UDC 621.311.1.011.716: 537.612: 537.312.62

論文

60-B122

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

正員 三谷 康範 (大阪大)

正員 辻 毅一郎 (大阪大)

正員 村上 吉繁 (大阪大)

1. ま え が き

電力系統において、系統連系は設備投資の節減、経済運用、あるいは系統故障に対する信頼性の向上といった多くの利点をもたらす。このため、今日まで大規模な系統連系が進められ、今後も電力需要の拡大と共に更に連系の強化が予想される。一方、系統が巨大化すると系統全体に広がる長周期でダンピングの悪い電力動揺が発生しやすくなり、動態安定度が低下するという問題が生じてきた。このため、発電機に Power System Stabilizer (PSS) を付ける⁽¹⁾、あるいは Static Var Compensator (SVC) を設置して制御する⁽²⁾⁻⁽⁴⁾といった対策が考えられている。超電導エネルギー貯蔵装置 (Superconducting Magnet Energy Storage, 以下では SMES と略称する) もこのような系統安定化装置として注目されている^{(5),(6)}。

電力系統の安定化制御の問題は、従来、主として一機無限大母線系統を対象とした議論がなされてきたが、前述の長周期の動揺のように多くの発電機が関与する動揺に対しては、十分議論されていなかった。このため、近年、多機系統を対象とした制御系の設計に関する研究が進められ、特に PSS の協調設計に関する研究が盛んに行なわれている^{(7),(8)}。SVC については、無効電力が制御でき、その設置個所に自由度があるため、制御アルゴリズムとともに適切な設置個所の検討が行なわれている⁽⁹⁾。これに対し SMES は有効電力と無効電力を同時に高速に制御可能であり⁽⁹⁾、SVC と同様系統内での設置個所に自由度がある。そこで本論文では、多機系統の安定化の問題を、SMES の設置個所から見た各動揺モードの可制制御ならびに可観測性

の問題としてアプローチしている。

多機系統には多くの電力動揺モードが存在するが、それらのモードに関する可制御性と可観測性は、制御あるいは観測を行なう位置に依存する。

もし、ある位置において、減衰の悪いモードに対してだけ可制御かつ可観測であるとすれば、この位置は、他のモードに影響を及ぼすことなく、そのモードだけを安定化できる。すなわち、適切な設置個所であるといえる。

本論文では、以上の観点に基づき、くし形に連系された系統でしばしば問題となる長周期でダンピングの悪い電力動揺⁽¹⁰⁾の安定化の一方法として SMES を用いた場合について制御系の構成ならびに設置個所の検討を行なう。はじめに、電力動揺を安定化するためのフィードバック信号に関する検討を行ない、SMES を用いた制御系を構成する。次に、各電力動揺モードの可制御性ならびに可観測性を加味した指標を定義し、これを用いて効果的な SMES の設置個所を検討する方法を示すと共に、モデル系統を用いてその妥当性を確認する。更に、いくつかのケースを想定した数値計算により、SMES の効果的な設置個所ならびに安定化の効果について検討する。

2. 解析モデル

〈2・1〉 モデルの数式表現 図1のような連系系統を想定し、連系線上の一点に SMES が設置されているものとする。発電機は過渡リアクタンス x_d' の背後電圧一定のモデルで表現する。このモデルは単純で

図1 連系系統に設置された SMES
Fig. 1. An SMES located in an interconnected system.

Stabilization of Bulk Power Longitudinal Interconnected System by Superconducting Magnet Energy Storage. By Yasunori Mitani, Member, Kiichiro Tsuji, Member, Yoshishige Murakami, Member (Faculty of Engineering, University of Osaka)
三谷康範: 正員, 大阪大学工学部電気工学科
辻 毅一郎: 正員, 大阪大学工学部電気工学科
村上吉繁: 正員, 大阪大学工学部電気工学科

はあるが、電力動揺の形態を捉えらるのに都合がよい。

いま、発電機の総数を n とし、 x_d' の背後電圧 V_i ($i=1, 2, \dots, n$) および図 1 に示した V_{n+1}, V_{n+2} から見たアドミタンス行列 (x_d' を含む) を次式で表わす。

$$\{G_{ij}\} + j\{B_{ij}\} \quad i, j=1, 2, \dots, n+2 \dots (1)$$

で表わしたとき、図 1 のモデルは数学的に以下のように表現できる。

(i) 発電機の運動および発電機出力の潮流条件

$$M_i \ddot{\delta}_i = P_{mi} - P_i \quad i=1, 2, \dots, n \dots (2)$$

$$P_i = V_i \sum_{j=1}^{n+2} V_j \{G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)\} \dots (3)$$

