

Sharing용 ESS의 연계변압기 결선방식에 의한 CMV 발생 메커니즘에 관한 연구

조성덕^{*,**}, 이후동^{*}, 태동현^{*}, 광충근^{*}, 노대석^{*}
*한국기술교육대학교 전기공학과
**한국폴리텍대학교 전기제어과
e-mail:dlwkd@kopo.ac.kr

CMV Mechanism for Winding Connection Type of Grid-connected Transformer in Sharing ESS

Sung-Duck Cho^{*,**}, Hu-Dong Lee^{*}, Dong-Hyun Tae^{*}, Chung-Guen Kwak^{*}, Dae-Seok Rho^{*}
^{*}Dept. of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education
^{**}Dept. of Electrical Control, Korea Polytechnics

요약

최근, 전기자동차의 폐배터리를 재활용한 Sharing용 ESS 서비스 실증사업이 진행되고 있는데, 이러한 Sharing용 ESS는 빈번하게 이동하여 수용가 계통에 연계되므로 CMV를 포함한 전기적 위해요인의 안전성에 대한 검토가 요구되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 Sharing용 ESS를 대상으로 변압기 결선방식에 따른 IGBT 스위칭에 의한 CMV와 사고차단을 위한 보호기기의 동작에 의한 CMV 발생 메커니즘을 제시한다. 이를 바탕으로, 배전계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 수용가의 수·배전설비부, PCS부, 배터리부, CMV부 등으로 구성된 Sharing용 ESS의 CMV 모델링을 수행하고, 변압기 결선방식에 따라 IGBT 스위칭 및 보호기기의 동작에 의한 CMV특성을 평가한다. Sharing용 ESS의 변압기 결선방식에 따라 CMV 특성을 분석한 결과, ESS용 변압기의 결선방식이 Δ -Y인 경우, CMV 값이 전기설비기준의 절연레벨을 초과하여, 배터리측의 절연레벨에 악영향을 줄 가능성이 있음을 알 수 있었다. 한편, 결선방식이 Y- Δ 인 경우, 배터리 측 절연레벨을 만족하는 CMV값으로 저감시킬 수 있음을 알 수 있었다.

1. 서론

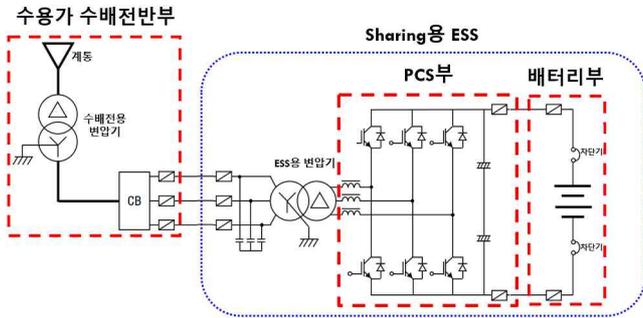
최근, 향후 다량의 폐배터리 처리 문제를 해결하기 위한 방안 중 하나로, 전기자동차의 폐배터리를 재활용한 이동형 Sharing용 ESS 서비스 실증사업이 진행되고 있다. 폐배터리를 이용한 Sharing용 ESS 서비스는 전력사용량 편차가 큰 중소건물(또는 사업장)들이 ESS를 공유하여, 필요한 시기에 ESS의 충·방전 운전을 통해 고객에게 전력사용량 요금 절감 효과를 제공하고, 전력계통 수요의 안정화에 기여할 목적으로 도입된 개념이다. 하지만, 이를 상용화하기 위해서는 이동하며 빈번하게 계통에 연계되는 Sharing용 ESS의 특성상 ESS설비와 작업자에 대한 안전성의 확보가 필수적으로 요구되고 있다. 또한, 현재까지(~2021.5) 총 31건의 ESS의 화재사고가 보고되고 있으며, 이에 따라 정부는 2차에 걸쳐 사고조사를 시행하여 화재사고에 대한 원인을 추정하였고, 그 중에서 전기적인 위해요인으로 공통모드전압(CMV: common mode voltage)이 주요 원인 중 하나로 평가되고 있다. 이러한 CMV는 ESS의 배터리 측 절연레벨에 심각한 악영향을 줄 가능성이 있으므로, Sharing용 ESS를 안전성을 확보하기 위하여, 운용 시 발생할 수 있는 CMV 현상에 대한 정확한 분석이 요구되어진다. 따라서, 본 논문에서는 Sharing용 ESS를 대상으로 연계변압기의 결선방식에 따른 IGBT 스위칭에 의한

