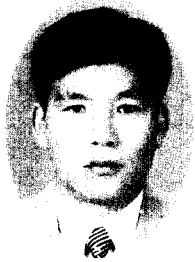
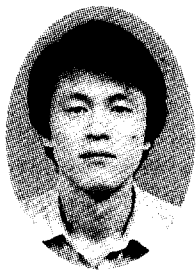


## 피뢰기 시험 및 진단기술



**김석수**  
한국전기연구소 전력시험실  
선임연구원. 관심분야: ZnO소자  
및 피뢰기 시험평가기술



**조한구**  
한국전기연구소 절연·피뢰기기술  
연구팀장. 관심분야: 신소재 절연  
물(composite insulator, arrester) 및  
성능진단기술



**임기조**  
충북대학교 전기공학과 교수  
관심분야: 절연진단기술 유전체  
특성 및 응용, 초음파 모터 등

### 1. 서론

일반적으로 서어지(surge) 전압이라 하는 것은 전기회로 또는 송배전계통에서 상시전압을 넘어 순간적으로 발생하는 전압을 말한다. 여러 가지 요인에 의해 발생한 서어지는 전원선, 신호선을 타고 감쇄와 반사를 반복하면서 전력기기와 반도체 제어기기로 침입하여 기기의 절연을 저감시키거나, 기기나 반도체를 파손시킨다.

따라서 가정용 전기기구에서부터 송배전선로, 의료장비, 항공기 등에 이르기까지 각종 선로 또는 장비에 유입되는 서어지에 대한 대책은 매우 중요하며, 이러한 보호대책으로 피뢰기(arrester)가 다양한 모델로 폭넓게 사용되고 있으며, 최근 사용되는 피뢰기는 종래의 직렬갭(gap type)으로 탄화규소(SiC)소자를 사용한 피뢰기 대신 방전시간의 지연이 없으며, 속류가 거의없는 비직선전압-전류특성이 우수한 산화아연(ZnO)소자를 사용한 갭리스형(gapless type) 피뢰기가 널리 사용되고 있다.

피뢰기란 뇌 또는 회로의 개폐 등에 의한 이상과전압의 파고치가 어느 값을 초과한 경우 방전에 의해 이상과전압을 제한해서 기기의 절연을 보호하고 또한 속류를 단시간내에 차단하고 원상태로 회복하는 특성을 지닌 보호기기이다. 이러한 보호기기의 성능에 대한 검증은 대단히 중요하며 지속적인

연구와 노력이 필요하다. 따라서 본 보고에서는 피뢰기의 성능 검증에 필요한 시험과 진단기술에 대해 기술하였으며 그림 1, 그림 2는 각각 배전선로 및 송전선로에서 뇌방전 상황을 나타내었다.

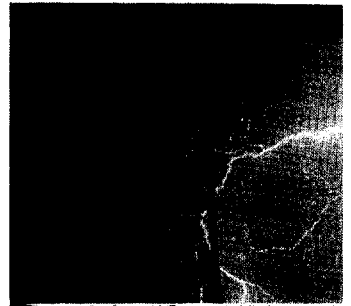


그림 1. 배전선선로에서의 뇌방전



그림 2. 송전선로에서의 뇌방전

### 2. 피뢰기 시험

피뢰기의 성능을 검증하기 위해 많은 시험항목들이 있지만 특

히 전력계통에서의 개폐동작, 뇌의 침입, 단락사고 등으로 인하여 발생하는 서어지를 모의하기 위해, 충격전류발생기를 이용한 인위적인 충격전류를 인가하여 피뢰기의 기본특성과 방전내량을 검증하고 있다.

### 2.1 충격전류발생기의 기본 시험회로

충격전류를 발생시키는 뇌충격전류 및 구형파전류의 기본회로는 R, L, C의 조합으로 구성되며 그림 3, 4와 같다.



