

고압전기기 절연시스템 열화특성분석을 통한 성능평가

최영찬, 김홍제, 서동현
현대중공업 기전연구소, 전동기설계부

Evaluation of Aging on Coil Insulation System for Rotating Machines

Young-Chan Choi, Hong-Je Kim, Dong-Hyun Seo
Hyundai Heavy Industry Mechatronics Research Institute, Electric Motor Design Dept

Abstract - We worried about the technology difference between our company and the advanced companies at present motor market. Thus we started independently to develop the technology of motor coil insulation system and to accumulate insulation technology data. When we export the electric machines to oversea market, we are asked to set up the insulation system to show our product excellence.

We first evaluate the insulation system of our motors to realize higher reliability of high voltage insulation system. Therefore we are possible to do the insulation diagnosis in real site and have accumulated the data related in insulation diagnosis. Thus we have improved the our insulation system. And also these data were used to new product development as very useful data, also will be used the insulation deterioration diagnosis to estimate the remained life time which is very important data for the maintenance management. As the result, we are able to get the our product reliability.

1. 서론

현재 국내시장 개방화의 추세에 따라 외국과 국내의 절연관련 기술의 심각한 차이에 대한 우려와 함께 독자적인 절연시스템의 구축 및 기술축적이 절실하게 요구되어 지고 있다. 또한 해외 시장에 진출함에 있어서 국내 제품의 우수성을 입증, 홍보하기 위해서도 절연시스템의 구축과 성능평가가 요구되어 지고 있다. 또한 최근의 추세는 사용자가 고압전동기에 대한 예방보전의 중요성에 대한 인식이 높게 되어 절연특성데이터에 의한 절연열화 진단의 중요성이 증가하게 되었다[1-3].

본 연구에서는 지금까지 제안되고 있는 열화검출방법 중에서 데이터축적이 가능하고 절연진단 실적이 있는 절연특성시험법(직류전류시험, 교류전류시험, 부분방전시험 등)을 선정하여 당사 고압전동기 절연시스템을 대상으로 일반특성 및 열화특성시험을 실시하였고 내구성을 평가하였다.

2. 고압전동기 열화 요인 및 과정

고압전동기 절연은 대부분 내부분방전성이 우수한 마이카를 사용하고 있으나 운전전압/부분방전개시전압의 절연여유는 작다. 또한 그 밖의 고전압기기에서는 볼 수 없는 많은 기계적 문제를 포함하고 있다. 이와 같은 것으로부터 절연열화의 연구, 특히 복합요인열화에 관한 연구는 오래 전부터 행해져 왔다[4].

전동기의 용도가 다양해지고 부하의 상태, 운전시간,

기동정지회수, 사용환경도 다양각색이므로 절연열화를 일정하게 취급하는 것은 곤란하다. 그러므로 본 절에서는 열화요인과 이 요인에 기인한 열화의 진전과정에 대하여 서술하였다.

2.1 열열화

고압전동기 고정자권선의 절연은 마이카, 보강재(폴리 에스터필름, 유리섬유 등)와 이들을 상호 묶어주는 합성 수지접착제로 구성된다. 이와 같은 구성의 경우 마이카, 유리섬유 등의 무기재료는 내열성이 높으므로 F종의 온도에서의 열열화는 문제가 되지 않는다. 열열화가 문제가 되는 것은 접착제인 유기고분자재료이다. 전동기절연의 경우에는 열열화에 의한 마이카테이프층간의 접착력이 저하하고 층간박리가 발생한다. 결과적으로 보이드가 생성하게 되고 부분방전의 발생이라는 열화진전과정을 거쳐 열과 전압에 의한 복합요인열화의 현상을 보이게 된다.

2.2 전압열화

고압전동기 절연시스템은 내부분방전성이 뛰어난 마이카가 주된 구성재이므로 절연파괴는 마이카 접합부를 따라 진전한다. 이 열화진전은 장시간 과전시험으로부터 알 수 있으며 많은 연구가 진행되어 왔다. 이밖에도 전동기절연에서 중요한 전압열화로써 절연물표면상의 전계방향에 열화도전로를 형성하는 트랙킹 열화가 있으며 표면전계의 강약, 표면의 흡습, 오염 등에 의존한 전압과 환경에 의한 복합요인열화를 제공한다.

