

# 현장실무자를 위한 설비진단 테크닉(9)

전기는 응용하는 기술의 발달에는 실로 눈부신 바가 있다.  
전기를 깨끗하고 안전한 에너지원으로써  
또, 컴퓨터나 통신에 이용되는 정보전송의 매체로서  
널리 사용되어 최근에는 광이나 초음파의 분야도 포함하여  
얼줄 모르는 진보를 계속하고 있다.  
우리들은 그 전부를 볼수는 없으나, 미래기술이라는 거대한 양상에 대하여  
비록 기술의 단편이라도 많이 모아 쌓이면 많은 참고가 될 것이다.  
본고에서는 이를 위해 전 13장을 번역 게재할 예정이다.

## 글 실는 순서

- |     |   |      |                       |
|-----|---|------|-----------------------|
| 제1장 | 예지보존에의 기초기술<br>· 이상예지를 위한 데이터 처리<br>· 열화 프로세스에서의 이상예지 | 제7장  | 케이블 열화의 간이측정          |
| 제2장 | 운전감시로 되는 상태의 추정<br>· 운전상태를 아는 테크닉<br>· 이상 발생후의 상태진단   | 제8장  | 롤러 베어링의 진단 테크닉        |
| 제3장 | 기기에 의한 외부진단 테크닉                                       | 제9장  | 전력전자 기기의 수명예측         |
| 제4장 | 가스절연기기의 내부진단  | 제10장 | 콘덴서 개폐와 보수유지          |
| 제5장 | 리모트 센싱에 대한 설비진단                                       | 제11장 | 큐비클의 방식기술             |
| 제6장 | 변압기의 예지 보전  | 제12장 | 보전용 계기와 사용법           |
|     |   | 제13장 | 센서에 사용되는 여러가지 성질과 활용법 |

# 제 7 장 케이블열화의 간이측정

역/대한전기기사협회

## 서 론

전력케이블의 기능은 송전이며 송전중에 절연파괴 사고를 일으키지 않는 것이 가장 중요한 과제이다. 그런데 부설된 케이블은 사용중에 여러가지 요인에 따라 열화하기 때문에 절연열화를 측정해서 절연파괴 사고를 미연에 방지해야 한다.

근래에 CV케이블을 중심으로 한 고무나 플라스틱 케이블은 600V서부터 특별고압에 이르기까지 범용화되고 있다. 이러한 고무나 플라스틱 케이블의 절연열화를 염두에 두고 열화측정에 대해 간이측정과 정밀 측정 또는 현장측정과 공장측정을 비교해서 설명한다.

1항에서는 절연열화 측정법의 개략, 2항에는 직류누설전류법, 3항에서는 유전탄젠트측정에 대하여 설명한다.

### 1. 케이블의 절연열화 측정법

송전을 목적으로 한 케이블은 일반적으로 20~30년의 수명이 요구되고 있으나 고무나 플라스틱 케이블에 대해서 말하면 (i) 열열화 (ii) 전기적인 열화 (iii) 흡수열화 (iv) 화학적인 열화에 의하여 열화가 진행하여 수명을 저하시키고 있다. 케이블의 열화 상황을 조기에 발견하고 대책을 취하기 위하여 여러 가지 절연 진단이 실시되고 있다. 이러한 것을 <표 1>에 나타내고 있다.

이 중, 현장에서 널리 사용하는 것은 직류누설전류법과 유전탄젠트측정이며 교류내압과 코로나 시험은 장치가 방대해지고 측정이 곤란하다는 점에서 사용이 한정되어 있다. 또한 이 밖에 나타낸 초저주파법(Very Low Frequency)과 고주파 중첩법(High Fr-

equency Superposition Theorem) 등은 아직 연구 단계에 있으며 일반적인 방법은 아니다.

실제의 열화진단에서는 한가지 방법만으로 판단하지 않고 몇가지 방법의 결과에서 종합적으로 열화를 판정하는 일이 많다.

