

절연진단시험을 이용한 고전압전동기 운영환경에 따른 절연특성분석

오봉근, 김현일, 장정호, 이광호
수자원연구원

Insulation Characteristic Analysis According to Operation Environment
of High Voltage Motor Using Insulation Diagnostic Test

Bong-Keun Oh, Hyun-Il Kim, Cheung-Ho Jang, Kwang-Ho Lee
Korea Institute of Water and Environment

Abstract - 회전기 고정자권선 절연물은 전기적, 기계적, 열적, 환경적 열화요인이 단독 또는 복합적으로 작용하여 열화된다. 본 논문에서는 실제 산업현장에서 운영 중인 고전압 전동기의 운영환경을 조사하여 건조환경에서 운영 중인 전동기와 다습환경에서 운영 중인 전동기에 대하여 절연진단시험을 실시하고 각 시험에서 도출된 절연진단인자를 비교하여 환경적 열화요인이 우세한 운영 환경에 따른 절연물의 특성변화를 분석하였다.

건조한 환경의 경우 평균습도는 60%이고, 건물내 지상에 설치되어 환기가 용이한 장소에서 운영중이고, 다습한 환경의 경우 평균습도는 85%이고, 옥내지하에 설치되어 환기가 매우 열악한 조건에서 운영 중인 전동기이다.

1. 서 론

고전압회전기에 적용된 전기적인 절연시스템의 열화특성에 대한 연구는 과거부터 많은 연구가 되어왔으며, 이러한 연구의 목적은 현재 운영중이거나, 새롭게 제작된 권선의 절연상태와 수명예측을 하는데 중점을 두고 있다. 회전기의 열화율은 절연시스템의 구조에 회복 할 수 없는 변화를 일으키는 물리적이고 화학적 열화과정에 기인하며 이러한 열화는 절연물이 받기쉬운 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.

2.2 절연진단시험

절연시스템의 절연상태는 전기적인 시험에 의하여 가장 잘 평가된다. 회전기에 사용되는 절연시스템에 대한 이러한 시험들은 크게 두가지 방식이 있는데, 절연내력 시험과 절연물의 특성을 측정하는 진단시험이다. 절연내력 시험은 정격전압보다 높은 교류 또는 직류전압을 인가하여 사용가능여부를 판정하는 시험이지만, 절연상태를 알 수는 없다. 반면 진단시험의 경우 절연물의 흡습, 오손, 미소공극, 박리현상등과 같이 절연물을 열화시키는 현상들을 알 수 있다. 대표적인 진단시험으로는 절연저항시험, 성극지수시험, 교류전류시험, 유전정접시험, 부분방전시험이 있다. 본 논문에서는 시험대상 전동기에 대하여 위의 5가지 절연진단시험을 수행하고, 여기서 도출된 절연진단인자를 분석하였다.

본 논문에서는 이러한 열화요인중에서 주요인이 환경적열화에 의해 발생하는 절연특성에 대하여 분석하고자 한다. 이를위해 실제 산업현장에서 동일조건(제작사, 제작일)에서 제작되어 운영 중인 펌프구동용 고전압전동기에 대하여 건조하고 통풍이 원활한 운영조건과 습하고 통풍이 원활하지 않아 상대적으로 열악한 운영조건에서 각 절연물의 열화상태를 절연진단시험법으로 측정하고 절연특성을 분석하였다.

2.2.1 절연진단시험방법

직류시험전압을 인가하여 시험하는 절연저항과 성극지수시험은 노출된 권선표면의 오손과 습기를 감지할 수 있는 시험법으로 권선이 깨지거나, 균열부분이 있을 경우에 더욱 민감하게 측정된다. 절연저항측정방법은 직류 시험전압을 인가 후 일정시간(통상1분)이 경과하는 순간의 값을 계속하여 평가한다. 그리고 권선 절연물의 흡습, 오손등에 의하여 누설전류가 충전전류와 흡습전류의 값보다 크면 전전류와 절연저항은 시간에 따라 거의 변하지 않게 되는데 성극지수시험은 이러한 시간적 변화에 따른 누설전류의 변화량(1분후누설전류측정값/10분후누설전류측정값)을 측정하는 시험이다.

