電力系統における可変速揚水発電電動機の 系統安定度向上に関する研究

正員 道上 勉 (東京電力) , 正員 小柳 薫 (東芝)

The Improvement of Power System Stability of An Adjustable-Speed Pumped-Storage Generator/Motor
Tsutomu Michigami, Member (Tokyo Electric Power Co.); Kaoru Koyanagi, Member (Toshiba Co.)

To adjust a frequency during midnight or while an electric power system is carrying a light load, an AC excitation synchronous machine is recently being used in place of the conventional fixed-speed synchronous machine as the generator/ motor at a pumped-storage power station. The use of this synchronous machine makes it possible to adjust the rotor speed and to use its inertial energy. We have prepared this paper to show how we can improve the power system stability by using the highly responsive control of the terminal voltage and the active electric power control through the AC excitation control of this adjustable-speed machine. The abstract of this paper can be summarized as follows:

(1) We can enlarge the zone of stable operation by performing terminal voltage and active power control along with current control for the AC excitation of an adjustable-speed machine.

(2) As the stability analysis model of an adjustable-speed machine, we can use an AC excitation wound-rotor induction motor. We were able to verify the effectiveness by comparing simulations with the results of the transmission system simulator.

(3) We can substantially improve the system stability by absorbing the power swing of the fixed-speed machine with the adjustable-speed machine, thereby decreasing it.

(4) The effect produced by the adjustable-speed machine for the improvement of the power system stability is more prominent in the transient stability than in the dynamic stability and also more so in the pumping operation than in the generating operation.

キーワード: 揚水可変速発電電動機, 交流励磁制御, 模擬送電線試験, 系統安定度向上

1. まえがき

深夜、軽負荷時の電力系統の周波数調整は、現行の揚水発電所がポンプ特性上、揚程に応じ案内羽根開度を固定した揚水電力一定で運転しているため、周波数調整力として活用できず、主として火力発電所の部分負荷でのAFC運転により、その所要量を確保している。しかし最近、電源構成として原子力発電比率の増加に伴い、その原子力発電所を経済性から定格出力の一定運転とする。このため、火力発電所はAFC運転ができない最低運転出力、又は毎日起動停止(DSS)を余儀なくされ、AFC調整量が不足する状況となってきた。このAFC調整量の確保策として揚水発電所の揚水運転中の発電電動機を従来の直流励磁同期機から交流励磁同期機に変え回転子の回転速度を可変運転することにより、揚水ポンプの揚水電力をかわることができ、それをAFC調整力として利用できる。その開発、導入が進められている。⁽¹⁾⁽²⁾この可変速揚水発電電動機(以下可変速機と称する)は前記のようにAFC調整力として電力系統へ適用されることとなるが従来の

定速同期機と異なり回転速度が可変となるため、それ自体は安定度上の問題がなく、しかも応答の速いサイクロコンバータなどによる交流励磁制御が行われる。このため系統安定度面から見た場合、可変速機を適用した周辺系統の従来形定速同期機の安定度を可変速機により改善させ周辺系統全体の安定度を向上させることが可能となる。

本論文では、この可変速機による系統安定度向上に着目し、可変速機の交流励磁による回転速度と無効電力制御の基本の考え方、系統安定度を解析するための解析用モデルの理論的考察、系統安定度向上の基本特性を得るための二機対無限大系統を用いた解析シミュレーション結果、模擬送電線実験による系統安定度向上効果と解析用モデルの検証結果を述べ、最後に実系統規模モデルによる系統安定度向上効果の解析シミュレーション結果について報告する。

2. 交流励磁による回転速度制御と無効電力制御の基本 の考え方

<2.1> 二次励磁による回転速度制御 交流励磁同期機は誘導機を二次励磁したものと見なすことができる。い

ま、ドット文字をベクトル量、ドットなし文字をスカラー量で表すものとし、誘導機が電動機運転（揚水運転相当）で滑り s ($s > 0$: 同期速度以下) の状態において、二次誘導電圧 $\dot{E}'$ と同位相の二次励磁電圧 $\dot{E}_2$ なる電圧を二次回路に挿入したベクトル図が図 1 (a) である。二次電流 $\dot{I}_2$ は二次励磁電圧を加えない場合に比べ、二次電圧が $s\dot{E}' + \dot{E}_2$ となり増加する。このため、電気トルク T_e が負荷トルクの要求する以上に大きくなり、回転速度は上昇し、滑り s が小さくなる。その結果、 $s\dot{E}'$ が小さくなり、 $\dot{I}_2$ が減少し、負荷と平衡する。 $\dot{E}_2$ の大きさによっては、 $s < 0$ となって、同期速度以上となる場合もある。

