

차단기 동작 및 뇌서지에 의한 CMV의 특성에 관한 연구

최성문*, 조성덕*, 김윤호*, 김미영**, 노대석*

*한국기술교육대학교, **호원대학교

e-mail:moon9507@koreatech.ac.kr

A Characteristics of CMV depending on Circuit-breaker Operation and Lightning-Surge

Sung-Moon Choi*, Sung-Duck Cho*, Yun-Ho Kim*, Mi-Young Kim**, Dae-Seok Rho*

*Korea University of Technology and Education, **Howon University

요약

최근, ESS(energy storage system)에서 빈번하게 발생하는 화재사고로 인하여, ESS 산업시장에 큰 타격을 주고 있다. 이러한 ESS의 화재사고를 사전에 방지하기 위하여, ESS의 6대 안전기준을 고려한 위험요소 평가 연구가 활발하게 진행되고 있는데, 그 중 CMV(common mode voltage)는 ESS 배터리 절연내력에 큰 악영향을 줄 가능성이 있다. 따라서, 본 논문에서는 차단기 동작 및 뇌서지에 의한 CMV 발생 메커니즘을 제시하고, CMV의 특성을 분석한다. 또한, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 수배전설비부, DC 선로부, PCS부, 배터리부, 뇌서지 발생장치부, 등으로 구성된 ESS의 CMV 특성 모델링을 수행한다. 이를 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, 차단기 동작 및 뇌서지 유입에 따라 상당한 크기의 CMV가 발생하여 ESS의 배터리 측 절연성능에 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있었다.

1. 서론

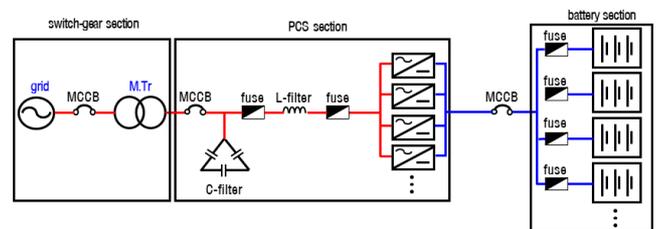
2015년 유엔기후변화 회의에서 채택된 파리 협정 이후, 우리나라는 재생에너지 3020 이행계획을 수립하여 재생에너지 비중 증가를 위해 힘쓰고 있지만, 재생에너지 발전의 핵심 장치인 ESS에서 현재까지 총 38건의 화재사고가 발생하여 많은 재산피해가 보고되고 있다[1]. 이러한, 화재사고를 사전에 방지하기 위하여, 정부는 공통모드전압(CMV: common mode voltage), 내부저항, 절연저항, 모듈퓨즈, 충전율, 온/습도환경 등, ESS 6대 안전기준을 제시하고 있으며, 이를 기반으로 하여 ESS 구성요소 및 시스템을 고려한 위험요소 평가 연구가 활발하게 진행되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 6대 안전기준 중 CMV를 중점으로 하여 ESS 연계용 변압기의 결선방식 및 차단기 동작에 따른 CMV 발생 메커니즘을 제시하고, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/ EMTDC를 이용하여 수용가의 수·배전설비부, ESS부, PCS부, 뇌서지 발생장치부, 등으로 구성된 ESS의 CMV 특성 모델링을 수행한다. 이를 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, 변압기의 결선방식이 Δ -Y인 경우 CMV 값이 전기설비기준의 절연레벨을 초과하여, 배터리측의 절연성능에 악영향을 줄 가능성이 있으며, ESS의 DC 측에서 단락사고가 발생하는 경우 매우 큰 CMV가 발생하여 배터리측의 절연성능에 악영향을 줄 가능성이

있음을 알 수 있다. 또한, 결선방식이 Y- Δ 인 경우, CMV 값이 절연레벨 이하로 저감시킬 수 있음을 알 수 있지만, 단락 사고 시 ESS의 DC 측에서 단락사고가 발생하는 경우 상당한 CMV가 발생하여 배터리측의 절연성능에 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다. 한편, ESS에 뇌서지가 유입되는 경우, 변압기 결선과 상관없이 상당한 CMV가 발생하여 배터리의 절연내력뿐만 아니라 ESS 계통에 큰 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있었다.

