

Sharing용 ESS에 있어서 CMV 저감을 위한 공통모드 필터의 운용방안에 관한 연구

조성덕, 김경화, 이민행, 원종홍, 노대석
한국기술교육대학교*
e-mail:sheengun@koreatech.ac.kr

A Study on Operation Method for Common Mode Filter to Mitigate CMV in Shairng ESS

Sung-Duck Cho, Kyung-Hwa Kim, Min-Haeng Lee, Jong-Heung Won, Dae-Seok Rho
Korea University of Technology and Education

요 약

최근, 전기자동차의 폐배터리를 재활용한 Sharing용 ESS 서비스 실증사업이 활발하게 진행되고 있는데, 이러한 Sharing용 ESS는 빈번하게 이동하여 수용가 계통에 연계되므로 CMV를 포함한 전기적 위해 요인의 안전성에 대한 대응 방안이 요구되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 Sharing용 ESS의 CMV 발생 메커니즘을 제시하고, CMV 저감용 공통모드 필터의 운용방안을 제시한다. 또한, 제시한 공통모드 필터의 운용특성을 평가하기 위하여, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 수용가의 수배전설비부, PCS부, 배터리부, 공통모드 필터부 등으로 구성된 Sharing용 ESS의 모델링을 수행한다. 이를 바탕으로, 공통모드 필터의 유무에 따른 CMV특성 시험을 수행한 결과, 공통모드 필터가 설치되지 않은 경우, CMV가 전기설비기준의 절연레벨을 초과하여 배터리 측 절연성능에 악영향을 줄 수 있지만, 공통모드 필터를 운용할 경우, 배터리측에서 발생하는 CMV를 효과적으로 감소시켜, 본 논문에서 제시한 CMV 저감용 공통모드 필터 운용방안의 유용성을 알 수 있었다.

1. 서 론

최근, 전기자동차의 보급에 따라 발생하는 폐배터리 처리 문제를 해결하기 위하여, 전기자동차의 폐배터리를 재활용한 이동형 Sharing용 ESS 서비스 실증사업이 활발하게 진행되고 있다[1]. 여기서, 폐배터리를 이용한 Sharing용 ESS 서비스는 전력사용량 편차가 큰 중소건물(또는 사업장)들이 ESS를 공유하여, 필요한 시기에 ESS의 충·방전 운전을 통해 고객에게 전력사용량의 요금절감 효과를 제공하고, 전력계통 수요의 안정화에 기여할 목적으로 도입된 개념이다. 하지만, 이런 비즈니스모델을 상용화하기 위해서는 이동하며 빈번하게 계통에 연계되는 Sharing용 ESS의 특성상, ESS설비와 작업자에 대한 안전성의 확보가 필수적으로 요구되고 있다. 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 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 평가가 요구된다. 따라서, 본 논문에서는 CMV 저감용 공통모드 필터의 운용방안을 제시하고, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 수용가의 수배전설비부, PCS부, 배터리부, 공통모드 필터부 등으로 구성된 Sharing용 ESS의 모델링을 수행한다. 또한, 제시한 모델링을 바탕으로, 공통모드 필터의 유무에 따른 CMV특성시험을 수행한 결과, 공통모드 필터가 설치되지 않았을 경우, CMV의 최대값이 배터리 최대전압을 초과하여 배터리 측 부품의 절연 성능에 악영향을 줄 수 있지만, 공통모드 필터를 설치하면 배터리측의 CMV를 저감할 수 있어, 제시한 공통모드 필터의 운용방안이 효과적임을 알 수 있었다.

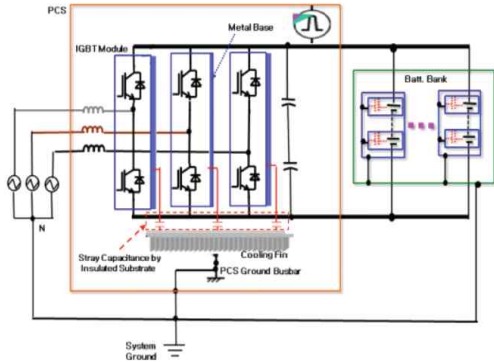
2. Sharing용 ESS의 CMV 발생 메커니즘

Sharing용 ESS의 PCS에서 IGBT의 도전부와 방열판(외함) 사이에 기생 커패시턴스가 존재하며, 배터리 측에서도 전극(+,-)과 외함 사이에 기생 커패시턴스가 발생하는데 이를 등가적으로 나타내면 그림 1과 같다. 이 그림에서와 같이,

Sharing용 ESS에서 수용가 측으로 전력을 공급하면 PCS 내 IGBT의 스위칭 동작 중에 발생하는 dv/dt와 기생커패시턴스에 의해 식 (1)과 같이 합성 CMV가 생성된다.

