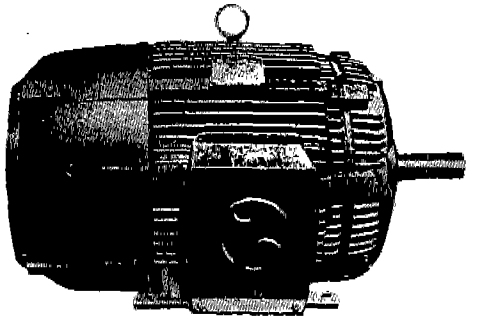
전동기의 열화진단과 평가

Diagonosis and Estimation of Insulation Ageing in Motors

(상)



오 길 환

효성중공업(주) 회전기사업부 특수기부장

1. 서 언

근래에 와서 회전기(전동기, 발전기등)의 Life Cost에 대한 관심이 점차 고조되고 있으며, 특히 Coil의 절연에 있어서도 사고를 미연에 방지하여 높은 신뢰성을 갖게 하는 것이 중요한 과제로 대두되고 있다.

합성 Resin 등으로 대표되는 최근의 회전기 Coil의 절연재료는 점차적으로 진보되어 왔다고 하나, 장기간의 운전에 따른 성능의 저하는 불가피하다고 볼 수 있다. 그러므로 평상시에 절연의 열화 상태를 파악하여 적절한 대책을 실시할 필요가 있다.

회전기의 Coil 절연은 일반적으로 절연 파괴를 수명이라고 하지만 현행의 절연진단법은 미리 절연내력과 상관관계가 깊은 특성치를 찾은 후 정기적, 계속적으로 측정결과를 찾아서 열화상태를 추정한다.

여기에서는 회전기 Coil 절연의 열화특성과 그 측정방법, 또한 측정결과의 고찰방법에 대하여 대략 설명한다.

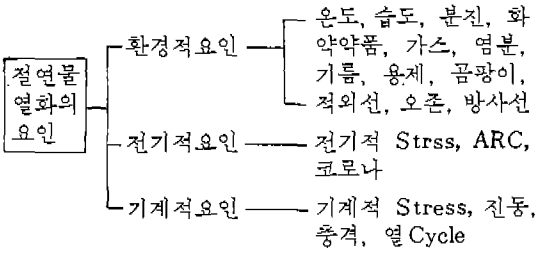
2. 절연물의 열화요인

절연물의 열화요인은 여러가지가 있으며, 고장 Mode, 고장 Mechanism과 그에 따른 각 Stress의 수준에 따라 수명이 결정된다.

표 1에 절연열화의 주요한 요인을 표시하였다.

이것들의 요인은 단독으로 작용하는 경우는 거의 없고, 몇가지의 요인이 각각의 수준에 따른 주효과와 상호작용이 합성되어 열화 Mechanism을 형성하고 있다. 절연열화의 정도는 부하

〈표 1〉 절연열화의 요인



의 크기에 따라 변하고 그 결과에 의해 성능이 결정된다.

가. 온도의 영향

내부에 잔류해 있는 공기와 휘발분의 열팽창과 장기간의 운전가열에 따른 접착제의 열분해 또는 Void(공극)의 형성은 회전기 Coil의 절연성능을 저하시킨다.

재료의 특성치를 ϕ라 하고, 또한 그의 열화가 물질의 확산, 산화 등의 반응에 따라 결정된다고 생각하면, 그것의 반응속도 K에 따라 수명이 결정된다고 생각되고, 그것의 반응속도 K에 따라 수명이 결정된다고 볼 수 있다. 이에 대한 모델로 다음의 식이 된다.

