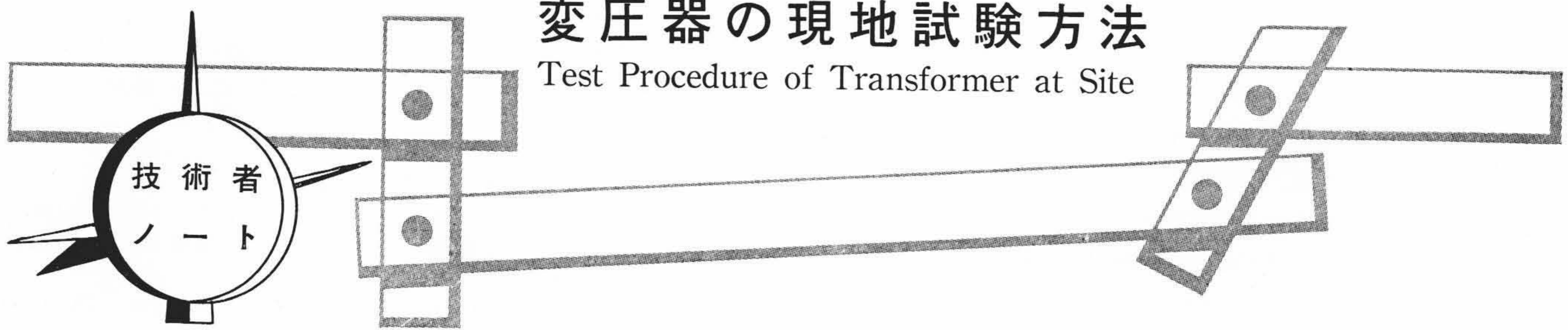




福岡 勝* 東 条 喜 義*
Masaru Fukuoka Nobuyoshi Tōjō

1. 緒 言

変圧器の温度上昇試験を現地で実施する場合、製作工場で行なうように簡単にできないことが多いので、現地の電源設備と供試変圧器の仕様とを考慮して適切な方法を決定しなければならない。また据付現場においては電気工作物規程に準拠して第1表に示すような試験電圧で絶縁耐力試験が行なわれる。実施にあたっては全絶縁の場合は試験用変圧器とこれに供給する電源があれば実施できるが、段絶縁の場合は線路側と中性点の絶縁階級が異なるため同一電圧を印加することができず、誘導法によって行なわれなければならない。そのため起動発電機付の同期調相機のある場合はこれを発電機として使用するか、または適当な誘導電圧調整器と変圧器を使って行なうか、または他の発電所からの送電線を利用して試験電圧に相当する電圧を印加しなければならない。本編は現地における変圧器の温度上昇試験および絶縁耐力試験の各種の方法を記し、現地の電源設備に応じた試験方法を決定するための参考とするものである。

2. 現地における変圧器の温度上昇試験の方法

2.1 本文で使用する文字の説明

本文で使用する文字の意義を第2表に示す。

2.2 供試変圧器が1台の場合。

2.2.1 実 負 荷 法

供試変圧器の定格出力に相当する負荷を供給して行なう方法で、この場合、供試変圧器には無負荷損と負荷損が供給される。

無負荷損は印加電圧によって決めるものである。印加電圧が供試変圧器の試験時のタップ電圧と異なる場合は、工場試験成績表の無負荷特性曲線により試験時の無負荷損を求める必要がある。また、負荷損は供給する負荷電流の2乗に比例して決まるものである。試験時の供給負荷が供試変圧器の定格出力と異なる場合は、試験時の供給負荷電流と定格出力時電流との比の2乗を定格出力における負荷損（工場試験成績に記載してある値）に乗じて、試験時の負荷損を算出しなければならない。

したがって、印加電圧が供試変圧器の試験時のタップ電圧と異なる場合、あるいは供給できる負荷が定格出力と異なる場合は、次式により実測値から定格出力における油温上昇値を補正計算で求めなければならない。

$$\theta = \theta' \times \left(\frac{W_i + W_c}{W_i' + W_c'} \right)^A \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{ただし } W_c' = \left(\frac{p'}{p} \right)^2 \times W_c$$

この方法の欠点は試験中に負荷の変動が大きい場合には補正計算が非常に煩雑になることである。しかし、比較的変動が小さい場合には試験時間中の平均負荷をもって試験時の供給負荷として

第1表 電気工作物規程による試験電圧値

最大使用電圧 (E)	系 統	試 験 電 圧	時間(分)
7,000V 以下	—	1.5E (最低 500V)	10
7,000V 以上	—	1.25E (最低 11,000V)	10
50,000V 以上	中性点非接地	1.25E	10
—	中性点接地	1.1E (最低 63,000V)	10
160,000V 以上	中性点直接接地	0.72E	10

第2表 本文で使用する文字の説明

文字	説 明	文字	説 明
V	供試変圧器のタップ電圧 (V)	p	供試変圧器の定格出力 (kVA)
I	供試変圧器のタップ電流 (A)	p'	試験時の供給負荷 (kW)
V _Z	供試変圧器のパーセントインピーダンス (%)	m	供試変圧器の外箱の冷却面積(本)(放熱器または冷却器に換算した本数)
I'	試験時の供給電流 (A)	n	供試変圧器の放熱器または冷却器の冷却面積 (本)
V _T	タップ差電圧 (V)	θ'	実測油温上昇
W _i	供試変圧器の無負荷損 (W)	θ	補正油温上昇
W _c	供試変圧器の負荷損 (W)	A	指数 (=0.8: 油入変圧器の場合)*
W _i '	供試変圧器の供給無負荷損 (W)		(=1.0: 乾式変圧器の場合)
P _c '	供試変圧器の供給負荷損 (W)		

* 冷却方式によって多少異なるが電気学会の油入変圧器運転指針により0.8を採用する。

よい。電鉄用の整流器用変圧器などはこの方法で温度上昇試験を行なうことが多い。

〔参考事項〕

(1) 供給負荷としては実負荷でなくても、電力用コンデンサがあればそれを負荷として試験を行なうことができる。

(2) 試験時の供給負荷が変圧器の定格出力に満たない場合は、その不足分を放熱器（あるいは冷却器）を閉鎖し、冷却面積を調整して定格出力における運転状態と等価にすることができる。この場合の油温上昇の補正は、上述の考えに次に述べる等価法における補正計算の考えを入れて計算すればよい。

〔例〕 定格出力 6,000 kVA の油入自冷式変圧器に定格電圧で 5,000 kVA の負荷を供給して温度上昇試験を行なった場合、実測油温上昇が 35℃ であれば定格出力における油温上昇は次のとおりである。ただし、この変圧器の無負荷損を 12 kW、負荷損を 42 kW とする。

$$\theta = 35.0 \times \left(\frac{12 + 42}{12 + \left(\frac{5,000}{6,000} \right)^2 \times 42} \right)^{0.8} = 43.5 (^\circ\text{C})$$

2.2.2 等 価 法

変圧器の全損失のうちの負荷損のみを供給して試験する方法で、さらに細別すると次の3方法がある。

- (1) 全損失を負荷損とみなしてこれを供給する方法
- (2) 試験時使用する冷却面積を減らさないで負荷損のみを供給する方法
- (3) 負荷損のみを供給して冷却面積を減らす方法

いずれの場合でも、この方法では一方の巻線を短絡して他の巻

* 日立製作所国分工場



線から負荷損を供給するので供試変圧器のインピーダンス電圧に相当する電圧が必要であり、したがって試験電源としては供試変圧器の定格出力のインピーダンス分の容量が必要である。

一般に現地では、供試変圧器のインピーダンス電圧を得ることは困難であるが、インピーダンス電圧に近似の電圧を得ることは比較的容易な場合があるので、現地で実施する温度上昇試験のうちで最も簡単にできる方法であり、電力用をはじめ、一般産業用の変圧器に広く実施されている。

(1) 全損失を負荷損とみなしてこれを供給する方法

全損失（すなわち無負荷損も含めて）を負荷損とみなしてこれを供給するので、試験時の電流は定格電流よりも無負荷損分だけ多く流すことになり、試験に先だってこの値をは握しておく必要がある。試験時の電流は次式により求めることができる。

$$I' = I \times \sqrt{\frac{W_i + W_c}{W_c}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

この電流を供給するためのインピーダンス電圧は

$$V_z' = \frac{I'}{I} \times \frac{V_z}{100} \times V$$

で求められるので、この電圧が得られればこの方法での試験は容易にできる。

この方法は等価的に全損失を供給して試験するので実測値を補正する必要はなく、また工場試験でも適用されていることが多いので工場試験成績表をそのまま参考にすることができる。しかしながら、 V_z' なる電圧を得るには比較的設備のととのったところでないとい困難であるので、工場では行われているが現地での温度上昇試験に適用された例は少ない。

(2) 使用する冷却面積を減らさないで負荷損のみを供給する方法

全損失のうちの負荷損のみを供給し、しかも放熱器（または冷却器）を調整しないで冷却面積を100%使用して行なう方法である。この場合も前述のように、所定のインピーダンス電圧を得ることは一般に困難であるので実測油温上昇値より定格時の損失と試験時の供給負荷損との関係によって定格状態の油温上昇に補正しなければならない。この補正計算式を(3)式に示す。

$$\theta = \theta' \times \left(\frac{W_i + W_c}{W_c'} \right)^A \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{ただし } W_c' = \left(\frac{I'}{I} \right)^2 \times W_c$$

この方法で試験するときの供給損失は少なくとも定格における負荷損の50%以上でなければならない。定格状態の損失と試験時の供給損失との比が大きすぎると(3)式は実験式であるので誤差が大きくなりがちで好ましくないからである。

(3) 負荷損のみを供給して冷却面積を減らす方法

適当な負荷損のみを供給し、不足分は放熱器を調整することにより有効冷却面積を減らして定格の状態と等価な条件のもとで試験する方法である。この場合供給できる損失と定格の損失とから試験時に使用する放熱器の本数をあらかじめ決定しておき、それによって実測油温上昇を補正しなければならない。

使用する放熱器の本数の決定と実測油温上昇の補正は次のように行なう。

試験時に必要な冷却面積：

$$N = (m + n) \times \frac{W_c'}{W_i + W_c} \quad \dots\dots\dots (4)$$

試験時に使用する放熱器の本数：

$$n' = N - m$$

n' が整数でない場合は n' にもっとも近い整数 N' をとり、これを使用本数とする。したがって温度補正係数は

$$k = \frac{m + N'}{N}$$

となり、補正油温上昇は

$$\theta = \theta' \times \frac{m + N'}{N} \quad \dots\dots\dots (5)$$

となる。

ただし、上のようにして決定された試験時の放熱器の使用本数が全本数の20%以下となった場合は、放熱器を調整することはやめて全部使用して試験し、実測油温上昇を(3)式によって補正する方がよい(すなわち2.2.2に述べた試験方法を採用する)。これは放熱器の全本数に対して試験時に使用する本数が極端に少ないと油入式変圧器の冷却の生命である油の対流や循環が極端に相異し、実測油温上昇が十分信頼できる値とならないからである。

[参考事項]

(1) 送油式冷却器を自冷式放熱器と同様に考えてよい理由

強制的に油を循環させたり、通風冷却方式の変圧器で冷却器を停止することはその冷却機能を完全に殺すことになり、油入自冷式変圧器の放熱器を対流をそこなわない程度に閉塞するのと少し様子が異なると考えられていた。しかし、日立製作所においては種々の実験の結果、冷却器を放熱器と同様に考えてその一部を閉塞し等価的に損失を供給した場合と全冷却器を使用して全損失を供給した場合とでは温度上昇値にほとんど差がないことを確認している。冷却方式のいかに問わず、油入変圧器においては冷却器を油入自冷式変圧器の放熱器と同様に考えて試験しても大差はない。

(2) 試験時の電流が測定できない場合の供給損失の算出

温度上昇試験では試験時の電流を測定することが供給損失の算出に是非必要なことであるが、なんらかの理由によりこれが不可能なときは、供給できるインピーダンス電圧を測定することにより次式で求めることができる。これはインピーダンス電圧に比例して電流が流れるからである。

$$W_c' = W_c \times \left(\frac{V_1}{V \times \frac{V_z}{100}} \right)^2$$

ここに V_1 ：試験時の供給可能な電圧(V)

