

6.6 kV급 고압전동기 고정자 권선의 절연열화 평가

Assessment of Insulation Aging in 6.6 kV Class High Voltage Motor Stator Windings

김희동^{1,a}, 김병한¹

(Hee Dong Kim^{1,a} and Byong Han Kim¹)

Abstract

Prior to destructive testing, diagnostic tests were performed in ten high voltage motors. Diagnostic tests included polarization index, ac current, dissipation factor($\tan\delta$) and partial discharge magnitude. The rewind of motor stator insulation at rated voltage is assessed by the results of these tests. After completing the diagnostic tests, the stator windings of motors were subjected to gradually increasing ac voltage, until the insulation punctured. No. 8 motor failed near rated voltage of 19.0 kV. The breakdown voltage of No. 4 motor was 7.0 kV which is lower than expected for good quality coils in 6.6 kV class motors. The failure was located in a line-end coil at the exit from the core slot. These two motors began operation in 1994. While testing No. 7 motor, flashover occurred between the stator winding and the stator frame at 15 kV. The relationship between the diagnostic test and the drop in insulation breakdown voltage was analyzed.

Key Words : Motor, Destructive test, Diagnostic test, Stator insulation, Flashover, Breakdown

1. 서 론

장기간 사용된 고압전동기 고정자 권선의 절연 재료는 슬롯부분보다도 단말권선(endwinding)에서 열화가 진행되는 경우가 많으며, 단말권선 표면의 오손, 습기조건에 의해 파괴전압이 저하할 수 있다. 고압전동기는 사용 환경이 다르기 때문에 고정자 권선 표면이 약품, 유독가스, 분진 및 수분 등 다른 분위기에서 운전되어 단말권선 단부의 절연 재료에 도전성 물질 부착과 정지중에 흡습으로 인해 절연층의 열화가 진행된다. 또한, 고압전동기는 기동할 때 흐르는 전류로 인해 전자력이 크게 발생됨에 따라 피로열화에 의한 박리, 균열 및 보이드(void) 등에 의해 절연열화가 가속되어 최종적으로 절연파괴가 일어난다[1,2].

미국 EPRI는 정격전압이 2.3 kV 이상의 대용량 전동기가 설치되어 운전중인 발전소에서 7,500대를 조사한 결과, 37 %는 고정자 권선에서 절연파괴가 발생한 것으로 발표하였다[3].

발전소 주요설비에서 운전중인 고압전동기의 갑작스런 절연파괴 사고는 전력공급의 신뢰성을 저하시키고, 단시간에 복구가 곤란할 뿐만 아니라 상대적으로 경제적인 손실이 매우 크게 된다. 따라서 대용량 고압전동기 고정자 권선에서 절연파괴가 발생하기 전에 열화상태를 평가하기 위해 주기적인 정밀점검과 절연진단 시험을 수행하고 있다. 정밀점검은 대략 3년 주기로 계획예방정비 기간 중에 실시되며, 절연진단 시험을 통해 성극지수, 교류전류, 유전정접 및 부분방전 크기 등을 측정하여 절연열화 정도를 평가하고 있으나 정확한 판정을 내리기가 어려운 실정이다. 따라서 교류전류, 유전정접 및 부분방전 크기와 절연파괴 시험결과 사이의 관련성을 분석함으로써 보다 유용한 판정기준을 제시할 필요가 있다.

1. 한국전력공사 전력연구원

(대전시 유성구 문지동 103-16)

a. Corresponding Author : hdkim@kepri.re.kr

접수일자 : 2006. 8. 25

1차 심사 : 2006. 10. 9

심사완료 : 2006. 10. 24

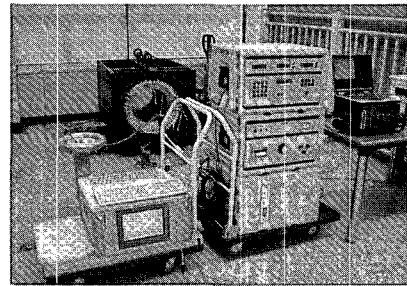
본 논문은 발전소에서 10년 이상 운전된 10대의 6.6 kV급 고압전동기 고정자 권선에서 성극지수, 교류전류, 유전정접 및 부분방전 크기 등을 측정하고 최종적으로 교류전압을 인가하여 절연파괴 시험을 시행하였다. 또한, 교류전류, 유전정접 및 부분방전 크기와 절연파괴전압 사이의 상관관계를 검토하여 판정기준을 제시하고 절연열화 특성을 평가하였다.

