

# 직류+60[Hz] 교류 중첩전압에 대한 ZnO 피뢰기 소자의 전기적 특성

(Electrical Characteristics of ZnO Surge Arrester Elements Subjected to the Mixed DC and 60[Hz] AC Voltages)

이복희\* · 양순만\*\*

(Bok-Hee Lee · Soon-Man Yang)

## Abstract

This paper deals with the electrical characteristics related to power loss, equivalent resistance, and leakage currents flowing through new and deteriorated zinc oxide(ZnO) arrester elements subjected to the mixed DC and 60[Hz] AC voltages. The test specimens were deteriorated by 8/20[ $\mu$ s] impulse current of 2.5[kA]. The leakage current-applied voltage( $I-V$ ) characteristic curves of ZnO surge arrester elements were measured as a parameter of the ratio of the peak of 60[Hz] AC voltage to the peak of total voltage. As a consequence of test results, in case of the same applied voltage, the leakage currents flowing through the deteriorated ZnO arrester elements were higher than those flowing through the new ZnO surge arrester elements. The cross-over phenomenon in  $I-V$  curves of ZnO surge arrester elements measured as a parameter of the mixed ratio of DC and AC voltages was observed at the low current domain. The effect of DC voltage on the leakage current flowing through ZnO surge arrester elements is pronounced at the same magnitude of test voltages. In addition, the larger the applied number of 8/20[ $\mu$ s] impulse current of 2.5[kA] is, the greater the power loss is, in particular, the more severe the power loss increases at higher applied voltages.

Key Words : ZnO Surge Arrester, Mixed DC+AC Voltages, Leakage Current, Cross-Over Phenomenon, Power Loss, Equivalent Resistance

## 1. 서 론

피뢰기는 낙뢰, 개폐기의 조작 등에 의해 발생하는

일시적 이상전압을 대지로 방출시켜 전력계통의 설비를 보호하는 역할을 한다. 특히 산업설비의 자동화와 더불어 순시적 정전에 의한 피해액은 획기적으로 증가하게 되었다. 예를 들면 2008년 여수 국가산업단지에서 발생한 피뢰기 노후화에 의한 일시적 정전사고로 수 백억원의 경제적 피해가 발생하는 등 피뢰기로 인한 전력공급의 중단사고는 송전선로 및 배전선로의 주요 사고 원인 중의 하나로 대두하였다. 이런 피뢰기

---

\* 주저자 : 인하대학교 IT공대 전기공학부 교수  
\*\* 교신저자 : 인하대학교 대학원 전기공학과 박사과정  
Tel : 032-860-7398, Fax : 032-863-5822  
E-mail : bhlee@inha.ac.kr  
접수일자 : 2012년 1월 25일  
1차심사 : 2012년 1월 27일  
심사완료 : 2012년 3월 15일

에 기인되는 사고를 미연에 방지할 필요가 있으며, 이에 대한 연구가 꾸준히 이루어져 왔다[1-6].

최근 직류고전압 송전시스템의 적용을 위한 기술개발이 이루어지고 있으며, 직류 송전시스템의 전력변환소 각 부위에는 피뢰기를 설치한다. 직류 송전시스템의 직교 변환소에는 A-K(벌브)피뢰기, 브릿지피뢰기, 직류모선피뢰기, 직류선로 피뢰기 등 여러 위치에 많은 피뢰기가 접속된다. 저압브릿지-접지, 직류 권선고압측-접지, 직류 모선-접지 사이에는 고조파 또는 직류와 교류가 중첩된 전압이 나타나며, 피뢰기에는 DC+AC 중첩전압이 인가된다[7]. 교류와 직류가 중첩된 전압이 피뢰기에 인가된 경우 전기적 특성은 직류만 또는 교류만 인가되었을 때와는 차이를 나타내므로 정확한 성능을 분석하기 위하여 심층적으로 연구할 필요가 있다.

