

부분방전검출에 의한 몰드변압기 무정전진단기법 연구

이준, 최길수*, 이은석
한국전기안전공사 부설 전기안전시험연구원

A study on the live line diagnostic technique of cast resin transformer by the partial discharge detection

Jun Lee, Gil-Soo Choi, Eun-Suk Lee
Electrical Safety Laboratory Research Institute

Abstract - It is difficult to maintain cast resin transformer in the field. In this paper, we developed the diagnosis techniques to detect degrade of cast resin transformer using partial discharge, EMI and material analysis.

1. 서 론

고분자재료의 현저한 발전과 더불어 전기적, 기계적으로 우수한 에폭시 수지(Epoxy Resin)가 개발되어 몰드변압기(Molded Transformer)가 제조되었고, 기술향상에 따라 합침(Molding)기술 등 점차 고전압 대용량으로 실용화되고 있다. 그러나 사고예방을 위한 적합한 진단기법이 없어 현장에서 유지보수에 많은 어려움으로 사고예방을 위한 진단기법 개발이 절실한 실정이다.

본 연구는 이러한 문제점을 해결하고자 몰드변압기의 이상·열화 상태를 정전 및 활선상태에서 비교·분석하여 무정전 진단기법을 개발하고자 하였으며, 특히, 활선상태에서 부분방전을 검출하고, 재료분석, EMI 측정등을 통해 몰드변압기의 열화상태를 진단할 수 있는 기법 개발에 주목적을 두었다

2. 본 론

2.1 국내 몰드변압기 실태 조사

몰드변압기를 사용하는 수용가를 대상으로 실태조사를 실시하였다. 실태조사는 현장에서의 점검방법, 사고현황등을 주 내용으로 하였으며, 국내 몰드변압기를 사용하고 있는 전체 수용가 20,000여 호(추정치)의 약 1.6%인 330호를 표본으로 선정하여 직접방문조사 및 우편 조사를 실시하여 분석하였다.

2.1.1 몰드변압기 사용연수 분포

몰드변압기 사용연수는 그림 1에서와 같이 12년 미만인 경우가 전체의 96.2%를 점유하고 있어, 국내 몰드변압기 사용연수는 12년 미만임을 알 수 있다. 몰드변압기 수명이 약 30년 정도(일본 JEM 규격)로 볼 때 아직 사고사태가 많지 않음을 알 수 있다. 현재 몰드변압기 사고발생은 경년열화에 의한 것이라기 보다는 제작불량이나 부하급변, 환경 등 주위조건에 따른 원인이 더 많다고 볼 수 있다.

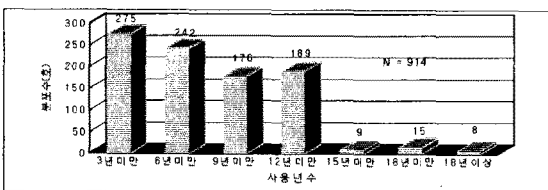


그림 1 몰드변압기 사용연수 분포도

2.1.2 몰드변압기 사고부위 분포

사고가 발생한 몰드변압기(40대 기준)에 대한 설문조사

를 보면 응답하지 않는 4대를 제외한 36대 변압기에서는 고압측 에폭시가 가장 많은 사고를 점유(45%)하고 있었다. 다음으로는 저압측에폭시, 고압측코일, 고압단자, 철심 등의 순서로 사고를 차지하고 있다.

이는 현장에서의 몰드변압기 유지·보수시 고압측 에폭시에 집중적인 관리가 필요함을 알 수 있다.

