

고압전동기 고정자 권선의 절연상태 평가

김희동, 박의갑*, 박완조**
한전 전력연구원, *삼천포화력발전처, **평택화력발전처

Assessment of Insulation Condition in High Voltage Motor Stator Windings

Hee-Dong Kim, Eui-Gab Park*, Wan-Jo Park**

Korea Electric Power Research Institute, *Samchonpo Thermal Power Plant, **Pyong Taek Thermal Power Plant

Abstract - This paper describes to access the insulation deterioration condition of the stator windings in six high voltage motors. Nondestructive tests have been carried out on stand-still motors. These tests include ac current increase rate(ΔI), delta tan delta($\Delta \tan \delta$), and maximum partial discharge(PD). AC current and $\tan \delta$ were measured by Schering bridge. The measurement of PD patterns were conducted using digital partial discharge detector. PD patterns were observed treeing and internal discharges in Motor 1 and 2. The stator windings of two motors were found to be in a poor condition and their were recommended to rewind. The stator windings of four motors were judged to be in serviceable condition.

2. 시험방법

본 논문에서는 6대의 고압전동기 고정자 권선에서 교류전류, 유전정접 및 부분방전 등을 분석하였다. 교류전류와 유전정접 시험은 셰링브리지(Schering Bridge)를 사용하여 으며, 셰링브리지는 전원장치(HV Supply, Type 5283), 브리지(Bridge, Type 2818) 및 공진 인덕터(Resonating Inductor, Type 5285)로 구성되어 있다. 그림 1은 고압전동기 고정자 권선에서 셰링브리지를 사용하여 삼상 일팔로 교류전류와 유전정접을 측정하는 회로도를 나타냈다. 부분방전을 측정하기 위해 각 발전기 고정자 권선에 셰링브리지(Tettex Instruments)를 연결하여 교류전압을 인가하고, 커플링 캐패시터(Coupling Capacitor, Tettex Instruments, 4,000pF)는 권선에서 유입되는 전원 잡음을 제거한 다음 신호를 커플링 유닛(Coupling Unit, Tettex Instruments AKV 572)에 보내어 증폭한 후에 디지털 부분방전 측정기(Digital Partial Discharge Detector, Tettex Instruments TE 571)에서 방전크기와 패턴을 분석하였다.

1. 서 론

장기간 사용된 고압전동기 고정자 권선의 절연재료는 슬롯부분보다도 단말권선(endwinding)에서 열화가 진행되는 경우가 많으며, 단말권선 표면의 오손, 습기 조건에 의해 파괴전압이 저하할 가능성이 있다. 고압전동기는 사용환경이 다르기 때문에 고정자 권선 표면이 약품, 유독가스, 분진 및 수분 등의 분위기에서 운전됨으로 단말권선 단부의 절연재료 표면에 도전성 물질이 부착되어 있다가 정지중에 흡습되어 절연층의 열화가 커지는 경향이 있다. 또한, 고압전동기에서는 기동시 흐르는 전류로 인해 전자기력이 크기 때문에 파괴열화에 의한 박리, 균열 및 보이드 등에서 부분방전 혹은 흡습에 의한 절연열화가 발생한다.

따라서 발전소 주요설비에서 운전중인 고압전동기의 갑작스런 절연파괴 사고는 전력공급의 신뢰성을 저하시키고, 단시간에 복구가 곤란할 뿐만 아니라 상대적으로 경제적인 손실이 매우 크게 된다. 대용량 고압전동기 고정자 권선에서 절연파괴가 발생하기 전에 열화상태를 평가하기 위해 주기적인 정밀점검과 진단 시험을 수행하고 있다. 정밀점검은 대략 3년 주기로 매년 시행되는 계획예방정비 기간 중에 실시되며, 진단 시험은 성극지수, 교류전류, 유전정접 및 부분방전에 의하여 고압전동기의 열화정도를 판정하고 있다 [1].

