

혼합절연을 이용한 초저손실급 주상변압기 개발에 관한 연구

(A Study on the Development of Super Low-loss Type Pole Transformer Using the Hybrid Insulation)

민윤홍* · 신대철

(Yun-Hong Min · Dae-Chul Shin)

요 약

주상변압기는 고객에게 직접 전력을 공급하는 설비로서 전력공급의 안정성확보를 위한 중요한 기자재 중 하나이다. 하지만 제조결함에 의한 3년 이내의 초기고장 또는 13년이 초과 사용한 후의 열화고장이 빈번히 발생하고 있어 변압기 품질분석을 통한 신뢰성이 개선된 주상변압기 개발이 필요하다. 본 논문에서는 열적, 기계적, 전기적으로 성능이 향상된 새로운 모델의 혼합절연 주상변압기를 개발하였다. 변압기의 기계적, 열적특성을 향상시키기 위한 혼합절연 방식에 대한 설계 및 제작방법을 제시하고 과부하시험을 시행하여 순간최대부하에 대응할 수 있도록 과부하내량 160[%] 까지 증가시킬 수 있음을 확인하였다. 또한 본 논문에서는 100[kVA] 1대를 시제품으로 제작하여 단락강도시험과 변압기 관련 절연시험을 시행하여 전자기계력의 분석과 단락강도설계 향상 방안에 대하여 설명하고 이와 관련하여 연구한 결과에 대해 논하였다.

Abstract

The pole transformer is one of the most important facility to insure the stability of electric power supply, which distributes electricity to customers directly. However there are a lot of defects which are caused by manufacturing fails(in 3 years) or deterioration (in 13 years), so we need a more improved transformer which insures quality. This thesis talks about the development of the new-type transformer using the hybrid insulation that is durable thermally, mechanically, and electrically. It would show how to lay out and produce the transformer using the hybrid insulation. And finally we are sure that we could increase the utilization rate of a transformer by 160% as compared with its own capacity through the overload test. Also, we carried out the examination about the short-circuit and insulation with a 100[kVA] model transformer, so that we expound the analysis of magnetic-mechanical forces intensity and the measure for improving short-circuit efficiency.

Key Words : Hybrid insulation pole-transformer, Short circuit test, Magnetic mechanical forces

* 주저자 : 호서대학교 전기공학과 박사과정,
한국전력공사 안산지점
Tel : 031-412-6283, Fax : 031-412-6279
E-mail : myh9032@kepeco.co.kr

접수일자 : 2007년 5월 15일
1차심사 : 2007년 5월 17일
심사완료 : 2007년 6월 1일

1. 서 론

현재 국내 배전용변압기 제조업체가 40여개로 영세한 실정이며 생산설비나 기술 인력이 부족하여 제

조 품질 개선 및 기술개발에 투자할 여유가 없어 적극적인 품질개선이 이루어지지 않고 있다. 주상변압기는 전국에 산재하여 있어 고장발생시 정전과급 영향이 크고, 고장복구에도 막대한 비용과 인력이 소요되고 있다. 그리고 변압기 제작자 간의 가격경쟁의 심화로 품질향상이 거의 이루어지지 않고 있으며 제조결함에 의한 고장발생이 증가하는 추세이다. 한편 주상변압기의 성능시험에서 단락강도 등 문제점들이 여전히 발견되고 있다. 또한 변압기 수명에 직접적으로 영향을 주는 권선내부 층간단락 고장 및 절연 등의 문제는 줄지 않고 있다.

변압기 권선의 설계 및 제작방법이 국외 변압기와 거의 유사한 것을 감안할 때 권선의 바니시 함침이 층간 절연 성능에 많은 영향을 주는 것으로 판단된다. 바니시 함침공정에서 에나멜 코팅이 열화되거나 바니시 함침 불량에 의한 권선내부에 보이드 및 이물질의 함유 가능성이 높은 것으로 나타났다[1]. 따라서 본 논문에서는 주상변압기의 신뢰성 제고와 과부하에 대한 수명특성을 향상시키기 위해 혼합절연방식을 적용한 시제품 변압기를 제작 하였다. 동일사양 표준형 주상변압기와의 비교를 통해 수요자에게에 대한 분석과 경제성을 검토하였다. 그리고 부하율 130~140[%]로 운영하였을 경우 설계수명을 계산하였으며 혼합절연 주상변압기의 연구내용을 본 논문을 통해 소개하고자 한다.

