発電機励磁／ガバナ多変数最適制御

正 員 大 塚 敬 (富士電機)
 正 員 植 木 芳 照 (富士ファコム制御)
 正 員 上之園 親 佐 (関西電力)
 正 員 田 中 裕 幸 (関西電力)
 正 員 瀬 里 勝 義 (関西電力)
 正 員 横 川 純 男 (富士電機)

1. ま え が き

発電機制御への最適制御理論の応用研究は、1970年初頭より数多く発表されてきた⁽¹⁾⁽²⁾が、いまだ実プラントへの普及には至っていない。しかし、最近、デジタル化技術の飛躍的進歩により、各分野において、システムのデジタル化が急速に行なわれている。発電機制御装置においても、シーケンス機能、励磁制御(AVR)機能、ガバナ(GOV)機能、安定度余裕監視機能⁽³⁾などを含めた発電機総合デジタル制御システムの開発が計画されている。我々は、これをTAGEC(Total Automatic Generator Control)システムと呼んでいる。このようなシステムに対し、今後、各種の方式が活発に検討されると予想される。

このTAGECシステムの機能強化の一つとして、特に実用的な観点から積分形多変数制御を応用した発電機励磁・ガバナ制御方式を研究した。本文はこの研究結果の報告である。本方式の特徴は次の点である。

- (1) 励磁系、ガバナ系の同時多変数最適制御
- (2) 水系安定化制御を含む水力機多変数最適制御
- (3) 積分形多変数最適制御

- (4) 多機系統に対する各機ごとと局部最適制御設計
- (5) 計測可能な発電機量の利用
- (6) 連系系統および発電機の運用条件に応じた適応制御
- (7) マイクロプロセッサ程度で実現可能な制御方式

以下、これらの方式を採用するに至った背景を述べる。

発電機は、運用上、電圧と出力(単独運転時には回転数)の安定運転が必要である。このため、定常時には、電圧は励磁系により制御され、出力はガバナ系により制御されるが、過渡的には、この電圧と出力は安定化制御(PSS)によって安定化される。PSSは、従来、サイリスタ高速励磁特性を生かして、励磁系のみで行なわれており、ガバナ系は用いていない⁽⁴⁾。特に水力機においては、ガバナ機構上生じる制御遅れと水系動揺の発生のため、ガバナ系の高速制御は極力回避されてきた。発電機制御への最適制御理論の応用研究においても、以上の理由から励磁系のみ利用する方式が多く、ガバナ系を併用する方式は少ない⁽⁵⁾。しかし、最近、電気油圧式ガバナの開発によりガバナ機構上生じる制御遅れは改善されてきており、また、本来、発電機出力はガバナ系によって調整されるのであるから、電圧、出力の両者の安定化制御のために、ここでは励磁、ガバナ両系による多変数最適制御方式を検討することにした。

ところが、このため、ガバナ系が従来に比べかなり高速に制御される結果となり、水力機の場合には、水系特性を無視した最適制御設計では、衆知の水系逆応答によって、逆に制御特性が悪くなる現象が生じた。

Multivariable Optimal Control for Generator Excitation and Governor Systems. By Kei Otuka, Member (Fuji Electric Co., Ltd), Yoshiteru Ueki, Member (Fuji Facom Corporation), Chikasa Uenosono, Member, Hiroyuki Tanaka, Member, Katuyoshi Neri, Member (Kansai Electric Power Co., Inc) & Sumio Yokokawa, Member (Fuji Electric Co., Ltd).

大塚 敬: 正員, 富士電機株式会社
 植木芳照: 正員, 富士ファコム制御株式会社
 上之園親佐: 正員, 関西電力株式会社
 田中裕幸: 正員, 関西電力株式会社
 瀬里勝義: 正員, 関西電力株式会社
 横川純男: 正員, 富士電機株式会社

そこで、水力機に対しては、水系の安定化のため、水系逆応答特性を考慮した多変数最適制御方式を開発した。

発電機では、自己の電圧や出力の設定変更、連系系統側では、系統構成や潮流の変更などが、系統運用上絶えず行なわれている。このような運用条件変化に対しても、発電機の電圧、出力の設定値からの偏差はできるだけ零にしたいという運用上の要望が強い。このため積分形多変数最適制御方式を採用した。この方式は、制御偏差の積分項とともに、多数の状態量の比例項をもつことが特徴であり、多変数最適制御理論に基づいて最適利得が設定されるので、上記のような運用条件に対して制御のロバスト性が期待できる⁽⁶⁾。

