

EPDM 고분자 애자에 대한 표면방전 및 누설전류파형의 고조파분석

Harmonics Analysis of Leakage Current Waveforms and Surface Discharge for EPDM Polymer Insulator

박재준^{1,a}, 양태규²
(Jae-Jun Park^{1,a} and Tae-Kyu Yang²)

Abstract

This paper presents the results of spectrum analysis of leakage current waveforms on contaminated polymer insulators under fog conditions. This is a basic study on development of a monitoring for aging degree and surface pollution state using distortion rate(%) of 3rd and 5th harmonics according fundamental frequency[60Hz] under environment conditions. Arcing on the surface was always associated with distortion in the leakage current ; hence the low frequency components of the leakage current can be used as a means to evaluate the surface degradation. The results indicate that the distortion rate by spectrum analysis is available for the monitoring of contamination condition of EPDM Polymer insulators

Key Words : Leakage Current waveform, Spectrum, EPDM Polymer Insulator, Harmonic Distortion rate, Surface Discharge

1. 서론

고분자 애자는 매우 가볍고, 가격면에서도 경제적이어서 국내,외적인 전력회사에서 각광 받고 있다. 그러나 불행하게도 장기신뢰성 문제에 있어서 기술적으로 해결되지 않는 많은 실정이다.

오손된 고분자 애자가 고장이 발생하면 송전 및 배전시스템의 전력 품질에 주요한 원인이 되어 왔다.그중 EPDM((Ethylene Propylene Diene Monomer) 고분자애자의 고장원인 및 과정 그리고 섬락메커니즘에 대한 연구자의 연구가 진행되어 왔

다[1].

오손현상은 고전압장치의 설계 및 동작 시 고려 되어져야할 심각한 문제로 되어 있다. 오손이 심한 환경에 습도가 있게 되면 젖은 전도피막이 형성되어 누설전류에 의한 아킹(arcing)의 결과로 표면 건조대의 형성을 가져오게 된다. 아킹에 의해 젖은 표면을 가로질러 갑자기 연장되어 전체 섬락의 결과를 가져온다. 교번용력 하에서 오손된 애자의 섬락은 복잡한 메커니즘의 마지막 단계이다. 오손물질이 고분자애자 표면에 묻게 되어 세정되지 않으면 배전계통뿐만 아니라 송.변전 계통에서도 고장 사고의 원인이 되어 고장(failure)이 발생하게 된다.

최근에는 고분자애자의 섬락을 미연에 방지하기 위해 확률통계 분석기법을 이용한 고분자애자의 섬락예지를 통하여 세정기간과 열화 정도와 같은 새로운 기법이 연구되어졌고[1,2], 송전 및 배전용 고분자애자(실리콘, EPDM)의 표면 열화 및 침식 그리고 설계시 왜곡도를 이용하는 기법이 연구되

1. 중부대학교 전기전자공학과
(충남 금산군 추부면 대학로 101)
2. 목원대학교 전자정보보호공학부
a. Corresponding Author : jjpark@joongbu.ac.kr
접수일자 : 2004. 4. 8
1차 심사 : 2004. 5. 13
2차 심사 : 2004. 7. 13
심사완료 : 2004. 8. 3

어 지고 있다[3,4]. 고전적인 기법으로서는 열화 시간에 대한 누설전류펄스 진폭의 최대값을 일정한 포인터수로 산술평균하여 구하는 정도로서는 방전열화 메커니즘, 열화원인 그리고 열화정도를 예측하기란 어려운 것이다[1].

본 연구에서는 오손된 고분자애자의 표면열화에 대한 새로운 모니터링 기법을 연구하기 위하여, 염무(salt fog)와 안개(clean fog)를 모의하여 표면에 흐르는 누설전류의 파형 및 패턴을 스펙트럼분석(Fast Fourier Transform)과 그 시점에서 발생된 표면방전 현상과의 관계를 비교 검토하였다. 또한 표면열화의 진행과정 및 오손상태를, 기본파에 대한 3 고조파 및 5 고조파의 백분율로, 정량화한 값인 왜곡율로 나타내었다. 정량화된 그 값은 향후 여러 환경 조건하에서 고분자애자의 표면열화 정도 및 오손상태를 분별할 수 있는 기법으로서 열화의 판정자료로서 이용하게 될 것이다.

