

흡습된 수냉각 발전기 고정자 권선의 전기적 특성

김병래¹, 김희동^{1,a}

¹ 한국전력공사 전력연구원 기술전문센터

Electrical Properties of Wet Bars in Water-cooled Generator Stator Windings

Byeong-Rae Kim¹ and Hee-Dong Kim^{1,a}

¹ Korea Electric Power Corporation (KEPCO) Research Institute, Daejeon 305-760, Korea

(Received August 15, 2012; Revised September 12, 2012; Accepted September 13, 2012)

Abstract: Insulation breakdown of water-cooled generator stator windings occurs frequently due to leakage of cooling water and absorption into the insulation material. Leakage and absorption problems of water-cooled stator windings are often found during regular preventive maintenance. To evaluate cooling water leakage and absorption, diagnostic tests were performed on two water-cooled turbine generators, which have been in service for 13 and 17 years, respectively. The test results of the measured electrical properties such as dissipation factor($\tan\delta$), capacitance and AC leakage current for water-cooled generator stator windings with wet bars are reported in this paper.

Keywords: Water-cooled generator, Stator winding, Cooling water leakage, Diagnostic test, Dissipation factor, Wet bar

1. 서 론

발전기는 터빈의 기계적 에너지를 전기적 에너지로 변환시켜주는 발전소의 핵심 설비이며, 운전 중에 고정자의 철손이나, 회전자의 기계손, 부하전류와 계자전류 흐름에 의한 고정자 권선 및 회전자 권선의 저항손 등에 의해 발전기 내부에서 많은 열이 발생되고 있다. 발전기 내부의 열을 냉각시키기 위한 매체로 공기, 수소 혹은 물이 사용되고 있다 [1].

최근에는 설비 효율 향상을 위해 대용량 발전소가 많이 건설되어 운영하고 있으며, 대용량 발전기의 경우 모두 수냉각 방식이 채택되어 사용하고 있다. 발전기 고정자 권선의 냉각 방식으로 물을 사용하는 경우 냉각수 누수 등의 수밀성이 문제될 수 있다. 국내

외 대용량 발전소에서 운전 중인 발전기 고정자 권선에서의 냉각수 누수로 인한 절연파괴 현상이 여러 차례 발생되었다 [2-5].

본 논문에서는 수냉각 발전기 고정자 권선에서 누수로 인해 절연물이 흡습됨에 따라 최종적으로 절연파괴가 발생하고 있기 때문에 흡습된 절연물과 건전한 절연물에 대해 위치별로 유전정접, 정전용량 및 교류 누설전류 등 전기적 특성을 측정하여 비교 및 분석하였다.

