空げき磁束による同期発電機の AVR 制御の解析

(II. 負制動現象の解析)

正員 松木 純也 (京大)

正員 岡田 隆夫 (京大)

正員 上之園 親佐 (京大)

1. ま え が き

AVR による同期発電機の界磁電流制御は、一般に安定出力限界を拡大するように動作する。しかし、AVR のゲインおよび時定数の設定いかんによっては、AVR 動作により発電機および系統が本来もっていた制動効果を著しく低減させ、その結果、定態安定出力限界より低い出力で持続振動が発生し、それが発散して発電機が脱調に至ることがある。これは、負制動現象と呼ばれ、これを抑制するために AVR に制動効果を付加して、安定領域を拡大する方法が採られている。

しかし、このような AVR や PSS などの動作を考慮した安定度解析結果が、必ずしも実系統の不安定現象と合致しないことも、しばしば指摘されている。

その原因として、多機系統の等価集約、負荷特性などの系統の問題のほか、解析に用いられる同期機の等価回路表現において、機器定数とその飽和効果の表現、ならびに過渡特性の表現など、今なお不明な点が数多く残されている点が挙げられる。

そこで本論文では、この問題を根本的に究明するための基礎研究として、同期発電機の空げき(ギャップ)磁束および回転子の速度変化などに着目して、AVR 動作による負制動現象を詳細に検討する。

2. 負制動現象とそれによる脱調に関する解析

本章では、AVR による負制動現象が原因で脱調す

Analysis of the Automatic Voltage Control of the Generator by Air-gap Fluxes (II. Analysis of its Effect on the Negative Damping Phenomena). By Junya Matsuki, Member, Takao Okada, Member & Chikasa Uenosono, Member (Faculty of Engineering, Kyoto University).

松木純也: 正員, 京都大学工学部電気工学科

岡田隆夫: 正員, 京都大学工学部電気工学科

上之園親佐: 正員, 京都大学名誉教授

るケースとして、試験の結果から、AVR のゲイン $K=5$ 、時定数 $T=100$ ms の場合を選定し(前論文 I, <2.2> 節参照)、ギャップ磁束、電流、回転子速度の変化などから AVR による負制動現象を解析する。

(2.1) 定常運転時のギャップ磁束などの変化

供試一機無限大母線系統に同期投入後、発電機出力を約 1 kW ずつ増加し、その都度定常状態を保ったときの、電圧、電流、相差角などの変化を表 1 に、またギャップ磁束分布などの変化を図 1 に一括して示す。約 6 kW を超えると振動が発生した。

(1) 出力が 1 kW から 5 kW までの各定常状態における V_t 、 I_a 、 I_f 、相差角 δ 、 δ_i 、 θ 、更にギャップ磁束分布 ϕ 、 ϕ_q 、 ϕ_d 軌跡などの変化は、前論文 I のケースと良く一致している。

(2) 出力が 5 kW から 6 kW に上昇するときに顕著な状態変化が起こる。すなわち、前論文 I のケースでは、 V_t : 224→223 V, I_a : 13.5→16.3 A, I_f : 4.8→5.2 A, δ : 49→57°, δ_i : 27→30°, θ : 38→43°... などであるのに対して、本ケースでは V_t は変化が小さいが、

表 1 AVR のゲイン $K=5$ 、時定数 $T=100$ ms の場合の定常状態における出力、電圧、電流、相差角などの変化

Table 1. Changes of output, voltage, current, phase angle and so on at the normal operating condition when AVR's gain is 5 and time constant 100 ms.

状態 No.	P_o (kW)	V_t (V)	I_a (A)	I_f (A)	V_m (V)	$\cos \varphi$	δ (°)	δ_i (°)	θ (°)
1	0.98	230	2.0	4.4	223	遅れ 0.76	10.8	8.1	51.2
2	1.95	228	5.3	4.4	222	0.95	21.7	13.5	32.3
3	3.00	227	8.1	4.4	222	0.97	29.8	16.2	29.5
4	4.00	226	10.6	4.5	223	0.98	40.6	24.4	37.7
5	5.05	225	13.6	4.9	223	0.98	48.7	24.4	40.4
6	6.10	224	19.8	5.5	224	0.93	70.4	35.2	48.5

 図 1 AVR のゲイン $K=5$ 、時定数 $T=100$ ms のときの定常時のギャップ磁束などの変化

Fig. 1. Changes of air-gap fluxes et al. at the normal operating condition when AVR's gain is 5 and time constant 100 ms.