一般に連系系統は多機系統であり、全系を最適制御するためには安定度を中央監視する必要がある⁽⁷⁾。これは情報伝送コストの点から実用的でない。従って発電所ごとの局部情報のみ利用する分散制御方式が望まれている。このため、多機系統に対しては、各機ごと一機無限大系とみなして局部最適制御設計する、実用上簡易な方法を採用することとし、これにより得られた局部最適制御方式によって多機系安定度がどの程度になるかを検討した。

多変数最適制御の実現にはすべて計測可能な発電機量を用いなければならない。本方式では通常の発電機計測量の他に発電機空隙磁束、系統角速度と回転子角速度の差、回転子位置と電圧、電流それぞれの相差角を計測する（発電機空隙磁束は、端子電圧などから推定した値を用いることもできる）。これらの計測量から発電機、励磁系、ガバナ系、連系系統（および水系）を含むシステム全体の状態量、制御量を算出し、本発電機励磁／ガバナ多変数最適制御系に使用する。

発電機安定度は、前述の運用条件変化によって影響を受ける。特に低励磁進相率運転に近づくにつれ安

定度は大幅に悪くなる。また、発電機の各種リアクタンス、連系系統の等価リアクタンス、等価電圧も、この運用条件変化によって変化する⁽⁸⁾。従って、上記計測値を用いてこれらのモデル定数を刻々推定し、これに基づいて本制御系の最適利得を修正して運用条件変化に適応させる適応制御方式とした。

本発電機制御方式は以上のような特徴を有するが、更に、TAGECシステムへの実装のためマイクロプロセッサ程度で実現可能な方式として計画した⁽¹²⁾。

図1に本発電機励磁・ガバナ多変数制御方式の概略構成を示す。本方式は、励磁系に対しては、サイリスタ点弧角調節器を、ガバナ系については、メインサーボの電油変換部を直接制御する。

2. 基本モデル式

発電機多変数最適制御系の設計には、発電機、励磁系、ガバナ系、連系系統および水系の基本モデル式が必要となる。

(1) 発電機と連系系統 発電機は、系統並列運転時には系統との同期化力が存在するが、単独運転時には存在しない。制御についても、前者では電圧と出力、後者では電圧と周波数が対象とされる。従って、基本モデル式は並列運転時と単独運転時に分けられ、かつ発電機と連系系統あるいは負荷とが一体のモデルとされる。以下には並列運転時モデルを例示する。

連系系統を等価無限大系とみなし、一機無限大系モデルとして取扱う。発電機は Park 二軸モデルで表現し、実用的見地から電機子抵抗とダンパ回路特性は無視する。

$$\dot{\phi}_{fd} = \omega_0 \{v_{fd} - r_{fd} y_{fd} (\phi_{fd} - \phi_{ad})\} \dots (1)$$

$$\dot{\omega} = [T_m - P_e - D(\omega - 1)]/M \dots (2)$$

$$\dot{\delta} = \omega_0(\omega - 1) \dots (3)$$

$$v_t = (v_d^2 + v_q^2)^{1/2} \dots (4)$$

$$P_e = [y_{ie} y_{ifd} \phi_{fd} v_{Bd} / y_{sd} + y_{ie}^2 (y_{sq} - y_{sd}) \times v_{Bd} v_{Bq} / y_{sd} y_{sq}] \dots (5)$$

ここに、

$$\phi_{ad} = (y_{ifd} \phi_{fd} + y_{ie} v_{Bq}) / y_{sd} \dots (6)$$

$$y_{sd} = y_{ifd} + y_{ad} + y_{ie} \dots (7)$$

$$y_{sq} = y_{aq} + y_{ie} \dots (8)$$

$$v_d = [1 + y_{ie} (y_{ie} - y_{sq})] v_{Bd} / y_{ie} y_{sq} \dots (9)$$

$$v_q = y_{ie} y_{ifd} \phi_{fd} / y_{sd} y_{ie} + [1 + y_{ie} (y_{ie} - y_{sq})] / y_{ie} y_{sd} v_{Bq} \dots (10)$$

$$v_{Bd} = v_B \sin \delta \dots (11)$$

$$v_{Bq} = v_B \cos \delta \dots (12)$$

(2) 励磁系 サイリスタ形励磁系の制御遅れは

図1 発電機励磁・ガバナ多変数最適制御方式の構成

Fig. 1. Composition of generator excitation and governor system with multivariable optimal control.

