

# 발전기 고정자 권선 절연재 흡습 특성에 관한 실험적 연구

배용채\*·이대성†·김희수\*·김연환\*·이현\*

## An Experimental Study of Water Absorption Characteristics for Generator Stator Winding Insulation

Y. C. Bae, D. S. Lee, H. S. Kim, Y. H. Kim, H. Lee

**Key Words:** Generator(발전기), Stator Winding(고정자 권선), Insulation(절연물), capacitance(정전용량)

### Abstract

Leaking water coolant into stator electrical insulation is a growing concern for the aging water-cooled generator since leaks in the generator water-cooled stator winding can affect machine availability and insulation life. But a domestic techniques of such field are insufficient and depend wholly on GE or TOSHIBA technique. Therefore this paper introduces measuring principle and developed measuring system, which has been used to detecting wet absorption. We accomplished the experiment with a stator promotion of virtue which is used in actual power plant. Also, Experimental method of generator stator winding, which is investigated into wet absorption test.

### 기호설명

$C$  : 정전용량  
 $\epsilon$  : 유전율  
 $\epsilon_0$  : 진공의 유전율  
 $\epsilon_r$  : 비유전율  
 $Q_1, Q_2$  : 전하량

### 1. 서론

발전소의 대용량화에 따라 300MW급 이상의 발전기 고정자 권선의 냉각 방식으로 수냉각 방

식을 채택하고 있다. 수냉각 방식은 공랭식이나 수소 냉각 방식에 비해 냉각 효율이 양호하나 발전기 운전중 고정자 권선 내에 냉각수가 흡습되는 경우 절연물의 절연 내력이 저하되고 주절연 파괴와 같은 2차 파급 사고를 야기 시킬 수 있다. 실제로 최근 국내 발전소에서 발전기 고정자 권선의 흡습으로 인한 사고가 발생되고 있으며 이로 인한 경제적 손실이 매우 크다. 따라서 국내외적으로 수냉각 발전기의 냉각수 흡습 및 누수에 대한 관심이 높아지고 있으며, GE사를 비롯한 웨스팅하우스, 도시바 등과 같은 제작사와 미국 전력회사(EPRI: Electric Power Research Institute)를 비롯한 연구 기관에서의 관련 연구가 진행되고 있다.

미국의 GE(General Electric)사에 따르면 자사에서 제작, 운전되고 있는 발전기 권선을 대상으로 흡습 및 누수 시험을 수행한 결과, 시험 권선 중 약 50% 이상이 누수 및 흡습되어 있었다고 보고 된 바 있다. 따라서 GE사와 일본의 Toshiba는 각 권선 절연물

† 논문발표자의 소속 : 전력연구원

E-mail : dsleenvh@kepri.re.kr

TEL : (042)865-5315 FAX : (042)865-5314

\* 저자의 소속 : 전력연구원

에 대한 흡습 여부를 시험, 진단하기 위하여 “권선 정전용량 측정장치”를 개발하여 권선에 대한 Capacitance Map을 통하여 발전기 권선의 흡습 진단에 적용하고 있다. 국내에서도 GE사의 용역으로 S 발전소에서 권선 흡습 시험을 수행한 바 있으며, 도시바에서 B 발전소의 시험을 제안한 바 있으나 외국 제작사의 시험에 따른 용역 비용이 많이 소요되어 용역 계약이 이루어지지 않았다.

전력 연구원에서는 발전기 고정자 권선의 누수/흡습 진단 시스템 개발의 일환으로, 복합 재료로 이루어져 있는 권선 절연물에 대한 흡습 실험을 수행하였다. 즉, 발전기 고정자 권선 모델 및 조건에 따라 시험 결과가 달라질 수 있기 때문에 국내에서 주로 운전되고 있는 권선의 절연물들을 대상으로 흡습 시험을 수행한 것이다. 본 흡습 실험 결과를 통하여 발전소에서 운전되고 있는 발전기 고정자 권선의 흡습 진단의 신뢰성을 증진시킬 수 있으리라 기대된다.