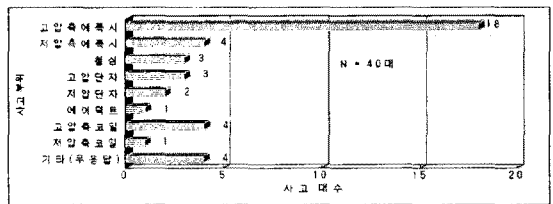


그림 2 몰드변압기 사고 부위 분포도

2.1.3 몰드변압기 사고 예방 대책

많은 수용가가 몰드변압기 사고예방을 위해서 육안점검만 실시하고 있었다. 이는 유입변압기와 달리 몰드변압기 구조가 노출되어 있으므로 육안점검이 용이하기 때문으로 분석되었다.

몰드변압기 사고예방을 위한 진단기법 개발은 현재의 육안점검 방법을 과학적으로 측정할 수 있는 활선진단 기법 개발이 필요하다고 볼 수 있다.

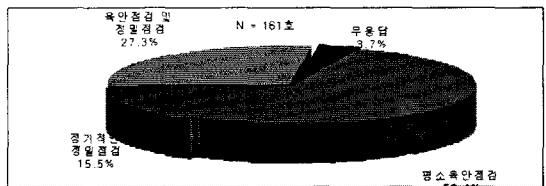


그림 3 몰드변압기 사고예방 점검 방법

2.2 몰드변압기 진단법

부분방전이 에폭시 수지 절연체 내부에서 발생한다면 부분방전 펄스는 진행파처럼 표면을 따라 전파되며 과도전류 $I_E(t)$ 는 다음과 같이 전압 $V_E(t)$ 를 발생시킨다.

$$V_E(t) = I_E(t) \times Z_W$$

여기서, Z_W 는 분포 유도성 및 용량성 매개변수에 의해 주어지는 에폭시 수지의 특성임피던스이다. 부분방전 펄스에 의해 발생하는 과도전압 $V_E(t)$ 와 과도전류 $I_E(t)$ 를 여러종류의 센서를 이용하여 검출 할 수 있다.

2.2.1 유도성 센서(Inductive field coupling)

그림 4와 같이 부분방전 전류 $I_E(t)$ 는 절연체의 특성임피던스 Z_W 로 인하여 말단의 각 위치에서 여러개의 부분적인 전류를 발생시키고, 이 부분적인 전류는 전자코일(L-센서)로 검출할 수 있는 자속 B(t)을 발생시킨다. 실제로 L-센서는 기기 외함의 접지선이나 에폭시 수지표면

가까이에서 부분방전 전류에 의해 발생된 자속을 검출할 수 있다. 또한 급속하게 증가하는 부분방전 전류는 표피 효과 때문에 상당한 전압을 발생시키므로 도체의 각 부위를 따라 발생된 전압강하를 측정하므로 부분방전을 측정할 수 있다.

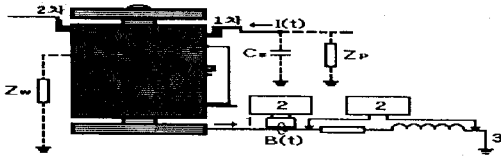


그림 4 유도성 결합에 의한 부분방전 측정도

2.2.2 용량성 센서(Capacitive field coupling)

부분방전 전류 $I(t)$ 는 몰드변압기의 내·외부 도체 사이에 과도전압 $V(t)$ 를 발생시킨다. 이 전압의 일부는 방사되고 표류용량으로 되어 그림 5와 같이 C-센서에 의해 그 크기를 검출할 수 있다

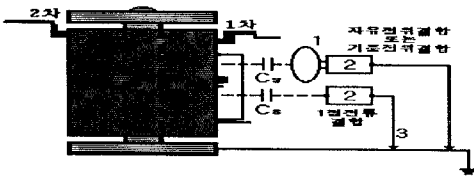


그림 5 용량성 결합에 의한 부분방전 검출도

2.2.3 활성부분방전 검출

몰드변압기 접지선에 흐르는 전류는 미소하므로 상호인덕턴스 기법을 이용한 로고스키 코일을 이용하고 있다. 그림 6은 로고스키 코일의 원리를 나타낸 것으로 접지선에 전류가 흐르면 도선 주위에 자속(Φ)이 생긴다. 이때 회로(loop)에 유기된 전압은 $e = \frac{d\Phi}{dt}$ 가 된다.

