

周波数変換機並列運転時の負荷配分

Load Distribution of Frequency Changers during Parallel-running

磯野 昭*
Akira Isono

要 旨

同期同期周波数変換機を並列運転する場合、原動機の入力により負荷を調整できないため、機器の定数および制御装置の特性差により負荷分担がきまる。したがって負荷配分が適正に行なわれているかどうかは並列運転時において重要な意味を持つ。

ここでは電子計算機を用いて定量的な検討を行なった結果、同一仕様の周波数変換設備において考えられる範囲での機器本体および AVR の製作誤差による負荷分担の不均衡は、定常時、負荷変動過渡時ともわずかであり、多少その特性に違いがあっても並列運転上問題のないことを明らかにした。

1. 緒 言

同期電動機で同期発電機を駆動する同期同期周波数変換機を並列運転する場合、一般の発電機の並列運転と異なり、電動機の位相も電源によって固定されるため原動機の入力を調整することにより負荷の分担を調整することができない。したがって負荷の配分は発電機および電動機の励磁およびインピーダンス、あるいは発電機または電動機に移相装置を設けた場合の移相角によって決定される⁽¹⁾。

周波数変換機のインピーダンスおよび励磁が異なる場合、それにより並列機の発電機および電動機の内部誘起電圧に位相差が生じ、かつ同一機の発電機と電動機との内部誘起電圧位相にはある一定の関係があるため、負荷配分の計算は比較的複雑になる。

ここでは二組の周波数変換機の定常状態における負荷分担と⁽²⁾、発電機の自動電圧調整器(以下 AVR と略記する)を考慮に入れた負荷変動過渡時の負荷分担⁽³⁾を電子計算機を用いて計算した結果について述べる。

なお本論文の計算法は任意の周波数変換機の並列運転に関するものであるが、問題の性質上、通常全く特性の異なる機器を並列運転することは少ないので数値計算例は同一仕様機におけるわずかな特性の違いを対象とする。

2. 機器の構成

図 1 に 1 号機、2 号機の 2 台の周波数変換機が並列運転をしている場合の構成を示す。図 1 で発電機は定常状態で負荷 L_A に電力を供給しており、負荷変動時には負荷 L_A から負荷 L_A+L_B に変化するものとする。 x_{G1} , x_{G2} , x_{M1} , x_{M2} は発電機および電動機インピーダンスを表わし、発電機および電動機に直列に接続される x_{Ge1} , x_{Ge2} , x_{Me1} , x_{Me2} は変圧器そのほかのリアクタンスを表わす。

図 2 は簡略化した励磁系のブロック線図である。図 2 で x_{cp} は横流補償を表わし、横流補償は 1 号機と 2 号機との差電流により行なわれるものとする。したがって横流補償 $+j(\dot{I}_1-\dot{I}_2)$ は 1 号機に対する補償であり、2 号機に対しては $-j(\dot{I}_1-\dot{I}_2)$ である。

3. 計算仮定および計算条件

- (1) 電動機および発電機の損失は無視する。
- (2) 電動機および発電機のインピーダンスとして直軸リアクタンス x_d , 横軸リアクタンス x_q , 直軸過渡リアクタンス x_d' を考慮する。
- (3) 発電機の負荷は定常状態では有効電力と無効電力の大きさと与えられ、負荷変動時には定インピーダンスと

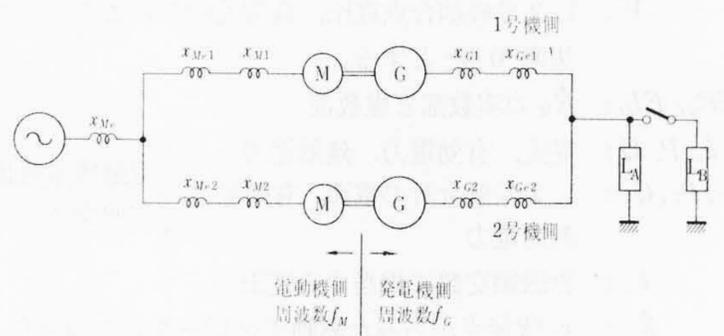


図 1 機器の構成

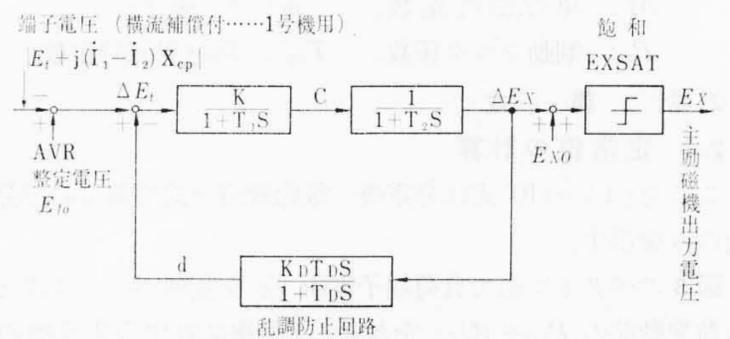


図 2 簡略化と発電機励磁系のブロック線図

- する。
- (4) 発電機の励磁系は図 2 のように簡略化する。
- (5) 負荷変動過渡時における電動機の界磁磁束鎖交数は一定 (e_q' 一定) とする。
- (6) 発電機および電動機の飽和は無視する。

