

ファジィ制御規則による一機無限大母線系統安定化の 実験と解析

貝津弘幸^{*}・吉澤健太郎^{**}・佐藤孝雄^{***}

(平成8年10月31日受理)

Experimental Study on the Improvement of Transient Stability
in One-Machine Infinite-Bus Power System using Fuzzy Control Rules

Hiroyuki KAIZU^{*}, Kentaro YOSHIZAWA^{**} and Takao SATO^{***}

This paper describes the experimental study on the improvement of transient stability in a laboratory size 3kVA generator connected to an infinite-bus power system using fuzzy control rules. The control scheme is constructed under the knowledge of the equal-area method well known as the transient stability analysis. The proposed method is implemented by controlling the field excitation system based on fuzzy logic rules consisting of the angular velocity and output power deviation during transient conditions of AC generator. The digital simulation studies are also carried out to test and compare the control scheme and its dynamic performances. As the results, the numerical studies show good agreement with the experimental results, and the proposed controller is verified to damp the transient swings caused by a fault in the system.

key words : electric power system, fuzzy control, equal-area method

1. まえがき

電力需要の増大と電源立地の困難化に伴う電源の遠隔化が進み基幹系統は大容量・長距離送電となり、その安定度の向上が重要課題である。このため各種安定化制御に関する研究が行われている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。電力系統は本質的に非線形性の強いシステムであり、系統モデルに含まれる不確実性に対応できる安定化制御にファジィ理論を適用する方法が提案されている⁽⁴⁾⁻⁽⁷⁾。ファジィ論理形制御はシステムの不確かさや非線形性に対して、エキスパートの知識・経験を言語的制御規則として理論化することによって制御動作を決定する。

本論文では、系統の過渡安定度解析法として周知の等面積法の知識に基づくファジィ論理形制御規則の有用性について、一機無限大母線系を模擬した小型(発電機

* 情報電子工学科 教授

** 東京電力株式会社 電力技術研究所

*** 新潟大学工学部 電気電子工学科

容量 3 kVA) の実験系統装置を用いて検証した。制御系は発電機の過渡動揺時の角速度と電気出力偏差の状態量を利用して「if (前件部) then (後件部)」形式の簡単なファジィ規則をパーソナルコンピュータで比較演算することによって導出した安定化信号を発電機の励磁系に与える。模擬送電系統のオンライン制御実験により本制御法は系統安定化に有効であり、実験結果の過渡応答が数値シミュレーション解析による制御性能の応答とよく一致することを確認した。なお、本ファジィ制御の有効性については、従来の系統安定化制御装置 (Power System Stabilizer : PSS と略記) との比較によって考察している。

2. ファジィ制御規則

2 回線送電線で関係される一機無限大母線系統を図 1 に示し、系統の過渡安定度を等面積法で考察すると以下のようなになる。

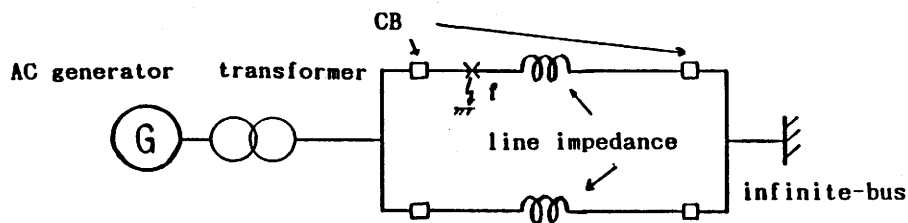


Fig.1. One-machine infinite-bus power system.

