

발전기 고정자 권선의 정전용량 측정을 통한 흡습 진단 방법에 관한 연구

김희수[#], 배용채^{*}, 기창두^{**}

A Study on the Water Absorption Diagnosis Method through Capacitance Measurement for Generator Stator Windings

Hee Soo Kim[#], Yong Chae Bae^{*} and Chang Doo Kee^{**}

ABSTRACT

The water leak in water-cooled generator stator windings can generate the serious accidents such as insulation breakdown and it brings a generator to the unexpected sudden outage. Accordingly, it is important to diagnose the water absorption of them for the effective operation of power plant. Especially, the capacitance value which is measured for diagnosis is very small so the special diagnosis methods like stochastic theory are needed. KEPRI developed the water absorption test equipment and diagnosis technology for them. The developed diagnosis technology is applied to the real system and the results of water absorption test for stator windings are agreed to them of water leak test.

Key Words : Generator stator windings(발전기 고정자 권선), Water absorption test(흡습 시험), Water leak test(누수 시험), Insulation breakdown(절연 파괴)

기호설명

- C = capacitance
- ϵ_r = permittivity of a dielectric substance
- ϵ_0 = permittivity constant in vacuum condition
- A = area of sensor
- D = distance between copper and sensor
- X_{mean} = mean of capacitances
- σ = deviation of capacitances
- $f(x)$ = normal density function
- $F(x)$ = accumulative distribution function

1. 서론

발전기 고정자 권선의 냉각수 누수로 인해 발전기 운전 중 절연 파괴를 발생시켜 발전소 불시 정지를 발생시킬 수 있으며 권선 손상에 따른 정비 기간 및 비용이 매우 많이 소요된다. 따라서, 발전기 고정자 권선의 냉각수 누수가 일어나기 전에 고정자 권선 절연물의 흡습 상태를 진단하는 것은 예방 정비 측면에서 매우 효과적인 정비 방안이다.¹

^{1st} 접수일: 2006년 8월 18일; 게재승인일: 2006년 10월 11일
[#] 교신저자: 한국전력공사 전력연구원 수화력발전연구소 기계정비지원그룹
 E-mail hskim@kepri.re.kr Tel. (042) 865-5427
^{*} 한국전력공사 전력연구원, 수화력발전연구소 기계정비지원그룹
^{**} 전남대학교 기계시스템공학부

발전기 고정자 권선 절연물에 대한 정전용량을 측정하는 일반 LCR 미터는 정밀도가 관심 영역이 수 십 [pF]으로 매우 낮으며 발전기 고정자 권선 절연물의 정전용량 측정을 위한 센서에 따른 측정 오차가 크다는 단점이 있다. GE 사는 발전기 고정자 권선 절연물과 동도체 사이의 정전용량을 측정하고 capacitance map 을 이용하여 권선 절연물의 흡습 여부를 진단하고 있으며 허용치를 넘는 권선에 대해서는 1 년 내로 권선을 교체하는 것이 바람직하다고 추천하고 있다. 한편, 전력연구원에서는 발전기 고정자 권선 흡습 시험 장치를 개발하여 발전기 고정자 권선에 대한 흡습 시험에 활용하고 있다.

발전기 고정자 권선의 구조 및 절연 재료의 복잡성으로 인하여 시험 및 진단이 매우 난해한 것이 현실이다. 또한, 발전기 고정자 권선의 도선과 절연물 사이의 정전용량 값은 $10^{-11} - 10^{-12}$ [F]으로, 매우 작은 값이어서 예를 들어, 단순히 5×10^{-12} 과 9×10^{-12} [pF]과의 크기만을 비교하여 흡습 유무를 판단하는 것은 심각한 오류를 범할 수가 있다. 이러한 오차를 최대한 줄이기 위해, GE 사에서는 발전기 고정자 권선에 대한 흡습 유무를 진단할 때, 정규분포와 같은 확률론적 방법을 활용하여 진단하고 있다. 본 연구에서는 GE 사에서 적용하고 있는 기존의 정전용량 맵핑(capacitance mapping method)과 유사하지만 이를 보완할 수 있는 정전용량 다이어그램(capacitance diagram method), 이와는 별도의 흡습 진단 방법인 정규 확률 선도(normal probability plot)와 상자 선도(box plot)와 같은 확률 이론을 적용하여 흡습 여부를 진단할 수 있는 새로운 진단 방법을 개발하였다. 또한, 표준화력 500MW 발전기 고정자 권선을 대상으로 수행한 정전용량 데이터를 새로운 흡습 진단 방법에 적용하여 발전기 고정자 권선의 흡습 여부에 대한 결과를 분석하여 정리하였다.^{2,3}

