U.D.C. 621.314.2

三巻線変圧器の並列運転について

真　流　和　徳*

Parallel Operation of Three Winding Transformers

By Kazunori Maryū
Kokubu Branch Works of Hitachi Works, Hitachi, Ltd.

Abstract

The calculation of the load to be shared by the primary and secondary windings of 3-winding transformers, which are operated in parallel with their tertiary load as unbalanced, is very difficult in general, as it depends upon the calculation of plural simultaneous equations.

The writer simplified this calculation. Let the tertiary load current and power factor of No. 1 transformer be I' and $\cos\varphi'$ respectively, let those of No. 2 transformer be I''' and $\cos\varphi'''$, and likewise, let composite load current and power factor be I'' and $\cos\varphi''$, assuming that the resistance of transformer windings is negligible, then the primary winding currents of No. 1 transformer which are represented respectively by $I_a=I_a'+jI''_a$, $I_b=I_b'+jI_b''$ and those of No. 2 transformer represented by $I_1=I_1'+jI_1''$, and $I_2=I_2'+jI_2''$, can be solved with ease from the writer's equations (8), (8′), (9), (9′), (10), (10′), (11), (11′).

The writer details in this article the problem of load distribution of 3-winding transformer quoting some actual examples of the calculation.

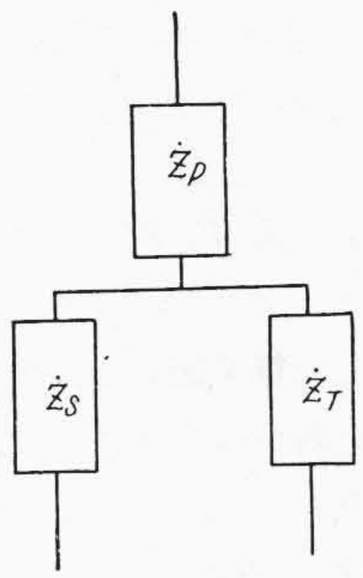
〔I〕 緒　　言

電圧のことなる三系統の連繋，または系統の電圧調整，力率改善用の調相設備を接続するなどいろいろな目的のために三巻線変圧器が送配電系統で多数使用されており，しかもその大部分は二バンクまたはそれ以上で並列運転を行つている。これら三巻線変圧器の並列運転は通常一次二次間で行われており，三次側はそれぞれ別箇に負荷されていることが多い。たとえば最近多くみられる例であるが，一方のバンクの三次に静電蓄電器を接続し，他方のバンクには同期調相機を接続して並列運転を行う場合などである。この場合三次側負荷は往々不平衡になることがある。この状態では，それぞれの三次負荷の性質，状況によつて各変圧器巻線の負荷分担は非常な影響をうけ，変圧器のある巻線がいちじるしく過負荷になることがある。したがつて変圧器運用上これらの電流分担を把握しておくことは重要なことであるが一般に計算が複雑であるため等閑に付されているむきが多い。本文では合理的な仮定を設けることにより簡単に各巻線の負荷分担を求めうることを述べ，かつ計算例をも示した。

