

가속수명시험에 의한 변압기 절연재료의 전기-기계적 특성 연구

김주한*, 한상옥, 김대식
 충남대학교, 한국전기공사협회

A Study of Electrical and Mechanical Characteristics by Accelerated Life Test

Ju-Han Kim*, Sang-Ok Han, Dae-Sik Kim
 Chungnam National University, Korea Electrical Contractors Association

Abstract - 본 논문은 변압기의 과부하 상태를 모의하고 내부 절연물의 잔존수명을 평가하기 위한 방법으로 열적 스트레스를 인가한 가속 수명 시험을 수행하여 광유 함침 절연지의 전기적·기계적 열화 특성을 분석하였다. 시험에 사용된 절연재료는 변압기의 주 절연물로 널리 사용하고 있는 셀룰로오스계 크래프트 절연지와 광유계 절연유를 사용하였다. 가속 열화 시험은 IEEE/ANSI Standard C59.91-1981의 수명 예측 곡선에 의거하여 국내 배전환경에 부합하도록 55℃ 절연시스템을 기준으로 하였으며, 150℃에서 약 1,000시간 동안 열 스트레스를 인가함으로써 변압기의 수명이 다하도록 모의하였다.

다. 본 연구에서는 배전용 변압기 절연물이 과부하에 따른 열적인 스트레스에 따라 절연 특성에 상당한 영향을 미친다는 선행 연구 결과들을 바탕으로 배전용 변압기의 절연설계와 수명 예측을 위한 기초 데이터를 제시하기 위해 가속 열화 모의 시험셀을 제작하여 유입변압기 절연물을 가속 열화 시킨 후 열화 시간대별로 시료를 제작하였다. 절연지의 열화정도를 분석하기 위해 유전특성, 절연파괴강도, 인장강도 및 중합도를 측정하여 열적 스트레스에 의한 절연지의 전기적, 기계적 특성 변화를 분석하였다.

1. 서 론

최근 절연재료의 수명평가에 관한 연구는 전기기기의 성능에 직접적인 영향을 미치는 열화메커니즘 분석에 의한 물리적 특성 연구로써 그 중요성이 높아지고 있는 추세에 있다. 최근의 전력용량의 증가추세에 따라 1992년 약 70여 만대였던 배전용 변압기가 10년이 지난 2002년에는 약 150여만 대로 그 수요가 대폭 증가한 반면 변압기의 전체 고장대비 1차권선의 중간 단락으로 인한 고장이 약 50 %대로서 절연물의 절연설계 및 제조방법에 대한 연구노력이 보다 요구되어지고 있다. 특히 최근에는 부하의 급증으로 예측하지 못한 과부하의 결과로 변압기 권선의 중간 절연물 열화고장이 상당부분을 차지하고 있다. 따라서 변압기 권선의 핫스팟(Hottest spot) 부분에서 발생할 수 있는 중간 절연지의 열화 유형 및 절연설계에서 고려할 사항에 대한 검토가 필요하다.

국외의 경우 절연물의 열화 메커니즘을 분석하고 절연물의 최적설계를 위한 절연연구 및 수명평가연구가 진행되었으며 나아가 절연지의 열화 진단을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 반면 국내의 경우 품질개선을 위한 몇몇 연구실적을 가지고 있지만 국외의 연구를 적용하는 문제점과 절연설계 기술개발의 부족으로 열화고장 발생율이 증가하고 있다. 또한 배전용 변압기의 경우 고장 발생 시 직접적인 수송가 측에 피해가 전달되므로 고장에 대한 예방 진단기술 확보가 요구되며, 지속적인 관리 및 성능평가를 위해 절연물의 가속열화 시험을 위한 설비 구축이 필요하다.

변압기의 권선 및 중간절연을 목적으로 사용되고 있는 절연물인 셀룰로오스계 크래프트 절연지는 값이 저렴하고 절연 특성이 우수하며 절연유와의 유침 특성이 뛰어나 배전용 변압기 권선 절연에 많이 사용되고 있다.[1] 1차권선의 경우 보통 0.18 mm 두께의 셀룰로오스 절연지 3~5매로 중간 절연을 하고 있다. 이러한 절연물은 변압기 과부하에 따른 열적인 스트레스와 사용 환경상 수분의 침투 및 산소함량으로 인해 셀룰로오스의 중합도 저하와 더불어 분자구조의 결합력이 약해져, 결국 기계적 급격한 저하와 이상전압 및 썌지(Surge)로 인한 권선의 진동에 의한 절연지 손상 및 절연특성, 유전특성, 인장강도 등의 특성저하로 나타나고 있다. 그러므로 실제 변압기의 수명은 부하율에 따른 권선 최고 온도의 지속시간으로 평가하고 있는데, 이러한 열적 스트레스에 의해 절연특성이 기준치 이하로 급격히 떨어질 때 절연물로서의 수명이 다한 것으로 보고 있

