

고압유도전동기 절연특성시험의 신뢰도 평가

이광호, 김현일, 곽희진, 오봉근*
한국수자원공사

Evaluation of Insulation Diagnostic Test Reliability for Stator Winding of High Voltage Induction Motor

Kwang-Ho Lee, Hyun-Il Kim, Hee-Jin Kwak, Bong-Keun Oh
Korea Water Resources Corporation

Abstract - This test was performed to assess the correlation between insulation diagnostic tests and breakdown voltage strength of the stator winding of 6.6kV class induction motor in insulation deterioration condition which have been in service for 5 years after being installed in 1998.

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 correlation between insulation diagnostic test and 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 노출되어 있다. 따라서 이러한 stress가 단독 또는 복합적으로 고정자 권선에 작용하여 절연열화를 가중시키고 절연강도를 저하시켜 결국 전동기의 절연파괴를 야기하게 된다.^[1]

따라서 일정주기로 절연진단을 실시하여 절연상태평가 및 변화추이를 관리하며, 그 결과에 따라 전동기의 분해 점검(Overhaul), 절연세척(Cleaning), 절연보강(Impregnation), 재권선(Rewinding)등의 상태기준유지보수 (Condition Based Maintenance)를 실시함으로써 적정유지보수에 의한 설비 수명연장 그리고 설비상태진단·평가에 의한 설비운용의 신뢰성 확보로 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·평가하여 절연상태평가의 신뢰성 향상에 기여하고자 한다.

2. 고압전동기 절연상태평가

2.1 절연특성의 수명기준

전력설비가 수명한계에 도달했는가 또는 정상적인 운전상태에서 절연파괴현상이 일어날 가능성이 있는가를 추정하는 기준은 시험대상이 보유하고 있는 교류내전압강도, 즉 교류파괴전압특성이 열화현상으로 인하여 최종적으로 계통

에서 필요로 하는 수준 이하로 저하되는 시점으로 전력계통에서 발생하는 이상전압값보다 적어져 정상적인 계통운전중에도 고장현상이 발생하는 시점에 도달했음을 표시하는 정량적인 특성값이다.

계통에서 사용되는 전력설비가 가져야 하는 내전압특성은 정격전압의 2~3배로 상당히 높으며 피뢰기와 과전압계전기등 충분한 보호설비가 갖춰진 계통에서 국부적으로 발생할 가능성이 있는 전압값을 "2E+1[kV]"로 제시하고 있으며,^[3] 국제규격에서도 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 5년간 현장에서 정상운영중인 설비이며, 6.6kV급 933kW용량의 펌프구동용 고압전동기로서 현장에서 3회에 걸친 절연특성시험과 제작공장에서 1회 교류파괴시험을 실시하였다.

표1. 시험대상 전동기 사양

대상	정 격			제작 년도	제작사
	용량	전압	전류		
전동기	933 kW (1250HP)	6.6kV	98A	'98. 3.	국내

2.3 고압전동기 절연상태평가

(1) 절연열화 판정기준에 의한 절연상태평가

전동기 고정자 권선을 3상 일괄로 DC 및 AC전압을 인가하여 Digital Insulation Tester에 의한 절연저항 및 성극지수(P·I)시험, Schering Bridge에 의한 유전손실을 측정하는 유전정접($\tan \delta$)시험 및 PD Detector와 커플링 캐패시터(10nF)를 이용한 부분방전시험(Qmax)등의 정밀절연특성시험을 실시하였다.

절연특성시험결과 표2와 같이 DC시험인 절연저항, 성극지수값은 양호한 상태로 나타냈으나, 교류시험인 교류전류 증가율(ΔI [%]), 유전정접증가율($\Delta \tan \delta$ [%]) 및 최대 부분방전량(Qmax[pC])이 '98년 설치이후부터 3차래 모두 판정기준을 초과하는 상태로 나타나고 있다.^[5]

특히 교류전류시험결과 그림1과 같이 운전전압(3.8kV)에서 제1번극점이 발생하고 급격하게 전류가 증가하며, 유전정접시험결과 그림2와 같이 운전전압이하인 3.5kV에

서부터 유전손실이 급격하게 증가하여 판정기준을 초과하는 값을 나타내고 있다.^[5]

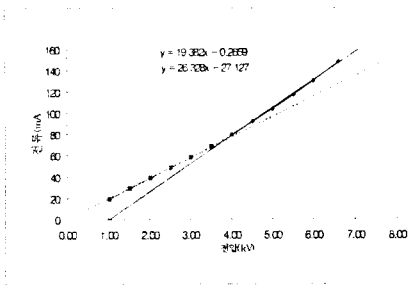


그림1. 교류전류시험결과

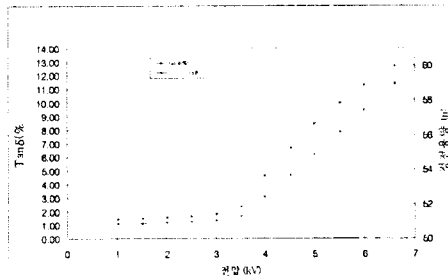


그림2. 유전정접시험결과

또한 부분방전개시전압(DIV)이 운전전압이하에서 발생하여 운전전압에서 10,000pC까지 발생하고 있다.