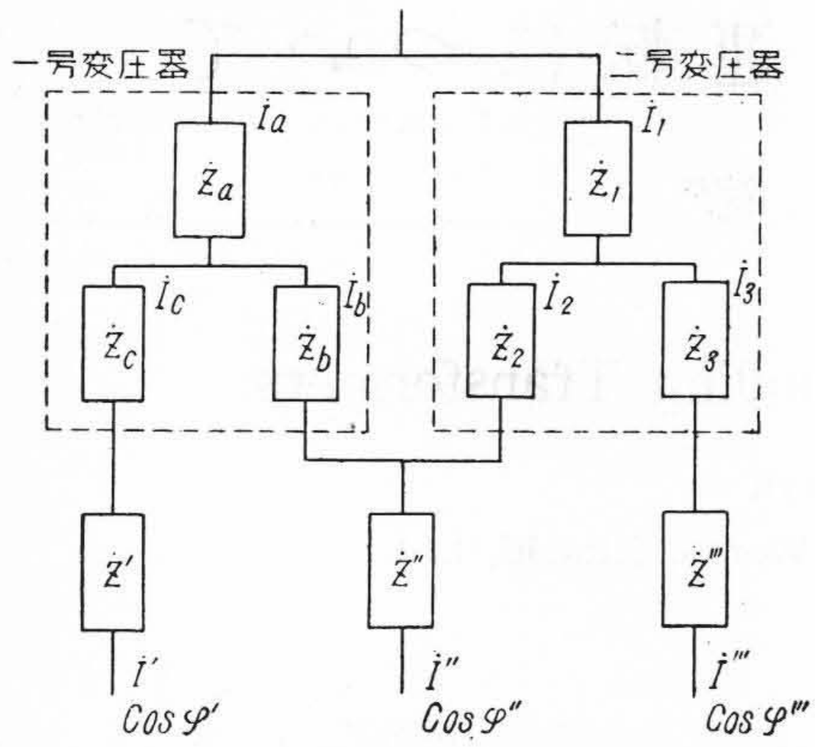
*　日立製作所日立国分分工場

〔II〕 三巻線変圧器の並列運転時負荷分担の計算

三巻線変圧器の等価回路は，一次励磁アドミッタンスを無視すれば**第1図**に示す星型等価回路がえられることは衆知の通りである。ただし $\dot{Z}_P$, $\dot{Z}_S$, $\dot{Z}_T$ は同一基準容量（たとえば一次容量）に換算した一次，二次および三次各巻線のインピーダンスである。



第1図　三巻線変圧器の星型等価回路
Fig. 1. Equivalent Star Circuit of Three Winding Transformer



第2図　三巻線変圧器の並列運転時の等価回路

Fig. 2. Equivalent Circuit of Parallel Operation of Three Winding Transformers

この等価回路の各巻線のインピーダンスは，三巻線のうち各二巻線について実測したインピーダンスを同一基準容量に換算した値から計算することができる。

$\dot{Z}_{PS}$＝巻線一次と二次間のインピーダンス

$\dot{Z}_{ST}$＝巻線二次と三次間のインピーダンス

$\dot{Z}_{PT}$＝巻線一次と三次間のインピーダンス

とし，

$$\frac{\dot{Z}_{PS}+\dot{Z}_{ST}+\dot{Z}_{PT}}{2}=\dot{Z}_{PST}{}^{*}$$

*とおけば

$$\dot{Z}_P=\dot{Z}_{PST}-\dot{Z}_{ST}\cdots\cdots\cdots\cdots(1)$$

$$\dot{Z}_S=\dot{Z}_{PST}-\dot{Z}_{PT}\cdots\cdots\cdots\cdots(2)$$

$$\dot{Z}_T=\dot{Z}_{PST}-\dot{Z}_{PS}\cdots\cdots\cdots\cdots(3)$$

となる。

この星型等価回路を使用すれば各巻線の箇々のインピーダンスは (1), (2), (3) 式より計算できるので，三巻線変圧器2台の並列運転の等価回路は**第2図**のように表わすことができる。

ここに，

$\dot{Z}_a$, $\dot{Z}_b$, $\dot{Z}_c$: 一号変圧器の一次，二次および三次の巻線インピーダンス

$\dot{Z}_1$, $\dot{Z}_2$, $\dot{Z}_3$: 一号変圧器の一次，二次および三次の巻線インピーダンス

$\dot{Z}'$: 一号変圧器の三次負荷インピーダンス

$\dot{Z}''$: 一号，二号変圧器の二次負荷インピーダンス

$\dot{Z}'''$: 二号変圧器の三次負荷インピーダンス

$\cos\varphi'$: $\dot{Z}'$ の負荷力率

$\cos\varphi''$: $\dot{Z}''$ の負荷力率

$\cos\varphi'''$: $\dot{Z}'''$ の負荷力率

とし，電流 I の足字はそれぞれの巻線の電流を示すとすれば**第2図**についてつぎの一般式が成立する。†

$$\begin{vmatrix}\dot{E}\\0\\0\\0\\0\\0\end{vmatrix}=\begin{vmatrix}\dot{I}_a\\\dot{I}_1\\\dot{I}_b\\\dot{I}_2\\\dot{I}_c\\\dot{I}_3\end{vmatrix}\times\begin{vmatrix}\dot{Z}_a & 0 & \dot{Z}_b+\dot{Z}'' & \dot{Z}'' & 0 & 0\\\dot{Z}_a & -\dot{Z}_1 & \dot{Z}_b & -\dot{Z}_2 & 0 & 0\\\dot{Z}_a & -\dot{Z}_1 & 0 & 0 & \dot{Z}_c+\dot{Z}' & -(\dot{Z}_3+\dot{Z}''')\\-\dot{Z}_1 & \dot{Z}_1 & \dot{Z}'' & \dot{Z}_2+\dot{Z}'' & -(\dot{Z}_c+\dot{Z}') & 0\\1 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0\\0 & 1 & 0 & -1 & 0 & -1\end{vmatrix}\cdots\cdots\cdots\cdots(4)$$

†(4)式を解けば各巻線の電流は計算できるが，特殊な例を除いて一般に膨大な計算式となり，実用計算には適しない。この計算式について，三巻線変圧器と二巻線変圧器の並列運転を円線図を用いて解いた例[1]もあるが，ここでは簡単な仮定を設けることにより十分実用性のある電流分布の計算法を示す。