2. 본 론

2.1 시험대상 설비특성

시험대상설비는 시험의 신뢰성을 높이기위해 실제 산업현장에서 운영 중인 동일한(동일제작사 및 제작년도) 펌프구동용 고전압전동기에 대하여 운영환경이 건조한 곳과 다습한 곳을 조사하여 절연진단시험을 수행하였다. 시험대상설비특성은 표1과 같으며 건조환경에서 2대, 다습환경에서 2대를 선정하였다.

교류전류시험은 권선절연물에 교류시험전압을 인가하였을 때 흐르는 전류와 전압의 관계, 즉 I-V특성으로부터 절연상태를 분석하는 시험으로 절연물내 결함이 존재하여 부분방전이 발생하면 미소공극을 단락시켜 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 철심사이에 공극(void)이 있어 권선에 고전압이 인가되면 이들 공극에서 부분방전이 발생하고 결국 유전손실도 증가하게 된다. 유전손실계수(tanδ)는 그림 1과 같이 인가전압(V)에 따라 용량성전류(Ic)와 손실전류(I_R)의 비율을 측정하는 것으로 이 값은 대상절연물의 평균손실을 나타내지만, 국부적인 결함을 나타내지는 못한다.

표1. 시험대상설비특성

| 운영환경 | 용량(kW) | 전압(kV) | 절연계급 | 제작년도 |
|------|--------|--------|------|------|
| 건조 | 110 | 3.3 | F | 1987 |
| 다습 | 93 | 3.3 | F | 1987 |

반면, 부분방전시험은 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 있다.

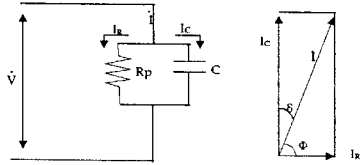


그림 1. 절연물의 등가회로 및 전류-전압 벡터도

2.2.2 절연진단시험결과

그림 2는 절연저항 및 성극지수시험 결과를 보여주는 것으로 직류시험전압 1000 V를 10분간 시험대상 전동기의 고정자권선에 인가하여 절연저항과 누설전류를 측정하였다. 건조환경 전동기의 경우 측정값을 40%로 환산한 절연저항값은 A전동기가 1500MΩ, B전동기는 1403MΩ이고, 성극지수는 A전동기가 5.12, B전동기가 5.48로 측정되어 IEEE43-2000에서 제시하는 기준값(절연저항값은 100MΩ이상, 성극지수는 2.0이상일 경우 양호)보다 모두 크게 나타나 양호한 절연상태인 것으로 사료된다. 반면, 다습환경 전동기는 누설전류값이 건조환경과 비교하여 1000배 이상 크게 측정되었으며, 이런 이유로 시험대상 전동기 보호를 위해 시험전압이 400 V이상 상승하지 못하였으며, 이 시험전압에서 측정된 절연저항값은 C전동기가 0.09MΩ, D전동기가 0.05MΩ으로 상당히 낮았으며, 성극지수도 C전동기가 0.99, D전동기가 1.0으로 기준값보다 낮게 분석되었다. 따라서 직류시험전압을 인가한 절연진단시험에서 다습한 운영조건에서의 시험대상 전동기의 절연내력이 건조환경 전동기에 비하여 상당히 저하된 상태인 것으로 나타났다.

