従来の PSS とファジィ制御との協調による電力系統のハイブリッド形安定化制御手法

正員 M. A. Iskandar (東 海 大)

准員 佐藤 仁 志 (東 海 大)

正員 鈴木 昭 男 (電 源 開 発)

正員 石 関 光 男 (開発計算センター)

正員 水 谷 芳 史 (東 海 大)

Hybrid Type Stability Control Method Based on Combination of Conventional PSS and Fuzzy Control

Marzan Aziz Iskandar, Member, Masashi Satoh, Associate (Tokai University), Akio Suzuki, Member (Electric Power Development Co., Ltd.), Mitsuo Ishizeki, Member (The Kaihatsu Computing Service Center Ltd.), Yoshibumi Mizutani, Member (Tokai University)

The paper presents a hybrid type stability control method based on fuzzy control to improve power system stability. The proposed method consists of a speed deviation input fuzzy controller ($F1$), an electrical power deviation input analog type PSS (ΔP -type PSS) and a fuzzy judgement mechanism ($F2$). By using the membership function of the magnitude of speed deviation/acceleration of generator, the following control schemes are considered. If the magnitude is big then the supplementary stabilizing signal computed by $F1$ is used to damp oscillations as fast as possible, otherwise the output signal of ΔP -type PSS is used to avoid undesirable noise effect due to noisy input signal of the speed deviation of $F1$. The proposed control method increases the power system stability greatly, while it is simple to implement. The effectiveness of the method is demonstrated by one machine infinite bus and multimachine model systems.

キーワード：電力系統，ファジィ制御，系統安定化装置，測定雑音，大小外乱

1. ま え が き

現在，電力系統では，安定度を高めるために系統安定化装置 (PSS)⁽¹⁾が設置されている。しかしながら，電力系統が大規模，複雑化するに伴い，十分な安定度が得られない場合がある。

一方，近年，知識と経験に基づく柔軟な制御が期待されるファジィ制御の適用が研究されている^{(2)~(7)}。それらの多くは，角速度偏差 $\Delta\omega$ などを観測し，ファジィ制御操作量を求めて発電機の励磁を制御する $\Delta\omega$ 形ファジィ制御で，一般に，PSS より安定度が優れている。しかし， $\Delta\omega$ とその変化分を必要としてお

り，定常状態の制御操作量などに比較的大きな測定雑音の影響が現れるという欠点があり⁽⁵⁾⁽⁷⁾，フィルタや不感帯などを制御装置に挿入して，測定雑音に対処しようとしている。しかしながら，フィルタを設けると収束性が劣化したり，原システムが不安定となる場合，不感帯を導入すると微小な周期振動が発生する。

そこで，これらを解決するために，著者らは文献(2)の $\Delta\omega$ 形ファジィ制御が，大外乱に対して PSS と比較して安定度に優れていることにまず注目する。また，出力電力偏差 ΔP_e を観測し，発電機の励磁を制御する ΔP 形 PSS が，出力電力の測定雑音が角速度のそれよりも小さいことに起因し，制御操作量にひ

だな振動がほとんどないということにも注目する。そして、これらの利点を活用し、外乱の大小と過渡特性の状態を文献(3)の概念でファジィ推論を応用し判断する。大外乱などで過渡特性が大きく振動するとき(以下、大外乱時と略記)に大外乱用の $\Delta\omega$ 形ファジィ制御を、小外乱などで過渡特性が小さく振動し、定常状態の近傍にあるとき(以下、小外乱時と略記)に小外乱用の ΔP 形PSSを実施する。また、過渡特性がこれらの中間領域にあるとき両制御を実施する系統安定化手法の基本構造を、文献(6)で提案した。

本論文は文献(6)を発展完成させたもので次のような特長がある。

(1) 分散形ファジィ制御と連続形PSSを協調したハイブリッド形制御方式とし、従来の連続形PSSをそのまま使用できるようにした。

(2) 大外乱用、小外乱用、協調判断制御器の各選定について述べている。

(3) 外乱の大小と過渡特性の状態を判断するメンバーシップ関数の変数として、リセット回路を通した $\Delta\omega$ とその1サンプル周期間の差から作る大きさを用いることによって、有効であることを明らかにしている。