仮定として各負荷電流 $\dot{I}'$, $\dot{I}''$ および $\dot{I}'''$ は与えられ，変圧器のインピーダンスは(5)式のごとくリアクタンス分のみよりなり，また**第2図**で三次側の負荷と直例に入る各変圧器の三次巻線のリアクタンスは負荷インピーダンスに比較すれば無視できるとする。したがつて

$$\left.\begin{array}{ll}\dot{Z}_a=jx_a & \dot{Z}_1=jx_1\\\dot{Z}_b=jx_b & \dot{Z}_2=jx_2\\\dot{Z}_c=0 & \dot{Z}_3=0\end{array}\right\}\cdots\cdots\cdots\cdots(5)$$

とおくことができる。

ここで $\dot{I}_a$ を有効分と無効分にわけ，$\dot{I}_a=\dot{I}_a'+jI_a''$ とおけば**第2図**の $\dot{Z}_a$, $\dot{Z}_b$, $\dot{Z}_2$, $\dot{Z}_1$ を含む回路でつぎの式が成立する。

$$\begin{aligned}0=&jx_a(I_a'+jI_a'')+jx_b(I_a'-I'\cos\varphi'+jI_a''\\&-jI'\sin\varphi')+jx_2(I_a'-I'\cos\varphi'-I''\cos\varphi''\\&+jI_a''-jI'\sin\varphi'-jI''\sin\varphi'')+jx_1(I_a'-I'\cos\varphi'\\&-I''\cos\varphi''-I'''\cos\varphi'''+jI_a''-jI'\sin\varphi'\\&-jI''\sin\varphi''-jI'''\sin\varphi''')\cdots\cdots\cdots\cdots(6)\end{aligned}$$

(6)式を整理すれば

$$\begin{aligned}0=&I_a'(x_a+x_b+x_2+x_1)-I'(x_b+x_2+x_1)\cos\varphi'\\&-I''(x_2+x_1)\cos\varphi''-I'''x_1\cos\varphi'''\\&+j\{I_a'''(x_a+x_b+x_2+x_1)-I'(x_b+x_2+x_1)\sin\varphi'\\&-I''(x_2+x_1)\sin x''-I'''x_1\sin\varphi'''\}\cdots(7)\end{aligned}$$

(7)式において実数部および虚数部をそれぞれ零とおけば

$$I_a'=\frac{I'(x_b+x_2+x_1)\cos\varphi' +I''(x_2+x_1)\cos\varphi''+I'''x_1\cos\varphi'''}{(x_a+x_b+x_2+x_1)} \quad \cdots\cdots(8)$$

$$I_a''=\frac{I'(x_b+x_2+x_1)\sin\varphi'+I''(x_2+x_1)\sin\varphi'' +I''x_1\sin\varphi'''}{(x_a+x_b+x_2+x_1)} \quad \cdots\cdots(8)'$$

となる。

$I_a'+jI_a''$ が求まれば他の巻線の電流はそれぞれの負荷電流を各分岐点より差引くことにより求めることができる。

$\dot{I}_b=I_b'+jI_b''$ とすれば

$$I_b'=I_a'-I'\cos\varphi'$$

$$=\frac{-I'x_a\cos\varphi'+I''(x_2+x_1)\cos\varphi''+I'''x_1\cos\varphi'''}{(x_a+x_b+x_2+x_1)} \quad \cdots\cdots(9)$$

$$I_b''=I_a''-I'\sin\varphi'$$

$$=\frac{-I'x_a\sin\varphi'+I''(x_2+x_1)\sin\varphi'' +I'''x_1\sin\varphi'''}{(x_a+x_b+x_2+x_1)} \quad \cdots(9)'$$

となり

$\dot{I}_2=I_2'+jI_2''$ とすれば

$$I_2'=I_b'-I''\cos\varphi''$$

$$=\frac{-I'x_a\cos\varphi'-I''(x_a+x_b)\cos\varphi''+I'''x_1\cos\varphi'''}{(x_a+x_b+x_2+x_1)} \quad \cdots\cdots(10)$$

$$I_2''=I_b''-I''\sin\varphi''$$

$$=\frac{-I'x_a\sin\varphi'-I''(x_a+x_b)\sin\varphi''+I'''x_1\sin\varphi'''}{(x_a+x_b+x_2+x_1)}$$