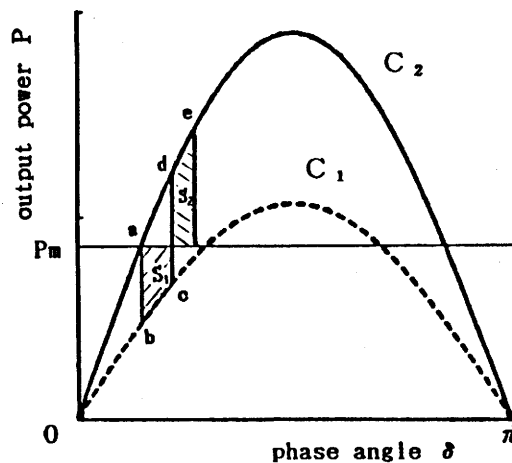


Fig.2. Power-angle curve.

図 1 の系統の電力 — 相差角曲線は発電機の機械入力 P_m を一定と仮定すると図 2 のように表される。図の平常運転時 (2 回線送電) の電力曲線 C_2 において点 a が安定平衡点である。このとき、1 回線が遮断されたとすると、動作点は b に移行し 1 回線送電時の電力曲線 C_1 に沿って発電機は加速エネルギーを受けて相差角 δ が増

大する。点cで再閉路によって2回線送電に復帰したとすると、動作点はdに移行し2回線送電の電力曲線 C_2 に沿って減速エネルギーを得る。このとき、面積 S_1 の加速エネルギーと面積 S_2 の減速エネルギーの補償($S_1=S_2$)によって相差角の増加は止まり、以後減速・加速を繰り返す系統は振動的となる。このように等面積法に基づく考察によると制御規則の前件部は、角速度偏差 $\Delta\omega$ に依存するところが大きく発電機の励磁制御系に関しては、 $\Delta\omega$ が正ならば励磁を強め、 $\Delta\omega$ が負ならば励磁を弱めることが望ましい。また、前件部変数としては $\Delta\omega$ のほかに角加速度 $\dot{\omega}$ や電気出力偏差 ΔP 、更には電気出力の時間微分 \dot{P} を利用することが有用と考えられる⁽⁸⁾。

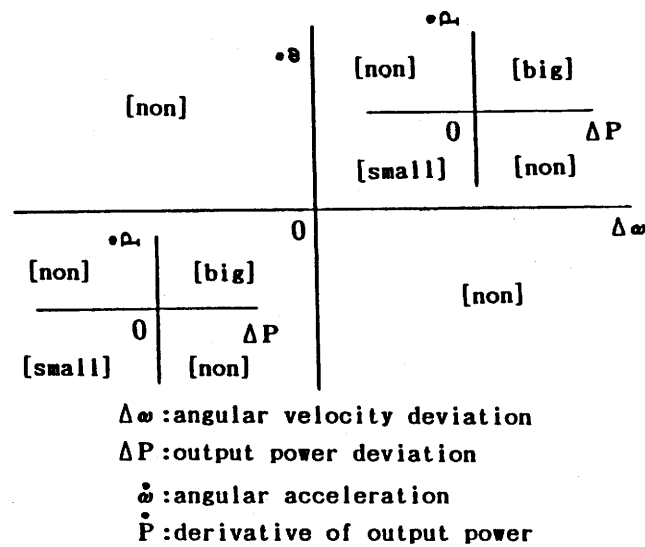


Fig.3. Fuzzy control rule.

