

ESS의 전기적 위해요인 평가시험장치 구현에 관한 연구

유현상, 김윤호, 김세진, 임민규, 노대석
한국기술교육대학교
e-mail:hsyu@koreatech.ac.kr

A Study on the Implementation of Evaluation Test Device for Electrical Hazards in ESS

Hyun-Sang You, Yun-Ho-Kim, Se-Jin Kim, Min-Gyu Lim, Dae-Seok Rho
Korea University of Technology and Education

요약

최근, 에너지저장장치(ESS, energy storage system)에서 화재사고가 빈번하게 발생하고 있어, 정부에서는 민관 합동 조사 위원회를 설치하여 ESS의 화재원인을 추정하여 다양한 대응방안을 제시하고 있는데, 이 가운데 전기적 위해요인에 대한 배터리 보호 시스템이 미흡한 것으로 평가되어 적절한 보호기기들이 ESS에 적용되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 전기적 위해요인으로 부터 ESS를 보호하기 위한 지락검출장치(IMD), 서지보호장치(SPD), 순환전류 저감장치(NGR)의 동작 메커니즘을 제시하고, 각 보호기기의 유효성을 평가하기 위하여 지락검출 평가시험, 서지저감 평가시험, 순환전류저감 평가시험장치로 구성된 ESS의 전기적 위해요인 평가시험장치를 구현한다. 상에서 제시한 메커니즘 및 시험장치를 바탕으로 각 전기적 위해요인별 평가시험장치의 운용특성을 분석한 결과, 지락사고 발생 시 IMD는 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 ESS의 전기적 위해요인 평가시험장치가 각 보호기기의 운용특성을 정확하게 평가할 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 화재사고가 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 보호기기들이 ESS에 적용되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 전기적 위해요인으로 부터 ESS를 보호하기 위한 IMD, SPD, NGR의 동작 메커니즘을 제시하고, 각 보호기기의 유효성을 평가하기 위하여 지락검출 평가시험, 서지저감 평가시험, 순환전류저감 평가시험장치로 구성된 ESS의 전기적 위해요인 평가시험장치를 구현한다. 상에서 제시한 메커니즘 및 시험장치를 바탕으로 각 전기적 위해요인별 평가시험장치의 운용특성을 분석한 결과, 지락사고 발생 시 IMD는 절연저항의 감소를 측정

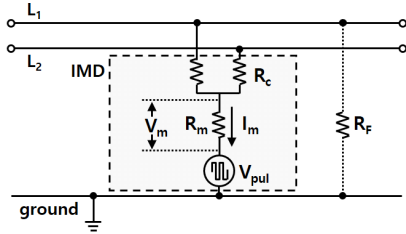
하여 단시간에 지락사고를 판단할 수 있음을 알 수 있다. 또한, 적정용량의 SPD를 설치하는 경우 배터리로 유입되는 개폐서지를 저감시킬 수 있으며, NGR을 통해 ESS용 연계변압기의 접지 측으로 유입되는 순환전류도 감소시킬 수 있음을 알 수 있다. 따라서, 본 논문에서 제안한 ESS의 전기적 위해요인 평가시험장치가 각 보호기기의 운용특성을 정확하게 평가할 수 있음을 알 수 있다.

2. ESS의 전기적 위해요인별 보호장치의 동작 메커니즘

2.1 지락검출장치의 동작 메커니즘

지락사고에 대한 보호기기로 IMD방식은 발전소 및 제철소의 주요 직류 제어전원 회로 및 저압직류 배전계통 등에 널리 적용되고 있다. 일반적으로 비접지 직류계통의 절연저항을 측정하여, 지락사고를 감시하는 IMD 방식의 보호기기는 그림 1과 같이 전력선과 대지 사이에 스위칭소자 혹은 신호발생기를 이용하여 펄스전압(V_{pul})을 인가하고, 측정되는 전압과 전류를 통해 절연저항을 감시하는 방식이다[1]. 구체적으

로, IMD는 식 (1)과 같이, 측정지점의 전압(V_m)을 저항(R_m)으로 나누어 전류(I_m)를 산정하고, 식 (2)와 같이 펄스전압이 전압분배 법칙에 따라 직렬로 연결된 측정부 저항, 커플링 저항(R_c), 계통의 절연저항(R_F)에 나누어 인가되는 것을 고려하여, 식 (3)과 같이 계통의 절연저항을 산정한다.