2. 혼합절연주상변압기 구조적 특징

현재 배전용 변압기 권선에 사용되는 주재료의 도체는 주로 동이나 알루미늄이 사용되고 있으며 권선의 온도상승이 55~65[°C]이며, 권선의 층간절연으로 대부분 셀룰로오스계 절연지를 사용하고 있다. 하지만 국내의 슬립형 주상변압기의 경우는 권선부분 절연에 아라미드계 H종 고온절연지를 적용하고 있으나 고온절연지의 가격이 비교적 높아 경제성 문제로 특수한 목적 이외에는 널리 보급되지 못한 실정이다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 연구에서는 주상변압기의 열적, 기계적, 전기적 특성을 개선하기 위해 권선층간 절연방식을 개선하여 종래의 배전용 변압기에 비해 절연특성과 과부하에 대

한 특성이 개선된 경제적인 구조와 권선온도 상승을 억제하여 변압기 층간단락의 소손을 개선시킨 혼합절연 방식의 배전용 주상변압기 100[kVA] 1대를 시제품으로 제작하였다. 시제품에 적용된 혼합절연방식은 과부하내량 증진과 단락강도향상에 중점을 두어 설계하였다. 그리고 경제성을 고려하여 변압기 내부구조에서 기계적, 열적으로 스트레스가 가해지는 부분은 고온절연지인 아라미드계 H종 고온절연지를 사용하여 경제적인 부담을 최소화 하여 수명 및 신뢰성을 향상시키는 개념으로 설계 하였다. 또한 층간 절연은 혼합절연 방식을 채택(A종+F종+H종)하였으며 변압기 내부권선 절연 등의 열적 상승이 수반되는 부분에는 직접 F종급(Epoxy Prepreg)Tape를 적용하였다. 권선부 층간절연을 보충하여 자세히 서술하면 권선 및 복합절연 구성도는 1차권선부에서 층별로 감겨지고 이권선부를 층간 절연부분에 다이아몬드지와 고온절연지를 혼합하여 사용한 복합절연부를 적용시킨다. 이 복합절연부는 권선부 코일에 직접적으로 접하는 부분에 고온절연지를 간접적으로 접하는 부분에는 다이아몬드(DPP)지를 사용하고 코일의 미끄러짐과 견고한 접착을 위하여 F종급 반경화 에폭시 그라스포 절연 Tape로 최종 절연처리 하였다. 절연물은 A종을 75[%]로 적용하고 H종을 24[%], F종을 변압기 전체절연물의 1[%] 정도로 설계하였으며 과부하조건은 160[%] 3~4시간으로 하였다. 그림 1은 혼합절연 주상변압기의 권선 및 혼합절연방식의 구성 도를 나타낸 것이다. 본 연구를 위해 설계 제작된 주요 설계조건은 표 1과 같다.

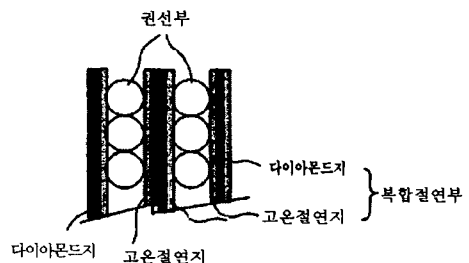


그림 1. 권선 및 혼합절연 구성도
Fig. 1. Organization of winding and hybrid insulation

표 1. 주요 설계조건

Table 1. Principal of condition design

항 목	설 계 조 건
[%] 임피던스	3.2±10[%]
절연유 온도상승	65[°C]
권선 온도상승	65[°C]
바니시 사용여부	None
절연지사용	F종급Tape+H(Aramid)종+A종
수 명	20년 이상
원가상승	표준형태비 10[%]이내
Oil Duct	유덕트를 최소화한 설계

3. 신 모델 변압기의 설계 및 제작

3.1 신 모델 변압기 설계개요

혼합절연방식을 적용하여 제작할 신 모델 변압기의 %임피던스는 기존 표준형과 동일하게 하였으며 권선온도 상승을 기존의 55[°C]에서 65[°C]로 상승하여 설계하였다. 1차측의 탭은 기존탭 13,200[V]를 가운데 두고 상위탭 13,800[V]와 하위탭 12,600[V]를 두었으며 본 연구에서의 신 모델 변압기는 기존의 주상변압기보다 과부하내량 및 무부하손이 향상되고 수명이 증가하는 방향으로 개념을 설정하고 설계하였다. 변압기 Hot Spot는 주위 발열체 온도보다 보통 10[°C]정도 높게 나타나는데 권선온도, 절연유 온도 등을 낮추고 절연체의 허용온도를 높게 함으로써 변압기 용량을 증대하는 효과가 되도록 설계하였다.

3.2 신 모델 변압기 권선설계 및 제작

본 신 모델 변압기 권선에 사용되는 주재료로서 도체는 주로 동(Copper)을 사용하고 절연물에는 그림 2와 같이 셀룰로이드계 A종 절연재료(DPP : Diamond Pattern Paper)로 다이아몬드지와 H종 절연재료 Nomex Paper를 혼합절연 사용하였다.

또한 귀접이 부분과 그 위에 F종급 Epp-tg-tape를 사용하였다. 1, 2차 권선은 전기적으로 중심점 배열에 대한 균형을 유지하도록 그림 3과 같이 기자력

의 수직변위 2[mm]이하로 최소화 및 권선대칭 설계로 축방향 기계력을 향상시키고자 하였다.