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

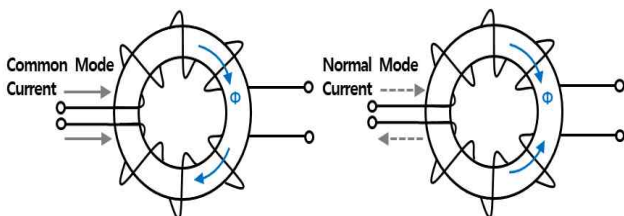
where, $V_{T-CMV}(t)$: total of CMV, V_{AC} : AC element, $V_{SW}(t)$: switching element, $V_{DC}(t)$: DC element



[그림 1] Sharing용 ESS의 CMV 발생 메커니즘

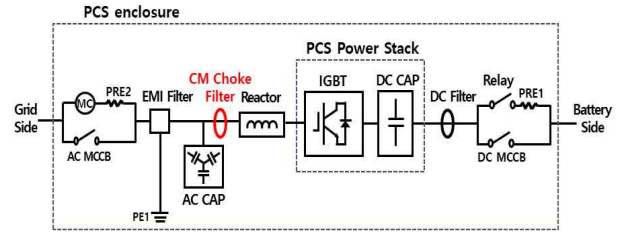
3. CMV 저감용 공통모드 필터의 운용방안

공통모드 노이즈는 PCS IGBT의 고속스위칭으로 인한 높은 dv/dt, di/dt와 전원 라인 및 접지(GND) 사이에 존재하는 기생 커패시턴스에 의해 필연적으로 발생하며, 노이즈 전류는 DC-link의 P선(+), N선(-)과 동일한 방향으로 접지를 통해 흐른다. 이러한 공통모드 노이즈를 제한하는 공통모드 필터의 기본 원리는 그림 2와 같다. 하나의 코일에 전원 라인을 동일한 방향으로 감아서 접지에 대하여 전원 라인이 서로 대칭이 되므로 코일을 순환하는 동일한 극성의 자속이 2배의 크기를 가지며, 이 결과로 공통모드 노이즈 전류 경로의 임피던스를 높여 흐름을 제한한다. 반대로 P(+선과 N(-)선 경로의 차동 모드 전류는 코일을 통하여 서로 반대 방향으로 흐르고 이는 같은 크기와 반대 극성의 자속을 생성함으로써 상쇄되며, 이 결과로 노멀모드 전류에 대하여 0의 임피던스를 가지게 되어서 감쇄 없이 전류를 통과시킨다.



[그림 2] 공통모드 필터의 기본 원리

상기의 개념을 바탕으로, 공통모드 필터는 그림 3과 같이 Sharing용 ESS의 PCS 내부의 EMI 필터 및 AC CAP과 PCS 전원스택 사이에 설치하여 운용한다. 하지만, 공통모드 필터를 잘못 설계하였을 경우, PCS 내부의 커패시터 성분에 따라 공진현상이 발생하여, 공통모드 필터를 설치하기 전보다 더 큰 CMV가 발생할 수 있으므로, 이러한 문제에 대한 고려가 필요하다.

