

HVDC용 크라프트 절연지의 전기적 특성 평가

연복희, 이상진, 김정년, 김동욱, 전승익
LS전선 전력연구소

Electrical Properties on Kraft Insulating Paper used as HVDC Cable

B. H. Youn, S. J. Lee, J. N. Kim, D. W. Kim, S. I. Jeon
Electric Power R&D Center, LS Cable Ltd.

Abstract - 본 논문은 HVDC용 크라프트 절연지의 기본 전기적 특성평가를 목적으로 온도별 역률의 변화, 절연저항 및 임펄스 절연파괴강도 등을 측정된 결과이다. 온도에 따른 크라프트 절연지의 역률은 50~70℃에서 최소값을 나타내었으며, 밀도가 낮은 시료일수록 낮은 역률을 나타내었다. 하지만, 임펄스 절연파괴 강도는 밀도가 낮을수록 저하되는 특성을 나타내어 적절한 밀도의 선정이 필요하다는 사실을 알았다. 또한, 온도 및 인가 전계에 따른 절연저항을 측정하여 크라프트 절연지의 온도상수 및 전계상수를 측정된 결과, 온도상수 α 는 0.09~0.1 $^{\circ}\text{C}^{-1}$, 전계상수는 약 1.5을 얻었다. 이는 HVDC용 케이블의 설계 시 절연체의 전계분포 및 두께 선정에 기본적인 데이터를 제공할 수 있다.

0℃, 80℃, 50℃ 및 20℃에서 각각 10 kV/mm의 전계를 인가하여 측정하였다. 측정 중에는 절연 컴파운드 중에 있는 기포나 수분을 제거하기 위해 0.1 torr의 진공탈기를 지속적으로 유지하였다.

표 1. 시료로 사용된 HVDC용 kraft절연지

시료명	두께 (μm)	밀도 (kg/dm ³)	평량 (g/m ²)
Kraft 1	70	0.88	66
Kraft 2	90	0.96	86

1. 서 론

HVDC송전기술은 유전손, 표피효과 및 무효전력에 의한 손실이 없어 송전효율이 좋을 뿐만 아니라 리액턴스 또는 위상각에 대한 고려가 필요 없어 안정도가 좋다. 따라서 비동기 전력계통의 상호연계가 필요한 곳이나 장거리 대전력 수송이 용이한 곳에 사용되고 있다. 최근에는 국가간 전력계통 연계에 의한 전력 상호용통 및 지원, 저원이 발전력의 장거리 수송, 부하패턴이 다른 지역간의 연계, 기타 연료전기, 신전력 공급장치 및 초전도 전기에너지 저장장치 등에 널리 활용될 것으로 전망된다. 하지만, 현재 국내는 HVDC 케이블 제조 뿐만 아니라 접속기술 및 DC송전기술에 있어서 모두 외국기술에 의존하고 있다. 따라서, 본 논문은 HVDC 케이블의 기초 절연재료인 크라프트지의 전기적 특성을 평가하여 케이블 설계의 기초 자료로 사용할 수 있도록 하였다.

2. 본 론

2.1 시료 및 측정

본 논문은 HVDC용 밀도 및 두께가 상이한 2 종류의 크라프트 절연지를 대상으로 하였다. 절연지는 밀도를 높이기 위해서 이중 광택(duplex calendering) 처리된 시료이며, 두께 및 밀도 차가 있는 시료를 준비하였다. 각 시료의 기본적인 사양을 표 1에 나타내었다. 절연지의 전기적 특성을 평가하기 위해 앞서 진공 건조과정을 충분히 거쳐 흡습으로 인해 발생할 수 있는 여러 가지 영향을 제거하였다. 이후, 절연 컴파운드로 48시간 이상 고온 함침하여 사용하였다.

2.1.1 역률

절연지의 역률을 측정하기 위하여 가드링이 포함된 전극셀을 사용하였다. 충분히 함침된 절연지를 전극 간에 삽입하고 절연유를 셀 안에 채운다음 120℃를 충분히 유지시켜 열평형상태를 이룬 다음 서서히 방냉하면서 10

2.1.2 절연저항

저항률 측정에서는 표면 누설전류와 시료 내부로 관통하는 체적전류로 나누어 측정하는데, 앞서 측정된 전극셀을 오븐에 넣어 각 열평형상태에서 전계별 측정을 실시하였다. 측정전극은 주전극과 가드링 사이의 거리가 1.0 mm이었으며, 측정 시스템에서 순시 흡수전류 및 충전전류를 제외한 순수한 체적전류 측정을 위해 전계별로 인가한 후 약 30분이 지난 정상상태의 전류치를 electrometer (TR8651, TAKEDA RIKEN)로 측정한다. 다음 저항률을 계산하였다. 체적 저항률 측정에서는 측정된 저항치를 가지고 다음 식에 따라서 저항률을 계산하였다.

