

電氣設備의 診斷技術

(17)

第 2 編 應 用

第3章 地中電線路의 診斷技術

3.1 概 論

전력수송은 架空電線路와 地中電線路를 통해 이루어지고 있으며 지중전선로는 도시지역에서 그 역할을 담당하고 있다. 이것은 도시 전력수요의 거대화와 더불어 높은 신뢰도의 전력공급이 요구되고 있으므로 지중전선로 진단기술의 중요성이 점차 고조되고 있다.

일본에서의 지중전선로의 역사는 鉛시스(Sheath)의 벨트지 케이블이 사용된 1910년에 시작되었으며 1929년에는 低粘度油를 사용한 유기식 OF케이블을 제조하기 시작하였다. 벨트紙케이블은 33kV까지, 그리고 66kV 이상에서는 OF케이블을 사용하게 되었다.

2차대전후 고분자화학의 급속한 진전과 더불어 절연재료로서 합성고무, 폴리에틸렌, 시스재료로서 클로로프렌 및 폴리염화비닐(PVC) 등을 사용하게 되었다.

특히 1960년에 3~6kV용 케이블로서 제조개시된 가교 폴리에틸렌 절연·PVC시스 케이블(약칭 CV케이블)은 포설, 유지보수·관리가 용이하므로 수요가 확대되었고 77kV 이하에서는 기타 케이블로 급속히 대체되기 시작하여 275kV급까지도 실용화가 진전되었다.

또한 최근에는 초고압 대용량에 적합한 지중송전방식으로 SF₆ 가스를 절연재료로 사용한 管路氣中送電線이 개발되어 일부는 실용화되고 있다.

본장에서는 油浸紙케이블, 고압 CV케이블, 특별고압 CV케이블 및 관리지중송전선의 劣化診斷技術에 대하여 기술한다.

油浸紙케이블의 주류를 이루고 있는 OF케이블은 사용경험이 길고 유압, 유량의 감시 이외에 절연유의 특성조사와 용존가스분석 등에 의해서 異常의 감시, 열화진단을 효과적으로 행하고 있다.

고압 CV케이블은 1970년대에 水트리劣化에 의한 사고 사례가 발생된 후 각종 열화진단방법이 검토되었으며 판정기준도 각 전력회사 등에서 제안되었다.

이에 대해서 특별고압 CV케이블은 아직 사용기간이 짧고 劣化事例데이터도 적으므로 많은 진단방법이 개발, 제안되었으나 다시 데이터를 축적하여 현재의 진단방법의 개선과 構度의 향상을 도모하는 이외에 새로운 원리에 바탕을 둔 새로운 진단방법의 개발이 바람직하다. 管路氣中送電線에 대해서는 음향센서에 의한 導電性粒子的 검출이나 가스분석 등에 의한 劣化診斷을 실시하고 있다.

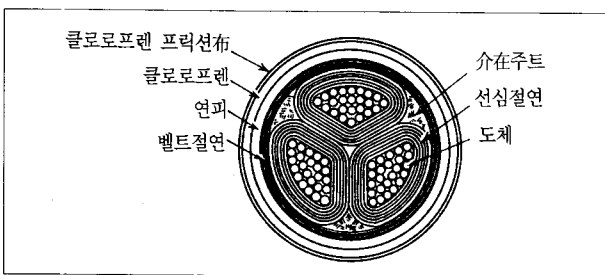
3.2 油浸紙케이블

3.2.1 油浸紙케이블의 概要

1. 케이블의 종류

종이가 전기절연에 사용된지는 이미 100년 이상이 되었으며 1886년 Kerite사이에 油含浸과 鉛皮의 기술을 개발하여 처음으로 고압 전력케이블에 적용하였다.