2. 실험

2.1 실험장치

누설전류의 계측은 그림 1에서 나타낸 실험장치를 이용하여 안개 및 염무의 측정이 이루어졌다. 지름이 100 mm인 배전용 EPDM고분자 현수애자를 사용하였으며, 이미 오염지역에서 서비스되어 열화가 상당히 진행된 애자(포항, 1997년~2001년)를 사용하였다. 자체 제작된 포그챔버 1190×1210×1670 mm에 설치된 애자를 철거시 가져온 그대로 사용하였다. 염무는 초음파가습기(Ultra Sonic Humidifier, 400 cc/hr, 연속연무)를 이용하였고, 염분량은 증류수 1000 ml 당 0 g, 50 g으로 조절하였다. 일정전압 16 kV, 60 Hz로 인가 후 염무를 실시하여 섭락 시까지 일정하게 인가하였다. 누설전류의 파형은 전압인가 후 염무를 적용함과 동시에 측정하였고, 측정하는 동안에 디지털 캠코더로 방전형태의 기록을 위하여 사용되어졌다.

누설전류는 일정한 고전압이 인가되어 애자의 표면을 통하여 접지로 흐르는 전류가 전기저항 100 Ω의 전압강하된 전류파형이, 차동프로브(ADP 305, Lecroy, 100:1)를 걸쳐 디지털오실로스코프(wave runner LT342L, Lecroy)로 입력되어진다. 입력된 아날로그신호의 파형을 디스플레이하고, 인터페이스 랜카드를 통하여 0.1 ms 샘플링주기를 갖는 A/D변환기를 경유하여 원격으로 컴퓨터에서 데이터를 매 200 ms 동안의 누설전류 파형을 획득하게 된다. 획득된 데이터는 필터링의 과정을 걸친

후 Matlab 6.5을 통하여 FFT 처리하였다. 시간에 따른 누설전류 파형의 최대값과 기본파로부터 16 고조파까지 스펙트럼분석을 실행하였다. 결국, 시간에 따른 기본파에 대한 3고조파 및 5고조파의 왜곡율을 구하게 된다.

Fig. 1. The whole system diagram.

실험에 사용된 EPDM 고분자애자는 포함지역의 배전용으로 사용 된지 약 4년 정도된 애자로서 상당히 오손된 상태의 시료를 그림 2에서 나타내었다.

그림 2. 오손된 EPDM 고분자애자.

Fig. 2. Polluted EPDM Polymer Insulator.

3. 결과 및 고찰

3-1. 누설전류의 분석

16 kV_{RMS}을 인가한 후(1 kV/s) 염무 개시와 동시에 누설전류 계측장치를 통하여 측정이 이루어졌다. 배전전압은 13.2 kV이지만 실험실에서 과전압 16 kV (112 %)을 인가하여 실험실상에서 실측하였다. 염무 및 안개의 발생은 초음파 가습기를 통하여 섬락시까지 연속 분무하였고, 데이터 획득 장치를 통하여 200 ms 씩 컴퓨터로 저장되어진다. 저장된 데이터는 Offset 과정과 FIR 디지털 필터를 이용하여 노이즈를 제거 하였다.

안개시 증류수를 이용하여 실험을 실시하였으며, 고습도(92 %)로 일정하게 분무하였다. 그림 3, 그림 4에서의 경우 안개 및 염무에 대한 누설전류파형의 피크값 변화를 나타내었다. 그림 3에서는 오손된 고분자에자의 열화초기로부터 섬락시까지 누설전류의 변화치는 2.3~416 mA 범위내의 변화치를 계측할 수 있었고, 섬락을 제외한 전류의 변화치는 2~32 mA을 나타내었다. 이는 청정지역의 경우 안개 발생시 고분자에자에 어떤 치명적인 효과를 주지 못함으로 볼 수 있다.

그림 3. 안개시 누설전류 피크치 파형의 변화 (603분).

Fig. 3. Variation of leakage current peak value (Clean Fog, 603 minute).

