

임펄스전류에 의한 배전용 ZnO 피뢰기 소자의 열화특성

(Deterioration Characteristics of ZnO Surge Arrester Blocks for Power Distribution Systems Due to Impulse Currents)

이복희* · 조성철 · 양순만

(Bok-Hee Lee · Sung-Chul Cho · Soon-Man Yang)

Abstract

In order to analyze the electrical performance of ZnO surge arresters stressed by the combined DC and AC voltages that are generated in DC/AC converter systems, the leakage current properties of ZnO surge arrester blocks deteriorated by impulse currents were investigated. The test specimens were deteriorated by the $8/20\mu s$ impulse current of 2.5kA and the leakage currents flowing into the deteriorated zinc oxide(ZnO) arrester blocks subjected to the combined DC and power frequency AC voltages are measured. As a result, the leakage currents flowing through deteriorated ZnO surge arrester blocks were higher than those flowing through the fine ZnO surge arrester blocks and the larger the injection number of $8/20\mu s$ impulse current of 2.5kA is, the greater the leakage current is. The leakage current-voltage curves($I-V$ curves) of the fine and deteriorated ZnO surge arrester blocks stressed by the combined DC and AC voltages show significant difference in the low conduction region. Also the cross-over phenomenon is observed at the voltage close to the knee of conduction on plots of $I-V$ curves.

Key Words : Lightning, ZnO Surge Arrester, Combined DC and AC Voltages, Leakage Current, Cross-Over Phenomenon, Leakage Current-Voltage Curve

1. 서 론

최근 지구의 온난화 현상으로 한반도 인근에도 낙뢰

의 발생빈도가 증가하고 있으며[1], 빈번한 낙뢰발생으로 인하여 배전선에 다양한 크기의 뇌서지가 침입될 수 있다. 낙뢰의 발생으로 인한 정전사고 및 인명사고도 지속적으로 늘어나고 있으며, 노후 피뢰기가 고장을 일으키거나 소손되어 정전사고로 이어진다면 그 피해는 아주 심각할 것이다. 이런 피뢰기에 기인되는 사고를 미연에 방지하기 위한 ZnO 소자의 특성해석에 대한 연구가 꾸준히 이루어져 왔으며[2-3], 직류와 교류가 중첩된 전압에 대한 ZnO 피뢰기 소자의 특

* 주(교신)저자 : 인하대학교 IT공대 전기공학부 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 : 2013년 1월 8일
1차심사 : 2013년 1월 10일
심사완료 : 2013년 2월 4일

성은 교류전압에 대한 특성과 다른 것으로 보고되었다[4].

스마트그리드 전력전송시스템의 적용을 위한 기술개발이 이루어지고 있으며, 직류 배전시스템의 변환소의 여러 위치에 피뢰기를 설치한다. 직류 배전시스템의 절연보호의 기본은 교류시스템과 동일하며, 피뢰기의 적용으로 보호하는 것을 기본으로 한다. 직교변환기 회로에 설치되는 피뢰기에는 직류전압과 교류전압이 중첩된 다양한 파형의 전압이 인가된다[5]. ZnO 피뢰기를 직류/교류변환시스템에 적용하는 경우, 아직 직류와 교류의 중첩전압에 대한 피뢰기의 동작특성이 명확하게 밝혀지지 않은 상태이므로 ZnO 피뢰기의 직류와 교류의 중첩전압에 관련된 정확한 성능을 분석하기 위한 심층적인 연구가 필요하다.

따라서 본 논문에서는 뇌서지전류에 의해 열화된 22.9kV 배전선로용 ZnO 피뢰기 소자의 전기전도특성을 분석하기 위한 목적으로 8/20 μ s 임펄스전류를 입사시킨 ZnO 피뢰기 소자에 직류와 교류의 중첩전압을 인가하였을 때 흐르는 누설전류를 측정하고 분석하였다. 배전용 ZnO 피뢰기의 열화진단 및 수명예측을 위한 평가요소로 적용할 수 있도록 2.5kA, 8/20 μ s 임펄스전류의 입사횟수, 합성 전압에 대한 교류전압의 중첩률을 파라미터로 임펄스전류의 입사횟수에 따른 ZnO 소자의 동작개시전압의 변화, 인가전압의 크기 및 전압중첩률에 따른 누설전류의 변동특성을 중점적으로 분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

ZnO 피뢰기 소자에 직류와 상용주파수 교류가 중첩된 전압이 인가된 상태에서 누설전류를 검출하기 위한 실험계의 개략도를 그림 1에 나타내었으며, 직류와 교류의 중첩전압발생장치에 대하여는 이미 문헌에 상세히 보고하였다[5-6]. ZnO 피뢰기 소자가 도통되었을 때 흐르는 과전류로부터 전원장치를 보호하는 안정저항으로 10k Ω 의 무유도저항을 접속하였으며, ZnO 피뢰기 소자에 흐르는 누설전류의 파형은 1k Ω 의 분류기로 검출하였다.

