

## 흡습측정장치를 이용한 정전용량 변화 분석

# A Study on the Capacitance Change Analysis by Using Water Absorption Detector

\*#김희수<sup>1</sup>, 배용채<sup>1</sup>, 이육륜<sup>1</sup>, 이두영<sup>1</sup>

\*#H. S. Kim<sup>1</sup>(hskim@kepri.re.kr), Y. C. Bae<sup>1</sup>, W. R. Lee<sup>1</sup>, D. Y. Lee<sup>1</sup>,  
<sup>1</sup> 한국전력공사 전력연구원

Key words : Capacitance, Water Absorption Test / Diagnosis, Capacitance Mapping Plot, Capacitance Diagram, Normal Probability Plot

### 1. 서론

발전기 평균 운전 수명은 대략 20년으로 추정하고 있다. 운전 중인 수냉각 발전기로부터 수집된 시험과 검사결과 뿐만 아니라 과거이력 데이터를 검토한 결과, 발전기 고정자 권선의 수명과 신뢰성에 영향을 미치는 중요한 2가지 요인은 오일의 오염과 고정자 권선의 누설임이 판명되었다. 수냉각 발전기는 기존의 공기 냉각식 발전기보다 동일 크기 당 보다 많은 출력을 생산한다. 그 결과, 기존의 발전기보다 훨씬 큰 전자기력이 고정자 권선에 작용한다. 슬롯과 단말 권선에는 이러한 증가된 힘에 견딜 수 있는 고정자 권선 구속 시스템이 설계되어 있다. 권선 구속 시스템에 임의의 부분에 대한 열화에 의해 냉각수 계통의 손상과 고정자 권선 절연 마모의 가속화를 유도한다. 따라서, 슬롯과 단말 권선 구속 시스템이 잘 유지되는 것이 중요하다. 또한, 냉각수 누출로 인해 주절연이 파괴되지 않도록 냉각수 계통의 건전성이 유지되는 것도 중요하다. 발전기 고정자 권선 냉각수 계통에 대한 누수 사례는 여러 번 발생하였으며 일반적으로, 발전기 운전에는 큰 영향을 미치지 않으며 major maintenance 없이 보수할 수 있다. 그러나 고정자 권선 절연체 즉 series loop 혹은 actual groundwall로 냉각수 침투 경우에는 주절연체에서의 hipot failure의 원인을 제공하므로 물의 존재는 고장의 중요한 인자임에는 틀림없다. 이러한 경험의 결과로서, 고정자 권선 주절연 특히 stator bar end ams에 영향을 미치는 누수를 막는데 많은 노력이 필요하다는 것은 명백하며 매우 작은 누수라도 치명적일 수 있다. 누수는 일반적으로 serires 혹은 phase connection 부에서 발생하므로 고정자 권선을 조립하기 전에 누설에 대해 엄격하게 시험하며 권선의 건전성을 확인하기 위해 조립 후에도 모든 권선에 대해 시험하고 있다.<sup>(1)</sup>

흡습 시험은 절연물의 정전용량을 측정함으로써 절연물의 냉각수에 의한 흡습 정도를 알 수 있는 효과적인 방법으로서, 이 방법은 절연물 표면에 측정용 전극 판을 붙여 절연물과 물과의 유전을 차이를 이용해 얻은 데이터를 통계적으로 처리하여 흡습 정도를 확인하는 방법이다. 만약 어떤 곳의 측정값이 명확한 값을 넘어서면 냉각수가 절연물 내로 누설되고 있다는 것으로 판정한다. 즉 측정된 각 권선의 정전용량의 평균값을 구해 여기에 3배의 표준편차 이상이 되는 것은 흡습 상태로 판정한다.<sup>(2)</sup>

