U. D. C. 621.316.728.6+621.316.729

トランジスタ式自動同期投入装置，自動負荷分担装置

Transistor Type Automatic Synchronizing Equipment, Automatic Load Balancing Equipment

横田　馨*　古賀靖夫*
Kaoru Yokota　Yasuo Koga
竹村克己**　加藤和男**
Katsumi Takemura　Kazuo Katô

内　容　梗　概

従来，舶用交流発電機の並列接続には電圧，周波数，位相をあわせて手動にて並列投入し，並列投入後の交流発電機間の負荷分担は原動機のガバナを手動にて調整して行なう方法がほとんどであったが，船舶自動化の一環として最近耐振性のあるトランジスタ式自動同期投入装置，自動負荷分担装置の開発が各方面より要望されるようになった。日立製作所ではこれらの要望にこたえるためトランジスタ式自動同期投入装置，自動負荷分担装置の試作研究を進めるとともに，このたび日立造船株式会社にトランジスタ式自動同期投入装置を製作納入した。本装置は現在，好調に運転中である。

1. 緒　　言

交流発電機の並列接続には電圧の大きさ，周波数，位相を一致させ，その負荷分担は原動機のガバナを調整することは周知のとおりであるが，最近の船舶自動化の一環として舶用交流発電機の並列運転操作を自動化したいわゆる，自動同期投入装置，自動負荷分担装置の使用が近時さかんになってきた。しかしながら従来用いられていた電子管式，継電器式のこれら装置は耐振性，耐衝撃性に難点がありこれが解決が各方面から要望されるようになった。

日立製作所ではトランジスタ式自動揃速装置，自動同期閉合装置をもった自動同期投入装置および自動負荷分担装置の試作研究を進めるとともに，このたび日立造船株式会社にトランジスタ式自動同期投入装置を納入したのでこれらの概要を以下に紹介する。

2. トランジスタ式自動同期投入装置，自動負荷分担装置の特長

トランジスタ式自動同期投入装置，自動負荷分担装置は下記のような特長をもっている。

（1） 装置はトランジスタ，固定抵抗器など可動部のない部品で形成されているので耐振，耐衝撃性にすぐれている。

（2） 使用する部品が小形，軽量，静止形であるので装置全体が小形，軽量化される。

以上のような特長をもっているが，たとえばトランジスタ式自動同期投入装置は強制自動同期投入装置[1]のように発電機の電圧，周波数がある規定値内にあれば位相に無関係に同期化でき，しかも数秒で同期投入が完了できるのに比べて自動揃速装置の動作時間だけ全動作時間が長くなる欠点をもっている。

3. 自動同期投入装置，自動負荷分担装置の概要

自動同期投入装置に自動負荷分担装置を追加することにより交流発電機の並列運転操作については完全な自動化をはかることができる。すなわち母線に並列接続しようとする交流発電機駆動用原動機を起動して同期投入スイッチを操作することにより，まず自動揃速装置を作動させ駆動用原動機ガバナを調整し交流発電機の周波数を母線周波数にほぼ一致させる。つぎに自動同期閉合装置により母線と交流発電機の電圧の大きさ，位相一致点を確認して自動的に発電機を母線に投入する。並列投入したままでは被並列機のガバナは無負荷時の状態になっているので自動負荷分担装置により並列運転中の各交流発電機の有効分出力を検出し発電機容量に比例するよう各原動機のガバナを調整して負荷を分担させ並列運転の自動化は完了する。

*　日立製作所日立工場
**　日立製作所日立研究所

4. 自動揃速装置

第1図は揃速装置のブロック図を，**第2図**は発電機周波数の遅速判別の原理を示したものである。いま母線側の三相電圧をそれぞれ V_A, V_B, V_C としA相に対応する発電機の一相の電圧を V_a とする。**第1図**のように V_B と V_a のビート電圧の交流分をシュミット回路 S_1 に入れて方形波とし，同様に V_c と V_a のビートを S_2 に，V_A'（V_A と180度位相の異なる電圧）と V_a のビートを S_3 に入れてそれぞれ方形波化する。シュミット回路 $S_{1\sim3}$ の出力電圧の関係は**第2図**のようになる。すなわち V_a のベクトルは V_A, V_B, V_C に対して母線周波数 f_L と発電機周波数 f_G の大小にしたがって相対的に回転（$f_L>f_G$ で反時計方向，$f_L<f_G$ では時計方向）することになり各シュミット回路出力には図示の電圧が得られる。S_3 の出力の立ち上がりが S_1 の出力と一致するか S_2 の出力と一致するかによって f_L と f_G の大小を判別している。一方この一致パルスは遅延回路を経て上げ，下げのフリップ，フロップをリセットして操作パルス幅を制御している。遅延回路には揃速制御系が乱調を生じない範囲の基準パルス幅を与えるバイアス電圧と操作パルスの時間的平均値に相当した正帰還電圧を与え，周波数差の大小により連続的に操作パルス幅を変えて迅速かつ安定な揃速動作を行なうよう計画されている。

