

고압전동기 고정자 권선의 절연상태 분석

김희동, 이영준, 주영호
한국전력공사 전력연구원 발전계전그룹

1. 머리말

고압전동기는 다양한 운전조건과 사용환경에 따라 고정자 권선 표면이 유독가스, 기름, 분진 및 수분 등의 영향을 크게 받고 있으며, 단말권선(Endwinding) 단부의 절연재료 표면에 도전성 물질이 부착되어 있다가 정지중(Off-line)에 흡습되어 절연층 열화를 가속시키는 경향이 있다. 장기간 사용된 고압전동기 고정자 권선의 절연재료는 슬롯부분보다도 단말권선에서 열화가 진행되는 경우가 많다. 슬롯부분은 권선이 반도체층(Semiconductive Layer)에 의해 철심과 접지되어 있으나, 단말권선은 표면의 오손, 습기조건에 의해 표면 저항이 크게 감소하여 물리적으로 전류의 흐름이 원활하기 때문에 탄화가 트리(Tree)와 비슷한 유형으로 성장하여 결국에는 파괴전압이 저하되어 절연파괴가 발생한다. 또한, 고압전동기에서는 기동시 흐르는 전류로 인해 전자력이 커지기 때문에 피로열화에 의한 박리(Delamination), 균열(Crack) 및 보이드(Void) 등에서 부분방전 혹은 흡습에 의한 절연열화가 발생한다. 일반적으로 절연열화는 절연재료 내부보다 오히려 권선 표면에서 더 많이 발생하는데, 주원인은 전자력에 의한 진동으로 피로파괴를 일으킨다.

따라서 발전소 주요설비에서 운전중인 고압전동기의 갑작스런 절연파괴 사고는 전력공급의 신뢰성을 저하시키고, 단시간에 복구가 곤란할 뿐만 아니라 상대적으로 경제적인 손실이 매우 크게 된다. 대용량 고압전동기 고정자 권선에서 절연파괴가 발생하기 전에 열화상태를 평가하기 위해 주기적인 정밀분해 점검과 절연진단 시험을 수행하고 있다. 정밀분해 점검은 대략 3년 주기로 매년 시행되는 계획예방정비공사중에 육안검사를 실시한다. 정지중 절연진단에 관한 연구가 주로 1980년대

부터 Simons, Yoshida 등에 의해 성극지수, 교류전류, 유전정접 및 부분방전 등을 측정하여 고압전동기의 절연열화 상태를 판정하고 있다⁽¹⁾⁽²⁾. 그리고 현재는 고압전동기 운전 초기부터 절연진단을 수행하여 트렌드(Trend) 관리를 통해 절연열화 상태를 지속적으로 분석하고 있다.

이 논문은 정밀 절연진단을 시행한 375대의 고압전동기 중에 6대의 고정자 권선에서 절연열화 상태를 세밀하게 분석하였다. 고압전동기의 절연열화 판정과 권선 교체는 교류전류, 유전정접 및 부분방전 등에 의해 평가하였으며, 부분방전 패턴과 고정자 권선의 절연 파괴 원인 등을 분석하여 최적의 유지정비, 수명연장 및 안정적인 운전에 활용하고자 한다.

2. 절연진단 시험 및 절연열화 평가 기준

가. 절연진단 시험

(1) 절연저항 시험(Megger Test)

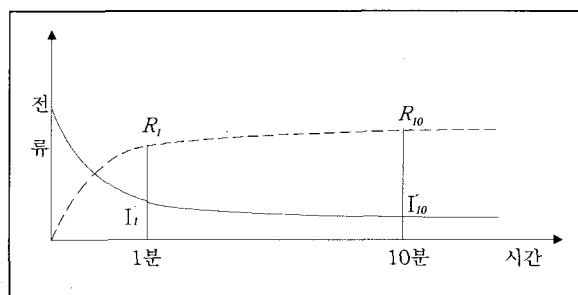
절연저항 시험은 절연물의 흡습이나 오손상태를 파악할 수 있으며, 운전 개시전이나 운전중에 필요한 절연저항 유지 여부를 측정한다. 운전에 따른 절연저항 저하의 정도를 점검하고 절연열화 시험시 사용되는 고전압을 인가해도 충분한가를 사전에 점검하기 위해서 실시한다. 고압전동기 고정자 권선을 3상 일괄로 하여 전원 입력단자와 대지간에 Megger로 직류전압을 인가하여 1분 후에 절연저항을 측정한다.

(2) 직류전류 시험(Polarization Index Test)

직류전류(성극지수) 시험은 절연물에 직류전압을 인가했을 때의 전류-시간 특성으로부터 절연물의 흡습, 도전성 불순물의 흡입, 생성, 오손과 절연물의 결합 등 절연물 상태를 판정한다. 전류의 크기는 절연물의 형태

와 크기에 따라 변하기 때문에 전류의 크기만으로 판단할 수는 없다. 절연물이 열화되거나 흡습된 경우에 직류전류를 측정하면, 전류-시간 특성 곡선에서 누설전류의 감쇄율이 낮아지게 된다. 따라서 절연물의 흡습과 오손 정도를 판정하기 위해 식(1)과 같이 누설전류와 절연저항을 시간 변화에 따라 측정하여 성극지수를 계산한다. 그림 1은 전압 인가시간에 따라 누설전류와 절연저항의 변화를 나타냈다.

$$\begin{aligned} \text{성극지수(PI)} &= \frac{\text{전압인가 1분후의 전류}}{\text{전압인가 10분후의 전류}} \\ &= \frac{\text{전압인가 10분후의 절연저항}}{\text{전압인가 1분후의 절연저항}} \quad (1) \end{aligned}$$



〈그림 1〉 전류-시간 특성

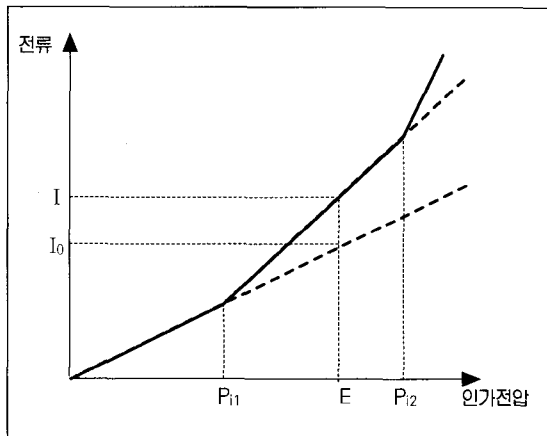
(3) 교류전류 시험(AC Current Test)

