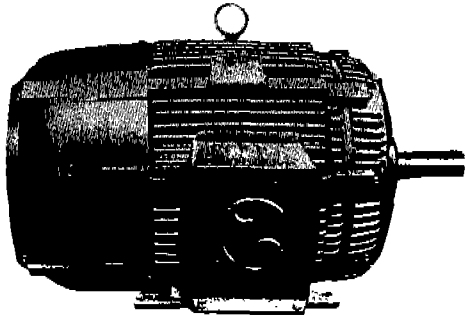


전동기의 열화진단과 평가

Diagnosis and Estimation of Insulation Ageing in Motors

(하)



오길환

효성중공업(주) 회전기사업부 특수기부장

다. $\tan \delta$ 시험(유전정접 시험)

절연물에 교류전압을 인가하면 절연물에 손실이 있으므로 전전류 I 는 그림 20의 (a)같이 충전전류 I_c 보다 δ 만큼 늦는다.

일반적으로 δ 는 대단히 적고, $\sin \delta \cong \tan \delta$ 이므로 이 때의 손실전력 W 는 그림 20 (a)의 Vector도로부터

$$W = VI \cos \psi \cong \omega CV^2 \tan \delta$$

가 되고 $\tan \delta$ 에 비례한다. 단, C 는 절연물의 정전용량, ω 는 전원의 각 주파수를 나타낸다. $\tan \delta$ 또는 유전정접이라고도 부른다. 절연물중에 공극이 없는 경우에는 시험전압을 높게 하더라도 $\tan \delta$ 는 거의 변화가 없다. 그러나 절연물중에 공극이 있을 경우에는 전압이 높게 되면 공극내에서 부분방전이 생겨 그에 따라 방전전류가 흐르므로 이것에 의하여 전력 손실이 생겨 $\tan \delta$ 는 증가한다.

부분방전이 없는 경우의 기호에 0을 붙여 표현하면 (b)처럼되고, 방전전류 I_d 에 의해 증가한 손실(방전손실) ΔW 는 $C/C_0 \cong 1$ 이므로

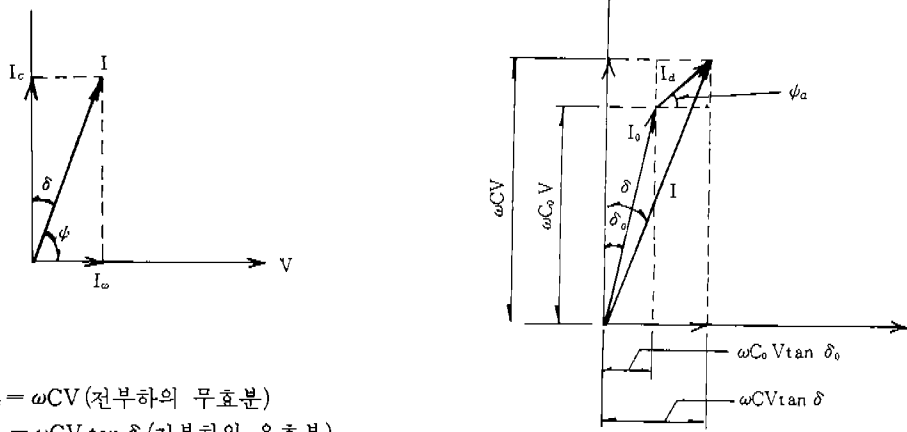
$$\Delta W = VI d \cos \psi d = \omega C_0 V^2 \left(\frac{C}{C_0} \tan \delta - \tan \delta_0 \right)$$

$\cong \omega C_0 V^2 (\tan \delta - \tan \delta_0) = \omega C_0 V \Delta \tan \delta$ 가 된다. 여기서 $\Delta \tan \delta = \tan \delta - \tan \delta_0$ 가 되고 $\tan \delta_0$ 는 부분방전이 일어나지 않는 것 같은 저전압의 값으로 된다.

