

저손실형 복합절연 주상변압기 개발 및 단락특성에 관한 연구

민윤홍, 유호근, 배선기, 김호철, 이윤재
 . 한전서울자재관리처, 인천대학교, 광표전기(주) ...

A Study on the Development of Low-loss Type Hybrid Insulation Pole Transformers and

Yun-Hong Min, Ho-Keun You, sun-Ki Bae, ho-chul-Kim, Yun-Jae Lee
 KEPCO Seoul Logistics Department Kwang Pyo Electric Industry Co.Ltd

Abstract

This paper presents the first domestic model product of hybrid Insulation low-loss type pole transformer, with increased overload ability, increased life, reduced loss, focusing improved short-circuit characteristics. The capacity of this transformer is 100 KVZ, rates first voltage 13200 V and secondary voltage 230/115 type. The volume of model transformer that was produced in high temperature using hybrid insulation can be reduced to 10-20% in comparison with that of present transformer with the same capacity. In this paper, we did short-circuit test and tested general characteristics of model transformer. In addition, we suggested design application new concept and methods through this experiment.

1. 서 론

현재 배전계통에 사용되고 있는 권철심형 배전용 주상변압기는 대부분 A종 절연물(Cellulose)을 사용한 종이절연방식으로서 일반고객에게 전력을 직접 공급하는 최말단 전력변환 기기로서 전력사업에 있어 매우 중요한 설비중의 하나이다. 또한, 전주위에 설치되는 단상 주상변압기가 주류를 이루고 있으며 2001년 12월 기준으로 약130만여대가 운전되고 있다. 최근 고도의 경제성장과 생활의 질이 향상되면서 전력수요의 증가와 더불어 고객으로 부터의 서비스 향상에 대한 요구가 증대되고 있으며 도시의 과밀화 현상 및 전력소비경향의 급속한 증가로 인하여 배전용 변압기는 부하량이 불규칙적으로 변하고 때로는 과부하가 자주 나타난다. 이러한 요인들은 배전용 변압기의 과열현상등을 일으키고 열화를 촉진하여 결과적으로 절연파괴에 따른 소손사고를 유발하게 된다. 또한 산업정보화 시대에는 전기에너지가 갖는 비중이 커지고 있고 신뢰성, 경제성, 안전성, 환경친화성 및 과부하내량을 고려하여 고객의 전력증가에 대한 수용성이 고려되어야 한다.

주요 배전기자재 중 주상변압기는 고장 등으로 인한 정전은 고객에 대한 양질의 서비스 및 고품질의 전력을 제공하는데 큰 지장을 초래하고 있다. 최근 5년('97~'01)이내에 제작한 주상변압기의 검수시험시 불합격한 유형을 살펴보면 총 354건중 204건(57.6%)이 단락강도시험 및 충격내전압 시험에서 불합격이 발생되었고 2001년도 하자가 발생된 소손변압기 대부분이 1차권선불량 및 1,2차권선의 절연이 불량한 것으로 나타났다. 따라서, 현재의 배전용 주상변압기는 주로 절연 및 단락강도특성이 취약한 상태로 제작되고 있으며

이로 인하여 변압기 수명에 지대한 영향을 끼치고 있는 것으로 나타났다. 따라서 경제성손실 및 품질개선이 시급하며 주상변압기의 고장억제 및 신뢰도 향상을 위하여 우리의 환경에 알맞은 새로운 모델의 배전용 주상변압기 개발이 현실점에서 필수적으로 요구되고 있고 절대적으로 필요하게 되었다. 이러한 필요에 의해 시제품 제작된 저손실형 복합절연 주상변압기의 연구 내용을 본 논문을 통해 소개하고자 한다.

2. 본 론

2.1 시제품 변압기 개발목표 및 설계사양

본 저손실형 복합절연 주상변압기의 설계조건은 과부하내량 증진과 단락강도향상 및 경제성을 고려하여 복합절연 방식을 채택(A종+B종+H종)하였으며 변압기 내부 권선절연 등의 열적상승이 수반되는 부분에는 직접 또는 주위를 F종급 반경화 에폭시그라스포(Semi-cured Epoxy Glass Cloth) + H종(Nomex지)으로 하고 기타부분에는 기존에 주로 사용하고 있는 다이아몬드지(D P P / Diamond-Pattern-epoxy-coated Paper)등 A종 절연물로 절연시키는 방식을 택하였으며 절연물의 적용은 A종을 변압기 전체 절연물의 75%정도로 하고 H종을 24%, F종을 변압기 전체 절연물의 1%, 정도로 설계하였으며 과부하조건은 160%(3-4시간)로 하였다. 본 연구를 위해 설계 제작된 시제품 변압기의 개발목표 및 설계사양은 표1과 같다.