교류전류 시험은 절연물에 교류전압을 인가했을 때 흐르는 전류와 전압사이의 관계, 즉 I-V 특성으로부터 절연상태를 평가한다. 교류전압을 절연물에 인가하면 전압상승에 비례하여 충전전류가 증가하며, 이때 절연층 내에 결함이 존재하여 부분방전 현상이 발생하면 미소공극을 단락시켜 충전전류가 급격히 증가한다. 이러한 전류 급증전압과 전류 급증률로부터 절연물의 흡습 및 열화의 정도를 알 수 있다.

비교적 열화가 진행된 절연물에 교류전압을 인가했을 경우, 인가전압이 높아져 부분방전이 발생하면 전류는 전압에 비례하지 않고 그림 2와 같이 급증하게 된다. 이와 같이 전류가 급증하는 점의 전압을 전류급증 전압이

라 부르며, 2개의 전류급증점이 존재할 경우 낮은 전압 점은 제1전류 급증점(P_{11}), 높은 점을 제2전류 급증점(P_{12})이라 한다. P_{11} 은 미소공극내 방전에 기인하는 것으로서 부분방전 개시전압이나 $\tan \delta$ 증가전압과 비교적 일치하는 경향이 있고, P_{12} 는 미소공극간의 섬락에 기인하는 것으로서 파괴전압과 상관관계가 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 절연진단 시험에 사용되는 파라미터는 교류전류-전압 특성에서 식(2)와 같이 전류증가율(ΔI)을 계산하여 사용한다.

$$\Delta I = \frac{I - I_0}{I_0} \times 100[\%] \quad (2)$$



〈그림 2〉 교류전류-전압(I-V) 특성

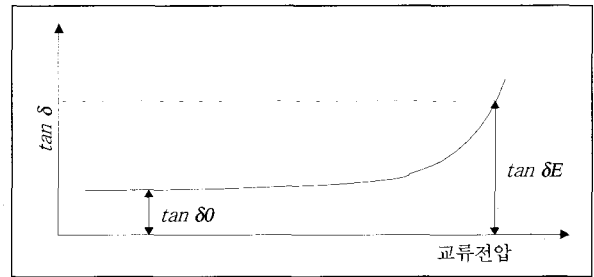
(4) 유전정점($\tan \delta$) 시험

절연물에 교류전압을 인가하면 일반적으로 전압에 대하여 위상이 90° 앞선 충전전류($I_c = j \omega CV$)와 동상인 누설전류($I_l = GV$)가 흐르며, 유전정점은 충전전류를 누설전류로 나눈 값을 나타낸다. 절연물에 교류전압을 인가하여 측정되는 $\tan \delta$ 로부터 흡습, 건조, 오손, 미소공극 유무 등의 절연상태 및 열화정도를 추정할 수 있다.

따라서 $\tan \delta$ 는 절연물의 특성값으로 전기적 손실 정도를 나타내며, 절연재료가 매우 양호하면 인가전압이

증가하여도 $\tan \delta$ 는 증가하지 않는다. 그러나 고정자 권선의 주절연 혹은 주절연과 철심 사이에 공극이 존재할 때 고전압이 인가되면 이들 공극에서 부분방전이 발생한다. 부분방전은 열과 빛을 생성하기 때문에 에너지를 소비하며, 이로 인하여 권선내 전기적 손실이 증가한다. 그 결과 전압이 증가함에 따라 $\tan \delta$ 도 증가하고 부분방전도 증가하게 되므로 $\tan \delta$ 시험은 부분방전의 발생상태를 간접적으로 나타내는 척도가 된다. 그림 3에 $\tan \delta$ -전압 특성을 나타내었으며, $\Delta \tan \delta$ 는 식(3)과 같이 계산한다.

$$\Delta \tan \delta = \tan \delta E - \tan \delta 0 \quad (3)$$

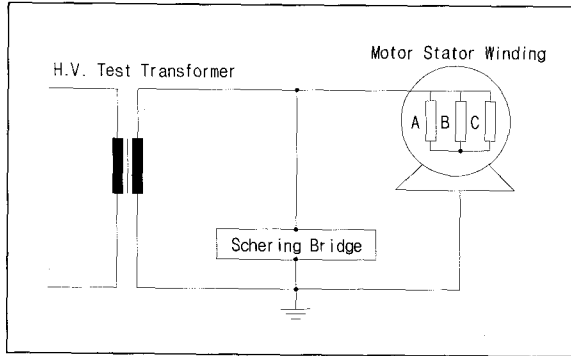


〈그림 3〉 $\tan \delta$ -전압 특성

고압전동기 고정자 권선에서 교류전류와 유전정점 시험은 웨링브리지(Schering Bridge)를 사용하였으며, 웨링브리지는 전원장치(HV Supply, Type 5283), 브리지(Bridge, Type 2818) 및 공진 인덕터(Resonating Inductor, Type 5285)로 구성되어 있다. 그림 4는 고압전동기 고정자 권선에서 웨링브리지를 사용하여 3상 일팔로 교류전류와 유전정점을 측정하는 회로도를 나타냈다.

