

협조된 SPD시스템에서 접속선의 길이가 에너지협조에 미치는 영향

(Influences of the Length of Connecting Leads on the Energy Coordination in Coordinated SPD Systems)

이복희* · 신희경

(Bok-Hee Lee · Hee-Kyung Shin)

Abstract

For the purpose of designing and applying the optimum surge protection scheme, multi-stage coordinated surge protective device (SPD) system is suitable to successfully fulfill its tasks; first, to divert a large amount of the transient energy, second, to clamp the overvoltage to the level below the withstand impulse voltage of the equipment to be protected. The length of SPD connecting leads shall be as short as possible. Long connecting leads will degrade the protection effect of SPDs. In this paper, the influences of the length of connecting leads on the energy sharing in a coordinated SPD system were investigated experimentally, and the simulation of determining the energy sharing and protection voltage level of each SPD depending on the length of connecting leads was carried out by using P-spice program. It was confirmed that the protection voltage level and energy sharing in coordinated SPD systems are strongly influenced by the length of connecting leads.

Key Words : Surge Protective Device, Protection Effect, Energy Coordination, Voltage-Limiting SPD, Protection Voltage Level, Coordinated SPD System

1. 서 론

최근 초고속 반도체 소자를 제조하는 기술의 발전으로 정보통신시스템의 보급이 급격히 증가하였다. 정보통신시스템에 적용되는 전자기기들은 내전압이

매우 낮으므로 낙뢰 및 개폐작용으로 발생하는 서지 전압에 의해 파손되거나 오동작을 일으킬 수 있다. 또한 교류 전원선과 더불어 각종 신호선 및 통신선이 망상화되어 있어 다양한 경로를 통해 침입하는 서지로 인해 정보통신설비의 피해가 증가하고 있다. 다양한 경로를 통해 침입하는 서지에 대해 전자기기를 효과적으로 보호하기 위해서는 서지방호장치(surge protective devices; SPDs)를 적절하게 설치해야 한다 [1-4]. 협조된 SPD시스템에서 뇌서지 및 이상전압으로부터 전자기기를 효과적으로 보호하기 위해서는 SPD 상호간의 에너지협조가 적절히 이루어져야 하며,

* 주(교신)저자 : 인하대학교 IT공대 전기공학과 교수
* Main(Corresponding) author : School of Electrical Engineering, Inha University, Professor
Tel : 032-860-7398, Fax : 032-863-5822
E-mail : bhlee@inha.ac.kr
접수일자 : 2014년 3월 13일
1차심사 : 2014년 3월 15일
심사완료 : 2014년 4월 15일

협조된 SPD시스템에서 접속선의 길이가 에너지협조에 미치는 영향

SPD의 전압보호레벨이 보호대상 전자기기의 임펄스 내전압 이내가 되도록 제한되어야 한다[5-6]. 협조된 SPD시스템에서 SPD 상호간의 적정한 에너지분담의 해석은 SPD의 정격, 설치방법, 설치위치와 밀접한 관련이 있으므로 SPD의 선정에 매우 중요하다[7-8]. 특히 SPD의 접속선의 길이는 SPD의 전압보호레벨과 에너지협조에 크게 영향을 미친다. 실제의 TT전원계통에서 SPD의 설치조건에 따른 보호특성과 에너지협조에 관련된 세부적인 기술적 내용은 실무와 관련하여 매우 중요하며, 실제 현장에서 조우되는 현상과 문제를 해결할 수 있는 상세한 기술의 보급이 요구되고 있다. 따라서 본 논문에서는 협조된 SPD시스템에서 SPD의 접속선 길이가 전압보호레벨과 에너지협조에 미치는 영향을 분석하기 위하여 조합과 임펄스발생장치를 이용하여 전압제한형 SPD에 너서지가 입사하였을 때 접속선의 길이에 따른 SPD의 동작특성 및 에너지분담에 대한 연구결과를 기술하였다. 더불어 모의 해석프로그램을 이용한 해석결과를 실측결과와 비교/검토하였다.

2. 관련이론

SPD를 사용하여 너서지 및 이상전압에 대한 전기·전자시스템의 보호효과를 향상시키기 위해서는 SPD를 접속하는 도체의 길이는 가능한 한 짧아야 한다. 접속도체의 길이가 길면 SPD의 보호효과가 저감되며, 제한전압이 낮은 SPD를 선정해야 한다. 전기·전자기기로 전달되는 잔류전압은 SPD의 제한전압과 접속도체에 유도된 전압의 합이 되며, 식 (1)과 같이 표현할 수 있다[9].

$$V_{AB} = V_{res} + (L_A + L_B) \cdot \frac{di}{dt} \quad (1)$$

여기서 L_A, L_B 는 그림 1에 나타난 SPD를 전원회로에 접속하는 도체의 인덕턴스이다.

