

ESS용 SPD의 적정용량 산정 알고리즘에 관한 연구

황승욱^{*,**}, 박찬욱^{*}, 김지명^{*}, 태동현^{*}, 노대석^{*}

^{*}한국기술교육대학교, ^{**}한국화학융합시험연구원

e-mail: bread545@hanmail.net

A Study on the Algorithm for Calculating the Appropriate Operating Capacity of SPD for ESS

Seung-Wook Hwang^{*,**}, Chan-Wook Park^{*}, Ji-Myung Kim^{*}, Dong-Hyun Tae^{*}, Dae-Seok Rho^{*}

^{*}Korea University of Technology and Education, ^{**}Korea Testing&Research Institute

요약

최근, 신재생에너지원의 출력 안정화, 수요관리 및 주파수 조정 등 다양한 기능을 가지고 있는 전기저장장치(energy storage system, ESS)가 설치되어 운용되고 있다. 그러나, ESS의 화재사고가 지속적으로 발생함에 따라 정부에서는 민간합동의 사고조사위원회를 통하여 ESS 사고원인과 안전강화 대책방안을 제시하고 있으며, 이 방안의 하나로 ESS 설치현장에 SPD(surge protect device), IMD(insulation monitoring device)와 같은 전기적 이상 보호장치를 설치하도록 권고하고 있다. 하지만, ESS의 DC측에 적용되는 SPD의 경우, 용량(U_c, U_p)에 대한 명확한 규정이 없어, 현장마다 서로 다른 용량의 SPD가 설치되어 운용되고 있는 실정이다. 하지만, 적정하지 못한 SPD가 설치된 현장에 서지가 유입될 경우, SPD가 배터리를 충분히 보호하지 못하여 ESS에 악영향을 미칠 가능성이 있다. 따라서, 본 논문에서는 ESS의 안정적인 운용을 위한 SPD의 적정용량 산정 알고리즘을 제안하고, 뇌서지 및 개폐서지 발생 시 SPD의 동작특성을 분석하기 위하여, 서지 발생장치와 SPD, 모의부하 등으로 구성된 ESS용 SPD의 서지 시험장치를 구현한다. 또한, 제안한 알고리즘에 의해 DC측에 적정용량의 SPD를 설치할 경우, 서지로부터 배터리를 안전하게 보호할 수 있음을 알 수 있었다.

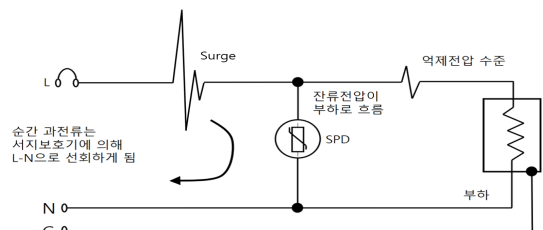
1. 서론

최근, 신재생에너지원의 출력 안정화, 수요관리 및 주파수 조정 등 다양한 기능을 가지고 있는 전기저장장치(energy storage system, ESS)가 설치되어 운용되고 있다. 그러나, ESS의 화재사고가 지속적으로 발생함에 따라 정부에서는 민간합동의 사고조사위원회를 통하여 ESS 사고원인과 안전강화 대책방안을 제시하고 있으며, 이 방안의 하나로 ESS 설치현장에 SPD(surge protect device), IMD(insulation monitoring device)와 같은 전기적 이상 보호장치를 설치하도록 권고하고 있다[1]. 하지만, DC측에 적용되는 SPD의 경우, 설정치에 대한 명확한 기준이 없으며, 이로 인해 적절한 SPD를 선정하지 않고 사용함으로써, 서지가 유입될 경우 ESS에 대한 보호가 취약한 실정이다[2,3]. 따라서, 본 논문에서는 SPD의 동작 메커니즘을 제시하고, 뇌서지 및 개폐서지 발생 시 SPD의 동작특성을 분석하기 위하여, 서지 발생장치와 SPD, 모의부하 등으로 구성된 ESS용 SPD의 서지 시험장치를 구현한다. 제안한 시험장치를 바탕으로 개폐서지에 대한 SPD의 특성을 분석한 결과, DC측에 적정 용량의 SPD를 설치할 경우, 서지로부터 배터리를 안전하게 보호할 수 있음을 알 수 있었다.

