

Sharing용 ESS의 CMV 발생 메커니즘 및 모델링에 관한 연구

조성덕, 신건, 최성문, 한병길, 노대석*
한국기술교육대학교 전기공학과

A Study on Mechanism and Modeling of CMV in Sharing Energy Storage System

Sung-Duck Cho, Jian Shen, Sung-Moon Choi, Byeong-Gill Han, Dae-Seok Rho*
Dept. of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education

요약 최근, 전기자동차의 폐배터리를 재활용한 Sharing용 ESS 서비스 실증사업이 활발하게 진행되고 있는데, 이러한 Sharing용 ESS는 빈번하게 이동하여 수용가 계통에 연계되므로 CMV를 포함한 전기적 위해요인의 안전성에 대한 대응 방안이 요구되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 Sharing용 ESS를 대상으로 다양한 요소에 의한 CMV 발생 메커니즘을 제시하고, 이를 바탕으로, 배전계통 상용해석 프로그램을 이용하여 Sharing용 ESS의 CMV 모델링을 수행하고, 각 CMV 발생메커니즘에 따른 특성을 평가한다. 상기에서 제시한 메커니즘과 모델링을 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, Sharing용 ESS의 PCS에 설치된 IGBT와 방열판 사이의 기생커패시턴스가 증가할수록 IGBT 스위칭에 의한 CMV의 크기가 증가하고, 배터리측의 보호기기가 동작하면 매우 큰 CMV가 서지 형태로 발생하여 ESS 구성품의 절연을 파괴할 가능성이 있으며, 연계용 변압기 2차측의 결선방식이 Y결선일 경우, CMV의 크기가 전기설비기준의 절연레벨을 초과하여 배터리측의 절연레벨에 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다. 또한, 연계용 변압기의 결선방식에 대하여 외함접지를 고려할 경우, 외함접지를 고려하지 않은 경우보다 CMV가 약 16배 정도 더 크게 발생함을 알 수 있고, 높은 뇌서지에 장기간 노출될 경우, 배터리측의 절연성능에 악영향을 줄 가능성이 있음을 알 수 있다.

Abstract Recently, a demonstration project of a shared ESS service using re-used EV(electric vehicle) batteries has been actively promoted. Countermeasures for safety hazards including CMV are required since a shared ESS frequently interconnects with a customer system. Therefore, this paper presents mechanisms of CMV due to diverse factors in a shared ESS. Based on the proposed mechanisms, we performed modeling of CMV in a shared ESS and evaluated the characteristics of CMV. From the simulation result based on the proposed mechanisms and modeling, it was confirmed that the CMV due to IGBT switching increases along with the magnitude of stray capacitance between an IGBT and heatsink in PCS. CMV may also breakdown the insulation of ESS components when protection devices on the battery side are operated. When the wiring method of the secondary side of a grid-connected transformer is a Y connection, the CMV may negatively influence the insulation level of the battery. Furthermore, it was confirmed that the CMV with consideration of enclosure grounding was 16 times more than that without the consideration, and the insulation on the battery side may be negatively influenced when the battery is exposed to the CMV caused by a lightning surge for a long time.

Keywords : Sharing ESS, Common Mode Voltage, Stray Capacitance, Lighting Surge, PSCAD/EMTDC, Mechanism of CMV

본 논문은 2021년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술연구원 지원(20213030160080), (에너지 소비대체율 50% 달성을 위한 신재생에너지기반 융복합형 마을단위 마이크로그리드 실증 기술개발과 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 국가과학기술연구회 선형 융합연구사업(No. CPS22131-100)의 지원을 받아 수행되었습니다.

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

Received February 7, 2023

Revised March 14, 2023

Accepted April 7, 2023

Published April 30, 2023

1. 서론

최근, 전기자동차의 보급에 따라 발생하는 폐배터리 처리 문제를 해결하기 위하여, 전기자동차의 폐배터리를 재활용한 이동형 Sharing용 ESS 서비스 실증사업이 활발하게 진행되고 있다[1-3]. 여기서, 폐배터리를 이용한 Sharing용 ESS 서비스는 전력사용량 편차가 큰 중소전물(또는 사업장)들이 ESS를 공유하여, 필요한 시기에 ESS의 충·방전 운영을 통해 고객에게 전력사용량의 요금 절감 효과를 제공하고, 전력계통 수요의 안정화에 기여할 목적으로 도입된 개념이다[4,5]. 하지만, 이런 비즈니스 모델을 상용화하기 위해서는 이동하며 빈번하게 계통에 연계되는 Sharing용 ESS의 특성상, ESS설비와 작업자에 대한 안전성의 확보가 필수적으로 요구되고 있다[6,7]. 또한, 2022년 12월 까지 총 40건의 ESS의 화재사고가 보고되고 있으며, 이에 따라 정부는 사고조사를 시행하여 화재사고에 대한 원인을 추정한 결과, 그중에서 전기적 위해요인으로 공통모드전압(CMV: common mode voltage)이 주요 원인 중 하나로 평가되고 있다[8-10]. 이러한 CMV는 ESS의 배터리 측 절연레벨에 심각한 악영향을 줄 가능성이 있으므로, Sharing용 ESS의 안전성을 확보하기 위하여, 운용 시 발생할 수 있는 CMV 현상에 대해 정확한 분석이 요구된다[11-13].