SPD의 제한전압과 접속도체의 유도전압이 같은 순간에 피크에 도달하지는 않지만, 일반적으로는 단순히 더해질 수 있다. 임펄스전류가 흐르는 동안 SPD

의 접속점 사이에서 측정된 전압에 포함된 접속선 인덕턴스의 영향에 대한 도식적 설명을 그림 1에 나타내었다.

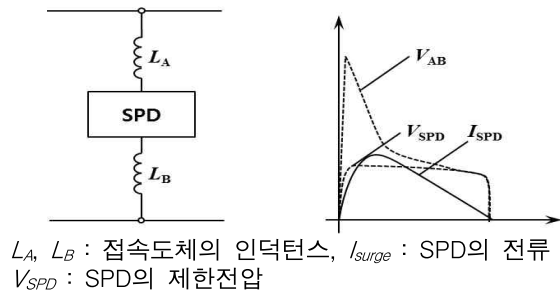


그림 1. SPD의 잔류전압에 대한 접속선 길이의 영향
 Fig. 1. Influences of the length of connecting leads on the residual voltage of SPD

3. 실험 및 시뮬레이션

3.1 실험조건 및 방법

실험대상 SPD로는 220V 전원회로에 가장 많이 사용하고 있는 공칭방전전류(I_n)가 20kA이며, 공칭방전전류에 대한 제한전압이 각각 1,240V, 710V인 전압제한형 SPD를 선정하였다. 협조된 SPD 상호간의 거리는 5m로 하였고, 표 1에 나타난 접속선의 길이에 따른 조합으로 2개의 SPD를 종속으로 설치하는 실험회로를 그림 2와 같이 구성하였다.

표 1. 실험조건
 Table 1. Experimental conditions

구분	접속선의 길이(m)		
	SPD1	SPD2	
실험 조건	Case 1	0	0
	Case 2	0.5	0.5
	Case 3	5	5
	Case 4	0.5	5
	Case 5	5	0.5
SPD간의 거리(d)	5(m)		
SPD의 정격	U_p 1,240(V) I_n 20(kA)	U_p 710(V) I_n 20(kA)	

본 실험회로는 우리나라에서 가장 많이 시설되어 사용하고 있는 누전차단기를 감전방지장치로 설치하는 TT전원계통에 적용하는 접속유형 CT2 SPD와 접속유형 CT1 SPD의 중속 접속회로에서 뇌서지가 가장 흔히 침입하는 상도체-접지(L-G)모드에 상응한다 [10]. SPD의 배선과 접속도체로는 단면적 6mm²의 IV 절연전선을 사용하였으며, 서지시뮬레이터로는 KS C IEC 61000-4-5/IEEE C62.45[11-12] 서지시험에 요구되는 개방상태에서 1.2/50μs 임펄스전압, 단락상태에서 8/20μs 임펄스전류를 발생시키는 조합과 임펄스발생장치를 사용하였다.

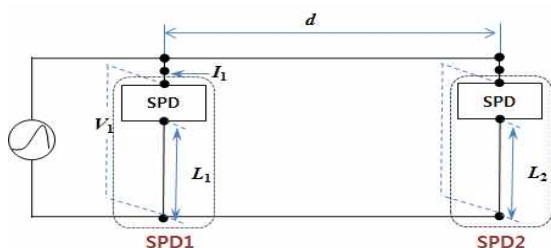


그림 2. SPD의 에너지분담에 대한 접속선 길이의 영향을 측정하기 위한 실험회로
 Fig. 2. Experimental setup for measuring the influences of the length of connecting leads on the energy sharing of SPD

전압의 측정에는 DC-50MHz 주파수대역의 능동형 차동전압프로브를 사용하였다. 전류측정용으로는 20MHz의 주파수대역과 5kA까지 측정할 수 있는 관통형 전류프로브를 사용하였다. 서지전압을 상위 SPD1에 입사시켰을 때 각 SPD에 흐르는 임펄스전류와 SPD의 잔류전압을 측정하였다. 임펄스전압과 전류 파형은 5GS/s의 오실로스코프로 관측하였으며, 오실로스코프의 연산기능을 이용하여 각 SPD가 분담하는 에너지를 산출하였다.

