

절연파괴시험을 통한 3.3kV 유도전동기의 절연특성 연구

이동근*, 이광호, 최교남, 김현일, 광희진, 오봉근
한국수자원공사

A study on insulation characteristics with AC Breakdown Test for Stator Winding of 3.3kV class Induction Motor

Dong Geun Lee*, Kwang-Ho Lee, Kyo-Nam Choi, Hyun-Il Kim, Hee-Jin Kwak, Bong-Keun Oh
Korea Water Resources Corporation

Abstract - This test was performed to assess the corelation of insulation deterioration condition with breakdown voltage of the stator winding of 3.3kV class induction motors which have been in service for 10 years after being installed in 1993. The insulation diagnostic tests include resistance, polarization index(P.I), dissipation factor($\Delta \tan\delta$), maximum partial discharges (Qmax) and AC breakdown test. we evaluated the corelation of insulation diagnostic test with AC breakdown test for stator winding of high voltage induction motor.

1. 서 론

산업 현장에서 사용되고 있는 각종 3상 유도전동기는 운용중 전기적, 열적, 기계적, 환경적 stress에 상시 노출되어있다. 따라서 이러한 stress가 단독 또는 복합적으로 고장자 권선에 작용하여 절연열화를 가속시키고 절연강도를 저하시켜 결국 전동기의 절연파괴를 야기하게 된다.^[1] 따라서 일정주기로 절연진단을 실시하여 절연상태평가 및 변화추이를 관리하며, 그 결과에 따라 전동기의 분해점검(Overhaul), 절연세척(Cleaning), 절연보강(Impregnation), 재권선(Rewinding)등의 상태기준유지보수 (Condition Based Maintenance)를 실시함으로써 적정유지보수에 의한 설비수명연장 그리고 설비상태진단.평가에 의한 설비운용의 신뢰성확보로 예기치 않은 사고에 따른 경제적 손실을 최소화하는 것이 설비운영 및 경제적 측면에서 중요한 과제이다.^[2] 따라서 광역상수도 펌프구동용 고압전동기에 대하여 Off-Line 절연특성시험에 의한 절연특성값과 절연파괴시험에 의한 절연파괴강도의 상관관계를 비교분석.평가하였다.

2. 고압전동기 절연상태평가

2.1 절연특성의 수명기준

전력설비가 그 수명을 끝짐에 도달했는가 또는 정상적인 운전상태에서 절연파괴현상이 일어날 가능성이 높지 않은가를 판정하는 기준은 시험대상이 가지고 있는 교류내전압특성, 즉 교류파괴전압특성이 열화현상으로 인하여 최종적으로 계통에서 필요로 하는 수준 이하로 저하되는 시점, 즉 교류내전압특성값이 전력계통에서 발생하는 전압값보다 적어져 정상적인 계통운전중에도 고장현상이 발생하는 시점에 도달했음을 표시하는 정량적인 특성값이다.

계통에서 사용되는 전력설비가 가져야 하는 내전압특성

은 정격전압의 2~3배로 상당히 높으며 피뢰기와 과전압계전기등 충분한 보호설비가 갖춰진 계통에서 국부적으로 발생할 가능성이 있는 전압값을 일본전력중앙연구소에서는 "2E+1[kV]"로 제시하고 있으며,^[3] 국제규격인 IEC216에서는 초기특성값 또는 설계값의 50%에 상당하는 내전압특성으로 정의하고 있다.^[4] 일반적으로 고체절연체를 사용하는 전력기기의 경우 초기 내전압이 정격전압의 4~5배가 되도록 설계되므로 두가지 기준치는 같은 의미라고 할 수 있다.

2.2 진단대상설비의 특성

진단대상은 아래 표1과 같이 10년간 현장에서 정상운영 중인설비로, 제작 사양 및 운전이력은 아래 표와 같다.

표1. 시험대상 전동기 사양

대 상	정 격			제작 년도	제작사
	용량	전압	전류		
전동기 (2대)	110kW (150HP)	3.3kV	25A	'93. 11.	H사

표2. 시험대상 전동기 운전이력

구분	호기	제2호기	제4호기
	가동시간	계	29,784:00
일평균		8:09	9:03
기동-정지 횟	계	11,680회	11,360회
	수 일평균	4회	4회
특기사항	운전중 권선 평균온도 : 78℃ ~ 90℃		

2.3 시료제작 및 시험방법

가. 시료제작

본 연구대상 전동기는 3상 6극의 단일 권선 구조로 전동기 각 상당 6개의 coil group으로 구성되어있다. 따라서 전동기 1대당 18개(Coil Group 6개×3상)의 시료 확보가 가능하였다. 각 coil group별 시료는 그림 1에서 보는바와 같이 각 coil group의 연결부를 확인하여 분리작업을 실시하였으며, 본 연구의 목적이 10년 동안 장기간 사용된 전동기의 절연특성을 고찰하는 것이므로 시료의 준비 작업시 권선 자체에 대한 별도의 절연보강은 실시하지 않았다.

