

## 저압용 서지 보호 장치(SPD)의 보호 거리 해석

(Analysis of the Protective Distance of Low-Voltage Surge Protective Device(SPD) to Equipment)

이정우\* · 오용택

(Jung-Woo Lee · Yong-Taek Oh)

### Abstract

Installing surge protection devices for a low-voltage system is important to ensure the survival of electric or electronic devices and systems. If surge protection devices (SPD) are installed without consideration of the concept of lightning protection zones, the equipment to be protected might be damaged despite the correct energy coordination of SPDs. This damage is induced by the reflection phenomena on the cable connecting an external SPD and the load protected. These reflection phenomena depend on the characteristics of the output of the external SPD, the input of the loads, and the cables between the load and the external SPD. Therefore, the SPD has an effective protection distance under the condition of the specific load and the specific voltage protection level of SPD.

In this paper, PSCAD/EMTDC software is used to simulate the residual voltage characteristics of SPD Entering the low-voltage device. And by applying a certain voltage level, the effective protection distances of SPD were analyzed according to the each load and length of connecting cable, and the effectiveness of SPD were verified.

Key Words : Surge, Low-Voltage Power Supply, Surge Protection Device(SPD), Voltage Protection Level

### 1. 서 론

저전압 설비에서 낙뢰나 부하 스위칭 때문에 야기 되는 과도 서지전압으로부터, 전기 전자 장치들을 보호하는 것은 매우 중요한 일이다. 과도 서지전압은

자주 발생하고 전압의 범위도 300[V]에서 5600[V]까지 다양한데, 이와 같은 과도 서지전압의 피해를 감소시키기 위해서는 서지 차단 장치, 즉 SPD(Surge Protective Device)를 반도체 공장의 설비나 수용가 설비에 설치하여 각각의 부하를 보호 할 필요가 있다. SPD는 낙뢰와 같은 과도 전압에 대한 가장 효과적인 보호 방법으로서 정상상태에서는 매우 높은 저항성을 띄게 되어 적은 전류가 흐르게 되고, 과도상태에서는 저항성이 매우 작게 줄어들어 서지의 과도 전압 임펄스를 통과 시키도록 한다.

\* 주저자 : 한국기술교육대학교 전기전자공학과 졸업  
Tel : 041-560-1261, Fax : 041-560-1261  
E-mail : beastwoo@kut.ac.kr  
접수일자 : 2011년 12월 2일  
1차심사 : 2011년 12월 9일  
심사완료 : 2012년 4월 10일

SPD를 설치함에 있어 보호하고자 하는 부하 설비의 종류나 SPD와 부하 설비 간의 거리가 서지 전압으로부터의 차단 효과에 영향을 끼칠 수 있다. ANSI/IEEE C 62.41에서는 위치에 따른 3가지의 과도 서지전압의 범주를 정의하였고[8], IEC 61643-12에서는 저전압 범위에서 과도 서지전압에 대한 SPD 보호 효과 레벨을 4가지로 정의하였다[3]. 이들 2개의 표준에 대하여 SPD는 여러 가지 길이를 갖는 케이블로 연결된 분전함에 전원을 공급받는 건물과 같은 곳의 분전함에 설치되도록 고려되어야 한다. 만일 SPD가 설비에 가깝게 인접하여 있다면 설비는 서지에 대하여 효과적으로 보호될 수 있으나, 만약 멀리 떨어져 설치되어 있다면 서지에 대한 보호를 받을 수 없을 수도 있다. 즉, SPD 설비에 있어 설치 위치를 고려하지 않을 경우, SPD의 설치에도 불구하고 서지에 의해 부하 측 장비들의 손상을 가져올 수 있다. 이러한 손상은 SPD와 연결된 부하측 사이에 있는 전원 케이블의 입출력 부분에서의 반사현상 때문에 유발 된다. 즉, SPD를 통과한 서지 잔류전압이 케이블을 통해 부하측에 전달 될 때 케이블 입력부와 출력부에서의 반사현상 때문에 서지 잔류전압의 피크값을 증폭시킬 수 있다[4]. 그러므로 SPD의 효과적인 서지 보호를 위해서는 부하의 종류와 해당 전압 보호 레벨의 수준에 따른 SPD 설치 위치를 선정하는 것이 중요하다.

