

수력발전기 고정자권선의 절연열화 분석

변두균, 오봉근, 강동식*, 임기조**
한국수자원공사, 한국전기연구원*, 충북대학교**

A study on the Analysis of Insulation Aging for Generator stator windings

D. G. Byun, B. K. Oh, D. S. Kang*, K. J. Lim**
Kowaco, Keri*, Chungbuk national University**

Abstract - This test was performed to assess the insulation condition of the stator winding of 3.45kV hydro generator in insulation deterioration condition which was due to long service period(30years) since installed.

We extracted 12 stator windings from the hydro generator core, cut the stator windings into three parts(Middle winding part, slot winding part, end winding part), and evaluated the insulation condition to know the deterioration condition of each parts. This insulation diagnostic tests include AC current, dissipation factor, and partial discharg test.

1. 서 론

산업 현장에서 사용되고 있는 고압회전기는 운용중 전기적, 열적, 기계적, 환경적 stress에 상시 노출되어있고, 이러한 stress가 단독 또는 복합적으로 고정자 권선에 작용하여 절연열화를 가중시키고 절연강도를 저하시켜 결국 회전기의 절연과괴를 야기하게 된다.^[1] 또한, 고압회전기 고정자권선의 절연과괴가 발생하는 부위도 권선중앙부, 슬롯인출부, 그리고 단말권선부등 여러부위에서 다양하게 나타나고 있다.

따라서 고정자권선에 대해 다양한 절연진단 방법을 적용하여 절연상태평가 및 변화추이를 관리하고, 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 본 논문에서는 장기간 운전한 수력발전기에서 인출한 고정자 권선을 시료로 하여 철심에 놓여진 위치에 따라 각 권선을 3부분(권선 중앙부, 슬롯인출부, 단말권선부)으로 나누어 절연특성 시험을 실시하고, 절연열화의 진행정도를 비교·분석하여 부분별 절연상태를 평가하고자 한다.

2. 절연상태평가

2.1 시험대상 고정자권선의 특성

시험대상 고정자권선은 약 30년간 운영중 고정자권선 단

말부의 절단과괴사고에 의하여 재권선 보수작업을 위해 인출한 권선중 건전상태의 권선 12개를 선정하였다. 하지만, 발전기실내가 운영중 수차설비에 사용되는 작동유 및 윤활유의 누유로 모든 고정자권선에 오일이 흡착되어 있었다.

표1. 시험대상 고정자권선 사양

대 상	정 격			제작 년도
	용량	전압	전류	
수력발전기 고정자권선	7MW	3.45kV	1,233A	1971

2.2 시료제작

철심의 슬롯에 고정되어 운전중인 고정자권선은 여러 가지 stress에 상시 노출되어 있고, 그러한 stress들은 복합적으로 고정자권선에 작용하여 절연열화를 가중시키고 있다. 따라서, 장시간 사용한 고정자권선의 경우 각 권선이 놓여진 위치에 따라서도 열화의 진행정도가 다를 것으로 판단되고 특히, 슬롯인출부의 경우 전계의 집중, 기계적 진동등에 의한 영향으로 절연물 열화의 진행이 같은 권선에서도 다른 부위에 비해 많이 진전되어 있을 것으로 가정하여, 인출한 고정자권선 12개에 대하여 각 권선의 부분별 열화정도를 알아보고자 그림1과 같이 각 권선을 3부분(①권선중앙부-MID, ②슬롯인출부-SLOT, ③단말권선부-END)으로 나누어 총 36개의 시료를 제작하였다.

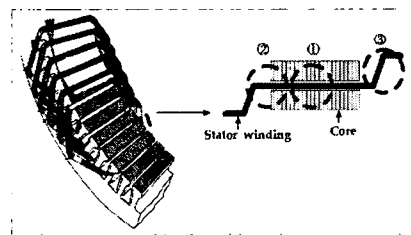


그림 1 고정자 권선의 구조

또한, 기존에 고정자 권선에 도장되어있던 반도체페인트, 전계완화페인트 및 단말권선부의 페인트를 모두 제거하고, 권선을 3부분으로 절단 한 후 시료별로 반도체페인트 및 전계완화페인트를 재도장 하였다.

2.2.1 시료권선제작

권선의 길이는 총 1,630mm로 기존에 도장되어 있던 반

도전페인트, 전계완화페인트 및 단말권선부 페인트를 제거하고, 권선 중앙을 중심으로 3부분으로 나누어 절단하였다. 그리고 중앙부를 권선중앙부로 사용하고, 한쪽 끝부분을 슬롯인출부로 반대쪽을 단말권선부로 시료를 구분하여 제작하였다.[그림1참조]

2.2.2 반도체페인트 및 고저항페인트 도장

권선중앙부 및 슬롯인출부는 실제운전 중 대지와 직접적으로 전압에 의한 영향을 받는 부분으로 같은 조건에서 절연특성을 비교하기 위하여 반도체페인트 도장길이를 220mm로 같게하고, 반도체페인트 양쪽 단말부에서의 전계집중을 완화하기 위해 전계완화페인트를 각각 90mm 도장하였다. 권선단말부는 실제 운전중에서는 상간전압차에 의한 전위차가 발생하는 부분이고 또한, 곡선부위로 접지전극제작의 어려움이 있어, 반도체페인트 도장길이를 270mm로 하였다.