本装置の性能は次のようなものである。

（1） 周波数差応動範囲　　±0.05～±15 c/s
（2） 操作パルス幅設定範囲　　100～600 ms
（3） 周囲温度範囲　　−10～+55℃

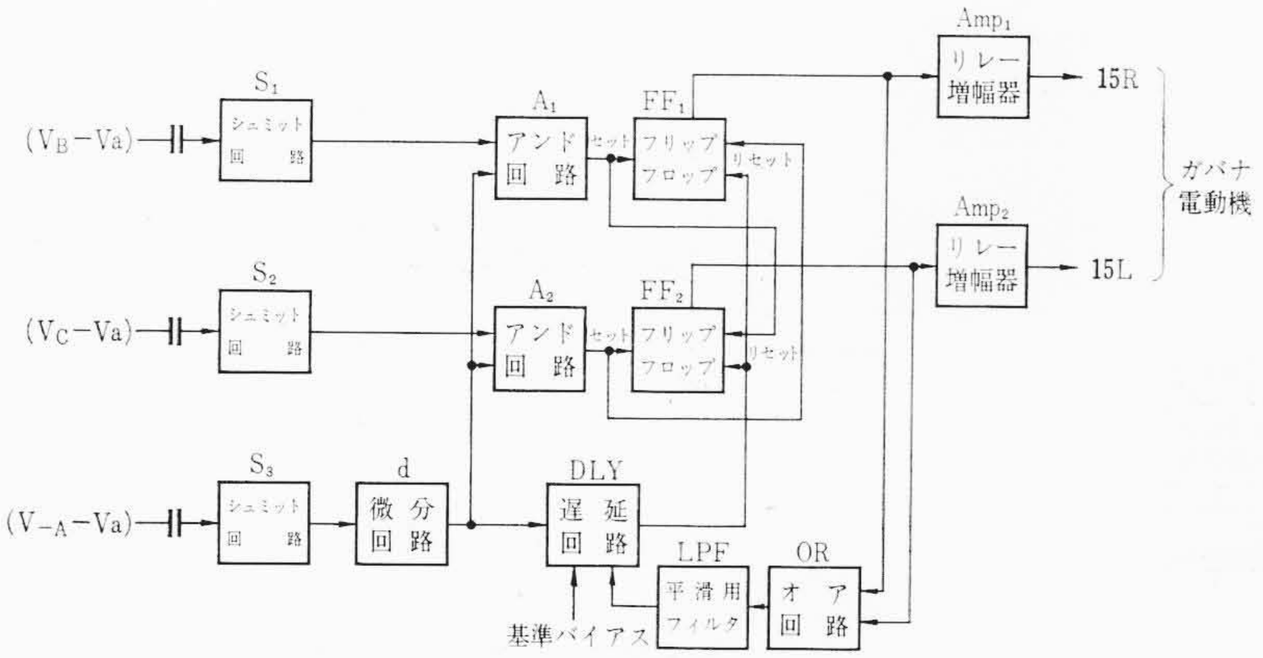
5. 自動同期閉合装置[2]

交流発電機を母線に並列接続する場合，通常遮断器は投入線輪励磁後，接点閉成まで0.1～0.6秒程度のむだ時間があるので同期点よりもこのむだ時間相当角度だけ早めに遮断器投入指令を出す必要がある。

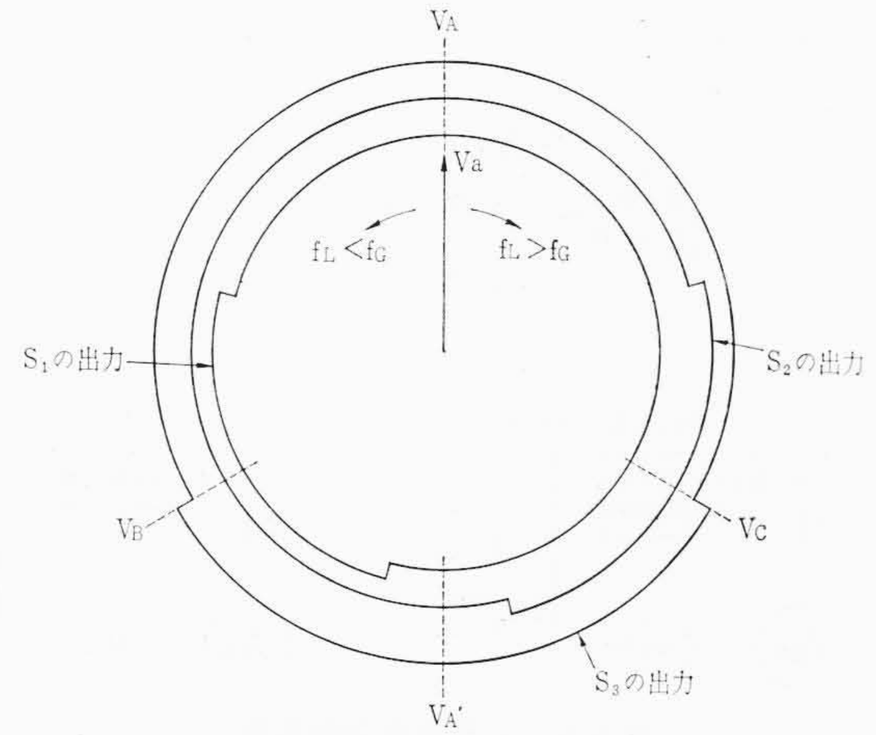
いま周波数差 Δf (c/s)，遮断器のむだ時間を T_D(s) とすればこの先行角度 θ_A(°) は