無視する。ブラシレス形励磁系は、一次遅れ特性とする。

(i) サイリスタ形励磁系モデル

$$v_{fd} = k_{ex} v_{ex} \dots \dots \dots (13)$$

(ii) ブラシレス形励磁系モデル

$$\dot{v}_{fd} = \tau_{ex} (k_{ex} v_{ex} - v_{fd}) \dots \dots \dots (14)$$

(3) ガバナ系と水系 ガバナ系の補助サーボ、主サーボは、一つの一次遅れ特性で近似する。水力機については水系のモデルを付加する。

水系については、次の理想水系伝達関数として取扱う⁽⁹⁾。

$$(1 - T_w S) / (1 + 0.5 T_w S) \dots \dots \dots (15)$$

(i) 火力機ガバナ系モデル

$$\dot{P}_m = c_q (P'_m - P_m) \dots \dots \dots (16)$$

$$T_m = P_m \dots \dots \dots (17)$$

(ii) 水力機ガバナ系モデル

$$\dot{P}_m = c_q (P'_m - P_m) \dots \dots \dots (18)$$

$$\dot{q} = \tau_w (P_m - q) \dots \dots \dots (19)$$

$$T_m = 3q - 2P_m \dots \dots \dots (20)$$

3. 積分形多変数最適制御の適用

積分形多変数最適制御方式の概要と、この発電機制御への適用方法と、これを用いた発電機励磁・ガバナ制御系の構成を示す。

(1) 積分形多変数最適制御方式⁽¹⁰⁾ システムの基本モデル式として次式を考える。

$$\dot{x} = f(x, u, t) \dots \dots \dots (21)$$

$$z = q(x, u, t) \dots \dots \dots (22)$$

この式を線形離散化した式を次式とする⁽¹¹⁾。

$$\bar{x}_{k+1} = A^* \bar{x}_k + B^* \bar{u}_k \dots \dots \dots (23)$$

$$\bar{z}_k = C^* \bar{x}_k \dots \dots \dots (24)$$

ここに、

$$\bar{x} = x - x_s \dots \dots \dots (25)$$

$$\bar{u} = u - u_s \dots \dots \dots (26)$$

$$\bar{z} = z - z_s \dots \dots \dots (27)$$

(23), (24)式を次のように拡張形として、離散積分形とする。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Delta \bar{x}_{k+1} \\ e_{k+1} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A^* & 0 \\ C^* A^* & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \bar{x}_k \\ e_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B^* \\ C^* B^* \end{bmatrix} \Delta \bar{u}_k \\ &\equiv \bar{A} \begin{bmatrix} \Delta \bar{x}_k \\ e_k \end{bmatrix} + \bar{B} \Delta \bar{u}_k \dots \dots \dots (28) \end{aligned}$$

ここに、

$$\Delta \bar{x}_{k+1} = \bar{x}_{k+1} - \bar{x}_k = x_{k+1} - x_k \dots \dots \dots (29)$$

$$\Delta \bar{u}_{k+1} = \bar{u}_{k+1} - \bar{u}_k = u_{k+1} - u_k \dots \dots \dots (30)$$

$$e_{k+1} = z_{k+1} - r \dots \dots \dots (31)$$

この線形離散積分形制御方式に対して、次の二次形式最適制御指標

$$\begin{aligned} J = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^N & \left\{ \begin{bmatrix} \Delta \bar{x}_k \\ e_k \end{bmatrix}^T \bar{Q} \begin{bmatrix} \Delta \bar{x}_k \\ e_k \end{bmatrix} \right. \\ & \left. + \Delta \bar{u}_k^T R \Delta \bar{u}_k \right\} \dots \dots \dots (32) \end{aligned}$$

を最小にする定常最適制御則は次式となる。

$$\Delta \bar{u}_k = -\bar{K} \begin{bmatrix} \Delta \bar{x}_k \\ e_k \end{bmatrix} \dots \dots \dots (33)$$

従って、最適操作量は次のように表現できる。

$$u_k = u_{k-1} + \bar{K}_1 (x_k - x_{k-1}) + \bar{K}_2 (z_k - r) \dots \dots \dots (34)$$

