

PSCAD/EMTDC를 이용한 Sharing용 ESS의 누설전류 모델링에 관한 연구

조정덕* **, 노대석*

*한국기술교육대학교 전기공학과

**한국폴리텍대학교 전기제어과

e-mail:dlwkd@kopo.ac.kr

A Study on Modeling of Leakage Current in Sharing ESS Using PSCAD/EMTDC

Sung-Duck Cho* **, Dae-Seok Rho*

*Dept. of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education

**Dept. of Electrical Control, Korea Polytechnics

요약

최근, 전기자동차의 폐배터리를 재활용한 이동형 Sharing용 ESS 서비스 실증사업이 활발하게 진행되고 있는데. 이러한 Sharing용 ESS는 이동하며 빈번하게 수용가 계통에 연계되므로, 안전성에 대한 검토가 필요하며, 특히 Sharing용 ESS의 대표적인 안전성 점검 항목으로 누설전류가 고려된다. 따라서, 본 논문에서는 수용가측 누설전류의 발생 메커니즘을 제시하고 이를 바탕으로, 배전계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 수용가 측 배전선로의 누설전류 및 부하불평형에 따른 누설전류 발생 메커니즘을 모델링하고, 누설전류의 특성을 평가한다. 상기의 모델링을 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, 수용가 측의 절연상태 및 접지저항의 크기, 부하불평형율에 따라 Sharing용 ESS의 PCS와 배터리 측으로 누설전류가 유입될 수 있음을 알 수 있었다.

1. 서론

최근, 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 것으로 기대된다[1]. 그러나, 현재 국내에서는 재활용 배터리를 이용한 ESS에 대한 시험 및 인증 절차가 존재하지 않고, 고정형으로 운용되는 ESS와는 달리, Sharing용 ESS는 이동하며 빈번하게 수용가 계통에 연계되므로, 안전성에 대한 검토가 요구되고 있다. 특히, Sharing용 ESS의 대표적인 안전성 점검 항목으로 누설전류가 고려되고 있다. Sharing용 ESS의 수용가 연계시 발생하는 누설전류는 수용가 측 전선로와 설비의 절연저항 감소로 인한 누설전류, 수용가 부하 불평형에 따른 누설전류로 구분된다. 이때, 설비 및 전로의 절연저항 감소로 인해 발생한 누설전류가 Sharing용 ESS와 연결된 접지선을 통해 ESS측으로 유입될 수 있다. 또한, 수용가 부하 불평형에 의한 누설전류는 불평형 부하로 인해 발생한 불평형 전류가 Yg- Δ 결선방식의 3각 철심이 적용된 Sharing용 ESS 연계형 변압기의 중성선을 통해 ESS로 유입되어 Sharing용 ESS의 운

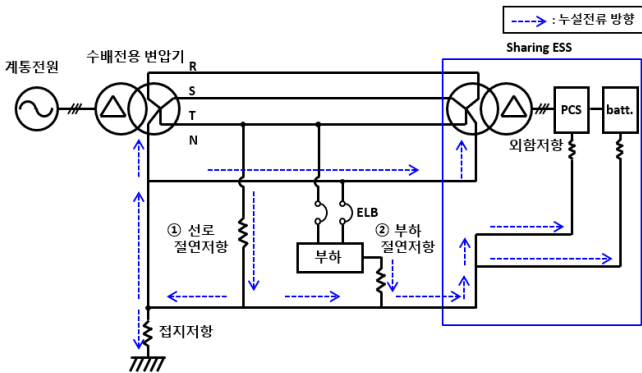
용상에 영향을 미칠 가능성이 있다. 따라서, 본 논문에서는 수용가 측 부하불평형에 의한 누설전류 발생 메커니즘 그리고 수용가 측의 선로 및 설비의 절연저항 감소로 인한 누설전류 발생 메커니즘을 제안한다. 이를 바탕으로, 배전계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 누설전류의 발생 메커니즘을 모델링하고, 수용가 부하불평형 전류, 수용가 측 절연저항 감소에 의한 누설전류의 특성을 평가한다. 상기의 모델링을 바탕으로 파라미터 분석에 의하여 시뮬레이션을 수행한 결과, 정상 운전 상태에서 부하불평형 전류로 인한 누설전류와 절연저항의 감소로 인한 누설전류가 Sharing용 ESS의 외함저항과 수용가 측의 접지저항의 비에 따라 ESS측으로 흐르는 누설전류의 크기가 결정되어 Sharing용 ESS에 안전성에 영향을 줄 수 있음을 확인하였다.

