

現場 適用化를 위한 몰드변압기의 診斷技法 研究

정영일, 이은석*, 김덕근
한국전기안전공사 부설 전기안전시험연구원

A study on the diagnostic technique of cast resin transformer for on-site application

Young-Il Jung, Eun-Suk Lee, Duck-keun Kim.
Electrical Safety Laboratory Research Institute

Abstract - In this paper, we studied the diagnostic technique to analyze the deterioration of cast resin transformer using partial discharge detection for on-site application.

1. 서 론

전력설비를 구성하는 수·변전설비의 사고예방을 위한 진단이 점차 정전상태에서 무정전 상태로 증가하는 추세이며 고분자재료의 현저한 발전으로 전기적, 기계적으로 우수한 에폭시 수지(Epoxy Resin)가 개발되어 몰드변압기(Molded Transformer)가 제조되었고, 기술향상에 따라 합침(Molding)기술 등이 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 검출하여 몰드변압기의 열화상태를 진단할 수 있는 기법 개발 및 이상열화 상태를 판정하는 기준치를 정립하는데 주 목적을 두었다

2. 본 론

2.1 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.

2.1.1 유도성 센서(Inductive field coupling)

그림 1과 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 표피효과 때문에 상당한 전압을 발생시키므로 도체의 각 부위를 따라 발생된 전압강하를 측정하므로 부분방전을 측정할 수 있다.

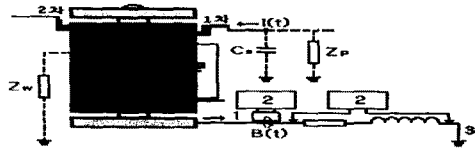


그림 1 유도성 결합에 의한 부분방전 측정도

2.1.2 용량성 센서(Capacitive field coupling)

부분방전 전류 $I(t)$ 는 몰드변압기의 내·외부 도체사이 에 과도전압 $V(t)$ 를 발생시킨다. 이 전압의 일부는 방사되고 표유용량으로 되어 그림 2와 같이 C-센서에 의해 그 크기를 검출할 수 있다

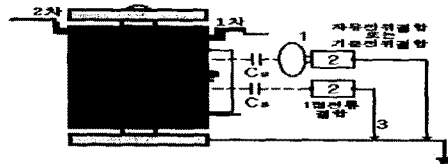


그림 2 용량성 결합에 의한 부분방전 검출도

2.1.3 활선부분방전 검출

몰드변압기 접지선에 흐르는 전류는 미소하므로 상호인덕턴스 기법을 이용한 로고스키 코일을 이용하고 있다. 그림 3은 로고스키 코일의 원리를 나타낸 것으로 접지선에 전류가 흐르면 도선 주위에 자속(Φ)이 생긴다. 이때 회로(loop)에 유기된 전압은 $e_l = \frac{d\Phi}{dt}$ 가 된다.

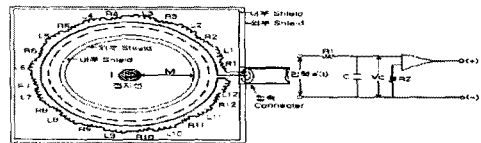


그림 3 로고스키 코일(Rogowski coil)의 구성도

원형으로 된 코일의 출력전압은 다음 식과 같다.

$$e(t) = M \frac{di}{dt} = Ri_1 + \frac{1}{C} \int i_1 dt,$$

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

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

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

2.1.4 충전분 방전전류 검출

교류전류 검출방식은 크게 CT를 이용한 방법과 필터(Band Pass Filter)를 이용한 방법이 있다. CT를 이용한 방법은 교류전류 I를 검출하며 교류전류 I는 용량성분 I_c와 저항분 I_r이 포함된다. 이 I 성분중 충전전류인 용량성 성분 I_c전류를 검출하는 방법이다.

