電力系統における 2 軸同期発電機の 自己同期法

正 員 中 村 光 一 (名工大)

正 員 別 井 孝 司 (名工大)

正 員 武 藤 三 郎 (名工大)

1. 緒 言

2 軸同期発電機（以下 2 軸機という）は従来の 1 軸形同期発電機（以下 1 軸機という）とは異なり、回転子に磁軸の異なる二つの界磁巻線をもち、それぞれを独立に励磁制御することによって、機械軸の位置に関係なく合成励磁ベクトルの大きさと角度を変えることのできる同期機である。このベクトルに関係して内部誘起電圧の大きさと角度も変えることができるから、発電機が系統につながっておれば電氣的出力を広範囲に制御することができる。

2 軸機は主として界磁構造の制約からくる技術上および経済上の問題があるために、これまで電力系統には採用されていない。近年電力系統の安定度向上対策の面から 2 軸機が注目され、種々の励磁機構を備えた系の動態安定度および過渡安定度などの研究が活発に行なわれている^{(1)~(4)}。

筆者らはこれまでに 1 軸機において、非同期投入・自己同期法について研究をしてきた⁽⁵⁾⁽⁶⁾。2 軸機に同法を適用すれば、発電機の系統投入操作から同期化するまでの時間短縮と、シーケンスの簡略を図る点で有利であるだけでなく、更に 2 軸機のもつ特徴をより広く生かすことができる。

この非同期投入・自己同期法は発電機の界磁電圧が確立し、しかも非同期状態で系統投入する方式である

から、特別な場合をのぞき突入電流、電氣的出力トルクなどは非常に大きくなる恐れがある。この理由から 1 軸機では系統投入可能な位相角差やすべり幅などに制限領域が定められている⁽⁵⁾。2 軸機の場合も基本的には同じであるが、系統投入可能な条件が満たされるまでの期間について考えてみると、2 軸機の方が短いといえよう。なぜならば、特に問題となる位相合せ機能は 1 軸機の場合機械的入力の微調整を必要とするのに対し、2 軸機ではたとえ非同期状態であっても、界磁の電氣的な制御により可能であるという顕著な違いからも判るとおり、応答性の点で優れているからである。ゆえに 2 軸機では位相合せは容易で、かつそのための時間をあまり必要としない。また内部過渡誘起電圧ベクトルの角度成分を適当に制御することによって、投入後の回転子動揺を早く収束させることができる点も特徴の一つである。

本論文では、非同期投入・自己同期法を一機無限大母線系統からなる 2 軸機系に適用し、投入後の電氣・磁氣および電氣・機械的過渡現象について解析している。そして系統投入時の突入電流、電氣的出力トルクなどが最少となる励磁印加法について述べている。更に筆者らが先に提案した評価関数⁽⁶⁾を再び適用し、並列後十数秒間持続する回転子動揺の定量的な評価から以下述べる種々の解析を行なっている。

2. 2 軸機とモデル系統

〈2・1〉 2 軸機の概要 2 軸機は一般に第 1 図(A)に示すように、 f_1, f_2 の二つの界磁巻線を有し、それらは共に機械軸 (d 軸) より任意の角度偏位している。一方 2 軸機⁽⁷⁾は界磁巻線間の相互作用が無視でき

Self-Synchronization of a Dual-Excited Synchronous Generator in Power Systems. By Kouichi Nakamura, Member, Takashi Betsui, Member, & Saburo Muto, Member (Nagoya Institute of Technology).

中村光一：正員，名古屋工業大学電気工学科

別井孝司：正員，名古屋工業大学電気工学科（現在，関西電力）

武藤三郎：正員，名古屋工業大学電気工学科

第1図 2軸同期発電機モデル
Fig. 1. Schematic layout of dual-excited synchronous machine.

