

활선상태에서 몰드변압기의 절연결함 측정기법 연구

최명일, 임용배, 이상익, 김동우, 문현욱
한국전기안전공사 부설 전기안전연구원

Measurement and Analysis of Insulation Defects of Cast-resin Transformer on live wire state

Myeong-Il Choi, Young-Bae Lim, Saing-Ik Lee, Dong-Woo Kim, Hyun-uk Moon
Electrical Safety Research Institute affiliated with a KESCO

Abstract - 몰드변압기는 유입변압기와 달리 구조적으로 복잡하고 밀폐된 구조로 되어 있어서 사용기간 동안 고신뢰성을 확보하기 위해서 예방진단기술이 필요하다. 그러나 공장이나 빌딩 현장에서 몰드변압기의 열화상태 관리하는 방법은 온도관리, 소음진동관리 등의 수준으로 활선상태에서 사고를 예측하기에는 많은 한계가 있다. 이러한 문제점을 해결하고자 본 논문에서는 몰드변압기의 부분방전 측정을 중심으로 활선상태에서 열화 진단기술이 중요하다. 특히, 몰드변압기의 절연열화 진단을 위해서 상호보완적인 측정방법이 필요하고, 몰드변압기의 절연상태의 유무를 판정할 수 있는 분석방법을 개발하고자 하였다.

1. 서 론

국내 전기설비에서 전력용 변압기는 중전기에서 매우 중요한 비중을 차지하고 있으며, 몰드변압기는 국내에는 1980년대초기 상용화한 이후 최근까지 유입변압기를 대체하여 급속하게 현장에 설치되고 있는 추세이다. 이러한 몰드변압기는 국내 22.9kV 이하 자가용 수전설비의 200,000개소 이상에서 사용하고 있는 것으로 추정된다. 몰드변압기의 교체주기는 일본전기공업협회(JEMA)에서 평균 수명을 15~20년으로 발표하였다. 따라서 1980년대 중반이후에 현장에 설치된 몰드변압기의 교체주기가 거의 도래하였음을 유추할 수 있으며, 몰드변압기 점검주기 및 안전관리의 중요성이 부각되어 몰드변압기에서 발생하는 사고 징후의 이상신호를 초기에 찾아내는 예방진단이 더욱 중요하게 되었다.

몰드변압기는 유입변압기 대비 유지보수를 위해 적용하고 있는 방법이 육안점검 및 열화상 카메라를 이용한 온도관리, 소음관리 등 극히 제한적인 항목으로 관리되고 있으며, 정밀진단으로는 몰드변압의 부분방전 시험으로 열화여부를 판정하고 있다. 특히 활선상태에서 부분방전 시험에 의한 몰드변압기의 안전진단시 외부 잡음신호가 대량 유입시 판정에 많은 문제점이 도출되고 있다. 몰드변압기의 설치 확대에 따라 사고예방 및 안전관리를 위한 활선상태 진단기술의 필요성이 현장을 위주로 제기되고 있다. 국내·외의 관련분야 연구동향은 실험실의 절연결함 조건에서 몰드변압기 열화상태를 측정하고 분석기법을 제시하는 수준으로, 현장에서 이를 활용하기에는 많은 어려움이 있다. 따라서 몰드변압기의 절연열화 진단을 위해서 상호보완적인 측정방법이 필요하고, 몰드변압기의 절연상태의 유무를 판정할 수 있는 분석방법을 개발하는 것이 매우 중요하다.

2. 몰드변압기의 부분방전 검출방법

부분방전은 도체사이의 절연시스템에서 발생하는 국부적인 전기적 방전현상으로 절연체 내부 및 외부 결함에서 고전계의 형성에 의해 발생되는 지속시간이 매우 짧은 절연파괴 과정이다. 절연체 내부에 보이드나 이물질 등과 같은 결함에 의하여 전계가 집중되고 전기트리가 성장하여 결국에는 절연파괴를 초래하게 된다. 이러한 부분방전은 전계집중 발생 부위에 따라 코로나 방전, 연면 방전, 그리고 내부 방전으로 분류할 수 있다. 부분방전이 발생하면 전기적 펄스 전류, 전자기파(EMP), 음향, 화학적 반응 등으로 초기 징후가 나타나며 다양한 이상신호를 검출함으로써 전력설비의 열화정도를 확인할 수 있다. 또한 부분방전 신호는 방전 펄스의 발생 빈도수, 방전의 크기 등을 분석하여 열화의 정도를 분석할 수 있으므로 몰드변압기와 같은 고체 절연체로 이루어진 전력설비의 사고 예측 기술로 현장에서 유용하게 사용되고 있다.

