

대용량 고압전동기 현장진단연구(1)

박덕규, 송영철, 김주현(한국수자원공사), 류희서, 선종호, 김광화(한국전기연구소)

The first report of a study for Field Diagnosis of Large High Voltage Motors

D. K. Park, Y. C. Song, J. H. Kim (KOWACO), H. S. Ryoo, J. H. Sun, K. H. Kim (KERI)

Abstract - This report is the first intermediate report of a series of field test result of large high voltage motors. Major specimens were 3.3/6.6kV class pump motor that was installed and operated for public water service by KOWACO(KOrea WATER resources COperation). The capacity of specimen motors were in range of several hundred kVA. Until now, we get the 22 field test result by testing technique discribed in IEEE standards and discharge-map technique reported by Japanese engineers. The test result were varied very wide range, and there was a tendency according to insulation material and manufacture.

1. 서 론

고전압을 사용하는 대용량전동기는 산업설비의 기본으로서 경제적·사회적 관점에서 적절한 정도의 신뢰성 및 안전성을 확보해야 한다. 전동기와 발전기와 같이 기계적인 진동이 수반되는 회전기의 경우 지금까지는 일정한 운전·보수지침에 따라 운전현황을 기준으로 개별기기의 운전특성이나 환경의 차이에 대한 고려가 없이 일률적인 교체와 보수가 이루어 졌다. 이 교체기준도 오랜기간의 운전경험과 연구자료를 근거로 만들어진 것이기는 하나 설비의 특성에 대한 확실적인 통계를 근거로 하고 있기 때문에 어느정도의 고장이 발생할 확율을 인정하고 있다. 따라서 운전자들이 만나는 불시고장현상을 충분히 감소시키기 위해서는 어느정도의 과투자 와 낭비요인이 발생한다. 이러한 경제적인 낭비를 방지하고 사고율을 낮추기 위해서 개별기기의 특성을 파악하여 주기적인 상태진단에 의한 특성변화를 파악함으로써 효율적인 유지 보수 또는 교체계획을 수립하여야 한다. 이러한 특성의 파악방법 및 대표적인 특성변화는 설비제작업체에서의 실험실적 분석에 의해 기본적인 사항이 확립되는 경우가 대부분이나 실제 현장에서 발생하는 현상에 대한 충분한 검토가 부족한 경우가 대부분이다. 또한 현장에서의 진단시험은 주위 전력기기로부터 발생하는 Noise와 여러 가지 현상 때문에 정확한 특성을 얻기가 어렵다. 본 연구의 목적은 다량의 대용량 전동기를 운용하고 있는 한국수자원공사의 설비 진단인력과 절연특성의 현장측정에 대한 경험이 많은 한국전기연구소의 인력이 공동으로 설비 특성치를 측정하여 국내 설비에 대한 기본자료를 확보하고 국내 실정에 맞는 전동기 절연열화 상태판정 기준안을 검토하기 위한 것이다. 이러한 목적을 달성하기 위하여 1997년부터 고압전동기에 대한 현장시험을 지속적으로 실시하고 있으며 본 자료는 현재까지 얻어진 자료를 종합한 것이다.

2. 본 론

2.1 대용량 전동기의 절연열화기구

전동기의 절연시스템은 발전기와 같이 대형의 권선구조와 두꺼운 절연구조를 갖지는 않으나 기본적인 철심코아의 슬롯내에 권선이 위치하는 구조는 동일하다. 따라서 회전기에서 발생하는 다음 표1.과 같은 열화요인이 존재하며 지속적인 열화현상을 유발시킨다.

