発電機制御方式の一機無限大系統における統一的評価

正員 郭 斌 (北海道大)

正員 田 中 英 一 (北海道大)

正員 長谷川 淳 (北海道大)

Uniform Evaluation of Generator Control Methods in a One-Machine Infinite-Bus Power System

Bin Guo, Member, Eiichi Tanaka, Member, Jun Hasegawa, Member (Hokkaido University)

Generator control has been studied using various methods. Generator control is an effective way to improve the stability and reliability of power systems which are continually expanding and becoming more complicated. However, the comparative estimation of these control methods is not made using one common criterion. In this paper, three kinds of fundamental generator control methods, optimal control, fuzzy control and PID control, are considered with some proposed alterations and a uniform evaluation of these control methods is made quantitatively with consideration for practical use. From the simulation results, a uniform evaluation is obtained by using a one-machine infinite-bus system which includes AVR and governor as the control object model.

キーワード：電力系統，発電機制御，最適制御，ファジー制御，PID 制御，制御性能評価

1. ま え が き

電力系統の大規模・複雑化に伴い，系統の安定性・信頼性を維持，向上させることはきわめて重要な課題となっている。このため，各方面で様々な検討が進められており，特に発電機制御の高性能化，高信頼度化は，有効な方策の一つと考えられる。発電機制御方式としては，古典制御理論に基づいたPID制御が広く用いられているが，状態空間においてシステムの挙動を把握する現代制御理論に基づいた多変数最適制御の適用も研究されている⁽¹⁾⁽²⁾。また近年，システムの非線形性やあいまい性をも考慮して，エキスパートの知識や経験などを制御規則として体系化することができ，ファジー制御⁽³⁾の適用^{(4)~(6)}が検討されており，最適・ファジーのコンビネーション制御による電力系統の安定化制御⁽⁷⁾も提案されている。しかしながら，各制御方式を発電機制御への適用の観点から，共通の基準の下で比較し，その制御性能などを定量的に評価した報告は，これまでほとんどみあたらない。今後，発電機制御の高度化を図り，より実情に即した望ましい制御方式を確立するためには，これらの方式の特徴を明確にしておくことが重要である。

以上のような背景から，本論文では発電機制御方式として，最適制御，ファジー制御，PID制御を取り上げ，それぞれの制御方式の特徴を共通の観点から比較検討する。

検討モデルとしては基本的な一機無限大母線系統モデルを用い，特に擾乱に対する応答特性，安定度限界および機器定数変化に対する収束特性について検討を行うが，比較的小さな擾乱として設定値変更を，大きな擾乱として三相地絡故障を想定する。各制御方式の設計は二乗積分関数で表される同一の評価指標を用いて，それぞれの擾乱に対して各方式の最適な制御パラメータをシミュレーションにより決定する。更に，試算結果に対して詳細な考察を加える。

2. 制御対象モデル

制御対象モデルとして，二回線送電線を通して無限大母線に接続にされている火力発電機（図1）を考える。

(1) 発電機モデル 発電機は，パークの二軸モデルで表現され，電機子過渡現象，電機子抵抗およびダンパ回路特性は無視する（各変数の意味は付録に示す）。

$$\dot{\psi}_{fd} = \omega_0 \left[v_{fd} - \frac{r_{fd}}{x_{fd}} (\psi_{fd} - \psi_{ad}) \right] \cdots \cdots \cdots (1)$$

$$\delta = \omega_0 (\omega - 1) \cdots \cdots \cdots (2)$$

$$\dot{\omega} = \frac{1}{M} [p_m - p_G - D(\omega - 1)] \cdots \cdots \cdots (3)$$

ここに，

$$\psi_{ad} = \left[\frac{x_{ad}}{x_{fd}} - \frac{x_{afd}x_{ad}^2}{x_{fd}^2(x_d' + x_e)} \right] \psi_{fd} + \frac{x_{afd}x_{ad}}{x_{fd}(x_d' + x_e)} v_{Bq} \cdots \cdots \cdots (4)$$

図 1 一機無限大母線系統モデル
Fig. 1. One-machine infinite-bus system.