3.2 시뮬레이션방법

실험회로를 이론적으로 시뮬레이션하기 위한 모의회로를 그림 3에 나타내었고, 해석에는 P-spice 프로그램 사용하였다. SPD 접속선의 회로정수는 실측

결과를 기반으로 1m당 저항 $R = 1m\Omega/m$, $L = 0.5\mu H/m$, 커패시턴스 $C = 50pF/m$, 컨덕턴스 $G = 20\mu S/m$ 을 적용하였다[13].

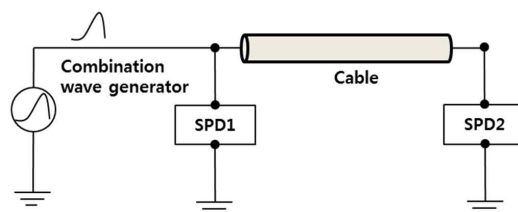


그림 3. SPD의 보호효과에 대한 접속선 길이의 영향을 해석하기 위한 모의회로
 Fig. 3. Model circuit for analyzing the influences of the length of connecting leads on the protection effects of SPD

4. 결과 및 고찰

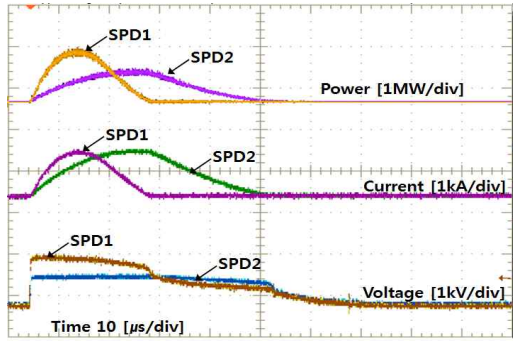
4.1 Case 1의 특성

Case 1의 실험조건으로 SPD1과 SPD2를 중속으로 접속한 협조된 SPD시스템의 경우 각 SPD에 흐르는 임펄스전류와 잔류전압의 실측결과와 시뮬레이션결과의 대표적인 파형의 예를 그림 4에 나타내었다. 실측파형과 시뮬레이션결과는 비교적 잘 일치하였다. SPD2에 흐르는 전류의 상승시간은 식 (1)에 의하여 결정되며, SPD 상호간을 연결하는 도체의 인덕턴스에 의해 완만해지고 SPD1의 동작이 중지될 때 최대로 된 이후 서서히 감소한다. SPD2의 도통기간은 SPD1의 약 2배 정도이며, SPD1과 SPD2에 흐른 전류의 피크값은 거의 같았다. SPD1의 잔류전압은 SPD2의 잔류전압에 접속선의 인덕턴스에 의한 전압강하의 합으로 나타났다[14].

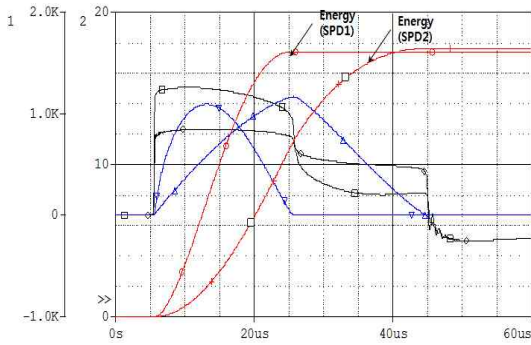
입사된 서지전류의 크기에 따른 각 SPD의 잔류전압 및 에너지분담의 실측 및 시뮬레이션결과를 그림 5에 나타내었으며, 두 결과는 거의 일치하였다.

협조된 SPD시스템에서 상위와 하위 SPD를 접속하는 도체의 길이 5m에 상응하는 인덕턴스에 의한 전압강하 때문에 상위 SPD1의 잔류전압은 하위 SPD2와는 달리 입사한 임펄스전류의 증가에 따라 잔류전압

협조된 SPD시스템에서 접속선의 길이가 에너지협조에 미치는 영향



(a) 실측결과



(b) 시뮬레이션 결과

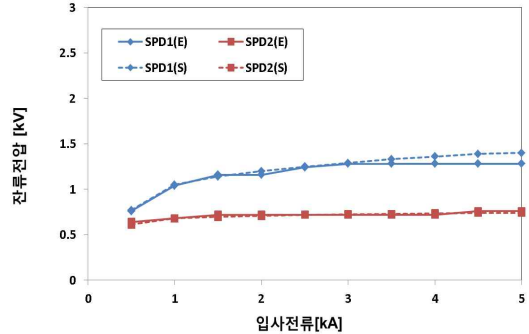
그림 4. Case 1에서 조합파에 대한 각 SPD의 잔류전압, 전류와 전력 파형의 예
Fig. 4. Typical waveforms of the residual voltage, current and power of each SPD against combination wave in Case 1

의 값이 선형적으로 증가함을 보였으며, SPD1의 잔류전압은 SPD2의 단자전압보다 높게 나타났다. 그러나 입사전류 2.5kA 이하에서 SPD2의 분담에너지는 SPD1의 분담에너지보다 많은 것으로 나타났다.