본 논문에서는 PSCAD/EMTDC 프로그램을 사용하여 부하의 종류 및 거리에 따른 과도 서지 전압 임펄스의 변화를 비교, 분석하여 SPD의 효과적인 보호 거리를 확인 하고자 한다. 우선 시뮬레이션을 위해서 여러 가지의 SPD 모델들중 한가지를 선정하여 모델링하였고[1-2], IEC 61643-12에서 제시한 4가지의 보호 전압 레벨 카테고리[3] 중 한 가지를 선택하여 SPD의 보호 기준 전압으로 적용하였다. 5가지 종류의 부하에 따른 SPD의 최대 보호 거리 분석을 위해 간단한 DC 220[V] 저전압 계통을 설계하여 시뮬레이션을 실시하여 부하에 유입되는 잔류 전압의 파형을 분석하고 제시한 보호전압 레벨에 적합한 보호거리를 해석함으로써 효과적인 SPD 설치 효율성을 확인하였다.

## 2. 시뮬레이션을 위한 모델링

### 2.1 서지 조합파

시뮬레이션에서 사용된 서지 임펄스는 국제기구인 IEC, IEEE, UL, NEC등에서 규정한 지수함수에 따라 상승하는 이중지수파형의 조합파를 사용하였으며, 조합파는 개방회로 상태에서 1.2/50[ $\mu$ s]의 서지전압을 적용하고, 단락회로에서는 8/20[ $\mu$ s]의 서지 전류를 적용한다[9]. ANSI/IEEE C 62.41에서 제시한 저전압 범주의 최적 조합파의 조건은 2[kV]/1[kA]이고, 최악의 조건은 6[kV]/3[kA]이다[8]. 본 연구에서는 그림 1과 같은 서지 조합파 발생기를 이용하여 6[kV]/3[kA]의 서지 조합파를 시뮬레이션에 적용하였다[10].

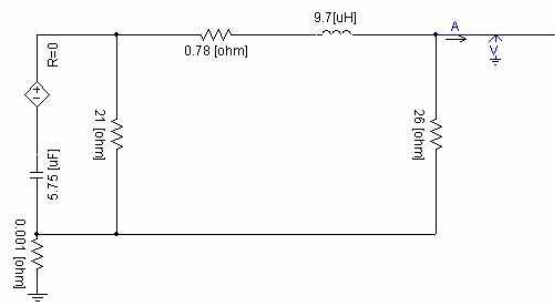


그림 1. 서지 조합파 발생기  
Fig. 1. Surge combination wave generator

### 2.2 모델 계통

SPD의 효과적인 서지 전압 보호 거리를 분석하기 위해 아래 그림 2와 같이 간단한 220[V] 단상 배전 시스템의 모델을 PSCAD/EMTDC를 이용하여 설계하였다. 케이블은 L과 C를 이용한  $\pi$  회로를 적용하여 선로정수를 계산하였다. 임피던스 성분  $Z = (0.00862 + j0.000964)[\Omega/m]$ 와, 어드미턴스 성분  $Y = (0 + j1.421 \times 10^{-7})[S/m]$ 를 PSCAD 케이블 설정값에 대입하였고, 케이블의 특성 임피던스는 82.4[ $\Omega$ ]이다.

SPD는 그림 3의 (a)와 같은 금속 산화물 비리스터(MOV)를 이용한 비선형 Physical 모델을 선정하였으며[1-2], PSCAD에서 기본으로 제시하는 MOV 어레

## 저압용 서지 보호 장치(SPD)의 보호 거리 해석

스터 소자 특성을 적용하였다[5-7]. 어레스터의 전류-전압 특성은 그림 3의 (b)와 같다[10].