그림 4의 경우 측정된 누설전류 파형의 피크치는 전압인가로부터 50분 정도까지는 큰 변화를 볼 수 없고, 50분이후로부터 표면에 아크방전이 심하게 발생되어 결국 섬락에 이르렀다. 섬락시의 경우, 안개와 염무가 같은 섬락값, 약 400 mA 을 기록하고 있다. 결국 어떤 환경 조건에 의해서든지 섬락이 발생되면 결과는 같다는 사실을 증명하고 있다.

그림 4. 염무시 누설전류파형 피크치의 변화(235분).

Fig. 4. Variation of leakage current peak value (Salt Fog, 235 minute).

이상의 결과에 대해서, 증류수 1000 ml에 소금 50 g 혼합한 염수를 염무 할 경우 상당히 누설전류가 증가되고 있다. 이는 오손된 표면에 높은 염분 퇴적이 급속하게 표면저항을 감소시키고, 강력한 표면방전과 더불어 누설전류의 증가를 가져온다[7]. 큰 전류는 과도한 건조대의 확장을 가져오게 되고, 연속적인 방전의 발생을 일어나지 못하게 한다.

반면에 안개는 급속한 표면저항을 감소시키지 못하기 때문에 건조대의 점진적인 진전을 가져오게 된다. 이런 결과로서 표면방전이 발생되게 된다 [1].

3-2. 누설전류파형과 스펙트럼 분석[4,6]

(1) 염무(Salt Fog)

저주파 고조파(기본파, 3rd, 5th)를 이용한 열화 정도를 판정하고 예지하는 도구로서 고조파의 왜곡율을 이용하였고, 사용된 왜곡율은 식(1)에서 나타내었다.

3고조파 왜곡율(Third Harmonic Distortion)

$$= \frac{\text{Third Harmonic (mA)}}{\text{Fundamental (mA)}} \times 100 \% \quad (1)$$

그림5(a)에서는 전압인가 직후 관측된 누설전류 파형으로서, 매우 왜곡된 비대칭적인 파형이다. 일반적으로 왜곡의 형태는 측정조건에 의존하게 된다. 이런 파형은 전도도가 낮거나 전압인가 초기 또는 전계가 낮을 때 나타나는 누설전류 파형이다.

그림5(b)에서는 누설전류파형을 분석한 주파수 스펙트럼으로서 0~600 Hz까지 나타내고 있다. 기본파(56)가 가장 우세하고 3고조파, 5고조파의 순으로 고조파 성분이 포함되어있음을 볼 수있다. 누설전류의 기본파에 대한 3고조파 및 5고조파의 왜곡율은 39.8 %, 23.2 %을 나타내었다. 왜곡율이 크다는 의미는 전도성전류와 표면저항의 파형이 중첩된 결과로서 찌그러짐이 크다는 의미와 같다. 그림 5(c)에서는 그때 애자의 집지전극 측 부분에서 미소한 방전을 관찰할 수가 있었다.

그림 5. 누설전류파형,스펙트럼 그리고 방전현상 (전압인가 직후).

Fig. 5. Leakage current waveform, spectrum and phenomena of discharge(Aging Beginning).

그림6(a)에서는 전압인가 6분후 누설전류 파형을 나타내고 있다. 열화초기 상태의 파형으로서 피크값은 24.4 mA기록하였고, 인가전압 직후에 비하여 상승된 결과이다. 그림 6(b)에서는 스펙트럼을 분석한 결과로서, 왜곡도가 상당히 큰 파형임을 알 수 있다. 기본파(192)에 대한 3고조파 및 5고조파의 왜곡율은 51.7 %, 19.4 %이다. 누설전류 기본파의 크기 및 3고조파 그리고 5고조파의 순으로 나타내었다. 그림6(c)는 방전현상을 볼 수 있었다.

그림 6. 누설전류파형, 스펙트럼 그리고 방전현상 (6분후).

Fig. 6. Leakage current waveform, spectrum and phenomena of discharge(after 6 minute).

그림7(a)에서는 전압인가 후 61분에서 나타나는 누설전류펄스 파형으로서 국부적인 표면아크 방전임으로서 정현파 전류에 또 다른 파형의 전류가 중첩되어 나타나는 결과로 볼 수 있다.

