

# 전기저장장치용 SPD의 운용 방안에 관한 연구

황승욱, 조성덕, 김윤호, 최형석, 노대석  
한국기술교육대학교  
e-mail: bread545@hanmail.net

## A Study on the Operation Method of Surge Protection Device in Energy Storage System

Seung-Wook Hwang, Sung-Duck Cho, Yun-Ho-Kim, Hyoung-Seok Choi, 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, 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 및 설치기준에 대한 명확한 규정이 없으므로, 서지 보호에 유효하지 않은 SPD가 설치되어 배터리에 대한 보호가 취약한 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 ESS를 안정적으로 보호하기 위한 SPD의 운용 방안을 제시하고, 뇌서지 및 개폐서지 발생 시 SPD의 동작특성을 분석하기 위하여, 서지 발생장치와 SPD, 모의부하, 등으로 구성된 서지 시험장치를 구현한다. 제안한 시험장치를 바탕으로 뇌서지 및 개폐서지에 대한 SPD의 특성을 분석한 결과, DC측에 적정 용량의 SPD를 설치할 경우, 서지로부터 배터리를 안정적으로 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[1,2]. 하지만, DC측에 적용되는 SPD의 경우, 설치기준에 대한 명확한 기준이 없으며, 이로 인해 적절한 SPD를 선정하지 않고 사용함으로써, 뇌서지 및 개폐서지가 유입될 경우 ESS에 대한 보호가 취약한 실정이다[3,4]. 따라서, 본 논문에서는 ESS를 안정적으로 보호하기 위한 SPD의 운용 방안을 제시하고, 뇌서지 및 개폐서지 발생 시 SPD의 동작특성을 분석하기 위하여, 서지 모의발생장치와 SPD, 모의부하, 등으로 구성된 서지 시험장치를 구현한다. 제안한 시험장치를 바탕으로 뇌서지 및 개폐서지에 대한 SPD의 특성을 분석한 결과, DC측에 적정 용량의 SPD를 설치할 경우, 서지로부터 배터리를 보호할

수 있음을 알 수 있었다.

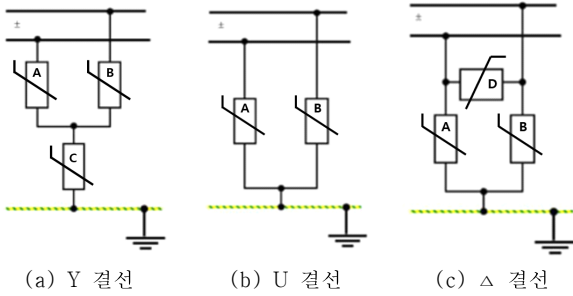
## 2. ESS용 SPD의 적정용량 산정 방안

### 2.1 Un, Uw 정정치

ESS가 설치된 현장마다 서로 다른 용량의 SPD가 운용되어, 일부 사이트에서는 서지로부터 ESS(특히, 배터리)를 보호하지 못하는 상황이 발생하고 있다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위하여, 본 논문에서는 서지가 발생하더라도 배터리에 영향을 최소화 할 수 있는 SPD의 적정용량 산정 방안을 제안한다. 즉, DC측 전로의 절연내력은 전기설비기술기준에 따라 3배 이상으로 유지해야하므로 서지가 발생하더라도 2차측 전압을 절연내력 미만으로 감소시킬 수 있는 적정한 부하의 절연내력( $U_w$ )을 선정한다. 또한, SPD의 공칭전압( $U_n$ )은 그림 1의 SPD의 결선방식(Y, U, Δ 결선방식)에 따라 결정되며, 식 (1)과 같이 (+)극과 (-)극의 공통모드전압(common mode voltage, CMV) 중에서 높은 값을 기준으로 산정된다.