2. ESS용 SPD의 특성분석

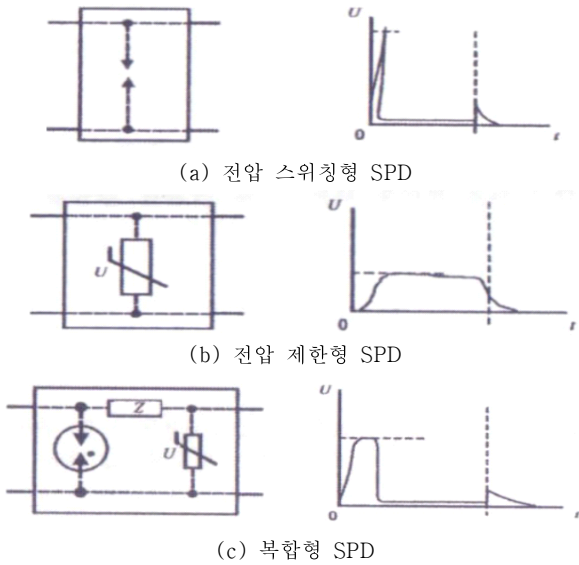
2.1 SPD의 동작 메커니즘

SPD는 서지로부터 각종 장비들을 보호하는 장치이며, 내부 구조, 동작방식, 등급시험 등에 따라 분류될 수 있다. 즉, 어떠한 이유로 인해 계통에 서지가 들어올 때, 그림 1과 같이 서지 전류가 부하를 통하지 않고 SPD를 통해 흐르도록 하여 부하를 보호하는 장치이다. SPD에 주로 사용되는 MOV는 정상상태에서 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.



[그림 1] SPD의 보호 메커니즘

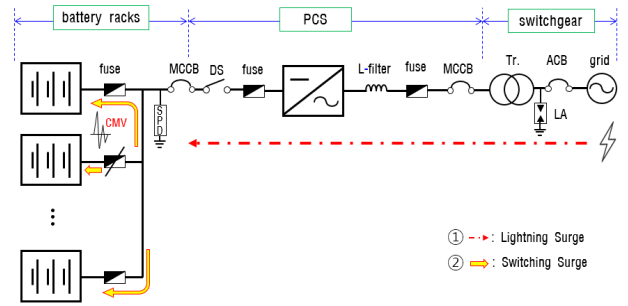
한편, SPD를 동작 방식별로 나누면, 전압 스위칭형, 전압 제한형, 복합형으로 구분되며, 먼저 전압 스위칭형의 경우 그림 2(a)와 같이 에어 갭을 이용하고, 스위치 동작 시에만 서지 전압에 대해 급격하게 낮은 임피던스값으로 변화하는 특성을 가진다. 한편, 전압 제한형 SPD는 그림 2(b)와 같이 바리스타를 이용하며, 서지전압에 대해 연속적으로 낮은 임피던스값으로 변화하는 특성을 가지며, 복합형 SPD는 그림 2(c)와 같이 전압 스위칭형 및 제한형의 특성을 모두 가진다. 본 논문에서는 ESS설치사이트에서 가장 많이 사용되고 있는 전압 제한형 SPD에 대하여, 뇌서지 및 개폐서지로부터 ESS를 보호하기 위한 적절한 SPD의 용량을 산정하는 방안을 제시하고자 한다.