なお、この式を用いれば、温度上昇試験前に供給損失や放熱器の使用本数を求めることができるのでこれにより試験前に試験の概要をは握することができる。

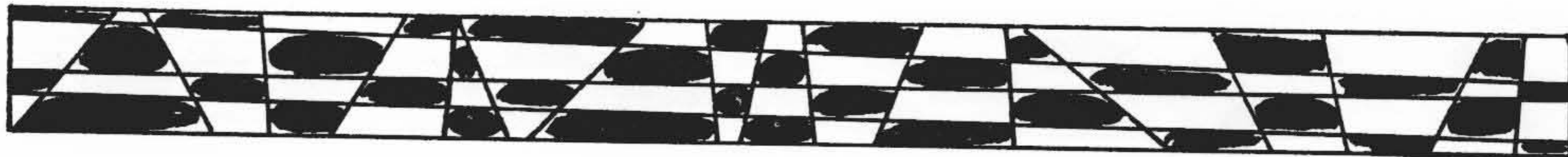
[例] 6,000 kVA 油入自冷式変圧器で損失のもっとも多い57/3.3 kV タップを使用して温度上昇試験を行ないたい場合、電源の電圧が3.3 kVのときいかにすればよいか。ただし、供試変圧器の57/3.3 kV タップにおけるインピーダンス電圧を7.5%、無負荷損を12.5 kW および負荷損を48.5 kW とし、冷却面積は放熱器12本、タンクとカバーは放熱器3.92本分相当とする。

3.3 kV 側を短絡し57 kV 側から負荷損を供給する。供試変圧器の所定のインピーダンス電圧は $57 \text{ kV} \times 0.075 = 4.27 \text{ kV}$ である。現地試験時供給できる電圧は3.3 kVであるからこのときの供給損失は

$$\left(\frac{3.3}{4.27} \right)^2 \times 48.5 = 29.0 \text{ (kW)}$$

となる。

したがって放熱器を全部使用して試験する場合の補正温度上昇は



$$\theta = \theta' \times \left(\frac{12.5 + 48.5}{29.0} \right)^{0.8} = 1.81 \times \theta' (^{\circ}\text{C})$$

また、放熱器を調整して等価的に全損失を供給する場合は

$$N = (12 + 3.92) \times \frac{29.0}{12.5 + 48.5} = 7.57$$

$$n' = 7.57 - 3.92 = 3.65$$

となり、これに最も近い放熱器の本数をとって $N' = 4$ 本とすれば補正值は次のとおりである。

$$\theta = \theta' \times \frac{3.92 + 4}{7.57} = 1.045 \times \theta' (^{\circ}\text{C})$$

さらに、電源の電圧が任意に調整できる場合には 2.1 に述べた方法も適用できる。この場合の試験時の電流は

$$I' = I \times \sqrt{\frac{12.5 + 48.5}{48.5}} = 1.122 \times I$$

となり 12.2% の過電流となるが試験にはさしつかえない。

2.3 供試変圧器が2台または複数台の場合

供試変圧器が2台または複数台の場合には前章に述べた1台の場合の方法でも行なえるが、次に述べる方法も実施することができる。なお既設の変圧器と組み合わせて試験できる場合もこれに準じて行なえばよい。

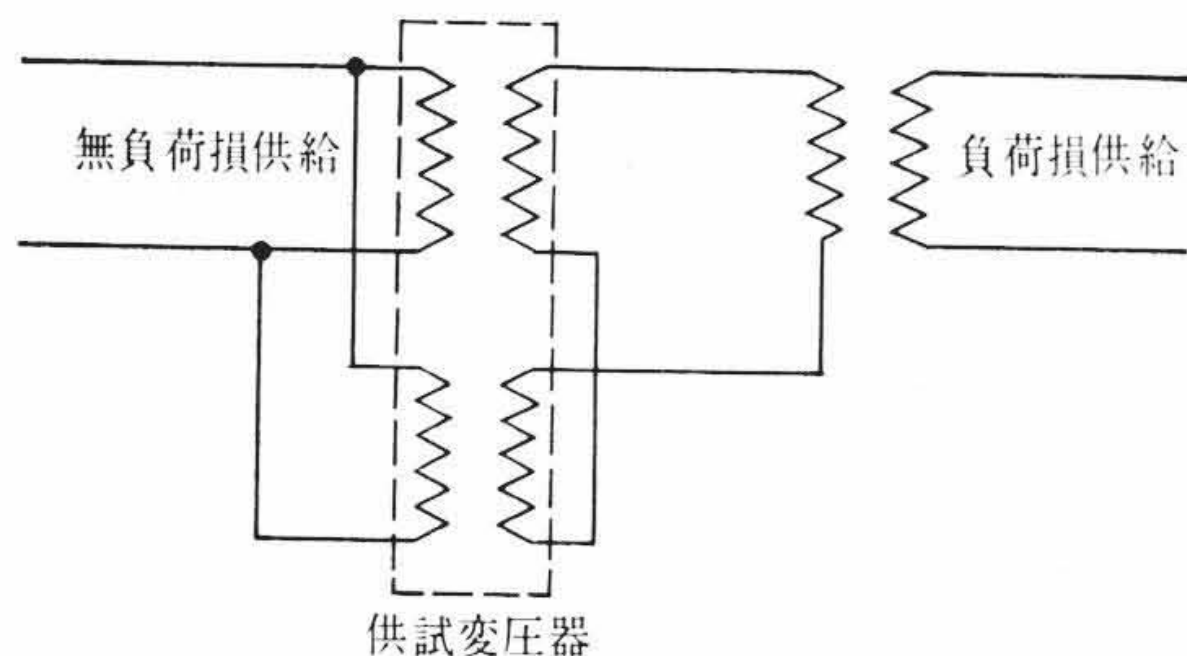
2.3.1 電源が二つある場合の返還負荷法

電源が二つある場合には、供試変圧器2台を組み合わせる無負荷損と負荷損の両方をそれぞれ別個に供給して実施する方法である。この場合でも定格の損失が供給できないときは(1)式により実測油温上昇を補正しなければならない。

この方法の欠点は電源が二つ必要で、しかも配線が複雑となることであるが、無負荷損と負荷損の両方を供給できるので温度上昇試験としてはもっとも理想的な方法である。しかし実際には現地で二つの電源を準備することは不可能に近いので実現性に乏しいが、単相変圧器が3台のときで受電電圧が準備でき、その変圧器の二次電圧が2台分のインピーダンス電圧に近いときは、1台を負荷損供給の電源として使用し、残り2台を試験することができる。この場合の結線例を第1図に示す。

2.3.2 供試変圧器のタップ差電圧を利用する場合の返還負荷法

前節に述べた方法では電源が二つ必要であったが、ここでは無負荷損供給の電源のみを準備し、負荷損の供給は供試変圧器のタップ差電圧を利用して循環電流を流すことによって行なう方法である。この場合、電源としては供試変圧器の定格電圧を印加できるものがあれば簡単に試験できるわけで、しかも電源側に流れる電流は供試変圧器のタップ差による差電流と2台分の無負荷電流との和だけである。しかし、一般にタップ差電圧は供試変圧器のインピーダンス電圧を100%補償することができないので、このような場合は試験時の損失を、印加電圧から無負荷損、循環電流から負荷損を求め、(1)式により実測油温上昇値を補正しなければ



第1図 単相変圧器1台を電源とし残り2台で行なう返還負荷法の結線例

ばならない。

この方法は2台または複数台の変圧器の温度上昇試験を行なうのに電源や配線などが簡単にできるので、電力用、産業用など一般の変圧器にもっとも広く利用されている。

〔参考事項〕

(1) タップ差電圧の選び方

組み合わせる変圧器の台数(2台組み合わせるときは2台、3台のときは3台)分のインピーダンス電圧にもっとも近く、かつそれ以下の電圧が得られるようにタップ差電圧を決定する。

(2) 試験時の励磁側の決定

試験時に電圧を印加する側は変圧器の一次、二次どちらでもよいわけであるが、現地の電源設備により決定するのがもっともよい。ただし、ここで注意しなければならないのは組み合わせたいいずれの変圧器もタップ差を設けたために、10%以上の過励磁にならないようにすることである。これは試験中の鉄心の過度な飽和などの異常現象を防ぐためである。したがってインピーダンス電圧にもっとも近いタップ差電圧を得ようとするときに変圧器が10%以上の過励磁となるときは、タップ差をつくらない側から励磁するか、あるいはタップ差電圧を小さくして試験することが好ましい。このようにして試験時の励磁側(電源側)を決定するのであるが、電源側、負荷側ともに組み合わせた変圧器間のわたり線は極端に長くしてはいけない。これは線路の合成インピーダンスが大きくなり、循環電流が計算どおりに流れ得ないからである。

(3) 循環電流を測定できないときの循環電流と供給負荷損の算出

供試変圧器の選定タップにおけるパーセント・インピーダンスを V_z とするとそのタップにおけるインピーダンス(Ω)は

$$R_i = \frac{V_i \times \frac{V_z}{100}}{I_i}$$

ここに R_i : 選定タップにおけるインピーダンス (Ω)

V_i : タップ電圧 (V)

I_i : 試験時のタップにおける定格電流 (A)

で計算できるから、試験時の循環電流は

$$I' = \frac{V_T}{\sum R_i} \dots \dots \dots (6)$$

ここに $\sum R_i$: 組み合わせた変圧器の合成インピーダンス(Ω)となる。したがって供給負荷損は

$$W_e' = \left(\frac{I'}{I} \right)^2 \times W_e$$

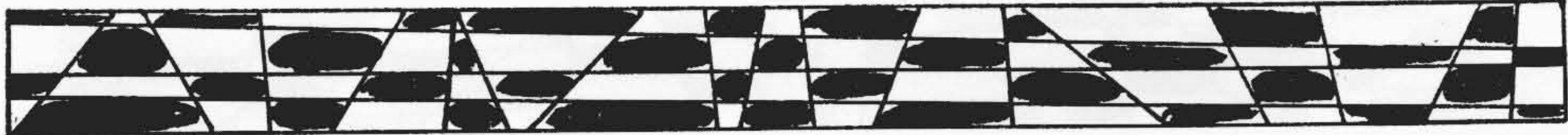
となる。

なお、この計算は試験前における試験概要のは握にも応用することができる。

(4) 三相変圧器1台ではこの方法が適用できない理由

試験時に流れる循環電流は零相であるが、一般の三相変圧器は零相磁路を有しないのが普通で、このようなものに零相電流を流すと漏えい磁束が極端に大きくなり、試験時の損失も定格状態の値とは著しくちがって試験の価値がなくなる。したがって三相変圧器1台のときは適用できない。ただし、単相変圧器3台を組み合わせる三角形結線としてタップ差電圧により循環電流を流すことは各変圧器の鉄心が個別のものであるので当然可能なわけである。

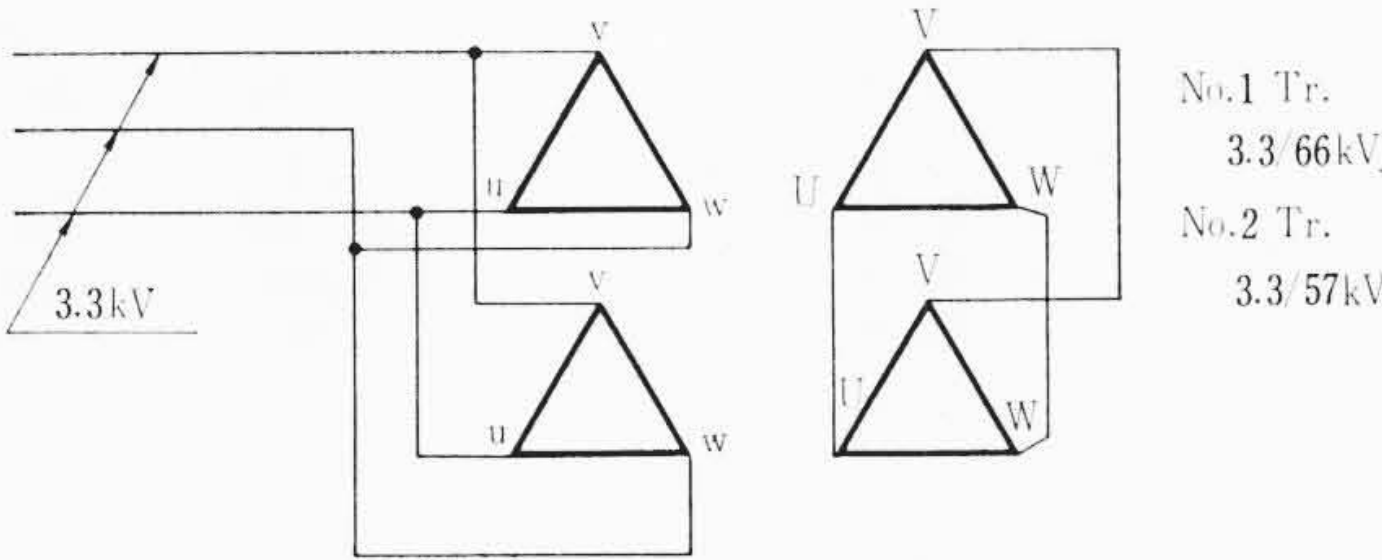
〔例〕 第3表に示す仕様の6,000 kVA三相変圧器2台を組み合わせるタップ差電圧による循環電流を流して温度上昇試験を行なう場合について説明する。