2. Sharing용 ESS의 누설전류 발생 메커니즘

2.1 절연성능 저하에 따른 누설전류

일반적으로, 절연성능 저하에 의한 누설전류는 그림 1과 같이 선로와 부하설비의 절연성능 저하로 발생할 수 있다. 먼저, 선로의 절연성능은 가설 시 전선피복의 손상이나 전선 접속부 및 전기기기 연결부의 노출에 의한 감소로 그림 1의 ①과 같이 누설전류가 발생할 수 있다. 또한, 전로로 사용되는 전선

은 장기간 사용 시, 사용 환경에 따라 열열화, 열변형, 오일이나 약품에 의한 열화, 내후성 열화, 저온 환경에서 균열이 생기는 등으로 인하여, 절연 성능이 저하될 수 있다. 한편, 그림 1의 ②와 같이 수용가 측 전기설비의 고장 및 취급 부주의로 인해 누설전류가 발생할 경우, 인체의 보호를 위하여 누전차단기가 동작하여야 하지만, 전기설비기술기준에 따라 30mA 이하의 정격감도전류에서는 동작하지 않으므로 항상 누설전류가 존재할 수 있다[2]. 이러한 누설전류는 수용가 측의 절연 상태와 부하불평형율에 따라, Sharing용 ESS에 유입될 수 있으므로 안전성에 영향을 미칠 수 있다.



[그림 1] 수용가측 절연성능 저하에 따른 누설전류 발생 메커니즘

2.2 수용가 부하불평형에 의한 누설전류

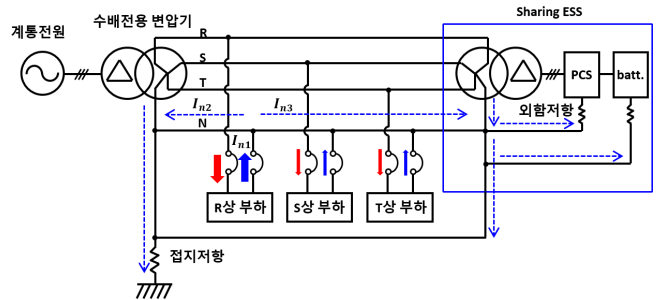
우리나라는 22.9[kV] 공통 중성선 다중접지 3상 4선식 방식을 채택하고 있는데, 이러한 방식은 단상 및 3상 부하 모두에 전력을 공급할 수 있지만, 단상부하에 의해 부하불평형이 발생할 수 있다. 이때 부하불평형률은 식 (1)과 같으며 전기안전관리자 직무고시에 따라 30%이하로 제한하고 있다[3].

$$\text{부하불평형률} = \frac{I_{max} - I_{min}}{\frac{1}{3}(I_R + I_S + I_T)} \times 100[\%] \quad (1)$$

여기서, I_{max} : 각 선간에 접속되는 단상부하 총설비용량의 최대값, I_{min} : 각 선간에 접속되는 단상부하 총설비용량의 최소값, I_R : R상에 전류값, I_S : S상에 전류값, I_T : S상에 전류값

특고압을 수전 받는 수용가용 주변압기는 대부분 Δ -Yg 또는 Δ - Δ 결선방식이 채용되고 있지만, Sharing용 ESS 연계용 변압기의 경우, 분산전원 연계 기준에 따라 Yg- Δ 방식 또는 Yg-Yg 결선방식을 사용하고 있다. 한편, 설치 비용의 문제점으로 변압기의 철심도 5각 철심이 아닌 3각 철심이 대부분 적용되고 있다. 따라서, 변압기 결선방식과 철심구조에 의하여, 부하불평형에 의해 발생하는 중성선 전류(I_{n1})는 그

림 2와 같이 Sharing용 ESS의 연계용 변압기(I_{n3})에 유입될 가능성이 있다. 이때, 전기설비기준에 따라 설치된 접지저항의 크기에 따라, 불평형 전류는 대지로 모두 흘러 들어가지 않고 PCS와 배터리의 외함으로 유입될 가능성이 있다. 즉, PCS 외함의 저항 및 수용가측 접지저항의 크기에 따라, 외함으로 흘러 들어가는 누설전류의 크기가 좌우됨을 알 수 있다.

