

CV 케이블의 새로운 診斷法

CV케이블은 그 우수한 절연성에 의하여 널리 보급되고 있다. 당초 폴리에틸렌은 화학적으로 인정되어 있고 우수한 절연재료로서 기대되어 왔는데 폴리에틸렌도 화학 트리, 수트리 등이 발생하여 절연 열화가 된다는 것이 명백해졌다. 전식가고방식 재료관리, 3층 동시압출기술 등의 기술이 개발되어 거의 완성된 것 같다. 그러나 보우타이狀 수트리의 일소는 곤란하며 수명을 정확히 파악하는 기술의 개발이 기대되고 있다.

이 열화판정의 수단으로서는 종래의 1000V 메가 측정으로는 불가능하다. 통상의 케이블의 절연저항치는 매우 높은 값이 되는데 1000V 메가로는 이 높은 절연저항치의 측정이 불가능하기 때문이다. 열화판정기준의 표준화에 의하여 현장 시험에서의 트리의 조기발견이 요구된다.

현장 시험에서는 시설조건에서 공장시험과는 달리 그에 적합한 시험장치, 시험방법이 필요하다. 여기서 현장시험에서의 유의점, 케이블 열화의 요인, 현장시험에 접하여 열화를 효율적으로 발견하는 방법에 대하여 실례를 들어 해설하기로 한다.

1. 現場試驗에서의 留意點

공장시험에서는 케이블 단독의 절연진단을 할 수 있으므로 문제가 되지 않는데 수전설비에 설치된 케이블은 개폐기, 애자 및 케이블 표면의 누설전류의 영향 때문에 개폐기, 애자 등의 절리가 필요하다. 그러나 이것은 시간적인 문제이고 현장에서는 좀처럼 실시할 수 없는 것이 현상이며 절리시켜도 케이블의 표면의 오염에 의한 절연저하 때문에 그 내부

저항을 측정할 수 없다. 이 내부 절연물의 절연 파괴에 의하여 지락사고가 발생하여 파급사고로 이르는 케이스가 있다.

A社의 진단결과에서 통상의 케이블의 내부 절연 저항은 100만(MΩ) 이상이며 그 이하는 초기열화(트리의 발생 등) 또는 단말처리에 문제가 있는 것으로 생각된다.

2. 케이블의 劣化要因

케이블의 구조 등은 생략하고 여기서는 열화 특히 트리에 대하여 해설하기로 한다.

케이블의 열화진행과 함께 절연파괴에 이르기까지에 발생하는 현상에는 외상 등의 불의의 사고에 의하여 절연성능이 급격히 저하되는 것을 제외하면 일반적으로 다음 4종류의 열화요인과 그 현상을 생각할 수 있다.

(1) 熱的 劣化

케이블을 구성하는 재료는 허용치를 초과하는 온도가 되면 산화, 분해, 휘발등에 의한 화학반응생성물이 이온화하여 절연저항을 저하시켜 내전압성능을 저하시킨다. 직류 누설전류에서는 검출되는데 부분방전에서는 검출의 예가 없다.

(2) 電氣的 劣化

고무, 플라스틱 등의 유기재료의 전기적 열화의 주요인은 코로나 열화나 트리 열화이다. 코로나 열화는 절연체 중의 보이드, 절연체와 차폐층 간의 틈 등에서 코로나 방전이 발생하여 서서히 절연체를

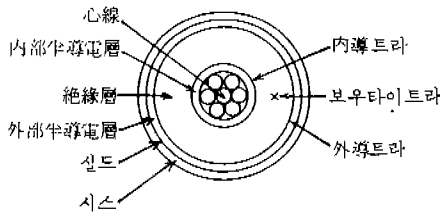
침식하므로 내전압성능이 저하된다. 또한 전기트리 열화에서는 차폐층상의 예리한 돌기에서 高電界에 의한 국부 파괴가 발생하여 서서히 수지상으로 진전하여 내전압성능이 저하된다.