2. 흡습 시험 절차 및 측정

발전기 고정자 권선에 대한 흡습 측정 원리는 마이카로 절연된 권선 내부의 구리를 하나의 전극으로 사용하면서 센서 전극을 마이카 외부 표면에 밀착하여 센서와 구리 사이의 절연물의

정전용량 값을 측정한다. 정전용량의 의미는 Fig. 1 과 같이 2 개의 평행한 금속판에 전압을 인가하면 금속판 사이의 공간에 전기가 저장되는 현상을 이용한 것이 콘덴서인데 이곳에 저장할 수 있는 전기 에너지의 양을 바로 정전용량이라고 한다. 그림과 같이 평행한 축전기에 전하를 충전시키면 전하는 극판 안 쪽에만 분포하고 전기력선은 극판에 수직하며 평행한 모양을 이루어 균일한 전기장을 이룬다. 평행 평판형 축전기의 정전용량은 식 (1)과 같다

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} [F] \quad (1)$$

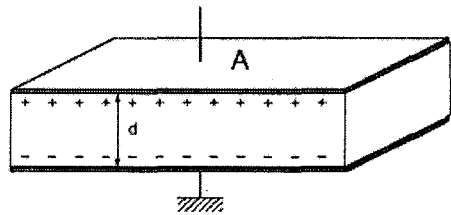


Fig. 1 Capacitance for parallel plate storage battery

정전 용량이 증가하는 경우는 다음의 2 가지 경우가 있다.

- (1) 판의 넓이(A)가 증가되거나 극판 사이의 거리(d)가 짧아지는 경우와,
- (2) 극판 사이에 유전율 (ϵ_r) 이 큰 물질로 구성되어 있는 경우이다.

위의 이론에 의한다면, 발전기 권선에 유전율이 큰 새로운 절연물이 부가될 수는 없으므로 단지 권선 내부의 냉각수가 누수되어 절연물에 존재하게 될 때에만 정전용량이 증가하게 됨을 알 수 있다. 참고로, 물의 유전율은 권선을 구성하는 마이카의 유전율보다 대략 20 배 정도 크다. 흡습 시험은 상기의 물리적 현상을 이용하여 발전기 권선 단말부의 정전용량을 측정하고 그 값을 통계학적 진단 방법을 적용하여 권선에 대한 정확한 흡습 여부를 평가하는 시험이다.

본 흡습 시험에서의 정전용량 값은 $10^{-11} - 10^{-12}$ [F]으로 매우 작은 양이므로 정량적인 단순 비교를 통해 흡습 여부를 판단할 수가 없다.

따라서, 권선에서 정전용량을 측정할 수 있는 모든 지점에서 데이터를 측정하고 비교할 수 있는 데이터의 수가 많을수록 흡습 여부의 판단에 대한 오류를 줄일 수 있으며 또한, 다양한 통계학적 진단 방법을 활용하면 흡습 진단에 있어 보다 더 정밀도를 높일 수 있다. 모든 권선에서 동시간에 균일하게 흡습이 진행되고 있다면 통계학적으로 모든 권선이 흡습되지 않고 정상 권선으로 진단될 것이다. 그러나 이러한 현상이 발생할 확률은 거의 불가능하다. 따라서 본 논문에서는 수냉각 발전기 고정자 권선 중에서 제작 결함 또는 운전에 의한 흡습이 국부적으로 발생한다는 전제하에서 확률론적 진단 기법을 적용하였다.

Fig. 2 는 발전기 고정자 권선의 단말부를 보여 주고 있으며, 발전기 권선에서 정전용량을 측정할 수 있는 위치는 터빈과 여자기 축의 단말 부로서, 그 중에서도 철심부에서 나와서 꺾어지는 곳이 유일하게 정전용량을 측정할 수 있는 위치이다. 나머지는 절연재 도포 및 바인더로 묶여져 있어 센서를 이용하여 정전용량을 측정할 수 없다.