$\tan \delta_0$ 의 값은 흡습이나 coil 표면의 오손 등에 영향을 받는다. 방전손실은 $\Delta \tan \delta$ 에 비례하므로 전압상승에 따른 $\tan \delta$ 의 변화로부터 평균적인 공극의 생성상태가 관찰되고 절연의 열화판정에 유효하다. 단, $\tan \delta_0$, $\Delta \tan \delta$ 라 하면 정격전압을 E 라 하고, $\tan \delta_{0.2E}$ 및 $\tan \delta_E - \tan \delta_{0.2E}$ 라는 것을 가리킨다.

또, 그림 21과 같이 상규대저전압 $E/\sqrt{3}$ 및 정격전압 E 에 의한 $\Delta \tan \delta$ 를 $\Delta \tan \delta 1$ 및 $\Delta \tan \delta 2$ 라 하고 있다.

$\tan \delta$ 의 측정에는 Schering bride, 간이 Schering bridge 혹은 이것을 역 Bridge화(후술)한 것 및 $\tan \delta$ 계 등이 사용된다. 이들 장치는 표 4와 같은 특징을 갖고 있고, 시험조건이나 목적에 맞추어 선택하고 있다. 비접지 공사



$I_c = \omega CV$ (전부하의 무효분)
 $I_p = \omega CV \tan \delta$ (전부하의 유효분)

(a) 부분방전이 없는 경우

(b) 부분방전이 있는 경우

〈그림 20〉 절연물에 대한 전류, 전압의 기본 Vector 도

〈표 4〉 $\tan \delta$ 측정장치의 종류 및 특징

| 측 정 장 치 | 정 밀 도 | 특 징 |
|---------------------|---|--|
| Schering Bridge | 측정치의 $\pm 3\%$, 단 정확도는 1×10^{-4} 이상 (절대치) | 표준형 정밀 장치 측정대상에 대하여 비접지시험물 전체가능 |
| 역 Schering Bridge | 측정치의 $\pm 3\%$, 단 정확도는 1×10^{-4} 이상 (절대치) | 취부식이외에 운반식이 있다. 접지시험물도 측정가능하며 현장 시험용으로 사용됨. |
| 간이 Schering Bridge | 최대성능의 $\pm 4\%$ | 직독, 운반식. 측정대상에 따라 기기용, 콘덴서용으로 구분된다. |
| 간이역 Schering Bridge | 최대성능의 $\pm 10\%$ | 직독, 운반식. 접지시험물도 측정가능하며 조작이 간편하므로 현장시험에 사용될 수 있다. |
| $\tan \delta$ 계 | $\pm 5 \times 10^{-3}$ (절대치) | 직독, 휴대용 지시계기 측정정도는 Bridge법 보다 낮다. |

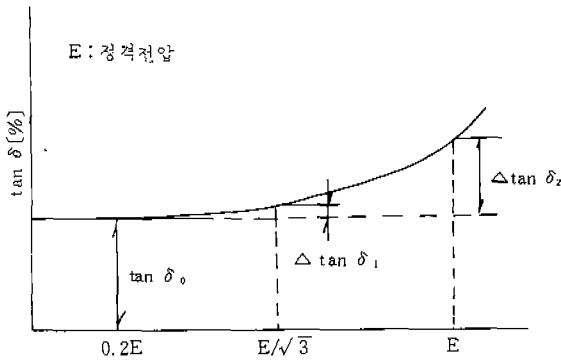
물에는 Schering bridge를, 또한 현지 측정에서는 공사물이 접지되어 있는 경우가 대부분이므로 휴대용의 역 Schering bridge나 간이 역 Schering bridge를 사용하는 일이 많다. $\tan \delta$ 시험의 시험전압은 정격전압을 상회하는 것이 보통이고, 공사물에 따라서는 전압 상승시와 하강시의 값이 다르게 되는 경우가 있으므로 양쪽의 경우 모두 측정한다.