2. ESS의 CMV 발생 메커니즘

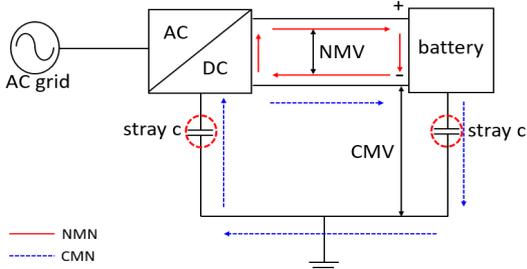
2.1 CMV의 특성

ESS는 그림 1과 같이 수용가의 수·배전반부, PCS부(필터, IGBT, DC 커패시터), 배터리부(배터리, 보호장치)로 구성되어 있으며 배선용 차단기를 통하여 수용가에 연계된다.



[그림 1] ESS의 구성도

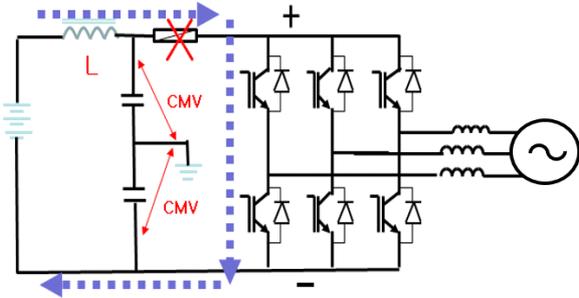
여기서, PCS의 IGBT는 전력변환을 목적으로 5~10[kHz]의 고주파수 스위칭 동작을 하며, CMN(common mode noise)과 NMN(normal mode noise)이라는 노이즈가 발생한다. 이때 CMN의 전압 형태인 CMV와 NMN의 전압 형태 NMV(normal mode voltage)는 그림 2와 같이 나타난다. 여기서, NMN은 배터리 양극 사이의 전압이고, CMV는 배터리의 (+)극과 접지 사이 및 (-)극과 접지 사이에 발생하는 전압이다.



[그림 2] 노이즈 발생 메커니즘의 개념도

2.2 보호기기 동작에 의한 CMV 발생 메커니즘

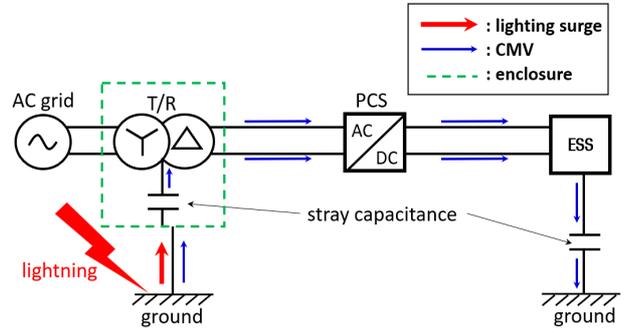
ESS 운용 중 PCS 내의 IGBT가 파손되어 단락전류가 발생한 후 fuse가 끊어지는 과정에서 발생하는 di/dt가 배터리와 PCS 사이 직류전로의 기생 인덕턴스와 결합하여 과도전압을 발생시킨다. 이 전압이 normal mode로 발생한 후 그림 3과 같이, 배터리의 기생 커패시턴스에 의해 약 1/2로 분압된 전압이 (+)극과 접지 및, (-)극과 접지 간에 CMV로 나타날 수 있다.



[그림 3] ESS에서의 CMV 측정위치

2.3 뇌서지에 의한 CMV 발생 메커니즘

일반적으로, Sharing용 ESS를 설치한 배전계통에 낙뢰가 발생하면 큰 뇌격전류의 에너지 전체가 지상에 유입되면서, 국지적인 대지의 전위상승을 수반하여 수만볼트 전압의 서지가 접지를 따라 수용가에 유입될 수 있다. 이러한 뇌서지는 ESS의 연계용 변압기와 기생커패시턴스 및 외함접지에 의하여 구성된 폐회로로 인하여 매우 높은 CMV를 발생시키고, ESS 배터리 측 절연이 파괴될 가능성이 있다. 구체적으로, 그림 4와 같이 뇌서지로 인한 CMV가 연계변압기의 외함접지와 기생커패시터를 따라 PCS와 ESS에 걸리게 된다.

