

# 単相変圧器の三相誤結線時の現象

研究部電力研究課 竹 村 健

## On Misconnected Single Phase Transformers in Three Phase Bank

By Takeshi Takemura  
(Power Research Sect., Research Dep't.)

### Synopsis

Accidents owing to transformer misconnection give rise to discussion, when one uses single phase transformers in three phase bank and especially when those connections are frequently changed for such purpose as voltage regulating.

Though there can be expected many cases of misconnection, we deal here only with the secondary misconnected single phase transformers in Y- $\Delta$ .

In such case current can not flow in  $\Delta$  circuit, that has been reported hitherto, but we observed secondary cross current in our laboratory test.

This paper reports voltage and current distribution of the case in comparison with the experimental data and the graphically calculated results.

### I. ま え が き

三相回路における変圧器の誤結線による事故は、三相変圧器の場合には、ケーシング内部ですでに接続済みであるのでなんら問題は無いが、単相変圧器を種々の三相結線方式に切り換えて用いる場合などには皆無とい得ない。結線の方式はY、 $\Delta$ の種々の組み合わせがあるため、誤結線についてもいろいろの場合が考えられるが、今回たまたまY- $\Delta$ 結線において、二次側一相が逆接続となった場合の電圧、電流などの分布につき検討する機会を得た。

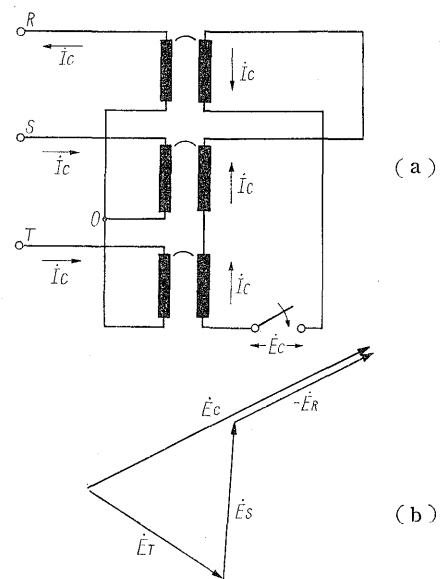
この問題は、従来二次側 $\Delta$ 回路には電流は流れないとされ、また一次側の励磁電流分布などについても、明確な説明がされていなかったが、実験の結果では二次側にも電流の流れうることを確かめ、またその大きさ、電圧分布などについては、図式計算により結果の裏付けを行った。

以下にその詳細を発表する。

### II. 誤結線時の電圧・電流分布の考察

第1図(a)のごとく、単相変圧器3台をY- $\Delta$ 結線、中性点非接地とした場合につき、 $\Delta$ 側一相を逆に接続し、かつその一部を開放しておく、この端子間には第1図(b)のベクトル図に示すように、 $\dot{E}_C = -2\dot{E}_R$ の電圧を生ずる。

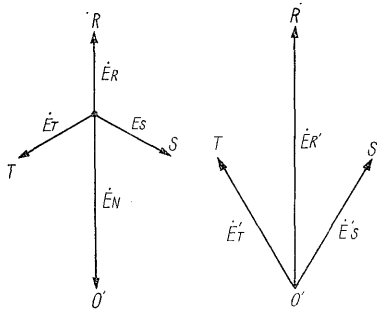
これを閉じた時に、二次側に循環電流 $\dot{I}_C$ が流れるものとすると、第1図(a)中の矢印の示すように一次側にも電流が流れるはずである。ところが変圧器の巻数比



第1図 (a) 接続図, (b) 電圧ベクトル図  
Fig.1. (a) Connection diagram  
(b) Voltage vector diagram

を1:1として、一次側中性点において電流の総和は零とならなくてはならないから、 $2\dot{I}_C - \dot{I}_C = \dot{I}_C = 0$ となり、電流は一次、二次とも流れ得ない。したがって、二次 $\Delta$ 回路の全合成電圧も零とならねばならず、これを満足するように変圧器の中性点電位が移動する。