표1. 고압 회전기 권선절연의 열화요인과 형태

열 화 요 인		열 화 현 상
열	연 속	화학적 변질
	주 기 적	박리, 균열, 마모
전 압	정 격 전 압	부분방전 침식, 트래킹
	서 어 지 전 압	트리잉
기계력	굽 힘	박리, 균열
	진 동	마모
	충 격	박리, 균열
수 분	흡 습	누설전류 증대, 트래킹
	결 로	
	침 수	
오 손	도 전 물 질	누설전류 증대, 트래킹
	기 름·약 품	화학적 변질

표1. 과같은 열화요인에 대하여 반응하는 열화형태는 권선절연재료에 따라 많은 차이가 난다. 발전기와 같이 권선의 절연구조가 마이카와 함침재로 이루어진 다층절연형태를 갖는다면 주로 박리현상에 의한 공극의 발생으로 부분방전현상이 뚜렷히 나타나겠으나 전동기와 같이 간단한 함침절연구조만을 갖는다면 부분방전열화보다는 절연재가 열적으로 변화하여 손실이 증가하는 열적열화의 경향이 많다. 또한 기계적진동이 발생하기 때문에 슬롯에서 빠져나와 불완전하게 고정되어 있는 edge부분에서는 도체의 피로열화에 의한 균열, 절단현상 등이 나타나며 권선이 가늘기 때문에 발전기권선보다 위험성이 크다. 이렇게 전동기의 열화현상은 전반적으로 회전기에서 발생하는 형태와 유사하나 고유의 구조에 따른 열화현상의 경향을 갖는다.

2.2 절연열화 평가방법

고전압을 사용하는 대용량 전동기의 열화정도를 평가하는 방법은 크게 두가지로서 하나는 운전시간과 기동·정지 횟수에 의한 잔여내전압 추정법이고, 또 하나는 비파괴 시험측정치에 의한 추정법이다. 전자의 경우 N-Y map법으로 불리우며 종래부터 많은 현장경험자료와 실험자료가 있기 때문에 99.9%정도의 신뢰구간에서 하한치를 설정하고 있으나, 후자의 경우 주로 부분방전량에 의해 평가하는방법으로 D-map (Discharge map)으로 불리우며, 아직 실측자료가 통계적으로 충분치 못하여

95%신뢰구간에서의 하한치를 사용하고 있다.

2.2.1 절연구조의 수명기준

절연체의 수명기준은 IEC 216에서 "절연파괴전압 초기치의 50%점"으로 정의하고 있다. 일반적으로 절연재료는 그림1.과 같은 신뢰도곡선(Bath tube)에서 보는 것과 같이 초기치의 50% 이하의 시기에서는 열화반행 속도가 급격하여 예측이 어려운 것으로 보고되고 있다.

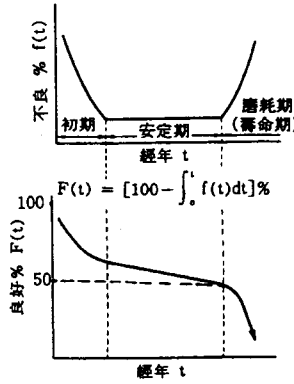


그림1. 신뢰성곡선

따라 달라지나 일반적으로 정격전압의 두배에서 2.4배에 달한다. 이러한 사항들을 종합적으로 고려할 때 수명점은 정규분포의 X-3σ 값이 초기치의 40%에 도달하는 시점에서 절연교체가 실시되는 것이 타당한 것으로 보고 되고 있다.

2.2.2 N-Y map법

일반적인 회전기의 절연열화는 전기적 열화, 열열화, 환경적 열화 및 heat cycle에 의한 열화로 분류된다. 이 가운데 전자 3가지는 운전시간에 주로 비례하는 특성이고 heat cycle는 기동 정지 횟수에 주로 비례한다. 따라서 종합적인 열화특성은 다음 식(1)과 같이 표현될 수 있다.

