

순환수 펌프용 고압전동기 고정자 권선의 절연내력 평가

김희동*, 공태식*, 박태성*
한전 전력연구원*

Estimation of Dielectric Strength in High Voltage Motor Stator Windings for Circulating Water Pump

Hee-Dong Kim*, Tae-Sik Kong* and Tae-Sung Park*
Korea Electric Power Corporation(KEPCO) Research Institute*

Abstract - To assess the deterioration condition of stator insulation, diagnostic and overpotential tests were performed on two high voltage(HV) motors for circulating water pump (CWP). Following the long term rewinding program, the diagnostic test was performed on two motors during the planning maintenance period. After completing the diagnostic test, overpotential test was done on the stator windings of HV motors. During the overpotential test, the No. 1 and No. 2 of HV motors failed at 8.8 kV and 7.9 kV, respectively. Stator windings of two HV motors had deteriorated significantly.

1. 서 론

국내에서도 1990년대 말부터 발전소를 중심으로 절연진단 시험을 활발하게 진행하고 있으며, 최근에는 민간기업에서도 적극적으로 도입하고 있는 실정이다. 특히, 운전연수가 10년 이상된 고압전동기는 대략 3년 주기로 계획예방정비 기간 중에 진단시험을 시행하고 있으며, 국내에서 개발한 절연열화 평가기준을 사용하고 있다[1].

절연진단 시험만으로 20년 이상 운전한 고압전동기 고정자 권선의 신뢰성을 유지하기가 어렵기 때문에 내전압 시험을 병행할 필요가 있다. 6.6 kV 전동기의 경우에 내전압 시험은 2E+1 kV 즉 14.2 kV 이상을 1분간 인가하고 이상이 없으면 절연상태가 양호하여 계속적인 운전이 가능하다[2]. 만약에 고압전동기 내전압 시험중에 절연과파가 발생하면 즉시 재권선을 수행한다.

본 논문은 복합화력발전소에서 재권선 후에 10년 이상 동안 운전된 순환수 펌프용(circulating water pump : CWP) 고압전동기(400 kW, 6.6 kV) 고정자 권선에서 정지중 절연진단 시험과 내전압 시험결과를 분석하였다.

2. 시험방법

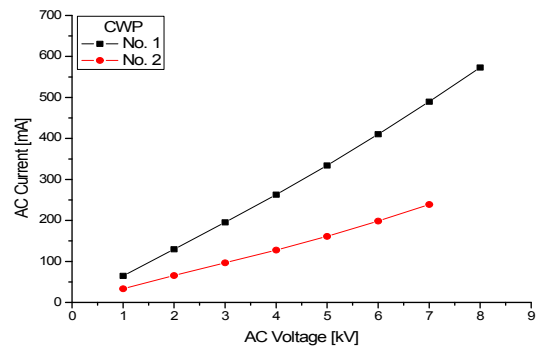
고압전동기(400 kW, 6.6 kV)는 동일한 정격용량, 정격전류, 회전수, 부하, 제작년도 및 제작사의 사양을 갖고 있다. 고압전동기 No. 1은 1991년 제작되어 11년 정도 운전되다가 2002년에 재권선하였고 고압전동기 No. 2는 1991년 제작되어 12년 정도 운전되다가 2003년에 재권선을 완료하였다.

고압전동기 절연진단 시험은 절연저항, 성극지수, 교류전류, 유전정접 및 부분방전을 포함한다. 교류전압을 인가하기 전에 고압전동기 고정자 권선에서 삼상 일팔로 직류 5kV를 인가하면서 절연저항과 성극지수(Automatic Insulation Tester, AVO International)를 측정하였다. 고압전동기 고정자 권선에서 부분방전 시험을 위해 교류 전원장치와 제어 시스템(HV supply and control system), 셰링브리지(Schering bridge)를 포함하고 있는 이동식 절연진단 및 분석 시스템(Mobile Insulation Diagnosis & Analysing System : MIDAS), 커플링 커패시터(coupling capacitor), 커플링 유닛(coupling unit) 및 부분방전 측정기(partial discharge detector)를 사용하였다. 부분방전 시험은 고압전동기 고정자 권선에 이동식 절연진단 및 분석 시스템(MIDAS, Tettex Instruments, 2880)을 연결하여 전압을 인가하였으며, 커플링 커패시터(Tettex Instruments, 9,000 pF)는 권선에서 유입되는 신호를 광대역 매칭 유닛(Broadband Matching Unit, Tettex Instruments 9103)에 보내어 증폭한 후 부분방전 측정기(Robinson, DDX 9101)에서 방전크기 및 패턴을 분석하였다. 부분방전 측정기의 주파수 대역폭은 30~400 kHz 이다. 고압전동기 고정자 권선의 부분방전 크기는 발전소 현장에서 측정하였으

