

가공 배전선로 절연물의 열화와 이상 신호 특성에 관한 연구

이병성*, 박용업, 최선규, 양정권**
 한국전력공사 전력연구원*, 한국전력공사 배전전략실**

The Study on Electromagnetic Signal Emitted from Defected insulations on Overhead Distribution line

Byung-sung Lee*, Yong-up Park, Sun-kyu Choi, Jung-kwon Yang**
 KEPCO Research Institute*, KEPCO**

Abstract - 전력설비의 절연물이 사용 환경 영향을 받아 열화되어 방전이 발생하게 되는데, 이 때 발생하는 방전의 크기 및 량은 절연물의 결합 형태와 환경에 영향을 받아 다양하게 나타난다. 절연물 결합에서 발생하는 신호는 열, 전자파, 초음파, 빛의 형태이며, 이들 신호가 복합적으로 방출된다. 결합을 갖는 절연물 종류에 따라 발생하는 이상 신호 패턴을 분석하여 절연성능 저하를 검출할 수 있고, 절연성능 저하 원인 규명에도 활용된다. 본 연구에서는 전력설비에 사용하고 있는 결합 또는 열화된 애자류의 이상신호 발생의 근본원인을 고찰하였으며, 이들의 신호를 검출하는 적절한 방법을 제시하였다.

1. 서 론

전기 절연물에서 국부적인 방전이 발생하면 절연재료의 열화를 진전시켜 절연파괴를 야기한다. 절연파괴 환경, 전기적 스트레스 상태, 절연물 고유 특성 등이 복합적으로 작용하여 나타나는 것으로 정확한 메커니즘 규명이 쉽지 않다. 전기설비에 사용되고 있는 절연물의 환경적, 전기적 신뢰성이 점차 개선되어 충전용량 증대를 가져올 수 있었다.

가공 전력설비에 사용하고 있는 절연물은 20년 이상의 수명을 요구하고 있으며, 선로 고장을 방지하기 위해 열화되어 결합이 발생할 경우 이를 검출하여 교체하고 있다. 결합있는 절연물을 검출하기 위해서는 열화된 절연물에서 나타나는 이상 현상을 구분하는 것이 중요하다.

옥외 환경에서 사용되는 전력설비는 다양한 스트레스를 받아 고유한 특성이 저하되거나 잃게 되면 외부로 이상 현상이 나타나게 된다. 이때 나타나는 이상 현상을 안전하고, 효과적으로 검출하기 위해 비접촉 방식의 진단기술이 개발되고 있으며, 주로 발열, 전자파, 빛, 진동파 등을 검출하고 있다.

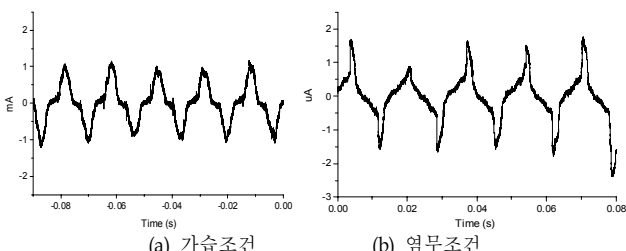
본 연구에서는 전력설비에 사용하고 있는 결합 또는 열화된 애자류의 이상신호 발생의 근본원인을 고찰하였으며, 이들의 신호를 검출하는 적절한 방법을 제시하였다.

2. 본 론

전력설비에 사용되고 있는 절연물에 전계가 가해지면 미소 누설전류와 방전이 발생하게 되며, 방전은 보통 열을 수반하고 전자파나 소리를 동반한다. 이들 신호를 분석하면 절연물 결합의 정도와 결합 위치도 알 수 있으며, 나아가 절연물 품질개선 방안 도출도 가능하다.

2.1 누설전류 증가

정상 절연물은 2 GΩ 이상의 높은 저항값을 갖는 반면에 오손이나 손상된 절연물은 이 보다 낮은 값을 갖는다. 절연물이 오손되었을 때 표면 저항이 감소하고 전류가 증가한다. 그림 1은 폴리머애자 표면 누설전류 파형을 측정한 것을 나타낸 것으로 누설전류의 파형과 크기는 순시적으로 변하고 미소 방전에 의해 파형에 고조파 성분, 펄스 등이 나타났다. 표면 누설전류는 시간적 변화가 크기 때문에 단시간 계측을 통해 애자의 손상을 판단할 수 없으며, 일정 시간 계측하여 통계적 처리로 판단하여야 한다.