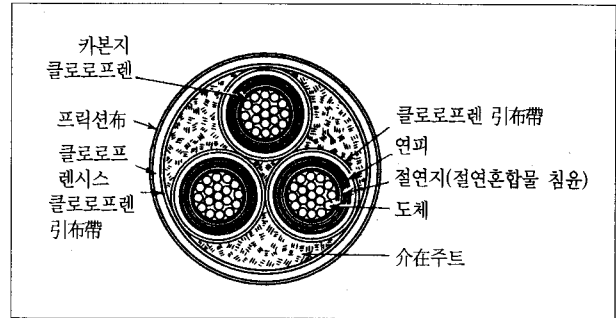
그후 솔리드(Solid)형 유침지케이블은 벨트紙케이블, H형紙케이블, SL紙케이블로 변화되었다. 벨트紙케이블은 현재 사용되고 있는 케이블로서는 가장 오래된 형태의 케이블로서 그림 3.1과 같이 3心케이블에는 各相을 전기적으로 분리하는 靜電遮蔽層이 없다.



〈그림 3.1〉 벨트紙 케이블

이에 대해서 H형紙케이블은 各相에 금속테이프 또는 金屬化成紙에 의한 정전차폐층을 설치한 구조의 케이블이다. SL紙 케이블은 그림 3.2와 같이 單心鉛皮케이블 3條를 꼬아서 합친 구조의 케이블이다.

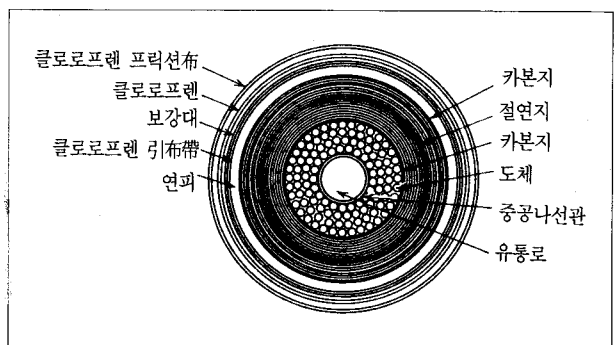
이들 케이블의 含浸油는 유동성이 모자라는 高粘度油를



〈그림 3.2〉 SL紙 케이블

無加壓狀態로서 채웠기 때문에 절연중의 갭, 보이드의 발생에 의한 部分放電이 일어나기 쉬워서 사용전압을 33kV 급으로 한정하였다. 그러나 현재 이들의 高粘度油를 사용한 유침지 솔리드케이블(Solid Cable)은 일부가 남아있는 정도이고 장거리 해저 케이블을 제외한 새로운 채용은 적어서 乾式CV케이블로 점차 대체되어 가고 있다. 油浸紙케이블의 비약적인 발전은 OF케이블의 출현이다.

OF케이블은 1917년 이탈리아 Pirelli사의 L.Emanueli가 발명한 것으로서 低粘度油를 사용한 유압형 케이블이다.



〈그림 3.3〉 OF 케이블

구조는 그림 3.3과 같이 시스내부에 유동로를 설치하고 저점도의 절연유(광물유 또는 합성 탄화수소유)를 脫濕狀態의 케이블로 충전하고 항상 대기압 이상의 압력을 외부에 설치한 油槽로서 加壓하여 완전한 보이드레스의 상태를 만든 케이블이다.

기술연재

OF케이블은 그후 구조적으로는 납시스로부터 알루미늄 시스로 진전하였다. 또한 절연지는 크라프트紙의 레임펄스 특성과 誘電特性的 개량이 가해진 양자의 특성을 조화시킨 것으로서 예를 들면 低密度, 高氣密度, 脫이온水洗紙 등의 154kV급 이상에서 사용되고 있다.

케이블의 誘電體損失을 저감하는 데는 크라프트紙의 유전특성에 명확한 한계가 있기 때문에 이를 위하여 재차 개량을 목표로 한 것이 셀룰로스紙와 플라스틱필름을 적층하여 一體化한 라미네이트紙(半合成紙)이다.

파이프형 케이블(POF)은 網管內에 油浸紙 케이블코어를引入한 케이블로서 유압을 걸어서 사용하고 있으나 OF 케이블보다 높은 압력을 가함으로써 절연내력을 향상시킨다는 이점이 있다.