第3表 供試変圧器の仕様および損失

一 次 電 圧 (kV)	F 66	F 63	R 60	F 57
二 次 電 圧 (kV)	3.3	3.3	3.3	3.3
一 次 電 流 (A)	52.5	55.0	57.7	60.8
二 次 電 流 (A)	1,050	1,050	1,050	1,050
無 負 荷 損 (kW)	12.32 (12.5)			
負 荷 損 (kW)	39.88 (39.88)	40.96 (40.95)	41.67 (41.66)	43.42 (43.42)
パーセント・インピー ダンス (%)	7.31 (7.30)	7.35 (7.35)	7.58 (7.58)	7.86 (7.85)

注：無負荷損，負荷損およびパーセント・インピーダンスの（ ）の内の値は No. 2 Tr のものである。



第2図 タップ差電圧を利用する場合の結線例

タップ差電圧の決定

上記変圧器のインピーダンス電圧は約4.5kVであるから2台組み合わせた場合の必要な差電圧は約9kVとなる。したがって1台を66/3.3kVタップとし，残りを57/3.3kVタップにすればよい。

励磁側の決定

上のようにタップを定めた場合66kVで励磁すると57kVタップにした変圧器は約116%の過励磁となり，さきに述べた理由で好ましくない。したがって3.3kV側から励磁するのがよい。ただし66kVしか電源がない場合は57kVタップを60kVタップに改めて，66kVで励磁するほかはない。ここでは3.3kV側から励磁した場合を説明する。

結 線

結線は第2図に示すとおりに行なえばよい。

計 算

高圧側からみたインピーダンスは

No. 1 Tr.: $\frac{66,000 \times \frac{7.31}{100}}{52.5} = 91.9 \text{ (}\Omega\text{)}$

No. 2 Tr.: $\frac{57,000 \times \frac{7.85}{100}}{60.8} = 73.7 \text{ (}\Omega\text{)}$

であり，タップ差電圧は9kVであるので循環電流は

$$I' = \frac{9,000}{91.7 + 73.7} = 54.4 \text{ (A)}$$

となる。したがってそれぞれ定格電流に対する割合は

No. 1 Tr.: $\frac{54.4}{52.5} \times 100 = 103.7 \text{ (}\%\text{)}$

No. 2 Tr.: $\frac{54.4}{60.8} \times 100 = 89.5 \text{ (}\%\text{)}$

となり，供給負荷損はそれぞれ次のとおりとなる。

No. 1 Tr.: $1.037^2 \times 39.88 = 42.9 \text{ (kW)}$

No. 2 Tr.: $0.895^2 \times 43.42 = 34.75 \text{ (kW)}$

したがって，実測油温上昇 θ' の補正計算は次式によればよい。

No. 1 Tr.: $\theta = \theta' \times \left(\frac{12.32 + 39.88}{12.32 + 42.9} \right)^{0.8} = 0.956 \theta' \text{ (}^\circ\text{C)}$

No. 2 Tr.: $\theta = \theta' \times \left(\frac{12.5 + 43.42}{12.5 + 34.75} \right)^{0.8} = 1.125 \theta' \text{ (}^\circ\text{C)}$

3. 各方法の比較

現地における変圧器の温度上昇試験のときには，上に述べた方法のうち最も適したものを選べばよいわけであるが，上の方法をいくつか組み合わせて行なうことも可能なことはいうまでもない（たとえばタップ差による方法で実施し，循環電流の定格電流に対する不足分を放熱器または冷却器を調整することにより補償するなど）。

最後に上記の各方法の長所と短所および適用できる変圧器の種類と比較表を第4表にまとめて示す。

4. 現地における変圧器の絶縁耐力試験の方法

4.1 本文で使用する文字，略号の説明

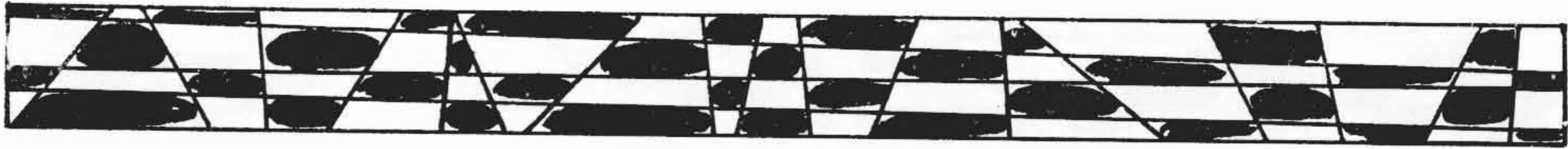
本文で使用する文字，略号の意義は第5表に示すとおりである。

4.2 試験電圧の確認

試験電圧の測定は標準として球間げきによる方法がよいが，現地においては球間げきの準備は困難な場合もある。そのときは試験電圧の低いもの，または電源波形が正弦波に近い場合は計器用変圧器で測定してもさしつかえない。試験用変圧器の3次を使用して電圧を測定する場合もあるが，静電容量の大きい変圧器を試験するときには不正確となるので，この場合は計器用変圧器により測定するほうがよい。また誘導法により試験を行なう場合は印加側の電圧で測定して変圧比倍する場合もあるが，被試験線路側に P. T. また P. D. がある場合はこれにより測定するほうが良い。

第4表 各方法の長所と短所

方 法	長 所	短 所	適用可能な変圧器の種類
実 負 荷 法	1. 使用状態と同一条件で試験できる。 2. 各種の変圧器に適用できる。	1. 負荷を得ることがむずかしい。 2. 多大な電力を消費する。	乾式，油入式および送油式の各種変圧器，特に整流器用変圧器はこの方法が良い。
等 価 法	1. 消費電力が少なくすむ。 2. 電源の都合がつけば簡単に試験できる。	1. 一般に負荷損しか供給できないので，補正計算が必要である。 2. 供給損失が極端に小さいときは誤差を生じる恐れがある。 3. 油入変圧器にしか適用されない。	油入式および送油式の一般電力用産業用変圧器
返 還 負 荷 法 (電源を二つ 用いる場合)	1. 無負荷損と負荷損との両方の損失が供給できるので使用状態に近い状態で試験できる。 2. 各種の変圧器に適用できる。	1. 電源が二つ必要であるから現地では多少むずかしい。 2. 配線が複雑である。 3. 供試変圧器が2台必要である。	乾式，油入式および送油式の各種変圧器
返 還 負 荷 法 (タップ差電圧を 利用する場合)	1. 上記と同じ。 2. 上記と同じ。 3. 受電電圧さえ得られれば簡単に試験できる。 4. 消費電力が非常に小さい。	1. タップ差電圧で100%のインピーダンス電圧を補償するのがむずかしいので補正計算が必要である。 2. 供試変圧器が過励磁にならないように注意する必要がある。 3. 供試変圧器1台では試験できない。	乾式，油入式および送油式の各種変圧器，特に乾式変圧器はこの方法がよい。



第5表 本文で使用する文字，略号

号	説 明	記号	説 明
T. Tr	試験用変圧器	K. S.	開閉器
I. R	誘導電圧調整器	(V)	試験電圧確認用電圧計
ⓐ	交流発電機	(Ag)	試験時充電電流測定用電流計
P. T	計器用変圧器	(DM)	起動発電機
P. D	結合コンデンサ形計器用変圧器	(RC)	同期調相機
C. T	計器用変流器	E	最大使用電圧
C. B	遮断器		

4.3 絶縁耐力試験方法

4.3.1 全絶縁の場合

現在わが国において公称回路電圧70 kV以下の絶縁は一般に全絶縁を採用している。この絶縁耐力試験は最初に記したように試験用変圧器とこれに供給する電源があれば実施できるが、試験用変圧器としては2次定格電圧が試験電圧に対して余裕があり、かつ試験時の充電電流に耐える容量のものを選ばなければならない。また電圧は約1/4以下の低電圧から電圧計の読み得る範囲で、できるだけ速やかに上昇させ、試験電圧値に達するようにするのが望ましいので、電圧調整を目的とした水抵抗または誘導電圧調整器を準備する必要がある。

試験時に必要な試験用変圧器と誘導電圧調整器の容量は試験時の充電電流と印加電圧によって決まるが、いずれもこの値より十分大きなものであることが要求される。試験時の充電電流は被試験器の静電容量と試験電圧により決まる。静電容量は変圧器の種類、容量および電圧などにより大きく異なり、一概に述べることはできないが工場試験データなどにより明らかにされている場合は(7)式によって試験用変圧器の容量を算出することができる。なお静電容量の概略値は第6表に示すとおりである。

$$P=I_c V=\omega C V^2\times 10^{-3}(\text{kVA}) \dots\dots\dots (7)$$

- P：試験用変圧器の容量 (kVA)
- I_c ：充電電流 (A)
- ω ： $2\pi f$
- f：試験時周波数 (c/s)
- C：被試験器の静電容量 (μF)
- V：試験電圧 (kV)

〔例1〕 下記に示すタップ電圧をもつ10,000 kVA 三相変圧器の絶縁耐力試験について説明する。

電 圧	高圧	66-63-60-57 kV	人
	低圧	3.41 kV	△
試験電圧	高圧	$66\text{ kV}\times 1.1=72.6\text{ kV}$ (抵抗接地系統)	
	低圧	$3.41\text{ kV}\times 1.5=5.115\text{ kV}$ (非接地系統)	

試験回路

試験回路は第3図に示すとおりである。

試験電圧の確認

T. Tr 3次の電圧計によるものとするとその読みは次のとおりである。

高圧 $72,600\times\frac{100}{75,000}=96.8\text{ V}$

低圧 $5,115\times\frac{100}{75,000}=6.82\text{ V}$

注： 低圧側の絶縁耐力試験を高圧側と同一回路で行なうと、上記のように確認電圧が非常に小さいため電圧調整が困難となり、試験電圧を超過する危険性があるのでT. Tr. を変えて行なうのがよい。