정 격	설계조건	
상수 및 주파수	1φ 60Hz	
정격용량	100 kVA	
정격전압(1차,2차)	13.2kV / 230V-115V	
정격전류(1차,2차)	7.58A / 434.7A× 2W	
% 임피던스	3.2±10%(2.88~3.52%)	
온도상승	권 선	80°C 이하
	절연유	75°C 이하
특성(규 격) (저손실 기준 임의설정)	무부하전류	: 1.4%이하
	무부하손실	: 206W이하
	전압변동율	: 1.6%이하
	효 율	: 98.3%이상

표 1. 시제품 변압기의 설계조건

2.2 절연지

유입변압기의 절연재료에는 절연지, 절연유 등이 사용되고 있는데 이러한 재료는 운전중인 부하전류에 의한 열 등의 영향으로 경년과 함께 열화된다. 특히 절연지에 대해서는 절연성능의 저하는 거의 없지만 기계적 손상이 크게 저하하는 것으로 알려져 있다. 절연유는 성능이 저하하면 비교적 용이하게 교체할 수 있지만 절연지에 있어서는 용이하게 교체할 수 없고 변압기 전체를 교체해

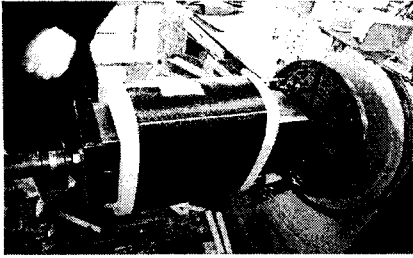


그림 5. 1차 권선의 5 Layer 에서의 Tap인출 장면

구 분	2 차	1 차
정격전류	434.7A	7.58A
도체종류	폴리에스터평각선 (PEW, 코팅)	폴리에스터 에나멜 동선
도체크기	3.2×10.5×4본	φ 1.8
단면적	132.2mm ²	2.545mm ²
전류밀도	3.29A/mm ²	2.98A/mm ²

표 3. 1,2차 도체선정

일반적으로 도체의 전류밀도는 Cu의 경우 1.5 ~ 3.3A/mm² 정도로 설정하나 본시제품변압기의 권선은도상 승 제한치는 80K로서 저손실형 주상변압기의 온도상승 치인55K에 비교할 때 35K가 높은 고온변압기이다. 따라서복합절연물(A종+H종)을 채택하였으므로 저손실 화 추구 등으로 전류밀도는 3.0 ~ 3.3 A/mm²로 설계함으로써 권선제작에 투입되는 동량을 줄이고자 했다. 변압기 권선 및 철심설계 한 Data를 정리하면 표 4와 같고 1,2차권선단면은 그림 7 그리고 회로도는 그림 6과 같다..

구 분	1차	2차
용 량	100 kVA	
정격전압	13,200V	230/115V
정격전류	7.58A	434.7A
사용도체	PEW φ 1.8	3.2×10.5×4본 평각동선
단면적/전류밀도	2.545/2.98	132.2/3.29
권선폭	260mm	302mm
층간전압	2701V	230V
층간절연두께	0.86mm	0.25mm
권선적고	27.0mm	14.1mm
층턴수	1377T	24T
중심장	712mm	865mm
권선길이	1195m	19.3m
권선중량	27.1kg	22.7kg
권선저항(100°C)	10.6405Ω	0.0031Ω
저항손	650W	645W
부하손	742W	735W
Core 폭	200mm	
권판두께	116mm	
단면적	220.4cm ²	
창구크기	68×330mm	
외형크기	(181×2)×490H	
중심장	97.31cm	
중 량	164.1kg	
재질	30PH139(PH-06/0.23mm)	
자속밀도	16,350Gauss	

