

4.16 kV 및 6.6 kV 전동기 고정자 권선의 절연열화 판정기준

논문
58-4-19

Judgement Criterion of Insulation Deterioration in 4.16 kV and 6.6 kV Motor Stator Windings

김희동[†]
(Hee-Dong Kim)

Abstract - To assess the condition of stator insulation, nondestructive tests were performed on twenty five coil groups and twenty six motors. The stator windings has nominal ratings of 6.6 kV and are classified into five coil groups :one group with healthy insulation and four groups with four different types of artificial defects. After completing nondestructive tests, the AC voltage applied to the stator windings was gradually increasing until insulation failure in order to obtain the breakdown voltage. No. 1, No. 2 and No. 6 of 6.6 kV motors failed near rated voltage of 14 kV, 8.7 kV and 14 kV, respectively. The breakdown voltage of three motors was lower that expected for good quality coils(14.2 kV) in 6.6 kV motors. No. 3 and No. 6 of 4.16 kV motors failed near rated voltage of 5.6 kV and 4.2 kV, respectively. Almost all of failures were located in a line-end coil at the exit from the core slot. The breakdown voltages and the types of defects showed strong relation to the stator insulation tests such as in the case of AC current, dissipation factor($\tan\delta$) and partial discharge magnitude.

Key Words : Motor, Nondestructive test, Stator winding, Breakdown voltage, Artificial defect, Dissipation factor

1. 서론

발전소 주요설비에서 장기간 운전중인 고압전동기 고정자 권선의 절연열화로 인한 파괴 사고는 전력공급의 신뢰성을 크게 저하시킨다. 주로 운전중에 열적, 기계적, 전기적 및 환경적인 스트레스(stress)가 복합적으로 작용하여 절연재료에서 보이드(void)와 같은 결함이 발생한다. 이러한 결함 부분에 지속적으로 여러 가지 스트레스가 부과되어 절연열화를 가속시켜 보이드 크기가 점점 커진다. 따라서 보이드가 커짐에 따라 부분방전 크기도 점차적으로 증가하는 과정이 반복되면서 절연내력이 급격하게 감소함에 따라 최종적으로 절연파괴가 일어나고 있다[1].

미국 EPRI는 정격전압이 2.3 kV 이상의 대용량 고압전동기가 설치되어 운전중인 발전소에서 7,500대를 조사한 결과, 37%는 고정자 권선에서 절연파괴가 발생한 것으로 발표하였다[2]. 일본에서는 정지중에 고압회전기 고정자 권선의 절연상태를 평가하기 위해 1970년대 중반과 1980년대에 제작사를 중심으로 절연진단 시험에 관해 활발한 연구를 수행함으로써 절연열화 평가기준을 정립하였다[3]. 절연진단 시험은 절연저항, 성극지수, 교류전류, 유전정접 및 부분방전 등에 의하여 절연열화 정도를 판정하고 있으며, 정격전압까지 인가하는 비파괴 시험(nondestructive test)을 주로 사용하고 있다. 국내에서도 1990년대부터 발전소를 중심으로 절연진

단 시험을 활발하게 진행하고 있으며, 최근에는 민간기업에서도 적극적으로 도입하고 있는 실정이다. 특히, 운전연수가 10년 이상된 고압전동기는 대략 3년 주기로 계획예방정비 기간 중에 진단시험을 시행하고 있으며, 일본에서 개발한 절연열화 평가기준을 사용하고 있다. 그러나 국내 제작사에 의해 공급된 고압전동기 수요가 증가함에 따라 우리 실정에 적합한 절연열화 판정기준이 필요하게 되었다[4].

본 논문은 4.16 kV와 6.6 kV 전동기에서 절연열화 상태를 평가하기 위해 그룹권선을 소선단락, 도체표면과 주절연재료 내부에서 보이드 및 도전성 테이프(conductive tape) 제거 등과 같은 인위적인 결함을 갖고 있으며, 다른 한 가지 종류는 정상적인 권선으로 제작하였다. 4가지 종류의 결함 권선과 한 가지 종류의 정상적인 권선을 고정자에 5개 그룹으로 분류하여 설치하고 5회 이상 동일한 방법으로 그룹권선을 제작하여 절연진단과 절연파괴 시험을 수행하였다. 또한, 10년 이상 운전된 4.16 kV와 6.6 kV 전동기 총 26대를 선정하여 절연진단과 절연파괴 시험을 수행하였다. 최종적으로 고압전동기 절연특성과 절연파괴 전압 사이의 상관관계를 검토하여 절연열화 평가기준을 재정립하였다. 그리고 고압전동기 고정자 권선의 절연상태는 양호, 요주의, 분해점검, 절연보강 및 권선교체 등으로 분류하여 평가할 수 있도록 근거를 제시하였다.

