

초고압 변압기의 단락강도시험

邊勝鳳·朴鍾華
(韓國電氣通信研究所電氣分所)
金重漢
(曉星重工業株式會社)

■ 차례

- | | |
|-----------------|----------------------|
| 1. 서 언 | 3.5 조립 |
| 2. 단락시 발생하는 전자력 | 4. 단락 강도시험 |
| 2.1 반경방향 전자력 | 4.1 피시폼 선정 |
| 2.2 내부 압축력 | 4.2 시험조건 및 방법에 관한 검토 |
| 2.3 축방향 전자력 | 4.3 시험 |
| 3. 변압기의 사양 및 구조 | 4.4 검증방법 |
| 3.1 사양 및 특성 | 4.5 시험결과 |
| 3.2 철심 | 4.6 시험결과와 평가 |
| 3.3 권선 | 5. 결언 |
| 3.4 단말처리 | 참고문헌 |

1 서 언

전원계통이 다양화되고 계통이 크게 확장 기대화 됨에 따라, 제반 전력기기의 성능과 신뢰성이 어느 때보다 요구된다.

송배전계통에 단락사고가 발생하면 과대한 단락전류가 흐른다. 이때 그 계통에 접속되어 있는 기기는 기계적 열적으로 가혹한 조건에 놓이게 되며, 변압기 또한 이러한 단락전류에 대해 기계적 열적 손상 없이 견디지 아니하면 안된다. 계통에서 발생하는 대용량 변압기 사고의 상당 부분은 단락시 발생하는 전자력에 기인한다.

한국전기통신연구소는 연구활동의 일환으로 각종 전력기기에 대한 연구개발시험을 실시해 오고 있으며, 특히 전력용 변압기에 대해서도 상당한 양의 단락강도시험을 실시한 바 있다.

이 보고서는 국내 전력계통에 이미 설치 사용되고 있는 154KV 전력용 변압기와 동일한 45/60MVA 변압기에 대하여 우리나라에서는 처음으로 직접 단락강도시험을 실시하고, 단락시 변압기가 받는 전자

력에 대한 검토와 함께 시험내용을 상세히 소개하는 글이다.

2 단락시 발생하는 전자력

2.1 반경방향 전자력

자계내에 직각으로 놓인 도체에 전류가 흐르면 자속밀도B, 전류I의 순시치와 도체 길이L의 곱에 상당한 전자력 $F = BIL$ 이 작용한다.

변압기의 고저압 권선에는 서로 다른 방향의 전류가 흐르므로, 이때 발생하는 자계의 크기는 같고 방향은 서로 반대이다. 그러나 각 권선이 동일한 공간을 점유하고 있지 않으므로 자계는 완전히 상쇄되지 않고 남아 있으므로 권선이 점유한 공간에 자속이 존재하게 되고, 두 권선 사이에는 다음 식으로 표시되는 반발력이 발생하여, 내측권선은 철심방향으로 압축하고 외측권선은 방사상으로 팽창시키는 방향으로 작용한다.

$$F_r = B_o IL$$

$$= \left[\frac{1}{2} (4\pi \times 10^{-7}) \frac{N_1}{L_f} \frac{I_{m1}}{Z} \right]$$

표 1. 한국전기통신연구소의 변압기 단락강도시험 실적

용량	량	시험규격	시험년월	제작자
3φ, 2000KVA, 33KV/11.6KV, 50Hz, 6.3%Z		IEC	1983. 8	신한전기공업(주)
3φ, 630KVA, 33KV/433V, 50Hz, 4.4%Z		"	"	"
3φ, 630KVA, 11KV/433V, 50Hz, 4.4%Z		"	"	"
3φ, 1000KVA, 33KV/11.6KV, 50Hz, 6.2%Z		"	1983. 10	"
3φ, 630KVA, 11KV/433V, 50Hz, 4.5%Z		"	"	"
3φ, 400KVA, 33KV/433V, 50Hz, 4.4%Z		"	"	"
3φ, 400KVA, 11KV/433V, 50Hz, 4.3%Z		"	"	"
3φ, 400KVA, 11KV/433V, 50Hz, 4.3%Z		"	"	"
3φ, 250KVA, 33KV/433V, 50Hz, 4.5%Z		"	"	"
3φ, 250KVA, 11KV/433V, 50Hz, 4.3%Z		"	"	"
3φ, 160KVA, 11KV/433V, 50Hz, 4.2%Z		"	"	"
1φ, 1667KVA, 33KV/6.67KV, 50Hz, 6.0%Z		"	1984. 4	효성중공업(주)
3φ, 45/60MVA, 154KV/23KV, 60Hz, 14.5%Z		ANSI/IEEE	1984. 1	"