[그림 1] IMD의 동작 메커니즘

$$I_m = \frac{V_m}{R_m} \quad (1)$$

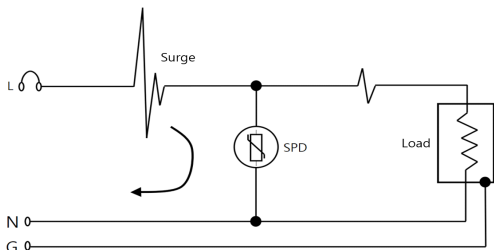
$$V_{pul} = I_m \times (R_m + R_c + R_F) \quad (2)$$

$$R_F = \frac{V_{pul}}{I_m} - R_m - R_c \quad (3)$$

여기서, I_m : 측정전류, V_m : 측정전압, R_m : IMD 측정부 저항, V_{pul} : 펄스전압, R_c : IMD 커플링 저항, R_F : 계통의 절연저항

2.2 서지보호장치의 동작 메커니즘

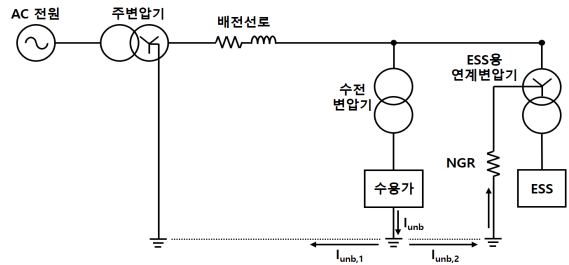
SPD는 서지로부터 각종 장비들을 보호하는 장치이며, 내부구조, 동작방식, 등급시험 등에 따라 분류될 수 있다. 즉, 어떠한 이유로 인해 계통에 서지가 들어올 때, 그림 2와 같이 서지 전류가 부하를 통하지 않고 SPD를 통해 흐르도록 하여 부하를 보호하는 장치이다. SPD에 주로 사용되는 MOV는 정상 상태에서 매우 큰 임피던스를 가지며, 여기에 전압 서지가 걸리면 MOV의 임피던스가 급격히 낮아지면서 서지를 부하가 아닌 다른 통로로 흘려보내는 저임피던스 통로가 되므로, SPD를 통해 전류를 방출하여 전압이 크게 상승하지 않는다 [2].



[그림 2] SPD의 동작 메커니즘

2.3 순환전류 저감장치의 동작 메커니즘

NGR은 그림 3과 같이 불평형 부하에 의한 순환전류(I_{unb})로부터 ESS를 보호하기 위하여, ESS용 연계변압기에 설치·운용할 수 있다. 여기서, 순환전류는 수용가 단상부하의 불평형에 의해서 발생할 수 있으며, 대부분의 전류는 배전용 변전소의 주변압기($I_{unb,1}$) 측으로 흘러가게 된다. 하지만, 분산전원 연계 기준에 따라 ESS용 연계변압기의 1차측이 Y_g 결선 방식을 사용하기 때문에, 일부 순환전류가 연계변압기($I_{unb,2}$)의 중성선을 통해 유입될 수 있다. 이 순환전류는 연계변압기의 철공진 현상을 발생시키거나 제어회로의 오동작을 유발시켜 ESS에 심각한 영향을 미칠 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 NGR을 통해 연계변압기 측으로 유입되는 순환전류의 저감 효과를 평가하고자 한다.

