

<응용논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2010.34.9.867

ISSN 1226-4881

수냉각 발전기 고정자 권선의 건조 과정 분석을 통한 누설 및 흡습 예측 진단에 관한 실험적 연구

김희수*† · 배용채* · 이육륜* · 이두영*

* KEPCO Research Institute

Experimental Study on Prediction and Diagnosis of Leakage and Water Absorption in Water-Cooled Generator Stator Windings by Drying Process Analysis

Hee Soo Kim*†, Yong Chae Bae*, Wook Ryun Lee* and Doo Young Lee*

* Power Generation Lab., Korea Electric Power Corporation Research Institute

(Received January 21, 2010 ; Revised July 26, 2010 ; Accepted July 26, 2010)

Key Words: Generator Stator Windings(발전기 고정자 권선), Leak Diagnosis(누설 진단), Water Absorption Diagnosis(흡습 진단), Vacuum Drying Process(진공 건조 과정) Leak Test(누수 시험)

초록: 수냉각 발전기 고정자 권선에서의 냉각수 누수 및 흡습에 의한 절연파괴 손상사례가 국내 및 국외에서 자주 발생되고 있다. 이러한 사고는 막대한 경제적 피해뿐만 아니라 전력의 안정적 공급 측면에서 매우 심각한 계통 사고로 연결될 수 있다. 특히 국내 발전기는 15년 이상 운전되어 열화가 진행된 발전기가 50% 이상이며, 계획예방정비 기간 중에 권선에서의 누설 및 흡습 권선이 종종 발견되고 있다. 기존에는 누수 시험 전 과정인 권선 건조 과정을 무시한 채 누수 시험 결과만으로 권선 누설 여부를 진단하였으나 본 논문에서는 누수 시험을 위한 준비 단계인 진공 건조 시의 권선 내부의 진공도 패턴 분석을 통해 권선 누설 및 흡습 여부를 예측진단할 수 있는 방법을 실험적으로 증명하였다.

Abstract: The failure of water-cooled generator stator windings as a result of insulation breakdown due to coolant water leaks and water absorption often occurs worldwide. Such failure can cause severe grid-related accidents as well as huge economic losses. More than 50% of domestic generators have been operated for over 15 years, and therefore, they exhibit signs of aging. Leaking and water-absorbing windings are often found during an overhaul. In an existing method for evaluating the integrity of generator stator windings, the drying process of the interior of the windings is ignored and only final leak tests are performed. In this study, it is shown that water leaks and water absorption in stator windings can be detected indirectly through vacuum pattern analysis in the vacuum drying mode, which is the used in the preparation stage of the leak test.

1. 서론

수냉각 발전기 고정자 권선에 대한 누수시험의 목적은 발전기 고정자 권선 내부의 냉각수를 제거하고 남아있는 수분까지 완벽히 건조시킨 후, 진공 저하 시험, 압력 강하 시험 및 헬륨가스 추적 시험을 통해 권선 내부에 존재하는 누설처를 찾아서 정비함으로써 발전기 고정자 권선의 기계적 건전성을 확인하는 것과 2차적으로 전기적 시험을 수행하기 위한 최적의 상태를 준비하는 단계이다. 또한, 흡습 시험은 발전기 고정자 권선

내부를 냉각시키는 냉각수가 절연재로 흡습되어 절연내력을 감소시킴으로써 절연파괴와 같은 심각한 손상사고를 발생시킬 수 있는 흡습 권선을 찾아내는 시험으로서, 국내의 연구실적은 전력연구원을 제외하면 거의 전무한 실정이다.⁽¹⁾

국내 발전회사에서는 예전에 수행하던 대로 발전기 고정자 권선 내부를 완전히 건조하지 못한 상태에서 누수 시험을 수행하기 때문에 권선에 누설처가 존재한다 할지라도 미세 균열 통로에 수분이 가로막고 있으면 압력이나 진공에 의한 누수 시험으로는 누설 여부를 정확하게 확인할 수 없는 게 사실이다. 따라서, 권선 내부의 완전 건조는 누수 시험의 성패를 쥐고 있는 열쇠와 같

† Corresponding Author, saeromy1@kepco.co.kr

© 2010 The Korean Society of Mechanical Engineers

은 중요한 필요충분조건이다.