$$U_n = \max|U_{CMV(+)}, U_{CMV(-)}| \quad (1)$$

여기서,  $U_n$  : 공칭전압,  $U_{CMV(+, -)}$  : (+)극과 (-)극의 CMV



[그림 1] 결선방식에 따른 SPD의 보호모드

### 2.2 $U_C$ , $U_P$ 정정치

상기의 그림 1(a), (b)와 같이 Y결선과 U결선으로 SPD를 설치하는 경우, SPD A, B의 최대연속 사용전압( $U_{C,Y}$ ,  $U_{C,U}$ )은 앞에서 산정된 공칭전압( $U_n$ )을 기준으로 여유율(120%)을 고려하여 결정한다. 단, 그림 1(a)의 SPD C에서는 평형인 경우 낮은 전압이 양단에 인가되어 별도로 고려할 필요가 없으므로, SPD A, B와 동일한 최대연속 사용전압으로 산정한다. 한편, 그림 1의 (c)와 같이  $\Delta$ 결선으로 SPD를 설치한 경우, 공통모드인 SPD A, B 뿐만 아니라 차동모드인 SPD D도 고려해야 하므로, 공통모드의 최대연속 사용전압( $U_{C,Y}$ ,  $U_{C,U}$ ,  $U_{C,\Delta c}$ )은 공칭전압( $U_n$ ), 차동모드의 최대연속 사용전압( $U_{C,\Delta d}$ )은 DC측 계통전압을 고려하여 산정한다.

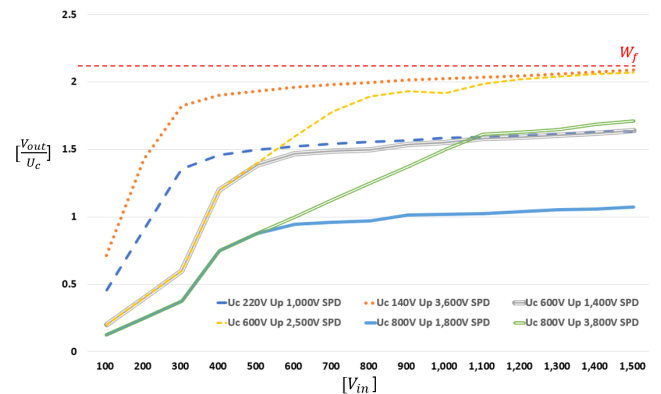
여기서, 그림 1(b)와 같이 DC 전로의 한 극과 접지 사이에 SPD가 1대만 설치된 경우, SPD에 고장이 발생하면 단락될 가능성이 있으므로 그림 1의 (a)와 같이 DC 전로의 한 극과 접지 사이에 직렬로 2대의 SPD를 설치하는 Y결선 방식이 일반적으로 채택되고 있다. 이 결선방식에서는 SPD A(또는 SPD B)와 SPD C에 전압이 분배되어 인가되기 때문에, SPD의 최대연속 사용전압의 합( $U_{C,sum}$ )은 식 (2)와 같이, SPD A와 SPD B의 최대연속 사용전압( $U_{C,A}$ ,  $U_{C,B}$ )을 바탕으로 SPD C의 최대연속 사용전압( $U_{C,C}$ )을 적절하게 조합하여 산정한다.

$$U_{C,sum} = U_{C,A}(\text{or } U_{C,B}) + U_{C,C} \quad (2)$$

여기서,  $U_{C,sum}$  : Y결선에서 SPD의 최대연속 사용전압,  $U_{C,A}$  : SPD A의 최대연속 사용전압,  $U_{C,B}$  : SPD B의 최대연속 사용전압,  $U_{C,C}$  : SPD C의 최대연속 사용전압

한편, SPD의 전압 보호레벨( $U_P$ )은 SPD의  $U_C$ 값과 2차측 출력전압 특성에 의하여 결정된다. 본 연구에서 수행한 다양

한 시나리오에 의한 시험결과에 의하면, SPD의 2차측 출력전압을  $U_C$ 로 나눈 값은 일정한 한계치( $W_f$ ) 이내로 제한되는 특성을 가지고 있다. 예를 들어, 6개 제조사의 SPD에 대하여 50V ~ 1,500V의 전압을 인가하면, SPD의 출력전압을  $U_C$ 로 나눈 값은 그림 2와 같이 산정된다. 여기서, 가로축은 SPD의 인가전압( $V_{in}$ ), 세로축은 SPD의 2차측 출력전압( $V_{out}$ )을  $U_C$ 로 나눈 값을 나타낸다. 즉, 어떠한 인가전압에 대해서도 SPD의 2차측 출력전압은 일정한 한계치( $W_f$ ) 이내로 제한됨을 알 수 있다.