## 2. 이론 정리

### 2.1 정전용량 및 유전율

전기 공학에서 가장 기본이 되는 양은 전하 (electric charge), 또는 전기량(quantity of charge)이며, 전하에는 양전하와 음전하가 있으며 단위로는 쿨롱(coulomb)을 사용한다. 어떤 절연체 속에서  $Q_1[C]$ 과  $Q_2[C]$ 의 전하가  $r[m]$  떨어져서 존재할 때의 전기력은

$$f = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon r^2}$$

이 되며 여기서  $\epsilon$ 을 그 절연체의 유전율 (dielectric constant)이라 하여

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_s$$

로 표현된다. 여기서  $\epsilon_0$ 는 진공의 유전율,  $\epsilon_s$ 는 절연체의 비유전율이다. 정전 용량  $C$ 의 크기는 서로 맞선 양극판의 면적  $S$ , 양극판간의 거리  $d$ , 양극판 간에 넣어진 유전체의 종류에 따라 결정된다. 즉,

$$C = k \frac{\epsilon S}{d} [pF]$$

이 된다. 이때  $k$ 는 비례 상수,  $\epsilon_s$ 는 절연체의 비유전율이다. 위 식으로부터 정전 용량은 극판의 면적이 클수록, 양극판 사이의 거리가 가까울수록, 또 양극판 사이에 넣은 유전체의 유전율이 클수록 크다는 것을 알 수 있다.

### 2.2 권선 흡습 진단

발전기 고정자 권선의 흡습 시험 및 진단에 사용되는 기본 원리는 복합 재료인 권선 절연물과 냉각수의 유전 상수가 다르다는 것을 이용한 것이다. 유전율(誘電率)이  $\epsilon$ 인 재료를 극판 사이에 넣으면 정전 용량은 공기일 때보다  $\epsilon$ 배 커진다. 따라서 발전기 운전중 냉각수가 고정자 권선 절연물 내에 흡습되면 건전한 절연물이 가지고 있던 유전 상수가 냉각수로 인하여 증가하는 원리를 이용한다.

## 3. 장치 구성 및 실험

### 3.1 측정 장치

발전기 고정자 권선 절연물의 정전용량을 측정하기 위하여 본 실험에 사용된 장치는 사진 1과 같다. 본 장치는 ‘발전기 누수/흡습 시험 장치 개발’과 관련하여 실험실에서 시험 제작한 것으로써 측정값의 신뢰성을 검증하기 위하여 10pF부터 100pF까지의 콘덴서를 이용하여 측정값과 비교 검증하였다. 그림 1에서 보는 바와 같이 측정값과 기준값이 잘 일치함을 알 수 있다.



Photo. 1 Measurement equipment

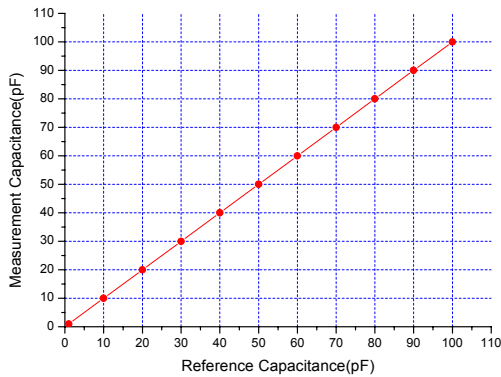


Fig. 1 Verification of test equipment

3.2 실험

본 연구에서는 실제 발전소에서 사용되는 고정자 권선의 냉각수 흡습에 대한 정전용량의 변화 상태를 파악하기 위하여 다음과 같은 실험을 수행하였다.

