

# 배전용 변압기의 고장원인 분석기술

송일근 <전력연구원 선임연구원>  
김동성 <전력연구원 선임연구원>  
이병성 <전력연구원 선임연구원>

## 1. 서론

전력수송에 있어서 변압기는 가장 중요하며 이들 기기에서 발생한 주요 고장은 전력공급에 지장을 초래하고, 큰 경제적 손실을 가져오게 된다. 따라서 제조자의 품질관리도 중요하지만 고장이 발생한 변압기에 대한 고장원인을 분석하여 기기의 성능개선 및 재조공정상의 문제점을 파악하고 해결책을 모색하는 것도 중요하다. 변압기가 정격 이상에서 운전할 경우 내부 온도상승이 변압기 성능에 중요한 영향을 준다. 과부하 운전의 경우 권선절연저, 프레스보드 등의 고체절연재료의 열열화 촉진에 의한 기계적 강도가 저하되어 권선부분의 단락기계강도가 저하를 가져온다. 또한 고체절연재료의 함유된 수분이 고온상태에서 노출됨으로써 동일 재료 중의 수분이 과포화되어 도체 근처에서 수증기와 같은 기포를 발생하고 절연성능을 저하시키게 된다.

변압기에서 발생하는 열화 메카니즘은 과부하 고온 운전에 따른 열적 열화현상, 외부 단락전류 유입에 의한 단시간의 열적 열화현상, 진동에 의한 기계적 손상현상, 부분방전 열화현상이 대표적이라 할 수 있다. 이러한 열화현상으로 인해 전기적·기계적 성능이 저하하게 되어 변압기의 기계적 강도 저하, 진

동 증가, 가연성 가스 발생 등으로 나타나고 결국 사고로 진전하게 된다.

변압기에 사용되는 절연은 크게 절연재와 절연유로 나눌 수 있고, 절연유에는 광유계 절연유와 합성 절연유를 포함한 여러 종류가 있지만, 현재 주상변압기에 사용하는 절연유는 광유 1종 2호에 적합한 것으로 규정되어 있다.

일반적인 주상변압기의 열화 진전 메카니즘은 그림 1과 같이 열, 전계, 수분, 산소 등이 원인이 되어 절연재나 절연유를 열화시켜 절연지의 탄화와 절연유의 분해가스를 생성시키는 형태로 진행된다.

본 고에서는 변압기의 원인별 고장요인, 고장 유형별 분석결과 및 고장감소대책에 대하여 서술하였다.

## 2. 변압기 원인별 고장요인

일단접지주상변압기가 현장 설치 후 3년이 경과되지 않아 고장이 발생하여 사업소에서 고장 원인 분석을 요청한 것에 대해 전력연구원에서 2001년 1월부터 9월까지 총 81 대의 고장변압기를 해체하여 분석한 결과이며, 분석 결과 1차권선의 절연이 문제가 되어 소손되는 고장이 50[%] 정도로 가장 많았으며,

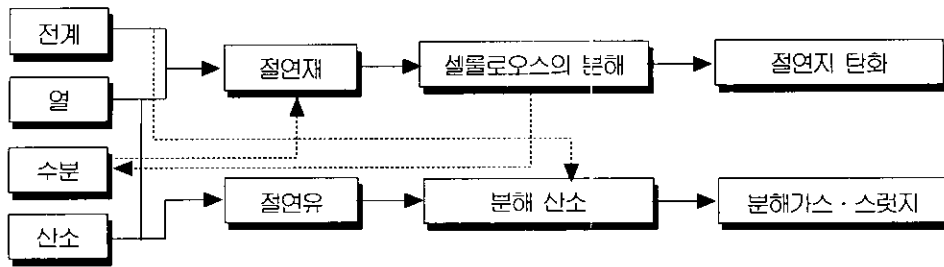


그림 1. 주상변압기의 열화진전 메커니즘

절연유가 누유되는 것이 다음으로 많이 차지하였다. 그리고 바니시 함침상태가 불량한 경우나 고압부싱이 파손된 것도 일부 있었다. 유형별 고장통계를 그림 2에 나타내었다.