(4) 本制御体系をとるとともに調整パラメータを決定する際、評価関数に制御操作量の変化分を考慮することによって安定度を保ちながら測定雑音に対処することができる。

(5) 制御操作量を決定する際、計算処理がほとんどなく、オンライン制御が実施できる。

(6) 多機系統でも設計できるように評価関数を決定し、3機9母線系統に本手法を適用して、本装置が増設されるのに伴い、安定性と収束性が改善されることを明らかにしている。

(7) 全発電機に、本設計手順に基づき決定された同じ調整パラメータによる本装置を用いても、制御の質が高められることを明らかにしている。

(8) 設計点以外の故障に対しても、本手法は有効であることを確認している。

本論文では、本手法の有効性を立証するために、一機無限大母線系統と3機9母線系統モデルを用いて従来手法と比較検討した。

2. 一機無限大母線系統と3機9母線系統モデル

本論文では、図1に示す火力発電所が二回線送電線を通して無限大母線系統に接続されている一機無限大母線系統モデルと、図2の3機9母線系統モデル⁽⁸⁾を

図1 一機無限大母線系統

Fig. 1. One machine infinite bus system.

図2 多機系統モデル

Fig. 2. Multimachine power system.

用いる。3機9母線系統の第1発電所は水力、第2、第3発電所は火力発電所である。各発電機には図3(a)~(c)に示す自動電圧調整器(AVR)と调速機(GOV)が備えられているものとする。

3. 本制御手法

図4は本論文で提案する系統安定化制御の概念図で、大外乱用制御器F1、小外乱用制御器PPSS、協調判断制御器F2からなっている。

F1は $\Delta\omega$ を観測し、大外乱で設計した $\Delta\omega$ 形ファジィ制御器⁽²⁾である。PPSSは ΔP_e を測定し、小外乱用に用いる ΔP 形PSS⁽¹⁾である。F2は、まず外乱の大小と過渡特性の状態をファジィ推論⁽³⁾を応用して判断する。次に、大外乱時にF1の制御操作量 U_1 を、小外乱時にPPSSの制御操作量 U_2 を、過渡特性がこれらの中間領域にあるとき両 U_1, U_2 を用いるように本制御操作量 U_c を決定する。そして、本安定化制御は、決定された U_c で同時発電機の励磁を制御する。

(a) 自動電圧調整器 (AVR)

(b) 火力用調速機

(c) 水力用調速機

図 3 AVR と調速機の構成図

Fig. 3. Block diagrams of AVR and governor.

図 4 提案する系統安定化制御方式の概念図

Fig. 4. Block diagram of proposed stabilizer.

〈3・1〉 F1 の制御方式⁽²⁾ F1 では、図 4 に示すように、まず $\Delta\omega$ を観測し、定常時に発電機端子電圧のオフセットをなくすためにリセット回路を通す。次に、その出力 $E_w(k) = \Delta\omega_R(t)$ を F1 に入力し、付録 1 に従って F1 の制御操作量 $U_1(k)$ を次式より算出する。

$$U_1(k) = \frac{\mu_{Nw}(k) - \mu_{Pw}(k)}{\mu_{Nw}(k) + \mu_{Pw}(k)} \mu_{Gw}(k) U_m$$

$$= \{2\mu_{Nw}(k) - 1\} \mu_{Gw}(k) U_m \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 $kT \leq t < (k+1)T$, $k=0, 1, 2, \dots$,
 t : 連続時間, T : サンプル周期, μ_{Nw} , μ_{Pw} ,

図 5 ΔP 形 PSS のブロック線図

Fig. 5. Block diagram of ΔP-type PSS.

図 6 D_d のメンバシップ関数

Fig. 6. Membership function of D_d .

μ_{Gw} : メンバシップ関数のグレード, U_m :

制御操作量の最大値, $\mu_{Pw}(k) = 1 - \mu_{Nw}(k)$

〈3・2〉 PPSS の制御方式⁽¹⁾ 本論文では、図 5 に示す連続形の ΔP 形 PSS⁽¹⁾ が線形化された電力系統に対して設計され、また、 ΔP_e の測定雑音が $\Delta\omega$ のそれと比較して小さいことにも注目し、小外乱用を使用しその制御操作量を $U_2(t)$ とする。