$$[N_2 \frac{I_{m2}}{Z}] [MT] \quad \text{Newton}$$

$$= 0.64 \left[\frac{NI_m}{Z} \right]^2 \left[\frac{MT}{L_f} \right] \times 10^7 \quad \text{Kg}$$

- F_r : 반경방향 전자력
- B_a : 권선 내부 평균자속밀도 (Wb/m^2)
- L_f : 축방향 누설자속의 자로길이 (m)
- Z : 변압기 임피던스 (per unit)
- MT : 전권선의 평균巻回길이 (m)
- $NI_m = N_1 I_{m1} = N_2 I_{m2}$: 파고전류에 대한 Ampere-turn

이러한 힘은 통상 변압기의 과부하시나 단락사고 시와 같이 정격전류 보다 상당히 큰 전류가 흐를 때 특별히 문제가 된다. 변압기의 부하측 회로에 단락 사고가 발생하면 정격전류의 수배 내지 수십배 크기의 전류가 흐르며, 이 전류의 크기는 변압기의 전원측 회로와 변압기 자체의 임피던스에 의해 결정되며, 이때 단락순간의 전압위상에 따라 직류분을 포함하는 비대칭 전류로 된다. 이 비대칭의 정도는 변압기 및 계통 임피던스의 저항분과 리액턴스분의 비에 따라 다음과 같이 결정된다.

$$K = \sqrt{2} \left[1 + \frac{\sin \phi \cdot e^{-\frac{r}{x} \left(\frac{\pi}{2} + \phi \right)}}{1 - \frac{r}{x} \cdot \cos \phi \cdot e^{-\frac{r}{x} \left(\frac{\pi}{2} + \phi \right)}} \right]$$

$$\approx \sqrt{2} \left[1 + \sin \phi \cdot e^{-\frac{r}{x} \left(\frac{\pi}{2} + \phi \right)} \right]$$

K : 대칭분에 대한 초기 파고치의 비

$$\phi = \arctan \left(\frac{x}{r} \right) \quad : \text{radian}$$

이러한 단락전류에 의해 변압기 권선에는 큰 전자력이 작용하고, 이 힘은 절연물 및 권선지지 장치에 전달되며, 경우에 따라서는 이로 인해 변압기가 파괴될 때도 있다. 더우기 단락전류가 장시간 지속되면 권선의 온도는 심하게 상승하고 결국은 소손된다. 이러한 외부단락은 이상전압과 함께 변압기를 고장시키는 큰 원인이 된다.

2.2 내부 압축력

동심배치 권선의 누설자속은 권선 중앙부에서는 똑바로 축방향으로 통하고 있으나, 권선 단부에서는 휘어져 좌우로 퍼진다. 이러한 권선 단부에서의 누설자속의 굴절 때문에 생기는 자속분포의 불평형에 따라 누설자속의 반경방향 성분이 생기므로써 축방향 전자력이 나타나 권선 전체를 그 중앙부로 향하여 압축하는 내부 압축력이 작용한다.

이 힘은 권선의 길이, 권선간 거리, 권선과 철심간 간격, 권선과 Tank 간 거리들의 함수로 표시되는 계수를 반경방향 전자력에 곱한 값으로 나타난다.

2.3 축방향 전자력

각 권선을 정확히 같은 길이로 하고, 단위 길이당 Ampere-turn 분포를 균등, 선형분포시키며, 권선의 선단면을 동일 평면상에 위치시켜서 1, 2차 권선의 전자기적 중심을 평행시킬 경우, 권선에는 위에서 언급한 반경방향 전자력 및 내부압축력만이 존재한다.