$$\rho_v = \frac{A}{t} R_v \quad (3-1)$$

여기서, R_v : 측정된 체적저항
 t : 시료의 평균 두께
 A : 가드 전극의 유효면적

2.1.3 임펄스 파괴강도

절연지의 임펄스 파괴강도를 측정하기 위해서 $\phi 25$ 의 황동전극을 끝단을 라운드 처리한 후, 주위에 에폭시 몰드 처리를 하여 연면방전을 제거하여 시험하였다. 임펄스 파괴 시험은 수차례 사전시험을 통하여 파괴예상전압을 정하고 그의 70%부터 2 kV/3회씩 승압하여 측정하였으며, 정극성과 부극성으로 각각 측정된 후, 두께로 나누어 절연내력을 구하였다.

2.2 시험결과 및 고찰

2.2.1 절연지의 역률과 온도

그림 1은 밀도가 다른 시료에 따라서 측정된 온도별 역률의 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 20~100 $^{\circ}\text{C}$ 범위에서 절연지에 대한 역률과 온도곡성의 특성은 온도가 50~70 $^{\circ}\text{C}$ 일 때 역률이 최소이고, 온도가 높아지면 다소 급격히 상승하였다. 여기서 역률이 최소인 점 이하에서 온도가 낮아지면 역률은 점진적으로 증가한다.

이러한 현상은 절연지 특유의 쌍극자 손실과 이온손실에 의한 유전체 손실 메커니즘의 중첩에 의해 나타나게 되는데 각 손실이 온도에 대한 반응이 상이하여 나타나게 되는 손실현상이다. 또한 밀도에 따른 역률현상을 살펴보면 절연지의 밀도를 낮추면 역률이 개선되는 효과를 볼 수 있었다. 이는, 절연지/합침재의 비율이 낮아지게 되면 절연지에서 나타나는 손실현상이 줄어들게 되기 때문이지만, 절연파괴강도와 관련이 있기 때문에 밀도를 낮추어 역률을 개선시키는 것이 항상 바람직하지 못하게 된다.

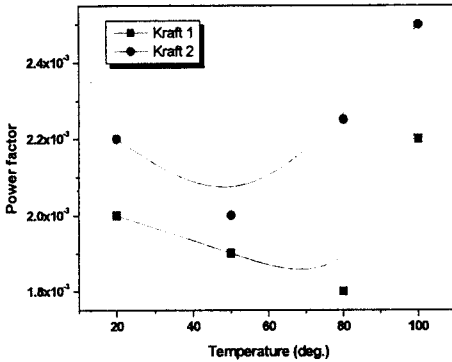


그림 1. 온도에 따른 절연지의 역률의 변화

2.2 절연저항

합침된 절연지의 경우 절연저항은 온도변화의 함수이며, 인가된 전계에 따라라도 변화한다. 직류 케이블에서 절연체내의 전위 및 전계분포가 절연저항에 의해서 정해진다. 아래에서 식과 같이 체적저항이 온도와 전계의 함수라면, 케이블의 중심에서 반경방향으로 x지점에서의 절연체 내의 전계분포는 다음과 같이 정해진다.

$$E(x) = V \frac{mx^{m-1}}{R_o^m - R_c^m}$$

$$m = \frac{P}{P+1} + \frac{\alpha}{P+1} \frac{T}{\ln \frac{R_o}{R_c}}$$

여기서, V 는 인가한 직류전압 (kV), R_c는 도체반경 (mm), R_o는 절연외경 (mm), T는 절연체 내외의 온도차 (°), α는 절연저항 온도계수, P는 절연저항 전계상수이다. 따라서, HVDC 케이블에서 온도와 전계에 따른 체적저항의 거동은 케이블의 상태에 따라서 절연체내의 전계분포가 변화하기 때문에 중요하다.

