

고압유도전동기의 절연상태 평가

이광호*, 임재일*, 김기원*, 정진달*, 이은웅**
한국수자원공사*, 충남대**

Evaluation of Insulation Condition for High Voltage Induction Motor

Kwang-Ho.Lee*, Jae-Il Lim*, Ki-Won.Kim*, Jin-Dal.Jung*, Eun-Woong.Lee**
Korea Water Resources Corporation*, Chungnam National University**

Abstract - This test was performed to assess the insulation deterioration condition of the stator winding of 3.3kV class induction motors which have been in service for 15 years after being installed in 1988. The insulation diagnostic tests include resistance, polarization index (P.I), dissipation factor($\Delta \tan \delta$) and maximum partial discharges(Qmax). The results of diagnostic tests were compared to the visual inspection in overhaul.

71대 중 11대는 절연내력이 수명한계(2E+1)이하로 불량하였다.

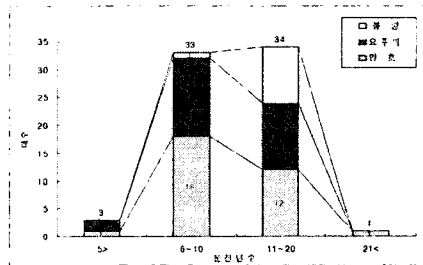


그림1. 운전년수와 절연상태평가

1. 서론

산업 현장에서 사용되고 있는 각종 3상 유도전동기는 운용 중 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]

11대의 절연불량전동기를 분해·육안점검을 실시하여 열화원인을 분석한 결과 그림2와 같이 8대(73%)가 전기적 기계적 열화가 주요인으로 판단되었고, 나머지 3대(27%)는 환경적 열화가 주요인으로 판단되었다. 절연상태가 불량한 전동기의 절연저항(M Ω), 성극지수(P·I), 교류전류시험(ΔI), 유전정접시험($\Delta \tan \delta$), 부분방전(Q $_{max}$)시험 등의 현장 Off-line 절연특성시험결과를 분석한 것과 육안점검결과를 비교하였다.

따라서 일정주기로 절연진단을 실시하여 절연상태평가 및 변화추이를 관리하며, 그 결과에 따라 전동기의 분해점검(Overhaul), 절연세척(Cleaning), 절연보강(Im-pregnation), 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]

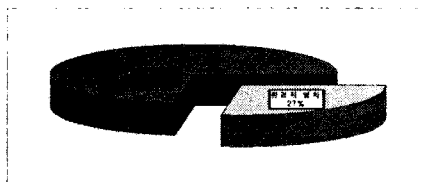


그림2. 절연불량 전동기의 열화원인

3.3kV급 전동기는 이미 발표된 문헌^[3]의 6.6kV급 이상 회전기의 열화정도 판정자료와 상이하게 현장적용에 다소 어려움이 있어 2002년도 진단팀이 실시한 광역상수도의 펌프구동용 3.3kV급 고압전동기에 대한 Off-line 절연특성시험결과, 절연내력시험, 분해·육안점검 자료를 근거로 가동연수, 절연상태평가, 절연특성시험값을 비교분석·평가하였다.

2.2 절연상태진단

절연진단시험 대상은 표1과 같이 광역상수도의 펌프구동용 3.3kV급 절연상태불량 유도전동기 중 그림3과

2. 진단대상 및 시험방법

2.1 운전연수와 절연상태평가

표본 조사한 광역상수도 펌프구동용 노후 고압전동기의 71대를 운전연수와 절연상태평가결과를 그림1과 같이 분석하면 ①21년 이상 운전한 전동기 1대가 양호한 절연상태로 평가되어 운전연수와 절연열화의 상관관계가 반드시 일치하지 않는 것으로 나타났으며 ②11-20년 운영한 전동기 34대중 10대가 절연불량으로 나타나 운전연수와 절연열화의 상관관계는 일반적으로 높은 것으로 나타났으며 또한 ③6-10년 운영한 33대중 1대만 절연불량으로 나타났다. 절연상태평가에 사용한 전동기 총

표1. 시험대상 전동기 사양

구분	A그룹	B그룹
정격용량(kW)	149	300
정격전압(kV)	3.3	3.3
정격전류(A)	33.5	61
극수(Pole)	4	4
절연계급(종)	B	B
제작년도(년)	1988	1988
시료대수(대)	8	3

같은 전기적·기계적 열화가 주요인 인 8대를 A그룹, 그룹4와 같이 환경적 열화가 주요인 인 3대를 B그룹으로 분리하여 분석하였다.

