

누설 전류를 이용한 오손된 고분자 애자의 섬락 예지 기법 연구

박재준*, 송영철**, 이유민*, 이현동*, 김정부*, 이성룡***
 *중부대학교, **경북대학교, ***호서대학교

Technique on Flashover Prediction of Contaminated Polymer Insulator using Leakage Current

Jae-jun Park*, Young-Chul Song**, You-min Lee*, Hyun-dong Lee*, Jeong-boo Kim*, Sung-yong Lee***
 Joongbu University*, Kyungpook National University**, Hoseo University***

Abstract - 본 논문에서는 오손된 EPDM 배전용 현수 애자에서 측정된 누설 전류의 파형을 분석하여 정확한 섬락 시기를 예측하기 위한 방법을 제안하였다. 이를 위하여 일정 시간 단위로 측정된 누설 전류들을 포락 한 후 레벨 교차율을 적용해 cdf 형태로 변환하였다. 획득된 cdf들은 서로 다른 기율기(각도)를 가지므로 애자의 섬락 시기를 예측하는데 유용하게 사용될 수 있다. 그러나 cdf들 간의 기율기 차는 매우 작아서 서로 구분되기 어려우므로 이를 해결하기 위하여 새로운 가중치를 정의하여 사용하였다. 실험 결과 제안한 방법은 배전용 현수 애자의 섬락 시기를 적절히 예측할 수 있었다.

형태로 변환되며, 포락된 파형들에서 누설 전류들에 대한 레벨 교차율을 구한 후 cdf(cumulative density function) 형태로 나타낸다. 이렇게 구해진 각각의 시간 구간을 대표하는 cdf들로부터 누설 전류 대 cdf의 50%에 해당되는 지점에서의 각도들을 구한 후 이것을 현수 애자의 섬락 시기의 예측에 사용하였다. 이때 애자의 섬락은 4 단계에 걸쳐 이루어지며 섬락에 가까워질수록 각도는 작아지게 된다. 그러나 각 단계별 각도는 아주 작은 차이로 인해 서로 구별되지 못하므로 본 논문에서는 각 단계별 각도가 서로 명확히 구분되도록 하는 방법을 제시하였다.

1. 서 론

오손된 애자는 산업 지역과 농업 지역 그리고 해안가 지역에서 큰 복구 비용을 요구하는 대규모 정전 사태를 일으킬 수 있다. 실제로 이런 대형 사고를 사전에 방지하려는 여러 방법들이 수행되고 있으나 이를 위해선 많은 시간과 비용이 요구되고 있다. 특히 정기적인 애자의 세정(washing)은 긴 시간과 많은 비용이 요구되는 대표적인 방법이다. 그러나 신뢰성 있는 세정 시기에 관한 정보를 제공받을 수 있다면 그 빈도를 상당히 줄일 수 있을 것이다. 이와 더불어서 다양한 환경 하에서 운전되는 애자의 오손에 의해 발생하는 정보는 애자의 교체 시기를 예측하는 중요한 판단 근거로 사용될 수 있을 것이다. 이것들을 가능케 하기 위한 노력으로 오손된 애자에서의 누설 전류를 측정하여 분석하는 방법이 지속적으로 연구되어져 왔다 [1,2]. 애자는 운전되는 환경이 열악하여 오손된 경우에는 표면 트래킹(tracking)과 침식 문제를 발생시키는데 이로 인한 관통과 섬락(flashover) 고장은 자체 성능을 떨어뜨리게 된다. 표면 트래킹과 침식은 누설 전류와 같은 전기적 스트레스가 주요 원인으로 작용하고 있으므로 애자에서 발생하는 누설 전류의 분석을 통해 애자의 오손 상태와 트래킹 정도를 대략적으로 파악할 수 있다. 이런 이유로 애자의 초기 설치 단계에서 섬락이 이루어지는 과정동안에 발생하는 누설 전류들의 특징 분석은 큰 의미를 가지게 되며 그 결과물으로써 얻어진 애자의 섬락 시기에 관한 예측 정보는 실제 필드에서 유용하게 사용될 수 있다. 본 논문에서는 해양지대(울산, 1997~ ~2001년)에서 오염된 EPDM 배전용 현수 애자에서 발생하는 누설 전류의 파형을 분석하여 애자의 섬락 시기를 예측하기 위한 방법을 제안하였다. 제안한 방법에서는 누설 전류의 최대값과 주파수 특성을 고려하는 기존의 방법과는 달리 누설 전류의 포락(envelop)과 레벨 교차(level crossing) 방법 [3,4]을 이용하였다. 제작된 챔버 안에서 salt fog(25g, 50g, 75g)와 함께 16kv의 일정한 전압을 애자에 가하여 섬락이 발생하기까지의 신호를 0.1msec의 샘플링 주기와 함께 200msec 단위로 획득하여 저장하였다. 이렇게 매 20분 동안 저장된 누설 전류 파형들은 힐버트 변환(Hilbert transform)을 통해 포락

