UDC 621.313.32: 621.316.729
621.311.1

論 文

47-B 55

電力系統における同期機の非同期運転
および再同期現象

熊 本 大 学	桧 山 隆
京 都 大 学	林 宗 明
京 都 大 学	上之園 親 佐
関西電力株式会社	黒 田 邦 臣

1. ま え が き

現在、電力系統の運用にあたり系統事故、その他の原因により同期機が脱調するに至った場合、その同期機は直ちに系統より分離され、脱調の原因を除去した後系統に再併入する操作が行なわれている。しかし、系統から分離された同期機の再併入には長時間を要することになり、大容量発電機を系統から長時間分離することは、電力供給、系統の経済的運用、信頼度などの点から考えて好ましくない。そこで以前から、運転中の発電機が脱調した場合、この発電機を系統より分離することなく、同期化力の回復するまでの間、非同期発電機として運転することが提案されてきている。最近諸外国で行なわれた試験⁽¹⁾の結果、ある状態のもとで限られた時間であれば非同期発電機として運転できることが示され、ソビエト、その他の国々において実用化されている。

従来、この種の計算は一機無限大母線系統においてなされているが、本文においては有限の大きさの多機電力系統に接続された一同期機の非同期運転、再同期現象が系統全体に及ぼす影響、さらにこれらの運転に対する AVR、ガバナなどの制御系の与える効果などについて、系統をデジタル計算機に適した数式的モ

デル⁽²⁾であらわすことにより検討するものである。すなわち、座標変換により系統の諸変数をこれに対応する同期機の Park 変数にてあらわし、全系統の大信号動作をあらわす系統方程式を $p\mathbf{x}=\mathbf{f}(\mathbf{x})$ なる形で求め、この方程式を Runge-Kutta-Gill 法にて解くことにより、上記の諸運転状態における系統の動作を調べる。実際の計算にあたっては、多機系統のモデルとして簡単な三機系統を用いる。さらに脱調した同期機が再同期するために必要な条件についても、一機無限大母線系統を対象とした位相面解析により求めている。

2. 系統の記述

系統の大信号動作を表わす式は二つの座標系を基礎として得られる。すなわち、各同期機はそれぞれの回転子に固定された座標系に関して Park の変数をもって表わす。一方、送電系統および負荷は常に同期速度 $\omega_0=(2\pi f_0)$ にて回転する共通基準座標軸に関する変数にて表わし、同期機の接続された各母線において、二つの座標系で表わされた各変数を座標変換⁽²⁾によりに関係づける。

〈2・1〉 座標変換 いま $\mathbf{W}_{dj}$, $\mathbf{W}_{Dj}$ をそれぞれ j 母線における第 j 同期機の回転子座標系にて表わした同期機の変数および共通基準座標系にて表わした同期機の変数とする。本文では全系統は対称であると仮定し、零相成分は省略してあるので、 $\mathbf{W}_{dj}$, $\mathbf{W}_{Dj}$ はそれぞれ二次の列ベクトルとなり、両者の間には次の関係がなりたつ。(第1図参照)

$$\mathbf{W}_{dj}=P(\delta_j)\mathbf{W}_{Dj}, \quad \mathbf{W}_{Dj}=P^{-1}(\delta_j)\mathbf{W}_{dj} \quad (1)$$

ただし、 δ_j は第 j 同期機の回転子の共通基準座標軸か

Computer Study of Asynchronous Operation and Resynchronization of an Alternator in a Power System. By T. HIYAMA, Member (Institute of Electrical Engineering of Kumamoto University) M. HAYASHI, Member, C. UENOSONO, Member (Institute of Electrical Engineering of Kyoto University) & K. KURODA, Member (Kansai Electric Power Co., Ltd)

桧山 隆: 正員, 熊本大学工学部
林 宗明: 正員, 京都大学工学部
上之園親佐: 正員, 京都大学工学部
黒田 邦臣: 正員, 関西電力株式会社

第 1 図 二つの座標軸とそれらの相互関係および系統ベクトル図

Fig. 1. Phaser relation between two reference frames and vector diagram of system.