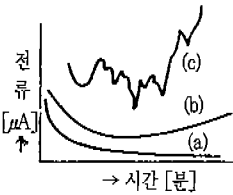
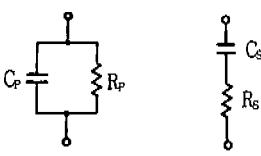
여기서는 현장에서 널리 사용되고 있는 직류누설전류법과 유전탄젠트측정에 대하여 상세히 설명한다.

## 2. 직류누설전류법에 대한 간이측정

### (1) 메거와 절연연계

직류누설전류법 중에서 가장 간편한 측정법은 메거(Megger)를 사용하는 것이며 널리 이용되고 있다. 전압은 DC 500V, 1000V, 2000V 등이며 각각 1000M $\Omega$ , 2000M $\Omega$ , 5000M $\Omega$ 까지 절연저항을 읽고 측정할 수 있다. 이에 대하여 절연저항을 정밀하게 측정하는 데는 초절연계가 있다. 안정화된 직류전압(500~2000V 정도)을 시료에 과전했을 때에 흐르는 누설전류를 표준 저항 양단의 전압으로서 인출하고 입력 임피던스가 극히 높은 증폭기에 의하여 증폭해서 측정한다는 것이 기본적인 원리이다. 예를 들면 DC1000V의 측정 전압에서  $2 \times 10^{16}\Omega$ 까지 절연 저항을 측정할 수 있고 오차도  $\pm 10\%$ 이하로 되어 있다. 메거는 중량이 가벼워서 휴대하기가 편리하며 어떤 장소에서도 운반할 수 있으므로 간편한 측정기이지만 측정전압이 불안정하기 때문에 절연 저항의 측정값에 대한 오차도 수10%정도로 많고 측정 범위도 대개 5000M $\Omega$ 이하로 한정되어 있다. 따라서 메거는 어디까지나 절연 측정에서는 보조적인 수단이라고 생각하는 것이 무난하다. 실제로는 직류고압에 의하여 내압을 시험하기 전

<표 1> 플라스틱 케이블에 대한 열화판정의 지표

종 류	방 법	플라스틱케이블에 대한 열화판정의 지표	특 징	
직 류 누 출 전 류 고 압 류 법	메 커 (간이법)	충전1분후의 절연저항 전압은 500~2000V	0~10MΩ 불 가 10~100MΩ 주의 100MΩ이상 가 이상목표에만	(1) 간편 (2) 고절연저항측정은 불능 (3) 한 열화의 검출불능 (4) 정밀도가 높다 (5) 고절연저항의 측정가
	조절연계			
	직 류	인가전압은 케이블의 공칭전압에 따라 결정되는 고전압 <표 2> (가) 누출전류값	10μA/km이상은 요주의	(1) 판정기준이 명백 (2) 국부적인 열화의 검출가능
	누 출 전 류	(나) 절연저항R 절연저항×정전용량CR 충전후 7분후 또는 10분후의 누출전류값에서 구한다.	100F이하는 요주의	
	고 압 류	(다) 파형 (*) 	(*) (a) 정상인 경우 요 (b) 증가하는 경우 주 (c) 킷전류 수반 경우 의	
	법	(라) 성극비 성극비 = $\frac{\text{전압인가후 1분후의 전류}}{\text{전압인가후 7분후의 전류}}$ (또는 10분뒤의 전류)	10이하는 요주의	
	(마) 상간불평형률 상간불평형률 = $\frac{3\text{상중의 누출전류의 최대값} - \text{최소값}}{3\text{상의 누출전류의 평균값}}$	200%이상은 요주의		
	(바) 약접비 약접비 = $\frac{\text{제1단계전압의 절연저항}}{\text{제2단계전압의 절연저항}}$	10이상은 요주의		
유 전 탄 젠 트	간이세링 브리지	전압을 인가하고 브리지의 평형조건에서 구한다. 유전탄젠트(tanδ)의 등가회로와 계산식은 다음과 같다.	1%이상 불 가 1~0.1% 주의 0.1%이하 가	(1) 전체길이의 평균적인 흡수노화, 열열화를 검출하는데 가장 적합하다. (2) 장치가 커진다.
	세링브리지	 $\tan\delta = \frac{1}{\omega C_p R_p} \quad \tan\delta = \omega C_s R_s$		
코 로 나	교류전압법과 직류전압법이 있다. 방전개시전압, 소멸전압, 방전전하량, 누적발생빈도 등을 구한다.  규정된 교류전압을 10분간 과전	30pc이하 가  절연파괴의 유무	(1) 절연체내의 공간, 외상등의 국부결함을 검출하는데 가장 적합하다. (2) 취급이 복잡하며 숙련을 요한다. (3) 외부잡음제거가 어렵고 현장 측정에는 적합하지 않다. (1) 판정기준의 명백	