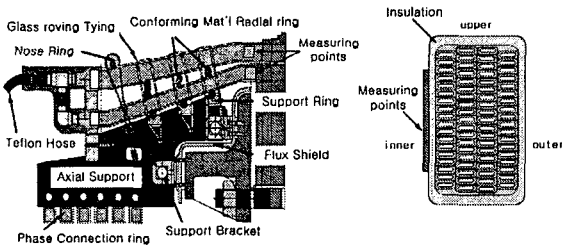


Fig. 2 Only point for capacitance measurement

Fig. 3 은 흡습 시험에 대한 절차를 도식적으로 표현한 그림이다. 흡습 시험을 위해, 발전기 로터를 제거하고 권선 표면에 이물질이 존재할 수 있으므로 세척을 하고 측정 시에 저항에 따른 임피던스를 줄이기 위해 3 상 접지를 한 후에, 권선의 정전용량을 측정한다.

전력연구원에서는 발전기 고정자 권선의 정전용량을 측정할 수 있는 흡습 시험 장치를 개발하였다. 이를 이용하여 10 여기의 표준화력 500MW 발전기 고정자 권선의 정전용량을 측정하였다. Fig. 4 는 실제 발전기 고정자 권선 상부의 정전용량을 측정하는 모습이며 상부 권선은 upper, inner, outer 세 지점에 대한 정전용량을 측정할 수 있으며 하

부 권선은 inner, outer 지점만 정전용량을 측정할 수 있다. Table 1 은 실제 화력발전소의 발전기 고정자 권선에 대한 정전용량 측정치를 정리한 표로서, 권선의 수는 총 42 개이며 정전용량의 평균은 대략 10.86~11.99[pF]사이 존재하였다.

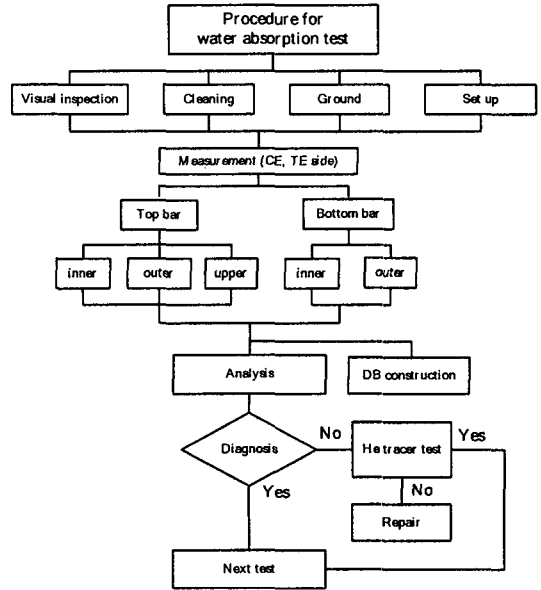


Fig. 3 Procedure for water absorption test

Table 1 Capacitance for generator stator windings

CE_side					
Bar No.	Top Upper	Top Outer	Top Inner	Bottom Outer	Bottom Inner
1	11.6	11.5	11.4	12.6	11.4
2	11.9	11.9	10.8	10.8	10.5
3	14.8	15.2	13.3	11.7	12.0
4	11.9	11.3	11.0	11.1	12.0
5	12.2	11.5	10.8	10.8	11.6
6	11.9	11.8	10.3	11.6	10.6
...	11.8	11.3	11.3	12.9	11.2
21	11.0	10.5	11.3	12.0	10.5
...	11.5	11.1	11.9	13.6	11.0
37	10.6	11.9	11.0	12.3	11.5
38	11.9	11.6	11.5	12.1	11.0
39	11.6	11.5	10.7	11.9	11.7
40	13.9	13.3	12.5	11.8	11.1
41	10.8	10.7	10.0	11.6	10.9
42	12.0	13.2	11.9	11.3	11.2
mean	11.82	11.84	11.22	11.99	10.86

