

대용량 고압모터 고장원인 정밀 분석

홍성택*, 이은춘, 신강욱
한국수자원공사

An Exactness Analysis for Damage Cause of Large-Capacitor and High-Voltage Motor

Hong, Sung-Taek, Lee, Eun-Chun, Shin, Gang-Wook
Korea Water Resources Corporation

Abstract - This paper demonstrates the trip of high-voltage motor(6.6kV 4,600Hp). To analyze the causes of damage in motors, exactness analysis of electricity system, analysis inspection of motor and voltage quality analysis fiery development were investigated. This result propose to improvement system and repair method.

제 1 장 서 론

수도권 일원의 용수공급 계획에 의하여 팔당호를 취수원으로 운영중인 팔당은 총 14대의 대용량 고압모터(6.6kW, 4,600~5,700Hp)를 구비하여 운영중에 있으며, 펌프가동은 용수 수요에 따라 다소 차이가 있으나 각 단계별로 2~3대 정도 가동하고 있다.

이중 2호기 고압모터(6.6kV 4,600Hp, '88년 제작)가 가동 중에 지락계전기 동작에 의하여 Trip되는 사고가 발생하였다. 따라서 소내 전력계통 정밀검토 분석, 고압기동반 전원품질 분석, 고장원인 정밀분석, 고전압 절연진단 시험을 통하여 이에 대한 사고원인을 정밀 분석하여 시스템 개선 및 수리방안을 제시하고자 한다.

제 2 장 분 론

2.1 고압모터 현황

사고 모터의 제원은 표 2.1과 같다.

표 2.1 설비 현황

구분	내 용
모터용량	3상 6.6kV, 4600Hp(3,432kW)
극 수	12 극
정격전류	Cos ϕ =0.87 → 355 A(제조) Cos ϕ =0.96 → 320 A(운영)
운전전류	315 A(Cos ϕ =0.96 병렬 조합운전)
절연계급	F중(155°C)
효 율	96.9%(FULL LOAD)
운전조건	병렬 조합운전
기동방식	리액터 기동(진식, 75 %탭)
기동장치	차단기(VCB) + 차단기(VCB)
부속장치	진상용콘덴서(6.6kV, 1200kVA), SA, ZCT, CT, Relay등
보호방식	MPR, SGR(67)

2.2 고압모터 분해점검

2.2.1 절연저항 시험

고압모터 단자를 해체한 후 권선의 절연저항을 측정할 결과 2중 Y결선의 1개 회로가 지락으로 나타났고, 나머지 1개회로는 1,500M Ω 이상으로 건전한 상태를 유지하고 있었다. 그림 2.1은 2중 Y결선으로 구성된 전동기 내부 회로도이며, R, S, T상은 건전상이고, R', S', T'상은 지락된 상으로 판명되었다.

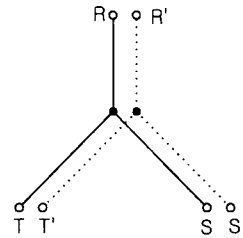


그림 2.1 전동기 단자 내부회로도

2.2.2 콘덴서 정전용량 측정

역률보상용 콘덴서의 정전용량을 측정할 결과는 표 2.1과 같고, 200kVA 콘덴서 1개당 정전용량은 36.53 μ F이다. 측정값이 정격용량의 $\pm 5\%$ 이내면 정상이므로 2호기용 콘덴서 6대는 모두 정상으로 나타났다.

표 2.1 정전용량 측정결과

설치위치	NO.1	NO.2	NO.3	비 고
상 단	36.92 μ F	37.34 μ F	37.34 μ F	기준치: 36.53 $\pm 5\%$
하 단	37.23 μ F	37.44 μ F	37.34 μ F	

2.2.3 권선저항 측정

모터 권선저항을 전동기 단자에서 측정할 결과 표 2.2와 같이 각 선간저항이 일정한 값으로 나타났다. 선간저항이 일정한 것을 비추어 볼 때, 층간단락 또는 단선은 아닌 것으로 분석된다. 지락사고는 권선과 대지간의 접지현상이므로 권선저항의 변화는 없게 된다. 따라서 본 전동기의 사고는 지락사고일 가능성이 높다.