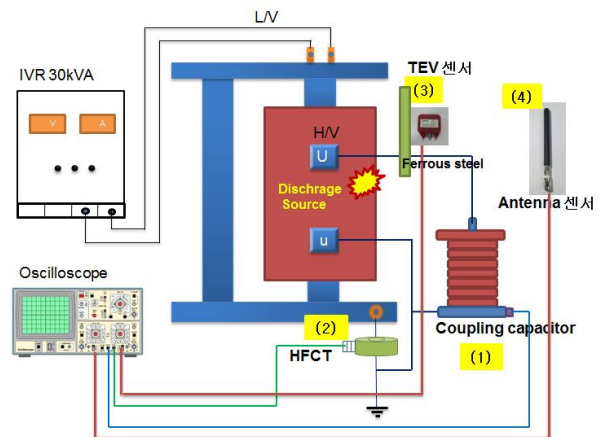
일반적으로 몰드변압기에서 부분방전을 검출하는 방법은 고체 절연체인 에폭시의 절연 특성 때문에 GIS나 전력케이블, 유입변압기 등 다른 중전기와는 다른 검출방법과 접근이 필요하다. 부분방전의 시험방법은 국제표준인 IEC 60270에 규정되어 있으며 전기적인 검출방법으로 커플링 커패시터 센서를 이용하여 부분방전을 시험하도록 명시되어 있다. 이 표준에서는 측정 주파수 대역이 광대역에서는 상한 주파수를 500kHz 이하로 권장하고 있으며, 협대역에서는 상한 주파수를 1MHz로

권장하고 있다. 이러한 주파수로 검출하는 것은 현장에서 노이즈 등의 부잡음 유입이 크기 때문에 현장 조건과는 부합되지 않는다. 최근에는 음향 및 전자기파와 같은 비전기적인 방법으로 부분방전을 측정할 수 있는 표준인 IEC 62478의 제정을 검토하고 있다. IEC 62478에서는 IEC 60270과는 달리 부분방전 시험을 음향 및 전자기파를 이용한 방법으로 측정 주파수 대역을 HF/VHF대역(3 - 300MHz)과 UHF대역(300MHz - 3GHz)의 대역으로 구분하여 제시하고 있다. 따라서 몰드변압기에서 부분방전 측정시 IEC 62478의 시험방법에 준하여 주파수 대역을 선정하고 이에 맞는 검출 센서를 이용하면 정확한 부분방전을 측정할 수 있다.

현장에서 전력설비의 부분방전을 검출하는 방법으로 다양한 측정센서가 적용되고 있다. 본 연구에서는 몰드변압기의 절연결함을 측정하는 새로운 측정방법을 제시하기 위하여 결합 커패시터, HFCT, 헬리컬 안테나 4가지 센서를 적용하여 결합신호를 측정하고 신호를 분석하였다.

3. 몰드변압기의 부분방전 실험장치 구성

몰드변압기 사고의 원인은 대부분이 에폭시 수지 내부의 보이드와 이물질에 의한 절연열화 사고, 에폭시 크랙에 의한 연면방전에 의한 절연파괴 사고, 그리고 고압측 권선의 상간, 층간 단락에 의한 사고로 알려져 있다. 본 연구에서는 몰드변압기 절연결함에서 발생하는 신호의 측정 결과에 대한 신뢰도를 높이기 위하여 단상 30kVA 몰드변압기로 코로나 결합과 에폭시 보이드 결함을 인위적으로 발생시켜 제작하였다. 몰드변압기 절연열화를 측정하기 위한 실험방법은 IEC 60076-11의 건식변압기 부분방전 시험방법을 참조하였다. 몰드변압기의 2차측 권선에 정격전압을 인가하고 1차측에 고압이 유도되는 시험을 적용하여 고압측의 절연열화를 측정하였다. [그림 1]은 몰드변압기 부분방전 시험에 대한 측정 시스템 구성도이다. 정상조건과 결합 조건으로 사용된 몰드변압기의 용량은 단상 30kVA(22.9kV/220V)이며, 몰드변압기의 입력 전압원으로 단상 30kVA(입력 : 220V, 출력 : 0 - 300V) 유도전압 조정기(슬라이더스)에서 몰드변압기 2차측에 전압을 주입하게 되면 몰드변압기의 1차 고압측에 22.9kV가 유기되어 결합부위에서 부분방전이 발생하게 된다. 이때 결합에서 발생하는 신호의 검출부는 변압기 1차측에 접속된 커플링 커패시터(1)와 외함 접지측에 설치한 HFCT(2), 상단부 코어측 명판에 설치한 TEV 센서(3), 그리고 고압측 에폭시 수지와 적절한 이격거리에서 헬리컬 안테나(4)를 이용하여 측정하였다. 4개의 센서에 측정된 신호는 최종적으로 디지털 오실로스코프(1GHz, 10GS/s)에서 신호를 측정하고 저장하였다.

