

배전계통의 활선상태 피뢰기 진단 및 현상적용

이만규, 류혁, 최윤중, 정재기
한빛EDS(주)

LightningArresterOnPowerDiagnosisofDistributionSystemandFieldApplication

Lee Man-kyu, Ryu Hyuk, Choi Yun-chong, Jung Jae-ki
HANBIT EDS, CO., LTD

Abstract - 전국적인 분포를 갖고 있는 배전망에 유일한 과전압 보호 및 절연보호장치인 피뢰기는 배전계통에서의 사고율을 감소시키는 중요한 역할을 수행한다. 이러한 피뢰기의 수명은 동작횟수의 증가에 의해서 서서히 열화되게 된다.

이러한 열화의 과정은 피뢰기의 저항성 전류가 증가하는 현상과 일치한다. 그러나 배전계통에서 저항성 전류를 검출하기 위한 전압요소에 대한 정보를 얻기가 쉽지 않다.

본 논문에서는 이러한 피뢰기의 열화현상을 파악하기 위하여 이론적으로 피뢰기의 열화정도가 고조파의 분석만으로 가능하다는 점을 증명하고 특히 3고조파의 증가와 저항성 전류의 증가가 비례함을 현장에서 수집한 피뢰기의 실증을 통해 입증하였다.

이러한 연구결과를 현장에 적용하여 현장의 가혹한 조건의 전자계영향에도 불구하고 정밀한 피뢰기 진단이 가능하다는 결론에 도달하였다. 결론적으로 본 연구의 결과로 현장의 피뢰기 진단이 간편해지고 효율적으로 이루어 질 수 있음을 실증하였고, 앞으로 배전계통에서의 안정적인 전력공급에 기여할 것으로 기대하고 있다

1. 서 론

최근의 변전소등의 전력변환소가 무인화의 경향에 입각하여 전력설비를 자동으로 진단하고 고장을 예지하는 시스템을 기존의 운전중인 변전소에 신설하고 있다. 이때 전력설비의 최저 절연점이며 절연전압의 기본을 이루고 있는 피뢰기가 고장이나 열화등의 원인으로 정상적인 동작이 불가능하거나 낙뢰 및 차단써지를 차단하지 못하게 될때 전력설비 특히 변압기 권선에 치명적인 영향을 미치게 되며 최악의 경우 정전사고를 유발할 수도 있으며, 피뢰기가 정격으로 동작하지 못하면 절연설계의 기본이 되는 전압레벨인 BIL이 확보 불가능하므로 절연협조에 의한 절연설계에 문제점이 발생하여 전력공급의 신뢰성이 저하되는 요인이 된다.

피뢰기의 가장 기본적인 기능은 송전선이나 변전기기에서 발생하는 내부적, 혹은 외부적 요인에 의해 발생하는 과전압을 효과적으로 저감하는 기능을 담당한다. 내부적으로 발생하는 요인은 차단기의 개폐에 의해 생기는 개폐과전압으로 전압계급이 올라갈수록 차단써지의 배수도 올라가면 차단써지가 절연설계의 측면에서 가장 가혹

한 상태를 만들게 된다. 이러한 차단써지 또한 피뢰기에 의해 감쇄되지 않으면 절연과 운용에 문제점으로 동작하게 된다. 특히 차단써지는 낙뢰써지와는 달리 에너지의 양도 상당하므로 다른 기기의 파손이나 소손에는 낙뢰파형보다 더 심각한 상태를 발생시킨다.

이점은 전력기기의 최적설계라는 측면에서 경제적인 생산에 기여하는 중요한 요인이 된다. 그러나 반대로 생각하여 피뢰기가 고장에 의해 오동작을 하는 경우는 다른 전력기기의 절연이 파괴되는 현상을 초래한다.

전력설비의 내부에서 발생하는 차단써지 혹은 낙뢰에 의한 낙뢰써지를 피뢰기는 효과적으로 차단해야한다. 만일 열화에 의해 낮은 전압에서 동작해도 운영상의 큰 문제점을 발생시키고, 높은 전압에서 동작해도 전력기기의 절연파괴의 원인으로 동작하게 된다. 결국 전압계급에 높을수록 사고의 파급효과도 크게 되므로 피뢰기는 상시감시에 의해 열화정도를 판단하는 것이 반드시 필요하며, 이러한 피뢰기의 열화현상을 파악하기 위하여 이론적으로 피뢰기의 열화정도가 고조파의 분석만으로 가능하다는 점을 증명하고 특히 3고조파의 증가와 저항성 전류의 증가가 비례함을 현장에서 수집한 피뢰기의 실증을 통해 입증하였다.