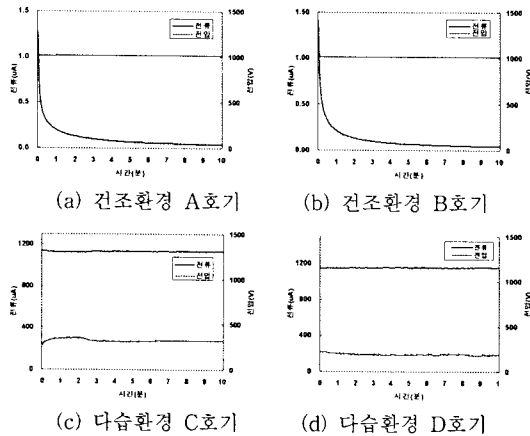


그림 2. 절연저항 및 성극지수시험 결과

그림 3은 교류전류시험 결과를 보여주는 것으로 교류 시험전압을 정격전압까지 상승시키면서 측정된 누설전류의 선형특성을 분석한 것이다. 건조환경의 경우 A, B 전동기 모두 전류급증점이 나타나지 않고 정격전압까지 선형적으로 증가하는 특성이 보이고 있다. 반면 다습환경의 경우 C, D 전동기 모두 A, B 전동기와 비교하여 측정된 누설전류값이 10배이상 크게 나타났고, C전동기는

시험전압 2.4 kV, D 전동기는 1.6 kV 이상에서는 누설 전류의 증가율이 감소하는 포화특성이 나타나 절연물의 절연내력 임계점에 근접한 것으로 보여진다.

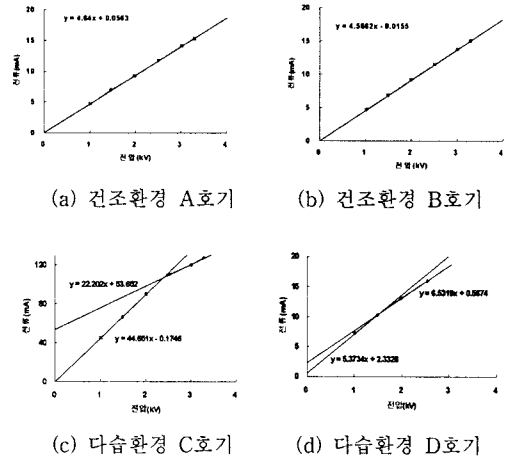


그림 3. 교류전류시험결과

그림 3은 유전정접시험 결과를 보여준다. 교류시험전압을 시험대상전동기의 정격전압까지 상승시키면서 1 kV 단위별로 유전정접 및 정전용량을 측정하였으며, 유전손실계수(tanδ)의 크기변화를 분석하였다. 건조환경의 경우 시험전압을 인가하여도 유전손실계수의 크기변화는 A, B 전동기 모두 0.2 %미만으로 미소하였지만, 다습환경의 경우 측정초기값도 건조환경에 비하여 5배 이상 높았으며 유전손실계수의 크기변화는 C 전동기는 26 % 증가하여 절연물의 손실이 급증한 것으로 나타났고, D 전동기는 오히려 5.4 % 감소하는 특징이 나타났다. 특히, 유전정접시험에서는 절연물의 흡습특성을 용이하게 나타내므로 다습한 운영조건에서의 전동기 권선절연물이 상당히 흡습된 것으로 나타났다.

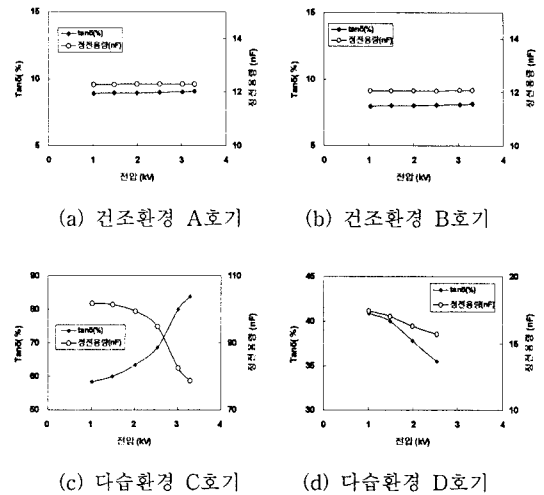


그림 4. 유전정접시험 결과

그림 4는 부분방전시험결과로 시험전압을 정격전압까지 상승하여 최대부분방전량을 측정하였다. 건조환경에서는 A 전동기가 1800 pC, B 전동기가 3100 pC이고, 다

습환경에서는 C전동기가 1900 pC, D전동기가 1600 pC으로 최대부분방전량의 크기는 유사하였으며 다습환경의 경우 부분방전개수가 상대적으로 많게 측정되었다. 하지만, 부분방전시험에서는 환경조건에 따라 부분방전량의 차이가 미소하여 구별하기가 어려웠다.