본 논문에서는 누수 시험 중에서 압력 강하 시험과 권선 내부를 건조하는 진공 건조 과정에서의 진공도 패턴을 병행하여 분석함으로써 발전기 고정자 권선의 누설 및 흡습 여부를 예측 진단할 수 있는 방법을 실험적으로 증명하였다.

2. 발전기 고정자 권선의 구조⁽²⁾

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 한다. 일반적인 수냉각 발전기 고정자 권선의 구조는 Fig. 1과 같다. 수냉각 발전기 고정자 권선은 축방향으로 8~10 m 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 키바(key bar)에 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. 2와 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 냉

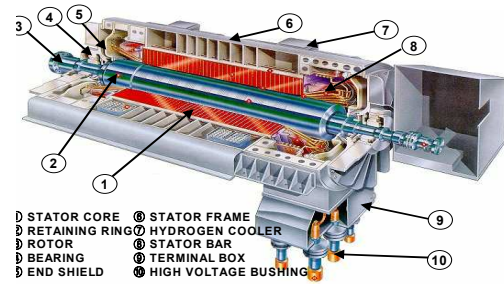


Fig. 1 Structure of a generator



Fig. 2 Section of clip to strand of stator

각수가 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.

3. 누설 및 흡습 예측 진단

일반적으로, 발전기 고정자 권선 내부를 완전히 건조시킨 후, 진공 저하 시험, 압력 강하 시험을 통해서 권선의 누설 여부를 진단하고 있으며, 흡습 시험을 통해 권선의 흡습 여부를 진단하고 있다. 이러한 시험들의 필요충분조건은 발전기 권선 내부의 완전 건조가 선행되어야 한다.

권선 내부를 건조시키는 과정은 Fig. 3에서 점선으로 도시하였다. 공기불어내기(air puffing mode)에서 건조 공기를 권선 내부에 일정 압력으로 충전시킨 후, 발전기 하부에 설치한 quick-open 밸브를 개방하면서 냉각수를 제거시키며, 이 때 출구의 노점이 -30°C 이하의 노점으로 측정되면 공기불어내기 공정에서 진공 건조 공정(vacuum drying mode)으로 전환시킨다.⁽²⁾

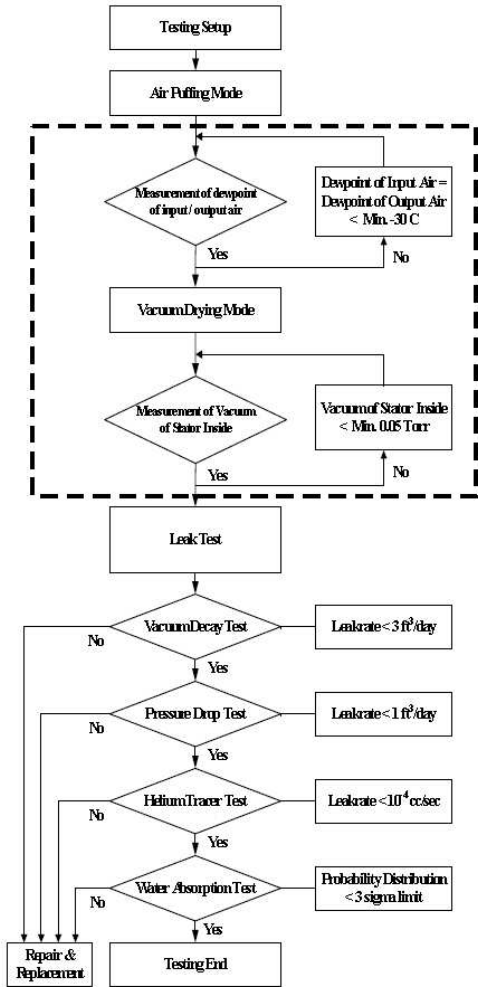


Fig. 3 Testing procedure for integrity evaluation of water-cooled generator stator windings