그림 3. 뇌충격전류 시험회로 (1/20, 4/10, 8/20 $\mu$ s)

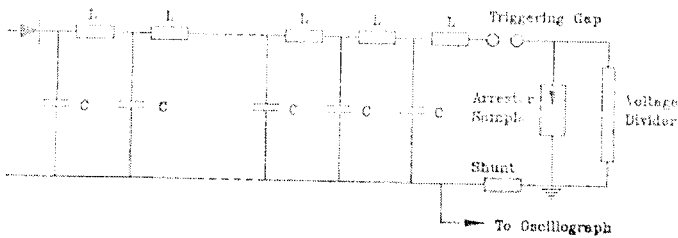


그림 4. 구형파형충격전류 시험회로(500, 1000 $\mu$ s)

### 2.2 충격전류파형(파두,파미장)

그림 3, 4의 시험회로에서 측정된 뇌충격전류 및 구형파 충격전류의 파형을 국제규격(IEC)에서 정의한 파두장(T1), 파미장(T2)과 각 시험파형의 허용오차에 대해 그림 5, 6과 표 1에 나타내었다.

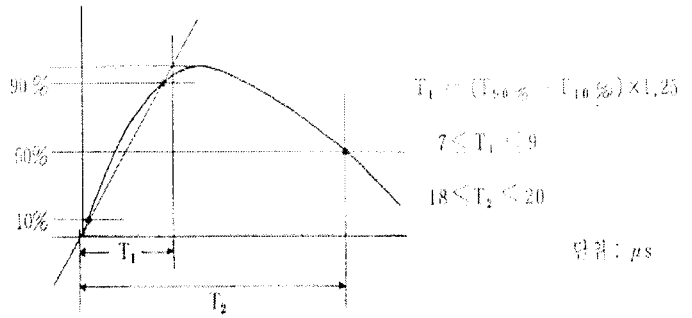


그림 5. 뇌충격전류 파형 (1/20, 4/10, 8/20 $\mu$ s)

표 1. 뇌격전류파형의 허용 오차

파형	구분 허용 오차	
	파두장(T1)	파미장(T2)
1/20 $\mu$ s	0.9~1.1 $\mu$ s	$\leq 20\mu$ s
4/10 $\mu$ s	3.5~4.5 $\mu$ s	9~11 $\mu$ s
8/20 $\mu$ s	7~9 $\mu$ s	18~22 $\mu$ s

그림 6의 구형파 전류파형에서 규약파고지속시간은 파고치의 90% 이상의 값을 가지는 시간이며 파형 총지속시간은 규약파고지속시간의 150%를 초과하지 않아야 하며, 또한 파고치에서의 진동은 10% 이상을 초과해서는 안된다. 이상으로 충격전류발생기의 기본회로와 충격전류의 파형에 대해 알아보았다.

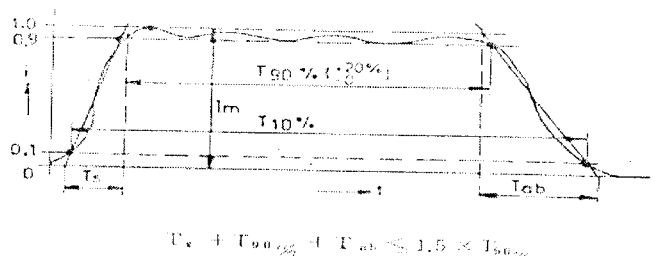


그림 6. 구형파충격전류 파형 (500, 1000 $\mu$ s)

## 2.3 규격별 시험항목 비교

다음은 규격별 피뢰기 성능 검증에 있어 어떠한 시험항목들을 적용하고 있는지를 표 2에 나타내었다.

표 2. 규격별 시험항목 비교

시험항목	구분	ES153 (한전)	IEC99-4 (국제규격)	JEC217 (일본규격)
1.구조검사		○	-	○
2.절연저항시험		○	-	○
3.누설전류시험		○	-	○
4.동작개시전압시험		○	○	○
5.급준과 제한전압시험		○	○	○
6.뇌충격 제한전압시험		○	○	○
7.개폐충격 제한전압시험		○	○	○
8.장시간 충격전류시험		○	○	○
9.대전류동작책무시험		○	○	-
10.뇌충격동작책무시험		○	-	○
11.복합동작안정도시험		○	-	○
12.상용주파내전압시험		○	○	○
13.뇌충격내전압시험		○	○	○
14.내열화성시험		○	-	○
15.내오손시험		○	○	○
16.단로기시험		○	○	○
17.부분방전시험		○	○	-
18.방압시험		○	○	○
19.복성요소의 V-I 특성시험		참고	-	-
20.안정도시험		참고	-	○
21.열소산응답시험		참고	-	-
22.뇌충격방전개시전압시험	Cap Type	Cap Type	Cap Type	Cap Type
23.개폐충격방전개시전압시험	Cap Type	Cap Type	Cap Type	Cap Type
24.파두충격방전개시전압시험	Cap Type	Cap Type	Cap Type	Cap Type
25.전류분배시험	-	○	-	-

## 2.4 피뢰기 시험

피뢰기의 성능 검증에 필요한 여러 가지 시험항목이 있지만 여기에서는 중요하다고 생각되는 ZnO소자의 기본특성(동작개시전압, 제한전압)과 동작책무시험에 대해서만 논하고자 한다.