그림 7(b)에서는 스펙트럼 분석 결과에서 기본파는 더욱 강해지고(360.85) 3고조파 성분만이 약간 나타내는 결과이다. 기본파에 대한 3고조파 및 5고조파의 왜곡율은 16.6 %, 4.2 %이었다. 누설전류파형 피크부분의 값은 280 mA정도이고 6분에 비하여 누설전류의 피크 값은 11.5배정도 증가됨을 알 수 있다.

그림 7. 누설전류파형, 스펙트럼 그리고 방전현상 (61분 후).

Fig. 7. Leakage current waveform, spectrum and phenomena of discharge(after 61 minute).

그림8(a)에서는 섬락직전의 누설전류파형을 나타내었다. 누설전류파형의 피크값은 377 mA를 기록하였고, 표면에서 극심한 아크방전이 일어나고 있음을 볼 수 있었다. 누설전류 피크값도 6분에 비하여 15.45배 증가된 전류의 크기를 볼 수 있다. 기본파(9253)에 대한 3고조파 및 5고조파의 왜곡율은 6.9 %, 5.1 %를 나타내었다.

그림 8. 누설전류파형, 스펙트럼 그리고 방전현상 (섬락직전).

Fig. 8. Leakage current waveform, spectrum and phenomena of discharge(Flashover Immediately Before).

그림 9(a)는 섬락시 나타나는 주기적인 파형은 무아크성으로서 섬락시 나타나는 누설전류 파형이

다. 섬락시 피크값은 400 mA을 기록하였고, 기본파(39572)에 대한 3고조파 및 5고조파의 왜곡율은 2.6 %, 0.51 %을 기록하고 있다.

락: 10^4 배(39,572)의 변화를 볼 수 있었다. 기본파에 대한 진폭은 표면에서 아크방전의 격렬도를 말해 주고 있으며, 표 1에서는 왜곡도의 변화양상을 나타내고 있다. 또한 기본파에 대한 3고조파 및 5고조파의 왜곡도는 전압인가시간에 따라 점차로 작아지고 있음을 볼 수 있다. 이는 전압인가 61분부터 격렬한 표면 아크방전이 발생되고 있음으로 사료되며, 왜곡율을 통하여 표면의 오염정도를 가름하는 기준이 될 수 있음을 시사하는 바이다.

표면방전과 주파수 스펙트럼과의 관계에서도, 같은 측정조건하에서도 같은 누설전류파형을 얻기란 불가능하다. 누설전류 파형 즉, 200 ms동안 같은 최대 전류값에 대해서도 각기 다르다. 이는 방전의 거동 가령, 발생시점, 연장, 소멸등이 오손층의 젖는 조건과 함께 변화하기 때문이다[6].

표 1. 고조파의 왜곡율

Table 1. Distortion rate of harmonics(salt fog).

열화정도	3rd Harmonics Distortion(%)	5th Harmonics Distortion(%)
전압인가 직후	39.8 %	23.2 %
전압인가 후 6분	51.7 %	19.4 %
전압인가 후 61분	16.6 %	4.2%
섬락 직전	6.9 %	5.1 %
섬락	2.6 %	0.51 %

그림 9. 누설전류파형, 스펙트럼 그리고 방전현상 (섬락).

Fig. 9. Leakage current waveform, spectrum and phenomena of discharge(flashover).

업무 인가시 결과를 종합하여 보면, EPDM고분자애자의 누설전류파형과 표면방전과는 밀접한 상관관계가 있음을 확인할 수 있었고, 소금농도에 따라 방전에 영향을 주며, 스펙트럼 분석을 통하여 기본파의 진폭은 전압인가직후: 10^1 배(56), 전압인가 후 61분: 10^2 배(360), 섬락직전: 10^3 배(9,253), 섬

(2) 안개(Clean Fog)

그림10에서는 안개 적용시 전압인가 직후 누설전류의 파형을 나타내고 있다. 기본파(269.8)에 대한 3고조파 및 5고조파의 왜곡율은 76.9, 22 %을 나타내었다.

(a) 누설 전류파형

그림12(a)에서는 439분후 누설전류 파형을, 그림 12(b)은 스펙트럼을 나타내고 있다. 스펙트럼 분석 결과 기본파(146)에 대한 3고조파 및 5고조파의 왜곡율은 49 ,23.9 %을 기록하였다.