2. 결함요소별로 제작된 그룹권선

그림 1과 그림 2는 그룹권선의 모형도 및 단면도를 나타내었으며, 12개의 동도체가 2병렬로 구성되어 있다. 표 1에 나타난 바와 같이 여러 가지 절연재료를 사용하여 6.6 kV

[†] 교신저자, 정회원 : 한전 전력연구원 책임연구원 · 공박

E-mail : hdkim@kepco.co.kr

접수일자 : 2009년 3월 4일

최종완료 : 2009년 3월 16일

전동기 고정자 그룹권선을 제작하였다. 그룹권선의 리드선 절연은 마이카 테이프(mica tape)를 1/2씩 중첩하여 7회 감은 후에 글라스 테이프(glass tape)를 1/2씩 중첩하여 2회 감는다. 리드선 절연작업을 마치고 권선 전 둘레로 마이카 테이프를 1/2씩 중첩하여 7회 감고, 직선부는 도전성 테이프(1/2씩 중첩하여 1회 감는다. 그리고 곡선부는 반도체성 테이프(semi-conductive tape)를 사용하여 1/2씩 중첩하면서 1회 감는다.

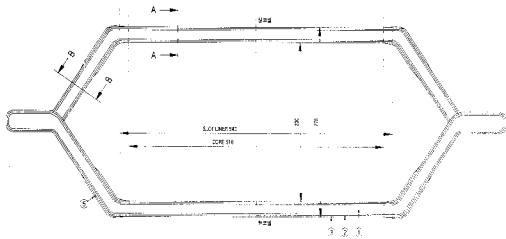


그림 1 고압전동기 그룹권선의 모형도
Fig. 1 Model of motor stator coil groups

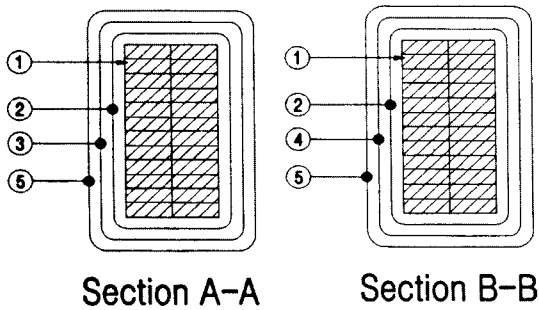


그림 2 고압전동기 그룹권선의 단면도
Fig. 2 Cross section of motor stator coil groups

표 1 고압전동기 그룹권선의 절연재료
Table 1 Insulation materials of motor stator coil groups

No.	절 연 재 료	규 격
1	Coil Conductor	1.8×6.4mm
2	Mica Tape	0.13×W20×50M
3	Conductive Tape	0.085×W25×30M
4	Glass Tape	0.13×W20×50M
5	Semi-conductive Tape	0.22×W20×30M

표 2에 나타난 바와 같이 6.6 kV 전동기 고정자 그룹권선은 소선단락, 도체표면에서 보이드, 주절연재료 내부에서 보이드 및 도전성 테이프 제거 등 결함을 모의한 권선과 정상적인 권선으로 분류하여 제작하였다. 소선단락은 12개의 동도체중에 두 개의 동도체 절연재료를 제거하고 단락시켰으며, 도체표면에서 보이드는 동도체와 주절연재료 사이에 길이 5 mm 및 폭 2 mm 정도의 보이드를 권선별로 10개씩 만들었다. 그리고 주절연재료 내부에도 길이 5 mm 및 폭 2 mm 정도의 보이드를 권선별로 10개씩 만들었으며, 도전성

테이프가 제거된 권선은 10개 모두 도전성 테이프를 사용하지 않았다. 그림 3과 같이 고압전동기 고정자 슬롯에 결함 권선과 정상적인 권선을 설치하고 5가지 그룹으로 분류하여 권선저항, 교류전류, 유전정접 및 부분방전 크기 등을 측정함으로써 절연열화 특성을 분석하였다. 그리고 4가지 종류의 결함권선과 한 가지 종류의 정상적인 권선을 5회 이상 동일한 방법으로 제작하여 절연진단과 절연파괴 시험을 반복하였다

표 2 고압전동기 그룹권선의 결함형태
Table 2 The types of defects in 6.6 kV motor coil groups

그룹권선	결함요소	권선수량
Group A	소선단락	10개
Group B	도체표면에서 보이드	10개
Group C	주절연재료 내부에서 보이드	8개
Group D	도전성 테이프가 제거된 권선	10개
Group E	정상적인 권선	10개

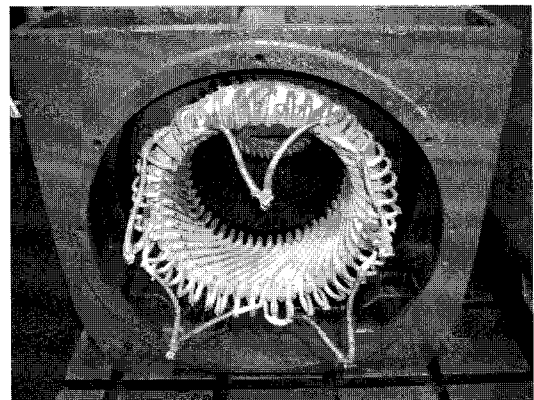


그림 3 인위적 결함을 갖는 고압전동기 그룹권선
Fig. 3 Five coil groups of a motor with artificial defects