$$\begin{aligned} p_G &= v_d i_d + v_q i_q \\ &= \frac{x_{ad}}{(x'_d + x_e)x_{fd}} \psi_{fd} v_{Bd} + \frac{x'_d - x_q}{(x'_d + x_e)(x_q + x_e)} v_{Bd} v_{Bq} \end{aligned} \quad (5)$$

$$v_d = \left(1 - \frac{x_e}{x_q + x_e}\right) v_{Bd} \quad (6)$$

$$v_q = \frac{x_e x_{ad}}{(x'_d + x_e)x_{fd}} \psi_{fd} + \frac{x'_d}{x'_d + x_e} v_{Bq} \quad (7)$$

$$v_{Bd} = v_B \sin \delta \quad (8)$$

$$v_{Bq} = v_B \cos \delta \quad (9)$$

$$i_d = \frac{e'_q - v_{Bq}}{x'_d + x_e} \quad (10)$$

$$i_q = \frac{v_{Bd}}{x_q + x_e} \quad (11)$$

$$e'_q = \frac{x_{ad}}{x_{fd}} \psi_{fd} \quad (12)$$

$$v_t^2 = v_d^2 + v_q^2 \quad (13)$$

(2) タービン系モデル タービン系を簡単な一次遅れと仮定すると、次式のように表される。

$$\dot{p}_m = \frac{1}{T_m} (p_{gov} - p_m) \quad (14)$$

(3) ガバナ系モデル ガバナ系も同様に、一次遅れで近似する。

$$\dot{p}_{gov} = \frac{1}{T_{gov}} (u_{gov} - p_{gov}) \quad (15)$$

(4) 励磁系モデル 励磁系についても、一次遅れ特性とする。

$$\dot{v}_{fd} = \frac{1}{T_{ex}} (k_{ex} u_{ex} - v_{fd}) \quad (16)$$

(5) 系統モデル 連系系統を等価無限大母線とみなし、外部リアクタンス $2x_e$ (1 回線当たり) の二回線送電線で発電機と接続されているものと想定する。

なお、ガバナ、励磁系における上下限制御、変化率の制約などについては、すべて制御操作量 (u_{gov} と u_{ex}) に対する制約に置き換えて考慮する。

3. 基本的な評価方針と各制御方式の概要

〈3・1〉 評価のための基本的方針

(1) 評価指標 各制御方式の設計にあたっては、共通の評価指標を用いる。すなわち、最適制御では設計の過程で二乗積分評価関数を用いるが、これを PID 制御およびファジー制御へも適用する。具体的には、発電機の有効電力および端子電圧の各目標値との偏差が最小となるように、以下の評価指標を考える。

$$\begin{aligned} J_s &= \frac{1}{2} \int_0^T \{ (y - y^*)^T Q (y - y^*) \\ &\quad + (u - u^*)^T R (u - u^*) \} dt \end{aligned} \quad (17)$$

ここで、 $y = [p_G, v_t]^T$ 、 $u = [u_{gov}, u_{ex}]^T$ は、各々発電機の出力ベクトルおよび制御操作量ベクトルで、 y^* 、 u^* は各々の目標値ベクトルである。 T は評価時間で、本論文では 100 秒とする。また、 Q および R は正定な重み行列であり、本論文では単位行列とする。

(2) 制御に利用する情報 最適制御では基本的に制御対象のすべての状態変数に関する情報を必要とするが、実際にはすべての状態変数が観測できるとは限らない。そこで、PID 制御やファジー制御と同じ条件で最適制御系をも実現するという立場から、出力情報に基づくオブザーバ⁽⁸⁾を設計し、このオブザーバを用いた最適制御についても検討する。

(3) 制御操作量制約の考慮 制御入力の実用的な範囲を超えないようにするため、ガバナと AVR の制御操作量の上下限制約、ガバナに対する制御操作量の変化率制限も考慮に入れて制御入力を決定する。

(4) 評価項目 三相地絡故障および設定値変更に対して各制御方式の時間応答特性、安定度限界ならびに機器定数変化に対する収束特性に関して、シミュレーションにより評価する。

〈3・2〉 各制御方式の概要 上記の基本的な方針に基づいて、以下の各制御方式を比較評価する。

(1) ファジー制御 ファジー制御の適用に際し、応答時の出力 y の目標値 y^* からの偏差 e とその変化分 Δe を前件部変数、ガバナおよび AVR に対する操作量 u の変化分 Δu を後件部変数とする。