(5) 부분방전 시험(Partial Discharge Test)

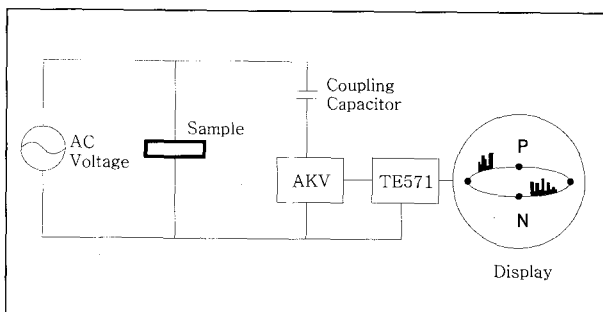
대형 고압회전기 고정자 권선의 경우 사용시간의 증가로 인해 권선이 열화되어 절연물에 미소공극, 균열, 박리 등이 생기면 이 결함부에서 부분방전 펄스전류가



〈그림 4〉 교류전류, 유전정접의 측정 회로도

발생한다. 이 부분방전을 검출하여 전기적인 절연물의 열화상태 뿐만 아니라 과열이나 주기적 응력에 의한 단말권선(Endwinding)에서 표면방전, 웨지 이완, 그리고 슬롯 방전 등의 이상상태를 알 수 있다. 절연물내의 국부적인 열화를 검출하는 수단으로서는 최대 부분방전 전하량(Qm)을 사용하고, 일반적으로 절연열화가 진행되면 방전전하가 커지고 방전 발생빈도 또한 증가하기 때문에 Qm이 커지면 절연 파괴전압이 저하되는 관계를 이용해서 절연열화 정도를 판단한다.

그림 5는 부분방전의 측정 회로도를 나타냈으며, 고압전동기 고정자 권선에 슈어링브리지(Tettex Instruments)를 연결하여 교류전압을 인가하였다. 커플링 캐패시터(Coupling Capacitor, Tettex Instruments, 4,000pF)는 권선에서 유입되는 전원 잡음을 제거한 다음 신호를 커플링 유닛(Coupling Unit, Tettex



〈그림 5〉 부분방전의 측정 회로도

Instruments AKV 572)에 보내어 증폭한 후에 디지털 부분방전 측정기(Digital Partial Discharge Detector, Tettex Instruments TE 571)에서 방전 크기와 패턴을 분석한다.

나. 절연열화 판정기준

3.3kV와 6.6kV의 고압 회전기에 대하여는 1984년 일본전기학회에 의하여 기술된 고정자권선의 절연열화 판정기준과 CRIEPI가 1967년도에 작성한 기준에서 인용하여 1988년 3월에 발간된 일본전기학회 기술보고서 및 Toshiba사에 의해 발표된 11kV 고압 회전기의 판정기준을 참고하여 사용하고 있다⁽³⁾⁽⁴⁾. 고정자 권선의 절연열화 판정기준을 표 1에 나타냈다.

〈표 1〉 고정자 권선의 절연열화 판정기준

정격 전압		3.3kV	6.6kV	11kV
성극지수	DC 1kV	1.5	1.5	1.5
교류전류 $\Delta I(\%)$	$1.25E/\sqrt{3}$		2.5	5.0
	E	4.0	8.5	12.0
유전정접 $\Delta \tan\delta(\%)$	$1.25E/\sqrt{3}$		0.9	2.5
	E	0.7	6.5	6.5
최대부분방전(nC)	$E/\sqrt{3}$		10	10

또한, 1989년도에 EPRI에서 발간된 보고서에도 아스팔트(Asphalt)와 에폭시(Epoxy) 수지를 사용한 고정자 권선의 성극지수, 방전 개시전압(Discharge Inception Voltage : DIV) 및 최대부분방전 등에 관한 판정기준을 발표하였다⁽⁵⁾. 에폭시 권선의 경우 대지와 권선 사이에 상전압을 인가하여 10nC이 넘으면 고정자 권선에 대한 육안검사를 실시하도록 권하고 있으며, 방전개시전압이 상전압의 1/2 이하이면 슬롯방전(Slot Discharge)이 발생하고 있는 것으로 판정한다.

3. 절연진단 사례 분석

가. 교류전류 및 유전정점 분석

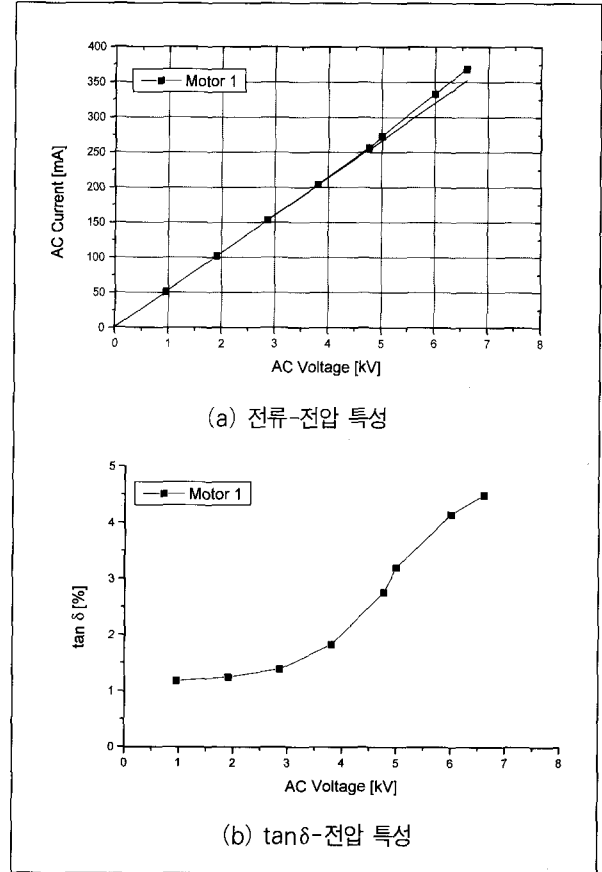
표 2는 고압전동기의 기본사양을 나타냈으며, 정밀 절연진단을 시행하여 표1의 절연열화 판정기준에 의해 절연상태를 평가하였다.