$$V_R = (1 - D_1)(1 - D_2)(1 - D_3)(1 - D_4) \times 100\% \quad (1)$$

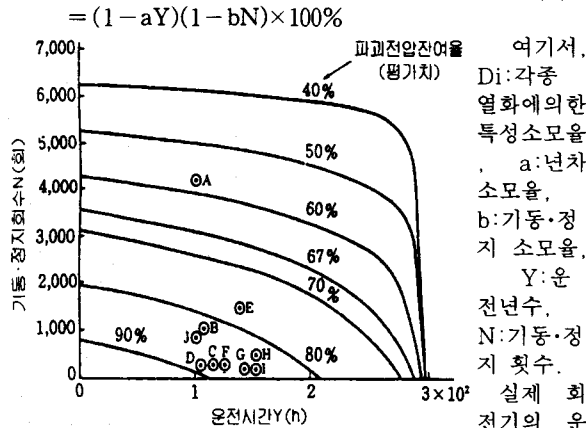


그림 2. 회전기의 N-Y map

열화특성으로부터 계수 a, b를 구하면
 $a = 7 \times 10^{-3}$: 운전시간 1년(24시간×365일) 당 0.7%
 $b = 7 \times 10^{-3}$: 기동·정지 횟수 1000회당 8%
 인 것으로 나타나고 있다. 이 값에 따라 x축을 운전시간 y축을 기동·정지 횟수로 그리면 그림2.와 같이 된다.

2.2.3 Discharge map법

회전기의 Off-line 비파괴시험은 일반적으로 표2.와 같은 단계로 실시한다.

표 2. 회전기의 고전적 열화판정기준

단계	측정항목	판정기준
①	PI	<1.5인 경우 흡습상태, ≥1.5인 경우 건조상태 ②단계로
②	P _{i2}	<E인 경우 불합격, E이하에서 나타나지 않으면 ③단계로
③	Δtan δ	≤6.5%
	ΔI	≤8.5%
	Q _{max}	<1×10 ⁻⁸
		3항목중 2항목이상 통과하면 합격 (잔존 절연파괴전압이 2E+1(kV)이상)

①단계는 권선의 흡습상태가 어떤가를 조사하는 것으로 일반적으로 아스팔트 콤파운드 절연시스템에서는 문제시 되지만 에폭시 등 레진절연을 갖는 회전기에서는 2.0의 값이 쉽게 얻어진다. ②단계에서는 교류전류의 제2전류 급증점P_{i2}를 검토하는 단계로서 교류전압 인가시 나타나는 전압전류특성이 안전한 선형구간에 있는 가를 확인하는 과정이다. 제2전류 급증점을 지난 전압인가구간은 절연파괴단계의 초기인 비선형전류급증구간으로 분류되며 급속히 절연파괴로 전이할 가능성이 있는 것이다. 이 특성 역시 아스팔트 콤파운드 절연시스템에서 주로 문제시 되며 레진시스템에서는 문제시되는 경우가 거의 없다. 따라서 레진계열의 절연시스템을 사용한 회전기에서는 ③단계의 결과가 가장 중요시 된다. ③단계의 3항목이 D-map법의 평가 요소이다. 표2.의 ③단계는 기본적인 특성을 표현한 것으로 한 항목정도는 기준을 초과하여도 무방하다. 기준을 초과 하였는가 보다는 각 측정치를 종합적으로 평가한 잔존수명 값과 각 측정치의 경년변화 경향을 주 검토대상으로 한다. D-map에 있어서 잔존수명은 다음 식(2)로 산출할 수 있다.

$$V_R = 100 - 2(\Delta - 0.8) - 67 \cdot \log \frac{Q_{max}}{1.5 \times 10^{-9}} \quad (2)$$

식(2)에서 Δ는 ΔI + Δtan δ를 나타내며 때로는 ΔI 대신 tan δ 측정에서 같이 얻어지는 정전용량의 변화량인 ΔC/C₀를 사용하기도 한다. 또한 식(2)에서 사용되고 있는 상수 2와 67은 회전기 제작업체에서 많은 실험을 거쳐 제안된 상수로서 업체마다 약간씩 다르게 제시하고 있으나 기본적인 식의 형태만은 같이 적용하고 있다. 식(2)의 값을 그림으로 표현한 것이 그림 3.이다.

