

<응용논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2010.34.2.137

수냉각 발전기 고정자의 권선 내부 건조 판정 기준 설정에 관한 실험적 연구

김희수^{**} · 배용채^{*} · 이육륜^{*} · 이두영^{*}

* KEPCO 전력연구원(KEPRI)

An Experimental Study on the Dryness Judgement Criterion for Water-cooled Generator Stator Windings

Hee Soo Kim^{**}, Yong Chae Bae^{*}, Wook Ryun Lee^{*} and Doo Young Lee^{*}

* Korea Electric Power Research Institute

(Received September 21, 2009 ; Revised December 14, 2009 ; Accepted December 14, 2009)

Key Words: Leak Test(누설시험), Dewpoint(노점), Polarization Index(성극지수), Vacuum(진공도)

초록: 발전기 고정자 권선 내부의 완전 건조는 누수시험을 위한 필요/충분조건이다. 발전기 운전에 의한 고주기 피로는 미세 균열 발생의 원인이 되고, 미세 균열에서의 물분자는 누설 진단의 신뢰성을 저하시킨다. 이와 같은 이유로, 발전기 고정자 권선에 대한 누수시험에서 권선에 누설처가 있음에도 불구하고 누설이 없다는 결론과 같은 오류를 범하고 있다. 발전기 제작사는 누수시험을 고유한 건조 판정 기준을 제시하고 있지만, 실제로는 어떤 판정 기준도 누수시험을 위해 정확하게 건조 판정 기준을 지시하고 있지는 못하고 있는 실정이다. 그 이유는 발전기 고정자 권선의 복잡한 구조와 효과적인 건조 장비의 부재 때문이다. 본 논문에서는 수냉각 발전기 고정자 권선의 내부 건조 여부를 판정하기 위한 건조 판정 기준을 완벽하게 제안하였으며 실험적으로 증명하였다.

Abstract: Complete dryness inside the stator is a necessary and sufficient condition for the leak test. Microcracks caused by high cycle fatigue due to operation are generated in stator windings, and they are interrupted by water molecules during the leak test. For this reason, during leak test, the wrong value is indicated when there are no leaks in stator windings. Generator manufacturers presents unique dryness judgment criteria for the leak test, but there is no actual criterion that accurately indicates the dryness point for the leak test. The reason is because stator winding has a complex structure and the absence of effective dryness equipment in power plants. This paper proposes a dryness judgment criterion to evaluate if inside the stator winding is dried completely and presents experimental results.

1. 서 론

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 고장 사고가 발생할 수 있는 단점도 있다.

수냉각 발전기 고정자 권선에 대한 누수시험의 목적은 발전기 고정자 권선 내부의 냉각수를 제거

하고 남아있는 수분까지 완벽히 건조시킨 후, 진공저하시험, 압력강하시험 및 헬륨가스 추적시험을 통해 권선 내부에 존재하는 누설처를 찾아서 정비함으로써 발전기 고정자 권선의 기계적 건전성을 확인하는 것과 2차적으로 전기적 시험을 수행하기 위한 최적의 상태를 준비하는 단계이다. 수냉각 발전기 고정자 권선에 대한 누수시험은 발전소 계획에 방정비(O/H) 공정에서 가장 먼저 수행하는 시험으로서, 시험 수행에 있어서 선결되어야 하는 조건은 발전기 고정자 권선 내부의 완전 건조이다. 권선 건조에 사용하는 방법은 크게 공기 불어내기(air puffing mode), 진공 건조(vacuum drying mode)를 순차적으로 수행하면서 권선 내부를 건조하며 대략 1주일 정도 소요된다. 한편, 각 발전기 제작사는 고