本文では図3に示す制御規則の原理を構築し、この規則に励磁制御系の時間遅れを考慮して反時計廻りに動かし、次式の制御規則によって安定化信号を生成することとした。

- R 1 : if $\Delta\omega > 0$, $\dot{\omega} > 0$, $\Delta P > 0$ and $\dot{P} > 0$ then U is [non]
- R 2 : if $\Delta\omega > 0$, $\dot{\omega} > 0$, $\Delta P > 0$ and $\dot{P} \leq 0$ then U is [small]
- R 3 : if $\Delta\omega > 0$, $\dot{\omega} > 0$, $\Delta P \leq 0$ and $\dot{P} > 0$ then U is [big]
- R 4 : if $\Delta\omega > 0$, $\dot{\omega} > 0$, $\Delta P \leq 0$ and $\dot{P} \leq 0$ then U is [non]
- R 5 : if $\Delta\omega > 0$ and $\dot{\omega} \leq 0$ then U is [non]
- R 6 : if $\Delta\omega \leq 0$ and $\dot{\omega} > 0$ then U is [non]
- R 7 : if $\Delta\omega < 0$, $\dot{\omega} < 0$, $\Delta P > 0$ and $\dot{P} > 0$ then U is [non]
- R 8 : if $\Delta\omega < 0$, $\dot{\omega} < 0$, $\Delta P > 0$ and $\dot{P} \leq 0$ then U is [small]
- R 9 : if $\Delta\omega < 0$, $\dot{\omega} < 0$, $\Delta P \leq 0$ and $\dot{P} > 0$ then U is [big]
- R 10: if $\Delta\omega < 0$, $\dot{\omega} < 0$, $\Delta P \leq 0$ and $\dot{P} \leq 0$ then U is [non]

上式に基づくファジィ安定化信号 U を与えるために、まず補助信号 $|u|$ を発電機の角速度偏差の大きさ $|\Delta\omega|$ を用いて $|u| = a|\Delta\omega|$ 、 $a > 0$ で与え、本文では試行により $a = 1$ とした。次に、 U はファジィ利得 K_f と上の補助信号により以下のように決定した。

- $U = K_f |u|$; 励磁を強める : [big]
- $U = -K_f |u|$; 励磁を弱める : [small]
- $U = 0$; 安定化信号なし : [non]

以上のファジィ安定化信号を付加する励磁制御系（1次遅れ近似）のブロック線図を図4のように構成する。なお、図4の（a）は提案のファジィ制御の有効性を比較検討するための従来形PSS制御のブロック線図を示す。

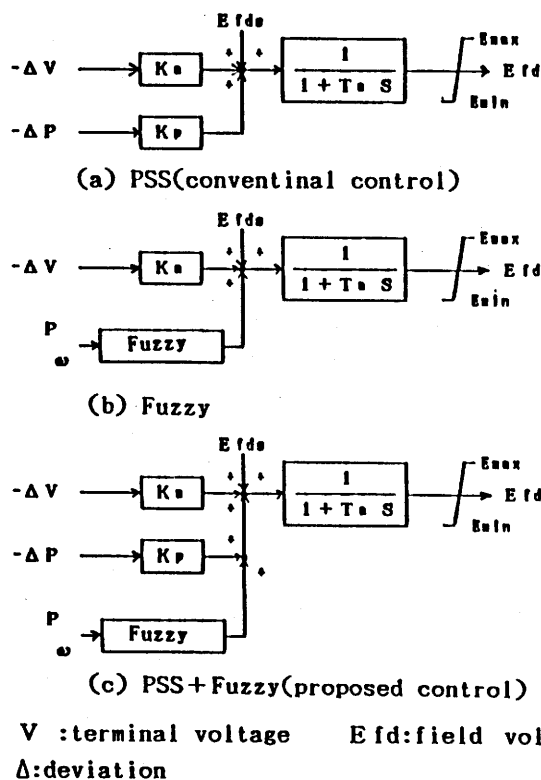


Fig.4. Block diagrams of field excitation control.

3. 実験と解析

提案した制御法の実用性を検証するために模擬系統装置を使用した実験を行った。実験系統装置の概要を図5に示す。交流発電機は定格電圧，容量，回転速度が200V，3kVA，1,500rpmの非突極機でサイリスタレオナード装置に制御された直流電動機に