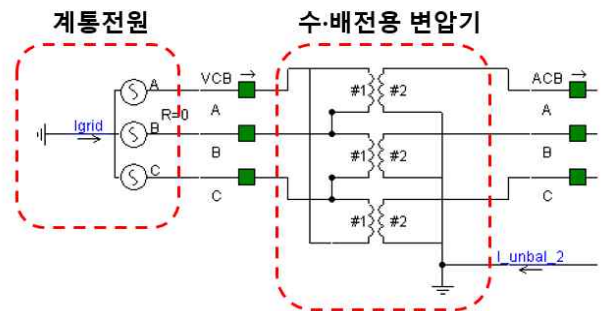


[그림 3] 공통모드 필터의 운용방안

4. PSCAD/EMTDC에 의한 Sharing용 ESS의 CMV 모델링

4.1 수용가의 수·배전설비부

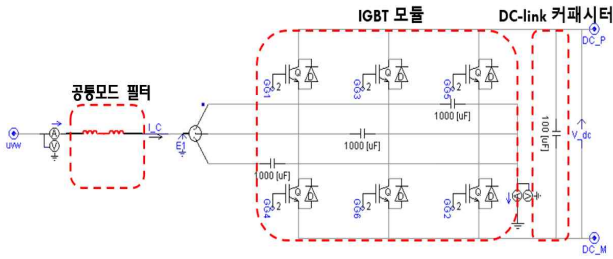
수용가의 계통전원, VCB 및 ACB, 수·배전용 변압기로 구성된 수·배전설비부를 PSCAD/EMTDC를 이용하여 모델링 하면, 그림 4와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 수·배전용 변압기는 Δ -Yg결선방식을 사용하며, 변압비는 22.9kV/380V이고, 2차측은 3상 4선식 저압 배전선로로 구성된다.



[그림 4] 수·배전설비부의 모델링

4.2 PCS부

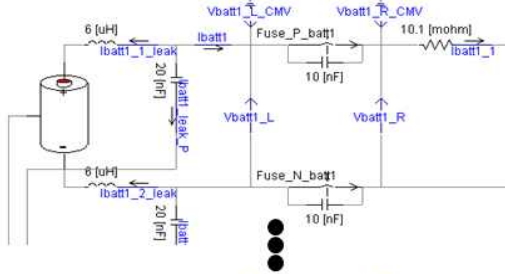
배터리의 충·방전 기능을 가진 PCS는 그림 5와 같이, LCL 필터, IGBT 모듈, DC-Link 커패시터 등으로 구성된다. 여기서, 공통모드 필터는 기생커패시턴스를 통해 유입되는 CMV를 제거하는 역할을 수행하며, IGBT 모듈은 DC 전원을 120° 위상차를 갖는 3상 AC로 변환하며, DC-Link 커패시터는 IGBT의 스위칭 동작에 의한 DC축의 전압을 안정시키는 역할을 수행한다.



[그림 5] PCS부의 모델링

4.3 배터리부

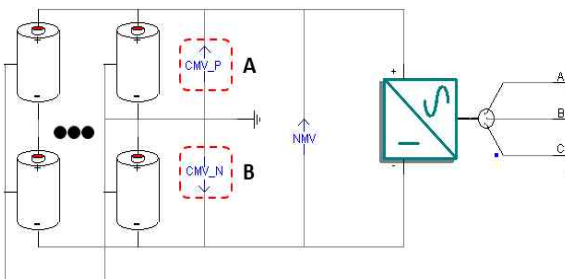
PSCAD/EMTDC를 이용하여 배터리 랙 및 DC전로를 모델링하면, 그림 6과 같이 나타낼 수 있다. 이 그림에서와 같이, 배터리 랙은 배터리와 퓨즈로 구성되고, DC전로는 DC 차단기와 전로로 구성된다. 여기서, 배터리는 내부 임피던스와 기생 커패시턴스, 전압원으로 구성되며, 배터리의 내부 임피던스는 150[mΩ], 기생커패시턴스는 20[nF], 전체 배터리부 용량은 2[MWh]로 상정한다. 또한, 배터리 부는 13개의 배터리 랙을 병렬로 구성하며, 1번 랙을 제외한 2~13번 랙은 하나의 랙으로 등가화 시킨다.



[그림 6] 배터리부의 모델링

4.4 배터리부 CMV

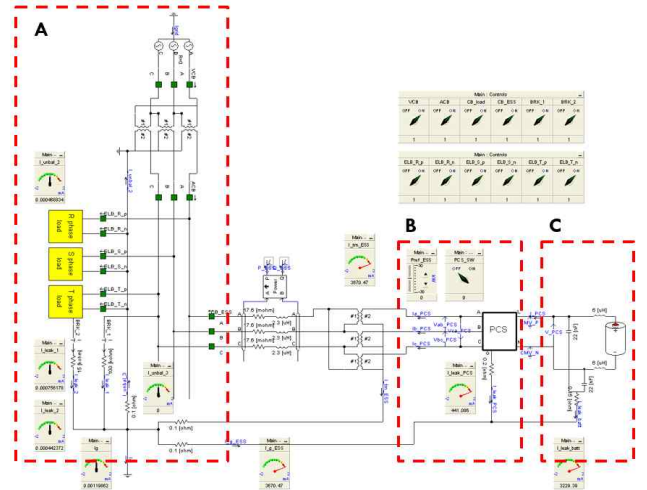
배터리부의 CMV 모델링은 PSCAD/EMTDC를 사용하여 그림 7과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, PCS는 실 계통 사이트와 동일하게 수용가 연계용 변압기의 Y결선을 접지하며, (+)단자 CMV의 모델링은 그림 7의 A와 같이 접지선과 배터리의 양극 사이의 전압으로 나타내고, (-)단자 CMV 모델링은 그림 7의 B와 같이 접지선과 배터리의 음극 사이의 전압으로 나타낸다.