따라서, 본 논문에서는 Sharing용 ESS를 대상으로 IGBT 스위칭, 보호기기 동작, 연계용 변압기의 결선방식, 연계용 변압기의 외함접지 및 뇌서지에 의한 CMV의 발생 메커니즘을 제시한다. 이를 바탕으로, 배전계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 수용가의 수·배전설비부, PCS부, 배터리부, 연계용 변압기부, 뇌서지발생 장치부 등으로 구성된 Sharing용 ESS의 CMV 모델링을 수행하고, 각 CMV 발생메커니즘에 따른 CMV 특성을 평가한다. 또한, 상기에서 제시한 메커니즘과 모델링을 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, Sharing용 ESS의 PCS에 설치된 IGBT와 방열판 사이의 기생커패시턴스가 증가할수록 IGBT 스위칭에 의한 CMV의 크기가 증가하는 것을 알 수 있고, 사고전류의 차단을 위하여 설치된 배터리측의 보호기기가 동작하면, 매우 큰 CMV가 서지 형태로 발생하므로, ESS 구성품의 절연을 파괴할 가능성이 있음을 알 수 있다.

한편, 연계용 변압기 2차측의 결선방식이 Δ 결선일 경우, CMV의 크기는 전기설비기준의 절연레벨을 만족하지만, 연계용 변압기 2차측의 결선방식이 Y결선일 경우, CMV의 크기가 전기설비기준의 절연레벨을 초과하여 배

터리측의 절연레벨에 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다. 또한, 연계변압기의 외함접지를 고려할 경우, 외함접지를 고려하지 않은 경우보다 CMV가 약 16배 정도 더 크게 발생함을 알 수 있고, 높은 뇌서지에 장기간 노출될 경우, 배터리측의 절연성능에 악영향을 줄 가능성이 있음을 알 수 있다.

2. Sharing용 ESS의 CMV 발생 메커니즘

2.1 IGBT 스위칭에 의한 CMV 발생 메커니즘

Sharing용 ESS의 PCS에서 IGBT의 도전부와 방열판(외함) 사이에 기생 커패시턴스가 존재하며, 배터리 측에서도 전극(+,-)과 외함 사이에 기생 커패시턴스가 발생하는데 이를 증가적으로 나타내면 Fig. 1과 같다. 이 그림에서와 같이, Sharing용 ESS에서 수용가 측으로 전력을 공급하면 PCS 내 IGBT의 스위칭 동작 중에 발생하는 dv/dt 와 기생커패시턴스에 의해 Eq. (1)과 같이 합성 CMV가 생성된다.

$$V_{T-CMV}(t) = \sqrt{V_{AC}^2 + V_{SW}^2(t) + V_{DC}^2(t)} \quad (1)$$

where, $V_{T-CMV}(t)$: total of CMV, V_{AC} : AC element, $V_{SW}(t)$: switching element, $V_{DC}(t)$: DC element

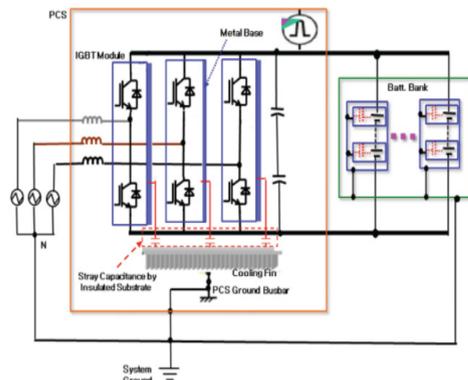


Fig. 1. Equivalent circuit of stray capacitances in PCS and Li-ion battery

2.2 보호기기 동작에 의한 CMV 발생 메커니즘

Sharing용 ESS 동작 중 PCS 내부의 IGBT와 필터용이 고장나면 사고전류가 발생하여 보호기기(Fuse, 차단기)가 동작하는 과정에서 발생하는 di/dt 가 배터리와 PCS의 기생 인덕턴스와 결합하여 과도전압을 발생시킨

다. 이 전압은 Normal Mode이지만, Fig. 2와 같이 배터리의 기생 커패시턴스에 의해 약 1/2로 분압된 형태의 CMV로 나타날 수 있다.

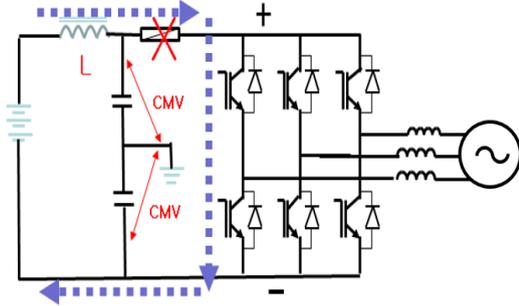


Fig. 2. CMV due to operation of protection device

2.3 연계용 변압기 결선방식에 의한 CMV 발생 메커니즘

일반적으로, 수용가에 설치되는 Sharing용 ESS의 연계용 변압기는 수용가의 조건에 따라 다양한 결선방식이 채용되고 있다. 그중에서 대표적으로 Y- Δ 결선 및 Δ -Y 결선방식의 결선회로와 영상분 등가회로를 나타내면 Fig. 3과 같다. 여기서, Fig. 3(a)는 Y- Δ 결선방식에 의한 영상분 등가회로를 나타낸 것으로, 2차측은 Δ 결선으로 인하여 Sharing용 ESS측에 영상분 회로가 형성되지 않음을 알 수 있다. 또한, Fig. 3(b)와 같이 Δ -Y 결선방식에서는 2차측의 Y결선으로 인하여 Sharing용 ESS측에 영상분 회로가 형성되어 CMV가 발생할 수 있음을 알 수 있다.

