



수냉각 발전기 고정자에 대한 누수 및 흡습시험 기술

배성운 (주식회사 피레타)

Bae Sung Won (bae9414@hanmail.net)

1. 서론

대용량 발전기는 터빈에서의 기계적 에너지를 전기적 에너지로 변환시키는 발전소의 핵심 설비로서, 발전기 고정자 권선에서 발생하는 전류의 흐름으로 인한 고온의 열을 냉각시키기 위하여 수냉각 방식을 채용하고 있다. 수냉각 방식은 다른 냉각 방식에 비해 냉각효율은 우수하나, 냉각수 누수로 인한 절연파괴 등과 같은 심각한 고장사고가 발생할 수 있는 단점도 있다. 국내에서 운전되는 화력 및 원자력 발전소의 발전기 고정자 권선 누수로 인한 발전정지가 빈번히 발생되고 있으며 장시간의 정비기간이 소요된다. 이는 전력 계통의 불안정을 발생시켜 국내 전력의 안정적 운용과 양질의 전기 품질 확보에 영향을 끼칠 수 있으며 발전기 고장 시 막대한 정비 비용이 소요된다. 최근 자주 발생하는 대용량 발전기 고정자 권선 주절연 파괴의 주요 원인으로 권선 누수 및 흡습을 들 수 있으며, 이에 따른 정비 기간이 15일~6개월로 장기간이 소요된다. 발전기 고정자 권선의 제작사인 GE사의 보고서에 따르면 자체 시험 권선 중 약 50% 이상이 누수 및 흡습과 관련된 고정자 권선의 주절연 파괴로 보고되고 있다. 국내에서 운전되는 대용량 발전기의 제작사는 일본의 TOSHIBA, HITACHI, 미국의 GE, WH, 유럽의 ALSTOM, GEC, PARSONS 등으로 다양하며 1990년대 이후 GE 설계의 500MW급 표준화력

발전기가 주류를 구성하고 있다. 한편, 발전기 누수 사고를 방지하기 위하여, 발전소 정기 점검 기간 중 발전기 고정자 권선에 대한 누수 시험을 수행하고 있으나 국내 발전기의 모델이 매우 다양하여 제작사 별로 시험 및 진단 방법이 다른 이유로 체계적인 누수 시험 및 진단의 표준화가 어렵고 이로 인해 적절한 설비 관리가 힘들다. 특히 시험 및 평가의 기본이 되는 권선 건조가 불완전하여 고정자 권선에 대한 건전성 진단의 신뢰성을 보장할 수 없다. 정확한 고장 진단을 위해서는 발전기의 현장조건에 따라 적용하는 시험에 대한 체계적인 절차를 수립할 필요가 있으며 또한, 시험 결과에 대한 정기적인 진단 데이터의 추이 관리를 통한 신뢰성 있는 예측이 중요한 요소라고 할 수 있다.

본 기술은 이러한 발전기 고정자 권선의 냉각수 누설 여부를 종합적으로 진단하기 위하여, 한전 전력연구원에서 연구개발한 발전기 고정자 권선 누수 진단 시스템을 이용하여, 권선 내부에 존재하는 누설과 같은 결함을 찾기 위해 진공저하시험, 압력강하시험 및 헬륨추적시험을 수행하여 발전기 고정자 권선의 기계적 건전성을 평가하는 시험이다.

2. 발전기 고정자 권선의 구조

발전기는 제작사에 따라 차이가 있으나 정상 운전 중 발생하는 전자력 또는 로터 회전에 따른 기계력과 같은 정상 상태의 힘과 3상 단락과 같은 과도력에 견딜 수 있는 구조로 제작되어야 한다. 일반적인 수냉각 발전기 고정자 구조는 아래 Fig. 1과 같다.