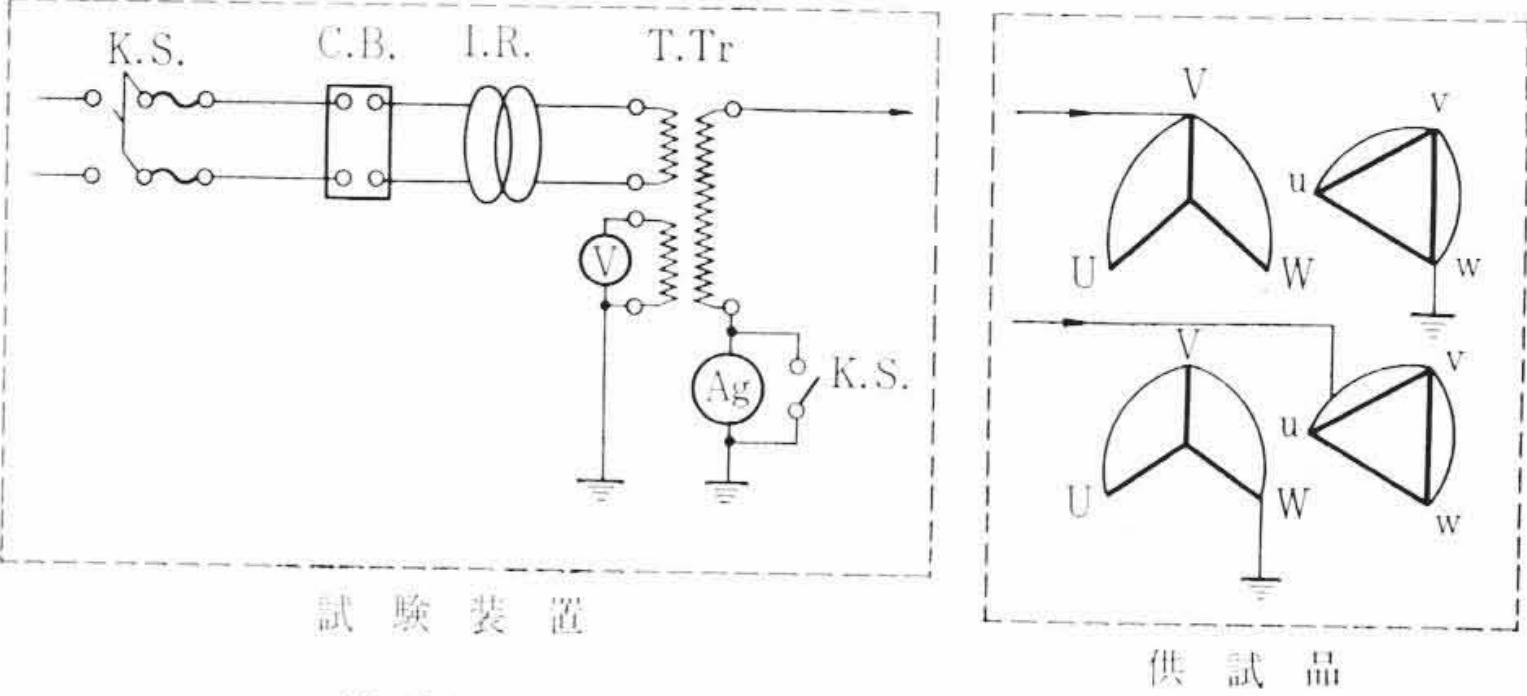
T. Tr として柱上変圧器を使用し、試験電圧の確認方法として

第6表 変圧器容量別の静電容量

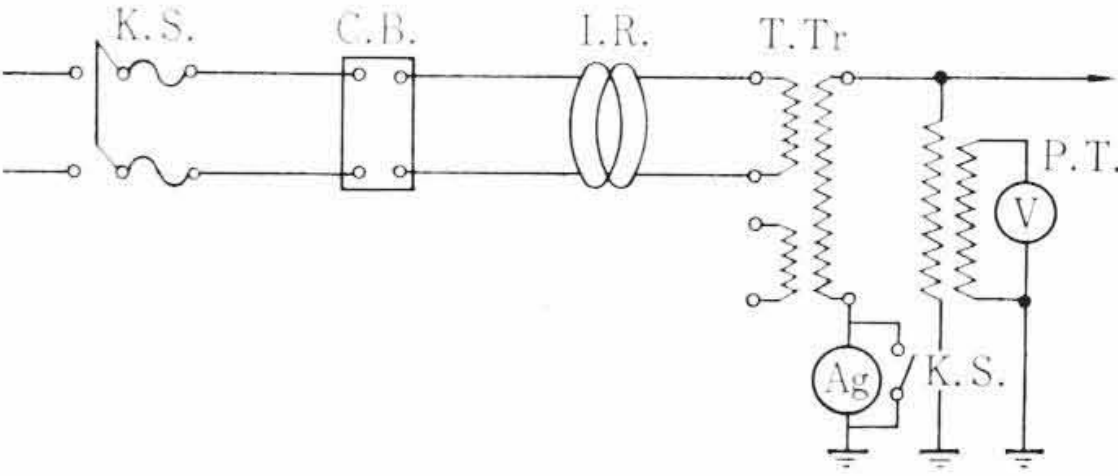
変圧器容量 (kVA)	静電容量 (pF)
6,000	3,000~10,000
10,000	5,000~12,000
20,000	7,500~15,000
30,000	13,000~20,000
60,000	18,000~25,000

第7表 例1, 2におけるI. R と T. Tr の仕様

	例1	例2
I. R { 容 量 (kVA)	37.5	75
1 次 電 圧 (V)	200	200
2 次 電 圧 (V)	200 ± 200	200 ± 200
T. Tr { 容 量 (kVA)	37.5	75
1 次 電 圧 (V)	$200\sim 400$	$200\sim 400$
2 次 電 圧 (V)	75,000	100,000
3 次 電 圧 (V)	100	100



第3図 例1, 2の試験回路



第4図 P. T使用の場合の試験回路

6,600/110 VのP. T.を使用するのがよい(第4図参照)。この場合の電圧計の読みは $5,115\times\frac{1}{60}=85.2\text{ V}$ となる。また高圧側の試験電圧の確認方法も低圧側と同じように77,000/110 VのP. T.を入れて行なってもよい。このときの電圧計の読みは次のようになる。

$$72,600\times\frac{1}{700}=103.7\text{ V}$$

〔例2〕 下記に示すタップ電圧をもつ30,000 kVA 三相負荷時タップ切換変圧器の絶縁耐力試験について説明する。

電 圧	高圧	80.5~75.25~70.0 kV (7タップ)	人
	低圧	22 kV	△
試験電圧	高圧	$80.5\text{ kV}\times 1.1=88.55\text{ kV}$ (抵抗接地系統)	
	低圧	$22\text{ kV}\times 1.25=27.5\text{ kV}$ (非接地系統)	

試験回路

試験回路は例1と同じように第3図に示すとおりである。

試験電圧の確認

T. Tr の3次の電圧計によればその読みは

高圧 $88,550\times\frac{1}{1,000}=88.55\text{ V}$

低圧 $27,500\times\frac{1}{1,000}=27.5\text{ V}$

4.3.2 段絶縁の場合

この場合は前述の全絶縁のようにT. Tr.を用いて、中性点に線路側と同一電圧を印加することができないので、誘導法によって

1 相ずつ行なわなければならない。試験用補助変圧器と誘導電圧調整器を用いて行なう場合、それらの必要な容量の決定は製作工場での無負荷試験結果の印加電圧と無負荷電流を参考とする。補助変圧器としては発電所では一般に所内変圧器を利用することが多く、誘導電圧調整器のみが問題となる場合が多い。系統の他バンクを利用して試験を行なう場合は古い発電機や変圧器を使用するため特に過励磁をさけ、通昇用変圧器を最高タップにし、発電機の発生電圧を定格以下にして行なうことが望ましい。低、中圧より印加し高圧側に電圧を誘起させる誘導法による場合は変圧器の使用タップによって誘起電圧が変わるので、まず使用タップを明確にする必要がある(最高タップを使用することをすすめる)。

(1) 140 kV 系統の場合(中性点は 80 号また 100 号の低減絶縁)

(i) 試験用変圧器による方法

〔例 3〕 下記のようなタップ電圧を有する 105,000kVA 三相変圧器の絶縁耐力試験について説明する。

電 圧	高圧	150.5-147-143.5-140 kV (段絶縁)	人
	中圧	66 kV	人
	低圧	21 kV	△

試験電圧

高圧線路側	$161 \text{ kV} \times 1.1 = 177.1 \text{ kV}$ (抵抗接地系統)
高圧中性点	$161/\sqrt{3} \text{ kV} \times 1.1 = 102.3 \text{ kV}$ (抵抗接地系統)
中 圧	$66 \text{ kV} \times 1.1 = 72.6 \text{ kV}$ (抵抗接地系統)
低 圧	$21 \text{ kV} \times 1.25 = 26.25 \text{ kV}$ (非接地系統)

注：高圧線路側は変圧器の最高電圧は 150.5kV であるが、系統に 161 kV のタップを有する変圧器があるため 161×1.1 を試験電圧としている。

試験回路

試験回路は第 5 図に示すように電源回路を構成し、第 6 図または第 7 図のように供試品の結線を試験する巻線によって構成すればよい。

試験回路構成上の注意

球間げきを使用するときにはできるだけ被試験器の近くにおき、かつ球間げきと直列に制動抵抗を入れ、放電電流と高調波振動の減衰を図るようにする。抵抗には液体抵抗または炭素抵抗を使用する。

試験電圧の確認

試験電圧は試験回路の 220 kV T. Tr により発生せしめる。試験電圧値 V は負荷容量により誤差を除くため、校正放電間げきにより校正する。すなわちまず 85~90% 試験電圧値に対する標準間げき長 a_0 を放電特性曲線より求める。放電特性曲線は放電間げきの直径によって異なる。

次にこの間げき長電圧を試験時の天候による気圧と温度による相対空気密度により校正する。

これは次式による。

$$\text{放電電圧} = \text{間げき長電圧} \times 0.386 \times \frac{b}{273.0 + t}$$

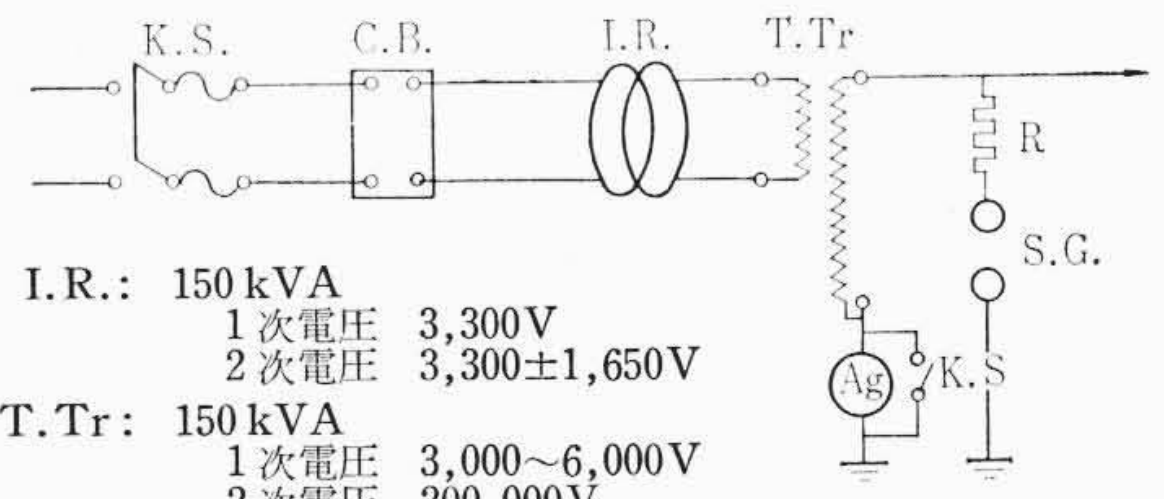
t : 温度 (°C)

b : 気圧 (mmHg)

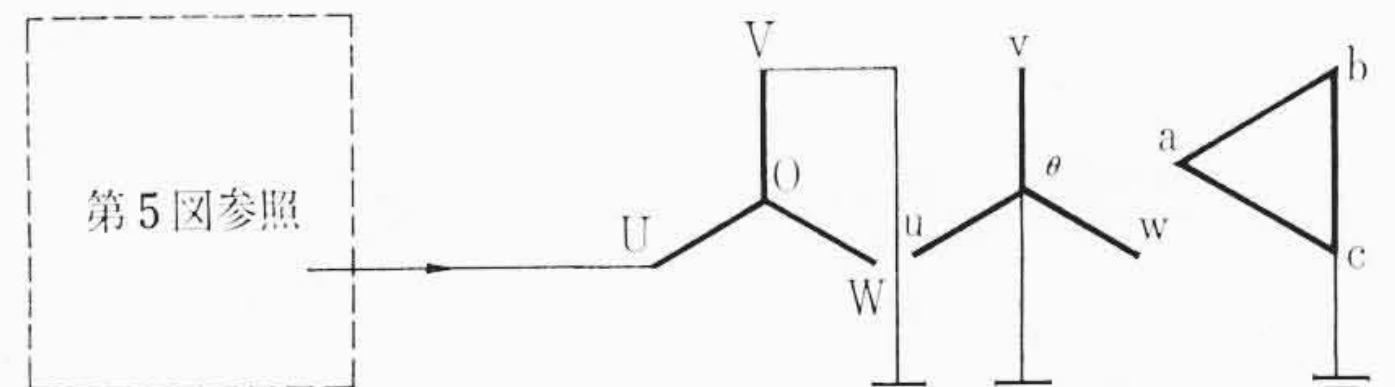
いま、間げき長 a_0 において放電するときの T. Tr 3 次の電圧計の読みを V_0' とすると、電圧変化の小さい範囲では放電間げき長と放電電圧は比例すると考えられるので、所要試験電圧値 V における電圧計の読み V_0 は次のようになる。