一方、 $\dot{E}'$ と逆位相の $\dot{E}_2$ を二次回路に挿入したときのベクトル図が図 1 (b) である。このときの二次電圧は $s\dot{E}' - \dot{E}_2$ となり、二次電流 $\dot{I}_2$ が減少して電気トルク T_e が負荷トルクより小さくなる。この結果回転速度が低下して滑り s が大きくなり $\dot{I}_2$ が増え電気トルクを増加させ負荷と平衡を保つ。これらを $\dot{E}'$ を基準とし式で表すと二次電流 $\dot{I}_2$ 、電気トルク T_e は

$$\dot{I}_2 = \frac{s\dot{E}' \pm \dot{E}_2}{r_2 + jsX_2} \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$T_e = mE' I_2 \cos \theta_2 = mr_2 E' \frac{sE' \pm E_2}{r_2^2 + s^2 X_2^2} \quad \dots\dots\dots(2)$$

ただし、 m : 相数、 θ_2 : 二次力率

r_2 : 二次抵抗、 X_2 : 二次リアクタンス

となる。いま、負荷トルクを T_0 (一定)、 $E_2 = 0$ のときの滑りを s_0 とし、 E_2 を加えたときの滑りの変化量 Δs は (2) 式から導出 (付録) でき、次式で表される。

$$\Delta s = \mp \frac{mr_2 E'^2}{(mr_2 E'^2 - 2X_2^2 T_0 s_0)} \cdot \frac{E_2}{E'} = \mp k \frac{E_2}{E'} \quad \dots\dots\dots(3)$$

ただし $k = 1 / \{1 - (2X_2^2 T_0 s_0 / mr_2 E'^2)\}$

(3) 式より、 E_2 を調整することにより滑りの変化分 Δs 、つまり回転速度を制御することができる。

図 1 $\dot{E}'$ と $\dot{E}_2$ (同、逆位相) のベクトル図
Fig.1. The vector diagram of $\dot{E}'$ and $\dot{E}_2$
(0 and π phase)

<2.2> 二次励磁による無効電力制御 いま、二次回路に $\dot{E}'$ より $\pi/2$ 位相が異なる電圧 $\dot{E}_2$ を加えた場合を考察する。 $\dot{E}'$ より $\pi/2$ 進みの $\dot{E}_2$ を加えたベクトル図が

図 2 (a) で、逆に $\pi/2$ 遅れの $\dot{E}_2$ を加えたベクトル図が図 2 (b) である。これにより、二次電流 $\dot{I}_2$ は次式となる。

$$\begin{aligned} \dot{I}_2 &= \frac{s\dot{E}' + j\dot{E}_2}{r_2 + jsX_2} = \frac{(s\dot{E}' \pm j\dot{E}_2)(r_2 - jsX_2)}{r_2^2 + s^2 X_2^2} \\ &= \frac{s(E'r_2 \pm E_2 X_2) - j(s^2 X_2^2 E' + r_2 E_2)}{r_2^2 + s^2 X_2^2} \quad \dots\dots\dots(4) \end{aligned}$$

$\dot{I}_2$ の虚数分 I_{21} が、一次励磁電流と同相の成分となり、無効電力と密接な関係を有する。その I_{21} は

$$I_{21} = \frac{s^2 X_2^2 E' + r_2 E_2}{r_2^2 + s^2 X_2^2} \quad \dots\dots\dots(5)$$

となる。つまり、 $\dot{E}_2$ が $\dot{E}'$ より $\pi/2$ 進みの場合は I_{21} が減少し、一次励磁電流が少なくてすみ、誘導機の遅れ無効電力が減少する。なお、 $E_2 \geq s^2 X_2^2 E' / r_2$ の場合は、無効電力は 0 から進みに変わることを示す。

また、 $\dot{E}_2$ が $\dot{E}'$ より、 $\pi/2$ 遅れの場合は I_{21} が増加し、一次励磁電流が大きくなり誘導機の遅れ無効電力が増える。このように二次励磁として加えた $\dot{E}_2$ の位相の方向と大きさを变化させることにより誘導機の無効電力を調整することが可能となる。

図 2 $\dot{E}'$ と $\dot{E}_2$ ($\pm\pi/2$ 位相) のベクトル図
Fig.2. The vector diagram of $\dot{E}'$ and $\dot{E}_2$
($\pm\pi/2$ phase)

以上をまとめると誘導機の二次側に加えた二次誘導電圧 $\dot{E}'$ を基準位相とし、励磁電圧 $E_2 e^{j\theta}$ のうち、 $E_2 \cos \theta$ は回転速度制御のための電圧となり $E_2 \sin \theta$ は無効電力制御のための電圧となる。

3. 可変速機の交流励磁システムの構成

実際の可変速機の交流励磁システムの構成は図 3 のように発電電動機端子から励磁変圧器を介して、サイクロコンバータや GTO に供給され、これらの装置により二次滑り周波数 ($0 \sim \pm 4$ Hz 程度) に変換した励磁電圧 $\dot{E}_2$ を回転子に加え、励磁電流を得る構成と成っている。前述のとおり、このサイクロコンバータや GTO のゲートを制御し、二次励磁電流をえることにより発電機の有効電力や端子電圧を制御することが可能で有効電力制御 (APR) 系は q 軸電流制御 ($\dot{E}'$ と同、逆位相)、電圧制御 (AVR)