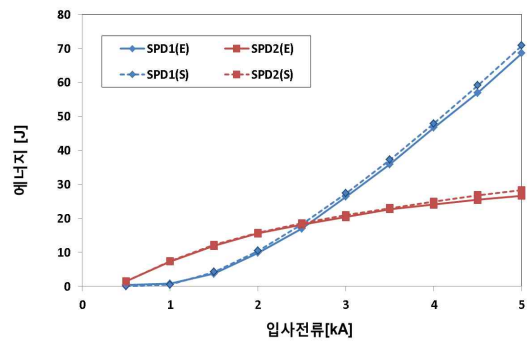
4.2 Case 2의 특성

Case 2의 실험조건으로 상위 SPD1과 하위 SPD2를 중속으로 접속한 협조된 SPD시스템의 경우 각 SPD에 흐르는 임펄스전류와 잔류전압의 실측결과 파형을 그림 6에 나타내었다.

입사된 서지전류의 크기에 따른 각 SPD의 잔류전압과 에너지분담의 실측결과와 시뮬레이션결과를 비교를 그림 7에 나타내었다. 접속선의 인덕턴스에 의한



(a) 잔류전압



(b) 분담에너지

그림 5. Case 1에서 각 SPD의 단자전압과 분담에너지의 측정결과와 시뮬레이션결과와의 비교
Fig. 5. Comparison between the measured and simulated results of the residual voltage and energy sharing of each SPD in Case 1

잔압강하의 영향이 없는 Case 1과 거의 비슷한 결과를 나타내었다. SPD의 잔류전압에 대한 실측결과와

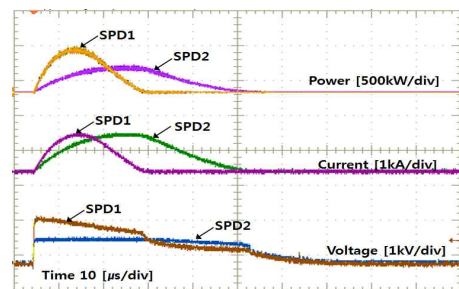
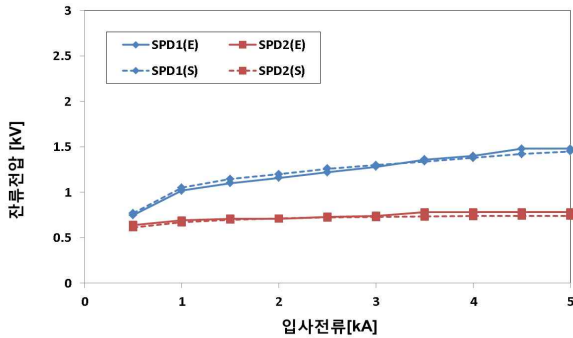


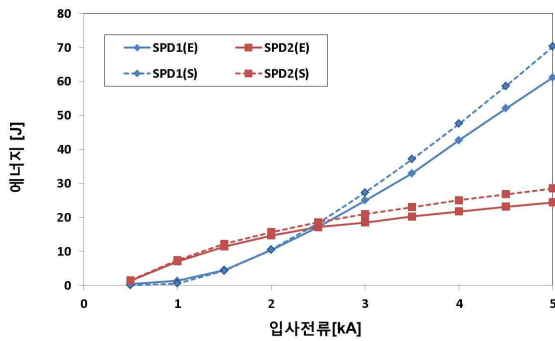
그림 6. Case 2에서 조합파에 대한 각 SPD의 잔류전압, 전류와 전력 파형의 예

Fig. 6. Typical waveforms of the residual voltage, current and power of each SPD against combination wave in Case 2

시뮬레이션결과는 잘 일치하였으나 에너지분담의 경우 입사전류 약 2.5kA 이상에서 시뮬레이션결과는 실측결과보다 약간 크게 평가되었다.