I_a : 13.6→19.8 A, I_f : 4.9→5.5 A, δ : 49→70°, δ_i : 24→35°, θ : 40→48°…と変化幅が大きい。

出力 5 kW において、同一の運転状態にある発電機がなぜ 6 kW に至って異なる動きをするのか。この点の解析は、回転子の微小速度変化、AVR による界磁磁束の過渡現象、ほかの関連項目の測定との同時性など極めて精度の高い計測と、一方、依然として解決されていない磁気回路の飽和効果などの検討が必要であり、今後の課題として残されている。

なお、上記(2)項で述べた現象およびこれに引続く振動発散現象の理由は、いわゆる Park の式を用いて、等価的な同期化トルク係数および制動トルク係数を計算することにより、一応の説明はできる(第3章参照)。

〈2.2〉 振動発生、持続振動および脱調の解析

出力 6 kW の状態から、若干出力を増加すると振動が発生し、そのまま放置すると徐々に振動が拡大し持続振動の状態となった。このとき、界磁電流にも同様の振動が現れるが、上昇時、既に励磁制御系の頂上電圧に達している。更に出力を増加していくと、同様の振動状態が続くが発散するまでには至らない。更に、出力を増し約 10 kW になると、むしろ振動は収まり気味となりながら脱調していった。

以下、これらの現象を順を追って検討する。

(1) 振動発生直後 まず、振動発生直後の現象について述べる。すなわち、発電機の出力 6 kW から若干出力を増加して、振動が発生したときの約 1 秒

図 2 振動発生直後の端子電圧 V_t 、電機子電流 I_a 、界磁電流 I_f 、電気出力 P_e のオシログラム

Fig. 2. Oscillogram of terminal voltage, armature current, field current and generator's output immediately after oscillation rose.

間をデータレコーダで記録する。

振動発生直後の端子電圧 V_t 、電機子電流 I_a 、界磁電流 I_f 、電気出力 P_e のオシログラムを図 2 に示す。同図において、 $\longleftrightarrow$ 印でマークした約 1 秒間の電圧、電流、ギャップ磁束分布などの変化をデータレコーダで記録し、解析した。その結果、得られた相差角 δ , δ_i , θ の変化を図 3 に、回転子速度の変化を図 4 に示す。また、ギャップ磁束波形、電機子反作用磁束波

形、界磁電流、電機子電流およびトルクの変化、更にギャップ磁束と電機子反作用磁束の各調波成分の変化、横軸磁束と直軸磁束の変化などを一括して図5に示す。(a)図のギャップ磁束波形中の二つの特徴的な波形を丸で囲み、それぞれを A_1 、 B_1 として、(b)～(e)図の各图中、対応する時間にマーク A_1 、 B_1 を入れている。このマークは図2～図4にも入れ、図5の A_1 、 B_1 と対応させている。

これらの図から、振動発生直後の特徴をまとめると次のようになる。

図3 振動発生直後の相角の変化

Fig. 3. Changes of phase angles immediately after oscillation rose.

(i) 図4に見られるように、発電機の回転子は同期速度 60 Hz を中心に $\pm 0.5\%$ の幅で加速、減速を繰返している。これに伴い V_t 、 I_a 、 I_f 、 P_e 、 δ 、 δ_i 、 θ 、ギャップ磁束などのすべての量が振動し、その振動周期は約 0.8 秒である。

(ii) 相差角は、 δ は約 54° を中心に $\pm 33\%$ 、 δ_i は約 26° を中心に $\pm 33\%$ 、 θ は約 42° を中心に $\pm 14\%$ の振動である。各相差角の平均値は、出力 5 kW のとき ($\delta=48.7^\circ$ 、 $\delta_i=24.4^\circ$ 、 $\theta=40.4^\circ$ (表1参照)) より増加している。すなわち、出力増加と共に相差角は振動しながら増加する。

(iii) 図2～図5に見られるように、発電機が減

図4 振動発生直後の回転子速度の変化

Fig. 4. Change of rotor speed immediately after oscillation rose.

図5 振動発生直後のギャップ磁束などの変化

Fig. 5. Changes of airgap fluxes et al. immediately after oscillation rose.