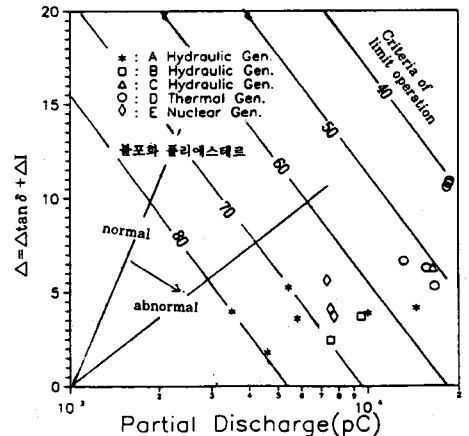


그림 3 에폭시 절연의 D-map

그림3.에 표시되어 있는 특성치는 주로 대형발전기의 측정치이다. 아스팔트 콤파운드 또는 폴리에스테르 절

연은 부분방전량의 변화보다는 손실특성치의 변화량이 크므로 그림에서 정상으로 표시된 윗방향으로 주로 변화하고 예폭시 절연은 상대적으로 교류손실량이 작기 때문에 그림의 아래쪽에서 오른쪽으로 변화하는 경향을 나타낸다. 또한 일괄 합침공정으로 생산된 회전기에서는 부분방전량도 상당히 낮은 수준을 유지한다. 따라서 식(2)의 상수들은 논란의 대상이 되고 있다. 그러나 새로운 재료와 공법에 대한 특성자료가 충분히 확보되지 못하였고, 아직 초기제품이 남아 있으므로 아직은 상수의 변화가 일반적으로 인정되지 못하고 있다. 따라서 여기서는 식(2)의 상수들을 그대로 사용하였다.

2.3 현장시험 및 결과분석

한국수자원공사에서 운영하고 있는 취수장 또는 가압장에 설치된 대용량 전동기를 대상으로 수자원공사 연구소와 한국전기연구소가 합동으로 절연진단시험을 실시하였다. 운전중이므로 시험시간의 최소화를 위하여 온습도의 조절이 어려운 겨울과 여름, 우기를 피하였다. 시험대상은 수자원공사의 점검일정에 따라 팔당취수장, 섬진강취수장 및 광명가압장의 일부 전동기를 대상으로 하였다.

각 전동기는 운전을 정지시킨 후 권선과 각 구조물의 온도가 안정되도록 6시간 이상이 경과한 후 전동기의 입력함에서 연결 케이블을 풀어내고 단자에서 시험하였다. 각 시험항목은 그림4.의 순서로 진행하였다. 시험설비는 구형 수동식 bridge형 계측기와 신형 자동측정장치를 복합사용하여 새로운 기기의 특성을 점검하였다. 측정된 특성들을 기기별로 정리하여 D-map에 표시한 것이 그림5.이다.

그림5.의 기본식인 식(2)는 Δ 가 0.8%, Q_{max} 가 1.5 nC인 점을 원점으로 하고 있다. 이 원점은 시험전압이 7~8kV 이상일 경우에는 무리없이 적용된다. 대표적으로 수력발전기의 고정자권선을 대상으로 하는 경우 11~15kV 정도의 시험전압을 가지며 주위의 기본 잡음도가 1.5~3nC정도 인 경우가 많다. 따라서 측정치가 1.5nC 이하로 측정되는 경우는 매우 드물다. 그러나 기기의 정격전압이 3.3/6.6kV인 전동기의 경우 E_0 가 1.8/3.8kV정도이기 때문에 측정전압을 다 걸어도 부분방전량을 측정하기 어려운 경우도 있으며, 대부분 전동기는 한 대만 단독으로 설치되는 경우가 드물기 때문에 주위의 운전중인 전동기의 영향으로 잡음이 다량 발생하여 부분방전과형의 구분이 어려운 경우가 많다. 그림5.에서 부분방전량이 1.5nC 이상인 기기들 가운데 두세 개의 전동기에서 매우 심한 잡음이 발견되었으며 반면 잡음이 효과적으로 차단된 회로를 구성한 경우에는 방전량이 매우 적은 경우가 대부분이었다. 따라서 전동기의 부분방전량을 기준으로 분석하기 위해서는 D-map의 원점을 전동기에 맞게 다시 가정 할 필요가 있다. 이 원점의 가정은 신품의 평균특성을 산출하고 기존 운전설비의 특성변화 추이를 지속적으로 관찰하여 신뢰성을 부여할 수 있다.