표 2.2 전동기 권선저항 측정결과

구 분	권선 저항	비 고
R-S상간	0.161 Ω	측정기기: AVO DLRO 220V 10mA
S-T상간	0.160 Ω	
R-T상간	0.161 Ω	

2.2.4 모터 외관점검

사고전동기의 단자를 해체한 후 고정자권선의 외관을 점검한 결과 지락점의 위치는 발견할 수 없었다. 지락사고 순간 계전기의 신속한 동작에 의하여 회로가 차단되었으므로 대지와 접촉(지락)지점에 불꽃방전이 일어나지 않았거나, 불꽃방전이 일어났다 하더라도 소량의 불꽃방전이 일어날 경우 외부에 노출되지 않을 수도 있다.

사고전동기는 그림 2.2 및 2.3에서 보는 바와 같이 고정자 권선이 많이 오염되어 있고 특히, 베어링에서 흡입된 기름과 주변 이물질이 혼합되어 아주 진한 오염물이 Coil End부분에 누적되어 있는 것을 볼 수 있으며, 오염물질은 권선 표면의 절연물 열화 촉진은 물론, 전계에 의한 코로나 발생으로 절연물의 수명을 급속히 단축시킬 수 있다.

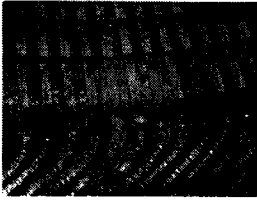


그림 2.2 리드선 인출측 오염모습

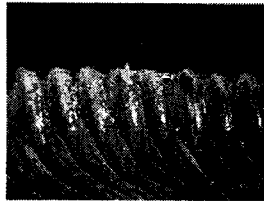


그림 2.3 리드선 인출 반대편측 오염된 모습

2.3 사고원인 정밀분석

2.3.1 전동기 열화현상

유도전동기의 고정자권선 절연열화 원인은 열적 열화, 전기적 열화, 기계적 열화 및 환경적 열화로 크게 4가지로 구분할 수 있다. 대부분의 전동기 절연파괴 사고는 위 4가지 요소가 복합적으로 작용하여 발생하는 것이 일반적이다. 열적 열화와 환경적 열화는 전동기의 일반적 노화 현상으로 볼 수 있지만, 전기적 열화와 기계적 열화는 전동기 절연수명을 극도로 감소시킬 우려가 대단히 높다.

급번 사고 전동기도 위 열화 요인이 복합적으로 작용하여 발생하였지만 특히, 전기적 요소와 기계적 요소가 사고원인에서 더 큰 비중을 차지한 것이라고 판단된다. 왜냐하면, 전기적 요소는 전동기 기동시 개폐써지에 의한 가전압의 반복적 발생과 정격전류 이상의 큰 기동전류가 권선에 흐를 때 권선표면에 코로나가 발생하여 절연물에 손상을 주기 때문이다. 그리고 기계적 요소는 대응량의 전동기가 회전을 할 때 고유진동을 갖고 있으며, 그 진동의 영향으로 슬롯 내부 또는 코일 엔드 부분에서 권선이 미세하게 움직일 수 있다. 이와 같은 현상이 반복될 경우 절연층에 박리 및 균열이 발생하여 급기가 절연파괴로 이어진다.

2.3.2 고정부분 탐색

사고 전동기를 현장에서 분해하여 고전압 시험기로 전압을 서서히 증가시킬 경우, 일정전압 이상이 되었을 때 누설(지락)전류가 급증하여 지락지점에서 불꽃(Arc)이 발생할 것임을 인지하고, 본 현장에서 이 방법을 이용하였다. 지락권선과 전동기 외함 사이에 전압을 서서히 증가시켜 약 400V 정도에 이르렀을 때 Coil End 부분에서 불꽃이 발생하였다.