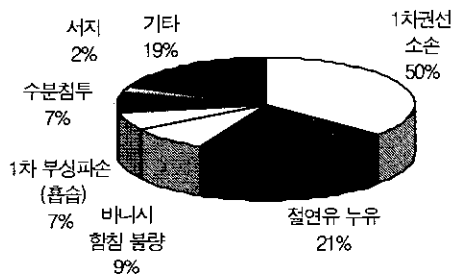


그림 2. 고장 유형별 분류

주상변압기 1차권선에서 발생한 고장은 유덕트가 삽입되어 있는 코일단부(coil end)의 상부 또는 하부에서 소손되는 경우가 79[%] 정도로 가장 많았으며, 철심(core)이 감싸고 있는 coil leg 부분에서 층간단락 고장이 발생한 경우는 21[%] 정도에 불과하였다. 또한, 고장이 발생한 층별로 분류를 하면 대체로 1차 권선의 가운데 층인 7층~9층 사이에서 고장이 가장 많이 발생하였으며, 바깥층에 해당되는 1층~3층 사이에서 발생한 고장은 3건에 불과하였다. 1차 권선에서의 층간단락 고장이 발생한 경우 각 층별 고장위치를 분석한 그래프가 그림 3과 같다.

또한, 변압기에서 절연유가 누유되는 경우의 68[%]가 1차 부싱캡 부분에서 기밀 상태가 불량하여 발생한 것으로 나타났다. 변압기의 단락강도를 향상

시키기 위해 적용하고 있는 바니시 함침이 불량한 경우도 분석한 변압기의 9[%]를 차지하였으며, 변압기 사용중 1차 부싱이 파손되어 고장이 발생한 경우와 제조 및 취급부주의에 의해 수분이 침입하는 경우도 각각 7[%]가 있었다.

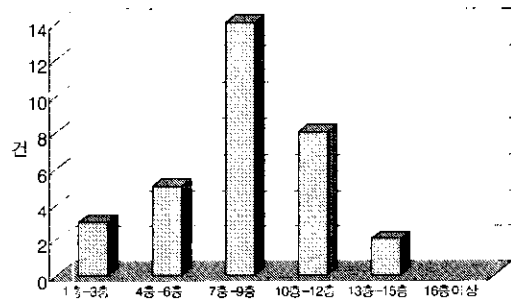


그림 3. 1차 권선의 층별 고장위치

기타 권선의 층간 절연불량으로 인한 부분방전 및 탭 변환기의 접촉불량, 탭리드선의 오결선 등이 있었다.

### 3. 변압기 고장 유형별 분석결과

#### 3.1 1차권선 소손

주상변압기 고장은 1차권선 층간 절연지의 절연불량으로 층간 단락고장이 발생하는 경우가 대부분이며 층간단락고장이 발생한 위치는 그림 4와 같고, 전기적으로 취약한 coil end 부분으로 유덕트(oil duct)가 끝나는 위치에서 고장이 많이 발생하였다.

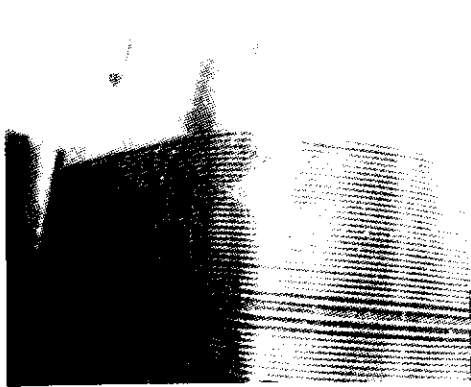


그림 4. 층간 단락고장

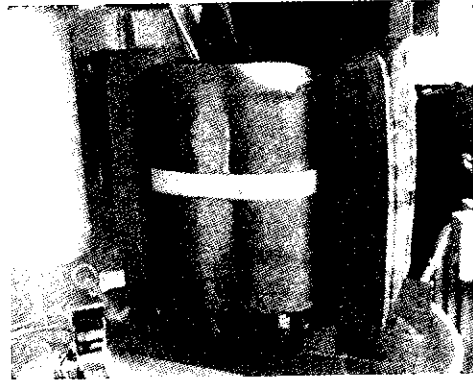
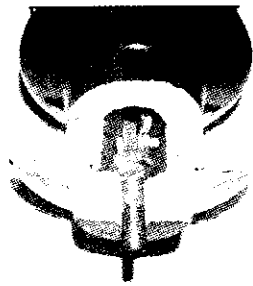


