

ESS의 전기적 위해요인 개선 알고리즘에 관한 연구

유현상*, 최성문*, 노성은*, 이예빈*, 노대석*

*한국기술교육대학교

e-mail:hsyu@koreatech.ac.kr

A Study on the Prevention Algorithm of Electrical Hazards in ESS

Hyun-Sang You*, Sung-Moon Choi*, Seong-Eun Rho*, Ye-bin Lee*, Dae-Seok Rho*

*Korea University of Technology and Education

요약

최근, 에너지저장장치에서 화재사고가 빈번하게 발생하고 있어, 정부에서는 민관 합동 조사 위원회를 설치하여 ESS의 화재원인을 추정하고 다양한 대응방안을 제시하고 있는데, 이 가운데 전기적 위해요인에 대한 배터리 보호 시스템이 미흡한 것으로 평가되어, 적절한 보호기기가 ESS에 적용되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 전기적 위해요인으로 부터 ESS를 보호하기 위해 설치하는 서지보호장치, 순환전류 저감장치의 적정용량을 산정하는 알고리즘을 제시하고, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 지락검출, 서지저감, 순환전류저감 평가시험장치로 구성된 ESS의 전기적 위해요인 평가시험장치의 모델링을 수행한다. 상기에서 제시한 알고리즘 및 모델링을 바탕으로, 각 보호기기의 운용특성을 평가한 결과, 지락사고 발생 시 지락검출장치는 절연저항의 감소를 측정하여 단시간에 지락사고를 판단할 수 있음을 알 수 있다. 또한, 적정용량의 서지보호장치를 설치하는 경우 배터리로 유입되는 개폐서지를 저감시킬 수 있으며, 순환전류 저감장치를 통해 ESS용 연계변압기의 접지 측으로 유입되는 순환전류도 감소시킬 수 있음을 알 수 있다. 따라서, 본 논문에서 제안한 알고리즘을 바탕으로 선정된 적절한 보호기기를 적용하면, 전기적 위해요인으로 부터 ESS를 보호할 수 있음을 알 수 있다.

1. 서론

최근, 신재생에너지의 출력 안정화, 수요자원 관리 및 주파수 조정 등 다양한 기능을 수행하기 위한 ESS의 설치가 급격하게 증가하고 있지만, 리튬이온전지를 이용한 ESS의 화재 사고가 지속적으로 발생하여 국내 ESS 시장에 큰 타격을 주고 있는 실정이다. 이에 따라, 정부에서는 민관 합동 조사 위원회를 설치하여 ESS의 화재원인을 조사하고 대응방안을 제시하고 있는데, 이 가운데 전기적 위해요인에 대한 배터리 보호 시스템이 미흡한 것으로 평가되어, 다양한 보호기기가 ESS에 적용되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 전기적 위해요인으로부터 ESS를 보호하기 위하여, 서지보호장치(surge protection device), 순환전류 저감장치(neutral grounding resistor)의 적정용량을 산정하는 알고리즘을 제안하고, 지락검출 평가시험, 서지저감 평가시험, 순환전류저감 평가시험장치로 구성된 ESS의 전기적 위해요인 평가시험장치의 모델링을 수행한다. 상기에서 제시한 알고리즘 및 모델링을 바탕으로, 각 보호기기의 운용특성을 평가한 결과, 지락사고 발생 시

지락검출장치(insulation monitoring device)는 절연저항의 감소를 측정하여 단시간에 지락사고를 판단할 수 있음을 알 수 있다. 또한, 적정용량의 SPD를 설치하는 경우 배터리로 유입되는 개폐서지를 저감시킬 수 있으며, NGR을 통해 ESS용 연계변압기의 접지 측으로 유입되는 순환전류도 감소시킬 수 있음을 알 수 있다. 따라서, 본 논문에서 제안한 알고리즘을 바탕으로 선정된 적절한 보호기기를 적용하면, 전기적 위해요인으로 부터 ESS를 보호할 수 있음을 알 수 있다.

2. ESS의 전기적 위해요인 개선 알고리즘

2.1 SPD 적정용량 산정 알고리즘

ESS의 DC측에 개폐서지가 발생하는 경우, ESS 내 절연강도가 약한 부분에서 절연이 파괴되어, 2차 사고를 유발하여 ESS의 화재로 진행될 가능성이 있다. 이에 대한 방안으로, SPD를 이용하여 개폐서지의 크기를 감소시킴으로써 ESS의 절연파괴를 방지할 수 있는 SPD의 적정용량 산정 알고리즘을 나타내면 다음과 같다.