이 열화는 부분방전으로 검출되는데 현장에서는 노이즈가 크기 때문에 노이즈를 제거하는 연구가 필요하다. 보이드 내에서의 절연저항이 낮으면 코로나 방전은 소멸되어 버리므로 주의를 요한다.

(3) 吸水劣化

고무, 플라스틱 등의 유기재료의 흡수현상은 단시간이라면 문제가 되지 않는데 장시간 잠겨 있으면 약간 흡수하여 전계가 가해지면 수지상으로 물이 진전되어 수트리가 발생한다. 内導水트리나 外導水트리는 케이블 차폐층의 돌기에서 또한 보우타이트 수트리는 절연체 중의 보이드나 이물에서 발생한다.

이들 수트리는 직류누설전류나 誘電正接의 측정에서는 검출되는데 부분방전 측정에서는 검출되지 않는다(그림 1).



〈그림-1〉 수트리의 발생

(4) 化學的劣化

유류나 화학약품류를 취급하는 석유화학공장 등에서 문제가 된다. 그 형태는 팽창, 용해, 균열, 화학 트리(수지상 유화동결점으로 도전성이 있다) 등이며 내전압성능을 저하시킨다.

이온성의 용제에 의한 팽창, 용해 및 화학트리는 직류누설전류나 유전정접의 측정에서는 검출할 수 있다. 균열의 검출에는 부분방전 측정을 생각할 수 있는데 측정실적은 없다.

이와 같이 케이블의 경우에는 직류고압에 의한 절연진단이 가장 효과적인 방법이라고 하겠다.

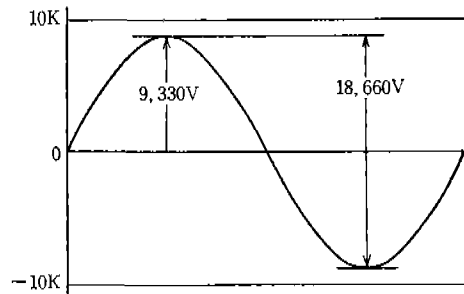
3. 直流高圧 診斷方法

(1) 印加電圧

절연진단에서 인가전압을 어느 정도로 할 것인지가 열화를 발견하는데 중요한 포인트가 된다. 인가전압이 높을수록 트리의 발견율이 높아진다는 것이 전력회사, 전선 메이커 등의 보고가 있다.

6600V를 수전하고 있는 설비라면 그 순간 전압의 최대치는 $6600V \times \sqrt{2} = 9300(V)$ 가 되므로 DC 10000V를 인가해도 무방하다. 그림 2와 같이 교류의 경우에는 마이너스의 피크에서 플러스의 피크까지 18660V가 된다. 또한 60Hz라면 1초간에 60회의 진동이 있으므로 상당한 스트레스가 있다. 그에 비하여 직류의 10000V가 인가될 경우에는 시간적으로 변동되지 않으므로 교류보다 스트레스가 작다고 하겠다.

트리가 발생하고 있어도 인가전압이 DC 1000~4000V 정도에서는 절연저항치는 항상 높은 값을 나타내는데 DC 5000~10000V를 인가하면 급격히 절연이 저하된다. 인가전압이 높을수록 트리의 발견율이 높다고 할 수 있다.

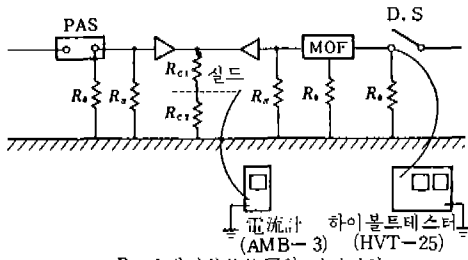


〈그림-2〉 試驗電壓

(2) 效果的인 診斷方法

등가회로(그림 3)에서 케이블 내부 절연층에 흐르는 누설전류를 케이블의 실드에서 검출하여 고압도 전류계에 의하여 누설전류를 측정한다. 이 방법에 의하면 케이블에 개폐기 및 애자 등이 접속되어 있어도 케이블의 절연진단은 지장을 받지 않고 할 수 있다.