GE사에서 수행한 발전기에 대한 실험에서 알 수 있듯이(그림 1 참조), 헬륨가스 추적시험에서는 65개 중에서 49개소가 통과하지 못한 것으로 미루어 보아, 매우 높은 민감도(누설감지율 85%)를 보임을 알 수 있으며 흡습시험(capacitance mapping test)에서는 73개 중에서 20개소에서 흡습된 권선을 감지하였으며 이와는 반대로, 전기적 시험에서는 125개 중에서 11개소만을 감지하였음을 알 수 있다. 따라서 전기적 시험 보다 기계적 시험이 보다 보수적인 발전기 고정자 권선에 대한 건전성 평가 시험임을 알 수 있으며 이러한 수냉각 발전기의 지속적이면서 신뢰성 있는 운전을 위해서는 다음의 권고된 시험 계획을 준수하여야 한다.(Table 1 참조) 본 논문에서는 발전기 고정자 권선을 대상으로 흡습 측정 장치를 활용하여 권선의 흡습 여부를 진단하는 사례에 대해 기술하고자 한다.

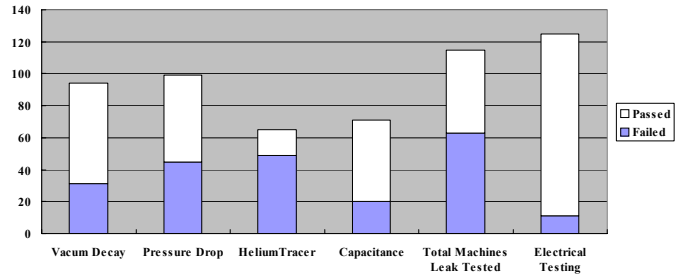


Fig. 1 1991 through 1993 testing summary

Table 1 Leak testing methods

Test Description	Test Frequency		
	Outage		
	Weekly	Minor	Major
STV Flow/Liquid Level Detector	○		
Vacuum Decay / Pressure Drop		○	○
Helium Tracer Gas			
A. Rotor in Place(optional)		○	
B. Rotor Removed			○
Capacitance			○

### 2. 흡습 시험 및 진단<sup>(3)</sup>

권선 흡습 시험 장치를 이용하여 'A' 화력 발전기 고정자 권선에 대해 2006년 7월과 2007년 5월에 정전용량을 측정하였으며 흡습 시험 결과는 Fig. 2와 같으며, 정전용량 분포도(capacitance mapping plot), 정전용량 선도(capacitance diagram), 정규 확률 선도(normal probability plot) 그리고 상자 선도(box plot)와 같은 다양한 확률 진단 방법을 활용하여 흡습 여부를 진단하였다. Fig. 3은 2006년과 2007년에 측정된 정전용량을 비교한 선도로서, 정전용량 분포 경향이 모든 권선에서 비슷하게 조금씩 증가된 것을 알 수 있으며 또한 23, 24번 권선에서는 1년 전에 측정된 값보다 정전용량이 많이 증가하였음을 확인할 수 있다. 이러한 진단 방법을 통한 흡습 시험 데이터 분석 결과, 대부분의 발전기 고정자 권선이 허용치를 만족하고 있으나 여자기측 상부 23번 권선(CE\_TOP\_OUT)에서 3σ를 벗어난 지역에 위치하고 있다. 이는 흡습이 의심되는 상태임을 의미하며 권선 내부에서의 냉각수 누설로 인한 권선 흡습이 진행되고 있음을 예측할 수 있다.

### 3. 소형 흡습 센서를 이용한 정밀 진단

기존의 흡습 측정 시스템은 수냉각 발전기 고정자 권선의 흡습 여부를 판단하기 위해 정전용량을 측정하는 장치로서, 발전기 고정자 권선의 코어부 가까이에서만 정전용량을 측정할 수 있으며 절연 바인더로 묶여져 있는 부분은 센서의 크기 제한으로 인해 측정이 불가능하였다. 이러한 단점을 극복하고 냉각수 누수로 인해 냉각수 압력과 모세관 현상에 의해 흡습이 진행될 수 있는 단말 권선의 전 부위를 측정할 수 있는 흡습 측정용 소형 센서를 설계, 제작하여 시험을 수행하였다. Fig. 4는 기존의 흡습 측정 센서와 새로 제작한 소형 센서와의 비교 및 측정 장면으로서, 소형 센서 면적은 기존 센서 면적의 약 0.5배 정도이다. 따라서