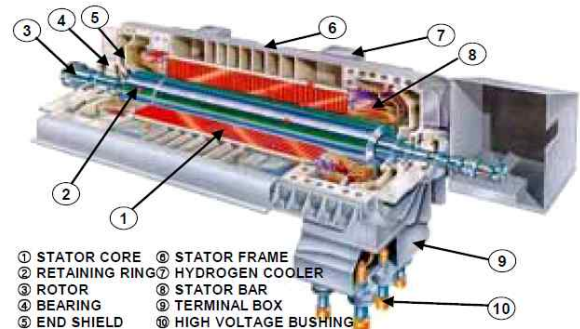


Fig. 1 발전기 구조

축방향으로 8~10m 정도로 매우 긴 구조이며, 크게 프레임, 고정자 철심, 권선 및 권선지지장치, 그리고 냉각수 공급을 위한 호스와 헤더로 구성된다. 고정자 단말 권선을 지지하기 위한 장치는 주로 스페이서와 끈, 그리고 이를 지지하기 위한 링으로 이루어져 있으며 일부 제작사에서는 콘형의 지지 장치를 사용하기도 한다. 이와

같이 발전기 고정자의 지지 구조가 제작사 별로 다르기 때문에 고정자 단말 권선의 진동 특성도 차이를 보인다. 고정자 프레임에 고정된 카바에 적층된 고정자 철심의 슬롯에 고정자 권선이 2단으로 삽입되며, 이들을 구속하기 위하여 웨지가 사용된다. 고정자 슬롯에서 나온 상하 권선은 스페이서로 끈으로 인근 권선들과 묶여 있으며 내부 링과 외부 링 그리고 권선 지지장치에 의하여 구속되어 있다. 따라서 고정자 슬롯부에 비하여 권선 단말부의 기계적 구속 상태가 비교적 취약하며, 실제로 발전기 고정자 냉각수 누수 및 권선 마멸 현상이 고정자 권선 단말부에서 자주 일어나고 있다.

수냉각 발전기 고정자에서 누수 현상이 자주 발생하는 권선 클립 내부의 구조는 Fig. 2와 같고 가늘고 긴 소선으로 구성되어 있어, 발전기 권선 내부를 건조하기 위해서는 특별한 건조 장치가 필요함을 알 수 있다.



Fig. 2 권선 클립 내부 구조

발전기 고정자 권선의 내부 구조는 전류가 흐르는 내부 동도체에서 발생하는 열을 냉각시키기 위하여 많은 냉각수 통로가 있으며 외부는 마이카-에폭시 절연 재료로 쌓여 있다. 고정자 냉각수 공급펌프에서 공급된 냉각수가 테프론 호스를 거쳐 고정자 권선 클립부로 유입되어 권선 내부의 냉각수 통로를 따라 흐르면서 권선을 냉각시키는 구조이다. 발전기 고정자 권선에서 발전기 운전 중 냉각수가 자주 누설되는 위치는 테프론 호스 연결부와 고정자 권선 클립부를 들 수 있다. 고정자 권선 클립부는 각 권선에 대한 냉각수의 챔버 역할 뿐만 아니라 상하부 권선에 대한 전기적 연결부의 기능도 담당하고 있다.

누수 및 흡습시험 절차는 다음과 같다.

- 1) 유니트 설치 및 자체 시험/ 점검(system self test)
- 2) 공기 불어내기(air puffing mode)
- 3) 진공 건조(vacuum drying mode)
- 4) 진공저하시험(vacuum decay test)

- 5) 압력강하시험(pressure drop test)
- 6) 헬륨추적시험(He tracer test)
- 7) 흡습시험(water absorption test)

2.1. 발전기 고정자 권선의 건조

발전기 고정자 권선을 냉각시키는 냉각수를 완전히 제거한 후 고정자 권선 내부에 존재하는 누설처를 찾기 위해 진공저하, 압력강하시험 및 헬륨추적시험을 수행하여 발전기 고정자 권선의 기계적 건전성을 확인하는 것과 2차적으로 전기적 시험을 수행하기 위해 최적의 상태를 준비하는 단계이다. Fig. 3은 대표적인 발전기 고정자 권선에 대한 냉각수 계통의 P&ID이고, 시험 방법은 아래와 같다.