(a) 잔류전압



(b) 분담에너지

그림 7. Case 2에서 각 SPD의 잔류전압과 분담에너지의 측정결과와 시뮬레이션 결과의 비교

Fig. 7. Comparison between the measured and simulated results of the residual voltage and energy sharing of each SPD in Case 2

4.3 Case 3의 특성

Case 3의 실험조건으로 상위 SPD1과 하위 SPD2를 종속으로 접속한 협조된 SPD시스템의 경우, 각 SPD에 흐르는 임펄스전류와 잔류전압의 실측결과의 대표적인 파형의 예를 그림 8에 나타내었다.

접속선 길이의 증가에 따른 SPD잔류전압의 상승은 SPD1에서 뚜렷하였으며, SPD1과 SPD2의 잔류전압 모두 접속선의 전압강하로 상승하였다. 각 SPD로 흐르는 방전전류의 크기는 SPD1과 SPD2의 접속선 길이가 같고 접속선 길이의 영향이 비율적으로 나타나

므로 Case 1의 결과와 비교하여 큰 차이를 보이지는 않았다.

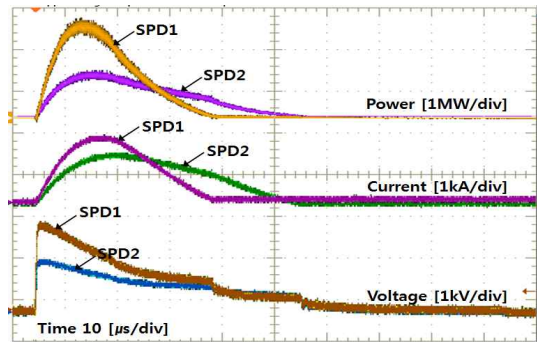
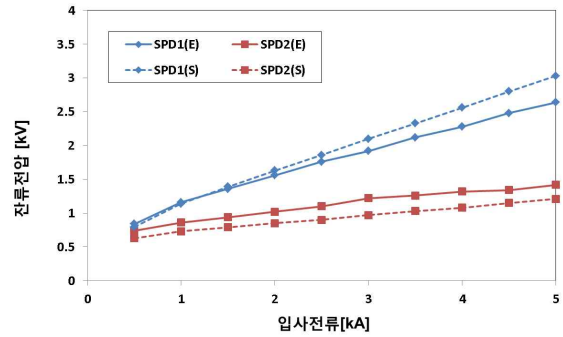
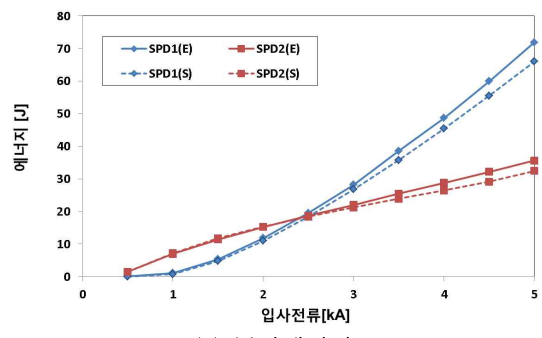


그림 8. Case 3에서 조합파에 대한 각 SPD의 잔류전압, 전류와 전력 파형의 예

Fig. 8. Typical waveforms of the residual voltage, current and power of each SPD against combination wave in Case 3



(a) 잔류전압



(b) 분담에너지

그림 9. Case 3에서 각 SPD의 잔류전압과 분담에너지의 측정결과와 시뮬레이션 결과의 비교

Fig. 9. Comparison between the measured and simulated results of the residual voltage and energy sharing of each SPD in Case 3

협조된 SPD시스템에서 접속선의 길이가 에너지협조에 미치는 영향

입사된 서지전류의 크기에 따른 각 SPD의 잔류전압과 분담에너지의 측정결과와 해석결과와의 비교를 그림 9에 나타내었다.

접속선의 길이에 따른 SPD1의 잔류전압 상승이 뚜렷하였고 입사한 임펄스전류의 증가에 따라 선형적으로 증가하였다. 이러한 SPD 잔류전압의 상승이 보호 대상인 부하기기의 임펄스내전압을 초과하면 소손될 수도 있다. 에너지분담은 SPD1과 SPD2의 접속선의 길이가 동일하므로 Case 1과 Case 2와 거의 비슷하며 큰 차이를 보이지 않았다. 에너지분담은 접속선의 길이 즉, 접속선의 인덕턴스와 밀접한 관련성이 있음을 알 수 있다.

4.4 Case 4의 특성

Case 4의 실험조건으로 상위 SPD1과 하위 SPD2를 종속으로 접속한 협조된 SPD시스템의 경우, 각 SPD에 흐르는 임펄스전류와 잔류전압의 실측결과와 대표적인 파형의 예를 그림 10에 나타내었다.