동일한 권선에 대한 정전용량 측정치도 대략 0.5배 정도 낮게 측정된다. 즉, 소형 흡습 센서의 민감도가 낮아지는 단점이 있지만 반면에 측정할 수 없었던 단말 권선의 거의 모든 위치를 측정할 수 있는 장점뿐만 아니라, 냉각수 흡습이 발견되는 경우, 정기적 흡습 측정을 통해, 발전기 운전에 따라 진행되는 냉각수 흡습 상태의 진행 상황을 추적 및 관리할 수 있는 커다란 장점이 있으며 또한, 냉각수가 공급되기 시작하는 clip-to-strand 이후부터 코어부 안쪽까지 여러 위치를 측정할 수 있게 됨으로써 흡습 진단의 신뢰도를 향상시킬 수 있는 커다란 장점이 있다.

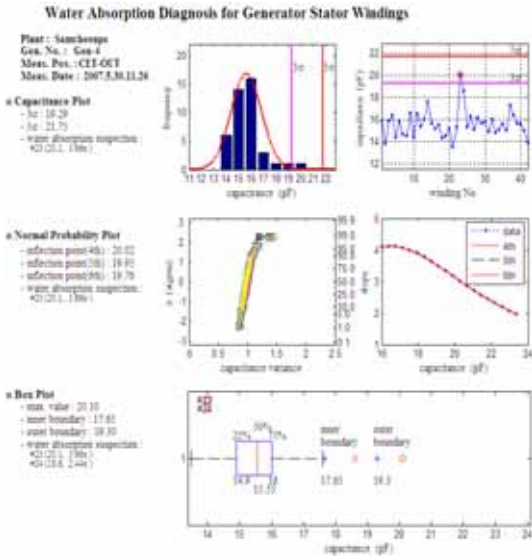


Fig. 2 Stochastic diagnosis with capacitance of top-bar(2007)

Fig. 2로부터 기존의 흡습 센서를 이용한 ‘A’ 화력 발전기 고정자 권선에 대한 흡습 시험 결과에서 알 수 있듯이, 여자기 측 상부권선 23번 권선은 정규분포에서  $3\sigma$ 를 초과하는 결과가 나왔다. 이는 흡습이 의심되는 결과로서, 추후 흡습 시험 및 진단을 통한 지속적인 관리가 필요하다고 판단된다. 그러나 실제 발전기 고정자 권선의 내부 및 절연물, 그리고 표면의 상태에 따라 정전용량의 크기가 변화할 수 있으므로 보다 정밀하고 신뢰성 있는 진단을 필요로 하는 경우가 있다. 특히 흡습이 의심되어 정비 여부를 판단하거나 향후 정비를 계획하여야 할 경우에는 신중한 판단이 요구된다. 따라서 새로 설계, 제작된 소형 흡습 센서를 이용하여 권선의 여러 위치에 대한 정전용량을 측정함으로써 보다 신뢰성 있는 흡습 진단을 수행하였다.

흡습이 의심된 권선 주위를 중심으로 소형 흡습 센서를 이용하여 상부 23번 권선을 포함한 주위 권선에 대한 각 위치에서의 정전용량을 측정하는 정밀 흡습 진단을 수행하였다. Fig.5와 같이, 흡습이 의심되는 여자기 측 23번 권선 주위의 21~25번 권선과 각 권선의 단말 부에서 철심까지 총 40 포인트에 대한 정전용량을 측정하였으며 Fig. 6에는 측정 지역에 대한 정전용량을 도시하였다. 그림에서 보이는 3, 8, 13, 18, 23, 28, 33번이 23번 권선에서의 계측한 정전용량으로서, 이웃한 다른 권선에서의 정전용량보다 월등하게 높게 나타남을 알 수 있다. 본 결과를 통해 여자기 측 23번 권선에서는 흡습이 진행되어 가고 있음을 예측할 수 있다.

