

## 고압전동기 고정자 권선의 절연열화 분석

김희동, 공태식, 이영준

한전 전력연구원

### Analysis of Insulation Aging in High Voltage Motor Stator Windings

Hee-Dong Kim, Tae-Sik Kong and Young-Jun Lee

Korea Electric Power Research Institute

#### Abstract

Prior to destructive testing, diagnostic tests were performed in eight 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. 1 motor failed near rated voltage of 12.96 kV. The breakdown voltage of No. 4 motor was 6.99 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 절연재료에 도전성 물질 부착과 정지중에 흡습으로 인해 절연층의 열화가 진행된다. 또한, 고압전동기는 기동할 때 흐르는 전류로 인해 전 자력이 크게 발생됨에 따라 피로열화에 의한 박 리, 균열 및 보이드 등에 의해 절연열화가 가속되어 최종적으로 절연파괴가 일어난다[1, 2].

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 절연과 괴가 발생하기 전에 열화상태를 평가하기 위해 주기적인 정밀점검과 절연진단 시험을 수행하고 있다. 정밀점검은 대략 3년 주기로 계획예방정비 기간 중에 실시되며, 절연진단 시험은 성극지수, 교류전류, 유전정접 및 부분방전에 의하여 절연열 화 정도를 판정하고 있다. 미국 EPRI는 정격전압 이 2.3kV 이상의 대용량 전동기가 설치되어 운전 중인 발전소에서 7,500대를 조사한 결과, 37%는 고정자 권선에서 절연과괴가 발생한 것으로 발표 하였다[3].

본 논문은 발전소에서 10년 이상 운전된 8대의 6.6kV급 고압전동기 고정자 권선에서 성극지수, 교류전류, 유전정접 및 부분방전 등을 측정하고 실제적으로 교류전압을 인가하여 절연과괴 시험 을 시행하였다. 또한, 절연진단 결과와 절연과괴 전압 사이의 상관관계를 검토하여 절연열화 특성 을 분석하였다.

## 2. 시험방법

그림 1과 같이 고압전동기 고정자 권선의 절연진단 시험을 위해 웨빙브리지(schering bridge), 커플링 캐패시터(coupling capacitor) 및 디지털 부분방전 측정기를 사용하였다. 웨빙브리지는 전원장치(HV supply, Type 5283), 브리지(bridge, Type 2818) 및 공진 인덕터(resonating inductor, Type 5285)로 구성되어 있다. 고압전동기 고정자 권선에 웨빙브리지(Tettex Instruments)를 연결하여 교류전압을 인가하며, 커플링 캐패시터(Tettex Instruments, 4,000pF)는 권선에서 유입되는 신호를 커플링 유니트(coupling unit, Tettex Instruments, AKV 572)에 보내어 증폭한 후에 디지털 부분방전 측정기(Tettex Instruments, TE 571)에서 방전크기를 측정하였다.

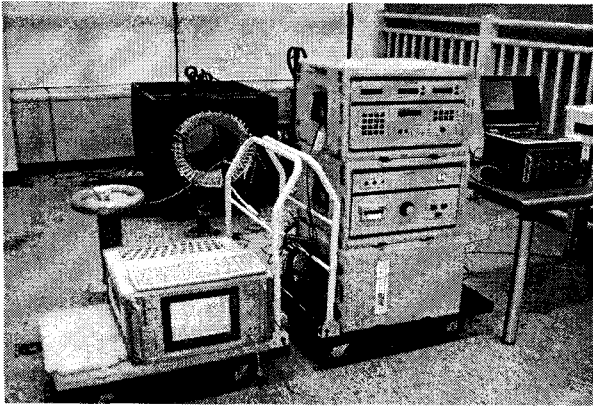


그림 1. 고압전동기 절연진단 시험

## 3. 시험결과 및 고찰

표 1은 6.6kV급 고압전동기 9대 및 4.16kV급 고압전동기 2대의 정격을 나타냈으며, 본 논문은 6.6kV급 고압전동기 8대에서 성극지수, 교류전류, 유전정접 및 부분방전 등을 측정하고 실제적으로 교류전압을 인가하여 절연파괴 시험을 수행하였다. 또한, 절연진단 결과와 절연파괴전압 사이의 상관관계를 세밀하게 검토하여 절연열화 특성을 분석하였다.