らの相差角を表わし、 $P(\delta_j)$ 、 $P^{-1}(\delta_j)$ はそれぞれ変換行列およびその逆行列である。(付録 1 参照)

ここで相差角 δ_j は次のように表わされる。

$$\delta_j = (\omega_j - \omega_0)t + \delta_{j0} = \Delta\omega_j t + \delta_{j0} \quad \dots\dots (2)$$

ただし、 δ_{j0} 、 ω_0 ：それぞれ定常時の相差角および角速度、 ω_j ：第 j 同期機の角速度

〈2・2〉 送電系統の表式 送電系統および負荷は共通基準座標軸に関して、電圧および電流の関係にて表わされる。ここで同期機の接続されていない母線はすべて消去され、求めようとする回路方程式のなかに組み入れられるべき母線だけを残している。いま I_{Dj} 、 V_{Dj} をそれぞれ、第 j 同期機の接続された母線における電流ならびに電圧とすれば両者の間には次の関係がなりたつ。

$$I_{Dj} = \sum_{k=1}^n Y_{jk} V_{Dk} \quad (j=1 \sim n) \quad \dots\dots (3)$$

これに前述の座標変換を施し、各同期機の基準座標に関する式に変換すれば次のようになる。

$$I_{dj} = \sum_{k=1}^n Y'_{jk} V_{dk} \quad (j=1 \sim n) \quad \dots\dots (4)$$

ただし、

$$I_{Dj} = [I_{Dj}, I_{Qj}]^T, \quad V_{Dj} = [V_{Dj}, V_{Qj}]^T$$

$$I_{dj} = [I_{dj}, I_{qj}]^T, \quad V_{dj} = [V_{dj}, V_{qj}]^T$$

$$Y_{jk} = \begin{bmatrix} G_{jk} & -B_{jk} \\ B_{jk} & G_{jk} \end{bmatrix}, \quad Y'_{jk} = P(\delta_j) Y_{jk} P^{-1}(\delta_k)$$

であり、 G_{jk} 、 B_{jk} は第 j 母線と第 k 母線の相互コンダクタンスおよびサセプタンスであり、 G_{jj} 、 B_{jj} は第 j 母線の自己コンダクタンスおよびサセプタンスである。

本文では送電系統の周波数変化による送電線および負荷の抵抗、インダクタンスの変化は少ないものと仮定し、 Y_{jk} を定数行列として扱っている。

〈2・3〉 系統方程式 系統方程式は、同期機の電

(a) A.V.R.

(b) ガバナ

第 2 図 発電機の AVR とガバナの構成線図

Fig. 2. Block diagrams of widely used continuously acting voltage regulator and governor.

気的特性、機械的特性および同期機に付属する制御系 (AVR、ガバナ) の動作を記述することにより得られる。ここでは、Kimbarck 氏によってまとめられた同期機のモデル⁽³⁾を採用し、過渡内部誘起電圧の時間変化を考慮し、運動方程式における同期機の電気出力は、同期出力と非同期出力とに分けて考えている。(付録 2 参照)

AVR、ガバナについては第 2 図のモデルを用い、それぞれの動作は以下のようになる。

$$E_{fdj} = \frac{K_{fj}}{(1+T_{1j}p)(1+T_{2j}p)} \{K_j(V_{Rj} - V_{tj}) - V_{sj}\} \quad \dots\dots (5)$$

$$V_{sj} = \frac{K_{sj}p}{1+T_{sj}p} E_{fdj} \quad \dots\dots (6)$$

$$\Delta P_{tj} = \frac{K_{gj}}{(1+T_{gj}p)(1+T_{hj}p)} \frac{\Delta\omega_j}{\omega_0} \quad \dots\dots (7)$$

ただし、

$$V_{Rj} = E_{fdj0}/K_j K_{fj} + V_{tj0}$$

$$V_{tj0} = \sqrt{V_{dj0}^2 + V_{qj0}^2}$$

であり添字 0 は定常時における値を、添字 j は第 j 同期機を示す。また AVR 動作の飽和は AVR の出力を制限することにより考慮している。すなわち

$$E_{fdj \min} \leq E_{fdj} \leq E_{fdj \max}$$

全系統の動作は、上記 (5)~(7) 式、(付 1)~(付 5) 式および (4) 式を用いて、非線形連立一階微分方程式にて次のように表わされる。

$$p\mathbf{x} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) \quad \dots\dots (8)$$