系はd軸電流制御 (E' と $\pm \pi/2$ 位相) により行われる。

また、発電機の有効電力を一定に保つためには回転子位置 (滑り s) に応じて二次励磁電流を変え、q軸電流を一定とする必要があるため、位相検出器が備えられている。

図3 可変速揚水発電電動機のシステム構成図

Fig.3. System diagram of adjustable-speed pumped-storage generator/motor

4. 可変速機の安定度上の理論的考察

ここでは可変速機の回転子の交流励磁電流制御と安定度の関係の理論的考察⁽³⁾を行う。

<4.1> 可変速機の過渡特性の基本式 可変速機構造上回転子が滑り周波数で交流励磁されている以外は巻線形誘導機と基本的には同じである。この発電機の過渡特性の基本式は、図4のモデルで、固定子の過渡現象を無視すると平衡運転状態に対して次式のように導出⁽⁴⁾される。

$$p\dot{E}' = \omega_0 \left(\frac{X_m}{X_m + X_2} \right) j\dot{E}_2 - j\omega_0 s \dot{E}' - \frac{1}{T_{d0}'} \{ \dot{E}' - j(X_s - X') \dot{I}_1 \} \quad \dots (6)$$

$$\dot{E}_1 = (r_1 + jX') \dot{I}_1 + \dot{E}' \quad \dots (7)$$

$$\dot{I}_2 = - \left(\frac{X_m}{X_m + X_2} \right) \dot{I}_1 - j \frac{1}{X_m} \dot{E}' \quad \dots (8)$$

ただし $\dot{E}'$: 内部誘導起電力 (回転子磁束比例量)

$\dot{E}_1$: 発電電動機電圧, $\dot{E}_2$: 交流励磁電圧

$\dot{I}_1$: 発電電動機電流, $\dot{I}_2$: 交流励磁電流

ω_0 : 定格角周波数, X' : 過渡リアクタンス

r_1 : 固定子抵抗, T_{d0}' : 回転子開路時定数

X_m : 相互リアクタンス, $p (=d/dt)$: 微分演算子

X_2 : 回転子リアクタンス, s : 滑り

X_s : 固定子自己リアクタンス

また、発電電動機の出力 P_1 と運動方程式は、

$$P_1 = \text{Re} \{ \dot{E}_1 \times \dot{I}_1^* \} \quad \dots (9)$$

$$p s = - \frac{1}{M} (T_1 - T_L) \quad \dots (10)$$

$$T_1 = \text{Re} \{ \dot{E}' \times \dot{I}_1^* \} \quad \dots (11)$$

ただし、 T_1 : 電機トルク, T_L : 負荷トルク

可変速機

図4 可変速機モデル

Fig.4. The adjustable-speed machine model

M: 慣性定数, *は共役を示す。

<4.2> 一機対無限大系統モデルの解析式 いま図5のような一機対無限大系統モデルで、固定子の抵抗 r_1 を無視すると $\dot{I}_1$ は次式で求められる。

$$\dot{I}_1 = \frac{1}{j \{ X' + (1 - Y_c X_c') X_e \}} (\dot{E}_s - (1 - Y_c X_c') \dot{E}') \quad \dots (12)$$

(12)式を(6)式に代入して整理すると、

$$T_d' p \dot{E}' = \omega_0 \left(\frac{X_m}{X_m + X_2} \right) T_d' j \dot{E}_2 - (1 + j \omega_0 s T_d') \dot{E}' + \frac{X_s - X'}{X_s + (1 - Y_c X_s) X_e} \dot{E}_s \quad \dots (13)$$

ただし、 $T_d' = \frac{X' + (1 - Y_c X_c') X_e}{X_s + (1 - Y_c X_s) X_e} T_{d0}'$ 閉路時定数

図5 一機対無限大母線系統モデル

Fig.5. A one-machine infinite-bus power system

以上の諸式は図6のような直交座標上で表される。

(13)式を直交座標系で表せば次式となる。

$$T_d' p E_R' = - \omega_0 \left(\frac{X_m}{X_m + X_2} \right) T_d' E_{2I} - \omega_0 s T_d' E_{1I}' - E_R' + \frac{X_s - X'}{X_s + (1 - Y_c X_s) X_e} E_s \quad \dots (14)$$

$$T_d' p E_{1I}' = - \omega_0 \left(\frac{X_m}{X_m + X_2} \right) T_d' E_{2R}' + \omega_0 s T_d' E_R' - E_{1I}' \quad \dots (15)$$

いま、解析する二次励磁の制御方式として

(1) 電流 $I_0 (= I_1 + I_2)$ の一定制御

(2) 発電電動機電圧 E_1 の一定制御

(3) 発電電動機出力 (滑り s) P_1 の一定制御

を考え図7の比例、積分制御が行われるものとする。

実際の可変速機は図3に示すように有効電力指定値 P_1^* に応じて案内羽根開度や高効率となる速度指定値 ω^* を設定する制御系を装備しているが、今回の解析ではこれらの