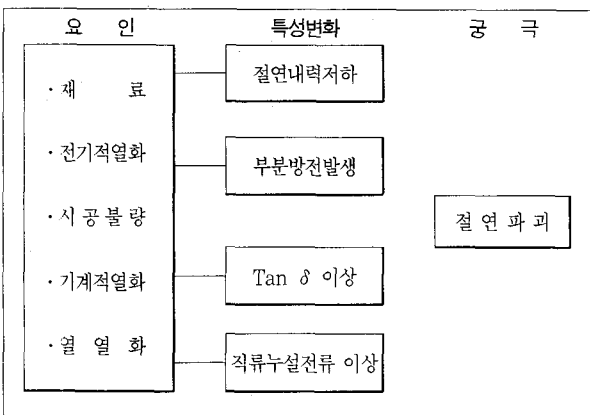
2. 劣化의 樣相

油浸紙케이블의 열화모양에 대해서는 케이블 제조후의 초기이상과 케이블 운용후의 經時變化에 의한 異常이 있다.

油浸紙케이블의 열화요인과 그 현상에 대하여 그림 3.4에 나타내었다.

절연내력의 저하는 제조상 紙捲不良 등에 의한 것이 있으나 이것은 케이블뿐만 아니고 접속부와 종단부 등의 조립에서도 동일하다.

부분방전의 발생은 운전중의 熱膨脹, 熱收縮이나 含浸油



〈그림 3.4〉 油浸紙케이블의 열화요인과 특성변화

의 流下 등에 의한 보이드, 갭의 발생에 원인이 있으나 이와 같은 열화상태는 주로 벨트케이블 등 無加壓의 솔리드 케이블에서 일어나기 쉽다.

Tan δ의 이상에 대해서는 제조시의 결함도 있으나 운전중의 酸化劣化, 熱劣化 등의 요인으로 발생하게 된다. OF 케이블의 경우는 tan δ의 증대가 있는 경우에도 이것이 국부적인 경우에는 검출이 매우 곤란하다.

直流漏洩電流의 증가는 이상과 같은 요인 이외에 水分의 혼입 등이 있으나 주로 솔리드케이블에서 일어나는 현상이다.

솔리드케이블과 OF케이블의 접속부에 대해서는 케이블과 똑같이 주로 油浸紙를 사용하기 때문에 열화현상에 대해서는 기본적으로 케이블과 동일하다.

3.2.2 油浸紙솔리드 케이블의 劣化診斷

油浸紙솔리드케이블은 전술한 바와 같이 33kV급 정도까지 실용화되어 있으나 현재 새로운 채용은 적어서 여기서는 주로 既設線路의 열화진단을 대상으로 기술한다.

1. 直流漏洩電流

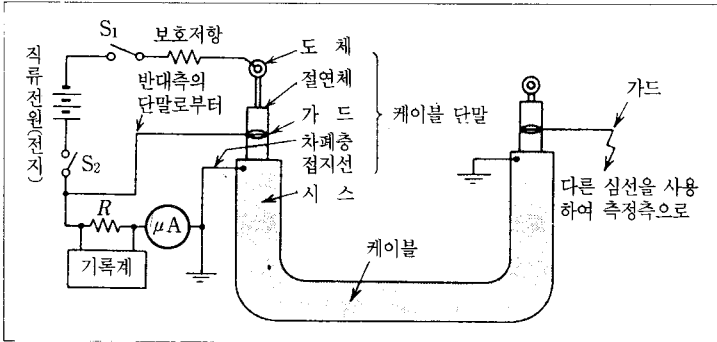
직류고압전원을 이용한 직류누설전류법은 종래부터 널리 채용되어 온 劣化診斷法이다.

