

취수 펌프용 고압전동기(6.6 kV, 3,800 kW)의 소손원인 분석

*오민환, 이은춘, 홍성택, 이상군
한국수자원공사

Damage Analysis of High Voltage Motor for Intake Pump

Oh, Min-Hwan, Lee, Eun-Chun, Hong, Sung-Taek, Lee, Sang-Gun
Korea Water Resources Corporation

Abstract - This paper demonstrates the insulation-destruction of high-voltage-motors for intake pump. To analyze the causes of damage in motors, electrical, mechanical and environmental fiery-development were investigated. The insulation-destruction of high-voltage-motors are generally due to the fiery-stress by void where composite materials such as mica/epoxy are used. But this paper shows that electrical and mechanical stresses can be the main reason of the damage, too.

450회이었으며, 본 전동기의 특성은 표 1과 같다.

표 1 소손 고압전동기 특성표

HP(kW)	5094 (3800)	Weight (kg)	30000
Volts	6600	Rotor	Squirrel cage
Poles	12	Service Factor	1.15
FLRPM	588	M a s s A m b i e n t (C)	40
FLAMPS	389	I n C l a s s S F	
Hertz	60	Dr B r g S i d e	Sleeve
Rating	Cont	Op B r g S i d e	Sleeve

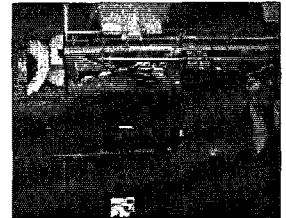


그림 1 소손 고압전동기 분해 현황

1. 서 론

한국수자원공사는 수도권 2천만 시민 생활 용수를 공급하기 위하여 팔당댐 취수장에서 하루 743만 m³씩 취수하고 있다. 대량의 용수를 취수하기 위해서는 펌프구동용으로 대용량 고압전동기가 필요하다. 최근 마이카/에폭시 복합재료에 의한 대용량 고압전동기의 설계 기술 발전으로 한국수자원공사 취수장에 432대가 운영되고 있으며, 향후 지속적으로 증가가 예상된다.

광역상수도는 국민 생활과 직접적인 영향을 미치는 공공성이 높은 시설이기 때문에 예기치 않는 전동기 절연 파괴시 급수중단 뿐만 아니라 수리에 장시간이 소요되는 문제점이 있다.

일반적으로 전동기 운영중 절연재의 파괴는 전성파피보다는 각종 열화의 점진적 진행에 의한 절연파괴가 대부분인 것으로 보고되고 있다[1].

전동기의 경우는 사고를 미연에 방지하고 경제적인 정비계획 수립 및 운전의 신뢰성 확보를 위하여 고정자 권선의 절연 열화상태 특히 부분방전의 크기를 사전에 측정하여 열화정도를 평가하고 있으나, 현재 운영되고 있는 고압전동기의 경우 개별 기기의 운전특성이나 환경의 차이를 두지 않고 일률적으로 운영되고 있다. 즉 운전기간 경과후 교체나 절연파괴 사고시 재권선이 반복적으로 이루어지고 있다[2].

본 논문에서는 수도권 4단계 10호기 소손 고압전동기에 대한 전기적, 기계적, 환경적 열화현상을 조사하고, 취수용 고압전동기 소손에 대한 코일엔드 부분의 절연 및 분진 시료를 채취 분석한 결과를 제시하고자 하였다.

2. 현황조사

2.1 전동기 현황조사

2.1.1 전동기 이력

소손된 3φ 유도형 전동기는 '92년 제작된 HSDP Serial Type No. 915037-1로 팔당 2 취수장 4단계 펌프장의 10호기로 사용되었다.

'92년 현장에 투입되어 4,500 시간 가동후 '94년 7월 13일 고정자 코일 절연파괴로 재권선 수리후 '95년 1월 15일부터 재가동하여 '98년 11월 28일 소손시 까지 24,876시간 40분 운영하였다. 기동정지 횟수는

2.1.2 설계현황

소손된 전동기는 6.6kV 3,800kW로서 고정자의 슬롯이 144개, 크기는 14.4mm×95.5mm이고, 고정자 결선은 4병렬 Y결선, 코일의 권선 횟수는 8회이며 코어의 길이는 1,160mm, 소선의 굵기는 2.1mm×4.8mm×2 가닥으로 고정자 선간저항은 0.0772Ω, 고정자와 회전자간의 공극은 편축으로 3mm로 설계되었다.