図6 $\dot{E}_1$, $\dot{E}'$, $\dot{E}_2$ の直交座標ベクトル
Fig. 6. $\dot{E}_1$, $\dot{E}'$, $\dot{E}_2$ vector of orthogonal coordinates

図7 交流励磁の制御ブロック図
Fig. 7. Transfer function block diagram of AC excitation

応動は無視した。

<4.3> モデルの安定判別 (14)(15)式などの発電動機と系統に関する状態方程式と図7の交流励磁の制御関数を含めて、ある運転点からの微小変化分の関係を、まとめると次式の状態方程式が得られる。

$$pX = AX \quad \dots\dots\dots(16)$$

ただし、A : 係数行列 X : 状態ベクトル

ここで、モデルの安定性を示す係数行列Aの固有値 λ はIを単位行列として次式から求められる

$$|A - \lambda I| = 0 \quad \dots\dots\dots(17)$$

<4.4> モデルの数値計算例 図5のモデルにおいて表1の系統、発電動機定数を(17)式に代入して、表2の初期条件と、制御方式を種々変えた場合の安定性(固有値)を解析した結果が、表3、4である。

(1) 一定励磁の場合が表3で、滑り $s = 0.0$ では安定で

あるが、 $s = +0.05$ で単調発散(電圧不安定⁽⁵⁾)、 $s = -0.05$ で振動発散となっている。

(2) 電流 $I_0 (=I_1 + I_2)$ 一定制御の場合が表4(a)で、定励磁に比べ安定運転領域が広がり滑り $s = +0.05 \sim -0.10$ の範囲で安定となっている。ただし、 $s = +0.10$ では単調発散(電圧不安定)となり安定な運転は行えない。

(3) $I_0 + E_1$ 制御の場合が表4(b)で、更に安定運転領域が広がり I_0 制御のみでは不安定であった $s = +0.10$ でも十分安定に運転が可能となる。これは E_1 制御、つまり発電電動機のAVR運転により電圧不安定が解消されたものと考えればよい。

(4) $I_0 + E_1 + P_1$ 制御の場合が表4(c)で、 $I_0 + E_1$ 制御と同様、滑り $s = +0.10 \sim -0.10$ の範囲で安定を保っている。

なお、減衰時定数の大きい実根は、滑りの変動に基づくものであり制御上問題とはならない。

以上のように、外部リアクタンス $X_e = 0.2$ p.u. の定励磁で不安定であったものが、交流励磁として電流制御に発電電動機電圧制御や出力制御を加えることにより外部リアクタンス $X_e = 0.8$ p.u. でも十分安定に運転でき安定領域の拡大が図れることを確認できた。

表1 系統・発電電動機機の定数

Table 1. Parameters of power system and generator/motor

r_1	X_1	X_2	r_2	X_2	X_m	X'	T_{d0}	Y_c	M
0.0	0.12	5.01	0.00138	0.133	4.89	0.25	11.59s	0.0	5.0s

(自己容量ベース p.u. 値)

表2 解析ケースの初期条件と制御方式

Table 2. Initial condition and control system for simulation studies

$X_e = 2$ p.u. $E_1(0) = P_1(0) = E_2(0) = 1.00$ p.u.	無制御(定励磁)
$X_e = 8$ p.u. $E_1(0) = P_1(0) = E_2(0) = 1.00$ p.u.	I_0 , $I_0 + E_1$
$K_1 = -10$, $T_1 = 5s$, $K_2 = -21$, $T_2 = 5s$, $K_3 = K_4 = 1.0$	$I_0 + E_1 + P_1$ 制御

表3 一定励磁の解析結果

Table 3. Simulation results of fixed-excitation

初期値		安定性(固有値)	
$s(0)$	$E_2 \angle \delta_2(0)$		
0.05	$0.053 \angle -26.0$	2.19	$-2.09 \pm j19.6$
0.0	$0.0015 \angle -175$	-1.00	$-0.50 \pm j11.5$
-0.05	$0.055 \angle -156$	-2.92	$0.459 \pm j19.6$

表4 I_0 , $I_0 + E_1$, $I_0 + E_1 + P_1$ 制御の解析結果

Table 4. Simulation results of I_0 , $I_0 + E_1$, $I_0 + E_1 + P_1$ excitation control

初期値		安定性(固有値)							
$s(0)$	$E_2 \angle \delta_2(0)$	(a) I_0 制御		(b) $I_0 + E_1$ 制御		(c) $I_0 + E_1 + P_1$ 制御			
0.10	$0.117 \angle -66.3$	0.098	$-55.4 \pm j32.0$	-0.296	-19.5	$-45.4 \pm j28.4$	-0.00884	$-5.98, -22.4$	$-41.3 \pm j33.2$
0.05	$0.058 \angle -66.9$	-0.177	$-55.2 \pm j16.3$	—	—	—	—	—	—
0.0	$0.0017 \angle 162$	-0.519	$-55.3, -54.8$	-0.519	-54.8	$-40.9, -14.7$	-0.00915	$-15.6, -39.9$	$-40.9, -14.7$
-0.10	$0.120 \angle 115$	-0.892	$-54.9 \pm j31.1$	$-13.5 \pm j1.47$	$-54.1 \pm j38.3$	—	-0.00946	$-4.24 \pm j8.19$	$-51.3 \pm j41.3$