$$\frac{df(\phi)}{df}=K,\quad df(\phi)=K\cdot df$$

$$f(\phi)=Kt \qquad \therefore\ t=f(\phi)/K$$

특성치 ϕ는 - 어느 고장 수준 FL이 될 때 수명 L이 된다면

$\phi=FL$이고

$t=L$이라면 $\quad L=f(FL)/K$

즉, 수명은 스트레스가 크고, 반응속도 K가 클 때 짧아진다. 또한 반응속도 K로 열화율을 결정하게 된다. 온도, 다시 말해서 열 스트레스의 경우에 있어서, K를 Arrhenius의 경험식으로 표시하면 $K=A\cdot e^{-B/T}$ A, B : 물질정수, T : 절대온도

따라서

$$lnL=ln\{f(FL)/K\}=lnf(FL)-lnK=lnf(FL)-ln(A\cdot e^{-B/T})$$

$$=\{lnf(FL)-lnA\}+\frac{B}{T}$$

$$=A+\frac{B}{T}\ ,\quad A=\{lnf(FL)-lnA\}$$

이 관계에서 lnL과 $1/T$의 관계는 기울기 B의 직선이 된다. 한편, 수명의 가속계수 Al을 수명비로 하면

$$Al=\frac{Ln}{L}=\frac{K}{Kn}\ ,\qquad n : 기준$$

이것의 관계로 부터

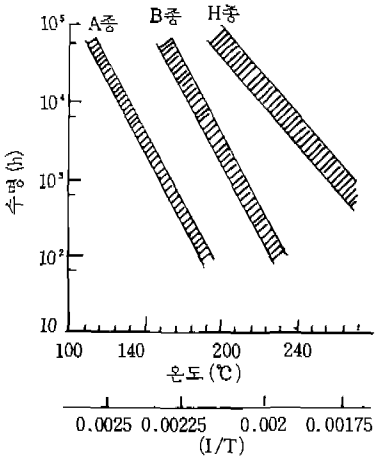
$$Al=\frac{A\cdot e^{-B/T}}{A\cdot e^{-B/Tn}}=e^{B(\frac{1}{Tn}-\frac{1}{T})}=e^{B(\frac{T-Tn}{Tn\cdot T})}$$

$$=e^{B(\frac{\Delta T}{\bar{T}^2})}=2^{\Delta T/\theta_T},$$

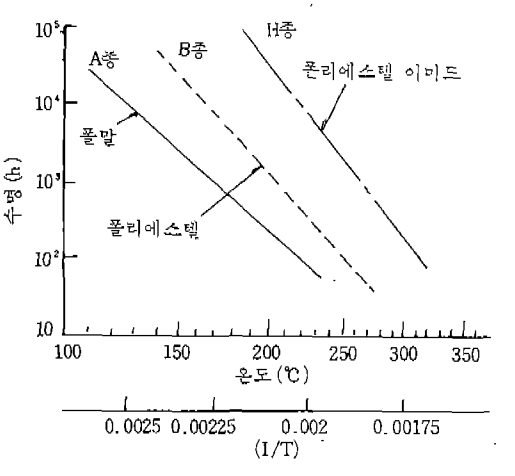
$\triangle T=T-Tn$, $\bar{T}^2=Tn\cdot T$, $\quad \theta_T=\bar{T}^2\cdot ln2/B$

즉, 온도가 θ_T 상승함에 따라 수명은 반감한다. **그림 1**에 절연종별, **그림 2**에 전선, **그림 3**에 절연물의 온도, 수명의 관계를 표시하였다.

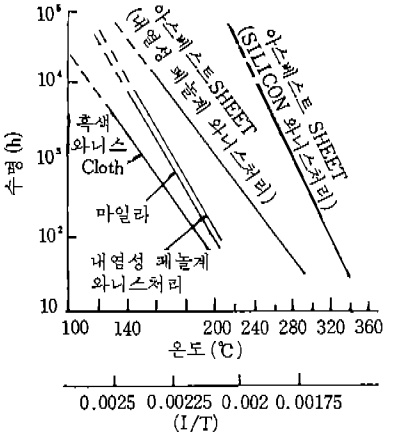
절연특성, 즉 수명은 전선, 절연물의 절연특성과 동시에 와니스와의 조합, 적합성이 중요하