〈표 2〉 고압전동기의 기본사양

전동기명	용량(kW)	전압(kV)	전류(A)	제조사
Motor 1	3,506	6.6	536	외산
Motor 2	730	6.6	75.7	국산 1
Motor 3	580	6.6	45	국산 1
Motor 4	930	6.6	101	국산 2
Motor 5	261	6.6	28	국산 2
Motor 6	261	6.6	27.3	국산 3

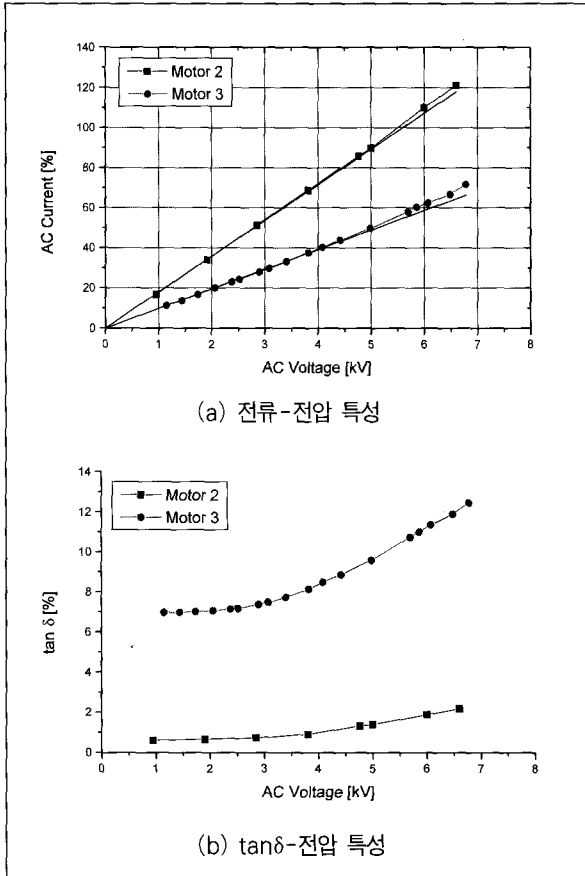
Motor 1은 7년 이상 동안 발전소에서 운전하였으며, 그림 6은 Motor 1의 절연진단 결과를 나타낸 것이다. 그림 6(a)에서는 전압을 6.6kV까지 인가하면서 교류전류를 측정하였으며, 식(2)에 의해 계산된 ΔI 는 4.24%로 분석되었다. 일반적으로 측정값과 기준값 사이의 차이가 작을수록 ΔI 가 작아지므로 절연재료의 상태를 양호하게 판정한다. Motor 1은 4.76kV에서 전류가 증가하기 시작하여 6.6kV에서 약간의 차이를 보이고 있어 절연열화가 거의 진행되지 않고 있음을 확인할 수 있었다. 그림 6(b)에서는 전압을 6.6kV까지 증가하면서 유전정점을 측정하였으며, 식(3)에 의해 계산된 $\Delta \tan \delta$ 는 3.31%로 분석되어 절연재료가 상당히 양호한 것으로 판단된다. $\tan \delta$ 값이 3.0kV에서 증가하기 시작하는데, 실제로 부분방전개시전압이 2.2kV로 분석되었다.

Motor 2와 Motor 3은 국내 동일 제작사에서 제작하였으며, Motor 2는 5년 이상 동안 발전소에서 운전하고 Motor 3은 재권선을 수행하여 공장에서 절연진단



〈그림 6〉 Motor 1의 절연진단 결과

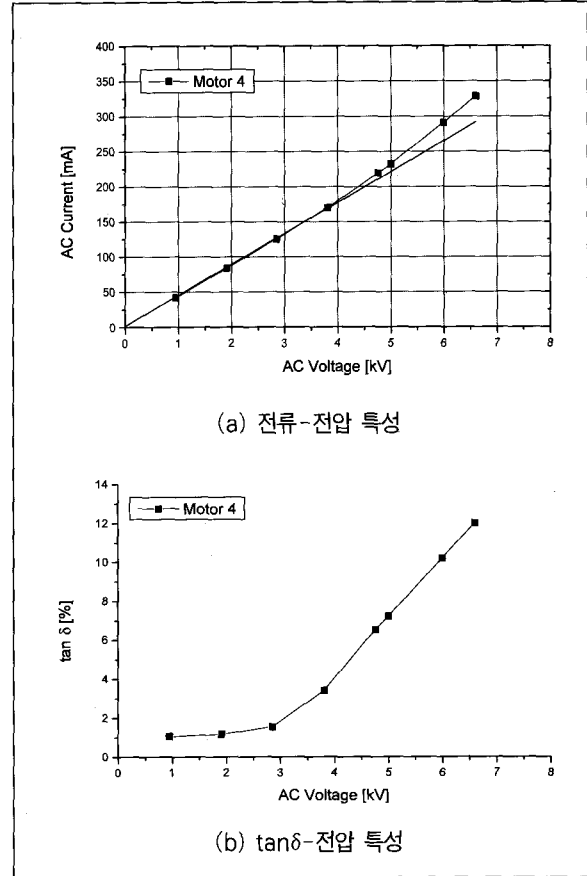
을 시험하였다. 그림 7은 Motor 2, 3의 절연진단 결과를 나타냈다. 그림 7(a)에서는 전압을 6.6kV까지 증가하면서 교류전류를 측정하였으며, 식(2)에 의해 계산된 ΔI 는 각각 2.54%, 4.51%로 분석되었다. 이처럼 ΔI 가 작기 때문에 절연재료의 상태가 양호하게 판정된다. Motor 2, 3은 5.0kV에서 전류가 증가하기 시작하여 6.6kV에서 약간의 차이를 보이고 있어 절연열화가 거의 진행되지 않고 있음을 확인할 수 있다. 그림 7(b)에서도 전압을 6.6kV까지 증가하면서 유전정점을 측정하였으며, 식(3)에 의해 계산된 $\Delta \tan \delta$ 는 각각 1.58%, 5.42%로 분석되어 절연재료가 상당히 양호한 것으로 판단된다. $\tan \delta$ 값이 3.0kV에서 증가하기 시작하는데,



〈그림 7〉 Motor 2, 3의 절연진단 결과

이 부분에서 부분방전의 크기가 증가할 것이라 예측할 수 있다. Motor 2에 비해 재권선한 Motor 3의 ΔI 와 $\tan\delta$ 값이 높게 나타나고 있는데, 이는 에폭시 수지가 완전하게 경화되지 않은 것으로 사료된다.

