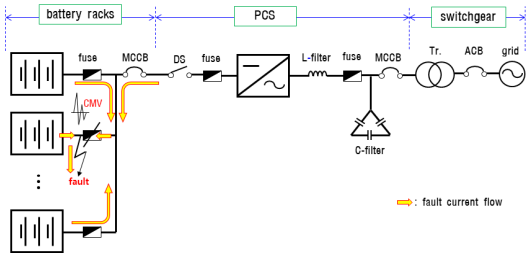


Fig. 1. Configuration of protection devices in ESS

3. SPD를 이용한 ESS의 보호알고리즘

ESS의 단락사고시 높은 사고전류로 인하여 퓨즈가 동작하면, 매우 큰 CMV가 발생하여 ESS의 절연이 파괴되어 화재를 유발할 가능성이 있다. 이에 대한 방안으로, SPD를 이용하여 DC측 전로에서 발생하는 CMV를 감소시킴으로써 ESS의 절연파괴를 방지하는 ESS의 최적 보호 알고리즘을 구체적으로 나타내면, 다음과 같다.

[Step 1] ESS에서 발생할 수 있는 사고 Case를 상정하고, 회로의 단락 저항을 상정한다.

[Step 2] 각 Case에 대하여, 사고전류 크기(If)를 계산하고, Fig. 2와 같이 보호기기의 동작시간과 퓨즈의 반한시곡선에 따른 동작시간(T)을 산정한다.

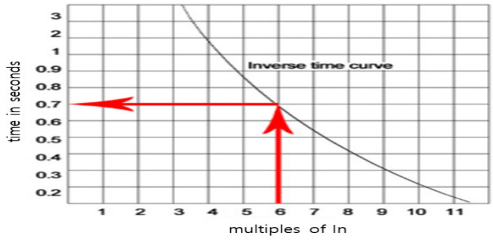


Fig. 2. Fuse curve characteristics with inverse time

[Step 3] [Step 2]의 사고전류 크기(If)와 퓨즈의 동작시간(T)을 바탕으로 단락사고를 모의하여, CMV를 계산한다. 이 때, CMV가 절연레벨 이상이면 [Step 4]로 진행하고, CMV가 절연레벨 미만이면, [Step 2]로 돌아가, 다음 Case에 대하여 해당 과정을 반복한다.

[Step 4] [Step 3]에서 CMV가 절연레벨 이상일 경우, 적정 용량(Uc, Up, Um)의 SPD를 설치하고, [Step 3]으로 돌아가 단락사고를 모의하여 CMV의 크기를 재산정한다.

[Step 5] 모든 Case에 대해 CMV가 적정한 절연레벨을 만족하면, 알고리즘을 종료한다.

상기의 SPD를 이용한 ESS의 최적 보호 알고리즘을 플로우차트로 나타내면, Fig. 3과 같다.

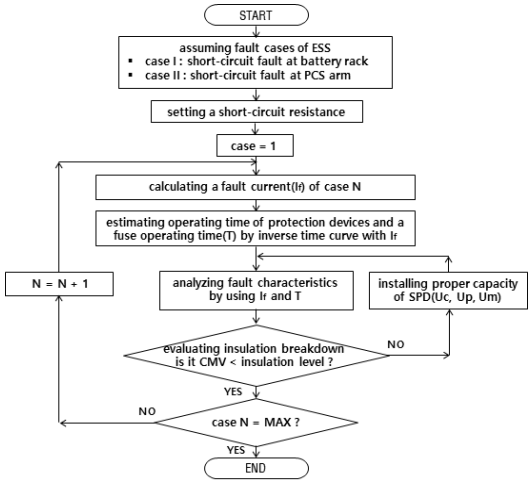


Fig. 3. Optimal protection algorithm ESS using SPD

4. PSCAD/EMTDC를 이용한 ESS의 모델링

4.1 배터리랙 및 DC전로 모델링

PSCAD/EMTDC를 이용하여 배터리랙 및 DC전로를 모델링하면, Fig. 4와 같이 나타낼 수 있다. 이 그림에서와 같이, 배터리랙은 배터리와 퓨즈로 구성되고, DC전로는 DC 차단기와 전로로 구성된다. 여기서, 배터리는 내부 임피던스와 기생커패시턴스, 전압원으로 구성된다.