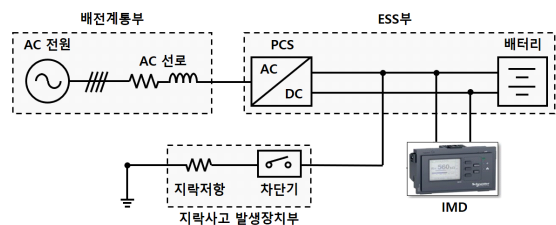


[그림 3] NGR의 동작 메커니즘

3. ESS의 전기적 위해요인 평가시험장치 구현

3.1 지락검출 평가시험장치

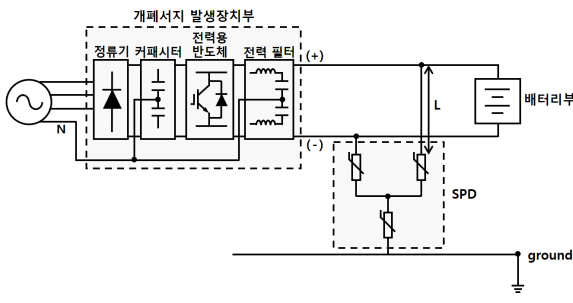
IMD에 의한 ESS의 DC 전로의 지락사고 검출특성을 분석하기 위하여, 그림 4와 같이 배전계통부, ESS부, 지락발생장치부, IMD로 구성된 지락검출 평가시험장치를 구현한다. 여기서, 배전계통부는 380[V] AC 전원과 선로로 구성하며, ESS부는 10[kW]의 PCS와 60[kWh]의 배터리로 구성한다. 또한, 지락사고 발생장치부는 PCS와 배터리 사이의 DC 전로와 접지 사이에 2[Ω]의 지락저항과 차단기를 연결하여 지락사고를 모의하고, 여기에 IMD를 연결하여 지락사고 검출특성을 평가한다.



[그림 4] 지락검출 평가시험장치 구성

3.2 서지저감 평가시험장치

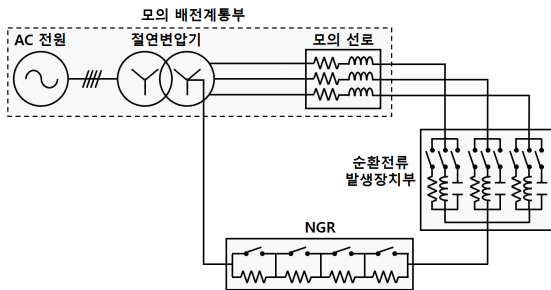
SPD에 의한 개폐서지의 저감특성을 평가하기 위하여, 그림 5와 같이 서지발생장치부, 배터리부, SPD로 구성된 서지저감 평가시험장치를 구현한다. 여기서, 개폐서지 발생장치부는 정류기를 통해 AC 입력을 DC로 변환하여 커패시터에 저장하고, 전력용 반도체와 전력필터를 통해 IEC 60060-1을 바탕으로 선정된 개폐서지 전압을 출력한다. 또한, 배터리부는 60[kWh]의 리튬이온배터리 랙을 사용하며, SPD는 개폐서지 발생장치부와 배터리부 사이 DC 전로에 일정 길이(L)의 연결선을 사용하여 설치하고, Y 결선방식으로 접지에 연결한다.



[그림 5] 서지저감 평가시험장치 구성

3.3 순환전류저감 평가시험장치

NGR에 의한 순환전류의 저감특성을 분석하기 위하여, 그림 6과 같이 배전계통부, 순환전류 발생장치부, NGR로 구성된 순환전류저감 평가시험장치를 구현한다. 여기서, 모의 배전계통부는 380[V]의 AC 전원, Y-Y 결선방식의 절연변압기, 모의선로로 구성하고, 순환전류 발생장치부는 상당 10[kW] 부하로 구성하고, 전자 접촉기(MC)를 통해 100[W] 단위로 부하를 가변시키며, 부하 불평형을 통해 순환전류를 발생시킨다. 또한, NGR은 각각 2개의 1[Ω]과 3[Ω]의 저항을 직렬로 연결하여 최대 8[Ω]의 저항을 투입할 수 있도록 구성하고, MCCB를 통해 1[Ω] 단위로 저항을 조정하여 순환전류 저감 특성을 평가한다.



