

절연파괴시험법을 이용한 3.3[kV] 유도전동기의 절연물 열화특성 분석

(Analysis of Aging Insulation Characteristics of 3.3[kV] Class Induction Motor with
AC Breakdown Test)

김현일 · 김윤현 · 손영규 · 이 주*

(Hyun-Il Kim · Youn-Hyun Kim · Yeoung-Gyu Son · Ju Lee)

요 약

본 논문은 유도전동기 고정자권선의 절연물에 대하여 비파괴 및 파괴시험을 실시하여 절연물의 비파괴특성과 내전압강도와의 상호관계를 비교, 평가, 분석함으로써, 향후 전동기의 절연상태 평가시 수명 및 절연진단의 신뢰성을 도모하고자 제안하였다. 본 논문에서는 비파괴시험과 파괴시험과의 상관관계를 평가하기 위하여 비파괴시험으로 절연저항시험, 성극지수시험, 유전정접시험, 부분방전시험을 실시하였으며, 파괴시험은 60[kV] AC 내전압을 이용하여 실시하였다. 또한 장기간 사용된 전동기 권선의 절연물에 대한 연구결과로부터 기존 선진국의 진단방법 및 판정기준이 국내에서 제작된 전동기에 대한 절연특성 평가 및 분석에도 타당함을 증명하였으며, 향후 본 논문에서 제시한 자료들은 유사조건인 산업현장에서 운용중인 유도전동기의 수명 및 상태 평가를 위한 기초자료로 유용하게 사용될 수 있으리라 기대된다.

Abstract

This paper introduce to improve the reliability of the expected service life and the insulation condition evaluation of the high voltage induction motors by assessing, comparing and analyzing the correlation between the dielectric properties of the off-line insulation diagnostic test and dielectric strength on the insulation breakdown test. The insulation diagnostic tests include insulation resistance, polarization index(P.I), dissipation factor($\tan\delta$), maximum partial discharges(Q_{max}) and AC breakdown test. This study evaluated the correlation between insulation diagnostic test and AC breakdown test for stator winding of high voltage induction motor. On the basis of these test results, we expect that this study can be used for effectively assessing the results of insulation diagnostic tests for similar class induction motors in service at industrial field.

Key Words : Induction motor, Insulation diagnostic test, Breakdown test, Dielectric strength

* 주저자 : 한양대 전기제어생체공학부 부교수

Tel : 02-2220-0349, Fax : 02-2295-7111

E-mail : jungds61@hanmail.net

접수일자 : 2007년 9월 5일

1차심사 : 2007년 9월 10일

심사완료 : 2007년 9월 21일

1. 서 론

현재 수자원공사는 수도물 공급을 위하여 운용중

인 3.3[kV]급 이상의 고전압 전동기는 약 500여대로 단일 규모로는 국내 최대의 전동기 댓수를 보유하고 있다. 이들 전동기중 10년 이상 장기간 사용된 설비가 점차 늘어가고 있는 추세이며, 안정적인 물 공급을 위하여 전동기 설비의 신뢰성 및 운용의 안정성을 확보하기 위한 노력이 절실히 요구되는 시점에 있다. 그러나 지금까지 전동기의 절연에 대한 체계적인 진단의 부재로 전동기가 가지고 있는 고유의 물리적 건전성과 무관하게 단순한 경제적 회계 년수에 의한 설비의 교체 시기가 결정되어왔다.

최근 들어 과학기술의 발전에 따라 전동기 절연에 대한 여러 가지 진단 기법의 도입에 의한 절연물의 열화 상태를 좀 더 정확하게 판단하고자하는 시도가 많이 이루어지고 있다. 이러한 현장 진단시험을 통한 경제적 이득의 목적을 달성하기 위해서는 진단 결과에 대한 판정의 정확성을 확보하는 것이 중요하다. 특히 열화 판정기준은 해당 설비에 사용된 절연재료와 설계치, 생산공정 등에 따라 결정되므로 시험대상 전동기의 정확한 특성이 필요하다. 그러나 사용되고 있는 각 전동기가 어느 정도의 특성 차이를 갖고 있어 신뢰성 있는 판단을 하기란 상당히 어렵다[1].

현재 국내에서 적용되는 진단방법과 판정기준치는 대부분 일본 등 선진국에서 발표된 연구논문을 등을 근거로 하여 이루어지고 있는 실정이다[2-3]. 그러나 국내에서 생산된 전동기에 대한 절연특성은 절연재료, 제조공정이 타 선진국의 절연재료, 제조공정과 차이가 존재하므로 선진국의 진단방법 및 판정기준이 국내에서 제작된 전동기에 대한 절연특성 평가 및 분석의 타당성을 재검증할 필요가 있다.

