

교류 1kV 이상의 애자장치에 대한 파워 아크 시험에 관한 고찰

류형기, 서운택, 박승재, 윤학동, 이용한
한국전기연구원

Review on A.C. power arc tests on insulator sets with a nominal voltage above 1kV

Rhyou Hyeong-Kee, Seo Yoon-Tack, Park Seung-Jae, Yoon Hack-Dong, Lee Yong-Han
Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - 초록 :

한국전기연구원(전기연)은 애자장치 및 절연물의 파워 아크시험을 수행하고 있으나, 실 사용상태를 모의할 수 있는 시험회로, 애자장치의 설치방법, 아크방전전류의 크기 및 평가방법 등이 미비한 상태에서 절연물의 연면에 적절한 아크에너지를 공급하지 못한 상태로 시험을 수행하고 있다. 국내·외 시험규격에서도 파워아크 발생 경로가 적절치 못하여 절연물과 금구류의 열적·전기적 손상 정도가 실 사용상태에 미치지 못하고 있다. 본 연구에서는 이의 개선을 위하여, 시험법에 대한 ① 아크방전의 기술적 근거를 마련하고, ② 성능검증 회로와 애자장치의 아크유기에 대한 기술적 근거, ③ 아크방전전류의 크기 및 평가방법 등을 고찰한다. 본 연구에서 검토한 성능검증방법은 교류 1kV 이상의 세라믹, 자기재 및 복합절연물의 파워 아크시험에 적용 가능하다.

1. 서 론

애자장치 및 절연물이 낙뢰, 개폐 과전압, 열화 및 오염에 의하여 절연파괴가 발생하면, 아크방전전류가 절연물의 연면을 따라 흐르게 되고, 이때 발생된 높은 열은 절연물과 금구류를 손상시킨다. 파워아크시험은 이 열에 의한 애자장치의 손상 유·무를 확인하고, 고장 제거 후 애자장치의 재 송전 가능 여부를 판단하는 기준이 되므로 이에 대한 적절한 성능검증방법이 필요하다.

현재 전기연은 파워아크시험을 시행하여 애자장치의 성능평가 서비스를 제공하고 있으나, 국내·외 시험규격과 시험설비의 미비로 실제 사용조건인 시험을 수행하지 못하고 있다. 따라서 본 연구에서는 이에 대한 기술적 이해를 높이고자 ① 파워아크 에너지의 평가방법, ② 아크이동을 고려한 적절한 시험회로, ③ 애자장치의 아크유기 방법, ④ 아크방전전류의 크기 및 시험결과의 평가에 대한 기술적 근거를 마련하고자 한다.

2. 본 론

2.1 시험회로 개요 및 Power arc 시험

파워아크시험 간략회로도는 그림 1과 같으며, 본 연구

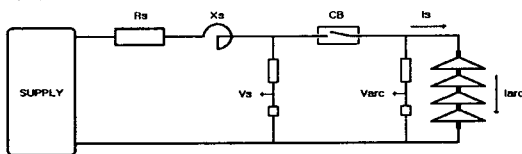


그림 1. 애자장치의 파워아크시험 간략 회로도

- V_s : 전원전압, V_{arc} : 아크전압
- I_s : 고유단락전류, I_{arc} : 아크전류
- L_{arc} : 섬락거리, R_{arc} : 아크저항
- t_{arc} : 통전시간, S_{arc} : 아크주의 단면적
- Z_s : $\sqrt{(R_s^2 + X_s^2)}$

에 사용된 Insulator는 국내 4개 회사에서 개발한 22.9 kV급 배전선로용 폴리머 현수애자 A호(525±25) mm 및 B호 (430±20) mm, 전기연이 개발한 154kV급 송전선로용 폴리머현수애자(2000±20) mm, 345 kV 급 송전선로용 폴리머현수애자(3000±25) mm를 사용 하였다.