5. 可変速機の系統安定度向上の基本特性解析

二機対無限大系統を用いて可変速機による系統安定度向上の基本特性を得るための解析シミュレーション⁽⁶⁾を行った。

〈5.1〉解析系統 図8のような大容量火力・原子力発電所の長距離送電線の中に揚水式水力発電所を接続し、火力・原子力と揚水式水力間は2回線1ルート(A線路)、揚水式水力と無限大系統間は2ルートの送電線(B線路)で構成されている系統とした。

〈5.2〉解析条件 初期潮流を図8とし

(a) 系統外乱: B線路の1回線3LG主保護遮断(事故継続70ms間とし、その後3LO)

(b) 解析ケース: 揚水式水力の発電電動機の形式並びに制御定数を変えた表5の各ケース

また、可変速機の制御系はd軸電流成分で電圧制御を、q軸電流成分で回転速度制御とした。(図3)

表5 二機対無限大系統での解析ケース

Table 5. Simulation cases of a two-machine infinite-bus power system

ケース	①	②	③
発電電動機の形式	定速同期機 (速応AVR)	高応答可変速同期機 ($G_p(p)=-10$)	低応答可変速同期機 ($G_p(p)=-1$)

〔注〕 $G_p(p)$: 速度制御系比例ゲイン

図8 二機対無限大系統モデルと初期状態

Fig. 8. A two-machine infinite-bus power system model and initial condition

〈5.3〉解析結果 各解析ケースにおけるシミュレーション結果が図9(a)～(c)である。これから

(1) 図9(a)は、揚水式水力が定速同期機のケース①で特に、火力・原子力機の電力動揺が著しくなり2.5秒付近で脱調を起こしている。

(2) 図9(b)は、可変速機が高応答制御のケース②で、火力・原子力機は大きな電力動揺を繰り返す、振動発散状況となっている。可変速機は高応答制御により、ほぼ一定の出力を保っているが、火力・原子力機の電力動揺を若干吸収する傾向がみられる。

図9 定速同期機と可変速機のシミュレーション比較

Fig. 9. Comparison of simulation result a

fixed-speed and an adjustable-speed machine

(3) 図9(c)は、可変速機が低応答制御のケース③で、可変速機は速度制御を低応答にすることにより、可変速機が火力・原子力機の電力動揺を吸収するために抑制され3波で完全に収束している。

つまり、長距離送電系統の中間点に可変速機を接続することにより定速同期機に対する安定度効果が向上し、また可変速機は速度制御を高応答とするよりも、低応答とした方が定速同期機の安定効果が大きいことが確認できた。これは定速同期機と可変速機との間の過渡的な電力の授受により、定速同期機の回転子の加速、減速を抑制し、安定効果を向上させることによる。ただし、可変速機は速度制御を強めすぎると相互の電力授受が円滑に行われなくなり安定効果が低下する。この現象は、電圧一定制御と電力授受の機能を備えたSME S⁽⁷⁾⁽⁸⁾に似ているといえる。

6. 可変速機の系統安定度向上効果の実験と系統解析用モデルの検証⁽⁹⁾

可変速機による長距離大容量送電系統の系統安定度向上効果を調べるため、実系統規模の長距離大容量送電線の中間母線に可変速機が接続された場合の、3kV模擬送電線に100kVA級の可変速機並びに定速同期機を接続した試験回路で実験を行った。また、この模擬送電線の実験結果と4章

図 10 模擬送電系統

Fig. 10. Simulation model of transmission system

表 6 定速同期機と可変速機の諸定数
Table 6. Parameters of the fixed and adjustable-speed machine

定速同期機		可変速機	
容量	120kVA, 220V, 4P, 1500rpm	容量	87.3kVA, 231V, 4P, 50HZ
$X_d = 1.42$	$X_q = 1.14$	二次定格	800V-63A
$X_d' = 0.269$	$X_d'' = 0.12$	$r_1 = 0.021$	$X_1 = 0.107$
$X_q'' = 0.246$	$X_2 = 0.11$	$r_2 = 0.0214$	$X_2 = 0.113$
$r_a = 0.026$	$T_d' = 5.0s$	$X_m = 1.84$	$T_d' = 5.0s$
$T_{d0}'' = 0.055s$	$T_{d0}' = 0.098s$	$H = 2.85s$	
$H = 2.78s$		巻線比	1:3.463
(自己容量ベース p.u. 値)			

