

CMV에 의한 ESS 안전성 평가에 관한 연구

최성문¹, 유현상¹, 한병길¹, 김미영², 노대석^{1*}
¹한국기술교육대학교, ²호원대학교

A Study on ESS Safety Evaluation Considering CMV

Sung-Moon Choi¹, Hyun-Sang You¹, Byeong-Gill Han¹, Mi-Young Kim², Dae-Seok Rho^{1*}
¹Korea University of Technology and Education
²Howon University

요약 최근, 에너지저장장치(ESS, energy storage system)에서 빈번하게 발생하고 있는 화재사고로 인하여, ESS의 안전기준을 고려한 위험요소 평가 연구가 활발하게 진행되고 있는데, 이 중에서 공통모드전압(CMV, common mode voltage)은 ESS 배터리 안전성에 악영향을 줄 가능성이 있다. 따라서, 본 논문에서는 PCS의 IGBT 스위칭에 의한 CMV, 정상상태시 개폐기에 의한 CMV, 사고시 차단기에 의한 CMV, 뇌격에 의한 CMV의 발생 메커니즘을 제시하고, 위험우선순위(RPN, risk priority number) 평가방안을 모델링하여, 다양한 CMV의 발생원인에 의한 ESS의 안전성 평가를 수행한다. 또한, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 AC 전원부, PCS부, 배터리부, 사고 발생 장치부, 뇌격 발생 장치부 등으로 구성된 CMV 안전성 평가 모델링을 제시한다. 이를 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, IGBT 스위칭에 의한 CMV 크기는 0.5[kV]로 산정되는데, 본 논문에서 제안한 안전성 평가 방법에 의하여 “low risk” 영역, 3상 단락, 지락 사고시 차단기 개폐 및 뇌격에 의한 CMV는 각각 18[kV], 4[kV], 3.1[kV]로 산정되어 “medium risk” 영역, 정상상태시 개폐기에 의한 CMV는 2.5[kV]로 산정되어 “high risk” 영역으로 평가되므로, 정상상태시 개폐기에 의한 CMV가 ESS의 안전성에 가장 큰 악영향을 끼칠 수 있음을 알 수 있다.

Abstract Recently, studies for risk level evaluation considering safety standards are being actively conducted because of fire accidents that frequently occur in an ESS. The CMV may negatively influence ESS safety. Therefore, this paper presents the mechanism of CMV by IGBT switching of PCS, CB, or MC switching in normal or fault conditions and lightning strike conditions. In addition, an ESS safety evaluation considering CMV was performed by using the risk priority number (RPN) evaluation method. An ESS safety evaluation model composed of an AC gird section, PCS section, battery section, fault-generating device section and lightning strike device section was made using PSCAD/EMTDC. From the simulation results based on the proposed mechanism and model, the CMV due to IGBT switching was calculated as 0.5[kV] and was evaluated as “low risk” by considering the proposed safety evaluation method. The CMV due to lightning strike and CB switching during a 3-phase short-circuit fault and grounding fault were calculated as 18[kV], 4[kV], and 3.1[kV], respectively, and were evaluated as “medium risk”. Additionally, CMV due to MC switching in normal operation was calculated as 2.5[kV] and was evaluated as “high risk”. Therefore, it was confirmed that the CMV due to MC switching in normal operation may negatively and seriously influence ESS safety.

Keywords : CMV Mechanism, RPN Method, ESS, Safety Evaluation, TR Connection Types
(Yg-Yg, Yg- Δ , Δ -Yg, Δ - Δ)

본 논문은 2023년 한국기술교육대학교 교수 교육연구진흥과제 지원 및 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 국가과학기술연구회 선
행 융합연구사업(No.CPS22131-120)의 지원을 받아 수행되었습니다.

*Corresponding Author : Dae-Seok Rho(Korea University of Technology and Education)
email: dsrho@koreatech.ac.kr

Received March 8, 2023

Revised March 28, 2023

Accepted May 12, 2023

Published May 31, 2023

1. 서론

최근, 환경오염 문제와 기후변화에 대응하기 위하여, 재생에너지원의 출력 안정화, 수요관리 및 주파수 조정 등 다양한 기능이 있는 에너지저장장치(ESS, energy storage system)의 설치가 급격하게 증가하고 있다 [1-3]. 그러나 2017년 8월 고창 전력시험센터에서 발생한 화재를 시작으로 현재까지 지속적으로 ESS 화재사고가 발생하고 있어, ESS 산업 시장에 큰 피해를 주고 있다 [4-6]. 이에 따라, ESS의 안전기준을 고려한 위험요소 평가에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있는데, 이중 공통 모드전압(CMV, common mode voltage)은 ESS 화재 사고의 주요 원인 중 하나로 평가되고 있다.

따라서, 본 논문에서는 ESS 연계용 변압기의 결선방식을 고려하여, IGBT 스위칭에 의한 CMV, 정상상태시 개폐기에 의한 CMV, 사고시 차단기에 의한 CMV, 뇌격에 의한 CMV 발생 메커니즘을 제시한다[7-10]. 이를 바탕으로, 심각도, 발생도, 검출도로 구성된 위험순위결정(RPN, risk priority number) 평가방안을 모델링하여, CMV를 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. 즉, CMV의 심각도는 CMV의 크기에 따라 “low”, “medium”, “high”, “very high”, 발생도는 CMV 발생 가능성을 고려하여 “low”, “medium”, “high”, 검출도는 발견 가능성에 따라 “low”, “medium”, “high”로 구분된다.

한편, 실 계통에서 운용되고 있는 ESS 사이트를 대상으로 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 사용하여 AC 전원부, PCS부, 배터리부, ESS 사고 발생 장치부, 뇌격 발생 장치부 등으로 구성된 CMV 안전성 평가 모델링을 수행한다. 이를 바탕으로 CMV를 고려한 ESS의 안전성 평가를 수행한 결과, IGBT 스위칭과 뇌격에 의한 CMV는 “low risk” 영역, 3상 단락 및 지락 사고시 차단기 개폐에 의한 CMV는 “medium risk” 영역, 정상상태시 개폐기에 의한 CMV는 “high risk” 영역으로 평가되어, 정상상태시 개폐기에 의한 CMV가 ESS의 안전성에 가장 큰 악영향을 끼칠 수 있음을 알 수 있다.