(iii) 母線 $n+1$ および $n+2$ における潮流条件

$$0 = V_{n+1} \sum_{j=1}^{n+2} V_j \{G_{n+1j} \cos(\delta_{n+1} - \delta_j) + B_{n+1j} \sin(\delta_{n+1} - \delta_j)\} \dots (4)$$

$$0 = V_{n+1} \sum_{j=1}^{n+2} V_j \{G_{n+1j} \sin(\delta_{n+1} - \delta_j) - B_{n+1j} \cos(\delta_{n+1} - \delta_j)\} \dots (5)$$

$$P_{SM} = V_{n+2} \sum_{j=1}^{n+2} V_j \{G_{n+2j} \cos(\delta_{n+2} - \delta_j) + B_{n+2j} \sin(\delta_{n+2} - \delta_j)\} \dots (6)$$

$$Q_{SM} = V_{n+2} \sum_{j=1}^{n+2} V_j \{G_{n+2j} \sin(\delta_{n+2} - \delta_j) - B_{n+2j} \cos(\delta_{n+2} - \delta_j)\} \dots (7)$$

(iii) 連系線潮流 P_c の計算式

$$P_c = G_{n+1n+2} V_{n+2}^2 - V_{n+1} V_{n+2} \{G_{n+1n+2} \cos(\delta_{n+1} - \delta_{n+2}) - B_{n+1n+2} \sin(\delta_{n+1} - \delta_{n+2})\} \dots (8)$$

但し、 M_i : 慣性定数、 P_{mi} : 機械入力、 P_{SM}, Q_{SM} : SMES の有効、無効電力である。なお、 P_c は後の解析でフィードバック信号として用いる。

〈2・2〉線形化状態方程式の構成 前節のモデル

を動作点の近傍で線形化して次式を得る。ここで、 M_i, P_{mi} は一定とする。なお、変数に Δ を付けて動作点からの変化分を表現することにする。

(2), (3) 式, (4)~(7) 式および (8) 式を線形化すると、それぞれ次式のように表現できる。

$$\Delta \ddot{\delta} = A_1 \Delta \delta + B_1 \Delta w \dots (9)$$

$$\Delta u = C_1 \Delta \delta + D_1 \Delta w \dots (10)$$

$$\Delta P_c = E_1 \Delta w \dots (11)$$

A_1, B_1, C_1, D_1, E_1 : 動作点でのヤコビアン

$$\Delta \delta = [\Delta \delta_1, \Delta \delta_2, \dots, \Delta \delta_n]^T$$

$$\Delta w = [\Delta \delta_{n+1}, \Delta \delta_{n+2}, \Delta V_{n+1}, \Delta V_{n+2}]^T$$

$$\Delta u = [0, 0, \Delta P_{SM}, \Delta Q_{SM}]^T$$

いま、SMES は有効電力と無効電力を同時に制御できるものとし⁽⁹⁾、まず、無効電力を定電圧制御に用いるものとする。この制御は無効電力補償装置(SVC)を用いた制御⁽²⁾に対応するもので、同期化力の強化とともに、制動の改善効果も期待できる。この制御により V_{n+2} が一定 (すなわち、 $\Delta V_{n+2}=0$) であると考えて、 ΔQ_{SM} および ΔV_{n+2} を消去すると

$$\Delta \ddot{\delta} = A_1 \Delta \delta + B_1' \Delta w' \dots (12)$$

$$\Delta u' = C_1' \Delta \delta + D_1' \Delta w' \dots (13)$$

$$\Delta P_c = E_1' \Delta w' \dots (14)$$

と表わすことができる。但し、

$$\Delta w' = [\Delta \delta_{n+1}, \Delta \delta_{n+2}, \Delta V_{n+1}]^T, \Delta u' = [0, 0, \Delta P_{SM}]^T$$

ここで、 $\Delta w'$ を消去すると

$$\Delta \ddot{\delta} = [A_1 - B_1' D_1'^{-1} C_1'] \Delta \delta + B_1' D_1'^{-1} \Delta u' \dots (15)$$

$$\Delta P_c = -E_1' D_1'^{-1} C_1' \Delta \delta + E_1' D_1'^{-1} \Delta u' \dots (16)$$

を得る。なお、行列 D_1' は (13) 式で $\Delta \delta=0$ としたとき、母線 $n+1$ および $n+2$ における潮流条件式のヤコビアン行列である (いまの場合、 $\Delta V_{n+2}=0$ の制約がある)。従って、限界潮流のような特殊な潮流時以外には D_1' は正則であり、ここでは、 D_1' の逆行列は存在するものとして議論を進める。

