

## 습도 변화에 따른 154kV급 송전용 자기애자의 누설전류 특성연구

오충석<sup>1</sup>, 이영조<sup>1</sup>, 류철휘<sup>1</sup>, 이방욱<sup>1</sup>, 최광범<sup>2</sup>, 구자윤<sup>1</sup>  
 한양대학교 SMDT Lab. 태광 E & C

### Leakage current characteristics of 154kV porcelain insulators with various ambient humidity

Chung-Seok Oh<sup>1</sup>, Young-jo Lee<sup>1</sup>, Cheol-Hwi Ryu<sup>1</sup>, Bang-Wook Lee<sup>1</sup>, Gwang-Beom Choi<sup>2</sup>, Ja-Yoon Koo<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>SMDT Lab. Dept. of Electric Eng., Hanyang University <sup>2</sup>Taegwang E & C

**Abstract** - 송전선로에 설치된 애자들은 지속적인 전기적 · 기계적 스트레스에 노출되어 있기 때문에 여러 환경적 요인으로 인해 애자 표면의 열화가 가속된다. 이와 같은 애자의 표면 열화는 dryband를 형성하게 되고 지속적인 애자 표면상의 dryband와 누설 전류 증가의 상호작용은 애자의 섬락을 일으키는 원인이 된다.[1][2] 이러한 연구의 결과 고전압용 애자로 유입되는 누설 전류는 애자 열화의 정도를 평가할 수 있는 매우 중요한 parameter임을 알 수 있다. 따라서 고전압용 애자의 누설전류를 분석하고 취득하여 애자의 열화 평가 및 이로 인해 발생할 수 있는 결함 애자의 검출에 대한 연구가 절실히 요구되고 있다.

본 논문에서는 고전압용 애자 중 자기애자의 습도변화에 따른 누설전류 특성을 조사하기 위해 자체 제작한 실험 챔버, power transformer, 전류센서, 오실로스코프, PC등으로 구성된 실험 시스템을 구축하였고, 데이터 분석을 위한 S/W로서 LabVIEW를 사용하였다. 그에 따른 실험 결과로서 다양한 습도변화(30%~90%)의 경우 정상 애자편과 결함 애자를 포함한 애자편의 누설전류 데이터를 취득하여 본 연구에서 제시한 알고리즘을 통해 분석함으로써 정상 애자 내의 결함 애자 포함 여부를 판별하고 다양한 습도 변화시에 정상 애자편과 불량 애자편의 특징을 볼 수 있었다.

## 1. 서 론

옥외용 애자는 송전선로에 필수적인 절연물로 전력공급에 중요한 역할을 담당하고 있다. 그 중 자기애자는 전기절연성과 내구성이 우수하고, 경제적이며 화학적 안정도와 기계적 강도가 높으나 표면장력이 커서 표면 절연성이 떨어지고, 소재 특성상 가공이 힘들고 무거우며 인장특성이 약한 단점이 있다. 옥외용 애자가 전기적, 기계적 스트레스를 지속적으로 받게 되고 특히, 오염이 심한 환경일 경우에 염분이나 오염물질에 노출된 상태에서 주변 습도가 증가함에 따라 누설전류가 증가하며 부분방전이 발생하게 된다. 누설전류와 부분방전으로 인해 열의 발생이 지속되면 소재간의 열팽창 계수 차이로 인해 결함이 발생하게 되고, 그 부위에 지속적인 전계 집중이 가해지면 절연파괴까지 이르게 되어 송배전 계통에 고장을 일으키는 원인이 된다.[3][4][5]