그림5.에서의 또 한 가지 특징은 교류손실이 증가하는 경향을 갖는 집단과 부분방전이 증가하는 경향을 갖는 집단이 나타나는 것이다. 이 두 집단은 같은 업체에서 제작한 것으로 제작의 시기만 틀린다. 교류손실이 증가하는 경향을 보이는 절연체는 B종 절연이고 부분방전이 증가하는 경향을 갖는 설비는 F종 절연체료를 사용한 것이다. 따라서 전동기의 진단시험시 사용된 절연재료의 종류에 대한 정보가 있어야만 정확한 판단이 가능 하 게 이 르 시 켜 진 다

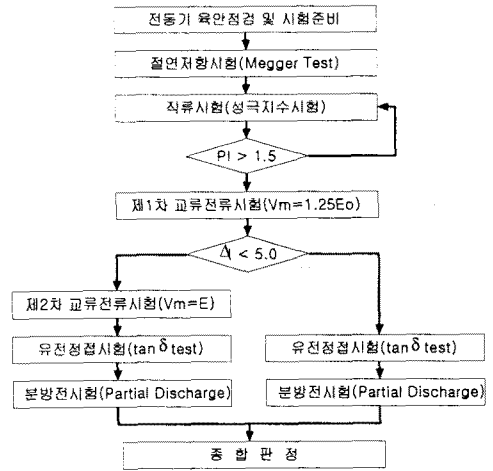


그림 4. 절연진단시험 순서도

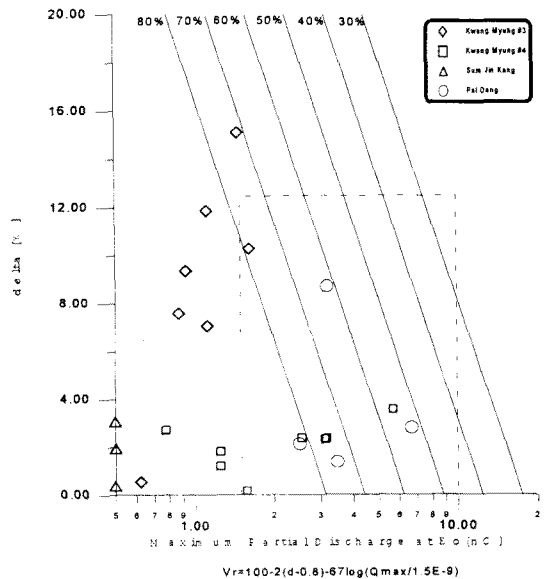


그림 5. 고압전동기 현장측정 결과

3. 결 론

국내에서 제작되어 설치 운전되고 있는 대용량 고압전동기의 현장진단시험을 실시하고 그 결과를 분석하여 다음과 같은 두가지 결론을 얻었다.

- 1) 3.3/6.6[kV] 정격의 전동기의 초기특성에 대한 자료 수집과 연구가 필요하다.
- 2) 절연재료에 따라 별도의 판정기준과 관리기준을 적용하는 방안을 고려할 필요가 있다.

본 연구는 실제 현장에서 측정된 자료를 공개하여 관련 분야에 정보를 제공하고 계속 실시되는 진단시험 및 분석을 위한 보완 방안을 검토하기 위한 것이었다.

(참고 문헌)

- [1] Y.Ikeda, H. Fukagawa, "합성레진 절연 발전기 권선의 절연열화 판정법", 전력중앙연구소보고 W88046, 1988. 6
- [2] K.Kadotani외 3인, "고압 회전기 코일의 절연진단과 수명예측" 히다찌평론 vol.3. no.3. 1981