[그림 2] SPD별 출력전압 특성

따라서, SPD의 전압 보호레벨( $U_P$ )은  $U_C$ 와 가중 계수( $W_f$ ), 여유율( $R_s$ )을 고려하면 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$U_P = W_f \times R_s \times U_C \quad (3)$$

여기서,  $W_f$  : 시뮬레이션 및 시험에 의해 산정된 가중 계수,  $R_s$  : 전압 보호레벨의 여유율

한편, SPD의 Y결선에서는 SPD A(또는 SPD B)와 SPD C에 전압이 분배되어 인가되므로, SPD의 전압 보호레벨의 합( $U_{P,sum}$ )은 식 (4)와 같이 나타 낼 수 있다.

$$U_{P,sum} = U_{P,A}(\text{or } U_{P,B}) + U_{P,C} \quad (4)$$

여기서,  $U_{P,sum}$  : Y결선에서 SPD의 전압 보호레벨,  $U_{P,A}$  : SPD A의 전압 보호레벨,  $U_{P,B}$  : SPD B의 전압 보호레벨,  $U_{P,C}$  : SPD C의 전압 보호레벨

또한,  $U_{P,sum}$ 의 적정용량은  $U_{P,sum}$ 을 너무 낮은 값으로 설정하여 SPD의 수명에 악영향을 주거나, 너무 높은 값으로 설정하여 서지로부터 배터리를 충분히 보호하지 못하는 경우를 방지하기 위하여, 계통측 절연내력( $U_w$ )과 여유율( $k$ )을 고려하여 식 (5)와 같이 산정한다.

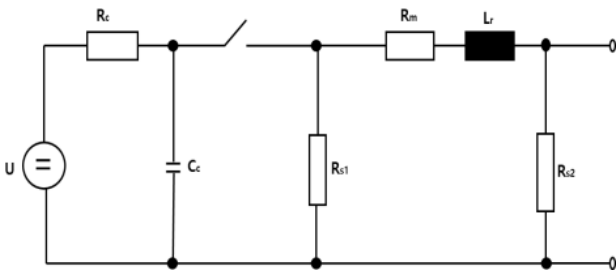
$$k \times U_w < U_{P, sum} \leq U_w \quad (5)$$

여기서,  $k$  : 여유율

### 3. ESS용 SPD의 시험장치 구현

#### 3.1 서지발생장치부

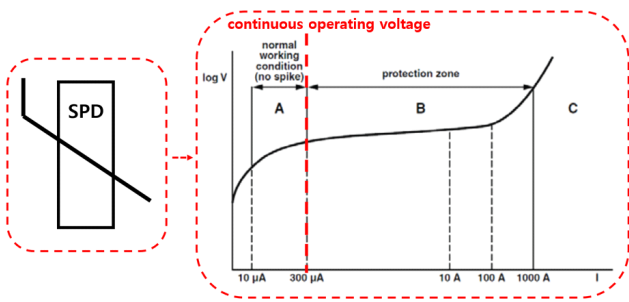
III등급 조합파 및 개폐서지를 모의하기 위한 서지발생장치부는 그림 3과 같이, 고전압 발생원(U)과 충전용 저항( $R_c$ ), 충전용 커패시터( $C_c$ ), 펄스 지속시간용 저항( $R_s$ ), 임피던스 정합용 저항( $R_m$ ), 상승 시간용 인덕터( $L_r$ )로 등가화된다. 본 논문에서는 각 소자의 적절한 값을 선정하여, III등급 조합파 및 개폐서지를 발생시킬 수 있도록 회로를 구성한다.



[그림 3] 서지 발생장치의 구성

#### 3.2 SPD부

SPD는 전압 스위치형, 전압 제한형, 복합형으로 분류되며, 본 시험장치에서는 전압 제한형 SPD를 대상으로 한다. 이 SPD는 그림 4와 같이, 연속 동작전압 이하에서 소자의 저항이 매우 높아 전류가 거의 흐르지 않는 절연체로 동작한다. 하지만 연속 동작전압 이상에서 SPD는 저항이 매우 낮아지며, 바리스터를 통해 에너지를 접지로 방류한다.