표2. 난도별 절연특성값

시험종류	특성치	측정조건	판정기준	'98.6	'99.6	'01.10
절연저항	$R_{insulation}$ [MΩ]	25kV, 40℃	≥100	16,037	3,859	8,682
직류전류	PI	10/1분	≥2.0	4.99	5.45	5.24
권선저항	권선편차(%)	U, V, W	±5%	-0.15	0.15	0.15
교류전류	P_{ij} [kW]	-	> E_0	0.939	4.28	3.87
	ΔI [%]	at 6.6kV	<8.5	17.83	14.54	14.87
유전정접	$\tan \delta$ [%]	at 2kV	<10	0.69	1.80	1.57
	$\Delta \tan \delta$ [%]	at 1.25E6kV (4.8kV)	<2.5	6.92	5.86	5.49
	$\Delta \tan \delta$ [%]	at 6.6kV	<6.5	12.61	10.40	11.13
부분방전	Q_{max} [pC]	at 3.8kV	-	7,000	13,000	10,000
		at 4.5kV	<10,000	-	-	17,000
		at 1.25E6kV	-	20,000	25,000	-
	DIV(kV)	-	2.25	1.92	2.4	
	DEV(kV)	-	2.20	1.90	2.79	

(2) 절연내력 추정에 의한 절연상태평가

절연내력정도를 추정하고 시험대상과 유사한 전동기(동급전압, 동일제작사)와 비교해 보기 위해 다음 식과 같이 추정절연내력을 계산하였다.^[6]

$$V_{BD}/E = 12.0 - 2.2 \log q_m - 280 (\tan \delta_0 / R_1 C_0)^{2.0}$$

$\tan \delta_0$: $\tan \delta$ at 2kV, q_m (pC) : Q_{max} at 4.5kV

R_1 (MΩ) : 절연저항 1분값(40℃환산)

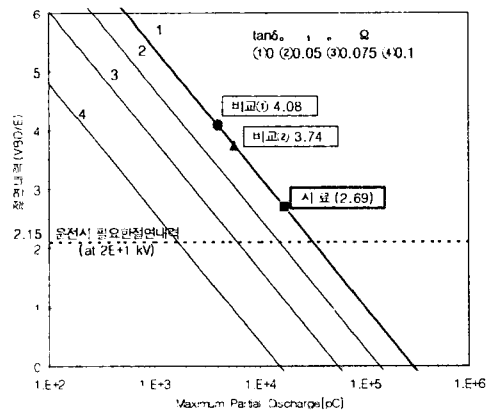
C_0 (μF) : 정전용량 at 2kV

정격전압에 대한 파괴전압 비율은 아래 표3과 같이 비교 대상에 비해 낮은 값인 2.69로 분석되었고,

또한 절연내력추정값을 그래프로 나타내면 그림3과 같이 비교대상에 비해 운전에 필요한 최소절연한계값(2E+1)에 근접함을 알 수 있다.

표3. 전동기 추정절연내력

구분	용량(HP) (제작일)	q_m [pC]	$\tan \delta_0$ [%]	R_1 [MΩ]	C_0 [μF]	V_{BD}/E
시료	1,250 (98.3)	17,000	1.57	8,682	0.051	2.69
비교 대상	1 2,010 (99.11)	4,000	0.52	7,618	0.165	4.08
	2 2,680 (92.11)	5,700	0.53	1,068	0.255	3.74



(3) 운전이력에 의한 절연상태평가

전동기 권선의 절연열화가 기동·정지 횟수(N) 및 운전 시간(Y)에 의해서 발생하는 기계적, 열적, 전기적 및 환경적 열화등이 복합적으로 작용하여 열화됨으로 이러한 NY-map^[7]으로 절연내력을 추정하면, 시험대상 고압전동기의 경우 준공('98)이후부터 2003년 12월까지 총 운전 시간(Y)과 기동·정지 횟수(N)는 다음 표4와 같다.

NY-map에서 적용되는 기동·정지 횟수는 등가 기동·정지 횟수이므로 운전 온도에 의한 보정이 필요하다. 예복시절 권선의 허용온도가 100℃이나 본 전동기의 평균 운전온도는 97℃이므로 등가 기동·정지 횟수는 다음과 같이 계산된다.