그림 10. 누설 전류파형, 스펙트럼(전압인가직후).
Fig. 10. Leakage current waveform, spectrum (Aging Begining).

그림11에서는 전압인가 9분후 누설전류파형(그림11a) 및 스펙트럼(그림11b)를 나타내고 있다. 이 파형은 왜곡된 대칭적인 파형으로서, 전압인가 직후에 비하여 전류가 증가하였지만, 미미한 정도의 증가를 볼 수가 있었다. 누설전류 기본파(2042)에 대한 3고조파 및 5고조파의 왜곡율은 33.38, 1.02 %을 기록하였다. 증류수를 이용한 안개발생으로 표면에 수분이 충분하여 주수시의 경우와 같은 파형을 볼수 있다.

그림 12. 누설 전류파형, 스펙트럼(439 분후).
Fig. 12. Leakage current waveform, spectrum (after 439 minute).

그림 13의 경우 섬락 시 누설전류 파형 및 스펙트럼을 나타내고 있다. 기본파 및 3고조파에 대한 스펙트럼 특성을 볼 수 있다. 기본파(138)에 대한 3고조파 및 5고조파의 왜곡율은 38.2, 11.38 %을 기록 하고 있다.

그림 11. 누설 전류파형, 스펙트럼(9 분후).
Fig. 11. Leakage current waveform, spectrum (after 9 minute).

(a) 누설 전류파형

표 2. 고조파의 왜곡율.

Table 2. Distortion rate of harmonics(clean fog).

열화정도	3rd Harmonics Distortion(%)	5th Harmonics Distortion(%)
전압인가 직후	76.9 %	22 %
전압인가 후 9분	33.38 %	1.02 %
전압인가 후 439분	49 %	29.38 %
섬락 직전	38.2 %	11.38 %
섬락	1.3 %	0.39 %

그림 13. 누설 전류파형, 스펙트럼 (섬락직전).

Fig. 13. Leakage current waveform, spectrum (Flashover Immediately Before).

그림14에서는 섬락시 누설전류파형과 스펙트럼을 나타내고 있으며, 기본파(39696)에 대한 3고조파 및 5고조파의 왜곡율은 1.3, 0.39 %을 기록 하고 있다.

염무인가의 경우, 섬락시 3고조파 및 5고조파의 왜곡율은 2.6, 0.51 %을 기록하고있으며, 섬락시 환경에 상관없이 왜곡율이 거의 일치함을 볼 수가 있다.

이로서 염무 및 안개 적용시 스펙트럼 분석결과로부터 다음과 같은 특징을 얻을 수 있었다.

첫째, 염무 시 고조파 왜곡율의 변화양상으로서 3고조파 및 5조파의 경우 전압인가와 동시에 염무를 적용한 결과 염무 시간이 오래갈수록 왜곡 율이 낮아지고 있으며, 섬락직전과 직후에 최소의 값을 나타내었다. 그리고 안개 적용 시 경우는 염무 시에 비하여 인가전압 직후 가장 크고 안개적용시간이 증가될수록 어떤 일정한 변화폭으로 증가와 감소를 거듭한 결과를 나타내었다. 섬락시의 경우는 염무와 거의 유사한 값을 갖고 있다. 왜곡 율은 기본주파수에 대한 3고조파 및 5고조파의 뒤틀어짐의 정도로서 염무 시의 경우는 초기에는 저항율이 급속이 떨어져서 전도성 및 저항의 성분으로서 뒤틀어짐이 크게 되어 왜곡 율은 상대적으로 초기에는 크게 될 것이고, 염무가 지속적으로 적용이 되게 되면 표면의 염분농도가 더욱더 증가되어 전도성 및 아크성 방전으로 인하여 기본파에 가까운 방전으로 오히려 왜곡 율이 떨어지는 결과로 사료됩니다. 또한 안개의 경우는 염무에 비하여 왜곡 율의 변화가 안개 적용 시부터 섬락이전까지의 경우 증감의 변화가 있는 이유는 아크성의 방전은 거의 발견하기 어렵고 순수한 저항성과 전도성에 의한 결과로 사료됩니다. 이로서 왜곡 율을 통한 고분자애자의 오손현상과 방전과의 관계 및 왜곡도와와의 상관관계가 있음을 알 수 있다.