〈그림 1〉 온도와 수명의 관계



〈그림 2〉 Magnet Wire의 내열수명(IEEE #57)



〈그림 3〉 각종 절연재료의 내열수명(대기중)

다. 또한 절연물의 수명은 경험적으로 다음 식으로도 표시된다.

$$t = A\ell \cdot \varepsilon^{-m\theta}$$

t : 절연물의 수명

$A\ell, m$: 정수

θ : 온도

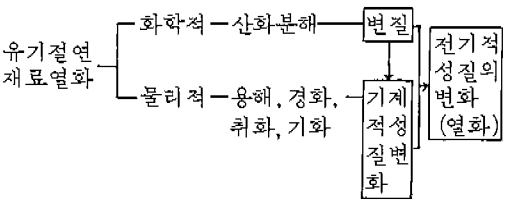
이 식에 따라 수명이 반감하는 온도차를 $\triangle\theta$ 라고 하면, 정수 m은 다음식으로도 표현된다.

$$m = ln2/\triangle\theta = 0.69/\triangle\theta$$

A종 절연은 일반적으로 $\triangle\theta$는 8℃가 되며 8도 반감설에 대하여 알 수 있다. 반감온도차는 B종 절연에서 10℃, H종 절연은 12℃가 된다.

여기서 볼 때, 절연물을 높은 온도로 사용하는 것은 현저한 수명의 단축을 초래한다는 것을 알 수 있다. 그러나 전동기의 저부하 사용은 저효율이 되므로 경제성 측면에서 볼 때 반드시 유리하다고 볼 수는 없다. 단순히 수명만을 길게하는 것이 아니고, 구입가격, 설치 공사비, 운전비, 보수비까지 고려한 전체적인 Running Cost를 최소화할 필요가 있다. 반면 허용치 이상의 온도상승을 초래하는 과부하 운전은 수명이 단축됨을 고려하여야 한다. 과열은 수명의 현저한 단축을 초래하므로 과부하 운전은 신중히 고려

〈표 2〉 유기 절연재료의 열열화



되어야 한다.

유기절연 재료의 열(熱)열화는 반응속도론적으로 설명된다고 볼 수 없으며, 표2에 표시한 물리적인 변화에도 관계됨에 유의할 필요가 있다.

A종의 경우는 섬유질계의 재료가 주체이며, 과열시에도 최종적으로 탄화물이 절연간격을 형성하는 경향이 있으며, E종계의 플라스틱 절연의 경우는 서모플라스틱-열가역으로 되므로 현저한 과열은 기계적 강도의 저하, 변형, 절연물의 용융, 수축 등으로 고장에 이르게 되므로 주의하여야 한다.

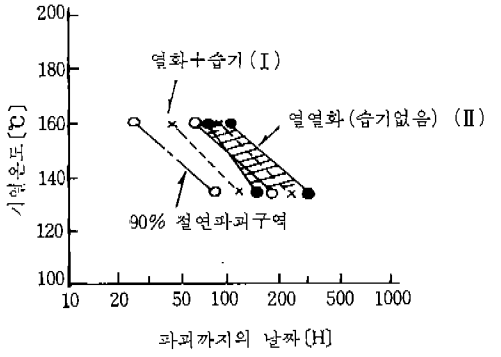
나. 습도의 영향

습도는 그 재료의 흡습성과 온도 습도 효과에 따라 영향을 주게된다. 그림4는 A종 전동기, 그림5는 E종 전동기의 습기에 대한 열화 특성을, 그림6은 절연시트 재료의 습열열화 특성, 그림7에는 흡습오손과 표면 저항과의 관계가 표시되어 있다.