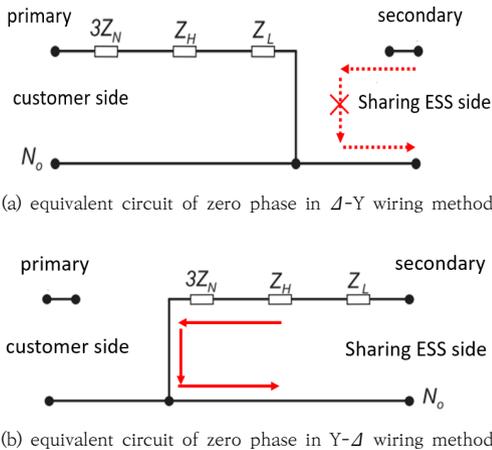


Fig. 3. Equivalent circuit of zero phase circuit depending on wiring method

2.4 연계용 변압기의 외함접지에 의한 CMV 발생 메커니즘

Sharing용 ESS는 수용가 계통의 영향을 최소화하기 위하여 연계용 변압기를 통하여 수용가 측에 전력을 공급하는데, 작업자가 감전되는 것을 방지하기 위하여 연계용 변압기의 외함을 접지한다. 이때, Fig. 4와 같이 접지된 외함과 변압기 권선 사이의 기생 커패시턴스로 인하여 영상분 회로가 형성되어 CMV가 발생할 수 있다 [14].

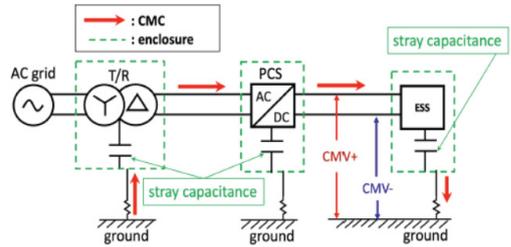


Fig. 4. Mechanism of CMV due to enclosure grounding of transformer

2.5 뇌서지에 의한 CMV 발생 메커니즘

일반적으로, Sharing용 ESS를 설치한 수용가 근방에 낙뢰가 발생하면 큰 뇌격전류의 에너지가 지상 유입되면서, 국지적인 대지의 전위상승을 수반하고 높은 전압의 서지가 접지를 따라 수용가에 유입될 수 있다. 이러한 뇌서지는 Sharing용 ESS의 기생커패시턴스와 외함에 의하여 구성된 폐회로를 따라 매우 높은 CMV를 발생시켜 ESS의 절연을 파괴시킬 가능성이 있다. 구체적으로, Fig. 5와 같이 뇌서지로 인한 CMV가 연계용 변압기의 외함 접지와 기생커패시터를 따라 PCS와 ESS로 흐르게 된다.

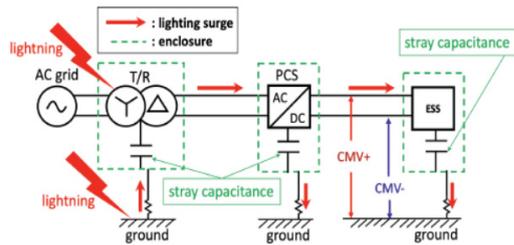


Fig. 5. Mechanism of CMV due to lightning surge

3. PSCAD/EMTDC에 의한 Sharing용 ESS의 CMV 모델링

3.1 CMV 발생 요인별 모델링

PCS에 설치된 IGBT와 방열판 사이의 기생커패시턴스는 Fig. 6과 같이, IGBT의 양 단자와 방열판 사이에 커패시터를 삽입하여 모델링 한다. 여기서, IGBT의 스위칭 주파수는 10[kHz]로, 기생커패시턴스의 크기는 0.5[nF]과 5[nF]으로 상정하여 모델링을 수행한다.

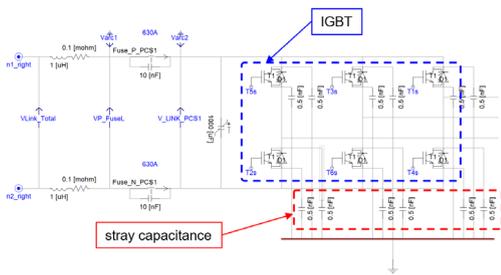


Fig. 6. Modeling of CMV due to IGBT switching

또한, 보호기기 동작에 의한 CMV특성을 분석하기 위하여, 본 논문은 Fig. 7과 같이, 단락사고가 1MW급 PCS의 2차측에서 발생하는 것으로 상정하고, 보호기기를 1MW급 Sharing용 ESS의 양극과 음극 단자에 각각 설치하여, 단락사고가 발생 시 보호기기의 동작에 의하여 발생하는 CMV를 모델링 한다.

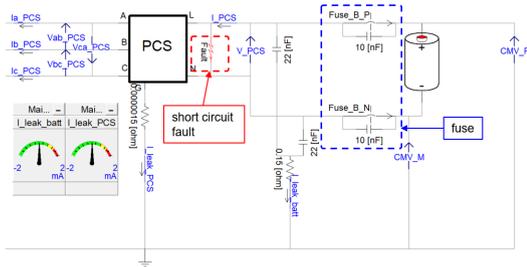


Fig. 7. Modeling of CMV due to operation of protection devices

한편, ESS용 연계용 변압기의 결선방식에 따른 CMV 특성을 분석하기 위하여, 본 논문에서는 Fig. 8과 같이 4 가지 결선방식에 대하여 각각 모델링을 수행한다. 여기서, Fig. 8(a)는 $\Delta - \Delta$ 결선방식을 나타내고 (b)는 $\Delta - Y$ 결선방식, (c)는 $Y - \Delta$ 결선방식, (d)는 $Y - Y$ 결선방식을 나타낸다.

