2 軸同期発電機の界磁電圧制御による 電力系統の安定化 (続報)

正 員 上 田 隆 三 (九州工大)

正 員 高 田 茂 夫 (九州工大)

1. ま え が き

筆者らは、先に電力の安定供給の確保を目的とする 2 軸同期発電機 (以下、2 軸機という) の界磁電圧の制御法を一機無限大母線系統について検討した結果を報告した⁽¹⁾。これはたとえ機械軸の変動を伴う場合にも 2 軸機が安定な電気出力を供給できることを明らかにしたものであるが、更にこの制御によって、電気系統のみならず 2 軸機自体の安定性も向上できることを実験的に確認している。また、同時に無限大母線に接続した 2 軸機を仮定して決定した制御方策が、無限大母線を有限容量の母線に置換えた場合にも有効に適用できることを明らかにしている。この結果はたびたび多機系統中の特定の発電機の制御効果を調べる場合に、その発電機以外の系統を大容量の発電機で置きかえた 2 機系統として検討することが行なわれていることと関連して、適切な制御法を適用した 2 軸機を既存の多機系統に配置することによって系統の安定性を向上させる可能性を示唆している。

そこで本論文では、この問題に対する手掛りを得る目的で単純化した二つのモデル系統について、本制御法を採用した 2 軸機を配置することによって系統の安定運転領域が拡大できることを計算機シミュレーションおよび実験系統によって確認することができたのでその結果を報告するものである。

ここでは、まず初めに 2 軸機と並列に設置した従来の同期発電機が線路を介して無限大母線に接続している系を構成し 2 軸機の界磁制御によって他方の同期機の安定領域が拡大する様子を明らかにしている⁽²⁾⁽³⁾。

次に多機系統をそれぞれ両ブロックが連系線によ

て連結される二つのブロックに分離して各ブロックを各々従来の同期発電機で代表し、その連系線の間地点に 2 軸機を配置したいわゆる 3 機系統を構成して、その 2 軸機に本制御を適用することによって系統の安定性が改善される様子を明らかにしている。

2. 安定領域の拡大に関する検討

本制御を採用した 2 軸機により多機系統を安定化する問題を考えるためには、2 軸機自体の安定性を明確にしておく必要がある。そこで、ここではまずこの問題を検討し、次に従来の同期発電機の安定範囲の拡大に関する問題を動作点近傍における線形化方程式に基づいて議論し、それに引続いて多機系統の安定化について基本的な考え方を示す。

〈2・1〉 2 軸機自体の安定性 この 2 軸機が無限大母線につながっている場合の電気出力 (P_e , Q_e) および機械軸 (δ) の運動は次式で表わされた⁽¹⁾。

$$\left. \begin{aligned} A_1 \dot{P}_e &= -A_2(P_e - P_{e1}) \\ A_1 \dot{Q}_e &= -A_2(Q_e - Q_{e1}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

$$M \ddot{\delta} + D \dot{\delta} = P_{in} - P_e \dots\dots\dots (2)$$

ここで P_{e1} , Q_{e1} は発電機出力の有効分および無効分の目標値、 M , D はそれぞれ慣性定数および制動係数を表わし、 A_1 , A_2 は系統定数で定まる正の定数で状態値に依存しない。この結果は次のことを示している。すなわち、2 軸機の電気出力は機械軸の変動にもかかわらず常に安定であり、しかもその度合は状態値に依らないので従来の同期発電機に必然的に伴う安定限界は存在せず全域的に同程度の安定性を有している。

なお、比較のために系統方程式を線形化して De Mello 氏ら⁽⁴⁾によって取扱われた手法に基づいて求めた電気出力平面における安定限界の特性を、(i) 従来の同期発電機の場合 (VR only)、(ii) Voltage Regulator & Angle Regulator⁽⁵⁾⁽⁶⁾ (以下 VR & AR という) を行なった場合および (iii) Botvinnik 氏⁽⁷⁾によ

Stabilization of a Power System by Means of Excitation Control of Two-Axis Synchronous Generator (Continued). By Ryuzo Ueda, Member & Shigeo Takata, Member (Kyushu Institute of Technology)

上田隆三: 正員, 九州工業大学工学部

高田茂夫: 正員, 九州工業大学工学部

第 1 図 一機無限大母線系統における安定領域
Fig. 1. Stability limit in one-machine infinite bus system.