(15) および (16) 式を整理すると

$$\Delta \ddot{\delta} = A \Delta \delta + B \Delta P_{SM} \dots (17)$$

$$\Delta P_c = C \Delta \delta + d \Delta P_{SM} \dots (18)$$

を得る。ここで、系統の性質として、すべての δ_i ($i=1, 2, \dots, n$) を一様に変化させても系統の状態は元と変わらないので、行列 A および C の要素には

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} = 0 \quad i=1, 2, \dots, n \dots (19)$$

$$\sum_{j=1}^n c_{ij} = 0 \dots (20)$$

の関係が成り立つ。また、 d は ΔP_{SM} の変化に対する ΔP_c の感度を表わしており次式となる。

$$-1 < d < 0 \dots (21)$$

〈2・3〉行列 A の対角化 行列 A の n 個の固有ベクトルにより構成される行列 T を用いて、変換

$$\Delta \delta = T x \dots (22)$$

により行列 A を対角化すると

$$\dot{x} = \Lambda x + T^{-1} B \Delta P_{SM} \dots (23)$$

$$\Delta P_c = C T x + d \Delta P_{SM} \dots (24)$$

を得る。但し、行列 Λ は行列 A の固有値 $-\lambda_i$ ($i=1, 2, \dots, n$) を対角に有する対角行列で、固有値は重複しないものとして議論を進める。

本論文では、(23) および (24) 式を用いて SMES の制御系を構成し、更に、その制御を効果的に行なうための SMES の設置個所を検討する。

なお、ここで (19) 式を考慮すると零固有値が存在する。しかし、(20) 式より零固有値は観測されない。このため、一般にこのような観測量を用いたフィードバック制御を施しても零固有値が残る。しかしながら、零固有値は、本論文で問題にしている安定性の議論には無関係であり以下では議論の対象としない。なお、零固有値を除いたシステムは、一般に振動系で λ_i は正である。

3. SMES の制御則と制御効果の評価

〈3・1〉 フィードバック信号の検討 はじめに、 x のある成分 x_i に着目して SMES のフィードバック信号を検討する。いま、SMES はある一地点に設置されているものとし、(23) 式で x_i に着目すると

$$\ddot{x}_i = -\lambda_i x_i + b_i^* \Delta P_{SM} \quad (25)$$

とかくことができる。ここで、 x_i と位相が θ (rad) 異なる信号をフィードバックした場合を考える。いま、 x_i の解の形を $x_i = x_{i0} \exp(\sigma_i + j\omega_i)t$ 、 $\omega_i > 0$ とし、フィードバック則を

$$\Delta P_{SM} = k_i \exp(j\theta) \cdot x_i \quad (26)$$

とすると、 σ_i (1/s) および ω_i (rad/s) は以下のように求められる (詳細は付録参照)。

$$\sigma_i \simeq \{b_i^* k_i / 2 \sqrt{\lambda_i - b_i^* k_i}\} \theta \quad (27)$$

$$\omega_i \simeq \sqrt{\lambda_i - b_i^* k_i} \quad (28)$$

但し、 $|\theta|$ を十分小さいとして近似計算を行なった。

(28) 式より、ある地点に SMES を設置したとき

$$b_i^* k_i < 0 \quad (29)$$

であれば同期化力が強化される (ω_i が $\sqrt{\lambda_i}$ より大になる)。更に、同時に制動を改善する (σ_i を負にする) には、(27) 式で (29) 式を考慮すると

$$\theta > 0 \quad (30)$$

であればよいことがわかる。

次に、フィードバック信号として、SMES の設置点において検出される連系線潮流の変化分 ΔP_c を選んだ場合について考察する。この信号は SMES から見てローカルで比較的検出が容易な情報である。

ΔP_c には種々のモードが含まれているが、簡単のため、一様に ϕ (rad) だけ位相を変えられるものとして

$$\Delta P_{SM} = -\exp(j\phi) \cdot \Delta P_c \quad (31)$$

で表わされる制御を行なうものとする。但し、右辺の負の符号は SMES の有効電力が連系線潮流の動揺分を補償する形で働くことを示している⁽¹¹⁾。

(24) 式および (31) 式より次式を得る。

$$\Delta P_{SM} = -\exp(j\phi) \cdot CT x_i / \{1 + d \cdot \exp(j\phi)\} \quad (32)$$