$$\theta_A=360^\circ\cdot\Delta f\cdot T_D \quad \cdots\cdots(1)$$

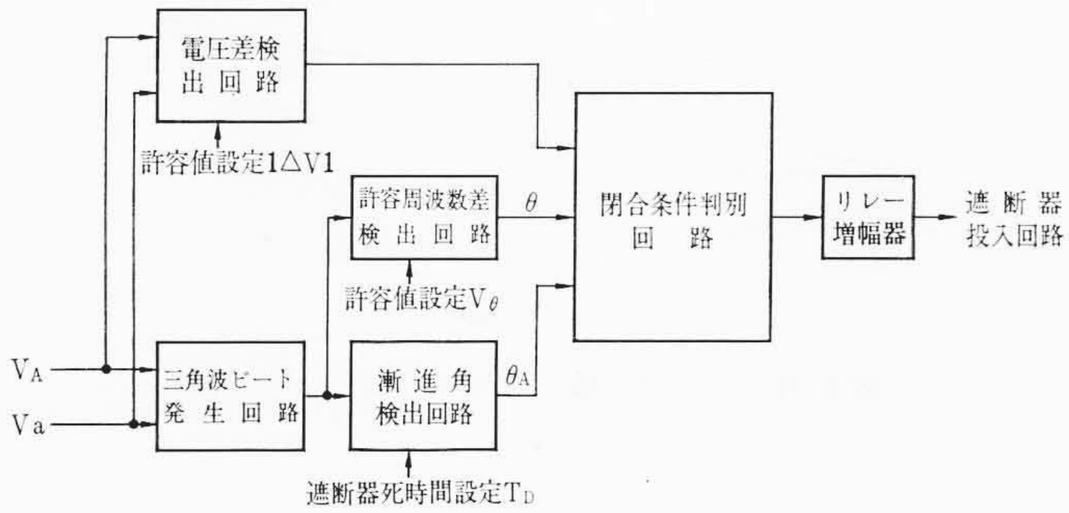
なる関係で周波数差に比例しなければならない。この特性を漸進特性と称しこの特性の良否が並列時のショック，突入電流の大小を最