표 4. 변압기 권선 및 철심설계 결과

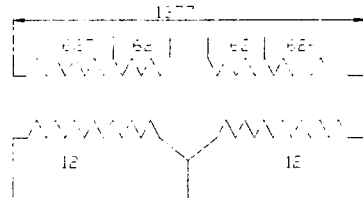


그림 6. 1,2차권선 회로도

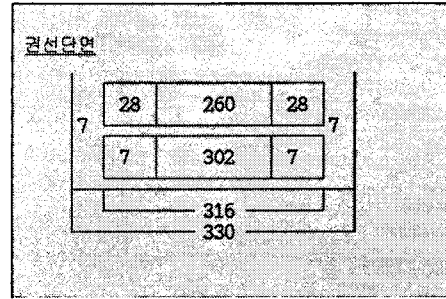


그림 7. 1,2차권선 단면

2.5 단락강도 설계

2.5.1 단락기계력의 고찰

변압기 권선에서 발생하는 커다란 전자기계력은 권선의 %Z의 크기, 사용재료의 종류등 많은 요인들에 의해 변하므로 정확히 계산을 하기에는 어려움이 있다. 외국뿐만 아니라 우리나라의 경우도전자기계력에 대한 계산방법도 제조사별로 약간씩의 차이를 보이고 있는것도 이러한 이유에서 기인하고 있다.그러나 공통적으로 들어가는 항목은 별로 다른 것이 없으며 계산한 결과치도 크게 차이가 나지 않는다. 즉 %Z에역비례하고 전류와 권선수 의 자속에 비례하며 권선의 배치 및 권선재료의 성질에 따라 적용하는 상수들이 변하는 것이 일반적이다.

배전용 주상변압기의 수명특성은 변압기의 절연, 단락특성의 일화에 의존하며 그중에서도 단락성능에 크게 의존한다고 볼 수 있다. 현재 주상변압기의 단락성능 향상을 위해 바니쉬를 사용하여 절연 및 기계적 강도를 향상시키고 있다. 그러나 경화되어 고체화 된 바니쉬가 절연유 속에서 장시간 사용될때 열화로 인하여 변압기 특성에 지대한 영향을 끼치고 있다. 변압기 단락시 권선에는 수평기계력(반경방향), 수직기계력(축방향) 의 2가지 힘이 발생하여 기계적인 힘이 작용하게 된다. 수평기계력이란 권선의 1,2차에 유기되는 기전력이 역기전력이 되어 방향이 반대이므로 서로 반발하는 힘이 발생하는 것이고 다른 하나는 2차권선을 지권선으로 사용할 경우 감기어 나가는 진행방향의 도체폭 만큼 1차와의 전기적 중심점이 일치하지 않을때 발생하는 힘으로 구분된다.

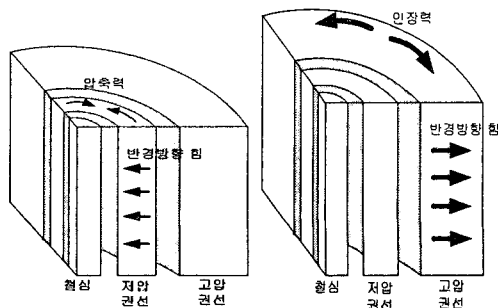


그림 8. 1,2차 권선에작용하는 전자기계력(반경방향 힘)

그림 8에서 보는바와 같이 1차 고압권선에 반경방향으로 작용하는 힘은 권선도체를 늘이는 인장력으로 작용하며, 이 인장력은 권선의 절연을 손상시키거나 권선을 기계적으로 절단시키기도 하며, 사각형태의 직선부가 힘을 받아 곡선으로 변형된다. 내측권선인 저압권선에 작용하는 기계력은 그림 8(좌측)에서와 같이 반경방향으로 권선 도체를 조이는 압축력으로 작용한다. 이 압축력은 권선을 손상시키거나 반경방향의 절연물을 파괴시킨다.

축방향 기계력은 기자력(Ampere Turn)의 중심이 동일 높이에 있을 때는 그림 9와 같은 압축력만 작용하고 권선전체의 상하 이동은 없다. 그러나 그림 9와 같이 기자력의 중심이 일치하지 않는 경우에는 내부 압축력이 작용할 뿐만 아니라, 권선전체가 상방향과 하방향으로 밀려나게 된다. 즉 내측권선인 저압권선이 하방향으로 밀리고 외측권선인 고압권선은 상방향으로 밀려올라가게 된다. 따라서, 권선설계시 고압권선과 저압권선의 기자력 중심을 가능한 한 일치시키는 것이 중요하며 예측되는 축방향 기계력을 충분히 버틸 수 있는 프레임의 설계가 매우 중요하다.