따라서 본 논문에서는 ZnO 피뢰기 소자의 직류+교류 중첩전압에 대한 전기적 특성을 분석하기 위한 목적으로 22.9[kV] 배전선로용 ZnO 피뢰기의 소자에 2.5[kA], 8/20[μs] 임펄스전류를 인가시켜 인위적으로 열화시킨 피뢰기 소자와 신품 피뢰기 소자에 직류 및 교류 중첩전압을 인가할 때 흐르는 누설전류와 등가저항, 전력손실을 측정하고 분석하였다. 실험조건으로는 피뢰기의 열화진단을 위한 평가요소로 적용할 수 있는 2.5[kA], 8/20[μs] 임펄스전류의 인가횟수, 중첩전압에 대한 교류전압의 중첩률 등을 파라미터로 인가전압의 크기에 따른 누설전류, 등가저항, 전력손실 등 전기적 특성의 분석을 중점적으로 검토하였다.

## 2. 실험

### 2.1 실험장치 및 시료

직류전압에 60[Hz] 교류전압을 중첩시키는 전압발생장치를 그림 1에 나타낸 회로도로 제작하였으며, 최대 피크전압 10[kV]을 발생시킬 수 있다. 그림 1의 하위 부분의 직류전압에 상위 부분의 교류전압이 중첩되도록 구성하였다. 상위 부분의 220[V] 절연변압기와 50[kV] 고압 변압기 사이에는 전원회로에서 발생하는 노이즈를 줄이기 위해 LC저역통과필터를 설치하였다.

고압 변압기의 보호를 위해 단락전류 제한저항 10[kΩ]을 직렬로 접속하고, 하위 부분에는 방전저항 300[MΩ]을 병렬로 접속하였다.

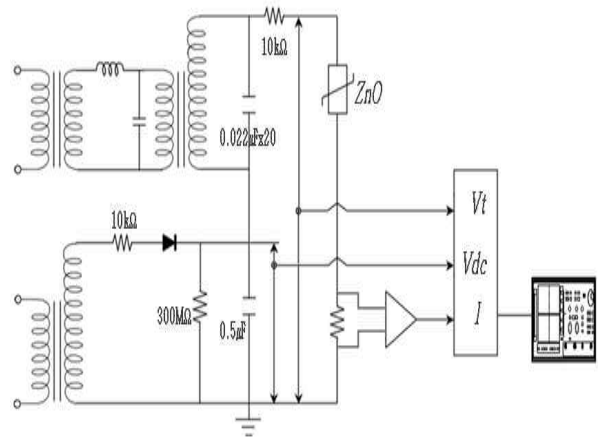


그림 1. 실험회로의 구성

Fig. 1. Configuration of the experimental circuit

실험에 사용된 피뢰기 소자는 22.9[kV] 배전선로용 ZnO 피뢰기를 분해하여 채취하였으며, 피뢰기의 정격전압과 공칭방전전류는 각각 18[kV], 2.5[kA]이다. 본 연구에 사용한 ZnO 피뢰기 소자 1개의 상세한 규격은 표 1에 나타내었다. 직류와 교류의 중첩전압에 대한 신품 ZnO 피뢰기 소자를 비롯하여 너서지전류에 의해 열화된 피뢰기 소자의 전기적 특성을 분석하기 위해 ZnO피뢰기 소자에 2.5[kA], 8/20[μs] 임펄스전류를 45회, 60회, 75회, 90회를 각각 인가시켜 열화된 ZnO 피뢰기 소자의 시료를 확보하였다.

표 1. 본 연구에 사용한 ZnO 피뢰기 소자의 상세 규격  
Table 1. Detailed specifications of ZnO surge arrester elements used in this work

| 항 목            | 규 격         |
|----------------|-------------|
| 직경[mm]         | 32          |
| 두께[mm]         | 36          |
| 정격전압[kV]       | 6           |
| 공칭방전전류[kA]     | 2.5         |
| 최대 연속 사용전압[kV] | 5.1         |
| 제한전압[kV]       | 21.6        |
| 방전내량           | 단시간 대전류[kA] |
|                | 25          |