[참 고 문 헌]

- [1] IEEE 43-2000, "IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery".
- [2] IEEE 286-2000, "Recommended Practice for Measurement of Power Factor Tip-Up of Electric Machinery Stator Coil Insulation".
- [3] Gupta, B. K, G. C. Stone, J. Stein "Use of AC and DC Hipot Tests to Assess Stator Winding Insulation", Pros, IEEE Electrical Insulation Conference, Chicago, 605-608.
- [4] Culbert, I.M., H. Khirani, G. C. Stone, "Handbook to Assess the Insulation Condition of Large Rotating Machines", EL-5036, 16, EPRI, 5-14.
- [5] IEC 60270, "High-voltage Test Techniques-Partial Discharge Measurements", 2000.

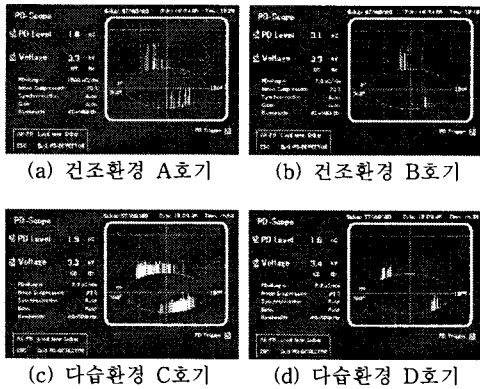


그림 5. 부분방전시험 결과

3. 시험결과분석

표2는 직류시험전압을 인가하여 측정된 절연저항과 성극지수시험, 그리고 교류시험전압을 인가하여 측정된 교류전류, 유전정접 및 부분방전시험에 대한 전동기 운영 환경에 따른 절연진단인자의 특성값을 나타낸다. 부분방전시험을 제외하고, 건조환경과 다습환경과의 절연특성값은 큰 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 특히 다습환경에서 운영중인 전동기에 대한 교류시험시에는 시험전압인가중 정격전압부근에서 고정자권선 인출부 권선이 절연파괴되었다. 따라서 다습환경에서 운영중인 전동기의 절연내력은 상당히 저하된 상태로 절연파괴 임계점에 근접한 것으로 사료된다.

표2. 절연진단시험결과

| 시험종류 | 건조환경 | | 다습환경 | |
|------|---------|---------|---------|---------|
| | 절연저항 | 1500 M | 1403 M | 0.09 M |
| 성극지수 | 5.12 | 5.48 | 0.99 | 1.0 |
| 교류전류 | 없음 | 없음 | -13.76 | -9.30 |
| 유전정접 | 0.17 % | 0.19 % | 25.5 % | -5.40 % |
| 부분방전 | 1800 pC | 3100 pC | 1900 pC | 1600 pC |

4. 결 론

실제 산업현장의 건조한 환경과 다습한 환경에서 운영 중인 동일규격의 고전압전동기 고정자권선 절연물에 대하여 절연진단시험을 실시한 결과 다습한 운영환경에서 운영중인 전동기의 절연내력이 상당히 저하된 것으로 분석되었고, 특히, 시험중에 절연파괴가 발생한 전동기도 있었다. 절연진단시험에서는 절연저항, 성극지수, 교류전류 및 유전정접시험에서 도출된 절연특성인자는 뚜렷한 흡습특성이 나타나 유용한 지표였지만, 부분방전시험은 구분하기 어려웠다. 따라서 절연진단시험을 통하여 절연물의 열화상태 분석이 가능하였으며, 동일규격의 전동기이지만 운영환경에 따라 절연물의 절연내력에는 상당한 차이가 발생한 것으로 나타나 환경적 열화요인을 최소화할 수 있는 운영환경 조성이 필요할 것으로 사료된다.