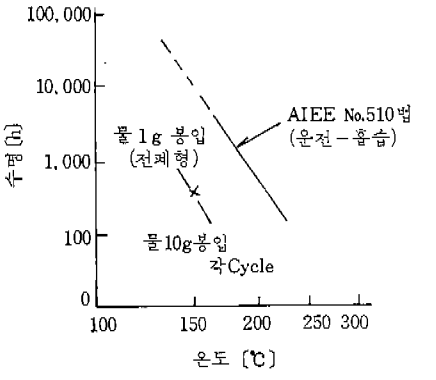
다. 전기적 Stress의 영향

정지기에서는 부분방전의 강도가 극히 낮은 Level이 되도록 전계의 설계를 실시하고 있으나 회전기에서는 일반적으로 그 구조상 Coil 절연에 유해한 부분방전이 없다고 할 수는 없다. 이 경우 공기의 절연내력은 절연물의 절연내력과 비교해서 대단히 낮으므로 부분방전은 Void나 Coil의 End 부위표면, Slot와의 접촉면에 발생하여 절연재료(접착제 등)를 분해 침식시켜 절연성능을 저하시킨다.

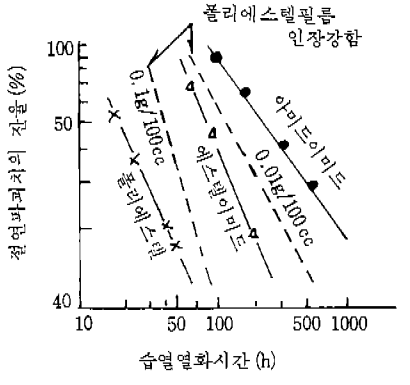
온도 이외의 스트레스에 대한 반응속도는 일



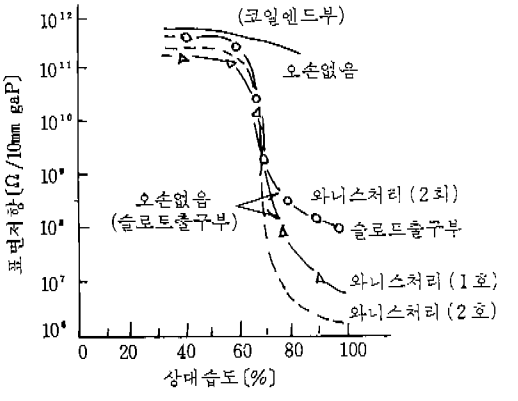
〈그림 4〉 A종절연 소형전동기(고정자)의 절연파괴 시간



〈그림 5〉 E종전동기(0.75kW)의 수명과 수분의 영향



〈그림 6〉 습열 열화특성
(물 0.1g/공기 100cc봉입)



〈그림 7〉 코일 절연의 흡습, 오손과 표면저항

반적으로 다음식으로 표시된다.

$K=\alpha \cdot S^{\kappa}$

K : 반응속도, α, k : 정수

S : 스트레스

수명 L은

$L \propto 1/k$이므로

$lnL \propto -ln\alpha - klnS = C - klnS$

가속계수 Al은 다음식으로 표시된다.

$$lnL = \frac{Ln}{L} = \left(\frac{S}{Sn}\right)^{\kappa}$$

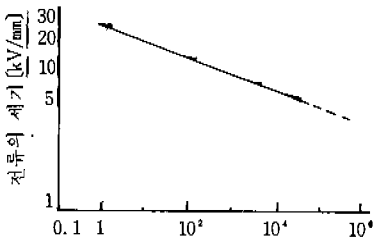
온도에 기타의 스트레스를 가미하면 가속계수는 $Al=\left(\frac{S}{Sn}\right)^{\kappa} \cdot e^{\frac{\Delta T}{T_2}} = \left(\frac{S}{Sn}\right)^{\kappa} \cdot 2^{\frac{\Delta T}{10T}}$ 로 된다.

그림8과 그림9에 전계의 크기와 수명의 관계를 표시했다.