각 시료의 단말은 파괴전압 인가시 시료단말과 철심간에 flash-over가 발생하지 않도록 충분히 길게 하였으며, 시료단말과 철심간의 누설전류에 의한 시험 값에 미치는

영향을 최소화하기 위하여 20kV이상의 인가 전압에도 충분히 견딜 수 있도록 절연을 실시하였다. 또한 시험시 시료가 아닌 인접한 코일에서 유도현상 등으로 인한 방전이 발생할 우려가 있으므로 시료가 아닌 코일도 모두 접지를 할 수 있도록 lead선을 마련하고 충분히 절연을 실시하였다. 그림 3은 각 시료의 단말부분을 처리한 모습이다.

시료 중 일부는 흡습 상태에서의 절연특성 및 파괴전압을 관찰하기 위하여 그림 2에서 보는바와 같이 물 분부를 충분히 실시하였으며, 약 12시간정도 흡습 상태를 유지한 후 시험을 실시하였다.

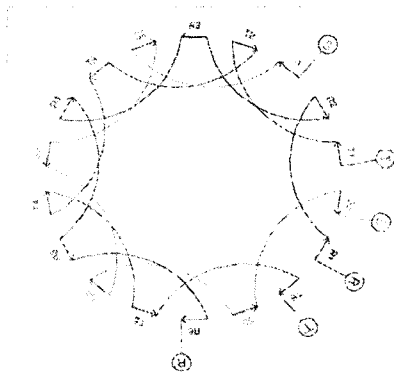


그림 1 Coil Group별 연결 상태

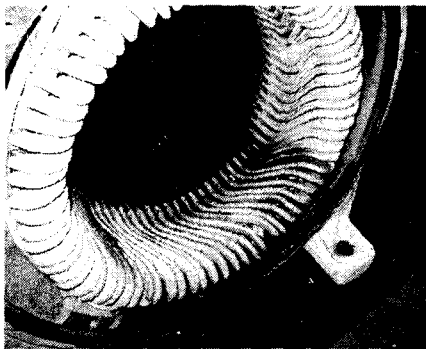


그림 2 시료의 흡습 상태

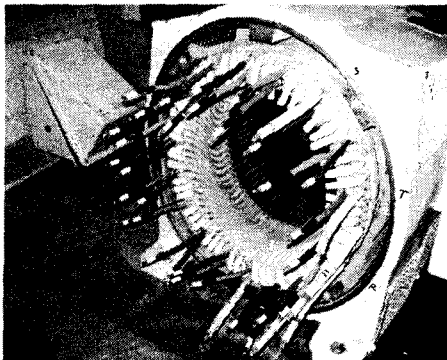


그림 3 시료의 단말처리 상태

나. 시험방법

준비된 각각의 시료에 대하여 먼저 표 3의 비파괴시험을 실시하고, 60kV급 교류내압기를 이용하여 시료별로 Step-by-step test를 실시하여 결과 데이터를 취득하였다.

1) 비파괴시험(절연특성시험)

시료의 비파괴 특성을 조사하기 위하여 직류 및 교류 전압을 인가하여 시험을 실시하였으며, 각 시험항목은 표 3과 같다.

표 3 시험종류별 시험기준

시험종류	시험기준 전압	시험관련근거
① 직류전류시험	1,000V	IEEE Std43
② 교류전류시험	3.3kV	IEEE Std56
③ 유전정접시험	3.3kV	IEEE Std286
④ 부분방전시험	3.3kV	IEC 270

2) 파괴시험

유요한 시험결과를 얻기 위하여 국제 시험규격인 ANSI/IEEE Std 434와 ASTM D149-97a를 준용하였다. 먼저 일부시료에 대하여 Short-time test를 실시하여 시험초기전압을 결정하였으며, 다음 일정전압까지 신속하게 승압한 후 일정전압 Step으로 단계적으로 상승하는 단계상승시험방법으로, 고정차권선 시료단자와 대지간에 교류내압기(60kV)를 이용하여 시험초기전압 7kV까지 신속하게 승압한 후 1kV 단위로 상승하고 1분간 유지하였으며, 절연파괴시 전압을 측정하였다.^[6]

