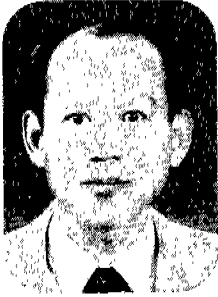


전동기의

열화 진단과 고장 대책 ①



글 / 류 홍 우

한전 전력연구원 시스템 통신연구소 그룹장

목 차

I. 서 론

II. 본 론

1. 전동기에 주어지는 각종 스트레스
2. 예방보전을 위한 열화 진단
3. 절연 진단 시험
4. 시간당 시동 허용 횟수
5. 축 전압
6. 축수의 진단과 고장대책
7. 인버터 운전시 자성식 전동기 속도별 허용 토오크

III. 결 론

I. 서 론

전동기에서 소비되는 전력사용량은 전체 전력소비량의 약 70%를 차지하고 있는 것으로 조사되고 있다. 이와 같이 전력사용의 많은 부분을 차지하고 있는 전동기에 대한 고장 예방활동은 산업체에서는 설비이용률의 향상에 따른 생산성 향상을 수반할 뿐 아니라 유지보수비의 절감을 가져올 것이고 가정이나 서비스분야에 있어서도 유사한 관점에서 검토 될 수 있을 것이다.

여기서는 전동기에 주어지는 각종 열화 요인들을 알아보고 이들에 대한 대책을 찾아보기로 한다. 또한 일반적인 기술내용 뿐 아니라 실제 현장에서 경험할 수 있는 몇가지 실질적인 기술에 대하여도 언급해 보고자 한다. 이러한 방법에는 여러 가지 의견이 있을 수 있으나 현장에서 검토할 수 있는 하나의 방법으로 이해해 주기를 사전에 부탁드립니다.

II. 본 론

1. 전동기에 주어지는 각종 스트레스

전동기에 가해지는 스트레스는 크게 다음의 4가지로 구분되고 있으며 이러한 스트레스가 전동기에 가해짐으로써 경년열화가 진행되고 그 결과 전동기가 고장에 이르게 된다. 전동기에 가해지는 스트레스에는 열적 스트레스, 전기적 스트레스, 기계적 스트레스 그리고 환경적 스트레스가 있다.

<표 1> 열화 요인과 열화 현상

스트레스 종류	열화요인	열화현상	영향이 큰 전동기
열적 스트레스	운전중의 온도 열 사이클	열분해, 산화분해, 벗겨짐, 떨어짐, 마모, 헐거워짐, 금이간다.	시동빈도가 높은 팬용 전동기
전기적 스트레스	서어지 전압인가	부분방전, 침식	상 등
기계적 스트레스	시동시의 전차력, 운전중의 진동, 열 사이클	벗겨져 떨어짐, 금이간다. 마모, 헐거워짐	시동빈도가 높은 팬용 전동기, 고속전동기, 단속부하용 전동기
환경적 스트레스	흡습, 분진, 화학약품, 기름, 염분, 방사선	누설전류가 큼, 절연저항 저하, 화학적 변질	개방형 전동기