の値を用い、定速同期機並びに可変速機の発電機諸定数を表 6 に示す。なお、ポンプ水車は 100kW の直流発電電動機 (DC. GM), サイリスタレオナードおよびポンプ水車の完全特性を内蔵したシミュレータで構成し、大容量ポンプ水車の動特性を模擬している。

<6.2> 試験結果 (1) 動態安定度試験; NO.2 定速同期機を発電時は出力を、揚水時は入力を徐々に増加させて安定限界電力を求めた。その結果が表 7 であり、発電方向では系統条件の厳しい 1 回線の方のみ、可変速機にすると定速同期機に比べ 10kW (約 9%) の増加がみられる。一方、揚水方向では 1 回線、2 回線とも 10kW の向上があり、発電方向より効果が顕著であった。(2) 過渡安定度試験; 外乱として送電線の無事故 1 回線 3 L O および 1 回線 3 L G 主保護遮断 (事故後 70ms で 3 L O) を与えた安定、不安定の結果が表 8、図 12(a) である。表 8 より発電、揚水方向ともに定速同期機で不安定であったものが可変速機では安定を保っている。また、図 12(a) の可変速機を使用した G-4, M-5 のケースでは可変速機の電力動揺は定速同期機と逆位相となっており電力の授受が観測される。

以上をまとめると可変速機の安定度向上効果は発電方向より揚水方向が、動態安定度より過渡安定度の方が大きいことが明らかとなった。また、5 章で述べた定速同期機と可変速機の電力の授受による安定度向上効果が実験でも確

図 11 模擬送電線試験回路

Fig. 11. Test circuit of transmission system simulator

の系統解析用モデルを用いたシミュレーション結果の対比で同モデルの検証を行った。

<6.1> 回路構成と解析条件 系統規模が図 10 となるよう、図 11 のような発電機 3 台 (120kVA 定速同期機 2 台 (内一台は可変速機と切替用)、87.3kVA 可変速機 1 台) と送電線は里側の 500kV 2 回線 70km を模擬送電線で模擬し、山側の 500kV 2 回線 50km を集中した低インピーダンスで模擬した構成とした。また、可変速機の制御系は 5 章の低応答制御

表 7 動態安定度試験結果

Table 7. Result of dynamic stability tests

運転 モード	並列機出力 [kW]		安定限界電力 (No. 2 同期機出力) [kW]	
	No. 1 同期機	可変速機	2 回線	1 回線
発 電 方 向	50	—	80 (安定)	60 (安定)
	50	—	85 (振動発散)	65 (振動発散)
	—	50	80 (安定)	70 (安定)
	—	50	85 (振動持続)	75 (振動持続)
揚 水 方 向	-50	—	-70 (振動持続)	-50 (振動持続)
	-50	—	—	-60 (発散)
	—	-50	-80 (安定)	-60 (安定)
	—	-50	-85 (振動持続)	-65 (振動持続)

表 8 過渡安定度試験結果

Table 8. Result of Transient stability tests

ケースNo. 運転モード		並列機 出力[kW]		No. 2同期機 出力[kW]	外乱 (1 回線)		安定度結果	
		No. 1同期機	可変速機		3 L O	3 LG-3 L O	判定	状 況
G-1	発	5 0	—	6 5	○	—	×	徐々に振動発散
G-2	電	—	5 0	6 5	○	—	○	振動収束
G-3	方	5 0	—	6 5	—	○(70ms)	×	振動発散
G-4	向	—	5 0	6 5	—	○(70ms)	○	振動収束
M-1	揚 水 方 向	- 5 0	—	- 5 0	○	—	×	徐々に振動発散
M-2		—	- 5 0	- 5 0	○	—	○	振動収束
M-3		- 5 0	—	- 4 0	—	○(70ms)	×	第一波減速脱調
M-4		- 5 0	—	- 4 0	—	○* (70ms)	△	緩やかに減衰
M-5		—	- 5 0	- 5 0	—	○(70ms)	○	振動収束
M-6		—	- 5 0	- 6 0	—	○(70ms)	○	振動収束 (減衰早い)

〔注〕*は遠方 3 L G を示す

ケース G-3 (発電方向一定速同期機)

ケース G-4 (発電方向可変速機)

ケース M-3 (揚水方向一定速同期機)

ケース M-5 (揚水方向可変速機)

(a) 模擬送電線実験結果

(b) 解析シミュレーション

図 12 模擬送電線結果と解析シミュレーションの比較

Fig.12. Comparision between the simulator and the simulation result

かめられた。

<6.3> 系統解析用モデルの検証 4章の解析用モデルを用いて表8のケースのうちG-3, G-4, M-3, M-5をシミュレーションした結果が図12(b)である。この結果、可変速機の挙動は同図(a)の実験結果とよく一致しており解析モデルの検証が行えた。また、解析シミュレーションでも定速同期機を可変速機に切替えることにより動揺周期の短縮と動揺抑制効果が明確に見られ、同期化力および制動力の向上が確認できた。なお、各解析ケースの事故直後と可変速機を解析したG-4, M-5のケースで事故除去後過渡的に2回大きなヒゲが発生しているが、これは解析上の回路条件変更時に対応し、数値解法上の理由によるものと考えられる。