진공 건조 공정에서는 진공펌프를 이용하여 권선 내부의 진공도를 상승시키면서 권선 내부를 건조시키고 있다. 누설처가 존재하지 않으면, 권선 내부의 진공도는 진공펌프의 운전시간에 따라 절대 진공에 수렴할 것이다. 진공 펌프에 의해 권선 내부에 존재하는 수분은 기화되어 진공 펌프 배출 배관을 통해 외부로 방출되면서 진공도는 향상되게 되며, 0.05 Torr 이하까지 진공도가 도달하면 권선 내부는 완전히 건조되었다고 판정한다. 그 이후에 본격적으로 발전기 고정자 권선에 대한 진공 저하 시험 및 압력 강하 시험을 수행함으로써 권선 내부의 누설 여부를 결정하게 된다.^(3,4)

현재 40기의 발전기 고정자 권선에 대한 누수 시험을 수행한 결과, 공기불어내기와 진공건조를 포함한 권선 건조를 완료하는 데 대략 7~8일 정도가 소요되고 누수 시험은 2일 정도가 소요되고

Table 1 Generator specification

Gen.	Output	Cooling type	Commercial operation	Manufacturer
A	500MW	Water-cooled	1994	Doosan Heavy Industry
B	500MW	Water-cooled	1995	Doosan Heavy Industry
C	500MW	Water-cooled	1984	General Electric
D	500MW	Water-cooled	1993	Doosan Heavy Industry

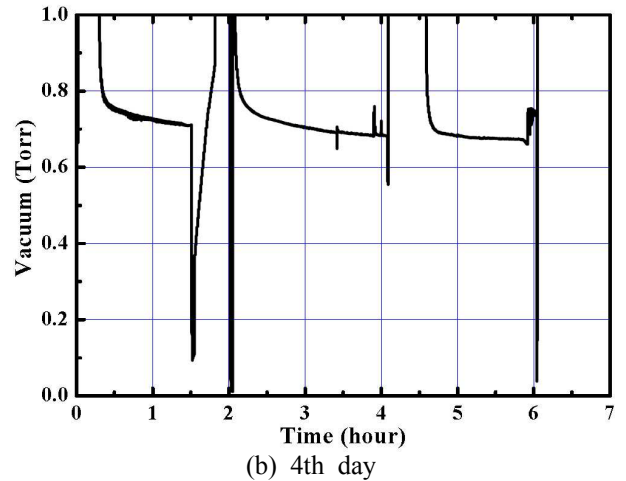
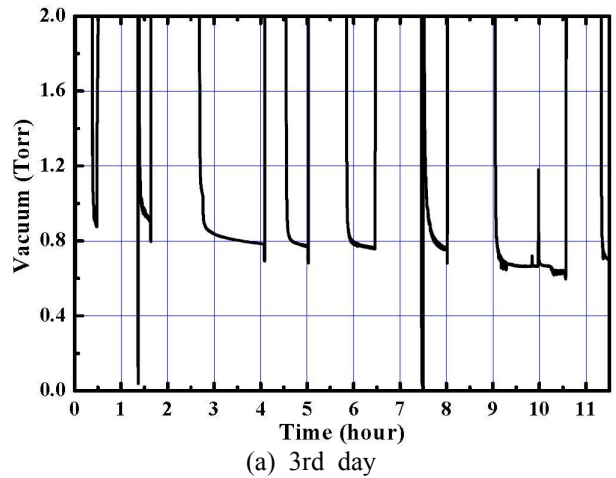


Fig. 4 Vacuum change due to elapsed time

있다. Table 1에는 발전기 권선 건조 과정 중에서 공기불어내기 과정은 제외하고 진공 건조 과정에서 측정된 발전기에 대한 사양을 기술하였다. 본 논문에서는 Table 1에 정리되어 있는 발전기에 대해 실제로 권선 내부를 건조하는 과정에서 권선 내부의 진공도 패턴 분석을 통해 정상, 누설, 흡습 권선 그리고 누설과 흡습이 동시에 진행되는 권선에 대한 예측진단 결과를 사례 별로 분석

하여 정리하였다.