となり

$\dot{I}_1=I_1'+jI_1''$ とすれば

$$I_1'=I_2'-I'''\cos\varphi'''$$

$$=\frac{-I'x_a\cos\varphi'-I''(x_a+x_b)\cos\varphi'' -I'''(x_b+x_2+x_1)\cos\varphi'''}{(x_a+x_b+x_2+x_1)} \quad (11)$$

$$I_1''=I_2''-I'''\sin\varphi'''$$

$$=\frac{-I'x_a\sin\varphi'-I''(x_a+x_b)\sin\varphi'' -I'''(x_b+x_2+x_1)\sin\varphi'''}{(x_a+x_b+x_2+x_1)} \quad (11)'$$

となり，各巻線の電流の計算は非常に簡単になる。(8)～(11′) 式により各巻線の負荷分担は各負荷電流の大きさ，負荷の力率および各変圧器巻線のインピーダンスが関係することがあきらかである。つぎに計算例により並列運転時の負荷分担を論ずることにする。

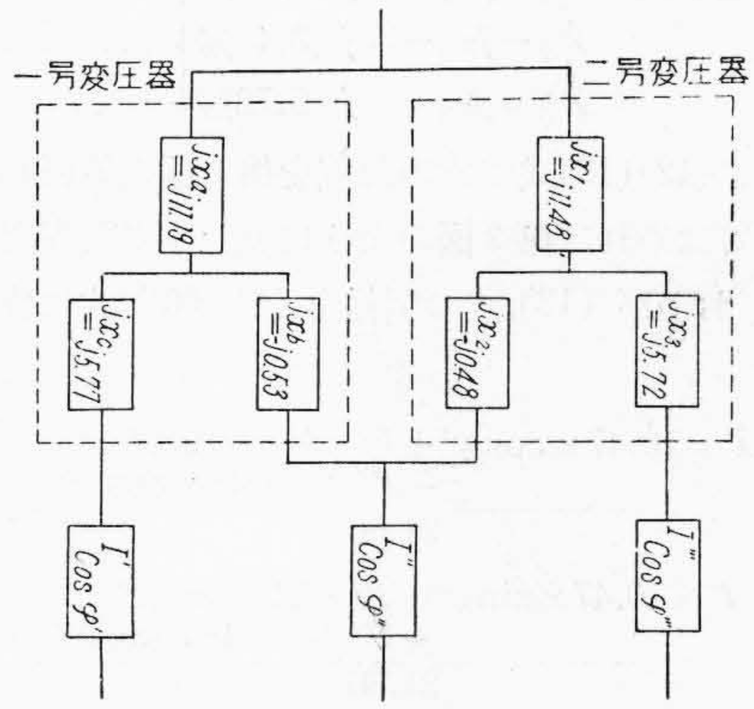
〔III〕 計　算　例

計算例として三巻線変圧器，一号器および二号器の2台が並列運転を行つているとき一号器の三巻線変圧器の三次進相負荷を一定とし，二号器の変圧器の三次進相負荷を変化した場合と一号器の三次巻線に一般遅相負荷を接続し，二号器の三次巻線の進相負荷を変化したときの各巻線の負担容量がいかに変るかを計算してみる。

第1表　変圧器のインピーダンス (45 MVA 基準)

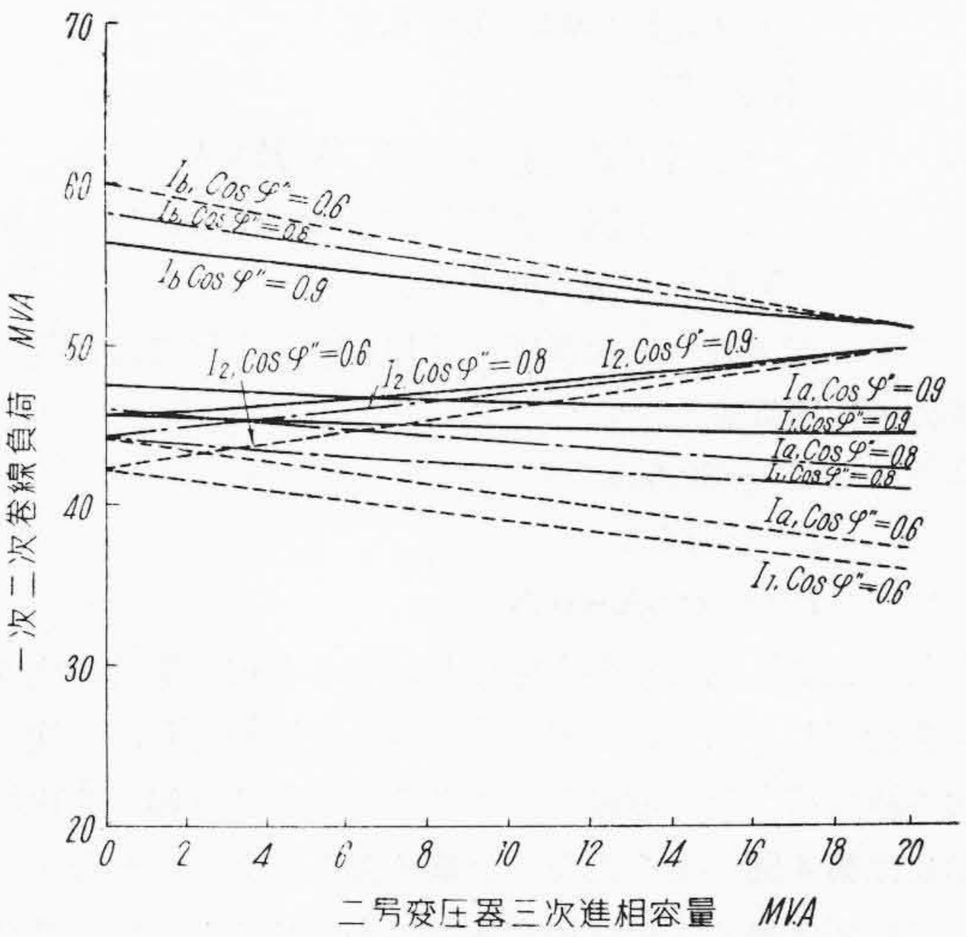
Table 1. Impedance of Transformer (45 MVA base)