본 논문은 6대의 고압전동기 고정자 권선에서 절연상태를 평가하기 위해 정지중에 절연진단 시험을 수행하여 열화상태를 평가하였다. 고압전동기의 권선 교체는 교류전류, 유전정접 및 부분방전 등에 의해 평가하였으며, 부분방전이 크게 발생한 전동기를 분해하여 정밀점검을 시행하였다. 절연상태가 매우 양호하게 판정된 고압전동기를 분해하여 점검한 결과 단말권선의 리드선 부분이 손상됨에 따라 재시험을 실시하였다.

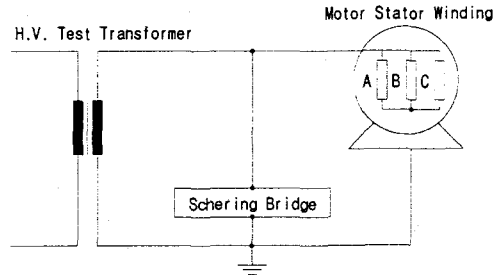


그림 1. 교류전류, 유전정접의 측정 회로도

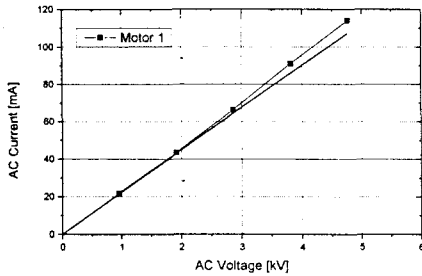
3. 시험결과 및 고찰

3.1 절연열화 분석

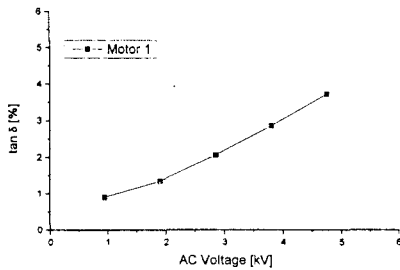
Motor 1과 Motor 2는 각각 15년 이상 동안 발전소에서 운전한 6.6kV 고압전동기(600kW, 261kW)이며, 그림 2와 그림 3은 Motor 1, Motor 2의 절연진단 결과를 나타냈다. 그림 2와 그림 3(a)에서 ΔI 는 각각 상전압의 1.25배인 4.76kV와 선간전압인 6.6kV 상부의 측정값에서 하부의 기준값을 빼서 그 차이를 다시 기준값으로 나누어서 백분율로 표시하면 각각 5.6%, 19.5%으로 분석되었다. 일반적으로 측정값과 기준값 사이의 차이가 작을수록 ΔI 가 작게 되어 절연재료의 상태를 양호하게 판정하지만, Motor 1과 Motor 2는 각각 2.0kV, 3.0kV에서 전류가 증가하기 시작하여

4.76kV와 6.6kV에서 큰 차이를 보이고 있어 절연열화가 진행되었음을 확인할 수 있다.

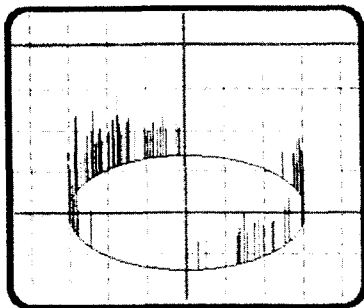
그림 2와 그림 3(b)의 $\Delta \tan\delta$ 는 4.76kV와 6.6kV의 $\tan\delta$ 값에서 0.95kV $\tan\delta$ 값 사이의 차이를 나타내며, 각각 2.82%, 6.82%로 분석되어 절연열화가 상당히 진행된 것으로 판단된다. 전류와 마찬가지로 $\tan\delta$ 값이 2.0kV, 3.0kV에서 증가하기 시작하는데, 이 부분에서 부분방전의 크기가 증가할 것으로 예측된다. 부분방전 측정시 계통잡음은 각각 550pC, 110pC이며, 1000pC 개시전압이 각각 1.18kV, 2.08kV로 측정되었고 2.0kV, 3.0kV부근에서 부분방전이 크게 나타났다.