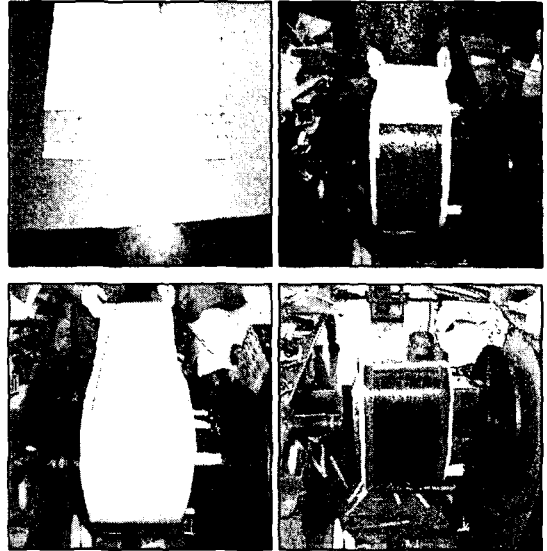


그림 2. 혼합절연 작업장면

Fig. 2. Manufacturing for hybrid insulation

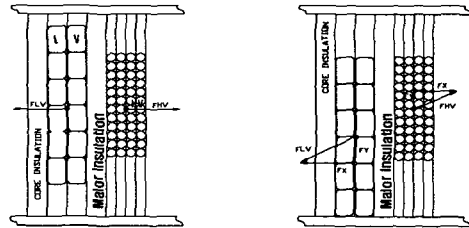
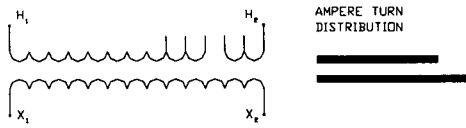


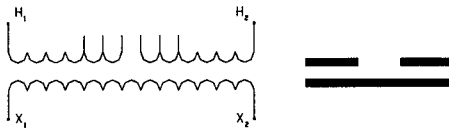
그림 3. 1, 2차권선간의 축방향힘 균형 및 불균형상태
Fig. 3. Balanced and unbalanced radial forces between primary and secondary coils

교일의 불균형을 탭으로 인하여 발생하는 것과 관련하여 본 논문에서는 단락특성 향상을 위하여 1차 권선 탭을 중앙에서 인출하였다. 이는 설계시 그림 4와 같이 끝단 탭의 권선과 비교해 보면 그림 5와 같이 1/4의 힘만이 권선에 영향을 주는 것으로 RTE 변압기 자료에 나타나 있다. 그리고 탭의 위치에 따라 축방향 힘의 크기를 크게 줄일 수 있다는 것을 알 수 있다[2-3].



$$Fa = 4.5\pi a (NI)^2 K \times 10^{-8}$$

그림 4. 1차권선의 끝단 측에 탭이 부착된 모양
Fig. 4. Shape of primary winding with taps at end winding



$$Fa = 1.12\pi a (NI)^2 K \times 10^{-8}$$

그림 5. 1차권선의 중앙측에 탭이 부착된 모양
Fig. 5. Shape of primary winding with taps at center winding

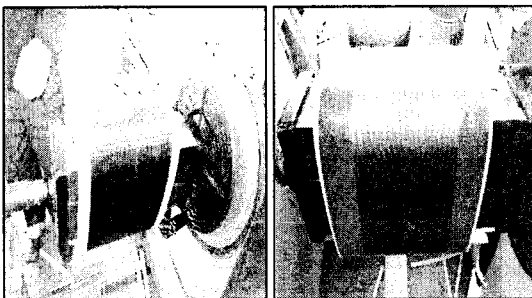


그림 6. 1차권선의 5층에서의 탭 인출 모양
Fig. 6. Shape of primary winding with taps located in the five layer

그림 6은 1차권선의 중앙(5층)에서의 탭 인출장면을 나타낸 것이다. 인출 시 축방향으로 작용하는 힘이 1/4로 경감(RTE자료)되기 때문에 설계에 반영하였다. 아라미드 계열인 H종 절연물의 우수한 열적 기계적, 전기적 장점 때문에 이를 설계에 적용했을 경우 변압기의 권선에서 절연물이 차지하고 있는 치수(또는 양)를 줄일 수 있으며 일반 셀룰로오스 절연물에서 적용하고 있는 절연거리를 줄일 수 있다. 이러한 점은 또한 동일체적에서 절연물을 아라미드 계열의 H종 절연물로 직접 대체했을 경우 많은 전류를

흐릴 수 있으며 설계변경 가능한 사항은 다음과 같다. 첫째, 절연물의 줄어든 치수만큼 도체치수 또는 냉각부위를 증가시켜 용량을 증가시킬 수 있다. 둘째, 고온 특성 때문에 냉각다트를 일부 생략할 수 있다. 셋째, 라인엔드(Line end)측의 전계분포 완화 및 절연보강을 위해 보강부분의 수량을 A종 절연지보다 적게 할 수 있다. 본 설계에서 혼합절연 주상변압기의 구체적인 설계내역 중 권선의 Volt/turn은 2차 턴수를 V/T으로 나누어 정수의 값을 취하면 23T이 되나 분할교차 및 철손 값을 고려하여 2차 턴수를 24 턴으로 설정하였다. 따라서 V/T은 230/24 따라서 9.58333이 된다. 1차 턴수는 [13200V/9.58333] 1377 턴이 되었다. 설정된 턴수에 대한 오차정도는 식 1과 같다.

$$e = \frac{N_1 \times (V/T) - E_1}{E_1} \leq \pm \frac{1}{200} \quad (1)$$

$$= \frac{1377 \times 9.58333 - 13200}{13200} = 0.000284438 \pm \frac{1}{200}$$

전류밀도는 혼합절연물(A종+H종+F종)을 채택함으로써 3.0~3.3[A/mm²]로 설계하고 절연은 2차측 도체(B종급 코팅각선)위에 H종 1회, F종급(Epoxy Prepreg)테이프 1회 사용하여 그림 7과 같이 혼합 절연하여 제작하였다.