3.2.1 권선 모델별 시편 흡습 특성 실험

국내에 운전되고 있는 주요 발전기의 고정자 권선 절연물의 냉각수 흡습 특성을 파악하기 위하여 모델별 권선 절연물 시편을 제작하였다. 즉, 그림 2에서 보는 바와 같이 300MW A사 시편과 500MW(회색) 및 1000MW(노란색) G사 시편을 제작하여 수조에 순수를 채워 제작한 시편들을 넣어 시간에 따른 흡습 정도를 비교 분석하였다. 일부시편은 흡습을 용이하게 하기 위하여 시편의 옆면에 일정 부분의 흠집을 내었다.



Photo. 2 Insulation specimens of stator winding

그림 2는 실험 결과를 비교한 것으로써 그림

의 주석에서 5-DL은 500MW 권선 시편의 옆면에 흠집을 낸 시편을, 5-N은 정상 시편을 나타낸다. 3-DL2는 300MW 권선 시편으로써 초기에는 정상 시편으로 판단하여 실험을 하였으나 실험 진행중 정전용량의 값이 증가하여 점검한 결과 시편 옆면에 판독하기 어려운 흠집(scratch)이 존재하여 DL2라고 표기하였다. 또한 10-N은 1000MW 정상 시편을 나타내며 시편의 옆면에 흠집을 낸 시편을 10-DL이라 표기하였다.

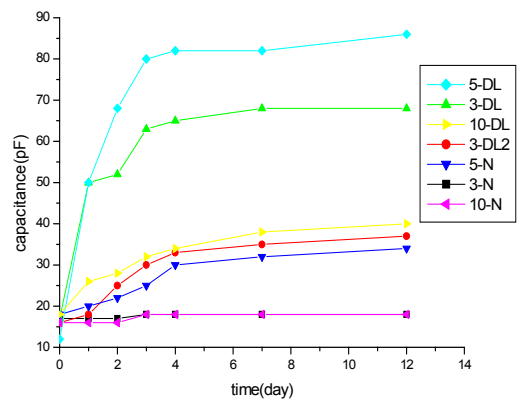


Fig. 2 Result of water absorption for insulation specimen by generator model

그림에서 보는 바와 같이, 권선 시편에 따라 약간의 차이는 있으나, 초기 흠집이 존재한 시편의 경우 5~7일이 경과한 후 흡습이 거의 완료되었으며 그 이후로는 비교적 일정한 값을 보였다. 흡습은 시편의 박리 정도에 따라 다르나 대체적으로 G사의 500MW 시편이 비교적 빨리 흡습된 반면 300MW 시편과 1000MW 시편의 흡습은 늦게 일어났다. 그림에서 3-DL의 경우 박리 정도가 5-DL의 경우 보다 커 정전 용량의 변화가 크게 나타났다. 정상 시편의 경우 500MW 시편은 4일이 경과될 때까지 흡습이 빨리 이루어 졌으며 그 이후로도 계속 증가되었다. 하지만 300MW 및 1000MW 시편의 경우 정전 용량의 변화가 거의 일어나지 않았으며 실제 흡습 정도를 측정하기 위하여 정밀 천칭을 이용하여 흡습 전후의 무게를 측정하였으나 변화가 없었다. 본 실험 중 500MW 정상 시편의 실험 결과를 보아 전체적으로 시편 표면까지 흡습될 때 약 15~20pF의 변화를 보이는 것을 알 수 있었다.

3.2.2 절연물의 흡습 깊이에 대한 영향 실험

흡습 깊이에 따른 정전 용량의 차이를 파악하기 위해서 각 두께별로 제작된 시편을 이용하여 동일 량의 water film을 흡습 깊이에 따라 삽입하여 흡습전과 흡습후의 정전용량을 비교하였다. 즉, 시편의 전체의 두께는 4.5mm로 일정하게 유지하고 흡습 깊이를 변화 시키면서 정전용량을 측정 하였다. 그림 3은 실험 결과를 나타낸 것으로서 건조 시편은 이론적으로 두께가 일정할 경우 정전용량 값도 일정하게 유지되어야 하는데 실제로 측정한 결과 두께에 따라 약간의 차이를 보였다. 이는 측정 시 시편의 표면 상태, air gap 등의 오차 요인에 의해 발생된 것으로 생각된다.

