

변압기 운용 측면에서의 절연 열화 분석 및 측정 기법

이병성, 송일근, 정종만, 김병숙, 한상옥*
한전전력연구원, *충남대학교

Measurement and Analysis for Insulation Deterioration on the Aged Distribution Transformers

Byung-sung Lee, Il-keun Song, Jong-man Jeong, Byung-sook Kim, *Sang-ok Han
KEPRI, *Chungnam National Univ.

Abstract - 국내에서 배전용 변압기 제조업체 수는 매년 조금씩 증가하고 있지만 품질향상을 위한 연구가 미흡하여, 전력회사가 요구하는 품질수준을 만족시키지 못하고 있다. 변압기는 권선의 취약부분에서 우선적으로 고장이 발생하게 된다. 정상운전중 과열점 온도에 의해 절연지가 열 열화 되어 고장으로 진전되게 된다. 따라서 변압기의 수명을 결정짓기 위해서는 무엇보다 내부 열특성 해석과 발생된 열에 대한 절연물의 열화 현상을 이해하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 변압기 절연지의 열화 현상과 열화로 인한 절연특성 변화메커니즘에 대한 연구를 수행하였다. 절연지의 열화는 변압기 층간의 절연상태를 악화하고 다른 환경적인 요인이 부가될 경우 고장으로 급격히 진전될 수 있다.

고장원인은 그림 1에서와 같이 1차 권선에서 발생하는 층간단락 고장이었다. 1차 권선에서 발생하는 고장의 대부분은 중간 층(5층~10층)이며, 고장위치는 권선의 상부 또는 하부 쪽이다. 층간 절연 문제로 부분방전이 지속되다가 단락고장으로 진전된 것으로 추정된다. 제조과정에서 절연지의 기계적 스트레스 및 단락기계력 확보를 위해 수행하는 바니시 함침공정과 관계가 있다고 판단된다.

1. 서 론

배전용 변압기는 선진 제조업체의 제품과 비교하면 아직 만족할 만한 수준은 아니지만, 최근 변압기 운용자 및 제조자의 노력으로 배전용 변압기 고장률이 점차 감소하고 있다. 제조업체의 품질개선에 비해 배전선로에 사용되고 있는 변압기의 고장 형태도 많이 바뀌게 되었다.

수 년 전에는 부싱파손, 누유, 기밀 등과 같은 단순한 조립공정상의 문제로 발생하는 고장이 상당부분을 차지하였으나, 최근에는 이러한 품질불량 사례가 많이 줄었다. 하지만 1차권선 내부 절연상의 문제로 발생하는 층간단락 고장은 감소하지 않고 있다. 이러한 고장은 단순한 품질관리나 작업공정개선으로 해결될 수 없으며, 권선의 제조방법이나 설계에 있어서 개선점을 찾는 노력이 있어야 한다.

변압기가 수명기간 동안 안정적인 전력공급을 하기 위해서는 변압기 제조자가 권선 내부 결함을 줄이는 설계 및 제조 기법을 연구 하여야 할 뿐만 아니라, 운용자는 서지의 유입이나 과부하 분담이 되지 않도록 선로를 관리하는 것이 중요하다. 이렇듯 실질적으로 변압기 고장률을 줄이기 위해서는 제조자와 운용자의 공동의 노력이 필요하다.

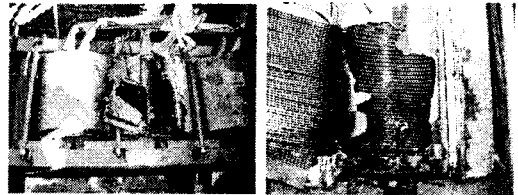
본 연구에서는 국내 배전용 변압기의 품질수준을 평가하기 위해 배전선로에서 운용중 고장이 발생한 변압기를 분석하여 고장의 주요 원인을 규명하였으며, 배전선로에서 운용중인 변압기 열화를 검출하는 기법들에 대해 검토하였다.

2. 본 론

2.1 변압기 고장원인

2.1.1 권선내부 단락 고장

대부분의 국내 배전용 변압기는 2차권선 바깥쪽에 1차 권선이 감겨져 있는 형태로 제조되는데, 대부분의 고장이 1차 권선에서 발생하고 있다. 본 연구에서 고장변압기 권선을 해체하여 원인 분석한 결과에 따르면 주요한



(a) 고장변압기 (b) 층간 단락 고장형태
그림 1. 층간단락 고장의 일반적 형태

현장에서 운용 중 단기간에 고장이 발생된 변압기의 대다수는 과부하, 서지 등과 같은 운용상 문제에 의한 절연물 열화이기 보다는 층간 절연에 문제가 있어서 고장이 발생한 것으로 추정할 수 있다.

