

고압전동기 고정자 권선의 온도변화에 따른 절연특성 분석

공태식¹, 주영호¹, 김희동^{1,a}, 박태성¹

¹ 한국전력공사 전력연구원 기술전문센터

Analysis of the Temperature Influence on Insulation Characteristics in High Voltage Motor Stator Windings

Tae-Sik Kong¹, Young-Ho Ju¹, Hee-Dong Kim^{1,a}, and Tae-Sung Park¹

¹ Korea Electric Power Corporation (KEPCO) Research Institute, Daejeon 305-760, Korea

(Received July 25, 2012; Revised September 13, 2012; Accepted September 20, 2012)

Abstract: A variety of diagnostic tests are widely applied in the field in industry to evaluate the condition of high voltage (HV) motor stator insulation. In this paper, the influence of temperature on the stator insulation diagnostic tests such as the insulation resistance, AC current, dissipation factor, and partial discharge measurements are studied and reported. The tests are performed with the HV motor stator winding temperature set between 40°C to 80°C in 10°C intervals. It is shown that the AC current, dissipation factor, and partial discharge magnitude steadily increase with temperature, which suggests that temperature must be taken into account in the interpretation of the test results.

Keywords: Diagnostic test, Motor, Insulation, Temperature, Dissipation factor, Partial discharge

1. 서론

고압전동기 고정자 권선 절연물의 결함은 제작 시 발생하거나, 장기간 운전되는 동안 열적, 기계적, 전기적 및 화학적 열화 등에 의해 나타나며, 고장원인 중 절연물 손상에 의해 발생하는 것이 약 37%에 이른다 [1]. 고압전동기 고정자 권선은 장기간 운전되면 복합적인 영향으로 인해 절연재료 내부에 공극(void)이 발생하여 열화가 계속 진행되면서 결국 절연파괴에 도달한다 [2].

고압전동기의 절연파괴로 인한 정지는 전체 시스템에 막대한 손실을 야기시키게 된다. 따라서 고압전동기의 절연물에 대한 건전성을 평가하는 절연진단의 중요성은 날로 높아지고 있다. 절연상태에 대한 건전성을 확인하는 방법으로는 고압전동기 정격전압의 2

배+1 kV의 전압을 일정시간 동안 인가하여 절연이 파괴되지 않고 견디는가를 보는 절연내력 시험법이 있으나 신규 제작된 고압전동기 고정자 권선의 품질 보증을 위한 공장시험과 재 권선된 고압전동기 검수 시험 등 특별한 경우에만 사용되고 있다. 보통 현장에서 운용 중인 고압전동기에 대해서는 정격전압의 1.25~1.5배를 1분 간 인가하는 시험도 절연특성에 문제가 있는 경우에 제한적으로 사용되고 있으며, 통상적으로는 적용하지 않고 있다 [3,4]. 일반적으로 국내 산업현장에서 사용하는 고압전동기에 대한 진단방법으로는 시험전압을 정격전압 이내에서 실시하고 있으며, 절연저항, 성극지수, 교류전류, 유전정접 및 부분방전 시험 등을 주로 수행하고 있다 [5].

고압회전기 절연물의 수명을 결정짓는 중요한 요인 중 하나는 절연물의 온도이며, 절연물의 재질에 따라 차이가 있지만 통상 절연물의 온도가 10°C 증가할 때

a. Corresponding author; hdkim@kepc.co.kr

마다 수명은 50%로 감소한다고 알려져 있다 [6]. 따라서 운전 중 고압전동기 고정자 권선의 온도가 증가하게 되면 절연열화를 가속시켜 불시 고장의 원인이 되기 때문에 주요한 감시항목으로 관리를 하고 있다 [7].

본 논문은 3.3 kV급 고압전동기 고정자 권선의 온도를 40~80℃로 변화시키면서 절연저항, 교류전류, 유전정점 및 부분방전 크기를 측정하여 절연특성을 분석하였다.

2. 실험 방법

그림 1(a), (b)에 나타난 바와 같이 사용 중인 3.3 kV급 고압전동기의 회전자를 분리하고 고정자 권선을 세척 후 건조로에서 120℃로 12시간 동안 가열 건조한 다음 대기온도 24℃에서 자연냉각 되는 과정에서 온도별로 절연진단 시험을 수행하였다. 온도에 따른 절연특성 변화를 알아보기 위해 절연진단 시험은 절연저항, 교류전류, 유전정점 및 부분방전을 측정하였다. 각각의 시험항목에 대하여 온도에 따른 특성변화를 비교 분석한 결과 절연상태를 평가하는데 있어서 고정자 권선 온도의 중요성을 확인할 수 있었다.