3. 시험방법

본 논문은 인위적인 결함을 갖도록 제작한 그룹권선과 장기간 사용된 고압전동기 고정자 권선에서 정지중 절연진단과 절연파괴 시험을 수행하였다. 인위적인 결함을 갖고 있는 그룹권선과 정상적인 권선에서 권선저항 시험기(micro ohm meter, Tinsley 5893)를 사용하여 권선저항을 측정하였다. 고압전동기 고정자 권선에서 교류전류, 유전정접 및 부분방전 시험을 위해 슈어링브리지(schering bridge), 커플링 캐패시터(coupling capacitor) 및 부분방전 측정기(partial discharge detector : PDD, Tettex Instruments TE 571)를 사용하였다. 슈어링브리지는 전원장치(HV supply, Type 5283), 브리지(bridge, Type 2818) 및 공진 인덕터(resonating inductor, Type 5285)로 구성되어 있다. 그림 4와 그림 5는 그룹권선이 설치된 고압전동기에서 교류전류, 유전정접 및 부분방전 시험을 위해 절연진단 장비와 회로도

를 나타내었다. 고압전동기 고정자 권선에 웨빙브리지(Tettex Instruments)를 연결하여 교류전압을 인가하였으며, 커플링 캐패시터(Tettex Instruments, 4,000 pF)는 권선에서 유입되는 신호를 커플링 유니트(coupling unit, Tettex Instruments AKV 572)에 보내어 증폭한 후 부분방전 측정기에서 방전크기 및 패턴을 분석하였다. 부분방전 측정기의 주파수 대역폭은 40~400 kHz 이다. 고압전동기 고정자 권선의 부분방전 크기가 상전압에서 1,500~6,000 pC을 나타내기 때문에 일반 시험실에서 측정하였으며, 외부잡음은 300~400 pC 정도를 나타내고 있다. 따라서 실험실에서 측정된 부분방전 크기는 외부잡음이 포함되어 있다.



그림 4 고압전동기 그룹권선에서 절연진단 시험
 Fig. 4 The equipments of nondestructive test in 6.6 kV motor coil groups

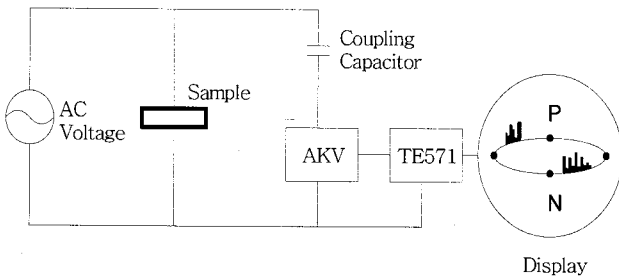


그림 5 부분방전 시험
 Fig. 5 Test circuit of partial discharge

4. 시험결과 및 고찰

4.1 그룹권선의 권선저항 분석

표 2에 나타난 바와 같이 Group A, B, D 및 E는 6.6 kV 전동기 고정자 슬롯에 각각 10개의 그룹권선을 설치하였으며, Group C는 8개의 그룹권선을 설치하였다. 표 3은 그룹권선에서 상용 장비를 사용하여 권선저항을 측정된 결과를 나타내었다. Group A의 권선저항은 소선단락을 모의하기 위해 두개의 동도체를 단락 시켰기 때문에 0.331 Ω으로 측정되었다. 10개의 슬롯에 권선이 설치된 Group B, D 및 E의 권선저항은 각각 0.360 Ω, 0.357 Ω 및 0.357 Ω으로서 거의 유사하게 분석되었다. Group A는 소선단락으로 인해 권선의 턴 수가 감소함에 따라 Group B, D 및 E의 측정 데이터에 비해 권선저항이 0.026~0.029 Ω이 낮게 측정되었다.

그리고 Group C는 고정자 슬롯에 8개의 권선을 설치함에 따라 권선저항은 0.284 Ω을 나타내었다.

표 3 그룹권선의 권선저항 측정결과

Table 3 The test results of winding resistance in motor coil groups

그룹권선	결함요소	권선저항[Ω]
Group A	소선단락	0.331
Group B	도체표면에서 보이드	0.360
Group C	주절연재료 내부에서 보이드	0.284
Group D	도전성 테이프가 제거된 권선	0.357
Group E	정상적인 권선	0.357

4.2 그룹권선과 고압전동기의 절연특성 및 절연파괴 전압 분석

표 4는 Group A, B, C, D 및 E에 대해 동일한 방법으로 5번 제작하여 고압전동기 고정자 슬롯에 설치하고 절연특성과 절연파괴 시험을 5회 반복한 결과를 나타내었다. 결함을 모의한 6.6 kV 전동기 절연특성을 분석하기 위해 교류전류, 유전정접 및 부분방전 크기를 측정하고 최종적으로 절연파괴 시험을 수행하였다. 먼저 그림 4에 나타난 장비를 사용하여 교류전류와 유전정접을 측정하였으며, 그림 5에 나타난 회로도를 근거로 부분방전 크기를 측정하였다. 소선단락된 Group A와 정상적인 권선인 Group E는 교류전류, 유전정접 및 부분방전 크기 등이 모두 양호하게 분석됨에 따라 절연진단 시험을 통해 동도체 절연재료의 결함을 확인하기가 어렵다는 것을 알 수 있었다. 그러나 세 가지 종류의 결함을 갖는 Group B, C 및 D는 정상적인 권선인 Group E에 비해 교류전류, 유전정접 및 부분방전 크기 등이 모두 높게 분석되었다.