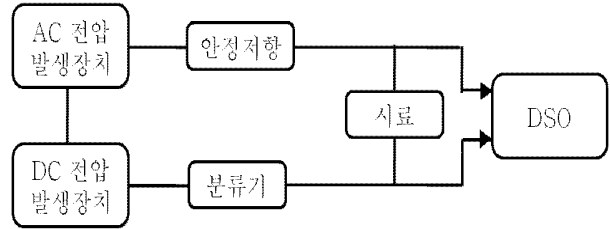


그림 1. 실험계의 개략도

Fig. 1. Block diagram of the experimental setup

시료로 사용한 ZnO 피뢰기 소자는 정격전압과 공칭방전전류가 각각 18kV, 2.5kA인 22.9kV 배전선로용 신품의 피뢰기에서 채취하였으며, ZnO 피뢰기 소자 1개의 상세한 규격을 표 1에 나타내었다. 낙뢰의 입사에 의한 ZnO 피뢰기 소자의 열화를 모의하기 위해 ZnO 피뢰기 소자에 2.5kA, 8/20 μ s 임펄스전류를 입사시켰다. 1가지 실험조건에 1개 시료에 대하여 연속적으로 특성을 평가하는 실험을 하였다.

표 1. 본 연구에 사용한 ZnO 피뢰기 소자의 규격
Table 1. Specifications of ZnO surge arrester blocks used in this work

항 목	규 격
직경	32mm
두께	36mm
정격전압	6kV
공칭방전전류	2.5kA
최대 연속사용전압	5.1kV
제한전압	21.6kV

ZnO 피뢰기 소자에 흐르는 누설전류는 능동성 전압프로브로 측정된 분류기의 단자전압을 분류기의 저항으로 나누어 산출하였다. ZnO 피뢰기 소자의 단자전압은 주파수대역 75MHz, 감쇠비 1/1000, 최대 입력전압 DC 20kV인 수동성 고전압프로브로 검출하였으며, 5Gs/s, 4채널인 디지털 축적형 오실로스코프로 ZnO 피뢰기 소자의 누설전류와 단자전압을 관측하였다. 통상 직류와 교류가 중첩된 전압의 전압중첩률은 식 (1)과 같이 정의하며[4,6], 본 논문에서도 식 (1)로 나타낸 전압중첩률을 적용하였다.

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

ZnO 피뢰기 소자의 단자전압과 누설전류는 피크값으로 나타내었으며, 인가전압의 전압중첩률 K 를 파라미터로 하여 ZnO 피뢰기 소자의 누설전류-전압곡선 ($I-V$ 곡선)을 작성하였다. 또한 단자전압이 동일할 때 전압중첩률에 따른 누설전류의 변동특성을 면밀하게 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 중첩전압에 대한 누설전류 파형

ZnO 피뢰기 소자의 저전도 영역에서의 전기전도 특성은 인가전압의 유형에 의존적이다. ZnO 피뢰기 소자에 직류와 교류의 중첩전압을 인가하여 장시간 동안 누설전류를 흘리게 되면 시료 자체의 특성이 시험전압에 의해 변동될 수 있다. 산화아연소자에 흐르는 누설전류의 증가는 열폭주를 초래하기 때문에 피뢰기의 열화정도는 누설전류의 크기로 판단할 수 있다. 따라서 시험전압에 의한 시료의 특성변동을 배제시키기 위해서 피뢰기 소자의 동작개시전압 부근에서 누설전류를 중점적으로 분석하였다. 즉 시험전압을 짧은 시간동안 인가하여 최대 1mA를 상회하는 누설전류의 분석을 본 연구의 범위로 하였다.

2.5kA, 8/20 μ s 임펄스전류를 60회 입사시킨 피뢰기 소자의 공칭동작개시전압의 피크값은 약 9.6kV이다. 동작개시전압 이상인 10kV 전후에서 전압중첩률을 파라미터로 하여 측정된 누설전류 파형의 대표적인 예를 그림 2에 나타내었다. ZnO 피뢰기 소자의 전기전도현상은 저전도 영역에서는 RC병렬회로로 특징지어지며, 누설전류는 식 (2)와 같다[2-3].

$$I(t) = C \frac{dV(t)}{dt} + I_R(t) \quad (2)$$

여기서 $I_R(t)$ 는 저항성 누설전류, C 는 산화아연소

자의 커패시턴스이다. 상용주파수 교류전압의 피크에서 용량성 누설전류는 0이기 때문에 저항성 누설전류의 피크값은 인가전압의 피크에서 누설전류의 크기에 상응한다.