따라서 본 논문에서는 10년간 장기 운용된 절연계급 B Class, 3.3[kV]급 농형 유도전동기의 고정자 권선을 시료로 활용하여 절연파괴시험을 통해 절연특성 평가를 수행코자한다. 특성평가 결과로부터 전동기의 기대수명을 조사하고 절연파괴시 고체절연물의 물리적 변화특성 인자를 도출하여 비파괴시험시 좀 더 신뢰성 있는 판단 척도를 마련하고자한다.

2. 본 문

2.1 시험방법

본 시험 대상시료는 10년 정도 사용된 전동기로서 수자원공사에서 운용되는 대표적인 3.3[kV]급 유도전동기로 비파괴시험인 절연특성시험을 실시하여 현재의 절연상태를 조사·분석하고 파괴시험을 실시하여 비파괴시험과의 상관관계를 비교·분석하고자 하였다.

1) 시험대상 시료의 선정

전동기 각 상별의 전반적인 절연열화 특성을 파악하기 위하여 우선 전동기의 각 R상, S상, T상에 대하여 시험을 실시하였으며, 각 상별 시험완료 후 장기 운영 중 열적, 전기적, 기계적, 환경적 열화가 권선의 부위별로 어떻게 다르게 나타나는가를 알아보기 위하여 각 상 그룹별로 제작된 시료 중 가장 고압측 시료와 중성점측 시료에 해당하는 (R1, R6), (S1, S6), (T1, T6)를 주 시험대상 시료로 선정하였다.

2) 시험의 종류 및 시험방법

가) 비파괴시험(절연특성시험)

시료의 비파괴 특성을 조사하기 위하여 직류 및 교류 전압을 인가하여 시험을 실시하였으며, 각 항목별로 표 1에서와 같이 시험을 실시하였다.

표 1. 시험 종류별 시험기준
Table 1. The standard of test

시험종류	시험기준 전압	시험관련근거
절연저항시험	1[kV]	IEEE Std 43
직류전류시험		
교류전류시험	3.3[kV]	IEEE Std 56
유전정접시험	3.3[kV]	IEEE Std 286
부분방전시험	3.3[kV]	IEC 60270

나) 파괴시험

유효한 시험결과를 얻기 위하여 국제 시험규격인 ASTM D 149-97a를 준용하였다[5]. 시험종류는 아래 표 2에서와 보는바와 같이 단시간(Short-time)

시험과 단계(Step-by-step) 시험을 실시하였으며, 단시간 시험은 단계상승 시험을 실시하기 위한 예비 시험으로 실시하였다.

표 2. 파괴시험 종류별 시험기준
Table 2. The standard of breakdown test

시험종류	시험전압	비고
단시간 시험	시료의 파괴시까지 0.5[kV/s] 속도로 연속인가 (파괴 평균시간 : 10~20[s])	- 단계상승시험을 위한 예비시험 - ASTM D149-97a
단계상승 시험	V _s 전압부터 시작, 1[kV]씩 단계적으로 전압을 상승하면서 60초간 지속 후 시료 파괴시 까지 상승	V _s = 0.5×V _{bd} [kV] 여기서, V _{bd} [kV]는 단시간 시험에 의해서 결정

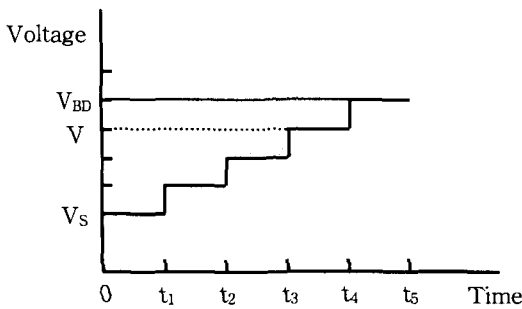


그림 1. 단계상승 시험방법
Fig. 1. The test method of graduation

- 주1) V_{BD} : 파괴전압, V_{WS} : 절연내력전압, V_s : 초기전압(시작전압)
- 주2) (t₀ - t₁) = (t₁ - t₂) = ... = (60 ± 5)s
- 주3) 120s ≤ t_{bd} ≤ 720s, for 60s steps.

본 시험에서는 파괴전압 인가를 위한 60[kV] 교류 내전압 시험기와 데이터 취득 위한 고전압 프로브(Probe)를 이용하여 측정회로를 구성하였다. 또한 고전압 인가시 인접한 시료의 전압 유도에 의한 플래쉬오브 등으로 인한 시험 중에 미치는 영향을 최소화하기 위하여 시험 대상 외의 모든 시료는 접지

를 실시하였다.