すなわち、第2図に示すように、中性点電位が移動すると、各相の電圧は、常規の値と中性点移動量のベクトル差になるから、今中性点電位を $\dot{E}_N$ 、一次各相常規電圧を $\dot{E}_R, \dot{E}_S, \dot{E}_T$ とすれば、誤結線時の相電圧 $\dot{E}_R', \dot{E}_S', \dot{E}_T'$ は、それぞれ $\dot{E}_R - \dot{E}_N, \dot{E}_S - \dot{E}_N, \dot{E}_T - \dot{E}_N$ と



第2図 変圧器中性点電位の移動

Fig. 2. Shift of transformer neutral potential

なる。

したがって二次側の全合成電圧が零となるためには、

$$-(\dot{E}_R - \dot{E}_N) + (\dot{E}_S - \dot{E}_N) + (\dot{E}_T - \dot{E}_N) = 0$$

上式と、 $\dot{E}_R + \dot{E}_S + \dot{E}_T = 0$  より、 $\dot{E}_N = -2\dot{E}_R$  が得られる。それゆえ、

$$E_R' = |3\dot{E}_R| = 3E, \quad E_S' = |(1-a)\dot{E}_R| = \sqrt{3}E$$

$$E_T' = |(1-a^2)\dot{E}_R| = \sqrt{3}E$$

となり、R相には特にいちじるしい過電圧がかかることとなる。

なお、上式で記号上に・印を付さぬものは、絶対値をあらわし、付したものはベクトル量をあらわすものとする。

この場合電圧のいかにかわからず、変圧器の励磁インピーダンスが非常に高いものとすれば、電流はほとんど流れず、電圧分布は上記の通りであるが、実際には励磁インピーダンスは、いちじるしい飽和特性を示すため、当然励磁電流が流れるはずである。

相電圧は、三相不平衡の状態となっているため、各相の励磁電流の和は、中性点において零となり得ず、それぞれの相電圧に相当する励磁電流を  $\dot{I}_{R0}$ 、 $\dot{I}_{S0}$ 、 $\dot{I}_{T0}$  とし、

$$\dot{I}_{R0} + \dot{I}_{S0} + \dot{I}_{T0} = \dot{I}_0 \neq 0 \dots\dots\dots(1)$$

一方二次側に循環電流  $\dot{I}_C$  が流れたとする時の、これに対応して流れる一次側電流の、中性点における総和は既述のごとく  $\dot{I}_0$  である。したがって

$$\dot{I}_0 + \dot{I}_C = 0$$

$$\therefore \dot{I}_C = -\dot{I}_0 = -(\dot{I}_{R0} + \dot{I}_{S0} + \dot{I}_{T0}) \dots\dots\dots(2)$$

すなわち、各相励磁電流の中性点における総和を打ち消すに等しいだけの電流が二次側を環流すれば、誤結線時の電圧、電流に関する条件がともに満足されることになる。

各相電流は第3図より、

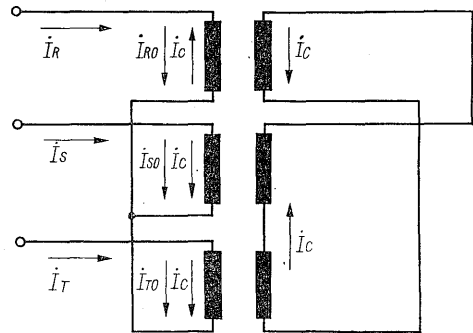
$$\dot{I}_R = \dot{I}_{R0} - \dot{I}_C, \quad \dot{I}_S = \dot{I}_{S0} + \dot{I}_C, \quad \dot{I}_T = \dot{I}_{T0} + \dot{I}_C \dots\dots(3)$$

であり、これに(2)式を代入すれば、

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{I}_R &= 2\dot{I}_{R0} + \dot{I}_{S0} + \dot{I}_{T0} \\ \dot{I}_S &= -(\dot{I}_{R0} + \dot{I}_{T0}) \\ \dot{I}_T &= -(\dot{I}_{R0} + \dot{I}_{S0}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(4)$$