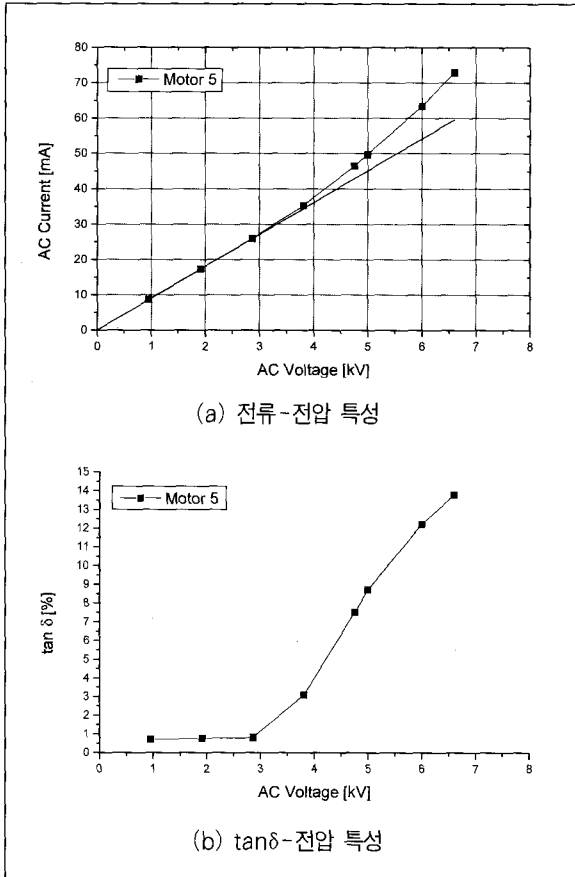
Motor 4는 9년 이상 발전소에서 운전해 왔으며, 그림 8에 Motor 4의 절연진단 결과를 나타냈다. 그림 8(a)에서는 전압을 6.6kV까지 증가하면서 교류전류를 측정하였으며, 식(2)에 의해 계산된 ΔI 는 9.33%로 분석되었다. Motor 4는 3.81kV에서 전류가 증가하기 시작하여 6.6kV에서 차이를 보이고 있어 절연재료에서 초기열화가 진행되고 있음을 확인할 수 있었다. 그림 8(b)에서는 전압을 6.6kV까지 증가하면서 유전정접을



〈그림 8〉 Motor 4의 절연진단 결과

측정하였으며, 식(3)에 의해 계산된 $\Delta \tan\delta$ 는 10.94%로 분석되어 절연재료 내부에 보이드가 존재하는 것으로 판단된다. Motor 4는 교류전류와 유전정접이 기준치를 초과하고 교류전류가 상전압(3.81kV) 이상에서 증가하기 때문에 고장자 권선이 초기 절연열화 상태를 나타내고 있다.

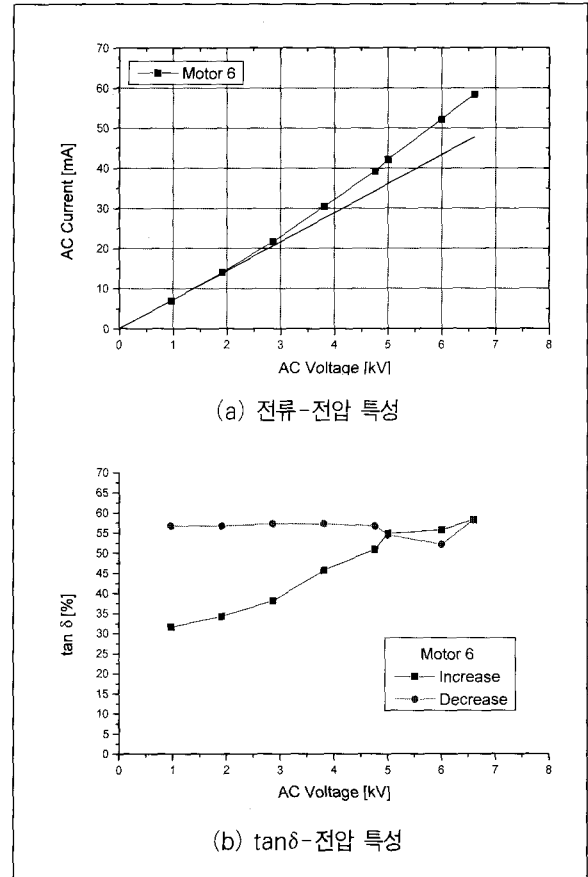
Motor 5는 15년 이상을 발전소에서 운전해왔으며, 그림 9에 Motor 5의 절연진단 결과를 나타내었다. 그림 9(a)에서는 전압을 6.6kV까지 증가시키면서 교류전류를 측정하였으며, 식(2)에 의해 계산된 ΔI 는 19.5%로 분석되었다. Motor 5는 3.0kV에서 전류가 증가하기 시작하여 6.6kV에서는 큰 차이를 보이고 있



〈그림 9〉 Motor 5의 절연진단 결과

어 절연재료가 열화된 것으로 분석되었다. 그림 9(b)에서는 전압을 6.6kV까지 증가하면서 유전정접을 측정하였으며, 식(3)에 의해 계산된 $\Delta\tan\delta$ 는 13.1%로 분석된 것으로 보아 절연재료 내부에 보이드가 많이 존재하는 것으로 판단된다. Motor 5는 교류전류와 유전정접이 기준치를 훨씬 초과하고 교류전류가 상전압보다 낮은 3.0kV에서 증가하기 때문에 고정자 권선의 절연열화가 크게 진행되어 재권선으로 판단되었다. 그리고 Motor 4와 Motor 5는 동일 제작사이며, 여기서 제작한 대부분의 고압전동기를 절연진단한 결과 유전정접이 높게 분석되었다.