	一号変圧器	二号変圧器
一次～二次間インピーダンス	10.66%	11.00%
二次～三次間インピーダンス	5.24%	5.24%
一次～三次間インピーダンス	16.96%	17.20%



第3図　50 MVA 変圧器の並列運転時の等価回路

Fig. 3. Equivalent Circuit of Parallel Operation of 50 MVA Three Winding Transformers



第4図　二次合成負荷 100 MVA，力率 0.9, 0.8, 0.6,，一号変圧器三次進相容量 20 MVA 一定で二号変圧器三次進相容量を変化した場合の巻線負荷分担特性

Fig. 4. Load Distribution Character to the Leading Load of the No. 2 Transformer's Tertiary Winding

両器とも一次容量 45 MVA，二次容量 50 MVA，三次容量 20 MVA とし，一次容量 45 MVA 基準に換算した各三巻線間のインピーダンスはそれぞれつぎの**第1表**の値とする。

第1表および (1) (2) (3) (5) 式により各変圧器の各巻線のインピーダンスを計算すれば

一号変圧器
$$\left.\begin{aligned}\dot{Z}_a&=jx_a=\ \ j\,11.19\%\\ \dot{Z}_b&=jx_b=-j\ \ 0.53\%\\ \dot{Z}_c&=jx_c=\ \ j\ \ 5.77\%\end{aligned}\right\}\cdots\cdots\cdots(12)$$

二号変圧器
$$\left.\begin{aligned}\dot{Z}_1&=jx_1=\ \ j\,11.48\%\\ \dot{Z}_2&=jx_2=-j\ \ 0.48\%\\ \dot{Z}_3&=jx_3=\ \ j\ \ 5.72\%\end{aligned}\right\}\cdots\cdots\cdots(13)$$

となる。(12)(13)式で求めた値を**第2図**の等価回路の記号にあてはめれば**第3図**のように表わすことができる。

(12) および (13) 式の関係を (8), (8′) 式に代入すれば

$$I_a'=\frac{I'\times10.47\times\cos\varphi'+I''\times11\times\cos\varphi''+I'''\times11.48\times\cos\varphi'''}{21.66}\qquad(14)$$

$$I_a''=\frac{I'\times10.47\times\sin\varphi'+I''\times11\times\sin\varphi''+I'''\times11.48\times\sin\varphi'''}{21.66}\qquad(14)'$$