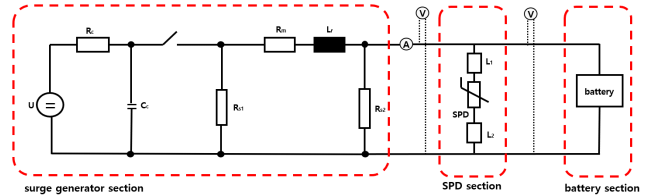


[그림 4] 전압 제한형 SPD 동작 특성

#### 3.3 전체 시험장치부

KS C IEC 61643-11의 '8.3.3 제한전압측정' 시험 항목과 IEC 60060-1을 바탕으로, 전체 시험장치는 그림 5와 같이 서지 발생장치부와 SPD부, 배터리부, 측정부 등으로 구성한다. 여기서, 서지 발생장치부는 컨트롤러를 통해 III등급 조합

파 또는 개폐서지 시험파형을 생성시키고, SPD부는 연결선(L1, L2)의 길이를 다르게 하여 DC 전로에 SPD를 연결한다. 또한, 측정부는 High Voltage Probe를 이용하여 입력 및 출력단의 전압을 측정하고, Rogowski Coil을 사용하여 입력단의 전류를 측정한다.



[그림 5] 전체 시험장치

## 4. 시험 결과 및 분석

#### 4.1 시험 조건

상기에서 구현한 시험장치를 바탕으로, 뇌서지 및 개폐서지에 따른 SPD의 특성을 분석하기 위하여, 표 1과 같이 시험 조건을 상정한다. 여기서, III등급 조합파에 의한 SPD의 특성 시험은 IEC 61643-11 시험에 부합하는 조합파 모의장치를 이용하여, SPD에 III등급 조합파(1kV/0.5kA, 1.5kV/0.75kA, 개방전압 파형(1.2/50μs), 단락전류 파형(8/20μs))를 인가하고, HFIX 2.5SQ 연결선을 이용하여 30cm, 50cm로 나누어 시험한다. 한편, 개폐서지에 의한 SPD의 특성시험은 IEC 60060-1 시험에 부합하는 개폐서지 모의장치를 이용하여 SPD에 개폐서지(1kV, 1.5kV, 개방전압 파형(250/2500us))를 인가하고, HFIX 2.5SQ 연결선을 이용하여 30cm로 상정하여 시험한다.

[표 1] 시험 조건

items	contents					
nominal voltage( $U_n$ )[V]	1,000	1,500	-	-	-	-
maximum continuous operating voltage( $U_c$ )[V]	1,200	1,500	600	800	600	800
voltage protection level( $U_p$ )[V]	3,900	4,500	2,500	3,800	1,400	1,800
maker	A		B		C	

#### 4.2 뇌서지 및 개폐서지에 대한 SPD 특성분석

표 2는 III등급 조합파 서지에 대하여, DC 전로와 SPD 사이의 연결선의 길이를 30cm로 상정하여 시험장치에 의한 특성을 나타낸 것이다. 여기서, 표 SPD에 의한 전압 저감율은 4.28% ~ 48.91%로 산정된다. 여기서, SPD의 서지보호 효과는 연결선의 길이가 짧고 SPD의 용량이 작아질수록 높게 나타남을 확인할 수 있다. 즉, 연결선의 길이에 의한 SPD의

서지저감효과는 연결선의 길이가 짧아질수록 서지로부터 기기와 병렬로 연결된 SPD까지의 저항이 작아지기 때문이고, SPD의 용량에 의한 SPD의 서지저감 효과는 SPD의 용량이 작을수록 같은 서지 전압에 대하여 SPD 내부 MOV의 저항이 낮아지기 때문이다. 따라서, 현장에서 설치되어 운용중인 A사의 SPD는 서지로부터 배터리를 보호하기에 적정하지 않지만, 본 논문에서 제안한 SPD의 적정용량 산정 알고리즘에 따라 선정된 C사의 SPD( $U_C$  600V,  $U_P$  1,400V)를 설치할 경우, III등급 조합과 서지로부터 배터리를 안전하게 보호할 수 있음을 알 수 있다.