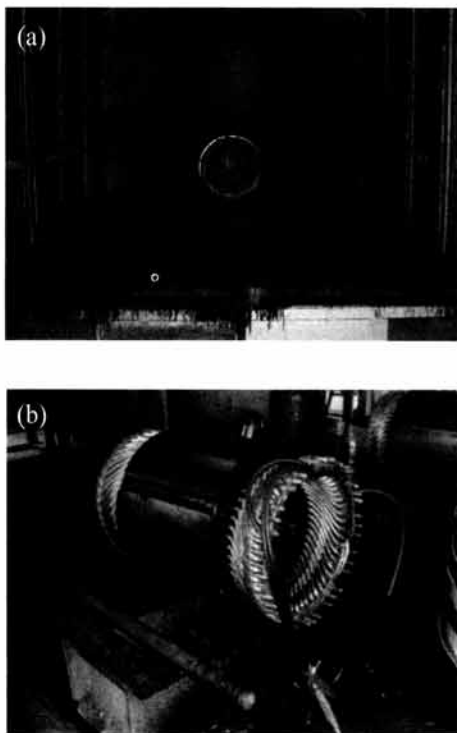


Fig. 1. Heating dry of HV motor stator windings. (a) Heating dry, (b) HV motor stator windings.

2.1 절연저항 시험

절연저항 시험은 고압전동기 고정자 권선과 대지 간에 직류전압을 인가하여 권선의 흡습 및 표면 오염 상태 등을 판정한다. 교류 고전압 인가여부를 판단하기 위해 주로 사용되며, 측정 방법은 권선에 직류전압인가 1분 후의 절연저항 값을 측정하며, 판정기준은 100 MΩ 이상이 되어야 한다 [6]. 시험 장비는 영국 AVO사의 S1-5010 모델을 사용하여 시험을 수행하였다.

2.2 교류전류 시험

절연물에 교류전압을 인가하여 전압에 따른 전류를 측정하는 시험이며, 전류는 인가한 전압에 비례하여 증가하나 전압이 증가함에 따라 절연물 내부의 미소 공극 및 권선과 슬롯사이의 틈에 의해 그림 2와 같이 전류가 급증하는 현상을 보이게 된다. 인가전압에 비해 누설전류가 얼마나 더 증가하는 가를 계산하여 권선 내부의 결함 정도를 판단하게 되며, 그 계산식은 아래의 식 (1)과 같다.

$$\Delta I = \frac{I - I_0}{I_0} \times 100\% \quad (1)$$

그림 3에 나타난 바와 같이 교류 고전압 시험 장비는 Haefely사의 Schering Bridge를 사용하였다.

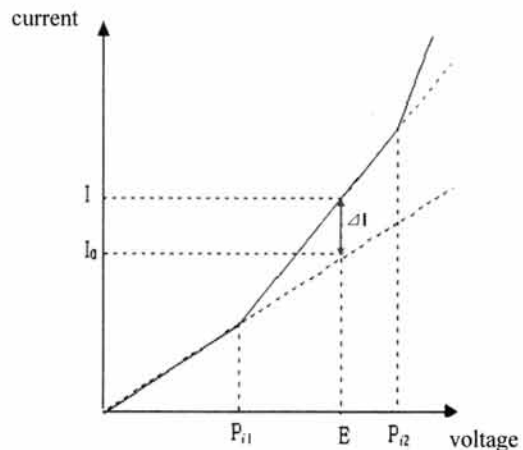


Fig. 2. Voltage-current curve.

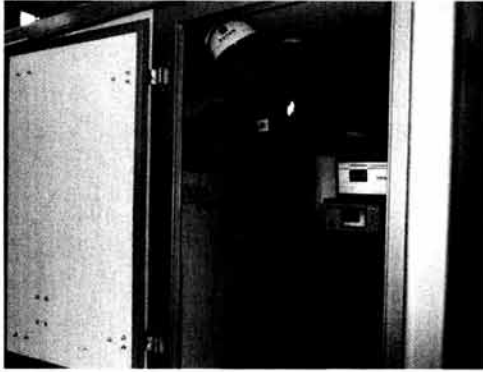


Fig. 3. AC high voltage test equipments.