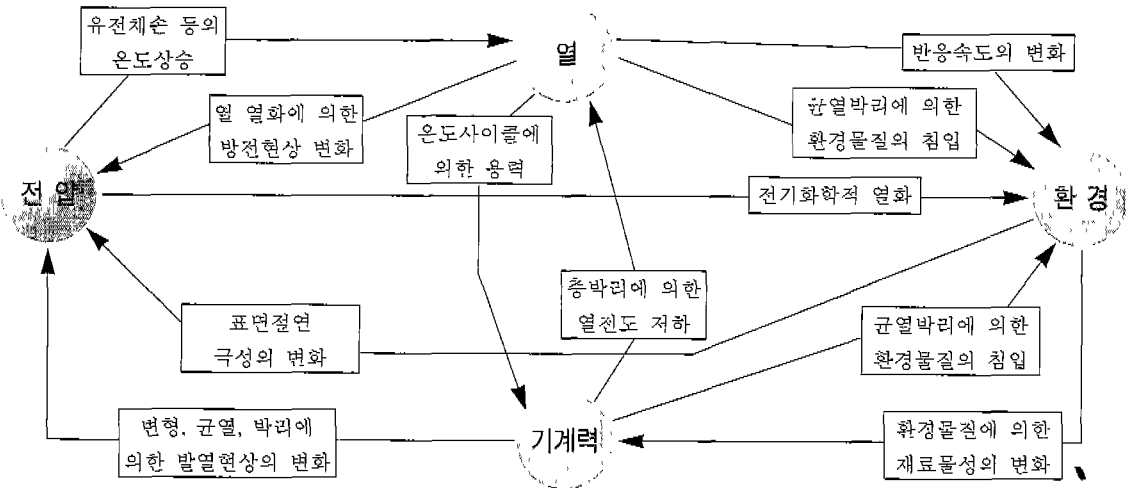
전동기에 인가되는 이러한 각종 스트레스는 하나의 스트레스가 단독으로 존재하는 것이 아니고 실제적으로는 하나의 원인에 의하여 복합적으로 나타나는 결과를 보인다고 한다. 예를들어 전동기의 열화요인과 열화현상을 표 1과 같이 나타낼수 있지만 표 1에서 알 수 있는 바와같이 열적 스트레스는 운전중의 부하변화에 따른 온도변화로 열 사이클이 발생하게 되고 이로 인하여 열분해, 산화분해, 벗겨져 떨어지거나 헐거워지며 금이 가는 현상을 나타내는데 특히 시동빈도가 빈번한 부하구동용 전동기에서 많이 나타난다고 되어 있다. 이 경우 열적 스트레스로 인하여 나타나는 각종 현상은 결과적으로 헐거워지거나 금이가는 등의 기계적 스트레스를 유발하게되고 산화분해 등으로 환경적 스트레스를 유발하고 있다.

이와 같이 어느 하나의 스트레스가 단독으로 존재하는 것이 아니고 다른 스트레스의 유발 요인으로 작용하게되어 전체 스트레스가 엉켜있는 현상을 보이게 되며 이러한 상호관계의 예를 그림 1에서 보이고 있다.

1.1 열적 스트레스

열적 스트레스의 요인과 열화현상으로

- 운전시 발생하는 동손, 철손 등의 열에 의한 권선 절연의 표면 산화현상 발생
- 열분해에 의한 화학작용으로 절단, 결합 및 분해물 생성
- 휘발성 물질에 의한 변색 및 경화
- 절연층간 분리, 표면 와니스 파손
- 과부하 운전은 급격한 온도 상승으로 열적



<그림 1> 복합 열화원인의 상호작용

열화를 급속히 진행시킴

결과적으로 열적 열화는 부분방전의 발생과 기계강도의 저하를 유발시키게 되고 흡습이 쉽게 되는 등 다른 요인으로 발전하게 된다.

1.2 전기적 스트레스

운전중 상규 대지전압에서 절연층내에 공간이 발생되면 방전이 일어나게 되며 이러한 부분방전으로 인하여 활성산소, 오존, 산화질소 등의 방전생성물이 발생하게 되고 이러한 생성물과 절연재의 화학작용으로 절연층이 부식하게 된다. 또한 하전 입자의 부식작용으로 절연층내에 공간이 확대되어 큰 방전으로 이행할 수 있다. 그리고 절연물 표면에서 연면 방전이 발생하게 되어 절연물 표면을 침식시킨다. 뇌서어지, 개폐기의 개폐 서어지 등의 서어지 전압은 파두장이 짧아 권선의 전압 분담이 불균일하게 되며 특히 파두장이 짧으면 짧을수록 Line측 권선에 집중되는 현상이 발생하게 되어 Line측 층(Layer)간에 임펄스 코로나가 발생하여 절연 열화를 진척시키게 된다.