(a) Schering bridge

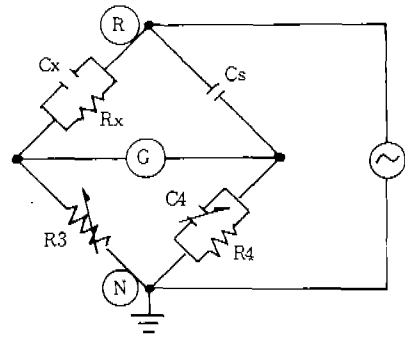
Schering bridge는 bridge 본체, 표준 Condenser, 평형점출기 및 전원으로 되어 있다. 그림 22에서 C_x, R_x 는 절연물을 각각 정전용량, 손실저항의 병렬등가 회로로 나타낸 것이고,

$$\tan \delta = \frac{1}{\omega C_x R_x}$$

이 된다. 본 그림의 Bridge를 평형시켰을 때 그



〈그림 21〉 $\tan \delta$ 전압 특성



- C_x, R_x : 시험물
- R_3, R_4, C_4 : Bridge 소자
- C_s : 표준 콘덴서
- G : 평형검출장치

〈그림 22〉 Schering Bridge의 기본회로

의 평형조건

$$\left(\frac{1}{R_x + j\omega C_x}\right) \cdot \left(\frac{1}{R_4 + j\omega C_4}\right) = \frac{R_3}{j\omega C_s}$$

의 실수로 부터

$$\tan \delta = \omega C_4 R_x$$

를 또 $\tan^2 \delta \ll 1$ 을 고려하면, 허수부로 부터

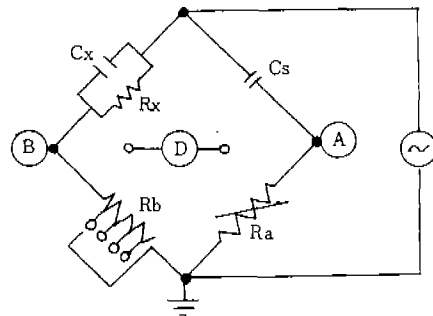
$$C_x = \frac{R_4}{R_3} C_s$$

를 구할 수 있다. 평형검출기로서는 선택증폭기 부착 검출기가 많이 사용된다. 다시 증폭기의 출력을 Oscilloscope의 Y축에, 또 전원을 X축에 부여하면 타원 Lissajou(리사쥬) 도형을 그려 Bridge가 평형되어도 도형은 수평선이 되므로 잡음으로부터 기본주파를 구별하기 쉽다. 역 Schering Bridge의 원리는 Schering Bridge와 동일한 것이지만 접지 공시물의 측정이 가능하므로, Bridge본체와 평형검출회로가 고전압이 되므로 측정자에 위험이 없도록 충분한 절연이 되어야 한다.

(b) 간이 Schering Bridge

간이 Schering Bridge는 Schering bridge의 조작을 간이화한 것으로 비교적 정확하게 $\tan \delta$ 를 측정할 수 있는 특징이 있다.

그림 23에서는 $R_a \ll 1/\omega C_s$, $R_b \ll 1/\omega C_x$, $\tan \delta = 1/\omega C_x R_x \ll 1$ 일 때 Switch 전환에 따라



- C_x, R_x : 시험물
- R_a, R_b : Bridge 소자
- C_s : 표준 콘덴서
- D : 증폭기부착전압계

〈그림 23〉 간이 Schering Bridge의 구성

증폭기 부착 전압계 D로서 R_a, R_b 의 전압 V_a, V_b 를 측정하면

$$V_a = \omega C_s R_a V$$

$$V_b = \omega C_x R_b V$$

이므로 양식으로 부터 C_x 는

$$C_x = \frac{V_b}{V_a} \cdot \frac{R_a}{R_b} C_s \text{로 구해진다.}$$

전압계의 Full Scale을 $R_a C_s / R_b$ 로 해서 눈금

을 표시해 두면 증폭기 이득(gain)을 조정하여 V_a Full Scale로 함에 따라 C_x 를 직독할 수 있다. 또 Switch 절환에 따라 전압계로 ㉠, ㉡ 간의 전압 V_{ab} 를 측정하면 전원전압을 V 라 하고