2.3 유전정접 시험

유전체에 교류전계를 인가하면 유전체 손실이 발생하게 되는데, 절연물 내부에서 쌍극자가 교번전계에 의해 진동을 하며 발생하는 마찰열, 부분방전에 의한 손실, 방전 시 발생하는 빛에 의한 손실 등이 발생한다. 만일 절연물에 이러한 손실분이 없다면 충전전류만 존재하겠지만, 실제로는 누설전류도 존재하게 된다. 그림 4에서 나타낸 바와 같이 전압보다 90° 앞선 충전전류 (I_c)와 실측전류 (I) 사이의 각을 유전손실각 δ 로 표시하며, 이러한 손실을 측정하는 척도로 유전정접 (dissipation factor)을 사용하고 $\tan\delta$ 로 나타낸다.

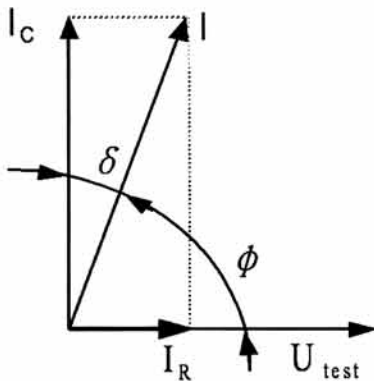


Fig. 4. Dissipation factor.

절연물 내의 미소공극 등이 많이 존재하게 되면 부분방전양도 커지게 되고, 유전정접도 증가하게 된다.

따라서 유전정접 ($\tan\delta$)을 측정하여 절연물의 전체적인 상태를 파악할 수 있다. 시험전압은 정격전압인 3.3 kV까지 인가하고 정격전압일 때의 $\tan\delta$ 값에서 정격전압의 20%인 $\tan\delta$ 값을 빼면 유전정접 증가율 ($\Delta \tan\delta$)을 계산할 수 있으며 절연상태를 분석하는 항목으로 사용된다.

2.4 부분방전 시험

고압전동기 고정자 권선 주절연물이 열화에 의해 발생하는 절연물 내부의 공극 (void)과 권선의 기계적 진동에 의해 권선 표면의 반도체층이 손상되어 권선과 슬롯 사이에 벌어진 틈에서 부분방전이 발생한다. 이러한 방전은 절연물을 계속 열화시켜 결국에는 절연파괴에 이르게 한다.

부분방전 시험은 고정자 권선에서 발생하는 방전량을 직접 측정하여 절연물의 상태를 평가하는 주요 항목이며, 실험 회로도는 그림 5에 나타낸 바와 같다. 부분방전 측정 장비는 PD (partial discharge) Detector (TE-571, Haefly)를 사용하였다.

부분방전은 절연시스템 내 미소공극이 존재할 경우에 외부 인가전압이 공극 양단에 가해져서 순간적으로 단락되면서 방전 현상이 발생한다. 부분방전은 전압이 증가하는 위상에서 나타난다 [4,5].

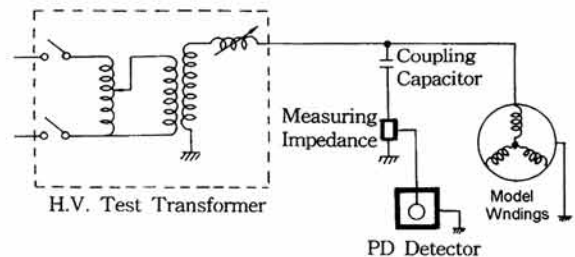


Fig. 5. Partial discharge measurement circuit.

3. 결과 및 고찰

고압전동기 고정자 권선의 온도에 따른 절연저항 시험결과는 표 1에 나타내었다. 고압전동기 고정자 권선의 온도를 $40\sim 80^\circ\text{C}$ 로 변화시키면서 절연저항을 측정한 결과 온도가 증가함에 따라 반비례하는 특성을 보였다. 고정자 권선의 온도를 40°C 에서 80°C 로 2배 증가했을 때 절연저항은 12.3배로 감소하였다.

Table 1. Test results of insulation resistance.

Winding Temp [°C]	I.R [MΩ]
40	10,600
50	8,610
60	5,370
70	2,580
80	865

Table 2. Test results of AC current.