2. 시험 방법

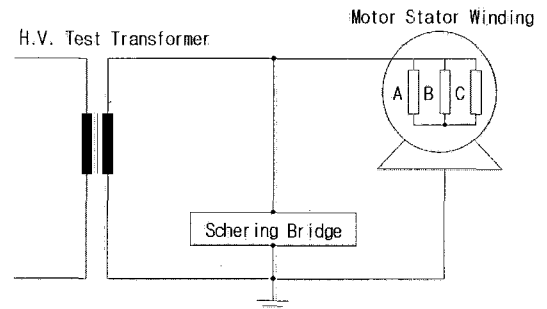
그림 1(a)는 고압전동기와 절연진단 장비를 나타내었다. 그림 1(b)와 같이 고압전동기 고정자 권선에서 교류전류와 유전정접 시험을 위해 셰링브리지(schering bridge)를 사용하였다. 셰링브리지는 전원장치(HV supply, Type 5283), 브리지(bridge, Type 2818) 및 공진 인덕터(resonating inductor, Type 5285)로 구성되어 있다. 고압전동기 고정자 권선을 삼상 일팔로 결선하고 셰링브리지(Tettex Instruments)를 연결하여 전원장치에서 교류전압을 인가하면서 교류전류와 유전정접을 측정하였다. 그림 1(c)는 고압전동기 고정자 권선에 전원장치를 연결하여 교류전압을 인가하면서 커플링 캐패시터(Tettex Instruments, 4,000pF)를 통해 유입된 신호를 커플링 유니트(coupling unit, Tettex Instruments, AKV 572)에 보내어 증폭한 후에 디지털 부분방전 측정기(Tettex Instruments, TE 571)에서 방전크기를 측정하였다. 또한, 고압전동기 고정자 권선의 절연파괴 시험은 전원장치(HV supply, 50 kV)와 제어시스템을 사용하였다.

3. 시험결과 및 고찰

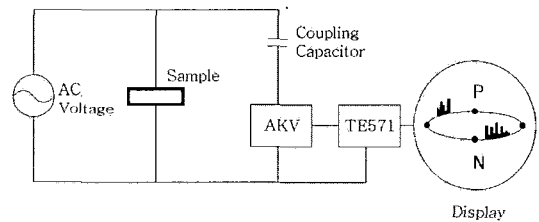
표 1은 6.6 kV급 고압전동기 10대의 정격을 나타냈으며, 동일한 정격을 갖는 4대의 고압전동기(No. 1~No. 4)에서 교류전류, 유전정접 및 절연파괴 시험의 결과와 육안점검에 의해 먼지와 베어링 오일 유입에 따른 오손상태를 표 2에 나타내었다. 4대의 고압전동기 모두 재권선을 시행한 후에 5년 정도 운전하였다. 먼저 절연저항, 성극지수, 교류전류, 유전정접 및 부분방전 크기 등을 측정한 후에 절연파괴 시험을 수행하였다. 4대 모두 절연저항과 성극지수는 양호하게 분석되었고 교류전류 증가율(ΔI)과 유전정접의 변화율($\Delta \tan \delta$)을 측정한 결과 No. 1, 2, 3은 양호하고 No. 4는 불량으로 판정



(a) 절연진단 장비



(b) 교류전류 및 유전정접 측정회로도



(c) 부분방전 측정회로도

그림 1. 고압전동기 절연진단 시험.

Fig. 1. Diagnostic test of high voltage motor.

되었다. 6.6 kV급 고압전동기 고정자 권선의 정지중 절연열화 판정기준은 정격전압에서 ΔI 는 8.5 % 이하, $\Delta \tan \delta$ 는 6.5 % 이하 및 부분방전 크기는 상전압에서 10,000 pC 이하이면 양호하게 평가하고 있다[4]. 그리고 오손정도, ΔI , $\Delta \tan \delta$ 및 절연파괴 전압을 분석한 결과 오손정도가 가장 양호하게 나타난 No. 3에서는 절연파괴 전압이 17.5 kV로 가장 높으며, 오손정도가 가장 심하고 ΔI 와 $\Delta \tan \delta$ 의 결과도 불량으로 판정된 No. 4에서는 절연파괴 전압이 7.0kV로 가장 낮게 나타났다. 절연파괴 위치는 No. 1, 3, 4는 슬롯단부, No. 2는 단말권선과 철심사이에서 발생하였다.

