SMES 有効無効電力のファジィ論理型制御による 電力系統安定化制御実験

正 員 宮 内 肇 (熊本大)
 学生員 藤 本 健 一 (熊本大)
 学生員 山 崎 泰 裕 (熊本大)
 学生員 大 西 正 恭 (熊本大)
 正 員 檜 山 隆 (熊本大)

Experimental Studies on Power System Stabilization by Fuzzy Logic Switching Control of SMES Active and Reactive Power

Hajime Miyauchi, Member, Kenichi Fujimoto, Student member, Yasuhiro Yamasaki, Student member,
 Masayasu Ohnishi, Student member, and Takashi Hiyama, Member
 (Kumamoto University)

A Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) is proposed to be used the stabilizing control of power systems. By simulations, we have been studying its control effect, the required energy for power system stabilization, and so on. We have also proposed the power system stabilizing control by SMES incorporated with the fuzzy logic switching control. Recently, a systematically designed 50kJ SMES system is installed at Kumamoto University. We have investigated the stabilizing effect of the proposed fuzzy logic switching control by means of experiments with the SMES system and a one-machine infinite-bus system. In the pervious paper, the experimental results about the SMES active power control is mentioned. In this paper, the experimental results of a simultaneous control of the SMES active and reactive power, which is incorporated with the fuzzy logic switching strategy, are shown and discussed. We make clear the effect of power system stabilizing control incorporated with the fuzzy logic switching control by SMES.

キーワード：SMES，系統安定化制御，ファジィ制御，模擬送電線実験

1. まえがき

電力の安定な供給を継続することは現代社会に対する責務であり、その要請に応え電力の生産輸送設備も拡充の一途を辿っている。しかし、電源立地や送電線用地の制約などから、電力輸送は長距離大容量輸送が一般的となり、電力系統の安定度は年々厳しさを増す傾向にある。それ故、種々の新しい系統安定化制御技術が検討され、その導入が進められている。

一方、超伝導コイルを用いた電力貯蔵設備である超伝導エネルギー貯蔵装置(SMES)⁽¹⁾は、パワーエレクトロニクスを利用した交直変換器により、電力を変換して貯蔵するので、高効率で、かつ、電力を高速に制御することが可能である。SMES のもつ電力の高速制御性能を活用することで、SMES を系統安定化制御へ応用することが提案され、各所で様々な検討が進められている。筆者らも、フィードバック制御法⁽²⁾やファジィ論理型スイッチング制御^{(3)・(5)}を適用した制御法⁽⁶⁾などを既に提案し、その制御効果や必要とするエネルギー貯蔵容量などにつ

いて、シミュレーションによる検討を行ってきた。

さらに、50kJ の貯蔵エネルギー容量をもつ SMES を本学へ導入し、SMES による系統安定化制御効果について実験的検討を開始した。実験を行うことによって、シミュレーションで有効性を確認しているファジィ論理型スイッチング制御の実時間制御への適用性、制御入力信号の取得、シミュレーションでは考慮していなかった問題はないかなどについて検討している。

すでに、SMES の有効電力のみのファジィ論理型スイッチング制御による系統安定化制御実験を行った結果については報告している⁽⁷⁾。ところで、導入した SMES は有効電力のみならず、定められた範囲内において無効電力を同時に独立に制御することも可能であるので、今回は SMES の有効電力無効電力の双方を同時に用いて、ファジィ論理型スイッチング制御による系統安定化制御実験を実施し検討を行った。

本論文では、まず、50kJSMES システムの概要について簡単に述べた後、今回の実験で用いた SMES による系統安定化制御のためのファジィ論理型スイッチング制

図1 50kJ SMES システムの外観
Fig.1. Outward of 50kJ SMES

御について説明し、有効無効電力を同時に制御する際の制約について述べる。最後に、一機無限大母線システムを用いて実験を行った結果を示し、実験結果について検討を加え、ファジィ論理型スイッチング制御の制御効果について検証する。