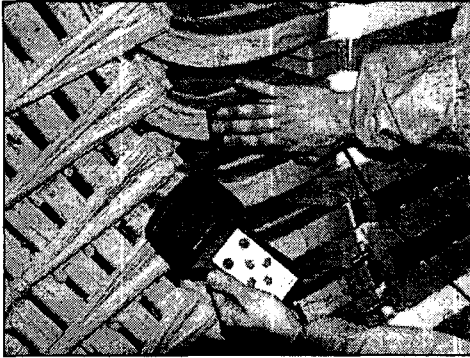


Fig. 4 Capacitance measurement for stator winding

3. 통계적 방법에 의한 흡습 진단 방법^{4,5}

3.1 Normal distribution 에 의한 흡습 진단

n 개의 표본에 대한 평균값(mean) 즉, 모든 표본 값의 합을 표본의 크기로 나눈 값을 평균이라 정의하며 식(2)로, 표본의 분산은 식(3), 표준 편차는 표준 분산의 양의 제곱근으로 정의한다.

$$X_{\text{mean}} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j \quad (2)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_j - x_{\text{mean}})^2 \quad (3)$$

정규 밀도 함수는 식(4)와 같이 정의하며, 정규 밀도 함수를 가지는 연속 분포를 정규 분포 또는 Gauss 분포라 한다.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left[\frac{x-\mu}{\sigma}\right]^2\right) \quad -\infty < x < \infty \quad (4)$$

정규 분포는 실제적으로 관심 있는 많은 확률 변수가 정규 또는 근사적으로 정규이고 비교적 간단한 방법에 의하여 정규 확률 변수로 변환될 수 있다. f(x)의 곡선을 종모양의 곡선이라 부르는데 μ에 대하여 대칭이다. σ² 이 작으면 f(x)의 크기는 커지고 밴드는 작아진다. 식(4)에서 정규 분포의 누적 분포 함수는 식(5)와 같으며 정규 분포에서의 확률은 식(6)과 같다.

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right] dx \quad (5)$$

$$P(a(x \leq b)) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_a^b \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right] dx \quad (6)$$

$$P(\mu - \sigma < X \leq \mu + \sigma) = 68.26\%$$

$$P(\mu - 2\sigma < X \leq \mu + 2\sigma) = 95.44\%$$

$$P(\mu - 3\sigma < X \leq \mu + 3\sigma) = 99.74\%$$

정규분포에서는 대부분의 값이 μ-σ 와 μ+σ 사이에 존재하고 있으며 이러한 두 값을 σ 한계라 한다. Fig. 5 는 정규 분포 곡선 중 1σ 한계와 3σ 한계 내의 분포를 보여주는 것으로서, 1σ 내에 존재할 확률이 68%, 3σ 내에 존재할 확률이 99.74%임을 각각 나타내고 있다.

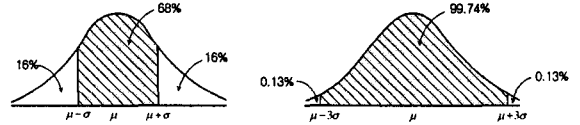
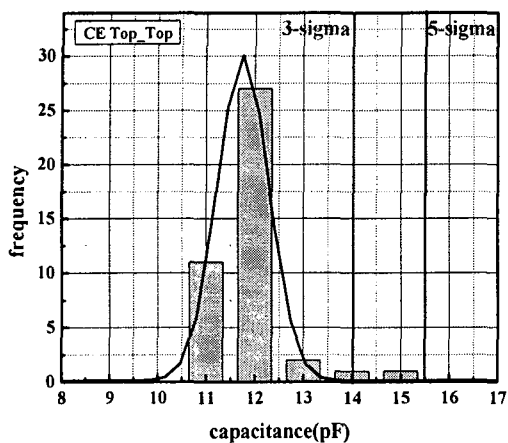


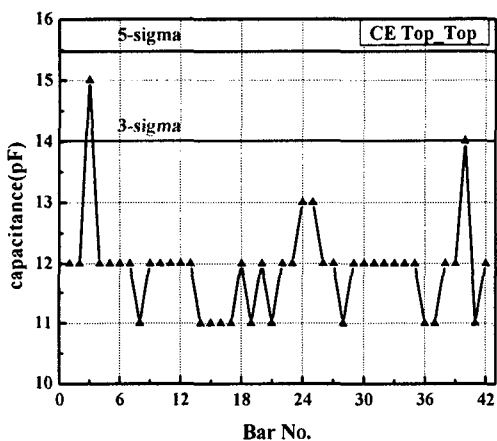
Fig. 5 Sigma limit in normal distribution