$$V_0 = V_0' \times \frac{\text{試験電圧}}{\text{放電電圧}}$$

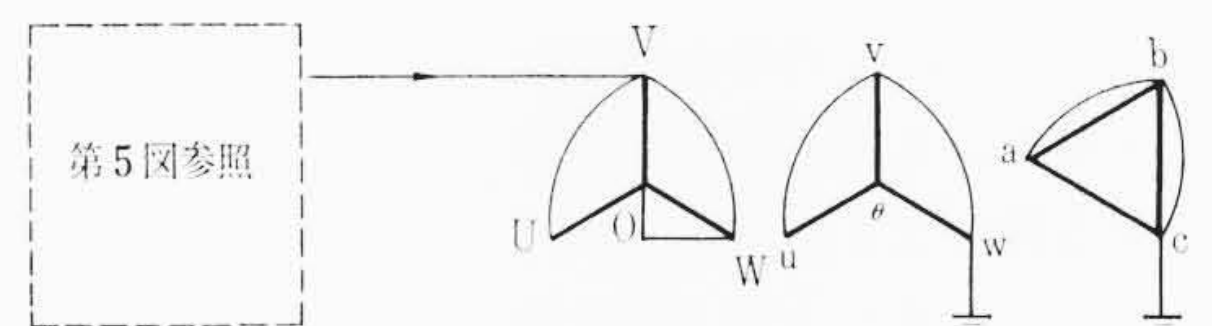
注：中圧および低圧については前に述べてあるので省略する。



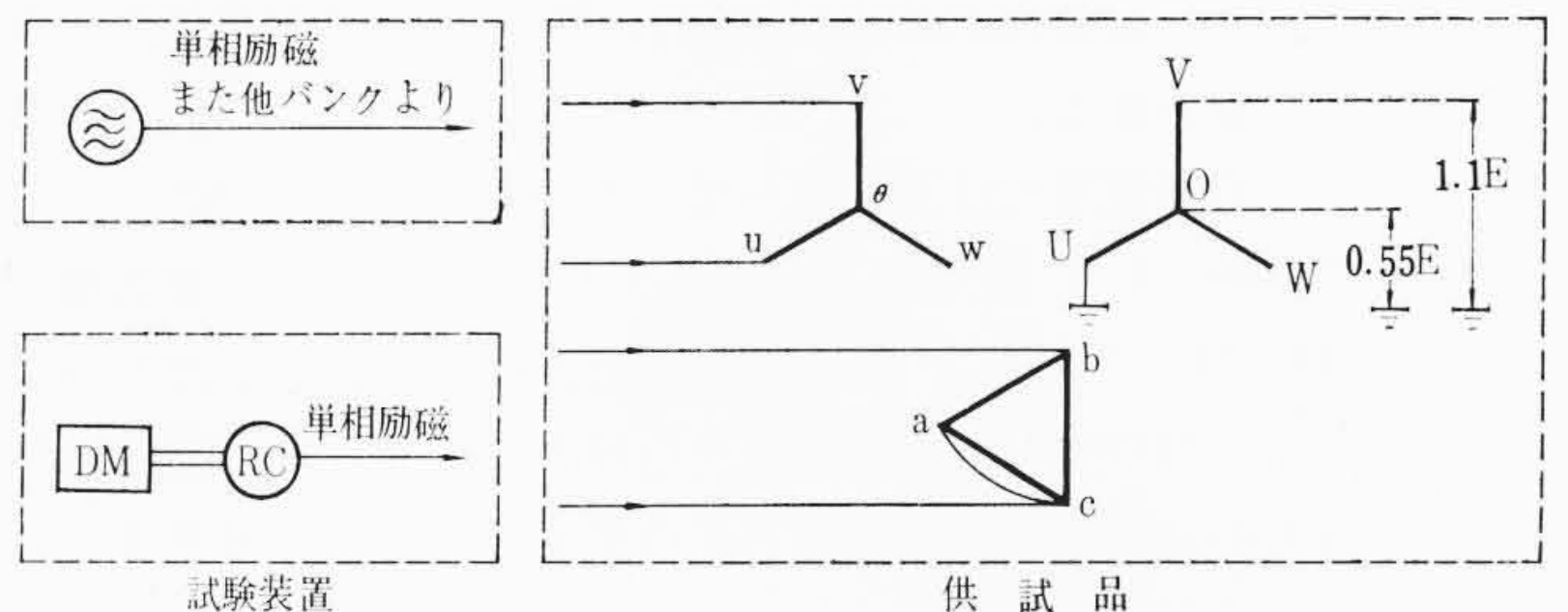
第 5 図 球間げき使用の場合の試験回路



第 6 図 高圧線路側 U 相の場合の供試品側回路



第 7 図 高圧中性点の試験回路



第 8 図 単相励磁による V 相試験の場合

(ii) 単相励磁による方法

試験回路

試験回路は第 8 図に示すとおりである。この場合中性点にかかる電圧は試験電圧の $1/2E$ であるが、中性点の試験電圧は前述のように $E/\sqrt{3} \times 1.1$ であり、線路側の試験とは別に中性点の試験を行なわなければならない。

〔例 4〕 下記のようなタップ電圧を有する 210,000kVA 三相変圧器の絶縁耐力試験について説明する。

電 圧	高圧	150.5-147-143.5-140 kV (段絶縁)	人
	低圧	11.7 kV	△

試験電圧

高圧線路側	$161 \text{ kV} \times 1.1 = 177.1 \text{ kV}$ (抵抗接地系統)
高圧中性点	$161/\sqrt{3} \text{ kV} \times 1.1 = 102.3 \text{ kV}$ (抵抗接地系統)
低 圧	$11.7 \text{ kV} \times 1.25 = 14.62 \text{ kV}$ (非接地系統)

試験回路

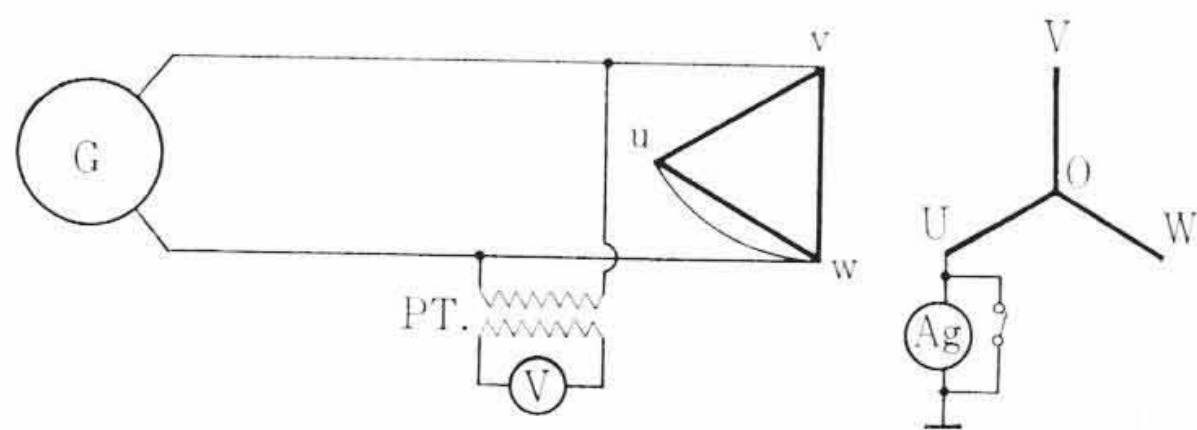
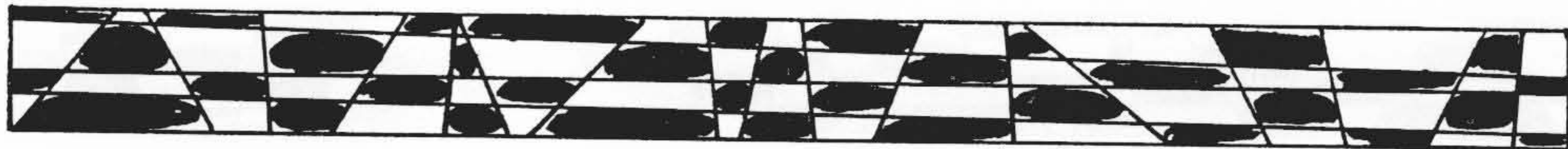
試験回路は第 9 図に示すとおりである。

試験電圧の確認

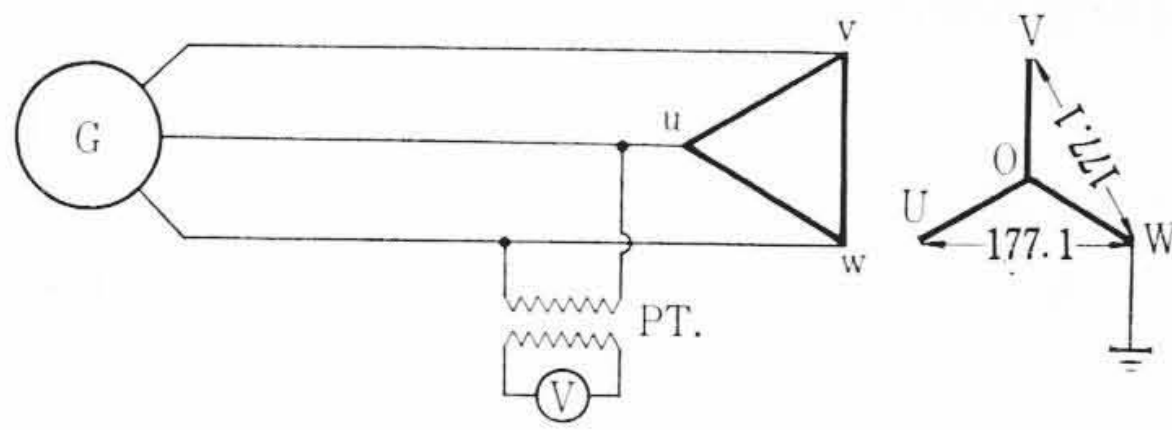
低圧側の P. T 12,100/110 V にて行なう。

$$\text{低圧印加電圧} = 11,700 \times \frac{177,100}{150,500} \times 2 = 11,920 \text{ V}$$

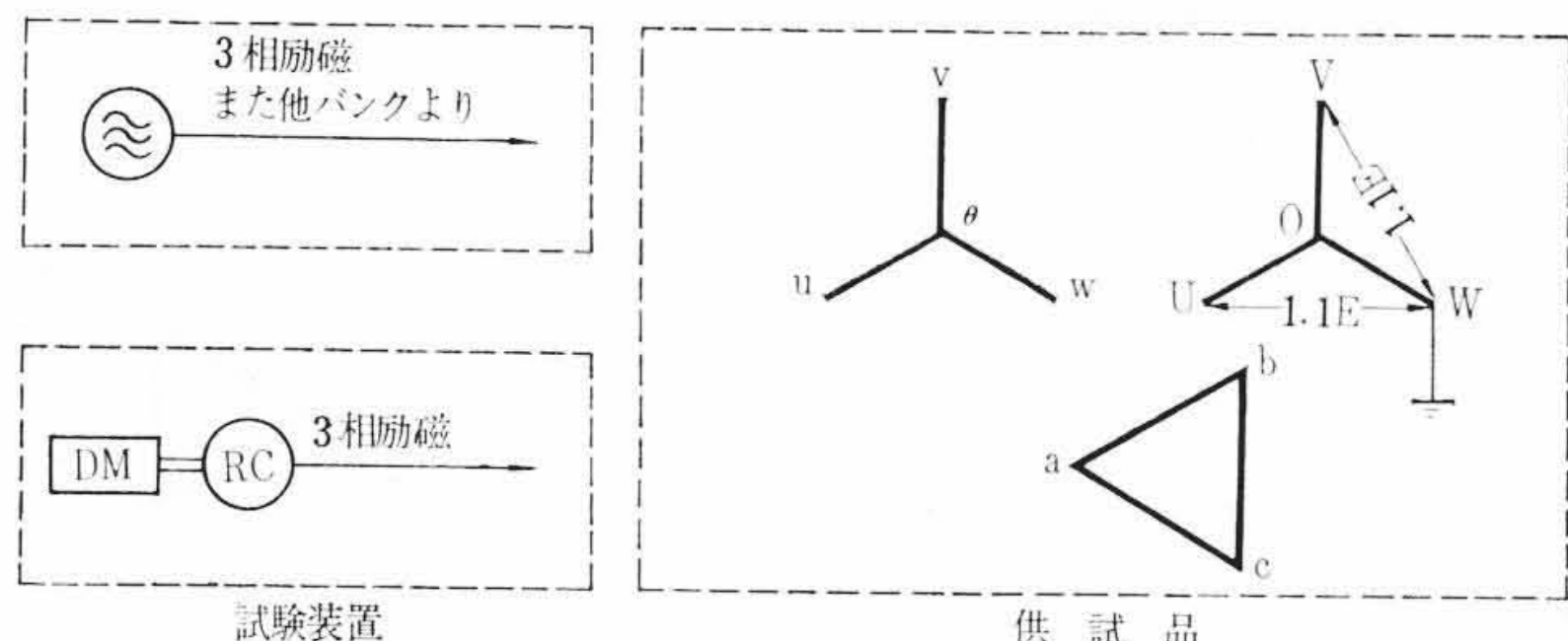
$$\text{電圧計の読み} = 11,920 \times \frac{1}{110} = 108.5 \text{ V}$$



第9図 V相試験の場合

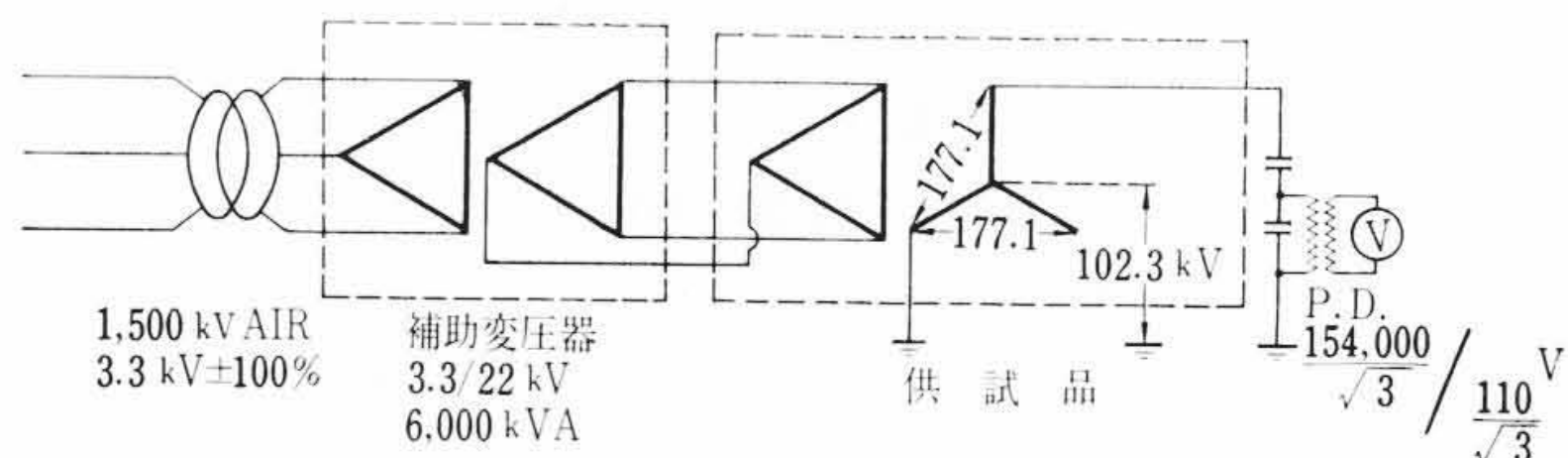


第11図 3相励磁による試験回路(1)