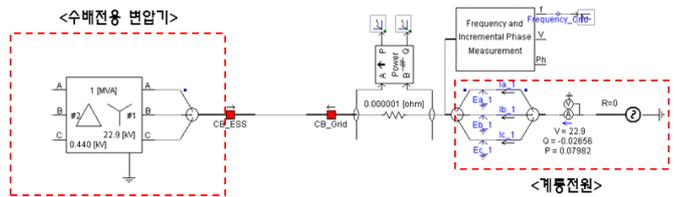


[그림 4] 낙뢰에 의한 CMV 발생 메커니즘

3. PSCAD/EMTDC에 의한 ESS의 CMV 모델링

3.1 수용가의 수·배전설비부 모델링

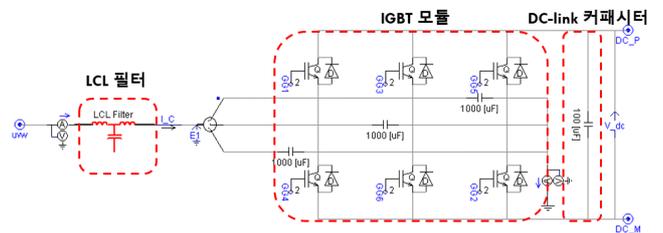
수용가의 계통전원, 차단기, 수·배전용 변압기로 구성된 수·배전설비부를 PSCAD/EMTDC를 이용하여 모델링하면, 그림 5와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 수·배전용 변압기는 Δ -Yg결선방식을 사용하며, 변압비는 22.9kV/380V이고, 2차측은 3상 4선식 저압 배전선로로 구성된다.



[그림 5] 수·배전설비부의 모델링

3.2 PCS부 모델링

배터리의 충·방전 기능을 가진 PCS는 그림 6과 같이, LCL 필터, IGBT 모듈, DC-Link 커패시터 등으로 구성된다. 여기서, LCL 필터는 AC 전원의 고조파 및 노이즈를 제거하는 역할을 수행하며, IGBT 모듈은 DC 전원을 120° 위상차를 갖는 3상 AC로 변환하며, DC-Link 커패시터는 IGBT의 스위칭 동작에 의한 DC측의 전압을 안정시키는 역할을 수행한다.

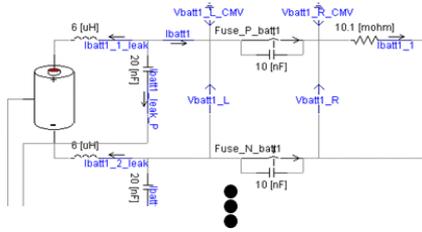


[그림 6] PCS부의 모델링

3.3 배터리부 모델링

PSCAD/EMTDC를 이용하여 배터리 랙 및 DC 전로를 모

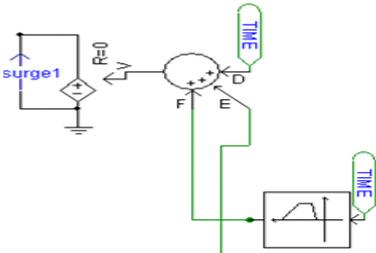
텔링하면, 그림 7과 같이 나타낼 수 있다. 이 그림에서와 같이, 배터리 랙은 배터리와 퓨즈로 구성되고, DC 전로는 DC 차단기와 전로로 구성된다. 여기서, 배터리는 내부 임피던스와 기생 커패시턴스, 전압원으로 구성되며, 배터리의 내부 임피던스는 150[mΩ], 기생커패시턴스는 20[nF], 전체 배터리 부 용량은 2[MWh]로 상정한다. 또한, 배터리 부는 13개의 배터리 랙을 병렬로 구성하며, 1번 랙을 제외한 2~13번 랙은 하나의 랙으로 등가화시킨다.



[그림 7] 배터리부의 모델링

3.4 뇌서지 발생 장치부 모델링

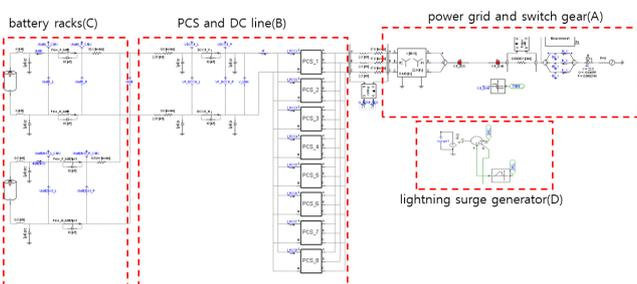
뇌서지 발생 장치부의 모델링은 PSCAD/EMTDC에서 제공하는 라이브러리를 이용하여 그림 8과 같이 독립전원의 형태로 나타낼 수 있다. 여기서, 뇌서지는 최대 50[kV] 전압으로 상정하여 지정된 시간동안 ESS 계통에 투입된다.



