

발전기 고정자 권선의 흡습 진단

배용채 · 김희수* · 이두영(한전 전력연구원)

A Study on the Diagnosis for Water Absorption of Generator Stator Windings

Y. C. Bae(KEPRI), H. S. Kim(KEPRI) and D. Y. Lee(KEPRI)

ABSTRACT

Water leak for the water-cooled generator stator windings affects seriously the availability and the reliability of power plants. Generally, water absorption test is conducted in the power plant during outage in order to confirm if leak part is in the bars or not. In this paper, it is described that the capacitance of winding bars is measured by using the developed water absorption instrument system and the water absorption of winding bars is evaluated by using the stochastic methods. The good results by proposed diagnosis technique can be got. It is expected that the reliability of diagnosis for water absorption is increased if the proposed methods are applied to evaluate the water absorption of stator winding bars.

Key Words : Stator Winding(고정자 권선), Water Absorption(흡습), Stochastic Evaluation(통계학적 평가)

1. 서론

발전소에서 운전되고 있는 대용량 발전기의 고정자 권선에서 발생하는 열을 냉각시키기 위하여 순수를 사용하고 있다. 이러한 발전기 고정자 권선에 대한 수냉각 방식은 공랭식이나 수소 냉각 방식에 비해 냉각 효율이 높은 장점을 가지고 있으나 발전기 운전 중 고정자 권선 내에 냉각수가 흡습되는 경우 권선 절연물의 내력이 저하되고 주절연(groundwall insulation)이 파괴되어 2차 파급 사고를 유발시킬 수 있다. 최근에 국내 발전소에서 빈번하게 발생하는 발전기 고장 사고의 주요 원인으로 발전기 고정자 권선의 절연파괴를 들 수 있으며 이는 발전기 고정자 권선 브레이징 재질 및 동도체의 냉각수에 의한 부식, 발전기 운전중 항상 발생하는 전자력에 의한 진동 등이 원인이 되어 누수의 경로를 만들고 냉각수가 권선 절연물에 흡습되어 발생된다. GE사는 발전기 고정자 권선 절연물과 동도체 사이의 정전용량을 측정하고 그 결과에 대한 분포도(capacitance map)를 작성하여 권선 절연물의 흡습 여부를 진단하고 있으며 허용치를 넘는 권선에 대해서는 1년 이내에 권선을 교체하는 것이 바람직하다고 권고하고 있다.⁽¹⁾ 전력연구원에서는 발전기 고정자 권선 흡습 시험 장치를 개발하여 발전소의 발전기 고정자 권선에 대한 흡습 시험에 활용하고 있다.⁽²⁾ 본 논문을 통하여 발전기 고정자 권선 흡습 측정 및 진단 기법에 대한 제안과 전력연구원에서 개발된 발전기 고정자 권선 흡습시험 장치 (Gen-SWAD I : Generator Stator Water Absorption Detector I)를 이용하여 실험 및 실제 발전소 적용 데이터를 이용하여 분석하였다.

2. 흡습 시험 및 진단 사례⁽³⁾

발전기 고정자의 전 권선에 대한 정전용량을 측정하여 평균치와 상호 비교함으로써 흡습 여부를 진단한다. 권선의 정전용량이 정규분포를 따른다는 가정 하에서 정상 권선이 3σ와 5σ한계를 벗어날 확률은 각각 0.26%, 0.00005%이다. 정규분포의 1σ한계와 3σ한계 내의 분포에서 1σ내에 존재할 확률이 68%, 3σ내에 존재할 확률이 99.74%이므로 발전기 고정자 권선에 대한 진단 시 3σ한계를 벗어난 권선은 정상이 아님을 예측할 수 있다. Fig. 1(a)는 발전기 고정자 권선 절연물 각각에 대한 흡습 상태를 파악하기 위하여 각각 권선에 대한 정전 용량을 측정하여 이들에 대한 정규 분포 곡선을 나타낸 capacitance map을 보여주고 있으며 Fig. 1(b)는 각 권선 절연물의 정전용량에 대한 평균 및 표준 편차를 구하여 기준 값을 초과하는 권선의 절연물을 흡습되었다고 진단하게 되며 발전기 고정자 권선 각각에 대한 절연물의 정전 용량을 나타내는 capacitance diagram이다. 그림에서 보는 바와 같이 각 권선에 대한 정전용량 정보를 포함하고 있어 권선의 흡습 진단 뿐 아니라 각 권선에 대한 시험 데이터와의 상호 비교를 통한 진단에 더 유용하게 사용될 수 있다.

본 논문에서 발전기 고정자 권선의 냉각수 흡습 여부를 진단하기 위하여 제안한 확률 선도는 Fig. 2(a)와 같다. 흡습이 의심되는 권선의 정전 용량 값을 증가시켜 가면서 전 권선의 정전 용량에 대한 정규 확률 선도를 구한다. 정전 용량이 17pF에서부터 직선구간에서 점점 멀어져 가고 있음을 알 수 있으며 이는 발전기 고정자 권선이 흡습되어 다른 권선

에 비해 정전 용량이 증가하였음을 의미한다. 정전 용량의 변화에 따른 모든 데이터의 linear fitting 후 각각의 데이터에 대한 기울기 곡선의 변곡점인 16.79pF를 흡습 가능 지점으로 진단할 수 있다. 흡습 실험시편의 정전용량인 17pF과 비교할 때 흡습진단이 적합하다는 것을 알 수 있다.