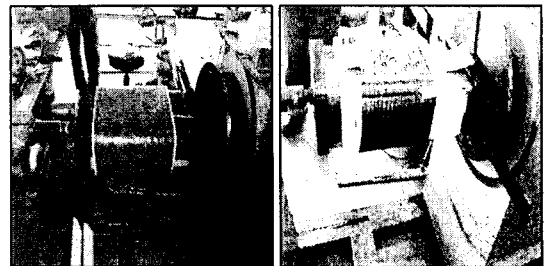


그림 7. 2차권선 및 혼합절연 장면
Fig. 7. Manufacturing for hybrid insulation and of secondary winding

또한 1차 턴수는 1377턴에 10층으로 하였으며 5층에서 탭을 인출하였다. 층간절연은 혼합절연으로 1층에서 6층 사이에는 Nomex 2장 다이아몬드지 1장을 7층에서 10층까지는 Nomex 2장 다이아몬드지 2장을 사용하였다. 표 2는 본 시제품에 대한 1, 2차 도

온압절연을 이용한 조겨손실급 주상변압기 개발에 관한 연구

체로 선정된 자료이다. P-S간 주면덕트는 생략하였고 이면덕트[(4.5d×5)×2]를 사용하였다.

표 2. 1차 및 2차권선 선정
Table 2. Election of primary winding and secondary winding

구 분	1차권선	2차권선
정격 전류	7.57[A]	434.8[A]
도체 종류	PEW	코팅평각선
도체 크기	φ1.8	3.2×10.0×4본
단 면 적	2.545[mm ²]	132.2[mm ²]
전류 밀도	2.98[A/mm ²]	3.29[A/mm ²]

3.3 절연지 기계적 특성 비교

그림 8은 Kraft 및 Nomex 절연지의 인장강도를 비교한 그림이다. Kraft 절연지의 경우 6[kgf/mm²] 정도의 인장강도를 가지면 Nomex 절연지의 경우 13[kg/mm²] 정도의 인장강도를 가지는 것을 알 수 있다. Nomex 절연지가 2배 이상의 기계적 특성이 좋아 단락강도 또한 개선될 것으로 기대된다. 또한 혼합 절연시 기대되는 효과는 과부하에 의해서 발생된 열 열화에 의한 변압기 권선의 열적 스트레스를 완화 효과가 크며, 특히 유전율이 유사한 고온절연지와 일반 다이아몬드지를 혼합 사용하여 권선에서 발생하는 열을 직접 접하고 있는 고온절연지가 분담하게 되어 일반 다이아몬드지의 열적인 스트레스를 상당부분 완화 시킬 수 있을 것으로 기대된다. 그리고 경제적인 측면에서도 열적으로 취약한 부분에 대해서만 고온절연지를 사용하고 나머지 부분은 일반 다

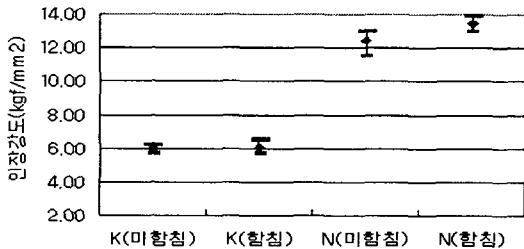


그림 8. Kraft 및 Nomex지의 인장강도 비교
Fig. 8. Tensile strength comparison between Kraft and Nomex paper

이아몬드지를 사용하는 방식으로 고온절연지의 사용량을 최소화할 수 있어 성능향상에 따르는 경제적인 부담을 최소화할 수 있다. 그리고 DPP를 사용한 부분적인 수지코팅은 코일마다의 접착강도를 기계적으로 강화시킴으로써 단락회로가 구성될 경우 발생하는 상당한 크기의 축방향 및 방사상의 기계력을 안전하게 억제할 수 있다[2-3].

3.4 철심설계

철심(Core)은 자기회로를 구성하는 핵심적인 구조의 하나로 자속의 흐름을 원활하게 하기 위해 입자의 결정구조가 압연방향으로 배열된 방향성 규소강판을 사용하였으며 철심의 와전류 손실을 최소화하기 위하여 강판의 두께를 얇게 하기 위해 0.23 [mm]를 적용하였으며 기존변압기의 손실보다 더욱 줄이기 위해 청정도, 잔류응력, 표면조도를 개선하였으며 저손실급 PH-06(30PH139)을 사용하여 중량 및 무부하손을 획기적으로 개선하였다.