단시간 시험은 샘플로 선정된 시료가 파괴될 때까지 0.5[kV/s] 속도로 시험전압을 연속인가 하여 파괴 전압(V_{bd})을 결정하였으며, 단계 시험의 초기 시험전압(V_s)으로 이용하였다. 단계상승 시험은 그림 1에서 보는바와 같이 단시간 시험에 의해 결정된 파괴 전압(V_{bd})의 0.5배를 시험 시작전압(V_s)으로 하였으며, 1[kV] 단계로 상승하여 각 단계에서 유지 시간을 1분으로 하였다. 확실한 파괴의 여부 및 파괴 위치를 확인하기 위하여 1차 파괴 후 2회 정도 재 전압 인가 하였다.

2.2 비파괴시험(절연특성시험) 결과

2.2.1 절연저항시험

본 시험은 교류시험 전압인가에 필요한 충분한 절연 저항을 갖고 있는지를 확인하기 위하여 실시하였다. 시험 대상의 시료를 제외한 시료는 시험시의 영향을 최소화하기 위하여 모두 접지를 실시하였으며, AVO사의 '5000[V] 5[TΩ], PI Tester (Model.BM-25)' 장비를 이용해서 1[kV]를 인가하여 1분 후의 절연저항을 측정하였으며, 각 측정치는 온도보정계수(0.5^{(40-T)/10})를 이용하여 기준온도 40[°C]로 환산하였다[4]. 시험결과 표 3과 같이 모두 양호한 상태로 나타났다.

표 3. 절연저항시험 결과
Table 3. The result of insulation-resistance test

구분	40[°C]환산결과 ([MΩ])	측정치(1분값) ([MΩ])	환산 계수	측정조건		
				온도 ([°C])	습도 ([%])	
시료A	R-1	41 250	330 000	0.125	10	38
	S-1	45 925	367 400	0.125	10	38
	T-1	44 100	352 800	0.125	10	38
시료B	R-1	60 163	481 300	0.125	10	38
	S-1	66 988	535 900	0.125	10	38
	T-1	63 688	509 500	0.125	10	38

2.2.2 직류전류시험

절연물에 직류전압을 인가했을 때의 전류-시간 특성으로부터 절연물의 흡습, 도전성 불순물의 혼입 혹은 생성, 오손, 절연물의 결합 등 절연체의 상태를 파악하기 위하여 실시하였다. AVO사의 「5000[V], 5[TΩ], PI Tester(Model.BM-25)」 장비를 이용해서 1[kV]를 인가하여 1분 및 10분의 직류전류 값을 측정하였으며, 시험결과 표 4와 같이 모두 기준값 2.0을 초과하여 양호하게 나타났다.

표 4. 직류전류시험 결과
Table 4. The result of direct-current test

구분	측정전류(nA) 1분값	측정전류(nA) 10분값	PI	측정조건	
				온도 ([°C])	습도 ([%])
시료A	R-1	3.065	5.24	5.85	10 38
	S-1	2.752	0.439	6.27	10 38
	T-1	2.867	0.479	5.99	10 38
시료B	R-1	2.1	0.373	5.63	10 38
	S-1	1.887	0.374	5.05	10 38
	T-1	1.985	0.387	5.13	10 38

2.2.3 교류전류시험

교류전류시험은 교류전압을 인가하였을 때에 흐르는 전류와 전압의 관계, 즉 I-V 특성으로부터 절연상태를 조사하기 위한 시험을 실시하였다. 본 시험에서는 Heafely Trench사 「쉐링 브릿지(Type 2818/5283)」를 조합하여 시료의 단자와 대지간에 1[kV]부터 0.5[kV] 단위로 교류전압을 인가하여 접지를 통해 흐르는 교류전류를 측정하여 전압에 대한 전류의 선형성 및 경향을 분석하였다. 시험결과 시료 A(그림 2)의 경우, 3.3[kV]까지의 시험에서 전압에 따른 전류의 선형성을 유지하였으나, 흡습시료(R-6)에서 전압에 따른 전류의 상승 비율이 건조시료의 경우 보다 훨씬 크게 나타났다. 시료B(그림 3)의 경우, 전압 3.3[kV]까지는 선형성을 나타내고 있으며, 약 4[kV]정도에서 전류의 급증점이 나타나고 이후 어느 정도의 선형성을 가지면서 전류의 증가 비율이 약간씩 커짐을 알 수 있다. 흡습시료 T-5, R-6의 경우 시험전압 각각 6[kV]부터 불규칙적인

경향을 보이고 있으며, 8.5[kV] 및 7.5[kV]에서 전류 증가율이 상당히 크게 나타나다가 각각 전압 10[kV] 및 9[kV]에서 절연이 파괴되는 현상이 발생하였다. 또한 상시 고압 노출부 시료(R-1, S-1, T-1)와 전압이 거의 인가되지 않는 중성점측 시료(R-6, S-6, T-6)의 교류전류 시험결과에서는 큰 변화를 나타내지 않았다. 이는 운전중 3.3[kV] 전압에 의한 열화가 거의 발생하지 않은 것으로 판단된다.