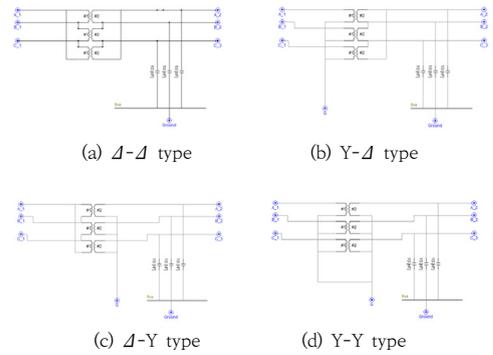


Fig. 8. Modeling of wiring method of grid-connected transformer in sharing ESS

또한, ESS용 연계용 변압기의 외함접지에 의한 CMV는 Fig. 9와 같이 권선과 외함사이의 기생커패시턴스를 고려하여 연계용 변압기에 대한 모델링을 수행한다. 여기서, 연계용 변압기 2차측의 각 상의 권선과 접지사이의 기생커패시턴스는 10[nF]으로 상정한다.

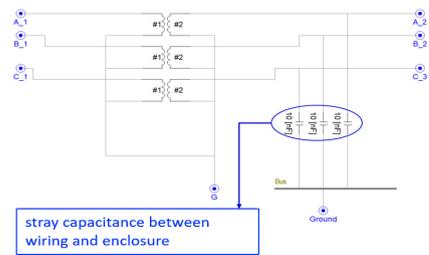


Fig. 9. Modeling of stray capacitance for enclosure grounding in grid-connected transformer

그리고, 뇌서지에 의한 CMV특성을 분석하기 위하여, 뇌서지 발생장치부를 모델링하면 Fig. 10과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 뇌서지 발생장치부는 PSCAD/EMTDC 라이브러리의 surge generator를 바탕으로 가변 전압원을 이용하여 뇌서지를 모델링한다.

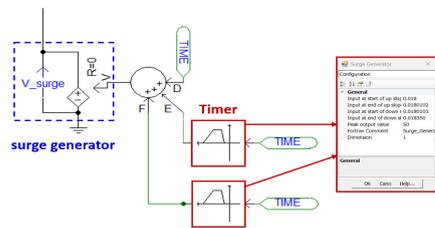


Fig. 10. Modeling of lightning surge generator

3.2 전체 모델링

상기의 내용을 종합하여, 전체 시스템을 모델링하면 Fig. 11과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, Fig. 11의 A부분은 수용가의 수·배전설비부를 나타내고, B부분은 외함접지에 의한 기생커패시턴스를 고려한 연계용 변압기부, C부분은 IGBT 등으로 구성된 PCS부, D부분은 배터리 랙, 보호기기, DC전로 등으로 구성된 배터리 부, E부분은 뇌서지발생 장치부를 나타낸다.

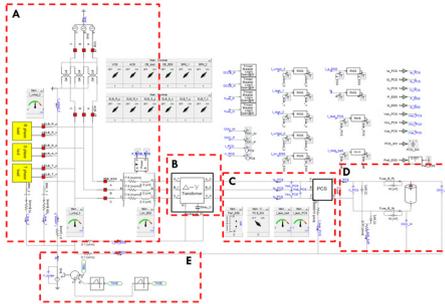


Fig. 11. Modeling of entire system

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 시뮬레이션 조건

Sharing용 ESS의 CMV 특성을 확인하기 위하여, Fig. 12와 같이 Sharing용 ESS가 연계된 수용가를 대상으로 모델계통을 구성하고, Table 1과 같이, 배터리와 연계용 변압기의 기생 커패시턴스, 배터리의 전압, PCS 스위칭 주파수 등의 시뮬레이션 조건을 상정한다. 여기서, 배터리부와 연계용 변압기부의 기생 커패시턴스는 실제 계통에서 운용되고 있는 부품들의 특성값을 바탕으로 각각 20[nF]와 10[nF]으로 상정하고, 연계용 변압기는 Δ -Y결선, Y-Y결선, Δ - Δ 결선 및 Y- Δ 결선방식과 380/380[V]의 변압비를 고려하며, 배터리부의 전압은 700[V], PCS의 스위칭 주파수는 10[kHz]로 상정한다.

Table 1. Simulation condition

item	contents
stray capacitance in battery section	20nF
stray capacitance in transformer	10nF
transformer in Sharing ESS	380/380V, 1MVA
rated voltage of battery	700VDC
switching frequency in PCS	10kHz

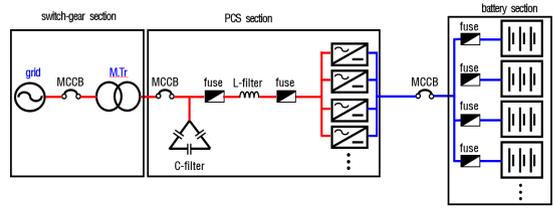
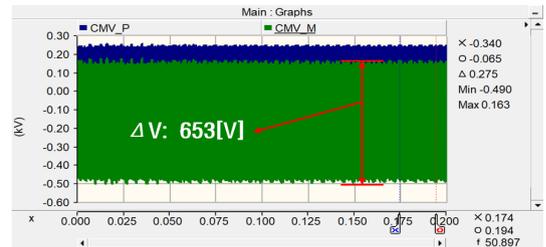