### 2.4.1 소자의 V-I 특성시험

ZnO소자를 사용한 갭리스형 피뢰기의 기본특성은 ZnO소자의 V-I 특성으로 집약된다. 또한 직

렬값이 없기 때문에 전류범위는  $10^3 \sim 10^5 A$ 로 광범위하며 전류파형도 직류, 상용주파, 뇌충격전류로 광범위( $10^{-6} \sim 10^1 sec$ )한 V-I 특성을 구하는 것이 필요하다. 그의 예로서 표 3의 결과로 V-I 곡선을 그림 7에 나타내었다.

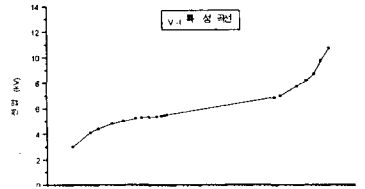


그림 7. 소자의 V-I 특성곡선

표 3. V-I 특성의 측정 결과

구분	DC 전류									
	1μA	5μA	10μA	40μA	100μA	300μA	500μA	1mA	2mA	3mA
전압 (kV)	3.0	4.1	4.4	4.8	5.0	5.2	5.25	5.3	5.35	5.4

구분	DC 전류	(충격전류)8/20μs								
		4mA	5mA	80A	134A	600A	1340A	2610A	5000A	10240A
전압 (kV)		5.45	5.5	6.84	6.98	7.73	8.17	8.69	9.73	10.7

### 2.4.2 동작개시 전압시험

동작개시전압시험은 피뢰기에 상용주파전압을 인가하고 저항분전류 파고치에서의 피뢰기 단자간 전압을 측정한다. 저항분 전류의 파고치는 직류 또는 교류 전압을 인가해서 저항분 전류 1mA가 흐를때의 단자간

전압 파고치를 동작개시 전압으로 사용할 수 있지만, 배전선로 용부더 계통용 중책무 피뢰기까지 일률적으로 1mA를 적용하는 것은 부적당하며 소자의 단위면적당 저항분 전류와 개폐동작책무 정전용량을 고려하여 JEC(일본)에서는, 1~3mA를 적용하고 IEC TC-37 WG04에는 1~10mA 범위가 제안되어 있다.

### 2.4.3 제한전압 시험

제한전압시험은 피뢰기에 규정의 파형을 가진 충격전류를 인가하였을 때 피뢰기 양단자간에 나타나는 전압을 말한다. 급준과 제한전압시험은 발·변전소 부근의 뇌 인접은 파두가 급준한 서어지가 되고 특히 가스 절연 개폐장치는 V-t 특성이 평탄하기 때문에 급준한 서어지에 대한 보호협조의 성능을 확인한다. 뇌충격 제한전압시험은 8/20μs의 파형으로 공칭방전전류의 0.5, 1, 2배의 각각의 전류에서 제한전압을 측정하여 V-I 곡선을 작성하여 공칭방전전류에서의 최대 제한전압을 구한다. 뇌충격제한전압을 측정할 오실로그래프와 V-I 곡선을 그림 8, 9에 나타냈다.

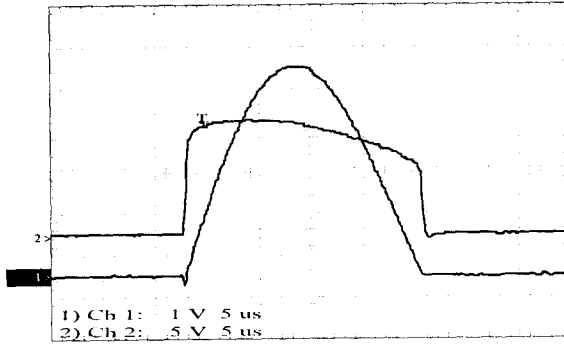


그림 8. 뇌충격 제한전압측정 오실로그래프(Ch1(충격전류)  
: 10.00kA (8/20 $\mu$ s), Ch 2(제한전압):9.99kV)