となる。他の巻線の電流も同様に (9)～(11′) 式でそれぞれ計算することができる。

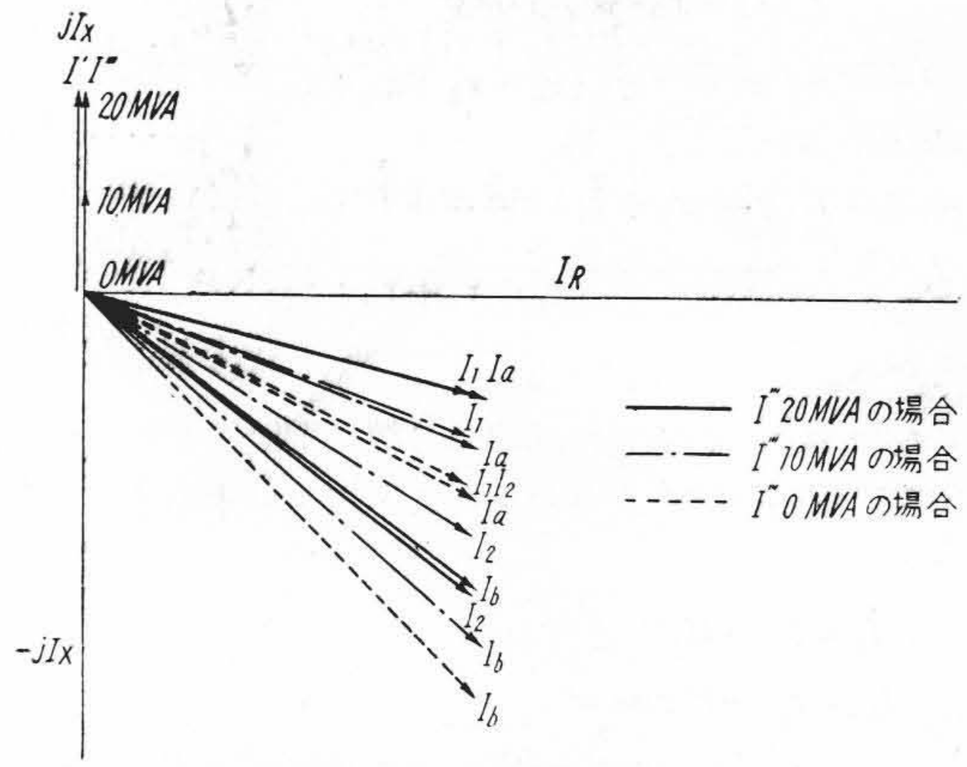
並列運転時の各負荷の条件を変えて負担電流の変化を計算してみる。

(a)　二次合成負荷 100 MVA 一定
　　力率遅れ　0.9, 0.8, 0.6
　　三次負荷
　　一号変圧器　進相負荷　20 MVA 一定
　　二号変圧器の進相負荷を 20 MVA から 0 MVA まで変化させる。

ここで変圧器の一次電圧を 140 kV とすれば各負荷電流の一次換算値は

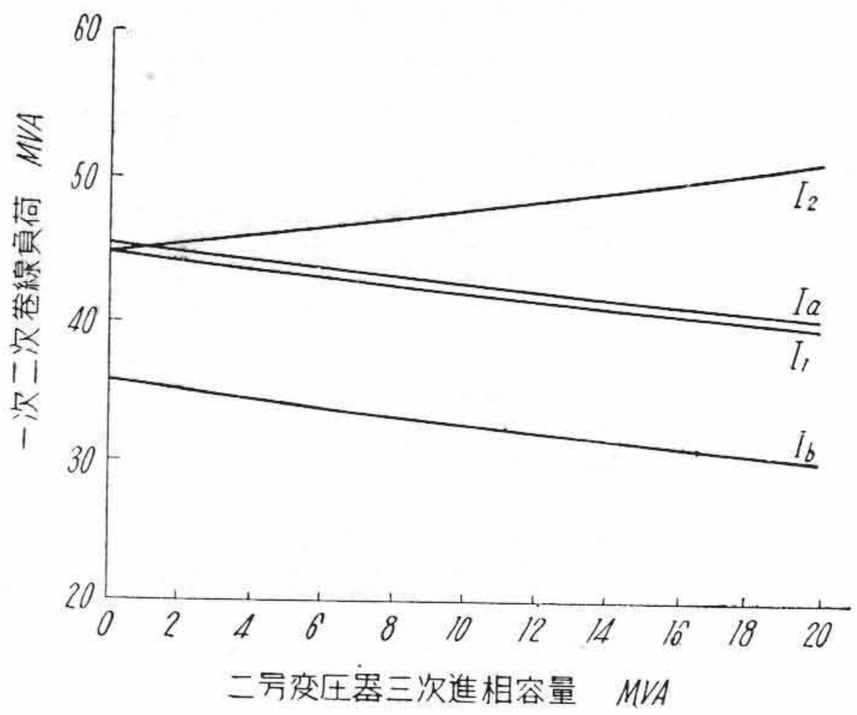
I' ＝82.6 A
I'' ＝414 A
I'''＝82.6A～0 A

となる。これにより各力率における各巻線の電流の大きさを計算し，二号変圧器の進相容量を横軸とし，一次二次巻線負荷容量を縦軸として各巻線の負荷分担の変化を示せば**第4図**のようになる。**第4図**からあきらかなように二号変圧器の三次進相容量を減少させるときは一号変圧器の二次巻線は急激に過負荷となり，二号変圧器の二次巻線は逆に軽負荷となる。この割合は二次負荷が低力率なほど大となる。**第5図**は二次負荷力率が 0.8 の場合の各巻線電流のベクトル的変化を示す。二号変圧器の三次進相負荷の変化に応じて各巻線の電流の大きさおよび位相が相当変化することがわかる。