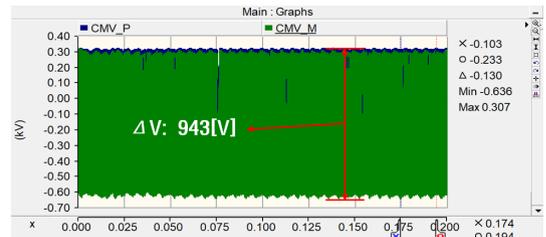
Fig. 12. Configuration of entire sharing ESS system

4.2 IGBT 스위칭에 의한 CMV 특성분석

상기의 시뮬레이션 조건을 바탕으로, IGBT와 방열판 사이의 기생커패시턴스가 각각 0.5[nF], 5[nF]인 경우, IGBT 스위칭에 의한 CMV의 특성을 나타내면 Fig. 13과 같다. 여기서, Fig. 13(a)는 기생커패시턴스가 0.5[nF]인 경우를 나타내는데, 이때 CMV는 409[V], ΔV 는 653[V]로 산정되는 것을 알 수 있다. 한편, Fig. 13(b)와 같이 기생커패시턴스가 5[nF]인 경우, CMV는 636[V], ΔV 는 943[V]로 산정된다. 따라서, Sharing용 ESS의 PCS에 설치된 IGBT와 방열판 사이의 기생커패시턴스가 증가할수록 IGBT 스위칭에 의한 CMV의 크기가 증가하는 것을 알 수 있다.



(a) 0.5[nF] of stray capacitance



(b) 5[nF] of stray capacitance

Fig. 13. Characteristics of CMV due to IGBT switching

4.3 보호기기 동작에 의한 CMV 특성분석

상기의 시뮬레이션 조건을 바탕으로 배터리측에서 단락사고가 발생한 경우의 CMV 특성을 나타내면 Fig. 14와 같다. 여기서, Fig. 14(a)는 연계용 변압기의 외함접

지가 고려되지 않은 경우의 CMV 특성을 나타낸 것으로, 단락사고가 발생하고 3[ms] 뒤 배터리측에 설치된 보호기기가 동작하여, CMV와 ΔV 는 각각 1,355[V]와 2,741[V]로 산정되는 것을 알 수 있다. 또한, Fig. 14(b)는 외함접지를 고려할 경우의 CMV 특성을 나타내는데, 보호기기의 동작시점인 3[ms] 이후, DC측 전로의 CMV 전압은 최대 2.962[V], ΔV 는 5,824[V]까지 상승함을 알 수 있다. 즉, 사고전류의 차단을 위하여 설치된 배터리측의 퓨즈가 동작하면, 매우 큰 CMV가 서지 형태로 발생하므로, ESS 구성품의 절연을 파괴할 가능성이 있고, 특히 연계용 변압기의 권선과 외함사이의 기생커패시턴스를 고려하면 더 큰 CMV가 발생할 가능성이 있음을 알 수 있다.

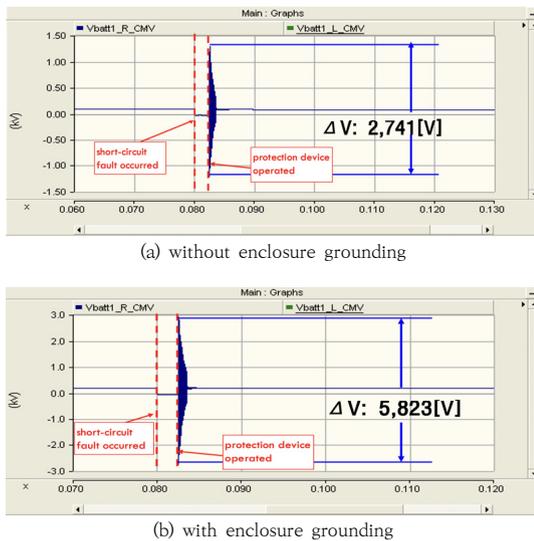


Fig. 14. Characteristics of CMV due to operation of protection device

4.4 연계용 변압기 결선방식에 의한 CMV 특성분석

상기의 시뮬레이션 조건을 바탕으로, 연계용 변압기의 결선방식에 따른 CMV의 특성을 나타내면 Fig. 15와 같다. 여기서, Fig. 15(a)와 같이 연계용 변압기의 결선방식이 Δ -Y인 경우, CMV는 2,247[V], ΔV 는 2,820[V]로 산정되는데, 이는 전기설비기준의 절연레벨인 2,100[V](표준전압의 3배)보다 초과된 값이므로, 배터리측의 절연성능에 악영향을 줄 가능성이 있음을 알 수 있다. 또한, Fig. 15(b)와 같이 연계용 변압기의 결선방식이 Y-Y인 경우, CMV는 2,448[V], ΔV 는 3,251[V]로 산정되는데, 이는 전기설비기준의 절연레벨을 초과한 값이

므로, 배터리측의 절연성능에 악영향을 줄 가능성이 있음을 확인할 수 있다.