[그림 2] 동작 방식별 SPD의 특성

2.2 ESS용 SPD의 운용사례 분석

일반적으로, ESS는 그림 3과 같이 병렬연결된 다수의 배터리 랙과 충·방전을 수행하는 PCS, 연계용변압기, 보호기기 등으로 구성된다. 이러한 구성에서 뇌격에 의해 서지가 발생할 경우(그림 3의 ①), 전원선과 각종 신호선 및 통신선 등 다양한 경로를 통해 유입되어, 각종 전기설비 및 제어설비의 파손과 기기의 오동작을 야기시킬 수 있다. 또한, 배터리 랙측 또는 PCS측에서 사고가 발생하는 경우, 퓨즈 또는 차단기가 동작하여(그림 3의 ②), 순간적으로 매우 큰 개폐서지가 발생하고, 절연강도가 약한 부분에서 절연이 파괴되어, 2차 사고를 유발하여 ESS의 화재로 진행될 가능성이 있다. 따라서, ESS 설치현장에서는 서지로부터 배터리를 보호하기 위하여 SPD를 사용하고 있지만, DC측에 설치되는 SPD에 대한 명확한 기준이 제시되지 않아, 서로 다른 용량(U_c , U_p)의 SPD가 설치되고 있는 실정이다.



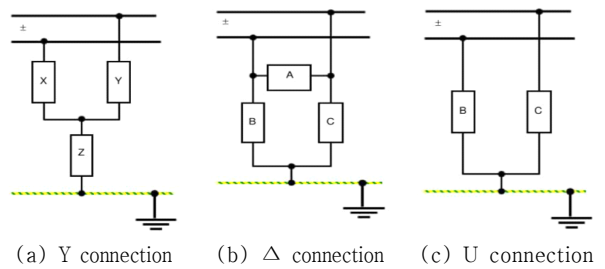
[그림 3] ESS에서 뇌서지 및 개폐서지에 의한 영향

3. ESS용 SPD의 적정용량 산정 알고리즘

뇌격 또는 개폐기의 조작으로 인해 발생하는 서지는 ESS 내 절연강도가 약한 부분에서 절연을 파괴시켜, 2차 단락사고를 유발하여 ESS의 화재로 진행될 가능성이 있다. 이에 대한 방안으로, DC측의 서지 크기를 감소시켜 ESS의 절연파괴를 방지할 수 있는 SPD의 적정용량 산정 알고리즘을 나타내면, 다음과 같다.

[Step 1] DC측 계통전압(U_o), 보호대상 기기의 내전압(U_w) 등의 DC측 데이터를 상정한다.

[Step 2] 그림 4와 같이, SPD의 보호모드(Δ , Y, U결선방식)에 따라, (+)극과 (-)극의 CMV 중에서 높은 값을 기준으로 공칭전압(U_n)을 결정한다. 여기서, 그림 6의 (a), (b)와 같이 Y결선과 U결선은 공통모드 SPD의 연속전압의 초기값을 상정한다. Δ 결선의 경우 그림 6의 (a)와 같이 차동모드 SPD(A)와 공통모드 SPD(B, C)에 대하여, 차동모드 연속 동작전압($U_{C,d}$), 공통모드 연속 동작전압($U_{C,c}$)의 초기값을 상정한다.



