

백화현상이 나타난 고압전동기 고정자권선의 절연특성 연구

논 문
60-8-26

A Study on Insulation Property of White Powder Found on High Voltage Motor Stator Winding

공 태 식[†] · 김 희 동* · 이 상 길** · 김 경 열*** · 주 영 호[§]
(Tae-Sik Kong · Hee-Dong Kim · Sang-Kil Lee · Kyeong-Yeol Kim · Young-Ho Ju)

Abstract - During a routine inspection of a large pump motor at power plant, white powder was found on the surface of the stator end windings. Visual inspection and high voltage insulation diagnosis was performed to determine whether this motor is available. The purpose of this paper is to understand the insulation properties of white powder found on high voltage stator and to know prevention of insulation weakness.

Key Words : Insulation, White powder, Motor, Partial discharge

1. 서 론

산업의 발달에 따라 발전소 및 공장에서 사용되어지는 고압전동기의 수요도 비례하여 늘어나고 있으며, 이에 따라 전 세계적으로 고압전동기 제작사 간 경쟁이 치열해지면서 제작비용 절감에 대한 압력이 가중되어지고 있다. 따라서 재료비, 인건비, 제작기간 절감을 위하여 최근에 제작된 일부 고압전동기들은 과거에 비해 각종 설계의 마진율을 낮추어 제작되어지는 경향이 있다. 이는 동도체 단면적의 축소, 절연물 두께의 감소, 철심의 소형화, 인건비가 값싼 나라에서 주문제작 및 제작공정 단축을 통하여 이루어지게 된다[1].

고압전동기 고정자권선 절연물의 결함은 제작 시 발생하거나, 장기간 운전되는 동안 경년열화에 의해 나타나며 전동기의 고장원인 중 절연물 손상에 의해 발생하는 것이 약 37[%]에 이른다[2].

고압전동기 고정자권선은 장기간 운전되면 열적, 전기적, 기계적 및 환경적 영향으로 인해 절연재료 내부에 보이드(void)가 발생하여 열화가 계속 진행되면 결국 절연파괴에 도달하게 된다[3][4]. 이렇게 운전 중 고압전동기가 불시 절연파괴가 되면 전체 시스템의 정지로 이어질 수 있어 막대한 경제적 손실을 초래하게 된다. 따라서 절연열화 상태를 진단하는 기술의 중요성이 점차 강조되고 있는 추세이다.

일반적으로 국내 산업현장에서 사용하는 전동기에 대한 진단방법으로는 시험전압을 정격전압 이내에서 실시하고 있으며, 시험의 종류에는 절연저항시험, 성극지수시험, 교류전

류시험, 유전정접시험, 부분방전시험 등이 주로 행하여지고 있다.

본 논문에서는 발전소에서 운용중인 대형 고압전동기에 대하여 계획예방정비 기간에 시행하는 정기점검 도중 회전자를 인출하고 고정자권선 육안점검 결과 단말권선의 철심 인출 부위 및 각 상간 단말권선 교차점 등 다수 부위에서 흰색분말이 발견되어 절연상태의 건전성을 평가하기 위하여 절연진단 시험을 수행하고 각종 점검결과를 종합 분석하여 전동기의 사용가능 여부를 결정하였다. 본 시험을 통하여 부분방전에 의해 발생된 백화현상의 특성과 발생원인에 대해서도 분석해 보았다.

2. 본 론

본 고압전동기는 대형 발전소에서 냉각수 순환을 위한 펌프에 사용되어지는 것으로써 불시 고장발생 시 발전소 전체의 정지를 초래하게 되어 큰 경제적 손실과 안정적 전력공급에 차질을 빚게 된다. 따라서 설비의 신뢰성 확보가 중요하며 이를 위하여 계획예방정비 시마다 각종 점검과 시험을 수행하여 관리를 하고 있으며, 주요 사양은 아래의 표 1과 같다.

