

고정자권선의 절연열화 특성분석

오봉근, 최교남, 한창동, 임기조*
한국수자원공사, 충북대학교*

Analysis of the Insulation aging for the stator winding

Bong-keun Oh, Kyo-nam Choi, Chang-dong Han, Kee-joe Lim*
Korea Water Resources Corporation, Chungbuk National University*

Abstract - Stator winding of hydro generator is gradually deteriorated by multi-stress and steady degradation of insulation results in insulation breakdown. The region where insulation breakdown occurs in stator winding is part where the multi-stress causes the defect of insulation material and electrical stress has been concentrated. Therefore, we judged locations of insulation breakdown to be varied according to various stress factors in service. In this paper, we drew the stator winding of hydro generators which has run for a long time and separated it into 3 parts (central part, end winding part, drawing part) according to the positions laid on the core. We performed electrical and thermal stress on these specimens for 1000 hrs under the same condition, measured the condition regularly and analyzed the insulation status of each winding by performing partial discharge test. In addition, we analyzed the trend of partial discharge concerning specimens that caused the insulation breakdown during aging.

1. 서 론

발전기의 주 절연은 발전설비중에서 가장 중요한 부분중의 하나이고, 운전중 항상 다중 스트레스에 노출되어 있다. 이러한 스트레스들은 절연시스템의 국부적인 전계의 증가를 발생시키고, 절연내력과 절연물의 절연특성을 변화시킨다. 전기적인 스트레스는 결합부분에 부분방전을 일으킬 수 있고, 이것은 절연물질을 침식시키고, 전기적인 트리를 일으킬 수 있는데, 이것은 고체절연물에서 가장 중요한 열화메커니즘으로 자주 언급된다. 그래서 절연물에서 전기적인 스트레스에 기인하는 열화과정을 검출하는 기술은 매우 중요하고, 절연상태를 알 수 있는 특성파라미터를 조사하는 것은 필요하다. 일반적으로, 열화메커니즘에 의해 발생하는 고정자권선의 절연파괴위치는 절연결함이 발생하는 위치에 따라 슬롯인출부, 권선단말부 그리고 권선의 중앙부등의 여러 곳에서 발생하게 된다. 따라서, 장시간 운전한 수력발전기 고정자권선의 일반적인 절연상태를 철심에 놓여진 권선의 위치별로 알아보는 것은 매우 흥미있는 일이다. 본 논문에서는 발전기에서 고정자권선을 인출하여 3부분(권선중앙부, 슬롯인출부, 권선단말부)으로 나누고, 1000hr 동안 전기적 및 열적열화를 인가하면서 주기적으로 부분방전 및 유전정접시험을 실시하였다. 열화 후 절연파괴시료에 대한 절연특성값이 급증한 시료에 대하여 절연특성의 경향을 분석하였다. 부분방전특성 파라미터로는 phase resolved PD pattern을 사용하여 분석하였고, 유전정접시험은 유전정접($\Delta \tan \delta$)을 사용하여 분석하였다. 또한, 열화과정에서 발생한 절연파괴시료에 대해 절연파괴위치를 조사하였다.

2. 본 론

2.1 실험준비

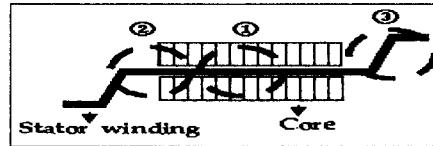
논문에서 사용된 시료는 수력발전기(3.45 kV, 7 MW)에서 인출한 12개의 고정자권선이다. 주절연층은 진공가압합침(VPI)한 에폭시 마야카 재료이며 시료의 운전년수는 30년이다.

2.1.1 시료제작

철심의 슬롯(slot)에 고정되어 운전중인 고정자권선은 여러 가지 stress에 상시 노출되어 있고, 그러한 stress들은 복합적으로 고정자권선에 작용하여 절연열화를 가능시키고 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 진행되어 있을 것으로 판단되었다. 따라서 인출한 고정자권선 12개에 대하여 각 권선의 부분별 열화정도를 알아보고자 각 권선을 3부분으로 나누어 총 30개의 시료를 제작하였다.(6개의 시료는 제작결함으로 실험에서 제외시켰다)

권선의 길이는 총 1,630mm로 기존에 도장되어 있던 반도전페인트

(semiconducting paint), 전계완화페인트(electrical grading paint) 및 단말권선부 페인트를 제거하고, 권선 중앙을 중심으로 3부분으로 나누어 절단하였다. 그리고 중앙부를 ①권선중앙부(M)로 사용하고, 한쪽 끝부분을 ②슬롯인출부(S)로 반대쪽을 ③단말권선부(E)로 시료를 구분하여 제작하였다.[그림1참조]



<그림 1> 고정자권선의 시료

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

2.1.2 시험준비 및 시료의 열화

PD시험회로는 IEC60270규격에 따라 1nF의 커플링커패시터와 디지털 PD 검출기(TE571, Haefely Trench AG)를 이용하여 구성하였다. 시험전압은 4 kV로 하였고, 측정시간은 2분으로 하였다. 유전정접시험은 쇼링브리지(Schering bridge)[5]를 이용하여 1 kV에서 4 kV에서 측정한 값의 차를 유전정접값으로 나타내었다. 시료의 열화를 가속하기 위하여 전기적 그리고 열적열화를 각 시료에 인가하였다. 열적열화는 오븐(oven)을 이용하였으며, 절연등급이 B종이므로 허용최고온도인 130°C를 열화온도로 선정하였다. 전기적 열화는 정격전압의 2배인 7 kV를 선정하였다.