速領域 (図4参照) に入ると、図3の各相差角は減少し、また図2の I_a , I_f も減少するので、結果的に発電機は加速し始める (図4参照)。それに伴い I_a , I_f , 各相差角およびトルクは増加し始める。トルクが電動機出力を上回り出すと、回転子には減速エネルギーが加わり、…以下、繰返す。すなわち、図5(a)において時間の原点付近および0.8秒付近のギャップ磁束波形 A_1 は、図5(a)および(d)に示すように、この区間内で ϕ_q と ϕ_f が最大になったときのもので、このとき図2の I_a , I_f , 図3の θ はほぼ最大となり、 $I_a=27$ A, $I_f=6.7$ A, $\theta=48^\circ$ である。また、図5(a)の0.37秒付近のギャップ磁束波形 B_1 は、図5(a), (d)に示すように ϕ_q と ϕ_f が最小になったときで、このとき図2の I_a , I_f , 図3の θ はほぼ最小となり、 $I_a=17$ A, $I_f=4.8$ A, $\theta=36^\circ$ である。そして、 A_1 と B_1 の間は連続的に変化している。

上述のように、振動発生直後には ϕ_q の振動と ϕ_f の振動が時間的に一致してくる結果、回転子に働くトルクは加速、減速ともに大きくなる。

(iv) 図5(c)に示すように、電機子反作用磁束の基本波成分は、 A_1 で最大、 B_1 で最小となっている。この理由を以下に述べる。すなわち、文献(1)で示したように、相差角 θ が遅れ位相で大きく、かつ電機子電流 I_a が大きいほど電機子反作用磁束 ϕ_a は大きくなり、この減磁作用でギャップ磁束 ϕ は減少する。従って、回転子の加速、減速に応じて図3に示すように相差角 θ が遅れ位相で約 42° を中心に上下に変化するとき、ギャップにおける電機子反作用は A_1 で最大、 B_1 で最小となる。一方、AVR は上記の電機子反作用によるギャップ磁束 ϕ の減少、すなわち発電機の端子電圧の減少を補償するように動作するから、図5(b)に示すようにギャップ磁束の基本波成分は、ほぼ一定に保たれる。

以上の(i)~(iv)の考察の結果、XY座標上の ϕ_q - ϕ_d の軌跡は、図5(e)のようになる。

(2) 持続振動 (1)項の状態から、徐々に振動が拡大し持続振動の状態となったときのオシログラムを図6に、ギャップ磁束波形などの変化を図7に示す。(1)項でマークした A_1 , B_1 と同様に、 A_2 , B_2 をマークしている。相差角および回転子速度の変化の図は、紙面の都合で省略する。

(i) 回転子は同期速度を若干超えて 60.1 Hz を中心に $\pm 1.33\%$ の幅で加速、減速を繰返している。これに伴い、すべての量の振動が大きく、その振動周期は約 0.83 秒と(1)項の状態よりもやや長くなっている。

(ii) 相差角は、 δ は約 52° を中心に $\pm 81\%$, δ_i は約 22° を中心に $\pm 64\%$, θ は約 42° を中心に $\pm 43\%$ の振動で、平均値は(1)項の場合とは同じであるが、振動幅は増加している。

(iii) 図6に見られるように、界磁電流はその上限値に達するため、AVR動作はその機能を停止するので、ギャップ磁束の基本波成分は図7(a)に見られるように一定ではない。

図6 持続振動時の諸量のオシログラム

Fig. 6. Oscillogram of constant oscillation.

図7 持続振動時のギャップ磁束などの変化

Fig. 7. Changes of airgap fluxes et al. at the constant oscillation.

(iv) A_2 および B_2 におけるギャップ磁束波形については、(1)項の(Ⅲ)で述べたのと同様のことが言える。すなわち、 A_2 はいま解析している区間内で ϕ_q と ϕ_r が最大となるときの、このとき I_a , I_r , θ はほぼ最大となり、 $I_a=35$ A, $I_r=8$ A, $\theta=60^\circ$ である。 B_2 は ϕ_q と ϕ_r が最小、 I_a , I_r , θ がほぼ最小となるときの、このとき $I_a=6$ A, $I_r=5.3$ A, $\theta=24^\circ$ である。ギャップ磁束波形は A_2 と B_2 の間を連続的に変化する。