2. 실험 방법

2.1 수냉각 발전기 고정자 권선 구조 및 누수 메카니즘

a. Corresponding author: hdkim@kepco.co.kr

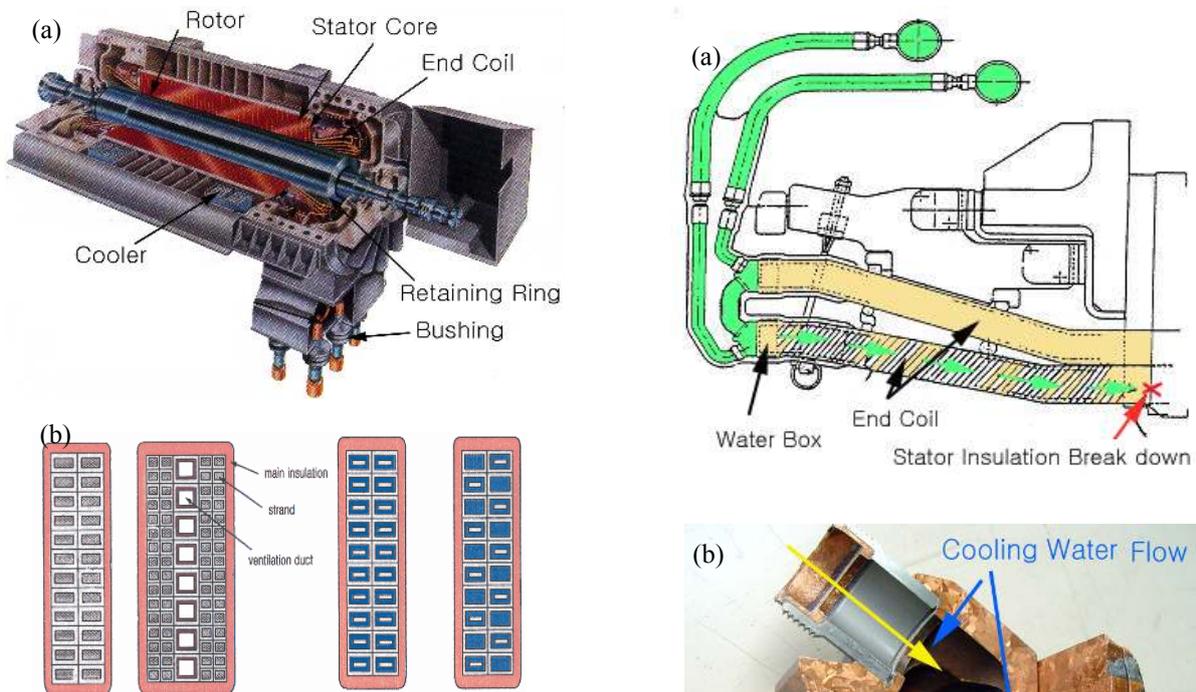


Fig. 1. Structure of water-cooled generator and cross-section of stator windings. (a) structure of water-cooled generator, (b) cross-section of stator windings.

그림 1(a)는 수냉각 발전기의 구조를 나타내었으며, 크게 고정자와 회전자로 분류할 수 있고 고정자 권선은 고정자 철심의 슬롯 내부에 설치된다. 운전 중 고정자 권선에 흐르는 부하전류에 의해 발생하는 줄열을 제거하기 위해 권선 내부로 냉각수 통로를 만들어 흐르도록 하고 있으며, 냉각수 통로의 구조, 크기 및 형상 등은 발전기 정격용량과 제작사에 따라 각각 상이하다.

그림 1(b)에 나타낸 바와 같이 수냉각 발전기 고정자 권선은 자체의 와전류 손실 등을 줄이기 위해 단일 도체로 만들지 않고, 각각이 절연된 수십 개의 소선 (strand)을 몰딩시켜서 하나의 권선으로 제작된다. 냉각수는 각각의 고정자 권선 소선 내부로 유입되며, 냉각방식은 다음과 같이 2가지로 분류할 수 있다. 고정자 권선 입구에서 유입된 냉각수가 권선 반대측에서 합쳐져 바로 외부로 배출되는 1경로 냉각 방식과 권선 반대측에서 타 권선을 통해 다시 입구측으로 되돌아와서 배출되는 2경로 냉각 방식으로 구분된다.

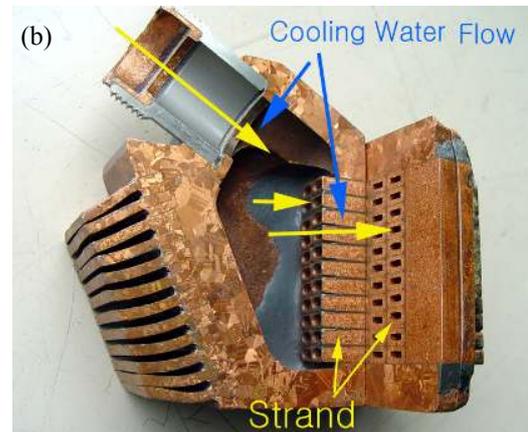


Fig. 2. Water absorption of generator stator windings and water box structure. (a) water absorption, (b) water box structure.

그림 2(a), (b)에 나타낸 바와 같이 수냉각 발전기 고정자 권선 입·출구측의 냉각수가 합쳐지는 부위를 수실 (water box)라 부르며, 권선과 별도로 제작된 다음 권선 양 끝단에 용접 (brazing) 방식으로 부착한다. 발전기 고정자 권선에서 냉각수 누설은 대부분 수실 부위에서 발생되며, 특히 용접 부위에서의 틈새 부식 (crevice corrosion) 발생 혹은 최초 용접불량이나 수실 자체의 모재결함 등에 의해 미세 틈새가 발생되었기 때문이다. 발전기 고정자 권선 수실 부위에서 냉각수 누설이 발생되면 주절연물로 흡수되면서 절연물이 흡습상태로 된다. 흡습상태가 계속 진행될 경우 최종적으로 고정자 권선 절연과피까지 진행되기도 한다 [3,4].