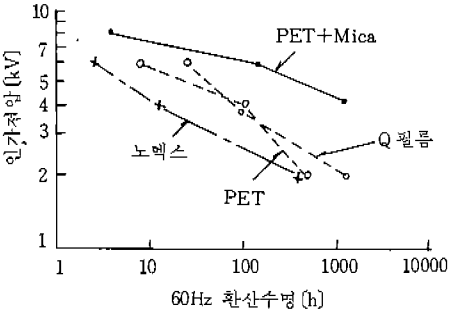
라. 환경적인 영향

Coil절연 표면에 부착한 오손물질(분진, 약품, 염분, 기름 등)이나 수분은 절연의 전기특성이나 기계특성에 유해한 영향을 주며, 또 마모성의 미립자는 냉각풍과 같이 공기속을 순환해서 절연층을 마모시킨다.

환경적인 인자에 의한 회전기 Coil절연의 열화는 운전 Level의 정량적인 파악이 어렵고, 확



〈그림 8〉 장시간 통전시의 열화수명곡선



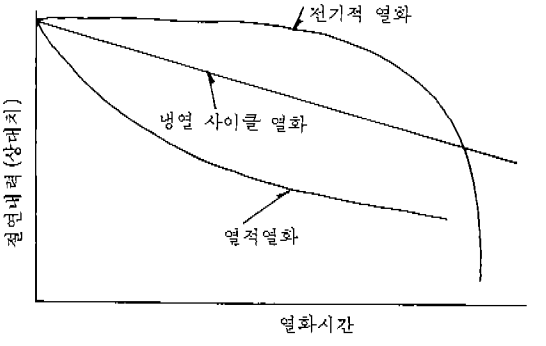
〈그림 9〉 각종 재료의 V－t 특성

고한 이론이 정립되어 있지 않다.

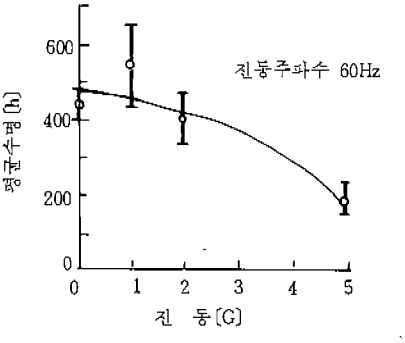
마. 기계적인 영향

회전기의 시동시에 나타나는 과대한 전자력은 Coil절연에 큰 응력을 발생시키므로 절연은 피로 열화하고 장기적으로는 절연 Tape에 박리가 생기게 된다. 또 절연물과 도체는 열팽창률이 상이하므로 시동정지나 부하 변동에 따라 냉·열 Cycle이 발생함에 따라 상호팽창에 의한 열응력이 발생된다. 특히 이 영향은 긴 Coil에서 많고, 장기 운전에 의하여 절연 Tape에 박리가 발생된다.

냉열 Cycle에 의한 열화는 종래의 접착제에서 합성 Resin계 접착제로 바뀜에 따라 경감되었다고 할 수 있으나, 한편 열적으로 치수 안전성이 양호한 절연 Coil에는 Slot내의 고정이 부적절한 경우 전자력에 의하여 진동하고 절연이 마모함과 동시에 Slot 방전이 발생되는 열화상태에 이르게 된다. 이상의 열화인자중 주된 것에 대하여 절연내력의 시간 변화 특성을 초기치와의 비로서 도식적으로 표시하면 **그림10**과 같다.



