

# 전기저장장치의 서지보호를 위한 SPD의 모델링 및 특성 분석에 관한 연구

황승욱\*, 최익준\*, 최형석\*, 노대석\*

\*한국기술교육대학교

e-mail: bread545@hanmail.net

## A Study on Modeling and Characteristics of SPD for Surge Protection of Energy Storage System

Seung-Wook Hwang\*, Ik-Joon Choi\*, Hyoung-Seok Choi\*, Dae-Seok Rho\*

\*Korean University of Technology and Education

### 요약

최근, 신재생에너지원의 출력 안정화, 수요관리 및 주파수 조정 등 다양한 기능을 가지고 있는 전기저장장치(energy storage system, ESS)의 설치가 매년 증가되고 있다. 그러나, 2017년 8월에 발생한 고창 전력시험센터의 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 ESS 운용 시, 안전성을 확보하기 위하여, 전력계통 상용해석 소프트웨어인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 배터리랙, PCS, SPD로 구성된 계통 모델링을 수행한다. 이를 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, DC측에 적절한 용량의 SPD를 설치할 경우, ESS를 서지로부터 보호할 수 있음을 알 수 있어, 본 논문의 유용성을 확인하였다.

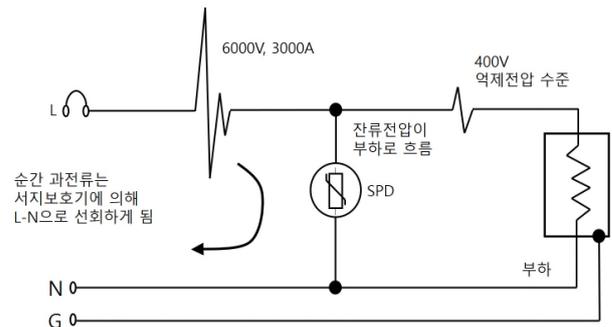
### 1. 서론

최근, 신재생에너지원의 출력 안정화, 수요관리 및 주파수 조정 등 다양한 기능을 가지고 있는 전기저장장치(energy storage system, ESS)의 설치가 급격하게 증가되고 있다[1]. 그러나, 2017년 8월에 발생한 고창 전력시험센터의 ESS 화재를 시작으로 경산 변전소의 F/R용 ESS, 군산 태양광발전연계용 ESS, 등 현재까지 총 29건의 화재사고가 발생하여 많은 재산피해가 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 ESS 운용 시, 안전성을 확보하기 위하여, 전력계통 상용해석 소프트웨어인 PSCAD /EMTDC를 이용하여 배터리랙, PCS, SPD로 구성된 계통 모델링을 수행한다. 이를 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, DC측에 적절한 용량의 SPD를 설치할 경우, ESS를 서지로부터 보호할 수 있음을 알 수 있어, 본 논문의 유용성을 확인하였다.

### 2. SPD의 동작 메커니즘

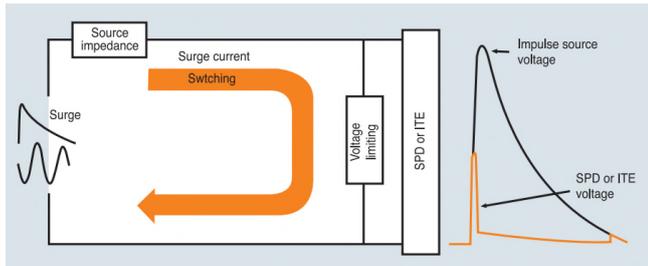
#### 2.1 SPD의 특성

SPD란, Surge로부터 각종 장비들을 보호하는 장치이며, 내부 구조, 동작기능, 등급시험에 따라 분류될 수 있다. 즉, 어떠한 이유로 인해 계통에 서지 전류가 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.