Table 1. Rating of water-cooled generator.

| Water-cooled generator | Voltage [kV] | Capacity [MW] | Insulation class | Operation years |
|------------------------|--------------|---------------|------------------|-----------------|
| A | 22 | 500 | B | 17 |
| B | 22 | 1,000 | B | 13 |

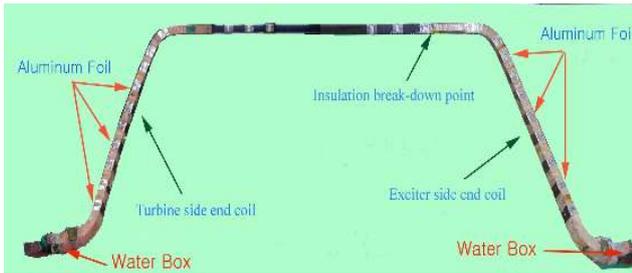


Fig. 3. Structure of A generator stator windings.



Fig. 4. Structure of B generator stator windings.

표 1은 수냉각 발전기 고정자 권선의 절연물 흡습으로 인해 절연파괴가 발생된 2대의 발전기 정격을 나타내었다. A 발전기 고정자 권선의 전기적 특성을 측정하고 분석하기 위해 그림 3과 같이 권선 절연물이 흡습된 여자기측 끝단 권선 부위와 절연물이 흡습되지 않은 터빈측 끝단 권선 부위의 절연물에 대해 표면을 은박지를 사용하여 일정 간격으로 감았다. B 발전기 고정자 권선도 운전 중 흡습에 의해 절연파괴된 권선이며, 그림 4와 같이 구간별로 나누어 절연물 표면을 은박지를 사용하여 일정 간격으로 감고 전기적 특성을 측정하였다.

고전압을 인가하여 엔드 코일 (end coil) 각 구간별로 유전정점, 정전용량, 교류 누설전류 등 3가지의 전기적 특성을 측정하기 위해 셰링브리지 (Schering Bridge, Tettex Instruments)를 사용하였다. 셰링브리지는 교류 고전압 전원장치 (HV Supply, Tettex Instruments Type 5283)와 브리지 (Bridge, Type 2818)로 구성되어 있다. 또한, 발전기 고정자 권선의

주절연물인 마이카 (mica), 에폭시 수지 (epoxy resin)의 구성, 조직 및 접착상태 등 미세구조를 확인하기 위해 권선의 각 영역 (zone)별로 나누어 주사전자현미경 (scanning electron microscope, SEM, 일본 JEOL, JSM-6400)을 사용하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

대용량 수냉각 발전기 고정자 권선 절연물 흡습에 대한 전기적 특성을 분석하기 위해 인위적으로 흡습 상태를 만들기가 거의 불가능하므로 흡습된 절연물의 전기적 특성을 측정하기가 매우 어렵다. 그러나 실제로 절연물 흡습으로 확인된 고정자 권선을 활용함으로써 그 특성을 정확하게 측정 및 분석할 수 있게 되었다. 또한 측정 결과는 과거 국내 사례와 비교하여 흡습된 권선에 대해 전기적 특성 변화를 보다 정확히 분석할 수 있다.

그림 5에 나타낸 바와 같이 A 발전기 고정자 권선의 경우 절연물의 전기적 특성은 권선 각 끝단을 동일하게 10등분하여 측정하였다. 각 측정지점의 경우 절연물이 흡습된 여자기측 끝단 권선은 E1, E2~E10으로 구분하였고 터빈측 끝단 권선 측정지점도 T1, T2~T10으로 구분하여 표시하였다.