2.2. 공기 불어내기(air puffing mode)

발전기 고정자 권선 내부를 건조하기 위해 먼저 냉각수 계통을 발전기 고정자 시스템과 분리하고 발전기 하부 배관을 개폐하여 중력에 의해 냉각수를 제거한다. 권선 내부에 고여 있거나 잔존하는 수분은 공기 불어내기 방법을 통해 외부로 배출된다.

2.3. 진공건조(vacuum drying mode)

발전기 고정자 권선 내부의 압력을 낮춰 잔존하는 습분을 기화시킴으로써 권선 내부를 건조 시킨다. 특히 흡착성이 좋은 질소를 주입시키면서 일정 진공도로 유지시켜 진공 건조를 수행하고, 권선 내부의 응결을 방지하기 위해 일정 진공도를 유지한다. 진공 건조 모드 이전에 누설 여부를 확인하기 위해 누설 시험 장치 및 발전기 고정자 권선과의 연결장치에 대한 버블시험을 수행하여 누설 여부를 반드시 확인하여야 한다. 또한, 질소를 발전기 고정자 권선의 내부를 통과시키면서 진공 건조를 수행하면 질소가 수분을 흡착하는 특성이 있어 진공 건조의 효율을 높일 수 있다. 공기 불어내기 모드에서 발전기 고정자 권선 내부로 공급되기 전의 노점과 권선을 통과시킨 후에 건조공기의 출구 노점이 거의 일치한 시점에서 진공 건조 모드로 전환하여 권선 내부를 건조시키고 있음에도 불구하고 여전히 많은 양의 수분이 권선 내부에 존재하고 있다. 발전기 고정자 권선 내부에 습분이 존재할 시에 진공 펌프를 활용한 진공 건조를 수행할 때 권선의 진공도를 측정하면, 임의의 진공도에서 습분이 기화되면서 발생하는 헨팅(hunting) 현상이 나타나게 되고 습분이 거의 제거되면 진공도의 변화는 처음에는 가파르게 나중에는 헨팅 현상이 없이 부드러운 곡선을 보이는 진공도 변화가 나타난다. 이러한 현상은 고정자 권선 내부가 건조되는 일반적인 경향이며 이와 패턴이 다른 경우는 어딘가에 누설이 존재하고 있다는 것을 간접적으로 의미하는 것이다.

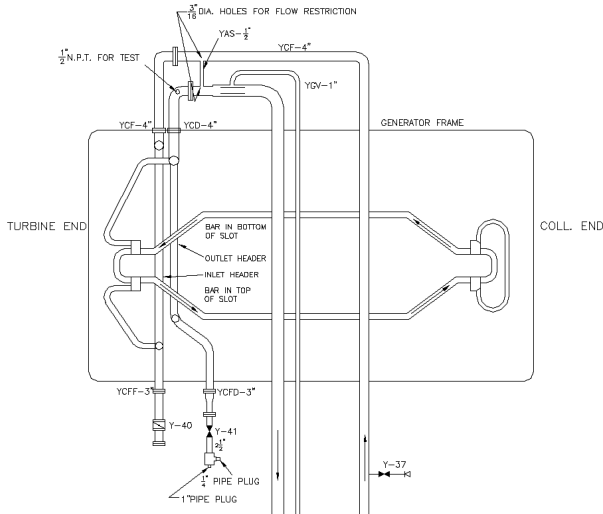


Fig. 3 발전기 고정자 권선 냉각수 계통의 P&ID

2.4. 누수시험

누수시험은 발전기 고정자 권선 냉각수를 완전 제거 후, 권선내부에 존재하는 누설과 같은 결함을 찾기 위해 진공 저하 시험, 압력 강하 시험 및 헬륨 추적 시험을 수행한다. 시험방법은 Fig. 4와 같다.