며, 외부잡음은 100~990 pC 정도를 나타내고 있다. 정지중 절연진단 시험을 완료하고 교류 전원장치(HV Supply, 50kV)와 브리지(Bridge, Type 2819)를 사용하여 1kV씩 증가시키면서 내전압 시험과 더불어 교류전류, 유전정접 및 커패시턴스를 측정하였다.

3. 시험결과 및 고찰

No. 1, No. 2의 고압전동기 고정자 권선 A, B 및 C상을 삼상 일팔로 결선하고 외부 전원장치에서 교류전압을 1 kV씩 증가하면서 내전압 시험 중에 각각 8.8 kV와 7.9 kV에서 절연과파가 발생되었다. 그림 1은 No. 1, No. 2의 고압전동기 고정자 권선에서 절연과파가 발생할 때까지 교류전류의 변화를 측정하여 나타내었다. 6.6 kV에서 고압전동기 No. 1, No. 2의 교류전류 증가율(ΔI)은 참고문헌[3]에 의해 계산하였다. 이상적인 절연재료에서 교류전압을 증가하면서 전류를 측정하면 직선적으로 비례하여 증가한다. 그러나 그림 1에서 나타난 바와 같이 실제로 고압전동기 고정자 권선은 어떤 전압 이상에서 전류가 직선적 비례 관계를 벗어나면서 증가하게 된다. 따라서 ΔI 는 이상적인 절연재료의 직선적 비례관계를 기준으로 했을 때 실제로 비례관계를 벗어나 증가하는 비율을 나타낸다. 또한, 교류전압에 대해 전류가 이상적인 비례 특성을 보이는 것 같지만 확대해서 직선형 자를 사용하여 0점을 기준으로 실측하면 제1차 전류급증점(P_{11})이 나타나고 다시 제1급증점을 기준으로 실측하면 제2차 전류급증점(P_{12})이 나타난다.

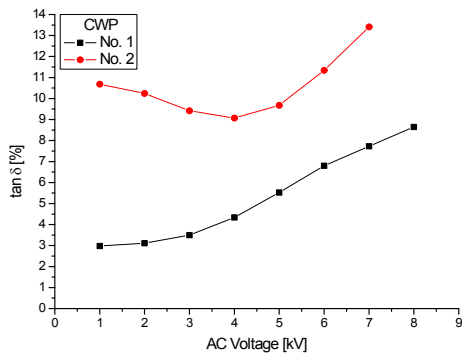


〈그림 1〉 고압전동기의 교류전류-전압 특성

고압전동기 성극지수는 2.0이상인 경우에 양호하게 판정한다 [1]. 고압전동기 No. 1, No. 2의 성극지수는 각각 2.28, 4.23으로 측정되어 양호하게 평가되었다. 6.6 kV 전동기의 경우 ΔI 는 10%이상이면 불량으로 판정하고 있다[1]. 고압전동기 No. 1, No. 2는 6.6 kV에서 ΔI 가 각각 6.56%, 3.85%로 측정되어 양호한 절연상태를 나타내고 있다. 또한, 고압전동기 No. 1, No. 2의 제1차 전류급증점(P_{11})이 나타나는 전압은 각각 3.0 kV, 3.0 kV이며, 제2차 전류급증점(P_{12})이 나타나는 전압도 각각 5.0 kV, 4.3 kV를 나타내었다. 발전기와 고압전동기 고정자 권선에서 절연상태의 열화정도가 심할수록 제1차와 제2차 전류급증점이 낮은 전압으로 이동하게 된다. 따라서 제1차와 제2차 전류급증점이 높은 발전기와 고압전동기는 낮은 것에 비해 절연과파전압이 높게 나타나고 있다[3].