$$V_{ab} = \left[\frac{R_b}{R_x} + j\omega(C_s R_a - C_x R_b) \right] V$$

이므로, R_a 를 조정하여 V_{ab} 를 최소로 하면 이때 $C_s R_a = C_x R_b$ 가 되고, V_{ab} 의 절대치 V_{min} 은

$$V_{min} = \frac{R_b}{R_x} V$$

가 된다. 한편 $V_b = \omega C_x R_b V$ 이므로

$$\frac{V_{min}}{V_b} = \frac{1}{\omega C_x R_x} = \tan \delta$$

가 되어 $\tan \delta$ 가 구해진다. $\tan \delta$ 를 직독하기 위하여 증폭기 이득을 조정하여 V_b 가 Full Scale로 되게 해 놓는다.

간이 Schering bridge에도 고압측과 저압측을 역으로 한 간이역 Schering bridge가 있고 접지된 공시물에 사용되고 있다.

(c) $\tan \delta$ 계

원리적으로는 전류역류계와 동일하고, 특히 저역률에서 눈금을 확대시켜 $\tan \delta$ 를 직독할 수 있게 되어 있다. 소용량기 등과 같이 측정전류가 적으면 오차가 커지게 된다.

라. 부분방전시험

이제까지 서술한 시험법은 어디까지나 절연의

평균적 열화를 취급하였지만, 회전기 Coil 절연의 열화에는 평균적으로 진행하는 것과 국부적으로 진행하는 것이 있으며, 절연 파괴가 취약점부터 시작된다는 것을 생각하면 후자에 대응한 시험법도 필요하다.

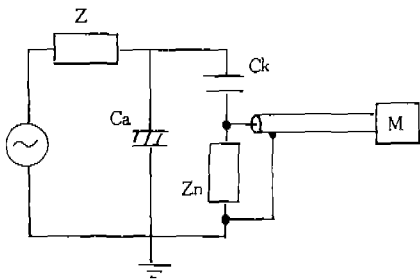
부분방전 시험은 절연물중의 약점에 있는 공극이나 균열에서 발생하는 부분방전의 Pulse 전류를 검출하여 그 크기, 발생빈도, 방전계시전압 등으로 부터 절연열화상태를 판단하는 것이다.

이중 회전기 Coil 절연에서는 최대 방전전하 Q_{max} 의 전압특성을 측정하는 것이 보통이다.

Q_{max} 는 누적발생 빈도-방전전하 곡선에 따라 발생빈도가 1개/반 Cycle에 상당하는 값으로서 정의하고 있다.

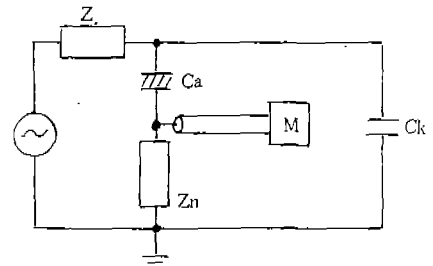
방전전하는 방전되어 있는 공극의 면적 및 Gap 길이, 즉 공극의 크기에 따라 결정된다. 전계 방향에 심한 균열이 있는 경우, Gap의 큰 공극이 있다고 볼 수 있으므로 이것에 따른 방전전압으로 아주 큰 Q_{max} 가 관찰될 수 있다. 또 열화 Coil처럼 공극이 많은 것에서는 당연히 큰 Q_{max} 를 주는 공극이 존재한다고 생각한다.

부분 방전 측정장치는 검출 Impedance, 증폭 회로 및 지시회로 등으로 되어 있고, 이것의 조합에 의하면 수종의 것이 실용되고 있지만 회전기 Coil 절연의 측정장치로서는 종래보다 광대역 방식이 표준으로 사용되고 있고, 최근에는 취급이 용이하고 가격이 저렴한 동조방식의 것도