온도와 전계에 따른 체적저항을 나타내는 식은 다음과 같다.

$$\rho = \rho_0 \cdot \exp(-\alpha T) \cdot E^{-P}$$

여기서, ρ : 온도 T, 전계 E에서의 체적저항률 (Ω.cm)

α : 온도계수 (1/°C)

T : 온도 (°C)

P : 전계상수

E : DC 스트레스 (kV/mm)

ρ₀ : 체적저항 (0°C, 1kV/mm 인가 시)

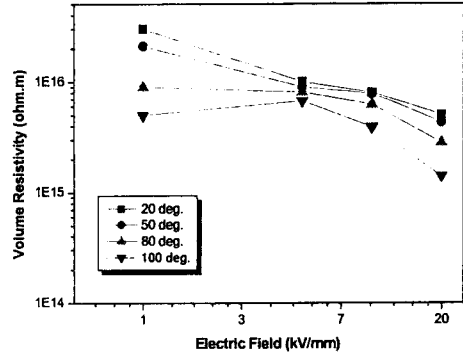


그림 2. 온도와 전계에 따른 체적저항률의 변화 (kraft 2 절연지의 경우)

그림 2는 각 시료의 체적 저항률 특성을 측정된 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 온도와 전계가 높아지면서 체적저항률이 점차 감소하였다. 위 식을 사용하여 측정된 ρ₀ 와 온도정수(α), 전계상수(P)값은 표 2와 같았다. 표에 나타난 바와 같이 고유저항율은 두께가 큰 시료에서 높게 나타났지만 온도계수 및 전계상수 값은 유사한 값을 얻었다. 이러한 결과를 바탕으로 절연지의 온도 및 전계에 따른 특성에 따라 m값이 정해지며, 전계 분포가 바뀌는 온도차가 정해지기 때문에 케이블 설계 시 고려해야 한다.

표 2. Kraft 절연지의 온도, 전계상수

	ρ ₀	α	P
Kraft 1	4.6×10 ¹⁶	0.09	1.51
Kraft 2	5.1×10 ¹⁶	0.10	1.50

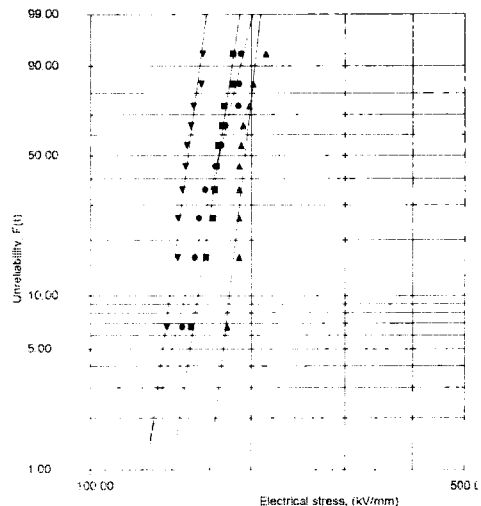


그림 3. 크라프트 절연지의 임펄스 내력

○ : kraft 1의 부극성 ▼ : kraft 1의 정극성
 ▲ : kraft 2의 부극성 ■ : kraft 2의 정극성

2.3 임펄스절연파괴강도

그림 3은 시료의 임펄스 절연파괴 강도의 결과를 나타낸 것이다. kraft 1에 비하여 kraft 2 시료가 절연내력이 약간 높게 나타났으며, 이는 밀도에서 kraft 2가 높아 절연내력이 높게 나타나지만, 두께효과로 나타나는 현상 때문에 큰 차이는 없는 것으로 판단된다. 그림에서 나타낸 결과와 같이 정극성에 비하여 부극성의 파괴강도가 높게 나타났다. 하지만, 다른 특수 절연지에 비하여 그 차이가 크지 않은 이유는 절연파괴 시 나타나는 공간전하의 축적현상이 없기 때문이며, 단지 극성에 따른 스트리머의 진행 특성 때문에 나타나는 현상으로 생각할 수 있다.

3. 결 론

본 논문은 HVDC용 크라프트 절연지의 역률과 절연저항 및 임펄스 절연내력을 측정된 결과를 나타내었다. HVDC용 크라프트 절연지는 온도에 따른 역률변화가 50~70℃부근에서 최소값을 나타내었으며, 밀도가 낮을수록 역률이 감소하는 결과를 얻었다. 하지만, 밀도가 낮은 시료에서 임펄스 파괴강도가 감소하는 결과를 얻어 서로간의 특성값을 비교 검토하여 결정하여야 한다. 또한, 온도와 전계에 따른 체적저항을 측정된 결과 온도와 전계가 증가하면서 낮은 체적 저항율을 나타내었으며, 온도상수가 0.09~0.1, 전계상수 값이 약 1.5 정도를 나타내었다. 이는 HVDC용 케이블의 설계 시 절연체의 전계분포 및 두께산정 시 기본적인 데이터를 제공할 수 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] A. Fugimori et al, "Development of 500 kV DC PPLP-Insulated Oil-Filled Submarine Cable", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 11, No. 1, 1996
- [2] CIGRE Electra, No. 72, "Recommendation for Tests of power Transmission DC Cables for a Rated up to 600 kV"
- [3] 日本電氣學會, 新版 電力ケーブル技術ハンドブック, 1989