그러나 실제로는 고저압 권선의 절연이 서로 다르

고, 통상 탭권선 및 인출선이 있으며, 권선 제작 조립시나, 사용중 또는 단락전류 통전시 생기는 절연물의 변형으로 인한 기하학적 불균형 등의 원인으로 누설자속의 반경방향 성분이 필연적으로 존재하게 되므로, 각 권선 전류와 작용하여 한 권선은 위로, 다른 권선은 아래로 밀어내는 축방향 전자력이 발생한다.

이 힘은 축방향 누설자속의 길이, 권선배치의 상호거리의 차, 교차 누설자속의 자료면적 및 권선의 길이들의 함수로 표시되는 계수를 반경방향 전자력에 곱한 값으로 나타난다.

3 변압기의 사양 및 구조

3.1 사양 및 특성

변압기의 사양 및 특성은 각각 다음 표와 같다.

표 2. 피시험 변압기의 사양 및 특성

형식	옥외용, 유입자냉 / 유입풍냉 안정권선배장, NLTC(고압권선) OLTC(저압권선)
상수	3상
주파수(Hz)	60
정격용량(MVA)	1차 및 2차 45/60 3차 15/20
전압(KV)	1차 161-157.5-154-150.5-147 2차 23 ± 10% (17 탭) 3차 안정권선
결선	1차 wye, 중성점 인출 2차 wye, 중성점 인출 3차 open delta, 일단 Tank 에 접지
절연계급	1차 선로측 650 KV BIL/275 KV AC 중성점 350 KV BIL/140 KV AC 2차 선로측 150 KV BIL/50 KV AC 중성점 150 KV BIL/50 KV AC 3차 60 KV BIL/22 KV AC
임피던스 (75°C 기준)	45MVA 기준, 단락 시험전 14.55% 161KV/25.3KV 최고탭 14.35% 154KV/23KV 정격탭 14.48% 147KV/20.7KV 최저탭
외형치수	폭 6350 mm 길이 7500 mm 높이 6000 mm
중량	총중량 142 ton 유량 29 ton (31.500 l) 운반중량 94.5 ton
제작회사	효성중공업주식회사

3.2 철심

Nonaging 방향성 규소강판을 사용하여 내철형으로 성층 조립했으며, 철심재료의 특성은 다음과 같다.

두께	0.3, 0.35 mm
밀도	7.65 g/cm ³
체적고유저항	48 uΩ-cm
포화자속밀도	20,500 gauss
점적율	94% 이상

3.3 권선

고압권선은 절연 충격 내전압 성능이 양호한 Z-연속권으로 원판형 연속권의 일종이며, 원형 절연관 상에 접착된 수직 spacer 위에 연속적으로 감으면서 수평 spacer 로 절연유 순환로를 만들어 단락시 미치는 반경방향 팽창력을 견딜 수 있도록 했다.

저압권선은 단락시 발생하는 반경방향 압축력에 충분히 견딜 수 있는 두께의 원형 micarta 절연관 상에 수직 및 수평 spacer 를 두어 절연유 순환로를 주면서 절연도체를 나선형으로 권선했다. 나선형 권선 방식은 단락시 발생하는 전자력에 대한 성능이 우수하다.

3.4 단말처리

고압권선은 인출선과 권선도체의 시종단을 바트스 프라이스의 양측에 삽입하여 유압 압착기로 압착하고, 저압권선은 인출선의 단부에 동판 ring 을 삽입하여 ring 과 케이블 소선사이에 인동 용접봉을 가스 용접기로 녹여 침투시켜 동바 형상으로 만들어 권선의 도체에 없어 인동 용접봉을 가스용접기로 녹여 접속하므로써 단락시 인출선에 미치는 전자력에 의한 충격에도 손상이 없도록 했다.

3.5 조립

하부계철과 철심각이 조립된 철심에 권선을 끼우고, 권선위에 pressure ring 을 놓은 다음 철심의 상부를 조립했다.