2. 본 론

2.1 피뢰기 관련 용어해설

◇ 벨브요소(Valve element): 피뢰기의 전압-전류의 비선형특성을 나타내는 자항으로 방전전로가 흐르는 동안 피뢰기터미널 사이에 걸리는 전압을 제한하는 기능을 하고, 정상 상용 주파수 전압에서 흐르는 전류를 제한한다.

◇ 피뢰기 방전전류(Arrester Discharge Current): 써지가 원인이 되어 피뢰기에 흐르는 전류

◇ 피뢰기 방전전압(Arrester Discharge Voltage): 방전전류가 흐르는 동안 피뢰기 양단 터미널에 나타나는 전압

◇ 계통전압(System Voltage): 상-대지(혹은 중성점)전압과 차별성을 부여하기 위한 목적으로 상용주파 실효값의 상-상 전압(선간전압)

◇ MCOV(Maximum Continuous Operating Voltage Rating): 피뢰기의 양단에 연속적으로 인가될 수 있는 상용주파 최대 실효값, 피뢰기가 동작하도록 설계된 연속최대전압

2.2 주파수 영역에서의 비선형요소의 처리방법 및 특성

2.2.1 이산 푸리에 변환에 의한 주파수 분석기법

전압, 및 전류파형을 분석하기 위해서 기본주파수와 고조파의 크기 및 위상분석에 필요한 해석기법으로 이산 푸리에 변환을 사용하였다. 이방법의 중요성은 지금까지 서술했던 콘덴서 뱅크를 해석하는 개념과 매우 밀접한 관계가 있는 기법이며 디지털 하드웨어 장치 혹은 디지털 컴퓨터에 적합하게 사용할 수 있게 되므로 실제 온라인 시스템으로 진단장치를 만드는데 현실성을 배가시키고 있다. 이러한 기법이 유한 순환신호를 처리하는 가장 편리한 기법으로 이산푸리에 변환(DFT: Discrete Fourier Transform)을 채택하였다.

$x[n]$ 을 유한 순환신호라 한다. 즉 정수 N_1 이 존재한다. 따라서

$$x[n] = 0, 0 \leq n \leq N_1 - 1 \text{ 이외의 구간}$$

앞절에서 했던 것처럼 한 주기에 대해 주기신호 $\tilde{x}[n]$ 을 $x[n]$ 과 같다고 놓을 수 있다.

특히 $N \geq N_1$ 인 정수가 주어지고 $\tilde{x}[n]$ 이 주기 N 의 주기신호라면

$$\tilde{x}[n] = x[n], 0 \leq n \leq N - 1 \quad (3.1)$$

$\tilde{x}[n]$ 푸리에 급수 계수는 다음과 같다.

$$a_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \tilde{x}[n] e^{-jk(2\pi/N)n}$$

합(\sum)의 구간을 $\tilde{x}[n] = x[n]$ 이 되는 범위로 선정하면

$$a_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-jk(2\pi/N)n} \quad (3.2)$$

DFT의 중요성이 몇 가지 있는데 첫째 본래의 유한순환 신호는 신호의 DFT를 취하면 얻을 수 있다는 사실이다. 특히 $\tilde{x}[n]$ 의 푸리에 급수식 이용하면 a_k 로 부터 역으로 $\tilde{x}[n]$ 을 계산할 수 있다. 즉,

$$x[n] = \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{jk(2\pi/N)n}, n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (3.3)$$

따라서 유한순환신호는 이미 가정한 영이 아닌 값의 유한집합 혹은 DFT에서

$X(k)$ 값의 유한집합에 의해 구별되는 것으로 생각될 수 있다. 둘째, DFT의 중요 점은 매우 빠른 알고리즘 즉, FFT (고속푸리에 변환)을 사용해서 계산할 수 있다는 점이다. 이산푸리에 급수와 변환에 밀접한 관계 때문에 DFT는 중요한 몇가지 성질을 만들기도 한다. 또한 FFT와 함께 이러한 성질은 두 개의 유한 순환 값의 콘볼루션 계산에 매우 크게 선택한다면 식(2.3)에 있는 N 값은 고정상태가 아님을 알아야 한다.