정격전류는 Full Load를 기준으로 설계시에는 Cosφ=0.83 (413A), 운영시에는 Cosφ=0.96 (356A)이며, 운전전류는 361A(Cosφ=0.96)로 병렬 조합운전을 한다. 리액터 기동방식을 채택하였으며 부속장치로는 진상용콘덴서(6.6kV, 1,200kVA), SA, ZCT, CT, Relay 등과 보호방식으로 3E, SGR(67)을 사용하였다.

2.2 사고 현상조사

2.2.1 전기적 열화조사

그림 2와 같이 3상의 U, V, W상에서 첫번째 그룹의 W상이 소손되었다. 상층의 W상과 하층의 V상은 전류의 동일방향으로 2층권으로 구성되었으며, 슬롯엔드 부분에서 상간단락으로 W상의 상층권선이 그림 3과 같이 전체 슬롯코일의 65% 정도가 녹아 내렸다. 이와 같은 현상은 슬롯내부의 코일간 단락에 의해 내부 순환전류가 발생, 발열이 지속되어 절연파괴에 의해 1점 지락이 순차적으로 발생함으로 코일이 과대하게 손상된 것으로 판단되었다.

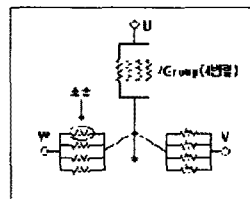


그림 2 Coil slot 소손 위치

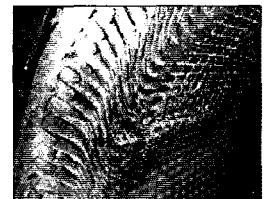


그림 3 Coil slot 소손 현상

2.2.2 기계적 열화조사

축베어링 축 표면에 베어링 캡의 잔존물인 알루미늄이 붙어 있어 1점 지력에 의한 접지현상을 발견할 수 있었으며, 그림 4와 같이 축 자체도 마모가 심한 것으로 조사되어, 상당한 회전 진동을 유발하였을 것으로 판단되었다.

또한 축의 마모에 의한 누유는 냉각시 통풍에 의해 많은 부분의 슬리브 베어링의 오일이 누유되어 반부하측 코일엔드부분에 부착, 절연물의 성능을 저하한 것으로 판단할 수 있었다.

그림 5는 회전자의 내부 스파이더 용접부에 크랙이 조사되었고, 부하측보다 반부하측이 정도가 심하게 나타난 것으로 판단되었다.

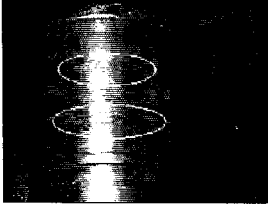


그림 4 반부하측 축베어링 캡

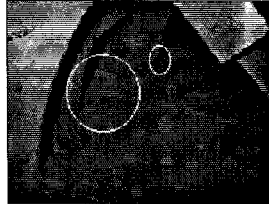


그림 5 회전자 후레임 용접부분 균열 현황

2.2.3 환경적 열화조사

전동기의 반부하측 코일엔드부분이 분진으로 심하게 오염되어 시료를 채취 유도결합 플라즈마 질량분석기(ICP/MS)로 분석한 결과를 표 2에 나타내었다.

부하측의 분진은 동 성분이 주를 이루고 반부하측의 오일은 토륨 성분이 86%로 주를 이루며, 도전성 성분이 많은 부분을 포함하고 있다.

그림 6에 반부하측의 슬리브 베어링의 오일이 누유된 것을 판단할 수 있었다. 오일은 도전성 성분이 높아 열화흡습을 가중시키므로 주기적으로 크리싱이 필요한 것을 알 수 있었다.

표 2 분진시험결과 단위:mg/t

항목	부하측 분진	반부하측 오일
K	7.066	4.777
Si	128	158
Fe	31.931	8.738
Mn	830	658
Cu	119.793	2.212
Co	158	11
Zn	1.825	3.622
Pb	459	1.017
Th	120.168	109.450
Sr	103	101
Ba	291	379
Cr	521	66
Cd	8	31
Mg	5.758	6.391

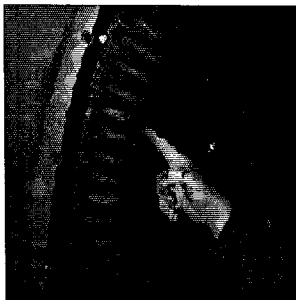


그림 6 반부하측 오일 부착 현황

3. 절연열화 원인분석

3.1 절연열화경로

최근 고전압전동기의 주 절연 재료로 마이카/에폭시 복합재료가 사용되고 있다. 운전중에 열적, 기계적, 전기적 응력 및 외부환경에 의한 열화요인이 단독 혹은 복합적으로 작용한다. 열적요인은 열응력과 열분해로 분류되는데, 열응력은 기계적 응력과 더불어 균일을 발생시키고 열분해는 에폭시의 분해에 의한 가스압력이 증가하여 접착강도를 저하시켜 계면에서 박리를 발생시킨다. 기계적 응력은 계면과 마이카/에폭시 단계부분에서 각각 미소균열을 발생시키고 동시에 이미 다른 원인에 의해 생성된 균열을 확대시킨다.