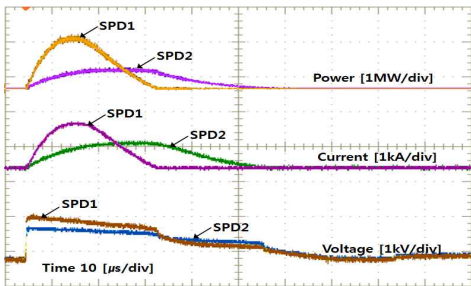


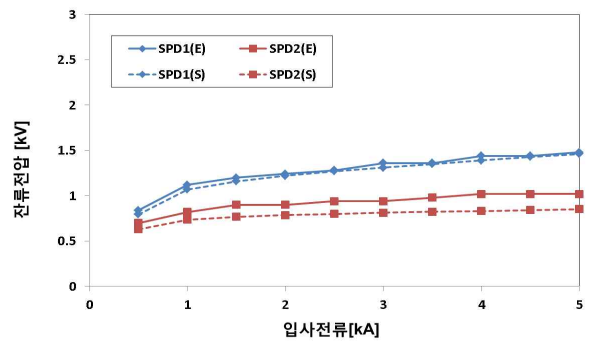
그림 10. Case 4에서 조합파에 대한 각 SPD의 잔류전압, 전류와 전력 파형의 예

Fig. 10. Typical waveforms of the residual voltage, current and power of each SPD against combination wave in Case 4

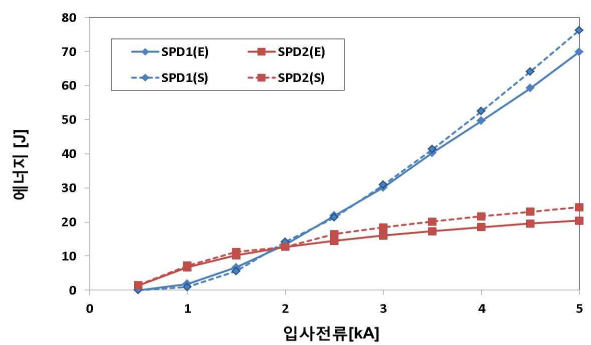
SPD2의 접속선 길이가 5m로 길지만 SPD2의 잔류전압은 Case 1에서 SPD2의 잔류전압보다 약간 상승하였으며, 방전전류는 SPD2보다 SPD1으로 많이 분류되었다. 입사된 서지전류의 크기에 따른 각 SPD의 잔류전압 및 에너지분담의 측정결과와 해석결과와의 비교를 그림 11에 나타내었다.

하위 SPD2의 접속선의 길이가 길어짐에도 불구하고

고 전류의 상승시간이 길어지고 분류되는 전류가 작아져 하위 SPD2의 잔류전압의 상승은 그리 크지 않았다. 따라서 하위 SPD의 접속선의 길이가 잔류전압의 상승에 미치는 영향은 현저하지 않음을 알 수 있다. 에너지분담은 Case 1과 비교했을 때 SPD1으로 더 많이 분담되었다. 이는 SPD2의 접속선의 길이 증가에 따른 인덕턴스의 증가로 SPD2로 방전전류의 흐름이 방해되었기 때문이다. 따라서 하위 SPD2의 접속선의 길이가 잔류전압의 상승에 미치는 영향은 적지만, 에너지분담을 상위 SPD1으로 전환시키는 역할을 하는 것을 알 수 있다. 하위 SPD의 접속선 길이의 증가는 하위 SPD로 흐르는 전류를 제한하므로 잔류전압상승이 낮으며, 에너지가 상위 SPD로 더 많이 분담되어 협조된 SPD시스템의 보호효과에 미치는 영향은 비교적 작게 작용한다.



(a) 잔류전압



(b) 분담에너지

그림 11. Case 4에서 각 SPD의 잔류전압과 분담에너지의 측정결과와 시뮬레이션결과와의 비교

Fig. 11. Comparison between the measured and simulated results of the residual voltage and energy sharing of each SPD in Case 4

4.5 Case 5의 특성

Case 5의 실험조건으로 상위 SPD1과 하위 SPD2를 종속으로 접속한 협조된 SPD시스템의 경우, 각 SPD에 흐르는 임펄스전류와 잔류전압의 실측결과 및 시뮬레이션결과의 대표적인 파형의 예를 그림 12에 나타내었다.

