

容量性配電變壓器에 관한 연구

A study on capacitive transformer

論 文

18~2~1

李 承 院*

(Sung Won Rhee)

[ABSTRACT]

From the first customer located right at the substation to the last customer at the end of the line, voltage must be held within close limits, so the voltage regulation is more important than the thermal limit.

On a typical distribution system during the peak load period, the voltage drop may be serious enough to cause unsatisfactory operation of home appliances in the residential area, and present many problems to manufacturing industries, where the voltage must be maintained within close limits to insure smooth operation.

Among all the factors contributing to voltage drop in the distribution system, the voltage drop in the distribution transformer may account for 30% of this figure. If we can eliminate this factor, the power companies can provide better quality electricity to more customers with the existing distribution facilities, thus saving on initial investment costs.

Taking all these problems into consideration, the author undertook the design of a capacitive transformer which would give zero voltage drop at rated load and at 80% lagging power factor while incorporating overload features to withstand 400% overload for at least 100 seconds.

The following are the results obtained through design, manufacture and test of an initial experimental transformer built with these specific purposes.

서 론

원래 배전 변전소에 가장 가까이 있는 수용가와 같은 선로의 가장 말단에 있는 수용가간의 전압차이가 있는 고로 이 차이를 어떻게 적게 해서 같은 전압으로 전력을 공급하느냐 하는 것이 배전 담당자들의 고심거리인 것이다. 그런데 우리나라에서는 이에 배전선로 및 배전변압기의 과부하로 말미암은 영향까지 겹쳐 수용가간의 전압 불균일은 고사하고 절대전압이 낮아 수용가의 불평과 전력회사의 고심은 이루 말할 수 없다. 그런고로 일반적으로도 문제가 되지만 우리나라에서는 더욱 배전 변압기에서 가장 문제가 되는 것이 전압변동율인 것이다. 대표적인 배전계통에 있어서 최대 부하시의 전압분포 모양은 그림 1과 같은데 이러한 경우에 만일 적격의 150%의 부하가 걸릴 것 같으면 배전변압기의 전압강하는 계통 전체의 전압강하의 30%에 달하게 된다. 만일 이와 같은 배전변압기의 전압강하를 제거할 수 있다면 우선 절대수용가전압이 상승될 뿐 아니라 이차 배전선은 더 많은 수의 수용가에 전력을 공급할 수 있도록 연장될 것

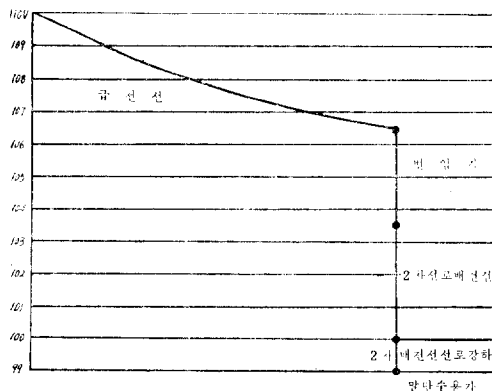


그림 1. 최대부하시의 전압분포
Fig. 1. Peak-load voltage profile

이며, 전력회사의 투자비 뿐만 아니라 운전비도 감소될 것이다. 과거에 이를 위하여 커패시터(capacitor)를 변압기에 직렬로 연결하여 위상을 변화시켜 전압을 조절하는 방법을 시도한 바 있으나 커패시터를 보호하기가 대단히 어려워 실적을 보지 못하였다. 이것은 본 연구의 실험에서도 경험한 바 있다. 즉 커패시터 단자간의 전압이 정격전류의 4배 정도에서 1사이클(cycle)이내에서

*正會員: 서울대학교 工科大学 電氣工學科 教授

파괴됨을 볼 수 있었다.