3.1 정상 권선('A' 발전기)

Fig. 4는 'A' 발전기 고정자 권선에 대한 진공도 선도를 보여주고 있다. 진공 건조 3일차와 4일차의 진공 선도로서, 권선 내부의 냉각수 존재로 인해 진공도가 일정시간 동안 정체되어 있다가 진공 건조 4일차에서 갑자기 진공도가 0.75 Torr로 상승하면서 권선 내부에 남아있는 마지막 수분이 기화됨과 동시에 진공 저하 시험이 가능한 0.05 Torr 이하의 진공도에 도달하였다. 또한, Fig. 5에는 24시간 동안의 발전기 고정자 권선 내부의 압력 강하 시험 결과로서, 제작사의 누설 허용치인 1 ft³/day 이하의 결과가 도출되었다. 따라서 권선 진공 건조 과정에서 특이점이 발견되지 않았으며 누수 시험 허용치를 모두 만족하므로, 발전기 고정자 권선은 누설 및 흡습 권선이 없는 정상 권선임을 진단할 수 있다.

3.2 누설 권선 ('B' 발전기)

Fig. 6은 'B' 발전기 고정자 권선에 대한 진공도 선도를 보여주고 있다. 본 발전기는 공기불어내기 공정 후 진공 건조 1일차의 진공 선도로서, 권선 내부의 냉각수 존재로 인해 진공도가 일정시간 동안 정체되어 있다가 진공 건조 시작 후, 10시간 이내에 진공도는 0.4 Torr 이하로 형성되었으며 최종적으로 0.05 Torr 이하의 진공도에 도달하였다. 또한, Fig. 7에는 24시간 동안의 발전기 고정자 권선 내부에 대한 압력 강하 시험 결과로서, 시간이 지남에 따라 지속적으로 압력 강하가 발생되면서, 제작사의 누설 허용치인 1

ft³/day 이상의 결과가 도출되었다. 이상의 결과로부터 작은 권선 누설이 존재하더라도 완전 건조 여부를 결정할 수 있는 0.05 Torr 이하의 진공도 형성에는 크게 영향을 미치고 있지 않음을 확인하였다. Fig. 7의 압력 강하 시험에서는 위와 같은 작은 누설이라도 누설 허용치를 만족할 수 없음을 진단하였다.

3.3 흡습 권선 ('C' 발전기)

Fig. 8은 'C' 발전기 고정자 권선에 대한 진공도 선도를 보여주고 있다. 본 발전기는 공기불어내기 공정 후 진공 건조 2~5일차까지의 진공 선도로서, 진공 건조 공정 초기에는 0.7 Torr 이하로 양호한 진공도를 보였으나, 5일째에도 완전 건조를 의미하는 0.05 Torr 이하로 상승하지 못했으며, 진공도는 일정 진공도를 벗어나지 않으면서 상승과 하강을 반복하는 패턴으로 진행되었