第5図　二次合成負荷 100 MVA，力率 0.8，一号変圧器三次進相容量 20 MVA，一定で二号変圧器三次進相容量を変化した場合電流ベクトル

Fig. 5. Current Vestor Diagram to the Leading Load of the No. 2 Transformer's Tertiary Winding when the Secondary Load's Power Factor is 0.8



第6図　二次合成負荷 80 MVA，力率 0.8，一号変圧器の三次負荷 10 MVA，力率 0.9 一定で二号変圧器の三次進相容量を変化した場合の巻線負荷分担特性

Fig. 6. Load Distribution Character to the Leading Load of the No. 2 Transformer's Tertiary Winding when the No. 1 Transformer has Lagging Load

つぎに，

(b)　二次合成負荷 80 MVA 一定
　　力率遅れ　0.8
　　三次負荷
　　一号変圧器　遅れ力率 0.9 の負荷 10 MVA 一定
　　二号変圧器の進相負荷を 20 MVA から 0 MVA まで変化させる。

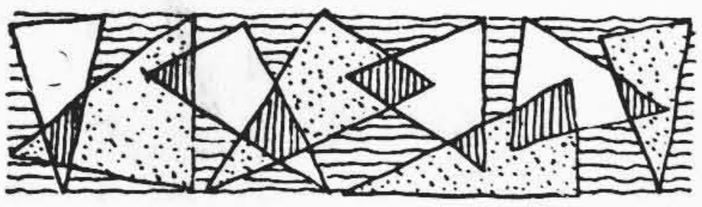
この条件での各巻線の電流分担の計算結果を(a)同様に示したのが**第6図**である。この場合，三次進相負荷の増加とともに各変圧器の一次巻線はほとんど同一負荷分担の割合で減少し，二次巻線は一方は増加，他方は減少するという相反する結果となる。

〔IV〕 結　　言

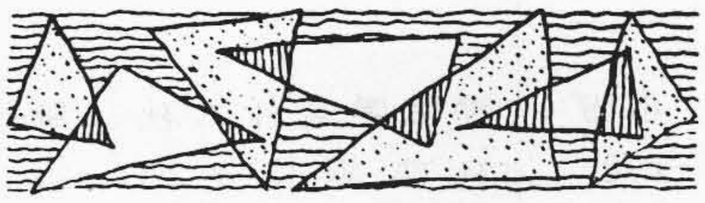
以上三巻線変圧器の並列運転時負荷分担の簡略計算法を示し，かつ実例について各巻線にことなる性質の負荷を接続した場合の負荷分担を計算した。当然のことながら各三巻線変圧器のインピーダンスが等しくとも，各三次側に接続される負荷の相違および力率の違いにより各巻線の負荷分担は影響を受ける。この場合でも一次巻線は比較的負荷分担は不平衡とはならぬが二次巻線は例外なく一方の巻線が過負荷となり運転上支障を来す。緒言にも述べたごとく，このことは従来さほど問題にされていなかつたが，三次にそれぞれ静電蓄電器を接続して並列運転を行つている一次変電所などで片方の変圧器の三次から相当容量の所内電源などをとる場合などは当然この種の不平衡が生ずると考えられ検討する必要があるとおもわれる。本稿がいくらかでもこの種問題の計算に参考になれば筆者の喜びとするところである。最後にこの研究をすすめるにあたりいろいろ激励助言を賜つた日立製作所日立工場林田検査部長，谷崎変圧器部長，永井変圧器検査課長，小川変圧器設計課長に謝意を表す。

参　考　文　献

(1)　栗田：　日立評論　**35**　1561 (1953)



特　許　と　新　案



最近登録された日立製作所の特許および実用新案　(その5)

(第26頁から続く)

区　別	登録番号	名　称	工場別	氏　名	登録年月日
実用新案	427372	可変選択度濾波器	戸塚工場	菅田昌次郎	30. 4. 21
〃	427376	壁掛型電話機	戸塚工場	高木寿夫	〃
〃	427407	多素子空中線	戸塚工場	古谷勝美 高橋政次郎	〃
〃	427415	高周波コイル	戸塚工場	角七男	〃
〃	427436	壺形インダクタンスコイル	戸塚工場	菅田昌次郎 岩波英一	〃
〃	427444	可変壺形インダクタンスコイル	戸塚工場	家形秀夫 岡田義男	〃
〃	427420	高圧整流管の陰極構体	茂原工場	宇多村幸彦 原田正	〃
実用新案	427394	小型運搬車の緩衝連結器	戸畑工場	三原正一	30. 4. 21