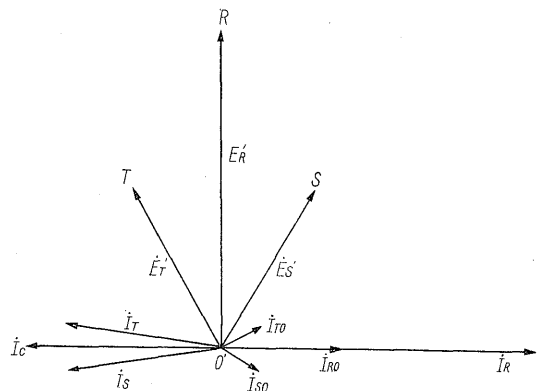
以上より総合して、このような誤結線時には、二次側閉路の条件から、一次中性点電位がこれを満足するように移動し、また一次中性点非接地の条件から、二次回路にこれを満足するよう循環電流が流れるものと考えられる。

第4図に、誤結線時の電圧電流のベクトル図を示す。



第3図 誤結線時の電流分布

Fig. 3. Current distribution of misconnected 3 phase bank



第4図 誤結線時のベクトル図

Fig. 4. Vector diagram of misconnected 3 phase bank

### III. 実験とその結果

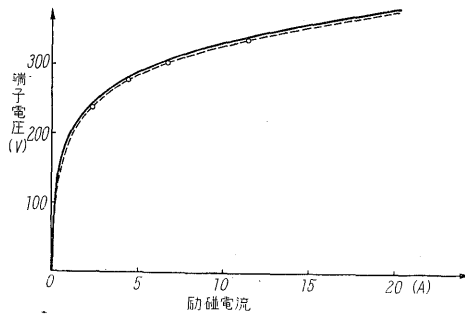
前述の考察の裏付けを求めめるため、小形の単相変圧器3台を用いて模擬実験を行なった。供試変圧器の仕様は下記のごとくである。

定 格 容 量 : 2.5 kVA

定 格 電 圧 : 200/200 V

定 格 電 流 : 12.5 A

短絡インピーダンス : 0.42 Ω (50%にて二次側より測定)



第5図 模擬変圧器無負荷励磁特性  
Fig.5. No load saturation curve of model transformer

直流抵抗：一次 0.19Ω, 二次 0.16Ω  
無負荷励磁特性を第5図に実線で示す。

実験には電源として水車発電機を用い、変圧器を誤結線状態で二次を開放しておき、オシログラフと同期させて閉路し、波形の観測、および各部の電圧電流を測定した。水車発電機の仕様は下記のごとくである。

定格容量：30kVA

定格電圧：200V

周波数：50%

リアクタンス：106% (=x<sub>d</sub>)