時点 k におけるこれらの関係は、(18)～(20)式で表される。

$$e(k) = y(k) - y^*(k) \quad (18)$$

$$\Delta e(k) = e(k) - e(k-1) \quad (19)$$

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1) \quad (20)$$

メンバシップ関数として図 2 に示したものを、パラメータ α の値は想定した変化に対して (17) 式を最小化するように非線形モデルを用いたシミュレーションに基づいて決定される。また、操作量 Δu は、表 1 の制御規則に従って「min-max-重心法」⁽³⁾により決定される。

ファジー制御では、制御規則やメンバシップ関数が制御の仕りに大きな影響を与えるが、それらの決定は試行錯誤的に行われることが多い。本論文のファジー制御における前件部変数と後件部変数に対応するメンバシップ関数は合計 6 個であるが、各変数のメンバシップ関数の α と (17) 式の評価指標値の間には近似的に二次関数的な関係が存在する⁽¹¹⁾。このため、各メンバシップ関数の α を順に調整しながら、(17) 式が小さくなるように各 α を大まかに決定する。更に、求められた各 α の値を初期値として、次式の最適化問題を解き、最適な α の値を決定する⁽¹²⁾。

$$\min J_s(z) \quad (21)$$

$$\text{sub } j. \text{ to } z > 0 \quad (22)$$

ここで、 z ：各メンバシップ関数の α で構成されるベクトル

P: Positive, N: negative, B: big
M: medium, S: small, ZO: Zero

図2 メンバシップ関数
Fig. 2. Membership function.

表1 ファジー制御規則
Table 1. Fuzzy control rules.

Δe	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	P	B		PB	PM	PS	ZO
NM			PB	PM	PS	ZO	NS
NS		PB	PM	PS	ZO	NS	NM
ZO	PB	PM	PS	ZO	NS	NM	NB
PS	PM	PS	ZO	NS	NM	NB	
PM	PS	ZO	NS	NM	NB		
PB	ZO	NS	NM	NB		N	B

ただし、(17)式の評価関数 $J_s(z)$ の z に関する導関数を解析的に求めることは困難であるために、最適化の過程において必要な勾配に関する計算は数値微分によって行う。この手法によれば、発電機の非線形性、制御操作量の制限をも考慮に入れて、想定した大擾乱、小擾乱に対するシミュレーションによって最適な制御パラメータを求めることができる。

(2) PID制御 有効電力および端子電圧の目標値から偏差 Δp_G および Δv_t とすると、ガバナと AVR に対する PID 制御入力 u_{gov} , u_{ex} は次式で表される。

$$u_{gov} = K_{GP}\Delta p_G + K_{GI}\int \Delta p_G dt + K_{GD}\frac{d\Delta p_G}{dt} \quad (23)$$

$$u_{ex} = K_{AP}\Delta v_t + K_{AI}\int \Delta v_t dt + K_{AD}\frac{d\Delta v_t}{dt} \quad (24)$$

ここで、 K_{GP} , K_{GI} , K_{GD} , K_{AP} , K_{AI} , K_{AD} : それぞれガバナ、AVR の比例、積分および微分ゲイン

PID 制御系において、一般に過渡動揺を抑制するための安定化補助信号が、励磁制御系への入力信号として付加される。本論文では、図3に示す安定化装置 (PSS) を採用する。PID の制御ゲインも、ファジー制御と同様に、制御操作量の制限も考慮に入れて、発電機の非線形モデルを用いたシミュレーションにより、想定した大擾乱および小擾乱に対して (17) 式を最適化することにより決定する。ただし、PID 制御の場合には、 z はガバナと AVR の比例、微分および積分ゲインの値で構成されるベクトルである。(17) 式の評価指標を最小化する過程において間接的にガバナと AVR 制御系の協調がはかられると考えられる。

図3 PSS 付き PID 制御方式の構成図
Fig. 3. Blockdiagram of conventional PSS.