2. ESS의 CMV 발생 메커니즘

2.1 IGBT 스위칭에 의한 CMV 특성

계통연계형 ESS는 Fig. 1과 같이 AC 전원부(grid section), PCS부(PCS section), 배터리부(battery section)로 구성된다. 여기서, AC 전원부는 메인 변압기(M.Tr)와 보호장치(fuse), PCS부는 필터(c-filter), IGBT, DC 커패시터(DC capacitor), 배터리부는 배터리(battery)와 보호장치(fuse, DCCB) 등을 포함한다. 그리고 PCS의 IGBT는 전력변환을 목적으로 5~10[kHz]의 고주파수 스위칭 동작을 수행하는데, 이때 도전부와 방열판(외함) 사이에 존재하는 기생 커패시턴스에 의하여 CMV가 발생된다. 여기서, 기생 커패시턴스의 크기는 Eq. (1)와 같이 IGBT 모듈과 방열판의 크기를 고려하여 산정된다[11].

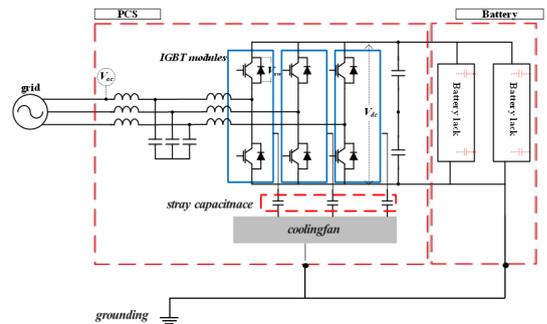


Fig. 1. CMV characteristics with IGBT switching

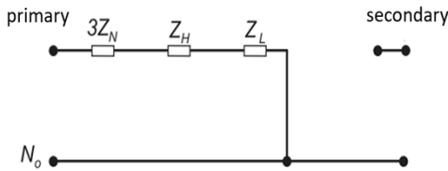
$$C_{stray} = \frac{4 \times \epsilon_r \times \epsilon_0}{\pi} \times w \times \ln\left(\frac{Y}{H}\right) + \frac{A}{d} \times \epsilon_0 + 0.88 \times \epsilon_0 \quad (1)$$

여기서, C_{stray} : 기생 커패시턴스, ϵ_r : 산화알루미늄의 비유전율, ϵ_0 : 진공 유전율, w : IGBT 모듈의 폭, Y : 방열판의 높이, H : 방열판에서 IGBT 모듈 중심까지의 거리, A : 방열판의 면적, d : 방열판에서 IGBT 모듈 밑면까지의 거리

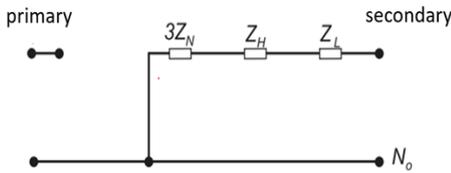
2.2 변압기 결선방식에 따른 CMV 특성

ESS의 계통연계용 변압기 결선방식에 따라 CMV 특성은 다른데, 자주 사용되는 변압기 결선방식(Yg-Δ, Δ-Yg)의 등가회로는 Fig. 2와 같으며, Z_H , Z_L , Z_N 는 1차측, 2차측 및 접지 임피던스를 의미한다. 여기서, Fig. 2(a)는 Yg-Δ 결선의 영상분 등가회로를 나타내는데, 2차측에는 영상분 회로가 형성되지 않아 CMV는 매우 낮다. 그러나 Fig. 2(b)는 Δ-Yg 결선에 대한 영상분 등가

회로를 나타내는데, 2차측에 영상분 회로가 형성되어 CMV가 상당히 높게 나타날 수 있다. 또한, CMV는 Fig. 3과 같이 배터리 DC 전압(V_{dc}), AC 전압(V_{ac}), 스위칭 전압(V_{sw})으로 구성되며, CMV의 크기는 Eq. (2)와 같이 산정된다. 여기서, DC 전압은 배터리의 전압, AC 전압은 영상분 회로를 통해 DC측으로 유입된 전압, 스위칭 전압은 IGBT의 스위칭 동작에 의해 발생하는 전압을 의미한다.



(a) Equivalent circuit of zero phase in Yg-D connection



(b) Equivalent circuit of zero phase in Δ-Yg connection

Fig. 2. Equivalent zero phase circuit for wiring connection

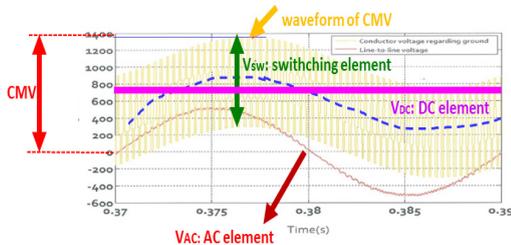


Fig. 3. Waveform components of CMV in ESS

$$V_{CM} = \sqrt{V_{dc}^2 + V_{ac}^2 + V_{sw}^2} \quad (2)$$

여기서, V_{CM} : waveform of CMV[V], V_{dc} : DC component [V], V_{ac} : AC component[V], V_{sw} : switching component[V]

2.3 정상상태시 개폐기에 의한 CMV 발생 특성

ESS의 PCS는 운용목적에 따라 하루 수차례 충·방전 동작을 수행하는데, 운용 중에 유지보수가 필요하거나

전력공급을 중단해야 하는 경우, Fig. 4와 같이 개폐기에 의한 서지가 발생할 수 있다. 따라서, 정격전압의 수배 이상인 개폐서지는 기생 커패시턴스에 의한 CMV로 발생되어, 배터리에 악영향을 미칠 가능성이 있다.

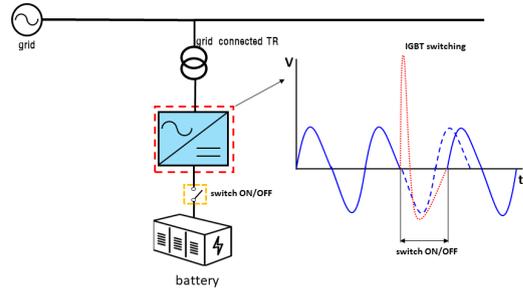


Fig. 4. CMV generation due to MC switching in normal operation

2.4 사고시 개폐서지에 의한 CMV 발생 특성

ESS에 설치된 차단기는 운용 중 발생된 단락 및 지락 사고로부터 설비를 보호한다[12]. 그러나 차단기 동작시 발생된 시간에 따른 전류의 변화량(di/dt)은 배터리와 DC 전로의 기생 인덕턴스와 결합되어 과도서지를 발생 시키게 된다. 즉, 이러한 개폐서지는 Fig. 5와 같이 배터리의 기생 커패시턴스에 의해 약 1/2로 분배되어, (+)극과 접지 및 (-)극과 접지간 CMV를 발생시킬 수 있다.