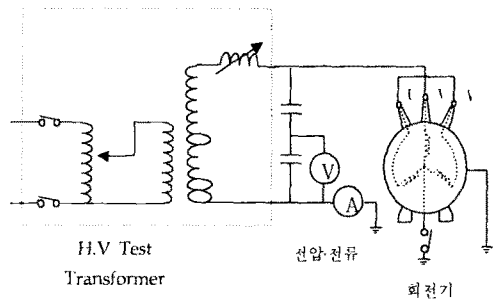


그림 4 시험 회로도

2.3 시험결과 및 분석

가. 비파괴시험(절연특성시험) 결과 및 분석

전동기 고정자 권선을 각 시료별로 도체와 대지간에 DC 및 AC전압을 인가하여 Digital Insulation Tester에 의한 절연저항 및 성극지수(P-I)시험, Schering Bridge에 의한 유전손실을 측정하는 유전정접(tanδ)시험 및 PD Detector와 커플링 캐패시터(10nF)를 이용한 부분방전시험(Q_{max})등의 정밀절연특성시험을 실시하였으며, 표4 및 5와 같은 결과를 얻었다.

표 4 제2호기 절연특성시험 결과

시험종류	특성치	측정조건	판정기준	제2호기						
				건조						흡습
				R-1	R-6	S-1	S-6	T-1	T-6	R-6
절연저항	R(MΩ)	40℃	>100	41,250	-	45,925	-	44,100	-	-
성극지수	PI	10분/1분	>2.0	5.85	-	6.27	-	5.99	-	-
교류전류	ΔI(%)	at 3.3 kV	<4.0	2.39	2.65	2.89	1.64	1.95	0	3.11
	P _n ¹⁾	>1.9kV		2.6	2.5	3.0	3.0	3.0	-	2.8
유전정접	tanδ ₀ (%)	at 1 kV	<10	0.74	0.71	0.73	0.74	0.70	0.78	8.87
	Δtanδ(%)	at 3.3 kV	<3.5	2.64	2.42	2.99	2.79	2.59	1.87	3.63
부분방전	Q _{max} (pC)	at 1.9 kV	-	143	146	86.3	173	141	138	2,400
		at 3.3 kV	<5,000	16,200	27,300	17,100	17,800	12,500	12,200	40,000
		방전개시전압(kV)		2.3	2.2	2.7	2.6	2.7	2.7	1.8
		방전소멸전압(kV)		1.9	2.0	2.2	2.1	1.9	2.2	1.9

표 5 제4호기 절연특성시험 결과

시험종류	특성치	측정조건	판정기준	제4호기						
				건조			흡습			
				S-1	S-6	T-1	R-6	S-4	T-5	
절연저항	R(MΩ)	40℃	>100	66,988	-	63,688	-	-	-	
성극지수	PI	10분/1분	>2.0	5.05	-	5.13	-	-	-	
교류전류	ΔI(%)	at 3.3 kV	<4.0	0	0	0	2.86	0	-	
	P _n ¹⁾	>1.9kV		4.3	3.8	3.8	2.5	3.9	3.9	
유전정접	tanδ ₀ (%)	at 1 kV	<10	2.87	1.12	1.08	18.4	11.9	7.9	
	Δtanδ(%)	at 3.3 kV	<3.5	1.46	1.93	2.20	-0.60	2.40	3.5	
부분방전	Q _{max} (pC)	at 1.9 kV	-	123	141	378	2,400	2,700	-	
		at 3.3 kV	<5,000	21,000	27,300	14,000	19,000	14,900	-	
		방전개시전압(kV)		2.5	2.5	2.8	1.7	1.9	-	
		방전소멸전압(kV)		2.2	2.0	2.2	1.8	2.0	-	

(1) 전동기의 각 권선 부위별 전압 열화 특성

10년간 운전한 전동기 권선의 각 부위별 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 시료별로 큰 차이를 나타내지 않았다. 3.3kV 전동기의 경우 상시 운전중 도체와 대지간 전압은 1.9kV이며, 이 전압이 권선의 주 절연물에 영향을 미치게 된다. 따라서 정격전압 3.3kV급 전동기에서 운전기간 10년 정도에서는 전압만에 의한 절연체에 미치는 열화 정도는 그

다지 크지 않음을 알 수 있었다.