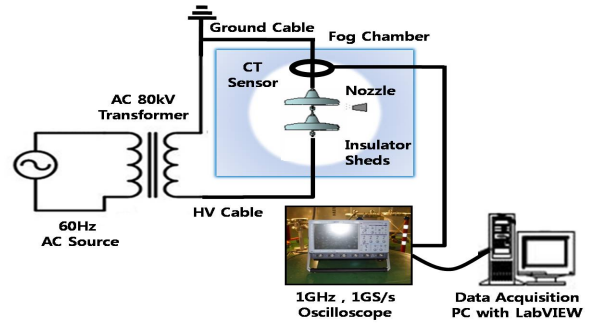
본 연구는 결함 발생 여부를 판별하기 위해 애자에서 발생하는 누설전류를 측정하여 정량적인 상태 분석이 가능하고 측정 설비의 구축이 용이한 Leakage Current Analysis Method를 연구 개발하였으며, 이를 위해 실험시료는 154[kV]급 36,000LBS 자기 애자를 사용하였으며, 실험 환경을 실선로와 유사하게 설정하기 위해 80kV급 실 변압기를 전압원으로 사용하였으며, 실험 시료 또한 현장에서 수거된 결함애자를 선별하여 사용하였다. CT센서를 사용함으로써, 애자편에서 발생하는 누설전류를 정확히 측정하였으며, 이러한 CT센서를 통해 검출된 결함 애자를 포함한 애자편과 정상 애자편의 누설 전류 신호 특성은 Oscilloscope를 통하여 time-domain에서 분석되었다.

## 2. 본 론

### 2.1 실험 구성

애자의 누설전류를 측정 · 분석하기 위한 실험 구성은 그림 1과 같다. 실험 대상 애자에 전압을 인가하고 실험 환경의 온도 및 습도를 제어하기 위한 fog chamber(IEC 61109 규격)를 제작하고 이를 이용하여 시료 애자의 주변 환경을 온도 30℃, 습도 30%~90%로 변화시켜 가며 애자편 하단에 power transformer(AC 80kV, 60Hz)를 통해 전압을 인가하여 실험하였다. 인가되는 전압은 high voltage probe(ratio of voltage division 5000:1)를 이용하여 확인하였다. 애자로 유입되는 누설전류를 측정하기 위해 표 1과 같은 특성의 저주파 전류센서(current ratio: 5000:1, 10Hz~10kHz)를 애자편 상단 접지 측에 설치하였다.

전류 센서로부터 검출된 전류 신호는 Oscilloscope(LeCroy, 1GHz, 1GS/s)에 의해 전압 신호로 변환되어 취득되며, 이러한 전압 신호의  $V_{p-p}$ ,  $V_{rms}$ 는 LabVIEW ver. 8.5를 통해 1초 당 5개(12cycle 당 1개) 검출된다. 또한  $V_{rms}$ 는 측정 시간에 따른 크기 변화율에 따라 분석되고,  $V_{p-p}$  signal은 인접한 두  $V_{p-p}$ 의 크기 차이(magnitude difference between two consecutive  $V_{p-p}$ )등의 형태로 분석된다.



〈그림 1〉 실험구성도

〈표 1〉 CT experiment data

subject	2mA to 8mA Signal Reaction Test					
	60Hz 2mA		60Hz 5mA		60Hz 8mA	
Burden & Output	1kΩ	3kΩ	1kΩ	3kΩ	1kΩ	3kΩ
	mV	mV	mV	mV	mV	mV
1	0.43	1.30	0.98	2.98	1.55	4.70
2	0.44	1.34	1.00	3.02	1.55	4.71
Remarks	Output Voltage = I <sub>input</sub> / 5000 X Burden Current ratio = 5000 : 1					

실험 대상 중 정상 애자는 상용 송배전용 154[kV]급 36,000LBS cap-and-pin type insulator (Alumina 함유량 17%)를 사용하였고, 결함애자는 정상애자와 동일 종류의 시료로서 실선로에 설치되어 운전 중 섬락 후 crack 결함이 확인되어 회수된 애자이며, 측정 결과 30[kΩ]의 저항을 나타내었다.

### 2.2 실험 과정

154[kV]급 송전선로에 설치된 애자편의 1편 당 포함된 애자 개수는 9~11기이므로 9기의 애자편을 기준으로 하여 해당 phase voltage를 실험 전압으로 인가하였다.

본 실험의 경우 시료 당 다음과 같이 2기씩의 애자를 사용했으므로, 매 실험마다 20[kV]의 전압을 인가하였으며, 실험 시료는 표 2와 같이 분류하였다.