2.3 기계적열화

고정자 권선에 작용하는 기계력에는 제조시, 운전시의 2종류가 있으며 제조시 기계력과 운전시 기계력으로 나눌 수 있으며 운전시의 동적스트레스인 Heat Cycle과 전자진동이 중요하다. Heat Cycle에 의한 열화는 절연층과 도체의 열팽창의 차이에 기인하고 기동정지, 부하 변동시에 반복되는 전단응력이 이들간에 작용한다. 특히 철심이 긴 경우에 철심 끝단부 부근의 절연층에 보이드, 크랙 등이 발생하거나 절연층이 얇아지는 등의 열화가 생기는 경우가 있다. 전자력에 의한 것으로는 단락시 발생하는 충격전자력과 정상운전에 발생하는 전자진동의 2종류가 있으며 전동기 기동시의 충격력에 의한 철심단부의 손상, 정상운전의 전자진동에 의한 절연층의 마찰, 박리 등이 생기게 된다. 이와 같이 기계력에 의해 보이드, 크랙이 발생하고 이 부분에서의 방전을 포함한 기계력과 전압에 의한 복합열화를 제공하게 된다.

2.4 환경적열화

일반적으로 발전기는 비교적 양호한 환경에서 운전되고 있으나 고압전동기는 특수한 환경에서 사용되는 경우가 많으며, 이들 환경조건중에서 내수성, 내약품성, 내방사선성 등에 대한 평가는 환경과 전압과의 복합열화요인의 형태로 실시되고 있다.

3. 절연성능 평가

고압전동기는 대용량화, 고전압화, 소형화와 함께 사용전계가 높아졌으며 열적, 기계적 조건 등의 간접적인 조건도 더욱 혹독해 지는 추세에 있다. 더욱이 사용분야의 확대 및 다양화와 함께 전동기에 대한 책무도 점점 중요해져 높은 신뢰성이 요구되고 있다. 그러므로 고압전동기의 수명을 결정하는 가장 중요한 요소인 절연시스템의 신뢰성 평가나 합리적 설계, 제조를 위해서는 신뢰성 평가방법의 확립이 요구되었으며 절연의 내전압수명 평가방법 등 많은 연구가 진행되어 왔다[5-6].

이러한 절연성능 평가는 건전한 상태(초기상태)에서 절연시스템이 가지고 있는 특성을 파악하기 위한 일반특성과 각종 열화조건을 단독 혹은 복합적으로 인가하여 가속열화시킴으로서 열화요인별 특성을 파악하기 위한 가속열화특성으로 분류할 수 있다. 이러한 절연성능 평가를 위해서는 실제 전동기를 대상으로 하여야 하나 장소, 비용 등 시험조건에 제약으로 인해 일반적으로 Fig.1과 같이 절연시스템을 적용한 시료(Sample Bar: 고정자 권선과 철심부를 Al plate로 모의한 직선상의 모델)나 형코일(코일을 절연처리하여 진공가압침한 Diamond형태의 날개 코일), Motorette(코아 일부분에 형코일을 삽입하고 lead 절연처리한 것으로 고정자 Ass'y에 대한 시험을 대응하기 위한 모델)을 이용하였다. 이들 시료에 당사 고압전동기 절연시스템을 적용하여 일반특성과 가속열화특성 분석을 실시하였다.

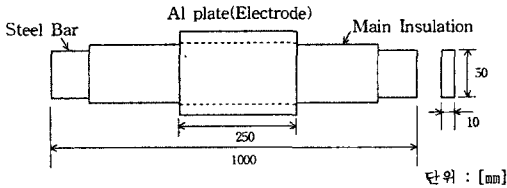


Fig.1 Sample Bar 형상

3.1 일반특성

일반특성에 의한 절연시스템의 건전성 평가는 구성되는 절연체의 품질과 제작과정에 크게 의존한다. 그러므로 개개의 재료 규격에 의한 구성재의 품질 검사와 제작 조건의 검사가 모든 재료에 대하여 실시되어야 한다. 절연재료의 초기건전성의 대부분은 제작업체에서 제공되는 특성데이터에 의해 보증되고 있다. 그리고 절연시스템의 초기건전성 평가는 위와 같은 특성이 정해진 절대값보다도 적절한 범위에 분포하고 있다는 것을 관리하고 이상을 검출하기 위한 기준을 설정하기 위한 데이터 축적에 있다.