하이볼트테스터의 전류계에는 고압기기의 누설전



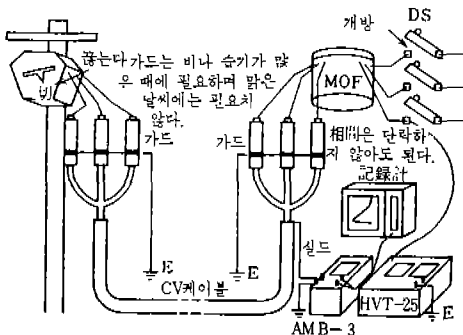
R_{c1} : 케이블絕緣層의 절연저항
 R_{c2} : 케이블시스의 절연저항
 R_3 : 케이블表面의 절연저항
 R_6 : 高壓機器의 절연저항

〈그림-3〉 실드檢出方式

류, 케이블 표면의 누설전류, 케이블 절연층의 누설전류의 합성치가 흐른다. 이 합성치는 고압기기 등의 진단에 유효하고 특별고압 송전선에 의한誘導의 영향도 조사할 수가 있다. 한편 고감도전류계에는 케이블 절연층만의 누설전류가 흐른다. 이 전류치가 케이블 진단판정재료가 된다. 케이블의 충전전류를 기록할 경우에는 이 실드전류를 기록하면 된다.

※ 진단에 있어서는 절연물에 흐르는 누설전류(μA)의 절연치로 판정한다. 진단장치를 ($M\Omega$) 표시로 하면 對數눈금이 되며 절연저항이 높을수록 오차가 생긴다.

실체도는 그림 4와 같다. 상에서 실드어드가 되어 있는 경우에는 그 어드를 제거한다. 주상 PAS, 전기실 내 DS를 끊는다. 전기실 내에 있는 케이블의 실드를 어드에서 제거하고 거기에 직류전류계를 접속한다. DS의 1차측에 직류고압을 인가한다. MOF가 붙어 있는 경우에는 3상을 단락할 필요는 없다.



〈그림-4〉 直流高壓絶緣診斷의 實體圖

(3) 트리發生케이블의 診斷結果

다음에 수트리가 발생한 케이블의 진단결과를 소개한다. 이 데이터는 동일 케이블을 당일 (A) 사와 (B)사에서 진단한 것이다. 표 1은 2사의 진단결과이다.

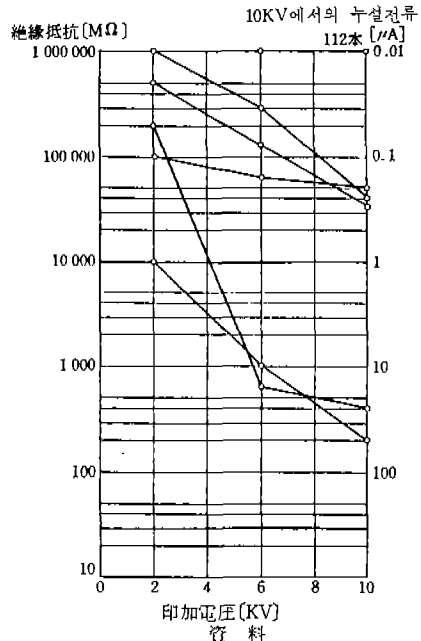
(A)사의 진단결과: (A)사는 실드 검출방식에 의하여 케이블의 내부 절연저항을 측정했다. 전압을 2KV, 6KV, 10KV로 높게 할수록 절연저항치가 저하되고 있으며 약점비가 나쁘고 또한 10KV에서의 절연저항치가 10만 $M\Omega$ 이하이므로 불량으로 판정했다.

