

변압기절연유 누설전류와 변압기열화의 상관성 분석

*강창원, *최길수, *홍성준, **전영갑, ***김재철
 *(주)피에스디테크, **한국전기연구소, ***승실대학교

A study of oil transformer diagnosis on TOID system

*Kang, Chang-won, *Choi, Gil-soo, *Hong, Seong-Jun, **Chon, Young-kap, ***Kim, Jae-chul,
 *PSD Tech, **KERI, ***Soongsil- Univ.

Abstract - A Study on TOID system which can measure a degree of diagnosis oil Tr. TOID system uses porous ceramic sensor and accept a DC 2000V, this method is to accumulate carbon element generated from the both electrodes from the ingredients the sensor when being vaporized the oil. The main substance of our research were comparison between vaporizing detection result of the oil, gas analysis, with-stand voltage, test of acid value, and to define a new technology of measurement.

1. 서 론

유입 변압기는 전력 수요의 증가에 따라 초고압화, 대용량화되고 있으며, 이러한 변압기에서의 사고는 설비의 보수비용과 수용가의 정전 및 수리 등 경제적 손실 등이 뒤따른다. 변압기 사고는 대부분 장기적 열화에 의한 절연 파괴로 진전되므로 절연열화되는 과정을 검출함으로써 열화 진전을 예측할 수 있다. 열화 검출은 과거에는 주로 사고가 난 이후 일정 시간을 두고 정비하는 시간기준정비(TBM)였지만 열화 검출기술의 발달, 신호 처리의 개발 등으로 최근에는 상태기준정비개념(CBM)으로 발전되고 있다.

따라서 최근 들어서 유입 변압기에 대한 다양한 센서 개발로 사고 예방에 많은 기여를 하고 있고, 선진 외국에서는 유입 변압기에 대한 다양한 센서를 이용한 On-line 진단 장비들이 개발되고 있다.

국내에서는 80년대 초부터 유입 변압기에 대한 절연유 열화 측정을 위하여 가스크로마토그래피(GC) 장비를 이용한 가스 분석을 주기적으로 실시하고 있다. 이는 절연유속에 녹아 있는 여러 가지 CH 계열 가스를 추출하고 산가, 내압시험 등을 병행하여 절연유 열화정도를 판정하고 있다. 국내에서는 대부분 이 방법에 의해 변압기에 열화 정도를 예측하고 있으며, 이 방법은 자동 측정이 아닌 수동 채취에 의한 분석 방법이기 때문에 변압기 열화 정도를 알기 위해서는 수일에서 수십일까지 소요되어 있어 변압기 내부에서 급속히 일어나는 부분 방전을 효과적으로 검출하지 못하고 있다. 일단 절연유를 채취할 경우 공기 중에 녹아있는 수분의 영향을 받게되며, 가스 분석 비용의 과다 등 문제점이 있다.

이러한 문제점을 해소하기 위해 실시간으로 변압기의 열화 정도를 예측하고 감시할 수 있는 장비들이 개발되고 있다. 그 대표적인 것이 절연유 누설전류 측정 장비인 "TOID" system 이다.

본 연구는 TOID 시스템의 구조와 원리 및 TOID 장비를 이용한 현장에서의 변압기 열화정도를 분석한 결과를 제시하였다.