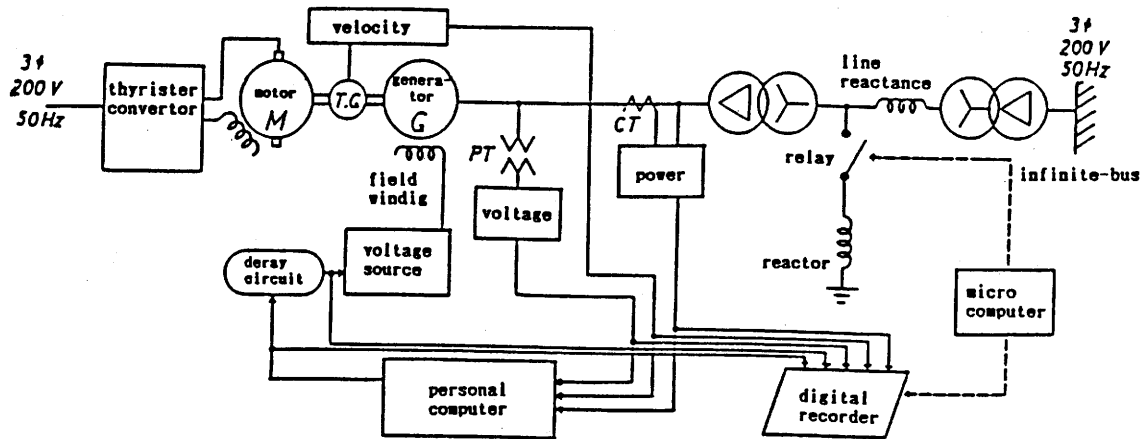


Fig.5. Structure of experimented system.

より定トルク運転（発電機の機械入力一定を想定）されており、変圧器，線路リアクトル，変圧器を介して無限大母線に接続されている。系統の状態量として発電機の端子電圧，角速度，電気出力を観測している。励磁制御系へ付加する安定化信号を構成するために必要な状態量のうち、発電機の角速度と電気出力の偏差 $\Delta\omega$ ， ΔP は直接観測値を用い、角加速度と電気出力の時間微分 $\dot{\omega}$ ， \dot{P} については後進差分によって推定した。状態量をA/D変換してコンピュータに取り込み比較演算して安定化信号を出力するまでのサンプリング間隔は約23msである。なお、短絡事故の発生・除去を行うためのリレーのON-OFF制御および過渡応答記録のためのデジタルレコーダの制御にワンボードマイコンを使用した。

実験は、発電機の平常運転として端子電圧1.015pu，電気出力0.5pu，励磁電圧については1.129puを設定した(puは200V，3kVA基準)。また、事故としては1回線送電中に三相短絡（観測系保護のため、リアクトルを介して短絡し故障突入電流を軽減している）を発生させ、故障発生から除去までが1秒間の場合について実験を行った。図6は実験結果を示したもので、一点鎖線が提案の制御法(PSS+Fuzzy)を行った場合であり、実線は従来形の制御(PSS)を示す。なお、図の破線は参考のためファジィ制御規則(Fuzzy)のみによる場合である。図6の結果から提案の制御法は系統安定化に有効であることが分かった。図7は本実験系統の数値シミュレーション解析を行った結果を示したもので、実験結果とのよい一致を見た。解析は、系統機器の抵抗分をすべて考慮し、数値計算の刻み幅を10msとして発電機の制動巻線効果と電機子側の過渡現象を考慮した厳密計算法で行っている。なお、図6の事故中の1秒間は電気出力の観測系保護のため電流回路を短絡しているため図7の時間応答と異なっている。