이상과 같은 실정을 참고로 하여 본인은 전압강하가 없는 변압기를 만들어 보기로 하여, 우선 변압기 자신이 직렬용량을 갖게 할 수 있는가 하여 첫째 연구목표를 변압기 직렬용량 부가법에 두어 동박을 고압권선에 사용, 겹쳐 말음으로써 용량성을 띠게 함과 동시에 정격전류를 흘리게 하는 데 성공하였다. 다음에 배전변압기는 짧은 시간이기는 하나 전동기의 기동시라든지 용접기의 사용 등으로 인한 과부하가 연상되므로, 이와 같은 과전류에 의한 직렬 커패시터 단자간의 전압상승으로 인한 절연파괴가 있는 것이므로 절연의 한계치로서 400% 부하에 100초를 결정하고 보호대책에 대한고찰을 하였다. 본 연구에서는 이상과 같은 고찰하에 시작품을 설계, 제작, 그 특성을 시험하여 결과를 이에 보고하는 바이다.

2. 소요 원자재 특성 시험

소요 원자재 중 주요 3종인 규소강판, 도전재료이며 용량성 권선 재료로서의 동박 및 절연재료인 콘덴서용 절연지에 대해서 그 특성을 조사하여 본 시작품에 다음과 같은 특성의 것을 선정하였다.

a. 철심재료

철심재료로서는 야하다(Yawata) Z-10을 선정하였고 그 특성 측정결과를 표 1, 그림 2와 같다.

(Z-10 W15/60=1.21)

시료번호	표준치		표준치와의 차
1	1.21	1.190(W/kg)	-1.65
2	"	1.172	-3.14
3	"	1.180	-1.82
4	"	1.210	0.00
5	"	1.190	-1.65
6	"	1.080	-10.70
7	"	1.220	+0.825
평균	1.21	1.1786	-2.59

표 1. Z-10 W15/60=1.21의 절연지
Table 1. Z-10 W15/60=1.21 insulating paper

b. 동박의 등가저항 계산에 관한 고찰

동박 1개의 저항을 R, 총장(Total Length)을 l이라 하면, 동박 1개의 동손 W_a는

$$W_a = \int_0^l i^2 dr = \int_0^l \left(\frac{I}{l} x\right)^2 d\left(\frac{R}{l} x\right) = \frac{I^2}{l^2} \cdot \frac{R}{l} \int_0^l x^2 dx$$

$$= \frac{I^2 R}{l^3} \cdot \frac{l^3}{3} = \frac{I^2 R}{3}$$

동박 2개의 손실은 같으므로 W=2W_a.

즉 $W=2W_a=2 \times \frac{I^2 R}{3} = \frac{2}{3} I^2 R$

등가저항은 1개의 저항의 $\frac{2}{3}$ 가 된다.

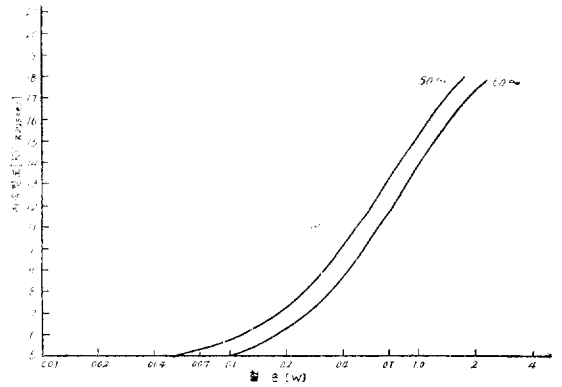


그림 2. Z-10 0.30mm 철손곡선
Fig. 2. Iron loss curve for Z-10 0.30mm

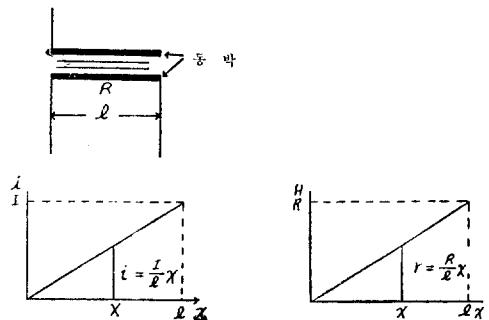


그림 3. 동박 저항 계산도
Fig. 3. Diagram for calculation of the resistance of Cu foil

c. 콘덴서(Condenser)용 절연지

이는 염화탄소수소계의 비유전율(ε_s)이 6인 것을 사용하기로 하였다. 그 특성은 표 2와 같다.

