

## 고전압전동기 고정자권선 절연물의 흡습특성

오봉근\*, 강현구, 김현일, 임기조\*\*  
한국수자원공사\*, 충북대\*\*

### Insulation Characteristics for The High-voltage Motor stator winding on The Moisture Condition

Bong-Keun Oh\*, Hyun-Gu Kang, Hyun-Il Kim, Kee-Joe Lim\*\*  
K-water\*, ChungBuk University\*\*

**Abstract** - 고전압회전기 고정자권선 절연물의 일반적인 운전조건에서 나타나는 열화특성은 많은 연구결과를 바탕으로 발전되어 왔다. 특히 고정자권선 절연물이 습한환경에서 운영되었을 경우 일반적인 절연물의 열화특성과는 다른것을 알 수 있다. 본 논문에서는 이러한 흡습특성에 대해 실제 산업현장에서 운영중인 고전압전동기 권선 절연물에서 나타나는 절연특성을 분석하고자 하였다. 이를위해 습한환경에서 운영중인 전동기를 선정하여 절연특성시험을 실시하였고 직류 및 교류시험전압결과에서 절연물의 흡습상태에 따른 교류의 절연특성결과값을 얻을 수 있었다.

#### 1. 서 론

회전기가 운전중에 발생하는 열화현상은 절연시스템의 구조에 회복할 수 없는 변화를 일으키는 물리적이고 화학적 열화과정에 기인하며 이는 절연물이 영향을 받기 쉬운 전기적, 기계적, 열적, 환경적인 원인에 의해 발생한다. 전기적 열화는 과도전압, 부분방전현상에 의하고 기계적 열화는 고정자권선에 주기적인 진동을 가하여 열화가 진행된다. 열적열화는 부하전류의 변동이 심한 회전기에서 절연물과 도체간의 열팽창계수 차이로 절연시스템이 열화되며, 환경적 열화는 설비의 운영환경에 의한 오손, 흡습에 의해 열화가 진행된다. 특히, 이러한 열화요인들은 설비에 복합적으로 인가되어 직접 또는 간접적으로 절연물을 열화시킨다.

본 논문에서는 이렇게 다양한 열화요인 가운데 환경적열화의 습한환경에 의해 발생하는 절연특성에 대하여 분석하고자 한다. 이를위해 실제 산업현장에서 동일조건(제작사, 제작일)에서 제작되어 운영중인 펌프구동용 고전압전동기에 대하여 습한환경에서 운영중인 전동기 권선 절연물의 열화상태를 절연진단시험법으로 측정하고 일반적인 절연물의 열화특성과 비교하였다.

#### 2. 시험 방법

##### 2.1 시험대상설비

시험대상 기기는 실제 산업현장에서 습한환경에서 가동중인 전동기를 선정하였으며, 시험결과의 신뢰성을 높이기 위해 2개의 다른 장소(A, B)에서 운영된 기기를 대상으로 각 전동기는 동일제작사에서 동일시기에 제작된 것으로 한정하였다. 표 1은 이들 설비에 대한 설비특성을 보여준다.

**<표 1> 시험대상전동기의 설비특성**

구 분	대 수	정격전압	정격용량	절연계급	제작년도
A	6	3.3	260	F	1996
B	6	3.3	100	F	1987

##### 2.2 절연진단시험방법

회전기 정지중 실시하는 절연진단시험방법은 인가하는 시험전압에 따라 직류 및 교류시험으로 구분할 수 있다. 직류시험전압을 인가하여 시험하는 절연저항과 성극지수시험은 노출된 권선표면의 오손과 습기를 감지할 수 있는 시험법으로 권선이 깨지거나, 균열부분이 있을 경우에 더욱 민감하게 측정된다. 절연저항측정방법은 직류시험전압 인가 후 일정시간(통상1분)이 경과하는 순간의 값을 계속하여 평가한다. 성극지수 시험은 권선 절연물의 흡습, 오손 등에 의하여 누설전류가 충전전류와 흡습전류의 값보다 크면 전전류와 절연저항은 시간에 따라 거의 변하지 않게 되는데 이러한 시간적 변화에 따른 누설전류의 변화량(1분후누설전류측정값/10분후누설전류측정값)을 측정하는 시험이다.