대부분의 제조업체에서는 1차권선 층간 절연에 사용되는 절연지는 에폭시가 코팅된 절연지를 사용하고 있다. 코팅 절연지는 단락전류에 의해 권선의 축방향 이동을 억제하기 위한 것으로 별도의 바니시 함침 공정을 하지 않아도 되는 장점이 있어 많이 사용되고 있다.

대부분의 국외 제조사에서는 에폭시 코팅 절연지를 사용하고 2차 권선은 판상도체를 적용하여 단락기계력에 대응하고 있으며, 장기신뢰성에 영향을 주기 때문에 별도의 바니시 함침은 하지 않고 있다. 하지만 국내에서 생산되는 모든 지상변압기 권선은 바니시 함침 제조되고 있다.

주상변압기에서 실측한 결과에 따르면 바니시 함침은 권선의 장기 신뢰성이 저하된 것으로 나타났으며, 내부의 절연유 순환을 제한하여 핫스팟 온도를 높이는 결과를 가져왔다.

단락기계력에 대응하기 위해 권선을 전자기적으로 균형이 되도록 설계하고, 권선의 반경방향과 축방향력을 최대한 억제할 수 있는 프레임 구조를 결정하여야 한다. 해석적인 방법이나 실험을 통해 프레임의 기계적 지지구조가 취약한 부분을 보강하여야 한다. 단락기계력을 바니시에 의존하는 것은 좋은 해결 방법이 되지 못한다.

2.1.2 엘보 접속부 고장

변압기 엘보 접속 단자부분의 접촉 불량에 의해 고장이 발생한 것으로 최초 작업자에 의해 연결된 엘보와 부싱의 접속이 변압기 진동이나 케이블 자중에 의해 조금

씩 밀려나와 초기의 접속 상태를 유지하지 못하여 고장이 발생할 수 있다. 그림 2는 엘보 접속부분에서 발생한 고장 예로써 접속부분 과열로 화제가 발생하였다. 접속이 보다 용이하고 견고하게 될 수 있는 부속자재의 개발도 동시에 이루어져야 할 것이다.

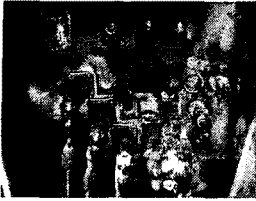


그림 2. 엘보 접속부분에서 발생한 고장 예

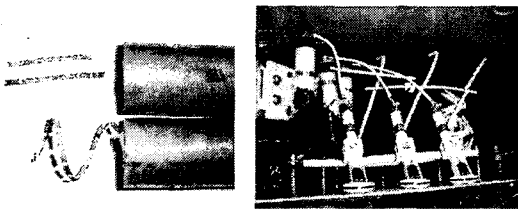
2.1.3 CL 퓨즈 고장

지상변압기에 사용되고 있는 한류퓨즈는 Backup 퓨즈로써 저전류 차단을 수행하는 방출형 퓨즈와 조합하여 전체의 고장전류에 대한 차단을 수행하고 있다.

한류퓨즈의 내부는 과전류 도통시 용단되는 역할을 하는 퓨즈 엘리먼트부분과 용단시 발생된 아크를 소호해주는 소호사로 구성되어 있으며, 외부는 FRP 재질의 튜브로 이루어졌다. 내부의 퓨즈 엘리먼트와 FRP 튜브 간의 거리가 10 mm 정도이기 때문에 퓨즈 외부 절연튜브가 외함에 접촉되도록 설치하면 부분방전이 진전되어 고장이 발생하게 된다. 그림 3은 철 밴드를 이용하여 퓨즈를 절연판에 고정하는 방법상의 문제로 고장이 발생된 사례를 나타낸 것이다. 작업자 부주의에 의해 철 밴드가 외함에 접촉되도록 조립하여 밴드와 퓨즈 엘리먼트간의 부분방전이 진행되다가 섬락고장으로 이어진 것이다.

CL 퓨즈는 변압기에 공급되는 전원측에 연결되어 후단을 보호하는 것으로 CL 퓨즈에서 고장이 발생할 경우 보호 협조상 고장 지속시간이 길어지므로 내부압력의 급상승으로 변압기 폭발 또는 절연유 분출 사고가 발생할 수 있다.

CL 퓨즈의 고정방법은 제조업체마다 약간씩 상이하다. 변압기 외함에 절연판을 대고 고정하는 것과 프레임 위에 고정하는 방법들이 적용되고 있다. 절연층면에서 안전성을 높이기 위해서 충분한 이격거리를 유지하여야 하고, 리드는 가능한 짧게 구성하여야 한다. 어떠한 원인에서 절연유의 절연내력이 저하되었을 경우 변압기 내부에서 3상 단락이나 지락 고장이 발생할 수 있기 때문이다.



