系統安定化用超電導エネルギー貯蔵装置の必要容量に関する検討

正員 宮内 肇 (京大)
正員 林 宗明 (京大)
正員 大澤 靖治 (筑波大)

1. ま え が き

近年の送電系統は、電源の遠隔化・集中化に伴い、長距離大容量化する傾向にあり、また広域連系が広く行われている。それゆえに系統の安定度が重要な問題であり、系統安定化対策として直列コンデンサ、超速応励磁方式、中間調相設備(静止形無効電力補償装置)などの適用が検討されている⁽¹⁾。一方、超電導エネルギー貯蔵装置(Superconducting Magnetic Energy Storage System, SMES)は、有効電力と無効電力を同時に制御することが可能であり、長距離大容量送電系統や長距離くし形系統(広域連系系統)において、安定化効果が確認されている^{(2)~(6)}。しかし、従来の検討においては大容量の電力貯蔵用 SMES を系統安定化にも利用すると仮定していたので、貯蔵容量は十分大きくコイル電流は一定であり、また、ある範囲内においては有効・無効電力を自由に制御できると仮定されることが多かった。最近、大規模な電力貯蔵用 SMES よりも先に、より小規模な系統安定化用 SMES を実用化し、電力系統における極低温・超電導技術の段階的蓄積を図るべきだとする傾向にあり、系統安定化に要する SMES の交直変換容量(MVA 容量)、エネルギー貯蔵容量(MJ 容量)などに注意が向けられつつある⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

本論文は系統安定化用 SMES の容量について検討を行うもので、まず長距離大容量送電系統を模擬した

簡単な一機無限大母線系統を対象に、SMES の非線形最適安定化制御を求める。最適制御はある制約下における最も有効な安定化効果を与えるので、これより最低限必要な SMES の MVA 容量と MJ 容量を得ることができる。次に、くし形系統をモデルに中間領域の安定化に必要な SMES の容量について検討する。最後に、SMES の容量によって安定度向上効果がどのように変化するか、10 機系統をモデルに検討を行う。

2. SMES を含む系統の最適制御

(2.1) 系統方程式 本節で例題とした一機無限大母線系統を図 1 に示す。これは 200 km 程度の 500 kV 送電線を模擬したもので、系統定数を表 1 に示す。発電機を過渡リアクタンス背後の一定電圧モデルで表現すると、発電機の特性は次のようになる。

$$\begin{aligned} d\delta/dt &= \Delta\omega \dots\dots\dots (1) \\ d\Delta\omega/dt &= (P_m - P_e - D\Delta\omega)/M \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

図 1 例題一機無限大母線系統

Fig. 1. Sample one-machine infinite-bus system.

表 1 系統定数
Table 1. System constants.

y_1	1.385 pu	M	0.02 pu
y_2	0.46 pu	D	0.01 pu

(10,000 MVA ベース)

Studies on the Required Capacity of Superconducting Magnetic Energy Storage for the System Stabilization. By Hajime Miyauchi, Muneaki Hayashi, Member (Department of Electrical Engineering, Kyoto University) & Yasuharu Ohsawa, Member (Institute of Engineering Mechanics, University of Tsukuba).
宮内 肇: 正員, 京都大学工学部電気工学科教室
林 宗明: 正員, 京都大学工学部電気工学科教室
大澤靖治: 正員, 筑波大学構造工学系

ただし、 δ : 発電機内部電圧の位相角、 $\Delta\omega$: 発電機回転子の角速度偏差、 P_m : 発電機への機械的入力、 P_e : 発電機の電氣的出力、 M : 慣性定数、 D : 制動係数

また、SMES のサイリスタ・ブリッジの転流リアクタンスを無視すると、SMES の動特性は次式で表される。

$$dI_d/dt = V_t \cos \alpha / L \dots \dots \dots (3)$$

ただし、 I_d : SMES のコイル電流、 V_t : 直流側に換算した SMES 設置点の端子電圧、 α : サイリスタ・ブリッジの制御角、 L : コイルのインダクタンス

図 1 に示す系統において

$$i_t \angle \tau = j y_2 (v \angle \delta - v_t \angle \theta) \dots \dots \dots (4)$$

$$i_t \angle \tau - i_{da} \angle (\theta - \alpha) = j y_1 (v_t \angle \theta - E) \dots \dots \dots (5)$$

ただし、 $v \angle \delta = \dot{v}$: 発電機の内部電圧 (以下、交流量は $\cdot$ を用いてベクトルで表示する。)