2. 본 론

2.1 변압기 절연유 열화 진행과정

절연유는 변압기의 전기적 절연과 냉각작용에 중요한 역할을 담당하고 있다. 또한, 절연유는 사용 중 과열, 방전, 온도, 수분, 산소 등의 영향을 받아 열화하여 절연내력 및 냉각기능이 저하하게 되므로 변압기 사고의 원인이 되기도 한다. 현재는 절연유열화 방지 대책으로 보수 점검시 일정 기간을 경과한 변압기의 절연유를 채취하여 절연과파 전압시험, 산가, Gas시험등을 실시하여 그 결과에 따라 교체, 처리하고 있지만 그 주기가 불규칙하거나 1년에 1-2회 정도이다. 일반적으로 절연유가 열화하면 중(산화동)등에 의해 전산가를 증가시키고 열화로 인해 슬러지가 생성된다. 도전성 불순물(Sludge)은 절연유의 점도 및 비중을 증가시켜 열확산을 저해하여 부분과열을 일으키는 원인이 되므로 도전성물질을 검출하므로서 열화사전예지 가능하다. 도전성 불순물의 생성 과정을 보면 변압기 절연유가 열화(과열, 부분방전)되면 절연유 속에 많은 도전성 불순물 미소 입자가 성장되어 그 메카니즘은 다음과 같이 해석된다.

C2H6(에탄) : 파라핀계 탄화수소(절연유중 98% 함유)가 과열될 때 CH4(메탄), H2(수소) 가스발생 및 C(유리탄소)가 남는다.

C3H6(프로필렌) : 나프탄계 탄화수소가 과열될 때 C2H4(에틸렌), H2(수소)가스발생 및 C(유리탄소)가 잔존한다. 유리탄소(C)의 전기적 특성은 저항률 0.0019(Ω-CM)의 도전성을 띠고 있으며 기타 가스도 약간의 도전성을 가지고 있다.

일반적으로 절연유의 열화생성에 따른 사고진행 과정을 보면 그림 1과 같다.

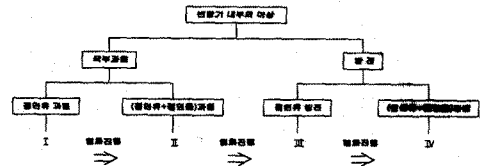


그림 1 절연유 열화 진행 과정

2.2 열화센서

2.2.1 절연유의 전기적 특성

변압기에 사용되는 절연유는 일반적으로 광유 1종 4호가 많이 사용된다. 광유는 경제적이며 양호한 전기적 강도와 열전달 특성을 가지고 있다. 또한 광유는 산화 방지제와 함께 용해가스, 불순물과 같이 많은 성분이 들어 있으며 정확한 조성비를 구성하지 않는다. 일반 변압기 철심이나 권선이 절연유속에 함침되면 불순물이나 가스, 수분등으로 오염된다. 이러한 오염물질은 여과, 건조등으로 유지하기 어렵다. 광유의 인화점은 140℃정도로 절연유속에서의 방전은 기기 본체내에서 폭발성 가스를 만들며 슬러지(Sludge)를 생성하게 된다. 슬러지의 크기는 보통 방전의 크기 즉, 열화의 정도에 따라 다르지만 대략 300(μm)정도이다. 이 슬러지의 검출을 이용한 열화센

서를 사용하면 절연유의 열화 특성을 분석할 수 있다.

2.2.2 열화 센서의 전계분포 계산

절연유 열화 센서의 주 재료는 기공 세라믹으로 구성되어 있다. 기공세라믹은 알루미늄, 실리카, 티타늄, 마그네시아 등 여러 가지 무기재료로 제조되나, Alumina (Al₂O₃)를 주로 사용한다. 이는 이 재질이 면심입방인 Corundum구조를 가지며, 특히 내화특성이 우수하기 때문이다. 제조방법으로는 통상의 알루미늄을 볼밀(boll-mill)하여 slurry상태의 colloid로 만들어서 시판되고 있는 폴리우레탄(polyurethane-약칭으로는 PUF)에 함침과정을 거쳐 건조 후 일반 알루미늄 제조공정에 따라 제조된다. 절연유 열화센서 자체가 침판형으로 제작되어 있어 절연유 열화센서 자체에 전압을 인가시키면 그림 2와 같은 형상으로 되며 절연유 열화센서(PCS: Porous Ceramic Sensor)는 Base Ring을 중심으로 양극판에 Mesh 전극이 접촉하게 되어 있다.