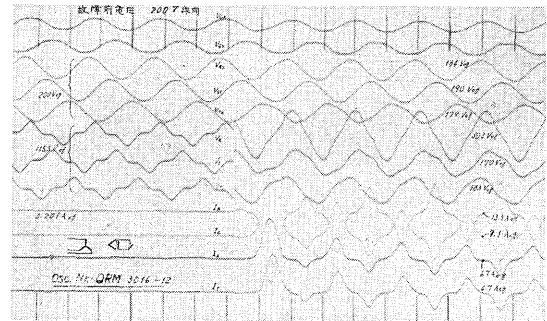
直流抵抗：0.88Ω

実験の結果は、第1表およびオシログラムの一例として第6図に示すごとくであり、これにより画いたベクトル図を第7図(a)に示す。なお二次側逆接続相をR相とした。

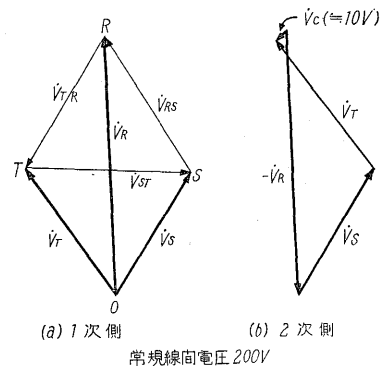
第1表 実験結果一覧表

Table 1. Model test result

常規線間電圧 (V <sub>RS</sub> )	102V	150V	180V	200V
常規相電圧(V)	59V	86.6V	104V	115.5V
常規励磁電流 (I <sub>0</sub> )	0.104A	0.144A	0.177A	0.201A
線間電圧	V <sub>RS</sub>	100V	144V	169V
	V <sub>ST</sub>	100V	146V	173V
	V <sub>TR</sub>	97V	142V	179V
相電圧	V <sub>R</sub>	168V	243V	280V
	V <sub>S</sub>	95V	139V	160V
	V <sub>T</sub>	94V	144V	169V
相電流	I <sub>R</sub>	1.27A	4.35A	8.70A
	I <sub>S</sub>	0.64A	2.13A	4.33A
	I <sub>T</sub>	0.65A	2.2A	4.41A
二次循環電流 (I <sub>0</sub> )	0.78A	2.41A	4.70A	7.1A



第6図 実験結果  
Fig.6. Test result



第7図 実験結果よりの電圧ベクトル図

Fig.7. Voltage vector diagram based on test result

#### IV. 検 討

##### 1. 励磁電流

実験では適当な電源が得られなかったために、変圧器の定格電圧200Vに対し、電源相電圧は120V程度までしか上げられず、したがって誤結線時も、逆接続相だけは300V程度の過電圧がかかるが、その他の相の電圧は200V程で、励磁特性の飽和点までは至っていない。

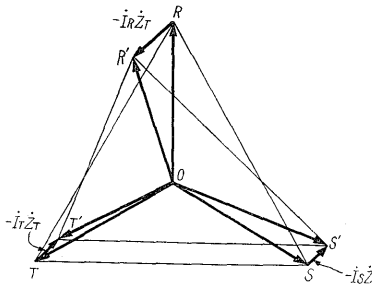
そのためこれらの相の励磁電流分は0.8A程度で、逆接続相のその20Aに対しごく小さく、第4図のベクトル図に示すときS, T相の電流間の位相差は、オシログラムからは余り顕著に見られない。ただし第1表より見て、一次S, T相電流の大きさが循環電流I<sub>0</sub>のそれに比べて全体に少ないのは、S, T相励磁電流によるもので、この点についても第4図のベクトル図で説明される。

##### 2. 電流分布と電圧分布

第1表、あるいは第6図のオシログラムでもわかるように、R, S, T各相一次電流の大きさの比は、ほぼ2:1:1であり、また、R相電圧とR相電流の1/2の値をもって、グラフを画くと第5図の破線のようになり、

実線に示した無負荷励磁特性とほぼ一致する。これは、(4)式において  $\dot{I}_{S0} = \dot{I}_{T0} = 0$  とした時に相当している。

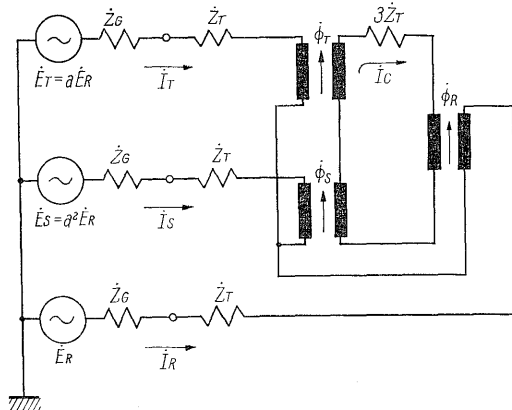
各相電圧分布については、IIの考察中で述べたような結果とはならず、たとえば R 相の誤結線時の端子電圧は、常規の 115V に対しては 303V と 2.6 倍程度の値であったが、これは不平衡励磁電流による電源電圧降下によるものである。第 7 図 (a) のベクトル図において、一次線間電圧により形成される三角形がひずんで、 $V_{RS} > V_{TR}$  となっているが、これは電源に流れる電流が不平衡であり、それによる電圧降下は、第 8 図のように各相ともリアクタンス分のために電圧に対しある位相を持っているからである。