るものとすれば、適当な変換ベクトルを作用することにより、二つの界磁巻線の作る合成起磁力の大きさと方向とを等しく保ち、磁軸が互いに直交する2軸機(以下 *d-q machine* という)⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾へ等価的に変換することができる⁽⁸⁾⁽⁹⁾。これを同図(B)に示す。またこの逆変換も可能であるから、一般2軸機のかわりに表現式の簡単な *d-q machine* について検討することにする。

〈2・2〉 回転子角、負荷角、励磁角 第2図の一機無限大母線系統につながれた2軸機の定常運転状態におけるベクトル図を示したのが第3図である。系統投入前のベクトルは電流 I が零の場合に相当する。ここで従来の発電機と区別するために以下(i)~(iii)を定義する。

(i) 回転子角 δ は、発電機 q 軸と系統の基準電圧 V_b との相差点である。

(ii) 負荷角 δ_e は合成励磁によって生ずる発電機内部誘起電圧 E_o と V_b との相差点で、この値が突入時の現象を左右する。また δ_e は励磁制御により任意に変えることができる。

(iii) 励磁角 α は二つの界磁束鎖交数のなす角で、定常時には E_o と q 軸のなす角に等しい。従って

$$\alpha = \tan^{-1}(W_{fq}/W_{fd}) = \tan^{-1}(E_{fq}/E_{fd}) \quad (1)$$

第2図 2軸機と一機無限大母線系統
Fig. 2. One dual-excited machine infinite-bus power system.

第3図 ベクトル図(定常時)
Fig. 3. Vector diagram (at steady state).

上記(i)~(iii)から $\delta_e = \delta + \alpha$ が成立することは明らかである。1軸機では極構造によって定まる d 軸励磁成分のみであるから、 $\alpha = 0$ であり、従って δ と δ_e とは一致している。

3. 系統投入直後の過渡現象

ここで述べる自己同期現象は、系統投入直後数十ミリ秒程度で終了する比較的短時間の電気・磁氣的過渡現象である。

〈3・1〉 初期励磁電圧 投入前、二つの界磁に電圧が印加され、その合成励磁電圧の単位で表わした大きさを E_f とすれば、 d 軸および q 軸成分の励磁電圧はそれぞれ次式で示される。

$$\left. \begin{aligned} E_{fd} &= E_f \cos \alpha \\ E_{fq} &= E_f \sin \alpha \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

従って発電機の過渡現象は E_f および α の二つのパラメータに依存することがわかる。

〈3・2〉 *d-q machine* の諸定数 2軸機は現在のところ、実験用小形機程度の試作段階にあり、まだ大容量機は製作されていないが、本解析に用いる諸定数は Hogg 氏らの文献に基づくもので⁽¹⁰⁾、200 MVA、16.5 kV 定格のタービン発電機を2軸機に適用したものである。それらを付録Ⅱ第1表に示す。

〈3・3〉 計算結果

(1) 投入直後の過渡現象の概要 電気・磁氣的現象に代表される突入電流や電氣的出力トルクなどの自己同期特性は、1軸機の場合初期相差点 δ_0 に大き

第4図 突入電流(A)と電氣的出力トルク(B)の時間変化

Fig. 4. Swing curves of rushing current (A), and electric output torque (B).

く依存するのに対し、2軸機の場合は負荷角 δ_e によって定まり、 δ_0 にはほとんど無関係である。

第4図は付録Ⅲに基づき初期すべり $s_0=1\%$ 、 $E_f=1$ p. u. で系統投入した場合の種々の負荷角 δ_e に対して求めた直流分も含む突入電流(A)図および電氣的出力トルク(B)図である。 δ_e が大きければそれらの振動は大きくなり、逆に $\delta_e=0$ のとき最小となる。この傾向は1軸機*とまったく同様である⁽⁵⁾。

(2) 突入電流と励磁角、負荷角の関係 初期すべり s_0 が1~2% 以下であれば、突入電流の第1波高値が最大値を示し、時間 t の経過に伴って振動的に減衰する。その他の諸量もほぼ同様の傾向にある。従って電氣的出力トルクや有効、無効電力などの諸量を代表して突入電流について検討すれば十分であり、逆に突入電流の現象から他の諸量の傾向についても推定できる。

第5図(A)は種々の初期相差角 δ_0 で投入するとき、そのときの励磁角 α と突入電流の最大値 I_{max} の関係を示す。ある δ_0 に対して I_{max} を最小とする励磁角が存在することを示している。それは $\alpha+\delta_0=0$ 、すなわち $\alpha=-\delta_0$ のときである。このとき第4図(A)の曲線 d に示すように電気・機械的な回転子動揺の最大点が最大値となり、その値は 0.771 p. u. と定格以下であ

第5図 突入電流最大値と励磁角 α (A) および負荷角 δ_e (B) との関係

Fig. 5. Peak rushing current vs. excitation-angle α (A), and vs. load-angle δ_e (B).