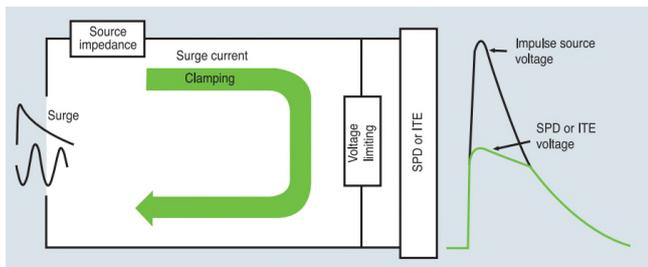
[그림 1] SPD의 보호 메커니즘

또한, 동작기능에 전압스위칭형과 전압제한형으로 나눌 수 있는데, 먼저, 가스방전관, 방전갯, 실리콘제어정류기, 트라이액 등을 사용한 전압스위칭형의 동작 개념도는 그림 2와 같다. 여기서, 전압스위칭형 SPD는 서지전압에 대하여 전류가 불연속적으로 변동하는 것이 특징이며, 방전 개시 전압 이하에는 개방 상태로 있으며 방전 개시 전압을 초과한 전압에 대해서는 순간 단락의 도통 상태가 된다. 또한 도통 상태는 최대 약 2 cycle 동안 지속되며 서지가 제거되면 자동적으로 개방 상태로 복귀한다.



[그림 2] 전압스위칭형 SPD

한편, 먼저, 금속산화물바리스터, 사태다이오드, 억제다이오드 등을 사용한 전압제한형의 동작 개념도는 그림 3과 같다. 여기서, 전압제한형 SPD는 서지전압에 대하여 전류가 연속적으로 변동하는 것이 특징이며, 동작 전압을 초과하는 전압에 대하여 매우 낮은 임피던스를 갖게되며 동작전압 이하에서는 매우 높은 임피던스를 갖게된다. 따라서, 선로 임피던스와 SPD 임피던스의 상관 관계에 의하여 전압이 억제되도록 작동된다.



[그림 3] 전압억제형 SPD

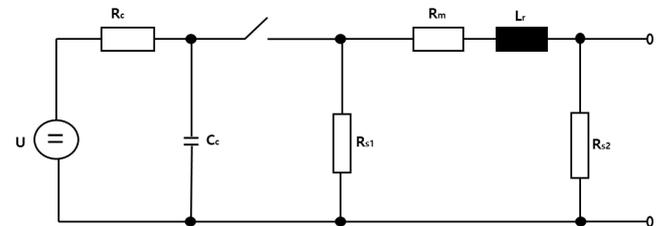
## 2.2 SPD의 시험 방법

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 전류과형  $10/350\mu s$ 을 사용한다. 또한, II등급시험은 공칭방전 전류  $I_n$  및 최대 방전전류  $I_{max}$ 를 이용하는 시험이다. 그리고, III등급시험은 조합파( $1.2/50\mu s$  임펄스전압,  $8/20\mu s$  임펄스 전류)의 시험전압으로 실행하는 시험을 나타낸다.

[표 1] 시플레이션 조건

SPD 종류	시험의 종류	방전대개변수	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	$U_{oc}$	$U_{OC} : III$ 등급시험에 대한 개방회로전압

이 중, III등급 조합파 시험을 위한, 조합파 서지발생기의 회로도는 그림 4와 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, 개방상태에서  $1.2/50[\mu s]$  임펄스전압, 그리고 단락회로에서  $8/20[\mu s]$  임펄스전류를 발생시키는 조합파를 구성한다.

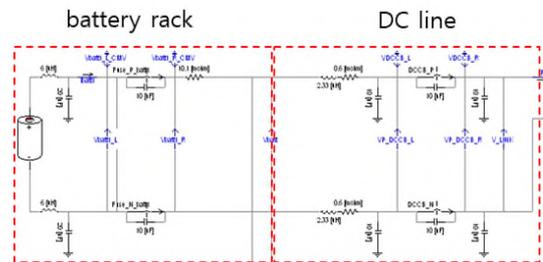


[그림 4] 조합파 서지발생기의 회로도

## 3. PSCAD/EMTDC를 이용한 ESS 및 SPD 모델링

### 3.1 배터리랙 및 DC전로 모델링

PSCAD/EMTDC를 이용하여 배터리랙 및 DC전로를 모델링하면, 그림 5와 같이 나타낼 수 있다. 이 그림에서와 같이, 배터리랙은 배터리와 퓨즈로 구성되고, DC전로는 DC 차단기와 전로로 구성된다. 여기서, 배터리는 내부 임피던스와 기생커패시턴스, 전압원으로 구성된다.