Motor 6은 17년 이상 발전소에서 운전하였으며, 그



〈그림 10〉 Motor 6의 절연진단 결과

림 10에 Motor 6의 절연진단 결과를 나타내었다. 그림 10(a)에서는 전압을 6.6kV까지 증가하면서 교류전류를 측정하였으며, 식(2)에 의해 계산된 ΔI 는 22.95%로 분석되었다. Motor 6은 2.0kV에서 전류가 증가하기 시작하여 6.6kV에서는 큰 차이를 보이므로 절연재료가 완전히 열화된 것으로 분석하였다. 그림 10(b)에서는 6.6kV까지 증가하였다가 다시 전압을 감소하면서 유전정접을 측정하였는데, 이런 패턴은 절연열화로 인해 권선 교체를 나타내고 있다. 식(3)에 의해 계산된 $\Delta\tan\delta$ 는 26.6%로 분석되어 절연재료 내부에 보이드가 상당히 존재하는 것으로 판단된다. Motor 6에서 절연저항과 성극지수를 측정한 결과 고정자 권선이 흡

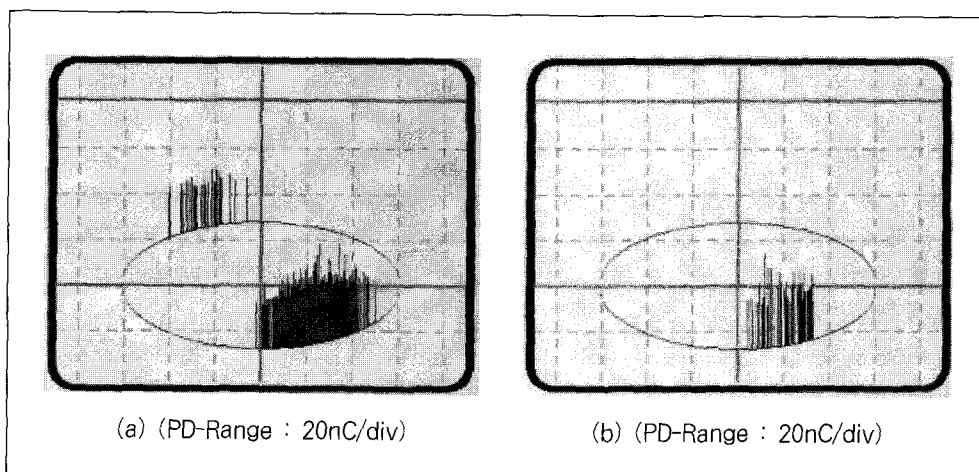
습되었으며, 교류전류와 유전정접이 기준치를 훨씬 초과하고 교류전류가 상전압보다 훨씬 낮은 2.0kV 이하에서 증가하기 때문에 절연재료가 완전히 열화되어 재권선으로 판정하였다. 그리고 Motor 6은 교류 절연내력 시험중에 대략 6.8kV 정도에서 절연파괴가 발생하였다. 그리고 Motor 1~Motor 6에서 알 수 있는 바와 같이 열화가 진행될수록 낮은 전압에서 전류가 증가하고 있으며, $\Delta \tan \delta$ 도 역시 크게 증가하고 있다.

나. 부분방전 패턴 분석

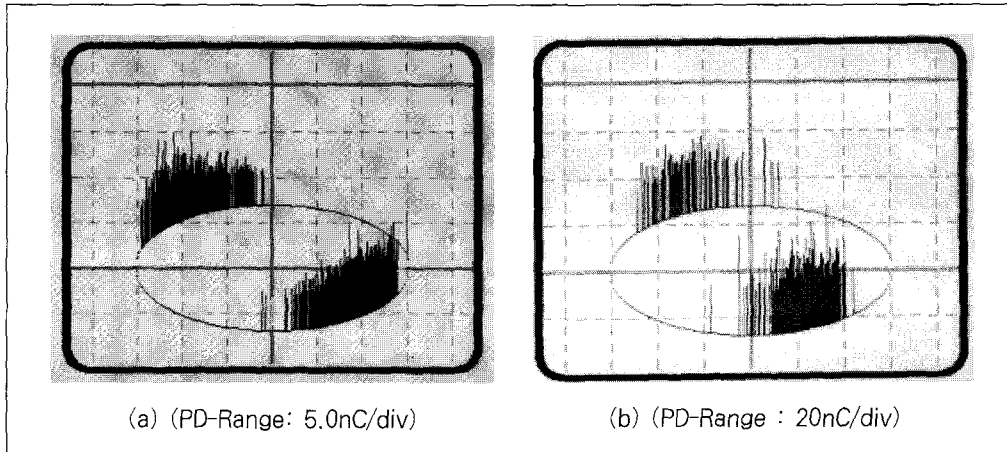
그림 11과 같이 Motor 4의 부분방전 패턴은 슬롯방전이며, 그림11(a)와 같이 정극성에 비해 부극성에서 부분방전 크기와 수가 많이 나타나거나 그림11(b)처럼 슬롯방전이 우세할 경우에는 부극성에서 주로 나타난다. 슬롯방전은 고정자 권선에서 표면방전의 영향을 최소화하기 위해서 권선 직선부에 반도체 코팅과 슬롯 외부재료에 End-grading 페인트를 사용하고 있다. 그런데 권선과 슬롯의 상대적 움직임으로 마모되어 반도체 코팅이 손상됨에 따라 일부 권선의 접지상태는 나빠지고 권선 표면에 전하가 축적되어 철심과 권선 사이에서 슬롯방전을 일으킨다. 슬롯방전은 상당한 에너

지가 포함되며, 방전시에 오존(Ozone)을 생성하여 고정자 철심과 고무성분의 절연재료를 심하게 산화시킨다.