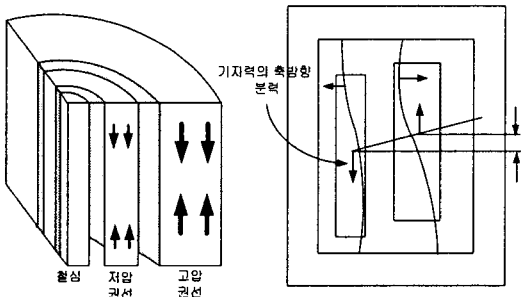


그림 9. 기자력 중심 불일치시 작용하는 축방향 기계력

2.5.2 단락기계력의 계산

그림 10에서 75kVA까지는 K사의 저손실형 주상변압기의 수평기계력(Horizontal Force: Fhs)을 계산한 결과이고 100kVA는 시제품변압기의 설계치이다. 변압기 용량이 커질수록 정격전류가 커지므로 그림과 같은 선형관계가 나타나고 있다.

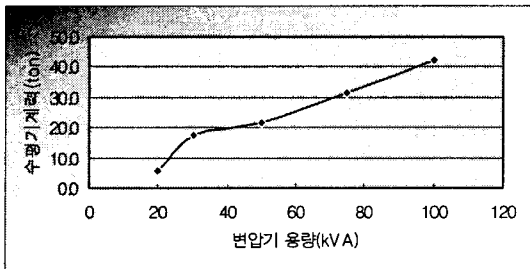


그림 10. 저손실형 및 시제품 주상변압기의 수평기계력

Vertical Force에 있어서 고압코일 및 저압코일의 기자력 중심점이 일치한다면, 축방향의 기계력은 없다고 할 수 있으나 실제에 있어서는 탭권선의 존재, 층간의 권선

높이의 차이, 저압권선 1턴의 높이차이 등에 의해 두 코일간의 기자력 중심점은 어떤 변위값 d를 갖게 된다. 그림 11은 주상변압기의 권선부 단면도를 나타낸 것이다. 전원측에서의 안정화 처리시 과도한 압축으로 인하여 절연이 취약함을 알 수 있다.

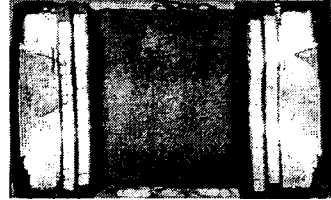


그림 11. 주상변압기의 권선부 단면

그림 12는 고압 및 저압코일의 권선이 균일하게 분포한다고 가정된 경우이다. 이러한 경우 권선의 중심높이만 일치시키면 두 권선의 기자력 중심점은 일치하게 된다. 왜냐하면 권선이 균일하게 분포한다는 것은 기하학적 중심점과 기자력 중심점이 일치하게 되기 때문이다. 그러나, 그림 11과 같이 실제의 권선은 균일한 분포를 갖지 않으므로 그림 12에서는 두 권선의 분포가 일정하다고 가정된 대신 두 권선의 중심점에 대해 어떤 변위 d를 갖게 배치하여 축방향 기계력의 분포를 검토하고 있다.

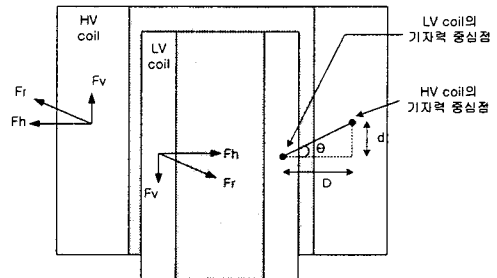


그림 12. 기자력 중심점 불일치 관련 축방향 기계력의 발생

그림에서 Fr은 두 권선의 기자력 중심점이 불일치하여 d라는 변위가 존재하게 됨으로써 실제로 두 권선에 작용하는 반발력으로 그 크기는 앞서 계산한 반경방향 기계력과 같다. 따라서, Fr은 수직성분 Fv와 수평성분 Fh로 나뉘어 지며, 축방향 기계력은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\sin \theta = \frac{d}{\sqrt{D^2 + d^2}}$$

$$Fv = Fr \sin \theta = F \frac{d}{\sqrt{D^2 + d^2}} \quad \text{이므로,}$$

$$Fv = \frac{4\pi}{9807} \left(\frac{NI_n}{\%Z} \right)^2 \frac{M_l}{a} \frac{d}{\sqrt{D^2 + d^2}} \quad [\text{kgf}]$$