2. 본 론

2.1 가속수명시험

변압기 내부 절연물의 열화에 따른 수명 감퇴는 온도와 시간의 함수라 할 수 있다. IEEE/ANSI Standard C57.91-1981[2]에 의하면 시간과 온도에 대한 절연성능 감퇴의 관계는 Arrhenius Reaction Rate Theory를 적용하면 55℃ 절연시스템을 기준으로 하였을 때 식 (1)과 그림 1로 나타낼 수 있다.

$$LIFE = \exp\left(\frac{15000}{T} - 27.064\right) \quad (1)$$

단, LIFE: 예측수명(hour), T: 핫스팟 온도(℃)

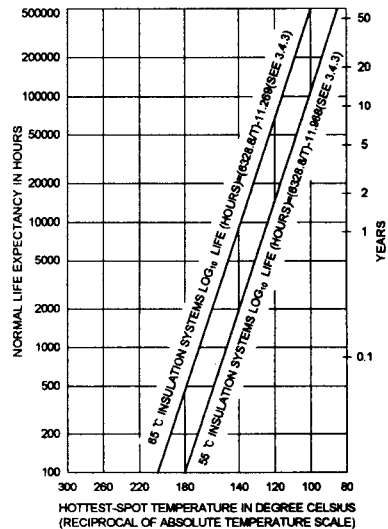


그림 1. 수명예측곡선

식 (1)과 그림 1은 변압기 내부 권선의 최고점 온도(Hottest Spot)를 바탕으로 변압기의 수명을 예측하는 것으로써 본 논문에서는 이를 기준으로 150°C에서 약 1,000시간 동안 가속 수명 시험을 수행하여 변압기의 수명이 다하도록 모의하였다.

2.2 실험

과부하시 열적 스트레스에 의한 변압기 내부 절연물의 절연 열화 상태를 모의하기 위해 그림 2, 그림 3과 같은 가속 열 열화 모의 시험셀을 제작하였다. 가속 열 열화 시험장치는 고온의 항온유조에서 시료에 고르게 열을 가하기 위해 열매체유인 실리콘유를 사용하여 중탕방식으로 하였다. 절연지는 인장강도 시험을 위해 KS M 7014에 준하여 25×180mm로 절단하여 광유에 함침 하였으며, 유함침 시 진공펌프를 이용하여 절연지 내부의 기포를 완전히 제거하였다. 또한 그림 3과 같이 시험셀의 기밀을 위해 실리콘 마개로 기밀 구조를 유지하였으며, 절연유의 열팽창에 따른 방압 밸브와 외기의 수분유입을 방지하기 위한 실리콘겔을 사용하였다.

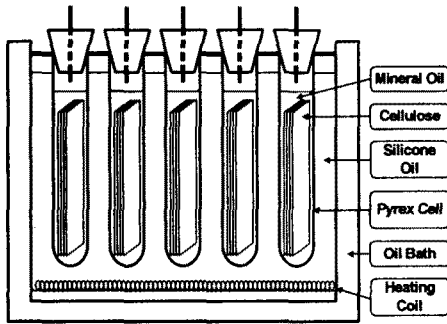


그림 2. 가속 수명 시험장치

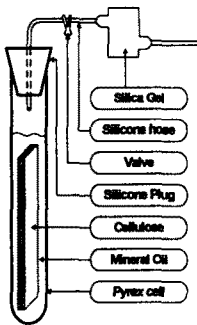


그림 3. 가속 수명 시험 용기

2.3 절연파괴 강도 시험

절연지의 절연파괴강도는 절연파괴전압 시험기(MEGGER FOSTER社, OTS 60 AF/S)를 사용하였으며, KS C IEC 60544-2 “전기용 셀룰로오스 페이퍼 시험방법”에 따라 측정하였다. 전국 간 절연지는 0.5[kgf/cm²]의 힘으로 끼워 넣고 3[kV/sec]의 전압상승률로 상용주파수의 전압을 전국 사이에 가하여 각각 10개의 시료에 대해 시험하였다.

2.4 인장강도 시험

절연지의 인장강도 시험은 KS M 7014 “종이 및 판지-인장강도 특성의 정속-정속 신장률법”에 준하여 인장강도 시험기(Unitech社, RNB)로 측정하였다. 하중속도는 시험편이 평균 20±5초 내에서 끊어지도록 조정하였다. 또한 절연지의 인장강도는 절연지의 방향에 따라 큰 차이를 보이므로 이에 주의하여 시료를 제작하였으며, MD(Mechanical Direction)방향을 종

5회 측정하여 평균치를 구하였다.