第6図 突入電流最大値と合成励磁電圧の関係
Fig. 6. Peak rushing current vs. resultant field voltage.

る。この関係を負荷角 δ_e を用いて示せば、 I_{max} は同図(B)のように1本の曲線に重なる。この図から明らかのように、 δ_0 がいかなる値であっても、 δ_e が零となるように励磁角 α を制御すれば突入電流は最小となる。また同図より直流分を含めた突入値が1 p. u. 以下となる負荷角の値は $\delta_e=10^\circ$ 以下である。

(3) 合成励磁電圧の大きさの影響 合成励磁電圧 E_f の大きさによる突入電流の関係は第6図に示すように δ_e の値によって種々異なるが、最小の I_{max}

*: 1軸機の場合 δ_e を δ_0 におきかえればよい。

は $\delta_e=0$, $E_f=1.0$ p. u. のとき得られる。

(4) 突入電流を最小にする初期励磁法 以上の検討から $I_{\max}$ が最小となるためには、初期回転子角 δ_0 に対して、 $\alpha=-\delta_0$, $E_f=1.0$ p. u. になるように界磁を制御すればよい。すなわち二つの界磁巻線 f_d , f_q にそれぞれ次式の電圧を印加する場合である。

$$\left. \begin{aligned} E_{fd} &= \cos(-\delta_0) \text{ (p. u.)} \\ E_{fq} &= \sin(-\delta_0) \text{ (p. u.)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

この制御法の実現はそれほど困難ではない。

4. 自己同期時の回転子動揺の解析

前章で述べた初期励磁法に基づき非同期投入を行なうものとし、その後の自己同期化過程で突入電流などを定格値以下に低減した上で、回転子動揺を積極的に抑制する方法について考える。

(4・1) 動揺方程式 第2図の一機無限大母線系統における電気・機械的な動揺方程式は原動機入力を零とみなせば、次式で表わされる。

$$a\ddot{\delta} + b\dot{\delta} + P_e \sin(\delta + \alpha) = 0 \dots\dots\dots (4)$$

$$\begin{aligned} \text{但し, } a &= 2H/\omega_0, \quad b = D/\omega_0, \quad P_e = E'_d V_b / (x_d' \\ &+ x_e), \quad r_e = 0, \quad E'_d = \{E'^2_d + E'^2_q\}^{1/2}, \quad \alpha = \tan^{-1} \\ &(E'_q/E'_d) \end{aligned}$$

同期後の最終状態（収束点）は、

$$\left. \begin{aligned} \delta_\infty &= -\alpha \\ \dot{\delta}_\infty &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

となり、励磁角 α に依存する。

(4・2) 回転子動揺の数値解析

(1) 一定励磁の場合 (4)式において二つの界磁巻線電圧 E_{fd} および E_{fq} は並列後一定に保たれるものとし、また合成背後電圧 E'_d を 1 p. u. として数値解析を行なう。

この場合、投入は同一 δ_0 で行なっても励磁角 α によって最終値は異なる。例えば第7図(A)に示すように $\delta_0=30^\circ$ の場合、 $\alpha=-30^\circ$ ならば投入時点では $\delta_e = \delta_0 + \alpha = 0$ が成立するから、突入電流は最小かつ回転子動揺も最も小さい（曲線b）。しかし収束点は $\delta_\infty = 30^\circ$ となる。また $\alpha=-40^\circ$ ならば $\delta_e = -10^\circ$ で投入することになり、 $\delta_\infty = 40^\circ$ に収束する（曲線a）。 $\alpha=0^\circ$ ならば $\delta_e = 30^\circ$ で投入、 $\delta_\infty = 0^\circ$ に収束することになる（曲線c）。

(2) 励磁角を制御する場合 上記(1)から $\delta_e = 0^\circ$ で投入するならばすべての諸量は最小動揺で自己同期することがわかる。しかしながら $\delta_0=0$ の場合をのぞけば、同期後は二つの界磁が共に励磁された状態にあり、かつ $\delta_\infty = -\alpha$ となる。これは界磁の抵抗損が

(A) δ の時間変化, (B) 位相面軌跡
 $H=3s$, $D=10$, $P_e=2.89$

第7図 励磁角 α に対する回転子動揺

Fig. 7. Swing motions of the rotor for various load-angle α .