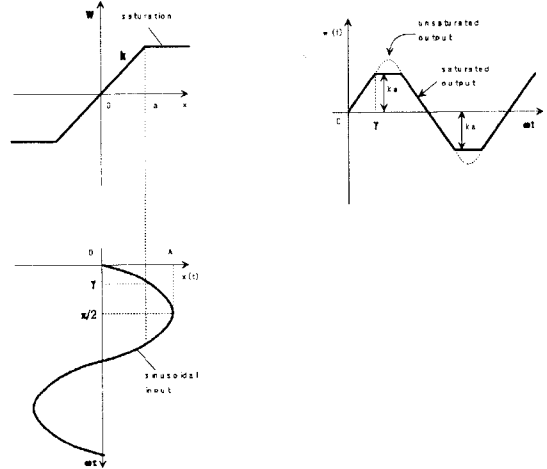
이러한 이론적 근거에 의해서 대지전압과 유입전류를 대상으로한 실험data를 분석하면 다음과 같은 중요한 정보를 얻을 수 있다.

- 전압의 주파수 스펙트럼
- 전압의 상대적 위상스펙트럼
- 전류의 주파수 스펙트럼
- 전류의 상대적 위상스펙트럼

- 전압, 전류의 상대적 위상스펙트럼을 분석하여 전압 전류의 위상차를 오차없이 계산할 수 있다.

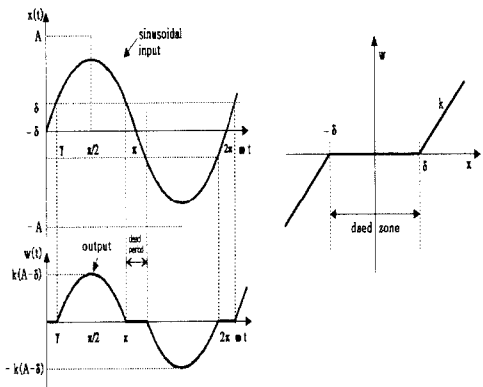
2.2.2 주파수 영역에서 비선형요소의 특성

주파수 영역에서 피뢰기를 해석하는 경우 피뢰기의 동작특성 및 열화특성에서 반드시 존재하는 현상으로 비선형요소가 존재한다. 가장 대표적이고 피뢰기의 특성과 일치하는 피뢰기의 비선형요소는 리미터이다. 이러한 현상을 이론적으로 해석하고자 한다.



<그림1 리미터가 존재하는 경우의 주파수 입출력 특성>

그림 1에서 보는 바와 같이 리미터가 존재하는 경우 본파의 일정 부분이 출력으로 전달되지 못하고 일정하게 유지되는 특성을 나타내게 된다. 이 때의 출력파형을 분석하면 다양한 주파수 대역의 고조파가 존재하게 된다. 일부 피뢰기의 파괴특성에서 알수 있듯이 피뢰기가 열화되면 다양한 대역의 고조파성분이 존재하게 되는데 이러한 특성은 피뢰기 열화를 분석하는데 중요한 요소로 작용하게 된다.

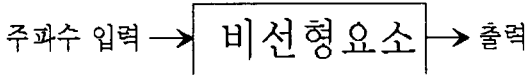


<그림2 비선형요소인 데드밴드의 입출력 특성>

그림2는 비선형요소의 또하나의 대표적인 요소인 데드밴드를 표현하고 있고 이요소를 통과한 입출력을 나타내고 있다. 그림에서 알수 있듯이 이러한 비선형요소를 통과하는 파형은 의형물과 파고물등이 변화하는 결과를 초래한다.