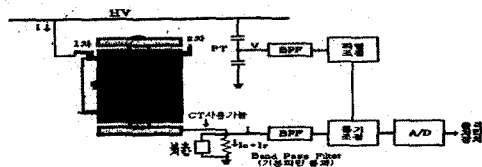


그림 4 RF센서를 이용한 충전분 전류 검출구성도

2.2 몰드변압기 열화실험

몰드 변압기가 외부영향이 아닌 자연 열화되는 경우, 주요 요인은 부분방전 및 발열에 의한 것이 대부분이므로 변압기에 전류를 인가하여 온도상승 시험을 실시하므로써 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.

2.2.1 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.

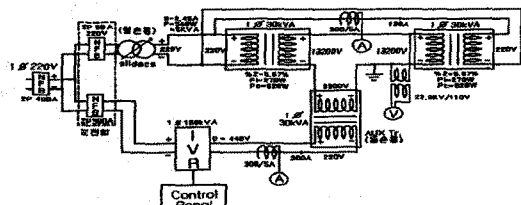


그림 5 반환부하법의 구성도

수명과 전압과의 관계 및 수명과 온도와의 관계식은 다음과 같다.

$$\frac{L}{L_0} = \left(\frac{V}{V_0}\right)^{-n} \quad \frac{L}{L_0} = 2 \exp\left(\frac{t-t_0}{\Delta t}\right)$$

2.2.2 실험설비에서의 부분방전 측정

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

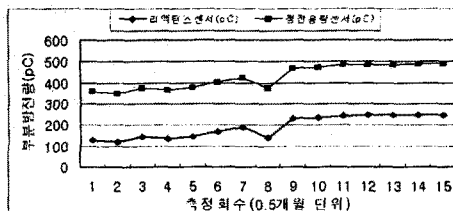
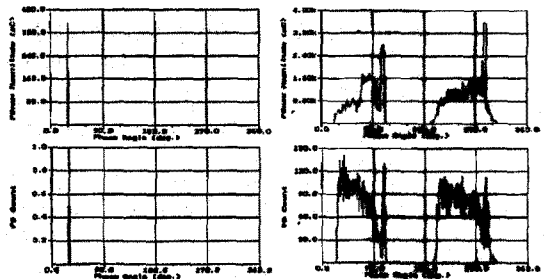


그림 6 활선 부분방전량 변화 추이표

그림 6은 몰드변압기 강제열화실험 후 15일 단위로 측정된 결과에 대한 분포도이다. 몰드변압기 외함에서의 L센서에 의한 것보다 C-센서가 높은 부분방전량을 나타내고 있음을 알 수 있다.



(a) (b)
그림 7 몰드변압기 부분방전 펄스 크기

그림 7(a)는 강제열화실험 이전에 측정된 PD펄스이며 (b)는 열화된 후의 결합(충간단락된 부위)부위에서의 PD펄스 모습이다. 방전량의 크기는 그림 7(a)에서는 346(pC), (b)에서는 1200(pC)이 검출되었다.

2.3 몰드변압기 현장실측

현장에서 운전중인 변압기를 대상으로 무정전 상태에서 에폭시 표면 및 접지선에서 활선 차동부분방전, 활선 부분방전 스펙트럼, 활선RF측정 등을 동시에 측정하였다. 현장에 설치되어 있는 몰드변압기 측정수용가는 모두 18호의 109대의 변압기를 대상으로 측정을 실시하였다.

2.3.1 활선차동부분방전 측정

현장에서 운전중인 몰드변압기 측정을 위해서 서울 경인지역 18개소를 방문하여 실측한 결과 몰드변압기 설치 조건, 접지계통 (다중접지, 비접지 등), 주위소음, 부하변화 등에 따라 측정값이 변화됨을 알 수 있었다. 또한 에폭시 수지 표면으로부터 센서 이격 거리에 따라 부분방전량(pC)의 감쇄 정도가 심하게 변화하였고 부분방전량의 크기는 변압기 용량에 비례적이지 않았다.