あるいは

$$u_k = \bar{K}_1 x_k + \sum_{i=1}^k \bar{K}_2 (z_i - r) \dots \dots \dots (35)$$

従って、本方式は操作量が状態量の比例項と制御偏差の積分項から成る積分形多変数最適制御方式となる。定常最適利得は、離散形 Piccati 方程式を解くことにより求められる(付録2)。

(2) 発電機制御への適用 この積分形多変数最適制御方式を発電機へ適用する場合、状態変数 x 、操作変数 u 、制御変数 z は、並列運転時または単独運転時、火力機または水力機、および励磁系の種類で異ってくる。一例として、並列運転、サイリスタ形励磁系、水力機の場合を次に示す。

水力機の場合には、水系安定化のために、制御変数として、通常の電圧と出力の他に機械トルクを追加する。機械トルクの代わりに、水圧あるいは流量も利用できる。

$$\Delta \bar{x}_k = [\psi_{fdk}, \Delta \omega_k, \Delta \delta_k, \Delta P_{mk}, \Delta q_k]^T \dots \dots \dots (36)$$

$$\Delta \bar{u}_k = [\Delta v_{exk}, \Delta P_{mk}]^T \dots \dots \dots (37)$$

$$z_k = [v_{tk}, P_{ek}, T_{mk}]^T \dots \dots \dots (38)$$

$$\bar{Q} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & Q \end{bmatrix} \dots \dots \dots (39)$$

$$Q = \text{diag} |q_{vt}, q_{pe}, q_{rm}| \dots \dots \dots (40)$$

$$R = \text{diag} |r_{ex}, r_{pm}| \dots \dots \dots (41)$$

(3) 発電機励磁・ガバナ制御系の構成 この積分形多変数最適制御方式を用いた発電機励磁・ガバナ制御系は、(34)式に基づいて、図2のように構成される。

4. 計測可能な発電機量の利用

この発電機多変数最適制御方式の実現には、発電機計測量から、まず図2の発電機制御系に必要な諸量が推定され、更に適応制御のための最適利得計算に必要

図 2 励磁・ガバナ積分形多変数制御系

Fig. 2. Integral type of multivariable control system for generator excitation and governor.

なモデル定数が推定される。

(1) 発電機制御系に必要な諸量 発電機の通常の計測量でない、 φ_{fd} , ω , δ , T_m について示す。

$$\hat{\varphi}_{fd} = \psi_{ad}^m + i_{fd}^m / y_{fd} \quad (42)$$

ω , δ については、(2), (3) 式を線形離散化した (43) 式に Kalman フィルタを適用すると、 ω , δ の推定値が (48), (49) 式で求まる。

$$\begin{bmatrix} \hat{\omega}_{k+1} \\ \hat{\delta}_{k+1} \end{bmatrix} = A_1^* \begin{bmatrix} \omega_k \\ \delta_k \end{bmatrix} + B_1^* [\hat{T}_m, P_{ek}^m, \omega_{Bk}^m]^T \quad (43)$$

ここに、

$$A_1^* = \exp[A_1 \tau] \quad (44)$$

$$B_1^* = A_1^{-1} [A_1^* - I] B \tau \quad (45)$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} -D/M & 0 \\ \omega_0 & 0 \end{bmatrix} \quad (46)$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 1/M & -1/M & D/M \\ 0 & 0 & -\omega_0 \end{bmatrix} \quad (47)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{\omega}_k \\ \hat{\delta}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\omega}_k \\ \hat{\delta}_k \end{bmatrix} + K_F \left[\begin{bmatrix} \omega_k^m \\ \delta_k^m \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \hat{\omega}_k \\ \hat{\delta}_k \end{bmatrix} \right] \quad (48)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{\omega}_{k+1} \\ \hat{\delta}_{k+1} \end{bmatrix} = A_1^* \begin{bmatrix} \hat{\omega}_k \\ \hat{\delta}_k \end{bmatrix} + B_1^* [\hat{T}_m, P_{ek}^m, \omega_{Bk}^m]^T \quad (49)$$

ここに、

$$\hat{\delta}^m = \delta_v^m + \tan^{-1} [P_e / (y_e v_i^{m2} - Q_e^m)] \dots (50)$$