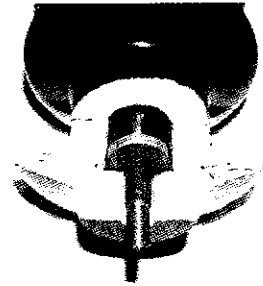
그림 5. 권선의 이동



(a) 가스켓의 손상



(b) 개선전의 구조



(c) 개선후의 구조

그림 6. 부상 캡의 패킹 구조 개선

또한, 그림 5와 같이 층간단락고장이 발생하였을 경우 큰 단락전류에 의해 권선의 변형이 생기는 경우가 있다. 이 경우 주로 유덕트가 설치된 층을 기준으로 권선층의 이동이 있었다. 권선은 모두 바니시 함침 공정을 거친 것이었지만 함침시 바니시의 점도가 너무 낮아 단락기계력의 증가를 가져오지 못한 것으로 판단되었다.

### 3.2 절연유 누유

#### 3.2.1 가스켓 불량에 의한 누유

변압기 외함으로 누유가 발생하는 경우는 대부분 1차 부상 캡 부분에서 발생하였다. 부상 캡 내부는 패킹으로 NBR이나 코르크를 삽입하여 단단하게 조여 고정시키는 구조로 되어 있는데, 캡을 너무 강하게 조일 경우는 부상이 비틀림 응력을 견디지 못하

여 파손되거나 그림 6(a)와 같이 NBR이 찢어지는 손상을 입어 이 부분으로 누유되는 경우가 있다. 그러나 이러한 위험성 때문에 부상 캡이 느슨하게 조여져 있을 경우나, 운반이나 작업 등과 같은 외적인 힘에 의해 부상 캡의 조임이 느슨해지게 될 경우 주위 환경 또는 변압기 운전중의 온도상승 등의 영향을 받아 패킹이 정상적인 역할을 하지 못하여 절연유가 스며 나오게 된다.

이를 개선하기 위한 방안으로 그림 6(b)를 그림 6(c)와 같이 캡과 연결되는 고압리드 단자볼트에 맞는 패킹을 추가로 제작하여 삽입하게 되면 이중으로 누유되는 부분을 제거할 수 있으며, 캡을 연결할 때 부상에 전달되는 비틀림 응력 역시 줄어들게 되어 부상의 파손을 막는데 효과적이라 판단된다.