(B)사의 진단결과: (B)사는 직류고압 진단 장치

〈표-1〉 케이블의 診斷結果

印加電壓	(A)사에 의한 診斷 内部絶緣抵抗測定	(B)사의 종래로부터의 診斷 表面絶緣抵抗測定	參考 1000 메가 at 1,000V
2,000V	500,000 $M\Omega$	10,000 $M\Omega$	2,000 $M\Omega$ at 1,000V
6,000V	125,000 $M\Omega$	10,000 $M\Omega$	
10,000V	35,000 $M\Omega$	9,000 $M\Omega$	
結果	不 良	良 好	良 好

(6,600V CV22*3, 시공 1970년, 발전 1983년)
 ※ 診斷回路-引키케이블 130m, 포함기기 PAS, LA, DS



(A)사의 診斷方法에 의한 診斷結果
 電壓-抵抗特性

의 합성전류치에 의한 절연저항치를 측정하고 있다. 기기 등의 절연저항치가 나타나 있고 케이블 내부에서의 열화의 추이는 나와 있지 않다. (B) 사에서는 케이블의 내부 절연저항의 판단기준이 없고 약점비가 거의 1이므로 양호한 것으로 판단하고 있다.

이 케이블을 절거한 후 조사해본 결과 케이블 절연체 두께 80%까지 트리가 발생하여 절연체 관통 직전의 内導트리가 관찰되었다. 내부 절연저항은 표면절연저항에 비하여 비교가 되지 않을 정도의 높은 절연저항치이므로 종래의 방법으로는 발견할 수 없는 것이 현상이다.

이밖에 절연진단을 한 불량 케이블의 샘플을 그래프로 표시했다(자료 참조).

(4) CV케이블의 劣化判定基準

(A)사에서는 열화의 판정기준을 누설전류치와 약점비의 두가지 점에 초점을 맞추고 있다.

(a) 漏洩電流의 最終値(漏洩電流值)

10KV DC를 인가하고 수분 후의 누설전류치(최종치)를 측정한다. 이 값에 의하여 열화를 판정한다. 표2와 같이 된다.

그러나 (A)사의 실례에 의하면 표2 보다 한자리 낮은 값으로 되어 있으며 표3과 같다.

(b) 電壓의 變化에 의한 絶緣抵抗의 變化(弱點比)

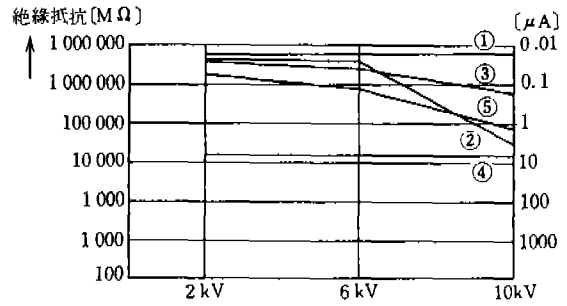
전압을 2KV, 6KV, 10KV로 차례로 인가하여 각 전압에서의 절연저항을 측정하여 比를 구한다.

$$\text{弱點比} = \frac{\text{제 1 스텝의 전압에서의 절연저항치}}{\text{제 2 스텝의 전압에서의 절연저항치}}$$

이 약점비의 판정기준은 표4와 같이 된다.

이상 이들 2 항목의 결과에서 (A)사에서는 CV 케이블의 열화를 판정한다.