ここで、 y_e は、次の (2) 項で推定した値を用いる。

$$\hat{q}_{k+1} = \hat{q}_k + \hat{e}_w (P_{mk}^m - \hat{q}_k) \tau \quad (51)$$

$$\hat{T}_m = 3q - 2P_m^m \quad (52)$$

ここで、 $\hat{e}_w$ は、次の (2) で推定した値を用いる。

(2) モデル定数 連系系統に対しては、等価系統リアクタンス、等価系統電圧、発電機に対しては、各種の等価リアクタンス、水系に対しては、水系時定数に関するモデル定数が推定される。

(i) 連系系統定数

$$y_e = (i_q^m + i_d^m \tan \delta) / (v_q^m \tan \delta - v_d^m) \quad (53)$$

$$\hat{v}_{Bd} = v_d^m + i_q^m / y_e \quad (54)$$

$$\hat{v}_{Bq} = v_q^m - i_d^m / y_e \quad (55)$$

$$\hat{v}_B = (\hat{v}_{Bd}^2 + \hat{v}_{Bq}^2)^{1/2} \quad (56)$$

ここに、

$$v_d^m = v_i^m \sin \delta_v^m \quad (57)$$

$$v_q^m = v_i^m \cos \delta_v^m \quad (58)$$

$$i_d^m = i_i^m \sin \delta_i^m \quad (59)$$

$$i_q^m = i_i^m \cos \delta_i^m \quad (60)$$

(ii) 発電機定数

$$y_{ad} = (i_{fd}^m - i_d^m) / \psi_{ad}^m \quad (61)$$

$$y_{aq} = -i_q^m / \psi_{aq}^m \quad (62)$$

$$y_l = 0.5 \{ i_d^m / (\psi_{ad}^m - v_q^m) + i_q^m / (\psi_{aq}^m + v_d^m) \} \quad (63)$$

$$y_{le} = y_l y_e / (y_l + y_e) \quad (64)$$

$$y_{sd} = y_{fd} + y_{ad} + y_{le} \quad (65)$$

$$y_{sq} = y_{aq} + y_{le} \quad (66)$$

(iii) 水系定数

$$T_w = T_{w0} P_e / P_{e0} \quad (67)$$

これらのモデル定数は、刻々の発電機運転点に対して、線形離散化したモデル式 (23), (24) の A^* , B^* , C^* を求める際に利用する。

これに基づいて離散形 Riccati 方程式を解いて、その運転点における多変数制御利得を求める。

5. シミュレーションによる制御性能の検討

本発電機制御方式の制御性能をシミュレーションにより検討した。対象機器定数を以下に示す。本方式と対比した従来方式のブロック図を図 3 に示す。

(i) 発電機(水力)

$$x_d = 0.784, x_q = 0.514, x_l = 0.139, M = 6.0 \text{ s}, x_d' = 0.348, x_d'' = 0.227, x_q' = 0.220, T_{d0}' = 4.17 \text{ s}, T_{d0}'' = 0.049 \text{ s}, T_{e0}'' = 0.091 \text{ s}$$

(ii) 発電機(火力)

$$x_d = 1.68, x_q = 1.68, x_l = 0.17, M = 9.48 \text{ s}, x_d' = 0.273, x_d'' = 0.21, x_q' = 0.21, T_{d0}' = 5 \text{ s}, T_{d0}'' = 0.039 \text{ s}, T_{e0}'' = 0.24 \text{ s}$$

(iii) 励磁系(水力)

$$k_{ex}=1, V_{cei}=4.27$$

(iv) 励磁系(火力)

$$k_{ex}=5, T_{ex}=0.1 \text{ s}, V_{cei}=5, V_{cei}'=1.1$$

(v) ガバナ系(水力)

$$k_g=25, T_g=2 \text{ s}, P_{mi}=1.1, P_{mi}'=1.1$$

(vi) ガバナ系(火力)

$$k_g=25, T_g=0.3 \text{ s}, P_{mi}=1.0, P_{mi}'=1.0$$

(vii) 水 系

$$T_w=2 \text{ s}$$

(viii) 従来方式 AVR, PSS, GOV (火力)

$$T_v=0.026 \text{ s}, k_a=10, T_a=2 \text{ s}, k_p=0.3, T_1=1 \text{ s}, T_2=1 \text{ s}, T_3=0.02 \text{ s}, T_4=0.01 \text{ s}, P_1=0.25$$