大きいことや2軸制御の効力が弱められるなどの点から好ましくなく、従って同期後は1軸（例えば d 軸）のみが励磁される。つまり合成励磁ベクトル、 d 軸および系統電圧ベクトルの三者が一致する方向に制御することが望ましい。この一方法として α を

$$\alpha = -\delta_0 e^{-t/\tau} \dots\dots\dots (6)$$

の形で指数関数的に減少させる方法が考えられる。これは $t=0$ で $\alpha=-\delta_0$, $t=\infty$ で $\alpha=0$ となるから上述の要求を満たしている。

この制御による回転子動揺は $e^{-t/\tau}$ で減衰する直流成分と発電機自体の制動特性（減衰時定数 $b/a=0.6s$ である）によって振動的に減衰する成分が重畳していることから、 τ が大きいほど $\delta_\infty=0$ に収束するのが遅いのは第8図より明らかであるが、逆に τ が小さければそれに比例して収束が早くなることにはならない。何となれば第7図(A)の曲線cは $\tau=0$ でとみなし得る特性からもわかるとおり、 τ が小さいほどこの大きな動揺に近づくからである。

動揺収束の望ましい様態は、第8図(A)の曲線cのように δ の振幅が小さくて、しかも動揺収束の時間が相対的に短いということである。 δ の振幅は同図より $|\delta - \delta_0 e^{-t/\tau}|$ にほぼ等しいから、これが小さければ同期出力 $P_e \sin(\delta - \delta_0 e^{-t/\tau})$ も小さくなるから、それゆ

第 8 図 励磁角減衰定数 τ に対する回転子動揺

Fig. 8. Swing motions of the rotor for various time constant τ .

え回転子動揺の電力系統などに与える影響は小さいといえよう。同図で τ の最適値は約 0.2 s であり、また動揺の収束までに 5 s もみれば十分であろう。

しかしながら、投入時の位相角 δ_0 が $\pm 180^\circ$ の全域に渡る場合を考えると、 $\tau = 0.2$ s は必ずしも最適値とはいえない。最適な τ について以下検討する。

〈4.3〉 評価関数による動揺の評価と τ の決定

(1) 評価関数 投入後同期に至るまでの回転子動揺を定量的に評価する方法として、角速度 $\dot{\delta}$ の二乗を時間積分した関数を用いる方法がある⁽⁶⁾。これを評価関数と呼び、次式で定義する。

$$IP = \int_0^\infty \dot{\delta}^2 dt \quad (7)$$

IP は単に動揺を定量化したものにはすぎないが、 IP に制動係数 b を乗じた値はいわゆるリアプノフ関数に相当するもので、発電機が自己同期するまでに系統の中で消費される非保存的エネルギーを意味する。この値が大きければ当然系統の動揺が大きくなる。

(2) 励磁角一定制御時の IP (4) 式の両辺を b で割ったのち、両辺に $\dot{\delta}$ を乗じ、 $t=0$ から $t=\infty$ まで各項を積分すれば、左辺第 2 項が評価関数 IP に

第 9 図 $s_0 = 1\%$ のとき励磁角 α は一定下における評価関数 IP と初期回転角 δ_0 の関係
Fig. 9. Values of performance index IP vs. initial rotor angle δ_0 when $\alpha = \text{const.}$

相当する。整理すれば次式のごとくなる。

$$IP = -\frac{a}{2b}(\dot{\delta}_\infty^2 - \dot{\delta}_0^2) + \frac{Pe}{b}\{\cos(\delta_\infty + \alpha) - \cos(\delta_0 + \alpha)\} \quad (8)$$

α が一定であるから、 IP の値は初期値 $(\delta_0, \dot{\delta}_0)$ と最終値 $(\delta_\infty, \dot{\delta}_\infty (=0))$ を代入することにより求まる。

第 9 図は $s_0 = 1\%$ のとき、 $\alpha = 0$ および $\alpha = -\delta_0$ の場合の IP の値を示す。 $\alpha = -\delta_0$ の場合初期 δ_0 がいかなる値であっても動揺は最小となり、 IP も常に一定値 ($IP = 4.23$) である。 $\alpha = 0$ の場合は $\delta_0 = 0$ のとき $IP = 4.23$ と最小を示すが、 $|\delta_0|$ が 0 より大きくなるに従い IP は増大する。