4. 計 算 法

4.1 記号の説明

[•] のあるのはベクトル量, [] のないのはスカラー量または基準ベクトル。

[*] のあるのは共役値。

添字 1, 2: 1 号機, 2 号機の別を示す。添字 1, 2 のないのは 1, 2 号機同一式または 1, 2 号機に共通のものを意味する。

添字 G, M: 発電機側, 電動機側の別を示す。G または M の添字のないのは発電機側だけに必要なもの、または発電機側, 電動機側が同一式のもの。

\dot{E}_I : 界磁電流に相当する電圧(定常状態の公称内部誘起電圧)

θ_G : 1 号発電機の内部誘起電圧に対する 2 号発電機の内部誘起電圧の進み角

δ : 内部誘起電圧の位相角

ER_I, EI_I : \dot{E}_I の実数部と虚数部。 \dot{E}_Q : x_q 背後電圧

* 日立製作所日立研究所

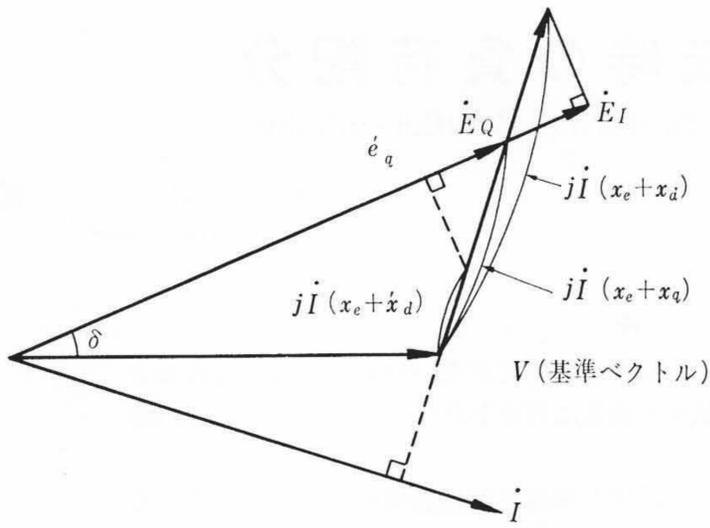


図3 ベクトル図

\dot{V} : 1, 2号機結合点電圧, 負荷変動前のこの点の位相を基準(0度)とする。

ER_Q, EI_Q : \dot{E}_Q の実数部と虚数部

\dot{I}, P, Q : 電流, 有効電力, 無効電力

\dot{I}_T, P_T, Q_T : 1, 2号機合計の電流, 有効電力, 無効電力

\dot{e}'_q : 界磁鎖交数に相当する電圧

\dot{Z}_{ij} : x_q 背後点からみた駆動インピーダンス ($i=j$), または伝達インピーダンス ($i \neq j$)。

θ_{ij} : \dot{Z}_{ij} のインピーダンス角。 δ_v : \dot{V} の位相角。

M : 単位慣性定数。 ω : 角速度。

P_d : 制動トルク係数。 T_{d0}' : 開路界磁時定数。

4.2 計算式

4.2.1 定常値の計算

ここで(1)~(10)式は発電機, 電動機同一式であるので発電機側のみを示す。

図3のベクトル図で負荷端子電圧 V_G を基準ベクトルにとり, 負荷変動前の $P_{TG} + jQ_{TG}$ を与え, 1号機に対する2号機の進み角 θ_G を仮定して(後述のように θ_G は負荷条件を満足するよう修正される), 下記の計算を行なう。

$$\dot{E}_{I2} = K_1 \dot{E}_{I1} (\cos \theta_G + j \sin \theta_G) \quad (1)$$

ただし K_1 は $|\dot{E}_{I2}|$ と $|\dot{E}_{I1}|$ の比を決める定数

$$\delta_2 = \tan^{-1} \left(\frac{EI_{I2}}{ER_{I2}} \right) \quad (1')$$

$$|\dot{E}_{Q2}| = V \cos \delta_2 \left(1 - \frac{x_{e2} + x_{q2}}{x_{e2} + x_{d2}} \right) + \frac{x_{e2} + x_{q2}}{x_{e2} + x_{d2}} |\dot{E}_{I2}| \quad (2')$$

$$\dot{E}_{Q2} = |\dot{E}_{Q2}| \cos \delta_2 + j \sin \delta_2 \quad (2)$$

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_{Q2} - V}{j(x_{q2} + x_{e2})} \quad (3)$$

$$\dot{I} = \dot{I}_T - \dot{I}_2 \quad (4)$$

$$\dot{E}_{Q1} = \dot{V} + j(x_{e1} + x_{q1}) \cdot \dot{I}_1 \quad (5)$$

$$\delta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{EI_{Q1}}{ER_{Q1}} \right) \quad (5')$$

$$|\dot{E}_{I1}| = V \cos \delta_1 \left(1 - \frac{x_{e1} + x_{d1}}{x_{e1} + x_{q1}} \right) + \frac{x_{e1} + x_{d1}}{x_{e1} + x_{q1}} |\dot{E}_{Q1}| \quad (6')$$

$$\dot{E}_{I1} = |\dot{E}_{I1}| (\cos \delta_1 + j \sin \delta_1) \quad (6)$$

(1)~(6)式は, \dot{E}_{I1} にある初期値を仮定し, Gauss-Seidel法で解く。式の形から明らかなように, 初期値は \dot{E}_{I1} だけ与えればよい。

なお, (2'), (6')式は図3から,

$$\frac{|\dot{E}_{I1}| - V \cos \delta}{|\dot{E}_{Q1}| - V \cos \delta} = \frac{x_e + x_d}{x_e + x_q} \quad (7)$$