3. 실험결과

1000시간 열화후 PD시험결과가 그림2에 나타나있고, 유전정접결과가 그림3에 나타나있다. 가속열화중 30개의 시료중 7개가 열화중에 절연파괴 되었다. 먼저 각 권선위치별 결과를 분석해 보고, 절연파괴시료에 대한 파괴전 절연특성을 분석하였다.

3.1 권선중앙부

그림2와 5에서 보여진것 처럼, 8M시료의 경우 PD와 유전정접값이 매우 급증하였다. 9M시료는 PD시험에서는 큰 변화가 없었지만, 유전정접시험에서는 다소 증가하였다. 다른 시료에서는 열화후 큰 변화는 나타나지 않았으며, 1000시간 열화후 권선중앙부시료는 절연파괴가 발생하지 않았다.

3.2 슬롯인출부

그림3과 6에서 보여진것 처럼, 200시간 열화후 1S, 2S, 7S, 9S 그리고 12S에서 PD시험결과가 급증하였다. 유전정접시험에서는 1S, 2S, 7S, 9S가 급증하였지만, 12S의 경우 큰 변화가 없었다. 1000시간 열화후 슬롯인출부 절연파괴는 5개 시료(3S, 5S, 7S, 9S, 12S)에서 발생하였다.

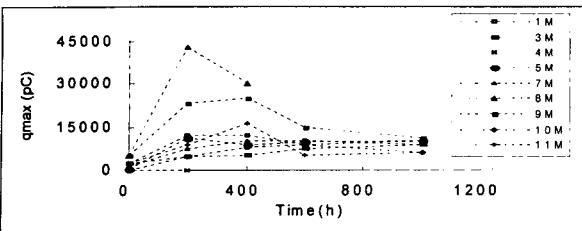
3.3 권선단말부

그림4와 7에서 보여진것 처럼, 1E와 6E 시료에서 열화후 다른 시료에 비하여 PD와 유전정접시험 모두 증가한 특성이 나타났다. 나머지 시료에서 PD는 점차 증가하는 추세를 보였으나, 유전정접결과는 변화가 없었다. 1000시간 열화후 3E와 12E 시료에서 절연파괴가 발생하였지만, 이 시료는 절연파괴전에 절연특성값의 변화는 나타나지 않았다.

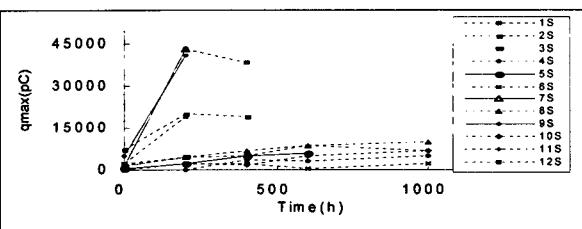
3.4 절연파괴시료 분석

총 7개의 시료가 절연파괴되었다. 시료 위치별로 분석해보면, 권선중앙부에서는 절연파괴가 발생하지 않았고, 슬롯인출부에서 5개, 권선단말부 시료에

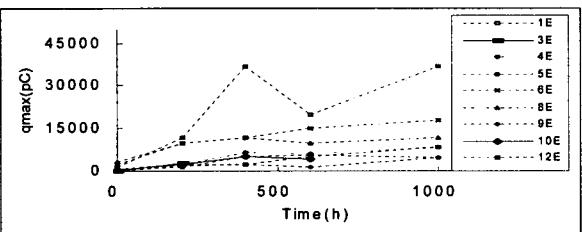
서 2개가 절연파괴 되었다. 따라서 이 절연파괴 시료에 대하여 절연파괴 전에 측정한 PD의 위상분포특성과 유전정접시험결과를 분석하여 보았다.