[그림 6] 순환전류저감 평가시험장치 구성

4. 시험 결과 및 분석

4.1 시험 조건

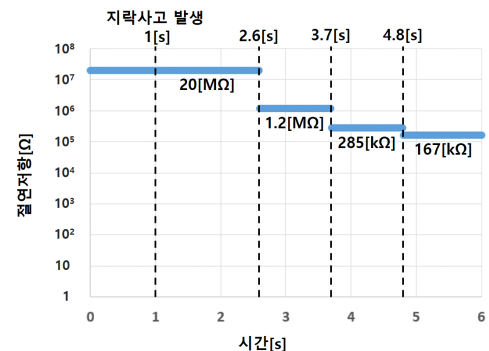
상기에서 제시한 ESS의 전기적 위해요인에 대한 평가시험 장치의 동작 특성을 평가하기 위한 시험조건은 표 1과 같이 상정한다. 여기서, 지락검출 평가시험은 280[V]의 ESS DC 전로에서 수행하고, 2[Ω]의 저항을 사용하여 지락사고를 모의한다. 또한, 서지저감 평가시험은 SPD의 U_c/U_p 값이 각각 800/1,800, 1,000/1,800, 800/3,800, 1000/3,800[V]인 4가지 종류를 사용하고, IEC 60060-1의 시험방법에 따라 1.5[kV]의 개폐서지 파형을 SPD에 인가하여 수행한다. 한편, 순환전류저감 평가시험에서 부하 불평형률은 87, 111[%]를 고려하고, NGR의 크기는 0, 2, 4, 6, 8[Ω]으로 변경하여 수행한다.

[표 1] 시험 조건

시험	항목	내용
지락검출 평가시험	DC 전압 [V]	280
	지락저항 [Ω]	2
서지저감 평가시험	SPD 용량(U_c/U_p) [V]	800/1,800
		1,000/1,800
		800/3,800
		1,000/3,800
개폐서지 [kV]	1.5	
	(250/2,500[μs])	
순환전류저감 평가시험	부하 불평형률 [%]	87
		111
	NGR [Ω]	0, 2, 4, 6, 8

4.2 지락검출장치의 운용특성

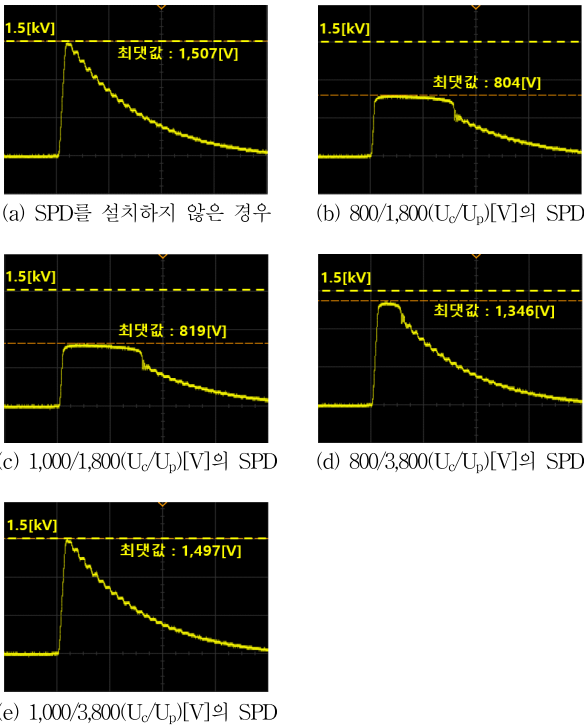
상기에서 제시한 표 1의 시험조건에 따라 지락검출 특성을 나타내면 그림 7과 같다. 여기서, 지락사고를 모의하기 전 IMD에서 측정된 절연저항은 20[MΩ] 이상으로 측정되어, DC 모의선로와 접지 사이에 충분한 절연이 확보됨을 알 수 있다. 또한, 지락사고 발생 1.6초 후 절연저항은 1.2[MΩ]로 크게 감소하고, 2.7초 후에는 285[kΩ], 3.8초 후에는 167[kΩ]으로 측정됨을 알 수 있다. 따라서, IMD의 절연저항 기준값을 적정하게 설정하면, IMD가 ESS의 DC측 지락사고를 단시간 내에 검출할 수 있음을 알 수 있다.