ZnO 피뢰기 소자에 흐르는 누설전류는 용량성과 저항성 전류로 구성되어 있음을 알 수 있다. 특히 저항성 누설전류는 인가전압의 거의 피크값 부근에서 현저하게 나타나고 있는데 주로 3고조파 성분으로 보인다. 교류전압에 의한 누설전류는 정극성과 부극성이 대칭으로 나타나고 있으나 직류와 교류가 중첩된 전압에 의한 누설전류는 비대칭으로 나타났다 [5,7,8].

일정한 피크값에서 전압중첩률 K 가 감소할수록 동작개시전압 이하에서는 누설전류의 용량성 성분은 감소하고, 저항성 성분은 증가하였다. 임펄스전류의 입사횟수가 많은 피뢰기 소자일수록 누설전류의 용량성 성분은 아주 작은 증가를 보이지만 저항성 성분은 눈에 띄게 증가한 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 낙뢰에 의한 과도과전압에 대한 노출은 ZnO 피뢰기의 성능을 저하시키는 요인으로 작용함을 알 수 있다.

특히 ZnO 피뢰기 소자에 임펄스전류의 입사횟수가 많을수록 그리고 직류분의 비중이 높은 중첩전압에서 누설전류가 많이 흐르게 된다. 따라서 직류와 교류가 중첩된 전압이 인가되는 위치에 ZnO 피뢰기를 설치하는 경우에는 중첩전압의 특성을 심층적으로 파악하여 대응할 필요가 있다.

피뢰기의 동작특성과 열화에 따른 성능변화를 알아보기 위해서는 피뢰기 소자의 공칭동작개시전압 부근에서의 특성을 분석하는 것이 중요하다. 공칭동작개시전압은 직류전압을 인가하였을 때 누설전류 1mA이 흐르는 공칭전도전압으로 정의하며, 공칭동작개시전압이라고도 한다[9]. 신품 소자 및 2.5kA, 8/20 μ s 임펄스전류를 45회에서 120회까지 입사시킨 피뢰기 소자에 60Hz 교류전압에서 1mA의 전류가 흐르는 전압의 피크값의 그래프를 그림 3에 나타내었다.

임펄스전류의 입사횟수가 45회까지는 공칭동작개시전압 V_{1mA} 의 변동률이 대략 2% 정도 낮아졌지만 입사횟수 60회 이상부터는 대략 10% 정도 낮아지는 것으로 나타났다. 산화아연소자에 임펄스전류의 입사횟수