그림 5와 같은 진단결과가 나왔을 경우에 (A) 사



〈그림-5〉 弱點比와 診斷例

에서는 다음과 같이 판정을 내린다. ①의 케이블은 10KV 인가시의 누설전류치도 0.1μA 이하이고 약점비도 1이므로 양호하다. ②의 케이블은 2KV, 6KV까지는 약점비도 누설전류치도 양호했는데 10KV를 인가했을 때 누설전류치가 1μA를 초과하여 약점비도 커지고 있다. 이같은 케이블은 단말처리가 나쁜 경우가 많다. ③의 케이블은 2KV, 6KV까지는 약점비도 누설전류치도 양호했는데 10KV를 인가했을 때 누설전류가 0.1μA를 초과하여 전류치의 값이 요주의 대상으로 들어갔고 약점비도 커지고 있다. 이와 같은 케이블은 요주의 대상이므로 다음의 진단주기를 단축시키도록 한다. ④의 케이블은 누설전류치가 불량으로 되어 있는데 약점비는 1로서 양호하다. 이 경우는 약점비에서만 양호한데 전류치가 불량이므로 이 케이블은 불량이다. 그러나 실제로는 이같은 케이블은 존재하지 않는다. 진단방법에 잘못이 있는 것이다. ⑤의 케이블은 불량 케이블의 대표적인 예로서 신속히 교체한다.

그밖에 다음과 같은 진단항목도 있다.

(c) 漏洩電流의 時間的 變化(成極比)

$$\text{成極比} = \frac{\text{전압인가 1분 후의 누설전류치}}{\text{전압인가 규정 후의 누설전류치}}$$

전압을 인가한 후의 누설전류의 변화를 본다. 그

〈표-2〉 漏洩電流值 判定基準

	CV케이블	BN케이블
良好	1μA以下	10μA以下
要注意	1~10μA	10~50μA
不良	10μA以上	50μA以上

(高压受電設備指針에서)

〈표-3〉 漏洩電流值 判定基準(A)社

	CV케이블
良好	0.1μA以下
要注意	0.1~1μA
不良	1μA以上

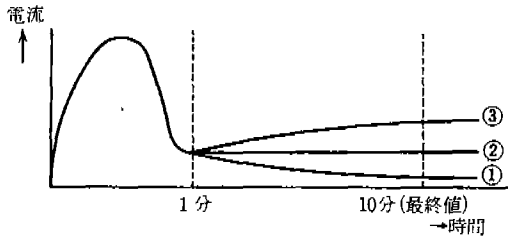
((A)사의 診斷例)

〈표-4〉 弱點比의 判定基準

	弱點比
良好	1以下
要注意	1~5
不良	5以上

〈표-5〉 成極比의 判定基準

	成極比
良好	1以上
要注意	0.5~1
不良	0.5以下



〈그림-6〉 電流의 時間的 變化(成極比)

림 6에서 ①의 경우는 최종시의 누설전류치가 1분치보다 감소되었으므로 양호하다. ②의 경우는 최종시의 누설전류치가 1분치와 같으므로 요주의대상이다. ③의 경우는 최종시의 누설전류치가 1분치보다 증가되고 있으므로 위험한 상태이다.

각 값의 가늠은 다음의 표 5와 같이 된다.

(d) 3線의 漏洩電流의 不平衡(相間不平衡率)

각 상별로 누설전류를 측정하고 전류치의 불평형을 본다. 가령 R상=0.12 μ A, S상=0.15 μ A, T상=0.2 μ A의 경우 상간 불평형률은

$$\begin{aligned} \text{상간불평형률} &= \frac{3\text{상의 누설전류의 최대치} - \text{최소치}}{3\text{상의 누설전류의 평균치}} \\ &\times 100 \\ &= \frac{0.2 \times 0.12}{0.1567} \times 100 \\ &= 51(\%) \end{aligned}$$

불평형률이 200%를 초과하면 요주의대상이다.

4. 케이블診斷의 주의사항

다음에 현장시험에서의 주의사항을 예거한다.

(1) 기록계의 사용

(a) 기기 어드는 반드시 한다. 이 어드는 진단의 어드와는 별도로 한다.

(b) 전압의 인가 직후에는 충전전류가 많이 흐르므로 적어질 때까지 입력은 Off로 한다.