このようなフィードバック制御を行なった場合、モード間の相互の影響のため、一つのモードに対する制御の効果を簡単な形で表現するのは困難である。そこで、制御の効果の一つの目安となる指標を得るために簡単に (26) 式の制御が (32) 式の右辺の x_i に関する制御項と等しいと考えると、

$$k_i \simeq -c_i^* / (1 + d) \quad (33)$$

$$\tan \theta = \sin \phi / (\cos \phi + d) \quad (34)$$

但し、 c_i^* は CT の第 i 成分である。また、 $|\phi|$ を十分小さいものとした。このとき、(29)、(30) 式は

$$b_i^* c_i^* / (1 + d) > 0: \text{同期化力強化の条件} \quad (35)$$

$$\phi > 0 \text{ (位相進み)}: \text{制動改善の条件} \quad (36)$$

次節では、ここで求めた条件を考慮して、SMES を設置したときの同期化力を強化する効果と制動を改善する効果を同時に評価できる指標を定義する。

〈3・2〉 SMES の設置効果の評価指標 (33) 式を (27) 式に代入すると

$$\sigma_i \simeq -\{b_i^* c_i^* / \{2(1 + d) \times \sqrt{\lambda_i + b_i^* c_i^* / (1 + d)}\}\} \theta \quad (37)$$

となる。ここで、右辺の θ の係数を

$$\gamma_i = b_i^* c_i^* / \{2(1 + d) \times \sqrt{\lambda_i + b_i^* c_i^* / (1 + d)}\} \quad (38)$$

このとき γ_i は次の性質を有する。

(i) $\gamma_i > 0$ と (35) 式は等価である。すなわち、ある地点に SMES を設置したときモード i の同期化力が強化される条件は $\gamma_i > 0$ で表現される。

(ii) (37) 式から明らかにように、 γ_i が大きいほど同じ θ に対してモード i の制動改善効果が大きい。

なお、(22) 式の行列 T は例ベクトルごとにスカラー倍の任意性を有するため、 b_i^* および c_i^* はそれぞれ任意性を有する。しかし、両者の積 $b_i^* c_i^*$ はこの任意性が相殺され、従って、 γ_i の値は与えられた潮流状態ならびに SMES の設置点に対して一意に決まる。また、 γ_i はモード i の可制御性 (b_i^*) および可観測性 (c_i^*) を加味した指標といえる。本論文では、この γ_i をモード i に対する SMES の設置効果の評価指標として用い、安定化に効果的な設置個所を検討する。

4. モデルシステムを用いた検討

〈4・1〉 SMES の設置個所の検討 図 2 に示す 6 機くし形モデルシステムを用いて解析する。このモデルは

6機の同じ発電機を連系したもので、解析に用いた系統の定数は表1に示すとおりである。

まず、(23)式で表わされる固有値 $\lambda_i (i=1, 2, \dots, 5)$ およびそれぞれに対応する左固有ベクトルを図3に示す。図中の番号は図2の発電機番号に対応する。

固有ベクトルを見れば各モードの動揺のし方がわかる(2)(5)(7)。第1～第3モードは、主に隣接した発電機間の同期化力による動揺(すなわち、隣接した発電機が互いに逆方向に揺れる)で、その動揺周期は比較的短い。第4モードはG1-G3間およびG4-G6間のやや広域的な動揺である。第5モードは系統の両端で逆方向に揺れる広域的な動揺で、その周期は長い。

このとき、各連系線上でSMESの設置点を変えて各モードについて $\gamma_i (i=1, 2, \dots, 5)$ を求めた結果を図4に示す。なお、図中の $I_1 \sim I_6$ は図2に示した連系点 $I_1 \sim I_6$ に対応し、横軸は連系点を基準にした連系線のリアクタンス値に対応する。但し、SMESから見て左側からの連系線潮流の変化分をフィードバックした。図4を見ると、各モードの動揺のし方と対応する γ_i には次の関係があることがわかる。

(i) SMESを設置した連系線の両端の発電機が逆方向に揺れるモードの場合、その連系線の中央付近で $\gamma_i = 0$ となる点がある。これは、その点に設置した場合、(23)、(24)式で表わされるシステムにおいてモード i の可制御性が失われる($b^*_i = 0$)ためである(例えば各連系線上での第1モード)。

(ii) SMESを設置した連系線の両端の発電機が同方向に同程度揺れるモードの場合、その連系線上では常に $\gamma_i \approx 0$ である。これは、その連系線上に設置した場合、同システムにおいてモード i の可観測性に欠ける($c^*_i \approx 0$)ためである(例えば、 $I_3 \sim I_4$ 間での第2および第4モード)。

以上の関係は、主として短周期の第1～第3モード

図2 6機くし形連系モデル系統

Fig. 2. A longitudinal interconnected system with 6 generators.

表1 系統の定数

Table 1. System constants.