化学装置の計装化に
日立工業計器
温度計(熱電及抵抗温度計)　液面計兼警報計
流量計　電子管式自動平衡計
トラフトゲージ　各種調節計
CO_2 ガス計　熱計器盤
PVQ型電子管式
自動平衡記録調節計
日立製作所

日立製作所社員社外講演一覧 (昭和30年4月受付分)

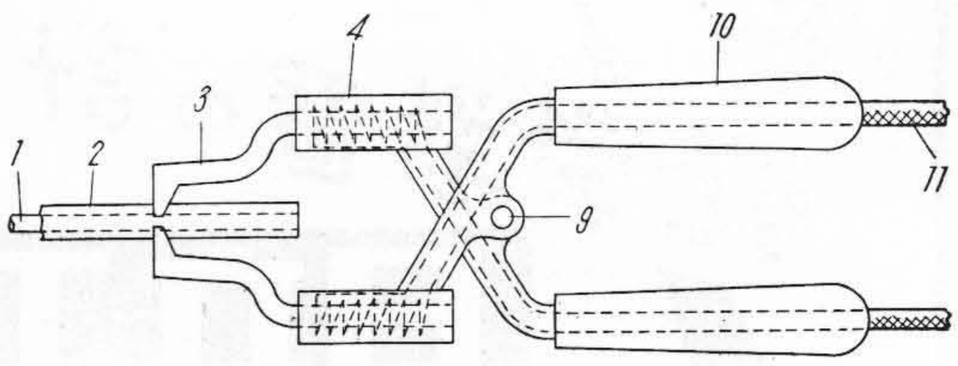
講演月日	主催	演題	所属	講演者
4/26	小峰工業技術KK	歯車の工作技術とその運転性能	中央研究所	明山正元
5/16～18	日本音響学会	貼合せ型受話機振動板の振動姿態とその制御	戸塚工場	西口薫
4/15	経営研究所	工場の労務管理組織について	戸塚工場	溝井正人
4/27	日刊工業新聞社	WF導入効果と実績	多賀工場	真鍋典男
3/25	東京鉱山保安監督部	巻上機の保守監理について、欧米炭砿事情その他の件	亀有工場	渋谷英寅
4/26	日本鉱業会	鉱山用巻上機および附属設備に関する技術向上について	亀有工場	石橋重遠
5/9	日本ボイラー協会外六社	日立式熱管理自動制御装置最近の進歩	日立工場	吉岡孝幸
4/5	日本労務研究会	生産性向上の諸問題	戸塚工場	岩坂溝堀丸榎 間田井山本 喜一正寅正 吉志人記雄人
6/18	電気学会外二社	無遮蔽ケーブルの感電現象とその対策	日立電線工場	橋本博治
6/8	特殊鋼倶楽部	特殊鋼JIS規格の解説	安来工場	小柴定雄
7/8	日本化学会	和鋼と特殊鋼について	安来工場	小柴定雄
4/28	阪大工学通信工学教室	我国の自動交換機の諸問題	戸塚工場	渡辺孝正
4/14	三重県X線技師会	日立間接撮影用蓄電器放電式X線装置について	亀戸工場	市川義三
4/2	日本医学放射線学会	蓄電器放電式装置の充電方法について	亀戸工場	小林長平
4/24	郡馬県放射線技師会	日立断層撮影X線装置について	亀戸工場	石橋正男
5/20	北海道炭坑技術会	1. 各種条件による竪坑巻上機の選定について 2. ゲージの着床誤差およびその修正について 3. 操車設備について	亀有工場	渋谷英寅

新案の紹介

実用新案第414473号　　菅野英太郎・星野　暹

ビニル被覆線端被覆剝離器

配電盤の裏面配線または通信機器内部配線として，ビニル被覆線が使用されているが，この考案は線端端子付作業に当り，ビニル被覆を剝離するペンチ型剝離器の新規構造に関するものである。図において1は心線，2はビニル被覆，3は剝離器の挾み金具，4は金具を加熱する電熱器，9はヒンヂ，10は把手，11は電熱器のリード線である。この剝離器は使用中電熱器4に通電し，挾み金具3を常時100～120°Cに加熱した状態でビニル被覆を挾み，被覆を挾まれた部分で溶断して心線より引抜くものである。従来絶縁電線の被覆剝離作業はナイフ，ニッパその他の剝離器を使用して行われたが，これら周知の剝離器は，心線径1.6～2.0 mm，外径4 mm以下



の細線では被覆剝離に際し心線を傷損することがあり不適当である。しかるにこの考案の電熱式剝離器では心線傷損のおそれが全くなく，加えるに被覆剝離能率を従来のほゞ3倍に増進しえたものである。　(滑川)