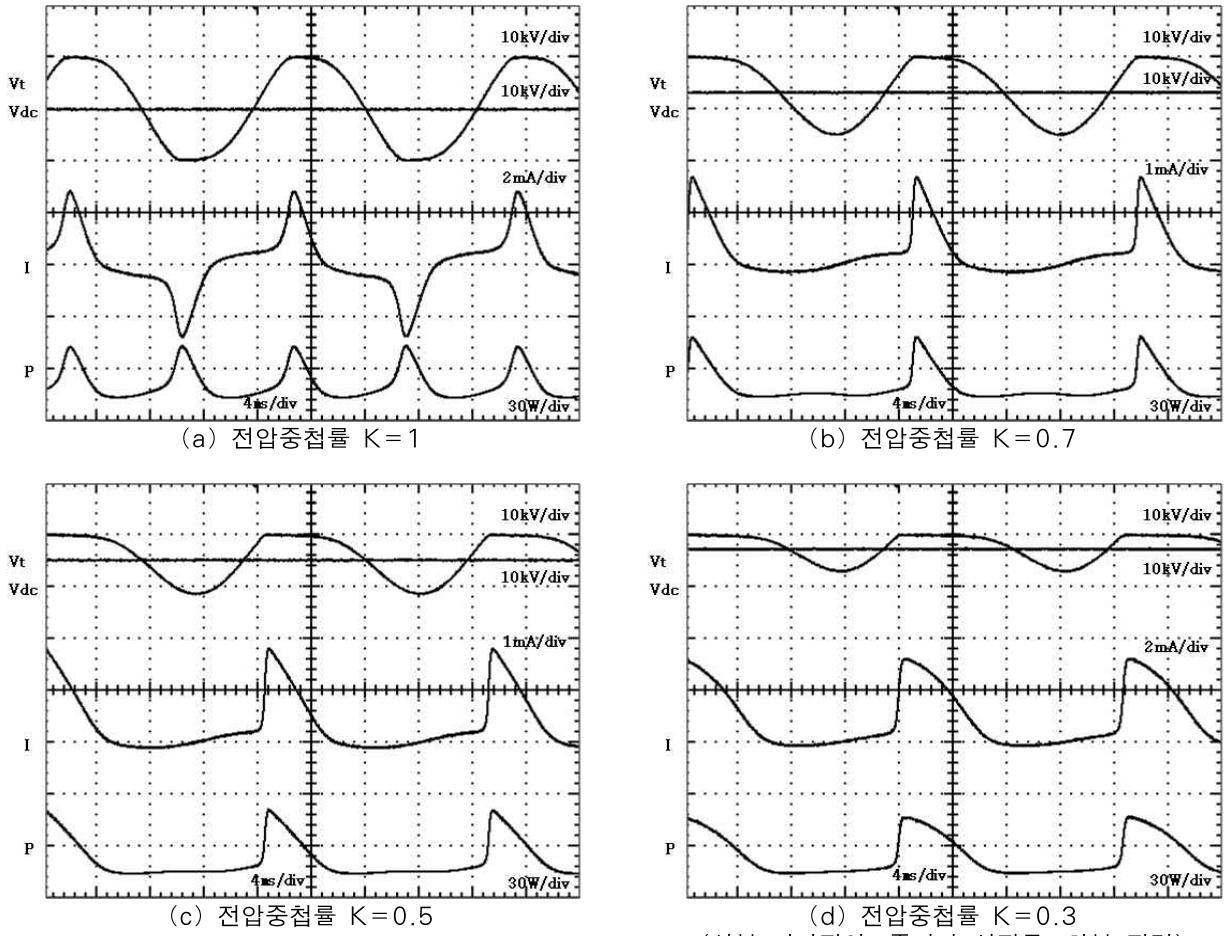


그림 2. 피크값 약 10kV의 직류와 교류 중첩전압에서 2.5kA, 8/20 μ s 임펄스전류를 60회 입사시킨 ZnO 피뢰기 소자에 흐르는 누설전류 파형의 예

Fig. 2. Typical waveforms of the leakage current flowing through the ZnO surge arrester block deteriorated by 60 times injections of 2.5kA, 8/20 μ s impulse current under the combined DC and AC voltages with the peak value of around 10kV

가 증가할수록 누설전류는 서서히 증가하고 있다. 이와 같은 산화아연소자의 열화현상은 직류전압이 인가된 경우와 마찬가지로 인가된 전압과 역방향의 전압-전류 특성으로 열화된[10].

산화아연소자의 열화는 첨가물의 조성이나 제조공정에 크게 의존한다. 조성이나 제조공정이 최적화되어 있지 않은 산화아연소자는 절연과피전압 이하의 전압을 인가하여도 상용주파수 누설전류가 증가하여 열화되는 경우가 많다. 산화아연소자의 절연과피전압 이하의 소전류 영역에서 전기전도기구는 쇼트키형 에

너지장벽으로 지배되어 있으므로 열화도 쇼트키형 에너지장벽의 저하에 기인된다고 볼 수 있다. 쇼트키형 에너지장벽이 저하되는 원인은 다음과 같이 생각할 수 있다. 산화아연소자의 입계부에 전압이 인가되면 전하가 이동하여 그림 4에 나타난 바와 같이 정(+)극측에서 역바이어스된 쇼트키형 에너지 장벽 내의 정(+)이온의 이동, Bi₂O₃ 입계층 내의 정(+)이온 또는 부(-)이온의 이동 또는 분극 및 부(-)극성 측에서 순바이어스된 쇼트키형 에너지장벽 내의 부(-)이온이 이동하는 것으로 볼 수 있다[10].

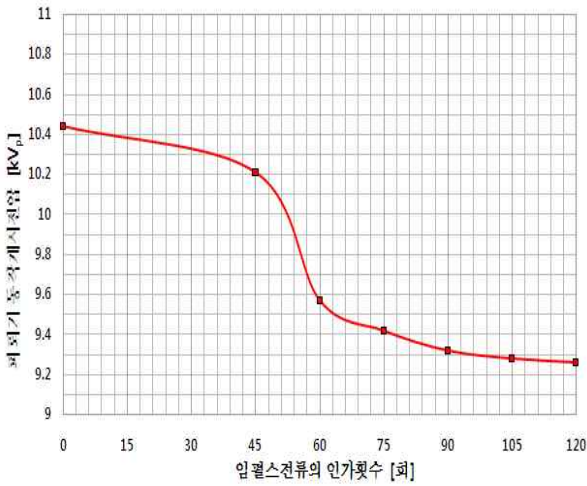


그림 3. 2.5kA, 8/20 μ s 임펄스전류의 입사횟수에 따른 공칭동작개시전압의 변동추이
 Fig. 3. Variation trend of the nominal conduction voltage at 1mA as a function of the injected number of 2.5kA, 8/20 μ s impulse current