본 연구에서는 절연시스템의 일반특성 검토를 위하여

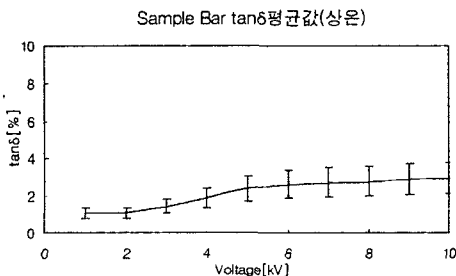


Fig.2 $\tan \delta$ - 전압특성

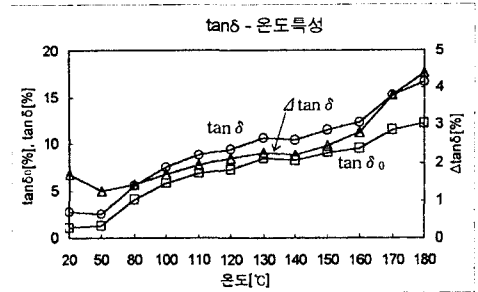


Fig.3 $\tan \delta$ - 온도특성

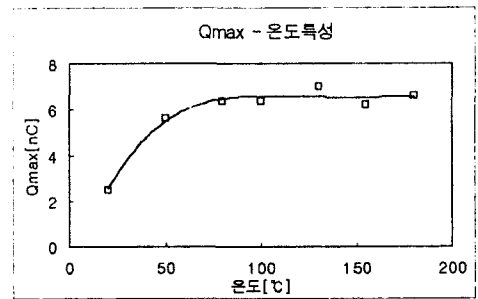


Fig.4 Q_{max} - 온도특성

각 절연특성항목에 대한 전압별, 온도별 시험을 실시하여 Fig.2, Fig.3, Fig.4의 결과를 얻었다.

위의 결과들은 시험결과와 일부를 나타낸 것으로 전압특성, 온도특성 결과로부터 당사 절연시스템이 가지는 일반특성 및 당사 고압전동기의 초기건전성 평가기준 확립을 위한 데이터를 확보하게 되었으며, Fig.4의 최대 부분방전전하량(Q_{max})은 온도상승에 따라 급격히 상승하였으며 그 이후로는 증감없이 일정하였다.

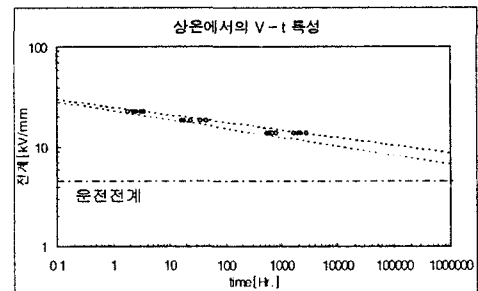


Fig.5 상온에서의 V-t 특성

3.2 가속열화특성

3.2.1 전기적 열화특성

전기적 열화특성에서의 인가전압 크기에 대한 구체적인 규정은 없으며 절연시스템의 절연내력을 참고로 결정할 필요가 있으며 일반적으로 V-t특성은 양대수 그래프로 표현할 때 선형성을 가지고 있는 것으로 보고되고 있으며 [7] 본 연구에서는 전압가속열화 시험방법을 이용하여 인가전압을 22.9kV/mm, 18.3kV/mm, 13.8kV/mm로 설정하였다.

당사 6.6kV 고압전동기 절연시스템의 경우 보강재가

폴리에스터필름인 마이카테이프를 적용하고 있으며 각각의 인가전압에서 절연파괴를 일으킨 시간과 전압을 양대수 그래프로 표현한 것이 Fig.5이다. 동 그림에서 각 인가전압에서의 과전시간이 가장 긴 데이터를 연결하여 최대수명점으로 하고 과전시간이 가장 짧은 데이터를 연결하여 최소수명점으로 하였다. 최소수명점인 경우에도 운전전계에서 100년 이상의 내전압 수명을 가지고 있는 것으로 확인되었다.

3.2.2 열적 열화특성

절연시스템의 내열성을 평가하는 경우에는 온도만에 의해 결정되는 고온에서의 형태안정성과 고온에서 장시간 가열하는 경우의 내열열화성으로 나눌 수 있다[8]. 본 연구에서는 가열열화시간에 따른 절연특성치의 경시변화와 절연내력의 감소율을 비교하여 내열성을 검토하였다.

Fig.6은 가열시간에 따른 절연내력의 변화추이를 나타낸다. 시간축은 대수축을 나타내고 변화추이를 수식으로 나타내면

$$y = -0.0029x + 46.937 \quad (3.1)$$

이 된다.

여기서 절연물의 수명점을 초기절연내력의 40% 저하점이라고 보면 약 9,300Hr.이 수명점이 된다. 또한 가열온도가 180℃이므로 운전온도를 120℃로 하여 온도반감의 법칙을 적용하면 약 100년의 수명을 갖고 있는 것을 확인할 수 있다.