(a) 전류-전압 특성



(b) $\tan\delta$ -전압 특성

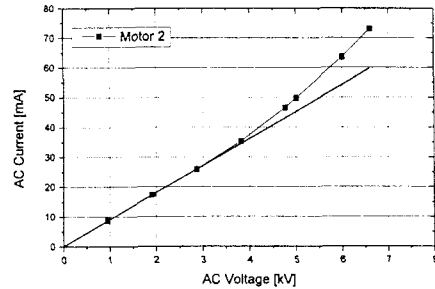


(PD-Range : 20nC/div)

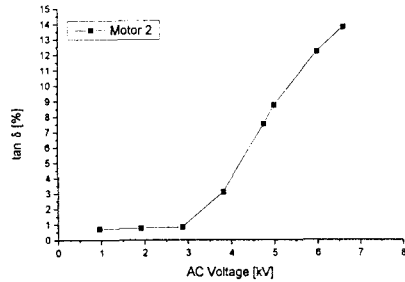
(c) 부분방전 패턴

그림 2. Motor 1의 절연진단 결과

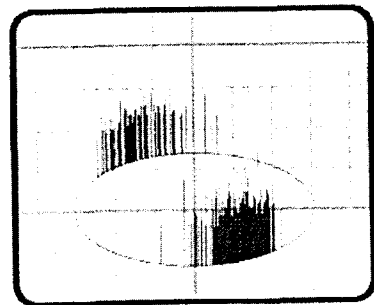
그림 2와 그림 3(c)의 부분방전 크기는 상전압에서 각각 36.2nC, 25.8nC이며, 4.76kV에서 각각 40.5nC, 35.3nC로 증가하였다. Motor 1의 부분방전 패턴은 트리잉방전(treeing discharge)으로 분류되며, 고정자 권선의 절연재료가 열화로 인해 트리가 존재하고 있음을 예측할 수 있다. Motor 2의 부분방전 패턴은 내부방전(internal discharge)으로 분류되며, 고정자 권선의 절연재료가 열화되어 다량의 큰 보이드(large void)가 존재하고 있음을 예측할 수 있다. 이와 같이 트리잉방전과 내부방전의 패턴은 참고문헌[2]과도 일치하고 있다. 따라서 Motor 1과 Motor 2에서 교류전류, 유전정접 및 부분방전 등이 모두 불량으로 분석되어 고정자 권선 교체를 판정하였다.



(a) 전류-전압 특성



(b) $\tan\delta$ -전압 특성



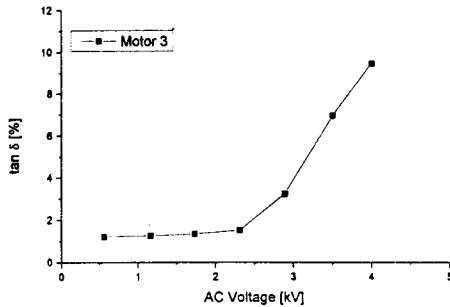
(PD-Range : 20nC/div)