표 1. 고압전동기의 정격.

Table 1. The rating of high voltage motor.

Motor Number	정격전압 [kV]	정격용량 [HP]	회전수 [rpm]	수량
No. 1~No. 4	6.6	800	1187	4
No. 5	6.6	2500	595	1
No. 6	6.6	2400	835	1
No. 7~No. 8	6.6	2050	1787	2
No. 9	6.6	765	1182	1
No. 10	6.6	800	880	1

표 2. 고압전동기의 절연파괴 특성.

Table 2. Characteristics of insulation breakdown in high voltage motor.

HP No.	$\Delta \tan \delta$ [%]	ΔI [%]	파괴전압 [kV]	파괴위치	오손 상태
1	1.90	2.51	14.5	슬롯단부	양호
2	3.30	8.07	13.0	단말권선-철심	심각
3	2.00	0.48	17.5	슬롯단부	가장 양호
4	8.10	8.98	7.0	슬롯내부	가장 심각

고압전동기에서 절연파괴 시험을 위해 교류전압을 인가 중에 권선과 철심사이에서 flashover가 발생하면 자동적으로 전압이 차단되며, 절연저항이 "0"가 아니기 때문에 다시 교류전압을 인가할 수 있다. 그러나 절연파괴는 교류전압에 의해 권선이 완전히 손상되어 절연저항이 "0"가 되어 다시 교류전압을 인가할 수 없다. 표 3은 No. 7 고압전동기에서 flashover전후 특성을 나타내었으며, flashover 전 데이터는 절연파괴 시험 바로 전에 측정하였다. flashover후 데이터는 절연파괴 시험을 위해 교류전압을 증가 시키다가 15 kV에서 flashover가 발생한 후에 파괴시험을 중단하고 다시 유전정점과 교류전류를 측정하여 비교하였다. flashover전에 측정한 데이터에 비해 flashover후에 측정한 데이터를 세밀하게 분석한 결과 순간적으로 flashover

표 3. 고압전동기 flashover전후의 특성.

Table 3. Characteristics of before and after flashover in high voltage motor.

전압 [kV]	$\tan \delta$ [%]		I [mA]	
	F/O 전	F/O 후	F/O 전	F/O 후
0.95	4.75	19.00	20.79	26.04
1.91	5.40	19.50	41.76	52.45
2.86	6.17	20.00	62.08	79.55
3.81	7.35	20.60	82.86	107.30
4.76	9.37	21.10	106.10	138.10
5.50	11.30	21.30	126.20	159.60
6.00	12.50	21.40	140.30	177.10
6.60	14.10	21.50	157.70	195.00
$\Delta \tan \delta$ [%]	8.70	2.00		
ΔI [%]			11.20	9.49

에 의해 임펄스 전압이 인가됨에 따라 고압전동기 고정자 권선에서 절연열화가 상당히 진행된 것을 의미한다. 단순히 flashover전후에 ΔI 와 $\Delta \tan \delta$ 를 분석하면 flashover전에 비해 flashover후에 측정된 데이터가 오히려 낮게 나타났으나, 그림 2와 그림 3에서 나타낸 바와 같이 임펄스 전압에 의해 고정자 권선의 절연물이 순간적으로 심각한 열화가 발생됨에 따라 유전정점과 교류전류의 측정값이 증가하고 있음을 확인하였다. 장기간 운전된 고압전동기 절연열화를 판정할 때 ΔI 와 $\Delta \tan \delta$ 의 값을 갖고 평가하였으나 이제는 유전정점과 교류전류의 측정값 자체도 참고하여 종합적으로 평가할 필요가 있다는 근거 자료를 확보하였다. flashover전후에 유전정점은 0.95 kV를 인가했을 때 4.75 %에서 19.0 %, 6.6 kV를 인가했을 때 14.1 %에서 21.5 %로 증가하였다. 실제적으로 유전정점의 크기가 낮다는 것은 절연상태가 양호한 것을 나타내고 상대적으로 높다는 것은 절연열화가 진행하고 있음을 의미한다[5]. No. 7 고압전동기는 15 kV에서 flashover가 발생하였고 다시 절연파괴 시험을 수행한 결과 8.7 kV에서 최종적으로 절연파괴가 일어났다. 고정자 권선 내부의 오손정도는 매우 양호한 상태

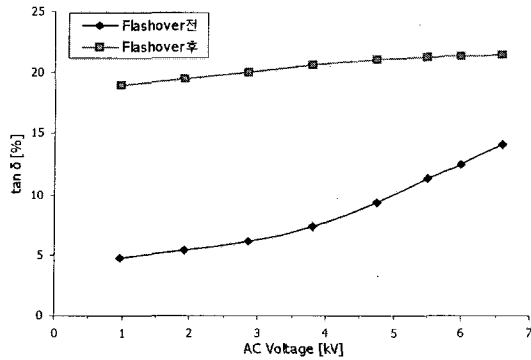


그림 2. No. 7 고압전동기의 $\tan\delta$ -전압 특성.