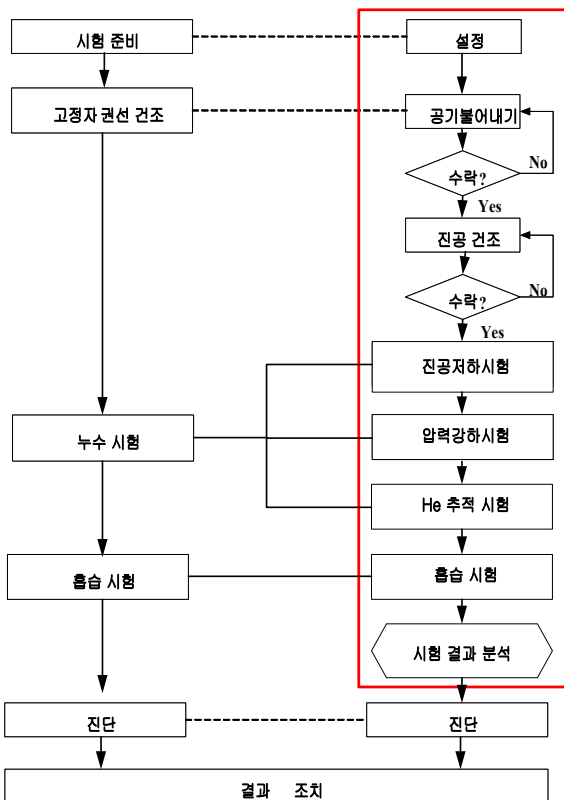


Fig. 4 누수시험에 대한 시험 흐름도

2.4.1. 발전기 내부의 체적 계산

발전기 고정자 권선의 내부의 체적은 설계사항을 고려하여 계산할 수도 있지만 모든 발전기의 제작사 및 사양이 상이하여 매번 누수시험을 위해 각 발전기의 체적을 계산하는 것은 매우 힘들다. 본 누수시험 장치의 공기저장탱크와 발전기 내부와의 체적과 압력 평형을 이용하면 실험적으로 각 발전기 고정자 권선 내부의 체적을 간단하게 다음과 같이 계산할 수 있다. 여기에서, V : 공기저장탱크의 체적, P_1 : 공기저장탱크의 압력, P_2 : 전체 시스템의 압력이다.

$$V = V_1 \times (P_1 - P_2) / P_2 \quad (1)$$

2.4.2. 진공저하시험(vacuum decay test)

Fig. 5는 진공저하시험 사진으로 고정자 권선 내부를 완전히 건조 시키고, 고정자 권선 내부에 진공을 건 후 일정시간 동안 발전기 고정자 권선 내부의 진공 변화량을 측정하여 누수여부를 판정하는 시험으로 시험 기준은 1ft³/day(1CFD)미만으로 발전기 고정자 권선 내부의 진공을 0.05Torr로 이하로 떨어트린 후, 밸브를 차단하고 1시간 동안의 진공 변화량은 계산하여 누수여부를 결정하는 단계이다.



Fig. 5. 진공저하시험 장면

2.4.3. 압력강하시험(pressure drop test)

고정자 권선 내부를 완전히 건조 시키고, 고정자 권선 내부를 가압하고 일정시간 동안 압력 변화량을 측정하여 누수여부를 판정하는 시험이다. 시험 기준은 3ft³/day(3CFD)

미만으로 발전기 고정자 권선 내부의 압력을 4.2kg/cm² 로 걸어서, 밸브를 차단하고 24시간 동안의 압력 변화량은 계산하여 누수여부를 결정한다. 일반적으로 압력 강하 시험과 진공 저하 시험을 모두 수행하는 이유는 누수 경로의 기하학적 형상으로 인하여 한 가지 시험만으로는 누설을 진단할 수 없는 경우가 발생할 수 있기 때문이다. 누설량 계산은 아래 식과 같다. 여기에서 H는 시험 시간, M은 권선 내부 압력, B는 대기압, T는 권선 내부 온도이다.