CMV와 사고차단을 위한 보호기기의 동작에 의한 CMV 발생 메커니즘을 제시한다. 이를 바탕으로, 배전계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 수용가의 수·배전설비부, PCS부, 배터리부, CMV부 등으로 구성된 Sharing용 ESS의 CMV 모델링을 수행하고, 연계변압기의 결선방식에 따라 IGBT 스위칭 및 보호기기의 동작에 의한 CMV특성을 평가한다. 제안한 모델링을 바탕으로 Sharing용 ESS의 연계변압기의 결선방식에 따라 CMV 특성을 분석한 결과, Sharing용 ESS 연계변압기의 결선방식이 Δ -Y인 경우, CMV 값이 전기설비기준의 절연레벨을 초과하여, 배터리측의 절연레벨에 악영향을 줄 가능성이 있음을 알 수 있었다. 또한, 결선방식이 Y- Δ 인 경우, 배터리 측 절연레벨을 만족하는 CMV값으로 저감시킬 수 있음을 알 수 있어, 본 논문에서 제시한 모델링 방안이 유효함을 확인하였다.

2. Sharing용 ESS의 CMV 발생 메커니즘

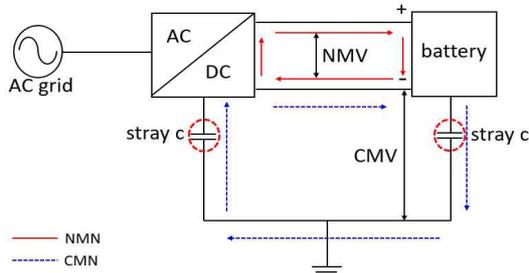
2.1 CMV의 특성

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



[그림 1] Sharing용 ESS의 구성도

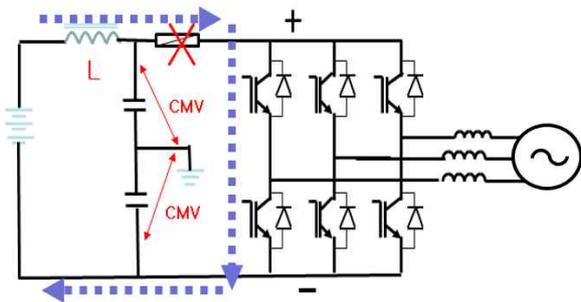
PCS부의 IGBT는 전력변환을 목적으로 5~10[kHz]의 고주파수 스위칭 동작을 하며, CMN(common mode noise)과 NMN(normal mode noise)이라는 노이즈가 발생한다. CMN의 전압 형태인 CMV와 NMN의 전압 형태 NMV(normal mode voltage)는 그림 2와 같이 나타난다. 여기서, NMN은 배터리 양극 사이의 전압이고, CMV는 배터리의 (+)극과 접지 사이 및 (-)극과 접지 사이에 발생하는 전압이다.



[그림 2] 노이즈 발생 메커니즘의 개념도

2.2 보호기기 동작에 의한 CMV 발생 메커니즘

Sharing용 ESS 동작 중 PCS 내의 IGBT가 과손되어 단락 전류가 발생한 후 Fuse가 끊어지는 과정에서 발생하는 di/dt가 배터리와 PCS 사이 직류전로의 기생 인덕턴스와 결합하여 과도전압을 발생시킨다. 이 전압이 Normal Mode로 발생한 후 아래 그림 3과 같이 배터리의 기생 커패시턴스에 의해 약 1/2로 분압된 전압이 P-G 및, N-G 간에 CMV로 나타날 수 있다.