Fig. 2. $\tan\delta$ -voltage characteristics of No. 7 high voltage motor.

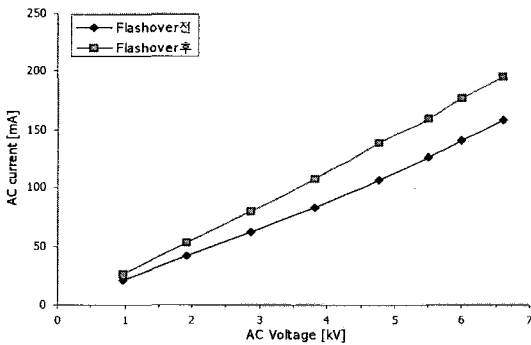


그림 3. No. 7 고압전동기의 교류전류-전압 특성.

Fig. 3. AC current-voltage characteristics of No. 7 high voltage motor.

였으며, flashover로 인해 절연물이 심각한 열화가 발생됨에 따라 현저하게 절연파괴 전압이 낮게 나타났다. 따라서 flashover가 발생한 전압을 기준으로 하여 절연파괴 전압을 15 kV로 평가하였다.

표 2와 표 4에서 나타난 바와 같이 6.6 kV급 고압전동기 10대의 유전정접, 교류전류 및 절연파괴 전압 등을 나타내었다. No. 8 고압전동기의 절연파괴 전압이 19 kV로 가장 높고, No. 4 고압전동기의 절연파괴 전압이 7.0 kV로 가장 낮게 분석되었다. 6.6 kV급 고압전동기에서 운전에 필요한 최소의 절연내력은 $2E+1$ kV, 즉 14.2 kV에서 1분 이상 견뎌야 사용이 가능하다[6]. 고압전동기 No. 2, 4, 10은 14.2 kV이하에서 절연파괴가 발생하였고, 나머지 7대는 14.2 kV이상에서 절연파괴가 발생하였다. 절연파괴 전압은 고정자 권선의 오손정도가

표 4. 고압전동기의 절연열화 특성.

Table 4. Characteristics of insulation aging in high voltage motor.

Motor Number	$\Delta \tan\delta$ [%]	ΔI [%]	파괴전압 [kV]
No. 5	2.90	2.92	14.2
No. 6	2.23	4.20	14.8
No. 7	8.70	11.2	15
No. 8	6.23	9.67	19
No. 9	2.29	3.60	16
No. 10	11.46	13.59	12

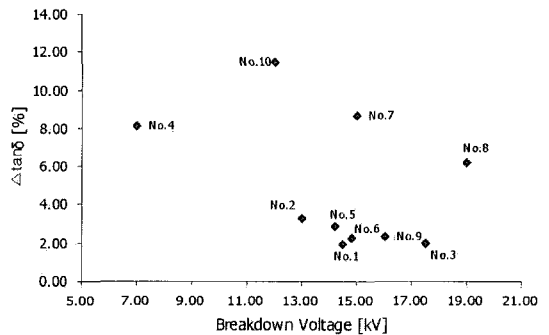


그림 4. 고압전동기의 $\Delta \tan\delta$ -파괴전압 특성.

Fig. 4. $\Delta \tan\delta$ -breakdown voltage characteristics of high voltage motor.

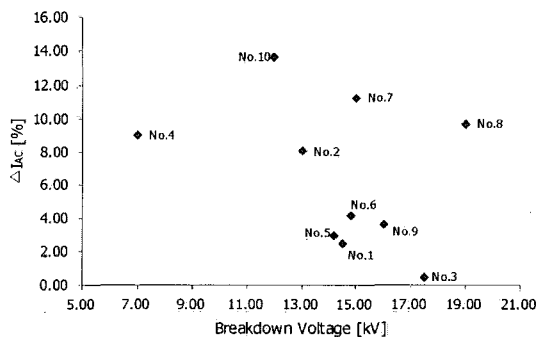


그림 5. 고압전동기의 ΔI -파괴전압 특성.