† Corresponding Author, hskim@kepri.re.kr

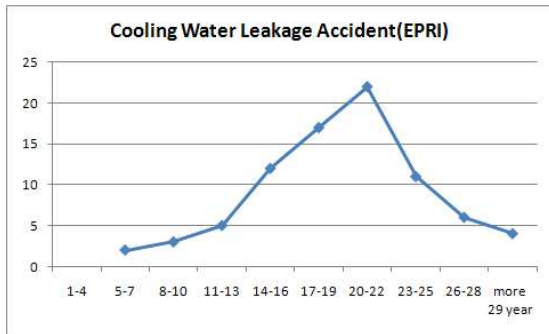


Fig. 1 Cooling water leakage accident due to operation time

유한 건조 기준을 제시하고 있으나, 모두 제각각이다. 또한, 누수 시험의 판정기준도 모두 달라서 정확한 건조 판정 기준 및 시험 판정기준의 설정이 필요하며 이에 대한 검증도 필요하다. 제작사에서 제시하고 있는 공기 불어내기 모드에서의 압력 설정치, 압력강하시험에서의 설정압력 그리고 진공저하시험에서의 진공도도 논란의 여지가 많다. 또한, 제작사에서는 보다 엄격한 시험을 위해 제작 당시의 발전기 검증에 적용하는 높은 압력을 제시하고 있는 반면에, 전력회사에서는 발전기의 안전차원을 고려해서, 운전 중에 발전기 내부와 고정자 권선 냉각수 압력과의 차압을 적용하여 누수시험을 주로 수행하고 있다.^(1,2)

Fig. 1은 수냉각 발전기 고정자 권선의 운전연수에 따른 냉각수 누수 사고를 정리한 것으로서, 운전연수가 10년 이상부터 냉각수 누수사고가 급격히 증가하고 있음을 알 수 있다. 발전기의 수명을 고려할 때, 10년 이상된 발전기 고정자 권선에 대해서는 정확한 누수시험을 통해 발전기 고정자 권선의 건전성을 확인하고 운전하는 것이 발전설비의 운전신뢰성을 제고할 수 있으며 동시에 발전기 수명도 연장시킬 수 있음을 알 수 있다.⁽³⁾

본 논문에서는 발전기 고정자 권선에 대한 누수시험을 위해 권선 내부를 건조함에 있어 어떤 시점에서 권선 내부가 완전히 건조되었나를 판정하기 위한 건조 판단 기준 설정에 대해 실험적으로 증명하였다.

2. 발전기 고정자 권선의 구조

발전기는 제작사에 따라 차이가 있으나 정상 운전 중 발생하는 전자력 또는 로타 회전에 따른 기계력과 같은 정상 상태의 힘과 3상 단락과 같은 과도력에 견딜 수 있는 구조로 제작되어야 한

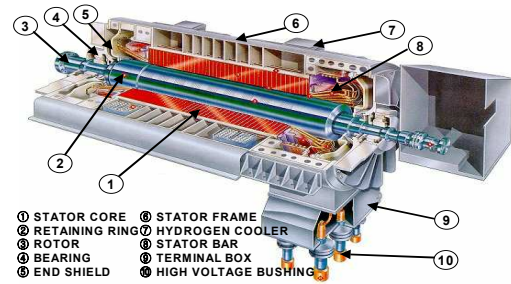


Fig. 2 Structure of a generator

다. 일반적인 수냉각 발전기 고정자 권선의 구조는 Fig. 2와 같다. 수냉각 발전기 고정자 권선은 축방향으로 8~10m 정도로 매우 긴 구조이며, 크게 프레임, 고정자 철심, 권선 및 권선 지지장치, 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 키바에 적층된 고정자 철심의 슬롯에 고정자 권선이 2단으로 삽입되며, 이들을 구속하기 위하여 웨지가 사용된다. 고정자 슬롯에서 나온 상하 권선은 스페이서와 끈으로 인근 권선들과 묶여 있으며 내부 링과 외부 링 그리고 권선 지지장치에 의하여 구속되어 있다. 따라서 고정자 슬롯부에 비하여 권선 단말 부의 기계적 구속 상태가 비교적 취약하며, 실제로 발전기 고정자 냉각수 누수 및 권선 마멸 현상이 고정자 권선 단말 부에서 자주 일어나고 있다.

