

전기저장장치의 서지보호를 위한 SPD의 모델링 및 시험장치 구현

황승욱*, 태동현*, 한병길*, 김순식*, 노대석*

*한국기술교육대학교

e-mail: bread545@hanmail.net

Modeling and Implementation of SPD for Surge Protection of Energy Storage System

Seung-Wook Hwang*, Dong-Hyun Tae*, Byeong-Gil Han*,
Soon-Sik Kim*, Dae-Seok Rho*

*Korea University of Technology and Education

요약

최근, 신재생에너지원의 출력 안정화, 수요관리 및 주파수 조정 등 다양한 기능을 가지고 있는 전기저장장치(energy storage system, ESS)가 설치되어 운용되고 있다. 그러나, 2017년 8월에 고창 전력시험센터에서 발생한 ESS 화재를 시작으로 경산 변전소, 군산 태양광발전소 등 현재까지 총 29건의 화재사고가 발생하여 많은 재산피해가 보고되고 있다. 하지만, DC측에 적용되는 SPD의 경우, 설정치에 대한 명확한 기준이 없으며, 이로 인해 적절한 SPD를 선정하지 않고 사용함으로써, 이상전압이 유입될 경우 ESS에 대한 보호가 취약한 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 SPD의 동작 메커니즘을 제시하고, 서지발생 시 ESS에서 SPD의 보호특성을 확인하기 위하여, 전력계통 상용해석 소프트웨어인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, III등급 조합과 서지발생기와 선로 및 SPD로 구성된 SPD 시험장치의 모델링을 수행한다. 또한, 조합과 서지발생기와 디커플링 변압기, SPD, 계측장비 등을 이용하여 SPD의 특성 시험장치를 구현한다. 이를 바탕으로 시뮬레이션 및 시험을 수행한 결과, DC측에 적절한 용량의 SPD를 설치할 경우, ESS를 서지로부터 보호할 수 있음을 알 수 있어, 본 논문의 유용성을 확인하였다.

1. 서론

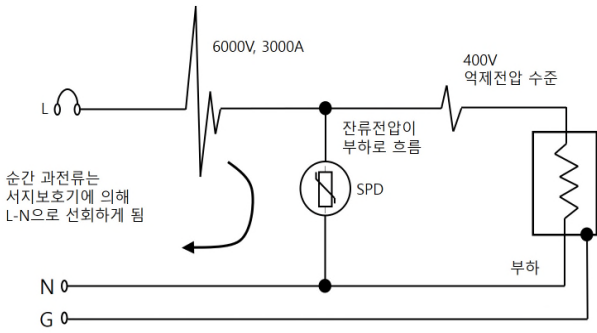
2017년 8월에 발생한 고창 전력시험센터의 ESS 화재를 시작으로 경산 변전소의 F/R용 ESS, 군산 태양광발전연계용 ESS, 등 현재까지 총 29건의 화재사고가 발생하여 많은 재산 피해가 보고되고 있다. 이러한 전기저장장치의 화재사고는 전기저장장치의 용량이나 계절과는 무관하게 발생되고 있으므로, ESS의 화재원인을 정확하게 파악하고 안전성을 확보하기 위하여, ESS의 사고특성에 대한 분석이 요구되어지고 있다[2]. 하지만, DC측에 적용되는 SPD의 경우, 설정치에 대한 명확한 기준이 없으며, 이로 인해 적절한 SPD를 선정하지 않고 사용함으로써, 이상전압이 유입될 경우 ESS에 대한 보호가 취약한 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 SPD의 동작 메커니즘을 제시하고, SPD의 시험방법에 대해 분석한다. 또한, 서지발생 시, ESS에서 SPD의 보호특성을 확인하기 위하여, 전력계통 상용해석 소프트웨어인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 조합과 서지발생기와 선로 및 SPD로 구성된 SPD 특성 모델링을 수행한다. 또한 컨트롤러를 이용한 조합과 서지발생기와 디커플링 변압기, SPD, 계측장비 등을 이용하여,

SPD의 특성 시험장치를 구현한다. 이를 바탕으로 시뮬레이션 및 시험을 수행한 결과, DC측에 적절한 용량의 SPD를 설치할 경우, ESS를 서지로부터 보호할 수 있음을 알 수 있어, 본 논문의 유용성을 확인하였다.