[그림 8] 뇌서지 발생 장치부 모델링

3.5 전체 시스템 모델링

상기의 내용을 종합하여, 전체 시스템을 모델링하면 그림 9와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 그림 9의 A부분은 수용가의 수·배전용 변압기부를 나타내고, B부분은, IGBT 등으로 구성된 PCS부, C부분은 배터리 랙과 DC전로로 구성된 배터리부, D부분은 뇌서지 발생장치부를 나타낸다.



[그림 9] 전체 시스템 모델링

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 시뮬레이션 조건

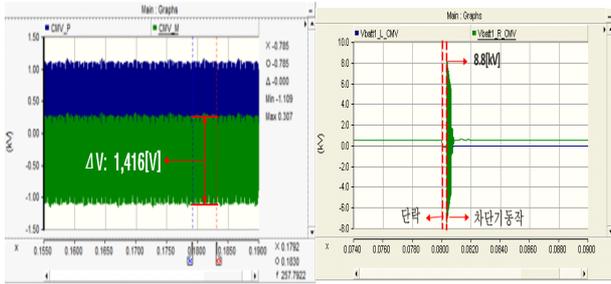
ESS용 연계변압기의 결선 방식 및 차단기 동작과 뇌서지 따른 CMV의 특성을 확인하기 위하여, 배터리의 기생 커패시턴스, 배터리의 전압, 연계용 변압기, PCS 스위칭 주파수 등의 시뮬레이션 조건을 상정하면 표 1과 같다. 여기서, 배터리 부의 전압은 700[V] 이고, 배터리의 기생 커패시턴스는 13개의 랙에 대하여, 1랙당 20[nF]을 상정하며, ESS용 변압기는 Δ -Y결선 및 Y- Δ 결선방식과 380/380[V]의 변압비를 고려하고, PCS의 스위칭 주파수는 10[kHz]를 상정한다.

[표 1] 시뮬레이션 조건

항목	내역
배터리부의 기생 커패시턴스	20nF
연계용 변압기부의 기생커패시턴스	10nF
ESS의 연계용 변압기	380/380V
배터리 정격전압	700V DC
PCS의 스위칭 주파수	10kHz
단락 저항	0.1mΩ

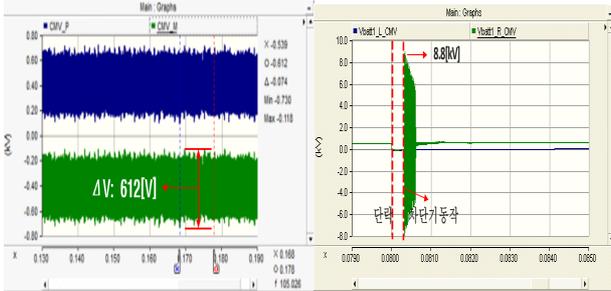
4.2 변압기 결선방식 및 차단기 동작에 의한 CMV 특성

상기의 시뮬레이션 조건을 바탕으로, 연계용 변압기의 결선방식에 따른 CMV의 특성을 나타내면 그림 10과 같다. 여기서, 그림 10(a)와 같이 연계용 변압기의 결선방식이 Δ -Y인 경우, CMV는 1,107[V]로 산정되며, 이 값을 NMV로 환산하면 2,214[V]로 계산되므로, 전기설비기준의 절연레벨(정격전압 기준의 3배)을 초과하여, 배터리측의 절연성능에 심각한 악영향을 줄 가능성이 있음을 확인할 수 있다. 또한, 그림 10(b)와 같이 ESS DC 측에서 단락사고가 발생하는 경우, 개폐서지의 값이 CMV에 영향을 미쳐 최대 8.8[kV]로 산정되어 전기설비기준의 절연레벨을 초과하여, 배터리측의 절연성능에 심각한 악영향을 줄 가능성이 있음을 알 수 있다. 한편, 그림 10(c)와 같이 연계용 변압기의 결선방식이 Y- Δ 인 경우, CMV는 730[V]로 산정되는데, 이 값을 NMV로 환산하면 1,443[V]로 계산되므로, 전기설비기준의 절연레벨(정격전압의 3배, 2,100[V])을 초과하지 않는 것을 알 수 있다. 그러나, 그림 10(d)와 같이 ESS의 DC 측에서 단락사고가 발생하는 경우, CMV는 8.8[kV]로 산정되어 전기설비기준의 절연레벨을 초과하여 배터리측 절연성능에 심각한 악영향을 줄 수 있음을 알 수 있다.