(c) 전압을 제거하면 역방향으로 전류가 흐르므로 입력은 Off로 한다.

(d) 너무 감도가 높은 기록계는 현장의 측정에는 적합하지 않다. 10mV F.S.로 한다.

(2) 메가의 使用

(a) 메가를 사용한 후에는 충전부를 단락하고 전하를 방전하여 3분 정도 기다린 후 케이블을 진단한다. 잔류전하가 있으면 측정전류가 달라진다.

(b) 시스의 절연저항을 측정한다. 이것은 열화과정의 참고가 된다. 통상 100~2000M Ω 있으며 이 값이 낮으면 시스에서 물기가 들어갔을 가능성이 있다.

(3) 실드電流의 測定

(a) 실드가 2개소에서 어드되어 있을 경우에는 1단의 어드는 테이핑을 한다.

(b) 전류계를 넣을 경우에는 실드선을 어드極에서 벗겨 전류계의 플러스와 어드극, 마이너스와 실드선을 접속한다(직류고압진단의 인가는 일반적으로는 負極性).

(c) 휴대형의 전류계를 사용할 경우에는 미리 전류계를 단락하는 회로를 접속해 둔다.

(d) 휴대형의 전류계를 사용할 경우에는 전압이 인가되어 있을 때에 레인지를 바꾸거나 전류계를 빼어내거나 하지 않는다.

(e) 전압을 인가하지 전에 각 미터가 흔들리고 있지 않은지 확인한다. 유도에 의하여 미터가 진동하는 것을 알 수 있다.

(f) 시험이 끝나면 반드시 실드선을 어드極에 접속한다.

(4) 가드의 使用

(a) 실드 검출방식의 경우에는 원칙적으로는 사용하지 않아도 된다. 강우 등으로 케이블 표면의 누설전류가 많은 경우에는 사용한다.

5. 케이블 診斷上의 의문점

(1) 흔히 누설전류는 케이블의 길이, 굵기에 관계가 없는지의 질문을 한다.

엄밀히 말해서 누설전류는 길이와 굵기에 관계가 있다.

$$R = \rho \frac{l}{s}$$

에 의하여 절연저항은 길이에 비례하고 단면적에 반비례한다. 따라서 케이블이 길어지면 극간의 면적이 증가되어 절연저항은 작아지고 또한 케이블이

짧아져도 극간의 면적이 증가되어 절연저항은 작아진다. 가령 38mm²와 100m의 CV케이블과 38mm²와 1km의 CV케이블을 비교할 때 1km의 케이블의 절연저항은 1/10이 된다. 이 관계에서 100m의 케이블과 1km의 케이블에서는 같은 전압을 가했을 경우 1km의 케이블쪽이 10배의 누설전류가 흐르게 된다. 그러나 절연저항의 값이 10¹²Ω/km 이므로 10000V인가해도 1km의 케이블에서는

$$i_{1000} = \frac{10000}{10^{12}} = 0.01 [\mu A]$$

100m의 케이블에서는

$$i_{100} = \frac{10000}{10^{12}} = 0.001 [\mu A]$$

밖에 흐르지 않는다. 이 0.01μA와 0.001μA의 전류치의 차이는 현장에서는 측정이 곤란하다. 또한 이것을 기록계로 측정할 경우를 생각해본다. 전류 검출에 10KΩ의 저항을 사용한다면

$$e_{1000} = 10 \times 10^3 \times 0.01 \times 10^{-6} \\ = 0.1 [\text{mV}]$$

$$e_{100} = 10 \times 10^3 \times 0.001 \times 10^{-6} \\ = 0.01 [\text{mV}]$$

가 되며 10mV F. S.의 기록계에서는 1/100과 1/1000의 위치로 되어 판단이 곤란하다(여기서 1mV F. S.의 기록계를 사용하면 된다는 의견도 있는데 너무 정도가 높은 기록계는 현장에는 적합하지 않다). 따라서 케이블의 누설전류는 길이, 굵기에 관계가 없다고 봐도 된다.