(v) 電気出力 P_e およびトルク T_e は飽和している。これは、界磁電流が上限に達するためである。

上述のように、この持続振動の状態は、(1)項の状態を放置したときのものであることから、原動機出力は(1)項と同じであるので、すべての量の振動の平均値はほぼ(1)項と同じである。しかし、界磁電流が上限に達するため ϕ_r の増加は制限されるので、結果的に A_2 における ϕ_q は A_1 における ϕ_q より大きくなる。これは回転子の慣性による加速、ひいては脱調を抑制するのに必要な増加であるが、一方、前論文Ⅰの第3章で述べたように、安定度余裕は低下していくことになる。

(3) 持続振動の進展 (2)項の持続振動の状態から更に出力を増加し、約 8 kW となったときのオシログラムを図8に示す。 A_3 , B_3 をマークしている。相差角、回転子速度、ギャップ磁束波形などの変化の図は紙面の都合で省略する。

(i) 回転子速度は、(2)項の状態よりも更に上昇した 60.15 Hz を中心に $\pm 1\%$ の幅で加速、減速を繰返している。これに伴い、すべての量が激しく振動し、その振動周期は 0.9 秒と長くなっている。

図8 持続振動進展時の諸量のオシログラム
Fig. 8. Oscillogram of growing oscillation.

(ii) 相差角は、 δ は約 68° を中心に $\pm 55\%$, δ_r は約 26° を中心に $\pm 50\%$, θ は約 49° を中心に $\pm 30\%$ の振動をしている。その平均値は、いずれも(2)項の状態より増加している。

(iii) (2)項および本項(i), (ii)の結果から、次のことがわかる。すなわち、電気出力を約 6 kW から約 8 kW まで増加していくとき、回転子速度は同期速度 60 Hz からスリップし、平均 60.1 Hz [(2)項の状態], 更に平均 60.15 Hz (本項の状態)と上昇する。また、それに伴い各相差角の平均値は連続的に上昇していき、発電機の重負荷状態への進展と約合いを保つ。

(iv) A_3 のとき $I_a=32$ A, $I_r=8$ A, $\theta=64^\circ$ であり、 B_3 のとき $I_a=6$ A, $I_r=5.3$ A, $\theta=34^\circ$ である。 A_3 におけるギャップ磁束波形の第三調波成分は増加しており、このことから発電機の重負荷状態への進展がうかがえる〔文献(1)参照〕。

(v) ϕ_q - ϕ_d 軌跡をみると、軌跡の傾きは(2)項の場合よりも立ってきており、この計測から安定度余裕が低下し脱調が近付いたことを予測できる。

すなわち、前論文Ⅰの第3章の(3)式で述べたことは、一機無限大母線系統であることを考慮し、飽和による発電機リアクタンスの変化などを無視すれば、本ケースのような AVR による持続振動発生の場合にもあてはまるので、あらかじめ $\phi_{q\max}$ を知ることができる。前論文Ⅰの図7に示すように、 $\phi_{q\max}=0.65$ ($\times 10^{-3}$ Wb) である。いま、 ϕ_q は振動しているが、その平均値で安定度余裕〔前論文Ⅰの(4)式参照〕を示すことにすると、(1)項は図6(e)に示すように $\phi_q=0.5$, (2)項は $\phi_q=0.5$ で(1)項とはほぼ同じであるが、本項は $\phi_q=0.52$ である。従って、安定度余裕は(1), (2)項で約 23% であるが、本項では約 20% と低下する。更に、 A_1 , A_2 , A_3 と順次 $\phi_{q\max}$ に接近してくるので、安定度は低下し脱調が間近いことがわかる。

以上、(1)~(3)項の検討結果からわかるように、約 6 kW から約 8 kW まで振動は激しくなるが発散せず、長い持続振動状態が続いている。すなわち、AVR により弱制動あるいは負制動となり振動発生→持続振動→振動発散→脱調が通説であるが、供試系統では、かかる振動発散から脱調に至るケースは観測されなかった(ただし、発電機端子電圧 $V_t=230$ V になるように 90 R を設定した状態で)。この原因は、大振幅の振動時には供試機の界磁電流が上限に達するためであると考えられる。

すなわち、(1)項の(Ⅲ)で述べたように回転子が加速方向へ向かうとき I_a , I_r は上昇し、 A_1 , A_2 , A_3 な

図 9 振動から脱調へ至る過程の諸量のオシログラム

Fig. 9. Oscillogram of loss of synchronism process.