第 8 図 電源電圧降下の影響  
Fig. 8. Effect of voltage drop in source

### 3. 変圧器の内部インピーダンス降下

第 7 図 (a) に得られた一次各相端子電圧ベクトル図をもって、二次閉回路についての合成電圧  $-\dot{V}_R + \dot{V}_S + \dot{V}_T$  のベクトル図を画くと、第 7 図 (b) に示すように零とならず、若干の残留電圧が見られる。これは変圧器の一次および二次電流によるインピーダンス降下によるものである。



第 9 図 接 続 図  
Fig. 9. Connection diagram

ここで電源および変圧器を含めて第 9 図のような回路について、各変圧器の磁束  $\dot{\Phi}_R, \dot{\Phi}_S, \dot{\Phi}_T$  を図示の方向を基準にとって考える。変圧器の巻数比を 1 : 1, 巻数を 1 とし、また漏れインピーダンスは一次、二次とも  $\dot{Z}_T$  とすると、一次側端子電圧および、二次側端子電圧はそれぞれ、次式で表わされる。

$$\begin{cases} \dot{V}_{R1} = \frac{d\dot{\Phi}_R}{dt} + \dot{I}_R \dot{Z}_T \\ \dot{V}_{S1} = \frac{d\dot{\Phi}_S}{dt} + \dot{I}_S \dot{Z}_T \\ \dot{V}_{T1} = \frac{d\dot{\Phi}_T}{dt} + \dot{I}_T \dot{Z}_T \end{cases} \dots\dots\dots (5)$$

$$\begin{cases} \dot{V}_{R2} = \frac{d\dot{\Phi}_R}{dt} + \dot{I}_C \dot{Z}_T \\ \dot{V}_{S2} = \frac{d\dot{\Phi}_S}{dt} - \dot{I}_C \dot{Z}_T \\ \dot{V}_{T2} = \frac{d\dot{\Phi}_T}{dt} - \dot{I}_C \dot{Z}_T \end{cases} \dots\dots\dots (6)$$

$$-\dot{V}_{R2} + \dot{V}_{S2} + \dot{V}_{T2} = 0 \text{ より}$$

$$-\frac{d\dot{\Phi}_R}{dt} + \frac{d\dot{\Phi}_S}{dt} + \frac{d\dot{\Phi}_T}{dt} = 3 \dot{I}_C \dot{Z}_T \dots\dots\dots (7)$$

これは当然のことながら、二次回路内のインピーダンス降下を表わしている。次に同様にして一次側の電圧により  $-\dot{V}_{R1} + \dot{V}_{S1} + \dot{V}_{T1} = \dot{V}_C$  を求めると、

$$\begin{aligned} \dot{V}_C &= -\frac{d\dot{\Phi}_R}{dt} + \frac{d\dot{\Phi}_S}{dt} + \frac{d\dot{\Phi}_T}{dt} + (\dot{I}_S + \dot{I}_T - \dot{I}_R) \dot{Z}_T \\ &= (3 \dot{I}_C + \dot{I}_S + \dot{I}_T - \dot{I}_R) \dot{Z}_T \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

これは二次側と同時に一次側をも含めた、変圧器の全インピーダンス降下である。こころみに、上式に(2)および(4)式を代入し、実験の場合のように  $I_{S0} = I_{T0} = 0$  とすれば、

$$\dot{V}_C \doteq 7 \dot{I}_C \dot{Z}_T \dots\dots\dots (9)$$

第 7 図 (b) のベクトル図の場合は、図上からは  $V_C \doteq 10V$  であり、一方第 1 表より  $I_C = 7.1A, Z_T = 0.21 \Omega$  から、 $V_C = 7 I_C Z_T = 10.4 (V)$  とほぼ合致している。