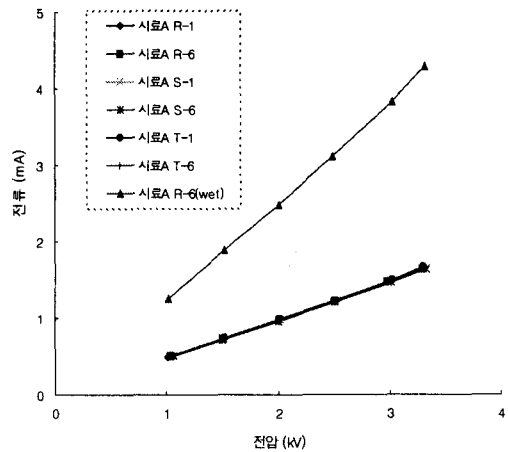


그림 2. 시료 A의 교류전류시험결과
Fig. 2. The AC test result of sample A

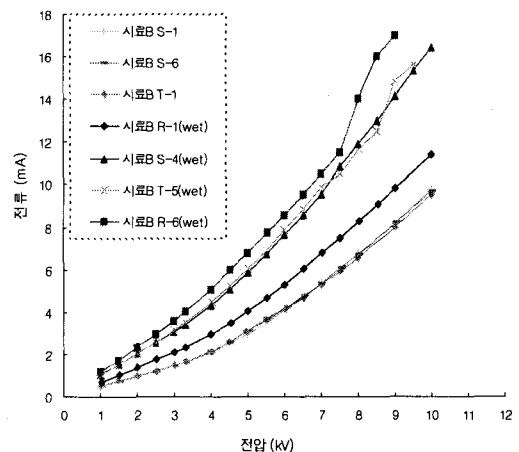


그림 3. 시료 B의 교류전류시험결과
Fig. 3. The AC test result of sample B

2.2.4 유전정점시험

유전체 절연물에 교류전계를 가할 때는 발생하는 누설전류, 유전분극, 부분방전 등에 의한 유전손을 측정하여, 이로부터 흡습, 오손, 미소공극 유무 등의 절연상태 및 열화정도를 추정하는 시험을 실시하였다. 본 시험에서는 Heafely Trench사 「쉐링 브릿지 (Type2818/5283)」를 조합하여, 시료의 단자와 대지 간에 1[kV] 부터 0.5[kV] 단위로 정격전압까지 교류전압을 인가하여 접지를 통해 흐르는 손실량을 측정하였다. 시험결과 유전정점 초기값($\tan\delta_{at 1[kV]}$) 및 유전정점 증가율($\Delta\tan\delta = \tan\delta_{at 3.3[kV]} - \tan\delta_{at 1[kV]}$)은 표 4.3에서 보는바와 같이 흡습시료의 경우 유전정점 초기값이 건조시료에 비해 상당히 높게 나타났으며, 유전정점 증가율도 다소 높은 것으로 나타났다. 시험전압 상승에 따른 변화에서는 시험전압 약 3[kV] 부근에서 유전정점 손실량이 상당히 가파르게 증가하는 특성을 보이고 있으며, 시험전압 약 5[kV]를 넘어서면서 서서히 포화되는 특성을 나타내고 있다. 또한 시료B(T-5, R-6)는 각각 전압 8.5[kV]에서 급격한 손실량 증가 및 불규칙적인 증가 추세를 나타낸 후 포화특성을 보이다가 전압 10[kV] 및 9[kV]에서 절연이 파괴되었다.

표 5 유전정점시험 결과
Table 5. The dielectric test result

항목 호기	$\tan\delta_0$ ([%]) at 1[kV]	$\Delta\tan\delta$ ([%]) at 3.3[kV]	측정조건		비고	
			온도 ([°C])	습도 ([%])		
시료A	R-1	0.74	2.64	11	43	건조
	R-6	0.71	2.42	"	"	"
	S-1	0.73	2.99	"	"	"
	S-6	0.74	2.79	"	"	"
	T-1	0.70	2.59	"	"	"
	T-6	0.78	1.87	"	"	"
시료B	R-6	8.87	3.63	"	"	흡습
	S-1	2.87	1.46	"	"	건조
	S-6	1.12	1.93	"	"	"
	T-1	1.08	2.20	"	"	"
	R-1	9.77	2.03	11	42	흡습
	S-4	11.9	2.40	"	"	"
	T-5	7.90	3.50	"	"	"
R-6	18.4	-0.60	"	"	"	