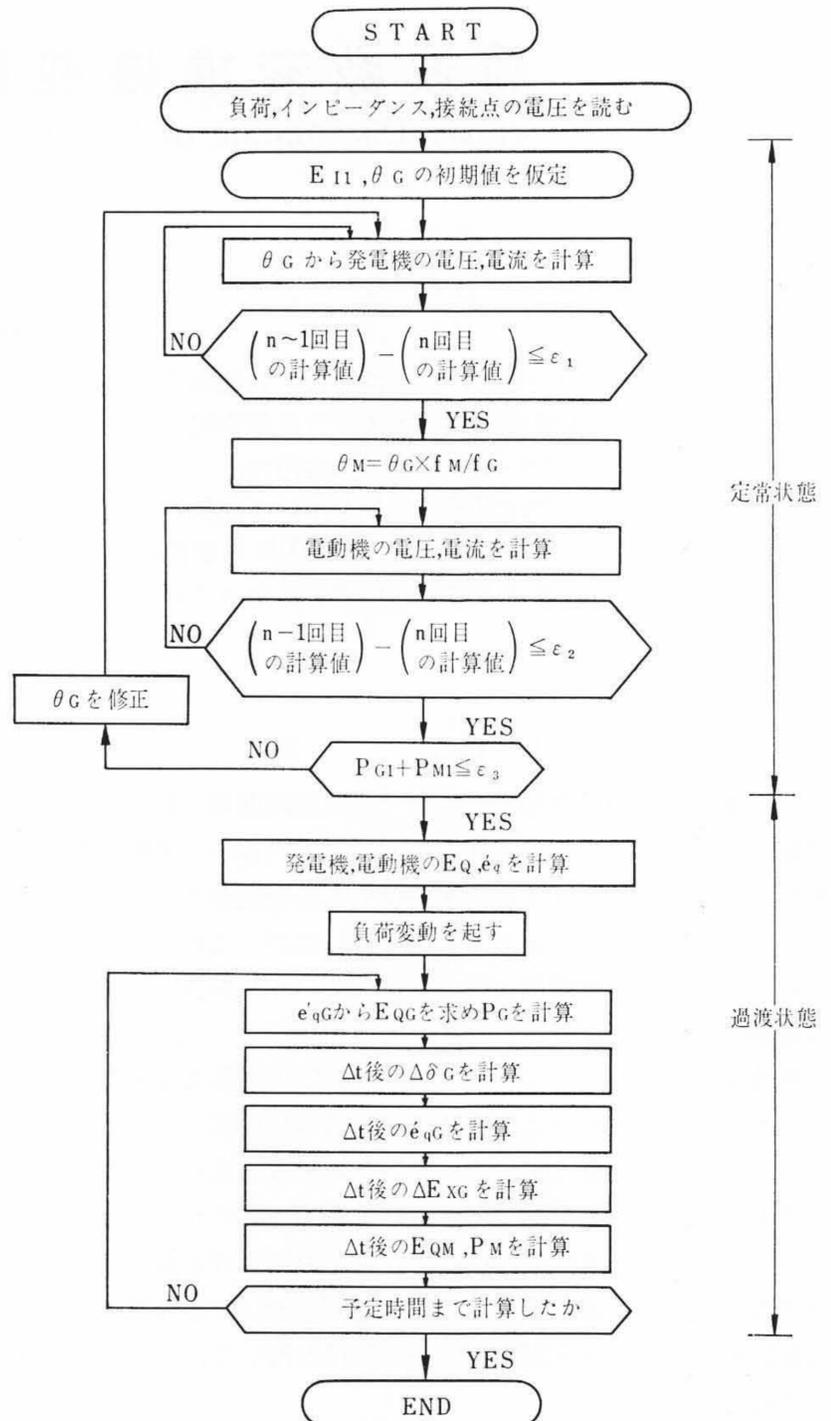


図4 フロー・チャート

$$|\dot{E}_Q| = V \cos \delta \left(1 - \frac{x_e + x_q}{x_e + x_d} \right) + \left(\frac{x_e + x_q}{x_e + x_d} \right) |\dot{E}_I| \quad (8)$$

$$|\dot{E}_I| = V \cos \delta \left(1 - \frac{x_e + x_d}{x_e + x_q} \right) + \left(\frac{x_e + x_d}{x_e + x_q} \right) |\dot{E}_Q| \quad (9)$$

となり, また \dot{I}_{TG} は(10)式から求められる。

$$\dot{I}_{TG} = \frac{P_{TG} - jQ_{TG}}{V_G} \quad (10)$$

(1)~(6)式の解から1号発電機, 2号発電機の出力は,

$$P_{G1} + jQ_{G1} = V_G \cdot \dot{I}_{G1}^* \quad (11)$$

$$P_{G2} + jQ_{G2} = V_G \cdot \dot{I}_{G2}^* \quad (12)$$

電動機側の1, 2号機の位相差は機械角と電気角の関係から発電機の f_M/f_G 倍になることから, $\theta_M = \theta_G \times f_M/f_G$ とおいて, (1)~(10)式と同様にしてSM側も計算し,

$$P_{M1} + jQ_{M1} = V_M \cdot \dot{I}_{M1}^* \quad (13)$$

$$P_{M2} + jQ_{M2} = V_M \cdot \dot{I}_{M2}^* \quad (14)$$

を求める。

次に(15), (16)式により, 最初に仮定した θ_G の修正を行なう。

$$\Delta \theta_G = K_2 \cdot (P_{G1} + P_{M1}) \cdot (x_{q1} + x_{q2} + x_{e1} + x_{e2}) \quad (15)$$