発電機 (8,000 MVA 自己容量ベース)			
$M=7.0 \text{ s}$ $x_d' = 0.38 \text{ pu}$			
系統 (10,000 MVA ベース)			
電源線	$r_1 = 0.0167 \text{ pu}$	$x_1 = 0.300 \text{ pu}$	
連系線	$r_2 = 0.0250 \text{ pu}$	$x_2 = 0.600 \text{ pu}$	
負荷	$P_L = 0.789 \text{ pu}$	$Q_L = -0.141 \text{ pu}$	

$\lambda_1 = 61.9$	$\lambda_2 = 58.7$	$\lambda_3 = 51.0$	$\lambda_4 = 38.6$	$\lambda_5 = 12.5$
--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------

図3 固有値と固有ベクトル

Fig. 3. Eigenvalues and eigenvectors.

図4 SMESの設置場所と γ_i の関係

Fig. 4. Values of γ_i for various SMES locations.

に見られる。長周期の第4および第5モードは中央の連系線上を除いて、 γ_i は各連系線ごとに同符号でその絶対値は大きい。これは、長周期のモードが系統の広範囲にわたる動揺であり、このため系統の広い範囲にわたって可制御かつ可観測であるためと考えられる。

これらの結果を考慮して図4を見ると、A点(I_1 と I_2 の中間)付近およびその左側において、長周期モードでは γ_i の値が大きく、短周期のモードほど、零に近い値であることがわかる。また、SMESから見て右側からの連系線潮流の変化分をフィードバックする場合を考慮すれば、 $I_5 \sim I_6$ 間でも全く同様の地点を見いだせることになる。くし形の連系系統でしばしば安定度上問題となる長周期の電力動揺を安定化するには、このような個所にSMESを設置すれば、その効果が期待できる。次節では、具体的なSMESの制御系について検討するとともに、上述の γ_i を用いた制御効果の評価の妥当性を確認する。

<4.2> 制御系の構成とその制御結果 以下の数値計算では、発電機を表2に示す定数を持つ界磁巻線

モデルで表現し、図5に示す AVR を考慮する。但しガバナの効果は無視する。また、SMESは図6に示す特性で有効電力および無効電力を同時に制御できるものとする。ここで、一次遅れの特性は主として電力トランスデューサによる電力検出の遅れを近似したもので、以下の解析では $T_a=0.02\text{ s}$ に設定している。これらのモデルを動作点の近傍で線形化して得られる状態方程式を用いて固有値計算を行ない、全固有値の中で電力動揺に対応する（すなわち、前節における各モードに対応する）固有値を対象として議論を進める。電力動揺に対応する固有値の周波数帯域は通常 1 Hz 付近であり、他の固有値とは容易に区別できる。また他の固有値は制御による影響は小さく、ここでの安定性の議論には関係しない。以下で、単に固有値と呼べば電力動揺に対応する固有値を指すものとする。

表3は各発電機の出力が全て 0.8 pu のときの無制御時の固有値である。最も長周期の第5モードが不安定であることがわかる。図4に示した A 点に SMES

表 2 発電機の設定
Table 2 Generator constants.

発 電 機 (8,000 MVA 自己容量ベース)	
$M=7.0\text{ s}$	$T_{d0}'=6.0\text{ s}$
$D=2.5\text{ s}$	$x_d=1.8\text{ pu}$
$x_q=1.8\text{ pu}$	$x_d'=0.38\text{ pu}$

図 5 AVR のブロック図

Fig. 5. Block diagrams of AVR.

図 6 SMES の特性

Fig. 6. Characteristics of SMES power controller.

表 3 電力動揺に対応する固有値 (制御無)

Table 3. Eigenvalues corresponding to power swing (without control).

No.	固 有 値
1	$-0.316 \pm j7.72$
2	$-0.308 \pm j7.53$
3	$-0.291 \pm j7.07$
4	$-0.250 \pm j5.96$
5	$+0.126 \pm j3.06$

を設置した場合を想定してこのモードを安定化する。

前章で検討したように、有効電力の制御のフィードバック信号には、(36)式で述べた ψ に相当する位相進みが必要である。これを実現するために、リセットフィルタ $S/(S+\omega_R)$ を付加して、 ω_R を適当に選ぶことにより、第5モードの周波数帯域である 3 rad/s 付近の信号の位相を進めることにする。このとき SMES の有効・無効電力の制御則はそれぞれ

$$\Delta P_{SM} = -\frac{1}{1+T_a S} \frac{S}{S+\omega_R} \Delta P_c \dots\dots\dots (39)$$

$$\Delta Q_{SM} = -\frac{K_V}{1+T_a S} \Delta V_s \dots\dots\dots (40)$$

で表わされる。但し、 V_s は SMES 設置点の電圧で、 $K_V=10.0$ に設定した。

図7は無制御のとき、無効電力による定電圧制御((40)式で表わされる制御)のみを行なったとき、および有効・無効電力を同時に制御し、 ω_R の値を変えた

(a) 固有値実数部

(b) 固有値虚数部

図 7 ω_R に対する固有値の動き
Fig. 7. Shifting of eigenvalues via variation of ω_R .