결함유무	정상 애자편 (정상애자 2기)	결함애자가 포함된 애자편 (정상애자 1기와 결함애자 1기)
건조상태	(A)번 시료	(B)번 시료
습윤상태	(C)번 시료	(D)번 시료

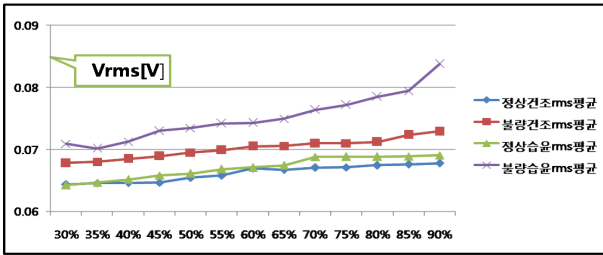
〈표 2〉 실험에 사용된 시료

선행 연구결과 결함애자가 고전압 측에 위치했을 경우의 누설전류량이 다른 위치에서의 누설전류량보다 높게 나타났기 때문에 시료(B)와 (D)에서 결함애자를 고전압 측에 위치시켰다.

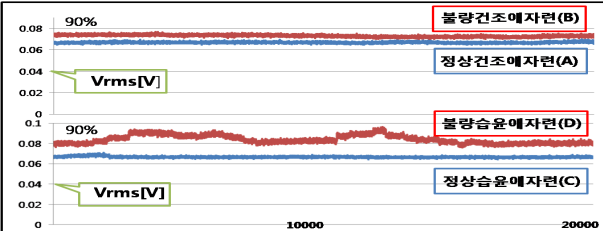
### 2.3. 습도변화에 따른 누설전류의 신호 분석

#### 2.3.1 습도변화에 따른 시료 별 $V_{rms}$ 분석

각 습도별(30%~90%)로 시료에 20[kV]의 전압을 인가 한 후, CT 센서에 의해 검출된 누설 전류 신호를 오실로스코프를 통해 취득하였고, LabVIEW를 통해 5samples/sec의 sampling rate로  $V_{rms}$ ,  $V_{p-p}$ 값을 각각 분석하였다. 취득된 전압은 [V] 단위로 소수점 6자리까지 측정하여 1시간 동안 총 20,000개의 데이터를 취득하였으며, 취득된  $V_{rms}$  평균 값을 그림 2에 나타내었다. 그중에서 습도 90% 일 때  $V_{rms}$  파형을 그림 3에 나타내었다.



〈그림 2〉 20kV를 인가하였을 때 실험시료의 V<sub>rms</sub> 평균



〈그림 3〉 20kV를 인가하였을 때 실험시료의 V<sub>rms</sub> 파형

2.3.2. 습도 변화에 따른 시료별 V<sub>rms</sub> 분석

그림 3과 같이 애자 표면이 건조 상태이고 주변 습도가 90% 일 때 누설 전압 변동폭(voltage variation range)은 정상 애자런일 경우 약 0.0055[V], 결함애자가 포함된 애자런일 경우 약 0.0061[V]로 비슷한 변화를 나타낸다. 이는 애자의 표면이 건조한 상태일 경우, 불량애자는 정상애자에 비해 습도에 따라 누설 전압의 크기는 증가하지만, 전압 변동폭(voltage variation range)에는 차이가 나타나지 않음을 의미한다.

또한, 동일한 주변 습도(90%)에서 애자 표면이 습윤 상태일 때의 전압 변동폭은 정상 애자런일 경우 약 0.007[V], 결함애자가 포함된 애자런일 경우 약 0.021[V]로 V<sub>rms</sub> 변동 폭이 약 3배 증가하였다. fog chamber 내부의 습도 범위가 20%~90%일 경우 주변 습도의 변화에 따라 건조 상태에서의 V<sub>rms</sub> 및 습윤 상태의 V<sub>rms</sub>에서 차이가 없으나, 90% 이상일 경우에는 그림 3과 같이 큰 변동폭의 차이를 보였다. 따라서 애자 표면이 건조 상태인 경우, 누설 전압의 변동폭을 통해 결함 애자의 포함 여부에 대한 판별이 어려운 반면 애자 표면이 습윤 상태일 경우에는 결함애자 포함 여부 판별이 가능하였다.