(2.1)

d: 고압 및 저압권선의 기자력 중심점의 수직변위

D: 고압 및 저압권선의 기자력 중심점의 수평변위

$$D = b + \frac{a+c}{2}$$

식 2.1에서 계산된 축방향 기계력은 철심의 한 각(leg)에서 발생하는 힘이다. 그림 13은 반경방향의 기계력(그림 12참조)으로부터 기자력 중심점의 수직변위 d값을

1mm에서 5mm까지 변화시켰을 때의 축방향 기계력을 계산한 결과이다. 100kVA 변압기의 경우에는 1.6 ton에서 7.7ton까지 그 힘이 변하고 있으므로 권선의 설계 및 제작시 고압 및 저압권선의 기자력 중심을 일치시키는 것이 얼마나 중요한 가를 알 수 있다.

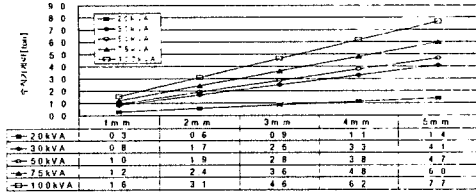


그림 13. 기자력의 수직변위 d에 따른 축방향 기계력의 변화

3. 실험 및 결과 분석

3.1 시제품 변압기 시방서 실험조건

본 연구에서 시제품 변압기 단락강도시험 회로는 저압 단자에 단락점지 사고가 발생한 것으로 가정하여 변압기의 저압단자 및 접지 축을 단락시켜 시험을 시행하였다. 기본적인 시험회로 및 사용 기기는 그림14와 같으며 단락전류를 공급하는 전원은 단락변압기(12,000kVA)를 사용 하였으며 단락강도 시험은 한전 서울자재관리처 실험설비에 의하여 수행하였다.

3.1.1 시방서 시험조건

시험은 한전적용 시방서인 ES 148 (1998)에 따르며, 이 시방서는 5 kVA 이상의 유입식 변압기에 대한 단락강도시험 시방서로 규격조건과 적용된 시험방법으로 본시제품도 이 방식을 적용하여 실험을 수행하였다.

(1) 시험회로의 결선방법

시료 변압기의 전원 인가축은 1, 2차측 어느 곳 이든 가능하나 본 설비는 2차측 단자를 단락하여 시행 하였다.

(2) 단락전류의 투입방법

단락 결선된 상태의 변압기에 전압을 인가하는 방식으로 서 대부분의 시험소에서 채택하고 있는 방법이다. 시료 변압기의 저압축은 미리 단락된 상태에서 시험전원을 시료의 고압축에서 인가하는 방법이다.

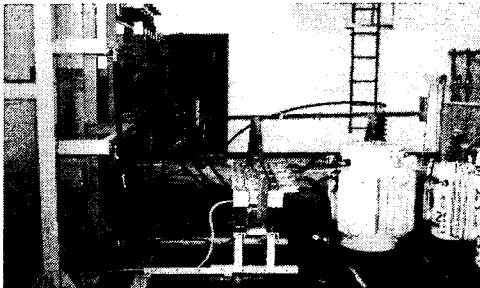
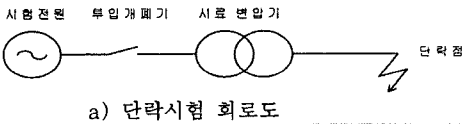


그림 14. 모델 변압기 단락시험회로 및 결선 장면

3) 전압조건

인가되는 전압은 110%를 초과할 수 없으며, 어느 시

험회로든지 시험중에 전원 인가축의 시료 변압기 단자에서 측정된 전압은 95~105%가 유지되어야 한다. 그러므로 전압측정은 시료의 전원 인가축에서 측정 하였으며 그림 14 시험회로 의 경우 투입개폐기 앞단에서 측정된 다.