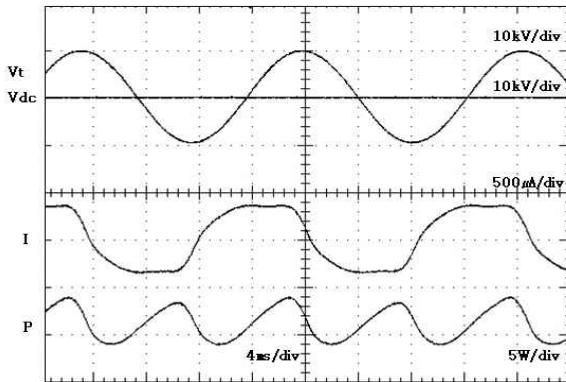
## 2.2 실험방법

ZnO 피뢰기 소자에 흐르는 미세한 누설전류의 정확한 측정을 위해 ZnO 피뢰기 소자 하단에 1[kΩ] 저항을 접속하여 누설전류의 검출에 이용하였으며, 능동성 FET 전압프로브로 누설전류 검출용 저항 양단에서 측정된 전압과 저항의 비로 누설전류를 산출하였다. 인가전압은 수동성 고전압 프로브를 검출하였으며, 인가전압과 누설전류의 파형은 오실로스코프로 관측하였다. 측정장비로는 오실로스코프(1[GHz], 5[Gs/s] 4 채널), 수동성 고전압 프로브(주파수대역 75[MHz], 감쇠비 1/1000, 최대 입력전압 DC 20[kV]), 능동성 FET 프로브(주파수대역 1[MHz], 감쇠비 1/10, 최대 검출전

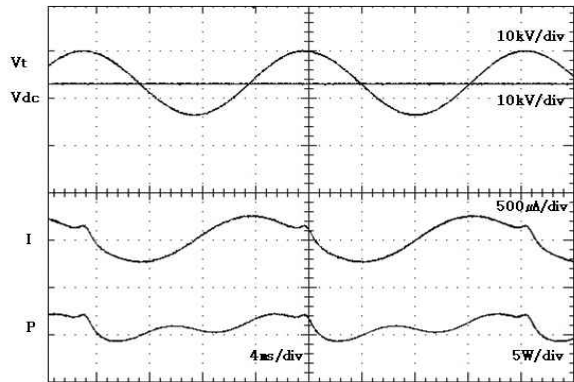
압 ±15[V])를 사용하였다. 중첩전압에 대한 실험파라미터로는 직류와 교류전압의 중첩된 비율을 나타내는 전압중첩률  $K$ 는 식 (1)과 같이 정의한다[8].

$$\text{전압중첩률 } K = \frac{V_{AC(peak)}}{V_{AC(peak)} + V_{DC}} \quad (1)$$

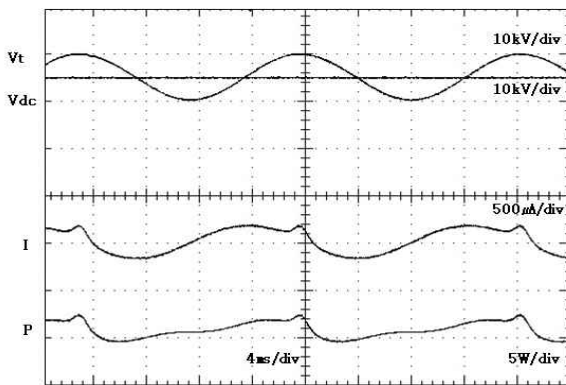
측정하고자 하는 전압중첩률에 따라 교류전압을 인가한 후 직류전압을 중첩시켜 합성전압의 피크치를 측정하였고, 그 때 ZnO 피뢰기 소자에 흐르는 총 누설전류를 측정하였다. 전압중첩률  $K$ 를 파라미터로 하여 인가전압에 의해 피뢰기 소자에 흐르는 누설전류를