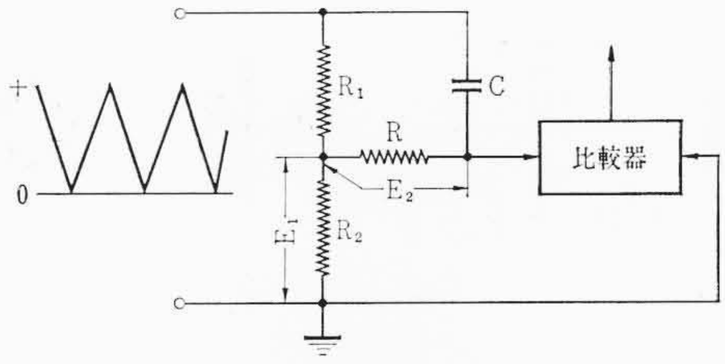
第1図　自動揃速装置ブロック図



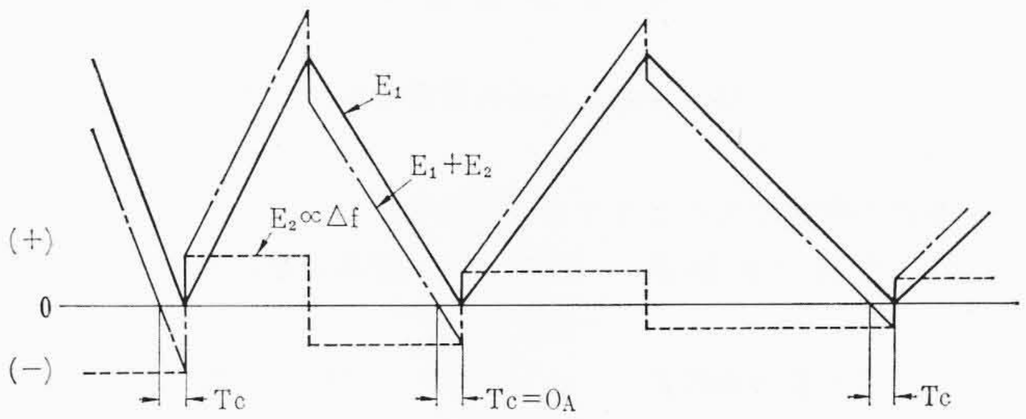
第2図　周波数遅速判別の説明図



第3図　自動同期投入装置ブロック図



第4図(a)　漸進角検出回路



第4図(b)　第4図(a)の動作波形

も大きく支配するため閉合装置は周波数差の広い範囲にわたって正確な漸進特性を有することが特に望まれる。

従来この漸進特性は母線，発電機双方の対応する相の電圧から得られる正弦波ビート電圧をもって両電圧の位相差に比例した量とみなし，一方この電圧を微分して得た周波数差相当の電圧と比較することにより漸進角を測定する方式が多く採用されてきた。この正弦波ビート電圧方式は

（1）　位相差が大きくなるにしたがい電圧が位相差に正しく比例せず，広い周波数範囲では漸進角に誤差を生ずる。

（2）　操作入力に電圧差，波形ひずみ(さらには大きな周波数差)が生ずるとビート電圧の同期点付近のかたちが崩れて漸進角に誤差を生ずる。

などの欠点があった。本装置では位相—電圧の関係が直線的な三角波発生には母線，発電機双方の操作入力電圧によりトランジスタをスイッチングする方法を用いることにより電圧差，波形ひずみなどの影響を受けず前記の欠点をほぼ完全に除いている。

第3図は自動同期閉合装置のブロック図である。

三角波ビート電圧発生回路は母線の一相の電圧 V_A，対応する発電機電圧 V_a をとり両者の位相差に比例した幅のパルス電圧を出すアンド回路と平衡回路からなる。そのパルス幅は両者の位相差が0度のとき零，180度のとき最大となり平滑回路出力として三角波ビート電圧が得られる。

この三角波ビート電圧は**第4図**(a)のような漸進角検出回路にはいり遮断器むだ時間 T_D に相当する漸進角 θ_A を検出する。この回路の各部の電圧波形は**第4図**(b)となり E_1 と E_2 の値が等しくなる時点で比較器に出力を生ずる。この回路により得られる漸進時間 T_C は

$$T_C=\frac{R_2}{R_1}\cdot CR \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(2)$$

（ただし，$CR\ll 1/\Delta f$ とする）

となり $T_C=T_D$ となるように R を設定すれば周波数差 Δf の大小に関係なく正確な漸進特性が得られる。

閉合条件判別回路は漸進角検出回路よりの出力を受け電圧差検出回路，閉合許容周波数差検出回路出力と照合し電圧差，周波数差がいずれも閉合許容値内であることを確認して閉合指令を発するようにしてある。