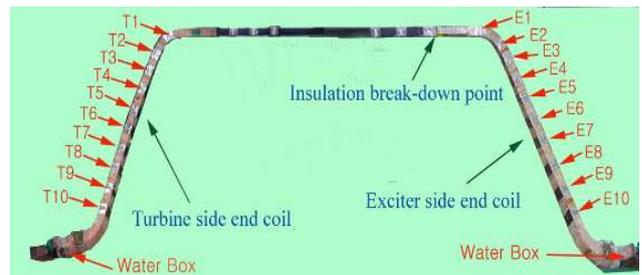


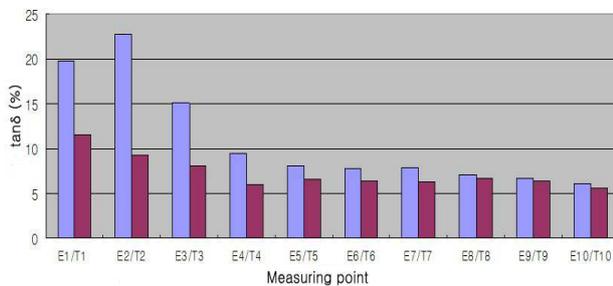
Fig. 5. Measurement position of A generator stator windings.

3.1 유전정점 분석

수냉각 발전기 고정자 권선의 유전정점은 절연물 내부에 흡습, 건조, 오손 및 미소공극 유무 등에 의해 절연상태 및 열화정도를 추정할 수 있으며, 해당 절연물의 전기적 손실정도를 나타내고 있다. 표 2는 A 발전기 고정자 권선에 대한 각 위치별로 교류전압 6 kV

Table 2. Dissipation factor of A generator [Unit:%].

| Measurement position | Exciter | Turbine |
|----------------------|---------|---------|
| 1 | 19.8 | 11.6 |
| 2 | 22.8 | 9.24 |
| 3 | 15.1 | 8.11 |
| 4 | 9.52 | 5.98 |
| 5 | 8.12 | 6.55 |
| 6 | 7.78 | 6.38 |
| 7 | 7.83 | 6.31 |
| 8 | 7.12 | 6.70 |
| 9 | 6.72 | 6.33 |
| 10 | 6.09 | 5.65 |

**Fig. 6.** Comparison of dissipation factor in A generator stator windings.

을 인가하면서 유전정접 측정값을 나타내었다. 그림 6에 나타낸 바와 같이 절연이 파괴된 위치에 근접할수록 유전정접값이 급격히 상승됨을 확인할 수 있었다. 유전정접 변화 정도를 초기 3개소 측정위치 (E8, E9, E10)와 끝단 3개소 측정위치 (E1, E2, E3)에서의 평균값으로 비교해 보면, 초기 3개소 측정위치의 평균 유전정접값은 6.64%이다. 반면에 끝단 3개소 측정위치에서의 평균값은 19.23%로 약 190% 정도의 증가치를 보이고 있다. 건전 부위 절연물의 경우 6.22%에서 9.65%로 약 55%만 증가되어 실제로 절연물이 흡습되었을 경우의 유전정접 증가율이 건전한 절연물에 비해 약 3.5배 정도 높음을 확인할 수 있었다.

하지만 흡습된 권선과 건전한 권선 모두 수실 부위 (E10 및 T10 부위)에서는 흡습여부에 상관없이 유전정접값이 유사함을 확인할 수 있었다. 유전정접값으로 절연물의 흡습여부를 판단하고자 할 경우에는 절연물의 흡습여부에 따라 유전정접값의 변화가 심하게 나타나는 고정자 슬롯 끝단에서 20 cm 이내 부근을 측정해야 함을 확인할 수 있었다.

Table 3. Dissipation factor of B generator stator windings.

| Voltage [kV] | tanδ[%] | | | | | |
|--------------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | Zone 1 | Zone 2 | Zone 3 | Zone 4 | Zone 5 | Zone 6 |
| 1 | 7.09 | 8.61 | 2.77 | 1.34 | 1.66 | 1.77 |
| 3 | 7.34 | 8.75 | 2.87 | 1.37 | 1.71 | 1.88 |
| 5 | 8.10 | 9.33 | 3.12 | 1.66 | 1.96 | 2.08 |
| 7 | 9.46 | 10.0 | 3.67 | 2.09 | 2.57 | 2.63 |
| 9 | 10.5 | 10.9 | 4.62 | 2.72 | 3.36 | 3.55 |
| 11 | 11.2 | 11.8 | 5.64 | 3.52 | 4.26 | 4.45 |
| 11.3 | 11.4 | 12.0 | 5.93 | 3.68 | 4.45 | 4.53 |

B 발전기 고정자 권선에 대한 유전정접 측정값의 측정결과를 표 3에 나타내었다. 교류 인가전압을 1 kV에서 최고 11.3 kV까지 증가하면서 영역 1~영역 6에서 유전정접의 변화를 측정하였다. 흡습된 위치인 영역 1과 영역 2에서 유전정접의 평균값은 11.7%이며, 비흡습 위치인 영역 5와 영역 6에서 유전정접의 평균값은 4.49%를 나타내었다. 흡습과 비흡습의 유전정접값을 비교해 보면 흡습된 경우에 약 2.6배 높음을 확인할 수 있었다.