2. 50kJSMES システムの構成^{(7),(8)}

図1に、系統安定化制御実験中の50kJSMESシステムの外観を示す。図中写真右側が液体ヘリウム容器、写真

中央手前がクライオスタット、奥が交直変換器、その左側が液体ヘリウム自動補給装置である。液体ヘリウム自動補給装置は、クライオスタット内のヘリウム液面を監視しており、液面が蒸発により低下した場合自動的に液体ヘリウムを補給する。

交直変換器の交流側定格は、3相220V、5kVAであり、直流側定格は±40V、100Aである。交直変換器は、IGBTを使用した電圧型PWMコンバータとDC双方向チョッパで構成されている。外部から与えられる有効無効電力制御指令（指令値のアナログ電圧信号10Vが5kVAの電力に相当する）に応じて、交直変換器盤内部に収納されているコンバータ制御回路とチョッパ制御回路が作動し、SMESから実際に有効無効電力を出力する。交直変換器の制御回路からは、コイル電流、交流側で測定した有効電力・無効電力等の情報をアナログ信号として外部に取り出すことができる。

超伝導コイルの最大定格電流は100A、インダクタンスは10Hである。本SMESシステムの詳細な電気的な構成、主な仕様や保護などについては、参考文献^{(7)・(8)}を参照されたい。

3. SMES へのファジィ制御則の適用

今回の実験では、系統安定化制御則として、ファジィ論理型スイッチング制御^{(3),(5)}をSMESに適用⁽⁶⁾して用いた。本節ではこの安定化制御則について述べる。

図2 有効電力制御系に対する入力信号のフィルタリング処理
Fig.2. Filtering process of input signal of active power control system

図3 無効電力制御系に対する入力信号のフィルタリング処理
Fig.3. Filtering process of input signal of reactive power control system

図4 位相平面図

Fig.4. Phase plane

図5 メンバシップ関数

Fig.5. Membership function

実験に用いた SMES は、最大皮相電力の範囲内であれば、有効電力と無効電力を自由かつ独立に制御することができる。今回実験に用いた制御系では、有効電力制御系はシステムの制動力向上を、また、無効電力制御系は SMES 設置母線電圧の一定化を目的とし、両制御系間で役割を分担してシステムの安定化を図るように構成する。

SMES の有効電力制御系への入力としては、発電機出力 P_e を用いた。発電機端子に設置した電力計の出力を、図2に示すフィルタリング処理を行うことで、発電機角速度偏差 $\Delta\omega$ に相当する信号 $Z3(k)$ と、位相角偏差 $\Delta\delta$ に相当する信号 $Z5(k)$ を得る。

無効電力制御系の入力には、発電機端子電圧 V_t を用いた。発電機端子に設置した電圧計の出力を、図3に示すフィルタリング処理を行うことで、端子電圧偏差 ΔV_t に相当する信号 $Z1(k)$ と、その積分 $\int \Delta V_t dt$ に相当する信号 $Z3(k)$ を得る。なお、図2および図3中のローパスフィルタは入力信号のノイズ除去を目的としている。

ファジィ論理型スイッチング制御では、図4に示す位相平面図を用いる⁽³⁾⁽⁵⁾。有効電力制御系においては、スケーリングファクタ Asp を用いて、横軸を $Z5(k)$ 、縦軸を $Asp \cdot Z3(k)$ とする。この位相平面の第1象限では、発電機の角速度偏差、位相角偏差ともに正で、発電機が加速している状態にある。第1象限を中心とする Sector A では、SMES へ有効電力を吸収して発電機の加速を抑

え、系統の動揺を抑制し動作点を原点へ導く。逆に、第3象限を中心とする Sector B では SMES が有効電力を放出する。

そして、これら2つの Sector 間は、図5に示す台形型メンバシップ関数を用いて、SMES 有効電力の吸収と放出を、スイッチングラインを中心に緩やかに切り替える。ただし、Sector 間の重なり角 α は 90° とした。