(c) 부분방전 패턴

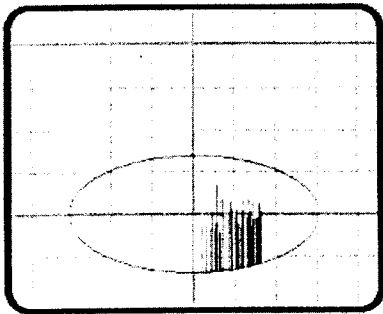
그림 3. Motor 2의 절연진단 결과

3.2 절연진단 분석 사례

Motor 3은 약 2년 이상 동안 발전소에서 운전한 4.0kV 고압전동기(1,900kW)이며, 그림 4는 Motor 3의 절연진단 결과를 나타냈다. 그림 4(a)에서 $\Delta \tan\delta$ 는 8.24%로 높게 나타났고 $\tan\delta$ 값이 2.31kV에서 증가하기 시작하는데, 이 부분에서 부분방전의 크기가 증가할 것으로 예측된다. 부분방전 측정시 계통잡음은 118pC이며, 1000pC 개시전압이 1.80kV로 측정되었고 2.31kV 이상에서 부분방전이 크게 나타났다. 그림 4(b)의 부분방전 크기는 상전압에서 3.5nC이며, 2.5kV 이상에서 갑자기 증가하여 2.89kV에서는 42.9nC으로 증가하였다. Motor 3의 부분방전 패턴은 그림 4(b)와 같으며, 고압전동기를 분해하여 점검한 결과 베어링 오일이 다량으로 유입되어 있음을 확인하였다. 이 고압전동기는 $\tan\delta$ 값이 기준값 이상이지만, ΔI 가 4.23%이고 상전압에서 부분방전의 크기도 3.5nC로 양호하며, 2.5kV이상에서 부분방전이 높게 나타난 것은 베어링 오일의 영향으로 판정됨으로 오일을 제거하고 완전하게 건조하여 운전하도록 조치하였다.



(a) $\tan\delta$ -전압 특성



(PD-Range : 20nC/div)

(b) 부분방전 패턴

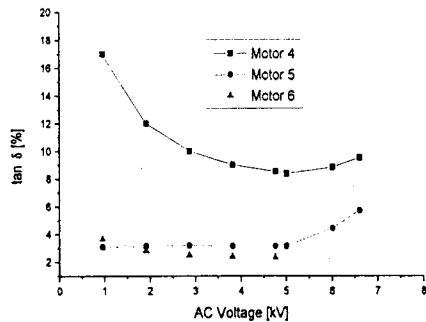
그림 4. Motor 3의 절연진단 결과

Motor 4는 약 15년 이상 동안 발전소에서 운전한 6.6kV 고압전동기(1,400kW)를 나타냈다. 그림 5(a)에서 보인 바와 같이 $\tan\delta$ 는 0.95kV에서 17.0%로 높게 나타났으며, 5.0kV까지 계속적으로 감소하다가 그 이상에서 증가하고 있다. ΔI 가 1.0%이며, 부분방전도 상전압에서 565pC로 매우 양호하게 나타나고 있다.

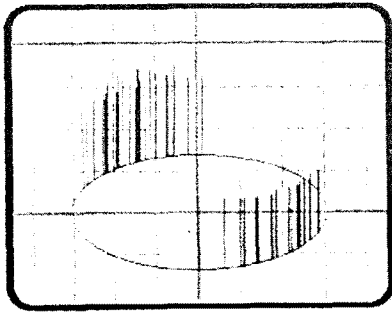
부분방전 측정시 계통잡음은 57pC이며, 1000pC 개시 전압이 4.1kV로 측정되었고 4.76kV에서 부분방전이 1.7nC으로 나타났다. 그러나 단말권선의 리드부에서 탄화 흔적이 발견되어 절연진단 시험을 다시 시행한 결과 이전의 데이터와 거의 유사하게 분석되었다. 선간전압의 1.5배(9.9kV)를 1분동안 인가하였을 때 단말 권선의 리드부 탄화 부분에서 방전이 발생하지 않았으며, 슬롯 끝부분과 단말권선 사이에서 연면방전 (creeping discharge)이 발생하였다. 실제로 탄화 부분에서 방전이 발생하지 않기 때문에 정지중 절연진단 시험으로는 단말권선 리드부의 탄화 흔적을 감지할 수 없었으며, 고정자 권선이 양호하게 판정됨으로 단말권선의 리드부를 정비하여 사용할 수 있을 것으로 판단된다. 단말권선의 리드부 탄화는 부분방전에 의해 발생된 것이 아니라 기동시 서지(surge)에 의해 순간적으로 발생하였으며, 정격전압의 2배 이상이 되는 고전압이 유입될 때 절연재료에 상당한 영향을 미칠 것으로 사료된다.