ここで IP と電気的出力トルク $T_e = b\dot{\delta} + P_e \sin(\delta + \alpha)$ の最大値 $T_{e\max}$ との関係について考えてみる。 IP の値から $T_{e\max}$ を直接予想することはできないが、種々の初期値に対する回転子動揺の解析から、 $T_{e\max}$ と IP の関係を知ることができる。試算によれば初期回転子すべり $s_0 = \pm 1\%$ 以内であるとき、 $IP = 6.73$ を越えなければ $T_{e\max}$ は 1 p. u. 以上にはならない。

第 9 図の点 a, b, c の評価関数の値は第 7 図の動揺曲線 a, b, c にそれぞれ対応するものである。点 a, b はいずれも動揺解析において $T_{e\max} < 1$ p. u. であった。また第 9 図中点 a', b', c' はそれぞれ点 a, b, c に対しては同じ IP を持つが、初期位相角 δ_0 が異なる(負値)ため並列後 T_e の瞬時値は若干異なるが、 s_0 が小さければその差は小さい。

(3) 励磁角制御の場合の IP 励磁角が $\alpha = -\delta_0 e^{-t/\tau}$ に従って制御される場合、(4) 式の左辺第 3 項中に時間 t が陽に含まれるため、(7) 式の評価関数は解析的には求まらない。それゆえ評価関数は動揺方程

式の数値解析から、次式のような形で求めなければならない。

$$IP = \int_0^{\infty} (\dot{\delta})^2 dt = \sum_{n=1}^{T_f/\Delta t} \dot{\delta}_n^2 \Delta t \dots\dots\dots (9)$$

これは計算が面倒であると同時に、また計算誤差が避けられない。

しかし、

$$\delta_e = \delta - \delta_0 e^{-t/\tau} \dots\dots\dots (10)$$

なる関数 δ_e を用い、(4)式に適用すると

$$a\ddot{\delta}_e + b\dot{\delta}_e + P_e \sin \delta_e = \frac{\partial_0}{\tau} \left(b - \frac{a}{\tau} \right) \times e^{-t/\tau} \dots\dots\dots (11)$$

なる式に変形できる。この動揺方程式は回転子ではなく、合成励磁ベクトルに関する式であって、右辺は外力とみなすことができる。そして $\tau = a/b$ および $\tau = \infty$ のとき零で、 $\tau < a/b$ のとき負、 $\tau > a/b$ のとき正である。

いま、(11)式の両辺に $\dot{\delta}_e/b$ を掛けて時間積分すれば

$$\text{左辺第1項} = (a/2b) (\dot{\delta}_e)^2 \Big|_0^{\infty} = -(a/2b) (\dot{\delta}_0 + \delta_0/\tau)^2$$

$$\text{左辺第2項} = \int_0^{\infty} \dot{\delta}_e^2 dt$$

$$\begin{aligned} \text{左辺第3項} &= \int_0^{\infty} P_e \sin \delta_e (\dot{\delta}_e/b) dt \\ &= P_e/b \int_0^{\infty} \sin \delta_e d\delta_e = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{右辺項} &= (\delta_0/\tau) (1 - a/b\tau) \int_0^{\infty} \dot{\delta}_e e^{-t/\tau} dt \\ &= (\delta_0/\tau) (1 - a/b\tau) \left\{ -e^{-t/\tau} \right\}_{t=0}^{t=\infty} \\ &\quad + (1/\tau) \int_0^{\infty} \dot{\delta}_e e^{-t/\tau} dt^* \Big|_0^{\infty} \approx 0 \end{aligned}$$

以上より新しい評価関数 IP_e は次のようになる。

$$IP_e = \int_0^{\infty} \dot{\delta}_e^2 dt = (a/2b) (\dot{\delta}_0 + \delta_0/\tau)^2 \dots\dots\dots (12)$$

IP と IP_e の違いは、 IP が原系の位置エネルギーと運動エネルギーとの和のいわゆるリアプノフ関数に比例するものであるのに対し、 IP_e は動揺の振動分のみに着目した評価関数であり、 IP において直流分 $e^{-t/\tau}$ に基づく成分を差引いた量に等しい。また IP_e は初期値 $(\delta_0, \dot{\delta}_0)$ のみを代入することにより得られ、しかも前節でも考察した IP と $T_{e\max}$ の関係はこの場合