シミュレーションにおいては、発電機にはダンパ回路を含む Park 2 軸モデルを用いており、励磁系の頂上電圧、ガバナ系の弁開度飽和も考慮している。またシミュレーション時間きざしは 4 ms であるが、本発電機多変数最適制御系から励磁・ガバナ系への操作量は、実際の制御装置に対応させて、20 ms ごとに出力している。

(1) 連系システムの等価系統リアクタンス変化に対する火力機の動態限界 プラシレス形励磁の火力機を対象として、並列運転、定格出力時において本方式の最適利得を求め、この利得を固定した状態で、系統状態変化を想定して等価系統リアクタンスを変えて、動態安定限界を計算した。これを図 3 に示す。このときの図 2 の k_{ij} の値を (68) 式に示す。

$$K = \begin{bmatrix} 9.8 & 3.4 & 148 & 608 & 27 \\ -0.061 & 0.2 & -0.66 & 160 & 0.75 \\ -3.9 & 2.6 \\ 2.3 & -0.004 \end{bmatrix} \quad (68)$$

図 3 火力機動態安定限界

Fig. 3. Dynamic stability limits of thermal turbine generator.

図 4 火力機動態安定度例

Fig. 4. Example of dynamic stability of thermal turbine generator.

図 4 は、この場合の時間応答の一例である。従来方式 (AVR+GOV+PSS) の結果も対比した。この結果から、系統等価リアクタンス変化の大きい系統では、本方式が有効であることが判る。このような本方式のロバスト性は、多数の状態量フィードバックを用いることによって得られるものである。

通常の PSS は、 P_e あるいは ω を位相進み遅れ補償を施す制御設計のため、対象の動揺周波数帯域が狭い。例えば、事故時 1 回線シャ断の場合、再閉路なし、成功、不成功などの系統状況によって動揺周波数が変わってくるので、図示のような効果が、本方式に期待できる。

(2) 3LG 故障に対する火力機の過渡安定限界

プラシレス形励磁の火力機を対象として、(1) と同様に定格出力時の最適利得を固定して、連系システムの平行二回線の一回線 3LG 故障時に故障回線シャ断 (再閉路無しとした) した場合の過渡安定限界を図 5 に示す。

図 5 火力機過渡安定限界

Fig. 5. Transient stability limits of thermal turbine generator.

図 6 火力機過渡安定度例

Fig. 6. Example of transient stability of thermal turbine generator.

図 7 水力機過渡安定度限界

Fig. 7. Transient stability limits of hydraulic turbine generator.

す。図 6 は、この場合の時間応答の一例である。従来方式では電圧の安定化が遅れるのに対し、本方式では電圧、出力とも十分速く安定となっており、本方式が優れていることが判る。

(3) 3LG 故障に対する水力機の過渡安定限界

図 8 水力機過渡安定度例

Fig. 8. Example of transient stability of hydraulic turbine generator.

図 9 水力機過渡安定度への水系動特性の影響

Fig. 9. Effect of hydraulic system dynamics on transient stability of hydraulic turbine generator.

サイリスタ形励磁の水力機を対象として、(2)と同様の 3LG 故障条件に対する過渡安定限界を図 7 に示す。図 8 は、この場合の時間応答の一例である。この場合、3LG 後、一回線しか断したまま ($X_e = 0.65$) になっており、安定度的にかなりか酷な状態であるが、このようなシステムの発電機にも、本方式は有効であることが判る。

(4) 水系特性を考慮しない水力機最適制御設計

水力機の場合に、水系特性を考慮せず、かつ水系安定化を含まない最適制御方式の制御特性を調べた。一回線しか断時の過渡応答の一例を図 9 に示す。従来方式より逆に悪い結果となっている。この場合、ガバナ操作量に対する重み r_{PM} の調整だけではこの制御特性は改善できない。従って、水力機の場合には水系安定化を含めた制御方式が必須であることが判る。

図 10 多機系統 ($G1 > G2$) 過渡安定度例

Fig. 10. Example of transient stability of multimachine system ($G1 > G2$).

図 11 多機系統 ($G1 = G2$) 過渡安定度例

Fig. 11. Example of transient stability of multimachine system ($G1 = G2$).