2. 본 론

2.1 누설 전류의 포락 과정

그림 1의 실험 장치를 통하여 애자의 섬락이 이루어지는 시점까지 발생하는 모든 누설 전류들을 획득하여 저장하게 된다. 저장된 누설 전류들에 대해 레벨 교차 방법을 적용하기 위해서는 포락 과정이 선행되어야 한다. 포락 과정은 힐버트 변환을 통해 이루어지며, 누설 전류 $i(t)$ 의 힐버트 변환 쌍은 식 (1)과 같이 정의된다 [5].

$$\tilde{i} = H(i(t)) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{i(t)}{t-\tau} d\tau = \frac{1}{\pi} i(t) \otimes \frac{1}{t} \quad (1)$$

여기서 \otimes 는 컨벌루션(convolution)을 나타낸다. 이때 누설 전류 $i(t)$ 와 $\tilde{i}(t)$ 에 의해 구성된 복소 함수인 식 (2)는 해석 함수(analytic function)가 된다.

$$Z(t) = i(t) + j\tilde{i}(t) \quad (2)$$

이 힐버트 변환은 시간에 따라 변화하는 신호의 해석에 주로 사용되며 포락을 구하는데 이용된다. 즉 식 (2)는 식 (3)과 같이 다시 쓸 수 있으며,

$$Z(t) = A(t)e^{j\phi} \\ A(t) = \sqrt{i^2(x) + \tilde{i}^2(t)}, \phi(t) = \tan^{-1} \frac{\tilde{i}(t)}{i(t)} \quad (3)$$

여기서 포락 $A(t)$ 와 신호의 위상 $\phi(t)$ 를 구할 수 있다. 본 논문에서는 섬락이 일어나는 과정을 크게 4 단계의 시간대 별로 구분하였다(그림 4 참조). 그림 2는 각 단계를 대표하는 누설 전류 파형을 보인 것으로 이런 누설 전류 파형들은 식 (1)-(3)을 통해 포락되는데 그림 3은 임의의 누설 전류에 대한 상위 포락 곡선을 나타낸 것이다. 여기서 상의 포락 곡선만을 나타낸 이유는 레벨 교차 수행 시 상위 포락 곡선만을 사용하기 때문이다.

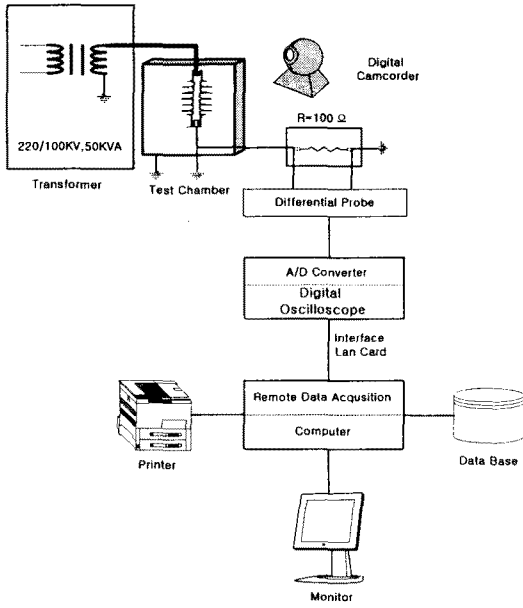


그림 1. 전체 시스템 구성도

2.2 포락의 레벨 교차율과 cdf

누설 전류 파형에 대한 포락이 수행되면 레벨 교차율을 구하게 된다. 누설 전류가 L 의 이산 레벨을 가진다고 가정하면(본 논문에서는 0.1 간격으로 대략 0.0mA에서 4.0mA), 레벨 교차율은 식 (4)를 통해 구해진다.

$$\hat{p}_i(i_k) = \frac{n_k}{n}, \quad k=0,0.1,\dots,L \quad (4)$$

여기서 i 는 누설 전류를 의미하며, k 는 0.1 간격을 갖는 누설 전류의 크기를 나타낸다. 또한 n 은 누설 전류가 레벨 교차되는 총 회수이며, n_k 는 각각의 누설 전류가 가지는 레벨 교차 회수이다. 즉 식 (4)의 레벨 교차율이란 누설전류의 레벨 교차 회수를 pdf(probability density function)로 나타낸 것이다. 이렇게 구해진 레벨 교차율은 다시 식 (5)의 cdf로 재 변환된다.