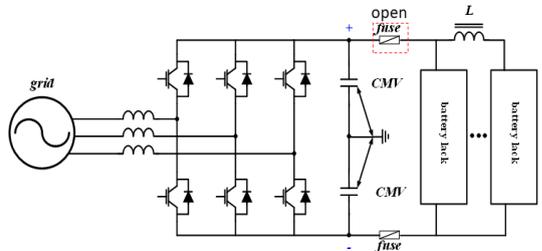


Fig. 5. CMV generation due to CB switching in fault condition

2.5 뇌격에 의한 CMV 발생 특성

Fig. 6과 같이 ESS가 설치된 배전선로에 낙뢰가 발생하면, 큰 뇌격 에너지가 피뢰기에 유도되어 지상에 유입되고 국지적인 대기전위상승이 수반된다. 또한, 뇌격은 피뢰기에 의해 대지(접지)로 방전되는데, 공통접지를 통해 연계용 변압기 및 PCS의 기생 커패시턴스와 결합된 후 CMV를 발생시킨다. 특히 연계용 변압기 2차측이 Δ결선인 경우, 중성점 비접지로 인하여 대기전위는 더욱

상승될 수 있다.

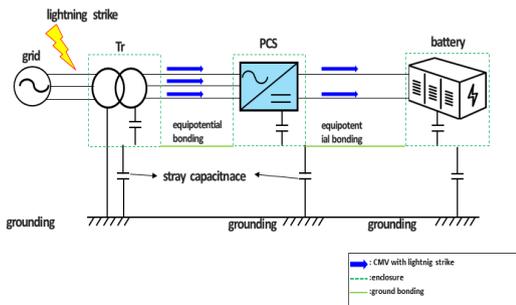


Fig. 6. CMV generation due to lightning strike

3. CMV를 고려한 ESS의 안전성 평가방안

3.1 위험우선순위(RPN) 평가방식

시스템의 안전성을 평가하기 위해서는 설비를 구성하고 있는 다양한 요소들에 대한 위협성을 분석해야 하는데, 일반적으로 RPN 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. 한편, 각 요소에 대한 위험등급은 Fig. 7과 같은데, 낮은 등급일수록 위험에서 안전하고, 높은 등급일수록 위험에 노출될 확률이 증가하는 것을 의미한다[13].

3.2 제안된 위험우선순위 평가방식

기존의 RPN은 위험등급에 대한 분류가 많아서 CMV 안전성을 평가하는데 복잡하므로, 본 연구에서는 Fig. 8과 같이 위험등급을 분류하며, CMV 위험등급은 “low”, “medium”, “high”, “very high”로 구분된다.

severity (S)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
occurrence (O)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
detection (D)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Fig. 7. RPN chart

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

Fig. 8. Proposed RPN chart

상기에서 제안된 RPN 모델링에서 CMV의 심각성(S)은 CMV 크기에 따라 4가지 단계로 산정되며, CMV 크기가 증가할수록 높은 위험등급을 적용한다. 즉, CMV의 크기가 배터리의 정격전압 이하인 경우에 위험등급을 “low”로 평가하고, CMV의 크기가 정격전압 이상이고 절연내력 이하인 경우에는 “medium”, 절연내력을 초과하는 경우에는 “high”, 절연내력을 수배 초과하는 경우에는 “very high”로 평가한다.

또한, CMV의 발생도(O) 위험등급은 3가지 단계를 적용한다. 여기서, IGBT 스위칭과 정상상태 개폐는 ESS 충방전에 의하여 자주 발생하여 위험등급을 “high”로 평가하며, 차단기 개폐와 뇌격에 의한 CMV는 각각 “medium”과 “low”로 평가한다. 즉, 차단기 개폐를 유발하는 전력계통의 사고율이 뇌의 발생 확률보다 현저하게 높기 때문이다. 한편, 뇌의 발생은 Fig. 9와 같이 기상청에서 제공하는 연간뇌파일수를 기반으로, ESS 설치 지역에 따라 발생도의 위험등급을 적용한다.

마지막으로 검출도(D)는 CMV의 잠재적 발견 가능성을 나타내는데, ESS에 의무적으로 설치되어 있는 서지보호장치(SPD, surge protection device)에 의하여 검출된다. 여기서, SPD는 ESS 설치 장소마다 서로 다른 정격전압(Un) 및 정정치(U_p, U_c)로 운용되어, CMV의 크기에 따라 SPD가 CMV를 검출하지 못할 가능성이 있다. 즉, 검출도의 위험등급은 CMV 크기에 반비례하여 low, medium, high의 3단계로 평가될 수 있다.

따라서, RPN에 의한 위험도 평가는 Fig. 10과 같이 “low risk”, “medium risk”, “high risk” 영역으로 나타낼 수 있다. 여기서, “low risk” 영역은 무시할 수 있는 위험을 나타내고, “medium risk” 영역은 상당한 위험, “high risk” 영역은 허용 불가 위험으로 분류된다.