따라서, 전동기 고정자권선의 지락지점은 슬롯 내부가 아닌 슬롯의 끝나는 부분 즉, Coil End 부분에서 지락이 발생되었음을 알 수 있다. 또한 팔당 2호기 고정자 권선 지락사고도 기동시의 대전류에 의한 코일 엔드 부분의 강한 전자력 형성으로, 미세 진동이 반복적으로 일어나 절연물이 손상되어 슬롯을 통한 지락사고가 발생하였을 것으로 판단된다. 불꽃 발생지점과 크기는 그림 2.4 및 2.5와 같다.

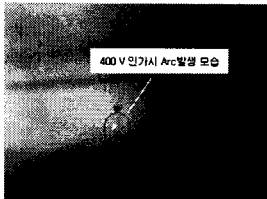


그림 2.4 지락시 Arc 방전 모습

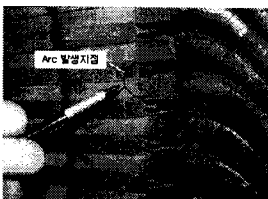


그림 2.5 Coil End부 지락지점

2.4 전원품질 분석

절연물의 전기적 열화원인이 대부분 기동시 개폐써지 및 과도전압에 의하여 발생하므로, 고압모터의 기동, 운전, 정지시 전원품질을 측정, 분석하였다. 전원품질 분석을 위한 측정장비는 Power Scope(BMI 8800),

DSO(Digital Storage Oscilloscope) 및 DWA(Disturbance Waveform Analyzer)를 이용하였고, 측정단자는 기동반의 CT, PT 및 고전압에 직접 연결하였다.

2.4.1 기동시 전원품질 분석

기동시 파형측정은 전압, 전류를 주로 하였고, 측정값은 실효값(RMS)이다. 측정대상은 7, 9, 12호기이며 측정당시 계통에 3~4대가 병렬운전중 이었다.

그림 2.6은 9호기 기동시 전압, 전류의 파형이며, 그림 2.7은 12호기 기동시 전압, 전류파형으로 9호기 기동특성과 비슷하게 나타났다.

그림 2.8에서 기동시간은 약 6초 정도 소요되고, 그때의 전압은 110V에서 104.5V로 강하한다. 그리고 전류는 11.25A까지 상승됨을 알 수 있다. 이를 상용전압, 전류로 환산하면,

$$V = PT비 \left(\frac{6600}{110} \right) \times 104.5 = 6,270V$$

$$I = CT비 \left(\frac{600}{5} \right) \times 11.25 = 1,350A$$

따라서, 기동시 전압강하율(ϵ)은,

$$\epsilon = \frac{6,600 - 6,270}{6,600} \times 100\% = 5\%$$

전류 상승률(τ)은,

$$\tau = \frac{1,350 - 350}{350} \times 100\% = 286\%$$

위 파형 측정결과 기동시 전압은 약 5%정도 강하하고, 전류는 정격전류의 약 3배 정도 상승함을 알 수 있다.

그림 2.8의 7호기 기동특성도 9, 12호기와 유사하게 나타났으며, 기동후 6초 후에 전류는 무부하 전류로 하강한다. 그리고 전류가 약 18초 동안 완만히 상승하다 정격전류에서 안정됨을 나타내고 있다. 18초 정도 무부하 운전을 하는 것은 기동후 토출밸브가 열리는 동안이고 그 후 전압, 전류가 안정적으로 유지됨을 나타내고 있다. 또한 그림 2.9는 4호기 기동시의 순시파형이며, 초기 1/2 Cycle에서는 전압이 약간 왜형파로 변화되나 시간이 짧고 일그러짐 정도가 작아 설비에 가해지는 손상 에너지는 적지 않다.