ただし、状態変数ベクトル $\mathbf{x}$ は

$$\mathbf{x} = [\Delta\delta_1, \Delta\omega_1, \Delta E_{q1}', \Delta E_{d1}', \Delta E_{fd1}, p\Delta E_{fd1}, V_{s1}, \Delta P_{t1}, p\Delta P_{t1}, \dots, V_{sn}, \Delta P_{tn}, p\Delta P_{tn}]^T$$

本文では (8) 式を Runge-Kutta-Gill 法にて解くことにより系統の諸特性を調べた。

第 1 表 系統定数
Table 1. System constants.

	x_d	x_d'	x_d''	x_q, x_q'	x_q''	T_d'	J	K_g
第 1, 2 号機	1.15 p.u.	0.37 p.u.	0.24 p.u.	0.75 p.u.	0.34 p.u.	1.3 s	5.6 s	25.0
第 3 号機	0.115 p.u.	0.037 p.u.	0.024 p.u.	0.075 p.u.	0.034 p.u.	1.3 s	56.0 s	95.0
	T_d'', T_q''	T_g	T_h	K	K_f	K_s	T_1, T_2	T_s
第 1, 2, 3 号機	0.035 s	0.3 s	0.3 s	1.0	5.0	0.007	0.2 s	0.3 s

Z_1	0.0+j0.4 p.u.	Z_2	0.0+j0.1 p.u.	Z_3	0.0+j0.1 p.u.	Z_{11}	0.0+j0.1 p.u.
Z_{12}	0.0+j0.3 p.u.	Z_{L1}	0.3+j0.1 p.u.	Z_{L2}	0.1+j0.02 p.u.		

(同期機の定数は E. W. Kimbark 氏の "Power System Stability" より)

第 3 図 モデル三機系統

Fig. 3. Model of 3 machine system.

〈2・4〉 モデル系統および初期条件 多機電力系統のモデルとして、第 3 図に示す三機系統を用いた。このモデル系統にて第 3 号機は便宜的に大規模系統を等価一機にて表わしたものと考え、第 3 母線に並列に接続された 10 機程度の同期機を表わすものとする。さらにこの大規模系統内部で消費される電力は第 3 母線に並列に接続されたインピーダンス負荷の消費電力と等価であるとしている。このようなモデル系統により第 1 号機の非同期運転および再同期が系統に及ぼす影響は、それらの運転状態における第 2 号機の動揺を調べることによりわかる。系統定数は第 1 表に示す。系統方程式を解く前に必要となる初期条件は第 2 表に示す。これは系統の潮流計算を行ない第 1 図のベクトル図により求めたものであり、各同期機のモデルとして突極機を使っているため、 E_d' 、 T_q' はともに零とし、以下の計算において (付 4) 式で示される E_d' の時間変化も考慮していない。

3. 同期機の非同期運転⁽⁴⁾

電力系統において、同期機の励磁の喪失、負荷の大変動、系統の事故などの要因により、同期機は同期を失うことがあり、この脱調した同期機を系統より分離しなければ周知のようにじょう乱は全系統に波及するおそれがある。しかし、分離してもそれが長時間にわたる場合には系統としての供給力に不足を生じやすい。最近の発電機の大容量化に伴い、この傾向はますます

第 2 表 初期条件
Table 2. Initial conditions.

	第 1 号機	第 2 号機	第 3 号機
P	1.000	1.000	9.767
Q	0.400	0.579	2.154
V_t	1.000	0.994	0.973
V_D	0.9899	0.9937	0.9732
V_Q	0.1416	0.0348	0.0000
I_t	1.0770	1.1619	10.2766
I_D	1.0465	1.0254	10.0354
I_Q	-0.2544	-0.5463	-2.2132
E_{fd}	1.8392	2.0108	1.6605
E_q'	1.1793	1.2435	1.0850
δ	-0.9055	-1.0506	-0.9870
δ_{12}	0.1451		
δ_{13}	0.0815		
δ_{23}		-0.0636	

強くなっている。したがって、なんらかの原因により同期機が脱調した場合、その励磁を適当に操作して同期化力の回復するまでの間、非同期発電機として系統に電力を供給しつつ運転し、比較的短時間の後に再同期化させることが考えられる。そこで、この同期機の非同期運転が系統に対してどのような影響を及ぼすかをモデル系統について調べてみた。