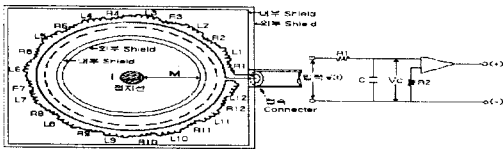


그림 6 로고스키 코일(Rogowski coil)의 구성도

원형으로 된 코일의 출력전압은 다음 식과 같다.

$$i = d \times H, \quad e_0 = \frac{d}{dt}(H \times d) = \frac{di}{dt}$$

$$e(t) = M \frac{di}{dt} = Ri + \frac{1}{C} \int i_1 dt,$$

$$i_1 = \frac{M}{R} \frac{di}{dt}$$

$$V_e(t) = \frac{1}{C} \int i_1 dt = \frac{M}{RC} \int \frac{di}{dt} dt = \frac{M}{RC} \int d \cdot i(t)$$

$$i(t) = \frac{RC}{M} V_e(t)$$

2.2.4 충전분 방전전류 검출

교류전류 검출방식은 크게 CT를 이용한 방법과 필터(Band Pass Filter)를 이용한 방법이 있다. CT를 이용한 방법은 교류전류 I 를 검출하며 교류전류 I 는 용량성분 I_c 와 저항분 I_r 이 포함된다. 이 I 성분 중 충전전류인 용량성 성분 I_c 전류를 검출하는 방법이다.

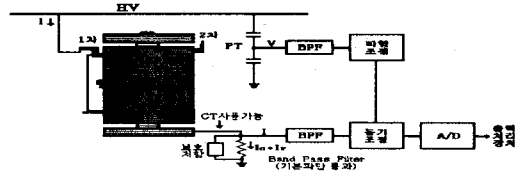


그림 7 RF센서를 이용한 충전분 전류 검출구성도

2.3 에폭시 수지에서의 부분방전 반응

그림 8은 보이드에 포함된 유전체의 정전용량 증가회로이며, (A)는 내부공동(void)이 있는 유전체, (B)는 정전용량의 증가회로, (C)는 (B)에 의한 생성전압 U_2 와 소멸전압 U_1 에 대한 보이드 정전용량 C_1 에서의 전압형태 $U_1(t)$ 를 나타낸다.

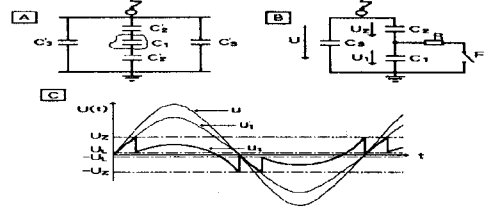


그림 8 유전체의 정전용량 증가회로 및 부분방전 펄스

그림 9는 에폭시 절연 시료내부에서 보이드 발생시 보이드의 정전용량과 회로저항을 고려한 회로 구성도다. 시료는 스위치 S에 의해서 단락회로가 될 수 있는 정전용량 C_1 과 방전위치와 직렬로 연결된 절연물의 정전용량 C_2 , 방전위치와 병렬로 연결된 절연물의 정전용량 C_3 로 구성된다.