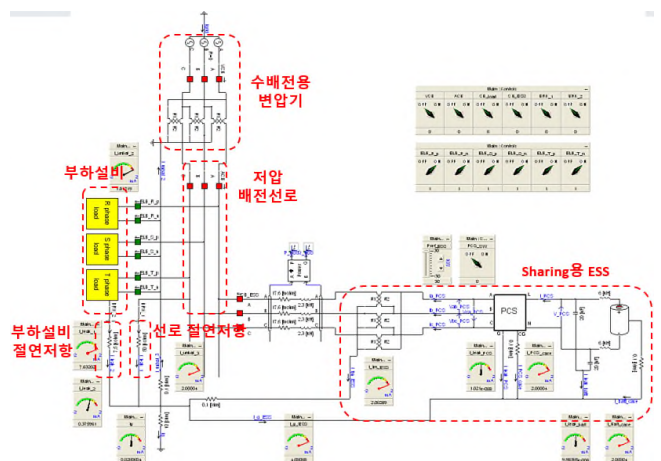


[그림 2] 수용가측 부하불평형에 따른 누설전류 발생 메커니즘

3. PSCAD/EMTDC에 의한 Sharing용 ESS의 수용가측 누설전류 특성 모델링

3.1 절연성능 저하에 의한 누설전류 모델링

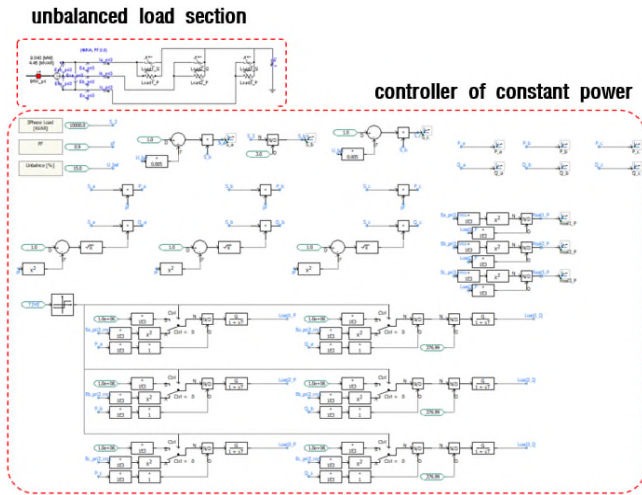
수용가측 배전선로 및 부하설비의 절연성능 저하에 의한 누설전류를 모의하기 위하여, Sharing용 ESS와 수용가측 배전계통을 PSCAD/EMTDC에 의하여 모델링하면 그림 3과 같이 나타낼 수 있다. 이 그림에서와 같이, 수용가 저압계통은 수배전용 변압기, 저압 배전선로 및 선로 절연저항, 부하설비 및 설비 절연저항 그리고 Sharing용 ESS로 구성된다. 여기서, 부하설비 절연저항은 어느 한 상의 부하설비의 절연성능 저하로 인하여 누전되어 누설전류가 발생하는 것을 모의한 것이고, 선로 절연저항은 전로의 열화 및 접속불량으로 인한 누설전류를 모델링한 것이다.



[그림 3] 수용가측 절연성능 저하에 의한 누설전류 모델링

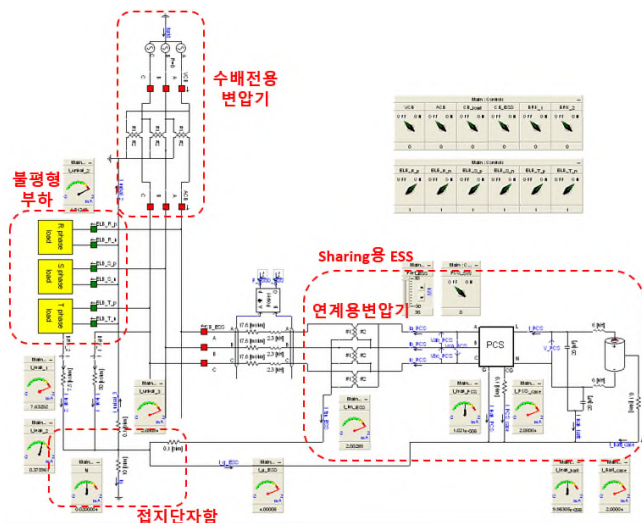
3.2 부하불평형에 의한 누설전류 모델링

수용가측 저압선로에서 3상 부하와 전류불평형 조건을 모의하기 위하여 수용가부하를 PSCAD/EMTDC에 의하여 모델링하면 그림 4와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 정전력 제어기는 정전력부하의 제어를 위하여, 부하의 순시값과 목표값을 부하의 편차에 대해, PI제어를 통해 목표값을 추종할 수 있다.