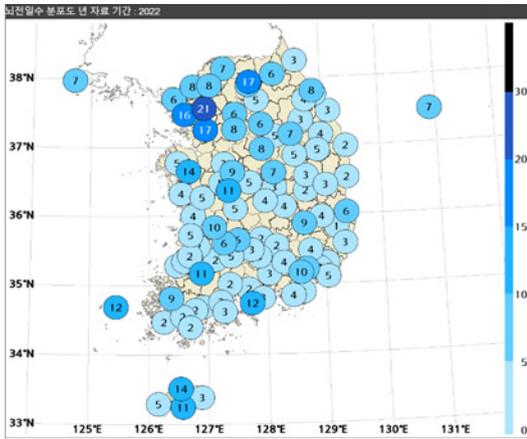


Fig. 9. Number of lightning days per year

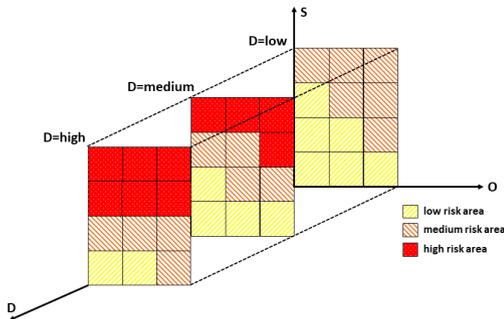


Fig. 10. Schematic diagram of risk evaluation through RPN

4. PSCAD/EMTDC를 이용한 ESS의 CMV 모델링

4.1 AC 전원부 모델링

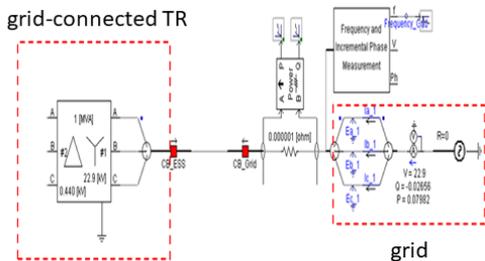


Fig. 11. Modeling of AC grid section

AC 계통전원, 차단기, 연계용 변압기로 구성된 수용가의 수배전설비부는 Fig. 11과 같이 모델링된다. 여기

서, 연계용 변압기 결선방식에 따른 CMV 특성을 분석하기 위하여 변압기의 4가지 결선방식($Y_g-\Delta$, Y_g-Y_g , $\Delta-\Delta$, $\Delta-Y_g$)이 고려되며, 변압비는 22.9kV/440V로 적용된다.

4.2 PCS부 모델링

배터리의 충방전 기능을 가진 PCS는 Fig. 12와 같이, LCL 필터, IGBT 모듈, DC-Link 커패시터 등으로 구성된다. 여기서, LCL 필터는 AC 전원의 고조파 및 노이즈를 제거하고, IGBT 모듈은 DC 전원을 120° 위상차를 갖는 3상 AC로 변환하며, DC-Link 커패시터는 IGBT의 스위칭 동작에 의한 DC측의 전압을 안정화시킨다.

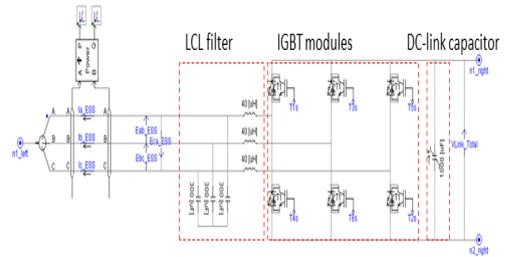


Fig. 12. Modeling of PCS section

4.3 배터리부 모델링

PSCAD/EMTDC를 이용하여 배터리 랙 및 DC 전로를 모델링하면 Fig. 13과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 배터리 랙은 배터리와 퓨즈로 구성되고 DC 전로는 차단기와 전로로 구성된다. 배터리는 내부 임피던스 150[mΩ], 기생 커패시턴스 20[nF] 및 전압원으로 구성되며, 전체 배터리부 용량은 1[MWh]로 설정된다. 또한, 배터리 부는 13개의 배터리 랙의 병렬연결로 구성되며, 1번 랙을 제외한 2~13번 랙은 하나의 랙으로 등가화 된다.

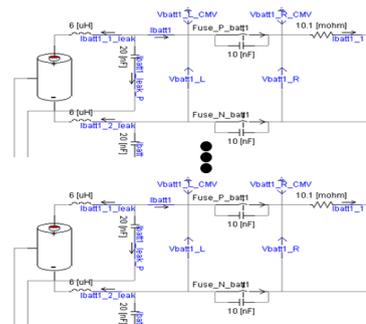


Fig. 13. Modeling of battery section

4.4 사고 발생 장치부 모델링

AC측 3상 단락 및 단상 지락사고를 발생시키는 사고 발생 장치부를 모델링하면 Fig. 14와 같다. 여기서, 단락 및 지락저항은 0.1[mΩ], 1[Ω]으로 상정하여, 차단기 개폐에 의한 CMV 특성을 모의한다.

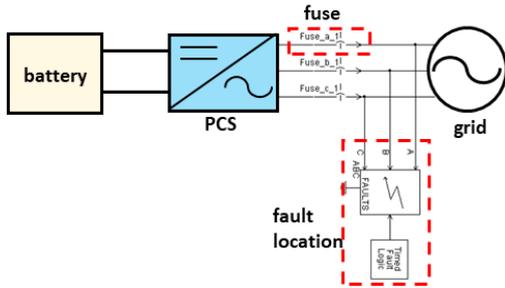


Fig. 14. Modeling of fault device section

4.5 뇌격 발생 장치부 모델링

뇌격 발생 장치부의 모델링은 PSCAD/EMTDC에서 제공하는 라이브러리를 이용하여 Fig. 15와 같이 독립전원과 타이머로 구성할 수 있다. 여기서, 뇌격은 최대 50[kV]로 상정하며, 지정된 시간동안 ESS 계통에 투입된다.

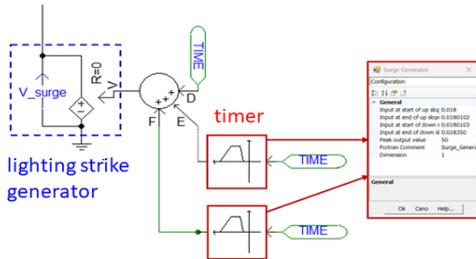


Fig. 15. Modeling of lightning strike device section

4.6 전체 시스템 모델링

상기의 내용을 종합하여, 전체 시스템을 모델링 하면 Fig. 16과 같다. 여기서, A부분은 주변압기, 고압선로, 연계용 변압기로 구성된 AC 전원부를 나타내고, B부분은 IGBT, DC link capacitor 등으로 구성된 PCS부, C부분은 배터리 랙과 DC 전로로 구성된 배터리부를 의미한다. 또한, D부분은 DC측 사고를 모의하는 사고 발생 장치부, E부분은 계통에 뇌격을 공급하는 뇌격 발생 장치부를 나타낸다.