3. 직렬용량 삼입시 변압기 위상 변위 및 전압 변동률 측정

a. 결선도

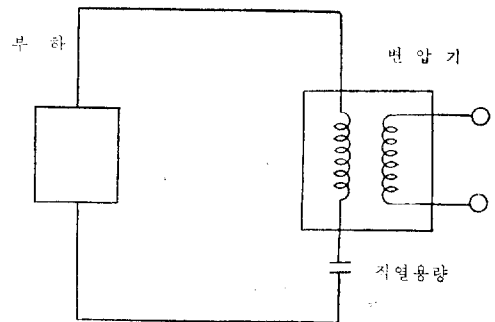


그림 4. 위상변화실험 결선도
Fig. 4. Connection diagram for the experiment of phase variation

	평균두께 의 허용차	밀도 g/cm ³	인장강도		신장율(%)		기밀도 sec/100°C	유전체물 율 (100°C) (%)	CR치 100°C ΩF	절연과피전압	
			종	횡	종	횡				평균	최저
0.05~ 0.065	±0.003	0.8~1.0	7.0 이상	2.0 이상	2.0 이상	4.0 이상	300~1000	0.3이하	100이상	9.0이상	7.0이상
0.07~0.08	±0.004	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
0.125	±0.005	"	"	"	"	"	"	"	70이상	"	"

표 2. 절연지 특성
Table 2. Characteristics of insulating paper

b. 시험 변압기

65°C, 5KVA, 6.3/3.15KV-210/105V

%IZ=2.2%

X=78.1Ω

R=140.1Ω

c. 측정 결과

리액턴스 (Reactance) ωL	직 커패시턴스 1/ωC	부하역률 (Load p.f.)	위 상 (Phase)	전부하시 전압 변동율 (%)
78.1Ω	78.1Ω	1.00	0°	1.96
"	"	0.95	18°	2.06
"	"	0.90	26°	2.18
"	"	0.85	32°	2.30
"	"	0.80	37°	2.45
"	"	0.75	41°	2.62
"	"	0.70	45°	2.80
"	"	0.65	49°	3.02
"	"	0.60	53°	3.26
"	"	0.55	56°	3.56
"	"	0.50	59°	3.92

표 3. 위상 변위
Table 3. Phase shift

4. 고압권선 용량 부가법 검토

그림 5와 같이 고압권선을 2분하여 P₁ 분을 동박으로

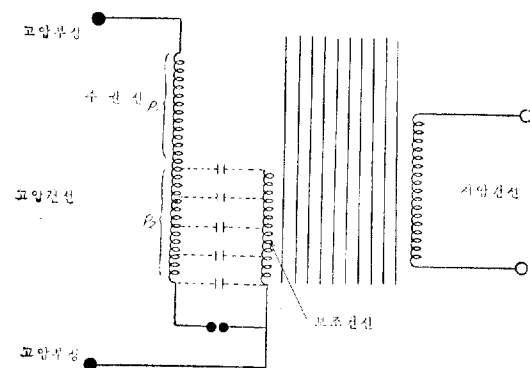


그림 5. 용량성 부가를 위한 권선도
Fig. 5. Winding development

감고 이에 걸쳐 직렬용량을 갖도록 보조권선을 감아 일차 권선으로 하고, 양권선단에 과전류시 절연과피를 방지하는 방전부를 부가시킨다. 이 경우 위상개선법에 대해서는 이미 기술한 바 있으며 2차권선은 임의의 판재환선 사용한다.