Voltage [kV]	Current [mA]				
	40°C	50°C	60°C	70°C	80°C
0.475	7.573	7.670	7.823	8.045	8.457
0.95	15.12	15.22	15.50	16.08	16.80
1.43	22.75	22.99	23.48	24.39	25.43
1.91	30.53	30.85	31.57	32.22	33.96
2.40	38.57	39.22	40.65	41.44	43.80
2.75	44.62	46.15	47.34	49.52	51.93
3.00	50.27	51.70	52.78	54.57	57.50
3.30	56.04	57.72	59.32	61.71	65.22
I_0	52.61	53.29	54.35	55.89	58.75
ΔI [%]	6.52	8.31	9.14	10.41	11.01

고압전동기 고정자 권선의 온도에 따른 교류전류 시험결과는 표 2에 나타내었다. 그림 6은 표 2를 근거로 고압전동기 고정자 권선의 온도를 40~80°C로 변화시키면서 교류전압-전류 특성을 나타내었다. 시험 결과 동일전압에서의 교류전류값은 온도가 높을수록 커졌으며, 전압증가에 따른 전류의 증가율 (ΔI) 또한 온도에 비례하여 커지는 것을 확인할 수 있었다. 고압전동기 고정자 권선의 온도를 40°C에서 80°C로 2배 증가했을 때 0.475 kV와 3.3 kV에서 교류전류 변화율은 각각 1.12배, 1.16배로 약간 증가하였다. 그리고 고압전동기 고정자 권선의 온도를 40°C에서 80°C로 2배 증가했을 때 ΔI 는 1.69배로 증가하였다. 그림 6에서 나타낸 바와 같이 교류전압이 1.91 kV 이상에서 교류전류의 증가율이 서서히 증가하고 있음을 확인할 수 있었다.

고압전동기 고정자 권선의 온도 변화에 따른 유전정접 시험결과는 표 3에 나타내었다. 그림 7은 표 3을 근거로 고압전동기 고정자 권선의 온도를 40~80°C로 변화시키면서 교류전압-유전정접 특성을 나타내었다. 시험 결과 동일전압에서의 유전정접값은 온도가 높을수록 커졌으며, 전압증가에 따른 유전정접 증가율 ($\Delta \tan \delta$) 또한 온도에 비례하여 커지는 것을 확인할 수 있었다. 고압전동기 고정자 권선의 온도를 40°C에서 80°C로 2배 증가했을 때 0.475 kV와 3.3 kV

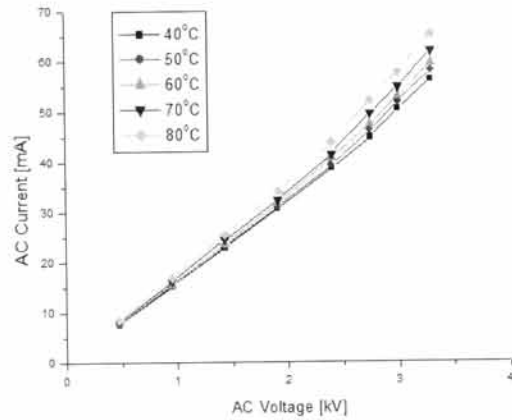


Fig. 6. AC current-voltage characteristics with various temperatures.

Table 3. Test results of dissipation factor.

Voltage [kV]	$\tan \delta$ [%]				
	40°C	50°C	60°C	70°C	80°C
0.475	1.26	1.47	1.98	2.69	3.93
0.95	1.29	1.49	2.00	2.72	3.95
1.43	1.31	1.51	2.03	2.74	3.96
1.91	1.42	1.65	2.21	2.97	4.30
2.40	1.95	2.76	4.06	5.19	7.15
2.75	3.71	5.42	6.50	7.91	9.55
3.00	5.85	7.02	7.98	9.15	10.77
3.30	7.02	8.32	9.33	10.47	12.05
$\Delta \tan \delta$ [%]	5.73	6.83	7.33	7.75	8.10

에서 유전정접 변화율은 각각 3.12배, 1.72배로 증가하였다. 그리고 고압전동기 고정자 권선의 온도를 40°C에서 80°C로 2배 증가했을 때 $\Delta \tan \delta$ 는 1.41배로 증가하였다. 그림 7에서 나타낸 바와 같이 교류전압이 0.475~1.91 kV까지는 일정하다가 1.91 kV 이상에서 유전정접의 증가율이 크게 증가하고 있음을 확인할 수 있었다.