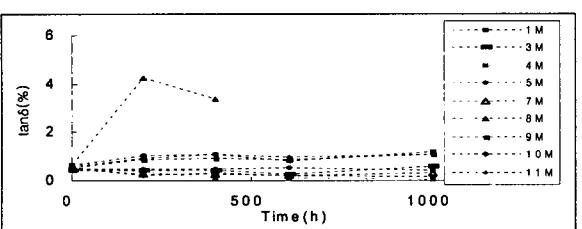
<그림 2> 권선중앙부 부분방전시험결과



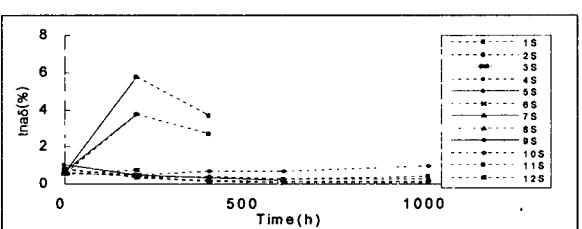
<그림 3> 슬롯인출부 부분방전시험결과



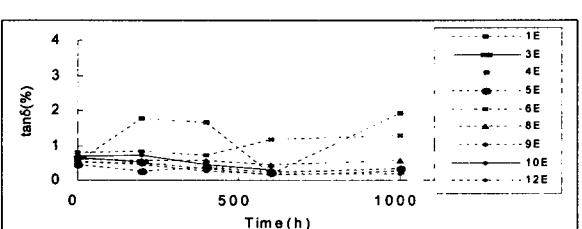
<그림 4> 권선단말부 부분방전시험결과



<그림 5> 권선중앙부 유전정접시험결과



<그림 6> 슬롯인출부 유전정접시험결과



<그림 7> 권선단말부 유전정접시험결과

3.5 PD의 위상분포특성

PD의 위상분포특성은 시험전압 4kV에서 2분동안 측정한 최대부분방전량과 부분방전발생갯수를 나타내었다.

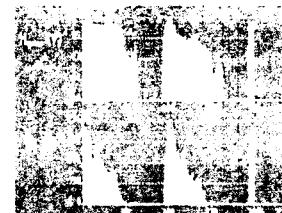
그림 9에서 보여진 것처럼, 절연파괴시료중 7S, 9S, 12S의 부분방전발생위상이 매우 낮은 위상에서 발생하였다. PD 분포는 0도에서 180도 180도에서

270도 사이에서 전체적으로 높게 발생하였고, 크기는 40 nC 이상으로 높게 나타났다.

나머지 시료는 90도 주변과 270도 주변에서 그림8과 같이 분포되었으며, 크기는 2~5 nC이었다.



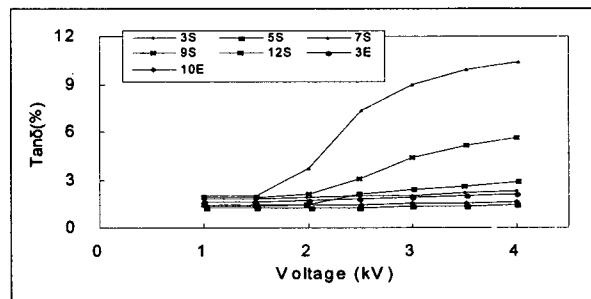
<그림 8> 절연파괴전 부분방전특성 (type 1)



<그림 9> 절연파괴전 부분방전특성 (type 2)

3.6 유전정접시험결과

그림10에서 보여진 것처럼, 7S는 시험전압 1.5kV이후에서 급증하였고, 9S와 12S는 시험전압 2kV이후에서 급증하였다. 나머지 시료에서는 시험전압을 증가하여도 큰 증가가 나타나지 않았다.



<그림 10> 절연파괴전 유전정접시험 결과

위 두 시험결과에서 보듯이 3개의 시료인 7S, 9S, 12S는 PD위상분포 특성과 유전정접시험결과 절연파괴전 급격한 변화가 나타났다. 하지만, 다른 절연파괴시료에서는 파괴전에 절연특성값의 변화를 찾을 수 없었다.

4. 결 론

가속열화 후 30개의 시료중 7개의 시료에서 절연파괴가 발생하였다. 우리는 이 시료들에 대하여 절연파괴전에 나타나는 절연특성값의 변화를 분석하였다. 3개의 시료는 절연특성값의 급격한 변화가 있었으나, 나머지 4개시료는 큰 변화가 나타나지 않았다. 시료의 특별한 변화가 나타난 시료에서는 부분방전이 발생하는 위상이 매우 낮았으며, 부분방전크기는 매우 큰 값이 발생하였다. 또한, 유전정접값도 급격한 변화가 있었다. 그래서, 진단시험만으로는 절연파괴와 관련된 모든 징후를 측정하는데 다소 제한이 있음을 알 수 있으나, 주기적인 절연시험결과 상기와 같은 경향이 발생한다면, 고정자권선에 대한 정밀점검이 필요할 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] I.M.Culbert, H.Dhirani, and G.C.Stone "Handbook to Assess the Insulation Condition of Large Rotating Machines", EPRI EL-5036, Vol 16, June 1989
- [2] B.K Gupta, and I.M.Culbert "Assessment of Insulation Condition in Rotating Machine Stators", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol 7, No. 3, September 1992
- [3] IEC 60270 "Partial discharge measurements", third edition 2000.
- [4] M.Farahani, et al, "Partial discharge and dielectric response behaviour of insulation system for high voltage rotating machines under electrical stress", 2004 Annual report conference on EIDP, 2004
- [5] Hafely Trench AG, Tettex Instruments Division, "partial discharge detector TE 571 operating instructions", Switzerland, 1988.