또한 권선 표면에서 2mm까지는 5pF 정도의 정전용량 차이로 민감도가 크게 나타나서 비교적 쉽게 흡습 여부를 판단할 수 있었으나 2mm 이상부터는 정전용량의 변화 폭이 1~2pF 정도로 낮게 변화하여 물의 흡습에 의한 변화인지를 구분하기가 어려웠다. 이를 통하여 프르브의 주위에 발생하는 eddy field에 의한 영향과 측정 위치부터의 깊이에 따른 전기력선의 민감도에 따라 동일 량의 물이 흡습되더라도 측정값의 달라진다는 것을 알 수 있었다.

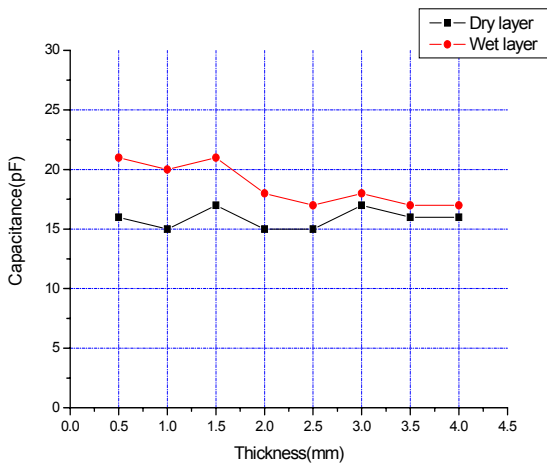


Fig.3 Comparison of capacitance for a thin, wet layer within dry insulation

3.2.3 압력 수조 내 권선 흡습 실험

발전소에서 운전 중인 정상 고정자 권선의 운전 중 냉각수에 의한 흡습 정도를 파악하기 위하

여 실제 권선에 대한 흡습 시험을 수행하였다. 실험용 권선은 300MW A사 권선 시편, 500MW 및 1000MW G사 권선 시편, 그리고 500MW W사 권선을 사용하였다.



Photo. 3 Experimental set-up

그림 4는 각 시편에 대한 흡습 실험 결과이다. 사진에서 권선의 길이는 각각 40cm이며 각각 5cm씩 나누어 위치를 표기하였다. 30일 동안 2.5Kg/cm<sup>2</sup>의 압력으로 권선에 냉각수를 흡습 시킨 결과 권선 시편에 대한 앞의 실험 결과와 같이 500MW 권선에 대한 흡습이 가장 빨리 일어났으며 300MW 권선의 경우 거의 흡습이 이루어지지 않았다. 한편, 본 실험의 경우 정상 권선의 흡습은 매우 천천히 일어난 것을 보아 진동으로 인한 권선 내의 절연물과 동선의 박리 현상 등의 손상을 입지 않은 경우에는 비록 권선 클립 내부 브레이징의 손상이 존재한다고 할지라도 단기간에 권선이 흡습되지 않는으리라 판단된다.

