

## 주상 변압기 신뢰성 향상기술

송일근, 이병성, 정종욱, 김동명, 김주용, 이재봉, 권태호

한전 전력연구원

### Reliability Upgrading Technologies of Distribution Transformers

I.K. Song, B.S. Lee, J.W. Jung, D.M Kim, J.Y. Kim, J.B. Lee, T.H. Kwon

KEPRI, KEPCO

#### Abstract

In this paper, a model pole transformer was designed to improve the reliability of pole transformers and its short circuit withstand strength was tested. The failure causes of the pole transformers which had been operated in the field were analyzed and several patterns of the causes were determined.

A novel countermeasure was devised to prevent the failures of the pole transformers in advance. A model pole transformer was designed and made in accordance with the given specifications to strengthen the short circuit withstand capability and its characteristic was tested.

As a result, the advanced performance of the model pole transformer was confirmed and novel techniques in manufacturing process was suggested.

It is considered that all the methods employed in the developing process will be helpful to design and manufacture the pole transformers thus the reliability of pole transformers in distribution lines will be improved.

**Key Words** : model pole transformer, reliability, short circuit withstand strength, failure causes

#### 1. 서 론

최근 주상변압기는 전력 수요의 증가에 따라 초고압화 및 대용량화의 추세와 함께 다량 설치되고 있다. 이러한 주상변압기에 고장이 발생할 경우, 정전 범위가 넓어지므로 막대한 경제적 손실이 발생하며, 사고 복구를 위한 장시간의 정전에 따라 사회에 미치는 파급효과 또한 크기 때문에 이러한 사고를 미연에 방지하기 위한 고 신뢰도 운전이 요구된다.

전력 시장의 개방·자유화가 이루어지는 가운데, 설비를 더욱 효율적으로 운용할 필요가 있으므로, 설비투자의 효율화와 함께 기존 설비의 수명 연장이 더욱 중요시되어지고 있다. 통계 자료에 의하면 국내에서 사용되는 주상 변압기의 고장율은 선진국에 비해 두 배 이상 높으며, 수명이 절반 이하로 나타나고 있다. 고장이 발생한 주상변압기는 과부하, 서지 및 기타 외부적인 요인에 의한 것도 있지만, 상당수는 주상변압기 품질이 불량하여 발

생한 것으로 추정된다[1].

본 논문에서는 주상변압기의 신뢰도 향상을 위해 고장이 발생한 주상변압기에 대한 고장원인을 분석하였다. 그리고 단락 기계력을 향상시킨 모델 주상변압기를 설계·제작한 후 단락강도 시험을 하였고 향후에는 주상변압기의 신뢰성이 향상될 것으로 사료된다.

#### 2. 주상변압기 고장원인 분류

##### 2.1 주상변압기 고장 현황

국내 배전선로에 설치된 일단접지 주상변압기는 2002년 6월 현재 148만대에 이르고 있으며, 매년 설비가 증가하고 있다. 주상변압기가 현장 설치 후 3년이 경과되지 않아 고장이 발생하여 사업소에서 고장 원인 분석을 요청한 것에 대해 전력연구원에서 2001년 1월부터 2002년 9월말까지 총 154 대의 고장변압기를 해체하여 분석하여 유형별 고장통계를 그림 1에 나타내었다[1].

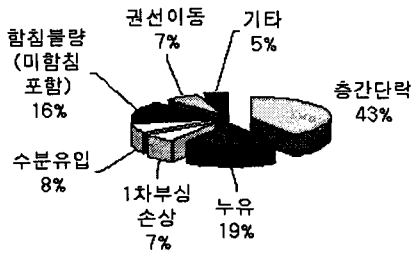


그림 1. 주상변압기의 고장 유형  
Fig. 1 Failure types of pole transformer

## 2.2 주상변압기의 고장원인

주상변압기 발생하는 층간단락고장의 대부분은 1차권선에서 발생하였다. 층간단락고장이 발생하는 주요원인은 절연지가 기계적으로 변형되거나 스트레스를 받아 층간의 절연손상으로 인해 발생하는 경우가 대부분이며, 층간단락고장이 발생한 위치는 사진 1과 같이 coil end의 각 층 상부 또는 하부 턴이었다. 대부분의 층간단락 고장은 7층에서 12층 사이에서 다발하였으며, 전기적으로 취약한 coil end부분으로 고압 권선의 에지(edge)부위에서 주로 발생하는 경향을 나타내었다.

주상변압기 고장에서 층간단락고장에 이어 다발하는 고장은 절연유의 누유였다. 주상변압기 절연유 누유는 그림 2에 나타난 것과 같이 약 64%가 1차 붓심의 상부 캡에서 발생하였다. 1차 붓심 상부 단자부분은 붓심사이에 기밀을 유지하기 위해 NBR(Nitrile Butadiene Rubber)이나 코르크 패킹을 삽입한 후 단단하게 고정하는 구조로 되어 있다. 1차 붓심 상부캡의 조임 상태가 불량하거나, 패킹이 손상되어 발생된다.