Fig. 5. ΔI -breakdown voltage characteristics of high voltage motor.

심하고 ΔI 와 $\Delta \tan \delta$ 의 크기가 높게 분석된 고압전동기에서 낮게 나타났다. 일반적으로 절연상태가 양호한 6.6 kV급 고압전동기의 절연내력은 24 kV ~ 35 kV 범위를 유지하고 있다. 따라서 6.6 kV급 고압전동기 10대의 고정자 권선을 재권선으로 판정한 것은 매우 시기가 적절한 것으로 평가되었다. 그림 4와 그림 5에서 알 수 있는 바와 같이 $\Delta \tan \delta$ 및 ΔI 와 절연파괴 전압 사이의 관계가 거의 반비례적으로 나타나고 있다. 따라서 $\Delta \tan \delta$ 와 ΔI 가 낮은 고압전동기 No. 3, 9는 절연파괴 전압이 높고, $\Delta \tan \delta$ 와 ΔI 가 상대적으로 높은 고압전동기 No. 2, 4, 10은 절연파괴 전압이 낮게 분석되었다. 그러나 $\Delta \tan \delta$ 와 ΔI 가 낮은 고압전동기 No. 1, 5, 6은 절연파괴 전압이 낮게 나타났다. 고압전동기 No. 1, 6은 6.6 kV를 인가했을 때 유전정접이 각각 15.3 %, 31 %로 높게 나타났으며, 고압전동기 No. 5는 6.6 kV를 인가했을 때 부분방전 크기가 32,000 pC으로 측정되었다. 따라서 유전정접과 부분방전 크기가 현저하게 높은 결과와 절연파괴 전압이 직접적인 관련이 있기 때문에 향후 지속적인 파괴 시험을 통해 근본적인 원인을 규명하여 고압전동기 절연열화 판정기준을 정립할 때 기초 자료로 활용하고자 한다.

4. 결 론

No. 8 고압전동기의 절연파괴 전압은 19 kV로 가장 높고, No. 4 고압전동기의 절연파괴 전압은 7.0 kV로 가장 낮게 분석되었다. 오손상태가 심하고 ΔI 와 $\Delta \tan \delta$ 의 크기가 높게 분석된 고압전동기에서 절연파괴 전압이 낮게 평가되었다. 단순히 flashover전후에 ΔI 와 $\Delta \tan \delta$ 을 분석하면 flashover전에 비해 flashover후에 측정된 데이터가 오히려 낮게 나타났으나, 임펄스 전압에 의해 고정자 권선의 절연물이 순간적으로 심각한 열화가 발생됨에 따라 유전정접과 교류전류의 측정값이 증가하고

있음을 확인하였다. 고압전동기 고정자 권선에서 유전정접, 교류전류 및 절연파괴 시험 결과 $\Delta \tan \delta$ 와 ΔI 가 낮은 고압전동기 No. 3, 9는 절연파괴 전압이 높고, $\Delta \tan \delta$ 와 ΔI 가 상대적으로 높은 고압전동기 No. 2, 4, 10은 절연파괴 전압이 낮게 평가되었다.

참고 문헌

- [1] I. M. Culbert, H. Dhirani, and G. C. Stone, "Handbook to assess the insulation condition of large rotating machines", EPRI, EL-5036, Vol. 16, p. 3-25~3-28, 5-13~5-14, 1989.
- [2] G. C. Stone, "Partial discharge diagnostics and electrical equipment insulation condition assessment", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 12, No. 5, p. 891, 2005.
- [3] G. Stone and J. Kapler, "Stator Winding Monitoring", IEEE Industry Applications Magazine, p. 15, 1998.
- [4] H. Yoshida and K. Umemoto, "Insulation diagnosis for rotating machine insulation", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. EI-21, No. 6, p. 1021, 1986.
- [5] F. T. Emery, "Partial discharge, dissipation factor, and corona aspects for high voltage electric generator stator bars and windings", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 12, No. 2, p. 347, 2005.
- [6] H. G. Sedding, R. Schwabe, D. Levin, J. Stein, and B. K. Gupta, "The Role of AC & DC Hipot Testing in Stator Winding Ageing", IEEE Electrical Insulation and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference, p. 455, 2003.