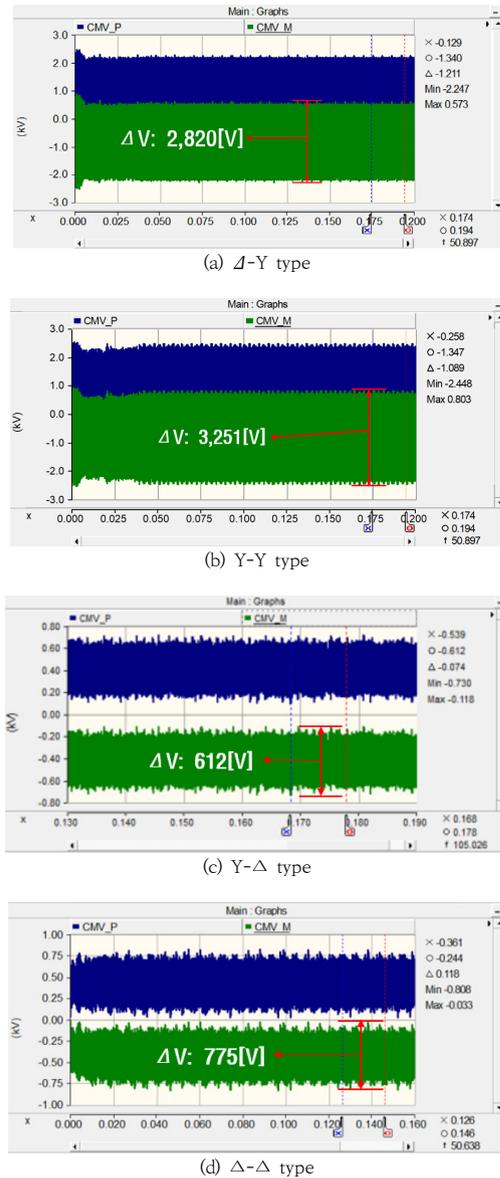


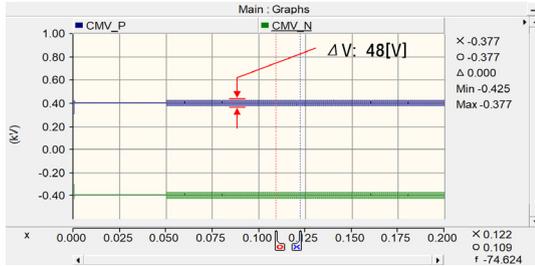
Fig. 15. Characteristics of CMV depending on wiring method in grid-connected transformer

한편, Fig. 15(c)와 같이 연계용 변압기의 결선방식이 Y- Δ 인 경우, CMV는 730[V], ΔV 는 612[V]로 산정되는데, 이는 전기설비기준의 절연레벨을 초과하지 않는 것을 알 수 있다. 또한, Fig. 15(d)와 같이 연계용 변압기의 결선방식이 Δ - Δ 인 경우, CMV는 819[V], ΔV 는 775[V]로 산정되는데, 이 값도 전기설비기준의 절연레벨

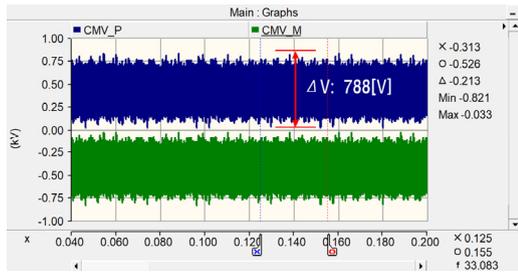
을 만족하는 것을 알 수 있다. 따라서, Sharing용 ESS의 연계용 변압기 2차측의 결선방식이 Δ - Δ 결선일 경우, CMV의 크기는 전기설비기준의 절연레벨을 만족하지만, 연계용 변압기 2차측의 결선방식이 Y결선일 경우, CMV의 크기가 전기설비기준의 절연레벨을 초과하여 배터리측의 절연레벨에 악영향을 미칠 수 있음을 확인할 수 있다.

4.5 변압기 외함접지에 의한 CMV 특성분석

상기의 시뮬레이션 조건을 바탕으로, 변압기 외함접지에 의한 CMV 특성을 나타내면 Fig. 16과 같다. 여기서, Fig. 16(a)와 같이 연계용 변압기의 결선방식이 Δ - Δ 인 경우, 연계용 변압기 외함접지를 고려하지 않으면 CMV는 425[V], ΔV 는 48[V]로 산정되므로, 전기설비기준의 절연레벨을 만족하는 것을 알 수 있다. 하지만, Fig. 16(b)와 같이 동일한 연계용 변압기의 결선방식에 대하여 외함접지를 고려할 경우, CMV는 821[V], ΔV 는 788[V]로 산정되는데, 이는 외함접지를 고려하지 않은 경우보다 약 16배 정도 더 크게 발생함을 알 수 있다.



(a) when enclosure grounding of grid-connected transformer is not considered



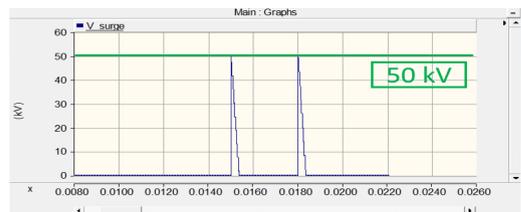
(b) when enclosure grounding of grid-connected transformer is considered

Fig. 16. Characteristics of CMV depending on enclosure grounding in grid-connected transformer

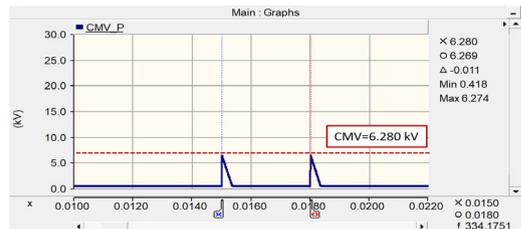
4.6 뇌서지에 의한 CMV 특성분석

상기의 시뮬레이션 조건을 바탕으로, 뇌서지에 의한

CMV의 특성을 나타내면 Fig. 17과 같다. 여기서, Fig. 17(a)는 Sharing용 ESS를 설치한 수용가의 대지전위를 나타내는데, 대지전위는 초기에 0[V]를 유지하지만, 낙뢰가 발생하면 50[kV]까지 상승하고 2[ms] 이내에 다시 0[V]로 돌아가는 것을 알 수 있다. 이때, Sharing용 ESS의 CMV는 Fig. 17(b)와 같이 산정 되는데, 유입된 뇌서지가 수용가의 임피던스에 의하여 CMV를 6.28[kV]까지 상승시키는 것을 알 수 있다. 따라서, 이러한 높은 뇌서지에 장기간 노출될 경우, 배터리측의 절연성능에 악영향을 줄 가능성이 있음을 알 수 있다.