2.3 절연특성시험

시료의 각 부위별 절연열화정도를 알아보기 위하여 절연특성시험으로 교류전류시험, 유전정접($\tan\delta$)시험 및 부분방전시험, 그리고 현장 적용에 앞서 현재 신뢰성 평가를 실시하고 있는 운전중 부분방전 측정시스템을 이용하여 정밀절연특성시험을 실시하였다.

2.3.1 교류전류시험

각 시료에 대하여 대지간에 2E(7kV)까지 1kV 단위로 전압을 상승시키면서 교류전압-전류(V-I)특성으로 전류가 급증하게 되는 전압값과, 전류증가율(Δ)로 절연상태를 평가하였다.

2.3.2 유전정접시험

유전손실은 $\tan\delta$ 에 비례하고, 절연체의 형상 및 크기와 무관한 절연물의 고유한 특성값으로 각 시료에 대하여 대지간에 2E(7kV)까지 1kV 단위로 전압을 상승시키면서 Schering Bridge에 의한 유전손실을 측정하였다^[3].

2.3.3 부분방전시험

시료 권선 절연물의 결함(void)에 의해 전압인가시 국부적인 전계의 집중으로 발생하는 부분방전신호를 측정하여 절연상태를 평가하는 방법^[4]으로, 여기서는 정지중 측정법과 운전중 측정법을 모두 실시하였다. 시험전압은 정격전압에서 부분방전신호가 미약하여, 상전압의 2배인 2E₀(4kV)를 인가하여 측정하였다..

가. 정지중 부분방전 시험

커패시터 커패시터와 매칭 임피던스를 이용하여 발전기 정지상태에서 시험전압을 인가하여 부분방전량(pC)을 측정하는 방법으로 현재 국내외에서 범용적으로 사용하고 있는 측정법으로 실시하였다.

나. 운전중 부분방전 측정시스템을 이용한 시험

운전중 부분방전 측정은 다양한 부분방전 측정센서를 이용하여 발전기 운전중 발생하는 부분방전신호를 측정하는 방법이지만, 여기서는 현장 적용에 앞서 신뢰성 평가를 실시하고 있는 13kV급 부분방전 접촉식 센서와 진단프로그램^[7]을 이용하여 정지중 시험방법과 동일하게 시험전압을 인가하여 부분방전 발생시 나타나는 미소한 전압변화분(mV)을 측정하였다. .

3. 절연특성시험 결과

3.1 시험결과

2.3절에서 설명한 절연특성시험방법으로 총 36개 시료에 대하여 시험을 실시하였다. 각 시료별로 측정데이터를 얻기위해 시험전압 인가 중 4kV 부근에서 2번, 7번, 11번 단말권선(END)부의 시료에서 절연파괴가 발생하였다. 이 시료들은 절연파괴전압 전까지 절연특성값의 급격한 변화가 없었고, 절연파괴위치도 단말권선부를 인접한 권선과 고정(bracing)하는 부분으로, 절연물의 열화에 의한 것이 아니라 bracing 제거 작업시 절연물이 손상되어 나타난 현상으로 판단된다. 따라서, 총 33개의 시료에 대한 절연특성시험결과를 얻을 수 있었다.

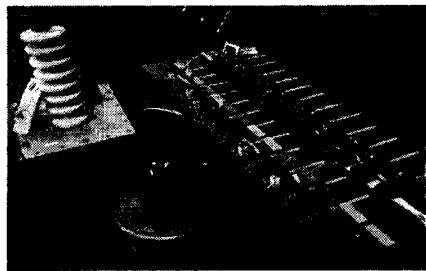
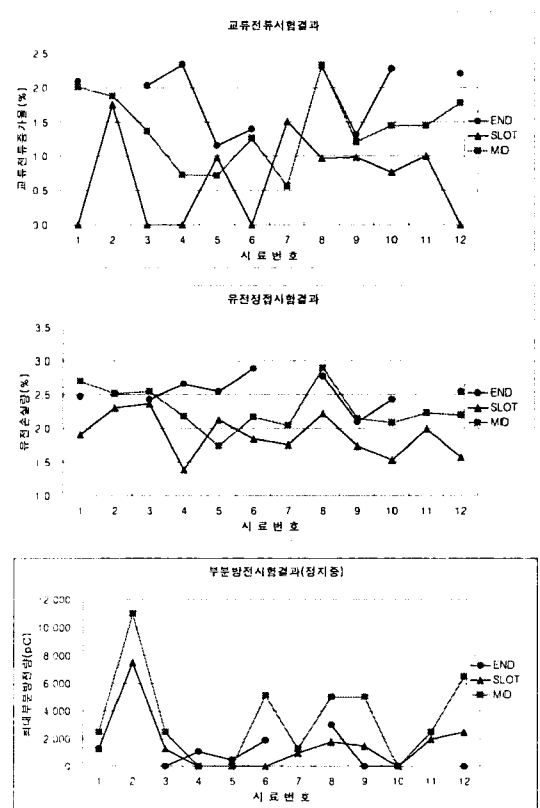
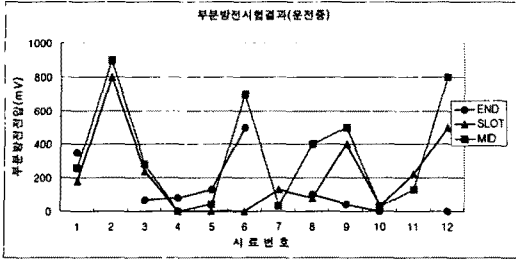