第10図 3相励磁による試験回路

第14図 ベクトル図



第12図 3相励磁による試験回路(2)

注(1): 試験電圧は系統電圧によるものであり、この場合は機器最大電圧より約7%大なるため発電機を2%過励磁せねばならない。また上記方法は発電機の単相負荷であることと過励磁の二つの問題点があり、発電機製作者の意見を聞く必要がある。

注(2): 火力発電所では蒸気タービンの過速度はJEC-62で、非常遮断として10%が規定されており、タービン発電機はJEC-114で15%、1分間と規定されている。したがって10%以内の速度上昇におさえなければならない。万一10%近くの過速度になった場合は自動的に蒸発が止まるようになっているのが一般である。

(iii) 三相励磁による方法

試験回路

試験回路は第10図に示すとおりであるが、この場合は中性点にかかる電圧が試験電圧の $\frac{E}{\sqrt{3}} \times 1.1$ となるので、1回の励磁で2相の線路側と中性点の試験ができる。次に接地相を変えることによって3相と中性点の試験が終了する。ただしこの方法は火力発電所のように発電機のみによる場合は変圧器が161kVのタップをもたないときは不可能である。例4の場合について記述すると次のようになる(第11図参照)。

低圧側印加電圧 $11,700 \times \frac{177,100}{150,500} = 13,800 \text{ V}$ (118%) すなわち発電機を18%過励磁せねばならずこれは不可能である。しかし電源側が発電機ではなく、誘導電圧調整器による場合と他の変電所を経由してくる場合は可能である。

〔例5〕 下記のようなタップ電圧を有する45,000kVA負荷タップ切換変圧器の絶縁耐力試験について説明する。

電圧 高圧 161-154-147-140kV (13タップ) (段絶縁) 人
低圧 22kV ◁

試験電圧 (高圧線路側のみで他は省略)

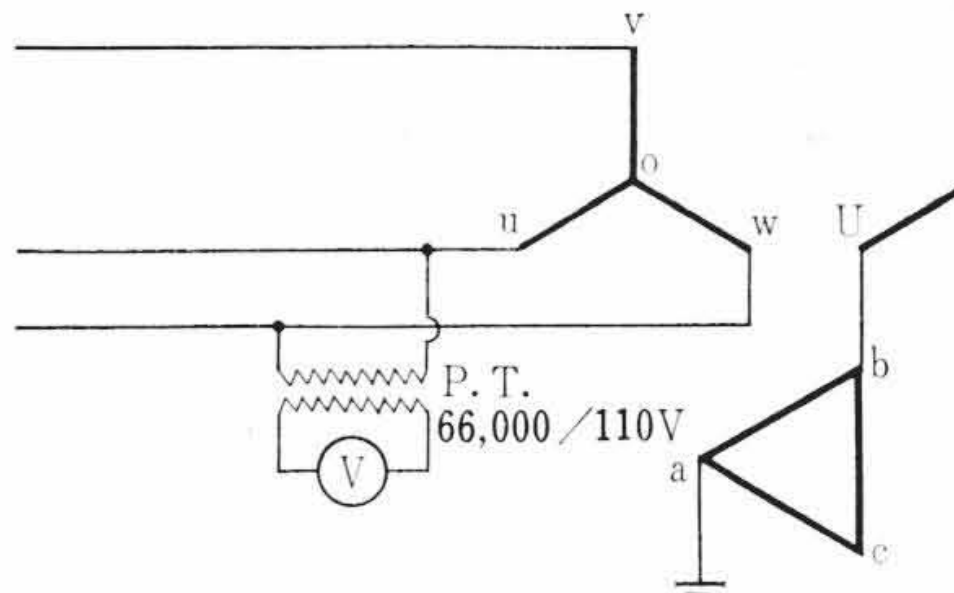
高圧線路側 $161 \text{ kV} \times 1.1 = 177.1 \text{ kV}$ (抵抗接地系統)

試験回路

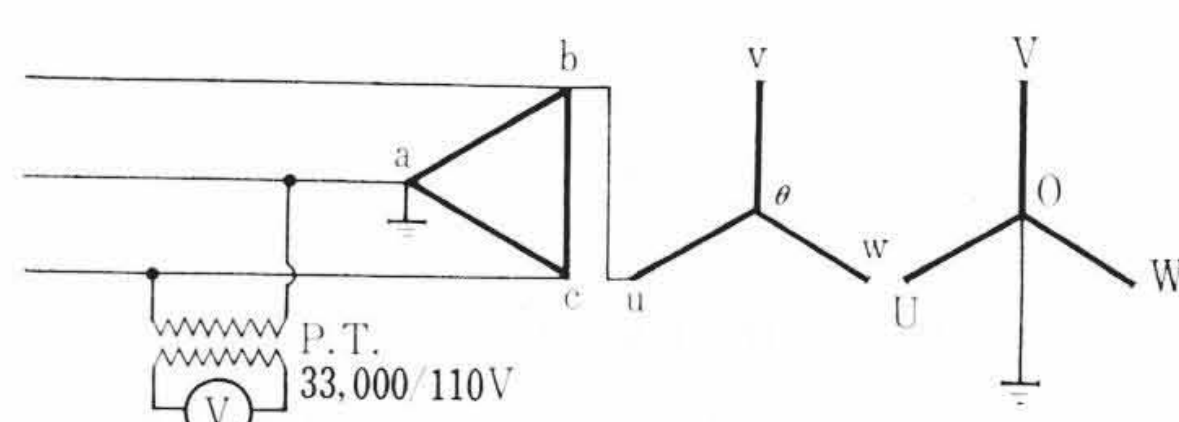
試験回路は第12図に示すとおりである。

試験電圧の確認

被試験機器高圧側の P. D. $\left(\frac{154,000}{\sqrt{3}} / \frac{110}{\sqrt{3}} \text{ V} \right)$ にて行なう。



第13図 3相励磁による試験回路(3)



第15図 3相励磁による試験回路(4)

$$\text{電圧計の読み } 177,100 \text{ V} \times \frac{110}{154,000} = 126.5 \text{ V}$$

例5は誘導電圧調整器と補助変圧器が準備できる場合であって、一般にはこれらの準備は不可能な場合が多い。このような場合には発電所を利用して被試験器を適当に組み合わせて電源側を過励磁することなく試験を行なうことが望ましい。

〔例6〕 下記のようなタップ電圧を有する66,000kVA三相変圧器の絶縁耐力試験について説明する。

電圧 高圧 161-154-147kV (段絶縁) 人
低圧 66kV 人
中圧 10.5kV ◁

試験電圧 (高圧線路側のみで他は省略)

$161 \text{ kV} \times 1.1 = 177.1 \text{ kV}$ (抵抗接地系統)

試験回路は第13図に示すとおりである。

電圧配分

電圧配分は第14図に示すベクトル図のようになり、中圧側に印加する電圧 $x \text{ kV}$ は

$$x = \sqrt{\frac{177.1^2}{\left(\frac{161}{66} \times \sqrt{3} + \frac{10.5}{66} \right)^2 + \left(\frac{161}{66} \right)^2}} = 68.69 \text{ kV}$$

中性点に誘起する電圧は

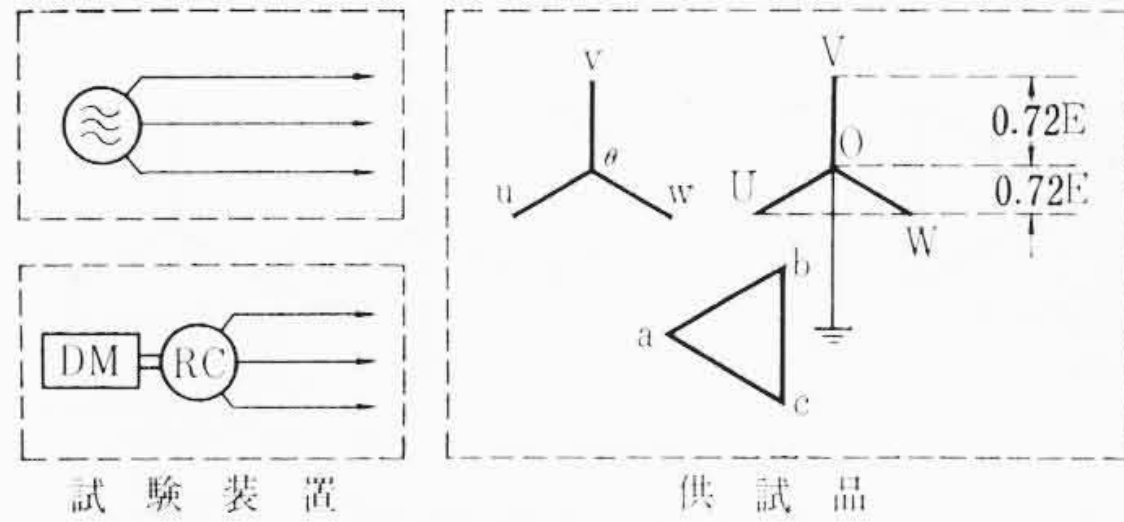
$$\left(\frac{10.5}{66} + \frac{161}{66} \times \frac{1}{\sqrt{3}} \right) x = 108 \text{ kV}$$

試験電圧の確認

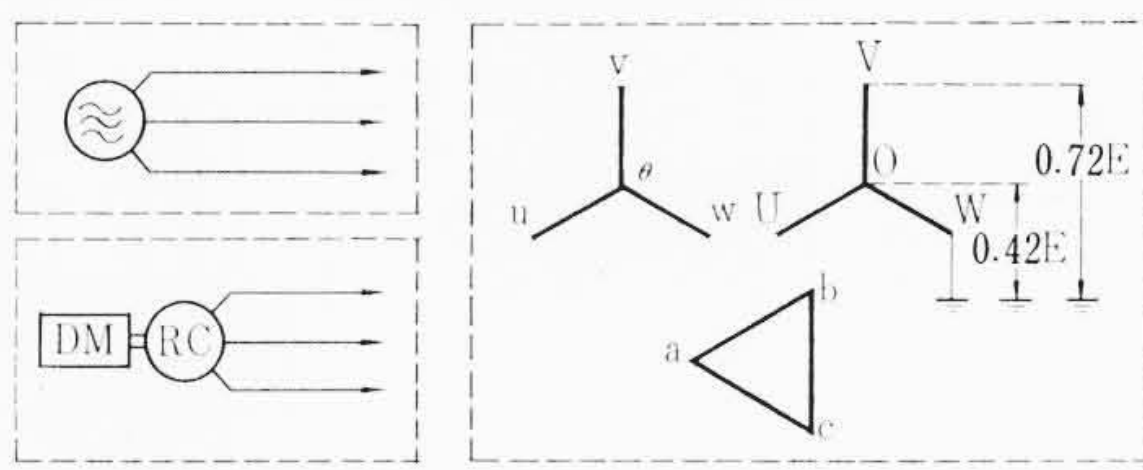
中圧側の P. T. 66,000/110V にて行なう。

$$\text{電圧計の読み } 68,690 \text{ V} \times \frac{110}{66,000} = 114.2 \text{ V}$$

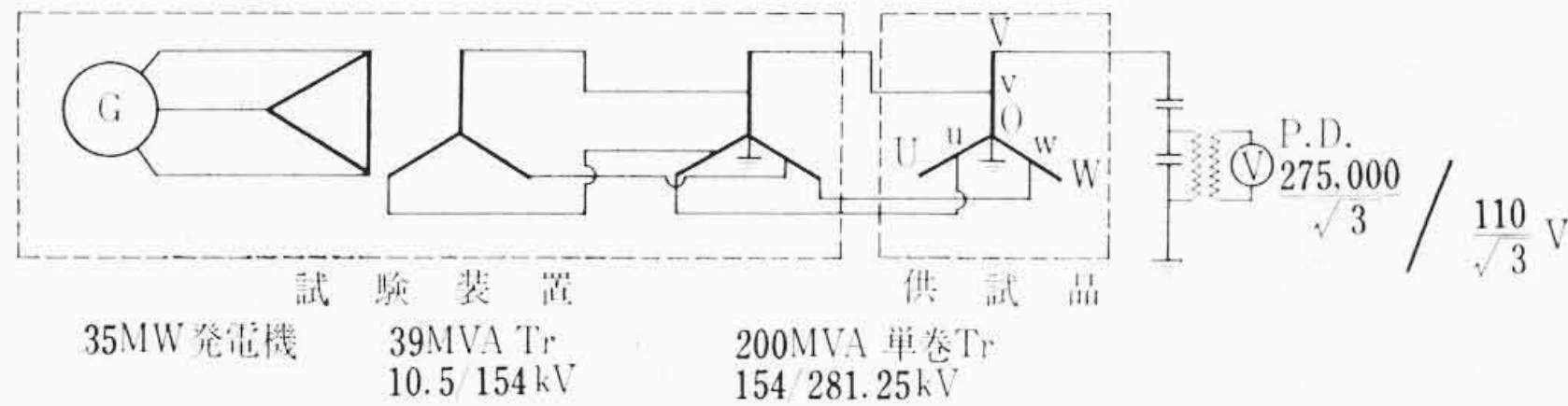
注: 中圧側に68.69kVを印加したときに高圧側が試験電圧になり、高圧中性点も試験電圧を超過するので、低圧の接地端子と低圧と高圧の仮接続を一度変更することによって三相