(a) 시험물이 접지되어 있는 경우

- Ca : 시험물
- Ck : 결합 Condenser
- M : 측정 장치
- Zn : 검출 임피던스
- Z : 폐 임피던스



(b) 시험물 저압측에 접속

Impedance Z_n 을 접지시킬 수 있는 경우

〈그림 24〉 부분방전시험 기본 회로

〈표 5〉 광역방식과 동조방식의 비교

| 측정장치 | 증폭기 영역 | Pulse분해능력 | Radio장애 | 가격 | 기 타 |
|------|------------------|----------------|---------|----|-----------------------------|
| 광역방식 | 수 kHz ~ 수MHz | 0.1~10 μ S | 제거곤란 | 고가 | Pulse파형이 비교적 확실하게 관측 가능 |
| 동조방식 | 400 \pm 45 kHz | 25 μ S | 제거용이 | 저가 | 출력파형은 모두 동일하게 되므로 구별할 수 없다. |

사용되고 있다. 양자의 특징은 표 5와 같다.

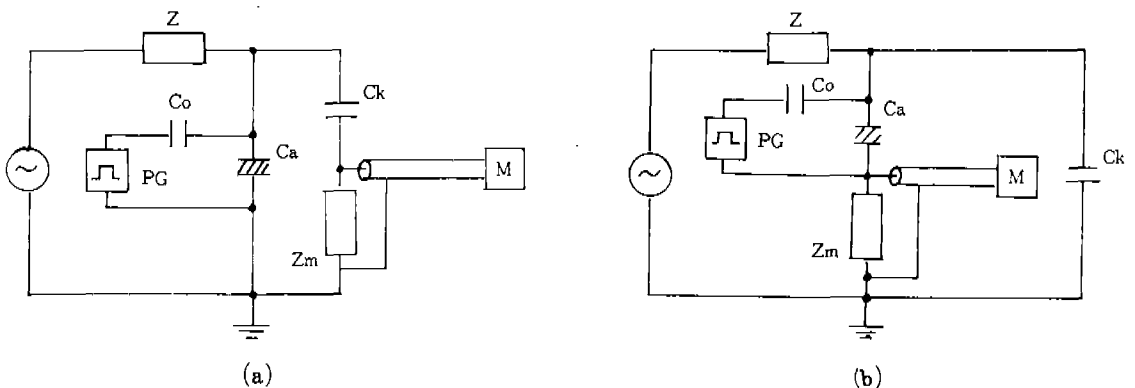
그림 24의 (a), (b)는 기본적인 부분방전 시험 회로를 나타낸다. 그림 24의 (a)에서는 측정장치가 결합 Condenser의 접지측에 있으므로 공시물이 접지되어 있는 경우에 유효하다.

부분방전에 의한 Pulse 전류는 Gk를 통하여 접출 Impedance Zm에 Pulse 전압으로서 나타난다. 측정장치 M에서는 신호에 포함된 상용주파수 전압을 제거하고, 증폭후 설정 전압 이상의 Pulse를 계수한다. 이 경우 측정장치의 주파수 대역내에서 공시물이 전원에서 (즉 Impedance로서) Block 되어 있다는 것이 중요하고, 그렇지 않으면 방전 Pulse는 전원 Impedance를 통하여 By-Pass 되어 버린다.

그림 24의 (b)에서는 측정장치가 공시물의 저압측에 있으므로 시료가 접지로 부터 떠있지 않으면 안된다. 이 회로에서는 잡음 장애를 제거하는 데 다소간의 이점이 있다고 하지만 Ck가

Ca에 비하여 크면 잡음은 대체로 Ca/Ck의 비로 감소한다. 왜 Impedance에는 일반적으로 수 mH의 직렬 Impedance 또는 수십 k Ω 의 직렬 저항이 사용되고 비교적 낮은 전압에서는 π 형 지역 Fiter 회로가 쓰이는 일도 있다. 권선의 도중에서 발생하는 부분 방전 Pulse는 권선내부에 감쇄하면서 전달되므로 발생 위치가 검출단으로부터 멀수록 감쇄는 크게 된다. 따라서 측정결과는 권선 자체의 발생량을 정확히 나타낸 것은 없고 검출단 부근에서 발생하는 것과 먼 곳에서 발생하는 비교적 강도가 큰 것들이 혼합된 것으로 된다. 운전중에 아주 높은 전압이 인가되어 방전이 발생하기 쉬운 선로측 단자 부근의 부분방전을 비교적 정확히 측정하기 위하여 권선의 접속은 원칙적으로 아래와 같이 하는 것이 좋다.