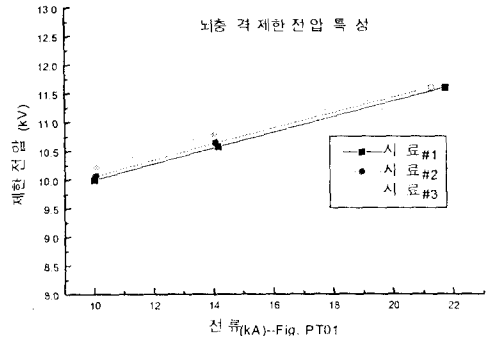


그림 9. 뇌충격 제한전압특성 곡선

#### 2.4.4 동작책무 시험

동작책무시험은 피뢰기가 소정의 단위동작책무를 규정의 횟수만큼 반복 수행될 수 있는지를 검증하는 목적으로 실계통에 동작상태를 모의하여 실시하는 시험을 말하며 피뢰기의 책무에 따라 대전류충격 동작책무시험과 개폐서어지 동작책무시험으로 나눈다. 여기에서는 대전류충격 동작책무 시험에 대해 논한다.

IEC 99-4에서 규정한 대전류충격 동작책무시험을 실시하기 위해서는 우선 가속열화시험이 선행되어야 한다. 가속열화시험은 동작책무시험에 적용할 보정전압  $U_r$ 과  $U_c$ 를 결정하기 위한 시험으로 3개의 시료를  $115 \pm 4^\circ\text{C}$ 의 항온조에서 1000시간 동안 보정된 식 1)과 같은 최대연속운전전압 ( $U_{ct}$ )을 인가한다.

$$U_{ct} = U_c(1 + 0.05L) \quad \text{----- 1)}$$

여기서 L은 피뢰기의 전체길이(m)이며,  $U_r$ 과  $U_c$ 의 산정은  $115 \pm 4^\circ\text{C}$ 로 예열시킨 시료에  $U_{ct}$ 를 인가하여 1~2시간후 각 시료의 전력손실( $P_{1ct}$ )을 측정한다. 이후 1000시간 동안  $U_{ct}$  전압을 인가하여 열화시킨 후의 각 시료 전

력손실( $P_{2ct}$ )을 측정하여,  $P_{1ct} \geq P_{2ct}$ 이면 보정없이 사용하고  $P_{1ct} < P_{2ct}$ 이면 IEC 99-4의 규정된 절차에 따라 보정된 전압  $U_r$ 과  $U_c$  값을 구하여 시험에 적용한다. 가속열화시험이 끝나면 대전류충격 동작책무 시험을 그림 10의 절차에 따라 실시한다

그림 10의 절차에 따라 상태조절시험은 시료에  $1.2U_c$ 의 상용주파전압을 파고치로부터 전기각  $60 \pm 15^\circ$  범위 이내에 충격전류를 인가한다. 공칭방전전류가 5kA인 피뢰기를 시험한 오실로그래프를 그림 11에 나타내었다. 상태조절시험후 대전류 충격의 인가는 1회씩 충격전류 인가후 시료를  $60 \pm 3^\circ\text{C}$ 로 예열

초기 측정	공칭방전전류에서 제한 전압 측정 (8/20 $\mu$ s)	$I_n(8/20\mu s)$ 1회
	시간 간격의 규정은 없음	
상태 조절	상태 조절 시험 연속 운전 전압+20%를 중첩시킨 상태에서 공칭 방전 전류인 8/20 $\mu$ s 충격을 5회 4군 인가	$1.2U_c$ $I_n(8/20\mu s)$ 5회 $\times$ 4군=20회
	시간 간격의 규정은 없음, $20^\circ\text{C} \pm 15^\circ\text{C}$	
대전류 충격 동작 책무 시험	대전류 충격 (4/10 $\mu$ s) $60^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$ 로 예열 대전류 충격 (4/10 $\mu$ s)	4/10 $\mu$ s 2회
	100ms 이내에 가능한한 빨리 (비고2. 참조)	
측정 및 검사	보정 정격 전압, 10초	$U_r$ $U_c$
	보정 연속 운전 전압, 30분	
	주위 온도로 냉각, $20^\circ\text{C} \pm 15^\circ\text{C}$	
측정 및 검사	공칭 방전 전류에서 제한 전압 측정 (8/20 $\mu$ s)	$I_n(8/20\mu s)$ 1회
	시험 시료의 육안 검사	