〈3・3〉 F2 の協調判断制御器 F2 は、まず $E_w(k)$ と 1 サンプル周期間の差 $\Delta E_d(k) = E_w(k) - E_w(k-1)$ によって求めた大きさ

$$D_d(k) = \{[E_w(k)^2 + \Delta E_d(k)^2]\}^{1/2} \dots\dots\dots (2)$$

で外乱の大小と過渡特性の状態を決定する。

次に、 $D_d(k)$ が大きいいわゆる大外乱時ならば $U_1(k)$ を、 $D_d(k)$ が小さいいわゆる小外乱時ならば $U_2(t)$ を、 $D_d(k)$ がこれらの中間領域にあるとき両 $U_1(k)$, $U_2(t)$ を採用するという概念でファジィ推論を適用し、図 6 を構成する。そして、次の荷重平均⁽⁹⁾ からハイブリッド形の本制御操作量 $U_c(t)$ を求める。

$$U_c(t) = \frac{\mu_S(k) U_2(t) + \mu_B(k) U_1(k)}{\mu_S(k) + \mu_B(k)}$$

$$= U_2(t) + \mu_B(k) \{U_1(k) - U_2(t)\} \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 $-U_m \leq U_c(t) \leq U_m$, $kT \leq t < (k+1)T$, S_{U2} , B_{U1} : 各々 U_2 , U_1 における制御領域のメンバシップ関数のラベル, μ_S , μ_B : 各々 S_{U2} , B_{U1} のグレード, γ_1 , γ_2 : 調整パラメータ, $\mu_S(k) + \mu_B(k) = 1$

特に、文献(6)で D_d を求める際 $\Delta E_w(k) = [E_w(k) - E_w(k-1)]/T$ を用いていたが、一般に $0.0 < T < 1.0$ であるから、 T が小さいと測定雑音の影響が $U_c(t)$ に現れるため、本論文では $\Delta E_d(k) = E_w(k) - E_w(k-1)$ とした。

〈3・4〉 調整パラメータの決定手順 一般に、ファジィ制御器の調整パラメータは、標準外乱に対して評価関数が最小になるようにシミュレーション実験を実施し決定される。そこで本論文でも、次の大小外乱を標準外乱として用いる。

(i) 図1の点*f*、または図2の点*a*で三相地絡後、故障除去時間 $t_c=0.1$ sで故障回線を開放する大外乱。

(ii) 図1の発電所、または図2の第2発電所の機械的出力 P_m をステップ状に 0.05 pu 変化させた小外乱。

そして、次の手順に従い本制御器を新設する発電機の $F1, F2$ の各調整パラメータを決定する。

〔手順1〕 $F1$ のみを対象とする発電機に対して新設し、(i) の大外乱を用いて次式の評価関数 J_1 が最小になるよう、新設した $F1$ の調整パラメータ $\alpha_{w1}, \alpha_{w2}, \alpha_{w3}$ を決定する。

$$J_1 = \sum_{L=1}^m \sum_{k=0}^n |\Delta\omega_{RL}(k)| t_k \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 $\Delta\omega_{RL}$: リセット回路を通した L 発電機の角速度偏差、 $t_k = kT$ 、 L : 発電機番号、 m : 発電機機数、 n : サンプル回数の最大値

〔手順2〕 まず、〔手順1〕で求めた $F1$ を実施した対象の発電機に、〈3・2〉節の PPSS を加え図4の本制御方式を作る。次に、 $\Delta\omega, \Delta P_e$ の各測定雑音 n_w, n_p を考慮し、(i)、(ii) の大小外乱を用いて次式の評価関数 J_2 を各々求めて、その和が最小になるよう $F2$ の調整パラメータ γ_1, γ_2 を決定する。

$$J_2 = \sum_{L=1}^m \sum_{k=0}^n (|\Delta\omega_{RL}(k)| + x_1 |\dot{U}_{cl}(k)|) t_k \dots\dots (5)$$

ただし、 $\dot{U}_{cl}(k)$: 本制御を実施している L 発電所の制御操作量 $U_{cl}(k)$ の変化分 $\dot{U}_{cl}(k) = \{U_{cl}(k) - U_{cl}(k-1)\}/T$ 、 $x_1 : \dot{U}_{cl}(k)$ に対する重み

特に、(4)、(5)式で、(i)と(ii)の大小外乱を評価するために $\Delta\omega(k)$ を用いると多機系統で残留偏差が残るために正確な評価ができない。そこで、本論文では、リセット回路を通した $\Delta\omega_{RL}(k)$ を用いている。更に本論文では、(5)式において $|\dot{U}_{cl}(k)|$ を考慮してむだな U_{cl} の振動を減少させている。