1.3 기계적 스트레스

기계적인 스트레스의 요인으로는 시동시의 전차력, 운동중의 진동에 의한 기계응력 그리고 열 사이클에 의한 열응력 등을 들 수 있다. 이러한 기계적 스트레스의 반복으로 나타나는 현상은 절연층간의 분리, Crack발생, 마모 등을 들 수 있으며 Coil End 지지부의 균열과 헐거워짐이 발생하게 된다.

1.4 환경적 스트레스

환경적 스트레스의 요인으로는 분진, 수분, 자외선과 방사선 등을 들 수 있다. 우선 분진은 연마성, 흡습성, 그리고 도전성을 촉진시키는 특징을 가지고 있다. 연마성은 전동기내에 침입한 분진이 절연물을 마모시켜 절연을 손상시킬 수 있으며 흡습성, 도전성은 절연물의 표면저항을 불균일하게 만들어 그 저항부에 전계가 집중되게 되어 미소방전과 발열이 발생하게 되고 이로 인하여 손상, 파괴되는 현상을 일으키게 된다.

수분의 침투로 절연물이 흡습하게 되어 수분이

절연층 내부에 점점 확산되어 고온에 의한 가열로 가수분해되어 화학적 열화를 촉진시키는 결과를 가져온다. 또한 표면저항의 저하로 표면 누설전류에 의한 국부 전조가 발생하게 되고 고저항부에 전계가 집중하게 되어 미소방전과 발열로 손상, 파괴를 일으킬 수 있다.

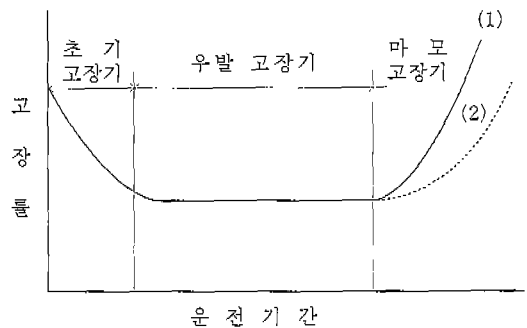
절연물이 직사일광을 받게되면 자외선을 흡수하게되고 이로 인하여 분자, 원자가 여기되어 광해리, 유리기에 이르게 되고 분자와의 반응으로 화학변화를 일으켜 열화를 진행시킨다.

감마(γ)선, 열중성자선을 절연체가 받으면 방사선 에너지에 의한 원자의 여기 발생이 일어나고 이온화 및 유리기 생성으로 화학반응이 발생되어 열화를 진척시킨다.

2. 예방보전을 위한 열화 진단

설비의 고장 형태는 그림 2와 같이 초기 고장기, 우발 고장기 그리고 마모 고장기로 나누어진다. 초기 고장기에는 일반적으로 설계오류, 시공오류, 제작오류 등으로 설비 그 자체가 운용과는 관계가 적으면서 원천적으로 설비자체에 오류가 있는 원인으로 인하여 고장이 발생하게 된다. 따라서 이 고장기간에는 설계, 제작, 시공과정에서 있었던 오류를 정상화시키는 작업이 설비의 종류에 따라 짧게 또는 긴 기간을 가지고 이루어진다.

이러한 초기 고장기간을 지나면 설비는 정상적으로 고장없이 상당기간 운전되게 되는 우발 고장기간을 맞게된다. 이 우발 고장기간 중에 설비는



<그림 2> 고장 형태

<표 2> 열화 진단 시험법

분 류	시 험 방 법	종 류
비 파괴 시험	직류전압시험	Megger 시험
		직류전류시험
	교류전압시험	교류전류시험
		부분방전시험
		Ian δ 시험
파괴 시험	직류 내전압 시험	
	상용주파 내전압 시험	
	충격내전압 시험	

높은 신뢰성을 가지고 정상운전되고, 고장은 우발적인 원인으로 발생되기 때문에 우발 고장기라고 부르고 있다. 우발 고장기간 중에는 전기설비일 경우 뇌격에 의한 설비의 고장, 이물질의 급작스런 침입에 의한 고장 등 외부원인에 의한 고장이거나 설비의 유지보수나 운전 등의 과정에서 인적으로 인한 고장 등이 이 고장기간중의 고장 원인이 될 수가 있을 것이다.