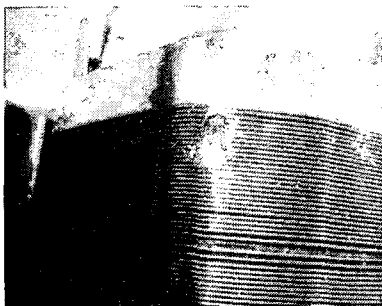


사진 1. 층간 단락사고  
Photo. 1 Damage at primary winding

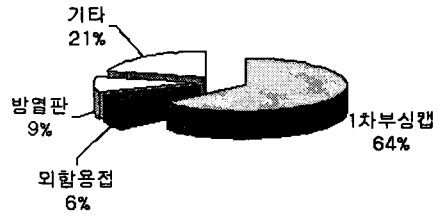


그림 2. 누유 부위  
Fig. 2 Leaking parts

고장원인 변압기의 대부분이 바니시 합침 처리가 된 것이었다. 권선의 기계적 단락강도 향상을 위해 권선 조립 후 바니시에 합침하며, 이 때 보이드 제거 및 합침 후의 건조처리가 매우 중요하다. 합침 시 내부에 보이드가 발생하면 변압기 사용중 부분방전의 원인이 될 수 있으며, 합침 후 바니시 권선의 건조가 불량할 경우 바니시가 절연유 내로 흘러나와 절연유의 성능을 저하시킨다. 또한 바니시 점도가 높을 경우 유(oil) 덕트를 막아 절연유의 순환을 저해함으로써 과열개소가 발생하여 고장의 원인이 될 수 있다.

위의 세 가지를 제외한 주상변압기 고장원인으로는 붓심의 흡습, 2차 붓심 파손, 수분의 유입, 작업자의 과실 등을 들 수 있다.

## 3. 모델 주상변압기 특성시험

### 3.1 모델 주상변압기 설계 개념 및 조건

주상변압기의 설계는 고도로 전문화되어 있으며, 상당한 역량과 설계 경험이 요구된다. 변압기는 자속 밀도, 동선 전류밀도, 철/동의 균형, 절연재료의 선택과 같은 기본적인 파라미터를 고려하여 설계를 한다.

본 연구에서는 단락강도의 향상과 소형화 및 과부하 내량 향상에 중점을 두어 설계하였다. 주상변압기 내부에서 기계적, 열적으로 스트레스가 가해진다고 판단되는 부분에 내열등급이 220℃인 아라미드 절연지를 사용하고 나머지 부분은 기존 셀룰로오스 절연지를 사용하여 경제적인 부담을 최소화하기에서 단락강도 향상을 위해 수행하고 있는 권선의 바니시 합침 공정을 생략하고, 설계개선 및 권선의 프레임 부분을 보강하여 단락내력을 향상시키고자 하였다.

표 1과 같은 조건을 고려하여 본 연구에서 사용할 모델 주상변압기를 설계 제작하였다.

표 1. 모델 주상변압기 설계시 고려사항

Table 1 Considerations in Design of a model pole transformer

설계요소	설계시 고려사항
설계 목적	단락강도 향상
% 임피던스	3.2±10%(PS 141에 의거)
손실(동손+철손)	평균 부하의 70% 수준
절연유 온도 상승	65℃
권선의 온도상승	65℃
일차측 탭	3탭(상위탭, 기본탭, 하위탭)
바니시	None
사이즈	소형화
Oil Duct	유덕트를 최소화한 설계
절연지	Cellulous + Aramid
수명	20년 이상
원가 상승	10% 이내

### 3.2 단락강도 시험결과

단락특성을 개선하기 위해 기계적으로 취약한 부분을 보완설계하고 바니시 함침처리 공정이 권선의 층간 절연에 좋지 않은 영향을 준다고 판단 되었으므로, 바니시 함침 처리를 하지 않은 모델 주상변압기가 제작되었다. 제작된 모델 주상변압기에 대해 단락강도 시험을 실시하고 기계적으로 취약한 부분은 다시 보강하여 제작 시험하는 방법으로 단락특성을 개선시키고자 하였다. 본 연구에서는 단락 특성 개선을 위해 두 차례에 걸쳐 모델 주상변압기를 제작하여 시험하였으며, 외철형 뿐만 아니라 내철형에 대해서도 동시에 시험하였다.

#### 가) 1차 단락강도 시험

기존 변압기와 비교해서 동등 이상의 특성을 갖는 모델 주상변압기를 제작하였으며, 층간 절연은 복합 절연방식을 적용하였다. 단락특성을 개선하기 위해 함침공정 없이 기계력 측면 보강 차원에서 프레임 지지구조만을 보강하였다. 표 2에 외철형 모델 주상변압기에 대한 특징 및 단락강도 시험 결과를 나타내었다.