*: $t=0$ で $\delta_e=0$, $t=\infty$ で $\dot{\delta}_e=0$, その間で δ_e は有限、連続、また $e^{-t/\tau} > 0$ であることから、十分大きな T に対して $0 \leq t \leq T$ の範囲で平均値の定理を適用すれば、ほぼ零とみなすことができる。但し τ は零に近くてはいけない。

第10図 励磁角減衰時定数 τ に対する評価関数 IP_e と初期回転角 δ_0 の関係

Fig. 10. Values of performance index IP_e vs. initial rotor angle δ_0 for various time constant τ .

IP_e との間で成立つとみなし得る。

第10図は $s_0=1$ および 0.5% のとき、 IP_e と δ_0 の関係 τ をパラメータとして示したものである。この図より、(i) τ が大きいほど IP_e は δ_0 に無関係に一定値に近づく。例えば第9図の $\alpha = -\delta_0$ の曲線に近づく。(ii) 逆に τ が小さくなると IP_e は δ_0 の値によっては非常に大きくなる。(iii) 励磁角制御により IP_e を非常に小さくできる δ_0 の範囲がある。このようなところでは回転子動揺は極端に小さく、ほぼ $e^{-t/\tau}$ の曲線によって初期値より減衰する特性を示す。

いま(12)式の数値解析より $T_{e\max}$ が 1 p.u. に対応する IP_e の値は、 $s_0=1\%$ のとき $IP_e=9.12$, $s_0=0.5\%$ のとき $IP_e=9.5 \sim 8.7$ の間の値であった。後者の場合を例にとると、系統投入条件である初期回転角が $\delta_0 = \pm 180^\circ$ の全域にわたるものとすれば、第10図(B)より $T_{e\max} < 1$ p.u. を満たす励磁角減衰時定数 τ は $\tau > 1$ s であることがわかる。

次に動揺解析から、回転子位置が種々の初期値 $(\delta_0, 0.5\%)$ より $\delta = \pm 1^\circ$ 以内 ($\dot{\delta} \approx 0$) に収束するまでの時間 t_e を示したのが第11図である。また図に示していないが $\delta = \pm 0.1^\circ$ 以内に収束するには更に 60%

第 11 図 励磁角減衰時定数 τ と系の収束時間 t_s の関係 (t_s は δ が ± 10 以下になったときをいう)

Fig. 11. Time required till synchronization t_s vs. τ .

程度の時間を必要とする。この図より、(i) $\delta_0 = \pm 180^\circ$ 全体の値に対して t_s が極小となる τ は $0.3 \sim 0.6$ の間にある。これは系の減衰時定数が $a/b = 0.6$ s であることに関係がある。(ii) もし t_s が 10s 以内に限定されるならば、 $\tau < 2$ s でなければならぬ。(iii) $\tau > 5$ s ならば、収束性が非常に悪くなり、 $t_s > 20$ s である。上記の事由から τ の適値は $1 \sim 2$ 秒と結論づけられる。

5. 結 言

2軸同期発電機の非同期投入から同期に至るまでの自己同期現象を大別して二つの現象、すなわち突入電流に代表される投入瞬時の電気・磁氣的過渡現象、および回転子動揺に代表される電気・機械的過渡現象について解析を行ない、次のような結論を得た。

(1) 2軸機の電氣的ふるまいは負荷角 δ_e によって一義的に定まる。

(2) 投入瞬時の電気・磁氣的過渡現象は負荷角 δ_e についてみると、従来の1軸機の場合とほぼ同様の傾向を示す。

(3) 初期回転子角を δ_0 とするとき、系統投入時の励磁電圧を

$$E_{fd} = \cos(-\delta_0) \text{ (p. u.)}$$

$$E_{fq} = \sin(-\delta_0) \text{ (p. u.)}$$

とすれば、いかなる δ_0 に対しても突入電流などは極小となる。

(4) 電気・機械的な現象については、励磁角 α を

$\alpha = -\delta_0 e^{-1/\tau}$ の形で制御すれば、突入電流は常に極小で、しかも同期後回転子角=負荷角=励磁角=0 に収束する。

(5) 評価関数を用いて動揺解析を行なった結果、 $s_0 = \pm 1\%$, $\delta_0 = \pm 180^\circ$ の範囲で系統投入が行なわれるものとする、 $\tau = 1 \sim 2$ s であれば電氣的出力トルクは 1 p. u. を越えることなく、また回転子は 10s 以内に自己同期する。