2.2.3 비선형요소의 해석

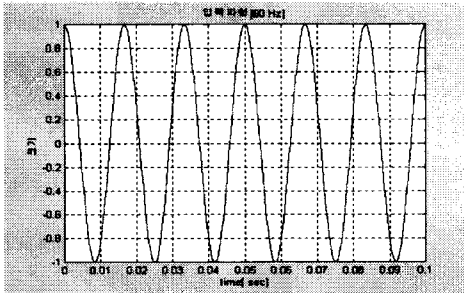
앞절에서 설명한 비선형요소를 통과한 상용주파수가 어떻게 변화하는가를 확인하고 비선형요소인 파형으로부터 물리적인 개념을 이해하고자 한다



<그림3 비선형요소의 특성을 파악하기 위한 블록선도>

그림3의 비선형요소에 입력신호를 각각 자승, 3승, 4승, 5승하는 비선형요소를 해석하고 이러한 비선형 특성을 통과한 출력을 주파수해석을 통해서 개념을 이해하고 이를 현장에서 나타나는 현상을 이해하는데 큰 도움을 주고자 한다.

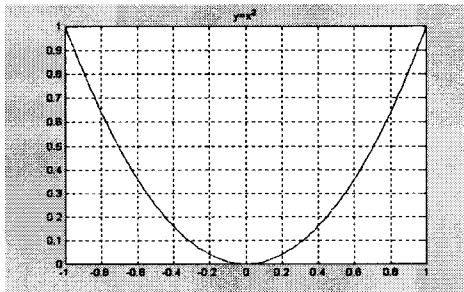
아래 그림4는 비선형요소에 입력으로 가하는 파형으로 상용주파수인 60Hz를 인가하였다. 크기가 1이고 60Hz인 파형을 자승, 3승, 4승, 5승의 특성을 갖는 각각의 비선형요소를 통과시켰을 때 비선형요소를 통과했을 때의 출력파형을 주파수와 크기의 관점에서 파악하고 이에 대한 개념을 확인하고자 한다.



<그림4 비선형요소에 인가하는 입력파형(주파수 60Hz, 크기 1)>

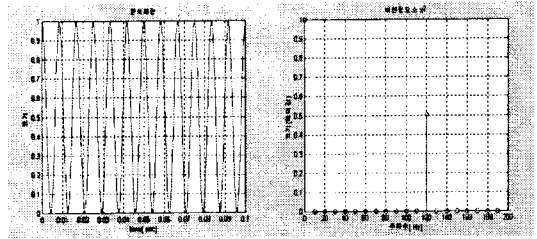
2.2.4 비선형요소가 입력을 자승하는 경우 해석

비선형요소가 입력을 자승하는 요소인 경우의 비선형요소와 출력파형 및 주파수 분석스펙트럼이다.



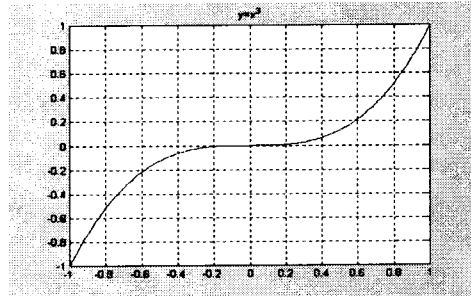
<그림5 입력을 자승하는 비선형요소의 특성>

아래 그림6은 그림4의 파형을 그림5의 비선형특성을 통과시킨 파형과 주파수 특성을 나타내고 있다. 그림6에서도 알 수 있듯이 그림5와 같이 입력을 자승하는 비선형요소를 통과한 파형의 주파수는 직류성분과 2고조파성분이 존재하게 된다. 기본파에 대한 출력성분은 전혀 존재하지 않는다.