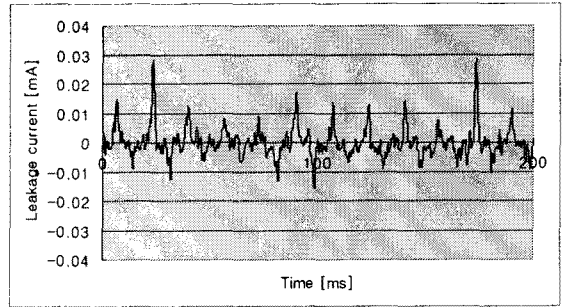
$$g_k = \sum_{j=0.5}^k \hat{p}_i(i_j), \quad k=0.5,0.6,\dots,L \quad (5)$$

여기서 0.5mA 미만의 크기는 너무 작아 고려하지 않았다. 그림 4는 각각 25g, 50g, 75g의 서로 다른 염수 농도를 가지는 salt fog하에서 식 (5)를 사용하여 구해진 cdf들로서 전체 크기를 100%로 놓았을 때 하위 2%와 98%에 해당되는 부분만을 고려하여 나타낸 것이다. 그림 4에서 볼 수 있듯이, salt fog의 염수 농도에 무관하게 섬락까지의 과정은 총 4 단계로 분류된다. 단계 1에서는 누설 전류의 크기가 매우 작아 cdf의 기울기가 크게 형성되지만, 시간이 지날수록 열화의 정도가 심해져 아크방전의 빈번한 발생으로 인해 누설 전류의 크기가 점차로 커져 cdf의 기울기는 반대로 줄어들게 된다. 이러한 특징은 섬락이 일어나는 단계 4에서 더욱 두드러지게 나타난다.

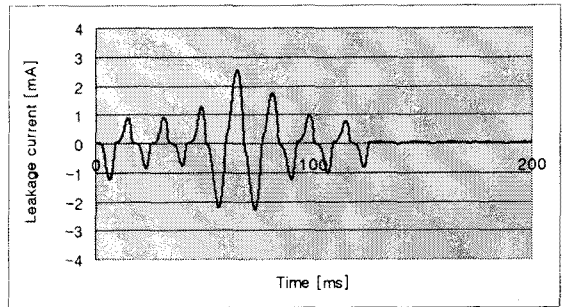
2.3 예자의 섬락 예측

우선 그림 4의 cdf들에 대한 기울기를 식 (6)을 사용하여 각도로 변환한다.

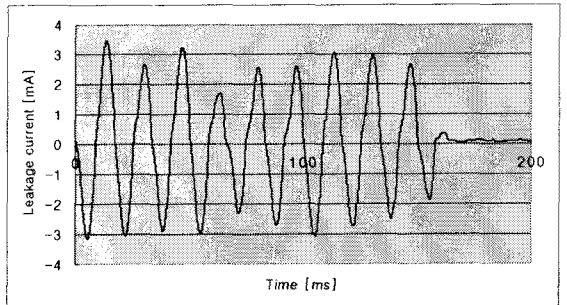
$$D = \tan^{-1} \frac{50}{r \cdot (ep - sp)} \quad (6)$$



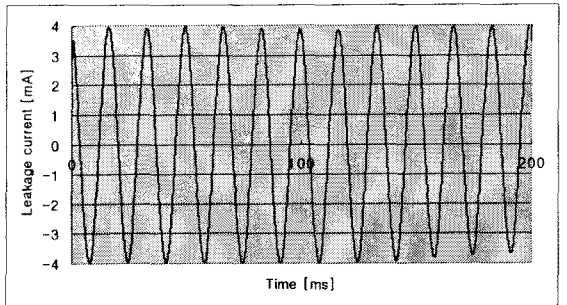
(a) 단계 1(초기 단계)



(b) 단계 2



(c) 단계 3



(d) 단계 4(섬락 단계)

그림 2. 각 단계를 대표하는 누설 전류 파형

여기서 sp (start point)는 각각의 cdf에서 처음으로 값이 존재하는 곳으로 시작점(즉 0.5mA)을 나타내며, ep (end point)는 cdf의 50%에 해당하는 곳의 x축 값으로 끝점을 나타낸다. 그러나 누설 전류를 나타내는 x축의 크기가 y축의 크기보다 상당히 작으므로 x축의 크기를 r 만큼 증가시킨 후 각도를 계산하였다(본 논문에

서는 $r=10$ 을 사용). 이러한 각도는 salt fog의 염수 농도에 따라서 달라지는데 표 1은 반복적인 실험을 통해 결정된 salt fog의 염수 농도에 따른 평균 각도 변화를 나타낸다.