$$239.36 \times \frac{V}{H} \times \left[\frac{(M_1 + B_1)}{(273 + T)} - \frac{(M_2 + B_2)}{(273 + T_2)} \right] \quad (2)$$



Fig. 6. 압력강하시험 장비

2.4.4. 헬륨추적시험(He tracer test)



Fig. 7. 헬륨추적시험 장비

Fig. 7은 헬륨추적시험 사진으로 고정자 권선 내부를 완전히 건조 시키고, 고정자 권선 내부를 헬륨으로

가압하고 일정시간 후 각 권선의 헬륨 누설량을 측정하여 누수여부를 판정하는 시험이다.

시험 기준은 10⁻⁴cc/sec미만으로 발전기 고정자 권선 내부 헬륨으로 압력을 3.0 ~ 3.5kg/cm² 로 가압하여 60분 후 각 권선과 테프론 호수 연결부 등을 헬륨 감지기를 이용하여 헬륨 누설 량을 측정 하는 누수여부를 결정한다.

2.5. 흡습시험(water absorption test)

정전용량 측정에 의한 흡습시험은 발전기 고정자 권선 내부의 냉각수 누수로 인하여 발생될 수 있는 주 절연물내의 습분에 대한 존재 여부를 평가하는 기법으로 비파괴적 전기 시험이다. 이 기법의 기본 개념은 고정자 권선 주 절연물과 물의 유전율(dielectric constant)의 차이가 크다는 사실을 이용한 것이다. 전 권선에 대한 정전 용량을 측정하여 평균치와 상호 비교함으로써 평가가 이루어진다. 정전용량 값이 높다는 것은 권선의 절연물 내에 습분이 존재한다는 것을 의미한다. 이 시험을 수행할 때는 아래의 조건에 따라 민감하게 반응하므로 세심한 주의가 필요하다. 측정 센서, 권선의 표면 조건과 코팅 및 페인트 상태, 그리고 주 절연물의 상태에 따라 고정자 권선의 정전 용량은 매우 민감하게 변화하기 때문이다. Fig. 8은 누수 및 흡습시험 장치 사진이다.



Fig. 8 누수 및 흡습시험 장치

정전용량 값에 대한 발전기 고정자 권선의 흡습 여부에 대한 진단은 통계 처리를 통하여 이루어지므로 측정 조건이 일정하여야 한다. 따라서 GE사의 경우, 제작 조건 및 테이핑 조건이 일정한 고정자 철심 끝 부분의 권선 꺾임부한 곳을 측정 지점으로 선정하여 시험한다.

- 정상 권선 : 3 sigma limit 미만
- 흡습 의심 : 3 ~ 5 sigma limit
- 흡습 진단 : 5 sigma limit 초과