[그림 7] IMD의 운용특성

4.3 서지보호장치의 운용특성

상기에서 제시한 표 1의 시험조건에 따라 서지저감 특성을 나타내면 그림 8과 같다. 여기서, 그림 8(a)는 SPD를 설치하지 않은 경우의 개폐서지 파형을 나타내는데, 개폐서지의 최대값이 1,507[V]로 측정되어 개폐서지가 정상적으로 인가됨을 알 수 있다. 또한, 그림 8(b), (c), (d), (e)는 SPD의 U_c/U_p 용량이 각각 800/1,800, 1,000/1,800, 800/3,800, 1000/3,800[V]인 SPD를 설치한 경우의 서지파형을 나타내는데, 개폐서지의 최대값은 각각 804, 819, 1,346, 1,497[V]로 측정되고, SPD에 의한 서지저감 효과는 각각 46.6, 45.0, 10.7, 0.7[%]로 산정된다. 상기의 시험결과를 종합하여 SPD의 U_c/U_p 용량에 따른 운용특성을 나타내면 표 2와 같다. 즉, SPD의 용량에 따라 개폐서지가 최대 46.6[%] 정도 저감되어, 적정용량의 SPD를 ESS에 설치하면 개폐서지로부터 배터리를 보호할 수 있음을 알 수 있다.



[그림 8] SPD 용량에 따른 개폐서지 파형

[표 2] U_c/U_p 용량에 따른 SPD의 운용특성

SPD(U_c/U_p) [V]	개폐서지의 최대값 [V]	개폐서지 저감분 [V]
800/1,800	804	703(46.6%)
1,000/1,800	819	678(45.0%)
800/3,800	1,346	161(10.7%)
1,000/3,800	1,497	10(0.7%)

4.4 순환전류 저감장치의 운용특성

상기에서 제시한 표 1의 시험조건에 따라 부하 불평형률과 저항의 크기에 따른 NGR의 운용특성을 나타내면 표 3과 같다. 여기서, 부하 불평형률이 87[%]인 경우 NGR을 투입하지

않으면 순환전류는 15.4[A]로 측정되지만, NGR의 용량을 2, 4, 6, 8[Ω]으로 투입시키면 각각 11.7, 21.4, 29.2, 35.1[%] 정도 저감됨을 알 수 있다. 또한, 부하 불평형률이 111[%]인 경우 NGR을 투입하지 않으면 순환전류는 20.9[A]로 측정되지만, NGR의 용량을 2, 4, 6, 8[Ω]으로 투입시키면 각각 15.8, 27.3, 35.9, 42.6[%] 정도 감소함을 알 수 있다. 즉, 적정용량의 NGR을 설치하면 부하 불평형으로 발생한 순환전류를 효과적으로 저감시킬 수 있음을 알 수 있다.

[표 3] 부하 불평형률과 저항의 크기에 따른 NGR의 운용특성

부하 불평형률 [%]	NGR [Ω]	순환전류 [A]	순환전류 저감분 [A]
87	0	15.4	-
	2	13.6	1.8(11.7%)
	4	12.1	3.3(21.4%)
	6	10.9	4.5(29.2%)
	8	10	5.4(35.1%)
111	0	20.9	-
	2	17.6	3.3(15.8%)
	4	15.2	5.7(27.3%)
	6	13.4	7.5(35.9%)
	8	12	8.9(42.6%)

5. 결 론

본 논문에서는 전기적 위해요인으로 부터 ESS를 보호하기 위한 IMD, SPD, NGR의 동작 메커니즘을 제시하고, 각 보호기기의 효율성을 평가하기 위하여 지락검출 평가시험, 서지저감 평가시험, 순환전류저감 평가시험장치로 구성된 ESS의 전기적 위해요인 평가시험장치를 구현한다. 상기에서 제시한 메커니즘 및 시험장치를 바탕으로 각 전기적 위해요인별 평가시험장치의 운용특성을 분석한 결과, 지락사고 발생 시 IMD는 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 ESS의 전기적 위해요인 평가시험장치가 각 보호기기의 운용특성을 정확하게 평가할 수 있음을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구(P0008458, 2023년 산업혁신인재성장지원사업)로서, 관계 부처에게 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 김기영, “직류 비접지계통에서 절연저항측정장치(IMD)를 이용한 사고검출 알고리즘”, 한국산학기술학회 논문지 제 21권 9호, pp. 528-535, 2020.09