표 1 고압전동기 사양

Table 1 Specification of motor for test

용 량	6,700 [kW]	회전수	1,787 [rpm]
정격전압	13.2 [kV]	절연계급	F
정격전류	345 [A]	제작년도	1996

고전압 절연진단 시험에 앞서 전동기 분해상태에서 고정자 권선에 대하여 육안점검을 수행하였으며, 그 결과 그림 1과 그림 2와 같이 고정자권선 슬롯인출부위와 각 상간 단

† 교신저자, 정회원 : 한전전력연구원 선임연구원

E-mail : kongts@kepco.co.kr

* 정 회 원 : 한전전력연구원 책임연구원

** 정 회 원 : 한전전력연구원 책임전문원

*** 정 회 원 : 한전전력연구원 선임연구원

§ 정 회 원 : 한전전력연구원 수석연구원

접수일자 : 2011년 5월 16일

최종완료 : 2011년 6월 27일

말권선 교차부위에서 백색가루가 여러 군데 발견되었다. 또한 발생위치도 그림 3과 같이 고정자권선에 고전압이 걸리는 부위와 각 상간 교차하는 부위 6군데에서 대칭적으로 나타나고 있다. 이는 정상운전 중에 백화현상 발생부위에서 지속적으로 부분방전이 발생하여 고정자권선 절연물이 방전에 의해 타들어가서 변색된 상태인 것으로 판단되며, 방전에 의한 열화가 발생하고 있음을 보여주는 확실한 증거이다. 이러한 현상이 지속되면 절연물을 점차 침식시켜 결국 절연 파괴로 이어지게 된다.



그림 1 단말권선 교차부위 백화현상
Fig. 1 White powder on end-winding intersection



그림 2 슬롯인출 부위 백화현상
Fig. 2 White powder on endwinding from slot

고정자권선과 철심 간 전위차를 줄여 운전 중 부분방전을 억제하기 위한 목적으로 고정자권선 표면에 반도체성(Semi conductive) 테이프를 감게 되며 슬롯에서 수 cm 나오게 제작한다. 반도체 테이프가 슬롯에서 수 cm까지만 감기고 바로 끊어지면 테이프 끝단에 전계가 집중되어 표면방전이 발생하고 절연물을 침식시킬 수 있으며, 이를 방지하기 위하여 전계완화용 테이프를 슬롯에서 나와 있는 반도체 테이프에 이어서 처리하게 된다[5]. 이러한 부분방전 억제를 위한 고정자권선 표면처리가 부적절하게 되거나 진동에 의한 마모가 있든지 혹은 표면 오염으로 인한 전계완화 효과가 줄어들게 되면 단말권선 표면에서 부분방전이 발생하여 백화현상이 일어나게 된다.

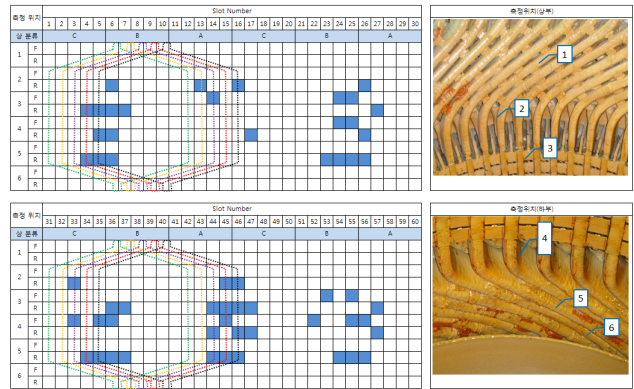


그림 3 슬롯별 백화현상 발생위치
Fig. 3 White powder location by slot

육안점검 결과 부분방전에 의한 백화현상을 슬롯인출부 및 단말권선의 각 상간 교차지점에서 다수 확인할 수 있었다. 고정자권선 절연물의 건전성을 평가하기 위하여 절연진단 시험을 수행하였으며, 시험은 절연저항, 성극지수 측정, 교류전류 증가율, 유전정접 증가율 시험, 부분방전 시험으로 이루어져 있으며[6], 시험전압은 아래의 표 2와 같다[7].