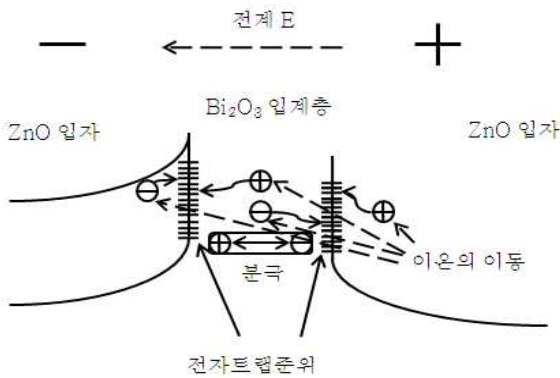


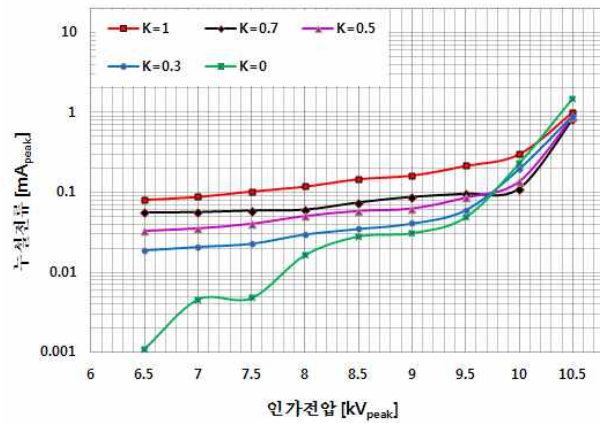
그림 4. 바이어스전압에 의한 전하이동의 가능성
 Fig. 4. Possibility of charge shifting due to bias voltage

3.2 임펄스전류의 입사횟수에 따른 I-V 곡선

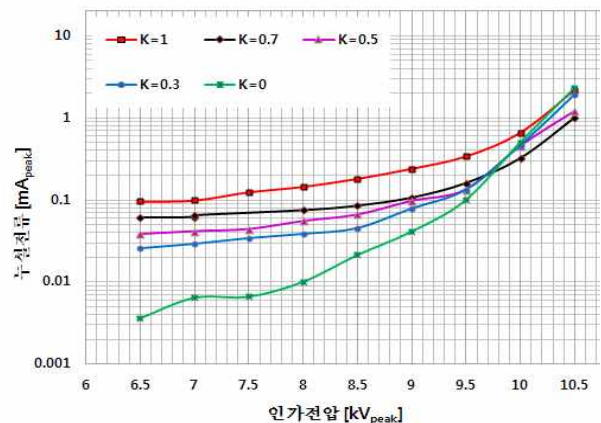
ZnO 피뢰기 소자에 임펄스전류의 입사횟수가 증가함에 따라 동작개시전압이 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. I-V곡선은 ZnO 피뢰기 소자의 기본적인 전기전도의 특징을 나타내며, 피뢰기의 수명 평가에 대한

중요한 요소가 된다. 2.5kA, 8/20 μ s 임펄스전류를 입사시킴 ZnO 피뢰기 소자의 I-V곡선을 전압중첩률을 파라미터로 하여 그림 5에 나타내었다.

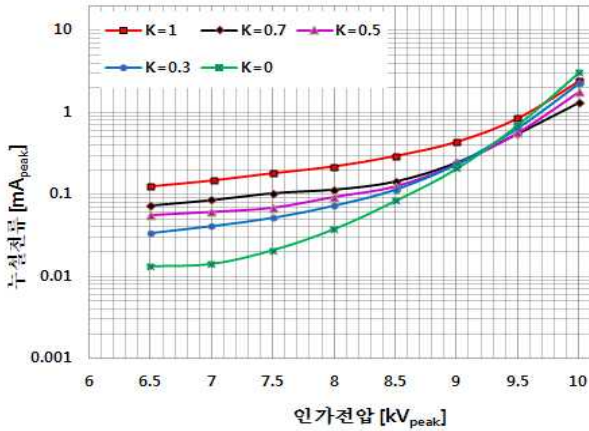
직류전압에 대한 I-V곡선은 교류전압에 대한 I-V곡선과 다르게 나타났다. 직류와 교류가 중첩된 전압에 대한 I-V곡선은 직류와 교류 전압에 대한 I-V곡선의 사이에 놓여 있으며, 전압중첩률이 0에서 1로 증가함에 따라 직류 I-V곡선에서 교류 I-V곡선으로 점진적으로 전이됨을 나타내었다. 즉 직류 전압과 교류 전압에 대한 ZnO 피뢰기 소자의 I-V곡선은 동작개시전압보다 약간 낮은 전압에서 교차하였다. 이 결과는 산화아연소자의 동적 응답특성과 관련이 있는 것으로 보이며, 직류 전압과 교류 전압에 대한 ZnO 피뢰기 소자의 전기전도메커니즘이 다른 것으로 추정할 수 있다.