5. 과전압 보호 검토

배전변압기에서 전동기, 전기용접기 등의 소비시설도 연결되므로 정격전류보다 더 큰 전류가 흐를 때가 종종 있을 것으로 예상된다. 이런 경우 이 변압기의 주권선과 용량성 보조권선간에 과전압이 발생한다. 본 실험에서는 400% 이상의 과부하에서는 그 절연이 경제성을 소해할 만큼 절연이 가중되므로 400% 이하에서 절당 수 있도록 설계하기로 하고, 이상의 과전압에 대해서는 전압제한 보호장치를 사용하는 것이 경제적임을 확인하였다. 이 경우 변압기의 전압 조정기능을 해하지 않고 절연을 보호하기 위해서는 이 보호장치는 다음 사항을 만족해야 한다.

(1) 보호기에 걸린 전압이 미리 결정된 최대치보다 저울 때는 전류가 거의 흐르지 않거나 또는 전혀 흐르지 않아야 한다.

(2) 전압이 최대치를 초과할 때는 전기 전도성이 아주 좋아야 한다. 비전도에서 전도에 이르는 변화는 최대치에 도달할 때 즉시 일어나야 한다.

(3) 비정상적으로 큰 일차전류가 흐를 동안에는 병렬 커패시터의 역할을 효과적으로 할 수 있어야 한다.

(4) 전압이 최대치 이하로 떨어질 때면 보호기는 비전도 상태로 돌아가야 한다.

(5) 값이 싸고 신뢰성이 있어야 한다.

그림 4는 변압기 코일의 용량성 부분에 병렬로 연결된 보호장치를 나타낸다. 보호기는 근본적으로는 아아크(arc)교란을 발생시키는 자장을 사용한 일종의 불꽃 간격이다. 불꽃 간격의 전극은 간격을 형성하는 넓은 면적의 판을 서로 대치시킨 것이다. 영구자석 회로는 아아크가 빨리 소멸되도록 동작속도를 전달하기 위하여 앙극에 자장을 마련해 준다. 보호기의 최초의 파괴전압은 간격거리와 주위온도와 대기압력이 일정하다고 하면 전극 모양의 함수이다.

이 경우 전극 거리와 전극 모양은 변하지 않으므로 아아크에 의한 전극온도가 변하는 파괴전압에 영향을 미치지 않도록 해야 한다. 공극 파괴전압을 일정하게 유지하기 위하여 두개의 온도 제한기를 보호기에 설치하였다. 전극을 열을 잘 흡수하도록 큰 구리 막대기로 만들어 열용량을 크게 하고, 편편한 전극면을 따라 열을 균일하게 분포시키기 위하여 아아크가 앞뒤로 움직이도록 하였다. 이와 같이 함으로써 전극면의 부분적인 손상을 막을 수 있었다.

7. 설 계

20KVA, 1상, 3150/210V

- (1) 정격전압
1차전압 : 3150볼트[V]
2차전압 : 210볼트[V]
- (2) 정격전류
1차전류 : 6.35암페어[A]
2차전류 : 95.2암페어[A]
- (3) 권선도 : 그림 5
- (4) 권당 전압(Volt per Turn) : 6.18V/T

표 4. 커패시터 보호기에 대한 과전압 시험
Table 4. Overvoltage test for capacitor protector

시험번호	고 압 전 류 (High Vtg. Current)				지 속 시 간 (Hold Time)	최 대 파 괴 전 압	
	8 암페어 (Amps)	84.4 암페어 (Amps)	8 암페어 (Amps)	8 암페어 (Amps)		치 음	나 중
1	8	84.4	8	8	18 사이클 (Cycle)	1.68KV	1.62KV
2	8	84.4	8	8	18 "	1.75 "	1.62 "
3	8	21.5	8	8	47 "		
4	8	53.6	8	8	47 "	1.75 "	1.62 "
5	8	53.6	8	8	40 "	1.88 "	1.81 "
6	8	21.5	8	8	25 "	1.93 "	1.68 "

표 4는 직렬 커패시터(capacitor) 보호기에 대한 몇 개의 과전압 시험결과로서, 이것은 보호기 파괴전압에 대한 정격의 400% 이상의 단시간 부하의 효과를 표시한 것이다. 최종 파괴치는 오실로그래프(Oscillogram)으로부터 측정된 것이다. 그리고 파괴전압이 약간 강하한 것은 가열된 간격 전극의 열이온 방사에 의한 것이다. 짧은 냉각기간 후에 파괴전압은 처음 값으로 회복하는 것이 발견되었다.