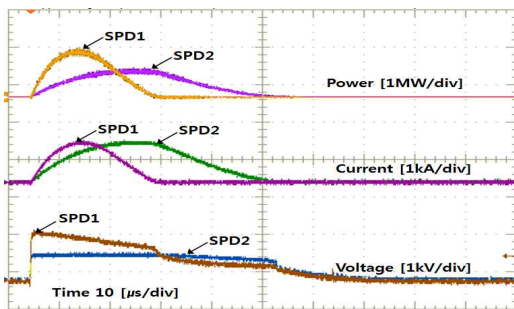
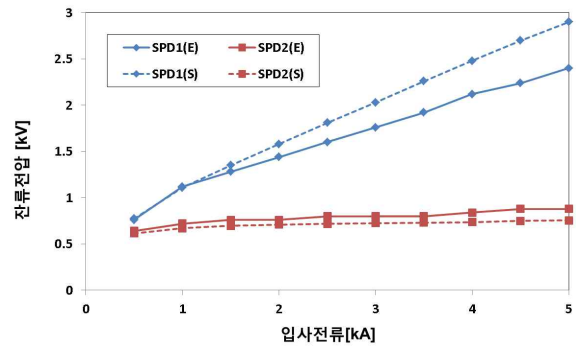


그림 12. Case 5에서 조합파에 대한 각 SPD의 잔류전압, 전류와 전력 파형의 예
 Fig. 12. Typical waveforms of the residual voltage, current and power of each SPD against combination wave in Case 5

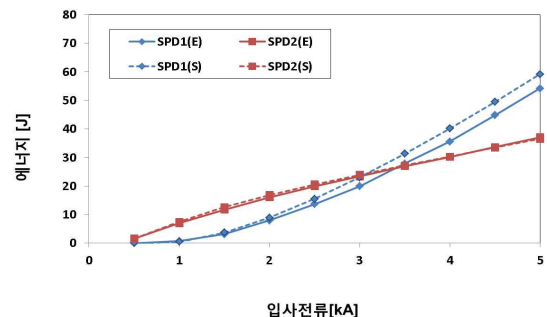
Case 3의 실험조건과 마찬가지로 접속선 길이에 따른 SPD 잔류전압의 상승은 SPD1에서 뚜렷이 나타났으나 SPD2의 잔류전압은 크게 변동하지 않았다. 방전 전류는 상위 SPD1의 접속선 길이만 길어졌기 때문에 인턴트스의 영향으로 인하여 방전전류가 SPD2로 더 많이 분류되었다. 입사된 서지전류의 크기에 따른 각 SPD의 잔류전압 및 에너지분담의 측정결과와 시뮬레이션결과의 비교를 그림 13에 나타내었다.

접속선의 길이가 길어짐에 따라 SPD1의 잔류전압의 상승이 뚜렷하게 나타났으며, 입사된 임펄스전류의 증가에 따라 선형적으로 증가하였다. 또한 에너지분담은 SPD1 접속선의 길이가 길어져 Case 1에 비해 SPD2로 전이되었다. 협조된 SPD시스템에서 상위 SPD1의 접속선의 길이가 길어지면 최종단 SPD의 잔류전압은 거의 변동하지 않으나 에너지분담은 에너지내량이 작은 SPD2로 전환되어 적절하지 않게 에너지가 분담되는 특성으로 나타났다. 따라서 SPD를 내장한 전자기와 같이 하위 SPD2의 에너지내량이 작을

경우 상위 SPD1의 접속선의 길이에 대한 검토가 반드시 필요하다.



(a) 잔류전압



(b) 분담에너지

그림 13. Case 5에서 각 SPD의 잔류전압과 분담에너지의 측정결과와 시뮬레이션 결과의 비교
 Fig. 13. Comparison between the measured and simulated results of the residual voltage and energy sharing of each SPD in Case 5

전반적으로 접속선의 길이가 긴 경우 SPD의 잔류전압과 에너지분담에 대한 실측결과와 시뮬레이션결과의 차이가 큰 것으로 나타났으며, 이는 접속선의 선로정수의 결정에 대한 영향인 것으로 생각된다.