ときの各固有値の実数部, ならびに虚数部をプロットした結果である。無効電力による定電圧制御のみを行なった場合, 第5モードの同期化力が強化され, 同時に制動も改善されている。A点は無効電力-電圧の制御ループから見ても第5モードの安定化効果が大きい地点である⁽²⁾。次に, 有効電力の制御も加えると ($\omega_R = 0 \text{ rad/s}$ のとき参照), γ_i の値が大きい第4および第5モードの同期化力が強化されるが, 制動はとくに第4モードの場合逆に悪くなる。これは SMES の制御の遅れにより位相が遅れるためである。そこで ω_R の値を大きくして位相進みの補償度を増すとこれらの制動は大きく改善される。 γ_2 が負のため第2モードの制動は若干悪くなるがその割合は小さい。第1および第3モードの実数部はほとんど変化しない。また, 各モードの虚数部は ω_R の値の変化によってはほとんど変化しない。以上の結果は γ_i の値から期待される結果と定性的によく一致する。但し, $\gamma_4 < \gamma_5$ であるにもかかわらず第4モードと第5モードの制動改善効果がほとんど同じであるなど, 定量的には必ずしも一致しない。これは, γ_i の値には複数のモードの相互的な影響が考慮されていないためと考えられる。

以上のように, ω_R を適切な値に設定することにより A 点に設置した SMES を用いて効果的な制御を行なえることがわかった。更に, γ_i を用いて制御の効果を評価することが妥当であることもわかった。

〈4・3〉潮流状態の変化と安定化の効果 一般に, 大規模な連系系統では, 発電機出力の増大あるいは連系線を流れる潮流の増大に伴い系統の安定度が低下する傾向があることが知られている。本論文では, 図2のモデル系統において次の3ケースを想定し, SMES による安定化の効果を検討した。

(a) P_i および P_{Li} ($i=1, 2, \dots, 6$) を一様に増加した場合 (このとき連系線には潮流はのっていない)

(b) 負荷 P_{L6} を増加し, この電力増加分を発電機1から供給し, 連系線の潮流を増加した場合 (他の発電機および負荷は 0.7 pu)

(c) 負荷 P_{L1} を増加し, この電力増加分を発電機6から供給した場合 (連系線潮流の向きが(b)の逆)

はじめに, 各ケースのそれぞれ一つの潮流状態について I_1 - I_2 間における γ_i の値を求めた結果を図8に示す。いずれの場合も図4で得た結果と良く似ている。前章で述べたように, γ_i の値は対応する固有ベクトルの分布のし方との関係が大きく, くし形の連系系統では, 系統の構成が変わらなければ潮流状態が変更されても, γ_i の値はあまり影響を受けない⁽²⁾。

次に, 図8の各ケースで $\gamma_4, \gamma_5 > 0, \gamma_1 \approx \gamma_2 \approx \gamma_3 \approx 0$ で

ある A' 点に SMES を設置し, 安定化制御を行なった。この結果を表4に示す。制御が無い場合には各ケースとも重潮流になるに従って不安定になっている。なお, 比較のため SVC による制御を想定して, (40) 式で表わされる無効電力による定電圧制御を施した場合についても解析した。SMES を用いて制御すれば, 常に安定化効果が大きく, 安定に送電できる容量を増大できる。特に(c)のケースでは, SVC を用いた制御により逆に安定度が若干悪化しているのに対して, SMES を用いた場合には安定度が良くなっている。

〈4・4〉シミュレーションによる検討 全発電機出力, および全負荷が 0.8 pu の場合についてシミュレーションを行なった。故障としては, 系統に小さなじょう乱を与えるため, 時刻 $t=0 \text{ s}$ に G1 の発電端での三相短絡 (0.02 s 継続) を想定し, 事故からの復帰後直ちに制御を開始するものとした。なお, SMES は A' 点に設置されているものとした。

シミュレーションの結果を図9に示す。無制御のとき, 電力動揺は発散傾向にあるが, SMESにより制御を施すことにより電力動揺は安定化されている。連系

(a) $P_i, P_{Li} : 0.9 \text{ pu}$ (b) $P_1, P_{L6} : 0.85 \text{ pu}$
 $i=1, 2, \dots, 6$ (他は 0.7 pu)

図8 潮流状態を変えたときの γ_i の値 (I_1 - I_2 間)
(c) $P_6, P_{L1} : 0.85 \text{ pu}$
(他は 0.7 pu)

Fig. 8. Values of γ_i in some power flow conditions (between I_1 - I_2).