[그림 4] SPD의 결선방식

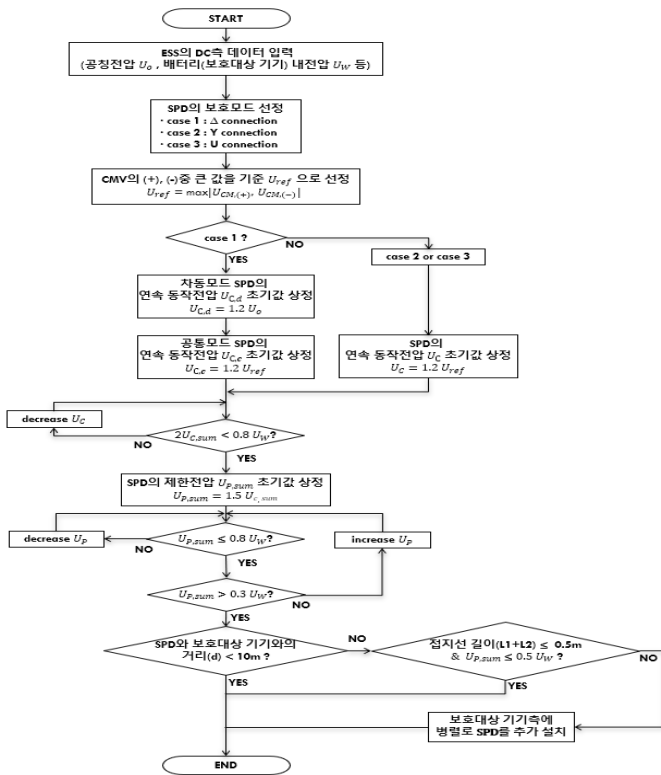
[Step 3] 상정된 $U_{C,sum}$ 값과 여유율을 고려한 임펄스 내전압 U_w 값의 크기를 비교한다. 여기서, SPD의 $U_{C,sum}$ 값이 적정치 이내일 경우, [Step 4]로 이동한다. 한편, SPD의 $U_{C,sum}$ 값이 적정치를 초과하여 상정된 경우, 서지 보호효과가 충분하지 않을 수 있기 때문에, U_c 값을 감소시켜, [Step 3]을 반복한다.

[Step 4] SPD의 제한전압($U_{P,sum}$)의 초기값을 상정한다. 또

한, 상정된 $U_{P,sum}$ 값과 여유율을 고려한 임펄스 내전압 U_W 값의 크기를 비교한다. 여기서, SPD의 $U_{P,sum}$ 값이 적정치 이내 일 경우, [Step 5]로 이동한다. 한편, SPD의 $U_{P,sum}$ 값이 적정치 미만일 경우, 상대적으로 낮은 서지전압에 빈번하게 동작하여 수명이 저하될 수 있으므로, U_P 를 증가시켜 [Step 4]를 반복한다. 또한, SPD의 $U_{P,sum}$ 값이 적정치를 초과할 경우, 서지 보호효과가 충분하지 않을 수 있기 때문에, U_P 를 감소시켜 [Step 4]를 반복한다.

[Step 5] SPD와 보호대상 기기와의 거리(d), 접지선 길이(L1+L2) 및 제한전압($U_{P,sum}$)을 고려하여, 보호대상 기기측의 SPD의 병렬 설치 필요 여부를 결정하고, SPD의 용량이 적정하게 산정되었을 경우, 상기의 절차를 종료한다.

따라서, 상기의 절차를 플로우차트로 나타내면 그림 5과 같이 나타낼 수 있다.

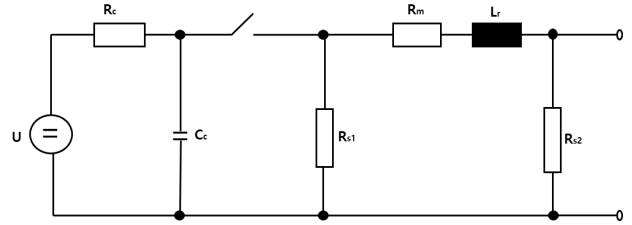


[그림 5] SPD의 적정용량 산정 알고리즘

4. ESS용 SPD의 서지 시험장치 구현

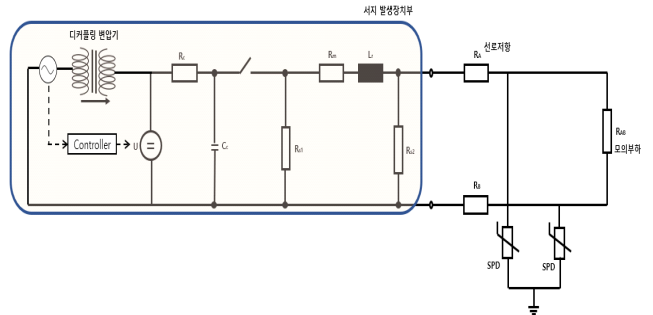
III등급 조합파 및 개폐서지를 모의하기 위한, 서지발생장치부의 회로도에는 그림 6과 같으며, 고전압 발생원(U)와 충전 저항(R_c), 에너지 저장 커패시터(C_c), 펄스 지속 시간 형성 저항(R_s), 임피던스 정합 저항(R_m), 상승 시간 형성 인덕터(L_r)로 간략하게 등가화된다. 각 소자의 적절한 값을 선정하여, 개

방상태에서 $1.2/50[\mu s]$ 임펄스전압, 그리고 단락회로에서 $8/20[\mu s]$ 임펄스전류를 발생시키는 조합파를 구성한다.