(3) 最適制御 最適制御器を設計するために、まず、(1)~(3), (14)~(16)式からなる状態方程式を、通常運転点の近傍で線形化する。その結果、(25), (26)式で表される状態方程式および出力方程式が得られる。

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (25)$$

$$y_t = Cx \quad (26)$$

ただし、

$$x = (\Delta \phi_{fd}, \Delta \delta, \Delta \omega, \Delta p_m, \Delta g_{gov}, \Delta v_{fd})^T$$

$$y_t = (\Delta p_G, \Delta v_t)^T$$

A, B, C : それぞれ定係数行列

この線形モデルに対して、(17)式 ($T \rightarrow \infty$) の評価指標を最小とする最適制御則は、(27)式で表される⁽¹³⁾。

$$u = -Kx \quad (27)$$

ただし、

$$K = R_s^{-1} B^T P \quad (28)$$

ここで、 P : 次式の正定行列解

$$PA + A^T P - PBR_s^{-1} B^T P + C^T Q_s C = 0 \quad (29)$$

ファジー制御および PID 制御では、制御操作量に対する制限および非線形性を考慮して設計を行っているが、通常の最適制御器の設計では、制御操作量に対する制限、制御対象の非線形性を直接考慮することが難しい。このため本論文では、前述の線形化モデルに対して最適制御器の設計を行うが、制御操作量の制限を考慮に入れた非線形モデルを用いて想定した擾乱に対するシミュレーションを行い、制御ゲインを修正する。ただし、制御ゲインを直接調節する代わりに、(29)式の Q_s と R_s [(17)式の単位行列 Q と R とは必ずしも等しくない正定な対角重み行列) を適当に調節することにより、ファジー制御および PID 制御と同様に Q と R を単位行列とする (17) 式が最も小さくなるような制御ゲインを最適ゲインとして決定する。

(4) オブザーバを用いる最適制御 (27) 式の最適制御則は、すべての状態変数をフィードバックすることになるが、実際には発電機の内部状態をすべて観測することは難しい。そこで、発電機の内部状態の推定にオブザーバ⁽⁸⁾を用いることとし、ファジー制御や PID 制御と同様に発電機の有効電力と端子電圧に関する情報だけを利用するフィードバック制御系を構成する。オブザーバを用いる最適制御システムは図4のように構成される。

また、観測システム⁽⁸⁾は (30) 式で表される。

$$\hat{x} = D\hat{x} + Ey_t + Bu \quad (30)$$

ただし、 D, E は次の条件を満足しているものとする。

u_0, y_0 : 通常運転点の入, 出力ベクトル
 u_r, y_r : 入, 出力ベクトル
 u : オブザーバの入力ベクトル
 $y_i: y_r - y_0$
 y_s : 増分出力目標値ベクトル
 A, B, C : (25), (26) 式と同じ
 $\hat{x}$: 推定された状態変数ベクトル

図 4 オブザーバを用いた最適制御系

Fig. 4. Optimal control system with observer.

(i) $A - EC = D$

(ii) D は安定行列である。

このシステムのオブザーバは線形モデルに基づいて構成されているが、実際の制御対象は非線形であるため、出力にモデル誤差に相当する定常偏差が残ってしまう。この定常偏差を残さないために、増分出力 y_i とその目標値 y_s との偏差に対して積分制御を加えた積分形の最適制御方式 (LQI)⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾ を採用する。

4. シミュレーションによる制御性能の評価

各制御方式の制御性能を調べるために、一機無限大母線系統非線形モデルを用いて、大擾乱としての三相地絡故障に対する応答特性、過渡安定度限界および機器定数変化に対する収束特性、また小擾乱としての設定値変更に対する応答特性、動態安定度限界および機器定数変化に対する収束特性に関してシミュレーションによる比較検討を行った。機器定数および制御操作量の制限を以下に示す。

$$\begin{aligned}
 &x_d = 1.68, x_q = 1.68, x'_d = 0.273, x'_l = 0.17, \\
 &M = 9.48 \text{ s}, D = 0.05, x_e = 0.25, T_m = 0.25 \text{ s}, \\
 &T_{\text{gov}} = 0.1 \text{ s}, T_{\text{ex}} = 0.1 \text{ s}, k_{\text{ex}} = 5.0, P_1 = 0.25, \\
 &T_v = 0.026 \text{ s}, T_1 = 0.25 \text{ s}, T_2 = 0.3 \text{ s}, \\
 &T_3 = 0.05 \text{ s}, T_4 = 0.03 \text{ s}, T = 0.5 \text{ s}, K_p = 0.475, \\
 &0.0 \leq u_{\text{gov}} \leq 1.05, 0.0 \leq u_{\text{ex}} \leq 3u_{\text{ex}0}, \\
 &-0.1 \leq \dot{u}_{\text{gov}} \leq 0.1 \text{ pu/s}
 \end{aligned}$$