7. 実系統規模における可変速機の系統安定度向上効果の解析

模擬送電線試験で検証を行った解析用モデルを用い長距離大容量水力系統に可変速機を適用した場合の系統安定度向上効果の解析シミュレーションを行った。

<7.1> 解析系統と条件 (1) 対象系統と初期潮流：500 kV変電所の二次275kV 側をループ構成とした図13のような長距離(400km)の水力発電所の送電系統とし、解析上の初期潮流は昼間帯の発電方向とし、全発電所(8箇所)全稼働(1713MW発電)で図13に示すとおりとした。また、可変速機の諸定数は表9、励磁制御ブロック図ならびに制御定数は図14とし、その他の発電機の諸定数は実機の詳細データを用いた。なお、可変速機を適用したポンプ水車(D(発))ならびに水車(E(発))のガバナ制御系は標準のものを用いた。また、解析プログラムは電中研開発の電力系統動特性解析プログラム(Y法)を用いた。

(2) 系統外乱：(i) A線路のS(変)至近端2回6LG主保護遮断(70ms), (ii) B線路のT(変)至近端2回線6LG主保護遮断(95ms-現状実態)

(3) 解析ケース：ケース①全発電所定速同期機の場合、ケース②D(発)のみ可変速機を適用した場合(可変速機容量300MVA: 全発電機容量の14% 相当)、ケース③D, E(発)に可変速機を適用した場合(可変速機容量D(発)300MVA, E(発)420MVA: 合計で全発電機容量の36% 相当)

<7.2> 解析結果 系統安定度を定速同期機である大容量機のF(発)の出力動揺で見ることとした。

(1) A線路事故の結果が、図15(a)である。ケース①では発電機の電力動揺は減衰の悪い振動となっている。これに対し、D(発)に可変速機を適用したケース②は第3波で収束しており、また、D(発)に加えてE(発)にも可変速機を適用したケース③は系統安定度の向上が著しく第1波で完全に収束している。

(2) A線路事故より安定度が厳しいB線路事故の結果が図15(b)である。ケース①では第4波で脱調しているが、D(発)に可変速機を適用したケース②では減衰は悪いものの収束方向となり安定度は維持されている。また、ケー

図13 長距離水力送電系統

Fig.13. Long-distance trasmission system of hydraulic power stations

図14 可変速機の励磁制御ブロック図

Fig.14. Excitation control block diagram of adjustable-speed machine

表9 可変速機の諸定数

Table 9. Parameters of adjustable-speed machine

容量D(発) 300MVA, E(発) 420MVA			
電圧	13.8kV,	回転数制御幅	143±13rpm
r_1	=0.0036	X_1	=0.144
r_2	=0.00223	X_2	=0.145
		M	=4.626 s
(自己容量ベース p.u. 値)			

ス③では、第2波で完全に電力動揺が収まり、可変速機の系統安定度の向上効果が顕著に現れている。

図15 実システムのシミュレーション結果(F (発) 出力)

Fig.15. Simulation results of real power system (Active power of F generator)

8. あとがき

本論文を要約すれば、次のようである。

(1) 可変速機の交流励磁として、電流制御(I_f 制御)に加えて電圧制御(E_f 制御)や出力制御(P_f 制御)を行うことにより安定運転領域が広がる。

(2) 可変速機の安定度解析上のモデルは、巻線形誘導機を交流励磁したものとして取り扱えばよく、解析モデルによるシミュレーションと模擬送電線による実験対比で、その有効性が検証できた。

(3) 可変速機と定速同期機からなるシステムの安定度は可変速機で定速同期機の動揺を電力授受により緩和させると大幅に向上できる。この際、可変速機の回転速度制御は低応答とし、定速同期機との電力授受が行いやすいよう協調させることが必要となる。

(4) 模擬送電線の実験では可変速機の系統安定度の向上効果は発電方向より揚水方向が、また、小外乱の動態安定度より大外乱の過渡安定度が顕著である結果が得られた。

(5) 実システムにおいて系統安定度が維持できない場合に可変速機の適用により安定度が向上し、安定運用が図れることを解析シミュレーションで確認できた。

今後は、実システムに適用される大容量可変速機の系統試験による系統解析モデルの検証、安定度向上効果の確認をするとともに、より一層の系統安定化のための補助信号の活用による高度利用の研究が必要となると考える。

日ごろ御指導をいただく東京大学名誉教授・東京理科大

学関根泰次教授に深く感謝の意を表する次第である。

(平成5年5月6日受付, 7月26日再受付, 9月20日再再受付)