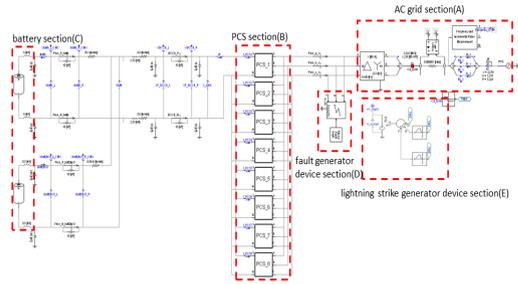


Fig. 16. Modeling of the entire system

5. 시뮬레이션 결과 및 분석

5.1 시뮬레이션 조건

ESS의 CMV 안전성을 평가하기 위하여, 배터리의 기생 커패시턴스, 배터리 전압, PCS 스위칭 주파수 등의 시뮬레이션 조건은 Table 1과 같다. 여기서, ESS 용량은 1[MWh], 배터리의 기생 커패시턴스는 랙당 20[nF], 배터리부의 전압은 1[kV]로 상정된다. 또한, 연계용 변압기는 Yg-Yg, Yg-Δ, Δ-Yg, Δ-Δ의 4가지 결선방식을 비교하고 변압비는 22.9kV/440V, 기생 커패시턴스의 크기는 0.5[nF]로 상정된다.

Table 1. Simulation conditions

items	contents
capacity of ESS	1[MWh]
stray capacitance of battery section	20[nF]
battery rated voltage	1[kV]
voltage ratio of TR	22.9[kV]/440[V]
magnitude of lightning strike	50[kV]
switching frequency of PCS	4[kHz]

5.2 발생원인별 CMV 특성 분석

5.2.1 IGBT 스위칭에 의한 CMV 특성

연계용 변압기의 결선방식에 따른 IGBT 스위칭에 의한 CMV 특성은 Fig. 17과 같다. 여기서, Fig. 17(a)와 같이 연계용 변압기의 결선방식이 Δ-Yg인 경우, IGBT 스위칭에 의한 CMV는 순간적으로 최대 3.1[kV]까지 증가함을 알 수 있다. 그러나 Fig. 17(b)와 같이 연계용 변압기의 결선방식이 Yg-Δ인 경우, CMV가 0.5[kV]로 산정되어 정격전압 이하임을 알 수 있다. 즉, Δ-Yg 결선방식과 달리 2차측에 영상분 회로가 형성되지 않기 때

문에 AC측의 영향을 거의 받지 않음을 알 수 있다. 한편, 연계용 변압기의 결선방식에 따른 IGBT 스위칭의 CMV 특성을 나타내면 Table 2와 같은데, 변압기 2차측이 Δ 결선이면 CMV가 거의 발생하지 않음을 알 수 있다.

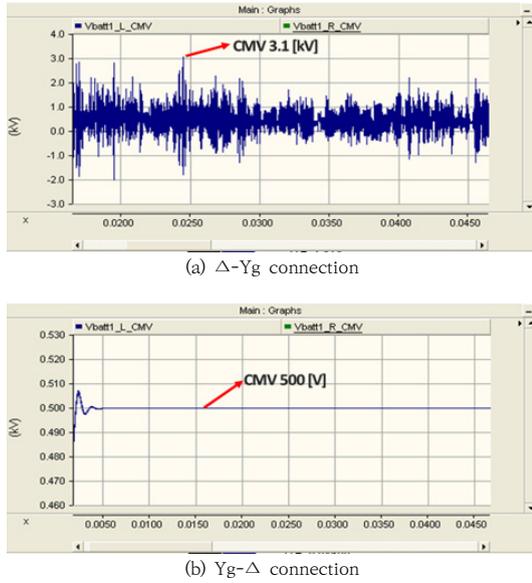


Fig. 17. CMV waveforms caused by IGBT switching

Table 2. CMV characteristics due to IGBT switching by TR connection types

TR connection types	magnitude of CMV[kV]
Yg-Yg	2
Yg- Δ	0.5
Δ -Yg	3.1
Δ - Δ	0.5

5.2.2 정상상태시 개폐기에 의한 CMV 특성

정상상태시 개폐기에 의한 CMV 특성을 나타내면 Fig. 18과 같다. 여기서, Fig. 18(a)와 같이 연계용 변압기의 결선방식이 Δ -Yg인 경우, 개폐에 의한 CMV는 순간적으로 최대 2.5[kV]까지 증가함을 알 수 있다. 또한, Fig. 18(b)와 같이 연계용 변압기의 결선방식이 Yg- Δ 인 경우에도 최대 2.5[kV]까지 증가함을 알 수 있다. 따라서, 정상상태시 개폐에 의한 CMV 크기는 연계용 변압기의 결선방식과 관계없이 동일함을 알 수 있다.

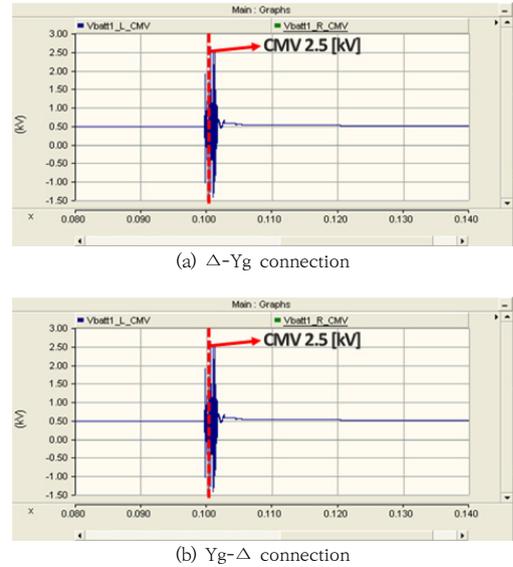
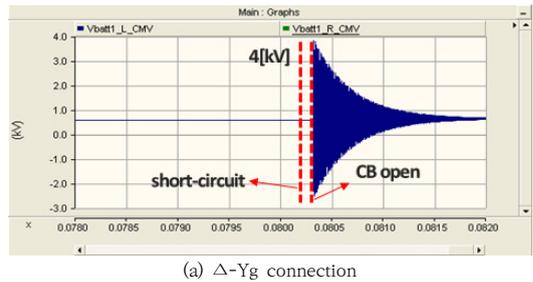


Fig. 18. CMV waveforms caused by MC switching in normal operation

5.2.3 사고상태시 차단기 개폐에 의한 CMV 특성

ESS의 AC측 3상 단락사고시 차단기 개폐에 의한 CMV 특성은 Fig. 19와 같다. 여기서, Fig. 19(a)와 같이 연계용 변압기의 결선방식이 Δ -Yg인 경우, CMV는 순간적으로 최대 4[kV]까지 증가함을 알 수 있다. 또한, Fig. 19(b)와 같이 연계용 변압기의 결선방식이 Yg- Δ 인 경우에도 CMV는 최대 4[kV]까지 증가함을 알 수 있다. 즉, AC측에서 3상 단락사고시, 차단기 개폐 CMV가 배터리 절연내력(정격전압의 3배)을 초과하여 배터리에 악영향을 줄 수 있음을 확인할 수 있다. 따라서, 연계용 변압기의 결선방식에 따른 3상 단락사고시 차단기 개폐에 의한 CMV 크기는 연계용 변압기의 결선방식과 관계없이 동일함을 알 수 있다.