[그림 4] 전류불평형 부하 모델링

한편, 수배전용 변압기부, 불평형부하부, Sharing용 ESS 그리고 접지단자함으로 구성된 전체 시스템을 모델링하면 그림 5와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 수배전용 변압기부는 Δ -Yg결선방식의 3상 4선식 저압 배전선로로 구성하며, 불평형 부하부는 3상 정전력 부하와 불평형 부하 제어장치로 구성된다. 또한, Sharing용 ESS부는 Yg- Δ 결선방식의 연계용 변압기의 중성선과 ESS와 배터리 및 PCS의 외함 접지선으로 구성된다.



[그림 5] 수용가측 부하불평형에 의한 누설전류 모델링

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 시뮬레이션 조건

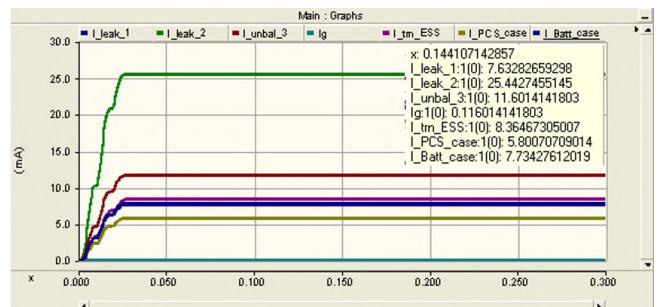
절연성능 저하 및 부하불평형에 의해 발생하는 누설전류의 특성을 분석하기 위하여, 표 1과 같이 시뮬레이션 조건을 설정한다. 여기서, 수배전용 변압기 용량은 500[kVA], 저압 배전선로의 절연저항은 50[Ω]과 100[Ω]을 적용하였으며, 부하설비의 불평형률은 전기안전관리자 직무고시 적합기준 최대값인 30[%]와 절반인 15[%], 수용가측 공통접지 저항은 1종 접지 기준의 최대값인 10[Ω]을 상정하며, 배터리와 PCS의 외함 저항은 각각 0.15[Ω]과 0.2[Ω]으로 상정한다.

[표 1] 시뮬레이션 조건

| 항목 | 파라미터 | |
|--------------|--------------|-----------|
| 수배전용 변압기 | 정격용량[kVA] | 500 |
| | 전압[kV] | 22.9/0.38 |
| 저압 배전선로 | 결선방식 | 3Φ4W |
| | 절연저항[kΩ] | 50, 100 |
| 부하설비 | 전류불평형률[%] | 15, 30 |
| | 절연저항[kΩ] | 7.5 |
| 누전차단기 | 정격감도전류[mA] | 30 |
| | 동작시간[s] | 0.03 |
| Sharing용 ESS | PCS 외함저항[Ω] | 0.2 |
| | 배터리랙 외함저항[Ω] | 0.15 |
| 접지 | 접지저항 | 10 |
| | 접지측 선로저항 | 0.1 |

4.2 절연성능 저하에 의한 누설전류 특성

상기의 시뮬레이션 조건을 바탕으로, 절연성능 저하에 의한 누설전류의 특성을 구하면 그림 6과 같다. 여기서 나타내는 값은 RMS값이며 Sharing ESS측 접지선을 타고 흐르는 누설전류가 PCS와 배터리 외함접지를 통해 유입됨을 알 수 있다. 그림 7에서 수용가 측 배전선로의 절연저항 값을 50[kΩ]을 적용하면 공통 접지측으로 0.12[mA]가 흐르며, 5.80[mA]는 PCS의 외함으로, 7.73[mA]는 배터리의 외함으로 유입된다. 한편, 수용가 측 배전선로의 절연저항 값을 100[kΩ]을 적용하면 공통 접지측으로 0.10[mA]가 흐르며 5.13[mA]는 PCS의 외함으로, 6.84[mA]는 배터리의 외함으로 유입됨을 알 수 있다.



[그림 6] 절연성능 저하에 의한 누설전류 특성(50[kΩ])

5. 결 론

본 논문에서는 Sharing용 ESS의 전기적 안전성 점검항목 중 하나인 누설전류 특성을 분석하기 위하여, 수용가 측에서 발생 할 수 있는 배전선로 절연저항 성능저하 및 부하 불평형에 의한 누설전류의 발생 메커니즘을 제시하고, PSCAD/EMTDC를 이용하여 누설전류를 모델링하고 시뮬레이션을 수행하였다. 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 배전선로의 절연성능 저하에 의한 누설전류는 수용가 측 공통접지와 변압기 내부 임피던스, Sharing용 ESS측 연계용 변압기 내부 임피던스와 PCS 및 배터리 외함접지의 비율에 따라 분산 되어 유입 될 수 있음을 확인하였다.