4대의 동일한 정격을 갖는 고압전동기에서 절연진단과 파괴시험의 결과 및 육안점검에 의한 오손정도를 표 2에 나타내었다. 고압전동기의 유전정접, 교류전류, 파괴전압, 절연파괴 위치 및 오손정도를 종합적으로 분석하였다. 4대의 고압전동기 모두 재권선을 시행하였으며, 절연저항, 성극지수, 교류전류, 유전정접 및 부분방전 등을 측정 한 후에 절연파괴 시험을 수행하였다. 절연진단 결과 No. 1, 2, 3는 양호하고 No. 4는 불량으로 판정되었다. 따라서 오손정도와 절연진단 데이터를 분석한 결과 가장 양호하게 나타난 No. 3에서

절연파괴 전압이 17.46kV로 가장 높으며, 오손정도가 가장 심하고 절연진단 결과도 불량으로 판정된 No. 4에서 절연파괴 전압이 6.99kV로 가장 낮게 나타났다. 절연파괴 위치는 No. 1, 3, 4는 슬롯단부, No. 2는 단말권선과 철심사이에서 발생하였다.

표 1. 고압전동기의 정격

Motor Number	정격전압	정격용량	회전수	수량
No.1 ~ No. 4	6.6kV	800HP	1187	4
No.5 ~ No. 6	4.16kV	800HP	1187	2
No. 7	6.6kV	2050HP	1787	1
No. 8	6.6kV	765HP	1182	1
No. 9	6.6kV	5000HP	720 580	1
No. 10	6.6kV	5000HP	890	1
No. 11	6.6kV	800HP	880	1

표 2. 고압전동기의 절연열화 특성

HP No.	$\Delta \tan \delta$ [%]	$\Delta I$ [%]	파괴전압 [kV]	파괴위치	오손 정도
1	1.90	2.51	14.5	슬롯단부	양호
2	3.30	8.07	12.96	단말권선 -철심	심각
3	2.00	0.48	17.46	슬롯단부	가장 양호
4	8.10	8.98	6.99	슬롯내부	가장 심각

표 3은 No. 7 고압전동기에서 flashover전후 특성 나타내었으며, flashover전 데이터는 절연파괴 시험 전에 측정하였다. flashover후 데이터는 15kV에서 flashover가 발생한 후에 다시 유전정접과 교류전류를 측정하여 비교하였다. flashover전에 측정한 데이터에 비해 flashover후에 측정 한 데이터는 절연열화가 상당히 진행된 것을 의미한다. 단순히 flashover전후에  $\Delta I$ 와  $\Delta \tan \delta$ 의 결과를 분석하면 flashover전 데이터에 비해 flashover후 데이터가 오히려 낮게 나타났으나, 그림 2와 그림 3에서 나타난 바와 같이 절연물이 손상됨에 따라 유전정접과 교류전류의 측정값이 증가하고 있음을 확인하였다. 그 동안 고압전동기 절연열화를 관찰할 때  $\Delta I$ 와  $\Delta \tan \delta$ 의 값을 갖고 평가하였으나 이제는 유전정접과 교류전류의 측정값 자체도 참고할 필요가 있다. No. 7 고압전동기는 15kV에서 1차 flashover가 발생하였고 8.7kV에서 최종적으로 절연파괴가 일어났다.

표 3. 고압전동기 flashover전후의 특성

전압 [kV]	tanδ[%]		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
Δtanδ[%]	8.70	2.00		
ΔI[%]			11.20	9.49

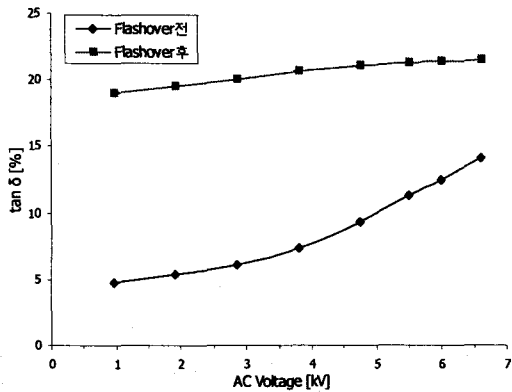


그림 2. No. 7 전동기의 tanδ-전압 특성

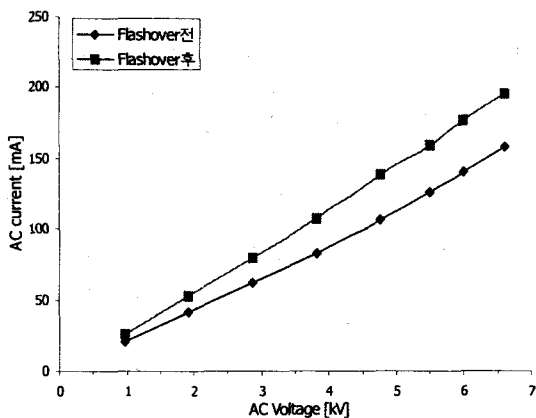


그림 3. No. 7 전동기의 교류전류-전압 특성

표 4. 고압전동기의 절연진단 및 파괴시험 결과

Motor Number	Δtanδ [%]	ΔI [%]	파괴전압 [kV]
No. 1	1.90	2.51	14.5
No. 2	3.30	8.07	12.96
No. 3	2.00	0.48	17.46
No. 4	8.10	8.98	6.99
No. 7	8.70	11.20	15
No. 8	2.29	3.60	16
No. 9	4.53	4.92	10
No. 11	11.46	13.59	12