ただし K_2 は最適な $\Delta \theta_G$ を得るよう定める定数。

$$\theta_G(\text{new}) = \theta_G(\text{old}) + \Delta \theta_G \quad (16)$$

(16)式で得た $\theta_G(\text{new})$ を用いて $P_{G1} + P_{M1} \neq 0$ となるまで(1)~(4)式の計算を繰り返す。

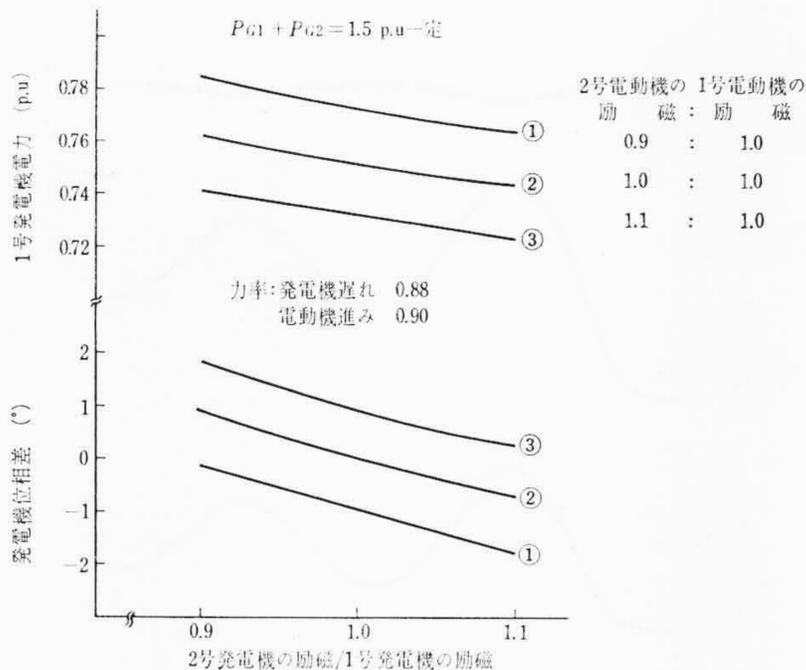


図5 励磁を変えたときの定常時負荷配分

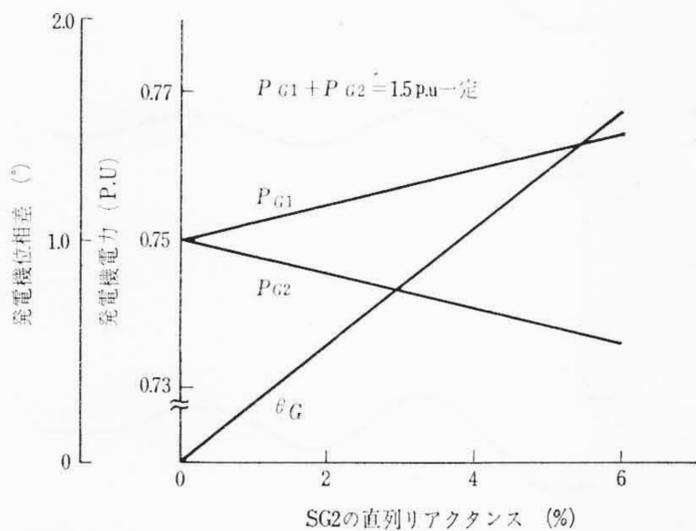


図6 2号機にリアクタンスを接続したときの定常時負荷配分

4.2.2 負荷変動過渡時の計算

(1) 負荷変動前の \dot{e}_q' の計算

図3から

$$\frac{|\dot{E}_I| - V \cos \delta}{|\dot{e}_q'| - V \cos \delta} = \frac{x_e + x_d}{x_e + x_d'} \quad (17)$$

$$\therefore \dot{e}_q' = \left\{ V \cos \delta \left(1 - \frac{x_e + x_d'}{x_e + x_d} \right) + \frac{x_e + x_d'}{x_e + x_d} |\dot{E}_I| \right\} \times (\cos \delta + j \sin \delta) \quad (18)$$

(2) \dot{E}_Q の計算⁽⁴⁾

別に x_q 背後点からみた駆動点インピーダンスおよび伝達インピーダンスを求めておき、

$$[|\dot{E}_Q|] = [a_{ij}]^{-1} [|\dot{e}_q'|] \quad (19)$$

$$a_{ii} = 1 - \frac{x_{qi} - x_{di}'}{|\dot{Z}_{ii}|} \sin \theta_{ii} \quad (20)$$

$$a_{ij} = \frac{x_{qi} - x_{di}'}{|\dot{Z}_{ij}|} \sin (\delta_i - \delta_j + \theta_{ij}) \quad (21)$$

ただし $[\dot{E}_Q]$, $[\dot{e}_q']$ は発電機側であれば2行, 電動機側であれば3行の列ベクトル, $[a_{ij}]$ は2行2列または3行3列の係数行列。

$$\dot{E}_Q = |\dot{E}_Q| (\cos \delta + j \sin \delta) \quad (22)$$

(3) \dot{I} , \dot{E}_I , P , Q , \dot{V} , \dot{E}_I の計算

$$\dot{I}_{G1} = \frac{\dot{E}_{Q1}}{Z_{11}} - \frac{\dot{E}_{Q2}}{Z_{12}} \quad (23)$$

$$\dot{I}_{M1} = \frac{\dot{E}_{Q1}}{Z_{11}} - \frac{\dot{E}_{Q2}}{Z_{12}} - \frac{\dot{E}_{Q3}}{Z_{13}} \quad (24)$$