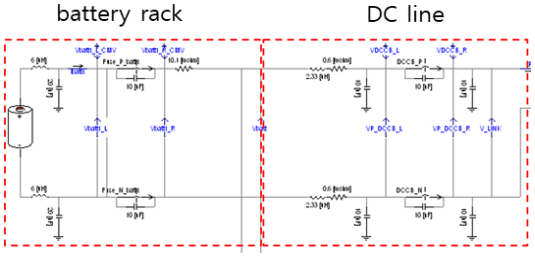


Fig. 4. Modeling of battery racks and DC line

4.2 PCS 모델링

배터리의 충·방전 기능을 가진 PCS는 Fig. 5와 같이, DC 전로, 퓨즈, DC-Link 커패시터, IGBT, L-C 필터, 등으로 구성된다. 여기서, DC 전로는 배터리랙간의 전선과 배터리제어장치(battery control panel)와 PCS간의 전선으로 구성되며, DC-Link 커패시터는 IGBT의 스위칭 동작에 의한 DC측의 전압을 안정시키는 역할을 수행한다. 또한, IGBT는 DC 전원을 120° 위상차를 갖는 3상 AC로 변환하며, L-C 필터는 변환된 AC 전원의 고조파 및 노이즈를 제거하는 역할을 수행한다.

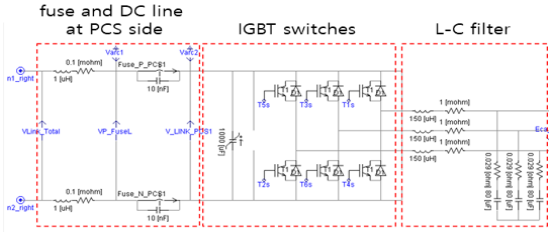


Fig. 5. Modeling of DC line and PCS

4.3 SPD 모델링

SPD는 Fig. 6과 같이 비선형 저항과 L-C로 구성되며, 과도 서지전압으로부터 ESS를 보호한다. 즉, SPD는 정상적인 동작전압 범위에서 높은 임피던스를 가지므로 정상상태에서는 시스템에 영향을 미치지 않는다. 하지만, 과도 서지전압이 발생하는 경우, SPD의 임피던스는 감소하여 서지 전류를 접지를 통해 방류함으로써, 발생하는 CMV의 크기를 제한할 수 있다. 한편, 과도 서지전압이 제거되면 SPD는 높은 임피던스 상태로 복귀하게 된다.

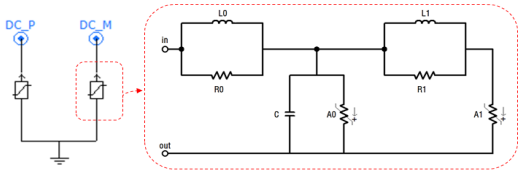


Fig. 6. Modeling of SPD

4.4 전체 시스템 모델링

상기에서 제시한 모델링을 바탕으로, ESS의 전체 시스템을 나타내면 Fig. 7과 같다. 이 그림에서와 같이, 전체시스템은 배터리랙, PCS, 보호기기(SPD), 등으로 구성된다. 여기서, 1MWh급 배터리는 13개의 배터리랙을 병렬로 구성하며, 1번 랙을 제외한 2~13번 랙은 하나의 랙으로 등가화 시킨다. 또한, 1MW급 PCS는 125kW급 unit 8개 병렬로 연결하여 구성한다[11-13].

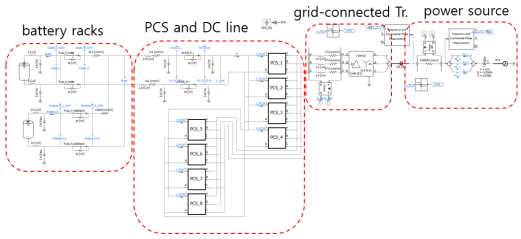


Fig. 7. Entire modeling of ESS

5. 시뮬레이션 결과 및 분석

5.1 시뮬레이션 조건

본 논문에서 제시한 모델링을 바탕으로, ESS의 사고 특성을 분석하기 위하여, Table 1과 Fig. 8과 같이 시뮬레이션 조건을 상정한다. 여기서, Case I은 1번 배터리 랙에서 단락이 발생한 경우이며, 사고전류에 의하여 0.32[ms] 이후에 퓨즈가 동작하는 것으로 상정하고, 단락저항은 0.1[mΩ]이다. 또한, Case II는 8번 PCS의 DC측에서 Arm 단락이 발생한 경우이며, 사고전류에 의하여 0.18[ms] 이후에 퓨즈가 동작하는 것으로 상정하고, 단락저항은 Case I과 동일하다. 한편, Case III은 배터리측과 PCS측에 각각 SPD를 설치한 경우를 나타낸다.