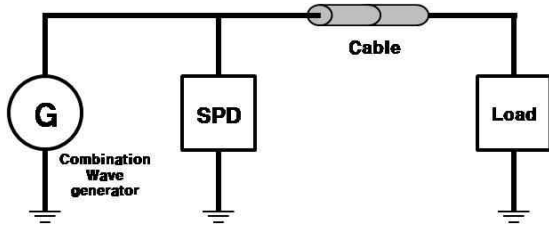


그림 2. DC 220[V] 단상 배전 시스템  
Fig. 2. Single-phase system of DC 220[V]

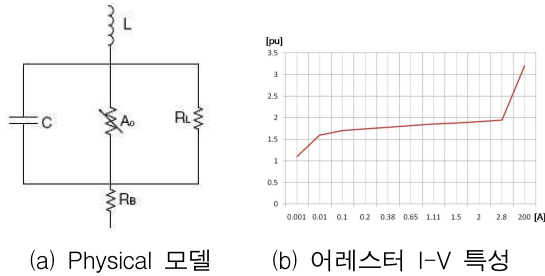


그림 3. SPD Physical 모델과 어레스터 I-V 특성 곡선  
Fig. 3. SPD Physical model and arrester I-V characteristic

### 2.3 SPD의 보호 전압 레벨 선정

표 1. IEC 61643-12 의 보호 전압 레벨  
Table 1. Voltage protection level IEC 61643-12

Voltage level	I	II	III	IV
	1.1 $U_0$	1.5 $U_0$	1.732 $U_0$	1.905 $U_0$
$U_c$	253[V]	345[V]	400[V]	440[V]
$U_p$	1,200[V]	1,500[V]	1,800[V]	2,000[V]

- \* $U_0$  : 실효 전압
- \* $U_c$  : 어레스터의 최대 연속 동작 전압
- \* $U_p$  : SPD의 보호 전압 한계

SPD의 서지 전압 차단 효과를 확인하기 위해서는 우선 설계한 DC 220[V] 단상 배전 시스템의 부하가 견딜 수 있는 최대 서지 전압을 정해야 한다. 그리하여 아래 표 1과 같은 IEC 61643-12에서 제시한 저전

압 계통에 따른 SPD의 보호 전압 레벨 카테고리 중 I 레벨을 선정하였다[3]. 이는 SPD의 서지 잔류전압이 케이블을 통해 부하에 도달할 때 그 최고값이 1,200[V]가 넘어서는 안되며, 1,200[V]가 넘을 경우 부하가 손상되어 SPD의 보호를 받지 못하였다는 기준을 결정한 것이다.

### 2.4 PSCAD 시뮬레이션을 위한 어레스터 설정

시뮬레이션 하기 위해 먼저 PSCAD/EMTDC로 설계된 SPD Physical 모델에 적용할 어레스터의 최대 연속 동작 전압(Maximum continuous operating Voltage)을 계산하였다. 어레스터의 최대 연속 동작 전압( $U_c$ )은 SPD에 지속적으로 인가되는 최대 실효치 또는 직류 전압, 정격 전압으로서 식 (1)과 같이 카테고리 I를 적용하기 위해 계통의 실효전압에 1.1배를 하여 구하였다. 그러나 IEC 같은 경우 실효전압의 기준이 230[V]/50[Hz]의 국제규격으로서 표 1과 같은 카테고리를 제시한 것이다. 그리하여 본 연구에서도 220[V]의 전압변동율 5[%] 허용치 이내의 230[V]를 식에 적용하였으며, 주파수는 고려하지 않았다.

$$U_c = 230 \text{ V} \times 1.1 = 253 \text{ V} \quad (1)$$

또한 이를 적용하여 시뮬레이션을 실행하기 위해서는 PSCAD에서 제공하는 어레스터에 계산된  $U_c$ 의 정격 전압 피크값(Peak value of rated Voltage,  $U_r$ )을 입력하여야 한다. 정격 전압 피크값의 계산 과정은 식 (2), 식 (3)과 같다.

$$* \text{ 어레스터의 정격 전압(Voltage rating) } U_r \text{은 } U_c \text{의 1.25배.}$$

$$U_r = U_c \times 1.25 = 253 \text{ V} \times 1.25 = 316.25 \text{ V} \quad (2)$$

$$U_{rp} = U_r \times \sqrt{2} \text{ (피크값)} \\ = 316.25 \text{ V} \times \sqrt{2} \approx 447 \text{ V} \quad (3)$$

### 3. 시뮬레이션 결과 분석

본 연구에서는 SPD의 효과적인 보호거리를 측정하고자, 케이블의 길이를 1[m]부터 100[m]까지 1[m] 단위로 증가시켜 각 부하에 도달하는 서지 잔류 전압의 최대값을 확인하였다.