(a) Δ-Y 결선방식

(b) 차단기 동작(Δ-Y)



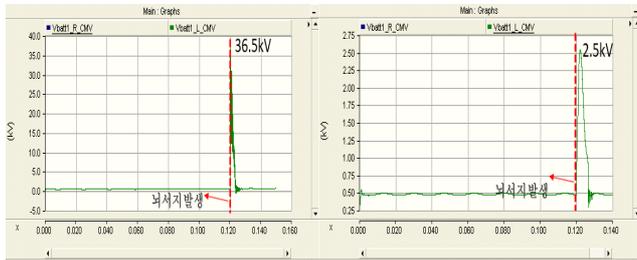
(c) Y-Δ 결선방식

(d) 차단기 동작(Y-Δ)

[그림 10] 결선방식 및 차단기 동작에 의한 CMV 특성

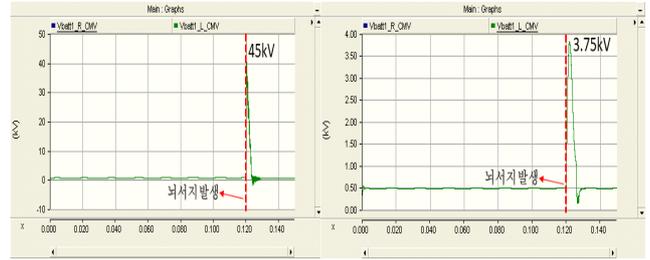
4.3 뇌서지에 의한 CMV 특성

상기의 시뮬레이션 조건을 바탕으로, 뇌서지에 의한 CMV 특성을 나타내면 그림 11과 같다. 여기서, 그림 11(a)와 같이 연계용 변압기의 결선방식이 Δ-Y인 경우, CMV는 36.5[kV]로 산정되며, 배터리측의 절연성능에 심각한 악영향을 줄 가능성이 있음을 확인할 수 있지만, 그림 11(b)와 같이 SPD가 설치되어 CMV의 크기가 2.5[kV]로 크게 감소함을 알 수 있다. 한편, 그림 11(c)와 같이 연계용 변압기의 결선방식이 Y-Δ인 경우, CMV는 45[kV]로 산정되어 전기설비기준의 절연레벨을 초과하여 배터리측 절연성능에 심각한 악영향을 줄 수 있음을 알 수 있으며, 그림 11(d)와 같이 SPD가 설치되면 CMV 크기를 3.75[kV]로 감소시킬 수 있음을 알 수 있다. 따라서, 뇌서지 유입시 SPD에 의해 배터리를 보호할 수 있음을 알 수 있다.



(a) Δ-Y 결선방식(SPD X)

(b) Δ-Y 결선방식(SPD O)



(c) Y-Δ 결선방식(SPD X)

(d) Y-Δ 결선방식(SPD O)

[그림 11] 뇌서지 및 SPD에 의한 CMV 특성

5. 결론

본 논문에서는 ESS 연계변압기의 결선방식 및 차단기 동작과 뇌서지 유입에 따른 CMV 발생 메커니즘을 제시하고, PSCAD/ EMTDC를 이용하여 수용가의 수 배전설비부, PCS부, 배터리부, 뇌서지 발생장치부, 등으로 구성된 ESS의 CMV 특성 모델링을 수행한다. 이를 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, ESS 연계 변압기의 결선방식이 Δ-Y인 경우, CMV 값이 전기설비기준의 절연레벨을 초과하여, 배터리측의 절연레벨에 악영향을 줄 가능성이 있음을 알 수 있고, 단락 사고에 의해 차단기가 동작하면 상당한 CMV가 발생함을 알 수 있다. 한편, 결선방식이 Y-Δ인 경우, 배터리 측 CMV가 절연레벨을 만족하지만, 차단기 동작에 의한 CMV는 배터리에 악영향을 미칠 가능성이 있다. 또한, 뇌서지가 유입하는 경우, 상당한 CMV가 발생하지만, SPD를 이용하여 이를 저감시킬 수 있음을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구(No.20206910100090, No.20213030160080)로서, 관계부처에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Woo-Hyun 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.