さらに詳細に変圧器のインピーダンス降下のようすを調べるために、第 9 図より次の方程式を得る。

$$\begin{cases} \dot{E}_T - \dot{E}_R = (\dot{I}_T - \dot{I}_R) (\dot{Z}_T + \dot{Z}_G) + \frac{d\dot{\Phi}_T}{dt} - \frac{d\dot{\Phi}_R}{dt} \\ \dot{E}_S - \dot{E}_R = (\dot{I}_S - \dot{I}_R) (\dot{Z}_T + \dot{Z}_G) + \frac{d\dot{\Phi}_S}{dt} - \frac{d\dot{\Phi}_R}{dt} \\ 0 = 3 \dot{I}_C \dot{Z}_T - \frac{d\dot{\Phi}_T}{dt} - \frac{d\dot{\Phi}_S}{dt} + \frac{d\dot{\Phi}_R}{dt} \end{cases} \dots\dots\dots (10)$$

これを变形整理すれば、

$$\begin{cases} \frac{d\dot{\phi}_R}{dt} + 3\dot{I}_R(\dot{Z}_T + \dot{Z}_G) - 3\dot{I}_C\dot{Z}_T = 3\dot{E}_R \\ \frac{d\dot{\phi}_S}{dt} - (\dot{I}_R - \dot{I}_T)(\dot{Z}_T + \dot{Z}_G) - 3\dot{I}_C\dot{Z}_T = (1-a)\dot{E}_R \\ \frac{d\dot{\phi}_T}{dt} - (\dot{I}_R - \dot{I}_S)(\dot{Z}_T + \dot{Z}_G) - 3\dot{I}_C\dot{Z}_T = (1-a^2)\dot{E}_R \end{cases}$$

(ただし  $1+a+a^2=0$ )

.....(11)

上式左辺の第一項は変圧器の誘起々電力，第2項，第3項はともにインピーダンス降下を表わしている。各変圧器の一次端子電圧は(5)式へこれらの式を代入することにより，

$$\begin{cases} \dot{V}_{R1} = 3\dot{E}_R - 3\dot{I}_R\dot{Z}_G - (2\dot{I}_R - 3\dot{I}_C)\dot{Z}_T \\ \dot{V}_{S1} = (1-a)\dot{E}_R - (\dot{I}_R - \dot{I}_T)\dot{Z}_G - (2\dot{I}_R - 3\dot{I}_C)\dot{Z}_T \dots(12) \\ \dot{V}_{T1} = (1-a^2)\dot{E}_R - (\dot{I}_R - \dot{I}_S)\dot{Z}_G - (2\dot{I}_R - 3\dot{I}_C)\dot{Z}_T \end{cases}$$

上式でとも右辺の第2項は電源の電圧降下であり，第3項は変圧器のインピーダンスに基づく電圧降下分であって  $\dot{I}_R + \dot{I}_S + \dot{I}_T = 0$  を考慮すれば，これは(8)式で求めた  $\dot{V}_C$  に他ならない。すなわち右辺1, 2項でできた一次側電圧分布状態で，さらに中性点電位が， $\dot{V}_C$  だけ移動したことに相当し，この点についてはIIの中性点電位の移動についてと全く同様の考え方が適用できる。

### V. 電圧・電流の算定

IIにおいては，電源あるいは変圧器のインピーダンスは全く無視して考えてきた。ところが実際にはこれは無視し得ず，また上述の実験結果からもわかるように，逆接続相にかかる電圧は常規の3倍とはならず，これらの分布は電流の分布と相互に関係し合ってくる。

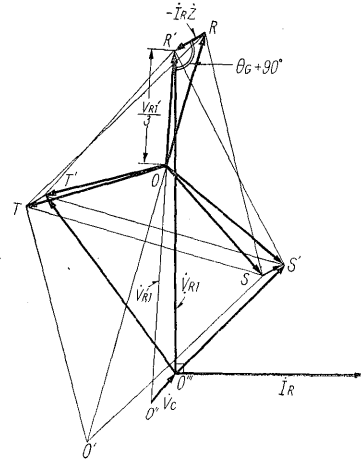
この点を考慮に入れて，電圧・電流の関係を求め，実測値のそれと比較したが，変圧器端子電圧と励磁電流の関係は非線形であり，数式的な計算を行なうのは困難であったので，図式的にこれを求めた。