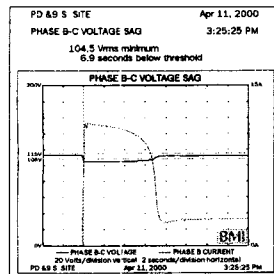


그림 2.6 9호기 기동시 전압, 전류파형

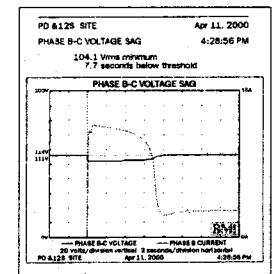


그림 2.7 12호기 기동시 전압, 전류파형

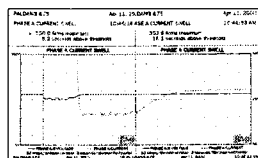


그림 2.8 7호기 기동시 전압, 전류파형

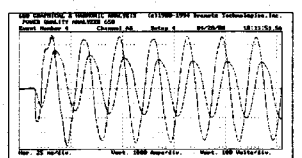


그림 2.9 4호기 기동시 전압, 전류 순시파형

2.4.2 운전시 전원품질 분석

기동후 일정시간이 경과한 다음 전원의 전압, 전류파형을 측정한 결과 전원품질은 상당히 양호하게 나타났다. 그림 2.10은 7호기 운전시 순시파형을 측정한 것으로써, 이상적인 정현파 곡선으로 파형의 일그러짐이 전혀 나타나지 않고 있다. 그림 2.11은 정상운전시 전동기 부하에 포함된 고조파 전압을 나타내고 있으며, 0.2~0.4Vpp를 나타내고 있다. 이 측정값을 실제 전압(6,600V)으로 환산할 경우 12~24Vpp로 아주 미세하게 나타남을 알 수 있다. 일반적으로 고압 회로에서 고조파 함량이 1% 미만일 경우 이상적인 회로라고 판단된다. 그림 2.12는 운전중 전원계통의 주파수 변화를 나타내고 있으며, 약 10시간 동안 주파수 변화폭이 59.8~60.1Hz로 상당히 안정적이다. 또한, 7호기 정상운전중 주변 회기를 기동할 경우 7호기의 전압, 전류 변화를 측정하였으며, 그 결과는 그림 2.13과 같다. 7호기 정상운전시 주변회기를 기동할 경우 계통전압이 순간적으로 약 5% 정도 강하하고, 전류는 반대로 상승함을 알 수 있다. 이와 같은 이유는 정출력 유도전동기이므로 출력은 전압, 전류의 곱으로 나타나기 때문이다. 이러한 현상이 반복적으로 지속 될 경우 기기에 미치는 영향은 수명을 단축하고, 운전중 순간전류 상승에 의한 고정자 권선의 기계적 응력이 증가하여, 절연물 손상을 촉진시킬 수도 있다.

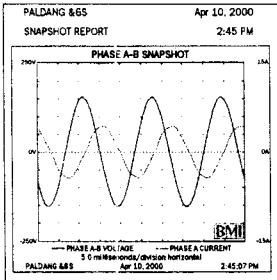


그림 2.10 7호기 정상운전시 전압, 전류 순시파형

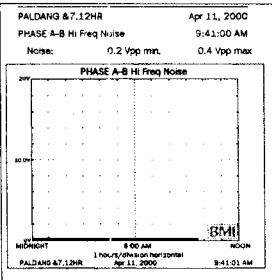


그림 2.11 7호기 정상운전시 고조파 전압

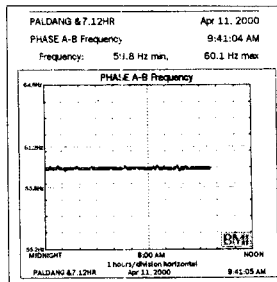


그림 2.12 7호기 운전중 주파수 변화모습

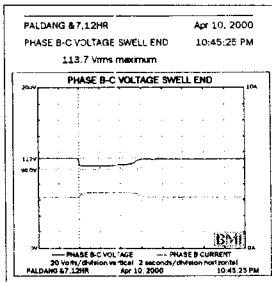


그림 2.13 7호기 운전중 주변회기 기동시 특성

2.4.3 정지시 전원품질 분석

전동기 운전중 정상적으로 정지할 때 11호기를 대상으로 전압, 전류의 특성을 측정, 분석하였다. 그림 2.14는 정지시의 전압파형 변화를 나타내고 있으며, 기동반의 VCB Off후에도 전압이 급격히 0V로 떨어지지 않고 시간이 경과함에 따라 일정 비율로 감소함을 보여주고 있다. 그림 2.15는 11호기 정지시 전류파형으로 전압 감쇄에 비례하여 전류도 감소되고 있다. 전동기가 수십 Cycle 진행되는 동안 계속적으로 회전하고, 전압도 서서히 감소하므로 차단기가 개방되어도 콘덴서 전압에 의하여 전류가 약간 흐르고 있다.