3.2 정전용량 분석

A 발전기 고정자 권선에 대한 각 위치별로 교류전압 6 kV를 인가하면서 측정한 정전용량을 표 4에 나타내었다.

Table 4. Capacitance of A generator stator windings [Unit:pF].

| Measurement position | Exciter | Turbine |
|----------------------|---------|---------|
| 1 | 322.1 | 275.8 |
| 2 | 296.9 | 253.7 |
| 3 | 289.9 | 255.8 |
| 4 | 264.8 | 245.1 |
| 5 | 253.1 | 245.6 |
| 6 | 259.1 | 245.5 |
| 7 | 251.6 | 246.8 |
| 8 | 253.9 | 249.1 |
| 9 | 252.6 | 248.1 |
| 10 | 247.3 | 243.8 |

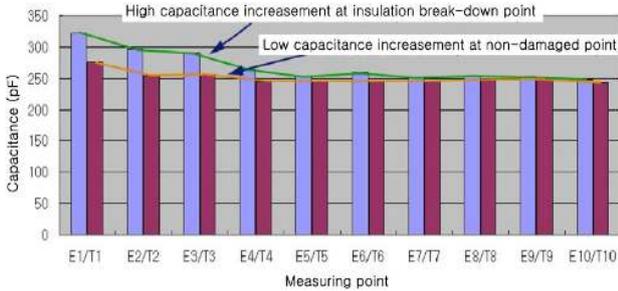


Fig. 7. Comparison of capacitance in A generator stator windings.

Table 5. Capacitance of B generator stator windings.

| Voltage [kV] | Capacitance[nF] | | | | | |
|--------------|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | Zone 1 | Zone 2 | Zone 3 | Zone 4 | Zone 5 | Zone 6 |
| 1 | 1.677 | 1.674 | 1.191 | 1.122 | 1.130 | 1.017 |
| 3 | 1.682 | 1.676 | 1.191 | 1.122 | 1.130 | 1.017 |
| 5 | 1.695 | 1.684 | 1.192 | 1.124 | 1.132 | 1.020 |
| 7 | 1.724 | 1.695 | 1.198 | 1.128 | 1.137 | 1.027 |
| 9 | 1.752 | 1.710 | 1.203 | 1.134 | 1.145 | 1.039 |
| 11 | 1.778 | 1.726 | 1.211 | 1.142 | 1.154 | 1.053 |
| 11.3 | 1.782 | 1.729 | 1.213 | 1.143 | 1.155 | 1.055 |

B 발전기 고정자 권선에 대한 정전용량의 측정결과를 표 5에 나타내었다. 교류 인가전압을 1 kV에서 최고 11.3 kV까지 증가하면서 영역 1~영역 6에서 정전용량의 변화를 측정하였다. 절연물이 흡습된 위치인 영역 1과 영역 2의 평균값은 1.755 nF이며, 비흡습 위치인 영역 5와 영역 6의 평균값인 1.105 nF과 비교해 보면 정전용량값이 약 1.6배 정도 높게 나타남을 확인할 수 있었다.

3.3 교류 누설전류 분석

A 발전기 고정자 권선에 대한 각 위치별로 교류전압 6 kV을 인가하면서 측정한 교류 누설전류를 표 6에 나타내었다.