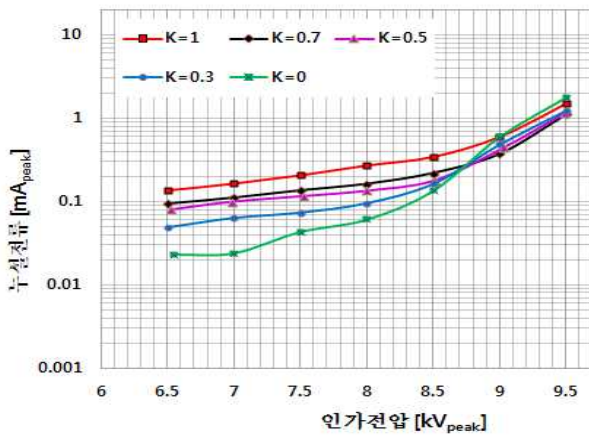
(a) 신품



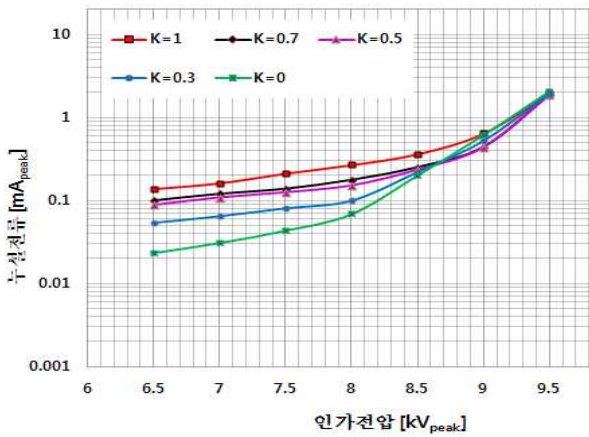
(b) 45회



(c) 60회



(d) 90회



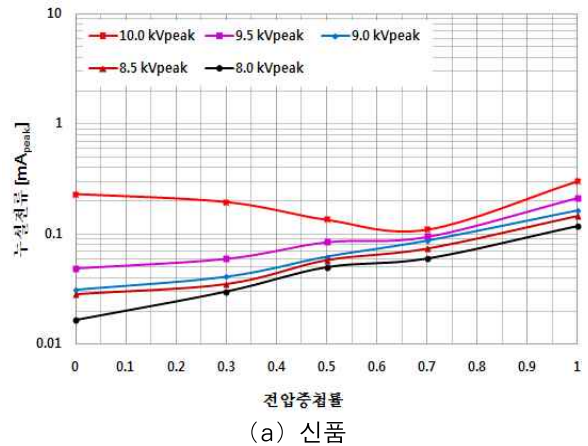
(e) 120회

그림 5. 전압중첩률에 따른 ZnO 피뢰기소자의 I-V 곡선
Fig. 5. I-V curves of the ZnO surge arrester blocks for different voltage ratios

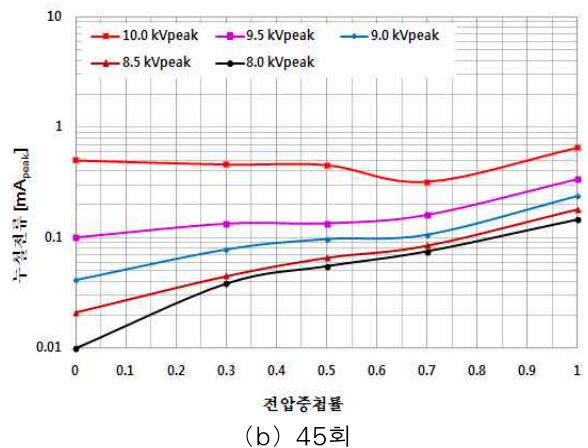
ZnO 피뢰기 소자의 직류 전압과 교류 전압에 대한 저전도 영역의 I-V곡선에서의 교차현상은 여러 연구자에 의해 보고되었다[6,11-12]. 그의 원인으로 교류 전압에 대한 유전체손의 영향과 분극현상과의 관련성을 제시하였으나 아직 명확하게 설명되지 못한 상태이다. 직류 전압과 교류 전압에 대한 I-V곡선이 다른 것으로 보아 전도메커니즘도 다를 것으로 추정된다. 직류 전압이 인가된 때는 쇼트키 전계방출에 의해 공급되는 전자의 이동으로 전류가 흐르는 것으로 추정하지만, 교류 전압에 대하여는 더욱 복잡할 것으로 보이며 명확하게 알려지지 않았다.