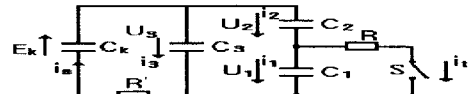


그림 9 전압과 전류를 인가하여 방전이 발생하는 시료의 등가회로

공동(void)에서 전압이 방전전류 i_t 의 결과로 감소할 때 전압 U_1 과 ΔU_3 는 다음과 같다 ($C_2 < C_1 \ll C_3$)

$$U_1 = U_3 \cdot \frac{C_2}{(C_1 + C_2)} = E_K \cdot \frac{C_2}{(C_1 + C_2)}$$

$$\Delta U_3 = U_3 \cdot \frac{C_2^2}{(C_2 + C_3) \cdot (C_1 + C_2)} \approx U_3 \cdot \frac{C_2^2}{(C_1 \cdot C_3)}$$

2.4 몰드변압기 부분방전 측정

몰드 변압기가 외부영향이 아닌 자연 열화되는 경우, 주요 요인은 부분방전 및 발열에 의한 것이 대부분이므로 변압기 절연재인 에폭시 수지에서 부분방전 및 화학적 변화에 의한 균열(Crack)이나, 이상발열을 일으키게 한다. 이들 균열 부위에서 국부방전(Partial Discharge)에 의한 방전펄스, 접지선 과도전류 등을 측정·분석하여 몰드 변압기 열화의 정도를 알아보고자 한다.

2.4.1 강제열화설비 구성

변압기 에폭시 절연재의 수명 단축은 열이 인가되었을 때 최대 온도와 인가시간에 좌우된다. 이러한 관계를 나타낸 것이 아레니우스(Arrhenius) 공식이다.

$$\text{Log}_{10} \text{Life}(h) = A + \frac{B}{T}$$

이 공식에 의해 변압기 수명을 기대수명 30년에서 수년

이하로 단축시킬 수 있다. 또한 변압기 권선발열을 상승시킬 수 있는 방법으로 반환부하법(Loading Back Method)을 이용한 실험설비를 구성하였다.

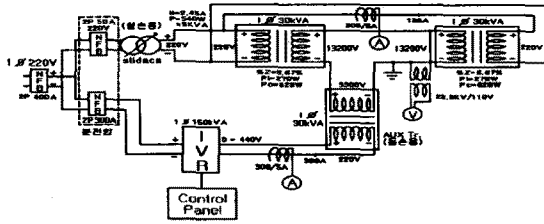


그림 10 반환부하법의 구성도

수명과 전압과의 관계 및 수명과 온도와의 관계식은 다음과 같다.

$$\frac{L}{L_0} = \left(\frac{V}{V_0}\right)^{-n}$$

$$\frac{L}{L_0} = 2 \exp\left(\frac{t-t_0}{\Delta t}\right)$$

2.4.2 실험설비에서의 부분방전 측정

몰드변압기 강제 열화시킨 결과 수명 만료 예정시간(약 40년)보다 10개월 정도 남긴 시점에서 비교 측정하였다.

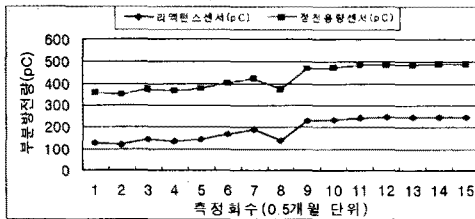


그림 11 활성 부분방전량 변화 추이표

그림 11은 몰드변압기 강제열화실험 후 15일 단위로 측정된 결과에 대한 분포도이다. 몰드변압기 외함에서의 L 센서에 의한 것보다 C-센서가 높은 부분방전량을 나타내고 있음을 알 수 있다.

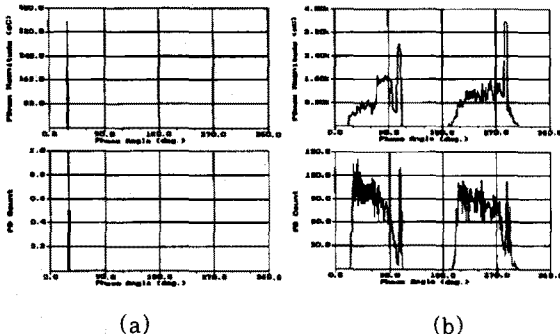


그림 12 몰드변압기 부분방전 펄스 크기

그림 12(a)는 강제열화실험 이전에 측정된 PD펄스이며 (b)는 열화된 후의 결함(충간단락된 부위)부위에서의 PD 펄스 모습이다. 방전량의 크기는 그림 12(a)에서는 346(pC), (b)에서는 1.2(nC)이 검출되었다.