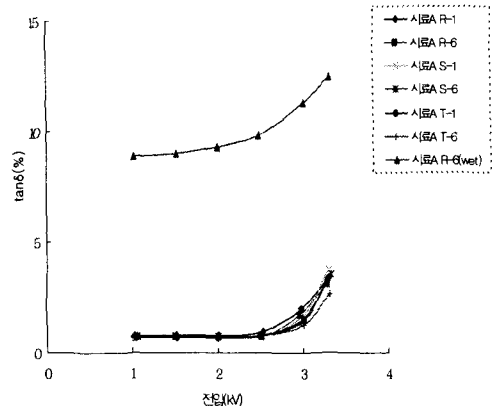


그림 4. 시료 A의 유전정점시험결과
Fig. 4. The dielectric test result of sample A

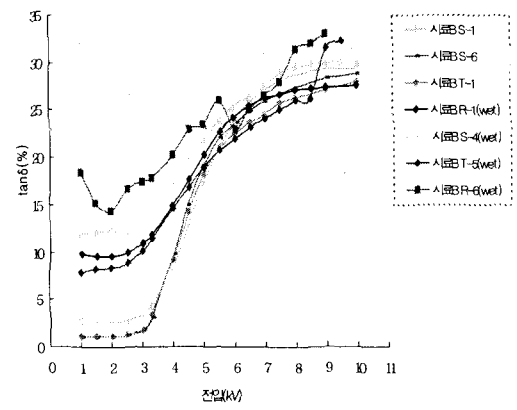


그림 5. 시료 B의 유전정점시험결과
Fig. 5. The dielectric test result of sample B

2.2.5 부분방전시험

절연물 내부의 국부적인 열화를 검출하기 위한 시험으로 부분방전 측정회로를 구성하여 실시하였다. 본 시험에서는 Haefely Trench사의 「PD Detector TE 571」 및 커플링 캐패시터(10nF)를 조합하여, 시료 단자와 대지간에 교류전압 E_0 (1.9[kV]) 및 E (3.3[kV])를 인가하여 최대 부분방전량을 측정하고, 부분방전 개시전압과 전압 하강시 부분방전 소멸전압, 그리고 전압인가 시간에 따른 부분방전 형태를 관찰하였다. 시험결과 표 6에서와 같은 결과를 얻었다.

절연파괴시험법을 이용한 3.3[kV] 유도전동기의 절연물 열화특성 분석

표 6. 부분방전시험 결과

Table 6. The result of partial discharge test

호기	항목	Back Noise (pC)	최대부분방전량 (pC) at		개시전압 ((kV))	소멸전압 ((kV))	비고
			1.9[kV]	3.3[kV]			
			시료A	R-1			
R-6	150	146		27 300	2.2	2.0	"
S-1	80	86.3		17 100	2.7	2.2	"
S-6	173	173		17 800	2.6	2.1	"
T-1	150	141		12 500	2.7	1.9	"
T-6	150	138		12 200	2.7	2.2	"
R-6	150	2400		40 000	1.8	1.9	흡습
시료B	S-1	130	123	21 000	2.5	2.2	건조
	S-6	120	141	27 300	2.5	2.0	"
	T-1	160	378	14 000	2.8	2.2	"
	R-6	140	2400	19 000	1.7	1.8	흡습
	S-4	150	2700	14 900	1.9	2.0	흡습

※ 온·습도는 $\Delta tan\delta$ 측정조건과 동일함. 부분방전 개시전압 : 1000 pC기준

2.3 파괴시험 결과

본 시험은 10년간 장기 사용된 3.3[kV]급 전동기 고정자 권선의 실제 보유 절연내력 평가 및 DC 파괴전압과 교류 파괴전압과의 상관관계를 조사하기 위하여 실시하였다. AC 60[kV]급 내전압시험기를 이용하여 각 시료별 단자와 대지간에 교류전압을 절연 파괴전압의 약 50[%]에서 시작하여 1[kV]씩 60초간 유지 후 단계적으로 상승시키는 시험 방법으로 실시하여 절연이 파괴되는 전압을 측정하고 절연파괴의 위치를 관찰하였다. 시험결과 표 7에서와 같이 모두 권선의 단말부위에서 파괴가 발생하였고, 파괴전압은 건조시료의 경우 AC는 약 18[kV]에서, DC는 AC의 약 2배정도인 42~44[kV]에서 파괴되었다. 또한 흡습시료의 경우 흡습의 정도에 따라 8~14[kV] 정도에서 절연 파괴가 발생하였다. 전동기의 사용정격 전압이 3.3[kV]임을 감안할 때 시료의 전동기 권선의 상태는 장기사용에도 불구하고 상당히 양호한 절연내력을 보유함을 알 수 있다.

표 7. 파괴시험 결과

Table 7. The result of break down test

시료구분		파괴전압 ((kV))	실파괴전압 ((kV))	파괴위치	비고		
Dry	시료A	S-1	18	19.0	권선단부		
		S-6	18	19.0	"		
		T-1	18	19.0	"		
	시료B	S-1	18	18.9	"		
		S-6	17	17.8	"		
		T-1	17	18.0	"		
		S-2	42	-	"	DC 시험	
		T-2	44	-	"	DC 시험	
		T-3	42	-	"	DC 시험	
	Wet	시료A	R-1	14	15.1	"	
			R-6	13	14.3	"	
			T-6	12	13.1	"	
시료B		R-1	14	15.0	"		
		R-6	8	9.2	"		
		T-5	9	10.0	"		
T-6	12	13.2	"				

2.4 시험결과 고찰

이상과 같이 10년간 운전된 전동기의 각 시료에 대한 비파괴시험(절연특성시험) 및 파괴시험결과에 대하여 종합적으로 분석해보면 다음과 같다.