2.2 시험회로의 전원용량

기중에서 파워아크 시험 중 최대 아크전압은 10kV 이하로 보고 되고 있으므로, 전원전압 10kV 이상이면 아크 유지는 가능하나, 요구된 아크전류의 크기를 유지시킬 수 없다. 그리고 아크저항 $R_{arc} \propto k \cdot L_{arc}$ 로 되므로 전원전압과 아크전류의 관계는 :

$$I_s = V_s / Z_s$$

$$I_{arc} = V_{arc} / R_{arc}$$

$$= (V_s - V_{arc}) / \sqrt{(R_s + R_{arc})^2 + X_s^2}$$

이다. 실제 아크방전전류는 위 식에서 보는 바와 같이 V_{arc} 가 일정할 경우 V_s 가 감소하면 아크방전전류는 감소한다. 그 결과 적정 아크전류를 공급하기 위해 전원 용량이 클수록 효과적인 성능 검증이 수행될 수 있으며, 경우에 따라 시험용량이 제한 될 수 있다.

2.3 아크전압과 섬락거리

그림 1과 같은 회로에서 절연물 연면에 아크방전이 발생하면, 아크방전전류가 흐르게 되고, 아크주의 경로는 전원회로의 전류 공급 및 귀환회로의 상태, 아크유기선의 설치 또는 시료의 특성에 따라 아크주의 이동을 수반하게 된다. 이때 아크주의 단면적은 절연물 주위의 충분한 공간에서 아크가 발생하므로 아크전류의 크기에 비례하여 증가하게 되고, 아크저항은 감소한다. 따라서 특정 섬락거리를 갖는 절연물의 아크전압은 아크방전전류의 크기와 무관하게 거의 일정한 값을 갖게 된다. 예로서 5 kA와 10 kA에 대해 아크전압을 고찰해 보면:

$$R_{arc}(5) = k \cdot L_{arc}(5) / S_{arc}(5)$$

$$R_{arc}(10) = k \cdot L_{arc}(10) / S_{arc}(10)$$

$$= k \cdot L_{arc}(5) / (2 \cdot S_{arc}(5))$$

$$[L_{arc}(10) = L_{arc}(5), S_{arc}(10) = 2 \cdot S_{arc}(5)]$$

$$V_{arc}(5) = I_{arc}(5) \cdot R_{arc}(5)$$

$$= I_{arc}(5) \cdot k \cdot L_{arc}(5) / S_{arc}(5)$$

$$V_{arc}(10) = I_{arc}(10) \cdot R_{arc}(10)$$

$$= 2 \cdot I_{arc}(5) \cdot k \cdot L_{arc}(5) / (2 \cdot S_{arc}(5))$$

$$= I_{arc}(5) \cdot k \cdot L_{arc}(5) / S_{arc}(5)$$

$$\therefore V_{arc}(5) = V_{arc}(10)$$

$$[I_{arc}(10) = 2 \cdot I_{arc}(5)]$$

$$[(5):5 \text{ kA 인 경우, } (10):10 \text{ kA인 경우}]$$

따라서, 섬락거리 L_{arc} 가 일정하면 I_{arc} 의 크기에 무관하게 아크전압은 일정하다. 즉, $V_{arc} = k \cdot L_{arc}$ 이다. 섬락거리 L_{arc} 가 다른 경우에는 그림 2에서 보는 바와 같이 섬락거리 L_{arc} 에 따라 아크전압 V_{arc} 는 지수함수로 증가함을 보여 주며, 아크방전전류 I_{arc} 의 크기와 무관하다. 그림 2는 L_{arc} 와 V_{arc} 의 관계를 보여주며, 아크전압 $V_{arc} \approx 1.0393 \ln(L_{arc}) - 4.7208$ 로 나타내어진다. 이 식은 기중

방전인 경우에 한하여 다른 전력 기기에 적용하여도 오차는 크지 않을 것으로 판단 된다.