[Step 1] DC전로의 전압, 계통측 절연내력(U_w) 등의 DC측 데이터를 상정한다.

[Step 2] SPD의 결선방식에 대하여, (+)극과 (-)극의 CMV 크기를 고려하여, 공칭전압(U_n)을 산정한다.

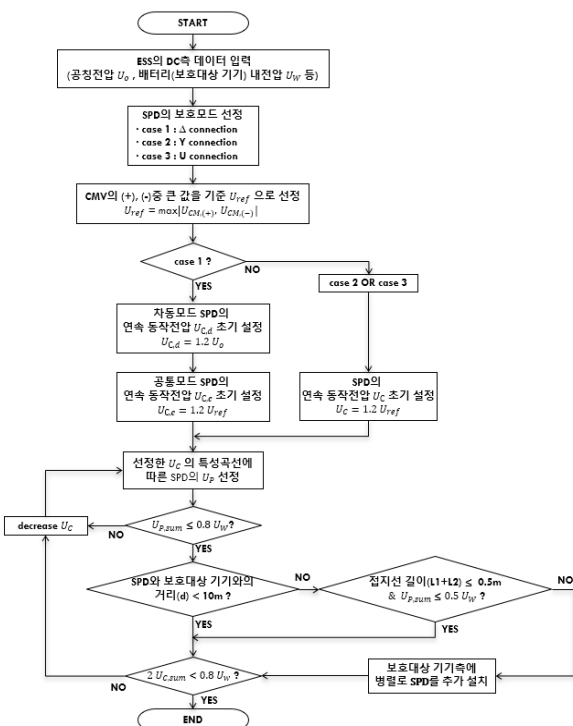
[Step 3] 결선방식(Y, Δ)에 따른 공통모드 및 차동모드의 최대연속 사용전압($U_{c,Y}$, $U_{c,\Delta}$)의 초기값을 공칭전압과 여유율을 고려하여 산정한다.

[Step 4] SPD의 결선방식을 고려하여 SPD 최대연속 사용전압($U_{c,sum}$)을 산정한다. 만약 $U_{c,sum}$ 의 값이 U_w 이하이면 적정한 U_c 가 산정된 것으로 판단하여 [Step 5]로 이동한다. 한편, SPD의 $U_{c,sum}$ 의 값이 U_w 보다 크면 SPD의 수명에 악영향을 줄 수 있으므로, $U_{c,sum}$ 을 감소시키고 해당 과정을 반복한다.

[Step 5] SPD의 전압 보호레벨(U_p)의 초기값과 합($U_{p,sum}$)을 산정한다.

[Step 6] SPD의 $U_{p,sum}$ 의 값이 여유율을 고려한 절연내력보다 작은 경우, 서지에 대한 보호가 충분하지 않을 수 있으므로 해당 과정을 반복하고, 큰 경우에는 알고리즘을 종료한다.

상기의 절차를 플로우차트로 나타내면, 그림 1과 같다.



[그림 1] SPD 적정용량 산정 알고리즘

2.2 NGR 적정용량 산정 알고리즘

ESS가 연계된 배전계통에서 수용가의 부하 불평형으로 발생한 순환전류가 ESS의 연계용 변압기의 접지를 통해 유입될 수 있다. 이러한 순환전류는 연계변압기의 철공진 현상을 발생시키거나 제어회로의 오동작을 유발시켜 ESS에 심각한 영향을 미칠 수 있다. 이에 대한 방안으로, NGR을 연계용 변압기 접지측에 설치하여 ESS로 유입되는 순환전류의 서지 크기를 감소시킬 수 있으며, NGR의 적정용량 산정 알고리즘을 나타내면 다음과 같다.

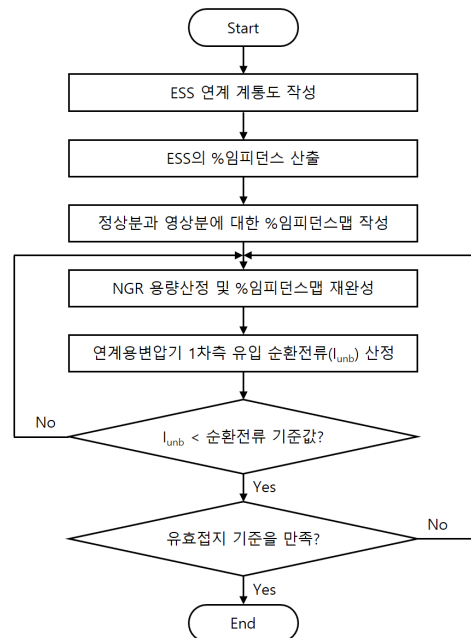
[Step 1] ESS가 연계된 배전계통의 계통도를 작성하고, ESS의 %임피던스를 산출하여 정상분과 영상분에 대한 %임피던스맵을 작성한다.