4. シミュレーション結果

〈4・1〉 一機無限大母線系統への適用 本論文では、図1のモデル系統に対して表1の定数を用いて、 $T=0.01$ sでシミュレーション実験を実施した。な

お、同期発電機モデルとしては、文献(7)に示す非線形状態方程式を使用する。また、電力系統における $\Delta\omega$ と ΔP_e の測定雑音は、付録2の各測定雑音 n_w, n_p を用いる。

(1) 大外乱用制御器の選定 $F1$ を選定するにあたり、本論文ではファジィ制御器、PSSの各制御法に対して $\Delta\omega$ または ΔP_e を入力とした図7に示す比較実験を実施した。

同図は(i)の大外乱が発生したときの $\Delta\omega, U_1$ の応答で、(I)が表1の受電側外部リアクタンス x_j を用いたいわゆる設計点の場合、(II)が(I)で設計し x_j を1.3倍にした場合の各応答である。(a)図は〔手順1〕によって設計された $F1$ のみの場合である。(b)図は ΔP_e を入力とし、(a)図と全く同じ〈3・1〉節のファジィ制御と〈3・4〉節の設計手順1を用いた ΔP 形ファジィ制御（ただし、調整パラメータ α_{pi} とし、添字 p は ΔP 形を意味する）である。(c)図は付録3に示す従来の $\Delta\omega$ 形 PSS、(d)図は図5の ΔP 形 PSS である。

(a)図と(c)図は、 $\Delta\omega$ を観測し制御しているために U_1 に大きな測定雑音の影響が現れて、その結果、出力電力 P_e 、端子電圧 V_t などに比較的大きな雑音が生じ質を低下させている。しかしながら、(a)図は図7で最も良好な収束性と安定性を示している。(b)、(d)図は、 ΔP_e を観測し制御しているために、 U_1 に対して測定雑音の影響もほとんどなく、むだな振動もない良好な特性であるが、(a)図と比較して収束が遅く、安定度が低い。これは、例えば $\Delta\omega$ がまだ正の最大にあるにもかかわらず、 U_1 が逆方向に切り換えられるからだと思われる。そこで本論文では、大外乱に対して収束性と安定度に優れている(a)図を大外乱用制御器として用いる。なお、AVRとGOVのみのいわゆる無制御の応答特性はどちらの場合も不安定である⁽⁴⁾。

表1 一機無限大母線系統の使用定数
Table 1. System constants for one machine infinite bus system.

発電機 :	$P_{max}=1.05$ pu, $P_{e0}=1.0$ pu, $T_{d0}'=5.6$ s, $M=7.2$ s, $D=0.00531$ pu.s, $X_d=1.62$ pu, $X_d'=0.25$ pu, $X_e=1.6$ pu, $V_{t0}=1.0$ pu, $V_b=1.0$ pu, $\omega_0=377$ rad/s
AVR :	$K_A=200.0$, $T_A=0.05$ s, $T_f=1.25$ s, $K_f=0.07$, $E_{fmax}=7.3$ pu
GOV :	$\sigma=0.05$, $T_g=0.02$ s, $T_r=2.0$ s
送電線 :	$x_t=0.14$ pu, $x_l=0.52$ pu, $x_j=0.05$ pu, $x_e=x_l+x_t/2+x_j$
測定器 :	リセット回路と ΔP 形 PSS : $T_{pm}=0.01$ s, $T_{wm}=0.056$ s, $T_p=4.0$ s, $T_1=0.0$ s, $T_2=0.0$ s, $T_3=0.0$ s, $T_4=0.0$ s, $K_p=1.0$

図 7 三相地絡後一回線開放の過渡特性 ($t_c=0.1$ s)
Fig. 7. Responses under tripping one line after three phase to ground fault ($t_c=0.1$ s).