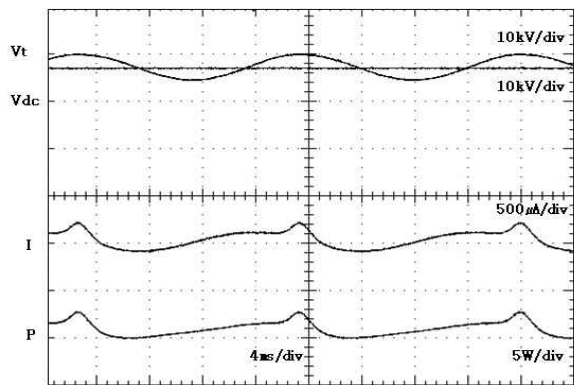
(a) 전압중첩률  $K=1$



(b) 전압중첩률  $K=0.7$



(c) 전압중첩률  $K=0.5$



(d) 전압중첩률  $K=0.3$

(상부 : 인가전압, 중앙 : 누설전류, 하부 : 손실전력)

그림 2. 직류+교류 중첩전압의 피크값이 10[kV]일 때 신품 ZnO 피뢰기 소자에 흐르는 누설전류와 손실전력 파형의 예  
Fig. 2. Typical waveforms of the leakage current and power loss flowing through a new ZnO surge arrester element under the mixed DC+AC voltage with the peak value of 10[kV]

나타내는 누설전류-인가전압( $I-V$ ) 특성곡선을 작성하였고, 이의 변동특성을 면밀하게 분석하였다.

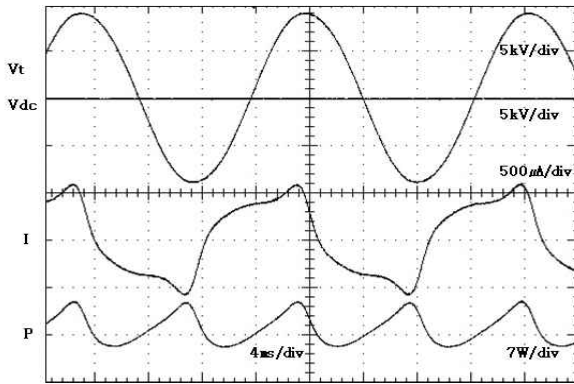
### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 누설전류 파형의 특성

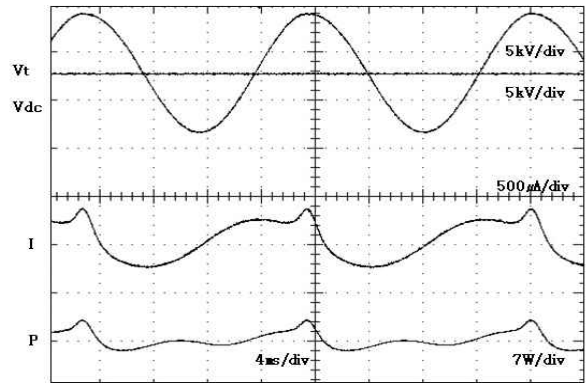
피뢰기의 동작특성과 열화에 따른 성능의 변화를 알아보기 위해서는 피뢰기 소자의 공칭개시전압 부근에서의 특성을 분석하는 것이 중요하므로 신품 피뢰기 소자에 대해서는 공칭동작개시전압 부근에서 흐르는

누설전류를 중점적으로 분석하였다. 신품 피뢰기 소자의 공칭동작개시전압은 직류전압을 인가하였을 때 누설전류 1[mA]가 흐르는 공칭전도전압의 피크값은 약 10.3[kV]이다. 신품 피뢰기 소자의 동작개시전압보다 약간 낮은 10[kV]에서 전압중첩률을 파라미터로 측정된 누설전류와 손실전력 파형의 예를 그림 2에 나타내었다.

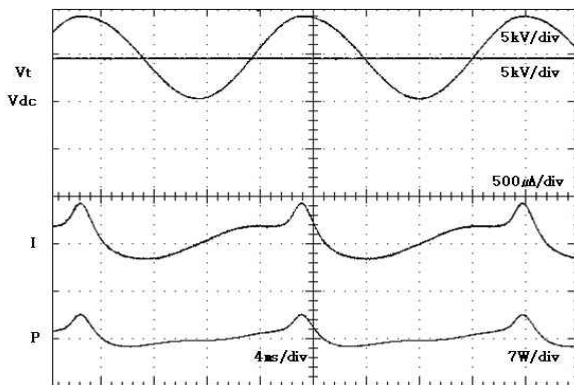
신품 피뢰기 소자의 경우 중첩전압의 피크값을 일정하게 하고 전압중첩률  $K$ 의 변화에 따라 나타나는 누설전류의 특성은 중첩전압이 공칭동작개시전압 이하일 때의 누설전류는 전압중첩률이 1일 때는 저항성 전