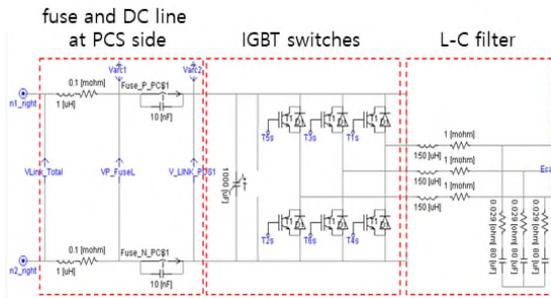


[그림 5] 배터리랙 및 DC 전로 모델링

### 3.2 PCS 모델링

배터리의 충·방전 기능을 가진 PCS는 그림 6과 같이, DC 전로, 퓨즈, DC-Link 커패시터, IGBT, L-C 필터, 등으로 구성된다. 여기서, DC 전로는 배터리랙간의 전선과 배터리제어장치

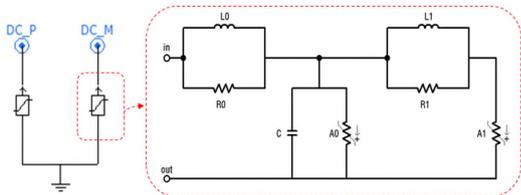
(battery control panel)와 PCS간의 전선으로 구성되며, DC-Link 커패시터는 IGBT의 스위칭 동작에 의한 DC측의 전압을 안정시키는 역할을 수행한다. 또한, IGBT는 DC 전원을 120° 위상차를 갖는 3상 AC로 변환하며, L-C 필터는 변환된 AC 전원의 고조파 및 노이즈를 제거하는 역할을 수행한다.



[그림 6] DC 전로 및 PCS 모델링

### 3.3 SPD 모델링

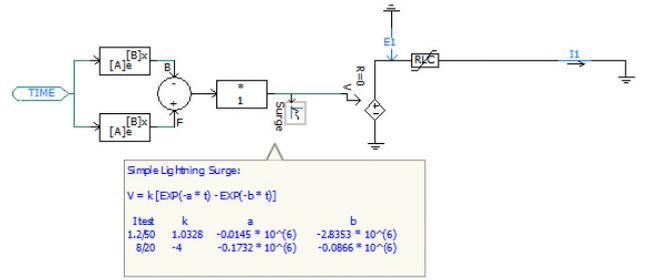
SPD는 그림 7과 같이 비선형 저항과 L-C로 구성되며, 과도 서지전압으로부터 ESS를 보호한다. 즉, SPD는 정상적인 동작 전압 범위에서 높은 임피던스를 가지므로 정상상태에서는 시스템에 영향을 미치지 않는다. 하지만, 과도 서지전압이 발생하는 경우, SPD의 임피던스는 감소하여 서지 전류를 접지를 통해 방류함으로써, 발생하는 CMV의 크기를 제한할 수 있다. 한편, 과도 서지전압이 제거되면 SPD는 높은 임피던스 상태로 복귀하게 된다.



[그림 7] SPD 모델링

### 3.4 조합과 서지발생기 모델링

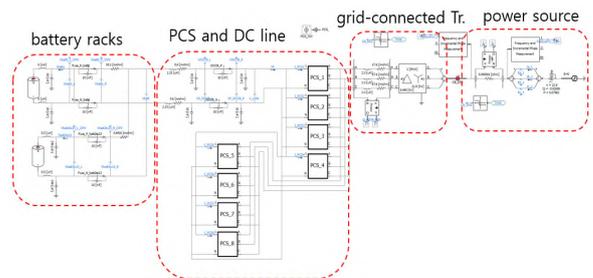
III등급 SPD 시험을 위해, 개방상태에서 1.2/50[μs] 임펄스전압, 그리고 단락회로에서 8/20[μs] 임펄스전류를 발생시키는 조합과 서지발생기를 모델링하면 그림 8과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 발생기는 2[Ω]의 실효 출력 임피던스를 가지며, 개방 회로 출력 전압은 20[kV]이고, 단락 회로 출력 전류는 10[kA]의 값을 갖도록 구성한다.