정규 분포를 이용한 capacitance mapping method 는 발전기 고정자 권선에 대한 정전용량 값들이 정규 분포를 따른다는 가정 하에, 3σ 이내에 존재하면 흡습이 되지 않은 건전한 권선이며 3σ 와 5σ 사이에 존재하는 권선은 흡습이 의심되는 권선으로서 1년 내에 권선에 대한 정비가 필요한 상태이고 마지막으로 5σ를 초과하는 권선은 권선이 흡습된 권선으로, 즉시 권선 교체 또는 정비가 필요한 권선임을 의미한다.

Fig. 6(a)는 각 정전용량에 대한 권선 수를 정규 분포화한 것이며 Fig. 6(b)는 각 권선에 대한 정전용량을 도시한 그림이다. (a)그림에서는 발전기 권선 전체에 대한 흡습 여부를 한 눈에 알 수 있는 장점이 있는 반면에 흡습이 의심되거나 흡습인 경우에 어떤 권선이 그런 상태인지를 알 수 없다. (b)그림은 (a)그림의 단점을 보완하기 위한 선도로서, 각 권선에 대한 정전용량을 도시함으로써 권선 각각이 흡습에 있어 어떤 상태인지를 한 눈에 파악할 수 있다.



(a) Capacitance mapping



(b) Capacitance diagram

Fig. 6 Capacitance mapping plot

3.2 Normal probability plot 에 의한 흡습 진단

발전기 고정자 권선의 냉각수 흡습 여부를 진단하기 위하여 정규 확률 선도를 활용하였다. 그림에서 가로축은 모든 권선에 대한 정전용량을 정전용량의 평균으로 나눈 값(capacitance variation)이고 세로축은 42 개의 권선에서 나올 수 있는 정전용량의 확률이다.

흡습이 의심되는 즉 정전용량이 가장 큰 값의 확률은 항상 일정하지만 평균으로 나누는 값이 점점 증가하므로 그림의 화살표 방향으로 진행하게 된다. 이 때의 각 데이터에 대한 전체 직선의 기울기를 계산할 수 있다. 또한, 각 정전용량에 대한 직선의 기울기는 다항식으로 나타낼 수 있으며 다

항식에서의 변곡점은 임의의 정전용량에 해당한다.

Fig. 7 은 실제 발전소에서 운전되고 있는 고정자 권선에 대한 정전용량을 측정한 데이터를 이용하여 정규 확률 선도를 구하고 한 권선의 정전용량이 13~24[pF]까지 변화될 때의 점들을 겹쳐서 그린 것이다. 선도의 맨 위에 있는 점들은 정전용량이 가장 큰 권선으로서 42 개의 권선에서 나올 수 있는 확률은 항상 일정하며 정전용량 값은 평균보다 증가하므로 권선의 편차는 점점 커져서 평균 정전용량에서 멀어지게 된다. 즉 정전용량이 17[pF]에서부터 직선(linear fitting line) 구간에서 점점 멀어져 가고 있음을 알 수 있다. 이는 발전기 고정자 권선이 흡습되어 다른 권선에 비해 정전용량이 증가하였음을 의미한다고 판단할 수 있다.