2.5 평균 중합도 시험

평균 중합도 측정은 KS C IEC 60450 ‘신규 및 열화된 절연지의 평균 중합도 측정’에 의해 구리에틸렌디아민 용액을 사용하여 절연지 용해에 따른 비점성도를 측정하는 방법을 사용하였다. 이 측정으로부터 용액의 고유 점성도를 추론하여 중합도를 쉽게 산출할 수 있다. 셀룰로오스 용액은 비뉴턴니안(non-Newtonian) 용액으로 점성도는 유속이 증가함에 따라 감소한다. 희석한 용액의 점성도가 속도율의 변화에 따라 약간 변하더라도, 최대 정확도를 확보하기 위해 KS C IEC 60450에 규정된 조건과 엄격하게 부합되어야 한다.

2.6 유전특성 시험

열적 스트레스에 의한 변압기 절연지의 절연 열화특성을 분석하기 위해 유전열 분석기(Novo Control社, Broad Band Dielectric Spectrometer)를 사용하여 비유전율을 측정하였다. 절연지 시료는 광유에 함침하여 진공펌프를 이용해 기포를 충분히 제거하였으며, 상용주파수에서 30-150°C의 온도구간을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 절연파괴 강도

그림 4는 열 열화 시간에 따른 광유함침 절연지의 절연파괴 강도 측정 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 절연지의 절연파괴강도는 큰 변화가 없는 것으로 나타났는데, 이는 열화 시험셀에 설치한 방압 밸브를 통해 절연지 내부의 수분이 외부로 증발하여 결과적으로 절연지가 건전한 상태로 유지되었기 때문일 것으로 판단된다. 따라서 절연지가 절연유 및 외기에 의한 수분을 흡수하지 않는다면 충분한 전기적 성능을 보장할 것으로 사료된다.

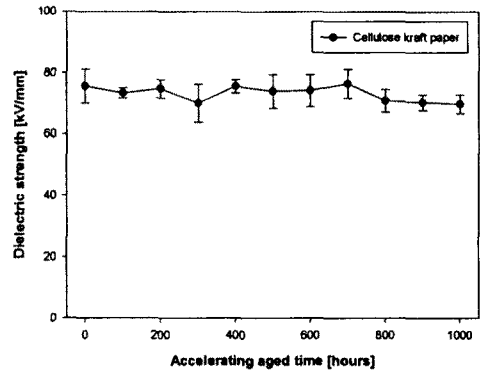


그림 4. 열 스트레스 인가 시간에 따른 절연지의 절연파괴 강도

3.2 인장 강도

절연지의 인장강도는 변압기의 수명을 평가하는 가장 중요한 인자 중 하나로서 일반적으로 절연지의 인장강도가 50% 이하로 떨어질 경우 기기의 수명이 다한 것으로 판단하고 있다. 그림 5는 열 스트레스를 인가한 시간에 따른 광유 함침 절연지의 인장강도를 나타내고 있다. 측정결과 열 열화 시간이 증가함에 따라 신품대비 최대 30%의 인장강도 저하를 나타내었는데, 특히 가속 열화가 900시간 이후부터 100시간의 50%이하의 값을 나타내고 있다. 따라서 열 스트레스를 인가한 900시간 이후에 절연지의 수명이 다 되었다고 판단 할 수 있다. 이는 절연지가 열적 스트레스로 인한 기계적 강도가 현저하게 저하되는 것을 의미한다.

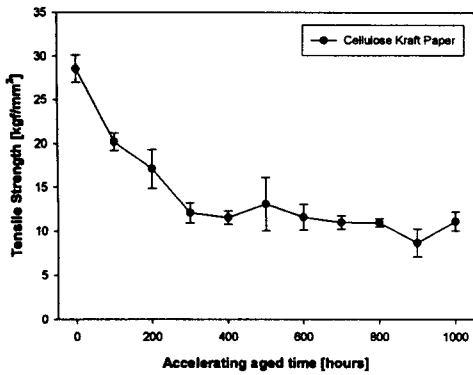


그림 5. 열 스트레스 인가 시간에 따른 절연지의 인장 강도

3.3 평균 중합도

표 1은 절연지의 열화상태에 따른 평균 중합도의 관계를 나타내고 있으며, 그림 6은 열화시간과 평균 중합도와와의 관계를 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 열화시간이 경과함에 따라 평균 중합도 값이 급격히 감소함을 알 수 있다. 특히 표 1의 평균 중합도에 의한 변압기 교체시기 판정조건에 따르면 평균 중합도가 200 이하 일 때 변압기의 교체할 것으로 권고하고 있다. 본 시험에서는 700시간부터 평균 중합도의 값이 200이하로 떨어지고 900시간 이후부터 급격히 감소하는 것을 알 수 있으며, 인장강도를 측정할 결과와 매우 흡사한 형태를 보이고 있음을 알 수 있다.