どの点で最大となり、トルクも最大となる。このトルクが電動機出力を上回って減速エネルギーとなり、回転子を減速させるのであるが、このトルクの最大値は界磁電流の上限で制限され低く抑えられる、すなわち励磁制御系頂上電圧による界磁電流の制限は、振動発散を抑制する効果があると考えられる。

しかし、他方、界磁電流の制限は同期化力を低下させることになる。

(4) 振動から脱調へ (3)項の状態から、更に出力を増し約 10 kW となったとき、振動しながら脱調していった。この振動から脱調へ至る過程のオシログラムを図 9 に示す。このうち、約 3 秒間をデータレコードで解析した結果、ギャップ磁束の変化について ϕ_q - ϕ_d 軌跡の変化の様子を図 10 に示す。A4, B4, A5, B5, A6 をマークする。相差角、回転子速度の変化の図は、紙面の都合で省略する。

(i) 図 9 のオシログラムに見られるように、(2) および (3) 項で現れた激しい振動は、界磁電流に対する制限が、前述のように振動を抑制する効果をもつことから収まりきみとなり、また同期化が減少するので振動周期は長くなり約 1.3 秒となり、緩やかに脱調している。脱調の約 1 秒間では界磁電流は約 8 A 一定となっており、諸量の変化は界磁電流一定時の脱調 (AVR なし) および前論文 I の脱調のケースと類似している。

(ii) 各相差角 δ , δ_i , θ は、(3)項の状態より更に増加し、やがて δ , θ は発散、 δ_i は減少している。

(iii) A4 と A5 のギャップ磁束波形は、第三調波の増加によりひずみが大きくなっており、脱調が近いことを示している。

 図 10 振動から脱調へ至る過程 (I → II → III) での ϕ_q - ϕ_d 軌跡の推移

 Fig. 10. Progress of ϕ_q - ϕ_d loci at the loss of synchronism process.

(iv) 図 10 に示す ϕ_q - ϕ_d 軌跡の変化から、振動から脱調へ移行する過程が明瞭に計測されることがわかる。また、前論文 I の (3) 式で述べた理由によって、 ϕ_q は一定の上限値 ϕ_{qmax} をもっていることが同図からも明らかである。(a) 図に示すように、 ϕ_q の振動の最大値はほぼ $\phi_{qmax} = 0.65$ になっており、安定度余裕はほぼ零である。

(v) 脱調開始点の決定はすべての量が振動しているため困難である。しかし、 P_e , T_e , ϕ_q などの減少と回転子の加速条件との組合せで、ある裕度をもたせて脱調過程に入ったことを判断させることは可能であ

る。

(vi) ギャップ磁束は、 A_4, B_4, A_5, B_5, A_6 というように振動しながら連続的に変化していく。 A_4, A_5, A_6 と順次基本波成分は減少する。 A_6 は基本波成分が最小、第三調波成分が最大となるときで、このときが脱調点である。脱調点で $P_s=0, T_s=0, \phi_s=0$ となる。相差角は $\delta=187^\circ, \theta=91^\circ, \delta_s=3^\circ$ となっている。回転子の加速は 62 Hz にまで達している。

(vii) 非同期状態における、XY 軸上の $\phi_s-\phi_d$ 軌跡は左上りとなっている。この理由は、前論文 I の第 5 章で述べたとおりである。

3. 同期化トルク係数と制動トルク係数の計算による AVR 効果の考察

前論文 I および本論文において、AVR による安定度向上効果および負制動現象による脱調について、ギャップ磁束、回転子速度、その他の関連項目の測定を基に解析した。本章では、発電機の微小変化時の特性式 (Park の式) を基に導出された、いわゆる同期化トルク係数と制動トルク係数の変化を、上記各ケースの実測値を用いて計算し、その計算結果から AVR の効果を考察する⁽²⁾。

以下、(i) 界磁電流一定時 (AVR なしのケース)、(ii) AVR あり (AVR のゲイン $K=30$, 時定数 $T=20$ ms, 前論文 I, 安定度が向上するケース)、(iii) AVR あり [$K=5, T=100$ ms, 本論文 (振動脱調のケース)] について計算した結果を述べる。なお、計算にあたっては、振動角周波数の値を与えなければならない。振動の起こらない(i), (ii)のケースは $\omega=0$ とした。(iii)のケースは、前章でみたように約 1 秒の振動周期で多少の変化がみられる。そこで、計算では振動周期は 1 秒であるとして $\omega=2\pi \times 1=6.28$ rad/s とし、比較のために $\omega=0$ の場合も計算した。