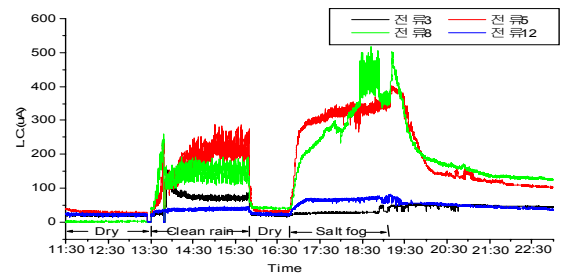
〈그림 1〉 폴리머 애자 표면 누설전류 파형

표 1은 LP애자 표면 실험 누설전류 크기를 측정하여 정리한 것이다. 주위온도 20 ℃에서 측정하였으며, 주수 누설전류는 전도도 20 μS/cm로 하여 4 mm/분 이상 주수한 다음 측정한 것이며, 표면 오손 누설전류는 전도도 4,000 μS/cm인 염수를 8 ml/분/m³으로 분무한 다음 측정된 것이다.

〈표 1〉 배전용 애자의 표면 누설전류 측정값

구분	표면 누설전류 측정값(μA)		
	건조 조건	주수 조건	표면오손시(염무)
세라믹 LP 애자	40~50	120~170	200~600
폴리머 LP 애자	1~10	10~30	100~150

그림 2는 건조, 주수, 염무 환경에서 누설전류 크기를 연속으로 측정한 결과이다. 주수 후 건조조건에서 누설전류가 급격히 감소함을 알 수 있다.



〈그림 2〉 건조, 주수, 염무 환경에서의 누설전류 측정값

누설전류는 절연물의 표면 특성을 반영하는 것이기 때문에 표면온도, 부착 오손물 종류, 습윤 조건 등에 따라 다르며, 절연물 재질도 영향을 주기 때문에 현장에서 누설전류 크기를 정량화 한다는 것은 쉽지 않다.

2.2 전자기파의 발생

전력설비 절연 결합부위에 존재하는 기체에 전계가 집중되고 여기에 존재하는 소량이 전자가 가속되어 중성 기체분자와 충돌하여 새로운 전자와 양이온이 생성된다. 생성된 자유전자와 양이온이 양쪽 극으로 이동하면서 다량의 자유전자와 양이온이 생성되어 전류가 급증하게 된다. 전기장에서 가속된 자유전자에 의해 중성 기체분자가 이온화되는 것 외에 에너지 준위가 높은 전자궤도로 이동하는 여기현상을 유발한다. 여기상태에 있다가 아주 짧은 시간에 원래 상태로 되돌아가면서 일정한 파장의 전자기파를 방사하게 된다.

2.2.1 부분방전

부분방전은 절연재료 내에 기공, 기포, 결함 등이 존재할 때 집중되거나 불균일한 전계에 의해 발생하는 미소 방전이다. 절연재료에 국부적으로 집중된 전계가 원인인므로 에너지 손실이며 이 때 발열을 동반하여 절연물을 손상시킨다. 절연물에서 발생하는 부분방전은 열과 전자파, 음파의 발생 원인이며, 비록 발생하는 열이 소량이지만 반복해서 집중되면 절연물의 열적 열화를 촉진한다. 폴리머애자의 침식이나 트래킹의 주요 원인이며, 케이블에서와 같이 고체 절연물에서 부분방전 누적효과로 도전성 방전 통로가 형성된다.

2.2.2 코로나 방전

코로나는 절연물 부분방전의 한 형태로서 전기적 스트레스가 임계값을 초과하였을 때 절연체계에서 과도 가스 이온화가 발생하여 국부적으

로 방사되며, 빛과 소리를 동반하고 전자파를 방사한다. 전계에서 기체 중의 전자가 중성원자와 충돌하여 이온화가 가속되며, 이 때 공기중에서 오존 및 열을 발생시킨다. 오존과 열 등의 복합작용으로 절연물 산화가 가속되어 고장으로 이어진다. 이 코로나는 도체와 절연체 계면뿐만 아니라 절연체 내부 기공에서도 발생할 수 있다. 일반적으로 코로나는 마이크로 아크를 구성하여 빛의 형태로 보인다. 어두운 환경에서 육안 관찰이 가능하며 소리도 들을 수 있으나, 코로나 검출용 카메라나 초음파 검출기를 사용할 경우 보다 명확하게 확인 가능하다.

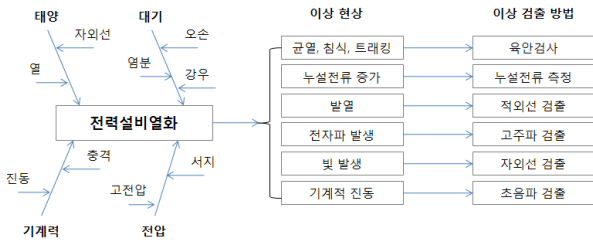
코로나 방전은 하우징이 유기성 소재로 구성된 폴리머에자에 영향이 크지만 고전압 절연물에서 코로나 발생을 완전히 방지하는 것은 쉽지 않다. 코로나로 인해 하전입자가 형성되고 기계적 진동, 자외선 방사, 오존의 생성 등 복합적 영향을 유발하는데, 질산이 형성되어 폴리머를 산화시킨다. 코로나는 아주 적은량의 열을 발생하고 자외선 범위의 파장(240~405 nm)을 갖는 전자파를 방사한다.