SMES の有効電力指令値 $P_d(k)^*$ は、

$$P_d(k)^* = G(k) \frac{N(\theta(k)) - P(\theta(k))}{N(\theta(k)) + P(\theta(k))} \cdot P_{d\max}(k) \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 $P_{d\max}(k)$ は SMES が取り得る有効電力の最大値である。また、

$$G(k) = \begin{cases} \frac{D(k)}{Drp} & \text{for } D(k) < Drp \\ 1 & \text{for } D(k) \geq Drp \end{cases} \quad (2)$$

であり、 Drp はゲインの逆数に相当し、 $D(k)$ は位相平面上での動作点の現在位置と原点間の距離、 $\theta(k)$ は現在位置が横軸となす角である（図4参照）。SMES の取り得る有効電力の最大値 $P_{d\max}(k)$ は、交直変換器の損失を無視すれば、式(3)で与えられる。

$$P_{d\max}(k) = V_t(k) \cdot I_d(k) \quad (3)$$

ただし、 $I_d(k)$ は SMES のコイル電流、 $V_t(k)$ は交流側電圧である。

無効電力制御系では、横軸を $Z1(k)$ 、縦軸を $Asq \cdot Z3(k)$ とする (Asq はスケーリングファクタ)。この位相平面の第1象限では発電機端子 (SMES 設置母線) 電圧が基準値よりも高いので、端子電圧一定化のために、Sector A では SMES は遅れの無効電力を取る。逆に、Sector B においては SMES から進み無効電力を出す。そして、式(1)の $P_{d\max}(k)$ を SMES が取り得る無効電力の最大値 $Q_{d\max}(k)$ に、 $P_d(k)^*$ を無効電力指令値 $Q_d(k)^*$ に書き換え、さらに、式(2)の Drp を Drq に書き換えて用いる。

事故直後の電力動揺第一波を十分に抑制するためには、今回用いた制御系では、設置母線電圧の一定化を目的とする無効電力制御系よりも、制動力向上を目的とする有効電力制御系を優先する方が効果的である。そのため、無効電力の最大値 $Q_{d\max}(k)$ は、SMES の取り得る最大の皮相電力 $S_{d\max}$ (本 SMES システムの場合は 5kVA) から有効電力を制御した残り、すなわち、

$$Q_{d\max}(k) = \sqrt{S_{d\max}^2 - P_d(k)^*{}^2} \quad (4)$$

で与える。

4. 模擬電力系統

実験に用いた一機無限大母線模擬電力系統を図6に、またその外観図を図7に示す。発電機 (M-G セット) の主な仕様を表1に示す。表2に発電機定数を示す。発

図6 模擬電力系統
Fig.6. Artificial transmission system

図7 模擬電力系統の外観
Fig.7. Outward of artificial transmission system

電機には図8のブロック線図で表される AVR を、SMES 制御用とは別のパーソナルコンピュータ上に実現した。この AVR 信号を発電機のサイリスタ式励磁器に引き渡す。なお、SMES の無効電力制御系の効果を見るために、AVR の定数は効果を抑制した設定としている。

SMES の制御用パーソナルコンピュータとしては、飯山電機製 S233GC (CPU は Intel MMX Pentium 233MHz) を用いた。電力計からの発電機出力データおよび電圧計からの発電機端子電圧データ (ともにアナログ信号) を、DSP ボードを介してパーソナルコンピュータに取り込む。パーソナルコンピュータ上に、フィルタリング処理も含めて前節で述べたファジィ論理型スイッチング制御を MATLAB/Simulink で表現し、Real Time Workshop を用いて演算を実行させた。得られた有効電力指令 $Pd(k)^*$ および無効電力指令 $Qd(k)^*$ を再び DSP ボードでアナロ