그림 2 절연특성시험 사진





4. 시험결과 분석

4.1 시험결과 분석

교류전류시험결과 각 권선시료별로 구분하여 교류전류증가율(%)을 비교하면 단말권선부는 1.16~2.34(%)로 각 시료에서 모두 높게 나타났고, 권선중양부는 0.57~2.33(%)으로 5,7번 시료를 제외하고, 슬롯인출부 0~1.75(%)보다 높은 값을 나타냈다.

유전정접시험결과 $\Delta \tan \delta$ (%)값은 단말권선부가 2.09~2.89(%)으로 각 시료에서 비교적 높은 값이 나타났고, 권선중양부는 1.74~2.90(%)으로 5번 시료를 제외하고, 슬롯인출부 1.39~2.36(%) 보다 높은 유전손실량을 나타냈다.

부분방전시험결과 정지중 부분방전시험에서는 권선중양부가 1,300~11,000(pC)으로 슬롯인출부 0~7,500(pC), 권선단말부 0~3,000(pC) 보다 각 시료에서 모두 높은 부분방전량을 나타냈다. 운전 중 측정시스템을 이용한 부분방전 시험측정시험에서도 권선중양부가 0~900(mV)로 슬롯인출부 0~800(mV), 권선단말부 0~500(mV)로 정지중 부분방전시험 결과와 유사한 절연특성이 나타났다.

5. 결 론

약 30년간 장시간 운전한 수력발전기 고장자권선을 인출하여, 각 권선을 3개의 부분으로 나누고, 절연열화의 진행정도를 비교해 보고자 실시한 절연특성시험결과

1) 교류전류시험에 의한 교류전류증가율과 유전정접시험에 의한 유전손실량은 절연특성 시험값이 각 권선에서 매우 유사한 분포로 나타나, 전류증가율이 높은 시료는 유전손실량도 높은 특성이 나타났다.

2) 또한, 절연물이 대시간에 의해 영향을 받는 부분 즉, 슬롯인출부와 권선중양부 시료의 절연특성을 비교해보면, 권선중양부의 절연상태가 상대적으로 낮게 나타났다. 이는 처음에 가정하였던 슬롯인출부의 열화진행정도가 여러 가지 열화원인에 의해 다른 부위보다 진전이 많이 되었을 것이라는 내용과 일치하지 않았다. 그리고, 권선중양부의 절연특성값이 낮은 원인은 철심 중양부의 열화산이 슬롯인출부에 비해 느리기 때문에 장기간 열열화에 의한 것으로 판단된다.

3) 정지중 및 운전중 부분방전 센서를 이용한 부분방전

시험결과 시료권선 모두에서 유사한 분포특성을 나타내어, 운전중 부분방전시스템의 측정 신뢰도도 입증할 수 있었다.

4) 향후과제로 금번 시험을 실시한 시료에 대하여 실제 발생가능한 열화조건을 추가하여 열화를 진행함으로써 현재 절연물의 절연특성값과 열화조건 추가 후 나타나는 절연특성값의 변화를 분석하는 것이 필요하겠다.

[참고 문헌]

- [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] IEEE std 286-1975 "IEEE Recommended Practice for Measurement of Power-Factor Tip-up of Rotating Machinery Stator Coil Insulation" 1975.7
- [4] IEC 60270 "High-voltage test techniques-Partial discharge measurements" 2000
- [5] I.M.Culbert, H.Dhirani, G.C Stone "Handbook to Assess The Insulation condition of Large Rotating machines" vol.16
- [6] ANSI/IEEE Std 434-1973(R1993) "대형고전압 기기의 절연시스템에 대한 실험적 평가과정"
- [7] "수력발전기 고장자 권선의 운전중 부분방전 진단시스템 개발" 한국전기연구원 2005