2.3 초음파 신호 발생

전력부분방전에 의한 초음파 발생 메커니즘에 대한 연구는 많이 보고되고 있지 않지만, 방전과정에서 발생하는 진동파가 초음파 형성에 기여하는 것으로 알려져 있다. 방전이 발생하는 동안에 충격력은 주변 매질이 진동하는데 영향을 준다. 초음파 센서는 측정감도가 좋은 공진주파수 대역이 있으며, 절연물에서는 30~40 kHz, 유중 절연물의 경우 75 kHz, 변압기의 경우 철심진동의 영향으로 100~200 kHz 부근이다. 초음파 신호는 지향성이 있고 공중으로 전달되기 때문에 표면에서 방사되어 일부가 블로킹 된다.

2.4 이상신호 검출

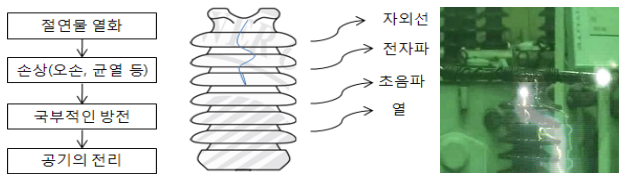
절연물이 고전압 환경에서 사용되므로 열화현상(환경적, 기계적, 열적, 전기적 열화 등)이 전기적 이상으로 나타나는 것이 특징적이다. 즉, 급구나의 균열이나 부식 등 일부를 제외하고 설비에 열화가 진행되면 방전이 누설전류 형태로 징후가 나타난다. 그림 3은 전력설비가 외부 영향을 받아 열화로 나타나는 이상 현상과 이를 검출하는 방법을 분석하여 정리하였다.



〈그림 3〉 배전설비 열화와 이상검출 방법

2.4.1 자기재 애자 이상신호

배전급 자기재질의 애자는 현수애자, LP애자, 부싱류 등이 있다. 자체 고장분석 결과에 따르면, 그림 4와 같이 애자의 열화현상은 균열이나 표면오손이 주요한 원인이 되어 국부 방전이 발생하고, 방전으로 나타난 자외선, 전자파, 초음파, 열 등의 이상현상은 주변환경, 절연물 종류, 결합 정도에 따라 신호의 크기가 다르게 나타난다.



〈그림 4〉 배전설비 열화와 이상검출 방법

(1) 균열 및 부분파손

자기재 애자는 충분한 절연거리를 두고 설계되었기 때문에 균열 및 파손 자체가 부분방전 직접적인 요인이 되지 않지만, 균열 부위에 수분이나 오손물이 유입되면 방전량이 급격히 증가하여 초음파나 전자파가 크게 나타난다. 누설전류나 방전현상에 따라 발열이 작은 경우도 있다.

(2) 표면오손

자기재 절연물 표면이 오손되면 누설전류가 증가되어 표면방전과 발열현상으로 나타난다. 다만 가습 조건이나 강우 조건에서 오손물의 영향이 나타나므로 건조한 날은 이상 신호가 약하다. 습도가 높거나 강우 환경에서는 상대적인 표면 방전이 많다.

(3) 내부결합

블로킹 효과로 보이드, 내부균열, 소성불량 등 내부 결합 원인으로 발생하는 이상 신호의 크기는 미약하다. 다만 내부 결합이 클 경우 누설전류 경로가 형성되어 전류밀도 증가로 발열된다. 자기재 현수애자는 캡과 핀 사이의 절연물이 약 20 mm 채워진 구조로 물리적 절연거리가 가까워 내부에 작은 결합에도 전류 집중으로 발열이 나타난다. 표 1과 같이 현수애자의 현장 측정결과 주위 동일한 애자에 비해 1 ℃ 이상 상승되더라도 불량인 경우가 있었으며, 보통 1 ℃에서 10 ℃ 정도로 나타났다. 불량 현수애자련의 누설전류는 상전압에서 대략 0.3 mA 이상이었으며, 0.8 mA에서 2 ℃에서 4 ℃ 정도 온도상승이 있는 것으로 나타났다.