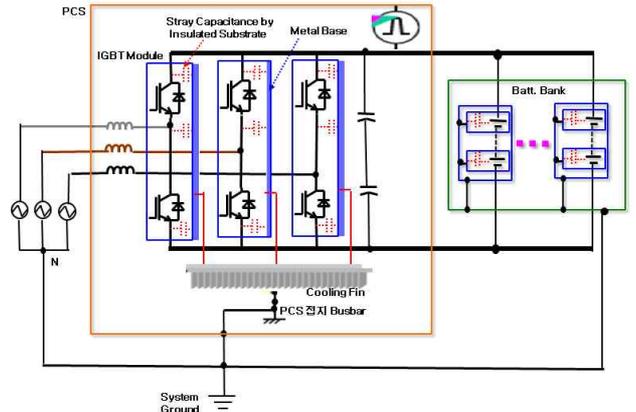


[그림 3] Sharing용 ESS에서의 CMV 측정위치

2.3 IGBT Switching에 의한 CMV 발생 메커니즘

Sharing용 ESS의 PCS에서 IGBT의 도전부와 외함 사이에

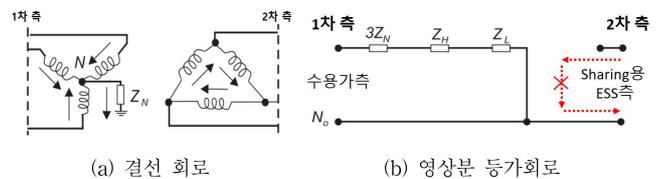
기생 커패시턴스가 형성되며, 배터리 측에서도 DC측의 P, N 전극과 외함 사이에서 기생 커패시턴스가 발생되는데 이를 등가회로로 표시하면 그림 4와 같다. 이 그림에서와 같이, Sharing용 ESS에서 수용가 측으로 전력을 공급하면 PCS 내 IGBT의 Switching 동작 중에 발생하는 dv/dt에 의해 CMV가 생성된 후 배터리의 전극과 외함 사이에 전압으로 나타나게 된다.



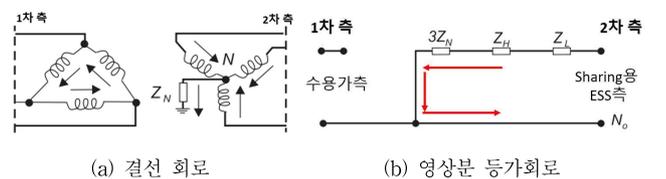
[그림 4] PCS와 리튬이온배터리의 기생 커패시턴스 등가회로

2.4 변압기 결선방식에 의한 CMV 발생 메커니즘

일반적으로 ESS가 설치되어 있는 수용가의 연계용 변압기는 분산전원연계기준에 따라 Y-Δ결선방식을 채용해야 하지만, 일부 ESS가 설치된 수용가들은 기존의 Δ-Y 결선방식을 적용하고 있다. 그림 5와 그림 6은 각각 Y-Δ 결선 및 Δ-Y 결선방식의 결선회로와 영상분 등가회로를 나타낸 것이다. 여기서, 그림 5(a)는 변압기의 결선회로이고, 그림 5(b)는 Y-Δ 결선방식에 의한 영상분 등가회로를 나타낸 것으로, 2차측은 Δ결선으로 인하여 Sharing용 ESS측에 영상분 회로가 형성되지 않음을 알 수 있다. 또한, 그림 6(b)와 같이 Δ-Y 결선방식에서는 2차측의 Y결선으로 인하여 Sharing용 ESS측에 영상분 회로가 형성되어 CMV가 발생할 수 있음을 알 수 있다.