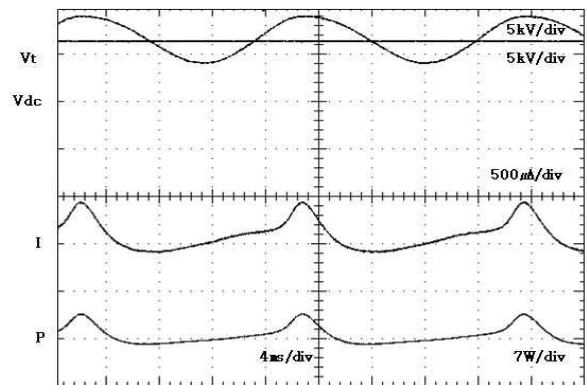
(a) 전압중첩률  $K=1$



(b) 전압중첩률  $K=0.7$



(c) 전압중첩률  $K=0.5$



(d) 전압중첩률  $K=0.3$

(상부 : 인가전압, 중앙 : 누설전류, 하부 : 손실전력)

그림 3. 직류+교류 중첩전압의 피크값이 9[kV]일 때 2.5[kA], 8/20[ $\mu$ s] 임펄스전류를 75회 인가시킨 ZnO 피뢰기 소자에 흐르는 누설전류와 손실전력 파형의 예

Fig. 3. Typical waveforms of the leakage current and power loss flowing through the ZnO surge arrester element aged by 75 times application of 2.5[kA], 8/20[ $\mu$ s] impulse current under the mixed DC+AC voltage with the peak value of 9[kV]

류보다 용량성 전류가 크게 나타났지만, 전압중첩률이 작아질수록 즉, 직류 전압이 높아질수록 용량성 전류의 크기가 작아졌다.

2.5[kA], 8/20[ $\mu$ s] 임펄스전류를 75회 인가하여 열화시킨 피뢰기 소자를 신품 피뢰기 소자와 동일한 방법으로 전압중첩률을 1에서 0까지 변화시키면서 누설전류를 측정하였다. 2.5[kA], 8/20[ $\mu$ s] 임펄스전류를 75회를 인가한 피뢰기 소자의 공칭동작개시전압의 피크값은 약 9.4[kV]이었으며, 동작개시전압 이하인 9[kV]에서의 누설전류와 손실전력 파형의 예를 그림 3에 나타내었다.

직류+교류 중첩전압을 인가하였을 때 ZnO 피뢰기 소자에 흐르는 누설전류는 용량성과 저항성 전류로 구성되어 있다. 교류전압( $K=1$ )을 인가하였을 때의 누설전류는 정극성과 부극성에서 대칭으로 나타나고 있으나 직류와 교류가 중첩된 전압을 인가하였을 때는 정극성과 부극성에서 비대칭으로 나타났다[9-10].

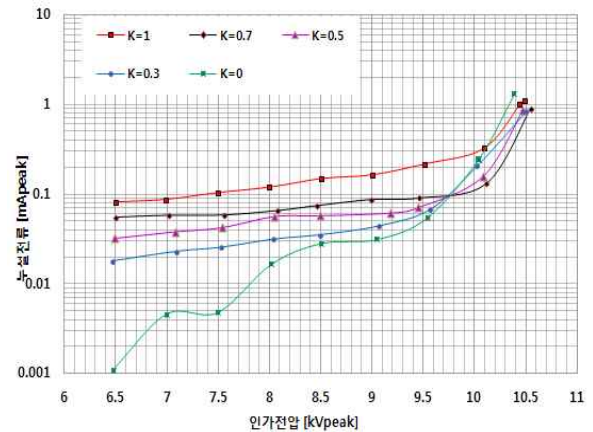
일정한 크기의 피크값에서 전압중첩률의 변화에 따라 나타나는 누설전류의 특성을 살펴보면 전압중첩률이 감소할수록 동작개시전압 이하에서는 누설전류의 용량성 성분이 감소하였고, 저항성 성분은 증가하였다. 열화된 피뢰기 소자일수록 누설전류의 용량성 성분은 아주 작은 증가를 보이지만 저항성 성분은 현저하게 증가하는 것을 알 수 있다.