우리들이 보려고 하는 전류는 열화에 의한 전류이다. 어떤 1점에서 수트리가 발생하면 케이블의 진정한 절연저항에 의한 누설전류의 몇배나 흐르므로 검출을 할 수가 있다.

(2) 위와 비슷한 의문인데 CV케이블 3선 일괄로 가해도 전류치는 3배가 되지 않는다는 질문도 있다.

절연저항은 1/3이 되므로 누설전류치는 3배가 된다. 그러나 위에서와 같이 절연저항이 충분히 크므로 현장 측정에서는 문제가 되지 않는다.

(3) 직류고압을 인가했을 때에 흐르는 전류의 변화를 기록계로 측정할 필요가 있는지 여부도 문제가 된다.

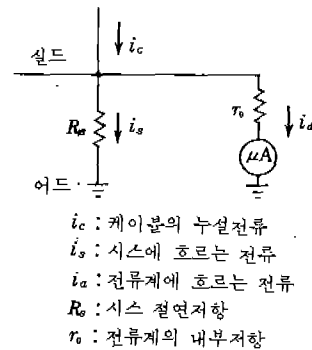
원칙적으로는 없다. 시험결과에 의하면 전류파형의 시간적 변화와 케이블의 열화의 상관관계는 없

다. 있는 것은 전류가 정상상태로 안정이 되었을 때의 절연저항치 뿐이다.

가령 성극비가 나쁜 경우에도 절연저항이 크면 열화되어 있지 않으며 성극비가 양호한 경우에도 절연저항이 작으면 열화되어 있다 즉 기록계는 필요가 없다. 그러나 전류의 시간적 변화는 열화판정의 판단재료의 하나가 되고 후일 기록의 정리에 편리하므로 기록계로 기록을 취할 것을 권장한다.

(4) 시스 절연이 나쁘면 실드 검출방식은 적용할 수 없는 이유는 무엇인가의 질문이다.

전류계를 실드와 어드 간에 삽입했을 때의 등가 회로는 그림 7과 같이 된다.



〈그림-7〉 케이블電流의 等面回路

전류계에 흐르는 전류는

$$i_a = i_c \frac{R_s}{R_s + r_0}$$

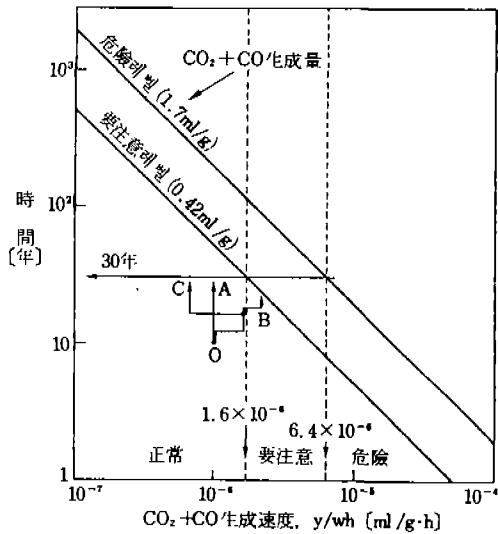
여기서 Rs와 r0를 r라 가정하면

$$i_a = i_c \frac{r}{r+r} = \frac{i_c}{2}$$

가 되며 전류계에는 케이블의 누설전류의 1/2밖에 흐르지 않으므로 오차를 가급적 작게 하기 위해서는 시스 절연저항이 전류계의 내부저항에 대하여 충분히 커야 된다. 가령 1%의 오차로 억제하기 위해서는 Rs > 100 r0의 관계가 필요하다. 이 진단의 경우에는 최저 10배의 시스 절연저항치가 필요하다(AMB-3의 3μA 레인지의 내부 저항치는 약 70KΩ이므로 700KΩ 이상의 시스 절연저항치가 필요하다).