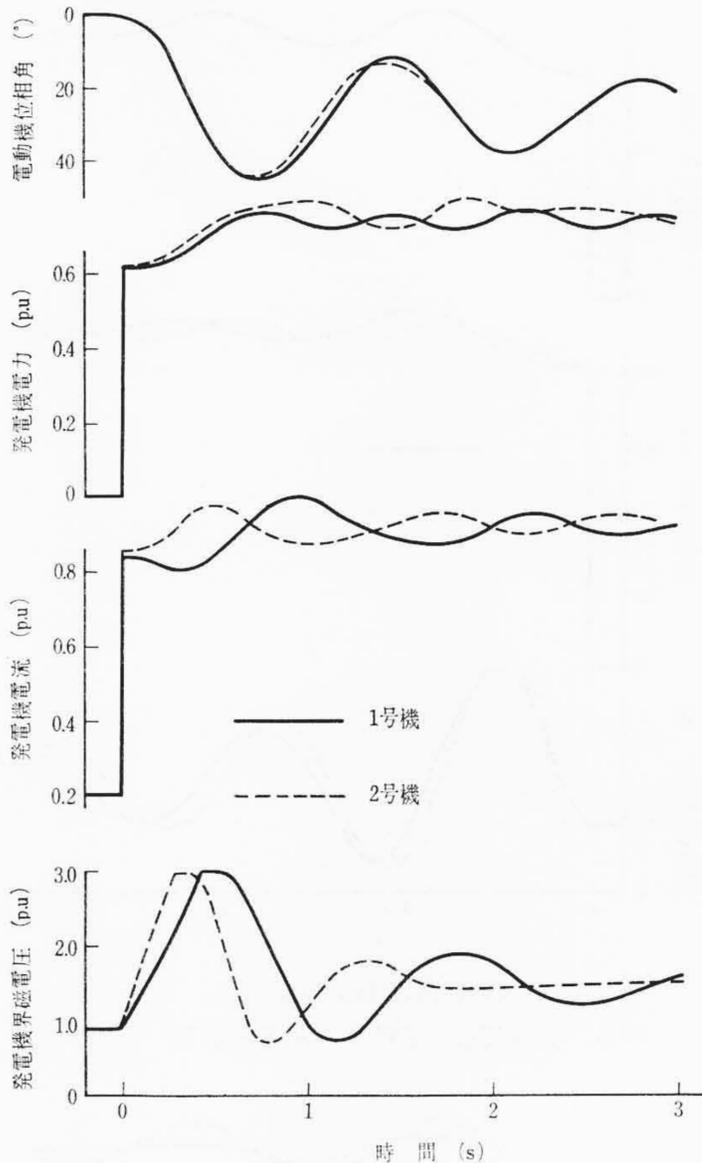


表1の定数比

図7 負荷変動過渡時の各種変動曲線 (1)

表1 図7に用いた1号機と2号機の定数比

定数名	総合利得 K	AVR時定数 T_2	インピーダンス x_d, x_q	インピーダンス x_d', x_q'	界磁時定数 T_d'
2号機/1号機	1.2	0.5	0.97	0.95	0.9

2号機の電流も(23), (24)式と同様に求める。

$$\dot{E}_I = \dot{E}_Q - j x_q \dot{I} \quad (25)$$

$$P + jQ = \dot{E}_I \dot{I}^* \quad (26)$$

$$\dot{V} = \dot{E}_Q - j(x_e + x_q) \dot{I} \quad (27)$$

図3のベクトル図から $\dot{V} = V \angle \delta_v$ とおいて

$$\dot{E}_I = \left\{ |\dot{V}| \cos (\delta - \delta_v) \left(1 - \frac{x_e + x_e}{x_e + x_q} \right) + \frac{x_e + x_d}{x_e + x_q} \cdot |\dot{E}_Q| \right\} \times (\cos \delta + j \sin \delta) \quad (28)$$

(4) Δt 後の δ , e_q' , E_x の変化分の計算

$$\frac{M}{\omega} \frac{d^2 \delta}{dt^2} + P_d \frac{d\delta}{dt} + P_G = -P_M \quad (29)$$

注: P_M は系統から電動機に電力が流入する方向を負に取っている。

(29)式を解いて Δt 後の位相 $\Delta \delta$ を求める。

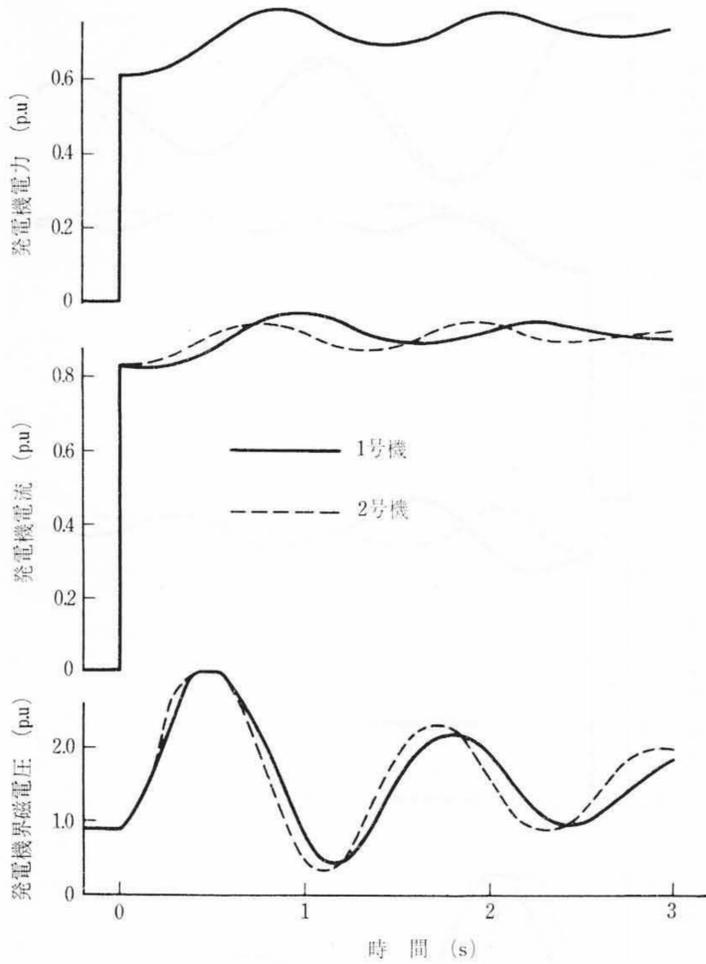
$$E_x = T_{d0}' \frac{de_q'}{dt} + E_I \quad (30)$$