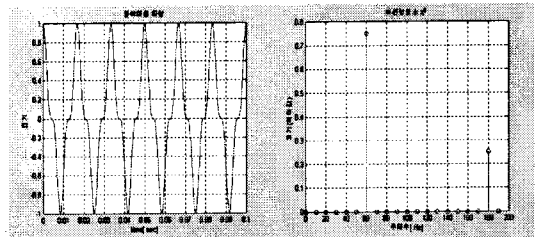


<그림6 그림5의 비선형요소를 통과한 파형과 주파수 스펙트럼>

2.2.5 비선형요소가 입력을 3승하는 경우 해석



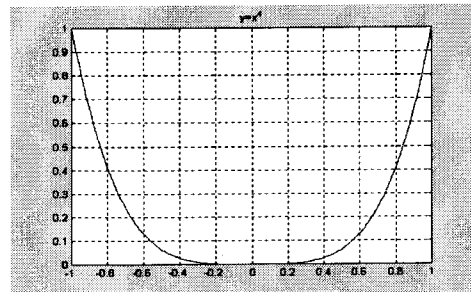
<그림7 입력을 3승하는 비선형요소의 특성>



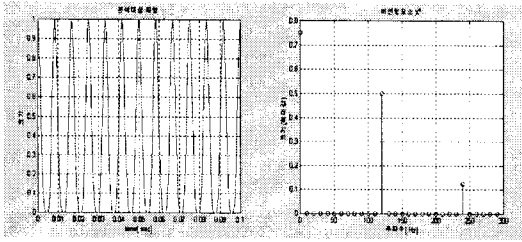
<그림8 그림7의 비선형요소를 통과한 파형과 주파수 스펙트럼>

그림8 입력을 3승하는 비선형특성에 그림 3.4의 파형을 통과시킨 출력파형과 주파수 분석 비선형요소가 입력을 3승하는 그림7과 같은 특성을 갖는 경우 이 특성에 그림4의 파형을 통과시키면 그림8의 파형과 주파수 특성이 된다. 이 그림8에서 알 수 있듯이 3승의 비선형특성에 상용주파의 성분을 통과시키면 기본파와 3고조파 성분이 존재하게 되고 직류성분은 없다.

2.2.6 비선형요소가 입력을 4승하는 경우 해석



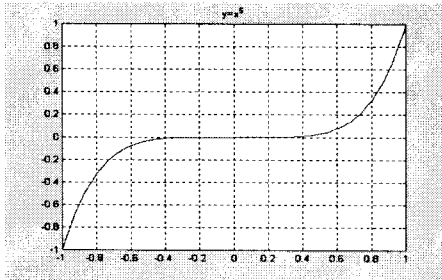
<그림9 입력을 4승하는 비선형요소의 특성>



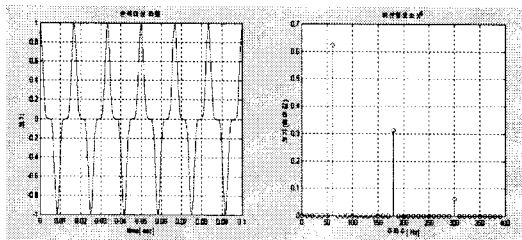
<그림10 그림4의 파형을 그림9의 비선형요소로 통과시켰을 때의 파형 및 주파수 분석>

그림10에서 알 수 있듯이 입력을 4승하는 비선형특성에 상요주파수를 통과시키면 기본파는 존재하지 않고 직류 성분, 2고조파, 4고조파 성분이 존재한다. 다만 짝수 누승이 되는 자승의 비선형요소와 비교하면 직류성분의 크기가 다소 작아지고 4고조파 성분이 존재한다는 다른 점에 주의하기 바란다.

2.2.7 비선형요소가 입력을 5승하는 경우 해석



<그림11 입력을 5승하는 비선형요소의 특성>



<그림12 그림4의 파형을 그림11의 비선형특성에 통과시킨 파형 및 주파수 분석>

그림12에서 알 수 있듯이 상용부파수를 입력을 5승하는 비선형요소를 통과시키면 1,3,5 고조파 성분이 존재하고 직류성분은 존재하지 않는다.

2.2.8 검토

피뢰기의 열화를 관장하는데 가장 기본적인 방법은 주파수영역에서 해석하고 그특성을 비선형요소로 처리해야 한다.

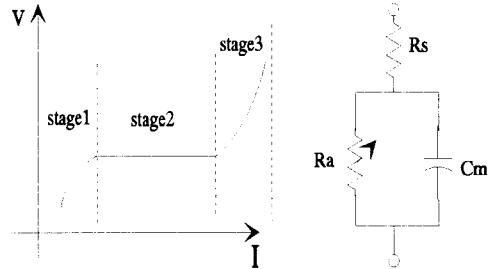
또한 입력을 짝수승하는 비선형요소로 상용주파수를 통과시키면 직류성분과 누승의 짝수 소인수에 해당하는 주파수가 존재한다.

또한 입력을 홀수승하는 비선형요소로 상용주파수를 통

과시키면 직류성분은 없고 누승의 홀수 성분과 그 이하의 홀수 고조파가 존재한다.