なる系統方程式が成立する。ただし、 i_{da} は I_d に対応する交流電流で、 v_t は V_t に対応する交流電圧である。状態変数 δ, I_d および制御変数 α を与えれば、 $|\dot{v}|$ と E は一定であるので、(4)、(5)式から i_t (および $\dot{v}_t$) が求まり、発電機出力 P_e を計算することができる。

〈2・2〉 最適制御 ポントリャーギンの最大原理を用いて、系統動揺時の SMES の非線形最適制御を求める。評価指標を

$$J = \int_{T_0}^T \{ A_\delta (\delta - \delta_f)^2 - A_\omega \Delta \omega^2 + A_I (I_d - I_{df})^2 + A_u (\alpha - \alpha_f)^2 \} dt \dots \dots \dots (6)$$

ただし、 $\delta_f, I_{df}, \alpha_f$: 状態変数、制御変数の最終値 (ただし $\Delta \omega_f = 0$)、 $A_\delta, A_\omega, A_I, A_u$: 重み係数

とするとハミルトニアン H は、

$$H = -A_\delta (\delta - \delta_f)^2 - A_\omega \Delta \omega^2 - A_I (I_d - I_{df})^2 - A_u (\alpha - \alpha_f)^2 + p_1 \frac{d\delta}{dt} + p_2 \frac{d\Delta \omega}{dt} + p_3 \frac{dI_d}{dt} \dots \dots \dots (7)$$

ただし、 p_1, p_2, p_3 は補助変数で次の微分方程式に従う。

$$\left. \begin{aligned} \frac{dp_1}{dt} &= -\frac{\partial H}{\partial \delta} = 2A_\delta (\delta - \delta_f) + p_2 \frac{1}{M} \frac{\partial P_e}{\partial \delta} \\ &\quad - p_3 \frac{1}{L} \frac{\partial V_t}{\partial \delta} \cos \alpha \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{dp_2}{dt} &= -\frac{\partial H}{\partial \Delta \omega} = 2A_\omega \Delta \omega - p_1 + p_2 \frac{D}{M} \\ \frac{dp_3}{dt} &= -\frac{\partial H}{\partial I_d} = 2A_I (I_d - I_{df}) \\ &\quad + p_2 \frac{1}{M} \frac{\partial P_e}{\partial I_d} - p_3 \frac{1}{L} \frac{\partial V_t}{\partial I_d} \cos \alpha \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (8)$$

このとき、最適制御 α^* は H 関数を最大にする制御で与えられる。すなわち

$$\alpha^* = \{ \alpha | H(\alpha) = \max_{\alpha_{\min} \leq \alpha \leq \alpha_{\max}} H \} \dots \dots (9)$$

最適制御 α^* は

$$\alpha^{(k+1)} = \alpha^{(k)} + \gamma (\partial H / \partial \alpha) \dots \dots \dots (10)$$

が収束するまで計算することにより求められる。ここで、 γ は 10^{-4} 程度の定数である (ただし、 γ の値は小さすぎると (10) 式の収束を遅くし、大きすぎると発散させる)。また、 $\partial H / \partial \alpha$ は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial H}{\partial \alpha} &= -2A_u (\alpha - \alpha_f) - p_2 \frac{1}{M} \frac{\partial P_e}{\partial \alpha} \\ &\quad + p_3 \frac{1}{L} \left(\frac{\partial V_t}{\partial \alpha} \cos \alpha - V_t \sin \alpha \right) \dots (11) \end{aligned}$$

〈2・3〉 計算条件 じょう乱として発電機端子での 0.1 秒間の三相短絡事故を仮定し、故障除去後 SMES の制御を開始するものとする。今回の検討では、コイル電流の最終値 I_{df} は (3) 式から明らかに、制御の結果として得られるものであり、またコイル電流の上下限を超えない限り、どのような値になっても安定化制御上問題がないので、 A_I は 0 とした。その他の重み係数の値は各種の値について計算した結果、最も良好な結果の得られた $A_\delta = 10,000$, $A_\omega = 10$, $A_u = 1$ を採用した。また、SMES の設置位置は最も安定化効果の大きい発電機端子とする⁽²⁾。

系統安定化用 SMES の規模は、エネルギー貯蔵容量 (MJ 容量) と交直変換器容量 (MVA 容量) によって特徴づけられる。前者はコイルの最大電流を $I_{d\max}$ とすると、 $LI_{d\max}^2/2$ で与えられ、後者はコイル電圧とコイル電流の積の最大値で与えられる。逆に MJ 容量や MVA 容量が指定されれば、磁束変化速度などを考慮してコイルの仕様である $L, I_{d\max}$, 電圧などが決定される。SMES のコイルは機械的ストレスなどの理由から通常、最大コイル電流の 1/2 から最大電流までの範囲で運用される。従って、系統安定化のために利用できるエネルギーは最大貯蔵容量の 3/4 である。

〈2・4〉 計算結果と考察 図 2 に、コイル電流 I_d の値が動揺抑制効果に及ぼす影響を示す。ただし、 I_d が一定、すなわちコイルのインダクタンスを無限大と

図 2 コイル電流 I_d の影響
Fig. 2. Effect of coil current I_d .