$$\therefore \frac{de_q'}{dt} = \frac{1}{T_{d0}'} (E_x - E_I) \quad (31)$$

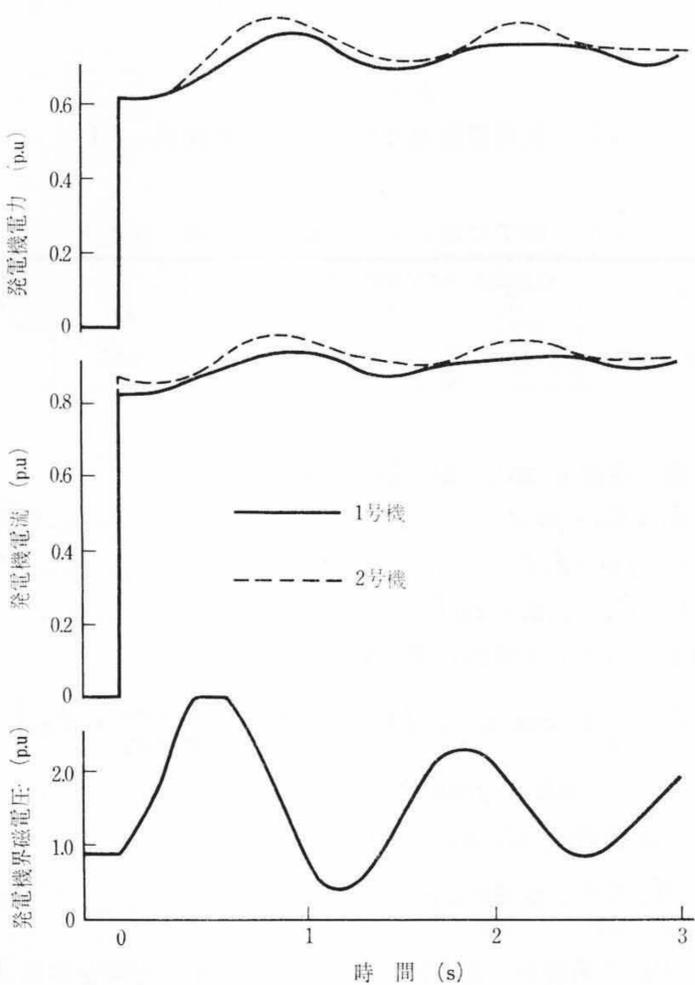
(31)式から e_q' の変化分 $\Delta e_q'$ を求める。

図2から

$$\frac{dc}{dt} = \frac{1}{T_1} \{ \dot{K} (\Delta E_I - d) - c \} \quad (32)$$



AVR の総合利得のみ表1の比
 図8 負荷変動過渡時の各種変動曲線 (2)



インピーダンス x_d, x_q, x_d' のみ表1の比
 図9 負荷変動過渡時の各種変動曲線 (3)

$$\frac{d(\Delta E_x)}{dt} = \frac{1}{T_2} \{c - \Delta E_x\} \dots \dots \dots (33)$$

$$\frac{d(d)}{dt} = \frac{1}{T_D} \left\{ K_D T_D \frac{d(\Delta E_x)}{dt} - d \right\} \dots \dots \dots (34)$$