今非接地の電源について不平衡電流の流れた時の中性点電位を考えてみると，各相誘起電圧  $\dot{E}_{GR}$ ,  $\dot{E}_{GS}$ ,  $\dot{E}_{GT}$ ，内部インピーダンスを  $\dot{Z}_G$ ，電流を  $\dot{I}_R$ ,  $\dot{I}_S$ ,  $\dot{I}_T$  として，端子電圧はそれぞれ，

$$\begin{aligned} \dot{V}_{GR} &= \dot{E}_{GR} - \dot{I}_R\dot{Z}_G, \quad \dot{V}_{GS} = \dot{E}_{GS} - \dot{I}_S\dot{Z}_G, \\ \dot{V}_{GT} &= \dot{E}_{GT} - \dot{I}_T\dot{Z}_G \end{aligned}$$

となる。 $\dot{E}_{GR} + \dot{E}_{GS} + \dot{E}_{GT} = 0$ ,  $\dot{I}_R + \dot{I}_S + \dot{I}_T = 0$  であるから， $\dot{V}_{GR} + \dot{V}_{GS} + \dot{V}_{GT}$  もまた零となり，結局，中性点電位は電流分布のいかんにかかわらず変化しない。

第10図において常規の電源電圧のベクトルがR, S,



第10図 インピーダンス降下を考慮した場合の電圧分布

Fig. 10. Voltage distribution when impedance drops are taken into account

Tの正三角形を形作っていたとし，誤結線時，電圧降下により，R, S, TがそれぞれR', S', T'点に移動したものとすると，その時前述により電源中性点は，O点のまま変化しない。

一方，変圧器の一次中性点は，変圧器のインピーダンス降下がなければ，二次側閉回路の合成電圧が零となるようにO''点に移動するが，実際には，IVで述べたごとくインピーダンス降下  $\dot{V}_C$  だけさらに移動しO'''点に落ち着く。

したがって，変圧器一次R相端子電圧  $\dot{V}_{R1}$  は  $\overline{O'''R'}$  で表わされる。 $\overline{RR'}$  はR相電流  $\dot{I}_R$  による電源の電圧降下であって，

$$\overline{RR'} = I_R \cdot Z_G = 2 I_{R0} \cdot Z_G$$

である。ただし，ここでは  $I_{S0} = I_{T0} = 0$  とする。

また  $\dot{I}_R$  の位相は，変圧器のインピーダンス降下  $V_C$  が比較的小さいので， $\dot{V}_{R1}$  と  $\dot{V}_{R1}'$  の相差を無視すれば，ほぼ  $\dot{V}_{R1}'$  より  $90^\circ$  遅れていると考えられるので

$$\angle RR'O = 90^\circ + \theta_G \quad (\text{ただし } \theta_G = \angle \dot{Z}_G)$$

以上より， $\triangle ORR'$  について余弦定理を適用すると，

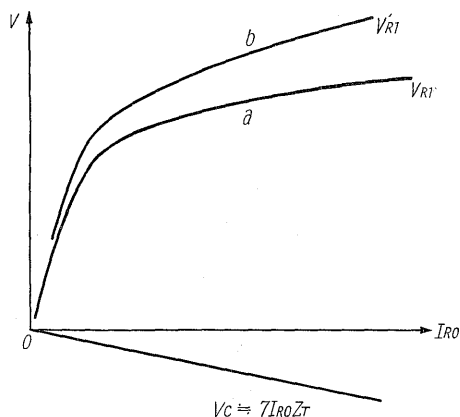
$$E_R = \sqrt{\left(\frac{V_{R1}'}{3}\right)^2 + (2I_{R0}Z_G)^2 - 4I_{R0}Z_G \frac{V_{R1}'}{3} \cos(\theta_G + 90^\circ)}$$

.....(13)

$V_{R1}'$  は  $V_{R1}$  と  $I_{R0}$  の関係，すなわち変圧器の無負荷励磁特性と，変圧器インピーダンスが知れていれば， $I_{S0} = I_{T0} = 0$  より

$$\dot{V}_{R1} = \dot{V}_{R1}' + \dot{V}_C = \dot{V}_{R1}' + 7\dot{I}_C\dot{Z}_T = \dot{V}_{R1} - 7\dot{I}_{R0}\dot{Z}_T$$