図 3 制御変数, SMES の電力と貯蔵エネルギーの変化 ($I_d = 0.1$ pu)
Fig. 3. Change of control variable, power and stored energy of SMES ($I_d = 0.1$ pu).

仮定して計算した。図 3 に $I_d = 0.1$ pu のとき、制御変数 α の変化、SMES の吸収放出電力 P_d (SMES への吸収を正とする) の変化、SMES の貯蔵エネルギーの変化 ΔE を示す。ここでは、インダクタンスを無限大、すなわち MJ 容量を無限大として最適制御を求めたが、図 3 (c) に示すように最適制御を実現するためには無限大の MJ 容量が必要というわけではない。図 3 (c) に示す貯蔵エネルギーの変化から、最大エネルギーが最小エネルギーの 4 倍 (すなわち、最大電流が最小電流の 2 倍) となるように、エネルギーの初期値を定めるとエネルギーが時間の関数として求められる。これより、電流の時間変化が定まり、電流と電力から電圧の時間変化も定まる。電流の最大値と電圧の絶対値の最大との積として MVA 容量が定まる。 I_d を変えた場合の MJ 容量と MVA 容量を表 2 に示す。ただし、この MJ 容量はコイルのインダクタンスが無限大、すなわちコイル電流が一定と仮定して求めたものであり、現実には貯蔵エネルギーの変化に従い

表 2 最適制御に要する容量

Table 2. Capacity necessary for the optimum control.

コイル電流	MW 容量	エネルギー	MVA 容量
0.05 pu	500 MW	476 MJ	830 MVA
0.10	1,000	667	1,566
0.15	1,500	700	2,510
0.20	2,000	1,131	3,981

図 4 貯蔵エネルギーの影響
Fig. 4. Effect of energy storage capacity.

図 5 SMES の電力と貯蔵エネルギーの変化 (最大エネルギー: 700 MJ)

Fig. 5. Change of power and stored energy of SMES (Maximum energy: 700 MJ).

電流も変化するため、交直変換器の MVA 容量は表 2 に示す値の 1.5~2 倍必要である。

次にコイル電流の最大値を 0.2 pu として、コイルのインダクタンスを変えることにより、MJ 容量を変えて最適制御を求め、MJ 容量が動揺抑制効果に及ぼす影響について検討する。結果を図 4 に示す。MJ 容量の大きい場合には、コイル電流の上下限を超えずに最適制御が行えるが、MJ 容量が 700 MJ 未満のときはコイル電流が制限を超えるので、サイリスタの制御角 α に制限を加えコイル電流が制限内に納まるようにした。ここでは、400 MJ のときは $0.4\pi \leq \alpha \leq 0.6\pi$ 、200 MJ のときは $0.46\pi \leq \alpha \leq 0.54\pi$ とした。また、700 MJ のときの SMES の吸収放出電力と貯蔵エネルギー E の時間変化を図 5 に示す。同図より制

本節では、最適制御によって SMES の最小必要容量に関する検討を行ったが、最適制御を $\Delta\omega$, あるいは δ と $\Delta\omega$ によるフィードバックで近似することもでき⁽⁹⁾、従って本結果についてある程度一般化できるものと考えられる。

電源の遠隔化と系統の広域連系に伴い、今後の基幹系統は長距離大容量送電系統と長距離くし形系統が中心になると考えられているが、これらの系統では減衰の良くない振動が発生しやすく、特に長距離くし形系統では故障発生から数秒後の中間領域において脱調することがある。本章では、このような中間領域安定化に SMES を用いた場合、SMES の必要な容量について9機くし形系統をモデルに検討を行う。

インピーダンスは%

Fig. 6. Sample 9-machine longitudinal system.

Fig. 7. Block diagram of AVR.

Fig. 8. Block diagram of PSS.