6. 시작품 사양 결정

이상의 원자재와 필요구조 일부를 검토한 결과 시작품 사양으로서 다음과 같이 그 사양을 결정하였다.

- a. 용량 20KVA
- b. 상수 1φ
- c. 전압 3150/210V

(5) 권 수

	총 권 수	층당 권 수	층 수
2 차 권 선	34회	8 $\frac{1}{2}$	4
1 차 1 권 선	132 "	66	2
1 차 2 권 선	378 "	1	378
보 조 권 선	378 "	1	378

1차측 총 권수=510회

(6) 권선높이 (Winding Height)

	높 이 (Height)	유 도 (Margin)
2 차 권 선	140	10
1 차 1 권 선	130	15
1 차 1 권 선	130	15

(7) 도 체

	동 선	단 면 적	전 류 밀 도	트 레 버 어 스 (traverse)	무 계
1 차 1 권 선	1.8φ 동선	2.545	2.5	1.914	2.16kg
1 차 2 권 선	0.02mm×130mm동박	2.6	2.44	130	16.1kg
2 차 권 선	2(3.0×7.0)	2×20.5	2.32	14.4	7.6kg

- d. 전류 6.35A/95.2A
- e. 철손 123W(115%)
- f. 전압변동을 p.f. 0.82 (lag)에서 0
- g. 효율 98.3%

(8) 도체 평균장

- 월드 주변(Mold Circumference): 550
- 2차측 권선 평균장: 616
- 1차 1권선 평균장: 722

$P_c : 6.13\%$

$$\% \epsilon = mP_r + nP_x = \cos\theta \times 1.24 + \sin\theta(4.38 - 6.3)$$

$$= 1.24\cos\theta - 1.75\sin\theta = 2.14\sin(35.3^\circ - \theta) = 0$$

p.f. = $\cos\theta = \cos 35.3^\circ = 0.82$ [지상 (lag)]

즉 역률 0.82에서 전압변동율이 0이 된다.

(25) 효율: 98.3% Y

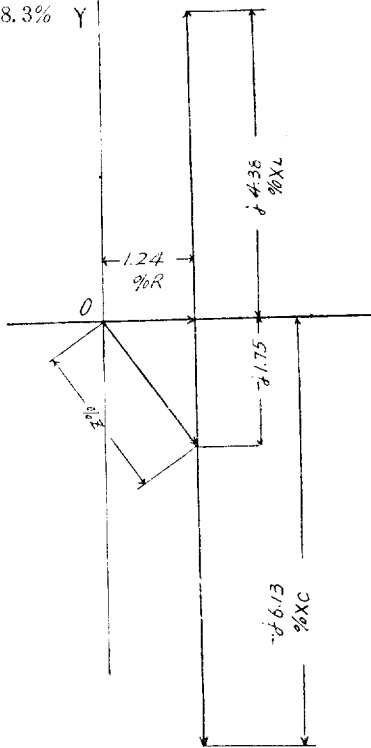


그림 7. 벡터 선도 Fig. 7. Vector diagram

8. 시 작

a. 철심 권선

이 작시품으로서 설계한 철심형은 웨스코(Wesco)형이라고 하는 미국 웨스팅하우스(Westinghouse)사에서 사용하는 방법으로서, 그 제작 도면은 그림 6과 같으며, 테이프(Tape)형 규소강판을 슬리팅머신(Slitting Machine)으로 소정의 폭으로 절제한 후 권선기로 소정의 지름과 두께로 마는데, 이 경우 가장 주의해야 할 것은 성층율을 정확히 해야 하는 것이다. 다음에 이를 절단, 원형으로 재성층하는데 이 경우 그 성층율은 95%로 해야 하며, 이것 역시 정확하게 해야 한다. 그림 8, 그림 9는 각각 권선한 철심과 그 절단도이다.

b. 철심 열처리

상기 철심은 그림 6에 표시한 최종 형태로 성형되어 열처리를 해야 하는데 이 경우 열처리 분위기는 환원성 가스 하, 850°C에서 30분간의 홀딩 타임(Holding Time)을 갖는 그림 10과 같은 열 사이클에 따라 해야 한다.