〈표 1〉 191 mm 자기재 현수애자의 온도 및 누설전류 관계

시료 번호	제조 연월	정상 온도 [℃]	분담전압 (kV)/온도상승 (℃)			분석결과				
			3번 애자 (완금측)	2번 애자 (중간)	1번 애자 (전선측)	누설전류(mA)				
					3번	2번	1번	전체	판정	
#1	95.05	20.5	9(10.6℃)	1(0.0℃)	1.5(0.0℃)	8	8	8	8	불량
#2	95.10	27.5	4(9.1℃)	5(9.1℃)	0(9.1℃)	0.6	8	8	0.4	불량
#3	96.03	30.2	2(0.0℃)	3(0.0℃)	8(4.4℃)	4	8	8	1.8	불량
#4	95.05	25.7	1.5(0.0℃)	2(0.0℃)	11(5.1℃)	8	8	8	5.8	불량
#5	92.10	29.0	0(0.0℃)	6(6.7℃)	4(6.7℃)	0.3	0.2	0.2	0.2	정상
#6	96.03	19.4	-	(2.0℃)	(1.0℃)	-	1.5	5	0.8	불량
#7	96.03	14.6	-	(3.1℃)	(4.5℃)	-	-	5	-	불량
#8	97.01	14.4	-	(7.3℃)	(7.2℃)	-	0.2	0.2	0.2	정상
#9	95.05	13.4	-	(11.9℃)	(3.2℃)	-	5	5	9.0	불량

(4) 절연전선 바인드 손상

라인포스트애자, 절연전선, 전선바인드 사이에서 발생하는 절연전선 손상 고장은 구성설비의 상호 연관성이 있다. 건조한 환경에서는 누설전류가 아주 적기 때문에 절연전선이나 전선바인드에 유해할 정도의 방전은 발생하지 않지만, 습윤 상태가 되면 누설전류 증가와 더불어 건조대 아크가 발생한다. 아크 발생위치는 절연전선과 LP애자가 접촉하는 부분과 전선바인드 부분이 될 가능성이 높다. 반복되는 아크로 인해 절연물 표면에 손상이 생기면 그 부분에 누설전류 밀도가 높아지고 아크에너지는 더욱 커져 손상이 가속된다.

2.4.2 폴리머 애자 이상신호

폴리머 애자는 불량부분에 전기적 스트레스가 집중되어 국부 방전이 발생되어 이상 신호가 나타나며, 절연거리가 길어 결합이 진전되어 고장까지 어느 정도 시간이 소요된다. 따라서 초기에는 외부로 방사되는 이상 신호가 미약하지만, 점차 절연이 약화되어 보다 큰 신호가 방사된다.

폴리머애자의 도전선 결합이나, 반도전성 결합에서 발생하는 코로나는 온도 상승량 아주 적기 때문에 적외선 카메라로 검출하기 어렵다. 결합부의 온도상승이 3 ℃ 이하로 나타나기 때문에 지상에서 검출될 가능성이 낮다. 이러한 경우 코로나를 검출할 수 있는 진단장비를 활용하면 효과적으로 검출할 수 있다. 하지만 내부 결합부에 수분이 유입되어 누설전류가 증가할 경우 적외선 카메라로 검출이 가능하다. 이와 같이 결합의 종류, 크기, 주위환경에 따라 방사되는 신호의 크기가 다르게 나타나므로 정확한 판단이 요구된다.

2.4.3 피뢰기 이상신호

피뢰기는 용량을 초과하면, 열폭주에 의해 소자에 크랙이나 관통이 발생할 수 있다. 이러한 손상으로 피뢰기 내부 저항이 감소하게 되면 누설전류 증가뿐만 아니라 건전한 피뢰기 동작 특성이 유지되지 않는다. 피뢰기는 일반 절연물과 다르게 소자를 통해 상시로 흐르는 누설전류가 크고, 소자나 내부 절연에 문제가 있을 경우 누설전류가 확실히 증가하여 추가 발열이 있기 때문에 적외선 진단 방법이 효과적이다.

3. 결 론

전력설비 절연물은 불량 형태에 따라 자외선, 전자파, 초음파, 열 등이 발생한다. 이들 신호의 크기 및 주파수는 절연물 재질, 결합 종류, 환경 조건에 따라 다르게 나타난다. 누설전류 경우도 경로에 따라 발열 위치가 균일하지 않고, LP애자는 물리적 거리가 길어 발열이 있을 정도로 누설전류가 크지 않는다. 절연물 표면의 전계분포 및 방전량은 환경(기상, 오존 등) 조건에 따라 크게 영향을 받고, 방전 신호와 유사한 주변 잡음이 상존하기 때문에 이를 고려하여 이상여부를 판단하여야 한다.

[참 고 문 헌]

- [1] 전정체의 4, “초음파 탐지기의 효과적 활용을 위한 초음파 분석프로그램의 개발”, 한국산학기술학회, 10(10):2609-2611, 2009
- [2] C A Rezende, R F Gouveia, M A da Silva and F Galembeck, “Detection of charge distributions in insulator surfaces”, Journal of Physics, Vol. 21, Number 26, 2009