6.6 kV 전동기에서 운전에는 필요한 최소의 절연내력은 2E+1kV, 즉 14.2 kV에서 1분 이상 견뎌야 사용이 가능하다. 그러나 Group B의 No. 1은 절연파괴 전압이 12.7 kV로 낮게 분석되었다. ΔI는 40.17% 이고 Δtanδ는 21.83% 이며, 4.76 kV에서 부분방전 크기가 21,000 pC으로 측정되었다. Group C의 No. 1도 절연파괴 전압이 14.0 kV로 낮게 분석되었다. ΔI는 31.60% 이고 Δtanδ는 18.76% 이며, 4.76 kV에서 부분방전 크기가 11,500 pC으로 측정되었다. 두개의 그룹권선 모두 슬롯단부에서 절연파괴가 발생하였다. 따라서 Group B, C에서 두개의 No. 1 권선만 14.2 kV이하에서 절연파괴가 발생하였고, 나머지는 모두 14.2 kV 이상에서 절연파괴가 발생하였다. 평균적인 절연파괴 전압은 Group E에 비해 Group A, B, C 및 D가 낮게 나타났다. Group E의 평균적인 절연파괴전압은 30.92 kV로 가장 높고, Group C는 21.66 kV로 가장 낮게 분석되었다. 따라서 ΔI, Δtanδ 및 부분방전 크기가 높게 나타난 고압전동기에서 절연파괴 전압은 상대적으로 낮게 분석되었다. 정상적인 권선인 Group E의 평균적인 절연내력은 정격전압의 4.68배 정도를 유지하고 있으며, 이러한 결과는 다른 연구자의 절연파괴 데이터와 거의 유사하게 분석되었다[5].

표 4 그룹권선의 절연진단 및 파괴시험 결과

Table 4 The results of nondestructive and breakdown tests in motor coil groups

그룹권선의 절연특성		ΔI [%]	$\Delta \tan \delta$ [%]	PD [pC]	파괴전압 [kV]	평균적인 파괴전압 [kV]
Group A	No. 1	2.94	2.06	2,300	26.0	25.26
	No. 2	6.30	4.62	1,900	23.4	
	No. 3	6.67	5.00	1,400	24.0	
	No. 4	3.25	2.72	550	26.0	
	No. 5	2.47	2.40	600	26.9	
Group B	No. 1	40.17	21.83	21,000	12.7	22.06
	No. 2	12.01	8.02	1,300	23.9	
	No. 3	9.35	6.22	5,300	29.1	
	No. 4	13.32	8.01	3,400	20.1	
	No. 5	11.58	6.82	3,200	24.5	
Group C	No. 1	31.60	18.76	11,500	14.0	21.66
	No. 2	8.94	5.97	2,400	26.1	
	No. 3	10.02	8.11	1,200	20.8	
	No. 4	9.74	12.45	5,300	27.4	
	No. 5	15.67	14.7	8,100	20.0	
Group D	No. 1	13.65	11.95	4,500	24.0	24.26
	No. 2	12.45	9.74	5,300	25.0	
	No. 3	13.20	9.85	7,600	22.6	
	No. 4	10.84	10.96	5,400	27.5	
	No. 5	17.04	14.07	8,300	22.2	
Group E	No. 1	6.88	3.65	6,700	31.0	30.92
	No. 2	3.05	2.07	2,500	31.1	
	No. 3	1.84	1.61	2,200	32.0	
	No. 4	1.05	1.05	1,500	31.0	
	No. 5	1.93	1.51	3,300	29.5	

고압전동기 고정자 권선의 소선단락은 제작결함과 장기간 운전이 원인이 되어 소선사이의 절연물 손상으로 인해 발생하며, 이러한 결함을 갖는 경우 빠른 시간에 주절연물이 손상되어 최종적으로 절연파괴가 일어난다. 따라서 고압전동기 제작결함으로 인해 소선단락이 발생한 경우에는 5년을 전후해서 주로 절연파괴가 발생한다[6]. 고압전동기 고정자 권선 내부에서 주절연물과 동도체 사이에 열팽창 계수의 차이가 근본적인 원인이 되어 전단응력(shear stress)이 발생한다. 전단응력으로 인해 동도체와 주절연물 사이의 결합력이 감소하면, 동도체가 주절연물로부터 분리하게 된다. 이러한 분리는 결과적으로 주절연물과 동도체 사이에 보이드를 생성함으로 도체표면에서 보이드라 한다[7]. 도체표면에서 보이드는 장기간 운전되거나 혹은 기동정지가 빈번한 고압전동기에서 주로 발생한다. 주절연재료 내부에서 보이드는 주로 열적 및 전기적 스트레스가 복합적으로 작용하여 주절연물 내부에서 보이드가 생성된다[8]. 도전성 테이프가 제거된 권선은 기동과 정지할 때 슬롯 내부에서 고정자 권선이 미세하게 움직이면서 철심에 의해 주절연물 외부의 도전성 테이프가 손상되어 주절연물과 철심사이에 보이드가 형성되