って提案されたもので、合成無負荷誘導起電力の位置を無限大母線に対して一定に保つようにした場合についてそれぞれ第 1 図に示す。本制御法以外のいずれの場合も安定限界が存在することがわかる。

なお、この場合の定数は次の通りで一機無限大母線を仮定しており 2 軸機は円筒形とする。

$$x_d=1.6, x_q=0.32, T_{d0}=6\text{ s}, H=5\text{ s}$$

$$\tau_a=\tau_v=0.05\text{ s}, \mu_a=\mu_v=2.0, x_t=0.4$$

〈2・2〉 2 軸機を従来の同期発電機と並列に設置した場合 多機系統の安定性の向上を目指す場合 2 軸機をどこに配置するかを定めることは非常に重要な問題であるが、これを一挙に解決するのは容易ではない。そこでまず第一に考えなければならないことは、従来の同期発電機の近くに 2 軸機を設置した場合、その発電機の安定性の向上に役立つものとなるかどうかということである。

〈2・1〉 節で明らかにしたように本制御を施した 2 軸機自体の安定性は何ら問題にはならないばかりではなく、その機械軸の変動の影響が電気出力に及ばないことを考慮すると、従来の同期機相互間に存在する機械軸の振動に伴う相互作用の影響はなくなるので、この点からも従来の同期発電機の安定性を向上できると考えられる。このことを明確にするために、従来の同期発電機に 2 軸機を並列に設置した系統が無限大母線につながった第 2 図のモデルを考える。ここでは 2 軸機による安定性の向上を、従来の同期発電機の安定運転

第 2 図 系統図

Fig. 2. Model system.

第 3 図 安定範囲の拡大特性

Fig. 3. Extention characteristics of stable range.

範囲が拡大されることと考える。この結果を第 3 図に示す。これは付録に示すように系統方程式を線形化して得た固有値により、安定範囲を求めたものである。このとき用いた定数は 2 軸機に関しては〈2・1〉節に示したものを、同期発電機 (S.G.1) の定数は文献 (4) と同じで次のとおりである。

$$x_d=1.6, x_q=1.55, x_d'=0.32, T_{d0}'=6\text{ s},$$

$$H=5\text{ s}, T_{ex}=0.05\text{ s}, K_{ex}=25$$

$$x_e=0.4 \text{ (線路リアクタンス)}$$

$$2 \text{ 軸機の運転状態 } (P_{e1}=0.3, Q_{e1}=0.5)$$

2 軸機と S.G.1 の定数をほぼ同じにしたのは、同程度の大きさの同期機間の相互作用が一番強く働くと考えられるからである。第 3 図の結果は、既存の発電機の安定範囲が 2 軸機を並列設置することにより拡大できることを示している。ここで用いた 2 軸機の容量は S.G.1 と同程度であるが、文献 (1) の実験結果から安定性のみに着目するならば 2 軸機の容量は S.G.1 の数分の 1 でよいことが示されている。なお図の点線は 2 軸機を無制御の一定励磁にした場合の S.G.1 の安定範囲を示しているが最も狭くなっており、2 軸機の

第 4 図 分割された多機系における
2 軸機の設置

Fig. 4. Location of two-axis machine in divided multi-machine power system.

制御効果は S.G.1 をより安定化するように働くと考えられる。

〈2・3〉 2 軸機の配置に関する基本的な考え方

2 軸機により従来の同期発電機の安定性を向上できることを示したが、次に配置に関する基本的な考え方を示す。

多数の発電機群から構成されている電力システムはいくつかのブロックに分割して考えることができる。その最も基本的な形は、系統が二つのブロックに分割できる場合である。そこで 2 軸機を第 4 図に示すように両ブロックに分けた連系線の中に設置して、いずれかまたは分割した両方の系統で発生した事故により、連系が不能に陥る場合に 2 軸機の設置によって系統全体を安定化できることが示されるならば、配置の問題に関しある程度の目安を与えることができたと考えられる。このことが可能なことを直接模擬実験システムを用いて示す。