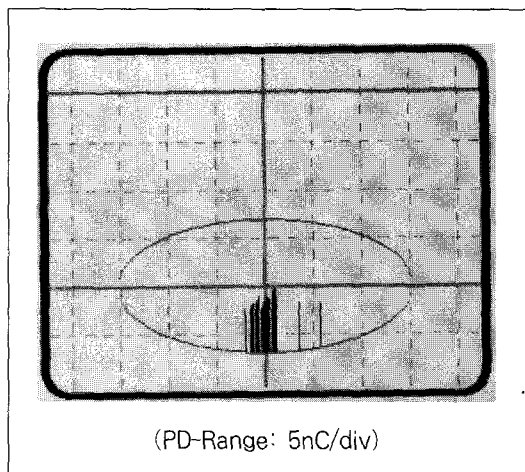
Motor 5와 Motor 6에서 부분방전 측정시 계통잡음은 각각 1,200pC, 110pC이며, 1000pC 개시전압이 각각 2.08kV, 3.80kV로 측정되었다. 부분방전 크기는 상전압에서 각각 25.8nC, 0.95nC이며, 6.6kV에서 각각 35.3nC, 8.3nC로 증가하였다. 그림 12에서 보인 바와 같이 Motor 1~3, Motor 5의 부분방전 패턴은 내부방전이며, 절연진단 수행시에 약 80%의 고압전동기에서 이런 형태의 방전이 나타나고 있다. 그림 12(a)는 정극성과 부극성에서 부분방전 크기와 수가 거의 일치하기 때문에 순수한 내부방전을 나타내고 있는데, Motor 1~3은 이런 형태의 방전패턴을 보이고 있다. 그러나 그림12(b)처럼 부극성이 약간 우세할 경우에는 내부방전에 슬롯방전이 포함된 것으로 분류되는데, Motor 5의 방전 패턴과 일치하고 있다. 내부방전은 가스로 채워진 공동(Cavity) 즉 보이드에서 발생하며, 기름으로 채워진 보이드에서 역시 절연파괴될 수 있고, 나중에 기체방전을 일으킨다. 보이드 방전은 각각의 분포가 특별한 모양을 갖는 것으로 나타났으며,



〈그림 11〉 슬롯방전



〈그림 12〉 내부방전



〈그림 13〉 코로나 방전

이들의 모양은 부분방전 개시조건에 의해 설명되므로 보이드는 물리적 상태를 반영하고 있다.

그림 13과 같이 Motor 6은 코로나 방전을 나타내고 있다. 코로나 방전은 가스와 액체로 채워진 전극으로부터 돌출된 날카로운 부분에서 발생하는데, 주로 침대 평판 사이의 틈(Gap)에서 불평등 전계에 의해 형성된다. 교류전압이 인가될 때 코로나 방전인 경우에 방전 패턴은 대략적으로 사용전압에서 대칭적으로 배열되며,

〈표 3〉 고압전동기의 절연진단 결과

전동기명	절연저항 (MΩ)	성크지수	교류전류 (%)	유전정접 (%)	부분방전 (nC)	방전패턴
Motor 1	1,800	5.62	4.24	3.31	3.20	내부방전
Motor 2	2,000	6.92	2.54	1.58	2.90	내부방전
Motor 3	2,000	3.25	4.51	5.42	7.92	내부방전
Motor 4	2,000	6.43	9.33	10.94	2.20	슬롯방전
Motor 5	2,000	1.66	19.5	13.1	25.8	내부방전
Motor 6	1.29	0.88	22.95	26.6	0.95	코로나 방전

방전의 크기가 부분적으로 균일하고 시간에 대해 일정한 간격을 갖고 있다. 이와 같은 배열은 부분방전 크기에서 안정된 성질을 나타내는 것이 특징이다.

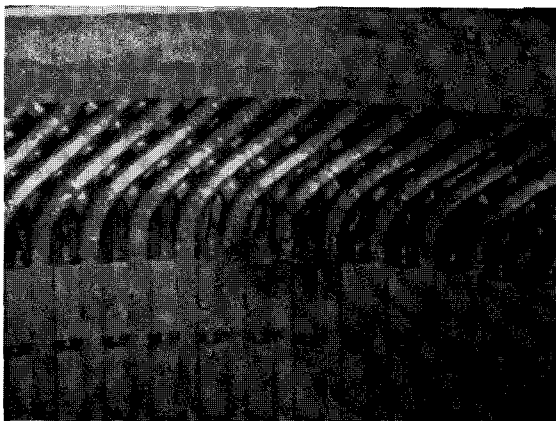
표 3에서는 Motor 1~Motor 6의 절연진단 결과를 종합하여 나타냈다.

4. 절연파괴 원인 분석

10년 이상 사용된 고압전동기에서 절연열화와 흡습에 의한 환경적 원인의 영향으로 인해 사고가 증가하고 있는데, 이를 분석한 결과 절연열화(44.6%) 및 환경(32.4%)에 의한 사고가 전체 중에 77%를 차지하고

있다. 또한, 고압전동기는 기동중에 발생하는 사고가 24%이고, 대부분(62%)은 정상 운전중에 돌발적으로 고장이 발생하므로 손상(Damage) 정도가 크며 단시간에 복구가 곤란할 뿐만 아니라 상대적으로 복구비용이 크다. 따라서 일본, 미국에서도 고압전동기의 고장방지에 대한 관심이 대단히 높기 때문에 고장예방을 위한 기술개발에 지속적인 노력을 하고 있다. 일본에서 3kV 급 유도전동기 125대의 고장원인을 살펴본 결과 고정자 권선(46.4%), 회전자(9.6%), 축수(28.8%), 기타(15.2%) 등으로 나타났으며, 미국 EPRI는 정격전압 2.3kV 이상의 대용량 전동기를 설치하여 운전중인 발전소에서 7,500대를 조사한 결과, 37%는 고정자 권선에서 절연파괴가 발생한 것으로 발표하였다⁽⁸⁾.

경년열화된 고압전동기의 고정자 권선 절연은 슬롯부분보다도 단말권선의 열화가 진행되는 경우가 많으며, 단말권선 표면의 오손, 습기조건에 의해 파괴전압이 저하할 가능성이 있다. 특히, 고압전동기는 사용환경이 다르기 때문에 고정자 권선 표면이 약품, 유독가스, 분진 및 수분 등의 분위기에서 존재하므로 단말권선의 절연재료 표면에 도전성 물질이 부착되어 있다가 정지중에 흡습되면 절연층의 열화가 커지는 경향이 있다. 그림 14는 고압전동기 고정자 단말권선에서 절연파괴된



〈그림 14〉 고압전동기 고정자 단말 권선에서 절연파괴

경우를 나타냈다. 고압전동기에서는 기동시 흐르는 큰 기동전류에 의해 전자력이 커지기 때문에 피로열화가 주요인이 된다. 절연재료에 피로열화가 발생하면 박리와 균열부에서 부분방전에 의한 열화 혹은 흡습에 의한 열화가 발생한다.