3.3 전압중첩률에 따른 누설전류의 변동

직류와 교류가 중첩된 전압의 크기를 파라미터로 하



(a) 신품



(b) 45회

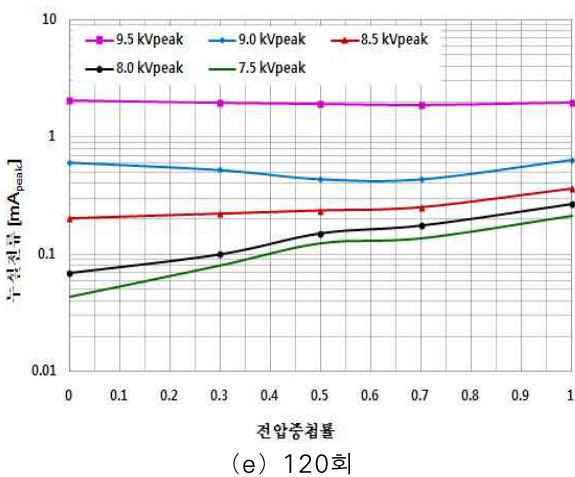
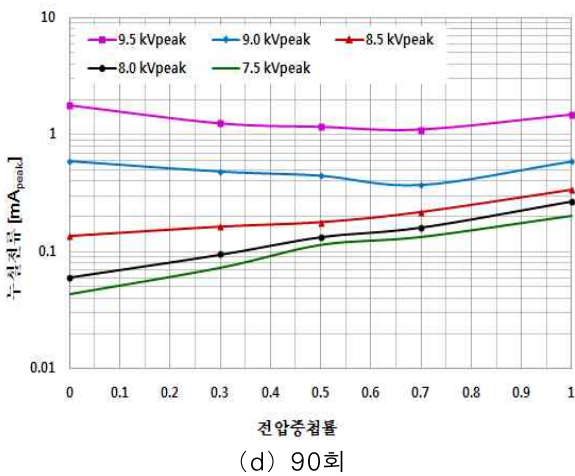
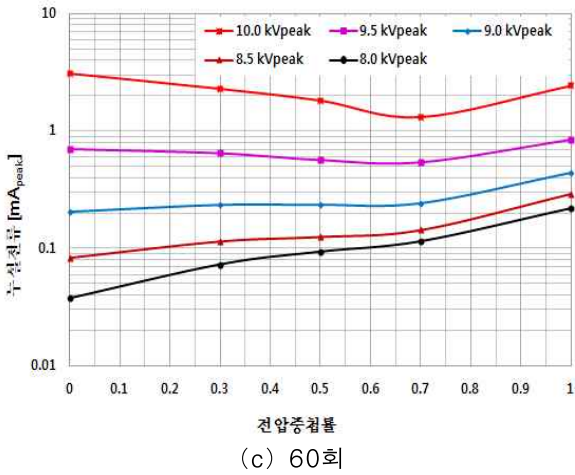


그림 6. 직류와 교류의 전압중첩률에 따른 누설전류
 Fig. 6. Leakage currents against the combined ratio of DC and AC voltages

여 전압중첩률에 따른 ZnO 피뢰기 소자에 흐르는 누설전류의 측정결과를 그림 6에 나타내었다. 전압중첩률에 따른 누설전류곡선에서 $I-V$ 곡선의 교차점보다 낮은 범위의 누설전류는 전압중첩률이 증가함에 따라 단조롭게 증가하였으나, $I-V$ 곡선의 교차점보다 큰 범위의 누설전류는 전압중첩률이 증가함에 따라 감소하다가 전압중첩률 1에서 증가하는 것으로 나타났다.

전압중첩률에 따른 누설전류의 전반적인 경향을 볼 때 전압중첩률이 감소함에 따라 즉, 직류 전압의 비중이 클수록 공급전압의 크기에 따른 누설전류의 차이가 크게 나타났다. 또한 전압이 낮을수록 누설전류의 전압중첩률에 대한 의존성이 작게 나타났다. 항복 영역의 초기단계의 진도에 대한 직류바이어스의 효과는 교류전압보다 더욱 두드러졌다[4]. 항복 영역 이전의 전류의 흐름은 장벽을 넘은 전자의 열적 특성에 의한 것인 반면, 항복 영역에서 전류의 흐름은 장벽을 통과하는 전자의 터널링에 의해 야기된다. 직류바이어스가 증가함에 따라 입계층과 입계의 한 쪽 경계면에서 쇼트키 장벽이 낮아지게 되어 전기전도는 더욱 쉬워진다[13].