계산된 권선 폭과 권선의 적고에 의해 철심의 창구가 결정되며 주어진 무부하손실 및 철심재료의 종류, 작업방법에 의해 자속밀도와 철심의 단면적이 결정된다. 본 시제품의 자속밀도는 16,350[Gauss]로 설계하였고 코아의 재질은 PH-06/0.23[t]를 설계하여 제작하였다. 또한 무부하손실은 190[W], 무부하전류 0.3[%] 이하, 효율은 98.45[%] 이상 되도록 설계하였다.

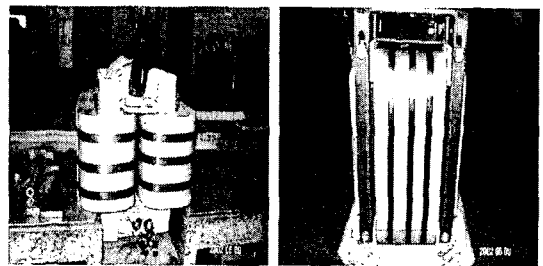


그림 9. 시제품 변압기의 철심조립장면
Fig. 9. Photos of the core assembly for prototype transformer

그림 9는 시제품 변압기의 철심 조립장면을 나타낸 것이다. 표 3은 본 혼합절연 주상변압기의 제작에

사용된 철심의 물리적 특성을 나타낸다. 그리고 표 4는 시제품 변압기 철심의 기계적 설계 결과이다. 주어진 규정에 모두 만족하므로 종합 설계표 되로 제작하였다.

표 3. 철심의 물리적 특성
Table 3. Physical character of core

두께	0.23[mm]
밀도	7.65[kg/cm ³]
체적고유저항	47[μΩ-cm]
포화자속밀도	16,350[Gauss]
점적율	95[%]이상

표 4. 변압기 철심설계 결과
Table 4. Result of transformer core design

구분	설계값	
철심	core 폭	200[mm]
	권판두께	116[mm]
	단면적	220.4[cm ²]
	창구크기	68×330[mm]
	외형크기	(184×2)×446H
	중심장	97.31[mm]
	중량	164.1[kg]
	재질	PH-06/0.23[mm]
	자속밀도	16,322[Gauss]

4. 신 모델 변압기 실험 및 결과분석

4.1 내전압시험

본 시험에서 인가된 시험전압은 표 5에서 한전 표준형 주상변압기 구매시방서에 명기된 전압기준에 의거하여 시행되었으며 본 논문에서는 표 5의 시험 결과에서 볼 수 있는바와 같이 AC 내전압시험과 내전압보다는 좀더 가혹한 뇌임펄스 내전압시험을 시행하여 인가된 임펄스 내전압 조건에서 모두 이상 없이 통과되었다.

그림 10, 11은 임펄스 내전압 시험시 측정된 인가 전압의 파형을 나타내는 것으로 뇌임펄스 파형에 왜곡이 없이 측정되었으며 절연시스템의 전기적 특성이 양호한 결과를 나타내었다.

표 5. 절연내력시험 결과
Table 5. Result of dielectric strength test

시험항목	시험 방법	결과
임펄스 내전압	- BIL 100[%]전압 (125[kV], 1.2×50[μs]) - 시험회수 : 반파 5회 재단 5회, 전파 5회	양호
AC 내전압	- 40[kV], 60[Hz] 20분	양호

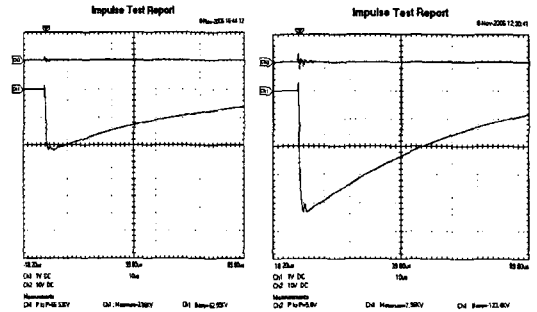


그림 10. 임펄스 내전압시험 결과 파형(반파, 전파 5회)
Fig. 10. Lightning impulse test wave and test results

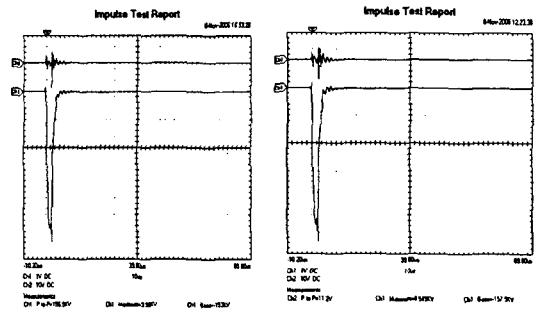


그림 11. 임펄스 내전압시험 결과 파형(재단 5회)
Fig. 11. Lightning impulse test wave and test results

4.2 시제품 변압기 과부하 가속열화 시험

시제품 변압기의 가속열화 시험을 위해 2차단락법에 의한 과부하시험을 실시하였다. 본 연구에서 과부하시험은 변압기에 가해지는 과부하상황의 판단을 위해 변압기에 대한 주위온도를 일정하게 유지한 상태에서 우선 정격부하 상태의 변압기 최상부 유온[°C]증가를 시험하고, 직전부하와 과부하 크기 및 지속시간을 가변하면서 변압기 최상부 유온 상승 값을 시험하였다. 혼합절연 주상변압기의 시험조건은 초기부하율은 정격부하의 50[%], 75[%],