수냉각 발전기 고정자에서 누수 현상이 자주 발생하는 권선 클립 내부의 구조는 Fig. 3과 같이 가늘고 긴 소선으로 구성되어 있어, 발전기 권선 내부를 건조하기 위해서는 특별한 건조 장치가 필요함을 알 수 있다. 발전기 고정자 권선의 내부 구조는 전류가 흐르는 내부 동도체에서 발생하는 열을 냉각시키기 위하여 많은 냉각수 통로가 있으며 외부는 마이카-에폭시 절연재료로 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 누



Fig. 3 Clip to strand of stator

설되는 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.

3. 누수시험에서의 건조 판정 기준 정립

+발전기 권선 내부의 건조 판정 기준으로는 육안검사, 발전기 권선의 성극지수, 노점온도, 그리고 진공도를 고려할 수 있다. 제작사마다 각기 다른 건조 판정 기준을 제시하고 있으며, 또한 실제 전력회사의 정비 분야 담당자들도 주어진 여건에 맞춰 권선 내부의 건조 여부를 판정하고 있다.

Fig. 4는 권선 건조 및 누설시험을 위한 시스템으로서, 발전기 권선 내부를 건조시킨 후 진공저하시험 및 압력강하시험을 수행하여 누설처 유무를 확인하고 이를 통과하지 못할 경우 헬륨가스 추적시험을 수행하여 정확한 누설처를 찾아서 정비하고 있다.

발전기 제작사에서 제시하고 있는 발전기 권선 내부의 건조 판정 기준으로는 발전기 고정자 내부를 순환한 후 배출되는 공기의 출구측 노점온도와 성극지수, 그리고 진공도를 제시하고 있다. 발전소에서는 이 중에서 주로 성극지수를 사용하고 있다. 그 이유는 노점계는 고가라서 발전소에서는 구매가 쉽지 않으며 특별히 효용성이 떨어지는 반면에 성극지수를 측정하는 절연저항계는 여러 용도로 쓰임이 많으며 노점계에 비해 저렴하기 때문이다. 그러나 성극지수는 발전기 권선 내부의 건조 여부를 판정하기에는 부적합함을 실험적으로 증명하였으며 노점과 진공도를 조합한



Fig. 4 Leak test equipment



Fig. 5 PI measurement setup

건조 판정 기준이 발전기 권선 내부의 건조 판정에 있어 가장 타당함을 증명하였다. 1차적으로, 발전기 권선 입·출구의 노점을 측정하여 입·출구측의 노점이 일정한 노점에 수렴할 시점($<-30^{\circ}\text{C}$)에서 진공 건조 모드로 변환하고, 2차적으로, 발전기 권선 내부의 진공도를 측정하여 0.05 Torr 이하로 진공도가 형성되는 조건을 건조 판정 기준으로 설정하는 것이 보다 완벽하게 권선 내부의 건조를 판단할 수 있는 기준임을 실험적으로 증명하였다.

3.1 성극지수에 의한 판정

성극지수는 10분후의 절연저항과 1분후의 절연저항의 비로서 정의되며, 제작사에서는 2 이상이면 건조되었다고 판정하고 있다. 또한, 성극지수가 시간에 따라 증가할수록 발전기 권선 내부의 건조상태는 양호한 것으로 판정하고 있다.