고압전동기 고정자 권선에서 온도 변화에 따른 부분방전 시험결과는 표 4에 나타내었다. 부분방전을 측정할 때 외부잡음은 500~750 pC 범위를 나타내었다. 고압전동기 고정자 권선의 온도를 40°C에서 80°C로 2배 증가했을 때 상전압 (2.4 kV)과 상전압 1.25배 (3.0 kV)에서 부분방전 크기의 변화율은 각각 3.3배, 6.75배로 증가하였다. 그리고 고압전동기 고정자 권선에서 측정된 부분방전 개시전압 (partial discharge

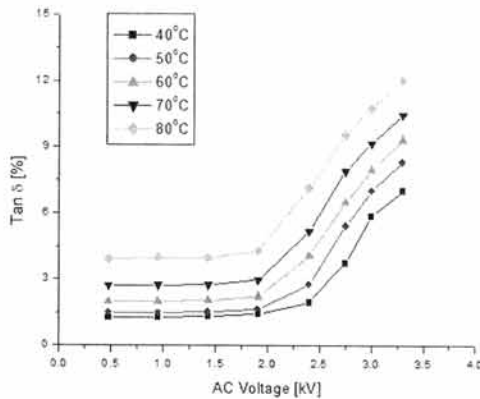


Fig. 7. $\tan\delta$ -voltage characteristics with various temperatures.

Table 4. Test results of partial discharge [E:3.3 kV].

Winding Temp.	Partial discharge [pC]			
	Noise[pC]	PDIV[kV]	$E/\sqrt{3}$	$1.25E/\sqrt{3}$
40°C	500	1.9	1,000	4,000
50°C	500	1.8	1,200	8,500
60°C	500	1.6	1,400	16,000
70°C	500	1.4	2,500	20,000
80°C	750	1.1	3,300	27,000

inception voltage, PDIV)도 온도를 40°C에서 80°C로 2배 증가했을 때 1.73배로 감소하였다. 부분방전 개시 전압은 교류전압을 증가하면서 방전크기를 측정할 때 1,000 pC 이상되는 순간에 인가전압을 측정한다.

고압전동기 고정자 권선의 온도를 40°C에서 80°C로 증가함에 따라 절연저항은 온도에 반비례하여 감소하고 교류전류, 유전정접 및 부분방전 크기는 온도에 비례하여 증가하였다. 이러한 현상은 온도가 올라갈수록 고압전동기 고정자 권선 절연물 내부에서 전하의 이동도가 높아지기 때문에 적은 에너지만으로도 쉽게 이동하여 나타나는 현상으로 사료된다. 근본적인 원인 분석을 위해 향후 지속적인 연구가 필요하다.

고압전동기 고정자 권선에서 교류전류, 유전정접 및 부분방전 시험 결과를 종합적으로 분석하면 교류전류 변화율과 유전정접의 증가율이 각각 1.91 kV 이상에서 증가하고 있음을 확인할 수 있었다.

그리고 고압전동기 고정자 권선의 온도가 40°C일 때 부분방전 개시전압도 1.9 kV를 나타내었다.

4. 결론

고압전동기 고정자 권선의 온도를 40°C에서 80°C로 증가함에 따라 절연저항은 온도에 반비례하여 감소하고 교류전류, 유전정접 및 부분방전 크기는 온도에 비례하여 증가하였다. 교류전류 변화율과 유전정접의 증가율이 동일하게 1.91 kV 이상에서 증가하고 있음을 확인할 수 있었다. 그리고 고압전동기 고정자 권선의 온도를 40°C에서 80°C로 2배 증가했을 때 ΔI 와 $\Delta \tan\delta$ 는 각각 1.69배, 1.41배로 증가하였다. 또한, 상전압 (2.4 kV)과 상전압 1.25배 (3.0 kV)에서 부분방전 크기의 변화율은 각각 3.3배, 6.75배로 증가하였다.

따라서 고압전동기 고정자 권선에서 절연진단의 모든 시험 항목들이 온도에 따라 변하는 특성을 보이고 있기 때문에 결과 분석에 오류를 방지하기 위해 정지 후에 대기온도 정도로 충분히 냉각 후 시험할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원 (KETEP)의 지원을 받아 수행한 것입니다. (No. 2010-1-0101-0027B)

REFERENCES

- [1] Motor Reliability Working Group, IEEE IAS Trans., A21, 863 (1985).
- [2] H. D. Kim, *J. KIEEME*, 15, 119 (2002).
- [3] IEEE Std. 95-1977, 13 (1977).
- [4] ANSI/IEEE Std 56-1997, 12 (1997).
- [5] H. D. Kim, T. S. Kong, Y. H. Ju, and B. H. Kim, *J. Electri. Eng. & Tech.*, 6, 384 (2011).
- [6] IEEE Std 43-2000, 10 (2000).
- [7] EPRI Research Project 2814-35 Final Report, 4 (1992).