c, d は図2参照。

(32)~(34)式を解いて E_x の変化分 ΔE_x を求める。

なお, (29), (31), (32)~(34)式は Runge-Kutta 法で解く。

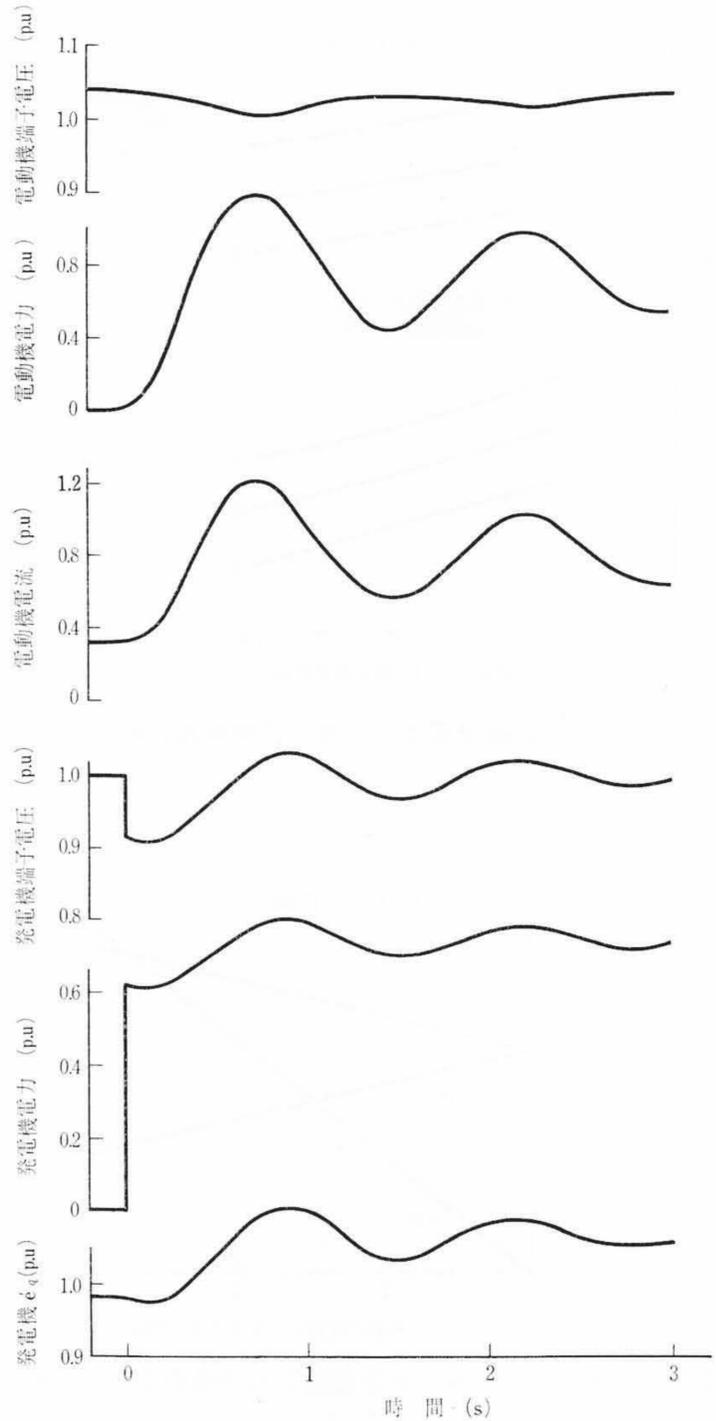


図10 1, 2号機同一特性時の各種変動曲線

4.3 計算手順

図4は負荷変動前の定常時の負荷配分から負荷変動過渡時の負荷配分までを計算する手順を示したものである。

5. 計算例

定常状態における負荷分担の例として全く同一特性の周波数変換機の励磁の比を変えたときの負荷配分および発電機の内部誘起電圧の位相差(2号機側進みを正)を図5に, 2号機発電機に直列リアクトルを接続したときのそれを図6に示す。図6で直列リアクトルの値は発電機容量ベースに対する%値である。電動機入力と発電機出力はつりあう必要があるため, 定性的には電動機の励磁の比を変えれば励磁の大きい側の内部誘起電圧の位相が進み, 電動機入力を押さえて発電機出力を増す方向に作用する。逆に発電機の励磁の比を変えれば励磁の大きい側の内部誘起電圧の位相が遅れる。1, 2号機の不平衡として(35)式のように定義すれば,

$$1, 2号機の不平衡率 = \frac{1号機の値 - 2号機の値}{1号機の値 + 2号機の値} \times 100 \dots (35)$$

図5の計算例では発電機, 電動機ともに2号機の励磁を1号機より10%増したとき, 励磁の不平衡-4.8%に対し, 負荷の不平衡は-3.9%である。

また図6の直列リアクタンス2%の点で(35)式と同様の計算を行えば1, 2号機の不平衡率は0.57%になる。励磁の不平衡と同じ理由から, 図6のように発電機側に直列リアクタンスを入れれば,

リアクタンスがはいった側の内部誘起電圧位相が進み、電動機側に直列リアクタンスを入れればリアクタンスのはいった側の内部誘起電圧位相が遅れる。なお、インピーダンスが異なる機器の負荷分担はそのインピーダンスの逆比によって決定されることはいうまでもない。たとえば、容量が異なり、かつ自己容量に対する発電機および電動機のインピーダンスのp.u値が等しい周波数変換機を同じp.u値の界磁電圧で並列運転すれば両者の内部誘起電圧の位相は等しく、負荷はその容量比によって配分される。

負荷変動過渡時における負荷分担、発電機電流、界磁電圧、電動機位相角の変動の例を図7に、図7で用いた1, 2号機の定数の比を表1に示す。また図8にAVRの総合利得だけを表1のように変えたときの負荷分担その他を、図9に発電機および電動機のインピーダンスだけを表1のように変えたときの負荷分担その他を示す。ここで負荷の変動は進み力率0.0, 25%の定常負荷に遅れ力率0.75, 200% (いずれも1機当たりの容量に対する比)の負荷が印加されるものとする。負荷変動前の内部誘起電圧は発電機、電動機ともに1, 2号機等しく、界磁電圧の飽和値は3.0 p.uであるとする。電動機側は50 Hz系、発電機側は60 Hz系である。

比較のため図10に1, 2号機全く同一特性の周波数変換機の負荷変動過渡時の諸量を示す。負荷、負荷変動前の内部誘起電圧、界磁の飽和は図7~9と同一条件である。

不平衡率として各瞬時における値を用いて(35)式のように定義すれば、図7で過渡時における電流の不平衡は最大-9%, 電力の不平衡は最大-6%である。図8, 9と同様表1に示す定数の一つまたは幾つかの比を表1のように変えた場合の電流および電力の不平衡はいずれも図7より小さくなる。