Fig. 5는 발전기 고정자 권선의 성극지수를 측정하기 위해 발전기 권선과 연결된 절연저항계를

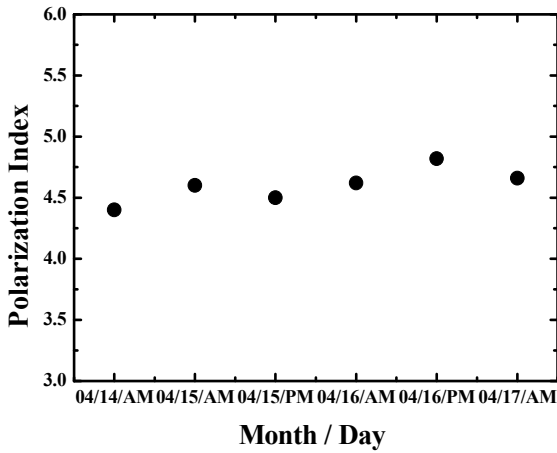


Fig. 6 PI change due to elapsed time

보여주고 있으며, Fig. 6은 시간에 따라 발전기 권선에 대한 성극지수의 변화를 보여주고 있다. 공기 불어내기를 수행하기 시작한 다음날에 4.4 정도로서 건조상태가 양호함을 지시하고 있으며, 권선 내부의 건조가 진행되는 동안 주기적으로 성극지수를 측정하여 분석한 결과, 성극지수는 노점과는 달리 권선 내부의 건조에 따라 민감하게 반응하고 있지 않음을 알 수 있다.

3.2 노점에 의한 판정

수냉식 발전기 고정자 권선 내부의 수분을 제거하기 위한 첫 번째 단계인 공기 불어내기 모드는 발전소의 계측용 공기공급시스템(instrument air system)에서 건조공기를 공급받아 일정 압력으로 발전기 고정자 권선 내부에 압력을 가한 상태에서 닫혀 있던 quick open valve를 순간적으로 열면서 권선 내부에 갇혀 있는 냉각수를 제거하는 공정이다. 권선 내부의 압력을 상승시켜 가면서 반복적으로 수행함으로써 권선 내부에 존재하는 수분을 제거한다. 배출되는 냉각수가 거의 없어지면 공기 불어내기 모드를 중지하고 다음 단계인 건조공기 불어내기 모드로 전환한다.

건조 공기 불어내기 모드에서는 공기 불어내기 모드 수행에도 불구하고 권선 내부에는 수분이 존재하고 있으므로 작업시간을 줄이기 위해 야간과 새벽에는 자동으로 건조공기 불어내기 모드를 수행한다. 발전기 권선 내부의 구조가 매우 복잡하여 중력을 이용한 드레인만으로는 고여 있는 냉각수를 완전히 제거할 수 없으므로 공기불어내기(air puffing mode)를 통해 냉각수를 제거하고 건조공기 불어내