90[%]에서 포화시점까지 지속한 후 과부하시험을 하였으며 초기부하율의 설정은 ANSI/IEEE C57.91-1981 규격의 시험상황에 근거하였으나 20 [%]는 현실성이 없어 생략하였고 100[%]는 90[%] 부하로 대체하여 50[%], 75[%], 90[%]로 초기부하율(직전부하율)을 설정하여 시험하였다. 시험지속 시간은 8시간으로 하고 1, 2, 4, 8시간마다 각각의 유온을 측정하였고 시험지속시간은 ANSI/IEEE C57.91-1981 규격을 참조하였으며 24시간 지속시험은 생략하였다[9]. 과부하한도 시험은 최대160[%]까지로 설정하였으며 130[%], 140[%], 160[%]에서 시험하였다. 또한 본 실험의 목적중 가장 중요한 것은 과연 정격부하에 대한 온도상승은 얼마인가 하는 것이다. 따라서 이것을 초과하여 온도상승을 일으킬 수 있는 상황은 모두 과부하 상황이라고 판단하는 것이므로 시료에 대한 100[%] 온도 포화시험을 실시하였다. 100[%] 포화시험은 최상부 유온측정 실험뿐만 아니라 권선의 평균온도 측정시험도 병행하였다. 주위온도는 본 실험의 경우 10~30[°C]로 유지하였다. 변압기 과부하 가속열화시험 결과는 직전부하 90[%]에서 각각 과부하의 크기 및 지속시간에 시간별 온도상승 크기로 나타내었다. 100[%]온도상승시험결과 유온 46.3[°C], 권선온도 59.8[°C]로 설계 설정값 65[°C]를 만족하였다. 표 6은 직전부하 90[%]일 경우 온도상승 시험결과이고 그림 11은 160[%] 과부하(온도상승) 시험기록(직전부하 75[%])을 나타낸다.

표 6. 직전부하 90[%]일 경우 온도상승 시험결과
Table 6. Result of temp. rising test when a just before lode is 90[%]

구 분	160[%]		비 고
	유온 [°C]	주위온도 [°C]	
0시간	63.4	10	평균 주위 온도 11.5 [°C]
1시간	89.8	10	
2시간	103	10.5	
4시간	124	11	
8시간	136	16.2	

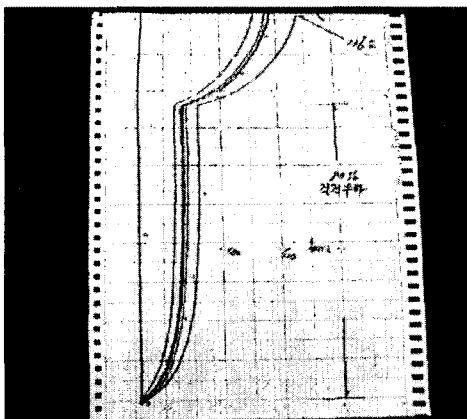


그림 11. 160[%] 과부하(온도상승) 시험기록(직전 90[%])

Fig. 11. Result of 160[%] overload(temp. rising) test

4.3 시제품 변압기 단락강도 시험

본 연구에서 시제품 변압기 단락강도 시험회로는 저압단자에 단락접지 사고가 발생한 것으로 가정하여 변압기의 저압단자 및 접지 축을 단락시켜 시험을 하였다. 기본적인 시험회로 및 사용기기는 그림 12와 같으며 단락전류를 공급하는 전원은 단락 변압기(12,000[kVA])를 사용하였으며 단락강도 시험은 한국전력공사(의왕시 소재) 시험설비로 시험하였다.

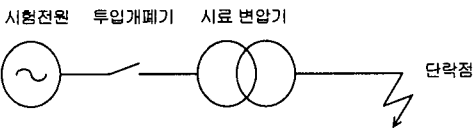
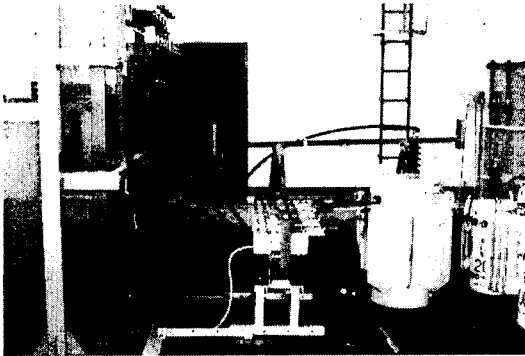


그림 12. 모델변압기 단락시험회로 및 결선장면
Fig. 12. Short circuit test and connecting figure of model transformer

4.3.1 시험조건 및 단락전류의 투입방법

시험은 한전적용 시방서인 ES148에 따르며, 이 시방서는 5[kVA]이상의 유입식 변압기에 대한 단락강도시험 시방서로 규격조건과 적용된 시험방법으로 본 시제품도 이 방식을 적용하여 실험을 하였다. 시료 변압기의 전원 인가측은 1, 2차측 어느 곳이든 가능하나 본 설비는 2차측 단자를 단락하여 시행하였다. 단락전류의 투입방법은 단락 결선된 상태의 변압기에 전압을 인가하는 방식으로서 대부분의 시험소에서 채택하고 있는 방법이다. 시료변압기의 저압측은 미리 단락된 상태에서 그림 12와 같이 시험전원을 시료의 고압측에서 인가하는 방법이다.