本装置の性能は次のようなものである。

（1）　漸進時間設定　　0.1～0.6 s

（2）　許容周波数差　　0.1～0.5 c/s

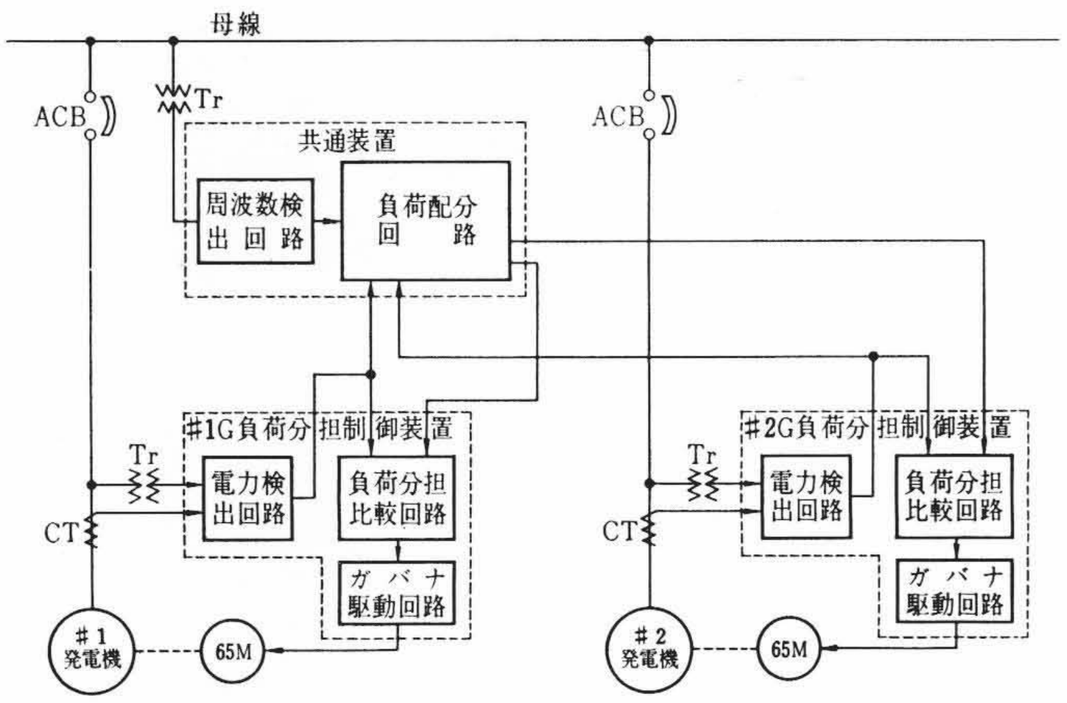
（3）　閉合時角度誤差　　±3度以内

（4）　周囲温度　　−10～+55℃

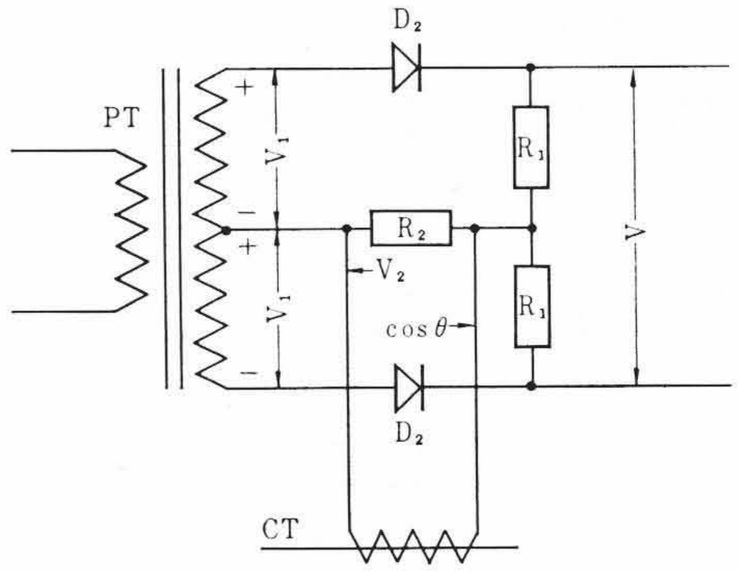
6.　自動負荷分担装置

6.1　装置の構成および動作

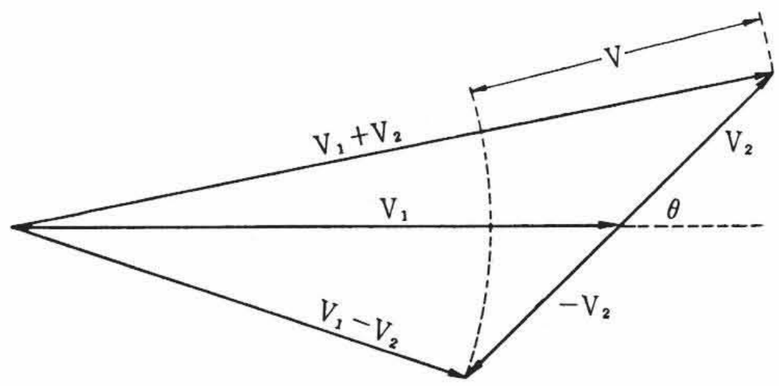
第5図に2台の交流発電機の自動負荷分担装置のブロック図を示す。各機の負荷は負荷分担制御装置において検出され共通装置の負荷配分回路に入り各交流発電機の負荷が総合される。この総合負荷に希望分担比 α_i を乗じた負荷が改めて各発電機の負荷分担制御回路に戻る。負荷分担比較回路は各発電機の負荷をこの目標値と比較し，これが一致するまで制御信号を発してガバナ用電動機を制御する。一方母線周波数の定格周波数からの偏差を共通装置において検出し各原動機をいっせいに昇速，あるいは降速方向に制御して母線