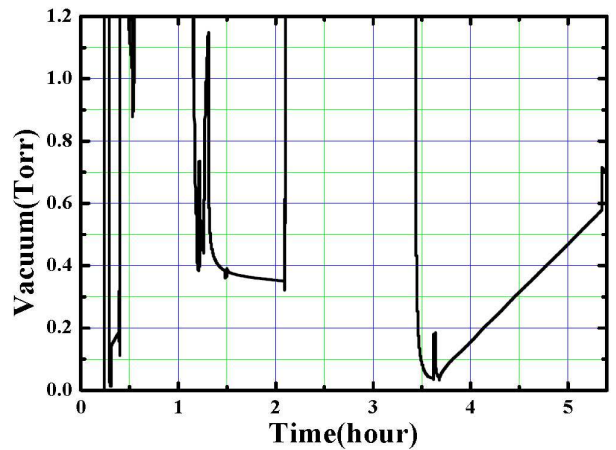


Fig. 6 Vacuum change due to elapsed time

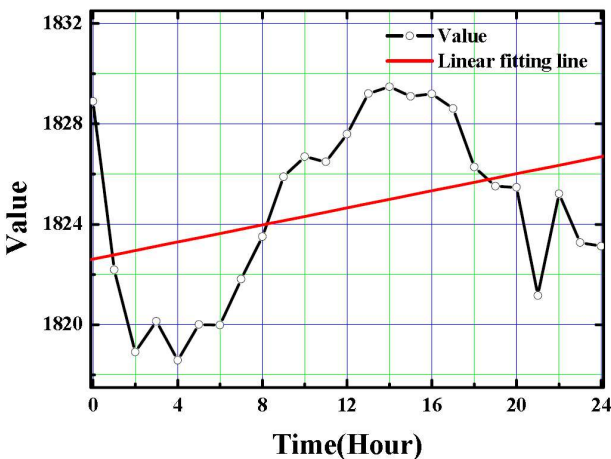


Fig. 5 Result of pressure drop test

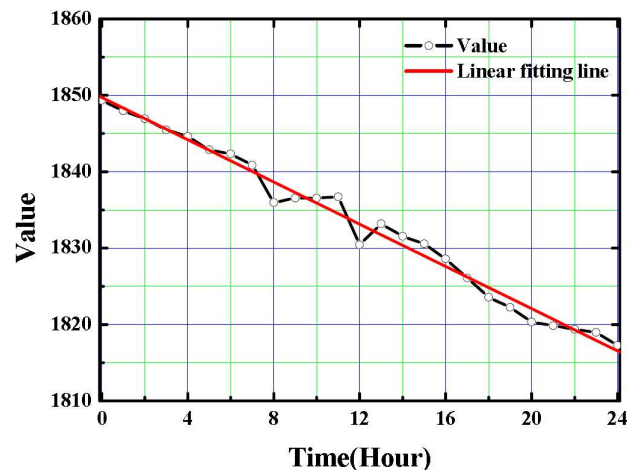


Fig. 7 Result of pressure drop test

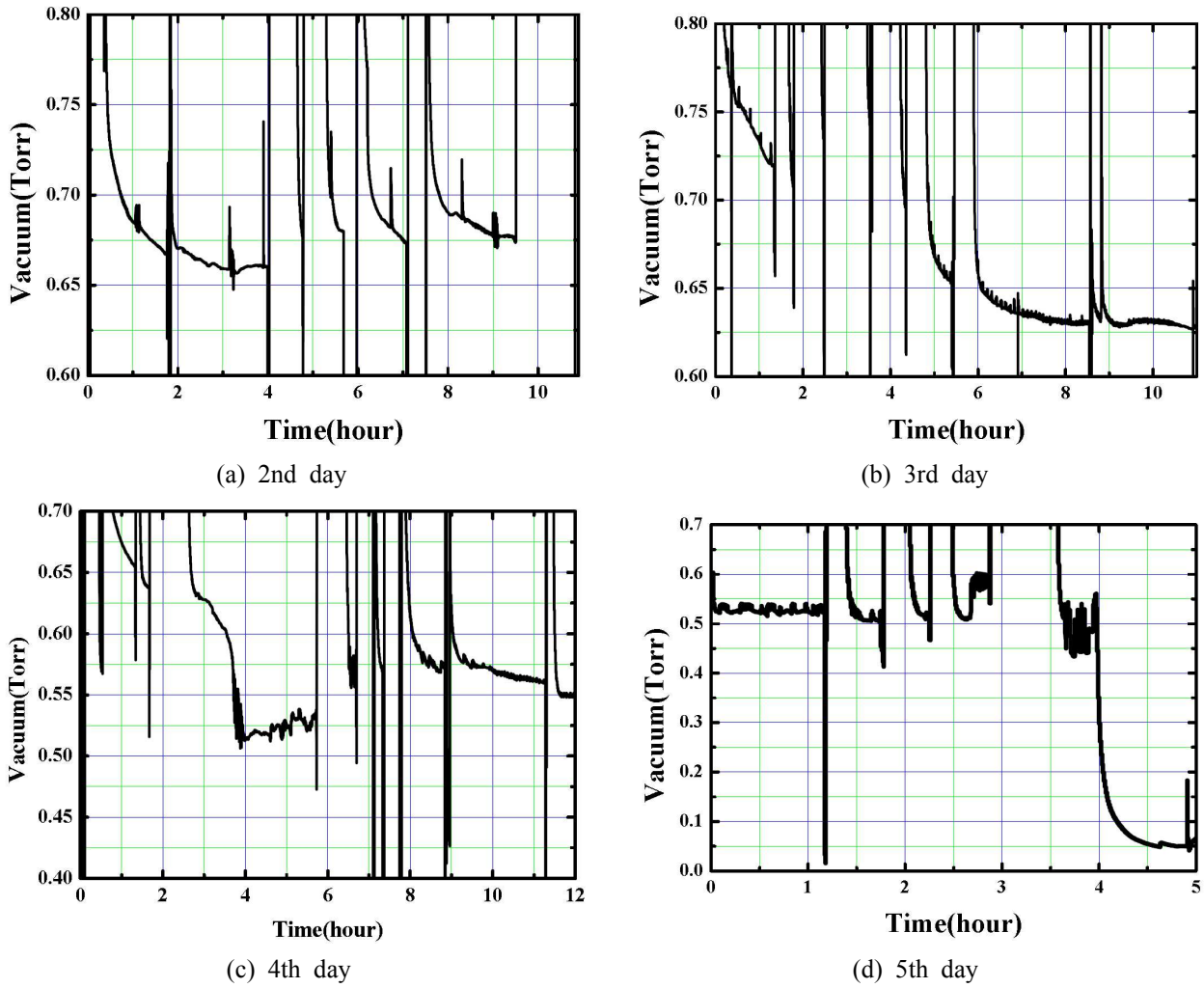


Fig. 8 Vacuum change due to elapsed time

다. 이는 권선에 누설이 존재하여 진공도 형성을 방해하는 경우나 또는 임의의 권선에서 오랜 시간 동안 냉각수 누수로 인한 흡습이 진행되어 흡습된 수분이 진공에 의해 서서히 기화되면서 진공도 형성을 방해하는 현상으로 추측할 수 있다. 다행히도, 마지막 진공 선도에서는 Fig. 4(b)와 동일한 패턴인 일정 진공도로 진공도가 하강하다가 0.05 Torr 이하로 수직 상승하는 동일한 패턴을 확인할 수 있다.

Fig. 9에는 24시간 동안의 발전기 고정자 권선 내부의 압력 강하 시험 결과로서, 제작사의 누설 허용치인 1 ft³/day 미만의 결과가 도출되었다. 이상의 결과로부터 권선에서 외부로 누설되는 누설치는 존재하지 않으나, 냉각수 누수로 인한 흡습 권선에 의해 진공 건조 과정에서 매우 지루한 진공 건조 과정이 필요했던 것으로 판단할 수 있다.