(a) 퓨즈의 구조 (b) 고장변압기
그림 3. 퓨즈 설치방법의 문제로 발생한 고장 예

2.2 변압기 열화 측정

전원공급의 신뢰도를 높이기 위해서는 현장에서 운용 중인 변압기에 고장이 발생하기 전에 교체하고 이상발생 원인을 규명하는 것이 중요하다. 일단 고장이 발생할 경우 소손되어 고장 위치가 없어 되기 때문에 고장원인 분석은 사실상 쉽지 않다. 따라서 안정적인 전력공급 및 변압기 품질향상을 위해 열화진단 센서를 적용하여 이상 변압기를 조기에 진단해 내는 기술개발이 절실하다.

본 연구에서는 변압기 열화 진단을 적용 가능한 측정 방법들에 대해 검토하고 배전용 지상변압기에 적용하기

에 적절방법을 제시하고자 하였다.

2.2.1 열화감지 센서를 활용한 진단

변압기 내부의 열화는 절연유 특성 변화로 나타나므로 절연유를 분석할 경우 열화 상태를 판정하는 것이 가능하다. 하지만 시료채취에서 분석까지 상당한 시간이 소요되고 지속적인 많은 연구가 진행되고 있지만 아직까지 명확 판정하는 기준이 정립되지 않아 여러 가지 방법을 병행해서 판단하고 있다.

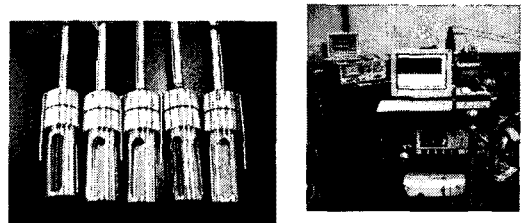
다양한 온라인 감지 센서들이 개발되어 있지만 국내 지중 배전선로에서 적용하기 위해서는 컴팩트하고 경제적이여야 한다. 본 연구에서는 전기용량형 센서, PCS 및 가스-수분센서의 특성 평가하였다.

일들 센서들의 특성 측정 시험은 가속열화 모의 시험용 셀과 실 변압기에 설치하여 수행하였다. 즉, 절연지 및 절연유의 가속 열 열화 시험과 동시에 셀 내에 센서를 설치하여 열화 감지 특성을 측정하였다. 열화 시간에 따라 셀에 설치된 정전용량 센서와 PCS의 열화 감지 특성을 평가하였다. 또한, 실 변압기에 센서를 설치하여 2차 단락법으로 열화 시키면서 두 종류 센서의 열화 감지 특성을 실시간으로 측정하였다.

가. 절연유 전기용량 측정용 센서

3전극형 전기용량 센서는 변압기 절연유의 열화정도를 감지하기 위해 (+)전극면, (-)전극면, 가드 및 쉴드 전극의 3단자 전극구조를 갖는 전기용량 센서를 양면 PCB를 사용하여 센서 자체로서의 정전설드 및 외부 케이스에서의 정전설드의 2중 정전설드 구조로 구성되었다.

내부 아크, 열적 스트레스, 수분 등에 의해 절연유의 초기 상태가 변하게 되었을 때 상기 센서로 측정한 전기용량값이 증가하여 나타났다. 전기용량값을 온도에 따라 적절하게 보정하여 열화를 감지할 수 있었다. 그림 3은 전기용량 센서와 실측한 시험장치 구성을 나타낸 것이다. 그림 4는 다양한 열화 조건에 따른 전기용량 센서의 감지 특성을 온도에 따라 측정하여 나타낸 것이다. 열화로 나타난 절연유의 상태를 감시하는 것이 가능해졌다.



(a) 전기용량 센서 (b) 열화감지 특성 측정
그림 3. 전기용량 센서와 시험장치 구성

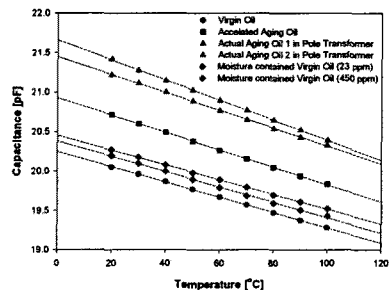


그림 4. 다양한 열화 절연유의 온도에 따른 전기용량 센서의 감지특성

나. 누설전류 측정용 센서

절연유가 열분해 되거나 수분량이 증가할 경우 절연유의 고유저항 값은 감소하게 된다. 따라서 센서 양단에 일정한 전압을 인가하였을 때 누설전류값이 변하게 된다. 이와 같이 절연유 누설전류측정 방법은 절연유 열화 진단을 위해 변압기 내부에 센서(PCS; Porous Ceramic Sensor)를 설치하고 PCS 양단에 DC 2kV 전압을 인가하여 이때 흐르는 누설전류를 nA 단위로 측정하는 것이다. 그림 5는 누설전류 측정을 위해 설치한 센서의 형태를 나타낸 것이다. 절연유 열화 상태에 따라 누설전류 값이 증가하여 나타났다.