2.4.1 비파괴시험(절연특성시험)에 의한 고찰

1) 전동기권선의 전압분포별 열화특성 고찰
전동기 권선의 전압분포에 따른 열화 정도가 전압에 따라 얼마나 다르게 나타나는지의 특성을 조사하기 위하여 운전시 대지간 전압이 가장 높은 전동기 단자측 시료(R-1, S-1, T-1)와 전압이 거의 걸리지 않는 중성점측 시료(R-6, S-6, T-6)로 분리하여 절연특성 시험을 실시한 결과 시료별 특성에 큰 차이가 발견되지 않았다. 결국 정격전압 3.3[kV]급 전동

기에서 전압만에 의한 절연체에 미치는 열화정도는 그다지 크지 않은 것으로 사료된다.

2) 흡습시료와 건조시료의 절연특성 고찰

건조시료와 흡습시료의 절연특성을 비교하기 위하여 일부 시료에 대하여 12시간 정도 흡습을 실시하고 이에 대한 특성을 조사·분석한 결과, 유전정점($\Delta \tan\delta$)시험에서는 그림 6에서 보는바와 같이 건조시료의 경우 모두 3.5[%] 이내의 양호한 상태를 나타내었으나, 흡습시료의 경우 유전정점 초기값이 건조시료에 비해 상당히 높게 나타났다. 이는 물의 비유전율이 크고 또한 물 분자가 큰 쌍극자 모멘트를 가짐에 따른 전기적 성질의 변화에 기인한 것으로 사료된다.

교류전류시험에서는 그림 4 및 그림 5에서 보는바와 같이 흡습시료의 경우 흡습의 정도에 따라 교류전류 값 및 기울기가 다른 분포를 보이는 것으로 나타났으며, 건조시료에 비해 상당히 큰 값을 나타내고 있다. 이는 절연체의 흡습에 따른 누설전류 및 유전손실량의 증가에 따른 영향으로 판단된다.

또한 부분방전 시험에서는 각 시료별로 다소간의 차이는 있으나 대부분 절연층 내에 기준치를 초과하는 다량의 미세 공극이 함유되어 있는 것으로 조사되었다. 그러나 제작 초기의 데이터가 없어 절연 열화의 진행에 의한 공극의 생성 또는 제작시 함유된 것인지에 대해서는 알 수 없었다. 다만 부분방전 개시 특성에서 흡습 시료의 경우 건조시료에 비하여 상당히 낮은 전압에서 부분방전이 개시하는 특성을 보이는 것으로 나타났다.

3) 절연 파괴시 교류전류 및 유전정점 특성 고찰

그림 6 및 그림 7은 흡습상태의 시료B(T-5, R-6)에 대하여 유전정점 및 교류전류 시험 중 각 시험전압 10[kV] 및 9[kV]에서 절연 파괴가 발생한 내용을 보여주고 있다. 이에 대한 절연특성 시험결과를 분석해보면 3[kV] 부근에서 교류전류의 1차 급증점이 발생하였고, 7.5[kV] 및 8.5[kV] 부근에서 2차 교류전류가 상당히 가파르게 급증하는 점이 발생하는 것으로 나타났다. 유전정점 손실량은 시료B T-5의 경우 교류전류 변화량과 유사한 경향을 보이고 있으며,

시료B R-6의 경우 전압상승에 따라 초기값에 비해 감소하는 등 매우 불규칙적인 특성을 보여주고 있다. 결국 제2차 교류전류의 급증점과 유전정점 손실량의 불규칙적인 증가 및 급증점의 존재는 절연 파괴전압과 상당히 밀접한 상관관계가 있음을 확인하였다.