(5) 多機系統における発電機局部制御設計 多機系統に対しては、本方式では各機ごとに局部最適設計する。この場合に、本方式が多機系統の安定度どの程度効果があるかを考察した。多機系統を図 10～図 12 に示すような二機無限大系によって検討した。多機系統の各種の状態を想定して、次の場合を検討した (pu は系統容量ベース, S は容量, P は出力)。

(i) $G1$; $S=1.0$ pu, $P=0.91$ pu, $G2$; $S=0.2$ pu, $P=0.182$ pu (図 10)

(ii) $G1=G2$; $S=0.65$ pu, $P=0.592$ pu (図 11)

(iii) $G1$; $S=0.2$ pu, $P=0.182$ pu, $G2$; $S=1.0$ pu, $P=0.91$ pu (図 12)

それぞれの系統に対して、サイリスタ形励磁、水力

図 12 多機系統 ($G1 < G2$) 過渡安定度例

Fig. 12. Example of transient stability of multimachine system ($G1 < G2$).

図 13 本方式対比の従来方式のブロック図

Fig. 13. Block diagram of conventional control system compared with the proposed one.

機の $G1$, $G2$ が、それぞれ本方式あるいは従来方式を採用した場合の制御特性を比較した。3LG 故障、一回線しゃ断、再閉路時の結果を図 10～図 12 に示す。これらの結果より、このような多機系統における本方式の安定度制御効果は、次のように考えられる。 $G2$ の容量が大であれば、本方式は $G1$ のみに採用するだけで有効である (図 10)。 $G2$, $G1$ が同容量程度の場合でも、遠方の $G1$ にのみ本方式を採用すれば有効である (図 11)。 $G1$ の容量が小であれば、 $G2$ のみに本方式を採用しただけでは効果がない。しかし、この場合でも、 $G2$ にも本方式を採用すれば有効となる (図 12)。

6. あとがき

積分形多変数最適制御方式を応用した発電機励磁・ガバナ制御方式を検討した。特に水力機に対しては、

水系安定化を含めた制御方式を提案した。本研究のシミュレーション結果によれば、本方式は、特に系統特性の変化が大きい系統において、火力機、水力機ともに過渡および動態安定度向上効果がみられ、多機系統の一例でも有効であることが示された。

本検討結果に基づいて、本方式は現在開発中の発電機総合デジタル制御装置 TAGEC システムに実装される。今後、模擬電力系統モデルによる実験を経て、実発電所における本方式の制御性能の確認評価を行なう予定である。

本研究に対し、早稲田大学 田村康男教授に、貴重な御示唆を賜った。末筆ながら厚くお礼申し上げます。(昭和 58 年 7 月 18 日受付、同 59 年 5 月 11 日再受付)

文 献

- (1) Y. N. Yu et. al.: "Application of an optimal control theory to a power system" *IEEE Trans. Power Apparatus. PAS-89*, 55 (1970)
- (2) Y. Tamura, et. al.: "Construction of dynamic equivalents and determination of suboptimal control", *CIGRE SC-32* (1972)
- (3) C. Uenosono, et. al.: "Development and testing of an automatic stability prediction and control for a synchronous generator by air gap flux", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst. PAS-101*, 719 (1982)
- (4) F. P. de Mello et. al.: "Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation control", *ibid. PAS-88*, 316 (1969)
- (5) H. A. M. Moussa, et. al.: "Optimal power system stabilization through excitation and/or governor control", *ibid. PAS-91*, 1166 (1972)
- (6) M. G. Safonov, et. al.: "Gain and Phase margin for multiloop LQG regulators" *IEEE Trans. Automatics Control. AC-21*, 173 (1977)
- (7) Y. N. Yu, et. al.: "Optimal stabilization of a multimachine system" *IEEE Trans. Power Apparatus Syst. PAS-91*, 1174 (1972)
- (8) 難波, 他: 「カルマンフィルタ法による電力系統安定度解析用発電機定数の同定」電学論 B 100, 617 (昭 55)
- (9) J. L. Woodward: "Hydraulic-turbine transfer function for use in governing studies", *Proc. Enstn Elect. Engrs.* 115, 424 (1968)
- (10) B. Porter: "Optimal control of multivariable linear systems incorporating integral feedback" *Electronic letters.* 22, 170 (1971)
- (11) B. S. Habibulla: "Optimal governor Control of a Synchronous machine" *IEEE Trans. Automatic Control.* 26, 391 (1981)
- (12) 杉浦, 他: 「多変数制御用フローティング演算プロセッサ」電気学会情報処理研究会資料 IP-83-39 (昭 58)