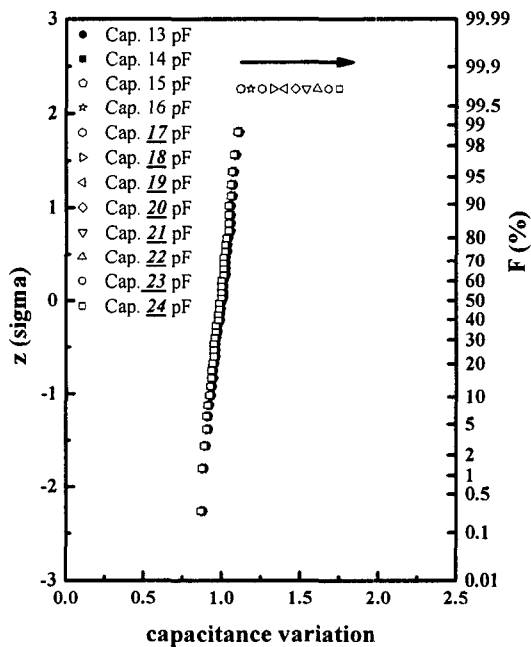


Fig. 7 Normal probability plot due to capacitance increase

Fig. 8 은 각 정규 확률 선도의 기울기를 계산하여 정전용량의 변화에 따른 기울기를 그린 선도이다. 정전용량이 1[pF]씩 증가하므로 이에 대한 직선의 기울기는 점점 작아지게 되며 어느 정전용량에서는 변곡점이 발생하게 된다. 수학적으로 곡선의 변곡점에서는 특성이 변화하는 지점이므로 이 변곡점을 계산하고 앞에서 기술한 정규

분포에서의 시그마와 어떠한 상관관계가 있는지를 분석하였다.

Linear fitting line 에 대한 곡선의 변곡점을 계산하기 위해, 곡선을 표현할 수 있는 다항식을 만들었다. 곡선에 대한 4, 5, 6 차 다항식을 각각 만들었으며 변곡점을 계산하였다. 변곡점 계산은 MATLAB 을 이용하여 간단하게 계산할 수 있다. 4 차 다항식에서의 변곡점은 14.64[pF], 5 차인 경우는 14.67[pF], 6 차인 경우는 14.68[pF]으로 계산되었다. 4 차 다항식은 linear fitting line 의 기울기 곡선과는 약간 차이가 발생하였으며 5 차와 6 차인 경우는 거의 일치하였다. 여기에서 계산된 변곡점은 앞에서 계산한 3 sigma(14.01[pF])와 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 즉 정규 확률 선도를 이용하여 흡습 진단이 가능하다는 것을 알 수 있다.

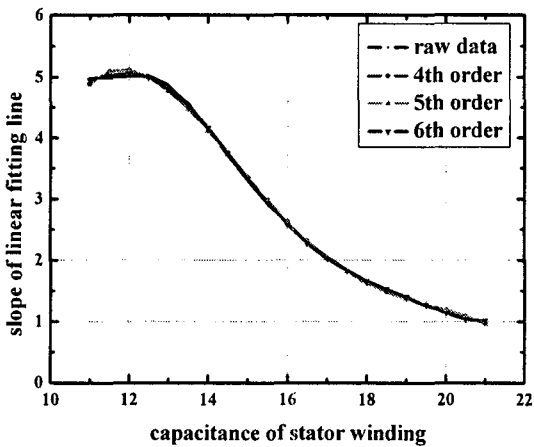


Fig. 8 Polynomial curve for inflection point calculation

3.3 Box plot 에 의한 흡습 진단

발전기 고정자 권선에 대한 흡습 진단을 위하여 통계학에서 사용되는 상자 선도를 이용하였다. 상자 선도는 데이터의 분포를 제 75 백분위수에서 제 25 백분위수를 뺀 값을 IQR(interquartile range)이라 정의하고 IQR 의 1.5 배를 안쪽 경계(inner boundary), IQR 의 3.0 배를 바깥쪽 경계(outer boundary)로 하여 작도한 것으로서 일반적으로 안쪽 경계를 넘는 값은 이상 데이터로 의심할 수 있다. Fig. 9 는 위의 정의에 따라 앞의 정전용량 데이터를 분석한 상자 선도이며 상자 선도에서 흡습이 의심되는 안쪽 경계와 바깥쪽 경계는 각각

12.9[pF]과 13.8[pF]이다. CE 측 권선 중에서 #3, #40 번 권선은 경계를 넘어선 곳에 위치하고 있으므로 흡습이 의심되는 권선으로 판단할 수 있다.