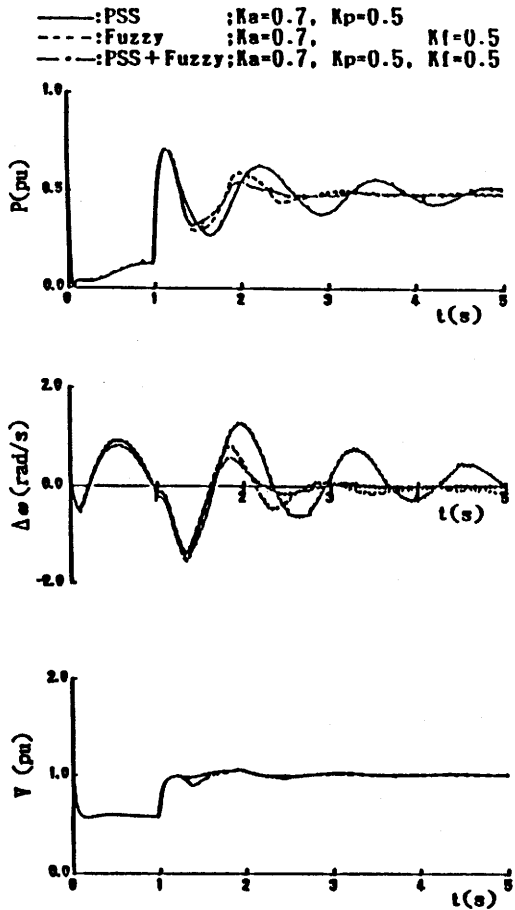


Fig.6. Time responses of generator (experimental results).

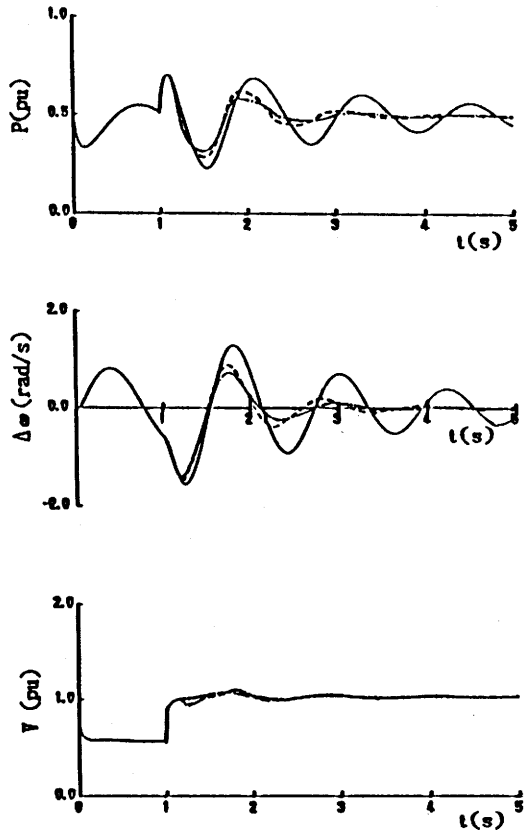


Fig.7. Time responses of generator (simulation results).

本文では、実験と解析についての一例を図6および図7に示したが、故障時間を変えた場合や平常運転時の電気出力を変えた場合についても検討している。その結果、制御性能は図6および図7と同様、本制御で対応でき有効であることを確認している。

4. まとめ

一機無限大母線系統の安定化について、等面積法の知識に基づくファジィ制御法の有用性をオンライン制御実験と数値シミュレーション解析によって検討し、制御性能に対して有効な結果を得た。多機系統への検討については今後の課題としたい。

参考文献

- (1) 嶋田：「パワーエレクトロニクス応用による新送電システム」，電気学会誌，112，35(1992)
- (2) Y.Wang, et al.：“Variable-Structure FACTS Controllers for Power System Transient Stability”，IEEE Trans. Power Systems, 7，307(1992)
- (3) A.A.Edris：“Enhancement of First-Swing Stability using a High-Speed Phase Shifter”，IEEE Trans. Power Systems, 6，1113(1991)
- (4) 石亀・他：「最適・ファジィのコンビネーション制御による電力系統の安定化」，電気学会論文誌B，110，811(1990)
- (5) T.Hiyama：“Rule-Based Stabilizer for Multi-Machine Power System”，IEEE Trans. Power Systems, 5，403(1990)
- (6) 上田・他：「電力系統におけるファジィ制御のメンバーシップ関数構成の単純化」，電気学会論文誌B，110，445(1990)
- (7) Y.Y.Hsu and C.H.Cheng：“Design of fuzzy power system stabilizers for multimachine power systems”，IEE Proc. 137-C, 233(1990)
- (8) 吉澤・他：「ファジィ制御による電力系統安定化の実験検証について」平成3年電気学会全国大会1149