3. 模擬実験システムによる検討

〈3・1〉 2 軸機自体の安定性 本制御を行なった 2 軸機自体の安定性に関しては、既に 〈2・1〉 節で述べたように全域的に安定でありその度合は系の状態に依存しないことがわかった。その根底にあるものは機械

軸の変動の影響が電気出力に及ばないようになっていることであり、そのことは文献(1)の実験結果によっても明確に示されている。この性質が多機系の安定性向上に有効に働くものと考えられる。

〈3・2〉 従来の同期発電機の安定範囲の拡大に関する実験的検討 本制御を施した 2 軸機を従来の同期発電機に並列接続すると、その発電機の安定範囲が拡大されることを 〈2・2〉 節で示した。これを実験により明確にするために第 2 図に対応する第 5 図の系統を構成する。実験系統の定数などは次の 〈3・3〉 節に示すのでここではその概要を説明する。図の S.G.1 は 220 V, 60 Hz, 25 kW の同期電動機を発電機として用いたもので励磁機としてのアンブリダインには AVR 作用を持たせてありその特性はほぼ一次遅れで表わされる。この発電機を駆動する直流機は 110 V, 228 A, 25 kW の定格を有し静止レオナードで速度制御しておりガバナ効果を持たせている。実験系の線路側電圧は線間 200 V に設定して、発電機端子電圧は実験設備の都合上変圧器で 100 V (線間) に落している。

一方、2 軸機は文献(1)で用いたもので 250 V, 60 Hz, 2.4 kVA でこれは 200 V の線路に直接つながっている。この実験で用いた実験機の定数などは必ずしも現実の系統と対応するものになっていないが本制御法の有効性を確認するには十分であると考えられる。この系に与える外乱としてスイッチ S を短時間 (0.4 s) 開放して再閉路した。なおここで設定した開放時間 0.4 s は 2 軸機の設置前の系統が運転不能の状態となるような開放時間として設定した。その実験結果を第 6 図 (a) および (b) 図に示す。(a) 図は本制御を施した場合、(b) 図は VR & AR を施した場合である。(b) 図の場合には脱調しているが本制御を行なった場合には系統の安定性が保たれており、2 軸機が他系統の安

第 5 図 実験系統図

Fig. 5. Laboratory test model.

第 6 図 実験結果

Fig. 6. Experimental results.

定性の向上に貢献できることを示している。その際 2 軸機の機械軸は外乱の大きさに対応して一定の方向に単調に動いているが、系統全体としての安定性を効果的に向上している。また、2 軸機は速度変動分は直接制御電圧に影響するものであるが十分抑制されているので、制御電圧は頂上値内にあり制御効果を高めている。2 軸機には界磁時定数を調整する回路を付加しているが、 T_{d0}' として 1 s が限度であった。なおこの

ときの定常状態は次のとおりである。

$$(S.G.1) \quad P_{g,SG1} = 2.22 \text{ kW}, \quad Q_{g,SG1} = 0.22 \text{ kVar}, \\ e_{i1} = 198 \text{ V}$$

$$(2 \text{ 軸機}) \quad P_g = 0.0 \text{ kW}, \quad Q_g = 0.77 \text{ kVar}, \\ e_i = 200 \text{ V}$$

〈3.3〉 分割した系統の連系線 の中間に 2 軸機を設置した場合 ここでは〈2.3〉節で述べた考え方を実験的に確認しようとするものである。分割した系統を

第 7 図 分割した系の実験系統

Fig. 7. Laboratory test model of divided power system.

第 1 表 系統定数など

Table 1. System constants.

S. G. 1 に関して (220 V, 60 Hz, 25 kW)
$x_d=0.5 \Omega$, $x_q=0.47 \Omega$, $T_{d0}'=0.41 \text{ s}$, $T_{d1}'=0.064 \text{ s}$, $H=0.5 \text{ s}$
S. G. 2 に関して (200 V, 60 Hz, 11 kVA)
$x_d=3.47 \Omega$, $T_{d0}'=0.303 \text{ s}$, $T_{d1}'=0.074 \text{ s}$, $H=1.74 \text{ s}$
2 軸機に関して
$x_s=34.04 \Omega$, $T_{d0}'=1.0 \text{ s}$, $T_{d1}'=0.12 \text{ s}$, $H=5.54 \text{ s}$
線路に関して
$x_{e1}=4.64 \Omega$, $x_{e2}=5.38 \Omega$, $x_{e3}=21.6 \Omega$

第 2 表 初期定常状態

Table 2. Initial steady state.