절연저항(Insulation Resistance), 성극지수(Polarization Index) 시험은 대상기기가 정상운전 또는 고전압 시험에 필요한 최소한의 절연내력을 확보했는지 알아보기 위한 시험이며 이를 통하여 고정자 권선 표면의 흡습, 오염상태를 알 수 있다. 이 시험에서 양호해야만 고전압 시험이 가능하므로 본 시험에 앞선 예비시험 성격을 띠고 있으며, 시험결과는 표 3과 같이 모두 양호하였다[8].

표 2 절연진단 시험전압
Table 2 Test voltage of insulation diagnosis

시험항목	시험전압	비 고
절연저항	DC 5,000V	E(정격전압) = 13.2kVac E/√3 ≒ 8.0kVac 1.25 E/√3 ≒ 10.0kVac
성극지수	DC 5,000V	
유전정접	AC 1.25 E/√3	
교류전류	AC 1.25 E/√3	
부분방전	AC E/√3	

시험결과 절연저항 및 성극지수 모두 기준치 이상을 나와 고정자권선이 교류 고전압인가를 위한 최소한의 절연내력을 확보한 것으로 분석되어 유전정접, 교류전류, 및 부분방전 시험을 진행하였다.

표 3 절연저항 및 성극지수 측정결과
Table 3 Insulation resistance & Polarization Index test

Item	측정값 [MΩ]	판정기준
1min Insulation Resistance	10,300	100 이상
10min Insulation Resistance	60,200	-
P. I (10min÷1min)	5.84	2.0 이상

유전정접(Dissipation Factor), 교류전류(AC Current) 시험은 절연물의 평균적인 상태를 알아보기 위한 시험으로써 유전정접($\tan\delta$), 교류전류(I) 값은 고정자권선 전체에서 발생하는 부분방전, 전류누설 등에 의하여 증가하게 된다. 따라서 시험전압을 증가시키며 유전정접($\tan\delta$), 교류전류(I) 값을 측정하여 초기값(2kV)보다 시험전압에 따라 얼마나 급증하는가를 계산하여 절연물 전체의 평균적인 상태를 분석할 수 있다.

표 4 교류전류 시험결과

Table 4 AC Current test result

Voltage [kV]	I [mA]
1	51.93
2	103.9
3	156.2
4	209.2
5	263.0
6	318.5
7	374.2
8	431.8
9	490.5
10	549.7
I0	519.3
ΔI [%]	5.85
양호 판정기준	5.0% 미만

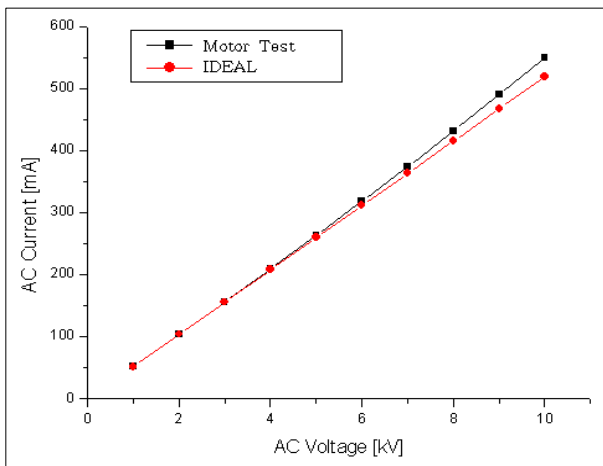


그림 4 교류전류-전압 특성

Fig. 4 Characteristics of AC current-voltage

표 4, 표 5에서 보는 바와 같이 두 시험 모두 시험전압 증가에 따른 교류전류 증가율(ΔI)과 유전정접 증가율($\Delta \tan\delta$)이 기준치를 초과하여 나타났다. 이는 고정자 권선의 절연시스템 전체에서 시험전압 증가에 따라 부분방전이 발생함으로써 미소공극이 단락되어 누설전류가 증가하고 있음을 나타낸다. 절연열화가 진행됨에 따라 부분방전, 누설전류의 증가에 따라 교류전류, 유전정접 증가율이 더욱 커지게 되며 이를 분석하여 열화의 정도를 가늠하게 된다. 따라서 본 전동

고정자 권선의 전체적인 절연상태는 양호기준치를 벗어난 상태로 분석되었다.