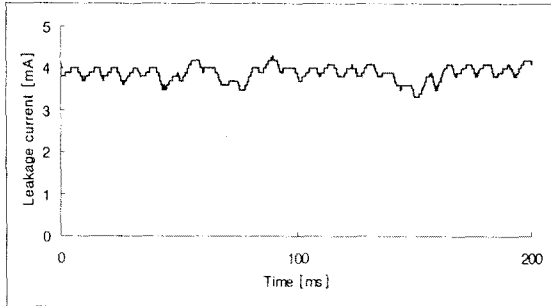
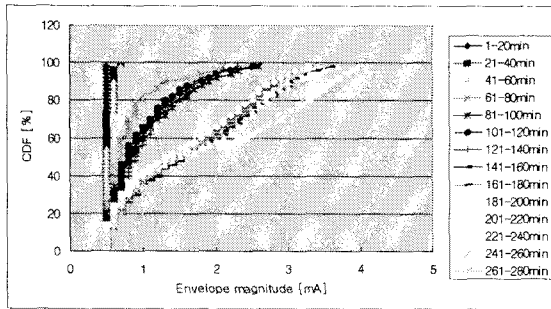
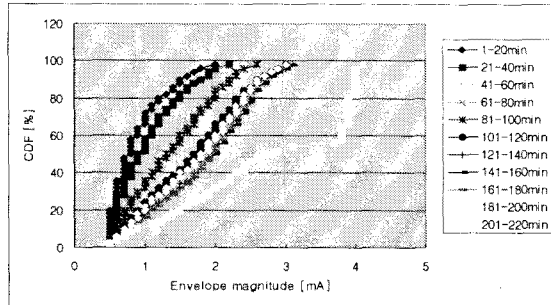


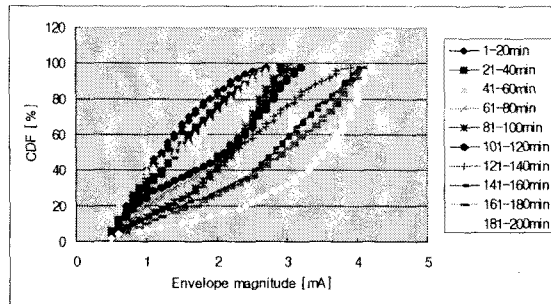
그림 3. 임의의 누설 전류에 대한 상위 포락 곡선



(a) 25g



(b) 50g



(c) 75g

그림 4. 각각의 salt fog에서 누설 전류의 cdf

표 1에서 볼 수 있듯이 salt fog의 염수 농도가 일정한 크기(25g 단위씩)로 변화했을 때 최대 각도와 최소 각도의 평균 변화량은 5 C로 나타났으며, 개개의 각도는 평균 20 C의 범위를 갖는 것으로 나타났다. 전체적으로 보면 salt fog의 염수 농도가 증가할 수록 각도가 점점 작아지는데 이것은 염분의 농도가 증가하면 큰 전도도를

표 1. salt fog의 염수 농도 변화에 따른 평균 각도 변화

salt fog의 종류	25g	50g	75g
	각도 (° C)	90-70	85-65

가지므로 상대적으로 큰 누설 전류가 발생되기 때문이다. 이것은 그림 4에서의 섬락이 일어나는 시간과도 밀접한 관계가 있는데, salt fog의 염수 농도가 증가할 수록 섬락에 도달하는 시간이 빨라진다. 그러나 식 (6)을 이용한 각도 계산법은 한가지 문제점을 가지고 있다. 즉 salt fog의 염수 농도에 무관하게 섬락이 발생하는 총 4 단계 동안에 평균 20 C의 작은 각도 차이로 서로 구분되어 있다는 것이다(그림 5 참조). 이와 같은 작은 차이로는 각각의 단계를 명확히 구분하기 어려우므로 식 (7)과 같은 가중치(weighting value)를 정의하여 사용하였다. 이때 구해진 가중치는 50g salt fog를 기준으로 하였다(25g과 75g도 기준으로 사용 가능하다).

$$w = \begin{cases} \alpha & , \text{if } T \geq 1.0 \\ \alpha \cdot \exp\left[-\frac{8(D-LD_{50g})}{LD_{50g}}\right] & , \text{elseif } T < 1.0 \text{ \& } D < UD_{50g} \\ \alpha \cdot \exp\left[-\frac{8(UD_{50g}-D)}{LD_{50g}}\right] & , \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