ただし、 $u_{\text{ex}0}$ は発電機の通常運転点（有効電力 0.8、無効電力 0.6、端子電圧 1.0、無限大母線電圧 0.8732）における AVR の入力である。単位の記載のない値は、いずれも pu である。なお、ファジー制御における制御時間刻みは 20 ms とする。

〈4・1〉 三相地絡故障に対する評価 図 1 のモデル系統において、送電線二回線のうち一回線の発電機端側で発生した三相地絡故障（0.1 秒後故障回線を遮断；再閉路なし）に対して、通常運転点において、〈3・2〉節の設計手法

に基づき各制御方式の制御ゲインを求める。求められたゲインを固定した状態で、シミュレーションによる比較検討を行う。

最適制御を適用した場合の最終的な重み行列 Q_s, R_s は以下のとおりである。

$$Q_s = \text{diag}[1 \ 5] \quad R_s = [10 \ 5000]$$

このときの制御ゲイン K の値は以下のとおりである。

$$K = \begin{bmatrix} -2.12 \times 10^{-2} & -2.45 \times 10^{-2} & 1.94 \\ 4.37 \times 10^{-2} & 1.59 \times 10^{-2} & -7.86 \times 10^{-1} \\ 4.92 \times 10^{-2} & 1.75 \times 10^{-2} & -1.99 \times 10^{-1} \\ -1.49 \times 10^{-2} & -4.00 \times 10^{-3} & 5.67 \times 10^{-1} \end{bmatrix}^*$$

また、オブザーバを用いた最適制御系における制御ゲイン K_{ox}, K_{oi} の値は以下のとおりである。

$$K_{ox} = \begin{bmatrix} -5.99 \times 10^{-3} & -2.10 \times 10^{-3} & 2.40 \\ 2.00 \times 10^{-2} & -9.12 \times 10^{-4} & -7.04 \times 10^{-1} \\ 7.62 \times 10^{-2} & 5.36 \times 10^{-2} & -9.71 \times 10^{-2} \\ -8.82 \times 10^{-3} & -1.94 \times 10^{-3} & 3.40 \times 10^{-1} \end{bmatrix}^*$$

$$K_{oi} = \begin{bmatrix} 2.23 \times 10^{-1} & 3.62 \times 10^{-2} \\ 1.02 \times 10^{-3} & 3.15 \times 10^{-2} \end{bmatrix}$$

次に、ファジー制御器の三相地絡故障に対する最適な各 α の値は以下のとおりである。

$$\alpha_{PE} = 1.56, \alpha_{PE0} = 2.04, \alpha_{PU} = 5.59 \times 10^{-3}$$

$$\alpha_{EE} = 7.80, \alpha_{EE0} = 1.73 \times 10^{-1}, \alpha_{EU} = 4.47 \times 10^{-5}$$

ここで、 α の添字 PE, PE0, PU, EE, EE0, EU: それぞれ有効電力の設定値からの偏差とその変化分, ガバナ操作量の変化分, 端子電圧の設定値からの偏差とその変化分, AVR 操作量の変化分

更に、PID の制御ゲインは以下のとおりである。

$$K_{GP} = 6.50 \times 10^{-3}, K_{GI} = 1.06 \times 10^{-2}, K_{GD} = 5.66 \times 10^{-4}$$

$$K_{AP} = 2.25 \times 10^{-2}, K_{AI} = 2.50 \times 10^{-3}, K_{AD} = 6.51 \times 10^{-3}$$

(1) 応答特性および過渡安定度限界 各制御方式における発電機の有効電力および端子電圧の時間応答特性例をそれぞれ図 5 および図 6 に示す。また過渡安定度限界を図 7 に示す。

状態がすべて観測できると仮定すると、最適制御は約 4 秒で収束しており、安定範囲が最も広く、最良の制御特性が得られている。しかし、出力に関する情報だけを用いた場合にはファジー制御が約 15 秒で収束しているのに対して、PID 制御とオブザーバを用いる最適制御では、有効電力の応答が振動的で収束も遅い。オブザーバの併用により最適制御の応答特性が著しく劣化していることがわかる。過渡安定度限界に関しても、最適制御は最も広い安定範囲を有しており、次にファジー制御、オブザーバを用いる最適制御、PID 制御の順となる。なお、過渡安定限界を超える場合には、各制御方式とも同様の不安定形態を示すが、ここでは一例として、ファジー制御の応答波形（運転点：有効電力 0.8 pu、無効電力 -0.3 pu、端子電圧 0.9 pu）

図 5 三相地絡故障時の発電機有効電力
Fig. 5. Active-power time responses to a sudden three-phase short circuit fault.