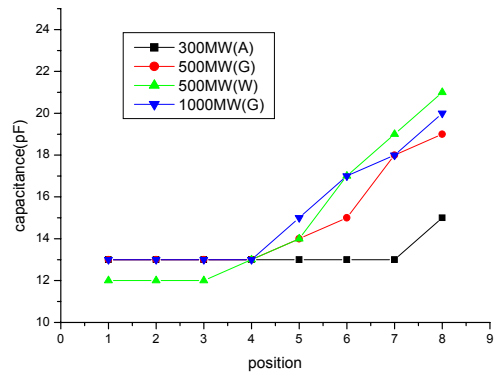


Fig. 4 Result of water absorption for stator windings in power plant

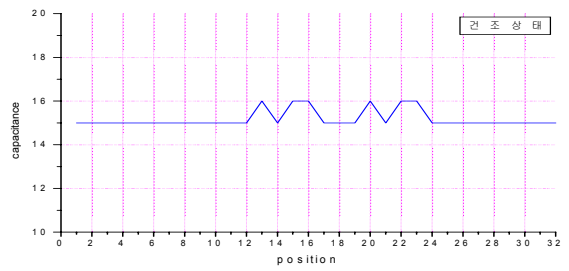
3.2.3 냉각수 유동에 따른 권선 흡습 실험

발전기 고정자 권선에 대한 전 권선의 정전 용량의 분포와 권선 내에 냉각수가 존재할 때, 그리고 냉각수가 흐를 때의 정전용량의 변화 상태를 파악하기 위하여 H발전소에서 가져온 A사의 300MW 권선과 사진 4와 같이 진동 및 누수 실험을 위하여 제작한 500MW 권선을 대상으로 권선 단말 부분은 냉각수의 유동을 위하여 호스를 순환 펌프 및 탱크에 연결시켜 실험하였다.

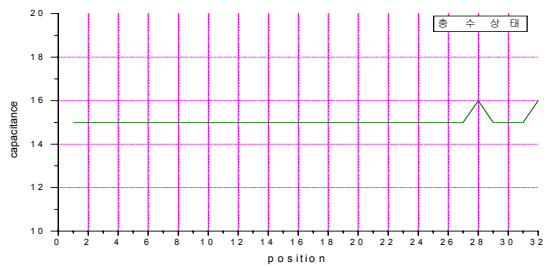


Photo. 4 Test equipment of vibration and wet absorption for winding

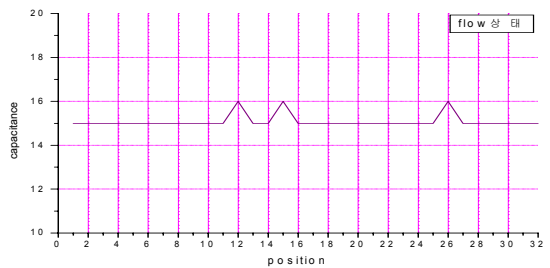
냉각수는 진동 및 누수 시험장치에 있는 냉각수 공급 장치를 이용하였으며 냉각수는 발전소에서 사용하는 순수를 사용하였다. 그림 5에서 1~5번은 터빈측, 26~29번은 여자기측 권선 단말부를 표시하고 6~28번은 코일 내의 권선을 나타낸다. 권선 건조상태, 권선 내부의 냉각수 충수 상태 및 유동 상태에 따른 흡습 시험 결과, 그림에서 보는 바와 같이 정전용량의 변화가 거의 없었다. 따라서 발전소 정기 계획 예방 점검시 누수 시험을 위하여 권선 내의 냉각수를 배수, 건조시키는 과정과는 상관없이 고정자 권선 흡습 시험을 수행하여도 결과에는 무관함을 알 수 있었다. 또한 500MW G사의 경우 흡습 실험 결과 위치에 따라 측정값에 변화가 없었고 꺾임부에서도 측정값에 차이가 없었다. 현재 측정 위치는 꺾임부로 일정하게 정해져 있지만 흡습은 clip부에서부터 흡습이 진행 되므로 꺾임부가 아닌 clip부에 가까운 위치를 정해서 모든 권선에 대해서 측정해야 할 것으로 사료된다.