Motor 5는 약 20년 이상 동안 발전소에서 운전한 6.6kV 고압전동기(700kW)를 나타냈다. 그림 5(a)에서 보인 바와 같이 $\Delta \tan\delta$ 는 2.63%이며, 5.0kV이상에서 증가하고 있다. ΔI 가 1.0%이며, (b)의 부분방전 크기는 상전압에서 각각 47.0nC이며, 4.76kV에서 51.9nC으로 증가하였다. 부분방전 측정시 계통잡음은 57pC이며, 1000pC 개시전압이 4.1kV로 측정되었다. 부분방전의 크기가 매우 높기 때문에 정밀점검을 권고하였다.

Motor 6은 약 20년 이상 동안 발전소에서 운전한 6.6kV 고압전동기(320kW)이며, 그림 5(a)에서 보인 바와 같이 $\tan\delta$ 는 0.95kV에서 3.63%로 높게 나타나다가 계속적으로 감소하고 있다. ΔI 가 0.8%, 상전압에서 부분방전 크기는 1.3nC이며, 4.76kV에서 1.5nC으로 증가하였다. 부분방전 측정시 계통잡음은 763pC이며, 1000pC 개시전압이 3.65kV로 측정되었다. 절연진단 결과 매우 양호하게 판정되었으나 분해점검을 마치고 시운전 중에 고정자 단말권선에서 절연파괴가 발생하였다. 절연파괴 원인은 단말권선의 절연재료 표면에 도전성 물질이 부착되어 있다가 분해점검 중에 흡습되어 절연파괴가 발생한 것으로 추정된다. 그 이유는 절연진단시 절연저항이 2000 Ω 이상으로 측정되었으나 시운전시 80 Ω 로 감소하였으며, 고압전동기 재권선시 고정자 권선을 육안으로 점검한 결과 매우 양호하였다. 10년 이상 사용된 고압전동기에서 절연열화와 흡습에 의한 환경적 원인의 영향으로 인해 사고가 증가하고 있는데, 이를 분석한 결과 절연열화(45%)와 환경에 의한 사고(32%)가 전체중에 77%를 차지하고 있다 [3].



(a) $\tan\delta$ -전압 특성



(PD-Range : 20nC/div)

(b) 부분방전 패턴

그림 5. Motor 4, 5, 6의 절연진단 결과

4. 결 론

6대의 고압전동기 고정자 권선에서 절연상태를 평가하기 위해 정지중에 절연진단 시험을 통해 열화상태를 평가하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

(1) 15년 이상 운전한 2대의 고압전동기 고정자 권선에서 절연상태를 평가하기 위해 교류전류, 유전정접 및 부분방전 등을 분석한 결과 절연재료 내부에서 절연열화가 상당히 진행되어 권선 교체를 판정하였다.

(2) 절연진단 시험에서 부분방전의 크기가 기준값을 초과함에 따라 분해하여 점검한 결과 베어링 오일이 유입되어 있음을 확인하였고, 완전히 건조하여 운전하도록 조치하였다.

(3) 절연진단 결과 양호하게 판정된 고압전동기를 분해하여 점검한 결과 단말권선 리드부에서 탄화 흔적이 발견되어 재시험을 실시하였으나, 역시 양호하게 분석되었고 측정값도 거의 일치하였다. 또한 절연파괴된 고압전동기의 고정자 권선이 육안점검으로도 매우 양호하였으며, 운전하기 전에 절연저항이 저하함에 따라 흡습에 의한 환경적 원인으로 판단되었다.

(참 고 문 헌)

- [1] H. Yoshida and Y. Inoue, "Test Method of Rotating Machines, IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. EI-21, No. 6, pp. 1069-1071, 1986.
- [2] E. Gulski and F. H. Kreuger, "Computer-aided recognition of Discharge Sources", IEEE Trans. Electr. Insul, Vol. 27, No. 1 pp. 82-92, 1992.
- [3] M. Koido, M. Ishikawa, S. Yamatake and Y. Kashiwamura, "Preventive Maintenance Technique for High Voltage Induction Motors", 日立評論, Vol. 72, No. 8 pp. 807-814, 1990.