図 10 に、昼間の全負荷時を想定した潮流状態を示す。7号機と脱落させる8号機の出力合計は、1,940 MW とする。また、SMES は大規模電力貯蔵用であると想定し、1,000MW の電力を放出しているものとする。ただし、この放出電力は -1,000 MW の負荷として取扱うので、後述する SMES による安定化制御とは無関係である。

SMES の設置位置と制御系は予備計算の結果、最も効果の大きいものを選択した。すなわち、SMES は母線 11 に設置し

Fig. 9. Block diagram of governor.

図 10 潮流図

Fig. 10. Power flow diagram.

(a) 連系統潮流の変化

(b) SMES の電力の変化

(c) SMES の貯蔵エネルギーの変化

図 11 SMES による中間領域安定化

Fig. 11. Mid-term stabilization by means of SMES.

$$\Delta Q_d = \frac{s}{1+s} \frac{5.0}{1+0.05s} \Delta v_t \dots\dots\dots (13)$$

ただし、 $\Delta\omega_2$: 2号機の回転子角速度偏差で制御されるものとする。ただし、上式で指示された $\Delta P_d, \Delta Q_d$ より定まる皮相電力が MVA 容量を上回る場合は、 $\Delta P_d, \Delta Q_d$ の比を一定に保って MVA 容量の制限値に等しくするようにする。

〈3・2〉 計算結果 図 11 に、脱落する 8 号機の発電量 P_8 が 300 MW の場合の連系統潮流 P_L の変化、SMES の $\Delta P_d, \Delta Q_d$ 、貯蔵エネルギーの変化を示す。この場合、10 MVA の MVA 容量をもつ SMES で

は系統を安定化することができず、20 MVA 以上の容量を必要とする。このときの貯蔵エネルギーの変化幅は約 23 MJ であるが、もし小規模 SMES を用いるならば、コイル電流の下限値や時間変化を考慮する必要がある、MJ 容量はこの約 2~3 倍必要と考えられる。また、電流脱流量 P_8 が 500 MW の場合、SMES は 60 MVA 以上の容量が必要で、このときエネルギー変化幅は 70 MJ である。

同一条件下で無効電力制御である SVC による系統安定化を図った場合について試算してみると、 P_8 が 300 MW の場合で 80 MVA、500 MW の場合で 200 MVA 必要であった。このことから、有効電力をも制御できる SMES は、より小さな容量で有効な安定化効果をもたらすと言える。

4. SMES の容量と安定化効果

前章では、簡単のために SMES のコイル電流の変化を無視して検討を行ったが、小容量 SMES による系統安定化を検討するには、コイル電流の変化を考慮に入れて容量を算出する必要がある。本章では、多機系を例題にコイル電流の変化を考慮に入れながら、SMES の容量と系統安定化効果について検討を行う。

〈4・1〉 例題系統 図 12 に、例題とした New England Test System⁽¹⁰⁾を示す (1 pu を 100 MVA とする)。発電機には、隣接系統を表す 1 号機を除き、AVR (図 13) とガバナ (図 14) が装備されている。じょう乱としては、A 点での三相短絡事故を仮定し、0.19 秒後に故障回線は除去されるものとする。なお、再閉路は行わない。

SMES はこれまでの検討⁽²⁾から、A 点での事故に最も効果的である母線 38 に設置する。また、制御系は

$$\Delta P_d = \frac{1}{1+0.1s} \Delta\omega_2 \dots\dots\dots (14)$$

図 12 例題 10 機系統

Fig. 12. Sample 10-machine system.

図 13 AVR 構成線図

Fig. 13. Block diagram of AVR.

図 14 ガバナ構成線図

Fig. 14. Block diagram of governor.

$$\Delta Q_d = \frac{3}{1 + 0.1s} \Delta v_t \dots \dots \dots (15)$$

とし、有効電力を優先して制御を行う。また、コイル電流 I_d は

$$dI_d/dt = E_d/L = P_d/(L I_d) \dots \dots \dots (16)$$

ただし、 E_d : コイル両端の直流電圧

で支配される。通常、コイル電流はその最大許容電流 I_{dmax} とその半分の間で運用される。(16)式に従って I_d が増加(減少)し、運用範囲の上限(下限)に至り、これ以上電力の吸収(放出)が行えない状態(以下、この状態を飽和という)になったときは無効電力の制御は継続して行うが有効電力は零とし、制御指令が放出(吸収)方向になるまで待機する。

〈4・2〉 計算結果と考察 SMES の MJ 容量と MVA 容量を変え、安定化効果の違いについて検討を行った。MJ 容量はコイル電流の運用範囲を決定し、MVA 容量は SMES の最大吸収放出電力を決定する。安定化効果を比較するために、評価指標として

$$P_f = \sum_{i=1}^{10} M_i \int_0^{\infty} t |\Delta \omega_i| dt \dots \dots \dots (17)$$