[그림 8] 조합과 서지발생기 모델링

### 3.5 전체 시스템 모델링

상기에서 제시한 모델링을 바탕으로, ESS의 전체 시스템을 나타내면 그림 9와 같다. 이 그림에서와 같이, 전체시스템은 배터리랙, PCS, SPD 등으로 구성된다. 여기서, 1MWh급 배터리는 13개의 배터리랙을 병렬로 구성하며, 1번 랙을 제외한 2~13번 랙은 하나의 랙으로 등가화 시킨다. 또한, 1MW급 PCS는 125kW급 unit 8개 병렬로 연결하여 구성한다[5].



[그림 9] 전체 시스템 모델링

## 4. 시뮬레이션 결과 및 분석

### 4.1 시뮬레이션 조건

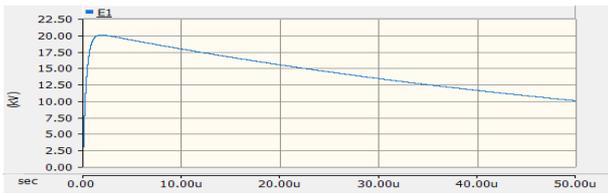
본 논문에서 제시한 모델링을 바탕으로, ESS 제어전원용 SPD의 특성을 분석하기 위하여, 표 2과 같이 시뮬레이션 조건을 상정한다. 여기서, ESS 제어전원용 SPD에 대한 III등급 제한전압 특성시험은 IEC 61643-11 시험에 부합하도록, 개방회로 출력전압 20[kV], 단락회로 출력전류 10[kA]의 임펄스 서지를 모의한다. 또한, SPD의 전압보호수준(U<sub>p</sub>)는 2.6[kV]와 기존 L사의 제품 정격인 3.9[kV]로 나누어 시험한다.

[표 2] 시뮬레이션 조건

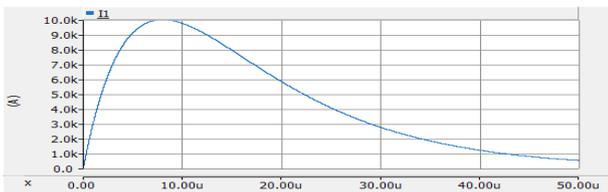
배터리 랙	정격 전압	DC 1[kV]
	정격 용량	1[MWh]
조합파 서지 발생기	개방회로 출력전압	20[kV]
	단락회로 출력전류	10[kA]
SPD	정격전압 U <sub>n</sub>	1[kV]
	최대연속동작전압 U <sub>c</sub>	1.2[kV]
	전압보호수준 U <sub>p</sub>	2.6[kV], 3.9[kV]
PCS	용량	1[MW]
	입력 전압	DC 1[kV]
	출력 전압	AC 0.44[kV]

4.2 III등급 조합파의 서지 특성 분석

상기의 모델링과 같이, 개방상태에서 1.2/50[μs] 임펄스전압, 그리고 단락회로에서 8/20[μs] 임펄스전류를 발생시키는 조합파 서지발생기의 개방 및 단락회로 시험 결과는 그림 10과 같다. 즉, 20[kV]의 개방회로 출력전압과 2[Ω]의 실효 출력 임피던스를 가지는 발생기에 의해, 10[kA]의 단락회로 출력전류가 정상적으로 출력됨을 알 수 있다.