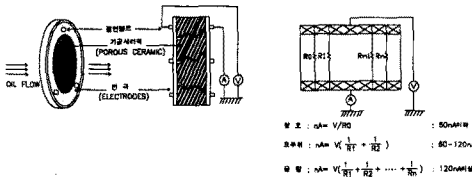


그림 2 절연유 열화 센서(PCS) 구성도 및 도선회로

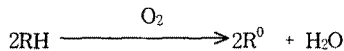
그림 2는 베이스링 자체 유전율 9.5, 절연유 유전율 2.2, 기공세라믹 유전율을 9.0으로 하여 센서에 DC 2kV를 인가한 경우이다. 센서의 크기를 나타내는 상면도를 보면 베이스링 길이는 3.3(mm), 절연유 통로 100(μm), 기공세라믹 150(μm)로 하였다. 베이스링 두께는 3.0(mm)로 계산한 것이다.

2.2.3 절연유 열화 센서와의 관계

절연유 열화센서는 Porous직경이 100-200(μm)의 공기 크기로 절연유가 열화되었을 때 발생하는 미립자가 150(μm)의 크기로 성장될 때 절연유가 열화센서를 흡수-통과되는 메카니즘은 다음과 같다.

가. Free Radical 성장

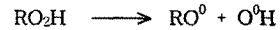
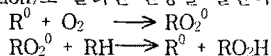
절연유 속에 포함된 RH가 수소와 접촉하면 자유기인 Free Radical R⁰가 발생되면서 수분자인 H₂O가 발생된다.



이것의 생성원인은 수소원자가 RH로 분리되어 산소인 O₂와 결합되어 발생되며 거의 기체화된 R₀ 성분은 절연유속을 부유하면서 다른 산소성분과 결합하려 한다. 그 크기는 초기상태에서 거의 5μm이하의 미소한 분자상태에서 절연유 열화센서(PCS)의 기공사이로 통과된다. 이때 측정되는 센서의 누설전류는 거의 10nA이하로 완전 절연체에 가깝다. 기공속에서 수분자가 존재하면 RH제열은 활발한 화학적 반응이 발생되어 절연유 열화센서에는 큰 누설전류가 발생된다.

나. Hydroperoxy Radical 생성 및 Propagation Reaction

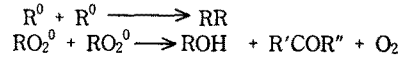
절연유의 열화가 더욱 진전된 경우에는 Free Radical인 R⁰가 산소와 접촉되면 ROH, RCHO, RCOOR', RCOOH등을 생성하는데 이 반응은 주로 자유산화(Auto-Oxidation)로 알려진 반응을 말한다.



이 과정에서는 절연유가 거의 열화되어 있지 않은 상태로 그 불순물 미립자의 크기가 50μm정도가 되어 절연유 열화센서의 기공속으로 통과된다. 이때 초기조건에서 충분한 절연상태를 유지하고 있는 한 절연유 열화센서의 누설전류 크기는 대략 50nA 이내로 측정된다.

다. Termination Reaction

절연유가 열화되어 마지막으로 포화되는 과정으로 절연유에 용해되는 열화생성물들이 생성되고, 절연유에 용해되지 않는 성분들 CO₂, CO, H₂등의 가스 성분과 탄소(Carbon)등의 슬러지(Sludge)가 생성되어 절연유 열화가 촉진된 상태에서 산가 및 내압 특성에 영향을 미친다. 그 원인은 이온화된 불순물이 증가되기 때문이다.



이 과정에서 절연유 열화로 인한 불순물 입자의 크기는 100μm이상으로 커짐을 알 수 있다. 이때 절연유 누설전류의 크기는 100nA이상으로 증가된다.