마모 고장기에는 말 그대로 설비의 장기간 사용으로 경년열화에 의한 고장이 대부분을 차지하게 되고 이 시점에서 각종 절연 열화진단기법을 이용하여 설비의 열화상태를 판단하고 설비의 상태에 따른 사전 예방조치를 적절히 취함으로써 장기간에 걸친 정상운전여부를 결정할 수가 있을 것이다. 예를들어 적절한 진단기법을 이용하여 절연과 피에 이르기 전에 권선을 교환하거나 본체를 교환함으로써 고장요소를 사전에 제거할 수가 있다. 이러한 방법으로는 필요한 에지(Edge)나 리드(Lead)선 등의 부품 교환, Coil End 지지부의 보강, 권선의 세정, 건조, 와니스처리 등의 실시도 한 방법이 될 수 있다.

그림 2에서 알 수 있는 바와같이 마모 고장기에 설비의 열화부분을 재 권선하거나 절연을 강화하거나 또는 신규 자재로 부품을 교체함으로써 설비의 사용수명을 연장할 수 있다. 하지만 설비의 전체를 교체하지 않고 투자비 등을 감안하여 부분적으로 교체하거나 예방보수할 경우에는 고장의 증가를 (1)의 그래프 대비 (2)의 그래프와 같이 완만하게 나타나도록 할 수 있을 것이다. 따라서 설비의 고장을 감소시켜 장시간 안정적으로 운전하

기 위해서는 사용기간에 따라 적절한 예방보수 또는 일부 부품의 교체를 적절한 시기에 수행하지 않으면 안된다. 만약 이와 같은 설비의 예방보전이 적절한 시기, 즉 그림 2를 기준할 때 마모 고장기에 들어가기 전에 시행하지 않으면 마모 고장기에 들어간 후 고장을 경험하고 이를 분석하여 마모로 인한 고장이라는 것을 인식하고 난 후에야 대책을 강구하게 되는 우를 범할 우려가 있다. 그림 2를 기준하여 볼 때 설비는 마모 고장기에 들어가기 이전에 설비의 열화진단을 실시하여 고장 발생 전에 대책을 강구하여 실시함으로써 일어날 수도 있는 고장을 사전 예방하여 안정적인 운전을 계속할 수 있을 것이다. 이는 일부 산업설비에서 실제로 있었던 일로 설비 운전기간이 12년을 경과 하면서 일년에 12번의 정지사고를 유발한 경우가 있었다. 고장 내용을 조사해 본 결과 경년열화로 인한 설비 고장으로 판단되어 다음해에 대대적인 설비의 보강 또는 교체공사를 수행한 후 고장률을 대폭 줄인 예가 보고되고 있으며 이는 앞에서 언급한 내용을 잘 설명해 주고 있는 하나의 예에 해당한다.

3. 절연 진단 시험

권선의 전기적 열화를 진단하기 위한 시험은 표 2와 같이 분류할 수 있다. 여기서는 비파괴시험에 대하여 기술해보기로 한다.

이들 시험 항목중 직류전압시험은 절연저항 및 흡습정도 등을 조사하기 위하여 사용하는 성극지수(PI) 측정시험이 있으며 교류전압시험중 DI,

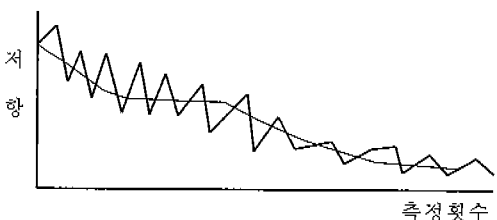
P_{i1} , P_{i2} , 부분방전시험에서는 최대 방전 전하량 Q_{max} , $\tan \delta$ 시험에서는 $\Delta \tan \delta$ 등을 얻을 수 있다. 일반적으로 내전압시험들은 절연진단시험이라기 보다 기기의 절연강도시험을 목적으로 실시하는 것으로 운전에 필요한 절연 강도여부를 판단하는데 사용되는 시험으로 시험시 인가되는 전압이 기기의 정격전압보다 높기 때문에 신규 제작 설비 또는 재권선후 절연내력을 시험하는데 일반적으로 많이 사용되고 있다.