[Step 2] NGR의 용량을 산정하여 %임피던스맵을 재완성하고 연계용변압기 1차측으로 유입되는 순환전류(I_{unb})를 산정한다.

[Step 3] 산정된 순환전류가 기준값보다 작은 경우 [Step 4]로 이동하고, 큰 경우에는 [Step 2]로 이동한다.

[Step 4] NGR의 설치에 의해 유효접지 기준을 만족하지 못하는 경우 [Step 2]로 이동하고, 만족하는 경우에는 해당 값을 NGR 설치용량으로 선정하고 알고리즘을 종료한다.

상기의 절차를 플로우차트로 나타내면, 그림 2와 같다.

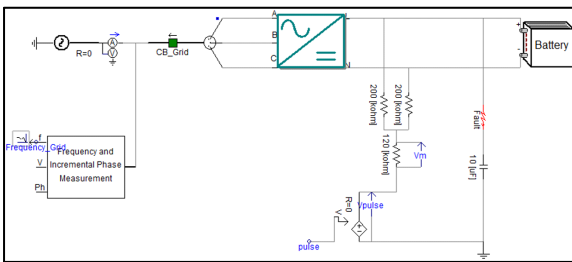


[그림 2] NGR 적정용량 산정 알고리즘

3. ESS의 전기적 위해요인 평가시험장치 모델링

3.1 지락검출 평가시험장치 모델링

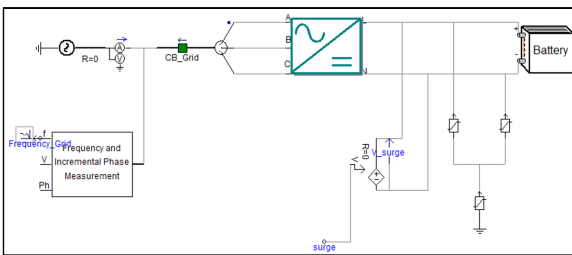
IMD에 의한 ESS의 DC 전로의 지락사고 검출특성을 분석하기 위하여, 그림 3과 같이 배전계통부, ESS부, 지락발생장치부, IMD로 구성된 지락검출 평가시험장치를 모델링한다. 여기서, 배전계통부는 380[V] AC 전원과 선로로 구성하며, ESS부는 10[kW]의 PCS와 60[kWh]의 배터리로 구성한다. 또한, 지락사고 발생장치부는 ESS의 DC 전로와 접지 사이에 사고발생장치를 연결하여 지락사고를 모의하며, 여기에 IMD를 연결하여 지락사고 검출특성을 평가한다[1].



[그림 3] 지락검출 평가시험장치 모델링

3.2 서지저감 평가시험장치 모델링

SPD에 의한 개폐서지의 저감특성을 평가하기 위하여, 그림 4와 같이 서지발생장치부, 배터리부, SPD로 구성된 서지저감 평가시험장치를 모델링한다. 여기서, 개폐서지 발생장치부는 IEC 60060-1을 바탕으로 선정된 개폐서지 전압을 출력하고, 배터리부는 60[kWh]의 용량으로 구성한다. 또한, SPD는 개폐서지 발생장치부와 배터리부 사이 DC 전로에 설치하고, Y 결선방식으로 접지에 연결한다[2].