2.2.4 PCS의 동작 원리

PCS센서에 절연유가 통과하는 과정은 그림 2와 같다. 그림 2에서 기공사이로 통과하는 불순물 미립자는 온도 상승으로 인하여 발생하는 절연유 유동효과로 어느 과정의 압력을 받아 불순물 미립자를 밀어낸다. 즉, 기공 세라믹에 흡수된 절연유는 그 기공 크기에 맞추어 불순물 미립자가 유동되는 순간 불순물 미립자가 보호된다. 이때 전계가 인가되면 전기적인 직·병렬 회로가 형성된다.



그림 3 PCS 센서 및 TOID 현장설치 모습

초기상태에서의 절연유 열화센서의 저항은 매우 큰 저항 값을 갖는다. 절연유 열화가 계속되면 센서의 기공사이로 직·병렬회로가 구성되며, PCS센서를 통과하는 절연유가 심하게 열화되면 될수록 센서 저항은 매우 낮은 값이 되어 누설전류가 크게 된다. 그림 3은 PCS센서 및 TOID 설치 모습이다.

2.3 절연유 누설전류 검출 프로그램

2.3.1 초기 설정 메뉴

절연유 진단시스템을 운용하기 위해 설정하는 메뉴로서 진단대상 변압기입력, 채널설정, 통신포트설정, 타임

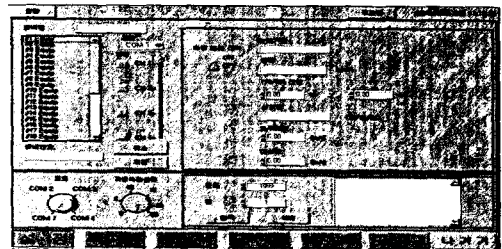


그림 4 설정 메뉴 화면

스케줄설정, 절연유교체시기설정, 자동수정선택설정 등의 항목을 설정한다.

2.3.2 측정메뉴

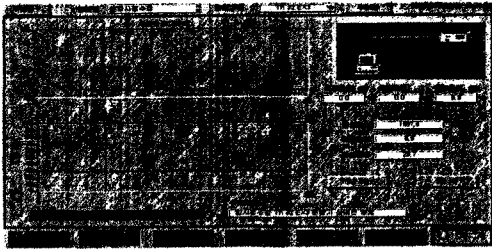


그림 5 측정메뉴 화면

측정모드는 수동측정 또는 자동측정으로 변압기를 24시간 Real Time으로 관리가 가능하도록 한 모드다. 또한 절연유 열화정도의 판정기준을 설정하여 자동으로 변압기 열화를 판정하도록 하였다.

2.3.3 분석 메뉴

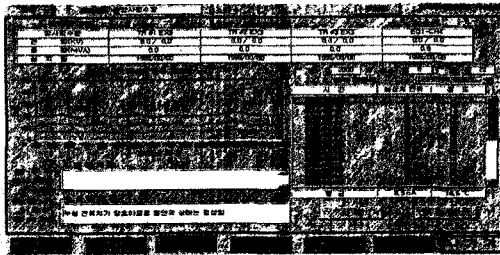


그림 6 분석메뉴 화면

분석모드는 변압기 열화를 Trend관리하는 모드로 변압기 절연유 누설전류값의 누적관리에 의한 변화를 나타낸다. 누적관리는 연보, 월보, 일보등으로 보고서를 받아볼 수 있다. 또한 변압기 내부에서 열화가 진행되어 절연유 누설전류가 증가하게 되면 경보발생, 열화원인을 자동적으로 표시한다. 누적관리에 의해서는 과거30년 Data를 호출하여 열화경향을 분석하며, 사고를 예측할 수 있는 프로그램으로 구성되어 있다. 이들의 프로그램에 의해 변압기 열화정도를 쉽게 파악 할 수 있으므로 변압기 사고 예방에 많은 도움을 줄 수 있다.

2.4 TOID에 의한 변압기 열화 추정

'99~'00년 TOID SYSTEM을 설치한 유입변압기 중 운영중인 변압기를 선정하여 절연유 열화를 분석하였다. 분석항목은

- TOID 누설전류 측정 분석
- 절연유 내압 및 산가 측정
- 주요 변압기에 대한 절연유 가스 분석 등이다.