그림 8은 측정 위치별로 교류 누설전류의 크기를 비교하였으며, 교류 누설전류의 경우 정전용량값에 비례하기 때문에 그림 7의 정전용량 측정 그래프와 패턴이 거의 일치함을 확인할 수 있었다. 교류 누설

Table 6. AC leakage current of A generator stator windings [Unit:A].

| Measurement position | Exciter | Turbine |
|----------------------|---------|---------|
| 1 | 0.731 | 0.626 |
| 2 | 0.675 | 0.574 |
| 3 | 0.658 | 0.580 |
| 4 | 0.602 | 0.554 |
| 5 | 0.572 | 0.555 |
| 6 | 0.588 | 0.555 |
| 7 | 0.570 | 0.561 |
| 8 | 0.576 | 0.565 |
| 9 | 0.571 | 0.563 |
| 10 | 0.561 | 0.551 |

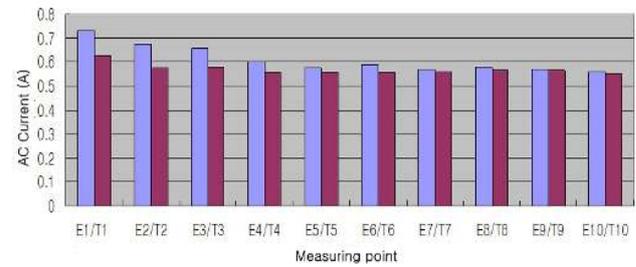


Fig. 8. Comparison of AC leakage current in A generator stator windings.

전류 변화 정도도 초기 3개소 측정위치 (E8, E9, E10)와 끝단 3개소 측정위치 (E1, E2, E3)에서의 평균값으로 비교하였다. 초기 3개소 측정위치에서의 평균값은 0.569 A를 나타내고 끝단 3개소 측정위치에서의 평균값은 0.688 A로 약 20.9% 정도의 증가치를 보였으며, 건전한 부위 절연물의 경우 0.559 A에서 0.593 A로 약 5.7%만 증가되었다. 실제로 절연물이 흡습되었을 경우의 교류 누설전류 증가율도 건전한 절연물에 비해 약 3.6배 정도 높음을 알 수 있었으며, 유전정접과 정전용량 크기의 증가율과 거의 일치함을 확인할 수 있었다.

B 발전기 고정자 권선에 대한 교류 누설전류 측정값의 결과를 표 7에 나타내었다. 교류 인가전압을 1 kV에서 최고 11.3 kV까지 증가하면서 영역 1~영역 6에서 교류 누설전류의 변화를 측정하였다. 절연물이 흡습된 위치인 영역 1과 영역 2의 평균값은 7.47 mA이며, 건전한 위치인 영역 5와 영역 6 평균값인 4.702 mA와 비교해 보면 누설 전류값도 역시 약 1.6배 높음을 확인할 수 있었다.

Table 7. AC leakage current of B generator stator windings.

| Voltage [kV] | AC current[mA] | | | | | |
|-----------------|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | Zone 1 | Zone 2 | Zone 3 | Zone 4 | Zone 5 | Zone 6 |
| 1 | 0.635 | 0.631 | 0.461 | 0.423 | 0.431 | 0.386 |
| 3 | 1.904 | 1.898 | 1.358 | 1.269 | 1.277 | 1.149 |
| 5 | 3.188 | 3.178 | 2.250 | 2.127 | 2.136 | 1.925 |
| 7 | 4.561 | 4.474 | 3.158 | 2.984 | 3.010 | 2.710 |
| 9 | 5.943 | 5.821 | 4.088 | 3.862 | 3.892 | 3.530 |
| 11 | 7.345 | 7.158 | 5.004 | 4.740 | 4.780 | 4.356 |
| 11.3 | 7.590 | 7.350 | 5.147 | 4.869 | 4.919 | 4.485 |

3.4 미세구조 분석

그림 9(a), (b)~그림 11(a), (b)에 나타낸 바와 같이 B 발전기 고정자 권선의 주 절연물인 마이카, 에폭시 수지의 구성, 조직 및 접착상태 등 미세구조를 확인하기 위해 각 영역별로 나누어 미세구조를 분석하였다. 그림 9(a), (b)에 나타낸 바와 같이 영역 1은 권선의 수실측으로는 이상이 없으며, 접지고장 측으로는 주 절연물인 마이카 층이 분리 (de-bonding)되어 약간의 균열 진행을 확인할 수 있었다 [3,6]. 그림 10(a), (b)에 나타낸 바와 같이 영역 2는 완전한 분리가 발생되어 균열이 진행되고 있음을 명확하게 확인하였다.