4. 결 론

2.5kA, 8/20 μ s 임펄스전류를 입사시킨 22.9kV 배전선로용 ZnO 피뢰기 소자에 직류와 교류가 중첩된 전압에 의해 흐르는 누설전류의 측정과 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) ZnO 피뢰기 소자에 교류 전압을 인가하였을 때의 누설전류는 정극성과 부극성이 대칭으로 나타났다으나 직류와 교류 중첩된 전압이 인가되었을 때 흐르는 누설전류는 비대칭으로 나타났다.
- (2) 임펄스전류의 입사횟수가 증가함에 따라 ZnO 피뢰기 소자에 직류와 교류가 중첩된 전압을 인가한 때 전압이 높고 그리고 직류 전압의 비중이 클수록 저항성 누설전류가 크게 증가하였다.
- (3) 직류와 교류가 중첩된 전압에 대한 ZnO 피뢰기 소자의 $I-V$ 곡선은 직류 전압과 교류 전압에 대한 $I-V$ 곡선 사이에 놓여 있다. 저전도 영역에서 직류 누설전류는 상용주파수 교류 누설전류보다

작지만, 고전도 영역에서 반전되는 현상이 관측되었다.

- (4) 직류와 교류의 중첩전압에 대한 $I-V$ 곡선에서 인가전압의 증가에 따른 교차현상은 임펄스전류의 입사횟수가 많은 ZnO 소자일수록 낮은 전압에서 나타났다.

References

[1] J. W. Woo, J. S. Kwak, Y. W. Kang, H. J. Kim C. H. Oh, B. H. Lee, and J. D. Moon, "The Introduction about New KLDNet(KOREA/KEPCO Lightning Detection Network) and the Statistical Distribution of Lightning Parameters in Korea('96-'05)", Proc. of the 19th International Lightning Detection Conference, Arizona, USA, pp. 24-27, 2006.

[2] B. H. Lee and S. M. Kang, "A Monitoring Device of Leakage Currents Flowing through ZnO Surge Arresters", JJAP. Vol.42, Part 1, No.4A, pp.1568-1574, 2003.

[3] B. H. Lee and S. M. 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] A. Haddad, H. S. B. Elayyan, D. M. German, and R. T. waters, "ZnO surge arrester elements with mixed direct and 50(Hz) voltages", IEC Proc., Pt. A, Vol.138, No.5, pp.265-272, 1991.

[5] B. H. Lee and S. M. Yang, "Electrical Characteristics of ZnO Surge Arrester Elements Subjected to the Mixed DC and 60Hz AC Voltages", J. KIIE, Vol.26, No.4, pp.41-47, 2012.

[6] 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.

[7] S. B. Lee, S. J. Lee and B. H. Lee, "Analysis of thermal and electrical properties of ZnO arrester block", Current Applied Physics, Vol.10, No.1, pp.176-180, 2010.

[8] S. B. Lee and B. H. Lee, "Degradation Properties of ZnO Surge Arresters Due to Lightning Impulse Currents", J. KIIE, Vol.23, No.4, pp.79-85, 2009.

[9] R. B. Standler, Protection of Electronic Circuits from Overvoltages", John Wiley & Sons., Inc., pp.133-137, 1989.

[10] M. Matsuoka, et al., Zinc Oxide Varistor, Ohm Ltd. pp.76-80, 2010.

[11] S. Tominaga, Y. Shibuya, Y. Fujiwara, M. Imataki, T. Nitta. "Stability and long term degradation of metal oxide surge arrester", IEEE Trans. Vol. PAS-99, No. 4, pp.1548-1556, 1980.

[12] A. Haddad, J. Fuentes-Rosado, D. M. German and R. T. waters, "Characteristics of ZnO surge arrester elements with direct and power frequency voltages", IEE Proc, Vol.137, No. 5, pp.269-279, 1990.

[13] W. G. Carlson, Dr. T. K. Gupta and A. Sweetava, "A Procedure for Estimating the Lifetime of Gapless Metal Oxide Surge Arresters", IEEE Trans. PWRD-1, No.2, pp.67-74, 1986.

◆ 저자소개 ◆



이복희 (李福熙)

1980년 2월 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1988~1989년 동경대학 객원연구원. 1999년 Cincinnati대학 방문교수. 2010년 1월~2011년 12월 본 학회 회장, 현재 인하대 IT공대 전기공학부 교수.
Tel : (032)860-7398
Fax : (032)863-5822
E-mail : bhlee@inha.ac.kr



조성철 (趙成哲)

1977년 12월 16일생. 2003년 2월 인하대 공대 전기공학과 졸업. 2005년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정. 기초전력연구원 주임 연구원.
Tel : (02)885-9443,
E-mail: canfeel@snu.ac.kr



양순만 (楊淳晩)

1984년 2월 원광대 공대 전기공학과 졸업. 2004년 2월 인하대 공학대학원 전기공학과 졸업(석사). 2012년 8월 인하대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 금호산업(주) 상무이사.
Tel : (032)860-7398
Fax : (032)863-5822
E-mail : smyang1@kumhoenc.com