	電 気 出 力		端 子 電 圧 (線 路 側) e_t (V)
	P_g (kW)	Q_g (kVar)	
S. G. 1	0.67	0.30	203
S. G. 2	0.75	1.32	190
2 軸機	0.05	0.10	197

一台の発電機で代表させた第 7 図の系統を構成する。図に示す線路リアクタンス (x_{e3}) 21.6 Ω は無限大母線との結びつきをできる限り弱くして 3 機系統に近づ

けると共に系統周波数を 60 Hz 一定に保ち易くするものである。この系統の定数を第 1 表に示す。S. G. 2 としては 200 V, 60 Hz, 11 kVA の同期発電機を用いてその端子電圧を変圧器で 100 V に落としている。この

第 8 図 実験結果

Fig. 8. Experimental results.

第 8 図

Fig. 8.

系統の初期定常状態の値は第2表に示すとおりである。これら一連の実験を通して2軸機の出力を零に設定したのは、系統を2軸機を設置する以前の状態に保ち、これが本制御を施した2軸機によりどのように安定されるかを示そうという目的のためである。

なお外乱としては〈3・2〉節と同様にしてスイッチSの短時間開放再閉路により与えた。そのときの実験結果を第8図(a), (b), (c), (d)に示す。(a)図は本制御を行なった場合、(b)図および(c)図はそれぞれVR & ARを施した場合および従来の同期発電機に対応してVRのみを施した場合である。なお(d)図は2軸機を取除いた場合である。(b), (c)図および(d)図はいずれの場合も脱調しているが本制御を施した場合には系統全体を安定化していることを示している。すなわち、2軸機を設置する以前の系統が運転不能の状態になるような場合に、従来の同期機の設置では安定化されず本制御を適用した2軸機により安定化されることを示している。

4. む す び

本論文では本制御を施した2軸機により多機系統全体の安定性向上に貢献できる可能性を示すと共に、配置の問題に対しても一応の手掛りを与えることができた。また、実験結果が示すように外乱に伴って2軸機の機械軸の速度変動分は十分抑制されているが単調な動きをするので、これをできる限り抑えるために慣性定数を大きくする必要がある。また、界磁電圧は速度変動分の関数でもあるから、界磁電圧の制御性の点から慣性定数を大きくすることが望ましい。また制御効果を発揮するためには界磁時定数をできる限り短くすることが望ましいが、これは実規模の2軸機的设计に際して十分検討しなければならないと考えている。

最後に本研究を進めるにあたり御検討を頂いた九州大学工学部電気工学科 相良節夫教授、実験に協力された本学工学部第2部電気工学科 園田敏勝助手、院生原田信康君ならびに研究室の方々に深く感謝します。

(昭和55年2月14日受付, 同55年7月7日再受付)

文 献

- (1) 上田・高田: 電学論B 99, p. 667 (昭54-10)
- (2) 上田・高田・原田: 昭54 電気学会九州支部連大 p. 236
- (3) 上田・高田・原田: 昭55 電気学会全大 867
- (4) F.P. de Mello & C. Concordia: *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.* PAS-88, p. 316 (1969-4)
- (5) M.R. Murthi, D. William & B.W. Hogg: *Proc. Inst. Elect. Engrs* 117, 1799 (1970-9)
- (6) P. Subramaniam & O.P. Malik: *ibid* 118, 1784 (1971-12)
- (7) M.M. Botvinnik: "Asynchronous Synchronous Machine" (Book) Pergamon Press (1964)

付 録

系統方程式の導出と線形化 第2図においてS.G.