Table 1. Simulation conditions of fault cases in ESS

cases	fault locations	fuse operating time	short-circuit resistance
case I	short-circuit faultat battery rack(no.1)	0.32[ms]	0.1[mΩ]
case II	short-circuit faultat PCS arm(no. 8)	0.18[ms]	
case III	short-circuit fault with SPD	same as case I and II	

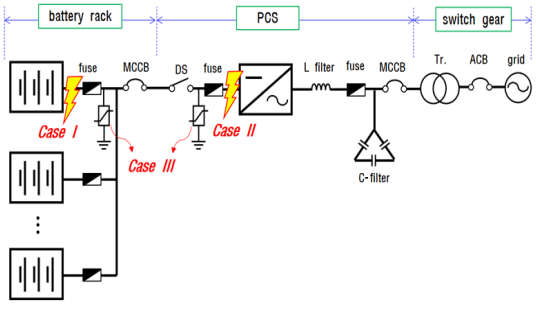
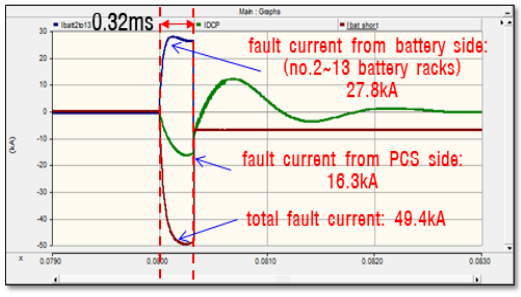


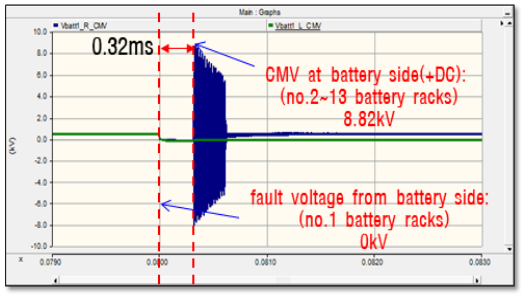
Fig. 8. Fault cases of ESS

5.2 배터리랙 내부 단락사고 특성(Case I)

5.1의 시뮬레이션 조건을 바탕으로 배터리측에서 단락사고가 발생한 경우의 사고특성을 나타내면 Fig. 9와 같다. 여기서, Fig. 9(a)는 DC 전로에 흐르는 사고전류 특성을 나타낸 것으로, 사고발생 이후 배터리측 퓨즈가 동작하는 시점인 0.32[ms] 동안, 사고지점으로 49.4[kA]의 단락전류가 흐르며, 이 중에서 PSC측(계통)으로부터 16.3[kA]의 사고전류가 공급되고, 2번~13번 배터리랙에서는 총 27.8[kA]의 사고전류가 공급됨을 알 수 있다. 또한, Fig. 9(b)는 단락사고 시의 DC 전로의 서지전압 특성을 나타낸 것으로, 퓨즈 동작시점인 0.32[ms] 이후, DC측 전로의 CMV 전압은 최대 8.82[kV]까지 상승함을 알 수 있다. 즉, 사고전류의 차단을 위하여 설치된 배터리측의 퓨즈가 동작하면, 매우 큰 CMV가 서지 형태로 발생하므로, ESS 구성품의 절연(보통 절연내력은 3[kV]임)을 파괴할 가능성을 알 수 있다.



(a) Fault current characteristics at DC line



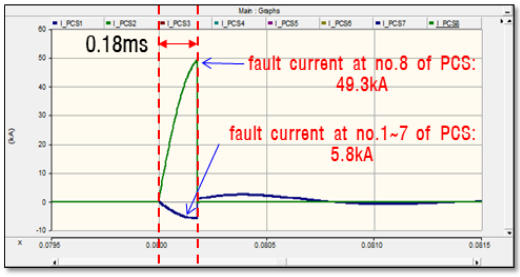
(b) CMV characteristics at DC line

Fig. 9. Fault current and CMV characteristics in case of short-circuit fault at battery rack

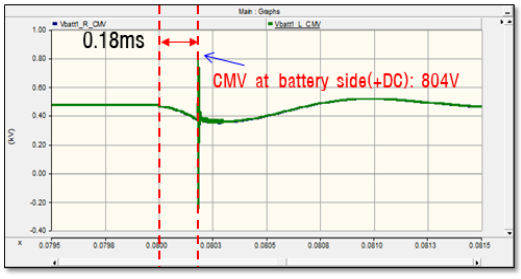
5.3 PCS 내부 단락사고 특성(Case II)

5.1에서 제시한 시뮬레이션 조건에 따라, PCS 8번 unit의 Arm에서 단락이 발생한 경우의 사고특성을 나타내면 Fig. 10과 같다. 여기서, Fig. 10(a)는 단락사고 시