[그림 5] Y-Δ 결선방식의 영상분 등가회로

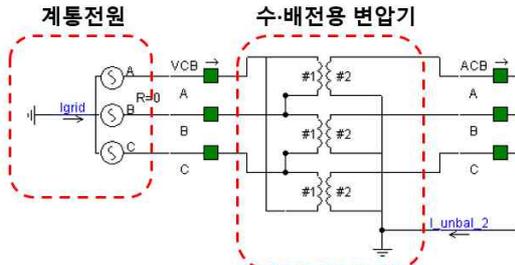


[그림 6] Δ-Y 결선방식의 영상분 등가회로

3. PSCAD/EMTDC에 의한 Sharing용 ESS의 CMV 모델링

3.1 수용가의 수·배전설비부 모델링

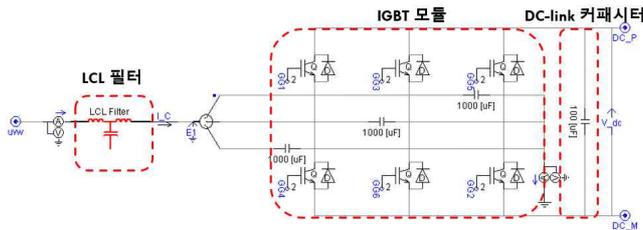
수용가의 계통전원, VCB 및 ACB, 수·배전용 변압기로 구성된 수·배전설비부를 PSCAD/EMTDC를 이용하여 모델링하면, 그림 7과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 수·배전용 변압기는 Δ -Yg결선방식을 사용하며, 변압비는 22.9kV/380V이고, 2차측은 3상 4선식 저압 배전선로로 구성된다.



[그림 7] 수·배전설비부의 모델링

3.2 PCS부 모델링

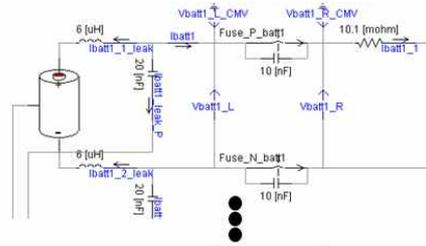
배터리의 충·방전 기능을 가진 PCS는 그림 8과 같이, LCL 필터, IGBT 모듈, DC-Link 커패시터 등으로 구성된다. 여기서, LCL 필터는 AC 전원의 고조파 및 노이즈를 제거하는 역할을 수행하며, IGBT 모듈은 DC 전원을 120° 위상차를 갖는 3상 AC로 변환하며, DC-Link 커패시터는 IGBT의 스위칭 동작에 의한 DC측의 전압을 안정시키는 역할을 수행한다.



[그림 8] PCS부의 모델링

3.3 배터리부 모델링

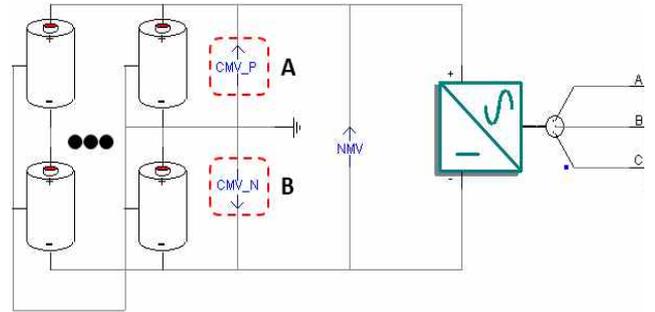
PSCAD/EMTDC를 이용하여 배터리 랙 및 DC전로를 모델링하면, 그림 9와 같이 나타낼 수 있다. 이 그림에서와 같이, 배터리 랙은 배터리와 퓨즈로 구성되고, DC전로는 DC 차단기와 전로로 구성된다. 여기서, 배터리는 내부 임피던스와 기생 커패시턴스, 전압원으로 구성되며, 배터리의 내부 임피던스는 150[mΩ], 기생커패시턴스는 20[nF], 전체 배터리 부 용량은 2[MWh]로 상정한다. 또한, 배터리 부는 13개의 배터리 랙을 병렬로 구성하며, 1번 랙을 제외한 2~13번 랙은 하나의 랙으로 등가화 시킨다.