4.3.2 시험전압 조건 및 전류조건

인가되는 전압은 110[%]를 초과할 수 없으며 어느 시험 회로든지 시험 중에 전원 인가 측의 시료변압기의 단자에서 측정된 전압은 95~105[%]가 유지되어야 한다. 그러므로 전압측정은 시료의 전원 인가측에서 측정하였으며 그림 12 시험회로의 경우 투입개폐기앞단에서 측정하였다. 전류조건은 전원측 시료변압기의 단자에서 측정하며 시험전류의 제 2사이클에서 측정하였다. 본 시험설비에서는 대칭전류의 보다 정확한 측정을 위해 규정된 통전시간중 전류의

시작점과 끝점에서의 전류를 자동으로 측정 기록하였다. 또한 전류는 권선전류를 측정하였고 2차측 전류를 측정하여 변압비로 환산 적용하였다. 측정된 전류는 요구되는 전류의 95[%]이상일 때 유효한 시험이 되므로 본 시험에서도 95[%] 이상이 되도록 실험하였다.

4.3.3 규정시험 전류값 및 시험회수

표 7은 시제품 변압기 규정시험 전류값이다. 본시제품 변압기(100[kVA]) 단락시간은 0.25초를 기본으로 하고 총 6회의 시험중 1회는 시료의 단락임피던스에 의해 결정되는 장시간 대칭전류 시험을 시행하였다. 또한 총 6회의 시험중 2회는 변압기의 특성에 의해 결정되는 X/R값에 따른 비대칭전류를 흘렸고 이렇게 결정되는 비대칭전류는 계통에서 실제 발생할 수 있는 최대값으로 시료변압기의 기계적 강도를 검증하는 방법이다[4-8].

표 7. 시제품 변압기 규정시험 전류치
Table 7. rules test current value of prototype TR

탭위치	시험 전류	과 고 값		통전 시간	기 준 전류배수
		K	Peak		
13.8[kV]	238.9	1.734	414.2	0.25s	31.54
13.2[kV]	250.3	-	-	0.25s	31.54
12.6[kV]	262.8	1.734	455.6	0.25s	31.54

* 대칭전류 장시간 : 1.256(sec)

4.3.4 단락강도 및 특성시험결과

한전 표준구매시방서 내용에 따라 단락강도 시험에 필요한 단락전류(실효값, 파고값), 대칭장시간 전류 및 전압과의 관계를 오실로그램으로 나타낸 것을 측정하였다. 단락전류는 파형에 따라 대칭전류와 비대칭전류로 나누어지며 그림 13은 전형적인 파형 형태이며 본 시제품 변압기 2번 탭에서의 단락전류파형을 나타낸 것이다. 또한 단락강도 시험 전, 후 특성 시험결과 구매시방서 범위에 포함되므로 양호한 것으로 판정되었다.

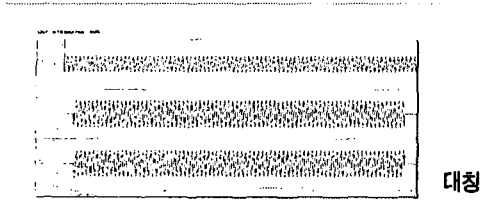


그림 13. 단락강도시험 전류파형
Fig. 13. Short circuit test current wave

본 논문에서의 시제품 변압기 특성시험은 한전구 매시방서와 KSC 4306에 준하여 우선적으로 시험을 하였고 기준특성치의 환산온도는 75[°C]로 하였으며 시험항목으로는 구조 및 외관검사, 절연저항시험, 상용주파내전압시험, 유도내전압시험, 충격내전압시험, 특성시험(무부하손, 전압변동율, 효율, %Iz)을 진행하였다. 특성시험의 설계치 대비 결과치는 표 8과 같이 양호한 것으로 확인되었으며 임피던스변화율은 3.15[%], 3.78[%], 3.78[%]로 규정치 7.5[%]이내로서 시험 결과치가 아주 양호한 것으로 나타났다.

표 8. 단락강도시험 후 특성시험 결과
Table 8. Result of characteristics for short-circuit test

시험 항목		시험기준	시험 결과		
			Tap#1	Tap#2	Tap#3
임피던스	전압[V]	-	422	404	384
	[%]	-	3.20	3.21	3.20
	%Iz	3.2±10[%]	3.27	3.29	3.29
무부하손	[W]	209[W]	-	185	-
임피던스 변화율	[%]	7.5[%] 이내	3.15	3.78	3.78
부하손	[W]	-	1331	1371	1400
전압변동율	[%]	-	-	1.38	-
효 율	[%]	-	-	98.51	-

4.3.5 혼합절연방식과 일반절연방식의 비교

시험결과를 제작측면에서 보면 본 연구에서 제안한 방식의 변압기는 기존의 A종 절연방식의 변압기보다 크기 및 중량을 약 15[%]정도 감소시킬 수 있었으나 고온절연지 사용으로 기존 표준형 주상변압기(187만원)에 비해 제조원가가 약 6.3[%](199만원)

정도 상승하였지만 바니시 함침공정 생략 및 장기 신뢰성 향상 등의 측면에서 현장적용 시 상당한 경제적인 효과가 기대된다.