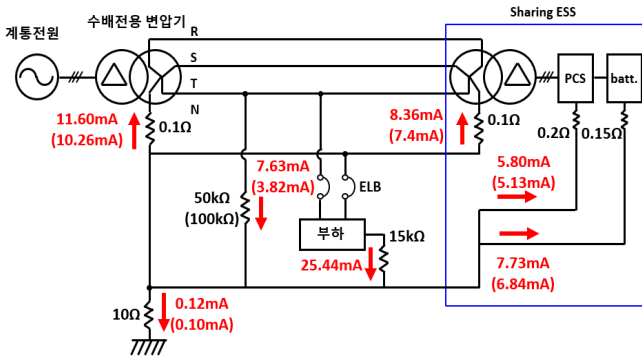
(2) 부하불평형 전류에 의한 누설전류는 수용가 측 부하 불평형율에 따라 영향을 받음을 알 수 있고, 또한 접지저항의 값이 증가함에 따라 누설전류는 접지저항을 통해 대지로 모두 흘러 들어가지 않고 배터리와 PCS의 외함으로 유입되어 영향을 줄 가능성이 있음을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구(No.20182410105070)로서, 관계부처에 감사드립니다.

참고문헌

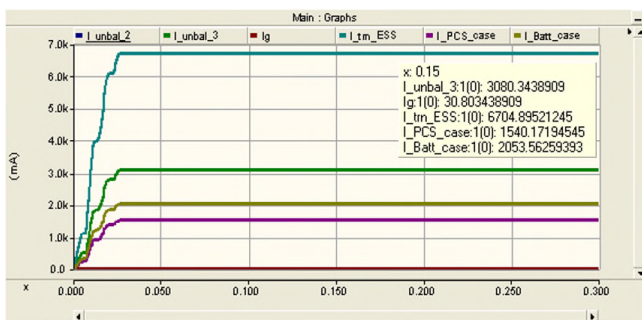
- [1] 이훈, “전기차 폐배터리 ESS로 변신한다”, 대한전기협회 전기저널, pp. 24-26, 2019.
- [2] 전기설비기술기준의 판단기준, 제33조(기계기구의 철대 및 외함의 접지) ②의 8항.
- [3] 전기안전관리자의 직무(산업통상자원부 고시 제2016-16호), [별지 제8호 서식], 전원품질 측정기록표, 전원품질 분석.



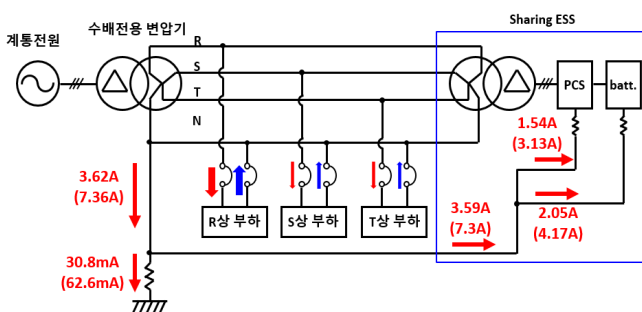
[그림 7] 절연성능 저하에 의한 누설전류 흐름도(50[kΩ], 100[kΩ])

4.3 부하불평형에 의한 누설전류 특성

상기의 시뮬레이션 조건을 바탕으로, 부하불평형으로 인한 누설전류의 특성을 구하면 그림 8과 같다. 여기서 나타내는 값은 RMS값이며 Sharing ESS측 접지선을 타고 흐르는 누설전류가 PCS와 배터리 외함접지를 통해 유입됨을 알 수 있다. 그림 8에서 수용가 측 부하불평형율을 15[%] 적용한 경우 부하불평형 전류가 3.62[A]인 발생하여, 30.8[mA]의 누설전류가 수용가 측 공통접지선으로 흐르고, 3.59[A]가 Sharing용 ESS 접지선을 통해 1.54[A]는 PCS의 외함으로, 2.05[A]는 배터리의 외함으로 유입된다. 한편, 수용가 측 부하불평형율을 30[%] 적용한 경우 그림 9와 같이 부하불평형 전류가 7.36[A]가 발생하여, 62.6[mA]의 누설전류가 수용가 측 공통접지선으로 흐르고, 7.3[A]가 Sharing용 ESS 접지선을 통해 3.13[A]는 PCS의 외함으로, 4.17[A]는 배터리의 외함으로 유입됨을 알 수 있다.



[그림 8] 부하불평형에 의한 누설전류 특성(불평형율: 15%)



[그림 9] 부하불평형에 의한 누설전류 흐름도(불평형율: 15%, 30%)