[그림 9] 배터리부의 모델링

3.4 배터리 부 CMV 모델링

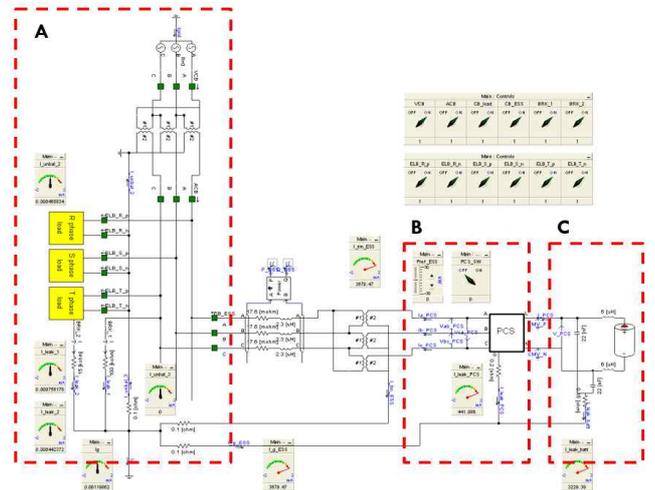
배터리 부의 CMV 모델링은 PSCAD/EMTDC를 사용하여 그림 10과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, PCS는 실 계통 사이트와 동일하게 수용가 연계용 변압기의 Y결선을 접지하며, (+)단자 CMV의 모델링은 그림 10의 A와 같이 접지선과 배터리의 양극 사이의 전압으로 나타내고, (-)단자 CMV 모델링은 그림 10의 B와 같이 접지선과 배터리의 음극 사이의 전압으로 나타낸다.



[그림 10] 배터리부 CMV 모델링

3.5 전체 시스템 모델링

상기의 내용을 종합하여, 전체 시스템을 모델링하면 그림 11과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 그림 11의 A부분은 수용가의 수·배전용 변압기부를 나타내고, B부분은, IGBT 등으로 구성된 PCS부, C부분은 배터리 랙과 DC전로로 구성된 배터리 부를 나타낸다.



[그림 11] 전체 시스템 모델링

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 시뮬레이션 조건

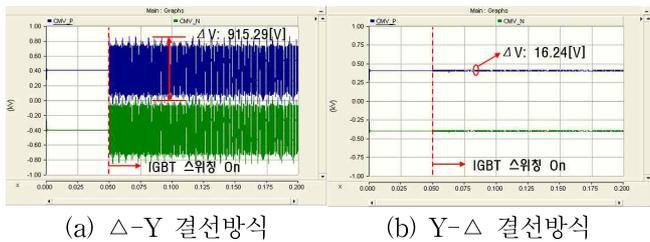
Sharing ESS용 연계변압기의 접지유무에 따른 CMV의 특성을 확인하기 위하여, 배터리의 기생 커패시턴스, 배터리의 전압, 연계변압기, PCS 스위칭 주파수 등의 시뮬레이션 조건을 상정하면 표 1과 같다. 여기서, 배터리 부의 전압은 800[V]이고, 배터리의 기생 커패시턴스는 13개의 락에 대하여, 1락당 20[nF]을 상정하며, ESS용 변압기는 Δ -Y결선 및 Y- Δ 결선방식과 380/380[V]의 변압비를 고려하고, PCS의 스위칭 주파수는 10[kHz]를 상정한다.