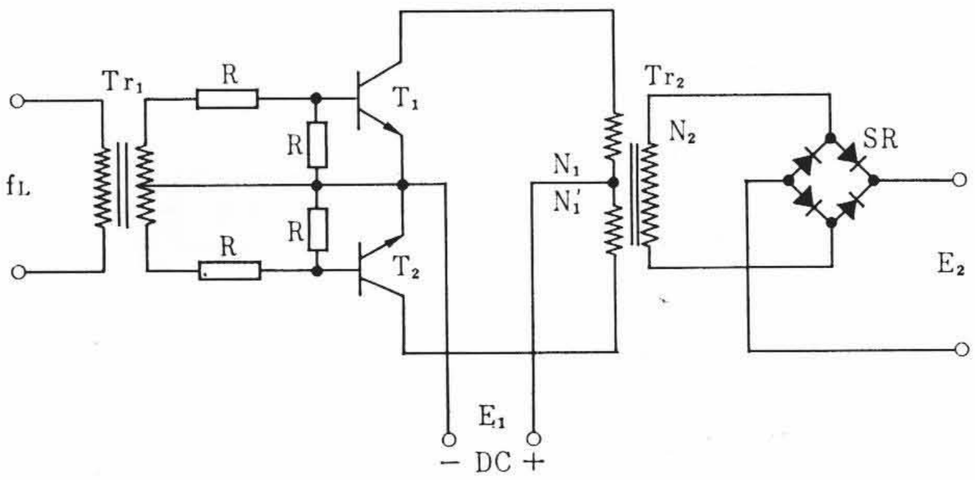
第5図　自動負荷分担装置ブロック図



第6図(a)　電力検出回路



第6図(b)　電力検出回路の動作ベクトル図



第7図　周波数検出回路

周波数を常に定格値に保持しながら負荷分担が可能なよう計画されている。

本装置の性能は次のようなものである。

（1）　負荷分担誤差　　10% 以下（定格容量に対して）

（2）　周波数制御誤差　　±1% 以下（定格周波数に対して）

（3）　周囲温度　　−10～+55℃

6.2　電力検出回路

本装置の電力検出回路は以下述べるように簡単な構成で，しかも実用上十分な信頼性をそなえている。

第4図(a)は電力検出回路を示し，**第6図**(b)はその動作ベクトル図である。図からあきらかなようにこの回路の出力 V は2成分（電圧，電流相当）の和と差のベクトルの代数的な差であり両者の位相差を θ とすれば

$$V=\sqrt{V_1^2+V_2^2+2V_1V_2\cos\theta}-\sqrt{V_1^2+V_2^2-2V_1V_2\cos\theta} \quad \cdots\cdots(3)$$

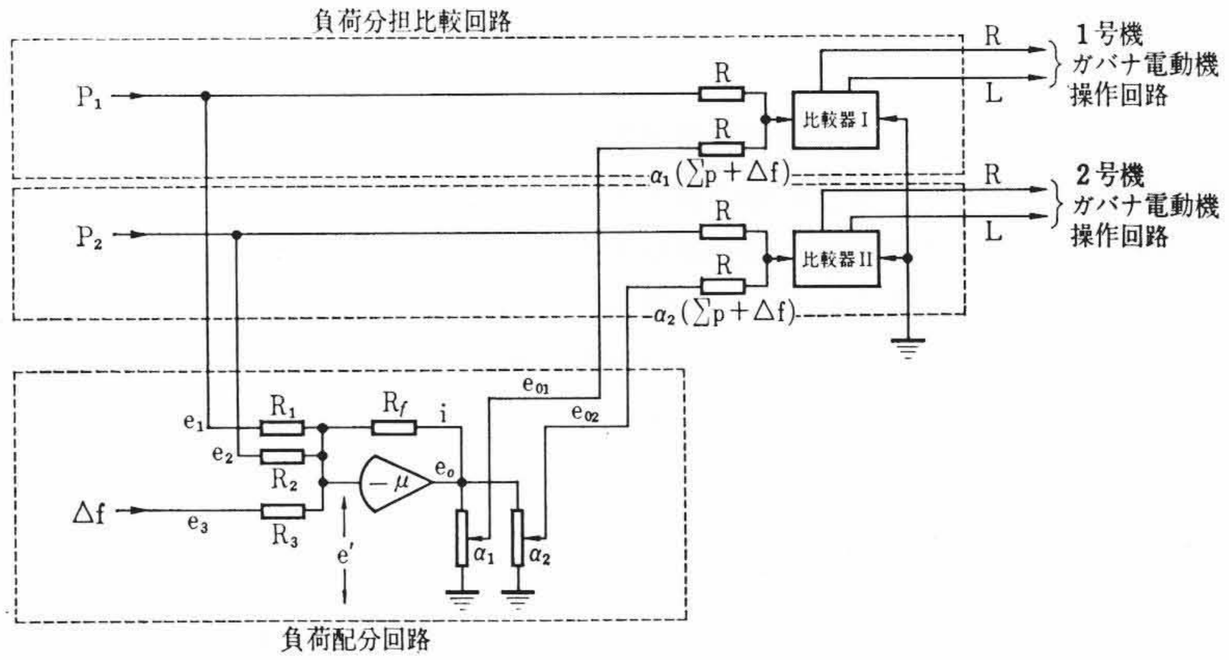
となる。これを二項展開すれば

$$V=2V_2\cos\theta\left[1-\frac{1}{2}\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2+\left\{\frac{3}{16}\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2+\frac{1}{96}\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2\cos^2\theta\right\}-\frac{15}{384}\right] \quad \cdots\cdots(4)$$