이 측정법은 전원이 소용량으로 해결되며 측정이 비교적 간단하고 또한 전류값, 흡수전류의 형상, 갭현상(부분방전에 의해서 펄스性 전류가 발생하는 현상), 전압특성 등 정보가 풍부하므로 경제적이며 더욱이 현장에 맞는 측정법이라고 말할 수 있다.

측정의 기본회로를 그림 3.5에 나타내었으며 전원은 전지를 사용하면 안정적이나 시판의 직류전원을 내장한 직류 절연저항 측정장치를 이용해도 좋다.

직류인가 전압은 케이블 사용전압에 의해서 다르나 電氣協同研究(電力케이블 절연측정전문위원회)에서는 표 3.1과 같이 전압을 推奨하고 있다.

제2스텝의 고전압인 경우 終端部漏洩電流(氣中코로나



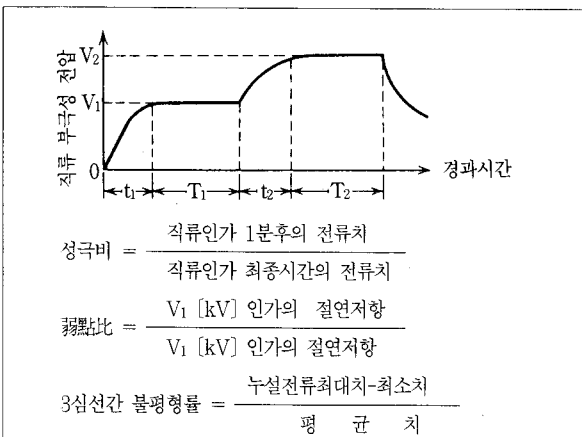
〈그림 3.5〉 직류누설전류의 시험회로

등)가 증가하므로 주의가 필요하나 오히려 제2스텝의 전압은 耐壓試驗의 요소가 높다.

직류누설전류에 의한 판정항목으로서 km당 누설전류 또는 절연저항값, 成極比, 弱點比 및 不平衡率 등이 있다. 여기서 成極比는 보통 1보다 크며, 1보다도 적은 경우 즉시 시간과 함께 전류값이 증대하는 경우는 이상이 있는 것이다.

〈표 3.1〉 직류인가전압 및 시간

| 케이블 계통전압 [kV] | 제 1 스텝 | | 제 2 스텝 | | 참고치전기 설비가중직류 [KV] |
|---------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------|
| | 전압(負) V ₁ [kV] | 인가시간 T ₁ [min] | 전압(負) V ₂ [kV] | 인가시간 T ₂ [min] | |
| 3.3 | 5 | 7 | 8 | 7 | 9.9 |
| 6.6 | 10 | 7 | 16 | 7 | 19.7 |
| 11 | 15 | 7 | 25 | 2 | 27.5 |
| 22 | 30 | 7 | 50 | 7 | 55 |
| 33 | 40 | 7 | 65 | 7 | 82.5 |



弱點比는 전압-전류특성이 나타나며 전압과 함께 전류값이 급증하므로 이상이 있는 것이다. 따라서 절연저항으로 환산하면 전압의 상승과 더불어 절연저항값이 저하되는 것, 즉 약점비가 1보다도 매우 큰 것이 이상이 있는 것이다.

불평형률은 3심간의 언밸런스를 나타내는 것이다. 다만 3심이 똑같이 열화되어 있는 경우에는 적게 나타난다.

한가지 예로서 전술한 電氣協同研究推獎의 22kV 油浸紙 솔리드케이블에 대한 「要注意」의 制定基準은 다음과 같다.

- (1) 직류 30kV승압후 누설전류가 200 μA/km를 초과하는 것
- (2) 30kV에 있어 불평형률이 200% 이상인 것
- (3) 30kV에 있어서 누설전류가 80 μA/km를 넘고 더욱이 成極비가 1.0 이하인 것
- (4) 수천 PC 이상의 직류부분방전전류가 인정되는 것

오히려 弱點比에 대해서는 전술한 바와 같이 제2스텝의 전압이 높으므로 終端部누설전류의 영향을 받기 쉽다. 여기서는 參考値로 한다.

tan δ의 측정은 그림 3.6과 같이 셰링브리지(Schering Bridge)회로 또는 逆셰링브리지회로를 이용하여 행한다.