(2) 건조시료와 흡습시료의 절연특성

건조시료와 흡습시료의 절연특성을 비교하기 위하여 일부 시료에 대하여 12시간 정도 흡습을 실시하고 이에 대한 특성을 조사하였다. 유전정접(tanδ)시험에서는 그림 5에서 보는바와 같이 건조시료의 경우 모두 기준치(3.5%) 이내의 양호한 상태를 나타내었으나, 흡습시료의 경우 유전정접 초기값이 건조시료에 비해 상당히 높게 나타나거나 기준치(10%)를 초과하여 나타났다. 또한 정전용량 값은 그림 4-164에서와 같이 흡습시 건조시료의 경우에 비해 상당히 크게 나타남을 알 수 있다. 이는 물의 비유전율이 크고 또한 물분자가 큰 쌍극자 모멘트를 가짐에 따른 전기적 성질의 변화로 유전손실 및 정전용량 측정 시험이 흡습의 영향에 대하여 잘 반응함을 알 수 있었다.

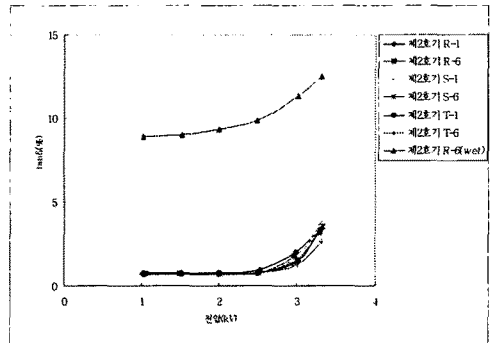


그림 5 시료별 유전정접 특성

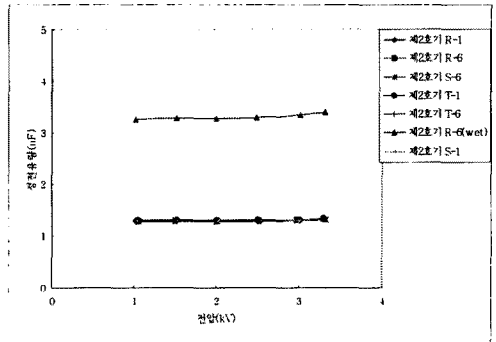


그림 6 시료별 정전용량 특성

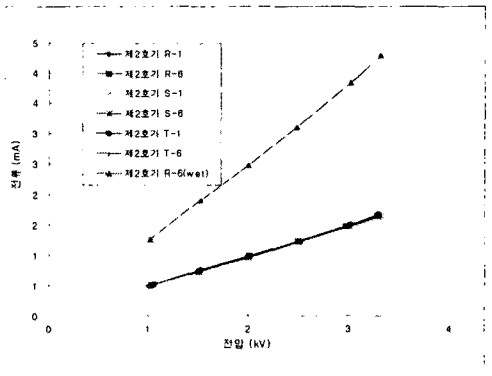


그림 7 제2호기 교류전류 특성

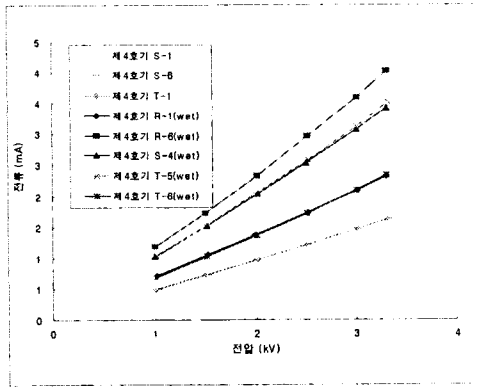


그림 8 제4호기 교류전류 특성

교류전류시험에서는 그림 7, 8에서 보는바와 같이 흡습 시료의 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 부분방전 개시 특성에서 흡습 시료의 경우 건조시료에 비하여 상당히 낮은 전압에서 부분방전이 개시하는 특성을 보이는 것으로 나타났다.