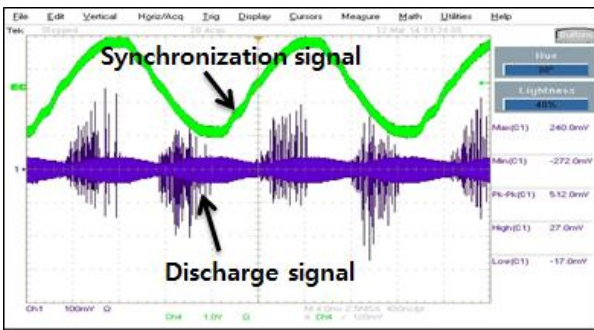


〈그림 1〉 몰드변압기 절연열화 측정 시스템 구성도

4. 안테나 센서를 이용한 부분방전 측정 결과

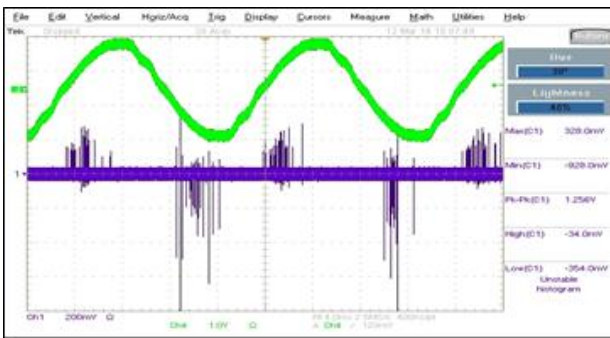
물드변압기의 예폭시 절연결합 시료에 2차측 권선에 전압을 인가하면 1차측에 고압이 유기되어 예폭시 절연결합에서 부분방전 신호가 발생하게 된다. 물드변압기 1차측(고압측)에서 유기된 22.9kV에서 발생한 결합신호는 결합 커패시터 등 4개의 측정 센서를 통해 방전신호를 취득하였다. 이때 측정데이터는 오실로스코프의 Envelope 모드와 Peak 모드에서 각각 구분하여 2가지 조건으로 측정하였다. Envelope 모드에서는 데이터의 취득 시간을 4ms/div로 설정하여 전체 40ms(2.4 주기)로 샘플링 시간을 설정하고 20회 반복된 누적주기를 10만개의 샘플링 데이터를 저장하였다. Peak 모드에서는 샘플링 시간을 10ms/div로 설정하고 전체 100ms(6 주기)에서 10개의 샘플링 데이터를 저장하였다. 그리고 방전 파형의 PRPDA(Phase Resolved Partial Discharge Analysis) 패턴을 분석하기 위하여 220V/4V의 소형변압기를 이용한 60Hz 동기 전원을 측정 채널에 추가하여 동시에 측정하였다.

아래 그림은 물드변압기 예폭시 절연결합에서 발생하는 신호를 오실로스코프 Envelope 모드에서 HFCT와 안테나 센서를 통해 측정된 방전 파형이다. 절연결합은 예폭시 내의 이물질에 의해 발생한 부분방전이 방전개시전압과 방전소멸전압에서 결합부근의 전하가 방전지속시간 동안 충전과 방전을 반복하여 16.67ms(1 주기)마다 동일한 방전 패턴이 형성되는 것을 확인할 수 있다. 특히 본 연구에서 제시하고 있는 물드변압기의 새로운 측정방법인 헬리컬 안테나를 통해서도 다른 3개의 센서와 동일하게 물드변압기의 절연열화 신호를 측정할 수 있다는 것을 Envelope 측정모드에서 검증하였다. [그림 2]는 HFCT를 이용하여 Envelope 모드에서 40ms동안 20주기를 측정된 파형이다. 시험결과 2.4 주기내에서 방전 펄스의 정극성 최대 진폭은 240mV이고, 부극성 최대 진폭은 -270mV이다.



〈그림 2〉 HFCT의 절연결합 신호 측정파형(Envelope 모드)

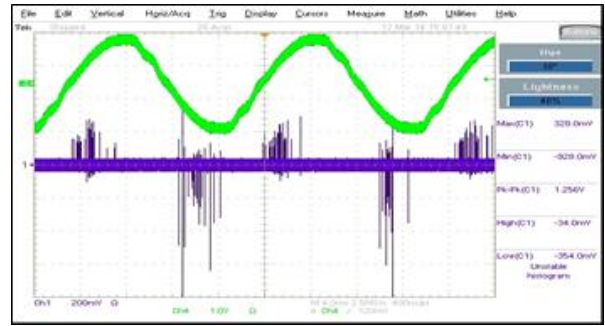
[그림 3]은 헬리컬 안테나를 이용하여 Envelope 모드에서 40ms동안 20 주기를 누적하여 측정된 파형이다. 시험결과 2.4 주기내에서 방전 펄스의 정극성 최대 진폭은 328mV이고, 부극성 최대 진폭은 -928mV이다.