는 경우를 나타낸다[9]. 동일한 정격을 갖는 두 대의 고압전동기에서 도전성 테이프를 사용한 경우와 그렇지 않은 경우에 측정된 캐패시턴스는 50% 차이가 난다. 예를 들면 도전성 테이프를 사용한 경우에 캐패시턴스가 100 nF이면, 그렇지 않은 경우에는 50 nF이 된다.

표 5 6.6 kV 고압전동기의 절연특성

Table 5 Insulation characteristics of 6.6 kV motors

고압전동기 No.	ΔI [%]	$\Delta \tan \delta$ [%]	PD [pC] at 4.76kV	절연파괴 전압 [kV]	운전수 [년]	제작사
No. 1	29.73	25.81	26,000	14.0	19	국외
No. 2	13.16	11.03	35,000	8.70	30	국외
No. 3	9.67	6.23	4,500	19.0	14	국외
No. 4	5.34	3.42	9,500	23.7	15	국외
No. 5	4.43	4.63	3,100	23.0	20	국외
No. 6	13.59	11.46	11,000	14.0	17	국내
No. 7	7.42	6.45	6,500	17.6	26	국내
No. 8	2.24	1.51	1,300	21.0	11	국내
No. 9	3.60	2.29	1,800	17.0	11	국내
No. 10	5.53	3.08	9,200	26.0	19	국내
No. 11	5.50	4.86	7,500	24.0	19	국내
No. 12	7.97	8.19	9,300	22.9	24	국내
No. 13	3.70	4.01	4,500	24.7	24	국내
No. 14	3.52	3.49	5,300	25.7	24	국내
No. 15	3.87	3.80	3,900	25.8	24	국내
No. 16	8.98	8.05	6,900	20.8	17	국내
No. 17	11.02	8.92	6,700	21.4	11	국내
No. 18	4.70	4.54	2,400	26.6	18	국내
No. 19	9.66	7.94	9,500	22.5	19	국내
No. 20	4.44	2.32	6,500	24.0	11	국내
평균적인 절연파괴전압 [kV]				22.7		

표 5는 6.6kV 전동기 20대의 교류전류, 유전정접, 부분방전 크기 및 절연파괴 전압 등을 나타내었다. No. 1~No. 5는 국외산 고압전동기이고, No. 6~No. 20은 국내에서 제작한 고압전동기이다. 앞에서 언급한 바와 같이 6.6 kV 전동기는 운전을 위해 최소한 14.2 kV 이상의 내전압에 견뎌야 한다. 그러나 고압전동기 No. 1은 절연파괴 전압이 14.0 kV로 낮게 분석되었다. ΔI 는 29.73% 이고 $\Delta \tan \delta$ 는 25.81%이며, 4.76 kV에서 부분방전 크기가 26,000 pC으로 측정되었다. 고압전동기 No. 2도 절연파괴 전압이 8.7 kV로 낮게 분석되었다. ΔI 는 13.16% 이고 $\Delta \tan \delta$ 는 11.03%이며, 4.76 kV에서 부분방전 크기가 35,000 pC으로 측정되었다. 그리고 고압전동기 No. 6도 절연파괴 전압이 14.0 kV로 낮게 분석되었다. ΔI 는 13.59% 이고 $\Delta \tan \delta$ 는 11.46%이며, 4.76 kV에서 부분방전 크기가 11,000 pC으로 측정되었다. 3대의 고압전동기 모두 슬롯단부에서 절연파괴가 발생하였다. 특히 고압전동기 No. 1의 유전정접은 약 2 kV에서 8.99%이고 6.6 kV에서 34.8%로 측정되었으며, $\Delta \tan \delta$ 가 25.81%로 가장 높게 나타났다. 14.2 kV이하에서 절연파괴가 발생된 3대의

고압전동기를 제외한 17대의 고압전동기에서 평균적인 절연 파괴 전압은 22.7 kV로 분석되었다. ΔI 가 10% 이상이고 $\Delta \tan\delta$ 가 8.5% 이상이며, 부분방전 크기가 10,000 pC 이상으로 높게 측정된 고압전동기에서 절연파괴 전압은 낮게 나타났다. 따라서 교류전류, 유전정접 및 부분방전 크기가 기준값을 크게 초과할 경우에 절연파괴 전압이 낮게 측정되는 것을 확인할 수 있었다.