[그림 6] 서지 발생장치부

III등급 조합파 및 개폐서지에 대한 SPD의 특성을 확인하기 위해, KS C IEC 61643-11의 '8.3.3 제한전압측정'시험 항목을 참조하여 그림 7과 같이 시험장치를 구성한다. 여기서, 서지발생기는 컨트롤러를 통해 3등급 조합파 시험파형을 생성하거나, IEC 60060-1에 따른 개폐서지를 발생시킬 수 있고, 220V, 3kW급의 디커플링 변압기는 서지발생기에서 발생한 서지가 계통으로 유입되는 것을 방지한다. 또한, 입력단 및 출력단에 High Voltage Probe를 이용하여 전압을 측정하고, 입력단에서는 Rogowski Coil을 사용하여 전류를 측정한다.



[그림 7] ESS용 SPD의 서지 시험장치

5. 시험 결과 및 분석

5.1 시험 조건

본 논문에서 제시한 시험장치를 바탕으로, III등급 조합파에 대한 ESS 제어전원용 SPD의 특성을 분석하기 위하여, 표 1과 같이 시뮬레이션 조건을 상정한다. 여기서, ESS 제어전원용 SPD에 대한 III등급 제한전압 특성시험을 위해 IEC 61643-11 시험에 부합하도록, 최대 출력전압 20[kV], 단락회로 출력전류 10[kA]의 임펄스 서지를 모의한다. 또한, SPD의 전압보호수준(U_p)는 A사의 제품 정격인 3.9[kV]와 4.5[kV]로 상정하고, AC 450/750V 전기기기용 비닐절연전선을 이용하여 30cm, 50cm로 나누어 시험한다.

[표 1] III등급 조합과 발생 시험조건

구분	조건		
standard code	IEC 61643-11		
조합과 서지 발생기	입력 파형(1.2/50 μ s)	C1 : 1kV, 0.5kA	
		C2 : 3kV, 1.5kA	
		C3 : 5kV, 2.5kA	
		C4 : 7kV, 3.5kA	
		C5 : 10kV, 5kA	
SPD	정격전압 Un	1kV	1.5kV
	최대연속동작전압 Uc	1.2kV	1.5kV
	전압보호수준 Up	3.9kV	4.5kV
연결선	AC 450/750V PVC	30cm	
		50cm	

한편, 개폐서지에 따른 SPD의 특성을 분석하기 위하여, 표 2와 같이 시험 조건을 상정한다. 또한, 모의하고자 하는 1[kV]의 DC 전로에 대해 공통모드로 SPD가 설치되어 있다고 상정하여 시험을 수행한다. 여기서, SPD에 대한 개폐서지 특성시험은 IEC 60060-1 시험에 부합하도록, 250/2500[us] 임펄스 전압서지를 모의한다. 또한, 제조사별로 다양한 SPD의 용량 (U_c , U_p)와 HFIX 전선 2.5SQ를 이용하여 30cm의 접지선에 대하여 시험한다.