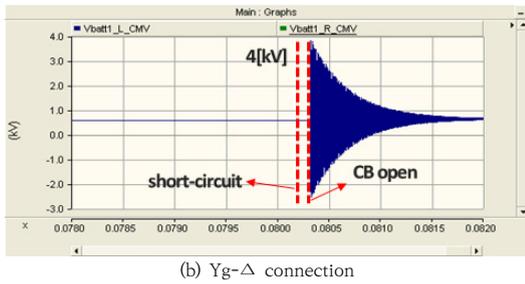


Fig. 19. CMV waveforms caused by CB switching in 3-phase short circuit

한편, AC측 지락사고시 차단기 개폐에 의한 CMV 특성은 Fig. 20과 같다. 여기서, Fig. 20(a)는 연계용 변압기의 결선방식이 Δ -Yg인 경우이며, CMV는 순간적으로 최대 3.1[kV]까지 증가함을 알 수 있다. 또한, Fig. 20(b)와 같이 연계용 변압기 결선방식이 Yg- Δ 인 경우에도 CMV는 순간적으로 최대 3.1[kV]로 산정됨을 알 수 있다. 즉, AC 측에서 단상 지락사고시, 차단기 개폐에 의한 CMV가 ESS에 설치된 배터리의 절연내력(정격전압의 3배)을 초과하여 배터리에 악영향을 줄 수 있음을 알 수 있다. 따라서, AC측 단상 지락사고시 연계용 변압기의 결선방식에 따른 차단기 개폐에 의한 CMV는 연계용 변압기의 결선방식과 관계없이 동일함을 알 수 있다.

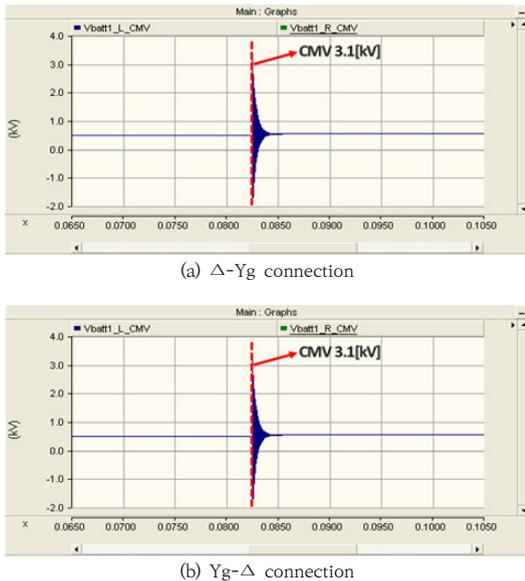


Fig. 20. CMV waveforms caused by CB switching in single line grounding

5.2.4 뇌격에 의한 CMV 특성

뇌격에 의한 CMV의 특성을 나타내면 Fig. 21과 같다. 여기서, Fig. 21(a)와 같이 연계용 변압기의 결선방식이 Δ -Yg인 경우, 뇌격에 의한 CMV는 최대 13[kV]까지 증가함을 알 수 있다. 또한, Fig. 21(b)와 같이 연계용 변압기의 결선방식이 Yg- Δ 인 경우, CMV는 18[kV]로 산정되어 배터리측 안전성에 심각한 악영향을 줄 수 있음을 알 수 있다. 따라서, 연계용 변압기의 결선방식에 따른 CMV 특성을 종합하면 Table 3과 같은데, 뇌격에 의한 CMV 크기는 연계용 변압기 2차측이 Δ 결선(중성점 비접지)이면 약 1.3배 크게 발생함을 알 수 있다.

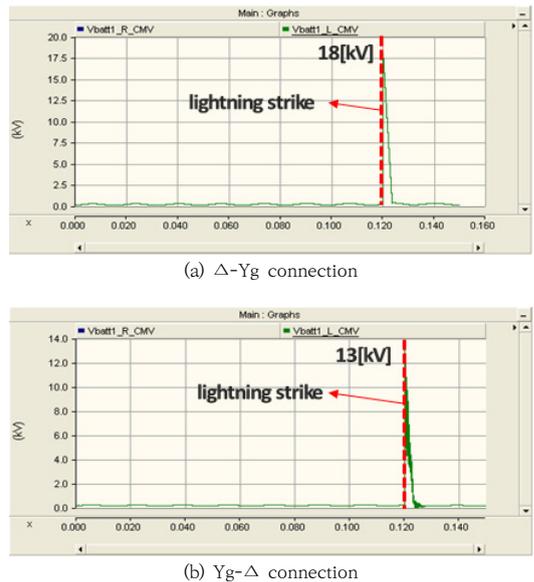


Fig. 21. CMV waveform caused by lightning strike

Table 3. CMV characteristics due to lightning strike by TR connection types

TR connection types	magnitude of CMV[kV]
Yg-Yg	13
Yg- Δ	18
Δ -Yg	13
Δ - Δ	18

5.3 CMV 특성을 고려한 ESS의 안전성 평가

상기의 내용을 바탕으로, CMV의 심각도는 Table 4와 같이 발생원인별 CMV의 크기를 고려하여 산정된다. 여기서, IGBT 스위칭에 의한 CMV는 연계용 변압기의 결선방

식(Y_g-Y_g , $Y_g-\Delta$, $\Delta-Y_g$, $\Delta-\Delta$)에 따라 심각도가 다르게 평가되지만, ESS의 계통 연계기준에 따라 $Y_g-\Delta$ 결선방식을 대상으로 하고 나머지 결선방식은 고려하지 않는다. 즉, IGBT 스위칭에 의한 CMV의 크기는 0.5[kV]로 산정되어, 심각도가 “low”(CMV의 크기가 배터리의 정격전압 이하)로 평가될 수 있다. 또한, 정상상태시 개폐기에 의한 CMV는 2.5[kV]로 산정되어 “medium”(CMV의 크기가 배터리의 정격전압 초과 절연내력 이하), 사고상태(AC측 3상 단락, 단상 지락)시 차단기 개폐에 의한 CMV는 각각 4[kV], 3.1[kV]로 산정되어, “high”(CMV의 크기가 배터리의 절연내력 초과)로 평가될 수 있다. 그리고 뇌격에 의한 CMV는 18[kV]로 산정되어, “very high”(절연내력을 수배 초과)로 평가될 수 있다.