(3) 절연 파괴시 교류전류 및 유전정접 특성

제4호기 T-5번 시료(흡습상태)에 대하여 유전정접 및 교류전류 시험중 시험전압 10kV에서 절연 파괴가 발생하였으며, 이에 대한 절연특성 시험결과를 분석해보면 3kV 부근에서 교류전류의 1차 급증점이 발생하였고, 8.5kV 부근에서 2차 교류전류 및 유전손실량이 상당히 가파르게 급증하는 점이 발생하는 것으로 나타났다. 결국 제2차 교류전류의 급증점은 파괴전압과 상당히 상관관계가 있음을 확인하였다. 또한 시료에서 부분방전량이 인가 전압 2.6kV 이상에서 크게 증가하는 것을 확인할 수 있었고, 제1차 교류전류 및 유전손실 값의 급증과도 상당히 일치하는 것으로 보아 절연체내에 함유된 다량의 공극에 의한 부분방전손실과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있었다.

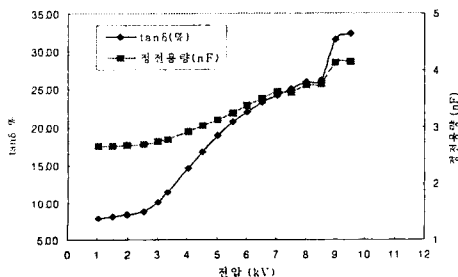


그림 9 절연파괴시 유전정접 특성

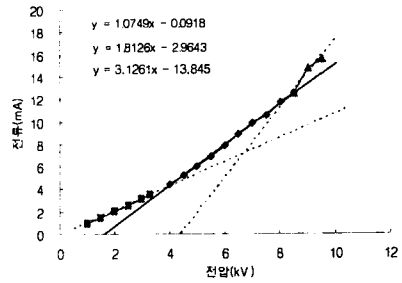


그림 10 절연파괴시 교류전류 특성

나. 교류파괴시험 결과 및 분석

10년간 운전된 전동기 권선의 실제 보유 절연내력을 파악하고 흡습시의 절연내력 특성 및 DC 파괴전압 인가시 교류 파괴전압과의 상관관계를 조사하기 위하여 실시하였으며, 표 6과 같은 결과를 얻었다.

표 6 파괴시험 결과

시료구분		파괴전압	파괴위치	비고
건조 상태	제2호기	S-1	18	END
		S-6	18	"
		T-1	18	"
	제4호기	S-1	18	"
		S-6	17	"
		T-1	17	"
흡습 상태	제2호기	R-1	14	"
		R-6	13	"
		T-6	12	"
	제4호기	R-1	14	"
		R-6	8	"
		S-4	14	"
	T-6	12	"	

(1) 건조 및 흡습 상태 시료의 파괴 특성

시료 대부분의 교류 파괴전압은 17~19kV 정도로 운전 중 필요한 보유 절연내력(2E+1kV, 2×3.3+1 = 7.6kV)보다 2.2~2.5배, 정격전압(3.3kV)의 5~6배 정도의 절연내력을 갖고 있는 것으로 나타났다. 이는 일반적으로 전동기 권선의 설계시 절연내력을 정격전압의 4~5배임을 감안 하면 대상 시료는 절연열화가 거의 없는 양호한 특성을 보유하고 있는 것으로 나타났다. 또한 흡습 시료의 경우 시료마다의 흡습의 정도에 따라 다소 차이를 보였으며, 정상상태의 건조된 시료보다는 4~5kV 낮은 12~14kV 전압에서 절연파괴가 발생하였다. 결국 고체절연체에 있어서 수분의 침투가 절연물의 열화 및 절연강도 저하에 큰 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

(2) 전동기 권선의 부위별 열화 특성

비파괴시험에서와 마찬가지로 장기간 운전에 따른 고압 축 권선 시료와 중성점축 권선 시료의 열화 특성을 조사하기 위하여 교류 전압에 의한 파괴특성을 조사해보았으나 큰 차이가 없는 것으로 나타났으며, 시료의 절연 파괴 위치는 모든 시료 권선의 단말 부분에서 발생하는 것으로 나타났다. 그림 4-167 및 4-168은 시료의 절연이 파괴되기 직전의 권선 단말 부분에서 절연물과 철심간에 Arc가 발생하는 장면이다. 결국 시험전압의 상승에 따라 고전계가 집중되는 권선 단말부분의 절연이 가장 취약함을 확인하였다.