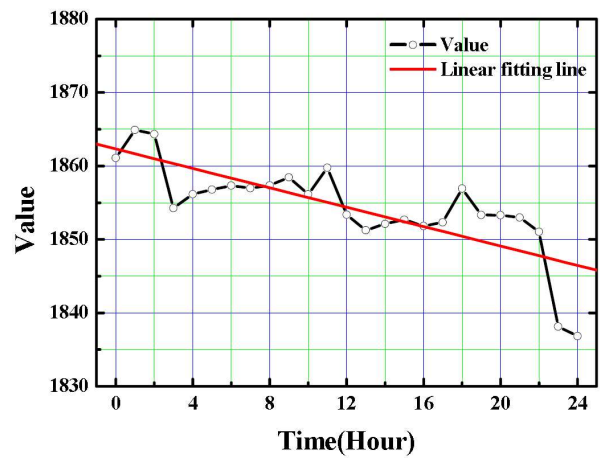
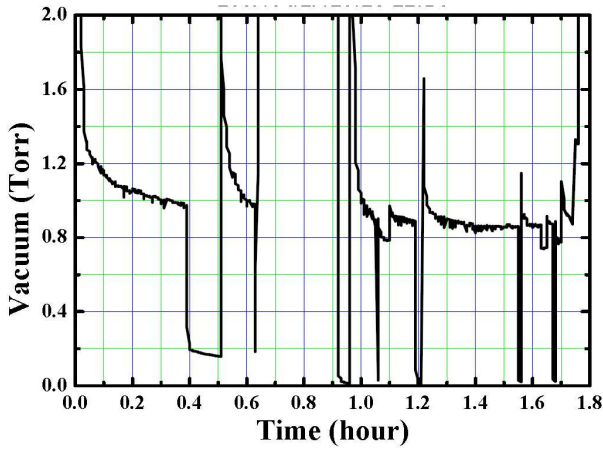


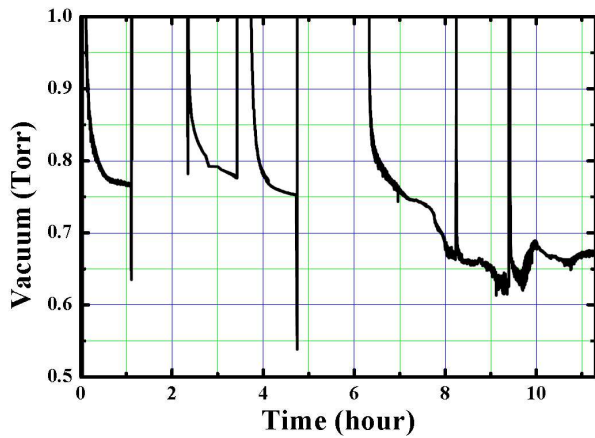
Fig. 9 Result of pressure drop test

3.4 누설 및 흡습 권선 ('D' 발전기)

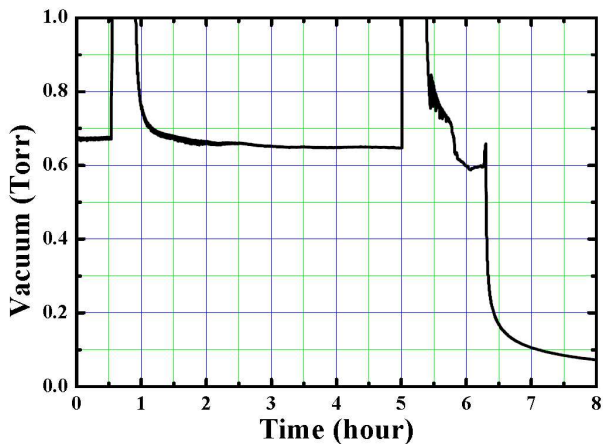
Fig. 10은 'D' 발전기 고정자 권선에 대한 진공도 선도를 보여주고 있다. 본 발전기는 공기불어



(a) 3rd day



(b) 4th day



(c) 5th day

Fig. 10 Vacuum change due to elapsed time

내기 공정 후 진공 건조 3~5일차까지의 진공 선도로서, 3일째에도 0.85 Torr 근처에서 진공도는 상승과 하강을 반복하는 패턴이 형성되고 있다. Fig. 10(b)의 진공 건조 공정 4일째에는 진공도가 향상되는 패턴에서 오히려 악화되는 구간도 일부