### 3.2 누설전류의 특성

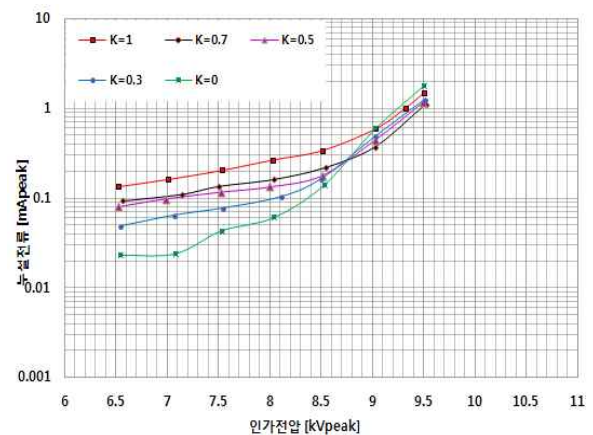
직류와 교류의 전압중첩률  $K=1$ 에서 0 까지 변화시키면서 누설전류-인가전압의 특성을 측정하였으며, 신품 피뢰기 소자와 2.5[kA], 8/20[ $\mu$ s] 임펄스전류를 90회 인가하여 열화시킨 ZnO 피뢰기 소자의  $I-V$  특성곡선을 그림 4에 나타내었다. 신품 피뢰기 소자 및 2.5[kA], 8/20[ $\mu$ s] 임펄스전류 2.5를 90회 인가하여 열화시킨 피뢰기 소자의 경우에도 전류-전압 특성곡선에서 직류전압이 인가된 중첩전압에서만 교차현상이 나타났으며, 열화된 소자일수록 교차점은 낮은 전압에서 나타났다.

공칭동작개시전압 이하의 누설전류 영역에서는 동일한 크기의 중첩전압에서 전압중첩률이 감소할수록

누설전류는 감소하고, 공칭동작개시전압 이상의 전도 영역에서는 전압중첩률이 감소할수록 누설전류가 증가하였다. 즉 신품 피뢰기 소자에 비해 열화된 피뢰기 소자의 총 누설전류의 크기는 증가하였고, 교차점 전압도 낮아졌으며 직류전압의 비중이 증가할수록 누설전류의 저항성 성분이 증가하였다.



(a) 신품 피뢰기 소자



(b) 2.5[kA], 8/20[ $\mu$ s] 임펄스전류를 90회 인가하여 열화시킨 피뢰기 소자

그림 4. ZnO 피뢰기 소자의  $I-V$  특성곡선  
Fig. 4.  $I-V$  characteristic curves of the ZnO surge arrester elements

이러한 현상은 동작개시전압 이하에서는 대단히 큰 전기저항을 가지므로 인가전압이 커패시턴스에 걸려 누설전류는 대부분 용량성이므로 교류의 영향을 많이 받는다. 동작개시전압 이상에서는 비선형계수의 급격

한 증가로 전기저항이 감소하게 되고 커패시턴스로 흐르지 못하던 누설전류 중 직류 성분이 비선형 저항으로 흐르게 된다. 즉 동작개시전압 이상에서는 직류 전압의 영향이 지배적이며 저항성 누설전류가 크게 증가하는 결과를 가져오게 된다.

### 3.3 등가저항 및 전력손실

피뢰기의 전기적 특성을 나타내는 등가회로는 저항과 커패시턴스의 병렬회로로 표시된다[8,11-12]. 커패시턴스는 단지 전압 등급에만 관련되고 피뢰기의 열화에는 크게 영향을 주지 않는 반면에 ZnO 피뢰기의 저항은 상용주파수 전압의 인가로 피뢰기 소자의 온도 변화를 일으켜 피뢰기 열화에 중요한 인자로 작용한다[5,9-10].