ここで、 $\alpha w_1, \alpha w_2, \alpha w_3$ の決定においては、まずこれらの考慮すべき範囲を各々 $0.0 \sim 1.0$, $0.0 \sim 90.0^\circ$, $0.0 \sim 10.0$ とし、刻み幅 h_i を各々 0.1 , 10.0° , 1.0 とした。そして、考慮すべき範囲を刻み幅 h_i で各々順次変化させ、[手順 1] に基づき繰返しシミュレーション実験を実施して、 J_1 の最小となるときの値を $\alpha w_1, \alpha w_2, \alpha w_3$ とした。次に、求まった調整パラメータに対して $\pm h_i$ の各範囲をとり、各刻み幅を $h_i/10$ として [手順 1] に基づき、 J_1 の最小化を図りそのときの値を用いた。また、 $\alpha p_1, \alpha p_2, \alpha p_3, \gamma_1, \gamma_2$ も同様に決定した。

(2) 小外乱用制御器の選定 小外乱用制御器を選定するにあたり、本論文では図 7 と同様、次の図 8 に示す比較実験を実施した。図 8 は $\Delta\omega, U_2, \Delta P_e$ 、発電機の端子電圧偏差 ΔV_i の応答で、(I) が (ii) の小

外乱が発生したとき、(II) が (i) の大外乱が発生したときである。(a) 図は [手順 1] によって設計された $F1$ の場合、(b) 図は図 5 の ΔP 形 PSS の場合である。(c) 図は、 ΔP_e を入力とし (a) 図と全く同じ (3.1) 節のファジィ制御を用いて、(ii) の小外乱に対して (3) 式の J_1 が最小になるよう設計した、 ΔP 形ファジィ制御の場合である。(a) 図は、 U_2 に大きな測定雑音が見え、 $\Delta P_e, \Delta V_i$ などに比較的大きな雑音が生じ質が低下している。(b), (c) 図は、 U_2 に対して測定雑音の影響もなく、 $\Delta\omega$ などにむだな振動もない良好な特性である。小外乱に対して (b) 図は (c) 図よりも振動も少なく速やかに収束している。また、大外乱に対しても図 7 (d) の (I) は図 8 の (c) の (II) と比較して収束が速い。これらの結果、本論文では小外乱用として ΔP 形 PSS を用いる。

図 8 小外乱と大外乱の過渡特性

Fig. 8. Responses under small and large disturbances

 図 9 本手法の過渡特性 ($\alpha_{w1}=0.75$, $\alpha_{w2}=11.0^\circ$, $\alpha_{w3}=2.3$, $\gamma_1=1.3$, $\gamma_2=1.6$)

Fig. 9. Responses with proposed control.

(3) 大小外乱用制御器をファジィ推論によって協調させた本手法 図 9 は $x_1=1.0$ における本手法で (i) および (ii) の大小外乱における $\Delta\omega$, U_c , ΔP_e , ΔV_t の過渡特性である。図 9 の応答は、測定雑音の影響もほとんど受けず良好な特性を示している。特に、大外乱の $\Delta\omega$ は図 7 (a) とほぼ同様な収束性を示している。

表 2 は、図 1 の x_j を大きくし、(i) の大外乱が発生した場合の安定度と測定雑音の影響について調べたものである。ただし、各調整パラメータは図 7～図 9 と同じ値を用いている。本手法は測定雑音の影響もなく、 ΔP 形 PSS よりも十分に安定度が大きく、 $\Delta\omega$ 形ファジィ制御と同等以上の安定度が得られ、ロバスト性に優れていることがわかった。

なお、図6のメンバシップ関数の変数 D_d としては、 $\Delta\omega_R$ 以外に ΔP_{er} 、 ΔV_{ir} 、発電機内部電圧の位相角偏差 $\Delta\delta_R$ (添字 R はリセット回路の出力を意味する)が考えられる。表3は、これらを用いて各々(2)式と同様に作られる大きさを図6の D_d として用い、[手順2]に従って $F2$ を設計し本制御を実施した場合である。 J_1 は設計点において、(i)の大外乱が発生したときの評価関数である。 x_j の安定限界値は表2と同様 x_j を大きくし、(ii)の大外乱が発生したときの安定限界を示す。表3より本論文で採用した $\Delta\omega_R$ の場合が最も J_1 が小さく、雑音の影響もなく、安定限界が高いことが理解され、以後 $\Delta\omega_R$ を用いる。

〈4・2〉多機系統への適用 更に、本手法の有効性を立証するために、表4の使用定数と表5の定格値近傍の負荷状態にある図2の3機9母線系統に本手法を適用する。実施に際して、各発電機の図5の ΔP 形PSSは、文献(1)に基づき各々設計し、表4(c)のごとくである。