그림 10. 1.5kA, 2.5kA, 5.0kA 및 선로방전등급 1인 10kA 피뢰기

하여 2회째의 충격전류를 인가함과 동시에 가속열화시험에서 결정된  $U_r$ 을 100ms 이내에 투입하여 10초간 인가하고  $U_c$ 를 30분간 인가하면서 열안정성과 열폭주를 확인하기 위해 소자의 온도, 전력손실 또는 저항분전류를 측정한다.

아래의 그림들은 대전류충격 오실로그래프와  $U_r$ ,  $U_c$  인가동안의 누설전류, 저항분전류, 전력손실이 열폭주없이 안정되어가는 과정을 나타내고 있다.

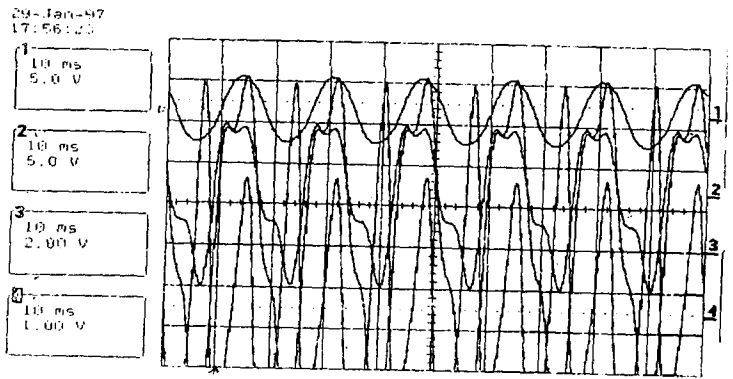


그림 13. 상용주파전압( $U_r$ ) 인가동안의  $I_x$ ,  $I_r$ ,  $P_w$ 의 초기측정(위로부터 인가전압, 누설전류, 저항분전류, 전력손실)

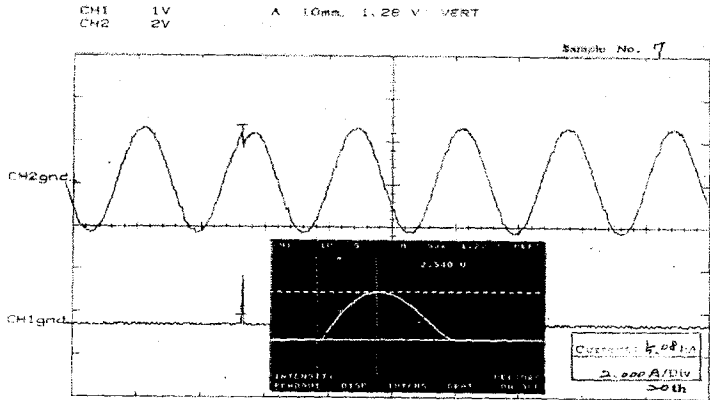


그림 11. 5kA 피뢰기의 상태조절시험 오실로그래프

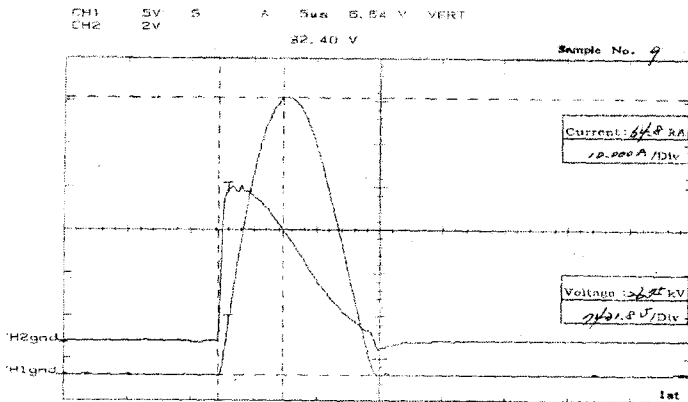


그림 12. 대전류 충격 오실로그래프

그림 13은 대전류충격후 100ms 이내에  $U_r$ 전압이 인가된 초기상태의 누설전류, 저항분전류 및 전력손실을 나타내고 있다. 그림 14보다 누설전류, 저항분전류, 전력손실이 급속도로 줄어들고 있다.