〈그림 10〉 절연 내력의 시간변화



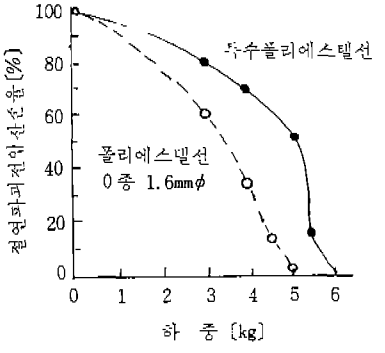
〈그림 11〉 160. C, 35V (DC) 인가시의 진동효과

바. 기 타

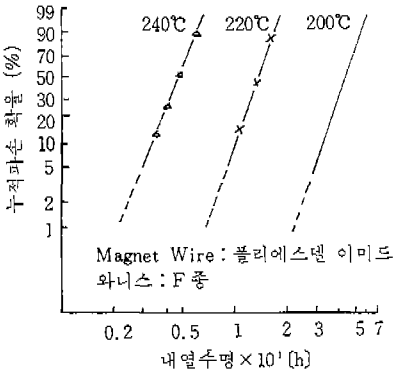
그림 11에 진동의 영향, **그림 12**에 전선에 따른 하중과 절연 파괴전압의 관계, **그림 13**에 염수오손과 누설전압의 관계, **그림 14**에 Magnet Wire의 내열 수명 분포를 표시하였다.

3. 절연열화 진단을 위한 시험법

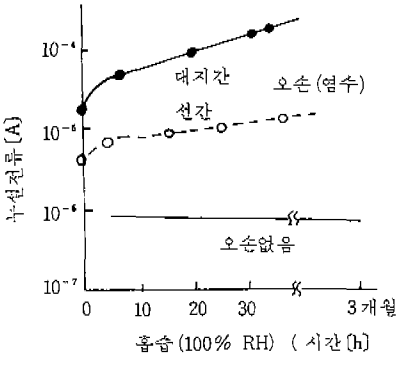
절연열화 진단을 위하여 과거부터 여러가지의



〈그림 12〉 하중에 따른 에나멜선의 절연파괴 전압변화



〈그림 14〉 Magnet wire의 내열수명



〈그림 13〉 코일의 흡습, 오손과 누설전류 (AC 220V)

〈표 3〉 절연특성에 반영되는 열화현상

절 연 특 성	변 화	열화현상
절 연 저 항	저 하	흡 습 오 손
성 극 지 수PI	감 소	
tan δ_0	증 대	
	감 소	공 극 박 리 마 모
△tan δ	증 대	
전류급등점 Pi1, Pi2	저 하	
전류증가율 △I	증 대	
최대방전전하 Qmax	증 대	

시험방법이 논의되어 왔으나 현재로서는 고체복합 절연재료의 열화구조에 대하여는 완전히 해명되었다고 할 수 없다. 그러므로 단독의 절연특성시험만을 가지고는 열화상태에 관하여 정확하게 판단하기에는 충분하다고 할 수 없고 몇가지의 절연특성을 조합하여 총합적으로 판단되고 있다.

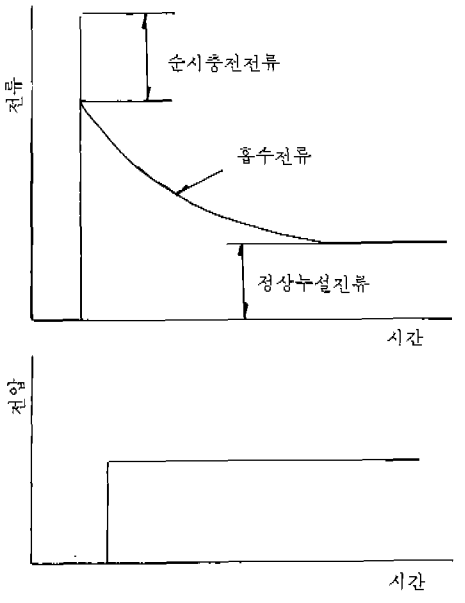
일반적으로는 직류시험 (PI 측정), 교류전류시험 (Pi1, Pi2, △I 측정), tanδ 시험 (tan δ 0, △tan δ측정), 부분방전시험 (Qmax 측정) 등을 조합하여 실시하는 경우가 대부분이다.

이들 특성에 반영되는 열화현상은 표 3과 같다.