表1 M-G セットの主な仕様

Table 1. Specification of motor-generator set

原動機	直流他励式	DC100V, 7kW 4極, 1800rpm
発電機	突極型同期機	3φ220V, 5KVA 4極, 1800rpm
AVR	時定数 T_{vs} ゲイン G_v	1sec (調整可能) 1 (調整可能)

表2 発電機定数

Table 2. Constants of generator

X_d	0.905 pu	X_q''	0.118 pu
X_q	0.542	X_l	0.093
X_d'	0.542	X_0	0.055
X_d''	0.129	X_2	0.124
T_{do}'	0.49 sec	T_d''	0.035 sec
T_d'	0.078	T_a	0.009

(設計値、5kVA, 220V ベース)

図8 AVR ブロック図
Fig.8. Block diagram of AVR

グ信号に変換し、交直変換器の制御回路に与える。制御のサンプリング間隔は 10msec とした。

SMES の初期状態は、入力信号中のノイズに伴う若干の変動を除いては、有効・無効電力ともに吸収も放出もしていない状態とする。外乱印加時点でのコイル電流 I_{d_0} は約 80A と設定した。

外乱は、線路の途中に挿入したスイッチにより線路の一部を短絡し、線路リアクタンスを変えるものである。スイッチを開き線路長を長くするものを外乱 1、逆にスイッチを閉じ線路長を短くするものを外乱 2 と呼ぶ。

外乱の発生時点を含む 10sec 間のデータを、デジタルオシロスコープ (横河電機製 DL708) で 10msec 間隔で収録した。収録したデータは、発電機出力 P_e 、発電機端子電圧 V_t 、SMES のコイル電流 I_d 、SMES への有効電力指令値 Pd^* と無効電力指令値 Qd^* 、交直変換器内の制御回路から得た SMES が実際に吸収放出した有効電力 P_d と無効電力 Q_d の 7 つのデータである。

図9 無制御時の結果 ($P_e=3\text{kW}$ 、外乱1)

Fig.9. Without control ($P_e=3\text{kW}$, case 1)

図10 ファジィ制御時の結果 ($P_e=3\text{kW}$ 、外乱1)

Fig.10. Fuzzy logic strategy ($P_e=3\text{kW}$, case 1)

5. 実験結果および検討

図2に示す有効電力制御系のフィルタリング処理のうち、ローパスフィルタの時定数を0.03sec、1段目のリセットフィルタの時定数を1.0sec、2・3段目のリセットフィルタの時定数を0.5secとした。また、図3に示す無効電力制御系の場合は、ローパスフィルタの時定数を0.05sec、1・2段目のリセットフィルタの時定数をそれぞれ3.0sec、0.5secとした。

図11 ファジィ制御時の結果 ($P_e=3\text{kW}$ 、外乱2)

Fig.11. Fuzzy logic strategy ($P_e=3\text{kW}$, case 2)

発電機出力 P_e を3kWと設定し外乱1を用いて、ファジィパラメータの最適値を求めた。求め方としては、4つのファジィパラメータの内3パラメータを固定し残り1つのパラメータの局所的な最適値を求める。次に他のパラメータについても同じ手順を行う。何度も試行錯誤的にこの手順を繰り返すことで最適値を求めた。その結果、 $Drp=0.025$ 、 $Asp=0.9$ 、 $Drq=2.0$ 、 $Asq=0.05$ が最適値となり、以下このファジィパラメータの値を用いる。

発電機出力 P_e を3kWとし外乱1の場合の、無制御時の結果を図9に、上述のパラメータを用いてファジィ論理型スイッチング制御を行った時の結果を図10に示す。収録した7つのデータのうち、発電機出力 P_e 、発電機端子電圧の変化 ΔV_t 、実際に吸収放出した有効電力 P_d と無効電力 Q_d の4データのみを示す。ただし、 P_e 、 P_d 、 Q_d は1pu=5kVAで、 ΔV_t は1pu=220Vである。