하지만 주위의 노이즈 및 절연유의 유동성, 내부 미소 방전 등으로 누설전류 측정값은 지속적으로 변하게 되므로 장시간 측정하여 변화 추이를 관찰하여 판정하는 것이 적절하였다.



그림 5. 누설전류 측정용 센서의 설치

다. 수분 및 가스분석 센서

수분 및 가스분석을 위한 센서는 캐나다 GE Power Systems에서 제작한 Hydran M2 모델을 사용 하였다. 절연유 내의 고장가스뿐만 아니라 수분(moisture)을 감시할 수 있다. 센서는 절연유내의 수분량(ppm, RH%), 수소(H₂), 일산화탄소(CO), 아세틸렌(C₂H₂), 에틸렌(C₂H₄)에 대한 우수한 감도를 보인다고 알려져 있다. 일산화탄소(CO)에 대한 정보를 얻을 수 있기 때문에 과열에 의한 절연지 열화 여부도 확인할 수 있다.

배전용 변압기의 경우 절연유의 량이 적고, 유동성이 부하에 따라 차이가 크기 때문에 열화에 따른 측정값의 변화가 정확도가 떨어질 수 있는 단점이 있다. 많은 측정 경험 데이터로 판정기준을 정하여야 한다.

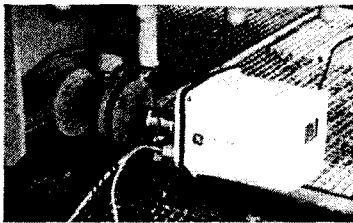


그림 6 수분 및 가스분석 센서의 설치 예

2.2.2 절연물 분석을 통한 진단

정상운전 또는 과부하 상태에서 변압기 내부에서 발생 되는 주열이 절연지를 열화시켜 고유의 전기적, 기계적 특성을 변화시키는데 이러한 변화들을 측정할 경우 보다 정확하게 열화를 판정할 수 있다.

하지만 운전중인 변압기에서 절연지를 발취하여 평가하는 것은 불가능하다. 따라서 절연유의 일정량을 발취하여 실험실에서 분석하여 평가하는 방법이 많이 사용되고 있다.

실험실에서 절연유의 특성을 측정하는 많은 방법들이 있지만 변압기 열화 상태를 측정하기 위해 기본적으로

절연내력, 수분함량, 용존가스 등을 분석한다. 이들 방법들에 대한 판정기준이 마련되어 있지만 열화상태를 완벽하게 판정해 내지 못한다. 그래서 추가적으로 필요한 경우 절연유의 유전특성 및 열화생성물 등을 분석하고 있다.

분석결과에 따른 열화 판정에 있어서 모든 변압기가 바나시 합침 권선으로 제조되었기 때문에 국외 전력사에서 적용하고 있는 판정기준을 동일하게 하는 것은 적절하지 않다.

2.2.3 변압기 이상 판정

변압기 진단에 있어서 열화진단 장비가 신뢰성이 있어야 할뿐 아니라 적절한 판정기준이 설정되어야 한다. 다양한 변압기 이상 진단 방법들이 개발되어 사용되고 있지만 하나의 진단방법으로 측정하여 변압기의 열화상태를 정확하게 판정하는데 한계가 있다. 열화 판정의 정확성을 높이기 위해서는 2~3가지 진단 방법을 병행하여야 하는데 경제적인 문제가 뒤따른다.

3. 결 론

변압기 장기신뢰성을 증가시키기 위해서는 모든 구성 부품의 신뢰성이 함께 충족되어야 하지만, 최근 고장 통계로 볼 때 배전용 변압기 신뢰성 향상을 위해서는 권선의 절연성능이 중요하였다.

아직까지는 지상변압기 열화 측정에 상시감시 방법을 적용하는 것은 비경제적이라 판단되지만 안정적인 전력공급에 대한 고객의 요구가 증가되고 있으며, 전력IT와 더불어 경제적인 통신망으로 종합적인 배전운영 시스템 구축에 열화측정 시스템도 상당한 역할을 할 수 있을 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] 이병성, 송일근 외, "지중배전용 변압기 신뢰도 향상에 관한 연구", 연구보고서, 2005.03,
- [2] H Herman etc, "A new approach to condition assessment and lifetime prediction of paper and oil used as transformer insulation", IEE ICSD, pp.473-476, 2001
- [3] Dr. B Pahlavanpour etc, "Experimental investigation into the thermal-ageing of Kraft paper and mineral insulating oil", IEEE ISEI, 2002 pp.341-345