終りに、本研究について御検討いただいた、名古屋大学 宮地 蔵教授ならびに市川真人教授、信州大学 永野泰男教授、計算に際し協力された当卒研 生 河戸 勉の各氏に謝意を表す。なお計算には名工大情報処理センター HITAC 8450 を利用したこと、および本研究が昭和 51 年度文部省科学研究費の助成を受けたことを付記し、紙面をかりて関係各位に謝意を表す。

(昭和 51 年 4 月 22 日受付)

文 献

- (1) G. Shackshaft: Proc. Inst. Elect. Engrs. 110, 4, 703 (1963)
- (2) M. A. Badr & A. M. El-Serafi: IEEE PES Summer Meeting Paper No. A 75 406-9 (1975)
- (3) P. Subramaniam & O. P. Malik: Proc. Inst. Elect. Engrs. 118, 12, 1768 (1971)
- (4) E. Fishwick & B. W. Hogg: *ibid* 121, 12, 1522 (1974)
- (5) 中村・武藤・川越: 電学論 94-B, 2, (昭 49-2)
- (6) 中村・川越・武藤: 同上 95-B, 7, 331 (昭 50-7)
- (7) A. M. El-Serafi & M. A. Badr: IEEE PES Winter Meeting Paper No. T 72 030-0 (1972)
- (8) R. G. Hareley & B. Adkins: Proc. Inst. Elect. Engrs. 117, 5, 933 (1970)
- (9) M. Goto & A. Isono, et al: IEEE PES Summer Meeting Paper No. C73, 307-6 (1972)
- (10) M. RamaMurthi & B. W. Hogg, et al: Proc. Inst. Elect. Engrs. 117, 9, 1799 (1970)
- (11) B. W. Hogg & A. S. Aldred: *ibid* 115, 507 (1968)
- (12) C. Concordia: Synchronous machine theory and performance (1951), John Wiley & Sons

付 録

I. 記号の説明 添字 d, q はそれぞれ物理量の d 軸, q 軸成分を示す。 v_d, v_q は電機子電圧。 v_{fd}, v_{fq} は励磁電圧。 i_d, i_q は電機子電流。 i_{fd}, i_{fq} は界磁巻線電流。 i_{kd}, i_{kq} は制動巻線電流。 Ψ_d, Ψ_q は電機子の磁束鎖交数。 Ψ_{fd}, Ψ_{fq} は界磁巻線の磁束鎖交数。 Ψ_{kd}, Ψ_{kq} は制動巻線の磁束鎖交数。 x_d, x_q は同期リアクタンス。 x_d', x_q' は過渡リアクタンス。 x_{ad}, x_{aq} は相互リアクタンス。 x_{fd}, x_{fq} は界磁巻線の自己リアクタンス。 x_{kd}, x_{kq} は制動巻線の自己リアクタンス。 r は電機子抵抗。 r_{fd}, r_{fq} は界磁巻線抵抗。 r_{kd}, r_{kq} は制動巻線抵抗。 r_e は線路抵抗。 x_e は線路リアクタンス。 δ は回転子角(rad), δ_e は負荷角(rad)。 α は励磁角(rad)。 $\omega_0 = 2\pi f$,

同期角速度(rad/s)。 ω =回転子の角速度(rad/s)。 $s=(\omega_0-\omega)/\omega_0$, すべり。 V_t =発電機端子電圧。 V_b =無限大母線電圧。 E_{fd} , E_{fq} =励磁電圧(p. u.)。 E_f =合成励磁電圧。 P =有効電力。 Q =無効電力。 H =単位慣性定数(s)。 D =制動係数。 T_e =電氣的出力トルク。 T_m =機械的入力トルク。 P_m =機械入力。 E_0 =同期リアクタンス背後の内部誘起電圧。 E_0' =過渡リアクタンスの背後電圧。 E_d , $E_q=E_0$ の d, q 軸成分。 E_d' , $E_q'=E_0'$ の d, q 軸成分。