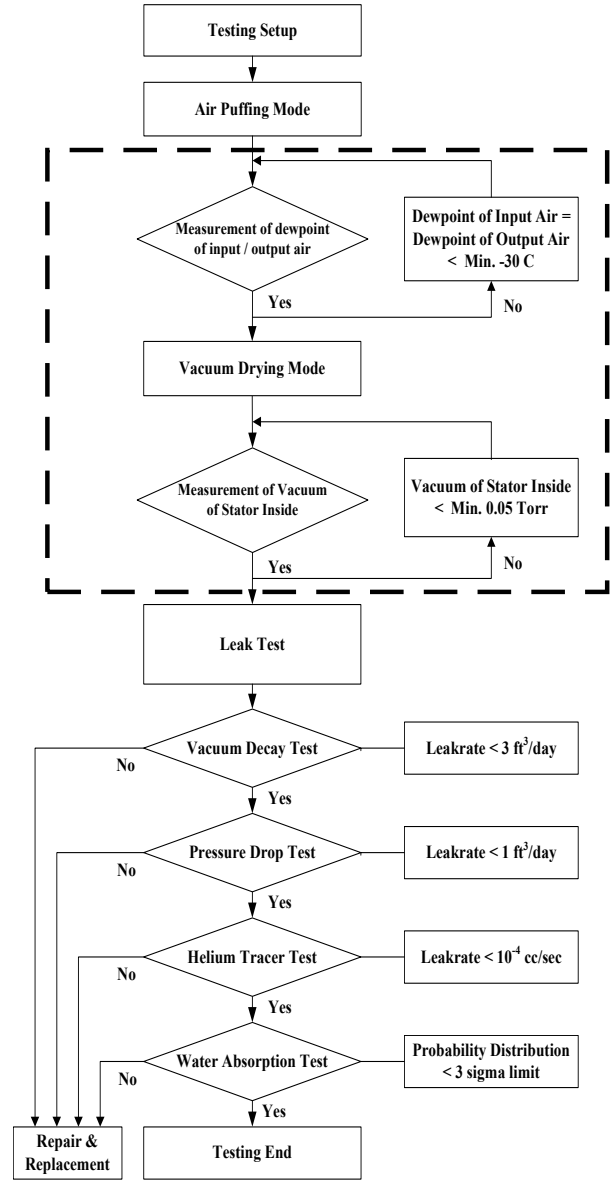


Fig. 7 Testing & diagnosis for water leak/absorption

기(dried air blowing mode)를 통해 권선 내부에 흡수되어있는 습분을 제거하고 마지막으로 진공건조(vacuum drying)를 통해 습분을 증발시킴으로써 권선 내부를 건조시킨다. 공기 불어내기 모드에서 공급하는 건조공기의 입구 노점과 발전기 권선 내부를 통과하여 배출되는 출구 노점을 측정한다.

Fig. 7은 발전기 고정자 권선 내부에 대한 건조/누수/흡습시험 및 진단을 위한 흐름도이며, 점선 부분은 발전기 권선 내부의 건조를 위한 수행 절차와 건조 판단 기준을 제시하였다. 발전소의 계측용 공기공급시스템에서 공급되는 건조 공기의 질에 따라 공급공기의 노점은 -30~35℃ 사이에 존재

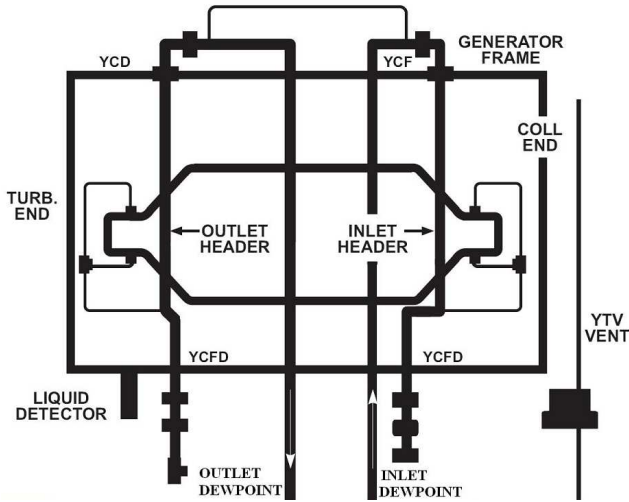


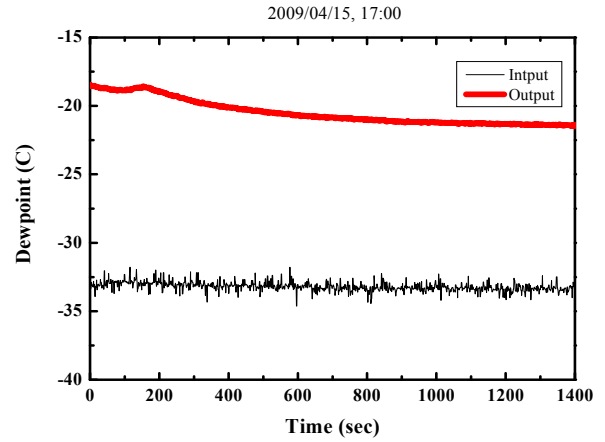
Fig. 8 Drying process by air puffing mode



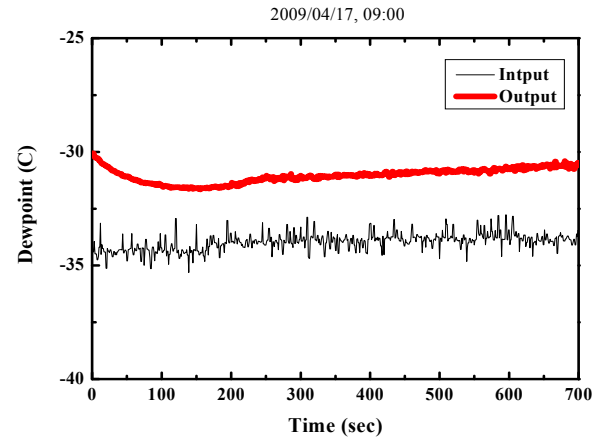
Fig. 9 Dewpoint measurement setup

하고, 건조 공기가 발전기 권선을 순환하고 배출되는 출구 공기의 노점은 권선 내부가 건조됨에 따라 입구 공기의 노점에 수렴하게 된다. 따라서, 1차 건조 판정 기준은 공급되는 공기와 배출되는 공기 노점의 수렴 여부로서 판정할 수 있으며, 수렴되는 노점은 공급공기의 노점인 $-30 \sim -35^{\circ}\text{C}$ 사이에 존재하게 된다.