各発電機の本制御器は、〈3・4〉節の手順に従い設計した。ただし、大外乱としては、〈3・4〉節の(i)と同様、母線7の近傍点 a において三相地絡後0.1sで故障回線7-8間の1回線を開放している[(1-2)の大外乱と呼ぶ]。小外乱としては、〈3・4〉節の(ii)と同様、第2発電所の P_{m2} をステップ状に0.05 pu変化させている[(2-2)の小外乱と呼ぶ]。また、各発電機に本制御

表2 X_j を大きくした場合の安定度と雑音の影響

Table 2. Stability limit by increasing x_j and noise effect.

	x_j の安定限界値 ($\times 0.05$ pu)	雑音の影響
$\Delta\omega$ 形ファジィ制御	1.635	×
ΔP 形PSS	1.220	○
本制御手法	1.660	○

○：なし，×：あり

表3 $F2$ の各入力に対する比較検討

Table 3. Comparison of $F2$ for each input signal.

$F2$ の入力	γ_1	γ_2	J_1	n_f	x_j の安定限界値 ($\times 0.05$ pu)
$\Delta\omega_R$	1.30	1.60	866.65	○	1.660
ΔP_{er}	0.04	0.08	896.01	△	1.615
ΔV_{ir}	0.06	0.08	901.18	○	1.560
$\Delta\delta_R$	0.15	0.19	900.02	△	1.575

n_f ：雑音の影響，○：なし，△：部分的にあり。

器を設置するときは表4(c)の各 ΔP 形PSSを使用する。

(1) 本制御装置の増設効果について 図10～図12は、(1-2)の大外乱、(2-2)の小外乱および(1-2)の大外乱発生後故障送電線路7-8間を開放したループ開放(6 LG-O、以後ループ開放と呼ぶ)が生じた場合の第2発電所における $\Delta\omega$ の特性である。ただし、 $\Delta\omega_{21}$ 、 $\Delta\omega_{22}$ 、 $\Delta\omega_{23}$ は各々(1-2)の大外乱、(2-2)の小外

表4 多機系統の使用定数

Table 4. System constants for multimachine system.

(a) 発電機

番号	M	D	X_d	X_d'	X_q	T_{d0}'	T_{q0}'
1	47.28	0.01	0.146	0.061	0.097	8.96	0.50
2	12.80	0.01	0.896	0.120	0.864	6.00	0.535
3	6.02	0.01	1.312	0.181	1.258	5.89	0.60

T_{d0}' 、 T_{q0}' の単位はs、他の単位はpu

(b) AVRとGOV

定数\番号	1	2	3
δ_r	0.3	-	-
T_r (s)	5.0	-	-
T_p (s)	0.04	-	-
σ	0.05	0.05	0.05
T_g (s)	0.2	0.2	0.2
T_w (s)	1.0	-	-
T_l (s)	-	1.0	1.0
P_{max} (pu)	2.47	1.92	1.28
K_A	200.0	200.0	200.0
T_A (s)	0.05	0.05	0.05
E_{fmax} (pu)	7.3	7.3	7.3
K_f	0.072	0.075	0.039
T_f (s)	1.20	1.25	0.65

(c) 測定器、リセット回路と ΔP 形PSS

定数\番号	1	2	3
T_{pm} (s)	0.01	0.01	0.01
T_{wm} (s)	0.056	0.056	0.056
T_R (s)	4.0	4.0	4.0
T_1 (s)	0.05	0.07	0.10
T_2 (s)	0.02	0.02	0.02
T_3 (s)	0.03	0.03	0.03
T_4 (s)	0.10	0.10	0.09
K_p	1.20	0.60	0.70

番号：発電所の番号

表5 運転条件

Table 5. Operating condition.

		発電所の番号		
		1	2	3
運転点	P_0 (pu)	2.20922	1.92	1.28
	Q_0 (pu)	1.02627	0.56543	0.41123
	V_{t0} (pu)	1.04	1.025	1.025

乱、ループ開放が発生したときの第2発電所の角速度偏差である。

図10はAVRと調速機のみいわゆる無制御の場合で、大小外乱に対して安定であるが振動的である。一方、ループ開放は不安定となっている。

図11(I)は ΔP 形PSSを、(II)は本手法を実施した場合である。(a)図は、最も制御効果が高い⁽⁹⁾第2発電所のみに ΔP 形PSSと本手法を各々実施した場合である。大小外乱に対してはいずれも安定となるが、ループ開放に対しては両者とも不安定である。(b)図は、第2発電所に(a)図の各制御を実施した系統に、新たに第3発電所に ΔP 形PSSと本手法を各々実施した場合である。(b)図は(a)図に比べて良好な特性となるが、 ΔP 形PSSはループ開放に対し

図10 第2発電所の無制御の過渡特性
Fig. 10. Uncontrolled responses of unit No. 2.