2. ESS용 SPD의 동작 메커니즘

2.1 SPD의 동작 메커니즘

SPD란, Surge로부터 각종 장비들을 보호하는 장치이며, 내부 구조, 동작기능, 등급시험에 따라 분류될 수 있다. 즉, 어떠한 이유로 인해 계통에 서지가 들어올 때, 그림 1과 같이 서지 전류가 부하를 통해 흐르지 않고 서지보호기를 통해 흐르도록 하여 부하를 보호할 수 있다. 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, SPD에는 높은 전류가 흘러도 전압이 크게 상승하지 않는다.



[그림 1] SPD의 보호 메커니즘

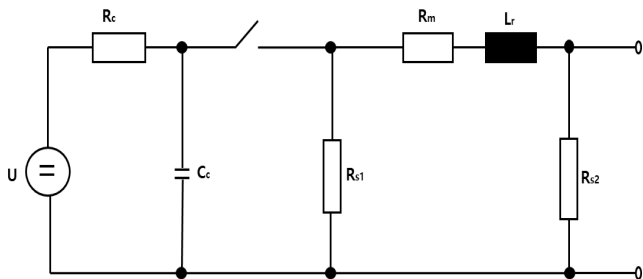
2.2 SPD의 시험 방법

SPD의 임펄스 동작 시험은 표 1에 따라 3종류로 분류된다. 여기서, I 등급시험은 공칭방전전류 I_n 및 피뢰시스템으로부터의 부분 뇌임펄스전류 I_{imp} 를 이용하는 시험으로 뇌임펄스 전류파형 $10/350\mu s$ 을 사용한다. 또한, II 등급시험은 공칭방전 전류 I_n 및 최대 방전전류 I_{max} 를 이용하는 시험이다. 그리고, III 등급시험은 조합파($1.2/50\mu s$ 임펄스전압, $8/20\mu s$ 임펄스 전류)의 시험전압으로 실행하는 시험을 나타낸다.

[표 1] SPD의 시험 종류

SPD 종류	시험의 종류	방전매개변수	비고
I 등급	I 등급시험	I_{imp}, I_n	$I_{imp} : 10/350 \mu s$ $I_n, I_{max} : 8/20 \mu s$
II 등급	II 등급시험	I_{max}, I_n	
III 등급	III 등급시험	U_{oc}	$U_{oc} :$ III등급시험에 대한 개방회로전압

이 중, III등급 조합파 시험을 위한, 조합파 서지발생기의 회로도는 그림 2와 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 증가화된다. 각 소자의 적절한 값을 선정하여, 개방상태에서 $1.2/50[\mu s]$ 임펄스전압, 그리고 단락회로에서 $8/20[\mu s]$ 임펄스전류를 발생시키는 조합파를 구성한다.