[표 2] 개폐서지 발생 시험조건

구분	조건						
standard code	IEC 60060-1						
개폐서지	입력전압[V]						
모의장치	(250/2500[us])						
SPD	정격전압 Un	-	110	-	-	-	-
	최대연속동작 전압 Uc[V]	140	220	600	800	600	800
	전압보호수준 Up[V]	3,600	1,000	1,800	1,800	2,500	3,800
	제조사	B사	C사	D사		E사	
	연결선	HFIX 2.5 SQ					
모의부하	30[cm] 2[k Ω]						

5.2 III등급 조합과에 의한 SPD 특성분석

표 1의 III등급 조합과 시험조건에 따라 시험한 내용을 정리하면 표 3과 같다. 여기서, 개폐서지에 대하여 모두 SPD 용량이 낮을수록, 그리고 연결선의 길이가 짧아질수록 부하측으로 전달되는 전압이 낮아지고, 모든 경우에서 Up값 이하로 저감됨을 알 수 있다. 하지만, 너무 낮은 용량의 SPD를 선정하면 잦은 동작으로 인해 수명이 저하될 수 있으며, 적정 용량의 SPD를 선정하는 것이 매우 중요함을 확인하였다.

[표 3] SPD의 III등급 조합과 시험특성

SPD 용량 [Un]	연결선 길이 [cm]	인가 전압[kV]				
		1kV, 0.5kA	3kV, 1.5kA	5kV, 2.5kA	7kV, 3.5kA	10kV, 5kA
1[kV]	30	0.81	1.28	1.57	1.83	2.23
	50	0.87	1.51	1.85	2.25	2.75
1.5[kV]	30	0.81	1.47	1.77	2.02	2.41
	50	0.87	1.69	2.09	2.45	2.99

5.3 개폐서지에 의한 SPD 특성분석

표 2의 개폐서지 시험조건에 따른 SPD의 특성을 정리하면 표 4와 같다. 먼저, E사의 U_c 800[V], U_p 3,800[V] 용량의 SPD를 사용하는 경우, 1,500[V]의 개폐서지를 인가 시 2차측에 1,367.32[V]가 유기되어, 약 8.85[%]의 낮은 서지 저감효과가 나타남을 알 수 있다. 하지만, 본 논문에서 제시한 SPD의 적정용량 산정 알고리즘에 따라, D사의 U_c 800[V], U_p 3,800[V] 용량의 SPD를 사용하는 경우, 2차측에 820.22[V]가 유기되어 약 45.32[%]의 높은 서지 저감효과가 나타남을 알 수 있다.

[표 4] SPD의 개폐서지 시험특성

제조사	SPD 용량 [V]		연결선 길이 [cm]	1,000[V] 인가 시		1,500[V] 인가 시	
	U_c	U_p		출력전압 [V]	저감율 [%]	출력전압 [V]	저감율 [%]
B사	140	3,600	30	283.42	71.66	292.43	80.50
C사	220	1,000		347.74	65.23	362.86	75.81
D사	600	1,800		776.54	22.35	820.22	45.32
	800	1,800		815.97	18.40	856.71	42.89
E사	600	2,500		959.61	4.04	1033.71	31.09
	800	3,800		999.93	0.01	1367.32	8.85

6. 결 론

본 논문에서는 ESS 운용 시 DC측에 적용되는 SPD의 용량에 대한 명확한 규정이 없으므로, 이에 대해 안정적인 운용방안을 제시하기 위하여 SPD의 적정용량 산정 알고리즘을 제시한다. 또한, 서지 발생장치와 SPD, 모의부하, 등으로 구성된 ESS용 SPD의 서지 시험장치를 구현하고, 이를 바탕으로 서지에 대한 SPD의 특성을 분석한 결과, DC측에 적정 용량의 SPD를 설치할 경우, 뇌서지 및 개폐서지로부터 배터리를 보호할 수 있음을 알 수 있어, 본 논문의 유용성을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구(No.20191210301940, No.20214910100010)로서, 관계부처에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] IEC 62933-2-1, "Electrical energy storage (EES) systems - Part 2-1: Unit parameters and testing methods - General specification", 2017
- [2] IEC 61643-12 ; Low-voltage surge protective devices - Part 12: Surge protective devices connected to low-voltage power distribution systems - Selection and application principles
- [3] B.H. Lee and S.C. Lee, "Protection of Information and Communication Facilities against Lightning ", The Publishing Department of Inha University, pp. 48-7, 05, 2004.