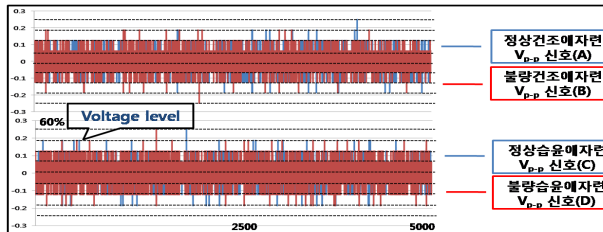
V<sub>rms</sub> 분석 결과에서 나타나는 이와 같은 특성은 정상 애자와 달리 결함애자가 포함된 애자런은 결함(crack)으로 유입된 수분으로 인해 crack에서 발생하는 부분방전(partial discharge)이 가속화되어 연속적으로 발생하게 되고, 이에 따라 애자런으로 유입되는 누설전류가 부분방전원에서 Joule's heat의 형태로 소모되어 접지 측의 CT에서 측정되는 누설전류량의 시간적 변화가 급격하게 변화되게 때문에 나타나는 현상이다.

2.4. 습도변화에 따른 누설전류의 신호 분석

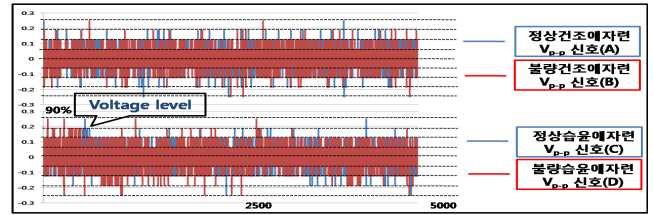
2.4.1. 시료별 pulse current 분석

주변 습도 변화에 따라 CT센서에서 검출된 인접 V<sub>p-p</sub> 신호의 전압 차이 값을 동일한 방법으로 취득하였다. 이 중 습도 90%일 때 각 시료들의 초기 5,000개의 데이터를 그림 4에 나타내었다.

습윤 상태에서 결함 애자를 포함한 애자런의 V<sub>rms</sub>를 분석한 경우, 정상 애자런에 비해 전압 변동폭이 2 배 이상의 차이를 보여 결함 애자유무에 대한 판별이 가능하나, V<sub>rms</sub> 변화량은 일정하게 지속되는 경향이 있어 전체적인 데이터 분석이 필요하다. 그러나 인접펄스간의 차이 값으로 분석하는 경우는 임의의 section의 분산도만으로도 결함 애자의 포함 유무를 판단할 수 있다. 이와 같은 인접 펄스의 크기 차이 분석은 펄스의 전압 크기별로 5개의 Voltage level로 분리하여 분석하였다.



〈그림 5〉 습도 60%에서 20kV를 인가하였을 때 실험시료의 ΔV<sub>p-p</sub> (V<sub>p-p</sub> difference) signal



〈그림 5〉 습도 90%에서 20kV를 인가하였을 때 실험시료의 ΔV<sub>p-p</sub> (V<sub>p-p</sub> difference) signal

2.4.2. 시료별 ΔV<sub>p-p</sub> 분석

60분 동안 검출된 20,000개의 ΔV<sub>p-p</sub> signal의 분포 그래프를 그림 4.5에 나타내었으며, 표 3은 애자 표면의 건조 및 습윤 시 각 시료의 voltage level 별 건조 상태에서 습윤 상태로 변화하였을 때의 각 시료의 ΔV<sub>p-p</sub> signal의 증감 량을 백분율로 산출하여 나타낸 것이다.