2.3 피뢰기 전기적 특성 및 열화 특성

2.3.1 피뢰기의 전기적 특성



<그림13 피뢰기의 전기적특성 및 전기적인 등가회로>

MCOV 전압의 동작에서 ZnO 피뢰기의 전형적인 캐패시턴스는 75pF·kV/Cm²이고, 이 콘덴서가 흐르는 누설전류는 0.5-3mA(peak value)이다. 누설전류의 저항성분은 50-250μA peak이다.

피뢰기의 3단계 동작중 첫 번째 단계는 정격운전 전압에서의 동작으로 수mA이하의 전류가 흐르고 이때는 주로 등가회로의 캐패시턴스 성분이 작용한다.

두 번째 단계는 정상적인 피뢰기의 동작으로 일정한 전압으로 유지하지만 전류는 어느정도의 한계까지 증가하는 특성을 갖고 있다.

세 번째 단계는 전류가 폭주하는 특성을 갖고 있다. 이러한 특성을 전압-전류식으로 표현하면 다음과 같다.

$$I = KV^a$$

여가서 I 는 피뢰기를 통과하는 전류이고, V 는 인가 전압이며, a 는 비선형특성을 나타내는 특성요소이다.

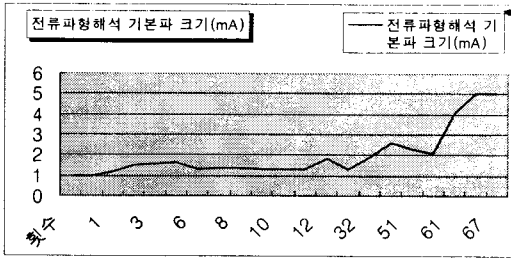
$$a = \frac{\text{Log}(I_2) - \text{Log}(I_1)}{\text{Log}(V_2) - \text{Log}(V_1)}$$

V_1, I_1 은 첫 번째 단계와 두 번째 단계가 이어지는 절점의 각각 전압, 전류이다. V_2, I_2 는 두 번째 단계와 세 번째 단계가 이어지는 절점의 각각 전압, 전류이다.

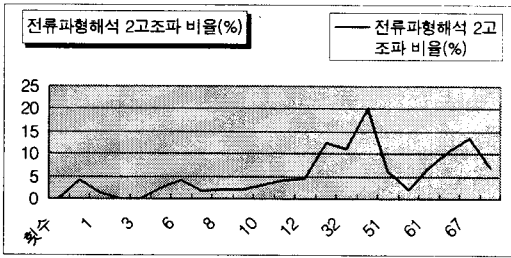
또한 전기적 등가회로에서 R_s 는 피뢰기의 내부저항이고, C_m 은 2단계의 특성을 나타내는 캐패시턴스이다. R_a 는 인가전압과 전압-전류특성을 표현하는 가변저항이다.

그림 13에서 알 수 있듯이 피뢰기의 전압-전류특성은 비선형특성을 나타내고 있다. 이것은 수학적으로 표현하는 경우는 어려운 점으로 작용하나, 입력된 주파수 특성이 왜곡되어 고조파를 발생시키는 원인으로 작용하므로 진단의 측면에서는 오히려 장점으로 작용할 수 있다.

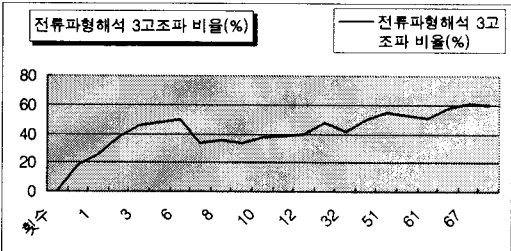
2.3.2 피뢰기의 인공 파괴실험에 따른 피뢰기 열화 특성



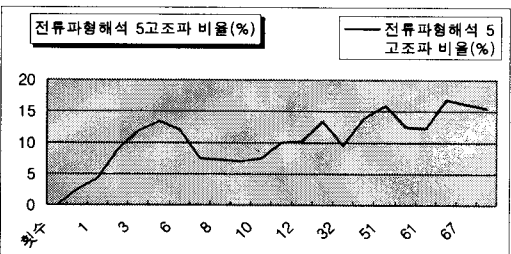
<그림14 모의 낙뢰 인가횟수에 대한 기본파 변화>



<그림15 모의 낙뢰 인가횟수에 대한 2고조파 변화>



<그림16 모의 낙뢰 인가횟수에 대한 3고조파 변화>



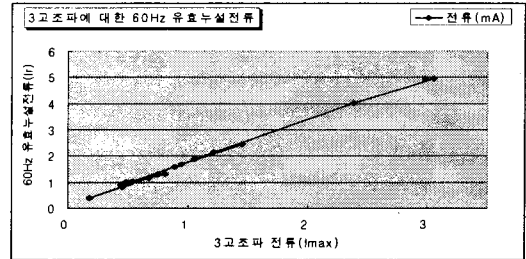
<그림17 모의 낙뢰 인가횟수에 대한 5고조파 변화>

이상에서 고찰한 결과를 정리하면 다음과 같은 결론을 도출가능하다.