(4)式からあきらかなようにこの回路は $V_1 \gg V_2$, V_1＝一定なる条件では $2V_2\cos\theta$ なる電流成分のみの形で電力を検出できる。この電力検出回路は従来の整流器による二乗検波法のように整流器の特性に左右されないので安定でかつ大きな出力電圧が容易に得られる。

6.3　周波数検出回路

第7図は周波数検出回路を示したものである。電源電圧によりトランジスタ T_1, T_2 を交互にスイッチングして方形ヒステリシス特性をもった変圧器 T_{r2} の鉄心の磁束を正の飽和磁束から負の飽和磁束まで交互に変化し二次巻線 N_2 に誘起する方形波電圧を整流器SRにより整流する。この整流出力電圧は以下に述べるように母線周波数に比例するからこれを基準電圧（周波数設定値を与える）と比較することにより母線周波数の設定値からの偏差 Δf に比例した電圧を得ることができる。



第8図　負荷分担装置主要部の動作説明図

第7図で変圧器 T_{r2} の一次巻線 N_1 にかかる電圧を E_1 とし飽和磁束を ϕ_m とすれば飽和時間（磁束 ϕ が $\pm\phi_m$ 間を変化する時間）T は

$$\int_0^T dt=\frac{N_1}{E_1}\int_{-\phi_m}^{+\phi_m}d\phi \qquad \therefore \quad T=\frac{2\phi_m N_1}{E_1} \quad \cdots\cdots(5)$$

となる。入力周波数が f_L の場合，整流器出力電圧 E_2 は

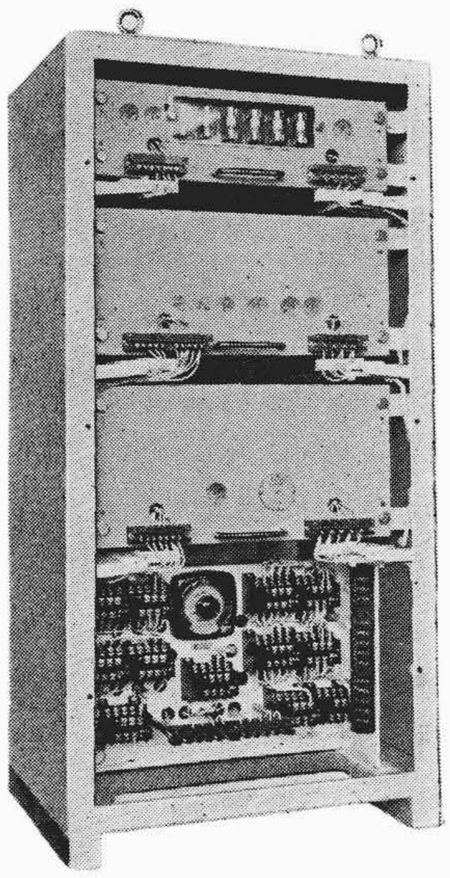
$$E_2=E_1\cdot\frac{N_2}{N_1}\cdot\frac{2\phi_m N_1}{E_1}\cdot 2f_L=4N_2\phi_m f_L \quad \cdots\cdots(6)$$

ここに，　N：　変圧器 T_{r2} の二次巻線

N_2, ϕ_m は回路，材料により定まるから出力電圧 E_2 は入力周波数に比例する。

6.4　負荷配分，負荷分担比較回路

第8図は負荷分担装置主要部の動作説明図である。図において負



第9図　トランジスタ式自動同期投入装置

荷配分回路は加算演算器と，その出力側の分担比設定回路よりなる。いまこの演算回路において入力電圧を e_1～e_3，入力抵抗を R_1～R_3，入力抵抗を流れる電流を i_1～i_3，帰還抵抗を R_f，出力電圧を e_0，帰還回路電流を i，増幅器入力端子電圧を e'，増幅率を $-\mu$（入力電圧に対して出力電圧の極性が反転することを意味する）とすれば次式がなりたつ。

$$\left.\begin{aligned} e_1-e'&=R_1 i_1\\ e_2-e'&=R_2 i_2\\ e_3-e'&=R_3 i_3\\ i&=i_1+i_2+i_3\\ e'-e_0&=R_f i\\ e_0&=-\mu e' \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots(7)$$