- 3상 일반측정의 경우는 선로측 단자만을 일괄한다.



Ca : 시험물 Zm : 접출 임피던스 M : 측정장치 PG : 방형파 발생기
 Ck : 결합 콘덴서 Z : 왜 임피던스 Co : 교정용 콘덴서

〈그림 25〉 시험회로계에 대한 교정

- 1 상 측정의 경우는 다른 2 상은 접지하지 않는다.
- 검출은 언제나 선로측 단자부터 행한다.

측정에 앞서 공시물을 접속한 조건에서 교정할 필요가 있다. 즉 공시물에 알고 있는 전하를 주입하여 증폭기 출력단에서 Pulse 전압이 파고치를 측정한다. 이것에 의하여 권선의 선로측 단자에 발생하는 부분 방전전하 Q_a 와 출력 Pulse 전압 파고치가 명확히 된다. 이 관계는 회로정수, 특히 결합 Condenser 용량과의 비 C_k/C_a 에 의존한다. 따라서 교정은 동일한 시험물에 의한 Series 시험 이되는 그때마다 실시하지 않으면 안된다. 그림 24(a), (b)에 대한 교정법을 그림 25(a), (b)에 나타내었다.

전하주입을 위한 Pulse는 진폭 U_0 의 방형파 전압 발생기와 직렬로 알고 있는 작은 Capacitance C_0 를 접속하여 얻는다

이때의 교정 Pulse는 다음식의 방전전하 q_0 와 등가이다.

$$q_0 = V_0 \cdot C_0$$

교정 Capacitance의 값 C_0 는 약 0.1 Ca이하이어야 한다. 짧은 상승시간의 교정 Pulse 원으로서 배터리를 사용하는 소형 Pulse 발생기가 있으며, Transistor 발전기나 수은 Relay 발전기가 내장되어 있다. 부분방전의 시험전압은 $E/\sqrt{3} \sim E$ 를 상한으로 하는 것이 통상적이다.

그림 26에 제측 예를 표시하였다.

마. 기 타

상기에서 기술한 시험법 외에 직류고전압을 인가한 전압-절연 특성을 이용한 직류고압법과 그림 27과 같이 교류전압을 인가하여 그 충전전압에 섞인 미소의 직류분을 제측하는 직류분법 등이 있다.

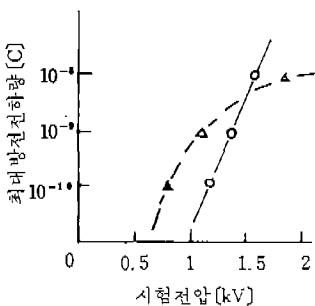
4. 절연열화 진단결과의 고찰법

성극지수 PI에 의하여 Coil절연의 흡습상태를 판단함에 있어 표 6과 같은 값이 주어지고 PI가 1.5 이하의 경우에는 흡습이라 판단되므로 이후의 시험은 건조 처리를 한 후 실시하고 있다. 또한 표 7에 흡습 코일의 판정기준을 표시하였다.

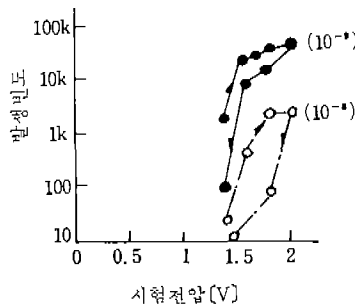
일반적으로 열화의 진행에 따라서 Pi 1, Pi 2는 저하하고 ΔI 는 증대한다. 어느 정도 열화되면 Pi 2 정격전압 이하에서 나타날 수도 있다. 열에 의한 열화에 따라 Coil 절연의 유기재료는 경화와 열분해에 의해 공극 생성 등으로 $\tan \delta$ 초기치보다 약간 적게 되는 것이 보통이지만 오손때문에 반대로 크게 되는 수가 있다.