표 5 유전정접 시험결과

Table 5 Dissipation factor test result

Voltage [kV]	$\tan\delta$ [%]
1	3.99
2	4.16
3	4.35
4	4.60
5	4.97
6	5.45
7	5.89
8	6.24
9	6.52
10	6.73
$\Delta \tan\delta$ [%]	2.57
양호 판정기준	2.5% 미만

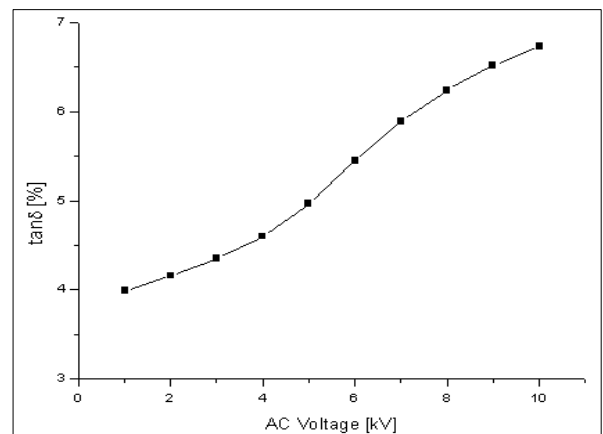


그림 5 유전정접-전압 특성

Fig. 5 Characteristics of $\tan\delta$ -voltage

마지막으로 부분방전 시험을 수행하였다. 부분방전 시험은 고정자권선 절연시스템에서 발생하는 방전의 크기를 측정하여 절연상태를 파악하기 위한 것으로써 측정하는 부분방전은 여러 곳에서 발생하는 방전 중 가장 큰 수치의 방전량이 화면에 표시되게 된다. 가장 큰 방전량은 절연시스템에서 가장 큰 결함에서 발생하게 되므로 부분방전을 측정함으로써 절연물의 가장 큰 결함의 정도를 파악할 수 있다.

시험결과 그림 6과 그림 7에서 보는 바와 같이 시험전압이 약 4kV부터 부분방전이 시작되고 있으며, 상전압인 약 8kV에서는 20,000pC이 발생되고 있어 양호기준치인 10,000pC을 초과하여 요주의 범위에 들었다[9]. 또한 시험전압을 증가시켜 상전압의 125%인 약 10kV에서는 31,000pC이 측정되었고 정격전압인 13.2kV에서는 41,000pC까지 증가하였다.

교류전류, 유전정접 시험결과 기준치를 초과하여 절연물의 전체적인 상태도 불량하였으며, 부분방전 시험결과 또한 요

주의 상태에 들어 가장 큰 결함의 상태도 좋지 않은 것으로 분석되었다.