(a) Dry condition



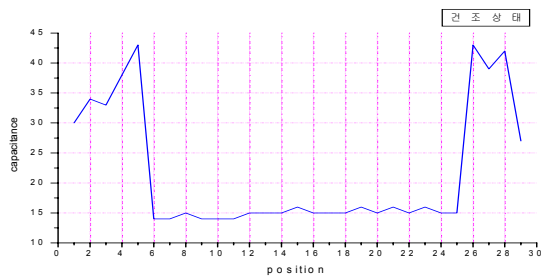
(b) Non-water flow condition



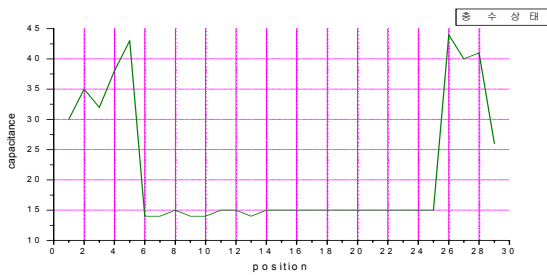
(c) Water flow condition

Fig. 5 Capacitance of 500MW winding by position

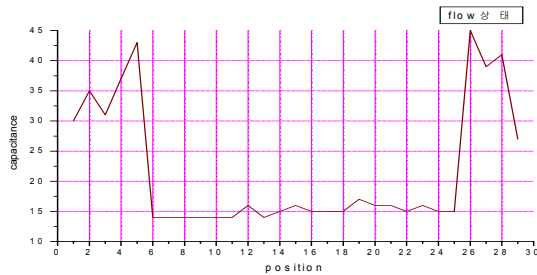
한편, 그림 6은 300MW 권선에 대한 시험 결과로써 권선의 직선부와 권선 단말부는 정전 용량이 다르며 특히 본 연구에서 관심이 되는 권선 흡습 시험 위치인 권선 단말부 꺾임부에서의 위치에 따른 정전 용량의 값이 달라지므로 측정 시 유의하여야 함을 알 수 있다. 즉, 본 모델의 권선 단말 부에서의 흡습여부를 진단하기 위해서는 각 권선의 측정위치를 정확하게 지정할 필요가 있다는 것을 알 수 있었다.



(a) Dry condition



(b) Non-water flow condition



(c) Water flow condition

Fig. 6 Capacitance of 300MW stator winding by position

#### 4. 결론

본 연구에서는 고정자 권선의 흡습 실험을 통하여 국내에서 주로 운전되고 있는 발전기 모델별 권선 절연물에 대한 흡습 특성과 권선 흡습 시험 시 고려해야 할 인자에 대하여 고찰하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 500MW급 고정자 권선이 다른 모델에 비하여 흡습이 가장 빠르게 진행되었다. 또한, 정상 권선의 흡습은 천천히 일어난 것을 보아 진동으로 인한 권선 내의 절연물과 동선의 박리 현상 등의 손상을 입지 않은 경우에는 비록

권선 클립 내부 브레이징의 손상이 존재한다고 할지라도 단기간에 권선이 흡습되지는 않으리라 판단된다.

- 2) 권선의 흡습 깊이에 대한 실험 결과, 깊이가 커질수록 건전 시편과 흡습 시편 사이의 정전 용량 차이가 작아졌다. 이는 Eddy field 및 민감도의 차이로 판단되며 향후 이를 고려하여 시험 장치를 보완하여야 할 것으로 판단된다.
- 3) 권선 내 건조, 냉각수 충수 및 유동 상태에서의 정전 용량 값이 변하지 않음을 보아 흡습 시험은 냉각수 운전 조건에 영향을 받지 않음을 알 수 있다.
- 4) G사 500MW 권선의 경우, 전 권선의 정전용량의 값이 거의 일정하게 나온 반면 A사 권선의 경우, 권선 단말부에서의 위치에 따라 정전 용량이 변화함을 보아 흡습 시험 시 측정 위치에 대한 세심한 주위가 필요하다.

#### 참고문헌

- (1) D. J. Stamon, 1992, "Diagnosing and Repairing Water Leaks in Stator Windings", G.E. company Review, Schenectady, New York
- (2) Y. C. Bae, 2000, "Evaluation of Mechanical Integrity for water Cooled Generator Stator Windings in Power Plants", Proceedings of 2nd Asia-Pacific Conference on System Integrity and maintenance, China, pp.75~80
- (3) Y. C. Bae, 1999, "Leak Test and Repair of Generator Stator Windings", KEPRI
- (4) J. Stein, N.E. Nilsson, 1995, "Monitoring and Diagnosis of Turbine-Driven Generators", EPRI