#### 3.1 저항 부하일 때 SPD의 최대 보호 거리

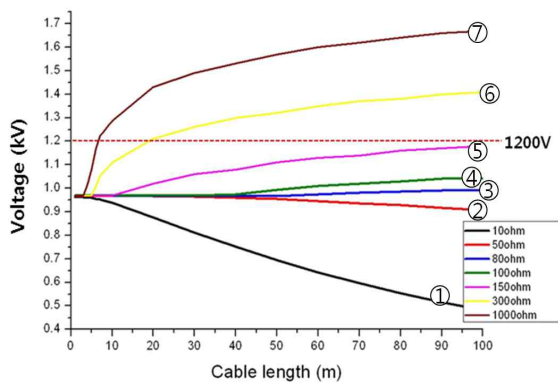


그림 4. 저항 부하일 때의 거리에 따른 SPD 보호 효과  
Fig. 4. Effective protection of SPD according to the distance protection when the resistive load

표 2. 저항 부하의 크기에 따른 SPD 최대 보호 거리  
Table 2. Maximum Effective protection distance of SPD for resistive load

번호	Load	Effect distance
1	10[Ω]	제한 없음
2	50[Ω]	제한 없음
3	80[Ω]	제한 없음
4	100[Ω]	제한 없음
5	150[Ω]	제한 없음
6	300[Ω]	< 23[m]
7	1000[Ω]	< 6[m]

그림 4는 케이블의 길이를 1[m]부터 100[m]까지 변경하며 7개의 저항 부하에 도달한 각각의 SPD 잔류 전압을 측정한 결과이다. 각 부하별 SPD의 효과적인 보호 거리를 알 수 있었으며 표 2에 정리를 하였다. 150

[Ω] 이하의 부하에서는 서지 잔류전압의 최고 크기가 1,200[V]를 넘지 않는 것을 확인할 수 있어서 SPD가 케이블 길이 100[m]까지 효과적으로 보호 할 수 있음을 알 수 있다. 150[Ω]을 초과하는 부하일 경우에는 그 크기가 클수록 SPD의 보호 거리가 줄어드는 것을 확인 하였다.

#### 3.2 커패시터 부하일 때 SPD의 최대 보호 거리

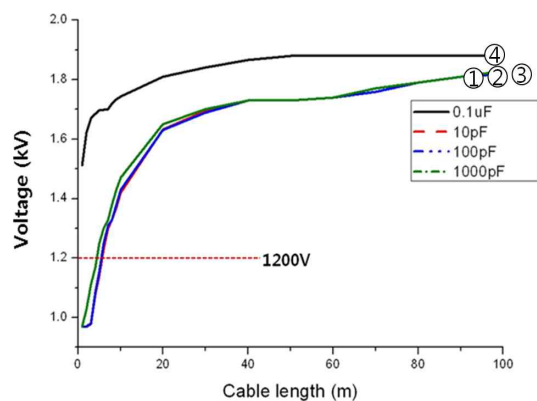


그림 5. 커패시터 부하일 때의 거리에 따른 SPD 보호 효과  
Fig. 5. Effective protection of SPD according to the distance protection when the capacitive load

표 3. 커패시터 부하의 크기에 따른 SPD 최대 보호 거리

Table 3. Maximum Effective protection distance of SPD for capacitive load

번호	Load	Effect distance
1	10[pF]	< 5[m]
2	100[pF]	< 4[m]
3	1000[pF]	< 3[m]
4	0.1[uF]	< 1[m]

그림 5는 커패시터 부하 4가지를 달리하며 시뮬레이션한 결과이다. 커패시터의 크기가 커질수록 SPD의 효과적인 보호 거리가 줄어들고 있으며, 대부분 5[m]까지가 한계임을 알 수 있다. 특히, 0.1[uF] 와 같이 매우 큰 부하일 경우 그 보호 거리가 1[m]도 안됨을 확

인 하였다. 이는 용량성 장비를 가진 부하 설비에서 효과적으로 서지 전압을 차단하기 위해서는 설비와 매우 가까운 곳에 SPD를 설치하는 것이 바람직함을 알 수 있다.