3.1 절연저항시험

절연저항 측정시험은 운전개시 전이나 운전중에 있는 기기에 대한 보수, 점검시에 주로 실시하며

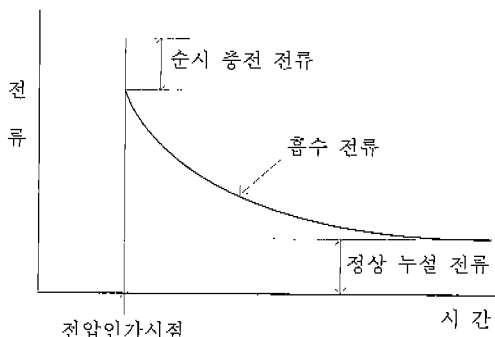


(a) 기름, 먼지는 존재하지 않고 수분이 변화하는 경우



(b) 수분의 존재하에서 기름, 먼지 등이 축적되는 경우

<그림 3> 장기적인 절연저항 측정예



<그림 4> 직류전압 인가에 따른 흡수전류

운전에 필요한 절연저항을 가지고 있는가의 여부, 운전에 따른 절연저항의 저하정도를 점검하고 절연열화 진단시험시 사용되는 고전압을 인가해도 충분한가를 점검하기 위하여 실시한다.

외부로부터 절연체에 이물질이 부착되거나 흡습, 혹은 오손되면 절연체에 도전 경로가 형성되어 절연저항이 낮아진다. 따라서 메가(Megger)시험으로 절연체의 흡습이나 먼지 축적에 의한 오손 상태를 어느 정도 파악할 수 있다. 그러나 절연저항치는 시료의 절연구조, 형태, 공정 등에 따라 변하므로 저항치만으로 평가하기는 곤란하다. 메가 시험으로 정기적인 측정에 의해 절연저항 변화 추이를 평가하여 절연상태를 판정하는 것이 바람직하다. 그림 3은 장기간에 걸쳐 절연 상태를 측정한 예로서 (a)는 절연저항치가 변동하고 있지만 장기적인 경향으로 절연저항치는 저하하지 않는 것을 알 수 있다. 그러나 (b)는 절연저항치가 점점 저하하고 있으며 어느 정도 오손이나 흡습이 진행되고 있는 것으로 분석할 수 있다.

3.2 직류전류시험

절연물에 직류전압을 인가할 때 절연물의 정전용량에 따라 순간적으로 끝나는 충전전류와 시간에 따라 천천히 감소하는 흡수전류 및 시간에 대하여 변화가 없는 누설전류가 흐른다. 전류가 시간에 따라 천천히 감소하는 현상을 절연물의 흡수 현상이라고 부르고 절연물이 흡습해 있는 경우는 흡수전류에 비하여 누설전류가 증가하기 때문에 전류가 일정치로 떨어질 때까지의 시간이 짧아진다. 이로부터 각시간에서의 특성을 구하여 흡습의 정도를 판단할 수 있으며 본 판단의 기준을 성극지수(Polarization Index)라 한다. 그림 4의 누설전류-시간특성으로부터 1분의 값과 10분의 값을 표시하여 나타낸다.

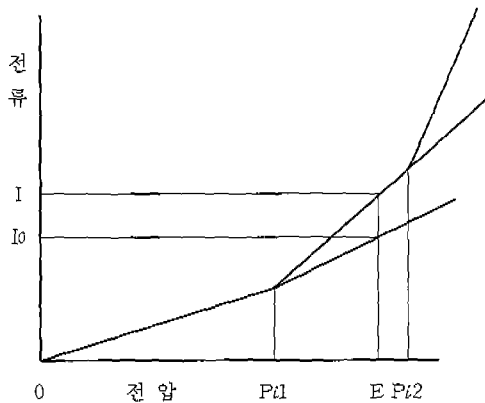
$$\text{성극지수(PI)} = \frac{\text{전압인가 1분 후의 전류}}{\text{전압인가 10분 후의 전류}}$$