양쪽 회로의 차이는 대상케이블이 직접 접지되어 있는가 어떨가에 있으므로 어느것을 채용하느냐는 케이블의 布設狀態로 판단하면 좋다.

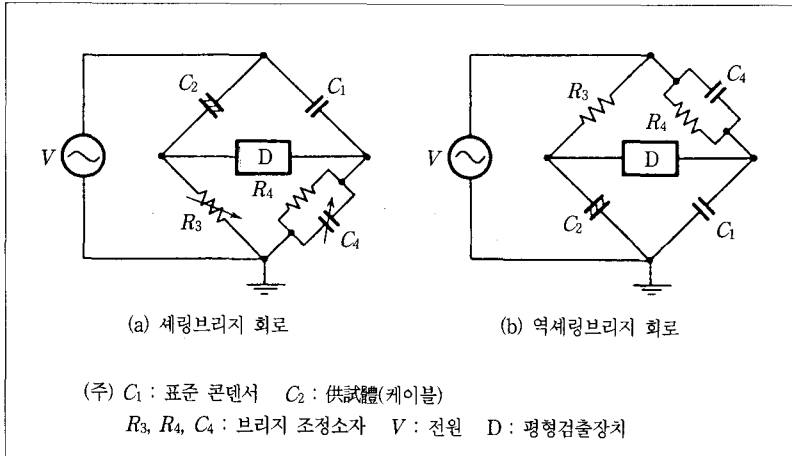
油浸紙 솔리드케이블을 tan δ의 측정에 의해서 劣化診斷을 하는 경우

- (1) 사용전압에 있어서 tan δ의 값
- (2) 사용전압에 있어서 tan δ와 사용전압의 1/2에 대한 tan δ와의 차이를 布設直後の 특성과 비교하여 劣化判定의 자료로 한다.

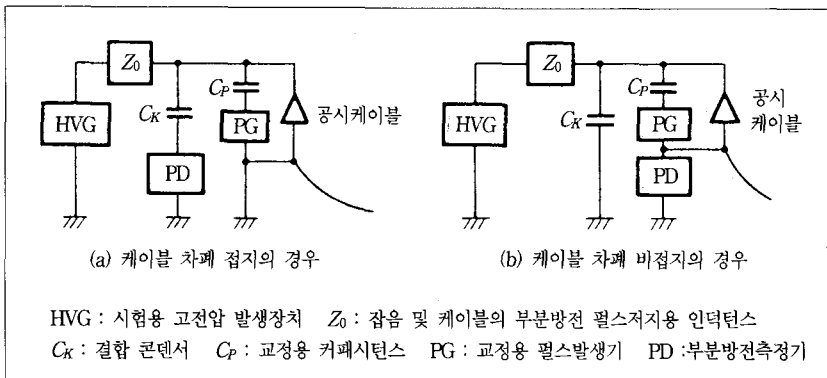
본래 tan δ의 측정은 케이블이 광범위하게 열화되어 있는 경우와 짧은 試料에서는 유효하나 길이가 긴 布設케이블의 경우에는 劣化를 파악할 수 없는 경우가 많다.

즉 健全部가 많이 포함되어 있는 포설케이블인 경우 吸

기술연재



〈그림 3.6〉 tan δ 측정회로



〈그림 3.7〉 부분방전측정의 기본회로

濕이나 部分放電의 원인이 되는 보이드 등의 국부적인 열화는 건전부의 특성에 흡수되어 평균화되기 때문이다.