상부철심의 조립이 끝난 후, lock plate 에 상부단철을 물리고, 상부단철과 pressure ring 사이에 유압 jack 을 넣어 단철을 지지점으로 하여 설계시 계산된 힘으로 pressure ring 을 누르고, 그 사이를 pressure ring 받침 볼트로 고정시켰다.

철심과 권선 조립시 상하부 단철과 pressure ring 및 lock plate 에 의해 견고히 지지되어 단락시 발생하는 축방향 전자력에 견디도록 했다.

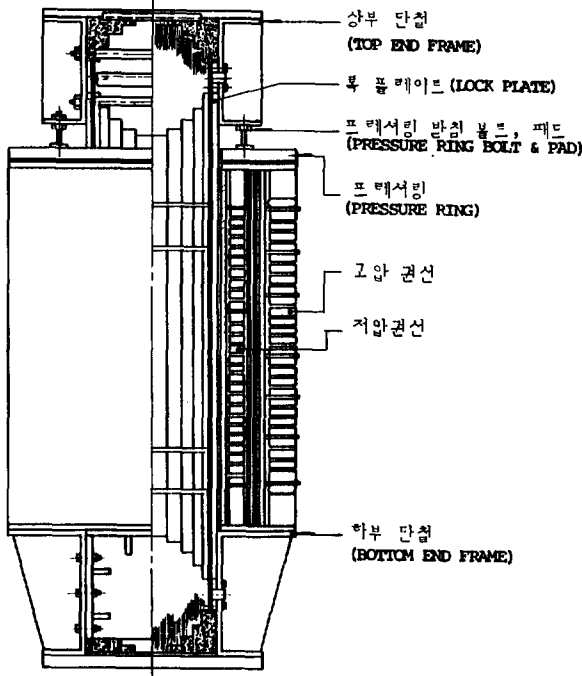


그림 1. 철심-권선 조립 단면도

4 단락강도시험

4.1 피시험 선정

국내 중전기기의 주 수요처인 한국전력공사에 공급하는 표준변압기로서, 기 제작하여 일반시험이 완료된 변압기중 한대를 발채하여 시험하기로 했다.

4.2 시험조건 및 방법에 관한 검토

어느 기기를 시험하는 목적은 그 성능과 신뢰도를 입증하기 위한 것이기 때문에, 실제 사용중에 직면하는 것과 같은 변수 및 상황하에서 시험하도록 해야 한다.

변압기에 대한 단락강도시험은 기계적 강도만을 검증하는 것으로 충분하다. 왜냐하면 단락시 도체의 온도상승은 계산상으로도 충분히 정확한 정도로 예측할 수 있기 때문이다.

본 시험에 적용한 시험규격은 다음과 같다.

ANSI/IEEE C 57. 12. 00-1980

general requirements for liquid-immersed distribution, power and regulating transformers

ANSI/IEEE C 57. 12. 90-1980

test code for liquid-immersed distribution, power and regulating transformers and guide for short-circuit testing of distribution and power transformers

변압기가 운전 사용되는 중에 처하는 고장상황이 서로 다르기 때문에 규격에서는 다음과 같이 용량에 따라 네가지 Category로 구분하고 있으며, 본 피시험 변압기는 45,000KVA 로써 Category IV에 속한다.

Category	단상용량(KVA)	3상용량(KVA)
I	5 - 500	15 - 500
II	501 - 1667	501 - 5000
III	1668 - 10000	5001 - 30000
IV	10000 이상	30000 이상

시험전류는 다음 공식으로 계산되며 본 피시험 변압기에 대해서는 다음 표와 같이 계산되었다.

$$I_{sc} = \frac{I_R}{Z_T + Z_S}$$

$$I_{sc}(pk asym) = K \cdot I_{sc}$$

$$K = [1 + (e^{-(\phi + \pi/2)r/x}) \sin \phi] \sqrt{2}$$

I_R ; 해당 탭에서의 정격 전류

Z_T ; 해당 탭에서의 변압기 임피던스 (p.u.)

Z_S ; 변압기 설치 위치에서 보는 계통 임피던스 (p.u.)