가스켓 재질(seal용 고무재질)로서 요구되는 특성은 적당한 고무탄성과 기계적 강도를 갖을 것, 영구

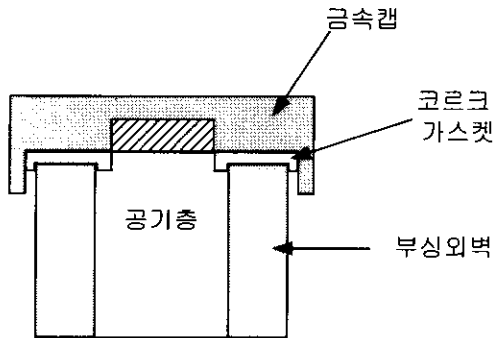


그림 7. 정상적인 가스켓구조

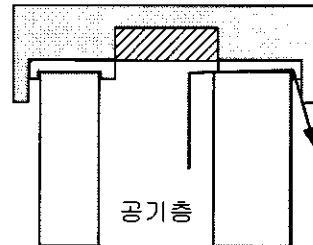


그림 8. 누유변압기의 가스켓 설치상태

압축 뒤틀림이 작을 것, 기름·용제·약품 등의 유체에 견딜 것, 내열성·내한성이 우수할 것, 내마모성이 뛰어나고 마찰계수가 작을 것 등이다. 이러한 고무의 최대 장점은 외력을 가하면 거의 체적변화 없이 변형하고 외력을 제거하면 단시간에 복원하는 탄성력을 들 수 있다. 결점으로는 분자중의 아크릴로니트릴(AN)의 함유량에 의한 굴곡균열·저항성이 나쁘고 내오존성이 좋지 못하여 보강성 충진제를 필요로 하며, 사용조건에 적합한 NBR의 선택이 요구된다. 인장강도는 약 70~320[kg/cm<sup>2</sup>] 이고, 신장율은 250~600[%], 사용온도는 최대 150[°C]이다.

그리고, 누유가 발생하는 메커니즘은 고무(또는 코르크) 가스켓이 기밀유지의 성능을 최대한 발휘하기 위해서는 금속 캡과 리드선 연결을 위한 특고압 부싱의 공간을 그림 7과 같이 부싱의 경계면에서 턱을 유지하도록 설치하여야 하나, 일반적으로 누유변압기에 설치된 가스켓은 그림 8과 같이 한쪽 부분이 턱을 형성하지 못함으로써 그 부위(부싱의 표면)를 통해 누유가 발생하는 것으로 판단된다.

다음은 기타 누유가 발생하는 사례를 다음과 같이 기술하였다.

### 3.2.2 유막공간에 의한 누유

누유 발생은 불완전하게 밀봉되어 있는 가스켓(고무)과 애관 사이에서 형성된 유막(油膜) 공간으로 모세관현상에 의해 발생한 절연유 기동이 상승한 것으

로 분석된다.

※ 모세관 현상 : 관과 액체사이의 접촉력에 의해 형성된 수막이 매우 가는 관 또는 공간으로 액체가 이동하는 현상으로 접촉력이 액체기둥의 무게가 같아질 때까지 위로 올라가게 된다.

### 3.2.3 내부 절연고장에 의한 누유

변압기의 누유현상은 내부 압력상승에 의한 대류현상(밀도차이)에 의해 기밀구조가 불량한 부위에서 발생하는 것으로, 정상적인 운전 온도외에 내부 절연고장시 발생하는 급격한 압력상승으로도 누유(이때는 분출이라 하는 것이 정확한 표현임)되는 것을 관찰할 수 있다. 탱크 과열압력(15psig) 이하에서 발견될 수 있는 현상으로 이 경우 방압밸브에서도 같은 현상을 확인할 수 있다. 권선 및 내부 전기회로가 정상으로 측정되었다면 누유의 원인은 고장과는 무관하므로 기밀상태 불량으로 보아야 한다.

### 3.2.4 방열판 점착불량에 의한 고장

변압기 방열판 용접시 부주의한 공정에 의해 발생된 것으로 판단되는 기공에서 누유흔적이 발견되었고, 표면 페인트칠에 의해 막혀 있다가 사용도중 열화에 의해 박리되면서 외부에 노출된 고장이 발생된다.