表 4 種々の潮流状態における SMES の安定化効果

Table 4. Stabilizing effect of SMES in several power flow conditions.

(a) 全発電機出力, 全負荷を一樣に変化させた場合 ($i=1, \dots, 6$)

$P_i (=P_{Li})$ (pu)	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00
制御方式						
無 制 御	○	×	×	×	×	×
S V C	○	○	△	×	×	×
S M E S	○	○	○	○	△	×

(b) P_i および P_{L6} を一樣に変化させた場合 (他は 0.70 pu)

$P_i (=P_{L6})$ (pu)	0.80	0.85	0.90	1.10	1.15	1.20	1.25
制御方式							
無 制 御	○	△	×	×	×	×	×
S V C	○	○	○	○	△	×	×
S M E C	○	○	○	○	○	○	×

(c) P_6 および P_{L1} を一樣に変化させた場合 (他は 0.70 pu)

$P_6 (=P_{L1})$ (pu)	0.80	0.85	0.90	0.95
制御方式				
無 制 御	○	△	×	×
S V C	○	○	×	×
S M E S	○	○	○	×

○: 安定 ($\sigma_{\max} < -0.05$)

△: 安定限界 ($|\sigma_{\max}| < 0.05$)

×: 不安定 ($\sigma_{\max} > +0.05$) $\sigma_{\max}$: 固有値実数部の最大値

線潮流の動揺および各母線の電圧変動も十分に抑制されている。なお、制御の結果より、SMES の所要有効・無効電力の出力は無制御時の電力動揺程度であることがわかる。ここで想定した故障に対しては、交直変換器の容量がおおよそ 800 MVA、制御に用いられたエネルギーがおおよそ 200 MJ であった。

図 9 シミュレーションの結果

Fig. 9. Simulation results.

5. 7 機連系モデル系統の安定化制御例

図 10 に示す 7 機連系モデル系統の安定化制御例を示す。表 5 に示されるように、この系統でも最も長周期のモードが不安定である。以下で、SMES を用いてこのモードの安定化をはかる。

各連系線上において r_i を求めたところ、図 11 に示すように、母線 3-6 間において前章の I_1 - I_2 間とよく似た結果を得た。但し、このときも SMES の左側からの ΔP_e をフィードバックしている。このように、くし形の連系系統では、系統端部の連系線上において r_i は特徴的な値を示していることがわかる。

同図に示す点に SMES を設置して制御を施したときの固有値を表 5 に示す。第 5 および第 6 モードが効

発電機の定数

(自己容量ベース、発電機の上に示すカッコ内の値が自己容量ベース)

$M=8.0 \text{ sec}$, $T_{d0}=6.0 \text{ sec}$, $D=2.5 \text{ sec}$

$x_d=0.3 \text{ pu}$, $x_d'=1.6 \text{ pu}$, $x_q=1.65 \text{ pu}$

送電線の定数は図中に示す (5,000 MVA ベース)

図 5 に示した AVR を有する (ガバナは無視する)

図 10 7 機連系モデル系統

Fig. 10. An interconnected system with 7 generators.

図 11 r_i の値 (母線 3-6 間)

Fig. 11. Values of r_i (between bus 3 and bus 6).

表 5 安定化制御の結果

Table 5. Results of stabilizing control (7-machine system).

固有値 No.	制 御 無	制御有 ($\omega_R=1.2$ rad/s)
1	$-0.288 \pm j9.80$	$-0.288 \pm j9.80$
2	$-0.257 \pm j9.53$	$-0.257 \pm j9.53$
3	$-0.254 \pm j8.57$	$-0.255 \pm j8.56$
4	$-0.203 \pm j5.63$	$-0.236 \pm j5.68$
5	$-0.175 \pm j4.79$	$-0.262 \pm j5.32$
6	$+0.209 \pm j2.66$	$-0.229 \pm j3.47$

果的に安定化されている。前章と同様、長周期の動揺の安定化には系統端部の連系線上に SMES を設置して制御すれば有効であることがわかった。

6. む す び

本論文では超電導エネルギー貯蔵装置(SMES)を用いて、有効電力ならびに無効電力を制御することにより、くし形連系系統に発生するダンピングの悪い長周期の電力動揺を安定化する方法について検討した。その結果、次のことが明らかになった。