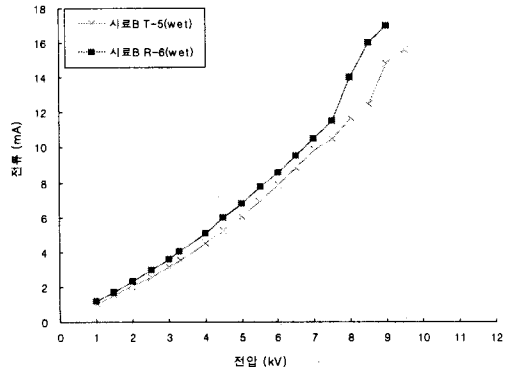


그림 6. 파괴시 교류전류 특성
Fig. 6. The AC characteristic on the breakdown

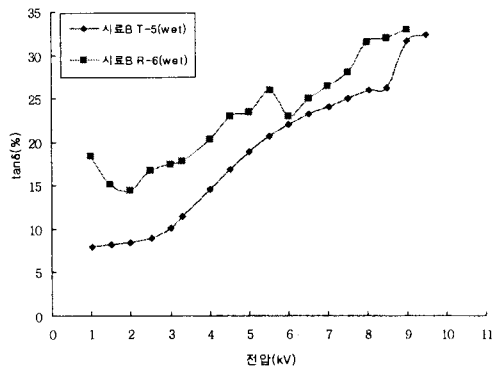


그림 7. 파괴시 유전정점 특성
Fig. 7. The dielectric characteristic on the breakdown

2.4.2 파괴 시험 특성에 의한 고찰

1) 건조 및 흡습 상태 시료의 파괴 특성

그림 8은 각 시료별 파괴전압의 분포 특성을 보여주고 있다. 건조시료의 교류 파괴전압은 17~19[kV]로 운전중 필요한 보유 절연내력((2E+1)[kV], 2×3.3+1 = 7.6[kV])보다 2.2~2.5배, 정격전압(3.3[kV])의

절연파괴시험법을 이용한 3.3[kV] 유도전동기의 절연물 열화특성 분석

5~6배 정도의 절연내력을 갖고 있는 것으로 나타났다. 이는 일반적으로 전동기 권선의 설계시 절연내력을 정격전압의 4~5배임을 감안하면 대상 시료는 절연열화가 거의 없는 양호한 특성을 보유하고 있는 것으로 판단된다. 또한 흡습 시료의 경우 시료마다의 흡습의 정도에 따라 다소 차이를 보였으며, 정상 상태의 건조된 시료보다는 5~9[kV] 낮은 8~14[kV] 전압에서 절연파괴가 발생하였다. 결국 고체 절연체에 있어서 수분의 침투가 절연물의 열화 및 절연강도 저하에 큰 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

2) 전동기 권선의 부위별 열화 특성

비파괴시험에서와 마찬가지로 장기간 운전에 따른 고압측 권선 시료와 중성점측 권선 시료의 열화 특성을 조사하기 위하여 교류 전압에 의한 파괴특성을 조사해보았으나 큰 차이가 없는 것으로 나타났으며, 시료의 절연 파괴 위치는 그림 9 및 그림 10에서 보는바와 같이 모든 시료 권선의 단말 부분에서 발생하는 것으로 나타났다. 이는 시험전압이 상승함에 따라 슬롯 인출구 부분에서 전계의 불균질에 의한 전계집중 현상에 의하여 발생하는 것으로 사료된다.

3) 직류 파괴전압과 교류 파괴전압과의 상관관계 평가

교류 파괴전압과 직류 파괴전압과의 상관관계를 평가하기 위하여 일부 시료에 대하여 직류 파괴전압을 인가한 결과 표 7 및 그림 8에서와 같은 결과를 얻을 수 있었으며, 직류 파괴전압은 교류 파괴전압의 2배 정도로 나타났다. 국제 규격(IEEE Std 95-1977)에서는 운전중 유지보수를 위한 시험에서 직류의 경우 교류시험전압의 1.7배를 추천하고 있다 [6]. 이번 파괴시험의 결과에서도 이 규정의 내용과 거의 일치하는 결과를 얻었으며, 향후 DC 이용한 절연내력 시험시 시험전압을 결정하는데 유용하게 이용할 수 있을 것으로 사료된다.

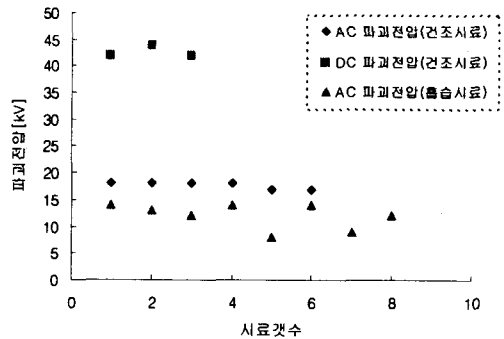


그림 8. 파괴전압 분포특성

Fig. 8. The distribution of breakdown voltage

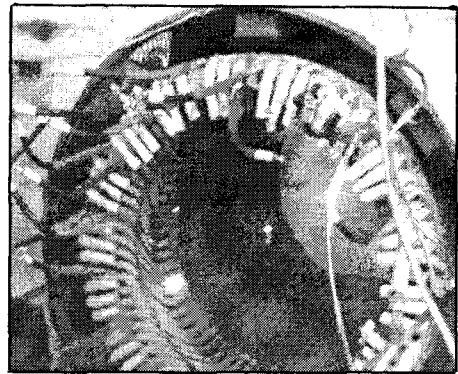


그림 9. 절연 파괴특성(1)