(5) 직류고압진단장치의 어드極을 케이블의 실드에, 가드極을 아드에 접속하는 진단방법이 일반적으로 실시되고 있는데 여기에 대한 사고방식을 설

(91페이지로 계속)



〈그림-5〉 絶緣紙의 經年劣化時間과 CO₂+CO 生成速度와의 關係

화가 그 상태에서 진행하면 30년 이상의 수명이 된다.

그러나 절연지의 가열열화속도가 크게 되어 B의

경로가 진행하면 30년이하의 수명이 된다. 도중에서 열화속도가 저하하면 C와 같이 30년 이상이 된다.

상술한 것은 변압기의 경년열화도·수명을 진단하는 구체적인 하나의 방법을 표시한 것이다.



유중가스 분석에 의한 변압기 이상진단 기술은, 공식으로 확립된지 약 10년이 되어 현재는 세계적으로 보급되고 있다. 그동안 분석기술은 향상하는 한편, 컴퓨터, 가스센서등의 기술도 진보하고 있다. 절연유중의 CO₂+CO에 의한 변압기의 경년열화도·수명진단방법은 이제 겨우 연구를 시작할때 불과하다.

앞으로 분석치의 취급방법 實器와의 대응등에 대해서 검토해 나가지 않으면 안된다.

이상 최근의 유중가스 분석에 의한 변압기 이상진단기술과 앞으로의 과제, 응용등의 개략을 정리했다. 앞으로 이러한 기술은 더욱 발전할 것으로 확신한다.

(본문중 연구소 보고등은 일본의 경우임) *

(85페이지에서 계속)

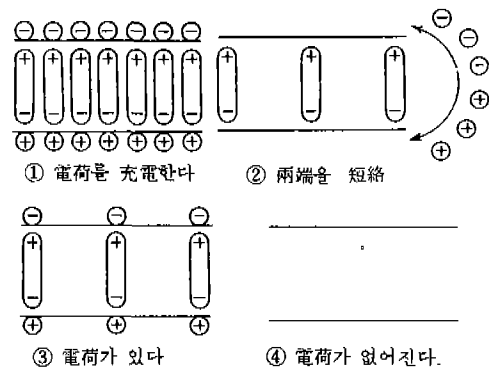
명한다.

사고방식은 실드 검출방식과 마찬가지로인데 이 방식이 좋다고 생각되지는 않는다. 그 이유의 첫째는 이 방식이면 PAS, MOF 등의 열화를 알 수가 없다. 진단은 CV 케이블이 주목적인데 설비의 진단도 할 필요가 있다. 둘째로는 케이블에 흐르는 전류를 보는 것이 아니고 발생측의 전류도 불필요가 있다. 케이블에 흐르고 있는 전류가 변동하고 있을 경우에 유도에 의한 것인지 발생측에 의한 것인지를 판단할 필요가 있기 때문이다.

(6) 케이블 진단의 주의사항에서 매가를 가한 후 電荷를 방전시키기 위해 충전부를 단락하여 전하를 방전하고 3분 정도 기다린 후...가 있다. 이것을 보충설명하다.

직류전압을 가하면 그림 8 과 같이 誘電體의 양쪽에 전하가 모여 電氣雙極子는 규칙적으로 배열된다. 전압을 제거하고 양단을 단락하면 그 순간 전하는 없어지는데 전기쌍극자는 일부 규칙적으로 배

열되어 있으므로 전하가 다시 모인다. 따라서 이시점에서 진단을 시작하면 이 전하가 누설전류에 영



〈그림-8〉 電荷의 放電

향을 미친다. 미소한 전류치를 취급하므로 이 전하가 큰 영향을 미친다. 3분 정도 기다리면 전기쌍극자가 여러 가지 방향으로 향하게 되므로 전하도 소멸된다. *