표 6 4.16 kV 고압전동기의 절연특성

Table 6 Insulation characteristics of 4.16 kV motors

고압 전동기	ΔI [%]	$\Delta \tan\delta$ [%]	PD[pC] at 3.0kV	절연파괴 전압[kV]	운전년수 [년]	제작사
No. 1	1.78	2.1	2,200	16.0	39	국외
No. 2	1.08	0.92	380	18.0	39	국외
No. 3	9.89	4.63	6,600	5.6	26	국외
No. 4	2.61	1.84	2,700	12.4	26	국외
No. 5	1.67	1.75	2,500	15.0	25	국외
No. 6	9.57	7.11	7,000	4.2	20	국내

표 6은 4.16 kV 전동기 6대의 교류전류, 유전정접, 부분방전 크기 및 절연파괴 전압 등을 나타내었다. 4.16 kV 전동기에서 운전에 필요한 최소의 절연내력은 $2E+1kV$, 즉 9.32 kV에서 1분 이상 견뎌야 사용이 가능하다. 그러나 고압전동기 No. 3은 절연파괴 전압이 5.6 kV로 나타났다. ΔI 는 9.89% 이고 $\Delta \tan\delta$ 는 4.63% 이며, 3.0 kV에서 부분방전 크기가 6,600 pC으로 측정되었다. 그리고 고압전동기 No. 6도 절연파괴 전압이 4.2 kV로 낮게 분석되었다. ΔI 는 9.57% 이고 $\Delta \tan\delta$ 는 7.11% 이며, 3.0 kV에서 부분방전 크기가 7,000 pC으로 측정되었다. 그러나 고압전동기 No. 3, 6은 9.32 kV 이하에서 절연파괴가 발생하였고, 나머지 4대는 9.32 kV이상에서 절연파괴가 발생하였다. ΔI 가 5% 이상이고 $\Delta \tan\delta$ 가 4% 이상 이며, 부분방전의 크기가 5,000 pC 이상으로 높게 측정된 고압전동기에서 절연파괴 전압은 낮게 분석되었다. 따라서 6.6 kV 전동기와 마찬가지로 교류전류, 유전정접 및 부분방전 크기가 기준값을 크게 초과할 경우에 절연파괴 전압이 낮게 측정되는 것을 확인할 수 있었다.

4.3 고압전동기 절연열화 판정기준 및 절연상태 평가

표 4, 표 5 및 표 6에 나타난 바와 같이 6.6 kV 전동기에서 결함을 모의한 권선과 실제 현장에서 10년 이상 사용된 4.16 kV와 6.6 kV 전동기 절연특성을 분석한 결과를 근거로 표 7과 같이 절연열화 판정기준을 제정하였다. 성극지수는 4.16 kV와 6.6 kV 전동기 고정자 권선에서 삼상 일괄로 DC 5 kV를 인가하여 측정하였으며, 1.5이상이면 양호로 판정하고 고전압을 인가하여 절연진단 시험을 수행한다. 기존의 판정기준에 비해 6.6 kV 전동기의 경우 ΔI 는 8.5%에서 10%, $\Delta \tan\delta$ 는 6.5%에서 8.5%로 증가시켰으며, 부분방전 크기는 상전압의 1.25배에서 10,000 pC으로 강화하였다. 그리고 4.16 kV 전동기도 ΔI 는 4.0%에서 5.0%, $\Delta \tan\delta$ 는 3.5%에서 4.0%로 증가시켰으며, 부분방전 크기는 상전압의 1.25배에서 5,000 pC으로 선정하였다.

표 7에 나타난 판정기준에 따라 발전소에서 운전중인 고압전동기 3,500대 이상의 절연진단 데이터를 분석하였으며, 그 결과를 근거로 표 8과 같이 고압전동기 고정자 권선의 절연상태 평가기준을 제시하였다.

표 7 고압전동기 고정자 권선의 판정기준

Table 7 New criteria for judging the motor stator windings

정격 전압	4.16 kV	6.6 kV	
성극지수	DC 5 kV	1.5	1.5
교류전류 ΔI [%]	E	5.0	10.0
유전정접 $\Delta \tan\delta$ [%]	E	4.0	8.5
최대부분방전[pC]	$E/\sqrt{3} \times 1.25$	5,000	10,000

표 8 고압전동기 고정자 권선의 절연상태 평가기준

Table 8 Assessment criteria of insulation condition in motor stator windings

절연상태	평가기준
양호 (A)	교류전류, 유전정접 및 부분방전 등이 모두 양호
요주의 (B)	교류전류, 유전정접 및 부분방전 중에 두 가지 항목이 평가기준을 초과한 경우에 매년 진단시험을 수행하여 트렌드 관리가 필요
분해점검 (C)	상전압에서 부분방전 크기가 10,000 pC 이상이며, $\tan\delta$ -전압 특성에서 유전정접이 초기값에 비해 감소하는 경우(그림 6 참조)
절연보강 (D)	부분방전 패턴이 슬롯방전으로 분석되고 부분방전 크기가 10,000 pC 이상인 경우(그림 7 참조)
권선교체 (E)	교류전류, 유전정접 및 부분방전 등이 모두 불량 혹은 유전정접의 초기값이 20% 이상으로 증가하거나(그림 8 참조) 소선단락으로 판정된 경우