Fig. 9. The insulation breakdown(1)

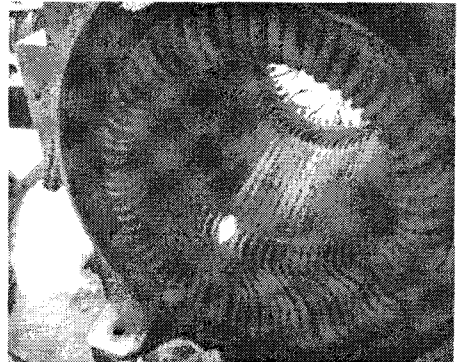


그림 10. 절연 파괴특성(2)

Fig. 10. The insulation breakdown(2)

3. 결 론

수자원공사에서 10년 동안 장기 운용된 3.3[kV]급 농형 유도 전동기의 고정자 권선을 시료로 활용한 본 논문의 절연특성시험연구에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 10년간 운전된 전동기 대하여 파괴 및 비파괴시험을 통한 절연 상태를 조사한 결과, 초기제품의 특성이 양호할 경우 기동정지 빈도가 평균 일 4회 이고 운전시간이 30,000시간 정도인 유도전동기의 절연상태는 운전중 필요한 보유 절연내력(2E+1)[kV]보다 2.2~2.5배 정도의 양호한 절연내력을 보유하고 있는 것으로 나타났다.

둘째, 전동기 권선의 열화 정도가 운전중 전압의 분포에 따라 나타나는 특성 조사 결과, 운전중 상시 대지간 전압이 가장 높은 단자측과 전압이 가장 낮은 중성점측 시료에 대한 시험결과 큰 차이를 나타내지 않았다. 결국 3.3[kV]급 전동기에서는 전압만에 의한 열화정도는 크지 않음을 알 수 있었다.

셋째, 환경적인 영향인 흡습에 대한 고찰에서 흡습의 경우 유전정점 초기값 및 전압에 따른 변화량의 차이가 상당히 크게 발생함을 알 수 있었고, 부분방전 개시 특성이 건조시료에 비하여 상당히 낮은 특성을 보이는 것으로 나타났다.

넷째, 또한 시료의 절연 파괴시 교류전류, 유전정점 특성 분석 결과, 제2차 교류전류 및 유전정점의 급증 값의 존재는 파괴전압과 상당한 상관관계가 있으므로 절연체의 수명을 판단하는 인자로 충분히 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] 한국수자원공사, "99 대형모터 절연파괴시험 결과보고서", pp.11-15, 1999.
- [2] Y. Ikeda and H. Fukagawa "A Method for Diagnosing the Insulation Deterioration in Mica-Resin Insulated Stator Windings of Generator", 전력중앙연구소보고, W88046, pp.45-56, 1989. 6.
- [3] IEC 6034-1, "Rotating electrical machines", Seventh edition, pp107-112, 1969.
- [4] IEEE Std 43-2000, "IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery", pp.17-19, 2000.3.
- [5] ASTM D 149-97a, "Standard Test Method for Dielectric

Breakdown Voltage and Dielectric Strength of Solid Electrical Insulating Materials at Commercial Power Frequencies", pp.89-91, 2004.

- [6] IEEE Std 95-1977, "IEEE Recommended Practice for Insulating Test of Large AC Rotating Machinery with High Direct Voltage", pp.13-17, 1977.

◇ 저자소개 ◇

김현일 (金鉉壹)

1968년 9월 27일생. 1992년 영남대 전기공학과 졸업. 2006년 한밭대 산업대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년~현재 한국수자원공사 근무.

Tel : (042)870-7670

E-mail : khi@kwater.or.kr

김윤현 (金倫賢)

1964년 3월 13일 생. 1987년 한양대 전기공학과 졸업. 1989년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989~1999년 LG산전연구소 책임연구원. 2002년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2003년~현재 한밭대학교 전기공학과 조교수.

Tel : (042)821-1099

E-mail : yhyunk@hanbat.ac.kr

손영규 (孫榮奎)

1964년 11월11일생. 1987년 한양대 전기 공학과 졸업. 1989년 한양대 대학원 전기 공학과 졸업(석사). 1989~1995년 금성부품. 1995~1999년 삼성전기. 1999년~현재 LG Innotek 책임연구원. 2004년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : (02)2220-0349

E-mail : ykson@lginnotek.com

이 주 (李 柱)

1963년 8월 30일생. 1986년 한양대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988~1993년 국방과학연구소 연구원. 1997년 일본 큐슈대학교 System 정보과학연구과 졸업(박사). 1997년 한국철도기술연구원 선임연구원. 1997년~현재 한양대 전기제어생체공학부 부교수.

Tel : (02)2220-0349

E-mail : jungds61@hanyang.ac.kr