これより、SMESの有効無効電力に対し、同時にファジィ論理型スイッチング制御を施すことにより、発電機の電力動揺が速やかに減衰していることが分かる。有効電力制御系への入力信号である発電機出力には多くのノイズが含まれているが、本ファジィ論理型制御系の特徴である、平衡点に近付くとゲインが低下することにより、SMESの不必要な動作を抑えている。一方、無効電力制御により発電機端子電圧の動揺がそれほど抑制されていないのは、入力信号である発電機端子電圧の動揺が元々小さく若干過制御気味のゲインとなっているためである。さらに電圧動揺に近いレベルのノイズを含んでおり、SMES制御系がノイズを電圧動揺と誤認している。

図11に、発電機出力 P_e は同じ3kWとし外乱2を加した時に、ファジィ論理型スイッチング制御を行った

図 12 ファジィ制御時の結果 ($P_e=5.5\text{kW}$, 外乱 1)Fig.12. Fuzzy logic strategy ($P_e=5.5\text{kW}$, case 1) 図 13 有効電力のみ制御時 ($P_e=5.5\text{kW}$, 外乱 1)Fig.13. Without reactive power control ($P_e=5.5\text{kW}$, case 1)

ときの結果を示す。用いたファジィパラメータは図 10 の場合と同じである。外乱印加前の運転点が異なり、異なる外乱 2 を与えた場合に、外乱 1 の場合と同じファジィパラメータを使用したにも関わらず、本ファジィ論理型制御系は適切に発電機の動揺を抑制している。

図 12 は、発電機出力 P_e を 5.5kW と大きくした場合に、外乱 1 を印加した時の結果である。これより、 P_e が 3kW の場合と同じファジィパラメータを用いたにも関わらず、発電機出力の小さい 3kW の場合と動揺はほ

ぼ同じであり、本ファジィ論理型制御によって動揺がよく抑制されていることが分かる。

無効電力制御の効果を見るために、図 12 と同じ条件に対して、無効電力制御を行わなかった場合の結果を、図 13 に示す。図 12 の場合と比較すると、有効無効電力の両方を同時に制御した場合の方が、発電機端子電圧の動揺が少なく、したがって無効電力制御によって端子電圧の安定化が実現されていることが分かる。

しかしながら、今回の実験で与えた外乱では、発電機端子電圧の動揺は最大でも高々 0.03pu (6.6V) 程度であり、さらに、無限大母線の電圧も必ずしも一定ではない。そのため、発電機の電力動揺収束後も発電機端子電圧の変動が続き、SMES 無効電力制御系による端子電圧の一定化効果が十分に発揮されていない。この点については、端子電圧信号のノイズの除去、無効電力制御系に入力信号に対する不感帯を設定するなどの対策が必要であり、今後さらに検討と実験を行っていく予定である。

6. まとめ

かねて、ファジィ論理型スイッチング制御を SMES の有効無効電力同時制御に適用し、系統安定化制御を行うことを提案してきた。本論文では、 50kJ の貯蔵エネルギー量をもつ SMES と一機無限大母線模擬送電システムを用いて、ファジィ論理型スイッチング制御による SMES の安定化効果を実験的に検証した。その結果、本制御法は効果的であり、ある発電機の運転点で最適化したパラメータを変更することなく、他の運転点や外乱に対しても動揺抑制効果が高くロバストな制御系であることを実験的に示した。また、本制御系は、制御系を実現する計算機に対する負荷も比較的軽く、今回用いたパーソナルコンピュータでは余裕を持って制御時間間隔を 10msec に設定することができた。さらに、入力信号に含まれるある程度のノイズに対しては不感帯を具備している。このことから、本ファジィ論理型スイッチング制御は実用的であり実時間向きの制御系である。

今回の実験では、無効電力制御系の効果は確認できたが、今後、無効電力制御系の入力信号に含まれるノイズの除去、無効電力制御系の改善を行い、制御効果を上げたい。また、より厳しい事故条件を課した場合など様々な条件下での実験も実施する予定である。

最後に、実験を行うにあたり、本学理学部極低温装置室(現本学衝撃・極限環境研究センター極低温科学分野)に多大のご協力を頂きました。深く感謝致します。

(平成 11 年 2 月 17 日受付, 同 11 年 5 月 24 日再受付)

文 献

- (1) H. A. Peterson, N. Mohan, R. W. Boom : "Super-conductive energy storage inductor-converter unit for power systems," IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-94,

No.4, pp.1337-1346, 1975.