시험전압은 일반적으로 500[V] 또는 10,000[V]가 이용되고 있으며 측정된 성극지수가 2.5 이상이면 건조상태이고 2.5~1.5이면 보통, 그리고 1.5 이하의 경우는 흡습상태로 판정하고 있으며 1.5 이하일 경

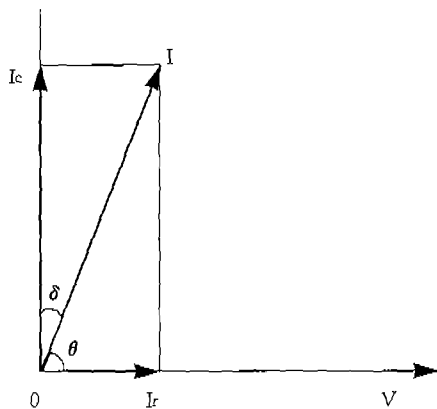
우는 건조 처리가 필요하다.

3.3 교류전류시험

절연물에 교류전압을 인가하여 전압을 증가시키면 충전전류가 비례하여 증가한다. 그러나 절연물 내에 공극(Void)이 존재할 경우에는 공극내에서 부분방전이 일어나 공극을 단락하므로 충전전류는 비례 이상으로 급증하여 전압-전류특성에 굴곡점이 생기게된다. 이 전류가 급증하는 전압과 전류 증가율에서 열화의 정도를 판정할 수 있다. 그림 5에는 절연체에 교류전압을 인가하였을 경우에 나타나는 교류전압-전류특성 예를 보이고 있다. 전



<그림 5> 교류전류-전압특성



<그림 6> 전압-전류 Vector

류증가율 ΔI 는 정격전압 E에 대한 실측 충전전류 I와 충전전류가 직선적으로 증가했다고 가정한 경우의 전류 I_0 를 사용하여 다음 식으로 정의한다.

$$\Delta I = \frac{I - I_0}{I_0} \times 100 [\%]$$

비교적 열화가 진전된 권선절연에서는 그림 5에서와 같이 2개의 전류 증가전압이 나타나는 것이 많고 각각 제1전류 급증점을 P_{11} 및 제2전류 급증점을 P_{12} 라고 부르고 있다. P_{11} 은 공극내 방전으로 P_{12} 는 공극간을 교락하는 방전에 기인한다고 말하고 있다. 일반적으로 절연열화의 진행에 따라 P_{11} , P_{12} 는 저하하고 ΔI 는 증가한다.

3.4 유전정점시험

절연물에 교류전압을 인가하면 절연물에서의 손실로 인해 전전류 I는 충전전류 I_c 보다 δ 만큼 늦어진다. 여기서 $\angle IcOI = \delta$ 이고 일반적으로 δ 는 작기 때문에 $\sin \delta \approx \tan \delta$ 로 되어 절연물에서의 손실 W는 다음식으로 된다.

$$W \approx \omega \cdot C \cdot V^2 \cdot \tan \delta$$

여기서 C는 절연물의 정전용량, ω 는 전원전압의 각주파수이다. 따라서 손실은 유전정점 $\tan \delta$ 에 비례한다. 절연물중에 공극이 존재하는 경우 인가전압이 높게되면 공극내에서 부분방전이 일어나 방전전류가 흘러 $\tan \delta$ 는 증가한다. 이것으로부터 정격전압에 있어서의 $\tan \delta$ 와 부분방전을 일으키지 않는 낮은 전압(통상 $0.2 \times$ 정격전압 E)에서의 유전정점 $\tan \delta_0$ 와의 차 $\Delta \tan \delta$ 를 이용하여 평균적인 공극생성상태를 추정한다. 이 $\Delta \tan \delta$ 는 열화의 진행에 따라 증가하므로 절연열화의 판정상 중요 정보이다.

3.5 부분방전시험

절연의 열화는 극부적으로 진행되는 것도 있어 이 극부적인 열화를 검출하는 시험도 중요하다.