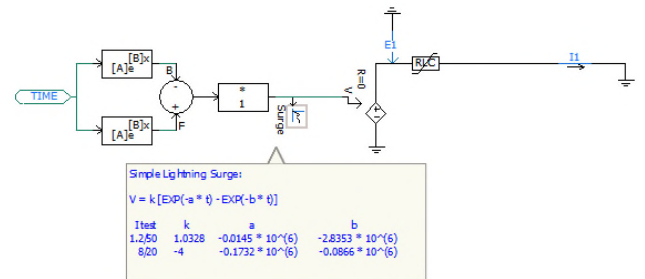


[그림 2] 조합파 서지발생기의 회로도

3. PSCAD/EMTDC를 이용한 SPD 모델링

3.1 서지발생기의 모델링

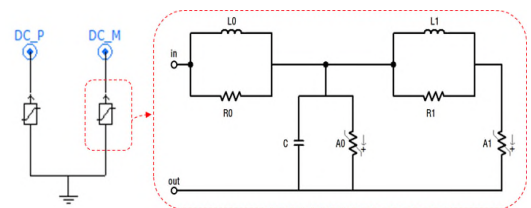
III등급 SPD 시험을 위해, 개방상태에서 $1.2/50[\mu s]$ 임펄스전압, 그리고 단락회로에서 $8/20[\mu s]$ 임펄스전류를 발생시키는 조합파 서지발생기를 모델링하면 그림 3과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 발생기는 $2[\Omega]$ 의 실효 출력 임피던스를 가지며, 개방 회로 출력 전압은 $20[kV]$ 이고, 단락 회로 출력 전류는 $10[kA]$ 의 값을 갖도록 구성한다.



[그림 8] 조합파 서지발생기 모델링

3.2 SPD의 모델링

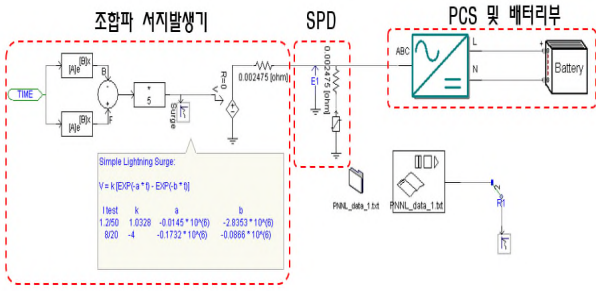
SPD는 그림 4와 같이 비선형 저항과 L-C로 구성되며, 과도 서지전압으로부터 ESS를 보호한다. 즉, SPD는 정상적인 동작 전압 범위에서 높은 임피던스를 가지므로 정상상태에서는 시스템에 영향을 미치지 않는다. 하지만, 과도 서지전압이 발생하는 경우, SPD의 임피던스는 감소하여 서지 전류를 접지를 통해 방류함으로써, 발생하는 CMV의 크기를 제한할 수 있다. 한편, 과도 서지전압이 제거되면 SPD는 높은 임피던스 상태로 복귀하게 된다.



[그림 4] SPD 모델링

3.3 전체 시스템 모델링

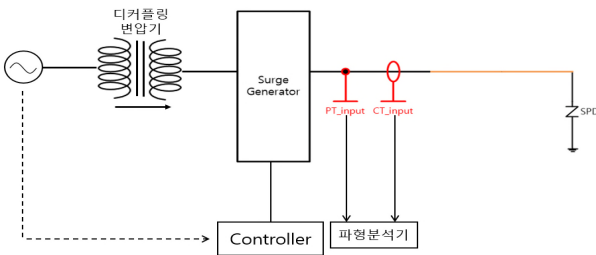
상기에서 제시한 모델링을 바탕으로, 조합파 서지발생기와 SPD, PCS 및 배터리부로 구성된 전체시스템을 나타내면 그림 5와 같다. 여기서, 조합파 서지 발생기와 SPD 사이의 선로거리를 조정할 수 있으며, PCS가 대기상태일 때 조합파 서지를 모의한다.



[그림 5] 전체 시스템 모델링

4. ESS용 SPD의 시험장치 구현

상기에서 모델링한 SPD의 특성을 확인하기 위해, KS C IEC 61643-11의 '8.3.3 제한전압측정' 시험 항목을 참조하여 그림 6 과 같이 시험장치를 구성한다. 여기서, 서지발생기는 컨트롤러를 통해 3등급 조합파 시험파형을 생성하며, 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 6] SPD용 시험장치 구성

5. 시뮬레이션 결과 및 분석

5.1 시뮬레이션 조건

본 논문에서 제시한 모델링을 바탕으로, ESS 제어전원용 SPD의 특성을 분석하기 위하여, 표 2과 같이 시뮬레이션 조건을 상정한다. 여기서, ESS 제어전원용 SPD에 대한 III등급 제한전압 특성시험은 IEC 61643-11 시험에 부합하도록, 최대 출력전압 20[kV], 단락회로 출력전류 10[kA]의 임펄스 서지를 모의한다. 또한, SPD의 전압보호수준(U_p)는 L사의 제품 정격인 3.9[kV]와 4.5[kV]로 상정하고, AC 450/750V 전기기기용 비닐절연전선을 이용하여 30cm, 50cm로 나누어 시험한다.