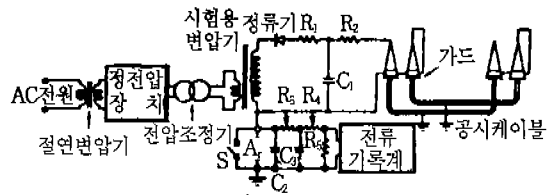
내전압 시험법	교류법			(2) 국부결함의 검출가능 (3) 시험에 의해 약점을 열화시킬 염려가 있다. (4) 장치가 커진다.
	직류법	규정된 직류전압은 10분간 과전(직류누설전류법과 병용한다)	절연과과의 유무	(1) 판정기준의 명백 (2) 국부결함의 검출가능 (3) 취급이 쉽다.
기타 교직중첩법 초저주파법 직류전압상승, 강하법 방전법 고주파중첩법		교류 0.1~0.05Hz 지수감쇠파(시상수, 수초~수10초) 지수감쇠파(시상수, 70ms정도) 고주파 700Hz정도		실시체험은 적으나 앞으로의 연구에 기대하는 바가 크다.

후에 메거로 측정을 해서 절연이 극단적으로 손상이 없는 것을 확인한다는 사용방법을 하고 있다. 이에 대하여 절연연계는 메거에 이어서 취급은 간편하지만 정밀하게 측정할 수 있으며 공장이나 연구실에서는 널리 사용되고 있다. 극히 미소한 전류를 계측하기 때문에 현장에서는 외부 잡음 등의 영향을 받기 쉽고 현장 측정에는 별로 적합하지 않다. 따라서 외부 조건이 양호한 공장에서 케이블의 출하 시험이나 열화 진단 시험에 주로 사용되고 있다.

**(2) 직류누설전류법에 대한 간이측정**

다음에 직류고압법인데 이 방법은 간이측정이라고 말하기는 어려우나 메거나 초절연계에 비하여 어떻게 다른가를 설명해 본다. <그림 1>은 부설 케이블을 시험하는데 잘 사용되고 있는 시험회로의 한가지 예이다. 직류고압법에서는 0.1 $\mu$ A~수mA 정도로 미소한 전류를 측정하기 때문에 직류 고전압V의 시간적인 변화 dV/dt에 따른 충전 전류를 적극적으로 억제하지 않으면 안된다. 이르기 때문에 시험회로에는 전원 전압 변동을 억제하는 정전압 장치와 정류전압의 맥동을 억제하는 적당한 R<sub>1</sub>-C<sub>1</sub>의 평활회로(Smoothing Circuit) 및 전압변동에 따른 충전전류의 억제와 서지전압보호용 저항 R<sub>2</sub>가 설치된다. 또한 직류전압이 높아 짐에 따라 고압 충전부의 코로나 실드(Corona Shield) 및 단말누설전류 제거용의 가드전극이 필요하

게 된다. 메거나 절연연계의 측정과 다른점은 다음과 같다.



- R<sub>1</sub>: 충전저항(1~2M $\Omega$ )
- C<sub>1</sub>: 정류용 콘덴서(1 $\mu$ F)
- R<sub>2</sub>: 보호저항(0.1~1M $\Omega$ )
- C<sub>2</sub>: 지역여과회로용콘덴서
- R<sub>3</sub>, R<sub>4</sub>: 지역여과회로용저항
- R<sub>5</sub>: 표준저항

<그림 1> 직류누설 전류측정회로의 예

(i) 측정 전압이 고전압이며 케이블의 운전 전압과 동등한 레벨이고 열화 검출의 감도가 좋다(<표 2>에 시험 전압과 시간 및 과정 방법을 나타내고 있다).