4) 전류조건

전류는 전원측 시료 변압기의 단자에서 측정하며, 시험전류의 제 2 사이클에서 측정한다. 본 시험설비에서는 대칭전류의 보다 정확한 측정을 위해 규정된 통전시간 중 전류의 시작점과 끝점에서의 전류를 자동으로 측정, 기록 하였다. 또한 전류는 권선전류를 측정하였고 2차측 전류를 측정하여 변압비로 환산 적용하였다. 측정된 전류는 요구되는 전류의 95% 이상일때 유효한 시험이 되므로 본 시험에서도 95% 이상이 되도록 실험 하였다.

5) 단락시간 및 시험회수

본시제품 변압기(100 kVA) 단락시간은 0.25초를 기본으로 하고 총 6회의 시험 중 1회는 시료의 단락임피던스에 의해 결정되는 장시간 대칭전류 시험을 시행 하였다. 또한, 총 6회의 시험중 2회는 변압기 특성에 의해 결정되는 X/R 에 값에 따른 비대칭 전류를 흘렸고 이렇게 결정되는 비대칭 전류는 계통에서 실제 발생할 수 있는 최대치로서 시료 변압기의 기계적 강도를 검증 하는 방법이다.

3..2 실험설비 제어 및 결과분석

3.2.1. 실험설비 특징

실험설비는 그림 15와 같이 중앙 조작반에서 모든 시험을 수행 하였다.

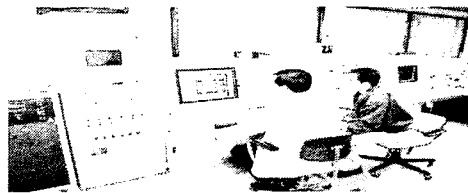
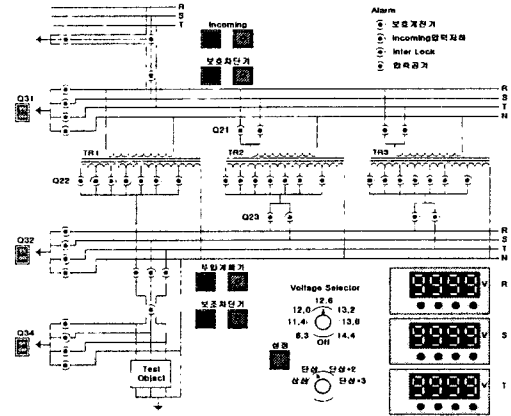


그림 15. 조작 제어반

3.1.2.2 측정시스템

시험과 관련된 전압, 전류값의 측정과 시험파형 기록은 상용화된 측정 레코더와 측정용 컴퓨터를 통해 데이터가 그림 16과 같이 화면에 나타난다.

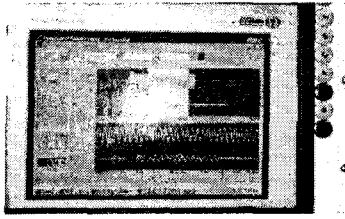
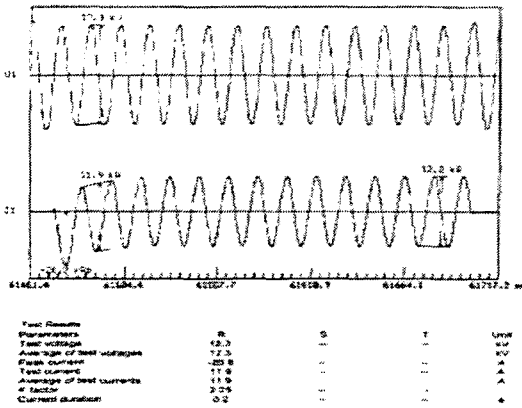


그림 16. 컴퓨터 화면

변압기에 가해지는 단락전류의 파형, 크기 및 인가시간은 ES148에 따라 행한다. 단락전류는 파형에 따라 대칭전류와 비대칭전류로 나누어지며 그림 17은 전형적인 형태이며 본시제품 변압기 2번 Tap에서의 단락전류 파형을 나타낸 것이다.