$\phi = \arctan(x/r)$ (radian)

x/r ; 전 임피던스의 저항분과 리액턴스분의 비

표 3. 대칭 및 비대칭 시험 전류 계산

탭	최고탭 (5 / 1) 161 / 25.3 KV	정격탭 (3 / 9b) 154 / 23 KV	최저탭 (1 / 17) 147 / 20.7 KV
	% Z_T	14.55	14.35
% X_T	14.546	14.345	14.472
% r_T	0.409	0.439	0.53
% Z_S	0.177	0.194	0.213
K	2.70	2.69	2.67
I_{sc} (KA)	1.095	1.159	1.202
I_{sc} (pk asym) (KA)	2.956	3.117	3.209

시험회수는 규격상 각 상에 대칭전류시험 4회, 비대칭전류시험 2회, 합계 6회의 시험을 각각 0.25 초씩 하되, 비대칭전류시험 2회중 최소 1회는 기계적으로 가장 가혹할 것으로 예상되는 태에서 시험해야 한다. 본 시험에서는 시험전류가 가장 큰 최저 탭에서 비대칭전류시험 1회, 정격탭에서 비대칭전류시험 1회, 대칭전류시험 4회를 실시하기로 했다.

변압기의 단락강도와 관련하여 발생하는 사고는 대부분 변압기의 2차회로에서 발생한다. 내철형 변압기의 외측권선을 단락시키고 내측권선을 전원회로에 결선하고 전원전압을 갑자기 인가할 경우 피시험 변압기로 과도여자 돌입 전류가 내측권선에 흘러 시험전류에 가세하며, 경우에 따라서는 정격 부하전류의 8내지 10배 까지의 돌입전류가 가세한다. 이와 동시에 철심이 포화되므로 전류 및 발생자계가 정상적인 경우와 크게 다르게 된다. 따라서 본 시험에서는 2차측을 단락시키고 1차측을 전원에 결선하여 시험하기로 했다.

당소의 3상 최고시험전압은 단락변압기를 최고탭으로 결선하는 $96\sqrt{3}$ KV 로써 이는 변압기 1차전압 154 KV 에도 미치지 못하므로 단상시험을 하기로 했다.

이 때 가능한 방법은 (1)모의 3상시험 (2)선간단락 (3)단상지락의 세가지가 있으나 (3)의 방법을 사용하여 각 상을 교대로 시험하기로 협의했다.

정상적인 운전중에는 일반적으로 변압기가 이미 여자되어 있는 상태에서 단락이 발생한다. 따라서 이러한 방법으로 시험하는 것이 바람직하다. 그러나

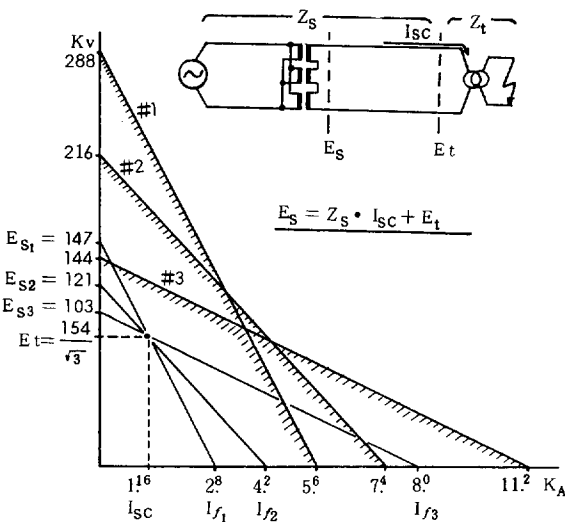


그림 2. 시험 회로별 시험가능범위, 단락전무부하 여자전압 E_s 및 사고발생시 고장 전류 I_f .

이 때 단락전 무부하 여자중의 전압은 철심을 포함시키지 않을 정도로써 규격상 정격전압의 110%를 초과하지 않아야 한다. 결과적으로 전원회로의 임피던스는 변압기의 임피던스보다 상대적으로 작아야 한다. 그러나 당소의 시험회로는 그림과 같이 단락전 무부하 여자전압 E_t 가 정격전압 E_s 의 160%내외로써 규격에서 규제하는 110%를 초과하므로 2차측을 미리 단락시켜 놓은 상태에서 전원전압을 인가하는 방법으로 시험하기로 했다.