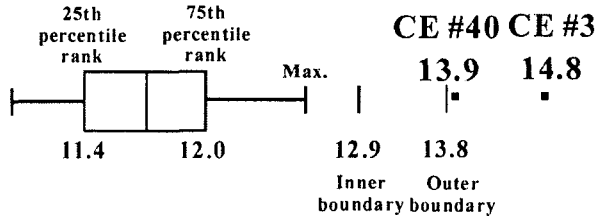


Fig. 9 Water absorption diagnosis by box plot

4. 시스템 적용

Fig. 10 은 흡습 시험을 위한 표준화력 발전소의 터빈 측 발전기 고정자 권선으로서, 계획 예방 정비 기간에 흡습 시험을 수행하였으며 측정된 흡습 데이터를 바탕으로, 기존의 흡습 진단 방법과 새롭게 개발한 확률론적 흡습 진단 방법을 적용하였다.

Table 2 에는 본 논문에서 분석한 3 가지 확률론적 분석 기법에 의한 진단 결과를 정리하였다. Gaussian distribution 에 의한 기준치를 기준으로 하여 분석하였을 때, normal probability plot 에 의한 기준치는 +5% 정도 높았으며 box plot 에 의한 기준치는 -5% 정도 낮게 분석됨을 알 수 있다.

Table 2 Diagnosis Results Analysis

Position	Diagnosis method	Criterion	Error(%)
CET_TOP	Gaussian distribution	14.01	
	Normal Prob. Plot	14.64	4.52
	Box plot	12.9	-7.92
CEB_IN	Gaussian distribution	12.86	
	Normal Prob. Plot	13.93	8.34
	Box plot	12.4	-3.56
CEB_OUT	Gaussian distribution	14.34	
	Normal Prob. Plot	14.45	0.78
	Box plot	13.35	-6.89
TET_TOP	Gaussian distribution	13.97	
	Normal Prob. Plot	13.89	-0.61
	Box plot	13.45	-3.74

Fig. 11 은 흡습 진단의 결과로서, normal distribution, normal probability plot 과 box plot 에 의한 흡습 진단 결과를 한 윈도우 창에 동시에 표현하고 있다. 또한, 각각의 진단 방법에 의한 흡습이 의심되는 권선도 각각 기록되어 있다.

Table 3 에는 각각의 통계적 진단 방법들에 대한 진단 결과를 정리하였다. CE, TE 측에는 #3, 40 권선이 공통적으로 흡습이 의심되는 것으로 진단할 수 있었다.

본 흡습 시험을 하기 전에, 고정자 권선 내부의 냉각수를 제거한 후, 고정자 권선에 대한 누수 시험을 가장 먼저 수행하는데, 누수 시험의 기준치를 통과하지 못하였다 즉 이것은 권선 어딘가에 누설처가 존재한다는 것을 의미하고 누설처가 존재한다면 냉각수가 권선을 싸고 있는 절연물을 통과하여 미세하게 새고 있음을 의미한다. 누수 시험 결과에서도 권선의 누수가 예측되었으며, 흡습 시험의 결과에서도 흡습이 의심되는 권선을 확인할 수 있었다. 이를 종합적으로 분석함으로써, 발전기 고정자 권선에는 냉각수 누수를 통한 흡습이 진행되고 있음을 확인할 수 있었다.

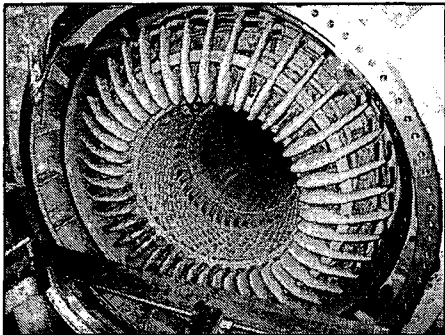
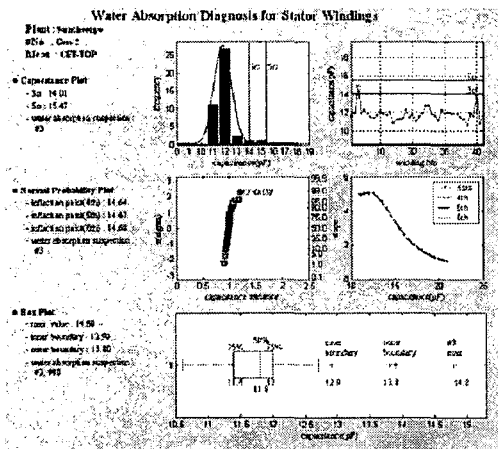
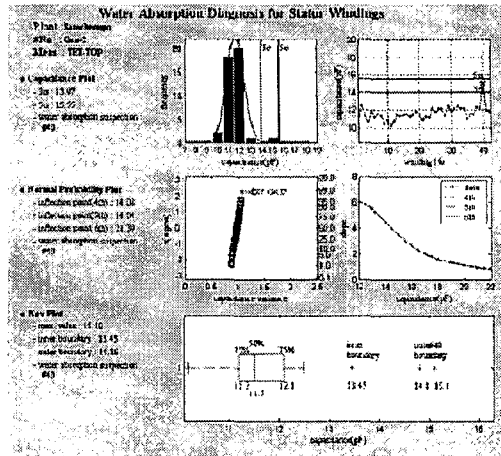