$\Delta \tan \delta$ 는 열화의 진행과 함께 커지므로 절연 열화 판정상 중요한 정보이다. 열화상태에 있어

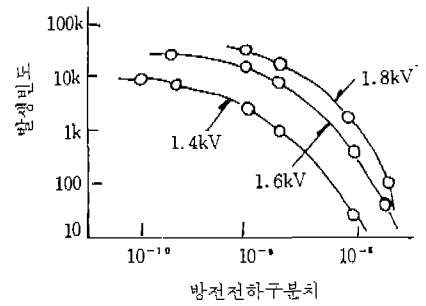
() 내는 방전전하 구분치 (C)



(a) 최대방전 전하량과 코로나 발생전압

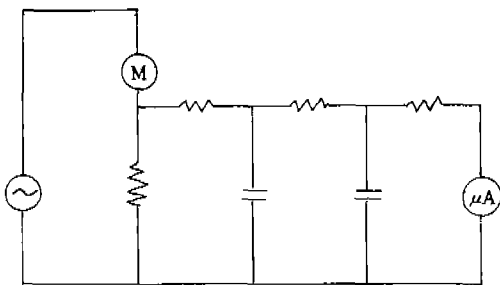


(b) 코로나 Pulse 발생빈도



(c) 방전전하와 발생빈도

(그림 26) 부분방전 시험(전동기, 정격전압 220V)



〈그림 27〉 직류분법

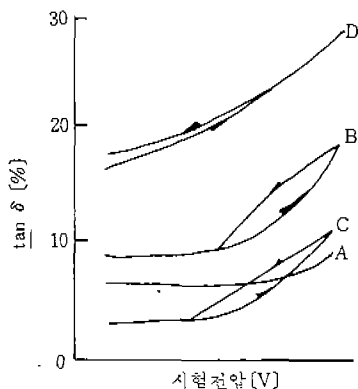
서 $\tan \delta$ 전압특성은 그림 28과 같이 될 것이다. 그림 29는 전동기에서 측정된 Data의 한 예이다.

균열 등과 같은 극소적인 결함이 존재하는 경우에는 통상의 권선보다 현저하게 방전 Pulse의 파고치가 커지고 발생빈도도 증대한다.

$\Delta \tan \delta$ 가 비교적 적은 것에서 Q_{max} 가 과도하게 큰 경우에는 결함이 존재하고 있다고 볼 수 있다.

이들 판정법에 대하여는 회전의 종류, 절연 방식 등에 따라 약간씩 현상이 다르므로 국제적으로 공인된 기준은 정해져 있지 않다.

일본에서는 3.3kV 이상의 Asphalt Compound



- A : 절연이 건전한 경우
- B : 절연중에 공극이 존재하는 경우
- C : 절연이 열적으로 열화한 경우
- D : 절연이 노화하여 흡습한 경우

〈그림 28〉 대표적인 $\tan \delta$ 전압특성
(절연시험 핸드북 P222)

절연 Coil을 대상으로 표 7과 같은 “발전기 권선 절연열화 판정기준”이 사용되고 있다.

합성 Resin 절연 Coil에 대하여는 충분한 Data가 없고 표준적으로 운용되는 기준은 확립되어 있지 않지만 초기에 제작된 것은 약 20년을 경과하여 절연 갱신시기를 맞이하고 있으므로 열화의 실제도 서서히 명확해져 있다.

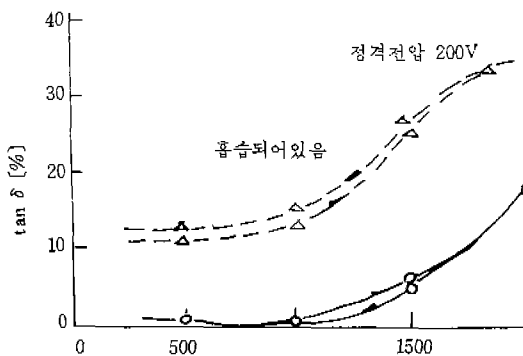
아무리 성능이 우수한 합성 Resin 절연 Coil이라 할지라도 그 사용조건이 가혹하면 열화는