열처리에서 주의해야 할 점은

- (1) 성형한 대로의 치수와 모양을 유지하게 할 것.

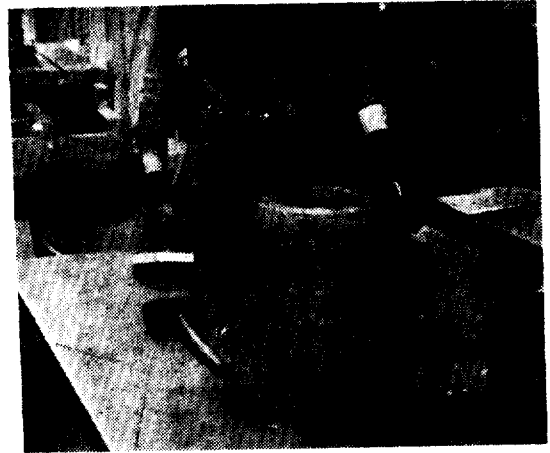


그림 8. 권선한 철심 Fig. 8. Wound core

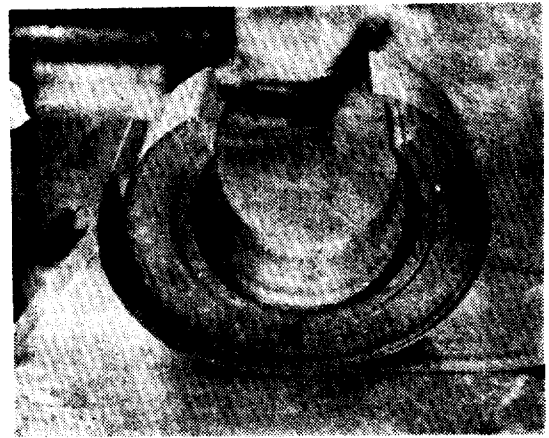


그림 9. 철심 절단도 Fig. 9. Cross section of core

- (2) 탄소나 산소가 침입하지 못하게 할 것.
- (3) 노(furnace)내 온도분포를 균일하게 할 것.
- (4) 열 사이클을 엄격하게 지킬 것 등이다.

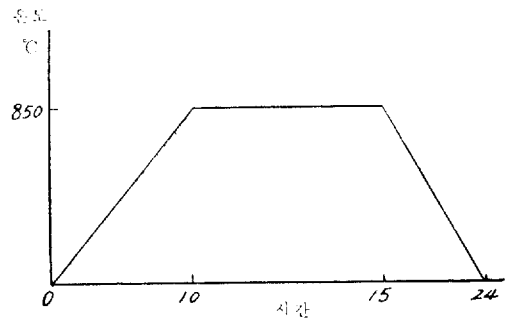


그림 10. 열 사이클 Fig. 10. Heat cycle

c. 권 선

전술한 바와 같이 이 변압기의 고압권선은 부박권선으로서 고압측 권선에 다량의 직렬 커패시탄스(Capacitance)를 갖도록 한 것이다.