ただし、 M_i : i 号機の慣性定数、 $\Delta \omega_i$: i 号機の回転子角速度偏差

を用いる。なお、積分は 5 秒で打切った。

変換器容量 P_c をパラメータとして、最大貯蔵エネルギー W_{max} と評価指標 P_f の関係を図 15 に示す。図中の矢印はこれより小さい W_{max} では、SMES に飽和の起こったことを示す。SMES が飽和しないときは、系統の安定度は W_{max} によらず一定である。一方、SMES の W_{max} が小さくなるに従い SMES がすぐに飽和し、十分に制御が行えないため安定度は急激に悪くなる。また、 P_c が 1.2 pu 以上であると、 P_c を大きくしても安定度向上効果にあまり差異は見られない。これは P_c が制御に用いられる範囲よりも十分大きいからである。本例において P_c が 3 pu の

図 15 最大貯蔵エネルギーと評価指標の関係

Fig. 15. Relation between maximum stored energy and performance index.

場合に、 W_{max} が 10 kWh 付近で P_f が最小となっているが、これは SMES が飽和(この場合、電力の吸収が行えない状態になっている)しているために、有効電力制御系が強制的に零にリセットされるため、次の制御タイミング(この場合、電力の放出)が早められるためである。

以上の結果から、この系統でこの事故に対しては、おおよそ 70 MJ、250 MVA 程度の SMES が必要と言える。この系統の総発電量は 3,100 MW であるので、MVA 容量に関してはほぼ発電機 1 台分と言える。

5. む す び

本論文では、系統安定化に必要な SMES の変換器容量、およびエネルギー貯蔵容量に関する検討を行った。まず、SMES を含む非線形最適安定化制御を一機無限大母線系統を例題に求め、系統安定化に必要な最小限の容量に関する評価を行った。その結果、発電機回転子に蓄積される事故中の過剰エネルギーに相当する容量が必要であることが明らかとなった。次に、故障発生後から数秒後の中間領域での脱調防止に SMES

を用いた場合について検討を行い、その安定化には、比較的小さい容量の SMES で十分に効果があることがわかった。最後に、SMES の容量と安定度向上効果について検討した結果、事故点至近に発電機 1 台分に相当する変換器容量をもつ SMES が設置される必要のあることがわかった。

本研究の一部は文部省科学研究費（エネルギー特別研究）によった。記して謝意を表す。貴重な御助言を賜りました京都大学 岡田隆夫教授、安陪 稔教授、仁田旦三助教授、筑波大学 本間琢也教授に深く感謝いたします。

(昭和 62 年 12 月 11 日受付、同 63 年 6 月 8 日再受付)

文 献

- (1) 電気協同研究会編：「電力系統の安定度」，電気協同研究，34，5 (昭 54)
- (2) 大澤・宮内・林：「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」，電学論 B，105，23 (昭 60-1)
- (3) 大澤・宮内・林：「超電導エネルギー貯蔵装置による長距離くし形系統の安定化制御」，同上 B，106，355 (昭 61-4)
- (4) 三谷・辻・村上：「超電導エネルギー貯蔵装置による電力系統の動態安定度の改善」，同上 B，104，749 (昭 59-11)
- (5) 三谷・辻・村上：「超電導エネルギー貯蔵装置による広域連系系統の安定化制御」，同上 B，105，1041 (昭 60-12)
- (6) 三谷・辻・村上：「特異振動法による電力系統安定化用超電導エネルギー貯蔵装置の制御系の設計」，同上 B，106，881 (昭 61-10)
- (7) 三谷・辻・村上：「電力系統安定化用超電導エネルギー貯蔵装置の制御に必要な容量に関する一考察」，昭 60 電気関係学会関西支大，G4，20，p. G 154
- (8) 北川・宮内・安陪・林：「SMES による系統安定化制御の効果とその容量に関する検討」，電気学会電力技術研究会資料，PE-86-166 (昭 61)
- (9) 松村・宮内・林・大澤：「超電導エネルギー貯蔵装置による電力系統の最適安定化制御」，同上，PE-85-58 (昭 60)
- (10) Systems Control, Inc.: Coherency-based Dynamic Equivalents for Transient Stability Studies, Final Report on EPRI Project RP 90-4 Phase II (1975)
- (11) 新エネルギー総合開発機構編：「超電導エネルギー貯蔵システムに関する調査研究〔Ⅲ〕」，NEDO-P-8408，p. 28 (昭 60)