5. 결론

뇌서지에 대한 전기·전자시스템의 효과적인 보호를 위해 전압제한형 SPD를 종속 접속하는 경우 접속선의 길이에 따른 SPD의 보호효과 및 에너지협조에 대한 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 접속선의 길이가 0.5m 이하인 경우 접속선의 길

- 이가 SPD의 잔류전압 상승과 에너지분담에 미치는 영향은 거의 나타나지 않았다.
- (2) 상위 SPD1과 하위 SPD2의 접속선의 길이가 모두 5m인 경우 상위 SPD1의 잔류전압이 크게 상승하였으나 에너지분담은 접속선이 짧은 경우와 거의 비슷하였다.
- (3) 상위 SPD1의 접속선의 길이가 0.5m이고, 하위 SPD2의 접속선의 길이가 5m인 경우 접속선의 길이에 따른 SPD2의 잔류전압은 약간 상승하였으나 에너지는 SPD1으로 많이 분담되어 협조된 SPD의 보호효과에 미치는 영향은 비교적 미약한 것으로 나타났다.
- (4) 상위 SPD1의 접속선의 길이가 5m이고, 하위 SPD2의 접속선의 길이가 0.5m인 경우, SPD1의 잔류전압이 크게 상승하고 에너지분담은 하위 SPD2로 더 많이 전이되어 협조된 SPD의 보호효과에 미치는 영향이 현저하여 SPD가 내장된 기기에 대하여는 면밀한 검토가 필요하다.

References

[1] B. H. Lee and S. C. Lee, "Protection of Information and Communication Facilities against Lightning", Department of publication of Inha University, pp.112~115, 2004.

[2] KS C IEC 62305-1; Protection against lightning - Part 1: General priciple, pp.60-66, 2010.

[3] I. A. Metwally and F. H. Heidler, "Enhancement of the SPD Residual Voltage at Apparatus Terminals in Low-Voltage Power Systems", IEEE Trans. Power Delivery., Vol. 22, No. 4, pp.2207-2213, 2007.

[4] J. He, Z. Yuan, S. Wang, J. Hu, S. Chen, and R Zeng, "Effective Protection Distances of Low-Voltage SPD with Different Voltage Protection Levels", IEEE Trans. PD, Vol. 25, No. 1, pp.187-195, 2010.

[5] B. H Lee and H. K Shin, "Energy coordination of cascaded voltage limiting type surge protective devices", J. KIIE, Vol.27, No.2, pp.29-35, 2013.

[6] B. H Lee and H. K Shin, "Protection Characteristics of Two-Stage Cascaded SPD Systems", J. KIIE, Vol.27, No.5, pp.95-105, 2013.

[7] KS C IEC 60364-5-53; Electrical Installations of Building - Part 5-53: Selection and erection of electrical equipment - Isolation, switching and control, pp.4-10, 2005.

[8] KS C IEC 62305-4; Protection against lightning - Part 4: Electrical and electronic systems within structures, pp. 80~89, 2010.

[9] IEC 61643-12; Low-voltage surge protective devices - Part 12 : Surge protective devices connected to low-voltage power distribution systems - Selection and application principles, pp.41-57, 90-97, 2007.

[10] Korea Electric Association ; Korea Electro-Technical Commission Guidance - Technical Guide for Selection and Application of Surge Protective Devices in Low-Voltage Power Systems, pp.10~27, 2011.

[11] KS C IEC 61000-4-5; Electromagnetic compatibility(EMC) - Part 4-5 : Testing and measurement techniques - Surge immunity test, pp.6-9, 2008.

[12] IEEE C62.45, IEEE Recommended Practice on Surge Test for Equipment Connected to Low-Voltage (1,000V and less) AC Power Circuits, pp.27~36, 2002.

[13] H. K. Shin and B. H Lee, "Influences of the length of connecting leads on the coordination performance of cascaded SPD system", Proc. 2013 IEEJ International Workshop, pp.565-569, 2013.

[14] The Study Committee of IEEJ, "Lightning Protection for Electrical and Electronic equipment", IEEJ, pp.265-270, 2011.

◇ 저자소개 ◇



이복희(李福熙)

1980년 인하대 공대 전기공학과 졸업
1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사).
1988~1989년 동경대학 생산기술연구소
객원연구원. 1995년 호주 Queensland대학
방문교수. 1999년 Cincinnati대학 방문
교수. 2010년~2011 본 학회 회장. 현재
인하대 IT공대 전기공학부 교수.

Tel : (032)860-7398

Fax : (032)863-5822

E-mail : bhlee@inha.ac.kr



신희경(申熹璟)

1973년 12월 11일생. 1999년 동국대학교
안전공학과 졸업. 2004년 한양대학 공학
대학원 전기공학과 졸업(석사). 인하대
학원 전기공학과 (박사과정). 현재 주식
회사 엘피에스코리아 대표이사.

Tel : (02)2639-8872

Fax : (02)2639-8873

E-mail : hkshin@lpskorea.com