교류시험은 권선절연물에 교류시험전압을 인가하였을 때 흐르는 전류와 전압의 관계, 즉 I-V특성으로부터 절연상태를 분석하는 시험으로 절연물내 결함이 존재하여 부분방전이 발생하면 미소공극을 단락시

켜 충전전류가 급격히 증가하는데 이러한 전압 및 전류 급증률로부터 절연물의 흡습 및 열화의 정도를 분석할 수 있다. 유전정접시험에서 사용되는 유전손실계수(Dissipation factor, tanδ)는 권선 절연물의 특성값이며 절연물의 전기적 손실정도를 나타내는 것이다. 절연물이 완전할 경우 유전손실은 인가전압이 증가하여도 증가하지 않는다. 하지만 고정자권선의 주절연이나 주절연과 절실사이에서 공극(void)이 있어 권선에 고전압이 인가되면 이들 공극에서 부분방전이 발생하고 결국 유전손실도 증가하게 된다. 유전손실계수(tanδ)는 인가전압(V)에 따라 용량성전류(Ic)와 손실전류(Ir)의 비율을 측정하는 것으로 이 값은 대상절연물의 평균손실을 나타내지만, 국부적인 결함을 나타내지는 못한다. 반면, 부분방전 시험은 고전압 절연물내 공극등과 같은 결함부에 고전계가 형성되어 국부적인 절연파괴에 의해 고정자권선을 통해 전송되는 빠른펄스를 측정하여 절연물의 국부적인 열화상태를 분석할 수 있다. 부분방전이 발생하면 오존, 산화질소, 불안정한 여자 및 전리된 이온이 형성되어 공극주변의 절연체에 화학반응을 일으켜 절연체가 열화되므로 부분방전과 절연수명은 깊은 상관관계가 있는 것으로 알려져 있다.

본 논문에서는 습한환경에서 운영중인 전동기를 대상으로 먼저 직류전압시험을 실시하여 그 결과를 기준으로 고정자권선 절연물의 상태를 흡습과 건전상태로 분류하고, 이후 교류시험을 실시하여 시험결과에서 나타나는 흡습시료와 건전시료의 절연특성을 비교하여 고전압전동기 고정자권선에서 나타나는 흡습상태의 고유한 절연특성을 분석하였다.

#### 3. 결과 및 검토

##### 3.1 시험결과

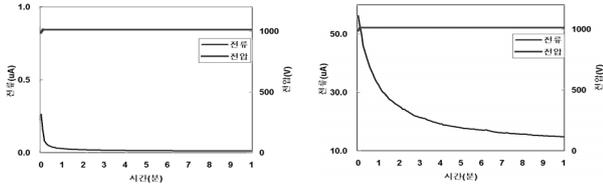
##### 3.1.1 직류전압시험결과

표 2는 시험대상 전동기에 대한 직류전압시험결과를 나타낸다. 절연저항시험은 직류시험전압 1000 V를 권선단자에 1분간 인가후 절연저항을 측정하였다. IEEE 43-2000에서는 측정값을 권선온도 40 °C로 환산하여 100 MΩ초과시 양호한 것으로 판정하고 있다[1]. 시험결과 A에서 1대(A-6호기), B에서 4대(B-1~4호기)의 전동기가 기준값 이하로 측정되어 절연물의 흡습 등에 의해 절연내력이 상당히 저하된 것으로 나타났다. 성극지수시험은 직류시험전압 1000 V를 10분간 인가 후 측정하였다. IEEE 43-2000에서는 측정값이 2.0 초과시 양호한 절연물로 판정하며 절연저항값이 5000 MΩ로 상당히 큰 값일 경우 성극지수값은 절연상태 평가 지표로서 의미가 없음을 제시하고 있다[2]. 시험결과 A에서는 성극지수가 낮지만 절연저항값이 상당히 크게 측정되어 양호한 절연상태를 나타내는 호기를 제외하면 1대(A-1호기)가 B에서는 4대(B-1~4호기)의 전동기 권선 성극지수가 기준값이하로 나타났다. 절연저항값이 낮은 B의 4대는 성극지수값도 기준값이하로 나타나 절연물의 흡습특성을 보인 반면, 장소 A에서의 1호기는 양호한 절연저항값에서 낮은 성극지수값이 나타나고, 6호기는 낮은 절연저항값에서 양호한 성극지수값이 나타나는 상반된 특성이 나타났다. 따라서 장소 A에서의 1호기와 6호기에 대하여 성극지수결과를 정밀분석하여 보았다. 그림1은 10분간 측정된 누설전류값을 보여준다. B-1호기의 경우 성극지수값은 낮았지만 건전한 절연물의 전형적인 특성을 보여주고 있는 반면, B-6호기의 경우에는 성극지수값이 높았지만 누설전류의 값이 1호기와 비교하여 크게 측정되어 B-6호기의 권선 절연물이 흡습특성을 보이는 것으로 판단된다.