Fig. 10 500MW generator stator windings



(a) CE_TOP_TOP



(b) TE_TOP_TOP

Fig. 11 Results of water absorption test

Table 3 Windings which water absorption is suspected

Position	Bar	Water absorption	Method
CE side	Top	#3	normal distribution
		#3	normal probability plot
		#3, #33, #40	box plot
	Bottom	#31	normal distribution
#31		normal probability plot	
#22, #31		box plot	
TE side	Top	#40	normal distribution
		#40	normal probability plot
		#40	box plot
	Bottom	-	normal distribution
		-	normal probability plot
		-	box plot

5. 결론

냉각수에 의한 발전기 고정자 권선 절연물의 흡습 여부를 정확히 시험, 진단하는 것은 발전소의 운전 신뢰성 확보 및 정비 비용 절감 측면에서 매우 중요하다. 따라서 발전기 고정자 권선의 흡습 시험 결과 데이터를 대상으로 흡습 진단에 대한 신뢰성을 제고할 수 있는 흡습 진단 방법들을 개발하였다. 개발된 확률론적 흡습 진단 방법들에 대한 유효성을 확보하기 위하여 실제 발전소에서 운전 중인 발전기의 고정자 권선에 대한 흡습 진단 사례를 제안된 흡습 진단 기법을 활용하여 분석하였다.

기존의 capacitance map 에서는 고정자 권선에 대한 흡습 유무 밖에 알 수 없으나 새로운 capacitance diagram 에서는 권선 각각의 정전용량에 대한 정보를 가지고 있어 권선의 흡습 진단 및 발전기 운전 에 따른 흡습의 진행 여부에 대한 진단 이 유용하였다. 새로 개발한 normal probability plot 을 이용한 흡습 진단 값은 GE 사 등에서 활용하고 있는 capacitance map 의 흡습 의심 설정 값인 3σ 를 기준으로 비교해 볼 때 약간 큰 값을 보였으나 대체로 5% 이내의 오차를 보였다. Box plot 에 의한 흡습 진단은 다른 진단 기법들에 비해 보다 보수적인 판단 기준을 제시하고 있음을 알 수 있다.

본 연구에서 제안된 다양한 통계적 흡습 진단 기법들을 발전기 고정자 권선에 대한 흡습 진단에 활용하고 기존의 누설 시험들과 연계하여 종합적으로 분석함으로써 발전기 고정자 권선에 대한 시험의 정확도를 보다 제고시킬 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Stanton, D. J., "Diagnosing and Repairing Water Leaks in Stator Windings," G. E. Company Review, pp.1-10, 1992.
2. Inoue, Y. and Hasegawa, H., "Wet Bar Detection and Maintenance of Water-Cooled Stator Bars of Turbine Generators," PowerGen-Europe 2005.
3. Makoto, T., "Development of a Capacitance Measuring Robot for the Water-Cooled stator Winding of Turbine Generators," IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 14, No. 4, pp. 1366-1371, 1999.
4. Bae, Y.C, Kim, H.S, Lee, D.Y, "Diagnosis of Water Absorption for Generator Stator Windings" KSPE 2006 Spring Annual Meeting, pp. 285-286, 2006.
5. Ayyub, B. M., "Probability Statistics & Reliability for Engineers," CRC Press, New York, 1997.