전기적응력은 박리 균열과 같은 결합부분에서 부분방전이 발생하여 유점점의 증가 코로나침식 및 트리가 진

행하다가 마이카조각이 존재하면 전진이 억제된다. 열화의 최종 단계에서는 독립적으로 발생된 미소균열이 결합하여 균열에 트리가 진전하여 절연파괴에 이른다[3].

3.2 SEM(Scanning Electron Microscope ; 주사형 전자현미경)분석

소손된 전동기는 코일엔드 부분에서의 이물질이 쌓여 전기적 열화기구에 의한 스트레스로 부분방전과 회전진동에 의한 기계적 스트레스에 의한 복합적인 파괴의 시점을 나타내주고 있다.

그림 7, 그림 8은 고압전동기 고정자 권선 End 부분의 단면에서 SEM 사진을 나타냈으며, 옅은 회색은 마이카이고 짙은 회색은 에폭시를 나타낸다. 건전 시편에서는 마이카와 에폭시 계면에서 미소공극을 거의 발견할 수 없지만, 마이카 크리스탈에서 절연열화 현상이 국부적으로 발생하고 있다. 열화시편은 마이카/에폭시 층간 계면이 짙은 회색으로 나타난 것처럼 미소공극이 거의 존재하지 않으며, 마이카 크리스탈에서 절연열화 현상이 건전 시편보다 많은 부분에서 발생하고 있다. 따라서 건전 시편에 비해 열화시편이 전기적 열화를 더 많이 받는 것으로 나타났다. 또한, 고압전동기 고정자 권선에 기계적인 하중이 가해지면 고분자 가지 사슬(polymeric matrix chains)의 정렬이 일어나 마이카와 에폭시의 계면에서 미끄러짐 발생으로 물리적 및 화학적인 결합력이 약화되면서 미소공극이 증가하여 절연열화가 발생한다는 것을 알 수 있다.

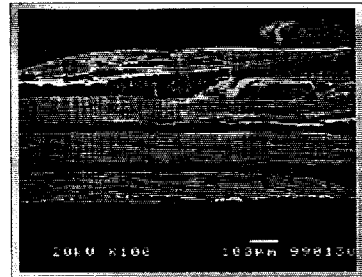


그림 7 건전코일의 마이카 절연상태

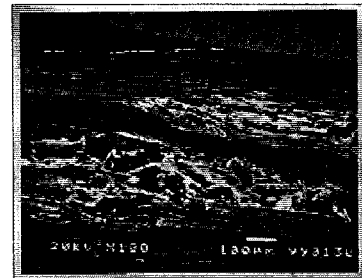


그림 8 절연파괴 마이카 전기적 스트레스 파괴현상

3.3 자체응력 분석

고압전동기 고정자 권선 절연재료의 전기적응력 모델링은 상용프로그램 ANSYS 5.3을 이용하여 유한 요소법에 의해 시도하였다. 그림 9는 고정자 권선에서 유한 요소법에 의한 전기적인 응력분포를 나타내기 위해 동도체에 3.81kV를 인가하고 외부 철심을 접지 하였을 때의 전계를 나타냈다. 권선을 wedge로 고정시킨 부분에서 최대 전계 0.51kV/mm가 나타나고 있다. 주기적인 전자기력에 의해 슬롯내에서 권선이 움직이면 윗부분에 굽힘이 작용하고 아랫부분에 압축에 의해 동도체와 주 절연물에 반복 응력이 가해진다. 이와 같은 작용에 의하여 고정자 권선에서 반도전층이 파손되어 슬롯방전에 의해 절연파괴가 발생한다.