II. モデル 2 軸機の定数 本解析に用いる 2 軸機の定数を付第 1 表に示す。

付 第 1 表 発電機および線路の定数
app Table. 1. Data of the generator and the transmission-line.

d 軸	q 軸
$x_d=1.6$ p. u.	$x_q=1.6$ p. u.
$x_{ad}=1.45$	$x_{aq}=1.45$
$x_{fd}=1.6$	$x_{fq}=1.6$
$x_{kd}=1.5$	$x_{kq}=1.5$
$r_{fd}=0.001$	$r_{fq}=0.001$
$r_{kd}=0.009$	$r_{kq}=0.009$
$r=0.002$	
$x_e=0.06$	$r_e=0.01$
$H=3.0$ kW _s /KVA	

III. 2 軸機の数学的表現式 第 1 図(B)に示す 2 軸機は固定子に三相星形平衡巻線をもつ回転界磁形とし、回転子に固定された座標系 (d - q 軸) に関して、Park 氏⁽¹²⁾の変数をもって表わす。また、Park 氏の場合と同様の仮定をおく。すなわち、(i)ギャップ磁束は正弦波分布である。(ii)磁気飽和、スロット効果などは無視する。(iii)機械損は無視する。(iv)零相分は無視する。(v)制動巻線は等価的に d - q 軸上に仮定した仮想短絡回路で表わされるものとする。

いま第 2 図に示す一機無限大母線系統について解析する。必要な方程式は次のようである。

<電圧方程式>

$$v_d = \frac{1}{\omega_0} p \Psi_d - \frac{\omega}{\omega_0} \Psi_q - r i_d \dots\dots\dots (付 1)$$

$$v_q = \frac{1}{\omega_0} p \Psi_q + \frac{\omega}{\omega_0} \Psi_d - r i_q \dots\dots\dots (付 2)$$

$$v_{fd} = \frac{1}{\omega_0} p \Psi_{fd} + r_{fd} i_{fd} \dots\dots\dots (付 3)$$

$$v_{fq} = \frac{1}{\omega_0} p \Psi_{fq} + r_{fq} i_{fq} \dots\dots\dots (付 4)$$

$$0 = \frac{1}{\omega_0} p \Psi_{kd} + r_{kd} i_{kd} \dots\dots\dots (付 5)$$

$$0 = \frac{1}{\omega_0} p \Psi_{kq} + r_{kq} i_{kq} \dots\dots\dots (付 6)$$

<鎖交磁束に関する方程式>

$$\Psi_d = -x_d i_d + x_{ad} i_{fd} + x_{ad} i_{kd} \dots\dots (付 7)$$

$$\Psi_q = -x_q i_q + x_{aq} i_{fq} + x_{aq} i_{kq} \dots\dots (付 8)$$

$$\Psi_{fd} = -x_{ad} i_d + x_{fd} i_{fd} + x_{ad} i_{kd} \dots (付 9)$$

$$\Psi_{fq} = -x_{aq} i_q + x_{fq} i_{fq} + x_{aq} i_{kq} \dots (付 10)$$

$$\Psi_{kd} = -x_{ad} i_d + x_{ad} i_{fd} + x_{kd} i_{kd} \dots (付 11)$$

$$\Psi_{kq} = -x_{aq} i_q + x_{aq} i_{fq} + x_{kq} i_{kq} \dots (付 12)$$

<電氣的出力トルク>

$$T_e = \Psi_d i_q - \Psi_q i_d \dots\dots\dots (付 13)$$

<運動方程式>

$$(2H/\omega_0) p^2 \delta + T_e = T_m \dots\dots\dots (付 14)$$

<有効・無効電力>

$$P = v_d i_d + v_q i_q \dots\dots\dots (付 15)$$

$$Q = v_q i_d - v_d i_q \dots\dots\dots (付 16)$$

<系統方程式>

$$v_d = r_e i_d - x_e i_q + V_b \sin \delta \dots\dots\dots (付 17)$$

$$v_q = r_e i_q + x_e i_d + V_b \cos \delta \dots\dots\dots (付 18)$$

$$V_t = (v_d^2 + v_q^2)^{1/2} \dots\dots\dots (付 19)$$

ここでは、送電線に関する過渡項は無視するものとする。

<突入電流>

$$I = (i_d^2 + i_q^2)^{1/2} \dots\dots\dots (付 20)$$