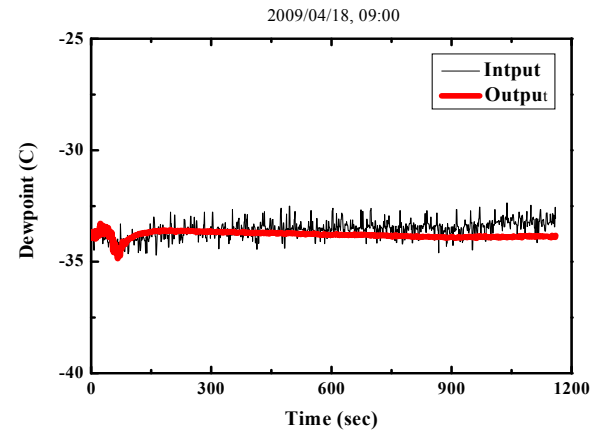
Fig. 8은 공기불어내기 시에 발전기 권선 내부로 공급되는 입구측과 권선 내부를 순환하면서 내부를 건조시키고 배출되는 출구측의 공기의 노점을 측정하는 간략도이다. 실제로는 발전기 권선 내부로 공급되는 건조공기는 발전기 권선 누수 시험 장치의 공기저장탱크에 저장되었다가 발전기 권선 내부로 공급되고 이 때에 입구측 노점을 측정하고



(a) 2nd day of air-puffing mode



(b) 3rd day of air-puffing mode



(c) 4th day of air-puffing mode

Fig. 10 Dewpoint change due to elapsed time

출구측 노점은 발전기 권선 외부로 배출되기 전에 일부 공기를 발전기 권선 누수 시험 장치의 우회 경로(bypass)로 경유시킴으로써 출구측 노점을 측정한다.