(a) grounding potential



(b)CMV at DC side

Fig. 17. Characteristics of CMV due to lightning surge

4.7 종합분석

상기의 시뮬레이션을 바탕으로, 요인별 CMV 특성을 종합하여 나타내면 Table 2와 같다. 여기서, Sharing용 ESS의 PCS에 설치된 IGBT와 방열판 사이의 기생커패시턴스가 증가할수록 IGBT 스위칭에 의한 CMV의 크기가 증가하고, 배터리측의 보호기기가 동작하면 매우 큰 CMV가 서지 형태로 발생하여 ESS 구성품의 절연을 파괴할 가능성이 있으며, 연계용 변압기 2차측의 결선방식이 Y결선일 경우, CMV의 크기가 전기설비기준의 절연레벨을 초과하여 배터리측의 절연레벨에 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다. 또한, 연계용 변압기의 결선방식에 대하여 외함접지를 고려하면 외함접지를 고려하지 않은 경우보다 CMV가 약 16배 정도 더 크게 발생함을 알 수 있고, 높은 뇌서지에 장기간 노출될 경우, 배터리측의 절연성능에 악영향을 줄 가능성이 있음을 알 수 있다.

Table 2. Characteristics of maximum CMV by factors

item	Max. CMV
CMV due to IGBT switching	636 V
CMV due to operation of protection devices	2,962 V
CMV due to wring method of transformer	2,448 V
CMV due to enclosure grounding	821 V
CMV lightning surge	6,280 V

5. 결론

본 논문은 Sharing용 ESS에서 발생하는 위해요인중 하나인 CMV의 특성을 분석하기 위하여, IGBT 스위칭, 보호기기 동작, 연계용 변압기의 결선방식, 연계용 변압기의 외함접지 및 뇌서지에 의한 CMV 발생 메커니즘을 제시하고, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 수용가의 수·배전설비부, PCS부, 배터리부, 연계용 변압기부, 뇌서지발생 장치부 등으로 구성된 Sharing용 ESS의 CMV 모델링을 수행하여, CMV 발생 메커니즘에 따른 CMV 특성을 제시한다. 이에 대한 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) Sharing용 ESS의 PCS에 설치된 IGBT와 방열판 사이의 기생커패시턴스가 0.5[nF]인 경우, CMV는 409[V], ΔV 는 653[V]로 산정되고, 기생커패시턴스가 5[nF]인 경우, CMV는 636[V], ΔV 는 943[V]로 산정되므로, 기생커패시턴스가 증가할수록 IGBT 스위칭에 의한 CMV의 크기가 증가하는 것을 알 수 있다.
- (2) 배터리측에서 단락사고가 발생하여 배터리측의 보호기기가 동작한 경우 연계용 변압기의 외함접지가 고려되지 않으면, CMV와 ΔV 는 각각 1,355[V]와 2,741[V]로 산정되고, 외함접지를 고려하면 CMV 전압은 최대 2,962[V], ΔV 는 5,824[V]까지 상승함을 알 수 있다. 즉, 이러한 CMV가 과도서지 형태로 발생하여 ESS 구성품의 절연을 파괴할 가능성이 있고, 특히 연계용 변압기의 권선과 외함사이의 기생커패시턴스를 고려하면 더 큰 CMV가 발생할 가능성이 있음을 알 수 있다.
- (3) Sharing용 ESS의 연계용 변압기의 결선이 Y- Δ 방식일 경우, CMV는 730[V], ΔV 는 612[V]로 산정되고, Δ - Δ 방식일 경우, CMV는 819[V], ΔV 는 775[V]로 산정되므로, CMV의 크기는 전기

설비기준의 절연레벨을 만족하는 것을 알 수 있다. 하지만, 연계용 변압기의 결선방식이 Δ -Y방식일 경우, CMV는 2,247[V], ΔV 는 2,820[V]로 산정되고, 결선방식이 Y-Y방식인 경우, CMV는 2,448[V], ΔV 는 3,251[V]로 산정되므로, CMV의 크기가 전기설비기준의 절연레벨을 초과하여 배터리측의 절연레벨에 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

- (4) Δ - Δ 결선방식의 연계용 변압기 외함접지를 고려하지 않으면 CMV는 425[V], ΔV 는 48[V]로 산정되므로, 전기설비기준의 절연레벨을 만족하는 것을 알 수 있지만, 동일한 연계용 변압기의 결선방식에 대하여 외함접지를 고려할 경우, CMV는 821[V], ΔV 는 788[V]로 산정되는데, 이는 외함접지를 고려하지 않은 경우보다 약 16배 정도 더 크게 발생함을 알 수 있다.
- (5) Sharing용 ESS를 설치한 수용가에 50[kV]의 낙뢰가 발생할 경우, 유입된 뇌서지가 수용가의 임피던스에 의하여 CMV를 6.28[kV]까지 크게 상승시켜, 이러한 높은 뇌서지에 장기간 노출될 경우, 배터리측의 절연성능에 악영향을 줄 가능성이 있음을 알 수 있다.
- (6) 본 논문에서는 Sharing용 ESS에서 화재사고의 원인이 될 수 있는 CMV의 발생 메커니즘을 다양한 각도에서 제시하고, 이를 바탕으로 실제 수용가를 대상으로 모델링을 수행하여 CMV 발생 메커니즘의 유효성을 확인하였다. 하지만, CMV에 대한 국제적인 표준과 국내기술기준이 아직 마련되지 않아, 향후 이를 바탕으로 각 CMV 방지 방안에 대한 연구를 수행하고자 한다.