(a) 개방회로 출력전압

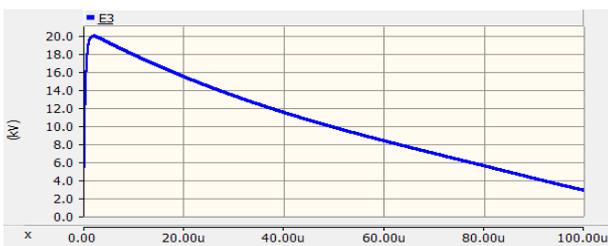


(b) 단락회로 출력전류

[그림 10] 조합파 서지 발생기의 출력

4.3 III등급 조합파 서지에 의한 SPD 특성분석

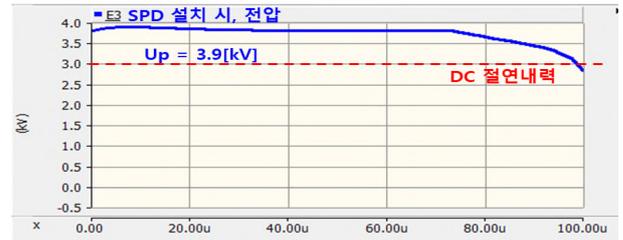
3장의 모델링을 바탕으로, SPD가 설치되지 않은 ESS 전단에 III등급 조합파 서지발생기를 이용해, 정상운용중인 ESS에 III등급 조합파 서지를 모의하면 그림 11과 같다. 즉, 서지를 억제할 수 있는 보호기기가 설치되지 않았기 때문에, 입력 서지가 부하에 그대로 출력됨을 확인하였다.



[그림 11] SPD 설치 전 조합파 시험 특성(20[kV], 10[kA])

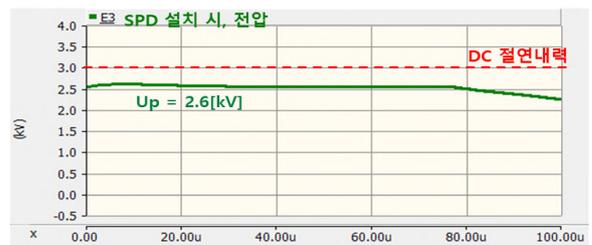
한편, 표 2의 시뮬레이션 조건에 따라, PCS와 배터리랙 사이에  $U_p$  3.9[kV]의 SPD가 설치되고, 조합파 서지가 발생될 경우, 부하 전압을 나타내면 그림 12와 같다. 즉, 1[kV]의 DC 선로에 조합파 서지가 유입되어,  $U_c$ 값 이상이 되면 SPD의 내부 저항이 저하되기 시작하며,  $U_p$ 값에 도달하면 거의 0에 가깝게 되어, 3.9[kV]를 초과하는 서지에 대해서는 접지를 통해 방전하므로 배터리에  $U_p$ 를 초과하는 전압이 인가되지 않는다. 하지만,  $U_p$  미만의 전압에 대해서는 그대로 부하에 전달되어, DC 절연내력이 3[kV]라고 가정할 때, SPD가 설치되

있음에도 불구하고, 절연과피로 인해 전기적인 위해요인이 될 수 있음을 확인하였다.



[그림 12] 조합파 서지 전압에 따른 SPD 특성( $U_p=3.9$ [kV])

한편, PCS와 배터리랙 사이에  $U_p$  2.6[kV]의 SPD가 설치되고, 조합파 서지가 발생될 경우, 부하 전압을 나타내면 그림 13과 같다. 여기서는, 2.6[kV]를 초과하는 서지에 대해서는 접지를 통해 방전하므로 배터리에  $U_p$ 를 초과하는 전압이 인가되지 않아, DC 절연내력이 3[kV]라고 가정할 때, 적정 용량의 SPD에 의해 SPD 2차측이 서지로부터 보호됨을 확인하였다.



[그림 13] 조합파 서지 전압에 따른 SPD 특성( $U_p=2.6$ [kV])

5. 결 론

본 논문에서는 ESS 운용 시 DC측에 적용되는 SPD에 대한 명확한 기준이 없어, ESS의 안정적인 운용을 위하여 전력계통 상용해석 소프트웨어인 PSCAD /EMTDC를 이용하여 배터리랙, PCS, SPD로 구성된 계통 모델링을 수행한다. 이를 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, DC측에 적정 용량의 SPD를 설치할 경우, ESS를 서지로부터 보호할 수 있음을 알 수 있어, 본 논문의 유용성을 확인하였다.

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