**<표 2> 직류전압시험결과**

시험방법	구 분	1호기	2호기	3호기	4호기	5호기	6호기
절연저항 (MΩ)	A	834	9136	4317	12318	7913	14
	B	31.18	0.09	20.64	0.05	1500	1403
성극지수	A	1.47	1.34	1.18	2.57	1.39	2.26
	B	1.39	0.99	1.38	1.00	5.12	5.48

직류시험결과에서 알 수 있듯이 총 시험대상 전동기 12대 가운데 5대 (A-1, B-1~4호기)가 흡습특성을 보이는 것으로 나타났다. 따라서 교류 전압시험을 통하여 건전한 권선과 흡습가능성이 있는 권선과의 절연특성을 비교하여 흡습시료의 고유 절연특성을 분석하였다.



(c) 전동기권선(A-1호기) (b) 전동기권선(A-6호기)  
**〈그림 1〉성극지수시험결과**

### 3.1.2 교류전압시험결과

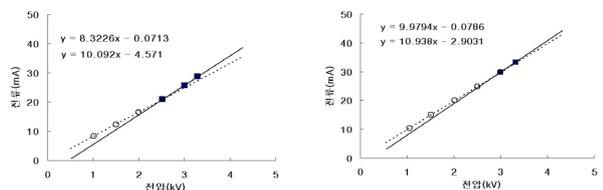
흡습권선 절연물에 대해 교류전압을 인가하여 얻을 수 있는 절연 특성 값을 알아보기 위해 직류시험결과를 바탕으로 구분한 흡습 전동기 권선절연물과 비교대상이 되는 건전한 전동기 권선을 선정하였다. 건전한 전동기권선은 상대적으로 절연저항값이 우수한 A-4호기를, 흡습특성의 전동기 권선으로는 A-6호기, B-2, 4호기를 선정하여 각각의 교류전압시험에 대해 절연특성을 비교하였다.

그림2는 교류전류시험결과를 나타낸다. 교류전류시험은 관련 논문자료에서 교류전류증가율이 4 % 이상시 주의를 요하는 것으로 제시하고 있다[2,3]. 건조한 A-4호기는 교류전류증가율이 4.89%로 주의를 요하는 값으로 측정되어 직류시험에서 상당히 양호한 결과값을 보인것과는 상반된 특성이 나타났다. 이러한 현상은 직류전압시험에서 나타나지 않는 권선내부 절연물의 열화특성에 의한 것으로 판단된다. 흡습권선 절연물의 경우 흡습상태가 상대적으로 양호한 권선인 A-6호기는 양호한 교류전류 특성을 보인 반면 흡습상태가 심각한 B-2,4호기에서는 부의 값으로 측정되어 누설전류가 포화되어 증가율이 감소되는 특성으로 일반적인 절연물의 열화특성과는 다른것으로 나타났다.

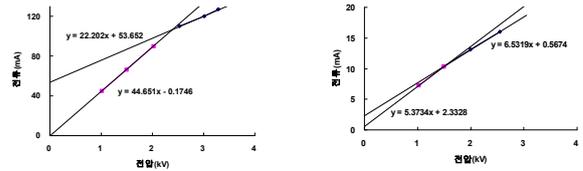
그림 3은 유전정점시험결과로 정격전압에서 측정된 유전손실계수와 1 kV에서 측정된 유전손실계수의 차가 3.5 % 이상일 경우는 주의를 요하며 또한, 1 kV에서 측정된 유전손실계수가 10 % 이상일 경우에는 절연물이 흡습된 상태로 주의를 요하는 것으로 제시하고 있다[2,3]. 건조한 A-4호기는 손실계수차가 4.85 %로 주의를 요하는 값 이상으로 측정되어 절연물의 열화특성이 나타난 반면, 1 kV에서 측정된 유전손실계수는 1.10 %로 흡습특성은 나타나지 않았다. 이는 교류전압시험결과와 유사한 특성을 보이는 것으로 나타났다. A-6호기는 유전손실계수의 차이는 적지만, 1 kV 측정값이 13 %로 흡습특성을 보여주었으며, 특히 B-2,4호기는 1 kV 측정값이 클 뿐만 아니라, B-2와 같이 포화특성을 보이거나, B-4호기 처럼 유전손실계수차가 상당히 큰 폭으로 증가하는 특성이 나타났다. 또한, 포화특성을 보인 B-2호기의 경우에는 시험전압 인가도중 2.7 kV에서 권선절연이 파괴가 발생되어 유전손실계수의 포화특성은 권선절연물의 절연내력이 상당히 저하된 상태를 나타내는 지표임을 알 수 있었다.