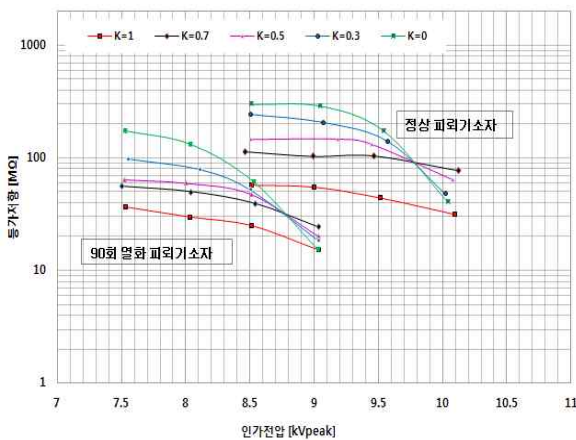


그림 5. ZnO 피뢰기 소자의 R-V 특성곡선  
Fig. 5. R-V characteristic curves of the ZnO surge arrester elements

I-V 특성곡선을 기초로 하여 신품 피뢰기 소자와 2.5[kA], 8/20[μs] 임펄스전류를 90회 인가하여 열화시킨 ZnO 피뢰기 소자의 인가전압에 따른 등가저항의 특성곡선(Equivalent resistance-applied voltage characteristic curve : R-V 특성곡선)을 그림 5에 나타내었다. R-V 특성곡선도 I-V 특성곡선과 마찬가지로 교차현상이 나타났으며, 열화가 심한 소자일수록 교차현상이 더 낮은 전압에서 나타났다. 이들 곡선에서 열

화된 피뢰기의 저항이 더욱 작아지는 것을 알 수 있으며, 그로 인해 누설전류는 더 커진다고 판단할 수 있다.

ZnO 피뢰기 소자에 흐르는 누설전류에 의한 전력손실은 소자의 온도상승을 초래하여 전기적 특성을 열화시키는 중요한 요소 중의 하나이다. 2.5[kA], 8/20 [μs] 임펄스전류의 인가횟수를 파라미터로 하여 인가전압의 크기에 따른 전력손실을 나타내는 손실전력-인가전압특성곡선(Power dissipation-applied voltage characteristic curve : P-V 특성곡선)을 그림 6에 나타내었다.

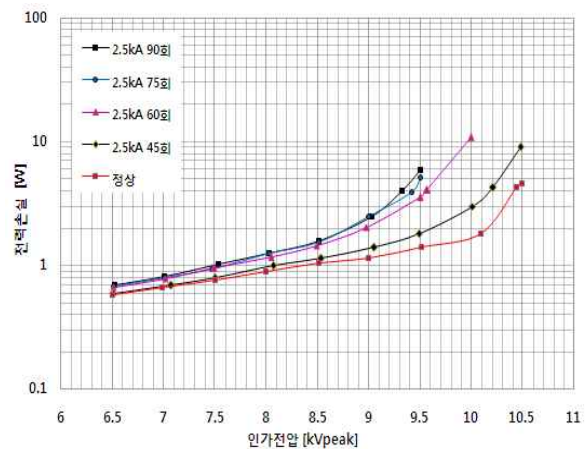


그림 6. ZnO 피뢰기 소자의 P-V 특성곡선  
Fig. 6. P-V characteristic curves of the ZnO surge arrester elements

ZnO 소자의 손실전력은 저항성 누설전류에 의존하며 저항성 누설전류가 증가할수록 손실이 커진다. 열화가 진행된 ZnO 피뢰기 소자일수록 저항성 누설전류가 커지고, 전력손실이 점점 증가하여 동일한 피크값의 전압에서 더욱 높은 온도 상승을 가져오기 때문에 피뢰기 성능의 열화가 점진적으로 진행된다고 판단할 수 있다.