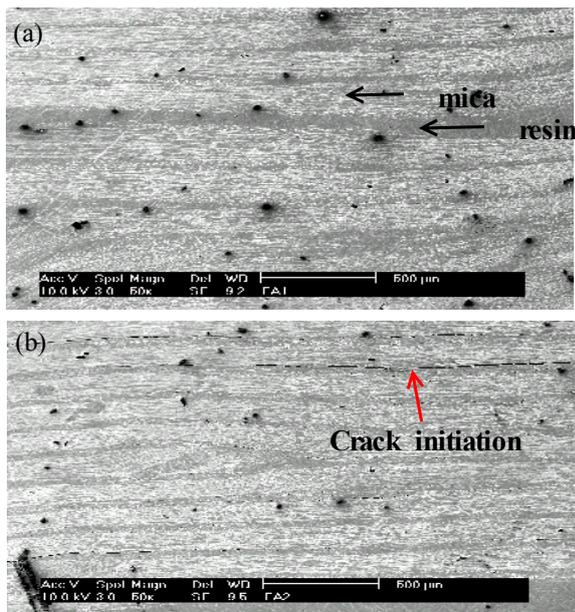


Fig. 9. SEM micrographs of zone 1 stator winding. (a) water box, (b) ground fault.

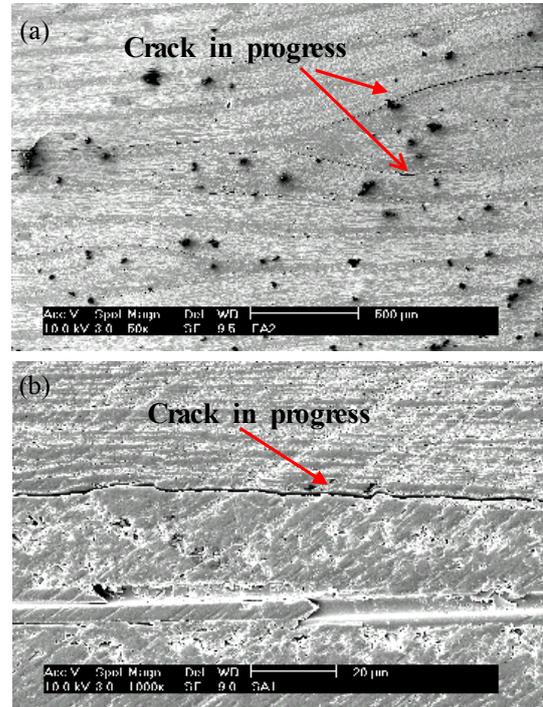


Fig. 10. SEM micrographs of zone 2 stator winding. (a) magnification: 50x, (b) magnification: 1,000x.

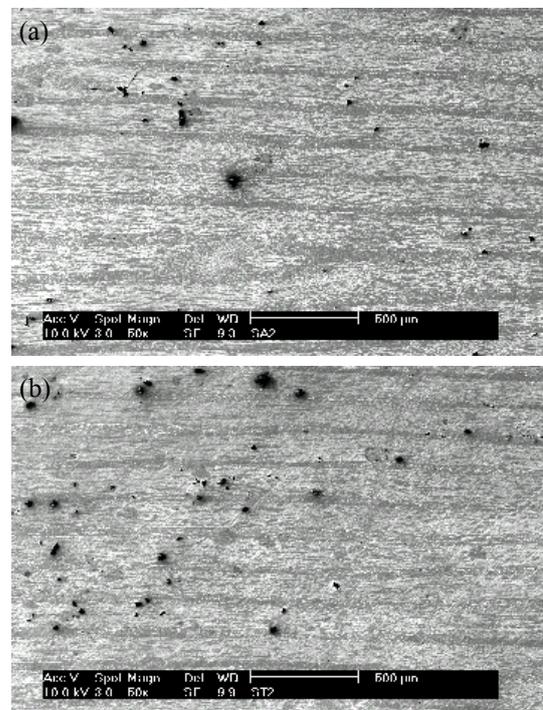


Fig. 11. SEM micrographs of zone 4 and zone 5 stator windings. (a) zone 4, (b) zone 5.