그림 15는 누설전류, 저항분전류 및 전력손실의 크기가 안정되었음을 보여주고 있다. 그림 10의 절차에 따른 피뢰기의 성능평가는 상용주파전압 인가시간 동안 열폭주없이 열적으로 안정되어야 하며, 뇌충격제한전압시험을 실시하여 시험전,후의 변화율이 5% 이내이며 특성소자에 관통, 섬락, 균열등의 흔적이 없으면 피뢰기는 규격을 만족하는 성능을 가진 것으로 판정한다. 피뢰기는 전기적, 기계적으로 반복, 장시간 사용에 대해 충분한 내구성을 갖고 내부구성요소, 기밀구조 및 성능이 열화되어서는 안된다.

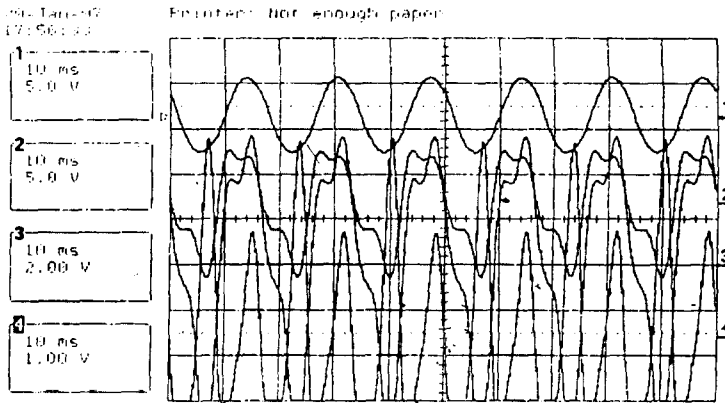


그림 14. 상용주파전압( $U_c$ ) 인가동안의  $I_x$ ,  $I_r$ ,  $P_w$ 의 측정  
(위로부터 인가전압, 누설전류, 저항분전류, 전력손실)

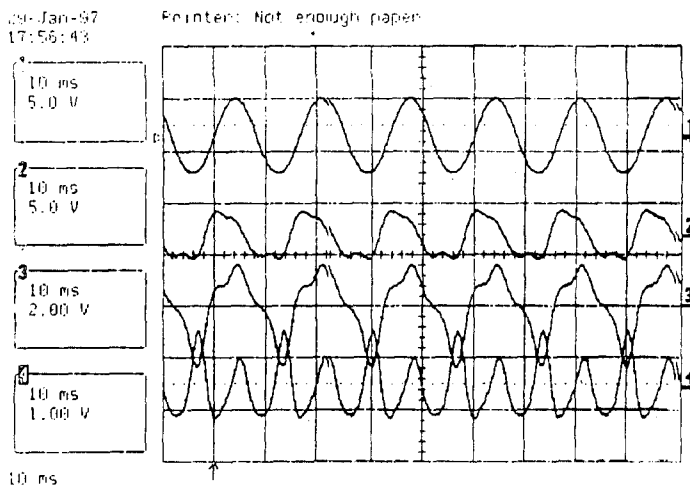


그림 15. 상용주파전압( $U_c$ ) 인가동안의  $I_x$ ,  $I_r$ ,  $P_w$ 의 측정(위로부터 인가전압, 누설전류, 저항분전류, 전력손실)

### 3. 피뢰기 진단기술

피뢰기는 소자, 절연물의 열화, 밀봉 구조상의 열화에 의한 흡습 등이 발생할 수 있기 때문에 열화의 유,무를 점검하여 신뢰성을 가질 수 있도록 관리하는 것이 필요하다. 특히 ZnO형 갠리스형 피뢰

기는 열화의 유,무를 판단하기 위하여 누설전류의 측정이 필요하다.

#### 3.1 피뢰기의 저항분전류 검출기법

현재 갠리스형 피뢰기의 외부 진단기술은 누설전류(전전류)를 측정하는 것이 주류이다. ZnO소

자의 열화가 어느정도 진행된 시점에서는 전전류중에서 저항분전류가 차지하는 비율이 크므로 전전류를 측정함으로써 용이하게 피뢰기의 이상진단이 가능하다.