References

- [1] W. H. Hwang, "Policies and Grid Reorganization Direction to Expand the Supply of Electric Vehicles in Fourth Industrial Revolution", the world of electricity in The Korean Institute of Electrical Engineers, vol. 68, no. 1, pp. 8-16, 2019.
<http://www.riss.kr/link?id=A106014601>
- [2] J. C. Kim, "Activation Plan for Electrical Vehicle", Journal of the Korean Society of Automotive Engineers, vol. 37, no. 3, pp. 57-61, 2015.
- [3] Y. W. Hwang, "A Study on Utilization Plan for Waste Battery of Electrical Vehicle and Improvement of the

relevant legal system”, Ministry of Trade, Industry and Energy, 2019.

[4] Smart Grids, Transmission & Distribution and District Heating Division, “Implement of Experience Center Intelligent Electrical Power Grids(Smart Grids)”, Ministry of Trade, Industry and Energy, 2019.

[5] H. Lee, “Waste Battery of Electrical Vehicle turns into Energy Storage System”, Journal of the Korea Electric Association, pp. 24-26, 2019.
<http://www.riss.kr/link?id=A106388696>

[6] D. H. Tae, H. D. Lee, J. M. Kim, D. S. Rho, “Characteristics of Saturation and Circulating Current Based on Winding and Iron Core Structure of Grid-connected Transformer in Energy Storage System”, Korea Academy Industrial Cooperation Society, vol. 21, no. 4, pp. 39-48, 2020.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2020.21.4.39>

[7] K. H. Um, “Design of Measuring System for Insulation Resistance and Humidity in High-Power XLPE Cables in Operation and the Relationship Between Insulation Resistance and Humidity in the Oversheath”, The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication (IIBC), vol. 16, no. 5, pp. 179-184, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.7236/IIBC.2016.16.5.179>

[8] S. H. Kim, H. S. Choi, J. Y. Kim, A. Han, “A Study on the Cause of CMV and Leakage Current, and Mitigation Strategy on the Lithium-ion Battery of ESS”, The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers, vol. 70, no. 1, pp. 61-71, 2021.
DOI: <https://doi.org/10.5370/KIEE.2021.70.1.061>

[9] S. M. Choi, S. H. Kim, M. Y. Kim and D. S. Noh. “Study on CMV Modeling and Characteristics by Grounding Method of Transformer for ESS” Journal of the Korea Institute of Industrial Science and Technology 22, no.4 pp. 587-593, 2021.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2021.22.4.587>

[10] S. W. Hwang, H. D. Lee, D. H. Tae and D. S. Noh. “A Study on the Protection Method of Electric Storage Device for Lithium Ion Battery Using SPD” Journal of the Korean Society of Industrial Science and Technology 21, no.4: 568-574, 2020.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2020.21.4.568>

[11] J. B. Jung, M. G. Lim, J. Y. Kim, B. G. Han, B. K. Kim, D. S. Rho, “Safety Assessment for External Short Circuit of Li-Ion Battery in ESS Application Based on Operation and Environment Factors” KSES, 163-163, 2022.
DOI: <https://doi.org/10.3390/en15145052>

[12] K. M. Park, J. H. Kim, J. Y. Park and S. B. Bang. “A study on the fire risk of ESS through fire status and field investigation” Journal of the Korea Fire and Fire Protection Society, 32(6), 91-99, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.7731/KIFSE.2018.32.6.091>

[13] B. G. Han, S. D. Cho, K. S. Ryu, K. H. Kim, D. S. Rho, “Mechanism of CMV for Winding Connection Type of

Grid-connected Transformer in Sharing Energy Storage System”, The Korean Institute of Electrical Engineers, 2118-2119, 2022.

[14] S. D. Cho, S. M. Choi, S. Y. Hwang, J. T. Jeon, D. S. Rho. “A Study on Mechanisms of CMV in ESS Considering Grounded Enclosure of Grid-connected Transformer”, The Korean Institute of Electrical Engineers, 267-268, 2021.

조 성 덕(Sung-Duck Cho)

[정회원]



- 1999년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2014년 2월 : 전남대학교 산업대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2015년 2월 ~ 현재 : 한국폴리텍대학 부교수
- 2019년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 박사과정 재학 중

<관심분야>

ESS, LVDC 배전계통, 분산전원연계, 전력품질해석

신 건(Jian Shen)

[정회원]



- 2011년 2월 : 한국기술교육대학교 기계공학과 (공학사)
- 2017년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학석사)
- 2021년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기공학과 박사과정 재학 중

<관심분야>

배전계통 운용, MVDC, 신재생에너지, micro-grid, ESS

최 성 문(Sung-Moon Choi)

[정회원]



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

<관심분야>

배전계통 운용, ESS, 마이크로그리드, 신재생에너지

한 병 길(Byeong-Gill Han)

[정회원]



- 2016년 2월 : 한밭대학교 전자계어공학과 (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

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 : 한국전기연구소 연구원/선임연구원

- 1999년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기전자통신공학부 교수

<관심분야>

전력/배전 계통, 분산전원연계, 전력품질해석