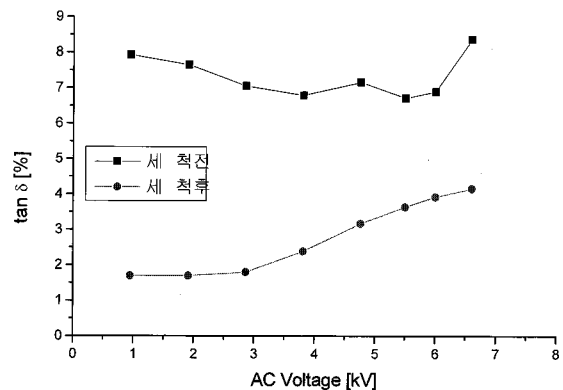


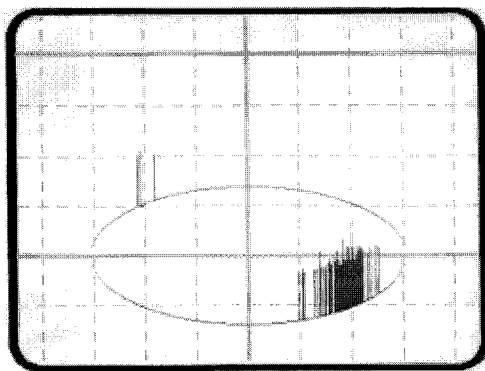
그림 6 고압전동기 고정자 권선의 $\tan\delta$ -전압 특성

Fig. 6 $\tan\delta$ -voltage characteristics of motor stator windings

그림 6은 화력발전소에서 15년 동안 운전한 고압전동기 (1,400 kW, 6.6 kV) 고정자 권선에서 정밀 분해점검 전후에 $\tan\delta$ -전압 특성을 나타내었다. 세척 전에는 먼지와 배어링

오일 등 이물질 유입으로 인해 전압이 증가함에 따라 초기 값에 비해 유전정접이 감소하다가 6.0 kV에서 증가하고 있다. 회전자를 분리하여 세척작업을 마치고 건조한 후에 측정된 $\tan\delta$ -전압 특성은 양호하게 분석되었다. 고정자 권선의 절연상태가 양호하여도 단말권선(endwinding)에 도전성을 갖는 이물질이 유입되어 있으면, 표면 트래킹(tracking)이 발생하여 절연과피가 발생 할 수 있다[9].

고압전동기가 기동과 정지할 때 고정자 슬롯 내부에서 권선과 철심 사이의 상대적인 이동으로 인해 외부 도전성 페인트가 파손되면 슬롯방전이 발생한다. 슬롯방전이 크게 나타나면 오존(ozone)이 발생되어 권선과 철심을 손상시킨다. 그림 7은 슬롯방전의 패턴을 나타내었으며, 1상한(0~90°)보다 3상한(180~270°)의 피크치가 우세하게 나타난다[10]. 상전압에서 슬롯방전 크기가 10,000 pC 이상으로 크게 나타날 때 절연보강을 판정한다. 부분방전 크기가 절연보강 전에 비해 현저하게 감소하는 것은 재합침시에 바니쉬가 철심과 고정자 권선 사이에 양호하게 유입되기 때문이다. 예를 들면, 슬롯방전에 의한 부분방전 크기가 절연보강 전에 10,000~30,000 pC으로 크게 나타난 경우 절연보강 후에는 3,000~5,000 pC으로 감소한다.



고압전동기(PD-Range: 2.0 nC/div)

그림 7 슬롯방전의 패턴

Fig. 7 The pattern of slot discharge

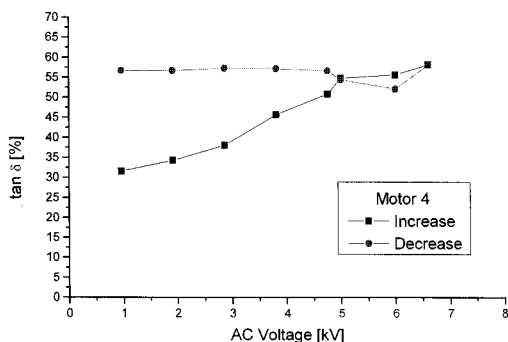


그림 8 열화된 고정자 권선의 $\tan\delta$ -전압 특성

Fig. 8 $\tan\delta$ -voltage characteristics of aged stator windings

그림 8은 화력발전소에서 20년 동안 운전한 고압전동기 (290 kW, 6.6 kV) 고정자 권선 교체 전에 $\tan\delta$ -전압 특성을 나타내었다. 전압이 증가함에 따라 유전정접의 초기값이

20%이상으로 증가하면 권선교체를 판정한다. 표 5에서 나타난 바와 같이 고압전동기 No. 1의 유전정접은 약 2 kV에서 8.99%이고 6.6 kV에서 34.8%로 측정되었으며, $\Delta\tan\delta$ 가 25.81%일 때 14 kV에서 절연과피가 발생하였다. 또한, 표 6에서 나타난 바와 같이 고압전동기 No. 6의 유전정접은 약 1.2 kV에서 7.09%이고 4.16 kV에서 14.2%로 측정되었으며, $\Delta\tan\delta$ 가 7.11%일 때 4.2 kV에서 절연과피가 발생하였다.