5. 결 론

본 논문에서는 주상변압기 혼합절연 설계 및 제작 기법을 제시하였다. 주상변압기의 수명을 연장하고 신뢰성을 높이기 위해 혼합절연 방식을 적용한 시제품 변압기를 설계 제작하여 단락강도시험 등 절연시험을 한 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 혼합절연 주상변압기는 과부하에 의해서 발생된 열 열화에 의한 변압기 권선의 열적 스트레스를 완화시켜 과부하 내량을 증가시킬 수 있었으며, 또한 권선을 열적으로 취약한 부분에서만 고온절연지를 사용하여 원가상승을 억제함으로써 제작비용을 줄일 수 있을 것으로 기대된다. 고온절연지 사용으로 기존 표준형 주상변압기에 비해 제조원가가 약 6.3[%]정도 상승하였지만 바니시 함침공정 생략 및 장기신뢰성 향상 등의 측면에서 한국전력공사 배전선로에 적용시 상당한 경제적인 효과가 기대된다.
- 2) 바니시는 열적인 열화를 받게 되면 기계적 특성이 저하되며 함침공정상 층간 절연성능 저하를 가져올 수 있으므로 권선의 바니시함침 없이 지지구조 및 절연보강(중신 프레임구조 및 층간절연) 하여 단락강도 등 절연성능 시험한 결과 단락기계력이 향상되었다(임피던스변화율 : 3.15[%], 3.78[%], 3.78[%]).
- 3) 권선의 축방향으로 이동하는 힘을 억제하기 위하여 국내 최초로 1차권선 중앙(5층)에서 탭을 인출하였고 축방향의 지지구조를 적절히 보강하여 단락기계력에 대응 하였으며 단락강도 시험에서 약 3.72[%]를 감소한 결과를 얻을 수 있었다.
- 4) 동일한 특성을 갖는 혼합절연방식을 적용한 시제품변압기에 대해 과부하시험(160[%]) 결과 과부하내량은 권선온도상승 및 절연유의 온도상승이 절연물의 허용온도상승 한도를 훨씬 밑도는 관계로 허용온도 범위 안에서 정격용량의

160[%]이상으로 증가시킬 수 있는 우수한 특성을 보였다.

본 연구를 통하여 기존 표준형 주상변압기에 비하여 변압기의 크기 및 중량을 15[%] 정도를 감소시키는 성과를 올렸으며 전기절연 측면에서 우수한 혼합절연 주상변압기를 개발함으로써 유입변압기 분야에서 독자적인 설계기술을 확보하였다. 또한 확보된 설계기술을 토대로 절연특성 및 열전달 특성에 대한 연구를 강화하여 본 제품의 성능향상 및 신뢰성향상 연구를 지속적으로 추진해 나아갈 계획이다.

References

- [1] 송일근외, “주상변압기 단락특성 개선에 관한 연구”(최종보고서), 한국전력공사, pp3-5, pp78-79 2002. 12.
- [2] 민윤홍외4인, 저손실형 복합절연 주상변압기 개발 및 단락특성에 관한 연구” 대한전기학회 하계학술대회 논문집(B), pp607-612, 2002. 7.
- [3] 민윤홍, “저손실형 복합절연 주상변압기 개발에 관한 연구” 호서대학교 대학원 pp51-53, 2003.
- [4] 민윤홍,유호근,한종희, “변압기 품질향상 대책” pp92-93, p186, 1996. 09.
- [5] 한국전력공사,“변압기 단락강도 시험규격, pp1-7 1998.06.
- [6] 한국표준협회, “KSC 4306 일단접지변압기”,pp3-6,1990.

- [7] ANSI/IEEE Std C57.12.90-1993, “IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power And Regulating Transformer and IEEE Guide for Short-Circuit Testing of Distribution and Power Transformer” pp56-63, 1993.
- [8] E. W, Tipton, “Vertical Short Circuit Forces Effect of Vertical Unbalance” Westinghouse Co, pp21-25, 1965.
- [9] ANSI/IEEE Std C57.91-1981, “guide for loading mineral-oil-immersed overhead and pad-mounted distribution transformers” pp9-27, 1981.

◆ 저자소개 ◆

민윤홍 (閔允泓)

1957년 11월 4일. 2000년 호서대학교 전기공학과 졸업. 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2007년 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정. 1980년~현재 한국전력공사 안산 지점 근무.

신대철 (申大澈)

1952년 3월 2일. 1973년 건국대학교 전기공학과 졸업. 1975년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원(박사). 1989 ~1990년 나가사키대학 visiting scholar. 1979년~현재 호서대학교 공과대학 전기공학과 교수.