### 4. 결론

직류와 교류가 중첩된 전압에 의해 배전용 ZnO 피뢰기 소자에 흐르는 누설전류와 손실전력의 측정과 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 동일한 피크전압인 경우 전압중첩률이 감소하면 즉, 직류 전압의 비중이 증가하면 누설전류의 용량성 성분은 감소하고 저항성 성분은 증가하였다.
- (2)  $I-V$  특성곡선에서 교차점 이하에서는 전압중첩률이 감소할수록 누설전류는 감소하고, 교차점 이상에서는 그 반대 현상으로 나타났다.
- (3) 직류+교류 중첩전압에 대한 ZnO 피뢰기 소자의  $I-V$  특성곡선과  $R-V$  특성곡선에서 교차현상이 나타났으며, 열화가 심한 피뢰기 소자일수록 교차점은 낮은 인가전압과 큰 누설전류에서 나타났다.
- (4) 누설전류에 의한 ZnO 피뢰기 소자에서의 손실 전력은 사용기간이 길고 열화된 피뢰기 소자일수록 동일한 인가전압에서 크게 나타났다.

이 논문은 2012년도 인하대학교의 지원에 의하여 연구되었음.

### References

- [1] A. Haddad, H. S. B. Elayyan, D. M. German, and R.T. waters, "ZnO surge arrester elements with mixed dierct and 50Hz voltages", IEC Proc., Pt. A, Vol.138, No.5, pp.265-272, 1991.
- [2] Bok-Hee Lee and Sung-Man Kang, "A Monitoring Device of Leakage Currents Flowing through ZnO Surge Arresters", Jpn J. Appl. Phys. Vol.42, Part 1, No.4A, pp.1568-1574, 2003.
- [3] Bok-Hee Lee and Sung-Man Kang, "A new on-line leakage current monitoring system of ZnO surge arresters", J. Materials Science & Engineering B, Vol.119, No.1, pp.13-18, 2005.
- [4] Y. Miyakawa, T. Sakoda, M. Otsubo and M. Ikuta, "Influence of Temperature Variation on Characteristics of ZnO Elements", Proc. of 2008 Int. Symp. on Electrical Insulating Materials, pp.119-122, 2008.

- [5] 승주, 이수봉, 이복희, "외부 환경조건에 따른 ZnO 피뢰기의 전기적 특성의 변화", 조명·전기설비학회 논문지, Vol.22, No.9, pp.62-68, 2008.
- [6] 이복희, 강성만, "산화아연 피뢰기 소자에 흐르는 저항분 누설전류 검출기법", 조명·전기설비학회 논문지, Vol.15, No.3, pp.67-73, 2001.
- [7] 尾崎勇造 編著, "高電壓電力工學", 電氣書院, pp.100-101, 1997.
- [8] Soon-Man Yang, Bok-Hee Lee, Seung-Kwon Paek, "Electrical Behaviors of ZnO Elements under Combined Direct and Alternating Voltages", Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol.4, No.1, pp.111-117, 2009.
- [9] Su-Bong Lee, Seung-Ju Lee and Bok-Hee Lee, "Analysis of thermal and electrical properties of ZnO arrester block", Current Applied Physics, Vol.10, No.1, pp.176-180, 2010.
- [10] 이수봉, 이복희, "뇌임펄스전류에 의한 ZnO 피뢰기의 열화특성", 조명·전기설비학회 논문지, Vol.23, No.4, pp.79-85, 2009.
- [11] 이복희, "고전압대전류공학", 청문각, pp.223-226, 2001.
- [12] R. B. Standler, Protection of Electronic Circuits from Overvoltages", John Wiley & Sons., Inc., pp.133-137, 1989.

### ◆ 저자소개 ◆



**이복희(李福熙)**

1954년 6월 29일생. 1980년 인하대 공대 전기공학과 졸업 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1988~1989년 동경대학 생산기술연구소 객원연구원. 1995년 호주 Queensland대학 방문교수. 1999년 Cincinnati대학 방문교수. 현재 인하대

IT공대 전기공학부 교수. 본 학회 명예회장.

Tel : (032)860-7398

Fax : (032)863-5822

E-mail : bhlee@inha.ac.kr



**양순만(楊淳晩)**

1984년 2월 원광대 공대 전기공학과 졸업. 2004년 2월 인하대 공학대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 인하대 대학원 박사과정. 금호산업(주) 상무.

Tel : (032)860-7398

Fax : (032)863-5822

E-mail : smyang1@kumhoenc.com