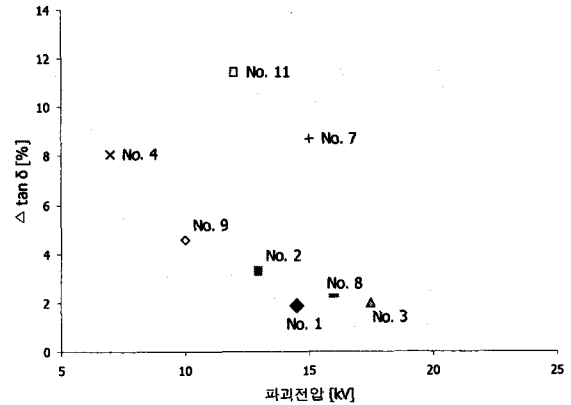


그림 4. 고압전동기의 Δtanδ-파괴전압 특성

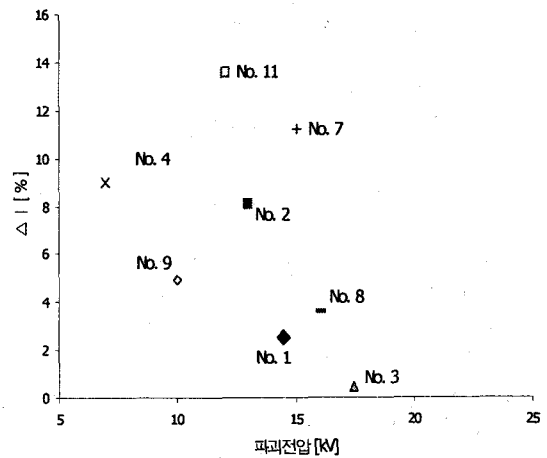


그림 5. 고압전동기의 ΔI-파괴전압 특성

표 4에서는 6.6kV급 고압전동기 8대의 유전정점, 교류전류 및 절연파괴 전압 등을 나타내었다.

No. 3 고압전동기의 절연파괴 전압이 17.46kV로 가장 높고, No. 4 고압전동기의 절연파괴 전압이 6.99kV로 가장 낮게 분석되었다. 오손정도가 심하고  $\Delta I$ 와  $\Delta \tan\delta$ 의 크기가 높게 분석된 고압전동기에서 절연파괴 전압이 낮게 나타났다. 그림 4와 그림 5에서 알 수 있는 바와 같이  $\Delta \tan\delta$  및  $\Delta I$ 와 절연파괴 전압 사이의 관계가 거의 비례적으로 나타나고 있다. 따라서  $\Delta \tan\delta$ 와  $\Delta I$ 가 낮은 고압전동기 No. 1, 2, 3, 8은 절연파괴 전압이 높고,  $\Delta \tan\delta$ 와  $\Delta I$ 가 상대적으로 높은 고압전동기 No. 4, 9는 절연파괴 전압이 낮게 분석되었다.

#### 4. 결 론

No. 3 고압전동기의 절연파괴 전압이 17.46kV로 가장 높고, No. 4 고압전동기의 절연파괴 전압이 6.99kV로 가장 낮게 분석되었다. 오손정도가 심하고  $\Delta I$ 와  $\Delta \tan\delta$ 의 크기가 높게 분석된 고압전동기에서 절연파괴 전압이 낮게 나타났다. No. 7 고압전동기 flashover전후에 절연진단 결과 flashover 발생으로 인해 절연물이 손상됨에 따라 유전정접과 교류전류의 측정값이 증가하였으나  $\Delta I$ 와  $\Delta \tan\delta$ 의 값은 오히려 감소하였다. 따라서 그 동안 고압전동기 절연열화를 판정할 때  $\Delta I$ 와  $\Delta \tan\delta$ 의 값을 갖고 평가하였으나 유전정접과 교류전류 측정값의 크기 자체도 참고할 필요가 있다. 고압전동기 절연진단과 파괴시험 결과  $\Delta \tan\delta$ 와  $\Delta I$ 가 낮은 고압전동기 No. 1, 2, 3, 8은 절연파괴 전압이 높고,  $\Delta \tan\delta$ 와  $\Delta I$ 가 상대적으로 높은 고압전동기 No. 4, 9는 절연파괴 전압이 낮게 분석되었다.

#### (참 고 문 헌)

- [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, pp. 3-25~3-28, 5-13~5-14, 1989.
- [2] 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, pp. 455~457, 2003.
- [3] G. Stone and J. Kapler, "Stator Winding Monitoring", IEEE Industry Applications Magazine, pp. 15~20, 1998.