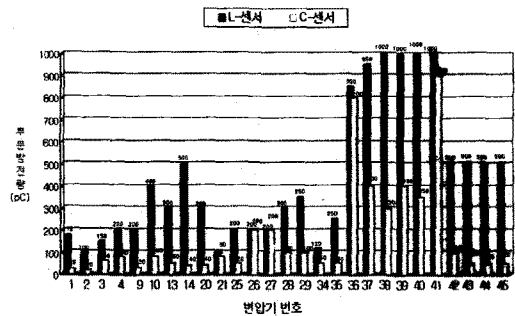


그림 8 활선차동부분방전 측정 분포도

그림 8은 L-센서에 의한 접지선에서의 방전량과 C-센서에 의한 외함에서의 방전량은 반드시 비례적으로 나타나지는 않음을 알 수 있다.

즉 몰드변압기 외함 접지선에서의 방전량이 많이 검출된다고 할지라도 에폭시 표면에서의 방전량은 반드시 이와 비례적으로 검출되지는 않았다.

때문에 몰드변압기 모의 실험에서는 열화에 비례하여 방전량이 증가되어 열화의 정도를 예측할 수 있었지만 현장 실측에서는 방전량에 따른 수명예측에는 많은 어려움이 예상됨을 알 수 있다. 그 중 가장 큰 것은 외함접지선에서의 부분방전 검출시 몰드변압기 자체 및 모선 구성에서

의 순환전류, 고조파 전류 등에 의한 노이즈 성분이 함유된 방전전류가 검출되어 정확한 부분방전 유무를 결정하기가 쉽지 않다. 보다 정확한 방전발생 여부를 예측하기 위해서 L, C-센서에 의한 방전량 비교를 실시하였다.

2.3.2 활성부분방전스펙트럼 측정

현장에서 운전중인 몰드변압기를 대상으로 변압기 외함 접지선에서 활성 부분방전스펙트럼(MS/SPAC)에 대한 측정을 실시하였다.

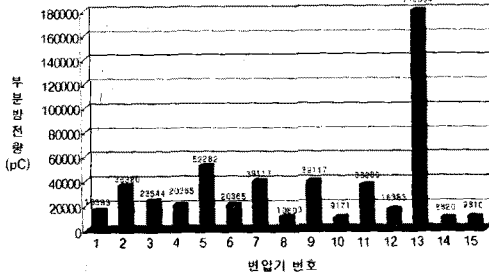


그림 9 활성부분방전스펙트럼 측정 분포도

현장에서 검출된 방전량에는 주위 노이즈 성분이 많이 포함되어 있다. 그러나 #13 변압기의 경우에는 다른 변압기에 비해 10배 이상의 방전량이 검출되고 있다. 이 변압기의 내부에서는 열화가 진행되고 있음을 추정할 수 있다.

2.3.3 활성RF 측정

현장에서 운전중인 몰드변압기를 실측한 결과 대부분의 전기실에서 여러 종류의 잡음이 나타났으며 그 양의 차이도 많았다. 따라서 노이즈 제거를 위해서 측정시 교정(Calibration)과 외부 노이즈를 측정하여 실측한 결과에서 외부노이즈를 제거한 숫자로 비교분석 하였으며 다른 측정방법과 병행 실시하여 비교 진단하였다.

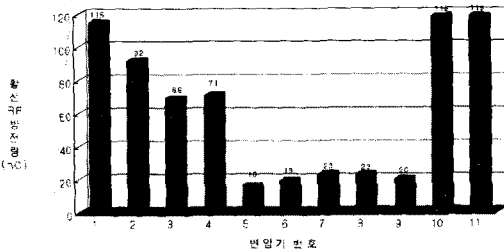


그림 10 활성RF 측정 분포도

22.9kV 몰드변압기에 대한 활성 RF 측정 결과 모의실험과 비교하여 보면 대부분 많이 검출되었다. 모의 실험에서는 열화의 정도가 요주의 수준으로 판단되는 RF 방전량이 80(nC) 이상이었다. 그림10에서 보면 80(nC) 이상되는 몰드변압기는 #1, #2, #10, #11, 모두 4대다. 실험에서의 기준치 이상을 보면 몰드변압기 열화 80% 이상(잔여 수명 20%)으로 추정되는 값이 80(nC)이므로 이들 변압기에서도 실험실에서의 같이 적용하면 변압기 내부에서 상당한 열화가 진행중으로 볼 수 있다.