그림 11, 권선도
Fig. 11. Winding diagram

고전압 권선은 두개의 분리된 등박 도선으로 감으며 각 도선의 일단벽이 각기 일차 배선선에 연결된다. 그러나 이 두 권선은 서로 금속적으로 연결된 것은 아니다. 이 두 도선은 넓은 표면적을 가지는 부박 도체이고 콘덴서용 절연지를 사이에 두고 서로 좁은 간격으로 감겨 있으므로 전기적으로 커패시턴스를 갖게 된다. 이차 권선은 각 선으로 일반 변압기와 같은 구조로 감는다. 권선은 그림 11과 같이 감으며 저압권선을 먼저 감고 그 위로 중복된 두개의 부박 도선을 고압 권선으로 감는다. 이 경우 고압 권선의 실변성권회수는 처음에서 끝까지 감겨 있는 전 부박 권선수이고, 두개의 고압 권선간에 포함된 분포 직렬용량은 이를 고압 권선에 직렬로 연결된 집중용량으로 볼 수 있으며 다음 식에 의해서 계산된다.

$$C = \frac{0.244KA}{d} \times 10^{-6}$$

여기서

C : 커패시턴스(Capacitance)

K : 유전체 상수

A : 실 부박도선 면적

d : 부박도선간 거리

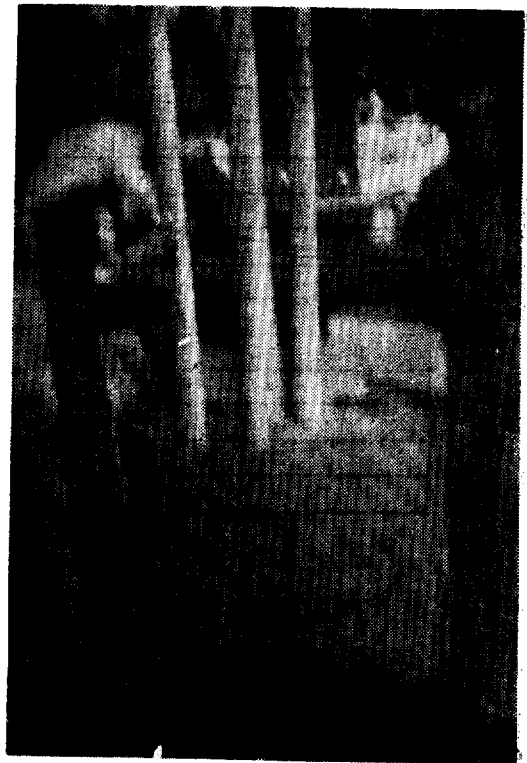


그림 12. 조립된 변압기 본체
Fig. 12. Assembled transformer

d. 조립

조립에서 가장 주의해야 할 점은 코일에 철심(Core)을 삽입할 때 성층울에 변화가 오게 해서는 절대로 안된다. 그 다음은 철심을 조일 때 압력이 균등하게 걸리게 해야 하며 너무 세게 조여도 안된다. 그리고 건조는 절연상 가장 중요한 문제로서 이 변압기는 120°C, 48시간 건조하였다. 그림 12는 조립된 변압기 본체이다.

9. 시 험

이 변압기의 다른 특성은 설계상 임의로 조절이 가능하므로 다른 특성시험 결과보고는 생략하고, 부하별 역률별 전압변동을 측정결과만을 보면 표 5 및 그림 13과 같다.

%정격전압	0%	50%	100%	150%	200%	250%	300%	350%
2 차전압 (일반변압기 p.f. 80%)	210V	208V	205.7V	203.6V	201.5V	199.5V	197.3V	195.2V
'' (100% 역률부하)	210V	209V	207.6V	206.5V	205.5V	204.3V	203.3V	202V
'' (80% 역률부하)	210V	210V	210V	210V	210V	210V	210V	210V
'' (60% 역률부하)	210V	210.5V	211V	211.6V	212V	212.5V	213V	213.6V
'' (40% 역률부하)	210V	211V	212V	213V	214V	214.8V	215.8V	216.7V