2.4.3 열화부위에서의 전자파 분포

장기 강제열화 실험에서 열화점 부위에서의 전자파 분포도는 그림 13과 같다. 몰드변압기 표면에서 검출되는

전자파 분포대역은 300(Khz)대역임을 알 수 있으며, 10(MHz)이상에서는 검출되지 않았다.

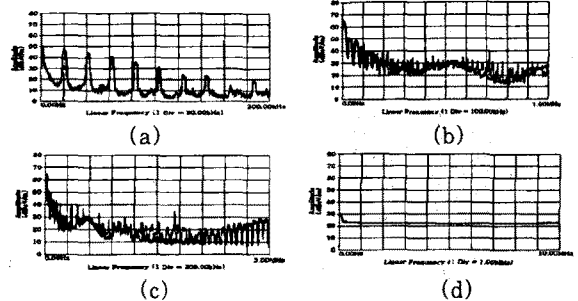


그림 13 에폭시 표면에서의 전자파 분포도

2.5 재료 분석

사고점 결함부위 재료에서의 SEM(주사전자현미경)에 의한 정성, 표면구조 분석은 그림 14와 같다. 그림에서 (a),(c)는 절연체인 에폭시 수지분석이며 (b),(d)는 도체 재료의 분석 결과이다.

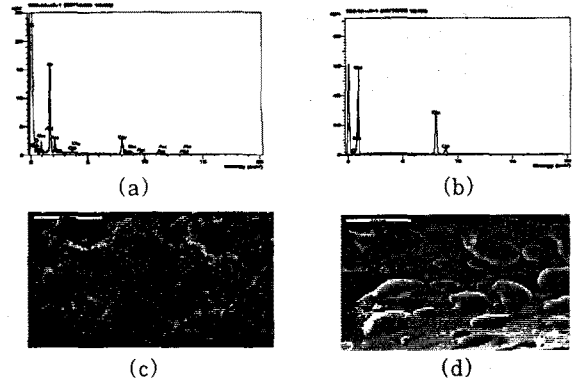


그림 14 에폭시 및 도체 재료 SEM 분석

에폭시 수지 절연재료에서는 열화 전과 후의 정성에 큰 변화가 있었지만 도체재료에서는 큰 변화가 없었다. 표면구조에서는 절연재료 및 도체재료 모두 조직의 팽창으로, 보이드가 발생됨을 알 수 있다.

3. 결 론

몰드변압기 진단기술은 아직 적합한 진단법과 측정법이 개발되어 있지 않기 때문에 육안 점검에 의존하여 사고예방을 하고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 몰드변압기에 대한 무정전상태에서의 진단법을 개발하여, 과학적인 방법에 의한 데이터 관리 및 열화원인 분석과 사고예방을 위한 진단기법 등을 개발하고자 하였다. 연구 결과 몰드변압기에서의 부분방전 측정은 정전상태 뿐만 아니라 활성상태에서도 효과적으로 검출이 가능하기 때문에 변압기에 상시 감시장치 등을 이용한 사고예방이 가능하리라 예상된다. 향후에는 현장에서의 노이즈 제거 기법, 열화판정기준 등 현장 적용이 가능하도록 연구 수행하고자 한다.

[참 고 문 헌]

- [1] 김박윤 역, "에폭시수지", 대광서림 pp14~pp236 1989
- [2] 전기학회기술보고, "절연시스템 복합요인열화에 관한 연구의 현황", 일본전기학회, pp50~pp59, 1983
- [3] Manfred Beyer, "Electrical and dielectric behaviour of cast epoxy resins", Hannover University, pp1~29, pp55~pp89, 1991