그림 2는 고압전동기 고정자 권선에서 절연진단과 내전압 시험을 위해 교류전압을 1 kV씩 증가하면서 유전정접($\tan\delta$)의 변

화를 측정하였다. 그림 2에서 나타난 바와 같이 $\tan\delta$ -전압 특성 그래프에서 고압전동기 No. 1은 유전정점의 증가점이 3.0 kV이며, No. 2는 인가전압 1 kV~4 kV에서 유전정점이 초기값 10.68%에서 9.07%까지 감소하다가 다시 증가를 시작하여 7 kV에서 13.41%로 측정되었다. No. 2는 유전정점이 전압증가에 따라 초기값에 비해 감소하다가 다시 증가하여 유전정점의 증가점을 확인하기가 어려웠다. 현재 고압전동기 정격전압에서 절연진단과 내전압 시험이 시행되고 있으므로 이러한 전압을 분석함으로써 고장자 권선의 절연열화 상태를 확실하게 판정할 수 있다. 그리고 발전기 및 고압전동기 고장자 권선에서 절연열화가 진행할수록 이들 전압은 낮게 이동한다고 보고하고 있다[3]. 6.6 kV에서 고압전동기 No. 1, No. 2의 유전정점 증가율($\Delta\tan\delta$)은 참고문헌 [1]에 의해 계산하였다. 6.6 kV 고압전동기의 경우 정격전압에서 $\Delta\tan\delta$ 는 8.5% 이상이면 불량으로 판정하고 있다[1]. 표 3에 나타난 바와 같이 정격전압에서 고압전동기 No. 1, No. 2의 $\Delta\tan\delta$ 는 각각 4.18%, 6.73%로 측정되었으며, 고압전동기 2대 모두 $\Delta\tan\delta$ 가 8.5% 이하로 측정되어 절연상태가 양호하게 분석되었다.



〈그림 2〉 고압전동기에서 $\tan\delta$ -전압 특성의 비교

표 1에서 나타난 바와 같이 고압전동기 고장자 권선에서 삼상 일괄로 교류전압을 인가하면서 부분방전 크기, 외부 노이즈 및 부분방전 개시전압을 측정하였다. 고압전동기 상전압(3.81 kV), 상전압의 1.25배(4.76 kV), 6.0 kV 및 정격전압(6.6 kV)에서 부분방전 크기를 나타내었다. 고압전동기 2대 모두 주절연물 내부에 보이드가 존재하는 내부방전을 나타내었다[4]. 외부 노이즈가 100~990 pC으로 측정되었으며, 외부노이즈를 기준으로 해서 부분방전 크기가 1000 pC이상으로 나타날 때 전압을 부분방전 개시전압(Partial Discharge Inception Voltage : PDIV)이라 한다. 고압전동기 No. 1, No. 2의 부분방전 개시전압은 각각 2.7 kV, 2.8 kV 이며, 상전압에서 부분방전 크기는 각각 5,700 pC, 3,400 pC으로 측정되었다.

〈표 1〉 고압전동기 고장자 권선의 부분방전 크기

CWP Motor	계통 잡음 [pC]	개시 전압 [kV]	PD 크기[pC]			
			E/ $\sqrt{3}$ [kV]	1.25E/ $\sqrt{3}$ [kV]	6[kV]	6.6[kV]
No. 1	990	2.7	5,700	6,200	7,100	8,300
No. 2	100	2.8	3,400	10,500	19,200	22,800

표 2는 고압전동기 No. 1, No. 2의 제1차 전류급증점이 나타나는 전압, 커패시턴스와 유전정점이 급증하는 전압, 부분방전 개시전압 및 제2차 전류급증점이 나타나는 전압 등을 나타내었다. 고압전동기 No. 1의 제1차 전류급증점이 나타나는 전압은 3.0 kV, 커패시턴스 급증 전압은 3.0 kV, 유전정점 급증전압도 3.0 kV이고, 부분방전 개시전압은 2.7 kV를 나타내었다. 따라서 고압전동기 No. 1의 제1차 전류급증점이 나타나는 전압, 커패시턴스 급증전압, 유전정점 급증전압 및 부분방전 개시전압을 분석한 결과 유사하게 나타내었다. 고압전동기 No. 2의 제1차 전류급증점이 나타나는 전압은 3.0 kV, 부분방전 개시전압은 2.8 kV를 나타내었다. 정격전압 6.6 kV까지 절연진단 결과 고압전동기 No. 1의 교류전류, 유전정점 및 부분방전 크기가 모두 양호하였으나 절연 파괴전압은 다른 전동기에 비해 낮은 8.8 kV로 나타내었다[5]. 또한, 고압전동기 No. 2의 교류전류와 유전정점은 양호하고 부분방전 크기가 요주의로 분석되었으며, 절연파괴전압은 7.9 kV를 나타내었다. 따라서 고압전동기 No. 1, No. 2의 절연파괴전압은 정격전압 6.6 kV의 1.20~1.33배로 매우 낮게 측정되었으며, 재권