3.2.2 성능시험 결과분석

3.2.2.1 단락강도 시험결과

한전 표준구매시방서(ES148~)내용에 따라 단락강도 시험에 필요한 단락전류(실효치, 과고치), 대칭장시간전류 및 전압과의 관계를 오실로그래프로 나타낸 것을 측정하였다. 또한 단락강도 시험전, 후 특성시험결과 구매시방서 범위에 포함되므로 양호한 것으로 판정되었다.

* 단락시험 특성결과

구 분	기준치	단락시험 전		단락시험 후	
		최대	정격	최대	정격
무부하전류 (A)			1.02		1.02
(%)			0.23		0.23
무부하손실(W)			194		195
임피던스전압 (V)			422		440
(%)			3.2		3.42
총 손실(w)			1698		1687
효율 PF=1			98.33		98.34
임피던스 변화율(%)	7.5% 이하				3.32
전압변동율(%)			1.54		1.54
유도내전압(240Hz, 30SEC)	75%				양호
상용주파내전압(2.25KV, 60SEC)	"				양호
충격내전압(93.75KV)	"				양호

* 규정시험 전류치

구 분	시험전류 (A RMS)	과 고 치		통전시간 (Sec)	기준전류 배수
		K	PEAK		
최대탭	228.7	1.734	396.5	0.25	30.2
정격탭		-	-	0.25	
최소탭		-	-	0.25	

- 대칭전류 장시간 : 1.370 Sec

3.2.2.2 특성 시험결과

본 논문에서의 시제품 변압기 특성시험은 한전 잠정표준 구매시방서(PS141-482~518)와 KSC4306에 준하여 우선적으로 시험을 하였고 기준특성치의 환산온도는 75℃로 하였으며 시험항목으로는 구조 및 외관검사, 절연저항시험, 상용주파내전압시험(유도시험), 충격 내전압시험, 특성시험(무부하손, 전압변동율, 효율, %Iz), 을 진행하였다. 특성시험의 설계치 대비 결과치는 양호한 것으로 확인 되었다.

4. 결 론

본 논문에서는 저손실형 복합절연 주상변압기 설계 및 제작결과에 대하여 기술 하였다. 개발에 있어서 가장 중점적으로 고려되었던 점은 변압기 단락강도 성능이 향상되고 손실 감소와 순간 최대부하에 대응할 수 있도록 과부하 내량 향상에 중점을 두어 설계한 새로운 모델의 변압기를 시제품으로 제작 하였으며 시제품 변압기의 설계 조건은 과부하 160%(3-4시간), 권선온도 80k, 절연유 온도 75k로 권선 충간을 복합절연 하였다. "H"중 절연물인 Nomex지와 1,2차 도체간, Diamond Paper와 Nomex지간에 1,2차 Layer별 복합적으로 절연처리 하는데 있어서 접착력이 큰 문제였으나 Nomex지에 F중급 필름을 코팅하여 사용하여 권선간의 충간 단락기계를 향상 시켰다. 새로운 방법의 복합절연 방식을 적용하여 고온으로 설계 제작한 본 시제품 변압기는 기존 동급 용량 변압기에 비하여 총중량 및 부피를 10-20%까지 낮추는 성과를 올렸다. 또한, 운전 보수유지 측면에서의 비용을 절감하는 효과도 있을 것으로 생각된다. 향후 부하시험을 통한 최고온도 한계 및 평균 권선온도상승을 설정하고 과부하운전조건(160% ,3-4시간) 충족여부를 계속해서 연구하여 신뢰성을 확보하고자 한다.

[참 고 문 헌]

- [1] ES 148 (1998), "변압기 단락강도 시험규격," 한전
- [2] ANSI/IEEE Std C57.12.00-1993, IEEE Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers
- [3] 민윤홍, 유호근, 한종희 "변압기 품질향상대책", 한전 1996
- [4] ANSI/IEEE Std C57.12.90-1993, IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers and IEEE Guide for Short-Circuit Testing of Distribution and Power Transformers.
- [5] "전기품질 향상을 위한 배전변압기 세미나", KERI 1999.5
- [6] 민윤홍, 유호근 "시험검사 실무수첩", 한국전력, 1998
- [7] "변압기 실무기술", 한국전기연구소, 1999
- [8] "KSC 4306 일단절지 주상변압기", 한국표준협회, 1990
- [9] "전기설계학", 동일출판사, 1996.8