둘째, 일반적인 내용이지만 누설전류성분은 대체로 홀수고조파가 크다는 사실이며, 스펙트럼은 대체로 주파수와 함께 감소한다는 사실이다. 안개를 적용할 때, 고습도 또는 저습도상태의 애자에서 누설전류는 무아크의 일정한 상태의 성분으로 구

그림 14. 누설 전류파형, 스펙트럼 (섬락).

Fig. 14. Leakage current waveform, spectrum (flashover).

성되어 고주파 활동은 없다. 그러나 고습도 상태에서 젖은 애자는 오손된 것이든 깨끗한 상태이든 둘다 전기적인 활동에 영향을 주게 된다[7].

깨끗한 상태에서 효과는 누설전류에 약간의 일정상태 저항성분 만이 더해져 최소로 되어지고, 오손된 애자에서 영향은 더욱 저항성분과 일시적인 아크 성분이 더해져서 더욱 혹독한 영향을 주게 된다. 본 연구에서 보여준 결과에서는 고습도에 걸과서 열화 되었지만 깨끗한 애자부터 오손된 염무시 애자의 전기적인 방전활동이 현격하게 구별되는 것을 볼 수가 있다. 이로서 향후 왜곡율을 통한 고분자애자의 오손정도 및 종류 그리고 열화정도를 판단하는 연구가 필요할 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 다음과 같은 결론을 얻었다. 200 ms동안 누설전류가 크면 클수록 60 Hz에서 더욱 더 큰 스펙트럼을 얻을 수 있었다. 방전들이 연속적으로 여러 개의 반파동안 발생할 때 60 Hz 기본파를 비롯 홀수 고조파가 증가되는 경향을 나타내고 있다. 오손된 고분자애자에 염무를 적용할 때 간헐적으로 발생된 표면의 아크방전시 최대의 누설전류를 계측할 수 있었고, 기본파의 증가를 가져오게 되었다. 염무시 기본파에 대한 3고조파 및 5고조파의 왜곡도는 염무 인가시간에 따라 감소되어지고, 안개시의 경우는 규칙성을 발견할 수 없었다. 깨끗한 애자 및 안개시의 경우는 누설전류의 성분이 전도성 및 저항성 성분의 변화에 따른 것으로 사료된다. 이로서 오손조건 및 정도를 판정할 수 있는 기법으로 유용함을 알 수 있었다.

감사의 글

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

참고 문헌

- [1] Felix Amarth, George G. Karady, and Raji Sundrarajan "Linear stochastic analysis of polluted insulator leakage current", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 17, p. 1063, 2002.
- [2] Jae Jun Park, Young Chul Song, and Doo Hyun Choi, "A flashover prediction method for contaminated insulators using a stochastic analysis of leakage current", Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 43, No. 5A p. 2693, 2004.
- [3] Ayman H. El-Hag, Shesha H. Jayaram, and Edward A. Cherney, "Influence of shed parameters on the aging performance of silicone rubber insulators in salt-fog", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 10, p. 655, 2003.
- [4] A. H.El-Hag, S. Jayaram, and E. A. Cherney, "Fundamental and low frequency harmonic of leakage current as a diagnostic tool to study aging of rtv and HTV silicon rubber in salt fog", IEEE Trans. DEL, Vol. 10, p. 128, 2003.
- [5] R. Matsuoka, K. Naito, T. Irie, and K. Kondo, "Evaluation Methods of Polymer Insulators under Contaminated Conditions", IEEE/PES T&D 2002:Asia Pacific, Yokohama, Japan, 6-10, No. PO18-11, 2002.
- [6] M. Sato, A. Nakajima, and T. Komukai, "Spectral analysis of leakage current on contaminated insulators by auto regressive method", IEEE, p. 64, 1998
- [7] Chris S. Richards, Carl L. Benner, Karen L. Butler-purry, and B. Don Russell, "Electrical Behavior of contaminated distribution insulators exposed to natural wetting", IEEE Transaction on Power Delivery ,Vol. 18, p. 551, 2003.