이 때문에 종래의 측정기술이 그대로 사용되고 측정오차가 적으며 용이하게 측정할 수 있는 전전류 측정이 피뢰기의 외부진단기술로서 널리 보급되고 있다. 그리고, 최근의 전자기술의 진보에 따라 미소한 비율의 저항분전류를 전전류중에서 검출하는 기술이 개발되고 실용화되고 있다.

초기의 ZnO소자의 열화를 빠르게 검출하고 피뢰기의 열폭주 발생을 예상하고 이를 미연에 방지하기 위해서는 저항분 전류를 관리하는 것이 가장 유효하고 피뢰기의 외부진단기술의 주류이다. 여기에서는 실용화되고 있는 저항분전류 검출법을 소개하고자 한다.

#### 3.1.1 자기 소호법

피뢰기의 전전류에서 자동적으로 소호파를 만들고 전전류와의 차동을 취해서 저항분전류를 얻는 방법이다. CT에 의해 검출한 전전류의 신호를 증폭하여 그 영점에 있어서 반전하는 구형파 신호를 schumit trigger 회로에서 발생시켜 상용주파성분을 추출하고, 또한 용량분 전류에서의 지연을 보정한다. 이 신호의 파고치를 전전류의 그것에 합해서 얻어진 소호파를 전전류파에서 뺀 저항분전류를 얻는다. 이렇게 해서 얻어진 저항분전류의 파고치를 위해 마이크로프로세서에 넣어서 소정의 알고리즘을 기호로해서 진단을 행한다.

이 방법은 PT/PD 등에서의 보조 신호가 불필요하며 또한 센서로서 CT를 사용하기 때문에 안전하여 내서어지성이 우수하다는 등의 장점이 있다.

### 3.12 동기정류방식

피뢰기의 전전류를 저항검출해서 밴드패스필터를 통해 기본파 성분을 추출하고 PT/PD 등에서 얻어진 전압신호로 동기정류, 직류로 변환, 증폭해서 저항분전류 신호를 얻는다. 이 방법은 계통에서의 고조파의 영향을 받지 않으며 측정오차가 적은 등의 장점이 있다.

### 3.13 소호 방식

CT에서 검출한 전전류파 신호에 PT/PD 등에서 얻어진 전압 신호를 미분해서 발생한 소호파를 차동시켜 저항분전류를 얻는다. 이 방법은 저항분전류 파형을

정확히 얻을 수 있으며, 또한 전압과 곱해서 손실(wattloss)이 얻어지는 장점이 있다.

### 3.14 제 3고조파 방식

CT에서 검출한 전전류중 기본파 다음에 저항분전류에 많이 포함되는 제3고조파를 밴드패스 필터로 검출해서 선형화하고 또한 증폭해서 저항분전류의 신호를 얻는다. 이 방법은 보조신호가 불필요하고, 또한 일반적으로 계통의 제3고조파는 변압기 3차에서 단락되어 대단히 적기 때문에 오차를 거의 포함하지 않는 저항분전류의 신호가 얻어지는 장점이 있다.

## 4. 맺음말

본 해설에서는 피뢰기 시험에 대한 충격전류발생기의 기본 시험 회로와 규격별 시험항목중에서 피뢰기 성능 검증에 기본적인 시험

인 동작개시전압, 제한전압, 동작책무시험에 대하여 간략하게 살펴 보았다. 그리고, 이의 진단기술중 저항분전류 검출에 대한 몇가지의 기법들의 간략하게 살펴 보았다. 앞으로 이 분야에 대한 연구 개발과 사업들이 진행되리라 예상되며 본 내용이 이 분야에 관심이 있는 분들에게 조그마한 도움이 되길 기대한다.

## 참고문헌

- 1] 白川普吳, “避雷器の開發狀況と異狀電壓 抑制效果”, 電氣評論, pp. 980-988, 1992.
- 2] 日本電氣學會技術報告, “酸化亞鉛素子の新適用技術動向”, 1996
- 3] International Electrotechnical Commission “Surge Arrester part 4 : Metal-oxide surge arrester without gaps for A. C. system”, IEC 99-4, 1991.
- 4] “갠리스형 금속-산화물 피뢰기에 관한 표준 개발에 관한 보고서” 통상산업부, 1997.

< 조한구 박사 >