〈표 3.2〉 模擬劣化 케이블의 부분방전 개시전압

| 시료종별 | 방전개시전압 [kV] (약 40pC 발생전압) | |
|----------------|---------------------------|---------------|
| | 0.1Hz | 50Hz |
| No.1 (건 전) | 25kV에도 발생치 않음 | 25kV에도 발생치 않음 |
| No.2 (연 면 (1)) | 3.5 | 4.0 |
| No.3 (못박는 것) | 11.5 | 13.0 |
| No.4 (구멍만들기) | 9.5 | 11.0 |
| No.5 (일부흡습) | 55.5 | 6.0 |
| No.6 (흡습) | 2.5 | 2.5 |
| No.7 (탈유) | 8.0 | 9.0 |
| No.8 (연 면 (2)) | 3.5 | 4.0 |
| No.9 (사용중열화) | 14.5 | 15.0 |

2. 부분방전

油浸紙 솔리드케이블과 그 접속부에서 舍浸油의 유출에 의한 보이드, 紙切, 外傷, 浸水 등의 검출에는 교류에 의한 部分放電試驗이 효과적이다.

부분방전측정의 기본회로를 그림 3.7에 나타낸다. 같은 그림의(a), (b)는 모두 펄스 회로적으로는 매우 같으나 實線路에서는 케이블차폐층을 접지한 그대로 측정할 수 있는 그림(a)의 회로가 사용되고 있다.

油浸紙 솔리드케이블의 劣化和 部分放電의 관계에 대해서는 다음과 같은 예가 있다.

22kV 150mm² SL케이블에 각종 열화를 模擬한 결함을 제작하여 부분방전을 측정한 결과를 표 3.2에 나타내었다. 이 결과 각종 模擬劣化케이블의 방전개시전압은 劣化狀態에 따라서 상당한 차이가 있다. 즉 吸濕케이블이 가장 낮은 전압치를 나타내었고 다음에 沿面劣化, 一部吸濕 및 脫油의 순서이다.

부분방전은 직류에서는 발생되기 어렵고 商用周波에서는 吸收電流 때문에 전원장치가 커야 되므로 超低周波를 이용한 실험을 실행한 바 0.1Hz의 放電開始電壓은 50Hz보다 약간 낮은 값을 나타내고 있다.

현장에 있어서 부분방전의 측정감도는 적어도 30pC 정도는 필요한데 實線路에서는 수100~1,000pC의 外來雜音을 많이 받으므로 그 대책이 중요한 과제로 되어 있다. 현재 외래잡음 제거방법으로는 差動法, 雜音論理辨別法 및 光파이버 檢出法 등 각종 방법이 제안되어 있다. 이상과 같이 부분방전시험은 油浸紙 솔리드케이블의 劣化制定에 유효하게 이용될 수 있다고 생각된다.

부분방전의 판정기준은 명확히 정해져 있지 않으나 22kV

SL케이블에는 사용전압이 약 1,000pC 이상의 방전이 인 정된 경우 주의하도록 하고 있다.

電氣協同研究에 의하면 22kV SL케이블 38회선에 대해서 직류누설전류와 동시에 직류부분방전을 측정하였는데 직류부분방전도 국부적인 열화의 검출에 유효하다고 하였다.

3.2.3 OF케이블의 劣化診斷

OF케이블의 경우 케이블本體, 終端部, 接續部는 전부 절연유로서 加壓되어 있기 때문에 기본적으로는 劣化가 발생하기 어려운 구조로 되어 있다.

만약 기름이 충전된 상태에서 열화가 발생하여도 이것은 장기적으로 서서히 저하되는데 그런데도 이것이 절연과피로 직접 연결되는 것은 아니다. 이를 위하여 OF케이블의 劣化 診斷으로서는 밀폐상태를 지시하는 유압감시 등의 通常點檢 이외에 절연유의 조사밖에 없는 것이 현상이다. 또한 절연유의 조사도 현재는 특정 선로를 대상으로 실시되고 있다.

1. 油壓, 油量監視

OF케이블의 절연유가 외부로 누설되고 유압이 負壓(大氣壓 또는 大氣壓 이하)이 되면 소위 OF케이블의 기능을 상실하기 때문에 절연과피에 이른다. 漏油(또는 漏가스)는 ① 접속부의 鉛工이나 플랜지 등의 접합부 ② 진동이나 신축, 외곡 등의 반복피로에 의한 金屬外裝의 균열 ③ 外傷 등이 원인이 되고 있다.