.....(14)



第11図 変圧器の励磁特性  
Fig. 11. Exciting characteristics of transformer

から計算することができる。ただし、ここでは  $\dot{Z}_T$  はリアクタンスのみと考える。一般には  $V_{R1}$  と  $I_{R0}$  の関係は第11図中 a のようなグラフで得られるから、これと上式右辺第2項とから、第11図 b の曲線によって、 $V_{R1}'$  と  $I_{R0}$  の関係を表わすことができる。したがって、 $I_{R0}$  を適当に数点選ぶことによりそれぞれにつき(13)式が計算でき、常規電圧  $E_R$  と  $I_{R0}$  (あるいは  $I_C$ ) の関係および、 $E_R$  と  $V_{R1}$  の関係が求められる。

上述の方法により、実験の場合について、 $E_R$  と  $I_{R0}$ 、 $V_{R1}$  の関係を求め、実験値と比較した。その結果は、第12図、第13図に示すごとくで、両者ともかなり良く一致した。

なお発電機、変圧器のインピーダンスはそれぞれ、

$$Z_G = |0.88 + j1.4| = 1.65 \Omega \quad (\theta_G = 58^\circ)$$

$$Z_T = 0.21 \Omega$$

として計算した。

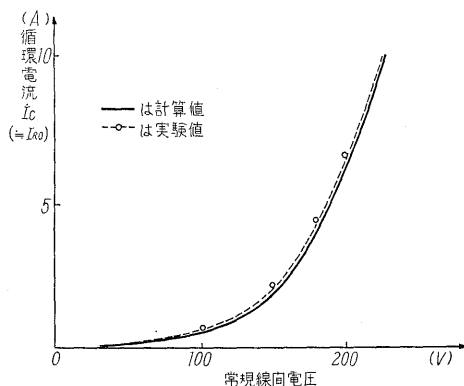
以上の方法は(12)式を基にして行なったものであり、(12)式の両辺を3で除して移項すれば

$$\dot{E}_R = \frac{\dot{V}_{R1}}{3} + \dot{I}_R \dot{Z}_G + \frac{\dot{V}_C}{3} = \frac{1}{3} \dot{V}_{R1}' + 2 \dot{I}_{R0} \dot{Z}_G \dots (15)$$

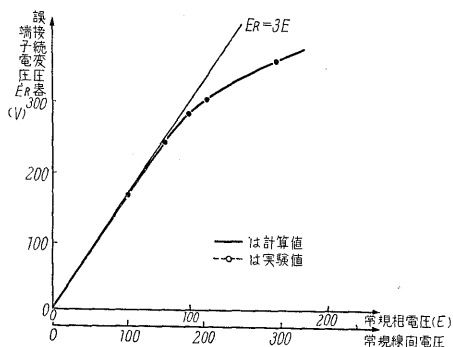
となり、(13)式をベクトル計算的に書きなおしたものに他ならない。

## VI. む す び

以上単相変圧器3台をY-Δ三相結線とし、二次側1相を逆に接続とした場合の電圧、電流分布などにつき考



第12図 常規線間電圧—循環電流  
Fig. 12. Relation of normal line voltage to secondary cross current



第13図 常規相電圧—誤結線変圧器端子電圧  
Fig. 13. Relation of normal voltage to misconnected transformer terminal voltage

察および実験を行なった結果を述べてきたが、本文中では省略できた正接続相の励磁電流分も、常時変圧器を定格付近の電圧において使用しているような場合には無視し難く、誤結線時の二次循環電流は非常に大きなものとなる。殊に二次側が低次巻線である場合とか、飽和特性の著しいオリエン・コアを用いた変圧器などでは、この電流はさらに著しいものとなる。この他、過電圧に基づく絶縁上の問題などにも留意する必要がある。終りに研究部尾本顧問、設計部前川係長をはじめ、この問題につきいろいろ御助言をいただいた方々に深く感謝の意を表して筆をおく。



\*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する  
商標または登録商標である場合があります。