5. 결 론

고압전동기 고정자 권선의 절연열화 상태를 평가하기 위해 5가지 종류의 그룹권선, 발전소에서 10년 이상 운전된 4.16 kV 전동기 6대 및 6.6 kV 전동기 20대에서 교류전류, 유전정접 및 부분방전 등을 측정하고 최종적으로 절연과피 시험을 시행한 결과 아래와 같은 결론을 얻었다.

(1) 정상적인 권선과 4가지 종류의 결함을 갖는 그룹권선에서 권선저항을 측정한 결과 Group A는 0.331 Ω이며, Group B, D 및 E는 각각 0.360 Ω, 0.357 Ω 및 0.357 Ω으로서 거의 유사하게 나타났다. Group A는 소선단락으로 인해 권선의 턴 수가 감소함에 따라 Group B, D 및 E의 측정 데이터에 비해 권선저항이 0.026~0.029 Ω이 낮게 측정되었다. 소선단락된 그룹권선에서 절연진단 시험결과가 양호하게 분석되어 동도체 절연재료의 결함을 확인하기가 어려웠으나 권선저항을 측정함으로써 소선단락 여부를 정확하게 판정할 수 있었다.

(2) 그룹권선, 4.16 kV 및 6.6 kV 전동기에서 절연특성과 절연과피 시험을 통해 고정자 권선의 건전성을 명확하게 확인할 수 있었다. 6.6 kV 전동기는 14.2 kV이하에서 절연과피가 발생된 3대를 제외한 17대의 평균적인 절연과피 전압은 22.7 kV로 분석되었다. 그리고 14.2 kV 및 9.32 kV 이하에서 절연과피가 발생된 두 종류의 그룹권선, 6.6 kV 전동기 3대 및 4.16 kV 전동기 2대의 교류전류, 유전정접 및 부분방전 크기 등이 기준값보다 훨씬 높게 측정되었다. 따라서 ΔI , $\Delta\tan\delta$ 및 부분방전 크기 등이 기준값보다 높게 측정된 고압전동기 고정자 권선의 절연과피 전압은 낮게 분석되었다.

(3) 절연진단과 절연과피 시험 결과를 분석함으로써 4.16 kV와 6.6 kV 전동기 고정자 권선의 판정기준을 재정립하였다. 또한, 고압전동기 고정자 권선의 절연상태를 양호, 요주의, 분해점검, 절연보강 및 권선교체로 분류하여 최종적으로 평가할 수 있도록 근거를 제시하였다. 따라서 절연진단 시험을 통해 고압전동기 고정자 권선의 열화상태를 사전에 확인하여 예측정비를 수행함으로써 고장발생으로 인한 경제적 손실을 저감할 수 있었다.

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] G. Stone and J. Kapler, "Stator Winding Monitoring", IEEE Industry Applications Magazine, pp. 15~20, 1998.
- [3] H. Yoshida and K. Umemoto, "Insulation Diagnosis for Rotating Machine Insulation", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. EI-21, No. 6, pp. 1021~1025, 1986.
- [4] 김희동의 6명, "고압전동기 정지중 절연열화 판정기준 및 진단기법 연구(최종보고서)" 산업자원부(R-2004-0-160-01), 2007.
- [5] H. G. Sedding, R. Schwabe, D. Levin, J. Stein and B. K. Gupta, "The Role AC & DC Hipot Testing in Stator Winding Ageing", IEEE Electrical Insulation and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference, pp. 455~457, 2003.
- [6] 김희동, 주영호, "고압전동기 고정자 권선 절연재료의 미세구조 특성", 한국전기전자 재료학회 춘계학술대회 논문집, pp. 513~517, 1999.
- [7] H. Zhu, C. Morton and S. Cherukupalli, "Quality Evaluation of Stator Coils and Bars under Thermal Cycling Stress", Conference Record of the 2006 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, pp. 384~387, 2006.
- [8] 김희동, "발전기 고정자 권선의 절연열화 메카니즘 분석", 전기전자재료학회 논문지, Vol. 15, No. 2, pp. 119~126, 2002.
- [9] J. H. Dymond, N. Stranges, K. Younsi and J. E. Hayward, "Stator Winding Failures : Contamination, Surface Discharge, Tracking", IEEE Trans. on Industry Applications, pp. 577~583, 2002.
- [10] Claude Hudon and Mario Belec, "Partial Discharge Signal Interpretation for Generator Diagnostics", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 12, No. 2, pp. 297~319, 2005.

저 자 소 개



김희동 (金熙東)

1961년 12월 15일생. 1985년 홍익대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 2002년 일본 큐슈공업대학교 초빙연구원. 현재 한전 전력연구원 책임연구원

Tel : 042-865-5481

Fax : 042-865-5304

E-mail : hdkim@kepco.co.kr