[그림 7] 배터리부 CMV 모델링

4.5 전체 시스템

상기의 내용을 종합하여, 전체 시스템을 모델링하면 그림 8과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 그림 8의 A부분은 수용가의 수·배전용 변압기부를 나타내고, B부분은 IGBT등으로 구성된 PCS부, C부분은 배터리 랙과 DC전로로 구성된 배터리 부를 나타낸다.



[그림 8] 전체 시스템 모델링

5. 시뮬레이션 결과 및 분석

5.1 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 700[V] 이고, 배터리의 기생 커패시턴스는 13개의 랙에 대하여, 1랙당 20[nF]을 상정하며, ESS용 변압기는 Δ-Y결선 방식과 380/380[V]의 변압비를 고려하고, PCS의 스위칭 주파수는 10[kHz]를 상정한다.

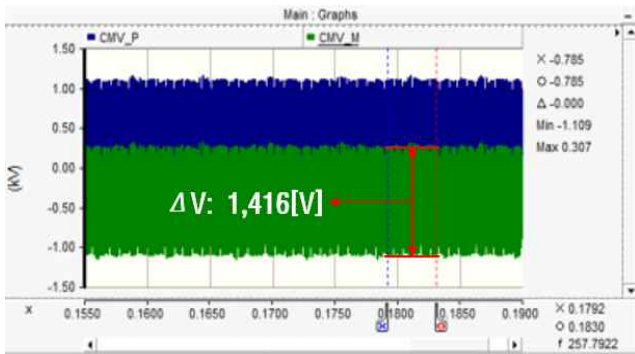
[표 1] 시뮬레이션 조건

항 목	내 역
배터리부의 기생 커패시턴스	0.5, 5 nF
배터리 공칭전압	700V DC
Sharing용 ESS의 연계변압기	380/380V
PCS의 스위칭 주파수	10kHz
공통모드 필터의 리액턴스	13 uH

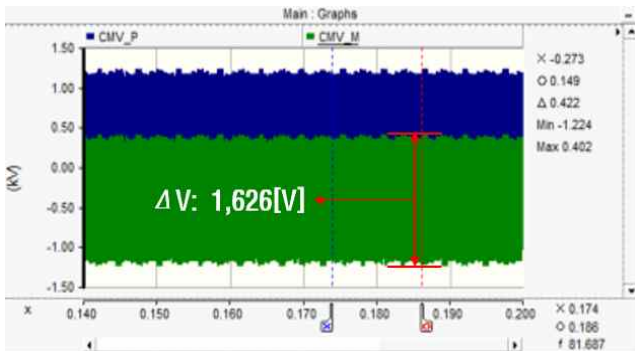
5.2 Sharing용 ESS의 CMV 특성

상기의 시뮬레이션 조건을 바탕으로, IGBT와 방열판 사이의 기생커패시턴스가 각각 0.5[nF], 5[nF]인 경우, IGBT 스위칭에 의한 CMV의 특성을 나타내면 그림 9와 같다. 여기

서, 그림 9(a)는 기생커패시턴스가 0.5[nF]인 경우를 나타내는데, 이때 CMV는 1,109[V], ΔV 는 1,416[V]로 산정되는 것을 알 수 있다. 한편, 그림 9(b)와 같이 기생커패시턴스가 5[nF]인 경우, CMV는 1,224[V], ΔV 는 1,626[V]로 산정된다. 따라서, Sharing용 ESS의 PCS에 설치된 IGBT와 방열판 사이의 기생커패시턴스가 증가할수록 IGBT 스위칭에 의한 CMV의 크기가 증가하는 것을 알 수 있다.