〈표 6〉 성극지수에 따른 건조정도의 판정

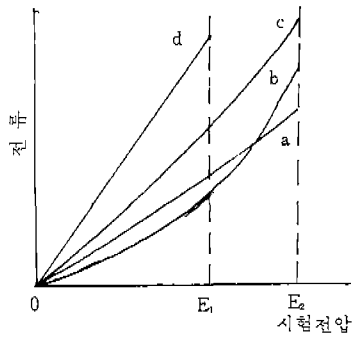
| 건 조 정 도 | 성 극 지 수 PI |
|---------|------------|
| 건 조 | 2.5 이상 |
| 보 통 | 2.5~1.5 |
| 흡 습 | 1.5 이하 |

〈표 7〉 흡습 코일의 판정 기준

| 성극지수 P. I | 누설지수 L. I | 코일의 절연상태 | 비 고 |
|-----------|-----------|----------|------------------------|
| 1.5 이상 | 30 이상 | 정 상 | 흡습하는 경우 PI는 1에 가깝게 된다. |
| 1.5 이하 | 30 이상 | 흡 수 | 건조하는 경우 LI는 1에 가깝게 된다. |



〈그림 29〉 $\tan \delta - V$ 특성



- a : 절연이 양호한 경우
- b : 절연이 노화된 경우
- c : 흡습한 경우
- d : 노화된 코일이 흡습한 상태에서 열화가 진행된 경우

〈그림 30〉 절연상태에서 따른 전류-전압 특성곡선의 변화

〈표 7〉 회전기 고정자권선의 절연열화 판정기준

| 정격전압 (kV) | | 3.3 | 6.6 | 11 |
|-----------|--------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| 시험전압 (kV) | 특성치 | | | |
| | ΔI (%) | 4.0 | 8.5 | 12.0 |
| E (정격전압) | $\Delta \tan \delta$ (%) | 0.7 | 6.5 | 6.5 |
| | Q_{max} | 5×10^{-9} [3.3] | 5×10^{-9} [4.5] | 1×10^{-9} [6.35] |

진행한다. 따라서 현 단계에서는 전동기 권선을 포함하여 앞의 판정기준을 참고로 판단해도 좋다고 생각된다.

Pi 2가 확실히 정격전압 이내에 있을 경우, 또한 Pi 2가 정격전압 이내가 아니어도 $\Delta I, \Delta \tan \delta$ 및 Q_{max} 중에서 2항목 이상이 각각의 표에서의 값보다 큰 경우에는 이 시험권선에 필요한 절연내력 ($2E+1$)kV을 갖지 않는 경우도 판정한다.

그림 30에는 교류고압법 시험에 따른 전류-전압 특성 곡선을 표시했다.

5. 맺음말

이상 주로 사용되고 있는 회전기 Coil 절연의 열화판정법에 대하여 서술했다. 이런 기술은 거위가 이론에서 나온 것이 아니고, 대부분의 축적된 Data 통계해석이나 경험을 기초로 한 것으로, 그 정확도는 반드시 충분하다고는 볼 수 없다. 이 때문에 전술한 것 같은 정기적인 시험을 실시하여 그 열화경향을 평가하는 일이 아주 중요하다.

진단의 신뢰성 향상 때문에 현재도 열화에 따른 상관관계가 높은 특성치의 제안이 행하여 지기도 하고 다량의 Data를 종합 판단하기 위한 처리의 자동화나 진단의 간소화 등의 노력이 계속되고 있다.

참고문헌

1. IEC PUBLICATION 505, 1975.
2. 三井, 井上; 絶縁材料研究會 資料IM-73-38, 1973
3. 吉田他; 絶縁材料研究會 資料 EIM-79-34, 1979.
4. 部分放電 試驗法, 電氣學會技術報告 II-6, 1969.
5. 絶縁 試驗法 HAND BOOK, 電氣學會, 222, 1971.
6. 福田; 電氣機器의 絶縁열화 判定法, OMH, 1 月號, P98, 1974.
7. 吉田 勝顔; COIL으로 壽命豫測, 電氣計算, 1983. 2 月號