〈3・1〉 定常非同期運転 同期機は以下に示す種々の励磁回路の状態に対して、定常非同期運転にはいる。(1)励磁回路を短絡した場合、(2)励磁回路を放電抵抗を通して短絡した場合、(3)励磁回路を開放した場合、(4)励磁がある場合、

(1)～(4)の各場合ともタービン出力 $P_t - JP_t$ と非同期出力 P_{as} が等しくなるすべし $s = (-\Delta\omega_s/\omega_0)$ にて定常非同期運転に入る。(第 4 図参照)

(1)、(2)の場合には誘導により流れる界磁電流による過渡内部誘起電圧の存在、および突極性によるリ

第 4 図 スリップに対する発電機の非同期出力とタービン出力

Fig. 4. Asynchronous power of generator and turbine power vs slip.

ラクトランス出力の存在により、(3)の場合には突極性によるラクトランス出力の存在により、(4)の場合には同期出力の存在により、各場合ともすべり s は s_m を平均値として脈動しさらに系統の諸変数を後述のように脈動する。(4)の場合、その脈動の振幅は同期出力の波高値により決定され、同期機の再同期のための条件を決定するにあたっては、このすべりの脈動振幅が重要な意味をもって来る。

〈3.2〉 同期機の非同期運転が系統に及ぼす影響

モデル系統にて第 1 号機の励磁回路を短絡することにより非同期発電機として運転した場合の系統の動揺を調べてみた。この非同期運転中の各同期機の端子電圧の変化は第 5 図に示される。この図から明かなように第 1 号機の端子電圧は定常時の 50~60% に、他の同期機の端子電圧は定常時の 90% 程度に低下する。しかしながら第 5 図の破線に示されるように第 1 号機以外の同期機の端子電圧はそれらの同期機の AVR により定常値まで回復させることが可能である。また、第 5 図に示す無効電力の変化により、第 1 号機はこの

第 5 図 第 1 号機の非同期運転の際の系統の母線電圧、および遅相無効出力の変化

Fig. 5. Changes of bus voltages and reactive powers during asynchronous operation of machine No. 1.

第 6 図 第 1 号機の非同期運転中の第 2, 3 号機間の相角度の変化

Fig. 6. Relative motion between machine No. 2 and No. 3 during asynchronous operation of machine No. 1.

非同期運転中、遅相の無効電力を消費することがわかる。この第 1 号機の無効電力の消費が、第 5 図に示されるような系統全体の電圧の低下を引き起こすといえる。また第 6 図に相角度の変化に示されるように、この非同期運転中第 2, 第 3 号機はそれぞれほとんど同期を保って動いている。したがって、第 1 号機の非同期運転が第 2, 第 3 号機に対してそれほど大きな影響を及ぼさないといえる。

また以上の図より、すべての系統量、すなわち相角度、すべり、母線電圧、母線電流、有効、無効出力などは非同期運転の期間中脈動している。これは先記のように、誘導による界磁電流の存在、突極性によるラクトランス出力の存在などに起因している。

4. 同期機の再同期現象

同期機が脱調した場合、従来のように系統からの分離、再併入という過程を通らずに以下に示すような操作を行えば、短時間にこの同期機を再同期化させることが可能である。すなわち、(1)脱調した同期機の励磁回路を短絡あるいは開放することにより、この同期機を非同期発電機として運転する。(2)ガバナによりこの同期機の軸トルクの調整を行なう、(3)励磁電流を再び供給して、この同期機を再同期化させる。

本文ではこれらの過程における同期機の動作を、その再同期現象と呼ぶことにする。

〈4.1〉 再同期の過程 モデル系統における第 1 号機の代表的な再同期の過程を第 7 図(a)~(c)に示す。これらの図において、 $A_1 \sim A_5$ は次の各状態を示している。

A_1 : モデル系統の A 点にて三相地絡事故の発生 ($t = 0.0$ s), A_2 : 故障回線のしゃ断 ($t = 0.30$ s), A_3 : 故障回線の再閉路 ($t = 0.40$ s), A_4 : 第 1 号機脱調、励磁

第 7 図

Fig. 7.