OF케이블의 유압, 유압감시는 통상 경보장치가 서치되어 있는 것이 많으나 정기적인 순시와 순회로서 행하고 있다. 더욱이 OF케이블의 漏油가 미소하다면 전기사고로 반드시 연결되는 것이 아니고 負壓이 되지 않도록 기름을 보강하면 송전을 계속할 수 있다.

2. 絶線油調査

OF케이블의 절연유조사는 비과피로서 케이블의

절연상황을 알기 위하여 가장 효과적인 수단이다. 현재로서는 가장 유일한 실체적 絶線診斷法이다.

a. 가스분석 : OF케이블의 절연유 및 절연지의 가스분석을 행함으로써 열화의 정도를 알 수 있다. OF케이블의 절연체는 절연유와 절연지의 복합체이므로 그 열화는 절연유의 열화와 절연지의 열화가 중첩된 형태로 진행하게 된다. 이 열화를 촉진하는 주요 원인으로는 ① 酸化劣化 ② 熱劣化 ③ 課電劣化로 생각된다.

이 중에서 酸化劣化는 절연유가 산소와 공존함으로써 발생하는 酸化反應으로써 서서히 진행하는데 이때 劣化過程은 다음과 같다:

알킬벤젠類 → 過酸化物 → 케톤 → 有機酸 → H₂O, CO₂

산화열화는 전술한 바와 같이 절연유가 공기에 노출되는 경우에 현저히 나타나는데 OF케이블에서는 제조시와 케이블 접속시 공기에 접촉되는 절연부가 이후에 脫氣處理되어서 밀폐되므로 熔存酸素量은 0.1% 이하가 되고 통상 酸化劣化는 거의 발생되지 않는다.

熱劣化는 절연지와 절연유의 종류에 관계없이 거의 똑같이 발생한다고 생각되며 절연지의 열분해에 의한 가스로서는 주로 CO₂, CO, H₂O가 발생된다. 한편 절연유의 열분해가스로서는 주로 CO, CO₂, CH₄가 발생하는데 油中放電 등이 큰 에너지가 가해지면 H₂나 C₂H₂가 발생하는 일이 많다.

課電劣化는 高電界상태에 있는 절연유가 化學組成에 따라

〈표 3.3〉 OF케이블의 劣化要因과 발생가스

| 열화의 요인 | | 열화 현상 | | 절연유 종류에 용해 |
|------------------|-----|-------------------|---|---------------|
| 산화열화 | | 알킬벤젠류 → 과산화물 → 케톤 | CO ₂ , H ₂ O | |
| | | → 유기산 → | | |
| 열열화 (유중방전 포함) | 절연지 | 열분해가스발생 | CO, CO ₂ , H ₂ O | |
| | 절연유 | 열분해가스발생 | CO, CO ₂ , CH ₄ , C ₂ H ₄ C ₂ H ₂ , H ₂ | |
| 과전열화 | | 분해가스발생 | H ₂ , C ₂ H ₂ | |

기술연재

서 분해가스를 발생하게 되는데 주로 H₂, C₂H₂가 발생된다.

이상에서 설명한 바와 같이 어떠한 劣化要因에 대해서나 분해가스가 발생하여 이것이 油中에 용해擴散되어 있으므로 절연유 중에 용해하는 분해가스를 추출하여 定量分析한다면 절연열화의 원인과 정도 혹은 절연열화의 위치를 어느 정도 추정할 수 있다. OF케이블의 劣化現象과 發生가스의 관계를 종합하면 표 3.3과 같다.

b. 絶緣油의 特性調査 : OF케이블에 공기나 水分이 혼입되어 있는 경우에는 케이블의 tan δ 증대와 절연저항저하 및 절연파괴강도의 저하를 초래한다. 오염된 異物이 혼입하는 경우에도 똑같이 케이블의 특성은 저하된다. 한편 鉛工 作業時 鉛工溫度管理의 불충분에 의한 가열과 또는 토양이 건조하여 그 부분의 토양열저항이 증대함으로써 케이블 운용시, 국부적으로 이상고온이 발생하는 경우에도 절연유가 열화되어 특성이 변화한다.