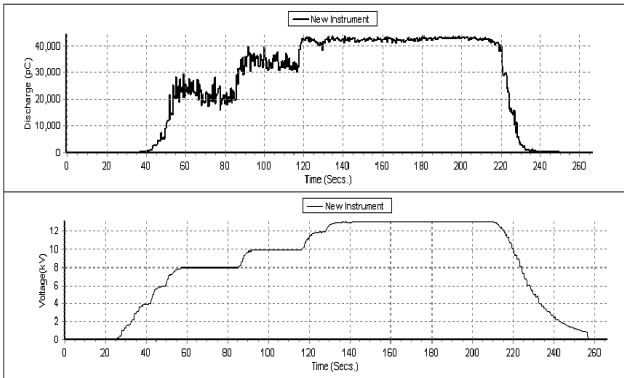


그림 6 시험전압-부분방전 특성
Fig. 6 Characteristics of Partial Discharge-voltage

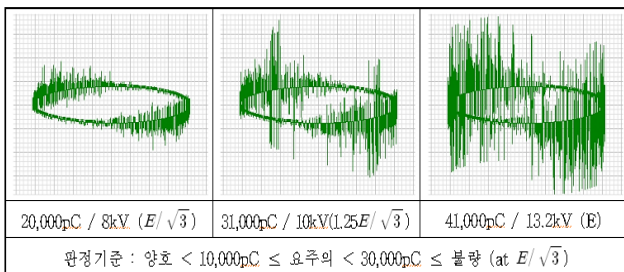


그림 7 부분방전 측정화면
Fig. 7 picture of partial discharge measurement

따라서 교류고전압을 인가하는 시험인 부분방전, 유전정접, 교류전류 시험결과가 모두 불량하다는 것은 절연물의 열화가 진행됐다는 증거이다[10].



그림 8 고전압 시험 중 방전불꽃
Fig. 8 discharge spark on high voltage test

그림 8은 시험전압(8kV)을 인가하였을 때 단말권선 슬롯 인출 부위에서 방전불꽃이 발생하고 있는 것을 보여주며, 발생부위 또한 백화현상이 나타난 부위와 일치하고 있어 정상 운전 중에도 지속적으로 이러한 방전이 발생하고 있음을 추정할 수 있다.

본 전동기는 발전소의 핵심 중요설비로써 높은 신뢰도가 요구된다. 따라서 금번 점검 및 시험결과 절연열화가 상당 부분 진행된 상태로써 교류전류, 유전정접, 부분방전 시험결

과가 양호기준치를 초과하고 있으며, 육안점검 결과도 방전에 의한 백화현상이 분명하여 운전 중 불시 절연과피의 우려가 있어 교체권고를 하였다.

5. 결 론

고정자 단말권선에 백화현상이 발생한 대형 고압전동기에 대한 점검 및 절연진단 시험결과 분석을 통해 백화현상의 위치적 특성과 절연진단 항목과의 연관성 및 발생원인에 대한 결론은 아래와 같다.

[1] 고압전동기 고정자 단말권선에서 나타나는 백화현상은 고정자권선이 슬롯에서 인출되는 부위와 각 상의 단말권선이 교차되는 부위에서 발생하는 것을 알 수 있었다.

[2] 백화현상은 단말권선 전체에서 발생하지는 않으며, 정상 운전 중에 고전압이 걸리는 각 상의 전원인입부위와 상간 교차지점에서 발생하게 되며, 따라서 불규칙적으로 여기 저기 나타나거나 전체적으로 고루 분포되는 것이 아니라 원형인 고정자권선에서 일정한 간격을 두고 대칭적으로 나타나는 것을 알 수 있었다.

[3] 백화현상이 나타난 전동기의 절연진단 시험결과 교류전류, 유전정접, 부분방전 시험 모두 양호기준치를 초과하였으며, 고전압 시험 시 백화현상이 발생된 부위에서 불꽃방전이 목격되는 등 절연상태가 불량을 알 수 있었다.

[4] 이러한 백화현상은 정상 운전 중에 부분방전이 일어난다고 있다는 증거이며, 발생원인은 고정자권선과 철심 간 전위차를 줄이기 위한 반도전층이 슬롯외부로 나오고 이어서 전계완화를 위한 테이핑을 하여 제작하는데 이러한 설계 및 제작오류 또는 표면손상, 오염 등에 의해서 발생하게 된다.