(ii) 누설전류의 경시변화를 관측함으로써 많은 정보를 얻게 된다.

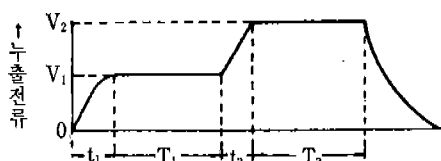
(iii) 전항과 관련하여 성극비, 불평형률, 약점비 등과 같은 지표를 얻게 되고 열화 상태의 정량적인 파악을 할 수 있다.

이상으로 설명한 바와 같이 직류고압법에 의한 누설전류 측정은 열화진단하는데 반드시 필요한 방법이며 메거 등의 간편법에서는 얻지 못하는 식견을

제공하고 있다.

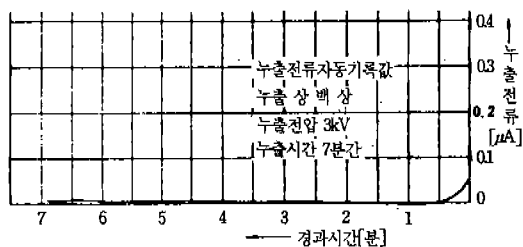
<표 2> 직류인가전압 및 인가시간

케이블 계통	제1단계 전압[kV]	제2단계 전압[kV]	참 고 치 전기설비기준 직류10분내압[kV]
전압[kV]	$V_1$ [kV]	$V_2$ [kV]	
3.3	5	8	10.35
6.6	10	16	20.7
11	15	25	28.75
16.5	22	37	43.13
22	30	50	57.5
33	40	65	86.3
66	90	—	151.8



인가시간→

- (주) (1) 단, 인가시간은 7분( $T_1, T_2$ )
- (2) 22kV 케이블인 경우  $t_1=t_2=30$ 초
- (3) 22kV이하의 케이블인 경우  $t_1=t_2<30$ 초
- (4) 22kV이상의 케이블에서는  $t_1=t_2>30$ 초



(a) 정당



시료 3kVCV 케이블

(b) 이상(키전류를 수반한다)

<그림 2> 직류누출전류측정 예

### 3. 유전탄젠트 측정에 대한 간이측정

유전탄젠트 측정도 직류누설전류법에 이어서 널리 사용되고 있는데 여기서는 간이측정의 대표적인 것으로 간이 세링 브리지(Schering Bridge)와 정밀급의 세링 브리지를 비교해 본다.

#### (1) 간이 세링 브리지

<그림 3>에 의하여 원리를 설명한다. 전원에  $V_0$ 인 전압을 주고 전환스위치(Change Over Switch)를 ①에 접속한 경우에 증폭기에는 입력으로서 AB사이의 전압이 가해진다. 지금 이 전압을  $V$ 로 하고  $C_s$  또는  $R_s$ 를 조절함으로써 브리지의 불평형 전압  $V$ 의 최소값  $V_{min}$ 을 구할 수 있다.

$$V = V_0 \left( \frac{j\omega C_s R_s}{1 + j\omega C_s R_s} - \frac{GR + j\omega CR}{1 + GR + j\omega CR} \right) \dots\dots\dots(1)$$