따라서 OF케이블 선로에서 케이블 내부를 가장 대표할 만한 적절한 방법으로써 정기적으로 절연유를 샘플링하고 절연유의 특성 레벨과추이를 조사할 수 있다면 열화의 원인과 그 정도를 추정할 수 있다. 절연유의 열화요인과 특성과의 관계를 종합하면 표 3.4와 같다.

〈표 3.4〉 절연유의 열화요인과 특성의 변화

| 劣化열화요인 | 현상 |
|-----------|------------------------------|
| 가스·수분의 혼입 | 절연유의 tan δ 증대 절연유의 절연저항저하 |
| 오물·이물의 혼입 | 절연유의 절연파괴도저하 절연유의 변색 |
| 가열과다 | 절연유의 점도증대 |

c. 測定項目과 判定基準 : 절연유의 열화를 측정하는 항목은 전술한 바와 같이 여러 종류가 있으나 이중에는 별로 유효치 않은 것, 色相 등 수치적 평가가 곤란한 것 등이 있다. 여기서 시험의 신속용이성, 품질판정을 위한 유효성으로부터 필요측정항목을 요약하면 다음의 5항목이 된다.

- ① 誘電正接 ② 體積抵抗率 ③ 水分 ④ 絶緣破壞電壓 ⑤ 가스分析

OF케이블은 변압기와 달라서 현시점에서 확립된 판정기준은 아니나 일부 電力會社의 잠정기준치나 또는 표준규격에 의한 規格值 등을 판정의 기준으로 정하면 표 3.5와 같다.

〈표 3.5〉 劣化判定基準

| 항목 | 기준치 | |
|---------------|--------------------------------------|-------|
| 유전정접(80℃) | 2% | |
| 절연저항(80℃) | 1×10 ¹³ Ω-cm | |
| 절연파괴강도 | 30kV/2.5mm gap | |
| 수분 | 10ppm | |
| 가스분석 (ppm) | 가연성가스총량 | 1,500 |
| | H ₂ (수소) | 500 |
| | C ₂ H ₂ (아세틸렌) | trace |
| | CO(일산화탄소) | 100 |
| | CO ₂ (이산화탄소) | 1,000 |
| | CH ₄ (메탄) | 200 |
| | C ₂ H ₆ (에탄) | 200 |
| | C ₂ H ₄ (에틸렌) | 200 |

또한 길이가 긴 實線의 실험에 있어서 샘플링의 위치문제로부터 열화를 適格하게 파악할 수 없는 케이스도 있어 앞으로 데이터의 중첩이 필요하다. 오히려 半合成紙에 있어서 實線路에 대한 절연유의 추적조사사례가 매우적으므로 판정기준을 정하는 것은 앞으로의 과제이다.

3. 其他

OF케이블이 국부적으로 오손된 경우 원리적으로는 汚損部의 tan δ가 크고 경우에 따라서는 局部發熱도 있을 수 있다.

이로부터 저주파 tan δ의 측정, 케이블온도측정(스팟, 全長), 熱流計에 의한 측정 등이 검토되고 있으나 어느 것이나 현시점에서는 실용적으로 劣化를 검출하기가 곤란하여 앞으로의 연구과제로 남아있다.

부분방전의 측정이나 음향적수법도 검토되고 있으나 어느 것이든 실용적이지 않다. 방사선(X선, γ선)조사에 의한 촬영은 예를 들면, POF케이블의 코어 이동, 접속부 내부의 상황 및 外傷의 조사 등에는 유효하게 이용되고 있다.

(다음호에 계속)