### 3.3 인덕터 부하일 때 SPD의 최대 보호 거리

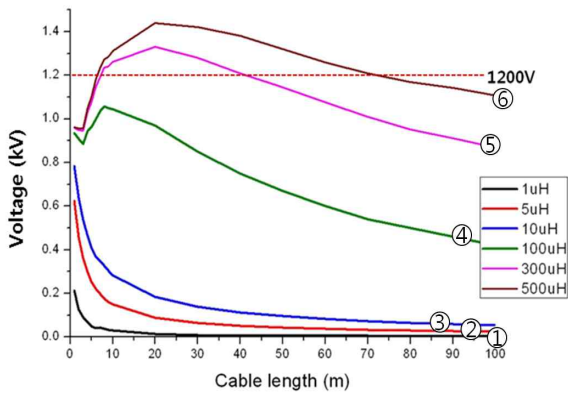


그림 6. 인덕터 부하일 때의 거리에 따른 SPD 보호 효과  
Fig. 6. Effective protection of SPD according to the distance protection when the inductive load

표 4. 인덕터 부하의 크기에 따른 SPD 최대 보호 거리  
Table 4. Maximum Effective protection distance of SPD for inductive load

번호	Load	Effect distance
1	1[uH]	제한 없음
2	5[uH]	제한 없음
3	10[uH]	제한 없음
4	100[uH]	제한 없음
5	300[uH]	< 5[m] 또는 > 41[m]
6	500[uH]	< 7[m] 또는 > 73[m]

그림 6은 인덕터 부하 6가지에 대한 시뮬레이션 결과이다. 인덕터 크기가 100[uH] 이하까지는 거리에 제한이 없이 SPD의 서지 차단 효과를 받을 수 있음을 확인하였다. 그러나 300[uH] 이상부터는 SPD의 보호 거리가 2가지로 나뉜다. 표 4와 같이 인덕터 300[uH]의 경우 SPD의 보호 거리는 5[m] 이내 이거

나 41[m]이상으로 나뉜다. 이는 케이블의 길이가 짧아 그 특성 임피던스가 작고 인덕터 부하의 크기가 클 때는 SPD의 보호 거리가 매우 짧아지고, 케이블의 길이가 길어져 특성 임피던스가 인덕터의 크기 보다 상대적으로 커지는 구간에서는 SPD의 보호를 받을 수 있다는 것을 확인하였다.

### 3.4 R-C 병렬 부하일 때 SPD의 최대 보호 거리

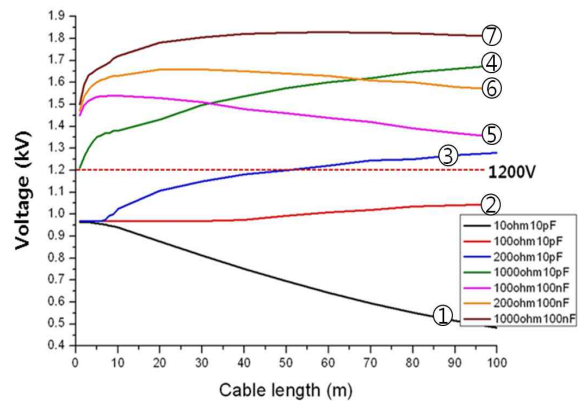


그림 7. R-C 병렬 부하일 때의 거리에 따른 SPD 보호 효과  
효과

Fig. 7. Effective protection of SPD according to the distance protection when the R-C parallel load

표 5. R-C 병렬 부하의 크기에 따른 SPD 최대 보호 거리

Table 5. Maximum Effective protection distance of SPD for R-C parallel load

번호	Load	Effect distance
1	10[Ω]/10[pF]	제한 없음
2	100[Ω]/10[pF]	제한 없음
3	200[Ω]/10[pF]	< 52[m]
4	1000[Ω]/10[pF]	< 1[m]
5	100[Ω]/100[nF]	< 1[m]
6	200[Ω]/100[nF]	< 1[m]
7	1000[Ω]/100[nF]	< 1[m]

저항과 커패시터의 병렬 부하일 때 케이블 길이에 따른 SPD의 보호 거리 시뮬레이션 결과를 그림 7에

나타내었다. 표 5에서 보면 100[Ω] 이하의 부하일 때 는 길이의 제한 없이 SPD가 효과적인 보호를 할 수 있음을 알 수 있다. 그러나 100[Ω]을 초과하는 부하에 대해서는 서지의 최대 잔류전압이 1[m]부터 1,200[V]를 넘어서 SPD 보호를 받지 못함을 확인 하였다. 이 경우 SPD의 보호 효과를 위해서는 SPD를 부하와 1[m]미만으로 아주 가깝게 설치해야 한다.