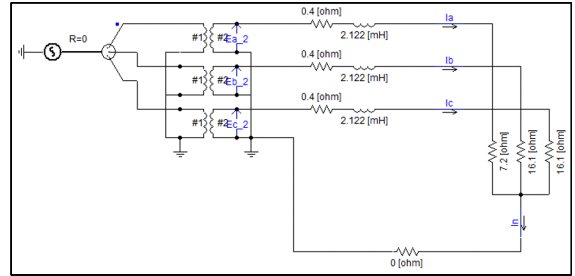


[그림 4] 서지저감 평가시험장치 모델링

3.3 순환전류저감 평가시험장치 모델링

NGR에 의한 순환전류의 저감특성을 분석하기 위하여, 그림 5와 같이 배전계통부, 순환전류 발생장치부, NGR로 구성된 순환전류저감 평가시험장치를 모델링한다. 여기서, 모의 배전계통부는 380[V]의 AC 전원, Y-Y 결선방식의 절연변압기, 모의선로로 구성하고, 순환전류 발생장치부는 상당 부하

의 크기를 변경하여, 부하 불평형을 통해 순환전류를 발생시킨다. 또한, NGR은 부하의 중성선에 설치하여 최대 8[Ω]의 저항을 투입할 수 있도록 구성하고, NGR의 저항값을 조정하여 순환전류 저감특성을 평가한다.



[그림 5] 순환전류저감 평가시험장치 모델링

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 시뮬레이션 조건

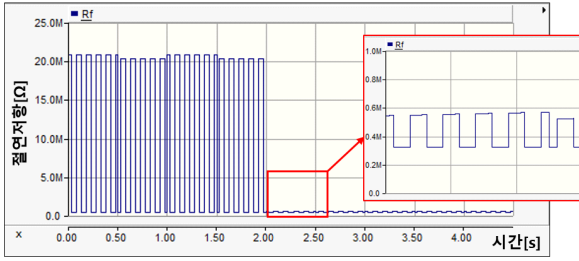
상기에서 제시한 ESS의 전기적 위해요인 평가시험장치 모델링을 바탕으로, 각 보호기기의 운용 특성을 평가하기 위한 시뮬레이션 조건은 표 1과 같이 상정한다. 여기서, 지락검출 평가시험은 280[V]의 ESS DC 전로에서 수행하고, (+)극과 접지 사이를 연결하여 지락사고를 모의한다. 또한, 서지저감 평가시험은 SPD의 U_c/U_p 값이 각각 800/1,800, 800/3,800[V]인 2가지 종류를 사용하고, IEC 60060-1의 시험방법에 따라 1.5[kV]의 개폐서지 파형을 SPD에 인가하여 수행한다. 한편, 순환전류저감 평가시험에서 부하 불평형률은 87[%]를 고려하고, NGR의 크기는 0, 2, 4, 6, 8[Ω]으로 변경하여 수행한다.

[표 1] 시뮬레이션 조건

시험	항목	내용
지락검출 평가시험	DC 전압 [V]	280
서지저감 평가시험	SPD 용량(U_c/U_p) [V]	800/1,800 800/3,800
	개폐서지 [kV]	1.5 (250/2,500[μs])
순환전류저감 평가시험	부하 불평형률 [%]	87
	NGR [Ω]	0, 2, 4, 6, 8

4.2 지락검출장치의 운용특성

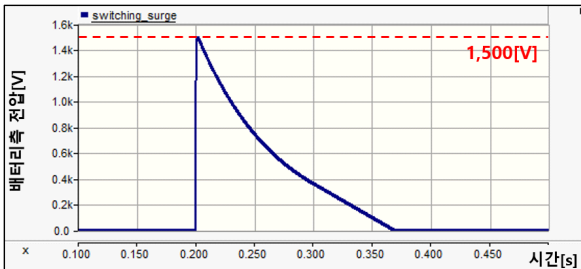
상기에서 제시한 표 1의 시뮬레이션 조건에 따라 지락검출 특성을 나타내면 그림 6과 같다. 여기서, 지락사고를 모의하기 전 IMD에서 측정된 절연저항은 20[MΩ] 이상으로 측정되어, DC 모의선로와 접지 사이에 충분한 절연이 확보됨을 알 수 있다. 또한, 지락사고 발생 시 절연저항은 약 0.6[MΩ]으로 크게 감소함을 알 수 있다. 따라서, IMD의 절연저항 기준값을 적절하게 설정하면, IMD가 ESS의 DC측 지락사고를 단시간 내에 검출할 수 있음을 알 수 있다.