한편, 표 3은 개폐서지에 대하여, DC 전로와 SPD 사이의 연결선의 길이를 30cm로 상정하여 시험장치에 의한 특성을 나타낸 것이다. 여기서, SPD에 의한 전압 저감율은 4.11% ~ 45.34%로 산정된다. 따라서, SPD의 보호효과와 수명을 고려하여, 본 논문에서 제안한 SPD의 적정용량 산정 알고리즘에 따라 C사의 SPD( $U_C$  600V,  $U_P$  1,400V)를 설치하면, 개폐서지로부터도 배터리를 안전하게 보호할 수 있음을 확인할 수 있었다.

[표 2] III등급 조합과 서지에 대한 SPD의 운용 특성

make	SPD capacity [V]		input voltage of 1,000[V]		input voltage of 1,500[V]	
	$U_C$	$U_P$	output voltage[V]	reduction rate[%]	output voltage[V]	reduction rate[%]
A	1,200	3,900	932.77	6.32	1299.98	13.25
	1,500	4,500	956.34	4.28	1320.97	11.76
B	600	2,500	838.30	16.17	931.62	37.89
	800	3,800	862.57	13.74	963.76	35.75
C	600	1,400	647.78	35.22	766.37	48.91
	800	1,800	658.05	34.20	776.96	48.20

[표 3] 개폐서지에 대한 SPD의 운용 특성

make	SPD capacity [V]		input voltage of 1,000[V]		input voltage of 1,500[V]	
	$U_C$	$U_P$	output voltage[V]	reduction rate[%]	output voltage[V]	reduction rate[%]
A	1,200	3,900	935.68	6.22	1300.98	13.25
	1,500	4,500	958.2	4.11	1321.17	11.72
B	600	2,500	955.26	4.47	1028.73	31.42
	800	3,800	996.01	0.40	1365.56	8.96
C	600	1,400	773.34	22.67	819.87	45.34
	800	1,800	815.38	18.46	855.82	42.95

## 5. 결 론

본 논문에서는 ESS의 전기적 위해요인 중의 하나인 서지에 대하여 배터리를 안정적으로 보호하기 위한 ESS용 SPD의 운용방안을 제안하고, III등급 조합과 및 개폐서지에 대한 SPD의 운용특성을 제시한다. 이에 대한 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) III등급 조합과 시험조건에 따라 SPD( $U_C$  1,500V,  $U_P$  4,500V)에 1.5kV의 조합과 서지를 인가할 경우, 서지보호 효과는 약 4.3%로 낮게 산정되지만, 본 논문에서 제안한 운용방안에 의해 산정된 적정용량의 SPD( $U_C$  600V,  $U_P$  1,400V)를 사용하는 경우, 서지보호 효과는 약 45%로 나타나며, 뇌서지로부터 배터리를 안전하게 보호할 수 있음을 확인하였다.

(2) 개폐서지 시험조건에 따라 SPD( $U_C$  1,500V,  $U_P$  4,500V)에 1.5kV의 개폐서지를 인가할 경우, 서지보호 효과는 약 0.7%로 낮게 산정되지만, 본 논문에서 제안한 운용방안에 의해 산정된 적정용량의 SPD( $U_C$  600V,  $U_P$  1,400V)를 사용하는 경우, 서지보호 효과는 약 45%로 나타나며, 개폐서지로부터도 배터리를 안전하게 보호할 수 있음을 확인하였다.

### 감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구(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] K. M. Park, J. H. Kim, J. Y. Park, S. B. Bang, "A Study on the Fire Risk of ESS through Fire Status and Field Investigation", FIRE SCIENCE AND ENGINEERING, vol. 32, no. 6, pp.91-99, 2018.12.
- [4] H. J. Jang, T. S. Song, J. Y. Kim, S. J. Kim, T. H. Jang "Study on Analysis of Fire Factor and Development Direction of Standard/safety Requirement to Keep Safety for Energy Storage System (ESS)", Journal of Standards, Certification and Safety, vol. 3, no. 9, pp.25-49, 2019.9.