(7)式から i, i_1, i_2, i_3 および e' を消去すると

$$e_0=\frac{\left(-R_f\cdot\sum_{j=1}^{3}\frac{e_j}{R_j}\right)}{1+\frac{1}{\mu}\left(1+R_f\sum_{j=1}^{3}\frac{1}{R_j}\right)} \quad \cdots\cdots(8)$$

ここでもし増幅器の利得が十分大きければ

$$1\gg\frac{1}{\mu}\left(1+R_f\sum_{j=1}^{3}\frac{1}{R_j}\right)$$

であるから(8)式は次のようになる。

$$e_0=-R_f\cdot\sum_{j=1}^{3}\frac{e_j}{R_j}=-\left(\frac{R_f}{R_1}e_1+\frac{R_f}{R_2}e_2+\frac{R_f}{R_3}e_3\right) \quad \cdots(9)$$

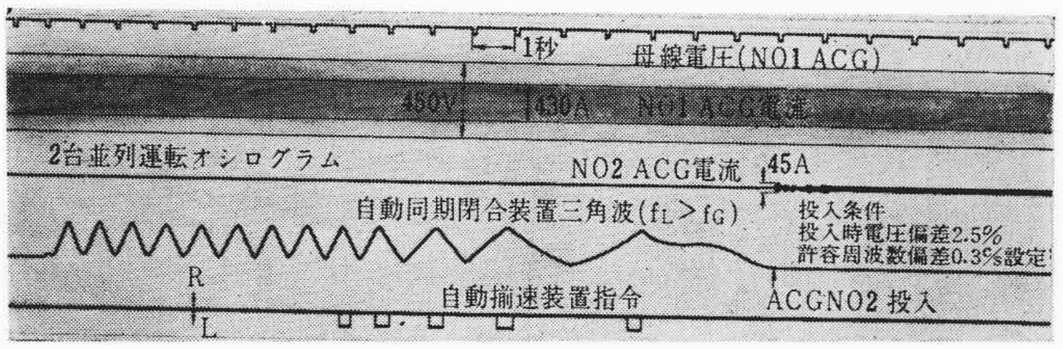
すなわち各端子の入力が R_f/R_j の比重で加算され出力となる。**第8図**より e_j は $P_1, P_2, \Delta f$ に相当するから増幅器出力電圧は

$$\left(\sum_{j=1}^{2}P_j+\Delta f\right)$$

となり総合負荷と周波数偏差の和が得られる。増幅器出力側の2個のポテンショメータをおのおの所望の分担比 α_1, α_2 に設定すれば各機の負荷分担目標値は

$$\alpha_j\left(\sum_{j=1}^{2}P_j+\Delta f\right)$$

が得られ，この目標値とおのおのの出力を比較してその偏差の極性



第10図　発電機の自動同期投入のオシログラムの一例

によりガバナ電動機を操作し母線周波数を一定値に保ちながら各機の負荷分担を制御することができる。

7. トランジスタ式自動同期投入の実施例

日立製作所ではこのたび日立造船株式会社にて建造のイギリス P & O 社納 39,000 t 鉱石運搬船の船内主交流発電機用トランジスタ式自動同期投入装置を完成，納入した。以下にその概要を示す。

交流発電機仕様

定格容量	525 kVA
定格電圧	450 V
周波数	60 c/s
回転数および力率	720 rpm，80%
発電機並列台数	3台
励磁方式	自励式
駆動原動機	ディーゼル機関

第9図はトランジスタ式自動同期投入装置の内観を示したものである。

発電機を並列運転するにはあらかじめ自動同期投入装置にてガバナ電動機操作用パルス幅，漸進時間，同期投入時の許容周波数差などを適当に設定し，配電盤上に設置の同期投入用押ボタンを押すことにより交流発電機を母線に自動並列接続することができる。装置は気中遮断器が投入したことを確認して主回路から切りはなされる。同期投入を確実，安全にするため自動同期閉合装置には発電機電圧が一定値以内でないと閉合装置が動作しないようインターロックが施されている。

第10図は船内で交流発電機を母線に自動投入した場合のオシログラムの一例を示したものである。オシログラムからわかるように発電機の突入電流は約7%以下で母線電圧のじょう乱はほとんどみられない。

8. 結　　言

以上，トランジスタ式自動同期投入装置，自動負荷分担装置の概要および自動同期投入装置の実施例について述べたが，これらの装置は交流発電機の並列運転操作を完全自動化することから，今後各方面にて使用されるものと信ずる。本論文がこの種技術開発の参考に利用されれば筆者らの幸いとするところである。

終わりに日立造船株式会社，日立製作所関係各位より多大のご指導をいただいたことを深く感謝する。

参　考　文　献

(1)　横田，奥田：　日立評論 **46**, 761 (昭 39-5)
(2)　竹村，加藤：　電気学会東京支部大会論文集 No. 298 (昭 39)