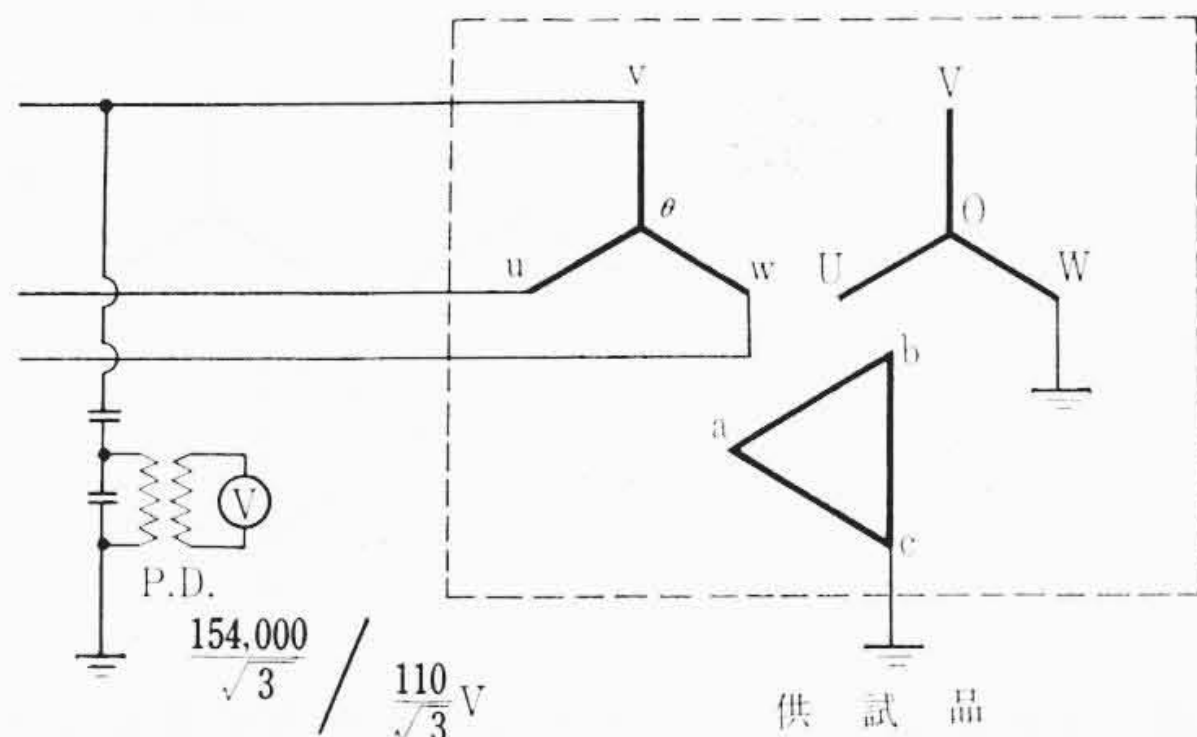
第16図 3相励磁し被試験器の高圧
中性点を接地する場合



第18図 3相励磁し、供試品の高圧線路測
1線接地の場合



第17図 3相励磁し、供試品の高圧中性点接地の試験回路



第19図 3相励磁し、1線接地の試験回路

と中性点の試験ができる。また本試験の際、中圧側がタップ電圧に対し4%過励磁となるが、被試験器に接続している系統変圧器のタップを69kVとしておけば、発電機の過励磁はさけられる。また低圧側の電圧が10.5kVより高い電圧であれば中圧の印加電圧はもっと低い電圧でよい。

〔例7〕 下記のようなタップ電圧を有する132,000kVA三相変圧器の絶縁耐力試験について説明する。

電 圧	高 圧	273.8 kV (段絶縁)	人
	中 圧	154 kV (段絶縁)	人
	低 圧	33 kV	△

試験電圧

中圧線路側 $161 \text{ kV} \times 1.1 = 177.1 \text{ kV}$ (抵抗接地系統)

試験回路

試験回路は第15図に示すとおりである。

電圧配分

電圧配分は第14図と同様になるが、低圧側印加電圧 $x \text{ kV}$ は

$$x = \sqrt{\left(\frac{33}{33} + \frac{154}{33} \times \frac{\sqrt{3}}{2}\right)^2 + \left(\frac{154}{33} \times \frac{1}{2}\right)^2} = 31.9 \text{ kV}$$

となり中性点に誘起する電圧は

$$\left(\frac{33}{33} + \frac{154}{33} \times \frac{1}{\sqrt{3}}\right)x = 117.7 \text{ kV}$$

となる。

試験電圧の確認

低圧側の P. T 33,000/110 V にて行なう。

$$\text{電圧計の読み} = 31,900 \text{ V} \times \frac{110}{33,000} = 106.3 \text{ V}$$

(2) 中性点直接接地系統の場合

わが国における中性点直接接地系統としては現在後述の3系統

があり、中性点の絶縁階級はいずれも一般に30号に低減されているので、中性点にかかる電圧に十分な考慮を払わなければならない。特に本系統の試験は大部分中性点にかかる電圧が30号相当以上になるので、製作者の意見も聞き試験回路を決定する必要がある。

わが国の中性点直接接地系統には

次の種類がある。

- (A) $E = 287.5 \sim 275 \text{ kV}$
- (B) $E = 230 \sim 220 \text{ kV}$
- (C) $E = 195.5 \sim 187 \text{ kV}$

(i) 三相励磁し被試験器の高圧中性点を接地する方法

試験回路

第16図の試験回路に示すように中性点にかかる電圧は接地されているので、中性点絶縁強度に関しては問題ないが、印加側に125%電圧を印加しなければならない。125%過励磁のため変圧器の鉄心が飽和してしまい電圧上昇が不可能になったり、また鉄共振など異常現象が起きる可能性があるため、本方法の採用にあたっては製作者にその実施の可否を問い合わせる必要がある。したがって1回の印加で高圧3相の試験ができ、試験の準備時間が短くてすむが望ましい方法ではない。

〔例8〕 下記のようなタップ電圧をもつ200,000kVA単巻変圧器の絶縁耐力試験について説明する。

電 圧	高 圧	287.5-281.25-275 kV (段絶縁)	人
	低 圧	154 kV (段絶縁)	

試験電圧

高圧線路側 $287.5 \text{ kV} \times 0.72 = 207.0 \text{ kV}$

試験回路

試験回路は第17図に示すとおりである。

試験電圧の確認

高圧側の P. D $\left(\frac{275,000}{\sqrt{3}} \div \frac{110}{\sqrt{3}} \text{ V}\right)$ にて行なう。

$$\text{電圧計の読み} = 207,000 \text{ V} \times \sqrt{3} \times \frac{110}{275,000} = 143.8 \text{ V}$$

(ii) 三相励磁し被試験器高圧線路側の1相を接地する方法

試験回路

第18図に示すように中性点にかかる電圧は $0.42E$ となるので、中性点の絶縁強度としては下記の強度が必要となり、試験実施にあたっては特に注意を要する。

$E = 287.5 \sim 275 \text{ kV}$	100 号
$E = 230 \sim 220 \text{ kV}$	100 号
$E = 195.5 \sim 187 \text{ kV}$	80 号

本方法は1相接地しているので接地相を変更して2度励磁すれば3相の試験を終了するが、1相のみ2度印加される。しかし結線は接地相のみの変更で非常に簡単であり誤結線の心配はない。

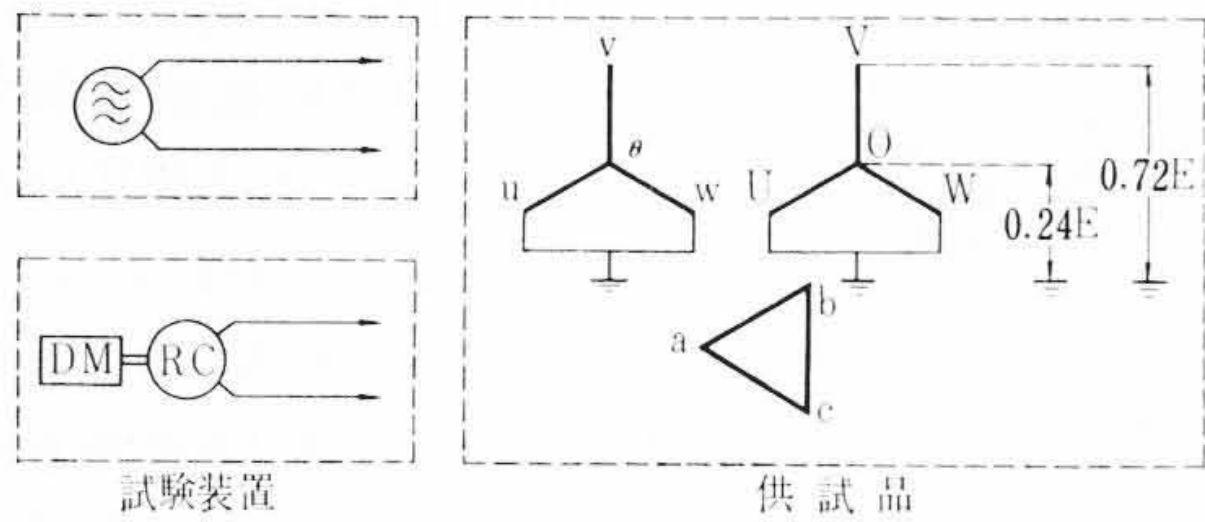
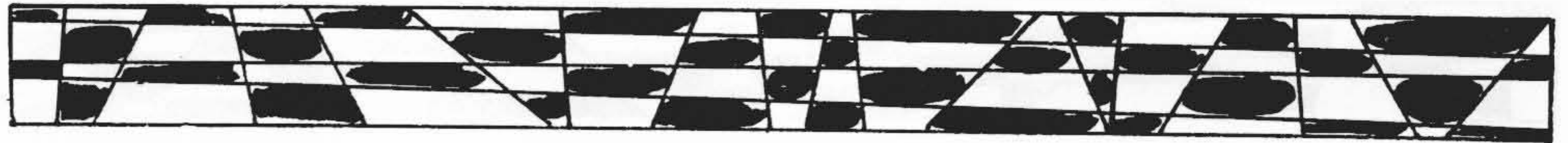
〔例9〕 下記のようなタップ電圧を有する200,000kVA三相変圧器の絶縁耐力試験について説明する。