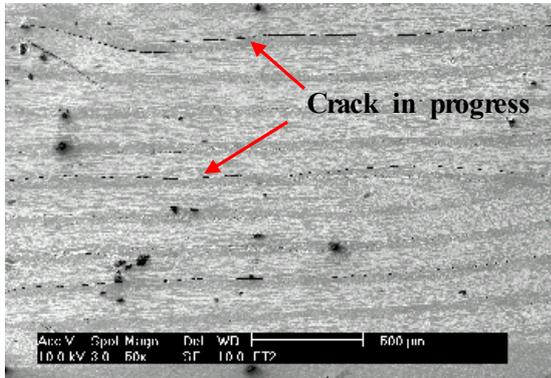


Fig. 12. SEM micrograph of zone 6 stator winding.

그림 11(a), (b)에 나타낸 바와 같이 영역 4와 영역 5의 경우 절연물에서의 균열은 확인되지 않았다. 그러나 그림 12에 나타낸 바와 같이 영역 6에서는 마이카 층이 분리되어 약간의 균열이 진행되었다.

그림 9~그림 12에서 나타낸 바와 같이 13년 정도 운전된 B 발전기 고정자 권선의 양쪽 끝단부위 엔드 코일에 해당하는 영역 1, 영역 2 및 영역 6 권선의 주절연물에서 균열 발생이 진행하고 있음을 확인할 수 있었다. 특히 수냉각 발전기 고정자 권선에서 냉각수가 누설될 경우 주절연물 내부에서 결합재 (binder resin)의 가수분해 (hydrolysis)와 같은 화학적 반응으로 인한 습열 열화 (wet-heat deterioration)가 일어나면서 흡습이 빠르게 진행되어 최종적으로 절연파괴가 발생될 수 있다 [3,4].

4. 결론

절연물 흡습으로 절연파괴 사고가 발생된 2대의 수냉각 발전기 고정자 권선의 건전한 절연물과 흡습된 절연물에 대한 전기적 특성 시험결과를 분석하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

(1) 수냉각 발전기 고정자 권선 주절연물의 유전정접, 정전용량 및 교류 누설전류를 측정된 결과 건전한 절연물에 비해 흡습된 절연물의 경우 A 발전기 고정자 권선은 3.5~3.6배, B 발전기 고정자 권선은 1.6~2.6배 정도 높게 나타났으며, 냉각수가 누설되어 절연물 흡습이 진행되는 방향으로 갈수록 측정값의 차이가 커지는 것으로 분석되었다.

(2) 수냉각 발전기 고정자 권선 절연물의 흡습여부를 확인하기 위한 정전용량 측정 시험 (capacitance-map test)을 실시할 경우 직선부 끝단에서 엔드 코일 쪽으로 약 20 cm 부근이 흡습여부 및 건전한 절연물과의 측정값 차이 변화를 가장 잘 알 수 있는 위치로 확인되었다.

(3) 흡습된 권선 절연물의 누설위치와 흡습이 진행되는 위치 사이의 유전정접, 정전용량 및 교류 누설전류 측정값의 변화율은 모두 동일함을 알 수 있었으며, 측정값의 변화율은 절연물의 흡습여부를 판정할 수 있는 유용한 방법으로써 활용이 가능한 것으로 분석되었다.

(4) 13년 정도 사용된 수냉각 발전기 고정자 권선의 미세구조를 분석한 결과 권선의 양쪽 끝단부위의 엔드 코일 절연물에서 균열 발생이 진행되었다. 특히 발전기 고정자 권선에서 냉각수가 누설될 경우 절연물 균열부위를 따라 흡습이 빠르게 진행되면서 최종적으로 절연파괴가 발생될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 2011년도 한국동서발전(주)의 재원으로 수행한 전력사 협약연구 과제입니다.

REFERENCES

- [1] G. Griffith, S. Tucker, J. Milsom, and G. C. Stone, *IEEE Electri. Insul Mag.*, **16**, 6 (2000).
- [2] H. S. Kim, Y. C. Bae, W. R. Lee, D. Y. Lee, and H. D. Kim, *J. of Electri. Eng. & Tech.*, **7**, 230 (2012).
- [3] H. D. Kim, *IEEE Int. Conf. on Solid Dielectr.*, 478 (2004).
- [4] Y. Inoue, H. Hasegawa, S. Sekito, M. Sotodate, H. S., and T. Okamoto, *IEEE Int. Electr. Machines and Drives Conf.*, 1337 (2003).
- [5] J. E. Timperley and J. R. Michalec, *IEEE/Electri. Insul. Conf.*, 439 (2003).
- [6] H. D. Kim, *J. KIEEME*, **15**, 119 (2002).