回路の短絡 ($t=0.42$ s), A_5 : 励磁再投入 ($t=1.42$ s), ただし A_3 にて事故は消滅しているものとする。

ここでは、同期機が脱調した後の非同期運転およびそれに続く再同期現象の解析に重点をおいているため故障回線のしゃ断までの時間を長くとり、第 1 号機が脱調するようにしてある。また再閉路までの時間も短かくとっている。

第 7 図(c)に示されるように、第 1 号機の同期出力はこれらの過程を通してかなり動揺している。しかしこの動揺の継続時間が 2～3 秒であるので、それほど問題はないと考えられる。また、同図(b)には第 2 号

機、第 3 号機の相対的な動作を示してある。この図から第 1 号機の非同期運転、再同期の過程を通して、第 2 号機、第 3 号機がほぼ同期を保って動作していることが確認できる。したがって、同期機の再同期現象も先に述べた励磁回路の短絡による非同期運転と同様に系統に対して大きな動揺を引き起こさないといえる。

〈4.2〉 系統諸パラメータの効果

〈ガバナの効果〉 非同期運転中、ガバナはタービン入力を調整することにより、同期機のすべりおよび出力を調整する。ガバナ利得が大きくなるに従って、非同期運転中の平均すべりは小さくなり、第 7 図(a)に示されるようにガバナ利得が大きいくほど再同期させやすくなる。さらにガバナの動作は系統の電気的特性に対して直接影響を与えないので、同期機の再同期を考える際には、ガバナの利得を増加させることが望まれる。

〈AVR の効果〉 AVR の働きは第 7 図(a)に示されるように再同期に対して効果がある。これは非同期運転の期間中その同期機の端子電圧が定常時の 50～60% に低下し、したがって、再同期化させるために励磁電流をふたたび供給したときに AVR の動作により励磁電圧が定常時よりも増加し、それに伴い同期出力の波高値も定常時より増加することによる。したがって、AVR の動作により、励磁供給より再同期にいたるまでの時間は短縮できる。

励磁回路時定数、慣性定数、外部リアクタンスの影響 これらのパラメータの影響については紙面のつごう上、図を省略する。計算結果によれば励磁回路時定数が小さいほど再同期に要する時間は短縮できる。これは内部誘起電圧が励磁投入後、励磁回路時定数に従って、ほぼ指数関数状に増加することより説明できる。

同期機の慣性モーメントは同期機のすべりの振動振幅に関係し、慣性定数が小さいほどその振幅が大きくなり、すべりが零を通過しやすくなり、再同期化も容易になるといえる。要するに慣性定数が小さければ脱調しやすい代わりに再同期もしやすいことになる。

同じすべりの値に対して、外部リアクタンス (送電線および変圧器のリアクタンス) の大きな同期機ほどその平均非同期出力は小さくなり、したがって、同じ運転状態においては外部リアクタンスの小さいほど非同期運転中のすべりが小さくなって、再同期化しやすくなる。

5. 再同期の条件

前節の計算結果から明らかなように、比較的大きい系統につながる同期機が非同期運転を行なう場合、それによるじょう乱が全系統に波及するおそれは余りな

と考えてよい。したがって、ここでは一機無限大母系システムを考え、条件を単純化しその位相面解析により同期機の再同期化のために必要となる条件について考察する。

〈5・1〉 位相面方程式 同期機の再同期の過程は次の方程式で表わされる。⁽⁵⁾

$$M p^2 \delta + P_d (1 - b \cos 2\delta) p \delta + P_m (1 - \varepsilon - t/T_d') \sin \delta + P_r \sin 2\delta = P_t - \Delta P_t \quad (9)$$

ガバナ動作の時間遅れを無視すれば ΔP_t は

$$\Delta P_t = K_g p \delta / \omega_0 \quad (10)$$

となり、位相面方程式は次のようになる。

$$d \Delta \omega / d\delta = [P_t - \{P_d (1 - b \cos 2\delta) + K_g / \omega_0\} \Delta \omega - P_m (1 - \varepsilon - t/T_d') \sin \delta - P_r \sin 2\delta] / M \Delta \omega \quad (11)$$