가. 직류 시험 (성극지수)

절연물에 직류전압을 인가할 때 절연물에는 그림 15와 같이 기하학적 정전용량에 따라 순간적으로 끝나는 충전전류와 그와 연이어 시간에 따라 천천히 감소하는 흡수전류 및 시간에 대하여 변화없는 누설전류가 흐른다. 전류가 시간에 따라 천천히 감소하는 현상을 절연물의 흡수현상이라고 부르고, 절연물이 흡습해 있는 경우는 흡수전류에 비하여 누설전류가 증가하기 때문에 전류가 일정치로 떨어질 때까지의 시간이 짧아진다.

이것으로부터 각각 시간에서의 특성을 구하여



〈그림 15〉 직류전압기에 따른 흡수 현상

흡습의 정도를 판단할 수 있으며, 본 판단의 기준을 성극지수 및 누설지수라 한다.

이것은 누설전류-시간특성의 1분의 값과 10분의 값을 표시한다. **그림 16**에 누설전류-시간특성을 표시하였다.

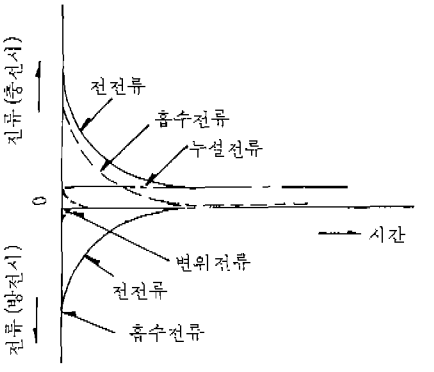
$$\text{성극지수 PI}=\frac{\text{전압인가 1분후의 전류}}{\text{전압인가 10분후의 전류}}=\frac{\text{전압인가 10분후의 절연저항}}{\text{전압인가 1분후의 절연저항}}$$

$$\text{누설지수 LI}=\frac{\text{전압인가 10분후의 전류}}{\text{방전개시 10분후의 전류}}$$

PI는 위 식의 절연저항의 비로서도 나타낼 수 있으며, 일반적으로 $10^{12}\sim10^{15}\Omega$까지 측정가능한 절연저항계를 이용하여 절연저항과 병행하여 측정된다. 시험전압은 통상적으로 500V 또는 10,00V가 이용된다.

나. 교류전류시험

절연물에 인가하는 교류전압을 증가시키면 충전전류도 비례하여 증가한다. 그러나 절연이 열



(절연시험법 핸드북 p. 195)

〈그림 16〉 누설전류 시간특성

화되어 내부에 많은 공극이 발생되어 있는 경우에는 공극내에서 부분방전이 일어나고, 공극을 단락시키기 때문에 절연의 정진용량이 변화하여 충전전류는 비례이상으로 급등한다. 그 결과 전류-전압특성에는 **그림 17**과 같은 굴곡점이 생긴다. 이 전류급등전압 및 전류증가율로부터 열화정도를 판단할 수 있다. 여기서 전류 증가율 $\triangle I$는 그림 17과 같이 정격전압 E에 의한 전류를 I, 전류가 직선적으로 증가한다고 할 경우의 값을 I_0라고 하면,

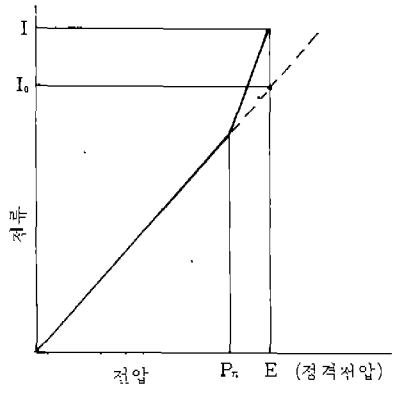
$$\triangle I=\frac{I-I_0}{I_0}\times100\,(\%)$$로 정의된다.