文 献

- (1) W. B. Gish · J. R. Schurz · B. Milan: "An Adjustable Speed Synchronous Machine for Hydroelectric power applications", IEEE Trans. P2171(May. 1981)
- (2) 中村泰造・長谷川博・藤本繁登・古矢千吉: 「可変速揚水発電システムの実用化(東京電力・八木沢発電所)」電学論B, 111 巻 6号 (平3-6)
- (3) 道上勉・南澤肇・小向敏彦・小柳薫・鶴田俊一: 「可変速揚水発電機の安定度解析(その1) 基本的考察」昭62年電気学会全大, No. 983
- (4) D. S. Brereton · D. G. Lewis · C. C. Young: "Representation of Induction-Motor Loads During Power-System Stability Studies", AIEE Trans. P451(Aug. 1954)
- (5) 片岡直昭・前田克民・小向敏彦・上村洋市・鶴田俊一: 「電圧安定性についての基本的考察」, 昭59年電気学会全大 No. 940
- (6) 道上勉・南澤肇・小向敏彦・小柳薫・鶴田俊一: 「可変速揚水発電機の安定度解析(その2) 動的シミュレーション」, 昭62年電気学会全大 No. 984
- (7) 三谷康範・辻穀一郎・村上吉繁: 「電力系統安定化用超電導エネルギー貯蔵の装置容量に関する基礎的検討」電学論B, 109巻 6号 (平3-6)

- (8) 白井康之・仁田旦三・岡田隆夫:「超電導エネルギー貯蔵装置を含む電力系統の特性解析法」電学論B, 111巻 4号 (平3-4)
- (9) 道上勉・南澤肇・小向敏彦・小柳薫・野原真一・柳沢忠洋・山本俊伸:「可変速揚水発電システムの模擬送電線装置による系統安定度試験」, 昭62年電気学会電技研 PE-87-139
- (10) 道上勉・南澤肇・石黒富士雄・峰節朗:「可変速揚水発電システムによる系統安定化効果のシミュレーション解析」, 昭62年電気学会電技研 PE-87-140
- (11) 杉本修・原口英二・港正博・斉藤啓自・桑原尚夫・阪東明・伊藤明男:「可変速発電システムの制御法」昭61年電気学会全大No. 1026

付 録

〔誘導機の二次励磁電圧 E_2 と滑り s の関係〕

誘導機の負荷トルクを T_0 。一定と仮定し、二次励磁電圧 E_2 を二次誘導電圧 E' に対し同、逆相で加えた場合の滑り s の変化を求める。平衡状態では電気トルクも T_0 となるから本文 (2)式から

$$T_0 = mr_2 E' \frac{s E' \pm E_2}{r_2^2 + s^2 X_2^2} \quad \dots\dots\dots (付1)$$

この式を滑り s について整理すると、次式を得る。

$$s^2 - \alpha s + \left(\frac{r_2}{X_2}\right)^2 \mp \alpha \frac{E_2}{E'} = 0 \quad \dots\dots\dots (付2)$$

ただし、 $\alpha = mr_2 E'^2 / (X_2^2 T_0)$

いま、 $E_2 = 0$ の場合の滑りを s_0 とすると (付2)式より

$$s_0^2 - \alpha s_0 + \left(\frac{r_2}{X_2}\right)^2 = 0 \quad \dots\dots\dots (付3)$$

そこで、 E_2 を加えた場合の滑りを $s_0 + \Delta s$ とすれば (付2)式より

$$(s_0 + \Delta s)^2 - \alpha (s_0 + \Delta s) + \left(\frac{r_2}{X_2}\right)^2 \mp \alpha \frac{E_2}{E'} = 0 \quad \dots\dots\dots (付4)$$

(付4)式に (付3)式の条件を代入して整理すれば

$$(2s_0 - \alpha) \Delta s + \Delta s^2 \mp \alpha \frac{E_2}{E'} = 0 \quad \dots\dots\dots (付5)$$

$\Delta s^2 \approx 0$ であるから (付5)式から Δs を求めると

$$\Delta s = \mp \frac{\alpha}{\alpha - 2s_0} \cdot \frac{E_2}{E'} = \mp k \frac{E_2}{E'} \quad \dots\dots\dots (付6)$$

ただし、 $k = 1 / (1 - 2s_0 / \alpha)$

となる。(付6)式から E_2 が E' と同相の場合には、 $\Delta s < 0$ となり回転速度は上昇し、逆相の場合には、 $\Delta s > 0$ となり回転速度は低下する。

道上 勉 (正員) 1943年6月16日生。69年3月東京電機

大学大学院工学研究科修士課程修了。その間、62年4月東京電力(株)入社。71年中央給電指令所、79年系統運用部に従事。現在、系統運用部課長(UHV系統技術担当)。主として基幹系統の安定化対策、運用計画に従事。88年オーム技術賞、91年電気学会進歩賞。CIGRE-38, 39 国内分科会委員、IEEE 会員。

小柳 薫 (正員) 1948年6月5日生。71年3月東京教育

大学大学院工学部応用物理学卒業。同年4月(株)東芝入社。現在、電力系統技術担当課長。重電技術研究所にて主として電力系統の解析手法、異常現象、安定度問題の研究に従事。