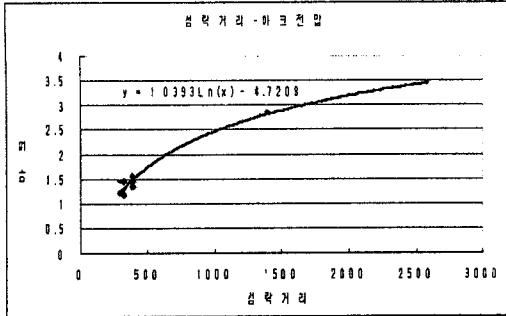


그림 2. 애자장치의 접촉거리와 아크전압 관계

2.4 아크에너지의 평가

파워아크시험 중 절연물 표면에 열을 발생시키는 열원은 아크에너지로서 $E_{arc} = I_{arc}^2 \cdot R_{arc} \cdot t_{arc}$ 로 정의되나, $E_{arc} = V_{arc} \cdot I_{arc} \cdot t_{arc}$ 로 나타낼 수 있으며, 동일 절연물인 경우 L_{arc} 가 일정하므로 V_{arc} 는 일정하다. 따라서 $E_{arc} = k \cdot I_{arc} \cdot t_{arc}$ 가 되며, 이때 단위는 $kA \cdot cycle$ 로 나타내어진다. 따라서 현재 적용하고 있는 모든 관련 규격은 아크방전전류와 지속시간의 곱으로 아크에너지를 규정하여 평가하고 있으며, 그 결과 $kA \cdot cycle$ 의 크기가 같으면 동일 시험조건으로 평가 한다.

2.5 시험회로의 구성

시험회로는 실 사용상태와 같이 구성 하여야 한다. 특히 아크 경로와 이동이 실 사용 상태와 상이하여 절연물 및 금구류의 연면에 동가의 아크열을 발생시키지 못하면 효과적인 시험 목적을 달성할 수 없다. 그림 3은 전류의 공급 및 귀환을 균등 분배하는 균형회로를 보여 주는 예로서 아크 주가 절연물 연면에서 이탈하지 않고 최대한 근접하여 아크 에너지를 공급하는 회로를 보여준다. 실 계통에서는 여러 형태의 회로가 있을 수 있으며, 이는 표 1에서 보는 바와 같다. 또한 공급 및 귀환회로의 길이도 아크 이동에 중요한 요소이므로 적절한 길이를 선정하여 시험회로를 구성하여야 한다.

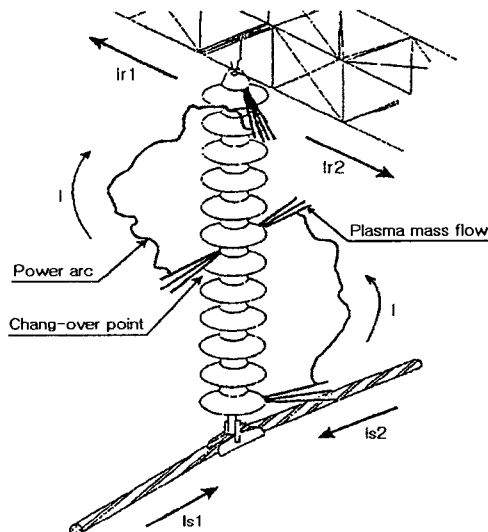


그림 3. 아크주의 이동을 억제하는 균형회로.

Is : 공급전류, Ir : 귀환전류

표 1. 전류 공급 및 귀환회로의 유형

구분	균형 공급회로	비균형 공급회로
균형 귀환회로	A 회로	B 회로
	$I_{r1} = I_n/2$	$I_{r1} = I_n/2$
	$I_{r2} = I_n/2$	$I_{r2} = I_n/2$
	$I_{s1} = I_n/2$ $I_{s2} = I_n/2$	$I_{s1} = I_n$ $I_{s2} = 0$
비균형 귀환회로	C 회로	D 회로
	$I_{r1} = I_n$	$I_{r1} = I_n$
	$I_{r2} = 0$	$I_{r2} = 0$
	$I_{s1} = I_n/2$ $I_{s2} = I_n/2$	$I_{s1} = I_n$ $I_{s2} = 0$
비고	$I_{r1}, I_{r2}, I_{s1}, I_{s2}$ 의 편차 $\leq 20\%$	

2.6 아크 유기

아크유기는 용단이 용이하고 직경 1mm 이하의 silver, Al 또는 Cu 등의 가는 전선을 사용하여야 한다. 특히 현수애자인 경우에는 절연물과 금속 소켓으로 연결되어 있으므로 아크 유기선의 설치는 아크방전 모의에 주의를 요한다. 그림 4, 5, 6은 수직형 현수애자의 아크유기선 설치의 예를 보여주는 것으로 절연물과 금구류에 아크열을 효과적으로 공급하기 위한 것이다.