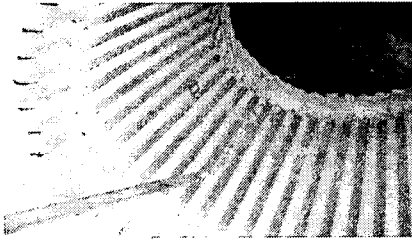


그림3. A그룹(전기적·기계적 열화)

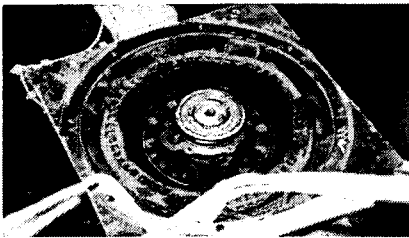


그림4. B그룹(환경적 열화)

2.3 시험방법

전동기 고정자 권선을 3상 일괄로 DC 및 AC전압을 인가하여 표2의 시험기준으로 Digital Insulation Tester에 의한 절연저항(Megger) 및 성극지수(P·I) 시험, Schering Bridge에 의한 유전손실을 측정하는 유전정접(tan δ)시험 및 PD Detector와 커플링 캐패시터(10nF)를 이용한 부분방전시험(Q_{max}) 등의 정밀절연진단을 실시하였다.

표2. 시험항목별 시험기준

시험종류	시험기준
①절연저항시험	IEEE Std43
②성극지수시험	IEEE Std43
③유전정접시험	IEEE Std56
④교류전류시험	IEEE Std286
⑤부분방전시험	IEC 60270
	IEEE Std1434

3. 시험결과 및 분석

3.1 절연저항시험

고정자 권선을 3상 일괄로하여 DC 5,000[V] 5TΩ급 Megger로 전동기 단자와 외함간에 1000[V] 전압을

표3. 절연저항 시험결과

구 분	한계기준 (MΩ, 40℃기준)	시험결과 (MΩ, 40℃기준)	측정조건 (온도, 습도)
A	100	62,616	19.4℃, 39%
B	100	16,465	12.6℃, 45%

인가하여 1분 후의 절연저항을 측정한 결과 표3과 같다. A그룹은 62GΩ, B그룹은 16GΩ으로 기준치(100MΩ) 이상으로, 절연저항시험은 정상적으로 운전중인 회전기의 절연상태평가에 직접적인 관계가 없는 것으로 분석된다.⁽⁴⁾

3.2 성극지수시험

절연저항시험과 동일한 시험기기를 이용하여 전동기 단자와 외함간에 DC1000[V] 전압을 10분간 인가하여 1분과 10분 후의 누설전류변화량을 측정하여 성극지수(1분전류/10분전류)로 나타낸 결과 표4와 같다. A그룹은 8.61 B그룹은 6.7로 기준치(2.0)이상이다.

표4. 성극지수 시험결과

구 분	한계기준	시험결과	측정조건 (온도, 습도)
A	2.0	8.61	19.4℃, 39%
B	2.0	6.70	12.6℃, 45%

성극지수시험은 흡습·오손 정도의 평가에는 뚜렷한 차이가 있으나, 운전중인 회전기의 절연상태평가에 직접 적용하는 것은 다소 오차가 있음을 알 수 있다.⁽⁴⁾

3.3 유전정접시험

고정자 권선 절연체의 유전손실량을 측정하기 위하여 3상 일괄로 전동기 단자와 대지간에 정격대지 교류전압(1.9kV)을 인가하여 절연체의 손실량인 유전정접을 측정 한 결과 유전손실 증가분(Δtan)이 표5 및 그림5와 같다. A그룹은 0.18% B그룹은 0.06%로 기준치(3.5%)이하로서 양호한 값이다.

표5. 유전정접 시험결과

구 분	시험결과[%]		측정조건 (온도, 습도)
	tan δ o at 1kV	Δtan δ at 1.9kV	
A	1.61	0.18	19.4℃, 39%
B	2.46	0.06	12.6℃, 45%

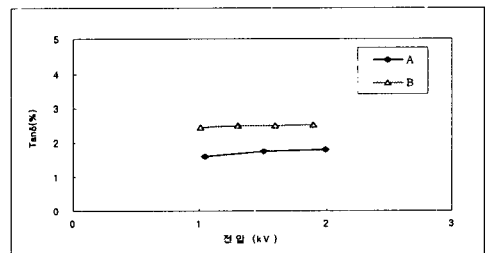


그림5. 유전정접 분포 Pattern

유전정접시험은 누설전류에 의한 손실, 유전분극손실 및 부분방전손실로 절연체의 평균적인 열화정도를 평가하는 시험으로 정격대지전압에서의 시험값을 운전중인 회전기의 부분적인 절연상태평가에 직접 적용하는 것은 다소 오차가 있음을 알 수 있다.

3.4 부분방전시험

고정자 권선을 3상 일괄로 전동기 단자와 대지간에 교류전압을 정격대전압까지 인가하여 절연체에서 발생하는 방전전하의 최대부분방전량(Qmax), 방전Pattern, 방전개시전압(Discharge Inception Voltage), 방전소멸전압(Discharge Extinction Voltage)을 측정하여 절연체의 국부결함 상태를 진단한 결과 표6과 같다.