DC 전로의 사고전류 특성을 나타낸 것으로서, 사고발생 이후 PCS측 퓨즈가 동작하는 시점인 0.18[ms] 동안 사고지점으로 49.3[kA]의 전류가 흐르며, 1번~7번 PCS unit에서는 총 5.8[kA]의 사고전류가 공급됨을 알 수 있다. 또한, Fig. 10(b)는 단락사고 시의 DC 전로의 서지전압 특성을 나타낸 것으로, 퓨즈 동작시점인 0.18[ms] 이후, DC측 전로의 CMV 전압은 최대 0.8[kV]까지 상승함을 알 수 있다. 즉, PCS의 퓨즈가 사고전류에 의해 동작하면, DC전로 부분에서 CMV가 발생하지만, 이 값이 절연내력 이내로 유지되어 문제점이 발생하지 않음을 알 수 있었다.



(a) Fault current characteristics at DC line



(b) CMV characteristics at DC line

Fig. 10. Fault current and CMV characteristics in case of short-circuit fault at PCS

5.4 SPD가 설치된 경우의 단락사고 특성(Case III)

상기의 배터리랙측 단락사고시에 발생한 CMV의 문제점을 해결하기 위하여, Case 1의 조건에서 SPD를 설치한 경우의 단락사고 특성을 나타내면 Fig. 11과 같다. 이 그림에서와 같이, SPD를 배터리측에 설치한 경우, 배터리측 단락사고 시의 DC 전로의 서지전압특성을 나타낸 것으로, SPD가 설치되기 전 CMV 전압은 8.82[kV]까지 상승하지만, SPD가 설치된 후 CMV 전압은 1.09[kV]까지 감소됨을 알 수 있다. 즉, ESS 구성품의 절연내력(3[kV]) 이내로 유지되어, SPD에 의하여 ESS를 보호할 수 있음을 확인하였다.

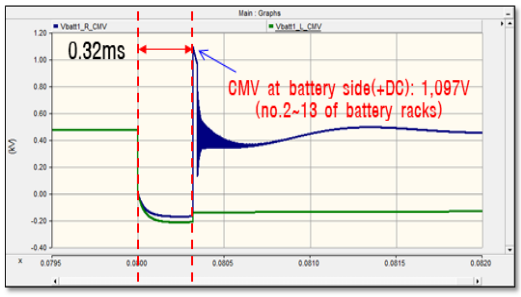


Fig. 11. CMV characteristics with SPD

6. 결론

본 논문에서는 ESS의 사고특성을 분석하고 안전성을 확보하기 위하여, SPD를 이용한 ESS의 절연파괴를 방지하는 ESS의 최적 보호 알고리즘을 제시하였으며, 이를 기반으로 ESS의 단락사고특성을 확인한 결과, CMV 전압이 크게 감소되어 ESS의 절연파괴를 방지할 수 있음을 확인하였다. 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) ESS의 단락사고특성을 확인한 결과, 높은 사고전류로 인하여 보호기기인 퓨즈가 동작하여 사고전류를 차단하지만, 매우 큰 CMV 전압이 발생하여 ESS의 절연이 파괴될 가능성이 있음을 확인할 수 있었다.

(2) 배터리측에서 단락사고가 발생한 경우의 사고특성을 분석한 결과, 사고전류의 차단을 위하여 설치된 배터리측의 퓨즈가 동작하면, 매우 큰 CMV가 서지 형태로 발생하여, ESS 구성품의 절연내력을 파괴할 가능성을 알 수 있었고, 이로 인하여 ESS의 화재원인 중의 하나로 추정할 수 있었다.

(3) PCS Arm에서 단락이 발생한 경우의 사고특성을 분석한 결과, PCS의 퓨즈가 사고전류에 의해 동작하여, CMV가 발생하지만 이 값이 절연내력 이내로 유지됨을 알 수 있었고, PCS Arm단락사고는 ESS의 화재원인이 아님을 추정할 수 있었다.

(4) 배터리랙측 단락사고시에 발생한 CMV의 문제점을 해결하기 위하여, ESS의 최적 보호 알고리즘에 따라 SPD를 배터리측에 설치한 경우, CMV가 ESS 구성품의 절연내력(3[kV]) 이내로 유지되어, SPD에 의하여 ESS를 보호할 수 있음을 확인하였다.