(I) ΔP 形PSS

図12 全発電所に同じ F_1 と F_2 を用いた過渡特性

Fig. 12. Responses in case of same F_1 and F_2 set for all units.

(II) 本手法

(a) 第2発電所に安定化制御を実施した場合

(I) ΔP 形PSS

(II) 本手法

(b) 第2, 第3発電所に安定化制御を実施した場合

(I) ΔP 形PSS

(II) 本手法

(c) 全発電所に安定化制御を実施した場合

図11 第2発電所の過渡特性

Fig. 11. Controlled responses of unit No. 2.

表 6 調整パラメータの値
Table 6. Value of tuning parameters.

No.	発電所番号	γ_{w1}	γ_{w2}	γ_{w3}	γ_1	γ_2
(1)	2	0.69	16.0	1.8	1.6	1.9
(2)	3	0.73	18.0	1.2	0.5	0.7
(3)	1	0.23	29.0	0.3	0.5	1.1
(4)	1,2,3	0.72	15.0	2.1	0.7	0.9

表 7 各故障点で三相地絡後ループ開放が
発生した場合の検討

Table 7. Comparison in case of loop
opened after three phase to ground fault
at each point.

No.	故 障 点					
	$a(t_c=0.1\text{ s})$		$b(t_c=0.1\text{ s})$		$c(t_c=0.14\text{ s})$	
	ΔP 形 PSS	本手法	ΔP 形 PSS	本手法	ΔP 形 PSS	本手法
(1)	×	×	○	○	×	○
(2)	×	○	○	○	×	○
(3)	×	○	○	○	×	○
(4)	—	○	—	○	—	○

○：安定，×：不安定

に従い設計した，表 6 (4) の調整パラメータを各発電所で実施した場合について検討する。図 12 は，この結果で図 11 と同じ外乱を与えた場合で，いずれも安定となり，図 11(c) の(II)より収束性が幾分遅くなるが十分良好な特性となっている。

(2) 設計点以外で故障が発生した場合 表 7 の(1)～(4)は，各々図 11(a)～(c)，図 12 と同じ制御装置を設置し，図 2 の故障点 a, b, c で各々ループ開放が発生した場合の ΔP 形 PSS と本手法を比較したものである。本手法は，(1) の a 以外で安定であることがわかり，ロバスト性が高いことが理解される。

5. 結果の検討

本論文では，電力系統の安定化制御問題に対して，測定雑音と大小外乱を考慮し，ファジィ制御と従来の ΔP 形 PSS を用いたハイブリッド形安定化制御手法を開発し，従来の制御手法と比較検討した。その結果，本手法は次のような成果を得た。

(1) ΔP 形 PSS と協調判断制御器 $F2$ を備え，評価関数に制御操作量の変化分を考慮することによって，大外乱用 $F1$ の欠点である角速度の測定雑音に対処できるようになった。

(2) 大小外乱とモデル系統の非線形性を考慮して本制御操作量を求めることができる。

(3) 提案した調整パラメータの一設計法に基づく本制御器は，基準となる大小外乱に対して，十分な最適性を保証することができる。

(4) 三相地絡後，故障回線開放などの大外乱に対しても，本手法は従来の手法と比較して良好で安定度も高く，ロバスト性に優れていることがわかった。

(5) 多機系統において，本制御器を増設することによって， ΔP 形 PSS 制御と比較して制御の質が高められることがわかった。

(6) 多機系統に対して全発電機で同じ調整パラメータによる本制御器を用いても，制御の質が高められることがわかった。

(平成 4 年 11 月 6 日受付，同 5 年 5 月 6 日再受付)