표4. 운전시간 및 기동·정지 횟수

구 분	운전시간(Y)	기동·정지 횟수(N)
전동기	21,566	1,214

$$\text{등가기동·정지횟수} = \text{기동·정지횟수} \times \frac{\text{평균운전온도}}{100(\text{°C})}$$

윗 식을 이용하여 전동기의 등가 기동·정지횟수를 구하면,

$$\text{등가기동정지횟수} \equiv 1,214 \times \frac{97(\text{°C})}{100(\text{°C})} = 1177.5\text{회}$$

전동기 운전시간을 운용년수(Year)로 환산하면,

$$\frac{21566.7}{24(h) \times 365(\text{일})} = 2.64(Y)$$

위의 기동·정지횟수(N)와 운용년수(Y)을 운전이력에 의한 잔여절연강도 계산식은 다음과 같다.

$$V_r [\%] = (1-aY)(1-bN) \times 100(\%)$$

Y : 운용년수, N : 등가 기동·정지횟수

여기서 실험적인 계수인 a, b를 구하면

$$a = 7 \times 10^{-3} : \text{운전시간 1년}(24\text{시간} \times 365\text{일}) \text{ 당 } 0.7\%$$

$$b = 8 \times 10^{-5} : \text{기동·정지횟수 } 1,000\text{회당 } 8\%$$

윗식에 각각 계수 a, b를 대입하여 잔여절연강도를 구한다.

$$(1 - 7 \times 10^{-3} \times 2.64)(1 - 8 \times 10^{-5} \times 1177.5) \times 100(\%) = 89.02(\%)$$

표5. NY-map에 의한 절연여유도

등가기동·정지 횟수(N)	운용년수 (Y)	잔여절연 내력Vr(%)	절연 여유도	비고
1177.5	2.46	89.02	49.02	운전한계기준 40%

NY-map법에 의한 잔여 절연강도는 표5와 같이 잔여절연내력은 89.02%로 분석되었으며 운전한계기준을 40%로 볼 때 49.02%의 절연여유도를 보유하고 있는 것으로 나타났다.

3. 고압전동기 교류파괴시험

3.1 시험방법

전동기 고정자권선을 그림4와 같이 3상일괄로 전동기 단자와 대지간에 300kVA(30kV, 10A) 교류내압기를 이용하여 일정전압까지 신속하게 승압한 후 일정전압 Step으로 단계적으로 상승하는 단계상승시험방법으로, 7kV까지 승압한 후에 2kV 단위로 상승하고 1분간 유지하였으며, 전압인가부와 접지선을 통하여 흐르는 누설전류를 측정하였다.^[8]

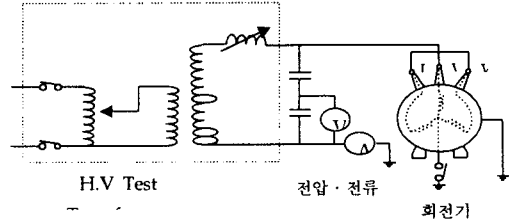


그림4. 시험 회로도

3.2 시험결과

시험전압을 단계적으로 상승시켜 표6과 같이 누설전류를 측정하였으며, 1차로 20kV에서 1분간 유지하는 과정에서 그림5와 같이 슬롯 중앙부에서 Flashover와 함께 Breakdown이 발생하였다.

권선절연과피 여부를 확인하기 위하여 2000V Megger를 이용하여 절연저항을 측정한 결과 양호한 상태(∞)로 확인됨에 따라 소정의 간격을 두고 다시 2차시험을 실시하였다. 2차 시험은 연속하여 전압을 상승시키는 중 19kV를 넘어서는 순간 전동기 권선과 슬롯에서 전체적으로 다량의 섬락이 발생하면서 Breakdown 되었다.

표6. 교류파괴시험결과

인가전압 [kV]	누설전류 [mA]	인가시간 [sec]	비고
7	150	60	
9	180	60	
11	230	60	
13	300	60	
16	440	60	
18	530	60	
19	(570)	상승중	2차BD전압
20	(600)	4	1차BD전압