선을 마치고 10년 동안 해수계통에서 운전환경으로 인한 절연특성으로 분석되었다. 고압전동기 No. 1, No. 2의 제1, 2차 전류급증점이 유사하게 측정된 다른 고압전동기의 절연파괴전압도 13.8~16.6 kV로 높게 측정되었다[3]. 2대의 고압전동기 고장자 권선은 슬롯단부에서 절연파괴가 발생하였다. 고압전동기 고장자 권선의 슬롯단부가 전기적 및 기계적 응력이 집중되어 대부분의 절연파괴가 슬롯단부에서 발생하고 있다[4, 5].

〈표 2〉 고압전동기 고장자 권선의 절연열화 및 절연파괴 특성

CWP Motor	P_{11} [kV]	커패시턴스 급증전압 [kV]	유전정점 급증전압 [kV]	부분방전 개시전압 [kV]	P_{22} [kV]	절연파괴 전압 [kV]
No. 1	3.0	3.0	3.0	2.7	5.0	8.8
No. 2	3.0	-	-	2.8	4.3	7.9

고압전동기 No. 2가 No. 1에 비해 절연파괴전압이 낮은 것은 제2차 전류급증점이 4.3 kV로 낮고 4.76 kV에서 부분방전 크기가 요주의 상태로 분석되었다. 유전정점값도 7 kV에서 13.41%로 높게 측정되어 절연열화가 더 심하게 진행된 것으로 판명되었다. $\Delta\tan\delta$ 가 양호하여도 정격전압에서 유전정점값이 13.0% 이상으로 측정되면 주의하여 운전할 필요가 있다. 고압전동기 No. 1, No. 2는 정격전압 6.6 kV에서 절연진단만 수행하고 내전압 시험을 하지 않은 경우에 운전중에 절연파괴가 발생한다. 따라서 적기에 내전압시험을 수행하여 고압전동기 고장자 권선의 절연열화 상태를 사전에 확인하고 정비함으로써 운전중에 발생할 수 있는 절연파괴 사고를 예방하는 좋은 기회가 되었다.

4. 결 론

No. 1의 고압전동기 고장자 권선에서 제1차 전류급증점을 나타내는 전압, 커패시턴스와 유전정점이 증가하는 전압, 부분방전 개시전압 등이 거의 유사하게 나타나고 있음을 확인할 수 있었다. 고압전동기 No. 1은 절연진단 결과 교류전류, 유전정점 및 부분방전 크기가 모두 양호하였으나 8.8 kV에서 절연파괴가 발생하였다. 또한, 고압전동기 No. 2는 교류전류와 유전정점은 양호하고 부분방전 크기가 요주의로 분석되었으며, 절연파괴전압은 7.9 kV를 나타내었다. 따라서 고압전동기 No. 1, No. 2의 절연파괴전압은 정격전압의 1.20~1.33배로 매우 낮게 측정되었으며, 재권선을 마치고 10년 동안 열악한 해수계통에서 운전환경으로 인한 절연특성으로 분석되었다.

감사의 글

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (No.2010101010001C)

[참 고 문 헌]

- [1] 김희동, "4.16kV 및 6.6kV 전동기 고장자 권선의 절연열화 판정기준", 전기학회 논문지, Vol. 58, No. 4, pp. 788~794, 2009.
- [2] J. E. Timperley and J. R. Michalec, "Estimating the Remaining Service Life of Asphalt-Mica Stator Insulation", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 9, No.4, pp. 686~693, 1994.
- [3] 김희동, 공태식, "고압전동기 고장자 권선의 절연열화 평가", 전기학회 논문지, Vol. 61, No. 5, pp. 711~716, 2012.
- [4] 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.
- [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.