- 1) 피뢰기의 열화분석은 기본적으로 피뢰기가 갖고있는 동작특성상 비선형특성을 고려해야 한다.
- 2) 피뢰기가 부분적으로 열화되는 경우에도 비선형특성이 존재한다.
- 3) 피뢰기의 누설전류를 분석하여 피뢰기의 열화를 측정하는 경우 다음과 같은 특성을 나타낸다.
 - ▶ 기본파의 실효값은 열화와 함께 증가하나 열화의 특성을 완전하게 반영하지는 못한다. 그러므로 피뢰기의 누설전류의 총량으로 피뢰기의 열화를 판정하는 것은 다소 곤란하다.
 - ▶ 열화의 초기에 2고조파성분이 존재한다.

▶ 열화의 진행과 함께 3,5,7고조파가 함께 증가한다.
 4) 피뢰기의 열화진단은 주파수의 비선형해석방법이 현재로서는 가장 합당한 방법으로 사료되고 이를 이용한 진단효과가 기대되고 있다.

2.3.3 유효누설전류 성분과 고조파의 관계



<그림18 모의 낙뢰 인가횟수에 대한 고조파 관계>

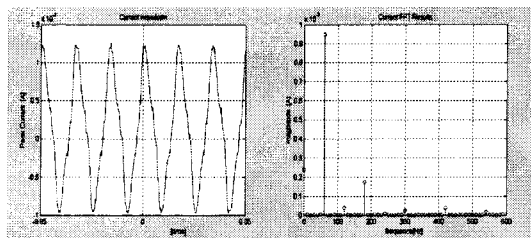
- 1) 피뢰기의 열화분석중 저항분 누설전류에 대한 증가부분은 피뢰기가 열화되면서 발생하는 3고조파의 양과 비례적인 관계가 성립된다.
- 2) 피뢰기의 열화를 판정하는 방법중, 저항분 누설전류를 이용하여 판정하는 피뢰기가 열화 되면서 발생하는 고조파를 이용하는 방법으로 병행 측정할수 있다.

2.4 현장적용 실측

2.4.1 피뢰기 비교분석

<표1>

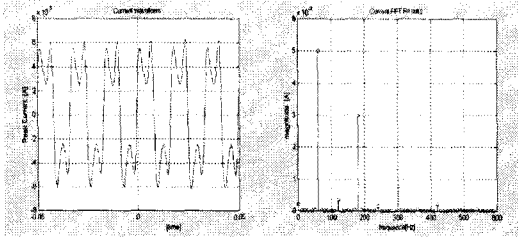
	기본파	3고조파	5고조파	7고조파	9고조파
누설전류 [mA]	0.973	0.1623	0.0215	0.0358	0.014
백분율 (%)	100%	18.5%	2.4%	4.09%	1%



<그림19 ◇◇업체 신품 피뢰기 분석파형>

<표2>

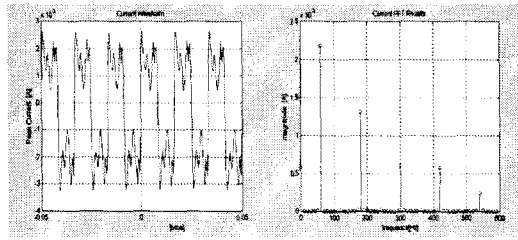
	기본파	3고조파	5고조파	7고조파	9고조파
누설전류 [mA]	5.01	2.983	0.7731	0.21158	0.05864
백분율 (%)	100%	59.54%	15.43%	4.22%	1.17%