1 および2軸機に対する各回転子軸での電気的特性は次式で表わされる。

S.G. 1 に対しては次のように表わされる。

$$e_{t1}^2 = e_{d1}^2 + e_{q1}^2 \quad \dots\dots\dots (付1)$$

$$\left. \begin{aligned} e_{d1} &= x_{q1} i_{q1} \\ e_{q1} &= e_{q1}' - x_{d1}' i_{d1} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (付2)$$

$$T_{d01}' \frac{d e_{q1}'}{d t} = e_{fd1}' - e_{q1}' - (x_{d1} - x_{d1}') i_{d1} \quad \dots\dots\dots (付3)$$

$$T_{e1} = e_{q1}' i_{q1} + (x_{q1} - x_{d1}') i_{d1} i_{q1} \quad \dots (付4)$$

$$M_1 \ddot{\delta}_1 = T_{in} - T_{e1} \quad \dots\dots\dots (付5)$$

励磁機としてサイリスタ形を仮定して

$$\Delta e_{fd1}' = \frac{K_{ex}}{1 + s T_{ex}} (e_{t1,r} - e_{t1}) \quad \dots\dots\dots (付6)$$

$e_{t1,r}$: e_{t1} の目標値, s : Laplace 演算子

2軸機に対しては円筒形を仮定しているので次のように表わされる⁽¹⁾。

$$\left. \begin{aligned} e_d &= e_d' + x_s' l_q \\ e_q &= e_q' - x_s' l_d \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (付7)$$

$$e^2 = e_d^2 + e_q^2 = e_{t1}^2 \quad \dots\dots\dots (付8)$$

$$\left. \begin{aligned} T_{d0}' \frac{d e_d'}{d t} &= -e_{fd}' - e_d' + (x_s - x_s') l_q' \\ T_{d0}' \frac{d e_q'}{d t} &= e_{fd}' - e_q' - (x_s - x_s') l_d \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (付9)$$

$$T_e = e_d' l_d + e_q' l_q \quad \dots\dots\dots (付10)$$

$$M \ddot{\delta} = T_{in} - T_e \quad \dots\dots\dots (付11)$$

VR & AR は次式で表わされる。

付第1図 座標軸間の関係

appl. Fig. 1. Relations between coordinate systems.

$$\left. \begin{aligned} e_{fd}' &= \frac{\mu_v(e_{tr} - e_t)}{1 + \tau_v s} \\ e_{fq}' &= \frac{\mu_a(A + \delta)}{1 + \tau_a s} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (付11)$$

同期速度で回転する座標系 (D - Q 軸) と各回転子軸上に設けた座標系 (d_1 - q_1 軸および d - q 軸) との関係は付第1図に示すように次式で与えられる。

$$\begin{bmatrix} f_D \\ f_Q \\ g_D \\ g_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta_1 & -\sin \delta_1 & 0 & 0 \\ \sin \delta_1 & \cos \delta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \delta & -\sin \delta \\ 0 & 0 & \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{d1} \\ f_{q1} \\ g_d \\ g_q \end{bmatrix} \dots\dots\dots (付12)$$

送電線に関しては D - Q 軸で次式が成立する。

$$\left. \begin{aligned} e_D &= e_{vD} - x_e l_{sQ} \\ e_Q &= e_{vQ} + x_e l_{sD} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (付13)$$

$$\left. \begin{aligned} l_{sD} &= l_{D1} + l_D \\ l_{sQ} &= l_{Q1} + l_Q \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (付14)$$

これらの方程式を動作点のまわりで線形化し、状態変数 x として

$$x^T = [\Delta e_{q1}', \Delta e_{fd1}', \Delta \delta_1, \Delta \dot{\delta}_1, \Delta e_d', \Delta e_q', \Delta \delta, \Delta \dot{\delta}, \Delta e_{fd}', \Delta e_{fq}'] \dots\dots\dots (付15)$$

を選ぶと

$$\dot{x} = Ax \dots\dots\dots (付16)$$

を得るので、この A の固有値により安定限界を求める。

〔記号〕

x_d, x_q : 直軸および横軸同期リアクタンス,
 x_d' : 過渡リアクタンス, T_{d0}', T_{d1}' : 界磁開
 路および閉路時定数, H : 単位慣性定数,
 μ_v, μ_a : VR & AR における Exciter の利得,
 τ_v, τ_a : VR & AR における Exciter の時定数