Table 4. Evaluation of CMV severity

CMV types	magnitude of CMV[kV]	severity degree
IGBT switching	0.5	low
MC switching in normal operation	2.5	medium
CB switching in short circuit	4	high
CB switching in single line grounding	3.1	high
lightning strike	18	very high

또한, CMV의 발생도는 ESS의 운용현황, 전력계통의 사고율, 연간난뢰일수 등을 바탕으로 Table 5와 같이 산정된다. 여기서, IGBT 스위칭 및 정상상태시 개폐기에 의한 CMV 발생도는 ESS의 빈번한 충·방전에 의하여 CMV 발생 빈도가 높으므로 “high”로 평가된다. 한편, 사고상태시 차단기 개폐에 의한 CMV의 발생도는 ESS 시스템의 사고율이 뇌격 발생률 보다 높으므로 “medium”, 뇌격에 의한 CMV의 발생도는 거의 발생하지 않으므로 “low”로 평가된다.

Table 5. Occurrence evaluation of CMV

CMV types	frequency of occurrence	occurrence degree
IGBT switching	charging and discharging in ESS is frequently occurred	high
MC switching normal state		
CB switching (short-circuit fault)	fault rate in ESS is rarely occurred	medium
CB switching (single line grounding-fault)		
lightning strike	lightning strike is very rarely occurred	low

또한, CMV의 검출도는 서지보호장치인 SPD에 의하여 측정되는데, CMV 크기에 따라 검출하지 못할 가능성이 있으므로, Table 6과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, IGBT 스위칭에 의한 CMV의 크기는 0.5[kV]의 매우 작은 값으로 산정되어, SPD가 CMV를 검출하지 못할 가능성이 높고, CMV의 크기도 배터리의 정격전압 이하이므로 “high”로 평가된다. 또한, 정상상태시 개폐기에 의한 CMV는 2.5[kV]로 산정되어, SPD가 CMV를 검출하지 못할 가능성은 낮지만, CMV의 크기가 배터리 절연내력 이하이므로 “medium”으로 평가된다. 한편, 사고상태시 차단기 개폐에 의한 CMV는 3상 단락, 단상 지락시 각각 4[kV], 3.1[kV]로 산정되어, CMV의 크기가 SPD의 정정치 이상으로 검출할 가능성이 매우 높으므로, “low”로 평가되며, 뇌격에 의한 CMV도 18[kV]로 높게 산정되어, SPD에 의해 확실하게 검출할 수 있으므로 “low”로 평가된다.

Table 6. Detection evaluation of CMV

CMV types	magnitude of CMV[kV]	detection degree
IGBT switching	0.5	high
MC switching normal state	2.5	medium
CB switching (short-circuit fault)	4	low
CB switching (single line grounding-fault)	3.1	
lightning strike	18	low

따라서, 상기의 3.2절에서 제안한 위험우선순위 평가 방식을 바탕으로, CMV에 의한 ESS의 안전성을 평가하면 Table 7과 같이 나타낼 수 있다. 먼저, IGBT 스위칭에 의한 CMV의 경우, 심각도(S), 발생도(O), 검출도(D)가 각각 “low”, “high”, “high”로 산정되어, 안전성은 “low risk” 영역으로 평가된다. 또한, 정상상태시 개폐기에 의한 CMV의 경우, S, O, D가 각각 “medium”, “high”, “medium”으로 산정되어, 안전성은 “high risk” 영역으로 평가된다. 한편, 3상 단락과 지락 사고시 차단기 개폐에 의한 CMV의 경우, 두 사고 모두 S, O, D가 “high”, “medium”, “low”로 산정되어, 안전성은 “medium risk”로 평가되며, 뇌격에 의한 CMV의 경우, S, O, D가 각각 “very high”, “low”, “low” 산정되어, 안전성은 “medium risk”로 평가된다. 따라서, 5가지의 CMV 발생원인 가운데 정상상태시 개폐에 의한 CMV가 “high risk” 영역으로 평가되어, ESS의 안전성에 가장 큰 악영향을 끼칠 수 있음을 알 수 있다.

Table 7. ESS safety evaluation considering CMV

CMV types	severity degree	occurrence degree	detection degree	risk priority
IGBT switching	low	high	high	low risk
MC switching normal state	medium	high	medium	high risk
CB switching (short-circuit fault)	high	medium	low	medium risk
CB switching (single line grounding-fault)	high	medium	low	medium risk
lightning strike	very high	low	low	medium risk

6. 결론

본 논문에서는 ESS 화재 원인 중 하나로 평가되고 있는 CMV의 발생 메커니즘을 제시하고, RPN 평가 방안을 모델링하여 다양한 CMV의 발생원인에 의한 ESS의 안전성 평가를 수행한다. 또한, PSCAD/EMTDC를 이용하여, CMV 안전성 평가 모델링을 수행하고, 이를 바탕으로 CMV에 의한 ESS의 안전성을 평가한다. 이에 대한 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) IGBT 스위칭에 의한 CMV는 연계용 변압기의 결선방식이 Δ -Yg인 경우, 2차측에 영상분 회로가 형성되므로 순간적으로 최대 3.1[kV]까지 증가함을 알 수 있다. 그러나 연계용 변압기의 결선방식이 Yg- Δ 인 경우, CMV가 0.5[kV]로 산정되어 정격전압 이하임을 알 수 있다.
- (2) 정상상태시 개폐기에 의한 CMV는 연계용 변압기의 결선방식이 Δ -Yg인 경우, 순간적으로 최대 2.5[kV]까지 증가함을 알 수 있다. 또한, 연계용 변압기의 결선방식이 Yg- Δ 인 경우에도 최대 2.5[kV]까지 증가함을 알 수 있으며, 정상상태시 개폐에 의한 CMV 크기는 연계용 변압기의 결선방식과 관계없이 동일함을 알 수 있다.
- (3) 3상 단락사고시 차단기 개폐에 의한 CMV는 연계용 변압기의 결선방식이 Δ -Yg인 경우, CMV는 순간적으로 최대 4[kV]까지 증가하고, 연계용 변압기의 결선방식이 Yg- Δ 인 경우에도 CMV는 최

대 4[kV]까지 증가함을 알 수 있다. 즉, 3상 단락 사고시, 차단기 개폐에 의한 CMV가 배터리 절연 내력을 초과하여 배터리에 악영향을 줄 수 있으며, 차단기 개폐에 의한 CMV 크기는 연계용 변압기의 결선방식과 관계없이 동일함을 알 수 있다.