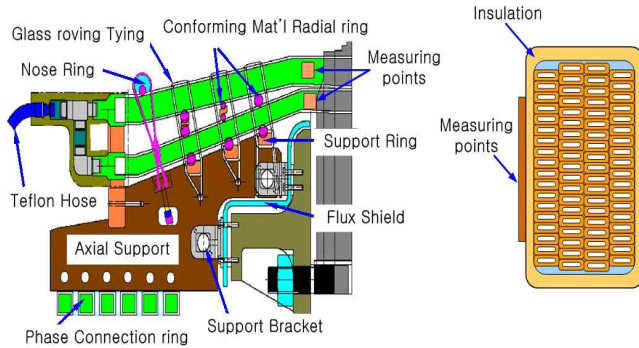


Fig. 9 정전용량 측정위치

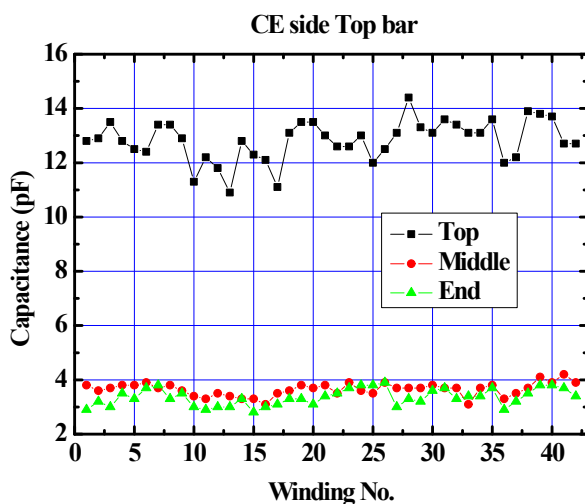


Fig. 10 발전기 권선에 대한 정전용량 분포 예시

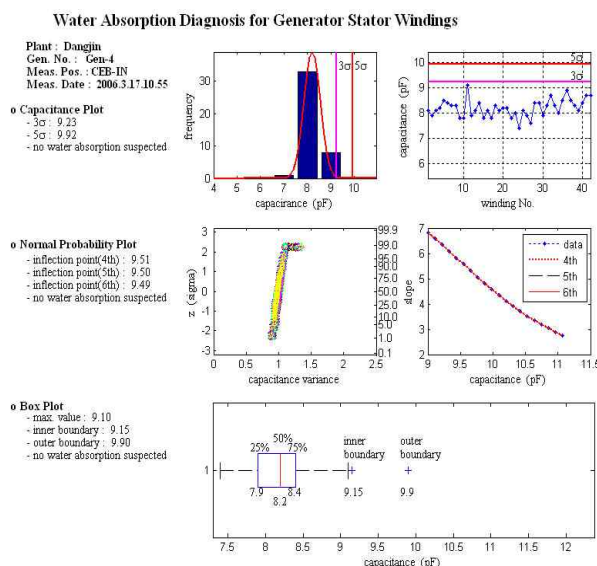


Fig. 11 흡습시험 결과 예시

3. 결론

발전기 고정자 권선의 냉각수 누수 여부를 종합적으로 진단하기 위하여 전력연구원에서 개발한 발전기 고정자 권선 누수 진단 시스템에 간략하게 소개하였다. 본 누수시험 진단 시스템을 활용하여 발전기 운전 중 발생하는 권선 누수 및 흡습에 의한 고장을 감소시킴으로서 국내 산업 및 경제적 손실을 감소시키고 발전 설비의 가동 효율 제고와 생산성 향상을 통해 경쟁력 있는 발전 설비 관리를 구축할 수 있으리라 기대된다.

참고문헌

- [1] Kim H. S. and Bae Y. C., 2006, "Application of the New Leak Test Equipment for Water-cooled Generator Stator Windings", Proceedings of the KSME 2006 Spring Annual Meeting, pp 1676-1682
- [2] Bae Y. C. and Kim H. S., 2008, "A Study on the Wystematic Mechanical Integrity Evaluation Methods of Water-cooled Generator Stator Windings", Proceedings of the KSME 2008 Autumn Annual Meeting, pp 3059-3066
- [3] Stein J., and Nilsson N. E., 1995, "Monitoring and Diagnosis of Turbine-Driven Generators", EPRI
- [4] Stamon D. J., 1992, "Diagnosing and Repairing Water Leaks in Stator Windings", G.E. company Review, Schenectady, Yew York
- [5] EPRI, "Preventing Leakage in the Strand to Clip Connections of Water-Cooled Generator Stator Windings", EPRI TR-107681, 1996, 12
- [6] Bae Y. C. and Kim H. S., 2000, "Evaluation of Mechanical Integrity for Water Cooled Generator Stator Windings in Power Plants", Proceedings of the 2nd Asia-Pacific Conference on System Integrity and Maintenance, China, pp 75-80