〈표 3〉 voltage level 별 ΔV<sub>p-p</sub> 증감률

Voltage Level	[(C-A)/A] in[%]	[(D-B)/B] in[%]	[(C-A)/A] in[%]	[(D-B)/B] in[%]
Level 4 (0.25V)	-50.00	150.00	-25.00	100.00
Level 3 (0.1875V)	2.22	38.33	-15.22	36.90
Level 2 (0.125V)	-6.37	54.61	-9.36	9.30
Level 1 (0.0625V)	-3.00	5.49	-3.75	3.74
Level 0 (0V)	2.46	-16.57	5.52	-10.20
Level -1 (-0.0625V)	-0.29	3.96	-3.85	6.60
Level -2 (-0.125V)	-1.58	60.79	-7.95	37.98
Level -3 (-0.1875V)	-4.44	13.89	-22.68	71.23
Level -4 (-0.25V)	-50.00	33.33	-20.00	66.67

표 3의 증감률은 기준 값인 건조 상태의 signal 개수를 기준으로 산출한 값으로서 습윤 시 ΔV<sub>p-p</sub> difference of the voltage level별 해당 개수의 증감 정도를 나타낸다. 표 3에서와 같이 정상 애자런은 애자 표면이 습윤 상태 일 경우에 각 voltage level별 ΔV<sub>p-p</sub> signal의 개수가 건조 상태에 비해 감소하는 반면 cracked insulator가 포함된 애자런은 습윤 시의 각 level별 ΔV<sub>p-p</sub> signal의 개수가 건조 상태에 비해 증가하여 level 3, 4와 -3, -4의 경우가 다른 level에 비하여 증감량이 현저히 큰 폭으로 증가했음을 알 수 있다. 이는 결함 애자에서 발생하는 부분방전으로 인해 ΔV<sub>p-p</sub> signal의 값이 급격하게 변화하고 있음을 의미한다. 또한 주변 습도가 증가할수록 부분방전에 의한 ΔV<sub>p-p</sub> signal의 voltage level별 밀집도는 커지지만 V<sub>p-p</sub>의 증감 량은 주변습도에 상관없이 비슷한 증감을 보인다.

3. 결 론

본 연구에서는 송전선로의 운전 시 정상 애자런과 결함 애자를 포함한 애자런에서 발생하는 누설 전류의 신호를 습도별로 측정·분석하여 습도별 각 애자런들의 특징을 분석하였고 결함 애자의 포함을 판별할 수 있는 다음과 같은 결론을 제시하였다.

- 애자 표면이 습윤하였을 때, V<sub>rms</sub>의 시간에 따른 변동폭(magnitude variation of V<sub>rms</sub>)을 비교하여 정상애자와 결함애자를 구분할 수 있었다
- 애자 표면이 습윤하였을 때, voltage level별 V<sub>p-p</sub> difference signal의 개수 분포 변화를 통하여 정상애자와 결함애자를 구분할 수 있었다.
- 습도가 증가할수록 각 애자런의 V<sub>rms</sub> 크기는 서서히 증가하나, 습도 90%이상 일 때 습윤 시 불량 애자런의 V<sub>rms</sub> 크기는 다른 상태의 애자런에 비해 300% 이상의 변화 폭을 나타낸다.
- ΔV<sub>p-p</sub>의 증감량은 습도변화에 상관없이 비슷한 증감을 보이므로, 이에 따라 주변 습도의 변화에 관계없이 결함 애자의 유무 판별에 적합하다.

〔참 고 문 헌〕

[1] Cigré TF 33.01.01, Polluted insulators: A Review of Current Knowledge, 2000  
 [2] J.S.T. Looms, "Insulators for High Voltages", pp. 195-215, 1998  
 [3] W.A.Chisholm, P.G.Buchan and T.Jary, "Accurate measurement of low insulator contamination levels", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 9, pp.1552-1557, 1994.  
 [4] D. F. Kawa, M. J. Chavez, T. Orbeck and C.Lumb, "Practical PCA-DA system for measurements of leakage current pulses on polymer insulators under wet contaminated conditions", IEEE Electr. Insul. Mag., Vol. 8, No. 2, pp. 5-13, 1992  
 [5] C. H. Ryu, S. K. Lee, G. B. Choi, J. Y. Koo, "A Novel Method for the Insulator Diagnosis considering Leakage Current", 23-25 November 2008, ACED 2008