표6. 부분방전 시험결과

구분	한계기준	A그룹	B그룹
Qmax(pC)	5,000	25,100	6,200
DIV(kV)	1.9/2	1.0	1.1
DEV(kV)	-	0.6	0.9
back noise(pC)	-	360	280

금번 절연상태가 불량한 전동기의 Qmax가 A그룹은 25,100pC B그룹은 6,200pC으로 기준값(5,000pC)을 상회하며, 방전개시전압(DIV)이 운전전압(E₀)이하에서 발생한다.

또한 그림6 및 그림7과 같이 방전패턴^{5,6)}이 넓은 위상에서 균일하게 발생하는 특이한 방전Pattern을 나타낸다.

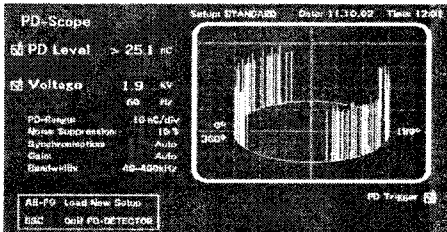


그림6. A그룹 부분방전패턴(E₀ at 1.9kV)

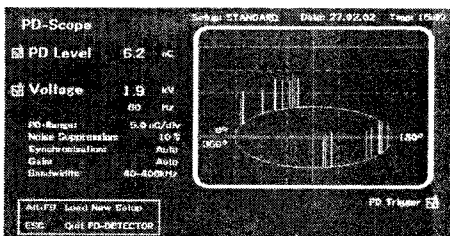


그림7. B그룹 부분방전패턴(E₀ at 1.9kV)

방전발생 상황이 ①방전발생 개시전압이 상당히 낮은 전압에서 개시되어 최대방전 크기에 도달하는 시간이 상당히 짧았으며, 인가전압의 상승에 따라 방전의 크기가 거의 변화하지 않는 특성이었다. 또한 ②방전발생의 위상이 상당히 넓게 나타났으며, 방전의 크기가 위상에 따라 거의 일정한 방전pattern이다.⁷⁾

3.5 시험결과 분석

본 연구에서 3.3kV급 전동기 유도전동기의 절연상태진단시험, 절연내력시험, 전동기분해·육안검사 자료를 근거로 절연상태를 평가하고 불량전동기에 대한 분석결과 ①열화원인은 정격전압(E₀ 3.3kV)이하에서 절연파괴된

전동기를 분해점검 한 결과 A그룹은 전기적·열적 열화진전으로 권선 웨지(Wedge)부 등에 crack이 상당히 진전되어 권선절연 불량에 육안으로 발견되었으며, B그룹은 전동기 권선부에 지지베어링 윤활유의 비산·Air에 혼입되어 권선의 발생열에 의해 가열·탄화되어 오손상태가 상당히 심각하게 나타났다.

②절연저항시험, 성극저수시험은 정상적으로 운전중인 건조한 상태에서는 절연물의 열화상태를 판단하기 어려웠으며, 절연체의 전반적 열화상태를 판단하는 유전정접 시험은 절연체의 국부적인 결함여부를 판단하기는 어려웠다. 다만 부분방전시험이 절연체의 열화정도를 판단하는 매우 효과적이다.

③장기간사용에 따른 고정자 권선의 슬롯부 Wedge crack 또는 기름·분진 등에 의한 표면 오손부의 가열에 의한 탄화현상 등이 발생한 부분에서 부분방전개시전압이 낮고, 방전개시 후 방전 최대 크기에 도달하는 시간이 짧으며, 인가전압의 상승에 따라 방전의 크기가 거의 변화하지 않았다. 또한 방전발생의 위상이 상당히 넓게 나타나며 방전의 크기가 위상에 관계없이 거의 일정한 pattern이다.

4. 결 론

3.3kV급 유도전동기의 상태기준유지보수를 위하여 정상 운전중인 건조한 상태에서 Off-line 절연진단시험은 절연특성시험 항목 중 부분방전시험이 매우 효과적이며 방전크기 외에 방전위상, 방전도달시간, 방전개시전압이 절연상태평가의 주 인자임을 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)T. Kanekawa, N. Morita and N. Sugimoto "Inspection and Diagnosis for Large Motors" FUJI 시보 VOL.46 NO.6 1991
- (4)IEEE Std 43-2000, "IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery", 2000.3
- (5)Dieter Konig, Y.Narayana Rao, "Partial discharge in electrical power apparatus", 1993
- (6) I.M. Culbert, H. Dhirani and G.C. Stone, "Handbook to Assess the Insulation on Condition of Large Rotating Machines", Power Plant Electrical Reference Series, EPRI Report No.EL-5036, Volume 16, Project No. 2577-1, 1989.
- (7)이광호, 이은용 외, "대용량 수차발전기의 절연진단에 의한 절연상태평가" 대한전기학회 하계학술대회는문집, pp. 1810~1812, 2002. 7.