図 6 三相地絡故障時の発電機端子電圧
Fig. 6. Terminal-voltage time responses to a sudden three-phase short circuit fault.

を図 8 に示す。

(2) 機器定数の変化に対する収束特性 制御対象モデルの機器定数が必ずしも正確に求められない場合を想定して、(1)～(16)式中の幾つかの機器定数の値を設計値の10%～200%まで10%ずつ変化させることにより、各制御方式の機器定数の変化に対する収束性を調べた。発電機の出力が目標値に収束したかどうかについての判定は、有限

図 7 過渡安定度限界
Fig. 7. Transient stability limits.

図 8 過渡不安定応答例
Fig. 8. Transient unstable example.

表 2 三相地絡故障時の機器定数安定変化範囲
Table 2. Stable range for parameter variation in sudden three-phase short circuit fault.

	x_d'	x_{ad}	x_q	x_e	r_{fd}	D	M	T_{gov}	T_m	T_{ex}
最適制御	20	30	10	10	10	10	40	10	10	20
	180	200	200	200	160	200	200	200	200	200
ファジー	30	30	30	20	90	10	80	10	10	20
	120	130	120	150	160	200	130	200	200	120
オブザーバ	50	40	20	10	60	10	70	10	40	60
	120	140	150	100	150	200	200	200	200	130
PID	30	50	30	90	10	10	100	10	40	40
	110	140	110	200	120	200	130	130	100	100

注) 数値はすべて設計基準値に対する%値

な制御時間 (100 秒) 内に (31) 式の収束判断指標を満足するかどうかで行い、満足しない場合は、未収束あるいは不安定とみなす。

$$| \Delta p_c | + | \Delta v_t | < 10^{-4} \dots\dots\dots (31)$$

表 2 は三相地絡事故時の機器定数の変化に対して、どこまで安定に収束するかを示している。表中の数字は、各機器定数の変化できる範囲を設計時の値に対する比率 (% 値) で表したもの (最大 200%) で、そこまでは安定性が

保たれることを示している。

三相地絡故障に対しては、最適制御において、広範囲にわたる機器定数変化に対して良好な安定性が保たれているが、PID 制御において安定性、収束性に問題が生じやすく、ファジー制御、オブザーバを用いる最適制御では、最適制御と PID 制御の中間的な特性が得られている。

〈4・2〉 設定値の変更に対する評価 設定値変更に関しては、発電機の有効電力と端子電圧を運転点（有効電力 0.8 pu、無効電力 0.2 pu、端子電圧 0.9 pu）から同時に 0.1 pu 変更させる場合を想定して、〈3・2〉節の設計手法を用いて制御ゲインを決定する。なお、設定値変更に対するシミュレーションで使用した最適なファジー制御および PID 制御ゲインは、以下のとおりである。

$$\begin{aligned} \alpha_{PE} &= 7.88, \alpha_{PE0} = 9.24, \alpha_{PU} = 1.82 \times 10^{-3} \\ \alpha_{EE} &= 8.42, \alpha_{EE0} = 4.46 \times 10^{-3}, \alpha_{EU} = 1.00 \times 10^{-5} \\ K_{GP} &= 6.32 \times 10^{-2}, K_{GI} = 2.47, K_{GD} = 4.35 \times 10^{-2} \\ K_{AP} &= 1.37 \times 10^{-3}, K_{AI} = 1.79 \times 10^{-3}, \\ K_{AD} &= 4.28 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

最適制御およびオブザーバを用いる最適制御に関して、最適ゲインを求めるためには新たに設計しなおす必要があるが、三相地絡故障に対して設計した制御器でも、設定値の変更に対する特性に大きな違いがみられないことから、今回の検討では、前述のゲインをそのまま使用する。

シミュレーションとしては、三相地絡故障時と同様に、ゲインを固定した状態で比較検討を行う。

(1) 応答特性および動態安定度限界 有効電力と端子電圧の設定値を同時に 0.1 pu 増加させた場合の各制御方式の応答特性例を図 9 および図 10 に示す。また設定値変更に関する動態安定度限界を図 11 に示す。

三相地絡故障の場合と同様に、制御性能は最適制御、ファジー制御、オブザーバを用いる最適制御、PID 制御の順になっている。

図 9 設定値変更時の発電機有効電力

Fig. 9. Active-power time responses to changes in setting points.