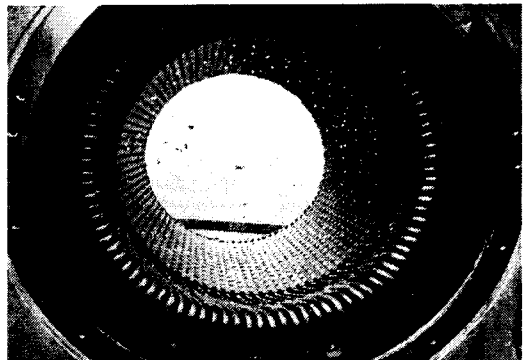


그림5. Flashover 발생광경

4. 시험결과 분석

4.1 절연파괴시험결과 분석

절연파괴시험결과 19~20kV에서 Breakdown이 발생하였고

이후 절연저항이 양호한 것으로 나타났으며, 이는 권선 절연의 완전한 파괴는 아니지만 Flashover에 의한 Break down으로 최대 20kV 이상의 절연내력을 보유하지 못하므로 실질적인 절연파괴전압으로 보는 것이 타당할 것으로 판단되며,
회전기 권선의 상용주파 내전압 시험전압은 6kV 이상급에서는 2E+1[kV]로 제시하고 있으며, 년차 절연저하율을 2%인 경우 필요절연내력을 30년간 유지하기 위한 초기내력치는¹⁹⁾

$$\begin{aligned} \text{초기내력치} &= \frac{1}{1-\delta \cdot n} (2E+1) \quad [kV] \\ &= \frac{1}{1-(0.02 \times 30)} (2E+1) \\ &= 2.5(2E+1) = 35[kV], = 5E+2 [kV] \end{aligned}$$

여기서 δ : 년차저하율(합성레진 : 2%/년)
n : 전동기 수명기간(30년)

위 식에서 5년 운전(잔존25년)한 상태임으로 잔존 파괴 전압추정치는 $= \frac{1}{1-(0.02 \times 25)} (2E+1) = 28[kV]$ 이나 시험 결과 최대 20kV에서 Breakdown이 발생하여 추정값보다 낮은 값에서 절연이 파괴됨을 알 수 있었다.

4.2 파괴시험과 절연상태평가결과 상관관계

(1) 파괴시험과 절연내력추정에 의한 절연상태평가
전동기 설치('98)이후 '99, '01 총3회에 걸쳐 절연특성시험을 실시하였으며, 그 결과 교류전류(ΔI [%]), 유전정접($\Delta \tan \delta$ [%]), 부분방전(Qmax[pC])시험 결과가 초기 추정값부터 판정기준을 상당히 초과하는 특성을 지니고 있었다. 절연특성시험결과를 근거로 하여 절연내력추정법에 의한 절연내력을 파괴시험결과와 비교·분석하면, 표7과 같이 각 시험결과가 거의 유사하게 나타나 파괴시험과 절연내력추정에 의한 절연상태평가는 밀접한 상관관계가 있음을 알 수 있다.

표7. 절연내력추정법과 파괴시험결과 비교

구 분	절연내력추정법		파괴시험 결과
	(V _{BD} /E)	추정전압[kV]	
'01	2.69	17.8	19~20kV

(2) 파괴시험과 운전이력에 의한 절연상태평가
전동기의 기동·정지 횟수(N) 및 운전시간(Y) 및 운전온도 인자로 평가하는 NY-map은 5년 운전한 상태임으로 잔여절연내력 V_R = 100 - 5년×(2%/년) = 90%
= 절연초기치(35[kV])× 90%=31.5 로써, 잔여절연내력(V_R)은 표8과 같이 90%로써 NY-map 평가 결과 89%와 거의 일치하지만, 절연파괴전압(20kV)은 절연초기치로부터의 계산값(31.5kV)과 비교하여 절연내력이 상당히 낮게 나타남을 알 수 있다.

표8. NY-map과 파괴시험결과 비교

NY-map에 의한 절연여유도		파괴시험 결과
잔여절연내력V _R (%)	추정전압[kV]	
89.02	31.5	19~20kV

5. 결 론

초기 절연특성값이 불량한 시험대상 고압전동기에 대해 3회에 걸쳐 절연특성시험에 의한 절연특성값을 가지고, 절연파괴전압과의 상관관계를 알아보기 위하여 절연열화상태를 평가하고, 실제로 교류파괴시험을 실시한 결과

1) 절연열화판정기준과 절연내력추정에 의한 절연상태평가 결과는 절연내력이 상당히 저하되어 있음을 나타냈고, 실제 파괴전압과도 절연내력추정에 의한 값과 유사한 값을 얻을 수 있었다.

2) 운전이력에 의한 평가결과는 절연물의 운전년수 및 기동정지횟수 및 운전온도만을 주인공으로 하여 평가하는 이론적인 평가방법으로, 이번 대상기와 같이 초기 절연특성값이 불량한 전동기에 대해서는 약간의 오차가 발생할 수 있었다.

3) 따라서 운전조건과 관계없이 전동기의 절연열화를 평가하는데 있어 절연특성시험에 의한 절연열화판정기준과 절연내력 추정에 의한 방법은 실제 절연내력을 추정하는데 있어 매우 유용함을 알 수 있다.

[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" 관서전력주식회사, 1973