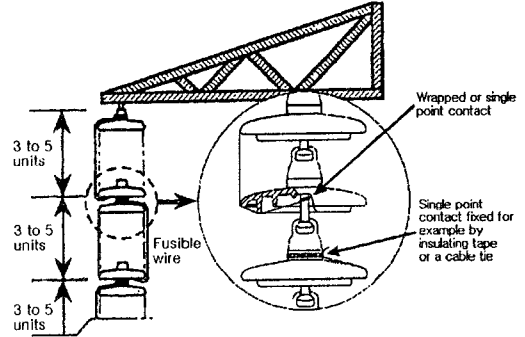


그림 4. 아크유기선 설치 예 1

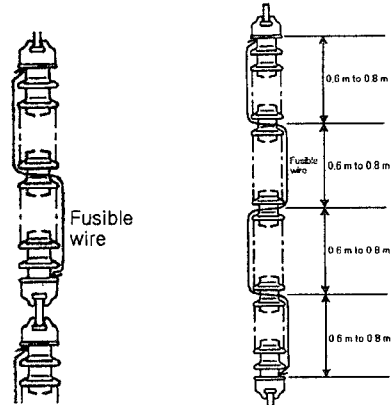


그림 5. 아크유기선 설치 예 2

그림 6. 아크유기선 설치 예 3

그림 4, 5, 6에서 아크유기선의 설치방향 전환은 3~5개의 단위 절연물 또는 다수의 단위절연물 길이가 0.6m ~ 0.8m가 되도록 한다. 그리고 아크이동 및 회전은 전류 공급, 귀환방향과 아크유기선의 설치각도에 따라 다르므로 아크주의 이동을 최소화 하여 애자장치 성능검증에 주의를 요한다. 그리고 아크의 이동과 관련한 대기조건(풍속, 대기압, 비, 습도, 온도) 및 시험 공간도 영향을 주고 있다는 사실을 고려하여야 한다. 그림 7

은 전류공급, 귀환과 아크유기선의 설치 각도를 보여준다.

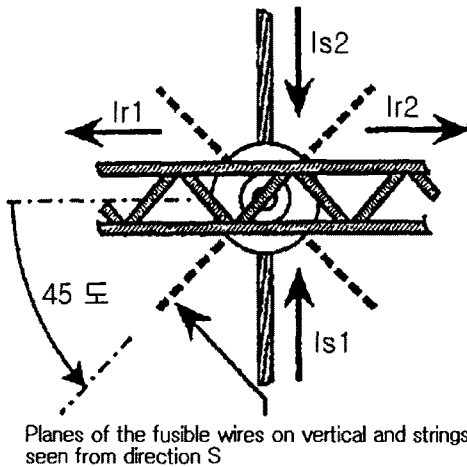


그림 7. 전류 공급, 귀환방향과 아크유기선 설치 예.

여기서 소개하지 않은 2련 또는 3련 현수애자, 수평 설치형 애자장치, Vee type 애자장치 등에 대해서도 같은 방법으로 실사용 상태를 고려하여야 한다.

애자장치의 기계적 부하로는 ① 금구 또는 금속부의 전기적 접촉, ② 실사용 상태에 맞는 올바른 위치, ③ 적절한 인장 5kN을 인가하여야 한다.

2.7 시험계열과 특성

다른 전력기기와 마찬가지로 절연물도 사용조건에 맞는 시험책무를 가져야 한다. 절연물의 파뢰아크시험은 X, Y 2종의 시험 계열로 구분하고, X 계열은 시험회로 A 또는 B를 모의하는 것으로 아크 이동을 극도로 억제하는 보다 가혹한 시험회로이며, Y 계열은 시험회로 C 또는 D를 모의하는 회로로 아크 이동이 상대적으로 크므로 X계열에 비해 가혹도가 떨어지는 회로이다. 각 시험 계열은 아크 방전전류의 크기와 지속시간에 따라 3 종류의 책무로 구분하고, 사용조건에 맞는 시험 계열을 선정하여 시험하여야 하며, 표 2는 이를 보여준다.

표 2. 시험계열 및 책무

시험 계열	시험 회로	시험책무	
		단락전류	시험 시퀀스
X	A	$I_n=0.2 \cdot I_{sym}$	2 of $t=0.2s$ & 1 of $t=1s$
	A	$I_n=0.5 \cdot I_{sym}$	2 of $t=0.2s$ & 1 of $t=1s$
	B	$I_n=I_{sym}$	2 of $t=0.2s$ & 1 of $t=0.5s$
Y	C	$I_n=0.2 \cdot I_{sym}$	2 of $t=0.2s$ & 1 of $t=1s$
	C	$I_n=0.5 \cdot I_{sym}$	2 of $t=0.2s$ & 1 of $t=1s$
	D	$I_n=I_{sym}$	2 of $t=0.2s$ & 1 of $t=0.5s$