計算結果によれば、各定数の1, 2号機の過渡時の不平衡率に与える影響は次のようになる。

- (1) AVRの総合利得Kは電流に与える影響が大きく、電力にはほとんど影響しない。

- (2) AVRの時定数 T_2 および発電機、電動機のインピーダンスは電流、電力とも影響するが、前者は電流に、後者は電力との関係が大きい。
- (3) 開路時定数 T_{d0}' は電流、電力の不平衡にほとんど影響しない。
- (4) AVRの総合利得Kおよび時定数 T_2 が異なることは過渡動揺中の発電機界磁電圧 E_x の不平衡に大きく影響するが、インピーダンスおよび T_{d0}' が異なることは界磁電圧 E_x の不平衡にほとんど影響しない。
- (5) 表1程度の定数の違いでは負荷変動による過渡動揺中においても1, 2号機の内部誘起電圧の位相差はほとんど生じない。

6. 結 言

発電機および電動機の諸定数ならびに発電機AVRの特性の異なる同期同期周波数変換機を並列運転した場合の負荷分担について電子計算機を用いて計算した。

同一仕様の周波数変換機を並列運転する場合、製作誤差に基づく特性の違い程度によっては定常時、負荷変動過渡時ともに問題となるような負荷そのほかの諸量の不平衡が生じないことを定量的に明らかにした。

終わりに臨み、種々のご助言をいただいた日本国有鉄道関係当局のかたがたに対し衷心より謝意を表す。

また本計算に当たり協力いただいた日立製作所日立研究所野原氏、八谷氏に対し厚く御礼申しあげる。

参 考 文 献

- (1) 三亀：立命館大学理工学研究所紀要第14号, 67 (昭40)
- (2) 磯野：昭和41年電気学会東京支部大会 No.132 (昭41-11)
- (3) 磯野：昭和42年電気学会東京支部大会 No.113 (昭42-10)
- (4) S. B. Cray：Power System Stability Vol. II, 129 (1947)



特 許 の 紹 介



特許第498855号 (特公昭42-1126号)

中山敬造

方 向 比 較 に も と づ く 保 護 継 電 方 式

この発明は並行多回線送電線において、2回線以上に同時に事故が発生した際の保護線電方式に関するものであり、優先遮断再開路方式を合理的に実施できるようにくふうされた保護継電方式を提供するものである。

よく知られているように、高抵抗接地系統の送電線においては1線地絡事故では事故電流が中性点接地抵抗器で制限されるため系統安定度や機器損傷に及ぼす影響が少ないため、さほど高速遮断を必要としない。そのため、たとえば、並行2回線の両回線に同時に事故が発生したときは、下記のような優先条件にしたがって、1回線だけを先行遮断、再開路し、次いで残りの回線を遮断、再開路することにより2回線が全遮断し系統の連絡を断つことを防止するようにされる。優先条件としては、たとえば

- (1) 2回線中1回線だけの事故のときは故障回線を優先する。
- (2) 1回線が進み相の1線地絡、他回線が遅れ相の1線地絡のときは進み相故障回線を優先する。
- (3) 1回線が2線以上の事故、他回線が1線地絡事故のときは2線以上の事故の回線を優先する。

従来、この優先条件の判別に選択短絡リレー(電力平衡リレー)が使用されたため、両回線とも2線以上の事故に対しては優先条件の判別ができず、重大事故であるにもかかわらず、短絡後備保護リレーによって限時遮断されるまで放置されていた。

この発明は、従来使用されている方向比較方式の保護継電方式に故障相選別リレーを追加して上記の優先条件を満たし、両回線に2線以上の事故が発生したときは両回線とも高速度で遮断するものである。図1は故障相選別リレーによる優先判別回路であり、図2は優先判別結果の搬送保護継電方式への組合せを説明する図である。

図1から明らかなように、リレーXは自回線のa, b, c相のいずれか2相に事故が検出されれば動作する。また、自回線1相だけの事故でも相手回線の2相以上または進み相に事故がなければ動作する。したがって、図2を参照して明らかなように、系統に短絡事故が発生し、接点SIが閉成しているとき、図1のリレーXが動作している側の回線が優先遮断される。両回線に2線以上の事故が発生し、両回線ともリレーXが動作していれば、両回線とも高速遮断されるのは明らかであろう。

かくして、本発明によれば、合理的な優先遮断ができ、機器の安全、系統の安定度向上に寄与するところ大である。(福島)

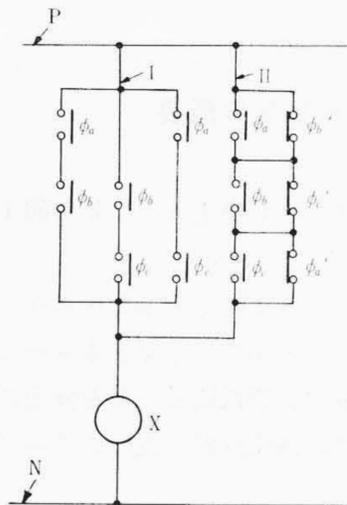


図 1

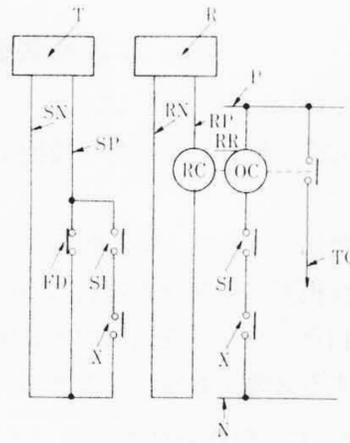


図 2