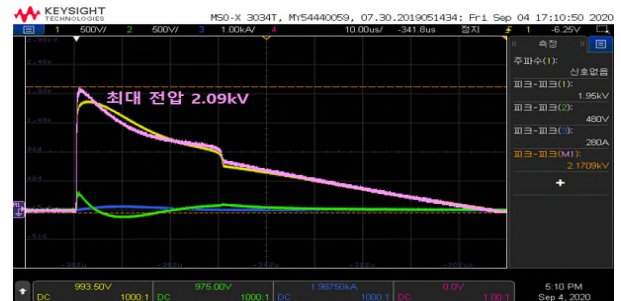
[표 2] 시뮬레이션 조건

구분	조건
standard code	IEC 61643-11

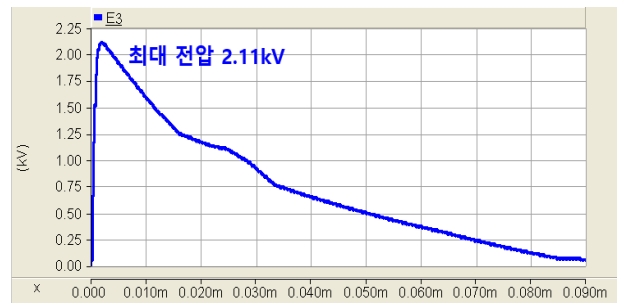
조합파 서지 발생기	입력 파형(1.2/50 μ s)	C1 : 1kV, 0.5kA	
		C2 : 3kV, 1.5kA	
		C3 : 5kV, 2.5kA	
		C4 : 7kV, 3.5kA	
		C5 : 10kV, 5kA	
SPD	정격전압 U_n	1kV	1.5kV
	최대연속동작전압 U_c	1.2kV	1.5kV
	전압보호수준 U_p	3.9kV	4.5kV
선로	AC 450/750V PVC	30cm	
		50cm	

5.2 III등급 조합파 서지에 의한 SPD 특성분석

표 2의 시뮬레이션 조건에 따라, U_p 4.5[kV]의 SPD가 설치되고, 선로거리 50cm에서 C3(5kV, 2.5kA)의 조합파 서지가 발생할 경우 부하전압의 하드웨어 및 시뮬레이션 결과를 나타내면 각각 그림 7 (a)와 그림 7 (b)와 같다. 즉, 1[kV]의 DC 선로에 조합파 서지가 유입되어, U_c 값 이상이 되면 SPD의 내부 저항이 저하되기 시작하며, U_p 값에 도달하면 거의 0에 가깝게 되어, 3.9[kV]를 초과하는 서지에 대해서는 접지를 통해 방전하므로 부하에 U_p 를 초과하는 전압이 인가되지 않는다. 하지만, U_p 미만의 전압에 대해서는 충분히 역제가 되지 않고 부하에 전달되는 문제점이 발생할 수 있다. 즉, SPD가 설치되었음에도 불구하고 정격 전압의 2배를 초과하는 전압이 부하측에 인가되어, 전기적인 위해요인이 될 수 있음을 확인하였다.