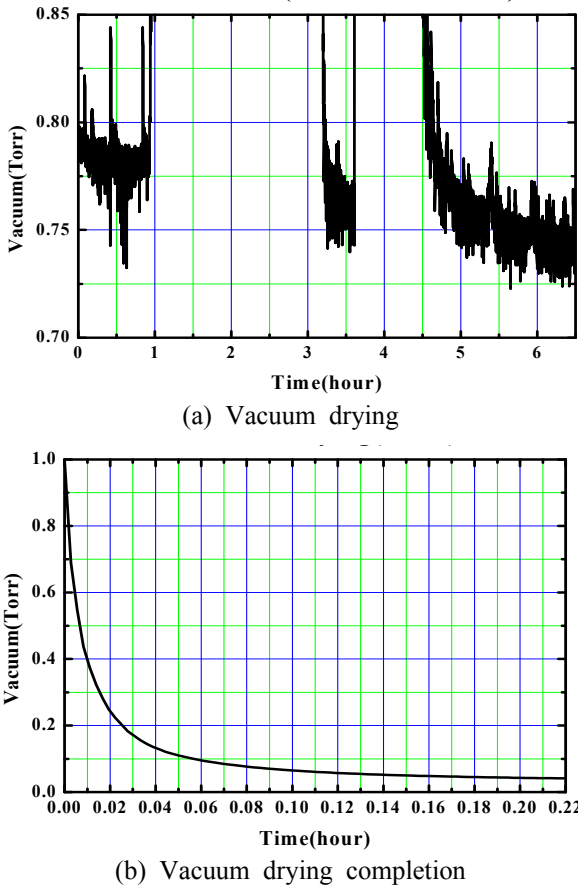


Fig. 11 Vacuum change due to elapsed time

Fig. 9는 발전기 권선 내부로 건조공기를 공급하고 배출할 때 공기의 노점을 측정하는 장비이며, Fig. 10은 공기 불어내기를 진행하면서 시간 경과에 따라 발전기 입·출구에서 공기의 노점을 측정하는 것이다. 공기 불어내기의 효과에 의해 발전기 권선 내부에 존재하는 냉각수가 제거되면서 출구측 공기의 노점이 증가되는 것을 알 수 있으며, 72시간이 지나고 4일째에 접어들 때의 입·출구측의 노점은 거의 동일한 값으로 수렴함을 알 수 있다. 즉 권선 내부에 수분이 거의 없음을 의미한다. 입구측의 노점이 매번 다른 이유는 계측용 공기공급시스템의 제습, 가열, 냉각 재생과 같은 운전이 주기적으로 변경되면서 운전공기를 생산하기 때문에 공급되는 공기의 노점이 조금씩 차이가 발생하게 된다.

3.3 진공도에 의한 판정

2차 건조 판정 기준으로는 공기 불어내기 모드에서 발전기 권선 입·출구의 노점이 거의 수렴할 때에 진공 건조 모드로 변경한 후 발전기 권선 내부의 진공도를 측정함으로써 최종적으로 발전

기 권선 내부의 건조여부를 확인할 수 있다.

Fig. 11은 공기 불어내기 모드에서 입구/출구 공기의 노점이 -33.5℃로 수렴되어 공기불어내기를 중지하고 진공건조모드로 전환한 후 진공펌프에 의한 발전기 권선 내부의 진공도 변화를 보여주고 있다. Fig. 11(a)에는 발전기 권선 내부에 수분이 존재하는 경우로서, 진공도 상승에 의해 압력 강하가 일어남으로써 수분의 기화현상이 발생하게 된다. 따라서 Fig. 11(b)와 같은 부드러운 진공도 곡선 대신에 어느 일정 진공도에서 아래위로 출렁거리면서 서서히 진공도가 증가하는 곡선을 볼 수 있다. 이와는 반대로 Fig. 11(b)에는 거의 절대 진공인 0.03 Torr 진공도로 수렴해 가는 것을 볼 수 있다. 이는 발전기 권선 내부에 존재하는 수분이 거의 없는 완전 건조 상태인 경우에 나타나는 진공도 곡선으로서, 발전기 권선 내부의 완전 건조 여부를 판단할 수 있는 2차 건조 판정 기준임을 실험적으로 증명하였다.

4. 결 론

발전기 제작사에서 제시하고 있는 발전기 고정자 권선 내부의 건조 판정 기준은 성극지수, 노점, 그리고 진공도를 발전소의 현장 사정에 따라 이 중에서 주로 성극지수나 진공도만을 측정하여 기준치와 일치하면 건조되었다고 판단하고 있으나, 이 보다는 1차적으로, 발전기 권선 입·출구의 노점을 측정하여 입·출구측의 노점이 일정한 노점에 수렴할 시점에서 진공 건조 모드로 변환하고, 2차적으로, 발전기 권선 내부의 진공도를 측정하여 0.05 Torr 이하로 진공도가 형성되는 조건을 건조 판정 기준으로 설정하는 것이 보다 완벽하게 권선 내부의 건조를 판단할 수 있는 기준임을 실험적으로 증명하였다.

발전기 권선 내부의 건조 설정 기준을 설정함으로써 수냉식 발전기 고정자 권선에 대한 누수 시험의 진단 신뢰성을 제고할 수 있으며 이는 냉각수 누수로 인한 발전기 불시정지사고를 예방함으로써 발전기 운전 신뢰성을 향상시키는 데 많은 도움이 될 것으로 판단된다.

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 Systematic Mechanical Integrity Evaluation Methods of Water-cooled Generator Stator Windings," *Proceedings of the KSME 2008 Autumn Annual Meeting*, pp. 3059~3066.
- (3) Lamberg, A., etc., "GE Generator Fleet Experience and Available Refurbishment Options," GE Energy GER-4223.