ただし、 $\Delta \omega = p \delta$

となる。

励磁投入後じゅうぶんな時間が経過すれば、 $\varepsilon - t/T_d'$ の項は 0 となるので (11) 式は次のようになる。

$$d \Delta \omega / d\delta = [P_t - \{P_d (1 - b \cos 2\delta) + K_g / \omega_0\} \Delta \omega - P_m \sin \delta - P_r \sin 2\delta] / M \Delta \omega \quad (12)$$

このとき、安定および不安定特異点を与える方程式は (9) 式において $t \rightarrow \infty$, $p \delta = 0$, $p^2 \delta = 0$ として

$$P_m \sin \delta + P_r \sin 2\delta = P_t \quad (13)$$

となる。

〈5・2〉 位相面トラジェクトリと再同期の条件

(12) 式にて与えられる位相面トラジェクトリは第 8 図に示されるように次の四つの形に分類⁽⁶⁾される。

(a) 平衡点が存在しない場合 いかなる初期点を出発したトラジェクトリも、 δ に関して 2π の周期をもつ定常曲線*に収束する。この場合には次の条件式がなりたつ。

第 8 図 電力系統の大振動に対する位相面トラジェクトリの分類

Fig. 8. Classification of phase plane trajectories on large oscillation of power system.

$$P_m \sin \delta_m + P_r \sin 2\delta_m < P_t$$

$$\delta_m = \cos^{-1} \left\{ -\frac{1}{8} \left(\frac{P_m}{P_r} \right) + \sqrt{\left(\frac{1}{8} \right)^2 \left(\frac{P_m}{P_r} \right)^2 + \frac{1}{2}} \right\}$$

(b) 特異点と定常曲線が存在する場合 この場合、図の斜線部に初期値をもつトラジェクトリは安定特異点に収束し、その他の初期点を出発したトラジェクトリは定常曲線に収束する。

(c) 定常曲線が存在しない場合 この場合にはいかなる初期点を出発したトラジェクトリも安定特異点に収束する。

(d) 定常曲線が不安定特異点を結ぶ周期 2π の曲線となる場合 この場合、図の斜線部に初期値をもつトラジェクトリは安定特異点に収束し、その他の初期点を出発したトラジェクトリは定常曲線に収束する。

しかし、この場合の定常曲線は不安定特異点を結ぶ周期 2π の曲線であり、不安定特異点はくら形点であるから、じゅうぶん長い間には安定特異点へ収束する可能性もでてくる。

同期機の再同期の条件は上記の (d) の形のトラジェクトリにより与えられる。すなわち、周期 2π の定常曲線の消滅が再同期に必要な条件となる。そこで、不安定特異点の近傍に初期点を与え、(12) 式の位相面方程式を解き、トラジェクトリが次の不安定特異点を通るための条件を求める。

初期点は次のようにあらわされる。

$$\Delta \omega = (d \Delta \omega / d\delta)_{\delta=\delta_2} \Delta \delta \quad (14)$$

$$\delta = \delta_2 + \Delta \delta \quad (15)$$

*: 参考文献(6)ではこの定常曲線を“同期機のリミットサイクル”と呼んでいる。またこの定常曲線は円筒形の位相空間を用いれば、 2π ごとに重なる閉曲線であり、“第 2 種のリミットサイクル”とも呼ばれる。

$$\begin{aligned}
 (d\Delta\omega/d\delta)_{\delta=\delta_2} &= \frac{1}{2} \left[-\frac{1}{M} \{P_a(1-b\cos 2\delta_2) + K_g/\omega_0\} \right. \\
 &\quad \left. + \sqrt{\left[-\frac{1}{M} \{P_a(1-b\cos 2\delta_2) + K_g/\omega_0\} \right]^2 \right. \\
 &\quad \left. * -4(P_m \cos \delta_2 + 2P_r \cos \delta_2) \right] \dots (16)
 \end{aligned}$$

ただし、 δ_2 は不安定特異点であり、 $(d\Delta\omega/d\delta)_{\delta=\delta_2}$ はトラジェクトリが不安定特異点を出発するときのこう配である。