### 3.5 R-L 직렬 부하일 때 SPD의 최대 보호 거리

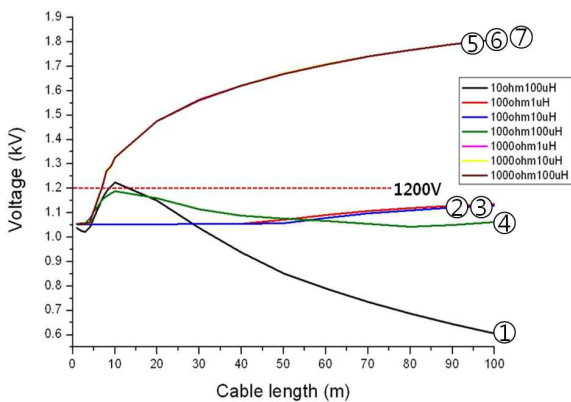


그림 8. R-L 직렬 부하일 때의 거리에 따른 SPD 보호 효과

Fig. 8. Effective protection of SPD according to the distance protection when the R-L serial load

표 6. R-L 직렬 부하의 크기에 따른 SPD 최대 보호 거리

Table 6. Maximum Effective protection distance of SPD for R-L serial load

번호	Load	Effect distance
1	10[Ω]+100[uH]	< 9[m] or > 15[m]
2	100[Ω]+1[uH]	제한 없음
3	100[Ω]+10[uH]	제한 없음
4	100[Ω]+100[uH]	< 10[m] or > 15[m]
5	1,000[Ω]+1[uH]	< 5[m]
6	1,000[Ω]+10[uH]	< 5[m]
7	1,000[Ω]+100[uH]	< 5[m]

그림 8은 저항과 인덕터의 직렬 부하일 때 시뮬레이

션 결과를 나타내었다. 저항과 인덕터의 직렬 부하 경우, 두가지 사항으로 나누어 분석할 수 있었다. 첫 번째로 저항이 100[Ω]이하일 경우에 인덕터의 크기가 작으면 케이블의 길이에 제한이 없이 SPD의 보호 효과가 적용되지만, 인덕터의 크기가 커지면 케이블의 길이가 10[m] 미만이거나 15[m]이상일 때 SPD의 보호 효과를 받을 수 있었다. 두 번째로는 저항의 크기가 100[Ω]을 초과할 경우 인덕터의 크기에 상관없이 SPD의 최대 보호 거리가 5[m]이내로 짧아짐을 확인 할 수 있었다.

## 4. 결 론

본 논문에서는 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 프로그램을 사용하여 6[kV]/3[kA]의 서지 조합과 발생기와 SPD 모델을 설계하였고 간단한 단상 배전계통에 이를 적용해 5개의 부하 종류를 달리하여 SPD의 설치 위치에 따른 과도 서지전압 차단효과를 분석 하고자 하였다. 우선 IEC 61643-12에서 제시한 4개의 저전압 보호 레벨 중 첫 번째 카테고리인 1,200[V]의 보호 전압 한계를 적용하였다. 그리하여 본 논문에서는 SPD를 통과한 서지 잔류전압이 보호 전압 한계 1,200[V]를 초과하지 않는 케이블의 길이를 SPD의 최대 보호 거리로 정의하였으며 이를 이용해 시뮬레이션을 실시 하였다. 저항 부하일 경우에는 150[Ω]을 기준으로 SPD의 최대 보호 거리가 결정되었다. 150[Ω] 이내의 부하에서는 케이블의 길이 제한없이 SPD의 보호 효과를 받을 수 있었으며, 150[Ω]을 초과하는 부하의 경우 그 크기가 커질 수록 SPD의 최대 보호 거리가 단축되었다. 이와 같은 이유로는 케이블이 부하와 연결된 지점에서의 전파 과정때문이라고 볼 수 있다. 만약, 부하의 임피던스 크기가 케이블의 특성 임피던스 보다 커지면 전파 과정에서의 반사 및 투과 현상으로 인해 케이블에서 부하쪽으로 출력되는 SPD를 통과한 서지 잔류 전압의 진동을 가져와 그 크기가 커진다. 인덕터 부하의 경우에는 인덕터 자체가 SPD와 같이 전압억제 현상을 띄어 케이블 길이의 제한없이 안정적인 보호 효과를 보였다. 커패시터 부하의 경우 그 크기가 커질 수 록 SPD의 최대 보호 거리가 급격히