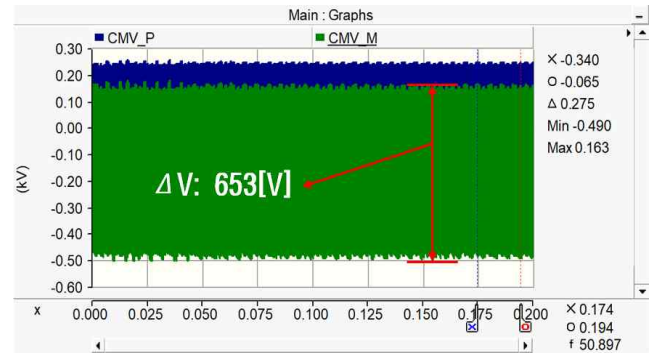
(a) 기생커패시턴스가 0.5[nF]인 경우



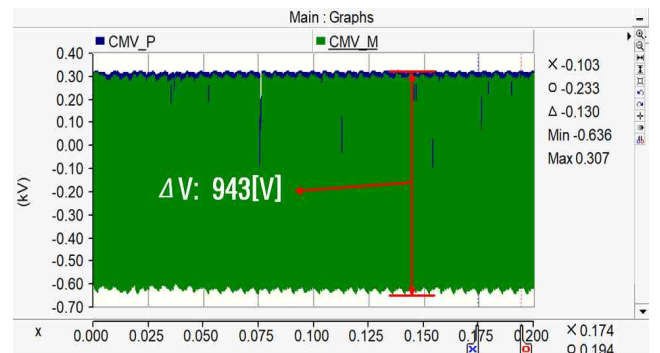
(b) 기생커패시턴스가 5[nF]인 경우
[그림 9] Sharing용 ESS의 CMV 특성

5.3 공통모드 필터를 적용한 Sharing용 ESS의 CMV 특성
상기의 시뮬레이션 조건을 바탕으로, IGBT와 방열판 사이의 기생커패시턴스가 각각 0.5[nF], 5[nF]인 경우, PCS에 공통모드 필터를 설치하여 CMV 특성에 대한 시뮬레이션을 수행하면 그림 10과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 그림 10(a)는 기생커패시턴스가 0.5[nF]인 경우를 나타내는데, 이때 CMV는 490[V], ΔV 는 653[V]로 산정되는 것을 알 수 있다. 즉, 공통모드 필터를 설치하여 Sharing용 ESS를 운용하였을 경우, 공통모드 필터를 설치하지 않은 경우에 비해 CMV가 619[V] 더 적게 발생하고, ΔV 는 763[V]로 감소하여 전기설비기준의 절연레벨을 만족하는 것을 알 수 있다. 또한, 그림 10(b)와 같이 기생커패시턴스가 5[nF]인 경우, CMV는 636[V], ΔV 는 943[V]로 되므로, 공통모드 필터를 설치하지 않은 경우에 비해, CMV는 588[V], ΔV 는 683[V] 감소하여 전기설비기준의 절연레벨을 만족하는 것을 알 수 있다. 따라서, Sharing용 ESS에서 발생하는 CMV

가 전기설비기준의 절연레벨을 초과하여, 배터리측의 절연 성능에 악영향을 줄 수 있는 경우, PCS에 공통모드 필터를 설치하여 운용하면 CMV를 효과적으로 감소시킬 수 있어, Sharing용 ESS의 배터리에서 발생할 수 있는 화재를 방지할 수 있는 방안이 될 수 있음을 확인하였다.



(a) 기생커패시턴스가 0.5[nF]인 경우



(b) 기생커패시턴스가 5[nF]인 경우

[그림 10] 공통모드 필터를 설치한 Sharing용 ESS의 CMV 특성

6. 결 론

본 논문에서는 CMV 저감용 공통모드 필터의 운용방안을 제시하고, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 수용가의 수배전설비부, PCS부, 배터리부. 공통모드 필터부 등으로 구성된 Sharing용 ESS의 모델링을 수행한다. 또한, 제시한 모델링을 바탕으로, 공통모드 필터의 유무에 따른 CMV 특성시험을 수행한 결과, 공통모드 필터가 설치되지 않았을 경우, CMV의 최대값이 배터리 최대전압을 초과하여 배터리 측 부품의 절연 성능에 악영향을 줄 수 있지만, 공통모드 필터를 설치하면 배터리측의 CMV를 저감할 수 있어, 제시한 공통모드 필터의 운용방안이 효과적임을 알 수 있었다.

참고문헌

[1] SNE Research, "Redox Flow Battery 최근 기술 동향 및 시장 전망(-2025)", Premium market reports, 2020.08.