〈5・3〉 計算例および結果の考察 ここでは位相面方程式(12)を Runge-Kutta-Gill 法にて解き系統諸パラメータの再同期に対する影響を考察する。

第9図(a)、(b)に計算結果を示す。図中 P_{mcr} は再同期のために必要な同期化力の波高値 ($=E_q' V/(x_d' + x_e)$) を示す。

これらの図から明らかなように、同期機を再同期させることが、不可能となる平均すべりの最大値が存在し⁽⁷⁾、〔第9図(a)参照〕この最大値は、励磁回路の頂上電圧により決定される同期出力の波高値により定まる。したがって、同期機の再同期化をはかるにあたっては、非同期運転中の平均すべりをこの最大値以下におさえる必要がある。また諸パラメータの影響については、〈4・2〉節で述べたのと同様の効果が認められた。さらに、(b)図に示されるように同期機の制動係数 P_d も再同期に対して大きな影響をもつことが示される。同期機の実極性は紙面のつごう上、図は省略するが、再同期に対してほとんど影響を与えない。ただし、ここでは AVR の動作を考慮せず、同期機の内部誘起電圧 E_q' は一定としている。

6. む す び

以上得られた結果をまとめると次のようになる。

(1) 同期機の非同期運転中には、種々の系統変数たとえば有効出力、無効出力、母線電圧、母線電流などが脈動をはじめ。また、非同期運転中の同期機の母線電圧は定常時の 50~60 % に低下し、これに隣接する他の同期機の母線電圧も定常時の 90 % 程度に低下する。しかし、比較的遠方の同期機の母線電圧の低下はその同期機の AVR の動作により防ぐことができる。

(2) 多機電力系統における一同期機の非同機運転は他の同期機の動作に一特にその同期に一ほとんど影響を与えない。すなわち、他の同期機はほぼ同期を保って動作する。

(3) 同期機の再同期に対してガバナの動作が効果

(a) ガバナ利得、慣性定数、外部リアクタンスと再同期に必要な同期化力との関係

(a) Effects of governor gain, inertia constant, and external reactance on the magnitude of synchronous power required to resynchronize the machine.

(b) 制動係数と再同期に必要な同期化力との関係

(b) Effect of damping coefficient on the magnitude of synchronous power required to resynchronize the machine.

第9図

Fig. 9.

的であり、また AVR の動作も効果がある。

(4) 非同期運転中の平均すべりが同期機の再同期を考える際に重要になってくる。すなわち、同期機を再同期化させることが不可能となる平均すべりの最大値が存在し、この最大値は励磁回路の頂上電圧により定まる同期出力の波高値により決定される。

(昭和46年10月14日受付、同47年4月24日再受付)

文 献

- (1) 例えば、T. H. Masson: Proc. Inst. Elect. Engrs 1106 A, p. 357 (1959)
- (2) K. Prabhaskar: IEEE Trans. Power Apparatus Syst. PAS-87 No. 1, p. 73 (1968)

- (3) E. W. Kimbark: "Power system stability", Book, (1956) John Wiley & Sons
 (4) V. A. Venikov: "Transient phenomena in electrical power system", Book, (1965) Pergamon Press
 (5) 堀野・上之園: 技研所報 10, 2, p. 51
 (6) 三浦, 他: 電学誌 89, 899 (昭 44-5)
 (7) O. P. Malik: Proc. Inst. Elect. Engrs 113, No. 12, p. 1977 (1966)
 (8) R. N. Sudan: Proc. Inst. Elect. Engrs 79, Pt. 1, p. 1120 (1960)
 (9) D. B. Mehta: I. E. E., Paper No. 3160S, p. 61 (1960)

付 録

1. 変換行列およびその逆行列

$$P(\delta_j) = \begin{bmatrix} \cos \delta_j & \sin \delta_j \\ -\sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix}$$

$$P^{-1}(\delta_j) = \begin{bmatrix} \cos \delta_j & -\sin \delta_j \\ \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix}$$

2. 同期機の表現⁽³⁾⁽⁸⁾

$$p\delta_j = \Delta\omega_j \dots \dots \dots (\text{付1})$$

$$p\Delta\omega_j = \{P_{tj} - \Delta P_{tj} - (P_{sj} + P_{asj})\} / M_j \dots \dots \dots (\text{付2})$$