15년 이상 운전한 고압전동기 고정자 권선에서 절연진단 결과는 매우 양호하게 판정되었으나 분해점검을 마치고 시운전중에 고정자 단말권선에서 절연파괴가 발생하였다. 절연파괴 원인은 단말권선의 절연재료 표면에 도전성 물질이 부착되어 있다가 분해점검 중에 흡습되어 절연파괴가 발생한 것으로 추정된다. 그 이유는 절연진단시 절연저항이 2,000MΩ 이상으로 측정되었으나 시운전시 80MΩ으로 감소하였으며, 고압전동기 재권선시 고정자 권선을 육안으로 점검한 결과 매우 양호하였다. 또한 15년 이상 운전한 고압전동기 고정자 권선의 절연저항이 80MΩ으로 측정되었으며, 절연진단중에 인가전압을 대략 4kV 정도로 증가하다가 장비보호장치의 차단으로 시험을 중단한 사례도 있었다.

계획예방정비공사중에 고압전동기를 분해점검하여 세정작업후 완전히 건조되지 않았거나, 먼지 혹은 베어링 오일(Oil)의 유입, 먼지와 오일이 혼합되어 오손된 경우에 절연진단을 시행하면 교류전류, 유전정접 및 부분방전 특성에 영향을 미치게 된다. 먼지 혹은 베어링 오일이 약간 유입되었거나 슬롯에서 권선이 느슨해지면 부분방전이 크게 나타나고, 먼지와 오일이 혼합되어 전체적으로 오손되어 있으면 교류전류, 유전정접 및 부분방전 등이 모두 불량으로 판정되어 고정자 권선 자체의 절연열화가 거의 없어도 권선교체로 판정할 수 있는 근거가 된다.

따라서 고압전동기 고정자 권선의 절연파괴 원인은 서지전압, 제작불량 및 절연열화 등 여러 가지가 있지만 습분, 먼지, 오일 및 먼지와 오일의 혼합 등 환경의 영향도 많이 받는다⁽⁹⁾. 운전연수가 5년 이하인 대부분의 고압전동기에서 절연파괴는 이러한 환경적 영향과

고정자 권선 제작 불량에 복합적으로 작용하여 발생한다⁽¹⁰⁾

5. 결론

정밀 절연진단을 시행한 375대의 고압전동기 중에 6대의 고정자 권선에서 절연열화 상태를 분석하였다. 고압전동기의 절연열화 판정과 권선 교체는 교류전류, 유전정접 및 부분방전 등에 의해 평가하였으며, 부분방전 패턴과 고정자 권선의 절연파괴 원인 등을 분석한 결과 아래와 같은 결론을 얻었다.

- ① 6대의 고압전동기에서 정밀 절연진단을 수행하여 고정자 권선의 절연상태가 양호하였고 초기열화, 열화, 흡습과 열화 등을 명확하게 구분할 수 있었다. 따라서 절연진단은 매우 신뢰성이 있으며, 고압전동기의 현재 상태를 정확하게 파악하여 설비의 유지정비와 재권선 판정에 큰 도움을 주었다. 그리

고 동일 제작사에서 신규로 제작하여 5년 동안 사용한 전동기에 비해 재권선을 수행한 전동기의 교류전류와 유전정접이 높게 나타났다.

- ② 고압전동기 고정자 권선의 부분방전 패턴을 슬롯방전, 내부방전 및 코로나 방전 등으로 분류하여 절연열화 평가 및 유지정비에 활용하였다. 또한 고정자 권선의 절연파괴 원인은 서지전압, 절연열화 및 제작불량 등 여러 가지가 있지만 습분(濕粉), 먼지, 오일, 먼지와 오일의 혼합 등에 의한 환경적 영향도 많이 받고 있다.

- ③ 향후 고압전동기 절연진단 결과의 신뢰도를 높이기 위해서는 체계적이고 종합적인 관리가 필요하다. 따라서 운전초기부터 주기적인 절연열화 진단을 통해 절연특성의 추이(Trend)를 분석하고 전동기의 사양, 운전특성, 운전환경, 고장 및 정비 이력 관리 등을 체계적이고 종합적으로 관리할 필요가 있다. ❏

참고문헌

- (1) J. S. Simons, "Diagnostic Testing of High-Voltage Machine Insulation", IEE Proceedings, Vol. 127, Pt. B, No. 3, pp. 139~154, 1980.
- (2) H. Yoshida and Y. Inoue, "Test Method of Rotating Machines", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. EI-21, No. 6, pp. 1069~1071, 1986.
- (3) Y. Ikeda and H. Fukagawa, "A Method for Diagnosis the Insulation Deterioration in Mica-Resin Insulated Stator Windings of Generator", 일본전력중앙연구소 연구보고 W88046, pp. 1~33, 1988.
- (4) H. Yoshida and K. Umemoto, "Insulation Diagnosis for Rotating Machine Insulation", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. EI-21, No. 6 pp. 1021~1025, 1986.
- (5) I. M. Culbert, H. Dhirani, and G. C. Stone, Handbook to assess the Insulation Condition of Large Rotating Machines, EPRI, EL-5036, Vol. 16, 1989.
- (6) E. Gulski and F. H. Kreuger, "Computer-aided recognition of Discharge Sources", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 27, No. 1 pp. 82~92, 1992.
- (7) 김희동, 이영준, 주영호, "고압회전기 절연재료에서 부분방전 패턴의 분석", 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, pp. 129~132, 1999.
- (8) G. C. Stone, B. A. Lloyd and S. R. Campbell, "On-Line Monitoring for Condition Assessment of Motor and Generator Stator Windings", IEEE Pulp and Paper Industry Technical Conference, pp. 94~103, 1994.
- (9) G. C. Stone et al, "Investigation of Turn Insulation Failures Mechanisms in Large AC Motors", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-103, No. 9, pp. 2588~2593, 1984.
- (10) 김희동, 주영호, "고압전동기 고정자 권선 절연재료의 미세구조 특성", 한국전기전자재료학회 춘계학술대회 논문집, pp. 513~517, 1999.