전류급증전압은 명확히 나타나는 경우도 있지만 완만히 증가하는 경우나 그림18처럼 2개 이상의 급등 전압을 갖는 경우도 있다. 비교적 Coil의 열화가 진전된 경우에서는 **그림 18**과 같이 2개의 전류 급등전압이 발견되는 일이 많고, 각각 제 1전류 급증점 Pi1〔kV〕 및 제 2전류 급등점 Pi2〔kV〕라 부른다. Pi1을 공극 내의 부분방전에 의하여 또 Pi2는 공극간을 교락하는 것과 같은 방전에 의하여 나타난다고 할 수 있다.

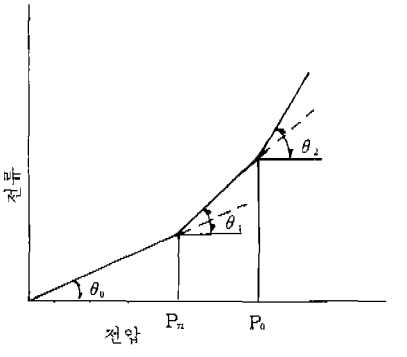
절연내력은 공극간의 방전에 의해 교락하는 것처럼 되어 초기에 저하하므로 Pi2는 특히 절연내력과 관계가 깊다.

$$BDV\fallingdotseq\alpha\cdot Pi2\quad(\alpha=1.5\sim2.5)$$

와 같은 관계가 있다고 할 수 있고 이것에서 절



〈그림 17〉 전류 – 전압특성



〈그림 18〉 Pi 2를 나타내는 전류 – 전압특성

연내력을 추정하는 방법이 있다. Pi2가 명확히 나타나지 않을 것 같으면 이것을 속단하지 말고 다음의 3조건을 만족해야 한다.

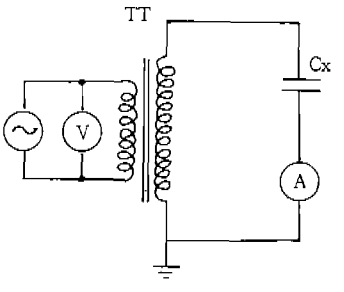
* Pi2의 출현위치는 Pi1의 대략 1.68배이상
* Pi2에서의 전류증가 경향의 증가계수 m은 대략 1.3이상

단, m은 그림 18에서

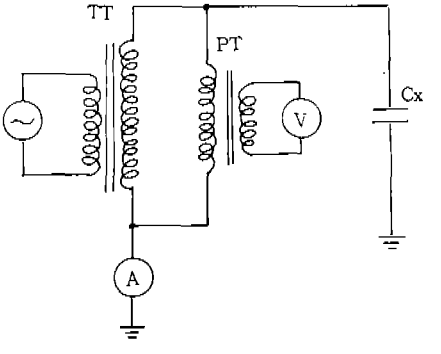
$$m=\frac{\tan\theta_2}{\tan\theta}$$

* Pi2 이상의 전압에 따른 전류 증가경향은 1.25Pi2까지 일정 교류전류시험을 위한 회로를 그림 19에 표시하였으며 (a)도는 시료의 저압측에 전류계를 접속시킬 수 있는 경우에 적용하고 (b)도는 시료가 접지되어 있는 경우에 적용한다 단, (b)도에서는 시험용 변압기 절연에 전류가 가해지므로 그 값을 무시할 수 없는 경우는 측정치에서 빼어 보정할 필요가 있다. 전류의 측정에는 정류형 전류계 (1급 이상)를 사용한다. $\triangle I$는 정격전압까지 측정하면 충분하지만 Pi2는 정격전압 이상이 되지 않으면 구할 수 없는 경우가 많아서 보통은 Coil의 내압시험 전압을 상한치로 해야 한다.

〈다음호에 계속〉



(a) 시료의 저압측에 전류계를 접속시키는 경우



(b) 시료가 접지되어있는 경우

TT : 시험용 변압기
PT : 계기용 변압기
Cx : 시 료

〈그림 19〉 교류전류 시험회로