界磁回路の磁束変化

$$pE_{qj}' = \{E_{fdj} - E_{qj}' - (x_{dj} - x_{dj}')I_{dj}\} / T_{dj}' \dots \dots (\text{付3})$$

$$pE_{dj}' = \{-E_{dj}' + (x_{qj} - x_{qj}')I_{qj}\} / T_{qj}' \dots \dots \dots (\text{付4})$$

ただし,

$$P_{sj} = V_{dj}I_{dj} + V_{qj}I_{qj}$$

$$P_{asj} = \frac{1}{2} V_{tj}^2 \left\{ \frac{x_{dj}' - x_{dj}''}{x_{dj}' x_{dj}''} \frac{\Delta\omega_j T_{dj}''}{1 + (\Delta\omega_j T_{dj}'')^2} + \frac{x_{qj}' - x_{qj}''}{x_{qj}' x_{qj}''} \frac{\Delta\omega_j T_{qj}''}{1 + (\Delta\omega_j T_{qj}'')^2} \right\}^{(4)(9)}$$

上式において P_{sj} , P_{sj} はそれぞれ第 j 同期機の非同期出力, 同期出力を表わし, P_{asj} の右辺第一項は制動巻線による非同期出力の直軸成分, 第二項は横軸成分を表わす。(付3)式により E_q' の時間変化を考える場合には, P_{sj} は同期出力とともに誘導により流れる界磁電流により生じる界磁巻線の非同期出力を表わす。

また, 第 j 同期機の母線電圧, 母線電流および過渡内部誘起電圧との間には

$$V_{dj} = E_{dj}' + X_{dj}' I_{dj} \dots \dots \dots (\text{付5})$$

の関係があり, この式と本文中の(4)式より同期機方程式の中に含まれる, 系統の状態変数以外の変数 V_{dj} , I_{qj} , I_{dj} , I_{qj} は系統の状態変数 δ_j , E_{qj}' , E_{dj}' を用いて, 次の行列方程式により決定される。

運動方程式

$$\begin{bmatrix} V_{d1} \\ \vdots \\ V_{dn} \\ I_{d1} \\ \vdots \\ I_{dn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & 0 & 0 & -X_{d1}' & 0 & 0 \\ 0 & \diagdown & 0 & 0 & \diagdown & 0 \\ 0 & 0 & I & 0 & 0 & -X_{dn}' \\ Y_{11}' & \dots & Y_{1n}' & P^{-1}(\sigma_1) & 0 & 0 \\ \vdots & Y_{jk}' & \vdots & 0 & \diagdown & 0 \\ Y_{n1}' & \dots & Y_{nn}' & 0 & 0 & P^{-1}(\sigma_n) \end{bmatrix}^{-1}$$

$$\begin{bmatrix} E_{d1}' \\ \vdots \\ E_{dn}' \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \times$$

ただし,

$$X_{dj}' = \begin{bmatrix} 0 & x_{qj}' \\ -x_{dj}' & 0 \end{bmatrix}, \quad I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$E_{dj}' = \begin{bmatrix} E_{dj}' \\ E_{qj}' \end{bmatrix}$$

3. 記号の説明

d, q ; D, Q : 同期機の直軸, 横軸および共通基準軸, ω_0, ω : 同期角速度, 角速度の瞬時値
 δ : d, q 軸と D, Q 軸の相差角, x_d, x_d', x_d''
 x_q, x_q', x_q'' : 同期機リアクタンス, E_d', E_q'
 E_{fd} : 同期機過渡内部誘起電圧, 励磁電圧,
 T_d', T_d'', T_q', T_q'' : 同期機の時定数, V_d ,
 I_d, V_D, I_D : d, q 軸および D, Q 軸にて表わした電圧, 電流ベクトル, $M (=J/\omega_0)$: 慣性定数, $P_s, P_{as}, P_t - \Delta P_t$: 同期, 非同期出力およびタービン出力, K, K_s, K_f, T_1, T_2, T ,
 AVR 定数, V_R : AVR 基準電圧, K_g, T_g ,
 T_h : ガバナ定数, x_e : 外部リアクタンス,
 P_d, b : 制動係数, 脈動係数, P_m, P_r : 同期出力およびリアクタンス出力の波高値, V : 無限大母線の電圧, t : 時間, $p (=d/dt)$: 微分演算子

なお, 添字 j は第 j 同期機を表わす。