また、計算に用いる発電機および系統が、本来もっている制動力 (D) は次のようにして求めた。すなわち、発電機を界磁電流 5 A 一定、電気出力 5.4 kW で供試系統で運転中、2 回線送電線のうち 1 回線中央で三相短絡事故を起こし、即座に事故回線の両端を開放することによって事故除去したケースで、事故除去後の電力動揺の減衰時定数の測定を基に求めた。結果は 5.71 であった。

上記(i)～(iii)までの各ケースの定常状態における同期化トルク係数の電気出力に対する変化を図 11 に、制動トルク係数の変化を図 12 に示す。また、(iii)のケースについて〈2・2〉節の記述に対応させて ①振動発生直後 (約 6 kW)、②持続振動 (約 6.5 kW)、③

持続振動の進展 (約 8 kW)、④振動から脱調へ (約 10 kW) の 4 点における平均の同期化トルク係数と制動トルク係数を図 13 に示す。

これらの図から、次のことがわかる。

(1) 図 11 に見られるように、(i) は界磁電流一定の場合は、出力増加に伴い同期化力は単調に低下する。AVR ありの場合、(ii) は約 9 kW まで一定の同期化力を維持する。それ以後は急速に低下していく。(iii) は約 6 kW まで一定である。

(2) 図 12 に見られるように、(i) の場合は出力増加と共に制動力が増加する。これは、電機子反作用の効果である。AVR ありの場合、(ii) は若干制動力を減少させるが微小である。(iii) は出力増加と共に急速に制動力が減少し、約 6 kW では発電機および系統が本来もっている制動力をほぼ打消して、弱制動

図 11 同期化トルク係数の計算値

Fig. 11. Calculated values of synchronizing coefficients.

図 12 制動トルク係数の計算値

Fig. 12. Calculated values of damping coefficients.

図 13 振動脱調時の同期化トルク係数と制動トルク係数の変化

Fig. 13. Changes of synchronizing and damping coefficients at the loss of synchronism process.

あるいは負制動の状態となる。

(3) 図 13 に見られるように、(Ⅲ)のケースでは振動発生、持続振動、脱調と進行するに従い、同期化と制動力が減少していく。ただし、同期化力がいったん上昇する(②)のは、(2・2)節で述べたように①から②へ移行するに従い界磁電流が上昇するためである。以後、界磁電流の上昇は頂上電圧で制限されるため、同期化力は減少していく。

以上、第 2 章で述べた AVR による振動発散現象を、発電機出力増加に伴う同期化力および制動力の変

化という観点から論じ、同時に界磁電流一定時および AVR による安定度向上時との相違も明らかにした。

4. む す び

本論文では、AVR によって発電機および系統に固有の制動力が減少し、弱制動あるいは負制動となって振動的に脱調していく過程を、ギャップ磁束、電流、回転子速度などの変化の測定を基に順を追って解析した。本論文で明らかにしたことは、次のとおりである。

(1) 同期機の AVR による負制動現象を、ギャップ磁束および回転子に働くトルクなどの変化に基づいて考察した。

(2) 横軸磁束 ϕ_q の最大値 $\phi_{q\max}$ は、供試系統において AVR の有無にかかわらず、また振動の有無にかかわらず一定であることが試験結果からも確かめられた。従って、このことを利用して任意の運転状態における ϕ_q を計測することにより、過渡動揺時でも安定度余裕を求めることが可能である。

(3) 発電機が振動的に脱調していく過程は、XY 座標上の ϕ_d - ϕ_q 軌跡によって明瞭に監視することができ、かつ脱調を予知することができる。

(4) 同期化トルク係数と制動トルク係数の計算を基に AVR による振動発散現象を論じた。

(昭和 62 年 2 月 26 日受付、同 62 年 8 月 31 日再受付)

文 献

- (1) 上之國・松木・岡田：「空げき磁束による三相同期発電機の脱調現象の解析」，電学論 B，100，41 (昭 55-1)
- (2) F.P. Demello & C. Concordia: "Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, PAS-88, 316 (1969)