그림 4는 부분방전시험결과를 보여준다. 부분방전시험에서는 정격전압에서 측정된 최대부분방전량이 5000 pC 이상에서 주의 의견을 제시하고 있다[2,3]. 건조한 A-4호기는 측정값이 44200 pC으로 주의 이상의 값이고 방전형태는 내부방전형태로 나타나 교류전류 및 유전정점시험결과와 같이 절연물 내부의 열화특성을 보여주었다. 반면 흡습 권선절연물인 A-6은 동일시기, 동일제작사에서 제작된 전동기임에도 부분방전값이 작게 측정되었고, B-2,4호기도 부분방전값이 작은 값으로 측정되었다. 이는 절연물내 보이드층이 수분침투로 인하여 부분방전이 미소하게 발생한 것으로 판단된다.

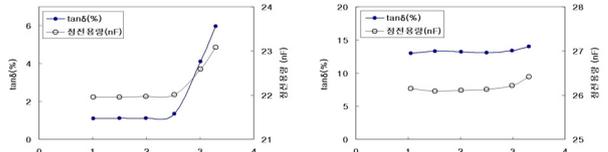
교류전압시험결과를 분석해보면 흡습시료의 경우 일반적으로 나타나는 건조한 절연물의 열화특성과는 다르게 교류전류시험에서는 전류 급증점에서 증가율이 감소되었고 유전정점시험에서는 초기 유전손실계수가 크게 측정되었고, 유전손실량은 큰 값으로 증가하거나 감소되었다. 특히 감소되는 특성의 권선절연물은 시험 중 절연파괴가 발생하여 절연내력이 상당히 저하된 상태임을 알 수 있었다. 부분방전시험의 경우에는 부분방전량이 오히려 감소된 현상이 나타나는 것을 알 수 있었다.



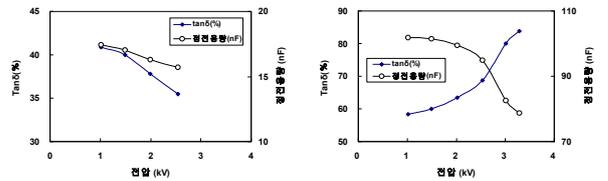
(a) 전동기권선(A-4호기) (b) 전동기권선(A-6호기)



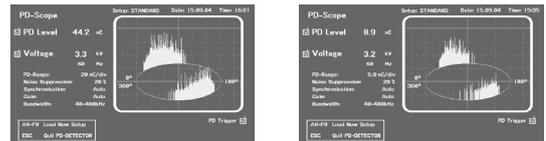
(c) 전동기권선(B-2호기) (b) 전동기권선(B-4호기)  
**〈그림 2〉 교류전류시험결과**



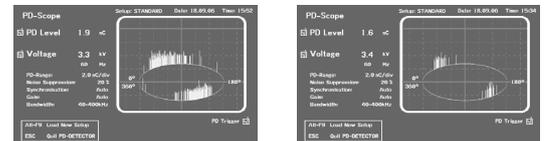
(a) 전동기권선(A-4호기) (b) 전동기권선(A-6호기)



(c) 전동기권선(B-2호기) (b) 전동기권선(B-4호기)  
**〈그림 3〉 유전정점시험결과**



(a) 전동기권선(A-4호기) (b) 전동기권선(A-6호기)



(c) 전동기권선(B-2호기) (b) 전동기권선(B-4호기)  
**〈그림 4〉 부분방전시험결과**

## 4. 결 론

산업현장에서 사용중인 고전압전동기 권선절연물의 흡습특성에 의해 나타나는 절연저항값의 변화특성을 분석하였다. 직류시험 결과를 바탕으로 흡습된 전동기권선을 선정하여 교류시험에 대한 절연특성을 분석한 결과 흡습권선의 경우 건조한 절연물의 열화특성과는 다른 특성을 갖는 것으로 나타났다. 교류전류증가율은 감소특성을 보였고, 유전정점시험에서는 전압상승시 포화특성을 보이거나 매우 큰 값으로 증가하였으며, 부분방전시험에서의 최대부분방전량은 오히려 감소되는 특성이 나타났다. 특히, 유전정점시험에서 전압상승시 유전손실계수가 감소특성을 보인 시료의 경우 시험전압인가 중에 절연파괴가 발생됨에 따라 이러한 권선 절연물의 절연내력은 상당히 저하된 것을 알 수 있었다. 따라서 교류시험에서 측정되는 흡습권선 절연물의 특성값은 권선절연물의 위험도 평가 시 좀더 정밀한 분석이 가능할 것으로 판단된다.

### [참 고 문 헌]

- [1] IEEE 43-2000, "IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery".
- [2] H. Yoshida, K. Umamoto, "Insulation Diagnosis for Rotating Machine Insulation", IEEE Trans. Elec. Ins, Vol. EI-21 No. 6, 1986.
- [3] 池田, "水車發電機 Coil의 劣化豫知와 壽命豫測의 調査研究", 전력중앙연구소보고, W95517. 1996.