なお、動態安定度限界を超える場合には、各制御方式とも同様の不安定形態を示すが、ここでは例としてファジー制御の応答波形（運転点：有効電力 0.8 pu、無効電力 0.45 pu、端子電圧 0.9 pu）を図 12 に示す。

(2) 機器定数の変化に対する収束特性 機器定数の変化に対する各制御方式の収束特性を表 3 に示す。設定値の変更に対しては、各制御方式ともに広範囲な機器定数変化に対して安定性が保たれている。

〈4・3〉 評価結果 以上のシミュレーション結果から、最適制御はいずれの場合も速やかに収束し、安定度限界、機器定数の変化に対する収束性にも優れていることがわかる。特に同一の制御ゲインを、三相地絡故障のような大擾乱、設定値の変更のような小擾乱の両方に対して適用可能であるという特徴をもつ。しかし、現実にはオブザーバの併用が必要であり、その場合には制御特性がかなり劣化する。これはオブザーバを用いる最適制御では、推定された状態変数と実際の制御対象の状態変数との差により出力に定常偏差が残るので、その偏差を積分操作によって抑える必要が生じ、そのために制御特性が悪化するためと考えられる。

ファジー制御はオブザーバを用いた最適制御や PID 制御より収束時間が短く、安定度限界、機器定数の変化に対

図 10 設定値変更時の発電機端子電圧
Fig. 10. Terminal-voltage time responses to changes in setting points.

図 11 動態安定度限界
Fig. 11. Dynamic stability limits.

図 12 動態不安定応答例
Fig. 12. Dynamic unstable example.

表 3 設定値変更時の機器定数安定変化範囲
Table 3. Stable range for parameter variation in the case of output changed.

	x_d'	x_{ad}	x_q	x_e	r_{fd}	D	M	T_{gov}	T_m	T_{ex}
最適制御	10	30	10	20	10	10	20	10	10	10
	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
ファジー	10	40	40	20	10	10	10	10	40	10
	150	200	200	170	200	200	150	200	200	200
オブザーバ	10	40	50	20	20	10	40	10	10	60
	140	200	200	150	200	200	200	200	200	200
PID	20	40	30	20	20	10	40	10	10	10
	140	200	200	200	200	200	180	200	200	200

注) 数値はすべて設計基準値に対する%値

する収束性にも優れた制御特性を示している。特に発電機の有効電力と端子電圧だけにより操作量が求められ、非線形要素を直接考慮に入れた設計が可能であるという特徴をもつ。

検討結果から制御特性を総合的に評価すると、最も良好な制御方式はすべての状態量を利用した最適制御となるが、これは理想的な場合で、実現性を考慮に入れると、ファジー制御、オブザーバを用いる最適制御、PID 制御の順になると考えられる。

5. むすび

本論文では、発電機制御方式として最適制御、ファジー制御、PID 制御、オブザーバを用いる最適制御を取り上げ、共通の評価指標を最小化するように、各制御方式の制御パラメータを決定した。この手法で設計された各制御器を用いて、三相地絡故障および設定値の変更時の制御性能に関して比較検討を行った。シミュレーションによる検討結果を要約すると、以下のとおりである。

(1) 最適制御は、同一の制御ゲインで、大擾乱、小擾乱の両方に対して速やかに収束し、優れた制御性能を有している。すべての状態量が観測できるならば、理想的な制御が期待できる。しかし現実には、状態量がすべて観測で

きるとは限らないので、オブザーバを併用することになるが、その場合には制御性能がかなり劣化する。

(2) ファジー制御とオブザーバを用いる最適制御は機器定数の変化に対してほぼ同じような収束性を有しているが、制御の速応性、安定度限界については、ファジー制御のほうが優れている。

(3) ファジー制御は、従来の PID 制御と同様に発電機の有効電力と端子電圧だけを用いて、発電機の非線形性、制御操作量の制限を直接考慮に入れて制御パラメータを決定することができる。ファジー制御は、PID 制御より優れた制御性能を有しており、従って観測量を増加させずに制御特性の改善を図ることが期待できる。ただし、設定値変更のような小さな擾乱と三相地絡故障のような大きな擾乱とでは、最適な制御パラメータが異なるので、その切り換えが必要となる。