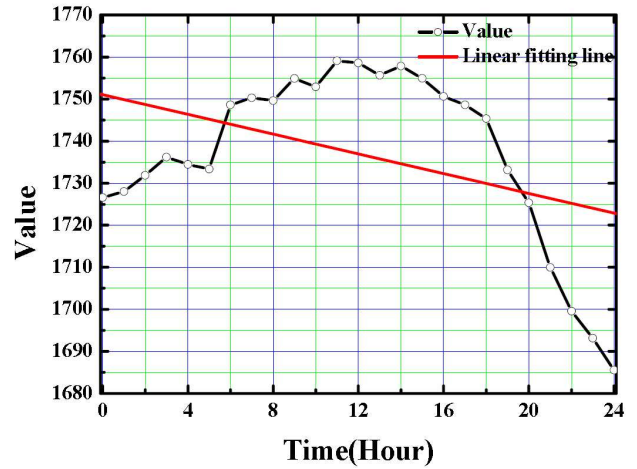


Fig. 11 Result of pressure drop test

나타나고 있다. 또한, Fig. 10(c)의 진공 건조 공정 5일째에는 진공도가 0.65 Torr에서 전혀 움직이지 않다가 임의의 권선 내부에 흡수되어 있던 수분이 기화됨과 동시에 진공 저하 시험이 가능한 0.05 Torr 이하로 진공도가 도달하였다. 즉, Fig. 4(b)와 동일한 패턴인 일정 진공도로 진공도가 하강하다가 0.05 Torr 이하로 수직 상승하는 동일한 패턴을 확인할 수 있다.

Fig. 11에는 24시간 동안의 발전기 고정자 권선 내부의 압력 강하 시험 결과로서, 제작사의 누설 허용치인 1 ft³/day를 초과하는 결과가 도출되었다. 이상의 결과에서, 권선 건조 과정에서는 3.2의 진공도 패턴과 동일한 점으로 보아 권선 흡수를 그리고 압력 강하 시험에서는 확실하게 누설을 진단할 수 있다.

4. 결 론

수냉각 발전기 고정자 권선에서의 누설 및 흡수 여부를 진단은 기계적 건전성 측면에서 매우 중요한 평가 요소 중의 하나이다. 기존에는 누수 시험 전 과정인 진공 건조 과정은 단지 누수 시험을 위한 전 단계로서만 간주하였으며 단지 최종 누수 시험 결과만을 중심으로 건전성 여부를 평가한 반면에 본 논문에서는 누수 시험 전 단계의 건조 과정인 진공 건조 모드에서의 진공도 패턴 분석을 통해 발전기 고정자 권선의 누설 및 흡수 여부를 예측진단하는 방법을 실험적으로 증명하였다.

본 논문에 제시된 방법과 누수 시험을 병행하여 건전성을 평가함으로써 수냉각 발전기 고정자

권선에 대한 누수시험의 진단 신뢰성을 제고할 수 있으며, 냉각수 누수 및 흡습으로 인한 발전기 불시정지사고를 예방함으로써 발전기 운전 신뢰성을 향상시키는 데 많은 도움이 될 것으로 판단된다.

후 기

본 연구(결과물)는 지식경제부의 “에너지기술개발사업”의 지원으로 수행한 연구결과입니다.

참고문헌

- (1) Lamberg, A. etc., "GE Generator Fleet Experience and Available Refurbishment Options," GE Energy GER-4223.
- (2) Kim, H. S. and Bae, Y. C., 2009, "A Study on the Dryness Judgement Criterion for Leak Test in Water-cooled Generator Stator Windings," *Proceedings of the KSME 2009 Fall Annual Meeting*, pp 2582~2586.
- (3) 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.
- (4) Kim, H. S., Bae, Y. C. and Kee, C. D., 2008, "Wet Bar Detection by Using Water Absorption Detector," *J. of Mechanical Science and Technology*, Vol. 22, pp 1163~1173.