[표 1] 시뮬레이션 조건

항 목	내 역
배터리부의 기생 커패시턴스	20nF
배터리 공칭전압	800V DC
Sharing용 ESS의 연계변압기	380/380V
PCS의 스위칭 주파수	10kHz

4.2 연계변압기 결선방식에 의한 CMV 특성분석

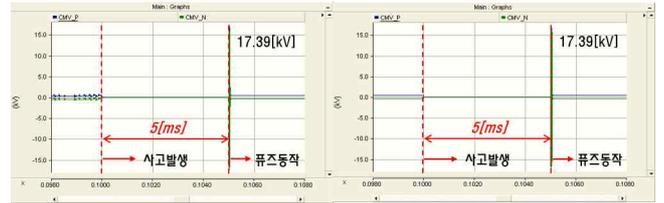
상기의 시뮬레이션 조건을 바탕으로, 연계변압기의 결선방식이 Δ -Y인 경우에 대하여, IGBT 스위칭에 의한 CMV의 특성을 나타내면 그림 12와 같다. 그림 12(a)에서와 같이, CMV는 847[V], ΔV 는 915.3[V]가 산정되는데, 이 값을 NMV로 환산하면, 1,694[V]가 산정되어 전기설비기준의 절연레벨(정격전압의 3배, 1,200[V])을 초과하여, 배터리측의 절연레벨에 심각한 악영향을 줄 가능성이 있음을 확인하였다. 한편, 연계변압기의 결선방식이 Y- Δ 인 경우에 대하여, IGBT 스위칭에 의한 CMV의 특성을 나타내면 그림 12(b)와 같다. 이 그림에서와 같이 CMV는 408[V], ΔV 는 16.2[V]가 산정된다. 따라서, Sharing용 ESS의 연계변압기의 결선방식이 Y- Δ 인 경우, CMV 및 ΔV 가 크게 감소하여 전기설비기준의 절연레벨도 만족함을 알 수 있었다.



[그림 12] 결선방식별 IGBT 스위칭에 의한 CMV 특성

한편, Sharing용 ESS 연계변압기의 결선방식이 Δ -Y인 경우에 대하여, 보호기기 동작에 의한 CMV의 특성을 나타내면 그림 13과 같다. 그림 13(a)와 그림 13(b)에서와 같이, 0.1초에 사고가 발생한 경우, 보호기기는 5ms 이후에 동작하여 사고전류의 차단으로 인해 17.4kV의 CMV가 동일하게 발생함을 알 수 있다. 따라서, 보호기기 동작에 의한 CMV 특성은 Sharing용 ESS의 연계변압기 결선방식에 영향을 받지 않음

을 확인하였다.



(a) Δ -Y 결선방식 (b) Y- Δ 결선방식

[그림 13] 결선방식별 보호기기 동작에 의한 CMV 특성

5. 결 론

본 논문에서는 Sharing용 ESS를 대상으로 IGBT 스위칭에 의한 CMV와 사고차단을 위한 보호기기의 동작에 의한 CMV 현상을 분석하고 Sharing용 ESS 연계변압기의 결선방식에 따른 CMV 발생 메커니즘을 제시하고, PSCAD/EMTDC를 이용하여 수용가의 수·배전설비부, PCS부, 배터리부, CMV부 등으로 구성된 Sharing용 ESS의 CMV 모델링을 수행한다. 또한, Sharing용 ESS의 연계변압기 결선방식에 따라 CMV 특성을 분석한 결과, Sharing용ESS 연계 변압기의 결선방식이 Δ -Y인 경우, CMV 값이 전기설비기준의 절연레벨(DC 정격전압의 3배)을 초과하여, 배터리측의 절연레벨에 악영향을 줄 가능성이 있음을 알 수 있다. 한편, 결선방식이 Y- Δ 인 경우, 배터리 측 절연레벨을 만족하는 CMV값으로 저감시킬 수 있어, 본 논문에서 제시한 모델링 방안이 유효함을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구(No.20206910100090)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.
- [2] Jong-Choon Kim, "Activation Plan for Electrical Vehicle," Journal of the Korean Society of Automotive Engineers, vol. 37, no. 3, pp. 57-61, 2015.
- [3] Hee-Eun Kang, "Expansion Plan of Eco-friendly Electrical Vehicle for 'Top 3 Cities of Global Electrical Vehicle in 2018,'" Journal of the Korean Society of Automotive Engineers, vol. 37, no. 1, pp. 57-62, 2015.