$$R_s \ll \frac{1}{\omega C_s}, R \ll \frac{1}{\omega C} \dots\dots\dots(2)$$

$$\tan\delta = \frac{G}{\omega C} \ll 1$$

(2)식의 조건을 만족시키고 있으면 (1)식의 제1항 및 제2항의 분모는 모두 근사적으로 1이라고 보아도 좋기 때문에

$$V = V_0[-GR + j\omega(C_s R_s - CR)] \dots\dots\dots(3)$$

이며  $V$ 의 절대값은

$$C_s R_s = CR \dots\dots\dots(4)$$

일때

$$V_{min} = V_0 GR \dots\dots\dots(5)$$

가 되는 극소값을 취한다. 또한  $R$ 의 양단 전압  $V_R$ 은 (2)식의 조건에서

$$V_R = V_0 \omega CR \dots\dots\dots(6)$$

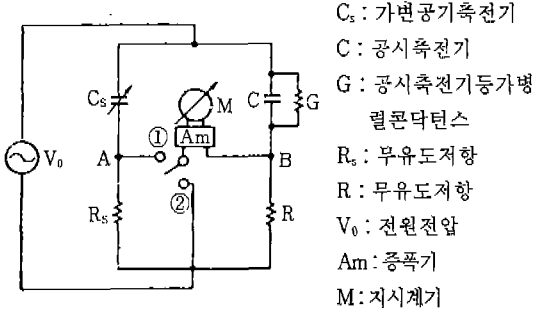
이기 때문에 (5)(6)식의 비를 구하면

$$V_{min}/V_R = G/\omega C = \tan\delta \dots\dots\dots(7)$$

대표적인 성능은 다음과 같다.

측정범위 : 0.01~100%

최소 측정값 : 0.01%, 미터 눈금 정밀도 : 0.02%, 오차 : 10%이하, 측정전압 : 10,000V이하



<그림 3> 간이 세링 브리지의 원리도 콘덴서

전원부를 내장하고 있으나 소형이며 운반하기 쉽고 리드선만을 접속시켜서 간단하게 측정할 수 있다.

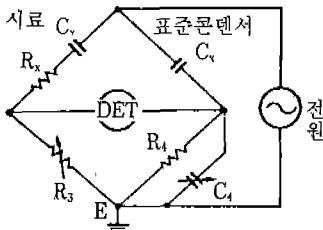
(2) 정밀급 세링 브리지

<그림 4>에 의하여 원리를 설명한다. 브리지의 평형조건을 구하면

$$C_x = \frac{R_4}{R_3} C_s \dots\dots\dots (8)$$

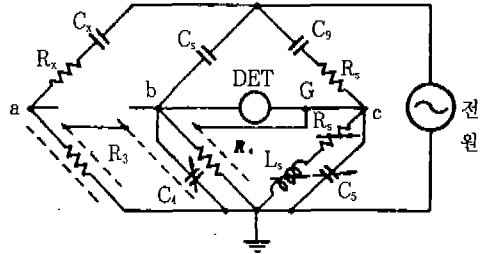
$$R_x = R_3 \frac{C_4}{C_3} \dots\dots\dots (9)$$

따라서  $\tan\delta = \omega C_x R_x = \omega C_4 R_4 \dots\dots\dots (10)$



<그림 4> 세링 브리지 원리도

또한 표준 콘덴서를 손실없게 하기 위하여 R3, R4 그밖에 브리지 내부에 있는 배선 등의 대지에 정전 용량 및 피측정물에 있는 저압측 도체의 대지에 대한 정전 용량에 의하여 측정 오차를 없애기 위하여 와그너 장치를 사용한다. 그 회로는 <그림 5>와 같다.



<그림 5> 와그너 회로원리도

그림에서 Cx, Rx는 표준 콘덴서의 고압측과 케이스 사이의 정전 용량 및 손실 저항을, 점선은 차폐판을 나타낸다. 차폐판은 c점에 접속되어 있다. 지금 측정회로 및 와그너 회로가 평형하였다고 하면 a, b, c의 3개점은 동일한 전위가 되므로 a, b 2개점이 차폐판에 대한 전위가 없고 따라서 정전 용량은 영향이 없게 된다. 또한 a, b 2개점은 차폐판에 둘러 싸여 있으므로 대지에 대한 정전용량은 영(Zero)이 된다. 이와 같이 해서 측정 오차를 대단히 적게 할 수 있다.

성능은 다음과 같다.

측정범위 : 0.001~100%

최소 측정값 : 0.001%

미터 눈금 정밀도 : 0.001%

오차 : 3%, 측정전압 : 임의

고전압으로 측정할 수 있도록 측정 전원과 표준 콘덴서는 별도로, 전체로서 상당히 큰 장치이다.