발전기 고정자 권선 절연물의 흡습진단을 위하여 본 논문에서 제안된 또 다른 방법은 통계학에서 사용되는 box plot을 사용하는 것이다. Box plot은 데이터의 분포에서 제75백분위수에서 제25백분위수를 뺀 값을 IQR (interquartile range)이라 정의하고 IQR의 1.5배를 안쪽 경계, IQR의 3.0배를 바깥쪽 경계로 하여 작도한 것으로 권선의 흡습 가능 여부를 진단한다. Fig. 3은 앞에서 사용한 실험 데이터에 대한 box plot이며 16.1pF이 의심 데이터로 나타났다. Table 1에는 본 논문에서 제안한 흡습 진단 기법에 대한 진단 결과를 비교한 것으로서, capacitance map과 normal probability plot에 비해 box plot이 보수적임을 알 수 있다.

발전소에서 운전되는 500MW급 수냉각 발전기 고정자 권선에 대한 흡습 시험을 통해 제안된 각각의 통계적 진단 방법들에 대한 진단 결과를 상호 비교하였다. A 발전기 권선에 대해 측정된 정전 용량을 capacitance diagram을 통하여 분석한 결과 모든 권선의 정전 용량이 3σ 이내에 존재하여 흡습에 대하여 건전함을 알 수 있었다. 또한 normal probability plot을 통하여 비교하기 위하여 가상 정전 용량 값을 26pF까지 증가시켜 정규 확률 선도를 구하여 정전 용량에 대한 기울기의 변곡점을 계산하여 진단하였다. Table 2는 normal probability plot에 의하여 권선의 각 측정 위치에 대한 진단 값과 capacitance map을 이용한 3σ를 비교한 결과이다. 표에서 보는 바와 같이 약 10% 이내의 차이를 보였다.

3. 결론

본 연구에서는 고정자 권선의 흡습 상태를 진단할 수 있는 확률론적 진단 방법들을 제안하였으며 이들에 대한 진단 결과를 비교하였다. 또한, 발전기 고정자 권선 절연물의 흡습 시편과 실제 발전소에서 운전 중인 발전기의 고정자 권선에 대한 흡습 진단 사례를 제안된 진단 기법을 토대로 분석하였다.

1) 제안된 capacitance diagram은 GE 및 Toshiba에서 활용하는 capacitance map에 비하여 권선 각각의 정전용량에 대한 정보를 가지고 있어 권선의 흡습 진단 및 발전기 운전에 따른 흡습의 진행 여부에 대한 진단이 유용하였다.

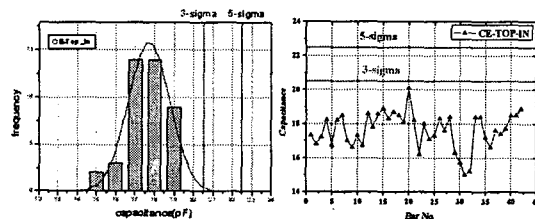
2) 실제 발전기 권선에 대한 시험 및 진단 사례에서 normal probability plot은 capacitance map을 이용한 권선의 흡습 의심값과 10% 이내의 차이를 보였다.

3) Box plot은 다른 진단기법에 비해 보수적이었으며, 실제 발전소의 누설된 발전기 고정자 권선에

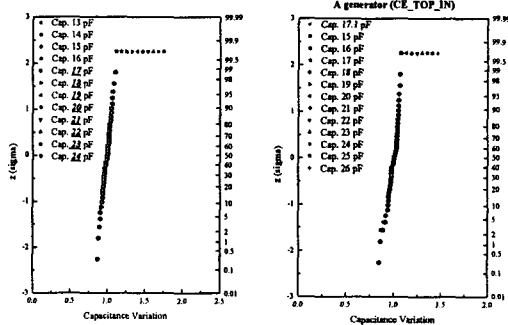
대한 흡습 진단 결과, 제안된 통계적 기법들이 흡습 진단에 유용함을 확인하였다.

참고문헌

1. Y. C. Bae, "Development of Water Absorption Measurement Equipment for Generator Stator Windings in Power Plan", Proc. of the KSME Annual Autumn Conference, pp. 406~411, 2005
2. J. Stein, "Monitoring and Diagnosis of Turbine-Driven Generators", EPRI, 1995
3. B. M. Ayyub, "Probability Statistics & Reliability for Engineers", CRC Press, 1997



(a) capacitance map (b) capacitance diagram
Fig. 1 Capacitance mapping for A generator



(a) experimental data (b) A generator
Fig. 2 Normal probability plot

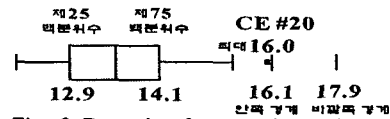


Fig. 3 Box plot for experimental data

Table 1 Critical value by the stochastic methods

	Critical value	Method
3σ	16.4	Capacitance map
Inflection point	16.79	Normal probability plot
Inner boundary	16.1	Box plot

Table 2 Comparison 3σ with inflection point

A generator	Polynomial		3σ	error(%)
	4th	5th		
CE_TOP	21.93		20.15	8.8
CE_TOP_OUT		21.19	19.64	7.9
TE_TOP_IN	18.4		18.56	-0.9
TE_TOP_OUT	18.77		18.09	3.8