- (4) 지락사고시 차단기 개폐에 의한 CMV는 연계용 변압기의 결선방식이 Δ -Yg인 경우, CMV는 순간적으로 최대 3.1[kV]까지 증가함을 알 수 있고, 연계용 변압기 결선방식이 Yg- Δ 인 경우에도 CMV는 순간적으로 최대 3.1[kV]로 산정된다. 즉, 지락사고시, 차단기 개폐에 의한 CMV가 ESS에 설치된 배터리의 절연내력을 초과하여 배터리에 악영향을 줄 수 있으며, 차단기 개폐에 의한 CMV는 연계용 변압기의 결선방식과 관계없이 동일함을 알 수 있다.
- (5) 뇌격에 의한 CMV는 연계용 변압기의 결선방식이 Δ -Yg이면 최대 13[kV]까지 증가함을 알 수 있고, 연계용 변압기의 결선방식이 Yg- Δ 인 경우, CMV는 18[kV]로 산정되어 배터리측 안전성에 심각한 악영향을 줄 수 있음을 알 수 있다. 즉, 뇌격에 의한 CMV가 ESS에 설치된 배터리의 절연내력을 초과하여 배터리에 악영향을 줄 수 있으며, CMV의 크기는 연계용 변압기 2차측이 Δ 결선(중성점 비접지)이면 1.3배 정도 증가함을 알 수 있다.
- (6) 본 논문에서 제안한 RPN을 적용하여 CMV를 고려한 ESS의 안전성 평가를 수행한 결과, IGBT 스위칭에 의한 CMV는 “low risk” 영역, 뇌격 및 사고상태시 차단기 개폐에 의한 CMV는 “medium risk” 영역, 정상상태시 개폐기에 의한 CMV는 “high risk” 영역으로 평가되어, 정상상태시 개폐기에 의한 CMV가 ESS 안전성에 가장 큰 악영향을 끼칠 수 있음을 알 수 있다.

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 Energies Sector”, Journal of Energy Engineering ,vol. 23, no. 4, pp. 31-40, 2014.

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] G.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.
DOI: <http://dx.doi.org/10.7731/KIFSE.2018.32.6.091>
- [5] H.Kim, S.H. Kim, H.J. Song, "A Study of the DC Ground Fault of a Lithium-ion Battery Affecting an ESS Fire", The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers vol.68, no.11, pp. 1470-1476, 2019.
DOI: <https://doi.org/10.5370/KIEE.2019.68.11.1470>
- [6] S.U. Hwang, H.D. Lee, D.H. Tae, D.S. Rho, "A Study on Protection Method of Energy Storage System for Lithium-ion Battery Using Surge Protection Device(SPD)", Korea Academy Industrial Cooperation Society, vol. 21, no. 4, pp. 568-574, 2020.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2020.21.4.568>
- [7] Manish Kumar; Kalaiselvi Jayaraman, Design of Active Common Mode Noise Voltage Canceler for SiC Inverter Fed Induction Motor Drive with Reduced Common Mode Voltage PWM, Institute of Electrical and Electronics Engineers, vol pp. 695-700, 2020.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ISIE45063.2020.9152492>
- [8] M. Harsha Vardhan Reddy, T. Bramhananda Reddy, B. Ravindranath Reddy, M. Suryakalavathi "Reduction of Common Mode Voltage in Asymmetrical Dual Inverter Configuration Using Discontinuous Modulating Signal Based PWM Technique", THE KOREAN INSTITUTE OF POWER ELECTRONICSVOL. vol 15, no. 6, pp. 1524-1532, 2018.
DOI: <http://dx.doi.org/10.6113/JPE.2015.15.6.1524>
- [9] 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.
DOI: <https://doi.org/10.14346/JKOSOS.2016.31.2.10>
- [10] 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.
DOI: <http://dx.doi.org/10.33162/JAR.2019.12.19.4.318>
- [11] J-M Kim, D-H Tae, I-M Lee, G-P Lim, D-S Rho. "A Study on Modeling of Leakage Current in ESS Using PSCAD/EMTDC", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, 22(2), pp. 810-818.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2021.22.2.810>
- [12] S-M Choi, S J, M-Y Kim, J-H Son, D-S Rho, "Operation Algorithm for Protection Cooperation Device in High Voltage Customer with ESS for Demand Management", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, 22(12), pp. 437-446.
DOI: <https://doi.org/10.3390/en15093257>
- [13] G-S Lee. "FMEA Development of Manufacturing Process

for Military Pyrotechnic", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society,23(8), pp. 156-161.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2022.23.8.156>

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

유 현 상(Hyun-Sang You)

[준회원]



- 2019년 8월 : 충남대학교 전기공학과 (공학사)
- 2020년 7월 ~ 2022년 7월 : 한국산업기술시험원 연구원
- 2022년 9월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기공학과 석사과정 재학 중

<관심분야>

전기저장장치, 신재생에너지, 보호협조

한 병 길(Byeong-Gill Han)

[정회원]



- 2016년 2월 : 한밭대학교 전자제어공학과 (공학사)
- 2018년 8월 : 서울과학기술대학교 전기공학과 (공학석사)
- 2018년 8월 ~ 2020년 4월 : 한국화학융합시험연구원 연구원

• 2020년 9월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기공학과 박사과정 재학 중

<관심분야>

전력변환기, ESS, 신재생에너지, 마이크로그리드

김 미 영(Mi-Young Kim)

[정회원]



- 2005년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학석사)
- 2008년 12월 : 일본 북해도대학 시스템공학과 (공학박사)
- 2009년 8월 ~ 2014년 12월 : 한국 선급 책임연구원
- 2017년 3월 ~ 현재 : 호원대학교 전기공학과 교수

<관심분야>

전력계통, 풍력 전기설비, 분산전원 계통연계

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 전기연구소 연구원/선임연구원
- 1999년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기전자통신 공학부 교수

<관심분야>

전력/배전계통, 분산전원연계, 전력품질해석