付 録

(1)

・: d/dt , φ_{fd} , φ_a , φ_{ad} : 界磁, 空隙, d 軸相互磁束
 ω_0 , ω : 系統, 回転子角速度
 v_{fd} , v_i , v_d , v_q , v_{Bd} , v_{Bq} , v_B , $v_{\phi i}$: 界磁, d 軸端子,

q 軸端子, d 軸系統, q 軸系統, 系統, 界磁頂上電圧, r_{fd} : 界磁抵抗, x_{fd} , x_i , x_a , x_{ad} , x_{aq} , x_d , x_q , x_d' , x_d'' , x_q'' : 界磁漏れ, 電機子漏れ, 系統, d 軸相互, q 軸相互, d 軸, q 軸, d 軸過渡, d 軸次過渡, q 軸次過渡リアクタンス

y_{fd} , y_i , y_a , y_{ad} , y_{aq} : 界磁漏れ, 電機子漏れ, 系統, 電機子漏れと系統の合成, d 軸相互, q 軸相互アドミタンス, δ , $\delta v'$, $\delta i'$: 回転子位置と系統電圧, 端子電圧, 端子電流の間の相差角, v_{ex} , P_m' : 励磁系, ガバナ系操作指令

T_m , P_e , Q_e , S , P_m , q : 機械トルク, 有効電力, 無効電力, 発電機容量, ガバナ弁開度, 流量

D , M , k_{ex} , T_{pm} , τ , P_{m1} , P_{m1}' : ダンピング定数, 慣性定数, 励磁系利得, ガバナ系弁制御時間, 時間きざみ, ガバナ系弁開度上限, ガバナ系操作指令上限

T_{ex} , T_w , T_θ , $T_{d0'}$, $T_{d0''}$, $T_{q0''}$: 励磁系, 水系, ガバト系, 界磁, d 軸ダンパ, q 軸ダンパ時定数

τ_{ex} , τ_w , τ_θ : $1/T_{ex}$, $2/T_w$, $1/T_\theta$

T_{w0} , P_{e0} : 定格出力時の T_w , P_e

i_{fd} , i_d , i_q : 界磁, d 軸端子, q 軸端子電流

T_v , k_a , T_a , k_p , T_1 , T_2 , T_3 , T_4 , P_i : 従来方式 AVR, PSS 定数 (図 13 参照)

x , u , z : 状態, 操作, 制御変数ベクトル

t , τ : 時間, 時間きざみ, $f(\cdot)$, $g(\cdot)$: 関数ベクトル

頭字 $\sim$, 添字 s , 添字 k , 前置字 Δ , 頭字 $\wedge$, 頭字 $\wedge$, 頭字 m : 基準からの偏差, 基準値, 離散ステップ, 時間差分, 推定値, 予測値, 計測値

A^* , B^* , C^* : 離散形状態, 操作, 制御行列

A_1^* , B_1^* : 離散形状態, 入力行列 (同定用)

$\bar{A}$, $\bar{B}$: 拡張形状態, 操作行列, I : 単位行列

e , r : 制御偏差, 設定ベクトル, J : 最適制御指標

$\bar{Q}$, R , Q : 拡張制御, 操作, 制御重み行列

q_{vi} , q_{pe} , q_{Tm} : 端子電圧, 有効電力, 機械トルクの重み, τ_{vex} , τ_{pm}' : 励磁系, ガバナ系重み

$\bar{K}$, $\bar{K}_1$, $\bar{K}_2$: 最適利得行列

K_F : カルマンゲイン行列

K_i , P_i : i 反復時点最適利得, 制御残差行列

(2)

$$K_i = [R + \bar{B}^T(\bar{Q} + P_i)\bar{B}]^{-1} B^T(\bar{Q} + P_i)\bar{A} \quad \dots\dots\dots (付 1)$$

$$P_i = \bar{A}^T(\bar{Q} + P_i)[\bar{A} - \bar{B} \cdot K_i] \quad \dots\dots\dots (付 2)$$

$$P_1 = 0 \quad \dots\dots\dots (付 3)$$

$$\bar{K} = \lim_{i \rightarrow \infty} K_i \quad \dots\dots\dots (付 4)$$