今回の検討により各制御方式の基本的な特性の違いが明らかとなったので、今後は、より実際に近いモデルを用いた詳細な検討を行う予定である。

本論文の作成にあたって、多大な支援をいただいた北海道大学工学部電気工学科 北 裕幸助手に深く感謝の意を表します。

(平成 4 年 12 月 21 日受付, 同 5 年 7 月 7 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. Syst.*, PAS-89, 55 (1970)
- (2) 大塚, 他: 「発電機励磁/ガバナ多変数最適制御」, 電学論 B, 104, 733 (昭 59-11)
- (3) 菅野: ファジー制御, 日刊工業新聞社
- (4) T. Hiyama, et al.: "Fuzzy Logic Stabilizer with Digital Compensation for Stability Enhancement of Multimachine Power System", Third Sympo. Expert System Application to Power Systems, Tokyo-Kobe, Japan (1991)
- (5) M. A. Iskandar, 他: 「ファジィ制御を用いた同期発電機制御(その 5)」, 電気学会電力技術研資, PE-91-10 (平 3)
- (6) 北内・谷口: 「ファジィ理論による発電機励磁制御方式」, 電中研報告研報, T 90020 (1991 年 3 月)
- (7) 石亀・井元・川本・谷口: 「最適・ファジィのコンビネーション制御による電力システムの安定化」, 電学論 B, 110, 811 (平 2-10)
- (8) 岩井・井上・川路: オブザーバ, コロナ社
- (9) B. Porter: "Optimal Control of Multivariable Linear Systems Incorporating Integral Feedback", *Electronics Letters*, 7, No. 8, 170 (1971)
- (10) 田中・植田・横川: 多変数最適制御の発電所励磁・調速系への応用
- (11) 郭・田中・長谷川: 「ファジィ理論に基づく同期発電機制御」, 平 3 電気関係学会北海道支部連大, No. 73
- (12) 郭・田中・長谷川: 「ファジィ理論に基づく同期発電機制御(その II)」, 平 4 電気学会全大, No. 1128
- (13) 伊藤: システム制御理論, 昭晃堂

付 録

記号の説明

• : d/dt

ψ_{fd}, ψ_{ad} : 界磁, d 軸電機子反作用磁束

ω_0, ω : 系統, 回転子角速度

δ : 位相角

$e'_q, v_{fd}, v_t, v_d, v_q, v_{Bd}, v_{Bq}, v_B$: 電機子内部, 界磁, 端

子, d 軸端子, q 軸端子, d 軸系統, q 軸系統, 無限大母線電圧

i_d, i_q : d 軸, q 軸電流

$x_{ld}, x_l, x_{fd}, x_{ad}, x_d, x_q, x'_d, x_e, r_{fd}$: 界磁漏れ, 電機子漏れ, 界磁, d 軸電機子反作用, d 軸, q 軸, d 軸過渡, 外部リアクタンス, 界磁抵抗

p_m, p_{gov}, p_G : タービン出力, ガバナ出力, 発電機有効電力

D, M, k_{ex} : ダンピング定数, 慣性定数, 励磁系ゲイン

T_m, T_{gov}, T_{ex} : タービン, ガバナ, 励磁系時定数

$T_1, T_2, T_3, T_4, T_v, T, K_p, P_1$: PSS 定数

u_{gov}, u_{ex} : ガバナ系, 励磁系操作指令

郭

斌 (正員) 1962 年 11 月 8 日生。1987 年瀋陽工業大学大学院電気工学専攻修士課程修了。1991 年 4 月北海道大学大学院工学研究科電気工学専攻博士後期課程入学。電力系統における発電機制御に関する研究に従事。

田中英一

(正員) 1952 年 8 月 12 日生。1977 年 3 月北海道大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年 4 月同大学工学部電気工学科助手となり, 現在に至る。主として, 電力系統の解析・制御に関する研究に従事。計測自動制御学会会員。

長谷川 淳

(正員) 1943 年 12 月 13 日生。1971 年 3 月北海道大学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程修了。同年 4 月同大学工学部講師, 同助教授を経て, 1985 年 4 月同教授, 現在に至る。工学博士。主として, 電力系統の計画・運用・制御・解析, およびエネルギー貯蔵に関する研究に従事。IEEE, 照明学会, 日本 OR 学会, エネルギー・資源学会, 日本エネルギー学会, 低温工学会会員。

員。