시험결과 기존의 변압기와 같은 방법으로 바니시를 1회 함침한 시료의 경우 단락시험 후 %임피던스 변화율이 7.5%를 초과하여 불량한 결과를 나타내었으며, 2회 함침한 시료의 경우는 기준에는 부합하였으나 임피던스 변화율이 컸다. 이것은 아라미드 절연지 채용에 의한 것으로 판단된다. 아라미드 절연지가 셀룰로오스 절연지에 비해 바니시 흡수율이 나 접착력이 떨어지기 때문인 것으로 판단된다.

표 2. 모델 주상변압기 단락강도 시험결과

Table 2 Results of short circuit withstand strength of a model pole transformer

시료번호	용량 및 전압	제작방법	권선 및 조임쇠 보강	단락 후 %임피던스 변화
1	1 φ 100kVA 13200 -230/115V	복합절연 A종+H종	바니시 1회	12.44%
2	1 φ 100kVA 13200 -230/115V	복합절연 A종+H종	바니시 2회	7.18%
3	1 φ 100kVA 13200 -230/115V	복합절연 A종+H종	무바니시 (BMC 절연판)	10.05%
4	1 φ 100kVA 13200 -230/115V	복합절연 A종+H종	무바니시 (칠판 보완)	7.84%

표 3. 모델 주상변압기 단락강도 시험결과

Table 3 Results of short circuit withstand strength of a model pole transformer

시료번호	용량 및 전압	제작방법	권선 및 조임쇠 보강	단락 후 %임피던스 변화
1	외철형 1 φ 100kVA 13200 -230/115V	복합절연 A종+H종	미함침 3 tap	2.4%이하
2	내철형 1 φ 100kVA 13200 -230/115V	복합절연 터트출입 프레임 보강	미함침 3 tap	3.1% 3.9% 6.4%
3	내철형 1 φ 100kVA 13200 -230/115V	복합절연 A종+H종	미함침 3 tap	2.3% 2.2% 2.2%

따라서 복합 절연 방식을 적용할 경우 기존의 셀룰로오스 절연지 함침공정과 동일하게 수행하는 것에 문제가 있음을 나타내고 있다. 복합절연물에 적합한 함침시간과 점도, 온도를 결정하여 적용할 필요가 있다.

시료 3과 시료 4는 기계적으로 지지구조를 보강하고 바니시 함침처리를 하지 않은 것으로 바니시 함침 처리를 하지 않더라도 프레임 구조를 적절히 보강할 경우 단락기계력에 대응할 수 있다는 것을 의미한다.

나) 2차 단락강도시험

표 3은 복합절연 방식을 적용한 시제품 변압기 및 저손실형 변압기의 단락강도 시험결과를 나타낸 것이다. 시험에 사용된 변압기는 단락특성을 개선하기 위해 기존의 방법과 달리 바니시 함침공정을 생략하고 단락기계력 측면에서 취약한 프레임 지지 구조를 보강한 구조로 단락시험에서 내철형 및 외철형 모두 만족할만한 결과를 보였다.

참고 문헌

- [1] “주상변압기 단락특성 개선에 관한 연구”, 최종 보고서, 전력연구원, 2002.
- [2] 손명수, “변압기용 절연재료의 전기적 특성에 관한 연구”, 석사학위논문, 연세대학교, 2001.

4. 결 론

본 논문에서는 주상 변압기의 고장원인을 분석하여 몇 가지 패턴으로 분류하였으며, 규명된 주상 변압기의 고장에 대한 대책으로서, 모델 주상변압기를 설계 및 제작한 후 단락강도 시험을 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 주상 변압기의 품질상 문제점은 작업자 및 사용자의 교육과 제조자의 적절한 시험검사가 이루어질 경우 상당부분 줄일 수 있을 것으로 판단된다.
- 2) 절연 및 구조적으로 취약한 부분인 1차 권선 coil end의 시작과 끝 부분의 절연방법 또는 제조방법의 개선이 필요하다.
- 3) 1차 붓싱의 누유는 캡 조립방법의 표준화가 필요하며, 구조 및 작업방법의 개선이 요구된다.
- 4) 단락강도 개선을 위해 수행하고 있는 바니시 함침은 변압기 용량 및 권선 형태에 따라 최적 함침조건을 설정할 필요가 있다.
- 5) 단락기계력 향상에 바니시 함침이 도움이 될 수 있지만, 장기신뢰성에는 나쁜 영향을 미칠 수 있으므로, 프레임 구조를 일부 보강함으로써 함침공정 없이 단락기계력에 대응할 수 있다고 생각된다.

지금까지 주상변압기의 단락강도 향상을 위해 모델 주상변압기를 새로운 복합절연방식을 사용하여 설계·제작한 후 만족할만한 기계적성능 시험결과를 얻었다. 추후에는 이와 같은 기계적 성능향상은 물론, 전기적 특성 시험과 각종 시물레이션을 통한 구조적 보강이 필요할 것으로 생각된다.

본 논문의 주상변압기 고장 분석과 모델 주상변압기의 단락강도 시험결과는 실제 주상변압기를 설계, 제작 및 운용하는데 도움을 줄 것이며 배전계통의 전반적인 신뢰성 향상에 기여할 것으로 사료된다.