2.8 아크방전전류의 평가

실 시험 중 발생하는 아크방전전류는 불안정한 아크저항(R_{arc})에 의해 전류의 순시 값이 그림 8과 같이 변하고 있다. 따라서 전류의 평가 방법은 ① 3 crest 법을 사용하고, 초기 또는 최종 반파가 아크 유기 또는 소호로 인해 지나치게 작을 경우는 무시하며, ② 일반적으로 오염에 의한 고장으로 초기 아크전류의 파형은 대칭전류를 필요로 하며, 비대칭 전류인 경우에는 직류분 30% 이하로 제한한다. ③ 시험주파수는 45Hz에서 65 Hz로서 50Hz 또는 60Hz 구분 없이 시험 가능하다. ④ I_{rms} 의 여유는 $\pm 10\%$ 이내이다. ⑤ 시험 중 전류 순시치의 여유는 20% 이하이다. ⑥ 아크에너지 kA·cycle은 $\pm 10\%$ 이내이다.

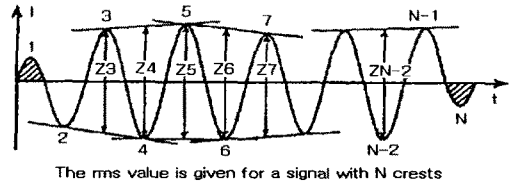


그림 8. 3 crest 법에 의한 아크방전전류 크기 평가

2.9 시험결과의 평가

파뢰아크 시험 후, 아래 표 3의 평가기준에 따라 시험 결과를 평가 한다.

표 3. 시험결과의 평가 기준

기준 또는 수행된 시험	평가 기준
-애자 분리	-허용 않됨
-Burning, shed의 파손 -유약 벗겨짐 -아연도금의 용융	-허용 됨
-fiberglass core의 노출 (복합 절연물에 한함)	-허용 않됨
-천공을 확인하기 위하여 건조 전압 선타시험	-모든 단위 절연물에 대해 실시 -외부선타이어야 함
-파괴하중 시험	-손상된 모든 단위 절연물은 SFL 또는 SML ¹⁾ 의 80%를 견디어야 함
-fitting류 와 도체 시험	-합의 또는 관련규격을 만족하여야 함

1) 캡과 핀 애자류에 대해, 적어도 선로 측 3개와 접지 측 3개, 열화된 구간의 중앙 3개를 시험함.

3. 결 론

현행 파뢰아크시험은 실 사용상태를 모의하여 적절한 성능평가를 수행하기에는 부족한 부분이 있다, 또한 자기재와 복합소재에 대한 기술표준의 혼란과 여러 종류의 시험규격이 산재해 있으므로 성능평가 시 많은 어려움이 있다. 본 연구는 이의 개선을 위하여 파뢰아크 시험의 기술적 배경과 근거를 아래와 같이 마련하였다.

- ① 선타거리(L_{arc})가 증가하면 아크전압(V_{arc})은 지수함수로 증가한다.
- ② 선타거리(L_{arc})가 일정하면 아크전류(I_{arc})의 크기에 관계없이 아크전압(V_{arc})은 일정하다.
- ③ 아크에너지(E_{arc})의 평가 단위는 kA·cycle이다.
- ④ 시험회로의 구성, 애자장치의 아크유기 방법 등을 마련하였다.
- ⑤ 전류크기의 평가, 시험계열 및 책무, 시험결과에 대한 판정기준과 이에 대한 기술적 근거를 마련하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] "Dead-end / suspension composite insulator for overhead distribution lines," CEA LWTWG-01, 1996
- [2] Technical specification of KEPCO 131-600~601, "Dead-end / suspension composite insulator for 22.9kV-y overhead distribution lines," 2001.
- [3] Standard Technical specification of KEPCO ES 131, "Testing Method for Insulators," 1998.
- [4] ES(Standard Technical specification of KEPCO) 131-540~560, "250mm Ball & Socket type Suspension Insulators," 2002.
- [5] IEC 60383-1, "Ceramic or glass insulator unit for AC systems-definitions, test methods and acceptance criteria," 1993
- [6] IEC 61467, Insulators for overhead lines with a nominal voltage above 1kV, "AC power arc tests on insulator sets," 1997.