文 献

- (1) 小林・船山・湯浅・平山・野原：「簡単な系統安定化装置の設計手法と実機試験結果」，電学論 B, 101, 271 (昭 56-5)
- (2) T. Hiyama & T. Sameshima: "Fuzzy logic control scheme for on-line stabilization of multi-machine power system", Fuzzy Sets and System 39, p. 181, North-Holland (1991)
- (3) 石亀・井元・川本・谷口：「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」，電学論 B, 110, 811 (平 2-10)
- (4) M. A. Iskandar・佐藤・鈴木・石関・水谷：「角速度と電力を観測しファジィ制御を用いた系統安定化装置」，電気学会電力技術研資，PE-92-83 (平 4)
- (5) 檜山・鯨島：「ファジィ制御法の応用によるオンライン電力系統安定化制御」，平 2 電気学会電力・エネルギー部門全大 (1)，No. 33
- (6) M. A. Iskandar・鈴木・石関・水谷：「 ΔP 型 PSS と $\Delta \omega$ 型ファジィ制御の協調による系統安定化装置について」，電学論 B, 112, 840 (平 4-9)
- (7) M. A. Iskandar・鈴木・石関・水谷：「ファジィ制御を用いた電力系統の安定化制御」，同上 B, 112, 1111 (平 4-12)
- (8) P. M. Anderson, A. A. Fouad: "Power System Control and Stability", Vol. I (1977) Iowa State Press
- (9) A. Feliachi: "Optimal siting of power system stabilisers", IEE Proc., 137, pt. C, No. 2, 101 (1990)

付 録

1. 文献 (2) の手法

$\Delta \omega_R(t)$ を $F1$ に入力し， $E_w(k) = \Delta \omega_R(t)$ ，その変化分 $\Delta E_w(k) = \{E_w(k) - E_w(k-1)\} / T$ とし， E_w を横軸， $a_{w1} \Delta E_w$ を縦軸にとった平面にこれらを描くと，次の $p_w(k)$ を得る。

$$p_w(k) = D_w(k) / \theta_w(k) \dots\dots\dots (付 1)$$

ただし， a_{w1} ：調整パラメータ， D_w ：大きさ， θ_w ：位相角

制御操作量 $U_i(k)$ は，文献 (2) に従い， θ_w と D_w に対して各々付図 1 (a)，(b) のメンバシップ関数を用いて (1) 式から算出される。

2. 測定雑音

付図 2 は，本論文で用いた n_w, n_P の各測定雑音の

付図 1 θ_w と D_w のメンバシップ関数
app. Fig. 1. Membership functions of θ_w and D_w .

(a) n_w の特性

(b) n_P の特性

付図 2 n_w, n_P の測定雑音
app. Fig. 2. Measurement noises of n_w and n_P .

付図 3 $\Delta\omega$ 形 PSS の構成線図
app. Fig. 3. Block diagram of $\Delta\omega$ -type PSS.

代表例である。それらは、乱数から作ったもので、大きさの平均値が 0.0 で、標準偏差が 1.0 の正規分布をしている。そして各最大値は、実際の測定結果を参照し、モデルシステムにおいて、AVR と調速機のためのいわゆる無制御の系を用いシミュレーション実験で求めたものである。なお、多機システムの各測定雑音についても同様な方法で決定している。

3. 従来の $\Delta\omega$ 形 PSS

文献(1)の連続形の $\Delta\omega$ 形 PSS を図 1 の一機無限大母線システムモデルについて設計すると付図 3 のようになる。

Marzan Aziz Iskandar (正員)

1958 年 5 月 18 日生。1986 年インドネシア技術評価応用庁(BPPT)入庁。平成 3 年 3 月東海大学大学院修士課程修了。同年 4 月同大学院博士課程進学。電力システムの安定化制御に関する研究に従事。

佐藤 仁志 (准員)

昭和 42 年 1 月 28 日生。平成 5 年 3 月東海大学大学院修士課程修了。電力システムの安定化制御に関する研究に従事。現在、東芝(株)勤務。

鈴木 昭男 (正員)

昭和 25 年 11 月 21 日。51 年 3 月成蹊大学大学院工学研究科修士課程修了。同年 4 月電源開発入社。以来、電力系統計画、解析業務に従事。現在、工務部技術室課長。IEEE 会員。

石関 光男 (正員)

昭和 26 年 1 月 14 日生。49 年 3 月神奈川大学電気工学科卒業。同年 4 月(株)開発計算センター入社。以来、電源開発計画に従事。現在、室次長。

水谷 芳史 (正員)

昭和 19 年 2 月 18 日生。43 年 3 月東海大学大学院修士課程修了。61 年 4 月同教授。工学博士。負荷周波数制御、電力システムの安定化制御に関する研究に従事。IEEE、計測自動制御学会、日本ファジ学会会員。