References

[1] Eungsang Kim, "Standardization and technical standards for new renewable energy and ESS power converters", Fall Conference for Society A of KIEE(Korean Institute of Electrical Engineers), Journal of Power Electronics, pp.31-35, April, 2017

[2] IEC 62933-2-1, "Electrical energy storage (EES) systems - Part 2-1: Unit parameters and testing methods - General specification", 2017

[3] IEC 62933-5-1, "Electrical energy storage (EES) systems - Part 5-1: Safety considerations for grid-integrated EESsystems - General", 2017

[4] S. H. Yoo, Y. W. Jo, K. W. Cho, H. K. Bahn, "Real-Time Power-Saving Scheduling Based on Genetic Algorithms in Multi-core Hybrid Memory Environments", The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication, vol. 20, no. 1, pp.135-140, 2020.2.
DOI: https://doi.org/10.7236/JIIBC.2020.20.1.135

[5] 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

[6] 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

[7] D. W. Kim, "Power Consumption Analysis by Adjusting of Check Interval in Asynchronous Wireless Sensor Network", The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication, vol. 19, no. 3, pp.91-96, 2019.6.
DOI: https://doi.org/10.7236/JIIBC.2019.19.3.91

[8] B. H. Lee, L. S. Bong, H. J. Gill, "REffects of Surge Protective Devices with Respect to Types of System Grounding and Wiring Methods", Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, vol. 18, no. 2, pp.90-99 2004.3.
DOI: https://doi.org/10.5207/jieie.2004.18.2.090

[9] S. J. Jin, E. M. Kim, J. S. Youn, Y. J. Lee, S. Y. Noh, "Effect the I-T curve and electrical characteristic of fuse elements by plated tin thickness", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, vol. 19, no. 6 pp. 80-87, 2018
DOI: https://doi.org/10.5762/KAIS.2018.19.6.80

[10] Y. G. Sun, Y. M. Hwang, I. S. Sim, J. Y. Kim, "De-noising in Power Line Communication Using Noise Modeling Based on Deep Learning", The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication, vol. 18, no. 4, pp.55-60, 2018.8.
DOI: https://doi.org/10.7236/JIIBC.2018.18.4.55

[11] J. B. Park, M.. S. Kim, D. S. Rho, "Characteristic Analysis and Implementation of 30kW Portable Test Equipment for Performance Evaluation in Energy Storage System", The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers, vol. 67, no. 6, pp. 715-723, 2018.6.
DOI: https://doi.org/10.5370/KIEE.2018.67.6.715

[12] M. K. Kang, S. S. Choi, J. B. Park, Y. H Nam, E. S Kim, D. S Rho, "A Study on the Modeling Method of Performance Evaluation System for MW Scaled Energy Storage System Using the PSCAD/EMTDC", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers vol. 66, no. 6, pp. 885-891, 2017
DOI: http://doi.org/10.5370/KIEE.2017.66.6.885

[13] S. S. Choi, M. K. Kang, H. D. Lee, Y. H.. Nam, J. H. Park, D. S. Rho, "A Study on an Evaluation Modeling of Power System Performance for Frequency Regulation ESS Based on the PSCAD/EMTDC", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers vol. 67, no. 8, pp. 1024-1030, 2018
DOI: http://doi.org/10.5370/KIEE.2018.67.8.1024

황 승 욱(Seung-Wook Hwang) [정회원]

- 2009년 8월 : 경희사이버대학교 정보통신학과 (공학사)
- 2011년 8월 : 숭실대학교 전기공학과 (공학석사)
- 2018년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기공학과 박사과정 재학 중

〈관심분야〉
전력품질 해석, 분산전원연계, 전기저장장치

이 후 동(Hu-Dong Lee) [준회원]

- 2016년 8월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2018년 8월 : 동대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2018년 9월 ~ 현재 : 동대학원 전기공학과 박사과정 재학 중

〈관심분야〉
전력 및 배전계통, 신재생에너지, 전기저장장치

태 동 현(Dong-Hyun Tae) [준회원]

- 2014년 8월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2016년 8월 : 동대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2019년 9월 ~ 현재 : 동대학원 전기공학과 박사과정 재학 중

〈관심분야〉
배전계통 운용, 신재생에너지, 마이크로그리드

노 대 석(Dae-Seok Rho) [정회원]

- 1985년 2월 : 고려대학교 전기공학과 (공학사)
- 1987년 2월 : 동대학원 전기공학과 (공학석사)
- 1997년 3월 : 일본 북해도대학교 대학원 전기공학과(공학박사)
- 1987년 3월 ~ 1998년 8월: 한국전기연구소 연구원/선임연구원
- 1999년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기전자통신공학부 교수

〈관심분야〉
전력/배전 계통, 분산전원연계, 전력품질해석