4. 결론

기존의 흡습 측정 방법과 동일한 방법이지만 단지 센서의 면적을 축소시켜 측정하기 어려운 단말 권선의 정전용량을 길이 방향으로 측정하였다. 이와 같이 수냉각 발전기 고정자 권선의 다양한 위치에서 흡습 여부를 측정하여 진단함으로써 보다 정확한 흡습 진단이 가능하게 되었으며 또한 발전기 운전 에 따른 냉각수 흡습의 진행 상황을 파악할 수 있게 되었다.

참고문헌

1. GE Power Generation, Technical Information Letter - 1098, 1993
2. 김희수, 배용채, 기창두, “발전기 고정자 권선의 정전용량 측정을 통한 흡습 진단 방법에 관한 연구”, 한국정밀공학회 논문지, pp50-57, 2006
3. 김희수, 배용채, 이두영, 이대성, “정전용량 이론을 이용한 흡습 측정 장치 개발”, 한국정밀공학회 춘계학술대회, pp325-326, 2007

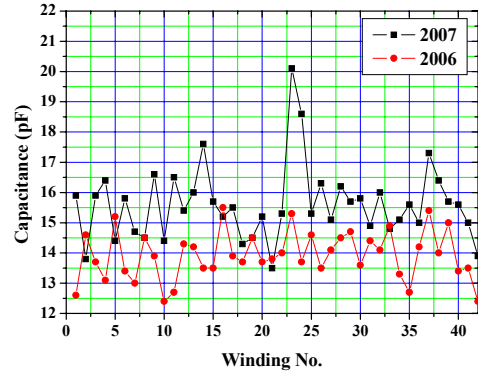


Fig. 3 Comparison with capacitance change of top-bar



Fig. 4 Comparison of sensors & measurement

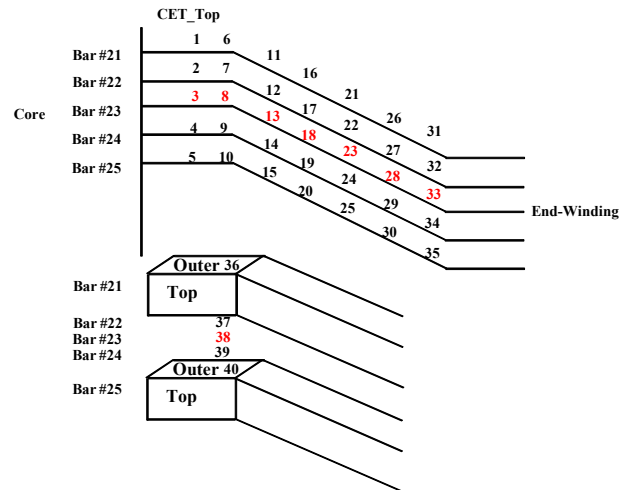


Fig. 5 Water absorption measurement along end winding bar

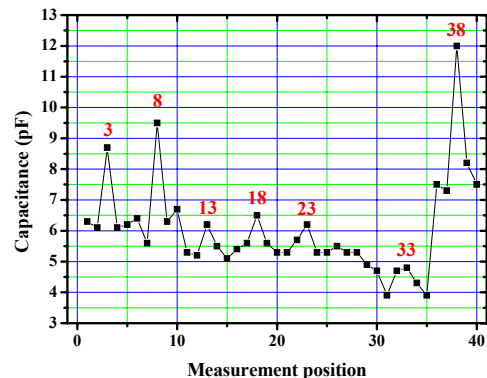


Fig. 6 Capacitance change along end winding bar