電 圧	高 圧	287.5-275-262.5 kV (段絶縁)	人
	中 圧	154 kV (段絶縁)	△
	低 圧	21 kV	人

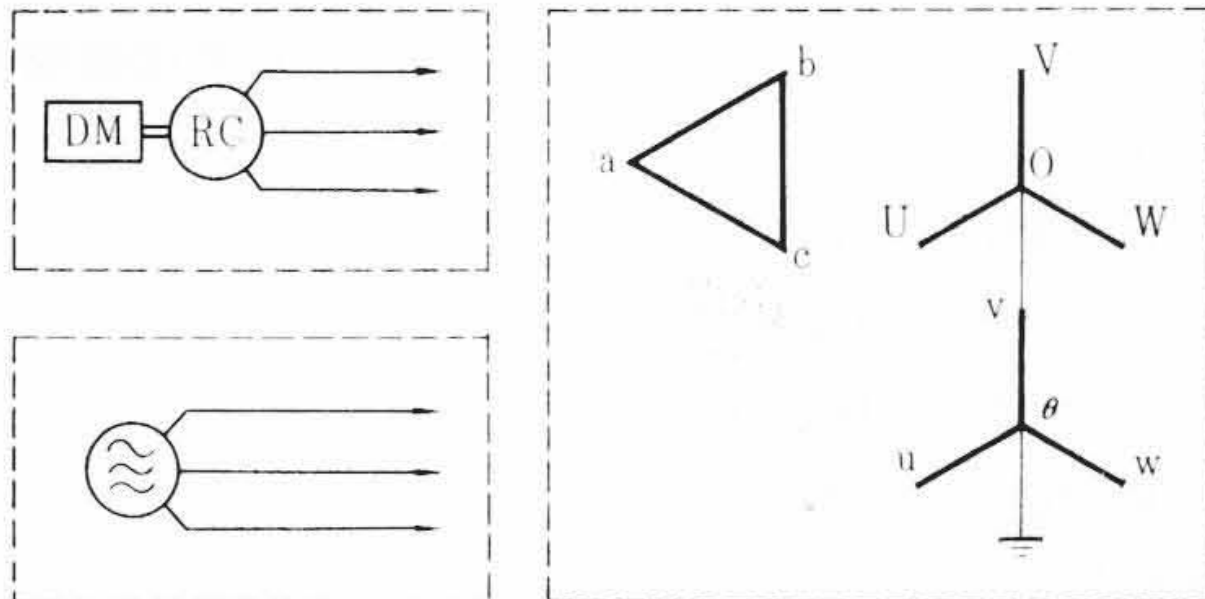
試験電圧

高圧線路側 $287.5 \text{ kV} \times 0.72 = 207.0 \text{ kV}$

試験回路



第20図 単相励磁による方法



第22図 3相励磁し、中圧1相を高圧中性点に接続する方法

試験回路は第19図に示すとおりである。

試験電圧の確認

$$\text{中圧側の P.D. } \frac{154,000}{\sqrt{3}} / \frac{110}{\sqrt{3}} \text{ V にて行なう。}$$

$$\text{電圧計の読み } 207,000 \times \frac{154}{287.5} \times \frac{110}{154,000} = 79.3 \text{ V}$$

(iii) 単相励磁による方法

試験回路

試験回路は第20図に示すように中性点にかかる電圧は $0.24E$ で(ii)の方法より低くなるが、中性点絶縁強度としては下記の強度が必要である。

$E = 287.5 \sim 275 \text{ kV}$	60号
$E = 230 \sim 220 \text{ kV}$	50号
$E = 195.5 \sim 187 \text{ kV}$	40号

中圧の星形結線より励磁する場合は被試験相を明確にし、励磁する相をまちがわないように注意しなければならない。

本方法は単相励磁のため結線を変更して3回の励磁を行なわなければならない。

〔例10〕 下記のようなタップ電圧を有する 150,000kVA 負荷時タップ切換変圧の絶縁耐力試験について説明する。

電 圧	高 圧	232~220~208 kV (9 タップ)	人
	中 圧	110 kV	人
	低 圧	66 kV	△

試験電圧

$$\text{高圧線路側 } 232 \text{ kV} \times 0.72 = 167 \text{ kV}$$

試験回路

試験回路は第21図に示すとおりである。

試験電圧の確認

低圧側の P.T 66,000/110V にて行なう。

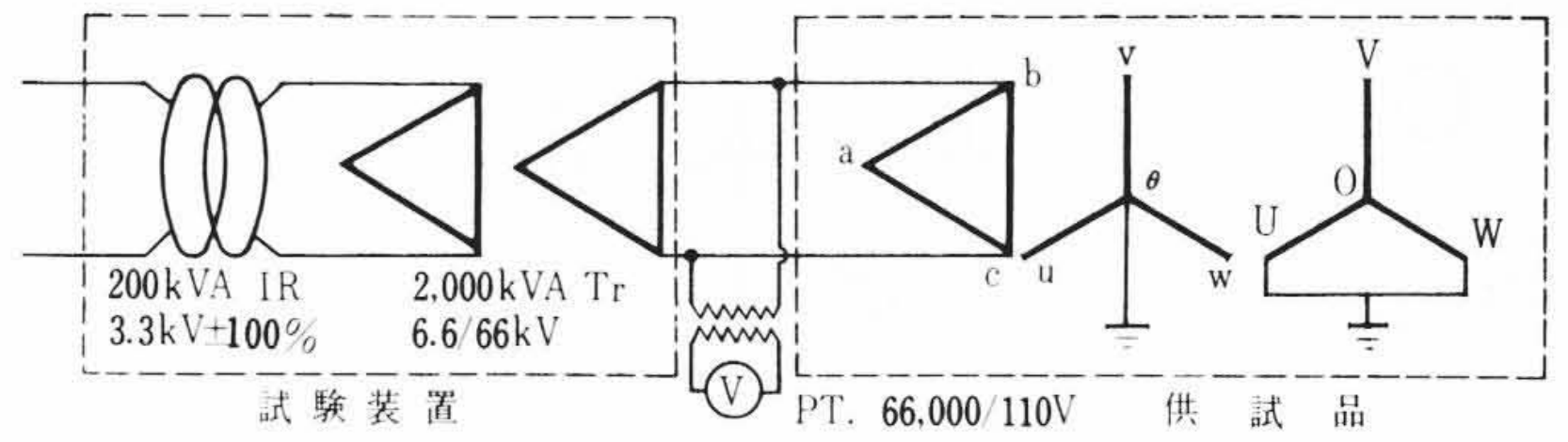
$$\text{電圧計の読み } 167,000 \times \frac{66}{\frac{232}{\sqrt{3}} \times 1.5} \times \frac{1}{600} = 91.5 \text{ V}$$

(vi) 3相励磁し中圧の1相を高圧中性点に接続する方法

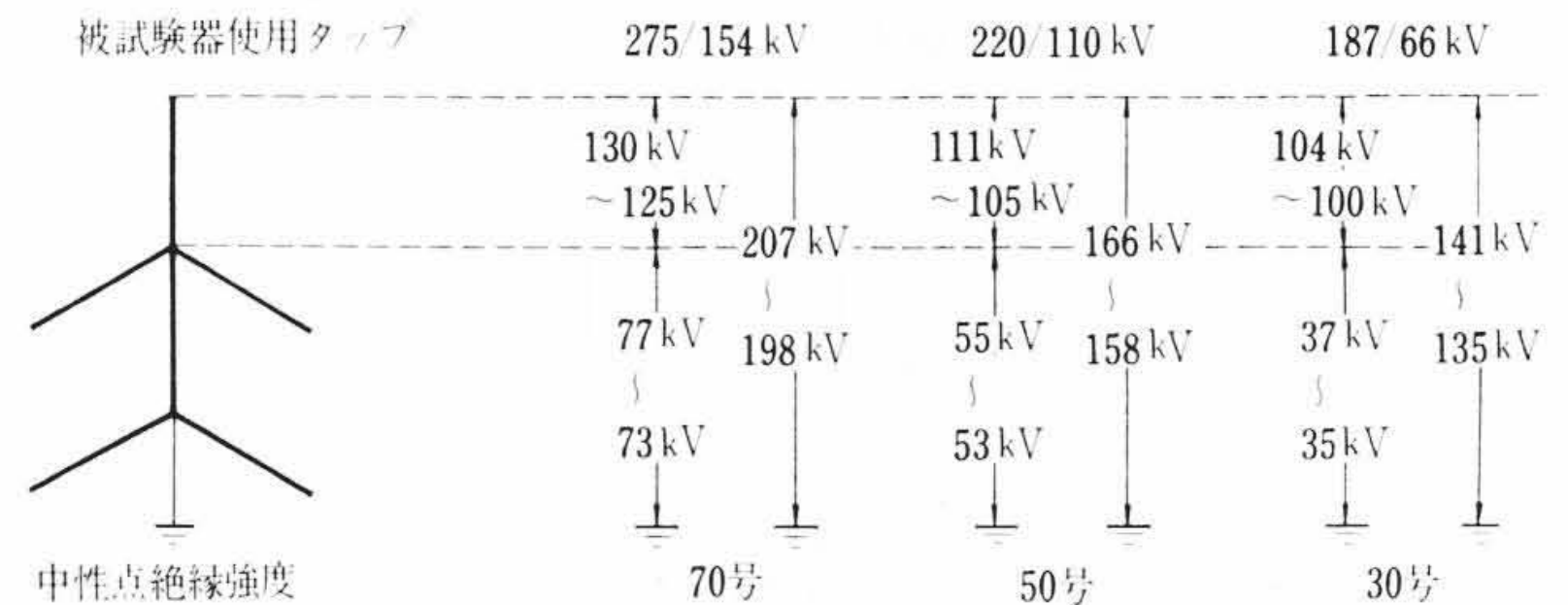
試験回路は第22図に示すとおりである。

電 圧 配 分

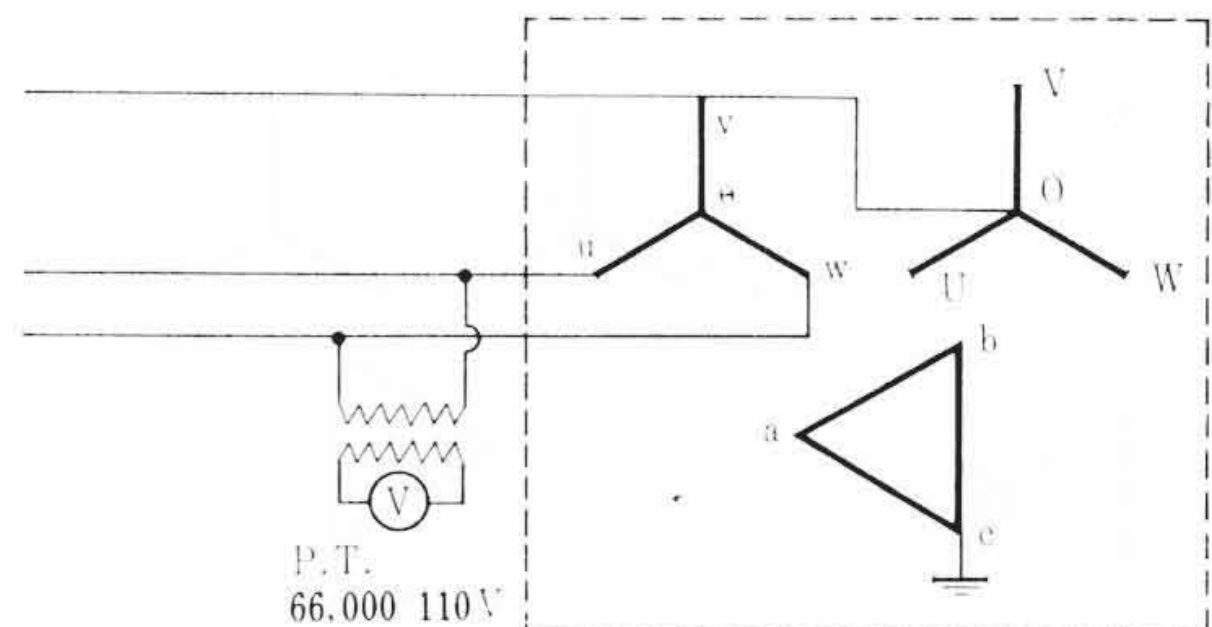
おのおの場合、第23図に示すような電圧配分になるが、この方法を採用するときは高圧中性点と中圧1相とを接続するのにコンサベータなどからの絶縁距離を十分にとり、接続線よりせん絡することがないようにする必要がある。



第21図 単相励磁の試験回路



第23図 電圧配分と中性点絶縁強度



第24図 3相励磁し、中圧1相を高圧中性点に接続する方法

〔例11〕 下記のようなタップ電圧を有する 100,000kVA 3相負荷時タップ切換変圧器の絶縁耐力試験について説明する。

電 圧	高 圧	190~178~166 kV (9 タップ)	人
	中 圧	66 kV	人
	低 圧	22 kV	△

試験電圧

$$\text{高圧線路側 } 195.5 \text{ kV} \times 0.72 = 140.8 \text{ kV}$$

試験回路

試験回路は第24図に示すとおりである。

試験電圧の確認

中圧側の P.T 66,000/110V にて行なう。

$$\text{電圧計の読み } 140,800 \times \sqrt{3} \left(\frac{66}{66+190} \right) \times \frac{1}{600} = 104.8 \text{ V}$$

そのほか、二巻線変圧器で低圧側が三角結線で 60 kV または 70 kV 系統の場合、高圧中性点につけ加える方法もあるが、高圧中性点は 60~70 号の絶縁強度が必要である。また発電所の場合は低圧側の電圧が 10~20 kV であり、これをつけ加える方法もある。これは中性点の絶縁強度としては 30 号相当で十分であるが、発電機を 10~15% 過励磁せねばならない。

5. 結 言

現地における変圧器の温度上昇試験と絶縁耐力試験の方法について、例をあげながら説明したが、これらですべてを網羅しているものでないので試験を実施するにあたっては、現地の事情を十分考慮して臨機応変にその方法を決定することが望ましいわけである。要するに試験設備の電圧、容量などが十分であり、供試品に必要な以上の無理が加わらないような試験を実施するよう注意しなければならない。

参 考 文 献

- (1) 電気協同研究 第17巻 第1号 p.123