- (2) 大澤靖治、宮内肇、林宗明：「超電導エネルギー貯蔵装置による電力系統の安定化制御」、電気学会論文誌、105-B 巻 1 号、pp.23-30、1985.
- (3) T. Hiyama, T. Sameshima, C. M. Lim : "Fuzzy logic switching control of breaking resistor and shunt reactor for stability enhancement of multi-machine power system," Proc. of ICARCV'90, pp.695-699, 1990.
- (4) T. Hiyama, T. Sameshima : "Fuzzy logic control scheme for on-line stabilization of multi-machine power system," Fuzzy Sets and Systems, Vol.39, pp.181-194, 1991.
- (5) 木原秀美、檜山隆、宮内肇、T. H. Ortmeier : 「ファジー制御を適用した SVC と PSS との協調による電力系統安定化制御」、電気学会論文誌、115-B 巻 5 号、pp.487-495、1995.
- (6) 宮内肇、檜山隆、安陪稔：「SMES による電力系統安定化制御へのファジー制御の適用」、電気学会電力技術研究会資料、PE-93-162、1993.
- (7) 宮内肇、松浪功、藤本健一、檜山隆、坊野敬昭：「ファジー論理型スイッチング制御を適用した SMES による電力系統安定化制御実験」、平成 10 年電気学会 B 部門大会、論文 I、18、pp.111-116、1998.
- (8) 鶴澤毅、鯉江和裕、江口直也、坊野敬昭、宮内肇：「電圧形変換方式による超電導エネルギー貯蔵システム(SMES)用交直変換装置の高速制御」、平成 10 年電気学会全国大会 1411、1998.

宮内 肇 (正員) 1959 年 1 月 10 日生。83 年 3 月京都大学大学院工学研究科修士課程電気工学専攻修了、85 年 4 月京都大学工学部助手、93 年 4 月熊本大学工学部助教授、現在に至る。工学博士。主として、電力系統の安定化制御、SMES の電力系統への応用に関する研究に従事。

藤本健一 (学生員) 1974 年 12 月 7 日生。99 年 3 月熊本大学大学院工学研究科修士課程電気情報工学専攻修了、99 年 4 月旭化成工業(株)入社、現在に至る。熊本大学在学中、SMES による電力系統の安定化制御に関する研究に従事。

山崎泰裕 (学生員) 1977 年 4 月 2 日生。98 年 3 月熊本大学工学部電気情報工学科卒業、98 年 4 月同大学院自然科学研究科博士前期課程電気システム工学専攻に進学、現在に至る。SMES による電力系統の安定化制御に関する研究に従事。

大西正恭 (学生員) 1976 年 12 月 9 日生。99 年 3 月熊本大学工学部電気情報工学科卒業、99 年 4 月同大学院自然科学研究科博士前期課程電気システム工学専攻に進学、現在に至る。SMES による電力系統の安定化制御に関する研究に従事。

檜山 隆 (正員) 1947 年 3 月 14 日生。71 年 3 月京都大学大学院工学研究科修士課程電気工学専攻修了、71 年 4 月熊本大学工学部助手、79 年 1 月同講師、82 年 1 月同助教授、88 年 7 月同教授、現在に至る。工学博士。主として、電力系統の安定化制御、電力系統の計画運用、太陽光発電システムの計測・制御に関する研究に従事。