2.4.1 누설전류와 절연유내전압 비교 그래프

누설전류크기와 내전압 시험을 비교하여 보면 아래 그래프와 같이 누설전류가 클수록 내전압이 낮게 나타남을 알 수 있다. 즉, 누설전류를 관리하면 변압기 절연유의 상태 예측이 가능함을 보여주고 있다. 절연유내압은 일반적으로 수분의 영향을 많이 받는 것으로 알려져 있다. 따라서 절연유 누설전류도 수분의 영향을 어느정도 받는 것으로 분석된다.

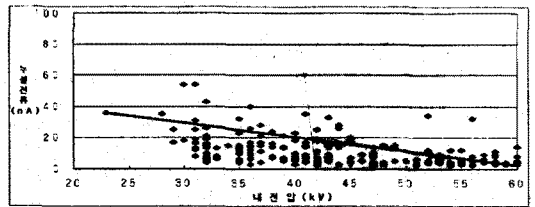


그림 7 누설전류와 절연유내전압 비교 그래프

2.4.2 누설전류와 산가(mmgKOH/g)의 비교 그래프

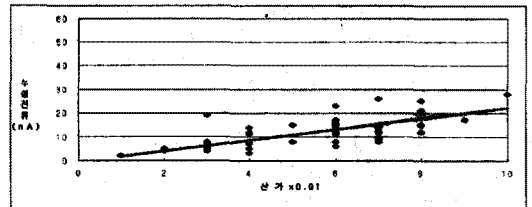


그림 8 누설전류와 산가 비교 그래프

절연유 누설전류가 증가됨에 따라 산가도 같이 비례적으로 증가됨을 알 수 있음.

2.4.3 절연유내압과 산가(mmgKOH/g)의 비교 그래프

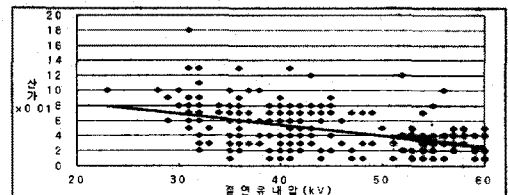


그림 9 절연유내압과 산가 비교 그래프

절연유 내전압이 낮을수록 산가가 높게 나타난다. 따라서 누설전류를 장기간 관리함에 따라 변압기의 절연열화가 자동으로 판정하여 절연유내전압 시험등을 할 필요가 없을 것으로 판단된다.

3. 결 론

본 연구는 TOID시스템에 의해 변압기 열화를 상시감시하고 측정할 수 있는 새로운 진단방법으로 컴퓨터에 의한 데이터관리 및 열화추이와 예측이 가능한 신기술에 대한 것이다. 지금까지 변압기에 대한 상시감시는 주로 가스분석등에 의한 온라인이 세계적인 추세였지만 가격이 비싸고 유지보수가 어려운 점 때문에 운영중인 변압기 적용이 극히 저조하였다. 그러나 TOID System은 비용이 저렴하고, 유지보수가 거의 필요 없으며, 원격에서 온라인으로 변압기 내부에서 일어나고 있는 여러 상황들을 그래프로 나타냄으로서 진단의 시각적대를 해소하게 되었다. 따라서 변압기 유지보수에 획기적인 방법으로 판단된다. 이러한 기술을 이용하여 향후에는 인터넷을 이용한 원격리에서 변압기 이상 및 열화정도를 진단 할 수 있는 기술개발이 예상된다.

(참 고 문 헌)

- [1] 과학기술처, "변압기절연유열화센서를 이용한진단기법 개발", pp9-pp25, 1995년
- [2] (주)피에스티테크, "절연유열화On-Line진단시스템", pp20-pp35, 1999
- [3] (주)피에스티테크, "변압기절연열화 측정결과보고서", pp4-pp15, 2000년 5월