### 3.2.5 기계적 충격에 의한 고장

외함 뚜껑이 변형된 변압기는 시공시 기계적인 충

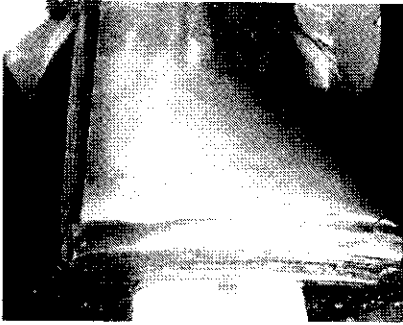


그림 9. 바니시의 미경화

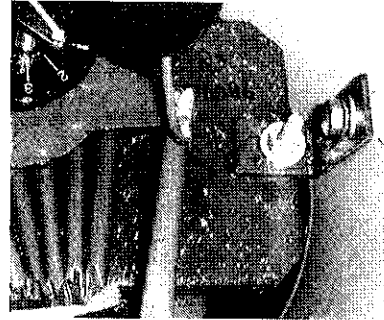


그림 10. 절연유중의 바니시

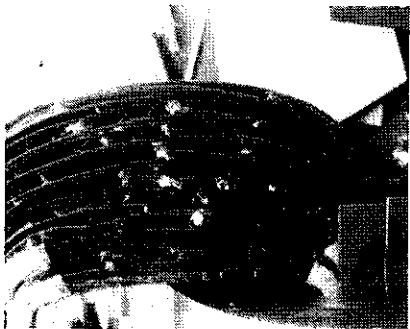


그림 11. 바니시가 유를 막음



그림 12. 권선의 열열화

격에 의해 발생한 것으로 추정되며, 2차 붓싱이 파손된 변압기는 내부의 붓싱 손상흔적이 발견되지 않아 외부 충격에 의해 파손된 것으로 추측되고, 운반 또는 시공시 관리 부주의에 의해서 발생할 수 있다.

### 3.3 불완전한 바니시 함침

고장원인을 분석한 변압기의 대부분은 변압기가 바니시 함침 처리를 하였고, 고압권선의 층간 절연지로는 주로 내층에 다이아몬드지(diamond coated kraft papers)를 사용하였으나 외층에는 일반 크래프트지를 사용하고 있었다. 또한 다이아몬드지를 사용한 권선 역시 단락기계력 증가를 위해 바니시 함침 처리를 하고 있었다.

권선의 바니시 함침에 대한 규정은 없으나 권선의 단락 기계적 강도 향상을 위해 권선 조립후 바니시 함침을 하는데, 이 때 함침시 보이드 제거 및 함침후의 건조처리가 매우 중요하다. 함침시 내부에 보이드가 존재하게 되면 변압기 사용중 부분방전의 원인이

될 수 있으며, 그림 9, 그림 10과 같이 함침 후 바니시 권선의 건조가 불량할 경우 바니시가 절연유 내로 흘러나와 절연유의 성능을 저하시킨다. 또한 그림 11과 같이 바니시 점도가 높을 경우 유(oil) 덕트를 막아 유 순환을 저해함으로써 과열개소가 발생하여 고장의 원인이 될 수도 있다.

현재 제조업체별로 자체 공정으로 수행하고 있는 바니시 함침 조건에 대한 재검토 및 최적의 함침 조건 정립이 필요하며, 바니시 함침이 불완전하게 된 사례는 다음과 같은 것들이 있다.

- 바니시가 미 경화된 경우 절연유에 스며나와 절연유의 고유한 유전특성에 영향을 주어 절연을 나쁘게 한다.
- 함침시 바니시의 점도가 너무 높거나 진공처리를 완전하게 하지 않은 경우 코일의 각층에 많은 보이드가 형성된다.
- 바니시의 점도가 너무 높은 경우 코일 내부에 균일한 함침이 되지 않으며, 냉각을 위한 유덕트를

막을 수 있고, 또한 점도가 너무 낮을 경우 바니시 함침 효과가 줄어든다.

■ 그림 12와 같이 함침후 건조 공정시 건조로의 온도가 너무 높은 경우 권선간 절연지가 열화되어 수명이 경과되지 않아 고장이 발생한다.

바니시 함침에 따른 절연내력 기준 값은 표 1과 같다.

표 1. 바니시 함침에 따른 절연내력

사료명	절연내력	비 고	
바니시 경화상태(정상상태)	9 kV/0.1mm 이상	KSC 2321	
바니시 침수후	7 kV/0.1mm 이상		
절연유(광유)-신유	60 kV/2.5mm 이상		
절연유(광유)에 바니시 혼합 (광유 200ml에 바니시 1.5ml)	1차	35.1 kV/2.5mm	실험값
	2차	42.4 kV/2.5mm	
	3차	27.2 kV/2.5mm	

결과적으로 변압기 절연유에 미 경화된 바니시가 혼합되었을 경우는 절연내력이 급격히 저하되어 궁극적으로는 변압기 소손으로 이어질 수 있다.