그림 2.14 정지시 전압 파형

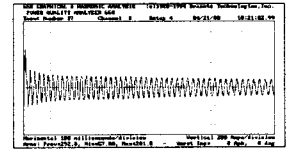


그림 2.15 정지시 전류 파형

제 3 장 결 론

현장조사에서 보호계전기 시스템 및 기타 부속기들은 정상적이었으며, 특이할 만한 것은 전동기 고정자 권선이 심하게 오염되어 권선 표면에서 전계강도 차이에 의한 코로나 발생 가능성이 높은 것으로 판단된다.

전원품질 분석기를 이용하여 기동반을 중심으로 펄프 기동시, 운전시 및 정지시의 전압, 전류, 고조파, 주파수 등을 측정 분석하였다. 전동기 기동시간은 약 6초 정도 소요되며, 전류는 정격전류의 3배정도 상승되고 반대로 전압은 약 5%정도 강하함을 알 수 있었다.

사고 부분은 고전압을 인가하여 지락지점에서 Arc를 발생시키는 방법에 의하여 Coil End 부분으로 나타났다. 이 부분은 자계의 세기가 강한 곳이고 전계의 불평등이 심한 곳으로, 절연파괴 사고의 위험성이 상대적으로 높은 곳이다. 그리고 기동시에 순간 과전류의 영향으로 전진전동 및 기계적 진동이 시작되는 지점으로 수명이 도래하면 슬롯 출구부의 틈새이완 등으로 절연층이 변형되어 쉽게 절연파괴를 일으킬 우려가 있다.

상기 내용과 같이 고정자 권선의 지락사고 원인을 전원계통의 전원품질분석 및 기타 현장조사결과 등을 토대로 종합 분석한 결과 내용연수 도래에 따른 절연물의 노후화 현상에서 초래된 일반적 절연파괴 사고로 분석되었다.

(참 고 문 헌)

- [1] "고효율 중형 삼상 농형 유도전동기 설계 및 제조기술 개발에 관한 연구", 한국전력공사, 1993
- [2] "전기설비의 진단기술", 대한전기협회, 1994.
- [3] "발전기 Stator 수명예측 및 절연진단에 관한 연구", 한국전력공사, 1992.
- [4] "발전기 회전자 Wedge 손상원인 분석", 한전 전력연구원, 1997.
- [5] 전승구, "최신 전기기기", 동일출판사, 1987.
- [6] "역률 조정기술", 기전연구소, 1988.
- [7] "고압전동기용 진공차단기 스위칭씨지 해석 및 저감대책 연구", 한전 전력연구원, 1993.
- [8] "팔당고압모터 소손원인 분석 기술지원보고서", 한국수자원공사, 1999.
- [9] "자가용 전기설비의 모든 것", 기다리, 1994
- [10] B.K.Gupta et al., "Protection of Motors Against High Voltage Switching Surges", IEEE Trans on Energy Conversion, Vol.7, No.1, pp. 139-147, 1992.
- [11] David W.Jacson et al., "Analysis of Surge Capacitor Lead Connection for the Protection of Motors", IEEE Trans on PAS, Vol.PAS-103, No.9, pp. 2605-2609, 1994.
- [12] P.G.Mclauren et al., "Steep-Fronted Surges Applied to Large AC Motors-Effects of Surge Capacitor Value and Lead Length", IEEE Trans on Power Delivery, Vol.3, No.3, pp. 990-997, 1988.
- [13] Albert Paul Malvino, "Electronic Principles", Macmillan/ McGraw-Hill Inc, USA, 1996.