<그림20 >>업체 신품 피뢰기 파괴직전 분석파형>

<표3>

	기본파	3고조파	5고조파	7고조파	9고조파
누설전류 [mA]	2.1820	1.312	0.601	0.577	0.24
백분율 (%)	100%	60.12%	27.54%	26.44%	10.9%



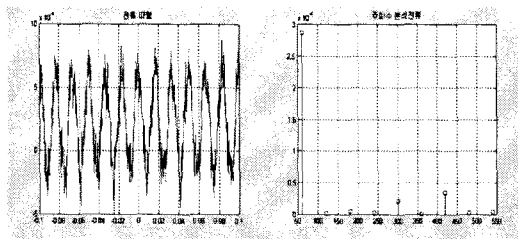
<그림21 >>지역 사고 피뢰기조사 분석파형>

실험실에서 모의낙뢰 실험으로 인공 열화실험을 실시한 열화 피뢰기설의 파형이 현장에서 적용됨을 알 수 있다.

2.4.2 현장실측 분석 예

<표4>

	기본파	3고조파	5고조파	7고조파	9고조파
누설전류 [mA]	0.2865	0.005	0.021	0.038	0.004
백분율 (%)	100%	1.74%	7.33%	13.26%	1.39%

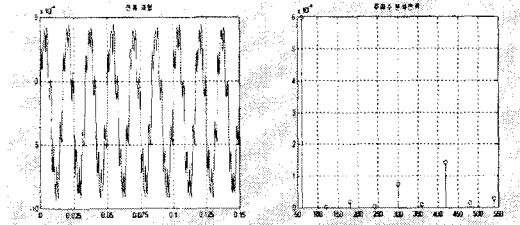


<그림22 >>지점 피뢰기 현장실측 분석파형>

● 판정 : 정상

<표5>

	기본파	3고조파	5고조파	7고조파	9고조파
누설전류 [mA]	0.423	0.013	0.053	0.101	0.020
백분율 (%)	100%	3.07%	12.53%	23.88%	4.73%

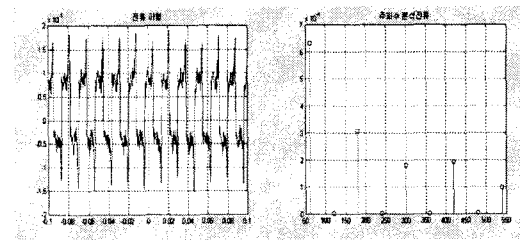


<그림23 >>지점 피뢰기 현장실측 분석파형>

● 판정 : 피뢰기 열화 중
● 원인 : 기본파값에 비해 각 고조파값들의 비율이 증가되고 있다.

<표6>

	기본파	3고조파	5고조파	7고조파	9고조파
누설전류 [mA]	0.6319	0.3084	0.1811	0.1915	0.0986
백분율 (%)	100%	48.8%	28.66%	30.30%	15.60%



<그림24 >>지점 피뢰기 현장실측 분석파형>

● 판정 : 불량
● 원인 : 기본파의 증가 및 고조파의 증가

3. 결 론

본 논문에서는 이러한 피뢰기의 열화현상을 파악하기 위하여 이론적으로 피뢰기의 열화정도가 고조파의 분석만으로 가능하다는 점을 접근하여 증명하였고, 특히 3고조파의 증가와 저항성 전류의 증가가 비례함을 피뢰기 모의 낙뢰 실험에서 분석한 데이터와 현장에서 수집한 피뢰기의 누설전류 파형을 비교 분석 한 결과 현장에 설치되어 있는 피뢰기의 누설전류를 측정하여 피뢰기의 열화 정도를 알 수 있었다. 연구결과를 현장에 적용하기 위해 현장의 가혹한 조건의 전자계영향에도 불구하고 정밀한 피뢰기 진단이 가능하도록 전계 및 자계 쉴드를 적용하면 측정이 가능하다는 결론에 도달하였으며, 배전계통의 안정적인 운영을 위하여 지속적인 현장 측정 및 점검이 필요하고 여겨진다. 결론적으로 본 연구의 결과로 현장의 피뢰기 진단이 간편해지고 효율적으로 이루어 질 수 있음을 실증하였고, 앞으로 배전계통에서의 안정적인 계통운영에 기여할 것으로 기대하고 있다.

[참 고 문 헌]

[1] 765kV 피뢰기 진단시스템 개발 2001. 9 한국전력공사, 전력연구원