2.3.3 현장 측정 결과 고찰

몰드변압기는 직접 접촉하기 곤란하여 일정간격을 이격하여 안전성을 확보하였으며 크게 3가지 방향으로 현장실측을 실시하였다.

첫째는 예폭시 수지 표면에서의 부분방전 발생정도를 측정하여 균열(Crack) 등이 예상되는 지점에서의 방전량(pC) 크기를 각 상별로 비교한 방법이다. 이 방법은 정전용량 센서를 이용하였다.

두 번째는 외함 접지선에서 방전전류를 검출하여 부분방전량(pC)으로 열화정도를 분석하는 방법이다. 이 방법에서는 리액턴스 센서와 로고스키 코일, RF CT를 이용하여 방전전류를 비교 분석하였다.

세 번째는 각각의 센서를 설치하기 전 교정에 의한 표준값을 확인하고 주위 노이즈에 대한 크기를 측정후 측정을 실시하였다.

따라서, 몰드변압기의 열화를 예측하기 위해서는 활성차동부분방전, 활성 RF, 활성부분방전스펙트럼 측정을 동시에 실시하여 측정 결과를 종합판정하는 것이 바람직하였다. 본 실측을 통하여 다음과 같은 판정 기준치를 설정하였다.

표 1 몰드변압기 활성 측정 기준치

측정 항목 판정 구분	활성 부분방전 스펙트럼 측정 (pC) (50pps기준)	활성 차동부분방전 측정 (pC)		활성 RF 측정 (nC)
		L-센서	C-센서	
이 상	10000pC이상	1000pC이상	1000pC이상	100nC이상
요 주의	10000pC미만 8000pC이상	1000pC미만 800pC이상	1000pC미만 800pC이상	100nC미만 80nC이상
정 상	8000pC미만	800pC미만	800pC미만	80nC미만

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 사고 예방을 위한 진단기법 등을 개발하고자 하였다.

연구 결과 몰드변압기에서의 무정전 측정은 효과적으로 검출이 가능하였으며 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 몰드변압기의 활성상태에서 진단은 활성차동부분방전, 활성 RF, 활성부분방전스펙트럼 측정을 적용하였다. 이러한 진단법을 모의실험을 통해 현장에서 노이즈 제거 기법 및 현장에서의 적용방법 등을 개발하고자 하였다
- 2) 몰드변압기를 반란부하법에 의해서 강제 단기열화시키면서 그 열화 과정에서 나타나는 제 특성 등을 정전상태 및 활성 상태에서 측정하여 비교·분석하였다.
- 3) 모의실험 결과의 데이터를 현장에 적용함으로써, 현장에서 무정전 진단법의 적용이 가능하게 하였다.
- 4) 현장에서 운전중인 몰드변압기의 활성 방전량 기준치를 선정하였다.

향후 측정기준치는 많은 현장실측을 통하여 수정·보완되어 지리라고 판단된다.

(참 고 문 헌)

- [1] 전기학회기술보고, "절연시스템 복합요인열화에 관한 연구의 현황", 일본전기학회, pp50~pp59, 1983
- [2] 전기안전시험연구원, "부분방전 검출에 의한 몰드변압기 무정전 진단기법", 한국전기안전공사, pp85~pp327, 1999
- [3] Manfred Beyer, "Electrical And Dielectric Behaviour of Cast Epoxy Resins" schering nstitute for High Voltage Engineering and High voltage Equipment Hannover University, PP1~119 1991
- [4] T. Tanaha, T.Okamoto, "An advanced partial discharge measurement method sensitive to the shape of a void", CIRGE 1988, Paper 15-02, S.1-7
- [5] 이옥배 저 "변전설비 진단법", 한국전력 중앙교육원, pp287~pp319, 1998
- [6] ANSI/IEEE C57.96 "Guide for loading dry-type distribution and power transformer, pp10~19, 1989