표 5. 변압기 전압 변동을
Table 5. Capacifomer voltage regulation

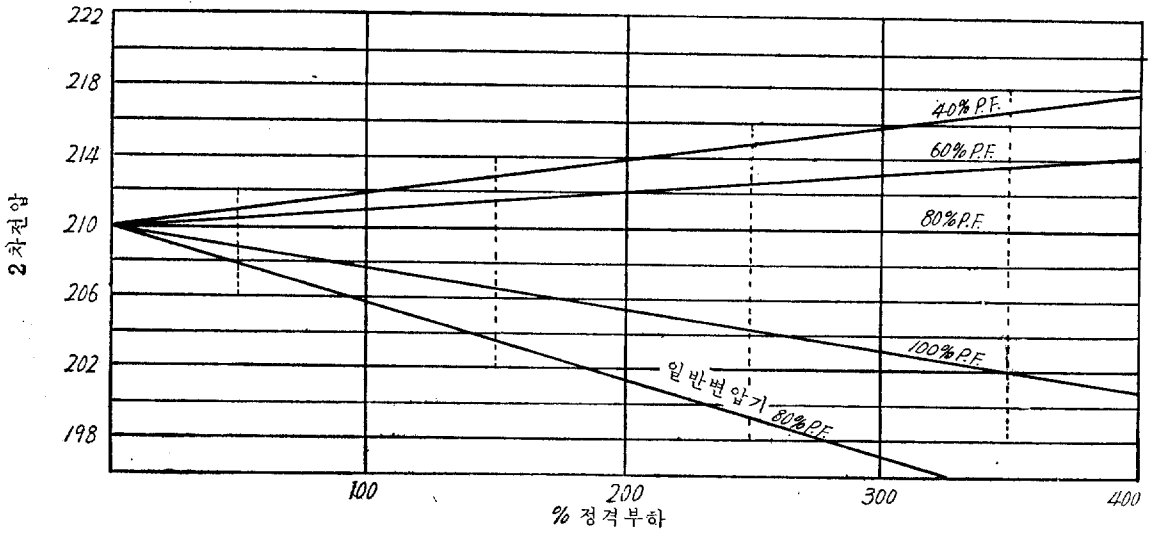


그림 13. 변압기 전압변동을
Fig. 13. Capacifomer voltage regulation

10. 결 론

이상 본 연구의 제일 목표라고 볼 수 있는 직렬용량 부가법은 동박 (실은 알루미늄박으로 하고 싶었음)으로 고압 권선을 포개어 감으로써 무난히 정격전류를 흐르게 할 수 있어 완전히 성공적이었다고 본다.

둘째는 용량 부가 고압권선 단자간의 전압상승 문제인데 이것도 어느 정도 본문에 기술한 바와 같이 성공적이 있다고 볼 수 있으나 좀 더 연구할 여지가 있다고 보겠다.

끝으로 이의 실용성 문제인데 본 연구에서는 상기 두 문제에 중점을 두었기 때문에 기타 조건에 대한 엄밀한 검토 즉 용량성으로 인한 제과도 현상의 철저한 분석, 그 결과에 따른 절연 문제의 검토, 배전 변압기의 최신 개선 특성의 부가 가능 여부(과부하 특성, 고온 사용

특성, 손실비 개선문제)의 검토를 하지 못한 것은 대단히 유감스럽다. 고로 차후단계로서 이들 문제를 검토 개량하여 실제 사용할 수 있는 배전 변압기를 시작하여 다음과 같이 실용화했으면 한다. 우선 적극 협조하여 실제 사용시험을 할 수 있는 제작회사를 선정하고(시험품 실용상의 신뢰성 향상을 위한 약간의 개량 필요) 이를 약 20대 가량 제작, 한국전력으로 하여금 실용시험을 행하게 한 후, 그 결과를 검토하기 위하여 한전, 제작회사, 연구자로 구성된 평가위원회를 거쳐 규격안을 작성, 표준국으로 하여금 이를 확정시킨 후 한전이 채택함으로써 실용화할 수 있다고 생각된다.

본 연구 중 각종 시험과 시료 제작에 대한 편리를 도모하여 주신 전기기기 제작 회사인 한영공업주식회사에 심심한 사의를 표하는 바이다.