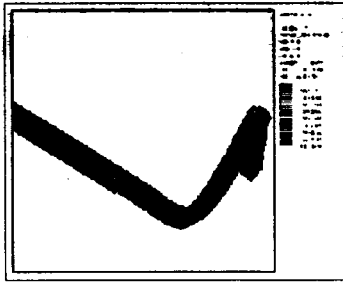


그림 9 고정자 권선의 전기적용력분포(단위:V/m)

그림 10은 실제 고압전동기에서 상전류 138(A)가 흐를 때의 전류밀도 분포를 모의한 것으로, 동도체 가장자리에 분포하는 최대전류밀도는 $0.742A/mm^2$ 으로 나타났으며, 이는 주울 열에 의한 최대 열 적 열화 위치를 나타내주고 있다. 따라서 고압전동기 고정자 권선 절연재료에서 전기적 용력은 슬롯 부분에 주로 영향을 미치며, 주로 마이카 크리스탈에서 절연열화가 발생된다. 전동기 운전중에 출력 변화로 인한 온도의 급격한 변동이 높은 열 \leftrightarrow 기계용력으로 작용하여 절연재료와 동도체사이 에 박리를 야기시킨다. 기계적 용력은 기동정지, 단락 등의 영향으로 단말권선 지지구의 이동을 발생시켜 절연 열화특성에 영향을 미친다.

따라서 직선바 보다는 단말권선의 절연열화가 더 심하게 발생되는데, 이는 전동기가 운전중에 주로 받는 전기적 용력보다는 기동정지 및 부하변동시 전자력과 같은 기계적인 용력에 의한 단말권선의 열화가 크게 영향을 받고 있음을 판단할 수 있다.

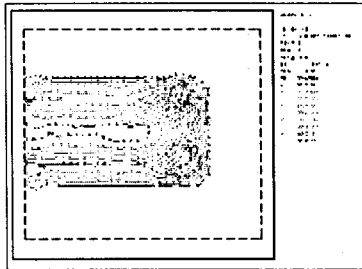


그림 10 고정자 권선의 전류밀도 분포(단위:A/m²)

4. 검토 및 고찰

4.1 운전중 절연파괴 분석

그림 11은 소손 고압전동기의 운전중 절연파괴의 과정으로 장시간 연속 운전중인 전동기에서는 절연파괴가 발생했을 경우, 1점 지락의 형태가 되는데 이러한 현상은 과도적으로 다른 상의 전위도 상승시켜 다점접지의 형태로 급속히 진전되고 코일을 통한 순환전류가 흘러 코일의 절연을 손상시키고 있다.

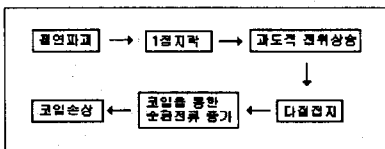


그림 11 절연파괴 과정

4.2 고압전동기의 유지관리 방안

취수용 고압전동기는 운전상태와 기계적 스트레스에 의해 가동시간에 비례하여 점진적으로 열화가 진행된다. 최근에는 성에너지 및 용수공급의 합리적 운영을 위해 연속 운전 시간이 증가되고, 또한 기동정지 횟수도 증가

하므로 절연열화의 빈도가 점점 증가하는 실정이다. 고압전동기의 고장 Bath-tub 곡선에서 안정성을 높 이려면 전기적, 기계적, 환경적 스트레스를 최소화하고, 열화상태를 감시하면서 마모부위에 대한 수리개선과 열 화흡수에 대한 환경요인을 크리싱 해주는 것이 유지관리 및 라이프사이클의 코스트를 최소화하는 것으로 판단된 다.

5. 결 론

소손된 전동기를 분해하여 육안점검을 실시한 결과 전 동기의 절연파괴로 분석되었으며 슬롯엔드 부분에서 전 기적, 환경적, 기계적 열화에 의해 W상이 과전류에 의 해 용융되고 1점 지락현상이 발생한 것으로 분석되었다. 전동기의 절연재료인 마이카 및 에폭시수지의 조직분 석을 위해 시편을 채취하고 SEM에 의해 분석한 결과 보이드에 의한 열적열화기구의 원인은 찾을 수 없었으 며, 전기적, 기계적 열화 즉, 자계진동 및 회전진동에 의한 절연파괴가 있었음을 판단할 수 있었다.

팔당 제2취수장 4단계 10호기 고압전동기는 '94년 절 연열화에 의해 재권선 영향으로 전기적, 기계적 스트레 스가 더욱 가중되어 절연파괴가 진행 됐음을 SEM분석 에서 알 수 있었다.

(참 고 문 헌)

- (1) Eugene J. McMahon, "A Tutorial on Treeing", IEEE Trans, Electrical Insulation, Vol.Ei-13.No.4, pp.277-288, 1978
- (2) Ontario Hydro Research Division, "Motor and Generator Insulation Life Estimation", EPRI TR-100185, Vol 1, Research project 2577-1, Final Report, January 1992
- (3) K.Mreuger, S.oulski and H.Krivda, "Current Method of Insulation Life Expectancy for Power Apparatus", T.IEE Japan, Vol.114-A, No.12 pp.845-852, 1994