(3) 간이형과 정밀형의 비교

현장에서는 간이 세링 브리지를 사용하는 것이 보통이며 연구실이나 공장에서는 정밀급의 세링 브리지를 사용한다. 측정한 한가지 예는 <표 3>과 같다.

<표 3> CV케이블에서 유전탄젠트의 측정값 비교

시 료	간이 세링에 의한 현장측정	정밀 세링에 의한 공장측정
(1) 77kVCV 280m	0.02%(6kV)	0.012%(40kV)
(2) 77kVCV 2800m	0.05%(6kV)	0.013%(40kV)

현장측정과 공장에서 측정한 것을 비교해 보면 다음과 같은 문제가 있다.

(i) 현장측정은 과전전압이 대개 6,000V이며 실제로 사용되는 전압에 비해 훨씬 낮은 경우가 많다. 이리 기 때문에 사용전압에서  $\tan\delta$ 를 구하지 못한다. 열화 케이블에는 전압특성이 있는 경우도 있고 정확한 판정이 되지 않는다.

(ii) 현장측정에서는 단말이나 애자 등을 포함한 측정이 보통이며 케이블만의  $\tan\delta$ 를 알 수 없다. 단말부는 오손된 것도 있으며  $\tan\delta$ 가 큰 경우가 많다.

(iii) 간이 세링 브리지는 와그너 회로 등의 배려가 없고 측정한 정밀도가 거칠며 오차도 크다.

간이법과 정밀법을 비교하였을 때에 측정 전압이나 정밀도 등의 점에서 간이법이 미치지 못하는 점은 많으나 케이블의 열화에 대한 지표가 되는 수%의 오차에서 측정할 때에는 간이 세링법에 의한 측

정값도 상당히 신뢰할 수 있는 것이며 실제로 현장에서는 대부분 이것을 사용하고 있다.

## 결 론

이상과 같이 케이블의 절연열화를 측정하는데 관하여 직류누설전류법 및 유전 탄젠트 측정에서 간이 측정과 정밀측정에 대하여 설명하였다. 케이블의 절연열화 상태는 상당히 정밀한 방법을 가지고 해도 결정적인 것을 얻지 못하는 경우가 많다. 더구나 간이 측정에서는 더욱 더하다. 특히 최근에 물 트리(Water Tree)열화에 의한 케이블의 절연열화가 염려되고 있으며 열화진단의 중요성은 더욱 증가하리라 생각된다. 판정 기준의 확립을 포함하여 간이 측정에서도 정밀도가 높은 절연열화 측정법이 요망되고 있다.

## 명심보감

# 讀書 起家之本 循理 保家之本 勤儉 治家之本 和順 齊家之本

‘글을 읽음은 집을 일으키는 근본이요, 도리에 따름은 집을 보존하는 근본이요, 근면하고 검소한 생활은 집을 다스리는 근본이요, 온화하고 유순한 것은 집을 지키는 근본이다.’

[내용의 이야기]

동양이나 서양에 있어서 옛날이나 지금이나 글을 많이 읽어서 학문을 닦아야만 빛나는 이름을 세상에 전할 수 있다.

배우지 않는다면 사물의 도리에 어둡기 때문에 아무 일도 할 수 없다. 그러므로 글을 읽는 것이 곧 집을 일으키는 근본이 되는 것이다.

무슨 일이든 도리에 따라야 성공할 수 있고, 도리에 어긋나면 반드시 실패하게 된다. 그러므로 도리에 따르는 것이 집을 지켜나가는 근본이 되는 것이다.

부지런하고 아껴쓰는 생활을 하게 되면 재물을 모으게 된다.

옛글에 ‘집안이 화목해야 모든 일이 잘 이루어진다’는 말이 있다. 한 가족이 화목하고 한마음이 됨으로써만 이 모든 일이 순조롭게 된다.

우리는 글을 읽어서 지식을 넓히며 도리에 따라서 일하며 부지런한 생활을 하며 평화롭게 살도록 힘써야겠다.