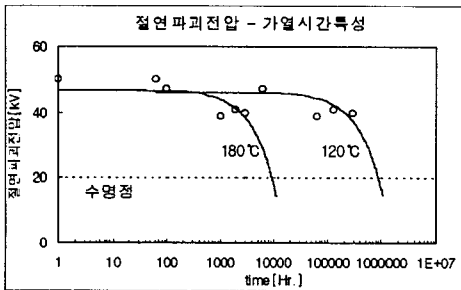


Fig. 6 절연파괴전압-가열특성

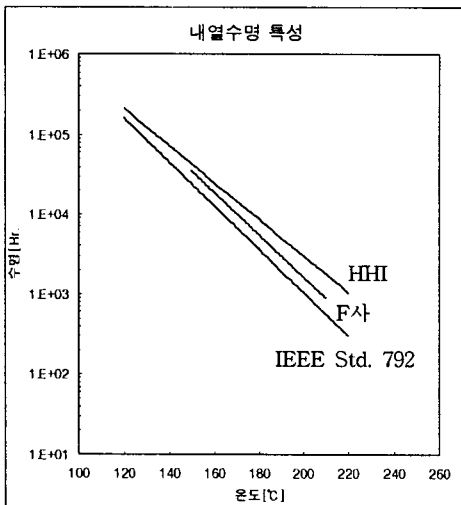


Fig.7 내열수명특성

Fig.7은 내열수명특성을 나타낸다. 이 결과로부터 당사 절연시스템의 내열수명은 IEEE Std. 792 규격에서 규정하고 있는 내열등급 F종 평가기준을 만족하며 선진사 절연시스템의 내열수명과 비교하여도 전혀 손색이 없고 오히려 고온에서 내열성능이 우수하다는 것이 입증되었다.

4. 결 론

본 논문에서는 고압전동기의 절연시스템의 성능 평가를 위한 방법을 제시하였고 일반특성과 가열열화특성 분석을 통하여 당사 절연시스템의 우수성을 입증하였다.

- 1) 고압전동기가 운전중에 받을 수 있는 스트레스 요인에는 전기적, 열적, 기계적, 환경적인 요인이 있으며 이들 요인은 단독 혹은 복합적으로 작용하여 열화를 진전시킨다. 이들 열화요인이 고압전동기 절연시스템에 미치는 영향을 분석, 정리하였다.
- 2) 절연시스템의 내구성 시험평가를 위하여 규격 및 선진사 자료를 검토하여 내구성 시험항목 및 방법을 선정하여 당사 고압전동기 절연시스템에 대한 절연성능 평가를 실시하였다.
- 3) 시험결과를 분석하여 각종 열화요인이 절연시스템의 특성과 수명에 미치는 영향을 검토하였고 절연시스템의 예상수명을 추정하였다. 또한 이들 결과와 선진외국업체 절연시스템의 결과를 비교 평가하여 당사 고압전동기 절연시스템의 성능을 파악하였다.
- 4) 절연시스템의 절연특성을 분석한 결과와 신제품에 대한 절연특성시험을 실시한 결과를 종합하여 당사 고압전동기의 전압별 초기전전성 평가기준을 확립함으로써 당사 고압전동기에 대한 보다 신뢰성 있는 운전관리가 가능해졌으며 초기불량율을 감소할 수 있게 되었다.
- 5) 당사 절연시스템은 전기적으로는 고압전동기 운전전계에서 충분한 수명을 가지고 있으며, 열적으로는 IEEE Std. 792를 만족하고 있으며 선진사의 절연시스템과 비교하여도 내구성에서 뒤지지 않는 것으로 입증되었으므로 F종 고압전동기로서 충분히 적용가능한 것으로 판명되었다.

[참 고 문 헌]

- [1] "絶縁劣化試験方法", 電氣學會 技術報告 第182號, 1984
- [2] "特別高壓回轉機・ケーブルの絶縁劣化診断技術", 電氣學會 技術報告 第267號, 1987
- [3] 小井戸正之, "電動機における設備診断", OHM, Sep. 1993
- [4] "絶縁システム複合要因劣化に関する研究の現状", 電氣學會 技術報告 第225號, 1986
- [5] 谷口正俊, 松延謙次, 實松俊弘, "大形回轉機のコイルの壽命診断技術", 日立評論, Vol.67, No.2, 1985
- [6] "電力設備の絶縁余壽命推定法", 電氣學會 技術報告 第502號, 1994
- [7] 藤井尙義, 石井勇次, 南松太郎, 佐佐木洋敏, 前田昌南, "Fレジン・R絶縁", 富士時報, 第51卷, 第2號, pp.17-21, 1978
- [8] 谷口正俊, 松延謙次, 實松俊弘, "大形回轉機のコイルの壽命診断技術", 日立評論, Vol.67, No.2, pp.73-77, 1985