표 1. 평균 중합도에 따른 절연지의 열화상태

DP value	Condition
DP > 400	Good
200 < DP < 400	Aged, perhaps replace
DP < 200	Replace

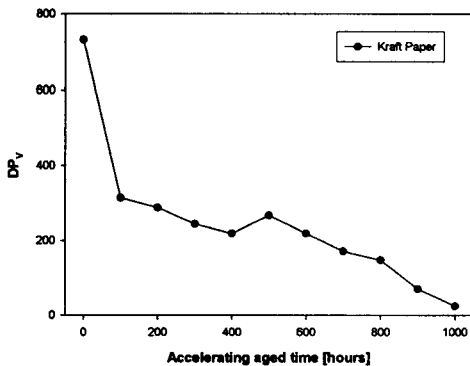


그림 6. 열 스트레스 인가 시간에 따른 절연지의 평균 중합도

3.4 유전특성

그림 7은 열 열화 시간에 따른 광유 함침 절연지의 비유전율 측정 결과이다. 열화 정도와 주위온도에 따라 절연지의 비유전율은 급격하게 상승함을 알 수 있으며, 이는 절연지와 절연유간의 전기적 스트레스 불균형을 초래하여 부분방전 개시 전압이 저하될 우려가 있다. 다시 말해 절연지가 장시간의 열적 스트레스를 받아 열 열화가 진행되었을 경우, 변압기의 부하가 증가하여 고온 운전 상태가 되면 유전손실이 증가함은

물론이고 상대적으로 비유전율이 작은 절연유가 받는 전기적 스트레스가 급격히 증가하여 부분방전이 발생할 확률이 클 것으로 예상된다.

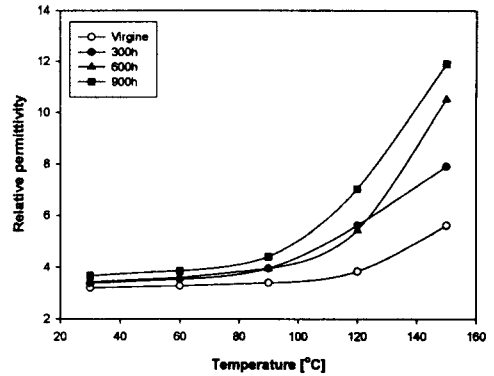


그림 7. 열 스트레스 인가 시간에 따른 절연지의 유전특성

4. 결 론

본 연구에서는 배전용 변압기 절연물이 과부하에 따른 열적인 스트레스에 따라 절연 특성에 상당한 영향을 미친다는 선행 연구 결과들을 바탕으로 배전용 변압기의 수명예측을 위한 기초 데이터를 제시하기 위해 열 스트레스를 인가하는 가속 수명 시험장치를 제작하였으며, 절연지의 열화분석기법으로 유전특성, 절연파괴강도, 인장강도 및 평균 중합도를 측정하여 열적 스트레스에 의한 절연지의 전기적, 기계적 열화 특성을 분석하였다. 장시간의 열적 스트레스를 절연지에 인가하였을 때, 절연파괴강도는 내부 수분함유량이 건전한 상태로 유지될 경우 큰 변화가 없는 것으로 나타났으나, 인장강도와 평균 중합도는 열 스트레스에 의해 기계적 강도가 현저히 저하되는 것으로 나타났다. 또한 비유전율은 열화시간에 비례하여 증가하였으며, 주위 온도가 상승하면 더욱 크게 상승하는 것으로 나타났는데 이는 상대적으로 절연유의 전기적 스트레스 증가로 인한 부분방전이 발생할 확률이 클 것으로 예상된다.

【참 고 문 헌】

- [1] H Herman etc, "A new approach to condition assessment and lifetime prediction of paper and oil used as transformer insulation", I EEE ICSD, pp.473-476, 2001
- [2] IEEE/ANSI Standard C57.91-1981 "Guide for loading mineral-oil-immersed overhead and pad-mounted distribution transformers"
- [3] KS C IEC 60544-2 "전기용 셀룰로오스 페이퍼 시험방법"
- [4] KS M 7014 "종이 및 판지-인장강도 특성의 정속-정속 신장률법"
- [5] James L. etc, 'Environmental and life cycle considerations for distribution and small power transformer selection and specification', IEEE, 2002 pp.353-358
- [6] M. J. Mousavi etc, 'Experimental investigation of distribution transformer aged solid insulation', IEEE, 2002 pp. 192-195
- [7] 김이곤 외, '변압기 절연열화진단 시스템개발에 관한 고찰', 한국조명·전기설비학회 학술대회 논문집, 2001 pp.139-144
- [8] 윤경현 외, '주상 변압기 절연재료의 열화 반응에 관한 연구', 화학공학의 이론과 응용 제 1권 제 2호, 1995 pp.123-126