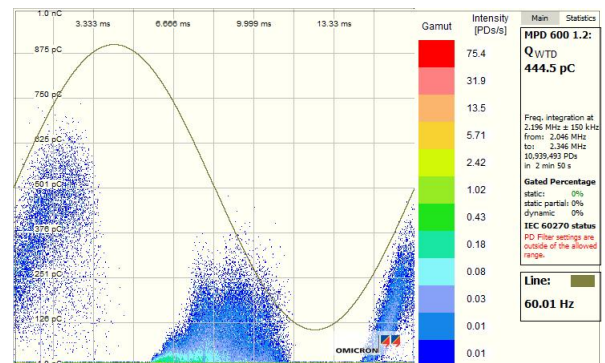
〈그림 3〉 헬리컬 안테나의 절연결합 신호 측정파형(Envelope 모드)

[그림 4]는 오실로스코프에서 측정된 절연결합의 신호와 측정 센서에 대한 신뢰성을 검증하기 위하여 전기설비 진단분야에서 많이 활용하고 있는 부분방전 측정장치에서 동일한 센서인 안테나 센서를 통한 신호 측정결과를 비교한 것이다. [그림 4(a)]는 오실로스코프에서 40ms(2.4 주기)에서의 20주기 누적한 방전신호 패턴이고, [그림 4(b)]은 부분방전 측정장치에서 16.67ms(1 주기)에서 측정된 방전 패턴이다. 본 연구에서 새로운 측정방법으로 제시하고 있는 헬리컬 안테나 센서로 측정시 16.67ms(1 주기)를 기준으로 1/4 주기와 3/4 주기에서 방전이 반복되는

PRPDA(Phase Resolved Partial Discharge Analysis)로 부분방전 패턴을 확인하였다.



(a) 오실로스코프에서 20주기 측정된 헬리컬 안테나의 방전신호 패턴



(b) 부분방전 측정장치에서 측정된 헬리컬 안테나의 방전신호 패턴

〈그림 4〉 헬리컬 안테나의 방전신호 패턴 비교

4. 결 론

국내에서 물드변압기는 1981년 최초로 상용화한 이후 최근까지 설치가 확대되고 되어 전체 변압기의 10% 이상을 점유하고 있다. 그러나 물드변압기는 유입변압기와 달리 고체 절연체인 예폭시 수지의 밀폐 구조로 되어 있어서 열화 상태를 점검하고 사고를 예측하기에 많은 한계가 있다. 본 연구에서는 22.9kV 이하 물드변압기의 절연열화시 발생하는 부분방전을 안테나 센서를 이용한 새로운 측정방법을 제안하였다. 오실로스코프에서 측정된 부분방전 신호를 검증하기 위하여 부분방전 측정장치를 이용하여 동일한 방법으로 HFCT와 안테나 센서에서 부분방전 신호 측정하고 PRPDA 패턴비교를 통해 안테나 센서의 측정 신뢰성을 검증하였다. 물드변압기의 절연결합 측정을 위한 새로운 측정 방법으로 기존의 측정방법과 상호 보완한 측정방법으로 물드변압기의 열화상태의 유무를 확인하고 물드변압기 안전검사에 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

[참 고 문 헌]

- [1] 최명일, 김재철, "SWT(Stationary Wavelet Transform)을 이용한 물드변압기 방전 측정신호의 디노이징 특성 연구", 조명전기설비학회 논문지, Vol. 28, No. 3, 2014
- [2] 유혜림, 조현숙, 이형, 이인정, "SWT(Stationary Wavelet Transform)을 이용한 영상 잡음 제거", KITA 춘계 학술대회, pp.9-27, 2007.
- [3] 김희훈, 강승호, 박재현, 하현호, 임진수, 이동훈, "정상 웨이블릿변환을 이용한 로버스트 영상 융합", 응용통계연구, Vol.24, No.6, pp.1181-1196, 2011.
- [4] 이수경, "Denosing Electrocardiogram Signal using Stationary Wavelet Transform", 경북대학교 대학원 석사학위 논문, 2008. 12.
- [5] 박치승, "원자력 발전소의 고감도 제철에 대하여 센서 최적 정합측설계법 및 Stationary Wavelet Denoising 기법을 이용한 초음파 검사 기술에 관한 연구", 한양대학교 대학원 박사학위 논문, 2004. 2.