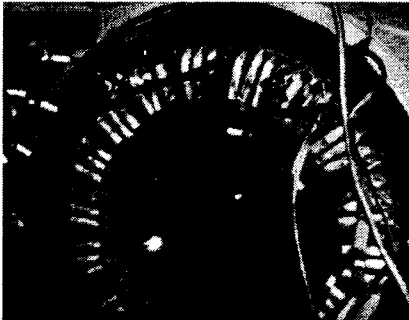


그림 11 절연의 파괴특성(1)



그림 12 절연의 파괴특성(2)

3. 결론

상기와 같이 10년 동안 장기 운용된 3.3kV급 농형 유도전동기의 고정자 권선을 시료로 활용하여 비파괴시험(절연진단시험)을 통한 운영중 열화(열적, 기계적, 전기적 열화) 정도 및 수명평가 방법과 절연파괴시험을 통하여 얻어진 절연파괴시점 등에 대한 절연물의 물리적 특성 조사를 통하여 비파괴시험과 절연파괴시험과의 상관관계 등을 파악하고자 실시한 시험에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 10년간 운전된 전동기 대하여 파괴 및 비파괴시험을 통한 절연 상태를 조사한 결과 전반적으로 양호한 특성을 보유하고 있는 것으로 나타났다. 특히 교류 시험전압을 이용한 파괴 시험결과, 정격전압(3.3kV)의 5~6배 정도의 절연내력을 갖고 있는 것으로 나타났다. 결국 3.3kV급 전동기에서는 전압만에 의한 절연체에 미치는 열화 정도는 그다지 크지 않음을 확인하였다. 또한 시료의 절연

파괴 위치는 모든 시료 권선의 단말 부분에서 발생하는 것으로 나타나 권선의 단말부분의 절연이 고전계 인가시 가장 취약함을 알 수 있다.

2) 건조시료와 흡습시료의 비파괴 및 파괴시험특성 조사 결과, 비파괴특성 시험에서 흡습시료의 경우 유전정접 초기값이 건조시료에 비해 상당히 높게 나타나거나 기준치(10%)를 초과하여 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이는 물의 비유전율이 크고 또한 물분자가 큰 쌍극자 모멘트를 가짐에 따른 전기적 성질의 변화로 유전정접시험이 흡습의 영향에 대하여 상당히 잘 반응함을 알 수 있었다. 또한 부분방전 시험에서는 부분방전 개시 특성에서 흡습 시료의 경우 건조시료에 비하여 상당히 낮은 전압에서 부분방전이 개시하는 특성을 보이는 것으로 나타났다.

3) 한편 파괴시험에서 시료 대부분의 교류 파괴전압은 17~19kV 정도로 운전중 필요한 보유 절연내력 $2E+1kV$ 보다 2.2~2.5배의 절연내력을 갖고 있는 것으로 나타났으며, 흡습 시료의 경우 시료마다의 흡습의 정도에 따라 다소 차이를 보이나 건조 시료보다 4~5kV 낮은 12~14kV 전압에서 절연파괴가 발생함을 알 수 있었다. 결국 고체절연체에 있어서 흡습이 절연물의 열화 및 절연파괴의 세기에 큰 영향을 미친다는 것이 확인되었다.

4) 절연 파괴시 교류전류, 유전정접 특성 분석 결과, 제2차 교류전류의 급증점에서 유전손실량이 상당히 가파르게 급증하는 점이 발생하는 것으로 나타나 제2차 교류전류의 급증점은 파괴전압과 상당한 상관관계가 있음을 확인하였다.

[참고문헌]

- [1] IEC 60505 "Evaluation and qualification of electrical insulation systems. 1999
- [2] IEEE Std 56-1977, "IEEE Guide for Insulation Maintenance of Large Alternating Current Rotating Machinery" p7~p23, 1997
- [3] IEC 34-1 "Rotating electrical machines" 1969
- [4] IEC 216 "Guide for the determination of thermal endurance properties of electrical insulating materials" 1990-06
- [5] T. Kanekawa, N. Morita and N. Sugimoto "Inspection and Diagnosis for Large Motors" FUJI 시보 VOL.46 NO.6 1991
- [6] 池田 "수차발전기 코일의 열화예지와 수명예측의 조사연구" 일본중양연구소보고, W95517 1996.4
- [7] IEEE Transaction on Electrical insulation Vol.EI-21 NO.6 1986.11 "Insulation Diagnosis for Rotation Machine Insulation"
- [8] ANSI/IEEE Std 434-1973(R1993) "대형고전압 기기의 절연시스템에 대한 실험적 평가과정"
- [9] "수력발전소 설계시공 표준 발전기권선 등의 개수" 판서전력주식회사, 1973