부분방전시험은 절연물중의 약점인 공극이나 균열로 발생하는 부분방전의 펄스전류를 검출하여 그 크기, 발생빈도, 방전개시전압 등에서 절연열화상태를 판정하는 것이다. 이중 권선절연에서는 최

<표 3> 권선 절연열화 판정기준 (1)

비파괴 시험측정치	권선의 정격전압 [kV]		
	3.3	6.6	11
PI	>1.5	>1.5	>1.5
P2	>4.58	>8.55	>13.86

<표 4> 권선 절연열화 판정기준 (2)

정격전압[kV]	3.3	6.6	11	시험전압[kV]
ΔI (%)	4.0	8.5	12.0	E(정격전압)
$\Delta \tan \delta$ (%)	0.7	6.5	6.5	
Q_{max} (C)	5×10^{-9} [3.3]	5×10^{-9} [4.5]	1×10^{-8} [6.35]	[]내의 전압

대 방전 전하량 Q_{max} 의 전압특성을 측정하는 것이 보통이다. 전계방향에 심한 균열이 있는 경우 큰 공극이 있다고 볼 수 있으므로 이것에 따른 방전 전압으로 아주 큰 Q_{max} 가 관찰될 수 있다. 균열 등과 같이 국소적인 결함이 존재할 경우에는 방전 펄스 파고치가 크고 발생빈도가 증대한다. $\Delta \tan \delta$ 가 비교적 적은데도 Q_{max} 가 대단히 클 경우에는 국소적인 결함이 존재하고 있다고 볼 수 있다.

3.6 절연열화의 관리한계

일반적으로 절연열화의 관리한계로서 다음과 같은 것이 있다.

(1) IEC 보고

『절연과피 전압에 있어서는 초기의 50% 저하점을 수명점』으로 정의하고 있다.

(2) 일본 전력중앙연구소 보고

『권선의 절연과피 전압이 상온에서 $(2E+1)kV$ 이상으로 추정되는 경우 그 권선은 운전이 필요한 절연내력을 가진 것으로 한다』라고 정의하고 있다. 여기서 E는 정격전압을 나타낸다. $(2E+1)kV$ 은 일반적으로 초기치의 거의 50%에 상당한다.

(3) 개폐 서어지로부터 검토

진공 차단기를 제외한 일반 차단기에 의한 계통의 개폐 서어지 전압 V_p 는 다음식으로 표시된다.

$$V_p = 2.6 \times \left(\frac{E}{\sqrt{3}} \right) \times \sqrt{2}$$

정격전압이 6.6kV에 있어서 $V_p=14[kV]$ 이고 실효치 기준 9.9[kV]이다.

3.7 절연열화 판정

비파괴시험법에서는 파괴전압을 추정하여 열화의 상태를 판정한다. 비파괴시험법은 절연열화에 의해 생기는 공극의 함유율과 파괴전압의 밀접한 관계에 따르고 있으므로 모든 공극이 방전되는 높은 전압을 인가할수록 진단정도는 높아진다. 그러나 고전압의 인가는 절연에 손상을 주는 것이므로 인가전압을 낮게 억제할 경우 진단정도는 저하되는 양면성을 가지고 있다.

일반적으로 현재 사용되고 있는 절연열화 판정 기준은 Asphalt Compound 절연에 의한 전통적인 방법과 최근에 널리 이용되고 있는 절연열화 진단법으로서 회전기 기동정지 횟수와 운용년수에 따라 잔존수명을 평가하는 방법과 전기적 진단시험에 의한 특성 기준으로 잔존수명을 평가하는 방법이 있다. 표 3과 4는 앞에서 설명한 비파괴 절연진단법에 의한 판정 기준치를 보여주고 있다.

표 3과 4의 절연진단법은 측정시점에서 절연체가 필요한 절연내력을 보유하고 있는가에 중점을 두고 있다. 때문에 열화의 정도를 파악하여 잔여 수명을 예측하기에는 미흡한 방법이다.

○ 다음호에 계속 됩니다