4.3 시험

단락강도시험을 실시하기 전에 온도상승시험을 제외한 일반시험을 실시했으며, 그 후 앞에서 검토한 제반 조건 및 방법에 따라 그림과 같은 시험회로를 사용하여 변압기의 2차측을 단락시킨 후 1차측을 전원회로에 결선하고, 보조차단기 AB 및 단락발전기 Gen의 출력측 보호차단기 BB를 투입한 후, 투입위상을 조정하여 투입개폐기 MS를 투입함으로써 소정의 대칭 또는 비대칭 단락전류를 통전시키고, 일정시간 후 보조차단기 AB로 차단하므로써 시험을 실시했다. 이 때 각 시험을 실시하기 전에 정격시험전류의 약 50%까지의 전류로 투입위상을 조정했다.

4.4 검증방법

단락시험중에는 다음(1)의 각 사항을 측정하고, 시험 후 변압기를 제작공장으로 운반한 후 (2)항의 특성시험을 실시하고 (3)항의 내부점검을 실시하여 손상을 판정했다.

- (1) 단락시험중의 측정
 - 고압측 전압, 전류
 - 변압기 tank로부터 대지로의 누설전류
 - 보호계전기의 동작유무
 - 시험중 변압기의 상태관찰 - 고속 Camera 로 촬영
- (2) 특성시험
 - 여자전류 측정
 - 손실측정

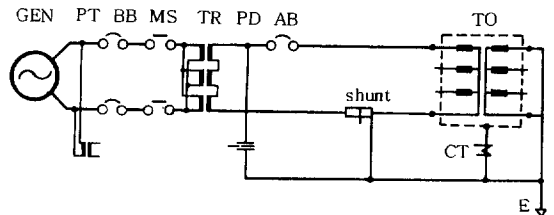


그림 3. 시험 회로

표 4. 단락강도 시험 결과

시험전 상태:
 1. 방열판 제거 * 최저탭: (1 / 17) : 147KV/20.7KV
 2. 절연유 온도(0-40°C) * 정격탭: (3 / 9b) : 154KV/23KV

시험번호	시험상	탭위치	인가전압(KV)	시험전류				통전시간(초)	전원전압(KV)
				peak치		RMS치			
				KAP	%	KA	%		
3200	U상 (H1-H0) (X1-X0)	최저탭	81.31	3.37	105.0	1.20	99.8	0.27	9.04
3203		정격탭	81.31	3.08	98.7	1.12	96.6	0.26	8.90
3204			81.31			1.13	97.4	0.27	8.90
3205			81.31			1.13	97.4	0.26	8.90
3206			81.31			1.13	97.4	0.27	8.90
3207			81.31			1.12	96.6	0.26	8.90
3209			V상 (H2-H0) (X2-X0)	최저탭	79.46	3.26	101.5	1.19	99.0
3211	정격탭	84.08	3.18	101.9	1.14	98.3	0.27	8.97	
3212		81.31			1.13	97.4	0.27	8.90	
3213		81.31			1.13	97.4	0.26	8.90	
3214		81.31			1.13	97.4	0.27	8.90	
3215		81.31			1.12	96.6	0.26	8.90	
3217		80.38	3.29	102.5	1.18	98.1	0.27	8.90	
3219	W상 (H3-H0) (X3-X0)	정격탭	82.23	3.08	98.7	1.11	95.7	0.26	8.90
3220			82.23			1.14	98.3	0.26	8.97
3221			82.23			1.14	98.3	0.27	8.97
3222			82.23			1.13	97.4	0.26	8.97
3223			82.23			1.13	97.4	0.27	8.97