여기서, T 는 일종의 문턱값으로 $\frac{LD_{50g}}{D}$ 을 나타내며, D 는 $\tan^{-1} \frac{50}{r \cdot (ep-sp)} + \Delta D$ 로써 정의되는데 50g salt fog에서는 ΔD 는 0으로 설정되지만 25g과 75g에서는 50g과 동일한 기준을 유지하기 위하여 각각 -5와 +5로 설정하였다. L 과 UD_{50g} 는 기준점인 50g salt fog의 최대 각도와 최소 각도로써 표 1에서 보인 것처럼 각각 65 C와 85 C가 된다. 마지막으로 α 는 가중치의 크기를 조절하는 변수로써 여기서는 $\alpha=20$ 으로 설정하여 사용하였다. 식 (7)을 통해 구해진 가중치 w 를 이용하여 식 (6)은 다음과 같이 수정될 수 있다.

$$D = \tan^{-1} \frac{50}{r \cdot w(ep-sp)} \quad (8)$$

그림 6은 식 (8)을 이용하여 그림 (5)의 결과를 재출력해 낸 것이다. 그림 6에서 보듯이 같은 salt fog 내의 cdf들이나 서로 다른 salt fog 간의 cdf들이 서로서로 명확한 구분되어 나타나고 있다. 그러나 세 경우 모두 섬락이 이루어는 마지막 단계 4에서는 10 C 미만의 각도를 유지하고 있으며, 특히 염수의 농도가 상대적으로 낮은 25g salt fog의 초기 상태는 90 C를 유지하고 있음에 유의하라.

3. 결 론

본 논문에서는 오손된 EPDM 배전용 현수 애자에서 측정된 누설 전류의 특징을 분석하여 애자의 섬락 시기를 예측하는 방법을 제안하였다. 이를 위해 측정된 누설 전류들을 힐버트 변환을 통해 포락시키고 레벨 교차율을 통해 cdf들로 변환하였다. 이런 cdf들은 애자의 초기단

noise," *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 23, pp. 282-332, July 1994.

- [4] A. Papoulis, *Probability, Random Variable and Stochastic Processes*, New York: McGraw-Hill, 1984.
- [5] S. Braun and J. K. Hammond, "Additional techniques," in *Mechanical Signature Analysis*. London, U.K.:Academic, 1996.

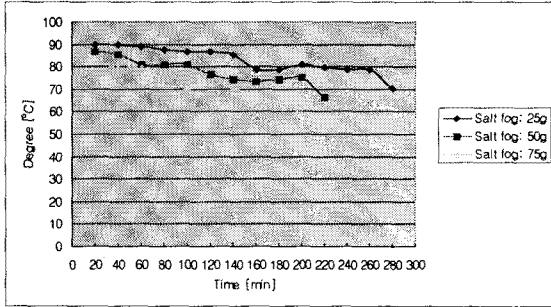


그림 5. 그림 4의 cdf들의 각도

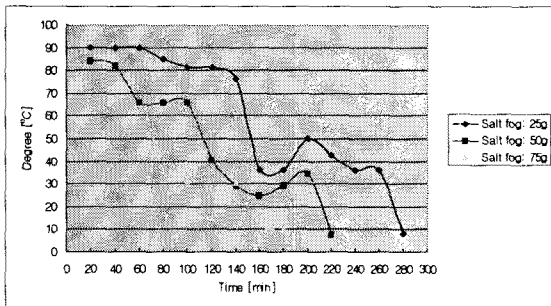


그림 6. 수정된 cdf들의 각도

계에서 섬락에 이르는 단계까지 서로 다른 각도로 나타나므로 애자의 섬락 시기를 예측할 수 있는 정보로 사용될 수 있었다. 만약 각 지역별 환경 특성이 고려된 cdf들이 데이터 베이스 되어있다면, 임의의 지역내에 설치된 애자들에서 얻어진 cdf와 비교하여 해당 애자의 오손 정도와 섬락 시기를 예측할 수 있을 것이다.

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소(02524) 주관으로 수행된 과제임.

[참 고 문 헌]

- [1] K. J. Lloyd and H. M. Schneider, "Insulation for power frequency voltage," in *Transmission Line Reference Book (345 kV and Above)*. Palo Alto, CA:EPRI, 1982.
- [2] G. Karady and F. Amarch, "Signature analysis of leakage current for polluted insulators," in *Proc. IEEE Transmission and Distribution Conf.*, vol. 2, New Orleans, LA, Apr. 1999, pp. 806-811.
- [3] S. O. Rice, "Mathematical analysis of random