(a) 하드웨어 시험 결과(C3 : 5kV, 2.5kA, 50cm)



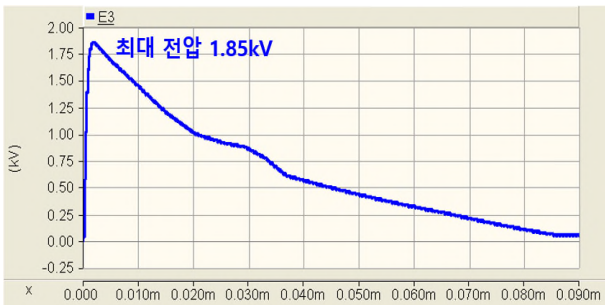
(b) PSCAD/EMTDC를 이용한 시뮬레이션 결과
[그림 7] 조합파 서지 전압에 따른 SPD 특성($U_p=4.5$ [kV])

한편, 상기의 전압 문제를 해결하기 위해, 적정 용량인 U_p 3.9[kV]의 SPD를 설치할 경우, 선로거리 50cm에서 C3(5kV, 2.5kA)의 조합파 서지가 발생할 경우 부하전압의 하드웨어

및 시뮬레이션 결과를 나타내면 각각 그림 8 (a)와 그림 8 (b)와 같다. 여기서, SPD의 특성에 의해 5[kV]의 입력서지가 적정범위 이내(2[kV])로 감쇠되어 부하측에 전달됨을 알 수 있다. 따라서, DC측에 적정 용량의 SPD를 설치할 경우, 서지로부터 ESS를 보호할 수 있음을 확인할 수 있다.



(a) 하드웨어 시험 결과(C3 : 5kV, 2.5kA, 50cm)



(b) PSCAD/EMTDC를 이용한 시뮬레이션 결과
[그림 8] 조합과 서지 전압에 따른 SPD 특성($U_p=3.9$ [kV])

상기의 시험방식과 같이, 표 2의 시뮬레이션 조건에 따라 시험한 내용을 정리하면 표 3과 같다. 여기서, H/W와 S/W 결과 모두 SPD 용량이 낮을수록, 그리고 연결선의 길이가 짧아질수록 부하측으로 전달되는 전압이 낮아지고, 모든 경우에서 U_p 값 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] 시뮬레이션 결과

H / W	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
S / W	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	0.83	1.31	1.58	1.87	2.25
		50	0.9	1.56	1.85	2.31	2.77
	1.5[kV]	30	0.83	1.52	1.81	2.03	2.39
		50	0.88	1.67	2.11	2.43	2.99

6. 결 론

본 논문에서는 ESS 운용 시 DC측에 적용되는 SPD의 용량에 대한 명확한 규정이 없으므로, 이에 대해 안정적인 운용을 위하여 전력계통 상용해석 소프트웨어인 PSCAD /EMTDC를 이용하여 배터리랙, PCS, SPD로 구성된 계통 모델링을 수행한다. 또한, 서지발생기 및 SPD의 시험장치를 구현하고, 시뮬레이션 및 특성시험을 수행하여 비교/분석한 결과, DC측에 적정 용량의 SPD를 설치할 경우, ESS를 서지로부터 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)로서, 관계부처에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Eungsang Kim, "Standardization and technical standards for new renewable energy and ESS power converters", Fall Conference for Society A of KIEE(Korean Institute of Electrical Engineers), Journal of Power Electronics, pp.31-35, April, 2017
- [2] IEC 62933-2-1, "Electrical energy storage (EES) systems - Part 2-1: Unit parameters and testing methods - General specification", 2017
- [3] IEC 61643-12 ; Low-voltage surge protective devices - Part 12: Surge protective devices connected to low-voltage power distribution systems - Selection and application principles
- [4] T.H Jeong, Y.S Kim, G.B Park, S.I Lee, "Optimal Design Method of 1-Port Surge Protective Device Based on Zinc Oxide Varistor", KAIS, Vol.19, No.4, pp.93~102, 2018
- [5] IEC 62305-1 ; Protection against lightning- Part1:General principles
- [6] IEC 62305-3 ; Protection against lightning- Part3:Physical damage to structures and life hazard
- [7] IEC 62305-4 ; Protection against lightning- Part4:Electrical and electronic systems within structures