단축 되었으며, 커패시터 크기 0.1[ $\mu$ F] 이상에서는 최대 보호 거리가 1[m]도 넘지 못함을 확인하였다. R-C의 병렬 부하와 R-L의 직렬 부하의 경우에는 시뮬레이션 결과가 공통으로 저항 성분의 크기에 따라 달라짐을 알 수 있었다. 특히 R-L 직렬 부하에서는 저항 성분의 크기에 따라 SPD의 최대 보호 거리가 2가지 경우로 구분되었다. 부하의 저항 크기가 케이블의 특성 임피던스 보다 작을 경우 인덕터의 크기에 따라 SPD의 최대 보호 거리 구간이 나뉘어 졌으며, 저항의 크기가 매우 커지면 SPD의 보호 거리가 줄어들었다..

본 연구의 결과, 일반적으로 커패시터 부하를 제외한 모든 부하에서 케이블의 길이에 따른 SPD의 최대 보호 효과 거리는 대부분 10[m] 이내임을 확인 할 수 있었다. 커패시터가 포함 된 부하의 경우에는 진동 주파수로 인한 서지 잔류전압 크기의 증가가 매우 심하여 SPD와 부하 사이의 거리를 1[m] 이내로 매우 가깝게 해야 함을 알 수 있었다.

향후에는 실계통의 모델에 SPD를 적용하여 다양한 형태의 과도 서지전압에 대한 차단효과를 연구 하고자 한다.

이 논문은 한국조명·전기설비학회 2010년도 추계학술대회(2010. 9. 29, COEX)에서 발표하고 우수추천논문으로 선정된 논문임.

### References

[1] IEEE, "Recommended practice on surge voltage in low-voltage ac power circuits", ANSI/IEEE Std. C6241, 1991.  
 [2] Low-Voltage Surge Protective Devices--Part 12: Surge Protective Devices Connected to Low-Voltage Power Distribution Systems--Selection and Applications Principles, IEC 61643-12, IEC Std., 2002.

[3] 이정우, 오용택 "부하특성에 따른 서지보호장치 차단효과 연구", 한국조명·전기설비학회, 한국조명·전기설비학회 2010 추계학술대회 논문집 2010.9, pp 184-185.  
 [4] 이정우, 오용택 "저전압 서지 보호 장치의 유효 보호거리 평가", 한국조명·전기설비학회, 한국조명·전기설비학회 2011 추계학술대회 논문집 2010. 10, pp 146-148.  
 [5] IEC, "Within low-voltage system", IEC Std. 60664 - 1, 1992.  
 [6] PSCAD Software, "Online Available", <http://www.pscad.com>  
 [7] B. Z'itnik, "M. Z'itnik, M. Babuder, The ability of different simulation models to describe the behavior of metal oxide varistors", in: 28th International Conference on Lightning Protection, pp. 1111 - 116, 2006.  
 [8] A. Bayadi, N. Harid, K. Zehar, S. Belkhat, "Simulation of metal oxide surge arrester dynamic behavior under fast transients", in: International Conference on Power Systems Transients, New Orleans, USA, 2003.  
 [9] A.Goudarzi, H.Mohseni, "Accuracy evaluation of IEEE model for distribution class metal oxide surge arrester", Universities Power Engineering Conference, 2004.

### ◇ 저자소개 ◇



**이정우 (李政宇)**

1980년 9월 16일생. 2009년 한국기술교육대학교 전기공학과 졸업. 2012년 한국기술교육대학교 전기전자공학과 졸업(석사).



**오용택 (吳龍澤)**

1958년 6월 17일생. 1980년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 1982년 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1979~1991년 한국전력공사 근무. 1987년 한국전력공사 정보처리처 과장 역임. 1991~현재 한국기술교육대학교 정보기술공학부 전기전공 교수. 2007년 호주 퀸스랜드 대학교 방문 연구원.