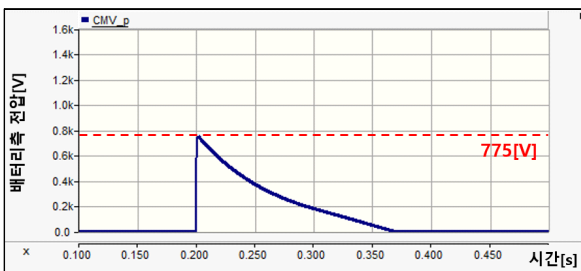
[그림 6] IMD의 운용특성

4.3 서지보호장치의 운용특성

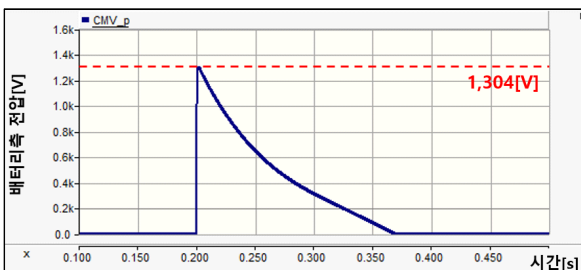
상기에서 제시한 표 1의 시뮬레이션 조건에 따라 SPD의 U_c/U_p 용량에 따른 배터리측 전압 특성을 나타내면 그림 7과 같다. 여기서, 그림 7(a)는 SPD를 설치하지 않은 경우의 개폐서지 파형을 나타내고, 그림 7(b), (c)는 SPD의 U_c/U_p 용량이 각각 800/1,800, 800/3,800[V]인 SPD를 설치한 경우의 배터리측 전압을 나타낸다. 즉, 서지발생장치로부터 배터리 측으로 최댓값이 1,500[V]인 개폐서지가 유입된 경우, U_c/U_p 용량에 따라 개폐서지의 최대 전압이 각각 775, 1,304[V]로 산정됨을 알 수 있다. 따라서, SPD의 용량에 따라 개폐서지가 최대 49[%] 정도 저감되어, 적정용량의 SPD를 ESS에 설치하면 개폐서지로부터 배터리를 보호할 수 있음을 알 수 있다.



(a) SPD를 설치하지 않은 경우



(b) 800/1,800(U_c/U_p)의 SPD 설치 시

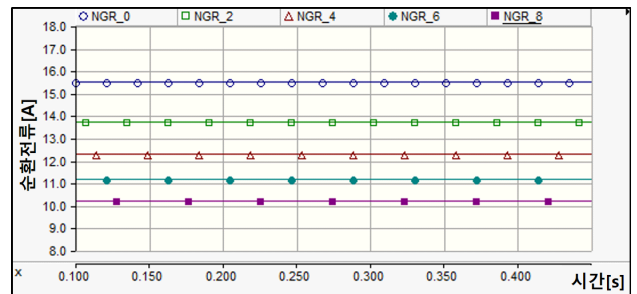


(c) 800/3,800(U_c/U_p)의 SPD 설치 시

[그림 7] SPD 용량에 따른 배터리측 전압

4.4 순환전류 저감장치의 운용특성

상기에서 제시한 표 1의 시뮬레이션 조건에 따라 저항의 크기에 따른 NGR의 운용특성을 나타내면 그림 8과 같다. 여기서, 부하 불평형률이 87[%]인 경우 NGR을 투입하지 않으면 순환전류는 15.5[A]로 측정되지만, NGR의 용량을 2, 4, 6, 8[Ω]으로 투입시키면 각각 13.7, 12.3, 11.1, 10.2[A]로 감소됨을 알 수 있다. 따라서, 적정용량의 NGR을 설치하면 부하 불평형으로 발생한 순환전류를 효과적으로 저감시킬 수 있음을 알 수 있다.



[그림 8] NGR 용량에 따른 순환전류 특성

5. 결 론

본 논문에서는 전기적 위해요인으로 부터 ESS를 보호하기 위하여, SPD, NGR의 적정용량을 산정하는 알고리즘을 제시하고, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 지락검출 평가시험, 서지저감 평가시험, 순환전류저감 평가시험장치로 구성된 ESS의 전기적 위해요인 평가시험장치의 모델링을 수행한다. 상기에서 제시한 알고리즘 및 모델링을 바탕으로, 각 보호기기의 운용특성을 평가한 결과, 본 논문에서 제안한 알고리즘을 바탕으로 산정된 적정된 보호기기를 적용하면, 전기적 위해요인으로 부터 ESS를 보호할 수 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] 김기영 외 3인, “직류 비접지계통에서 절연저항측정장치(IMD)를 이용한 사고검출 알고리즘”, 한국산학기술학회 논문지 제21권 9호, pp. 528-535, 2020.09
- [2] 황승욱 외 3인, “SPD를 이용한 리튬이온전지용 전기저장 장치의 보호방안에 관한 연구”, 한국산학기술학회 논문지 제21권 4호, pp. 568-574, 2020.04