#### 4. 결론

고장이 발생한 주상변압기의 고장원인 분석을 통해 현재 생산되고 있는 변압기의 전기적으로 취약한 부분 및 제조 공정상 품질관리가 요구되는 사항 등에 대한 이해는 얻을 수 있었고, 이에 대한 개선방안 도출로 향후 주상변압기 고장으로 인한 정전 피해를 많이 줄일 수 있을 것으로 사료된다. 주상변압기에 대한 고장원인을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 1) 제조시 작업자의 부주의나 변압기 운반 및 설치시 취급자의 부주의로 인하여 고장이 발생하는 경우가 있으므로 세심한 취급이 요구된다.
- 2) 육안검사 및 기밀시험을 통해 변압기 제조시 편홀이 존재하는 외함은 제외시킬 수 있다.
- 3) 1차권선의 winding은 숙련된 작업자가 작업절

차를 준수하며 취급시 충분한 주의를 기울일 경우 권선의 불량 사고를 크게 줄일 수 있다.

4) 주상변압기의 단락강도 특성 향상을 위해 사용 중인 바니시는 경년에 따라 절연내력을 저하시키는 지 추가 검토가 필요하고, 건조시 충분한 시간을 주어 진공건조가 요구된다.

#### 參 考 文 獻

- (1) 노광래외, "배전기자재(저수실주상변압기)의 성능확인 및 특성시험 연구", 전력연구원, 1999.
- (2) 송일근외, "주상변압기 단락강도향상을 위한 바니시 함침기술 동향", 대한전기학회지, Vol. 49, No. 5, pp. 44-50, 2000. 5. 30.
- (3) 송일근, 전력설비진단기술 및 주상변압기 선진기술습득 공무·국외여행보고서, 전력연구원, 2000.
- (4) 하복남외, "주상변압기 절연파괴 감소대책 연구", 전력연구원, 1991.
- (5) 변압기 보수관리입문, 安西和夫.
- (6) Large Power Transformer, K. KARSAI D. Sc, 1987.
- (7) KSD 6002, 한국공업표준협회.
- (8) Test code for liquid-immersed distribution, power, and regulating transformers and guide for short-circuit testing of distribution and power transformers. ANSI/IEEE C57.12.90 1987.
- (9) General requirements for liquid-immersed distribution, power and regulating transformers, ANSI/IEEE C57.12.00, 1987
- (10) Overhead-type distribution transformers, 500kVA and smaller, ANSI/IEEE C57.12.20, 1988.
- (11) D.F. Binns, A.B. Crompton, and A. Jaberransari, Effect of Temperature on the Breakdown Voltage of Papercovered Conductor Impregnated with Various Liquids..
- (12) W. Lampe, Influence of Different Stress Factors on the Dielectric and Mechanical Strength of Oil-Cellulose Insulation.
- (13) W.J. McNutt, Insulation Thermal Life Considerations for Transformer Loading Guides.
- (14) R. Blue, D. Uttamchandani, O. Farish. "Infrared Detection of Transformer Insulation Degradation Due to Accelerated Thermal Aging" IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation Vol.5 No.2, 1998. 4.

◇ 著 者 紹 介 ◇



송 일 근(宋一根)

1984년 송실대 전기공학과(학사). 1986년 송실대 대학원 전기공학과(석사). 1997년 송실대 대학원 전기공학과(박사). 1985년 현재, 전력연구원 배전기술센터 황선진단팀 P/L. 관심분야 : 배전설비 수명진단 및 열화진단기술. Tel : 042-865-5920. E-mail : iksong@kepri.re.kr.



이 병 성(李丙成)

1968년 8월 17일생. 1993년 충남대 공대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995-현재 : 한전 전력연구원 전력계통연구실 선임연구원. 관심분야: 폴리머에자 및 절연재료의 열화특성. Tel : 042-865-5924. E-mail : leebs@kepri.re.kr.



김 동 명(金東明)

1986년 한국전력공사 입사. 1994년 한전 전력연구원 선임연구원. 1986년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 1999년 고려대학교 산업대학원 재료공학과(석사). 관심분야: 배전용 변압기 및 절연재료의 열화특성. Tel : 042-865-5922. E-mail : kimdmng@kepeco.re.kr.