- 임피던스 측정
- 절연저항 측정

(3) 내부점검

모든 시험 완료 후 변압기를 해체하여 권선, 철심, tap changer, 철심체부금구, 절연물, 배선 등의 손

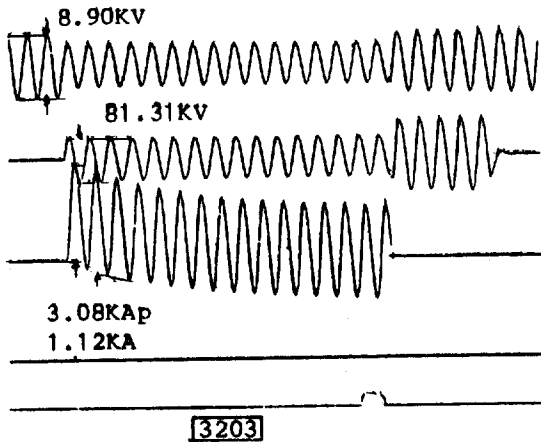


그림 4. 시험 오실로그래프 예

상유무를 육안 검사했다.

4.5 시험결과

(1) 전압, 전류

각 시험시의 전압, 전류 파형은 정상적인 정현파로써 파형상 특별한 이상이 없었으며, 시험전류치는 각기 허용치 이내였다.

(2) 누설전류

변압기 tank와 대지간에 CT를 설치하여 측정했으나, 누설전류가 흐른 특별한 징후는 발견되지 않았다.

(3) 보호계전기 동작

변압기 본체 보호용 충격압력 계전기와 방출 안전장치 및 OLTC 보호용인 보호계전기의 동작은 없었다.

(4) 시험중 변압기의 상태

단락기간중 변압기로부터 단락음이 청취된 외에 외관상 특별한 이상이 관측되지 않았다.

(5) 통전시간

단락시간은 각 시험 공히 규격상의 0.25초 이상이
었다.

(6) 여자전류

단락시험 전후에 측정된 값을 비교하여, 초기치를
기준으로 한 변화율이 - 3.07%로써 규격상 허용치
5%이내였다.

(7) 임피던스

단락시험 전후에 측정된 값을 비교하여, 초기치를
기준으로 한 변화율이 + 0.55%로써 규격상 허용치
2%이내였다.

(8) 상용주파 내전압시험

고압 및 저압권선에 규정시험전압의 100%를 인
가, 시험한 결과 양호했다.

(9) 내부점검

단락시험 후 해체하여 내부를 육안 검사했으나, 특
별한 이상이 발견되지 않았다.

4.6 시험결과와 평가

전항 시험결과에 기술한 바와 같이, 피시험 변압
기는 시험규격에 규정된 단락시험의 합·부판정 조
건을 만족하고, 단락으로 인한 손상을 받지 않았음
이 검증되어 합격 판정했다.

5 결 언

본 시험을 계기로 지금까지 국내에 단락시험설비
부재로 단락강도에 대한 성능시험 없이 사용해 오던
변압기의 설계제작분야에 하나의 전기를 이루었다고
보며, 초고압 변압기 수출시 신뢰성의 척도로 간주

되는 단락시험의 성공은 국내 제작품의 해외시장 진
출 확대에 획기적 기원을 마련하였다.

특히 앞으로는 특정 모델의 개발과정에서 부터 이
러한 시험을 실시하므로써 설계자료를 확보하고 성
능을 확인해 나감은 물론, 이미 개발 생산중인 모델
에 대한 단락강도시험도 실시하므로써 기존 설계기
준의 실증적 확인 검토가 이루어질 수 있으며, 관련
분야의 기술향상을 촉진할 수 있도록 각 계의 계속
적인 연구와 노력이 요망된다.

參 考 文 獻

- 1) 朴 旻鎬, 誘導機器, 東明社, 1977, pp192~201
- 2) 變壓器專門委員會, 短絡時における變壓器巻線の
機械的強度について, 電氣學會技術報告 (I 部),
第 89 號, pp1~4, 1969
- 3) 효성중공업주식회사, 전력용변압기표준 사양서(H
IC-140-411), pp.3~8
- 4) ANSI/IEEE C 57. 12.00-1980, IEEE stand-
ard general requirements for liquid-immersed
distribution, power, and regulating
transformers.
- 5) ANSI/IEEE C 57. 12.90-1980, IEEE s-
tandard test code for liquid-immersed di-
stribution, power and regulating transform-
ers and IEEE guide for short-circuit te-
sting of distribution and power transform-
ers