[5] 백화현상이 발생한 전동기 고정자권선의 보수 방법으로는 권선표면 손상부위는 반도전성 페인트를 칠하여 보수하고, 상간 교차점의 경우에는 절연블록을 삽입하여 부분방전을 억제하는 것을 생각해 볼 수 있다. 하지만 이는 눈에 보이는 부위만 부분정비가 가능할 뿐이고 절연설계, 제작 오류에 의한 방전 또는 진동에 의한 마찰 등이 계속되는 한 완벽한 정비는 어려우며, 권선교체 시점에 대한 검토가 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] B.J Moore, et al. "Utilizing Reduced Build Concepts in the Development of Insulation Systems for Motors" Proc IEEE Electrical Insulation Conference, Cincinnati, October 1999, pp 347
- [2] Motor Reliability Working Group, "Report of Large Motor Reliability Survey of Industrial and Commercial Installation", Parts I and II, IEEE IAS Transaction Vol I A-21, No4, pp. 863, 1985.
- [3] Hee-Dong Kim, "Analysis of Insulation Aging Mechanism in Genrator Stator Windings", Journal of the KIEEME, Vol. 15, No2, pp.119-126, 2002
- [4] Hee-Dong Kim, "Assessment of Insulation Condition

in Operating Large Turbine Generator”, Trans, KIEE, Vol. 53C, No6, PP.324-329, 2004

- [5] Greg C. Stone, Edward A. Boulter, Ian Culbert, Hussein Dhiranni. "Electrical Insulation for Rotating Machines" pp26
- [6] Hee-Dong Kim, Tae-Sik Kong, Young-Ho Ju, Byong-Han Kim "Analysis of Insulation Quality in Large Generator Stator Windings", Journal of Electrical Engineering & Tehcnology Vol. 6, No. 2, pp384-390, 2011
- [7] 특별고압회전기·케이블의 열화진단 기술조사 전문 위원회, "특별고압회전기·케이블의 절연열화 진단기술", 일본 전기학회 기술보고(II부), 제267호, pp. 14~20, 1988
- [8] IEEE Standard "IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery" IEEE std 43-2000, pp. 17, 2000
- [9] Y. Ikeda and H. Fukagawa, "A Method for Diagnosing the Insulation Deterioration in Mica-Resin Insulated Stator Windings of Generator", Yokosuka Research Laboratory Rep. No W88046, pp31, 1988
- [10] Hee-Dong Kim, "Analysis of Insulation Quality in Large Generator Stator Windings", Jorunal of Electrical Engineering & Technology , Vol. 6, No. 2, pp. 389, 2011



이 상 길 (李 相 吉)

1963년 4월 2일생. 1990년 전남대 전기공학과 졸업. 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 한전 전력연구원 책임전문원

Tel : 042-865-7563
 Fax : 042-865-7599
 E-mail : lsklsk@kepco.co.kr



김 경 열 (金 京 烈)

1968년 1월 16일생. 1994년 전북대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 한전 전력연구원 선임연구원

Tel : 042-865-7576
 Fax : 042-865-7599
 E-mail : k2yeol@kepco.co.kr



주 영 호 (朱 榮 鎬)

1956년 5월 1일생. 1981년 인하대 전기공학과 졸업. 2000년 대전산업대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 한전 전력연구원 수석연구원

Tel : 042-865-7570
 Fax : 042-865-7599
 E-mail : juyh@kepco.co.kr

저 자 소 개



공 태 식 (孔 太 植)

1972년 2월 27일생. 1997년 충북대 전기공학과 졸업. 2004년 충남대 전기공학과 졸업(석사). 현재 한전 전력연구원 선임연구원

Tel : 042-865-7573
 Fax : 042-865-7599
 E-mail : kongts@kepco.co.kr



김 희 동 (金 熙 東)

1961년 12월 15일생. 1985년 홍익대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 2002년 일본 큐슈공업대학교 초빙연구원 현재 한전 전력연구원 책임연구원

Tel : 042-865-7571
 Fax : 042-865-7599
 E-mail : hdkim@kepco.co.kr