(1) SMES の充放電において、無効電力による定電圧制御と同時に有効電力による連系線潮流の位相進み制御を行えば顕著な安定化効果が得られる。

(2) システムの可制御性と可観測性を加味した指標を定義し、これを用いて連系系統における SMES の効果的な設置個所を検討する方法を提案した。

(3) くし形連系モデル系統と 7 機連系モデル系統に本手法を適用した結果、効果的に動揺を抑制する設置個所を適切に選び得ることを確認できた。

(4) このようなくし形の連系系統を安定化するには、系統端部の連系線上に SMES を設置すれば有効である。また、このように設置すれば各種の潮流状態において安定化の効果が期待できる。

(5) 制御に必要な SMES の有効・無効電力の容量は、無制御時の電力動揺に相当する値であった。

本制御の実現や、系統故障中、回線しゃ断時などの SMES の運転方式について、今後、数値解析と模擬系統を用いた実験により詳細に検討する予定である。

なお、本研究は、本学工学部超電導工学実験センターにおける超電導エネルギー部門の研究の一環として行なった。また、文部省科学研究費「エネルギー特別研究」の補助を受けていることを付記する。

(昭和 59 年 12 月 15 日受付, 同 60 年 6 月 7 日再受付)

文 献

- (1) F.P. de Mello & C. Concordia: "Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.* PAS- 88, No. 2

p. 316 (1969)

- (2) 難波・勾坂・水上・吉田・室谷・浅野・萩原:「静止形無効電力補償装置(SVC)による電力系統の安定度向上効果」電学論 B, 104, p. 289 (昭 59-5)
- (3) 藤原・阿部・武田・小畑:「静止形無効電力制御装置による電力系統の安定化制御」電学論 B, 101, p. 101 (昭 56-2)
- (4) F. Aboytes, G. Arroyo & G. Villa: "Application of Static Var Compensators in Longitudinal Power Systems", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.* PAS-102, No. 10, p. 3460 (1983)
- (5) 大澤・宮内・林・本多:「超電導エネルギー貯蔵装置(SMES)による串型系統の安定化」電気学会電力技術研究会資料 PE-82-15 (昭 57)
- (6) 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」電学論 B, 104, 749 (昭 59-11)
- (7) F. P. de Mello, P. J. Nolan, T. F. Laskowski & J. M. Undrill: "Coordinated Application of Stabilizers in Multimachine Power Systems", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.* PAS-99, No. 3, p. 892 (1980).
- (8) 土井・阿部:「多機系における PSS の協調設計法」, 電学論 B, 103, p. 655 (昭 58-10)
- (9) 伊藤・辻・村上:「0.5 MJ 超電導エネルギー貯蔵装置による有効・無効電力同時制御」電学論 B, 104, p. 545 (昭 59-9)
- (10) V. Arcoiacono, E. Ferrari & F. Saccomanno: "Studies on Dumping of Electromechanical Oscillations in Multimachine Systems with Longitudinal Structure", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.* PAS-95, No. 2, p. 450 (1976)
- (11) 三谷・辻・村上:「超電導エネルギー貯蔵装置による連系線潮流の安定化」昭 59 電気学会全大 No. 883

付 録

フィードバック信号と状態方程式の解の関係

(25)式に(26)式を代入すると次式を得る。

$$\ddot{x}_i = -\lambda_i x_i + b_i^* k_i \exp(j\theta) \cdot x_i \dots\dots (付 1)$$

このとき, x_i の解の ω_i および σ_i を求めると

$$\omega_i = \sqrt{(\lambda_i - b_i^* k_i \cos \theta)^* * \frac{1}{1 + \sqrt{\lambda_i^2 + (b_i^* k_i)^2 - 2\lambda_i b_i^* k_i \cos \theta}} / 2} \dots\dots (付 2)$$

$$\sigma_i = \pm \sqrt{(-\lambda_i + b_i^* k_i \cos \theta)^* * \frac{1}{1 + \sqrt{\lambda_i^2 + (b_i^* k_i)^2 - 2\lambda_i b_i^* k_i \cos \theta}} / 2} \dots\dots (付 3)$$

但し, 複号は $b_i^* k_i \sin \theta$ の符号に一致する。

ここで, $|\theta|$ が小さいとして近似計算を行なうと

$$\begin{aligned} & \sqrt{\lambda_i^2 + (b_i^* k_i)^2 - 2\lambda_i b_i^* k_i \cos \theta} \\ &= \sqrt{(\lambda_i - b_i^* k_i)^2 + 2\lambda_i b_i^* k_i (1 - \cos \theta)} \\ &\simeq (\lambda_i - b_i^* k_i) \{1 + \lambda_i b_i^* k_i (1 - \cos \theta) / (\lambda_i - b_i^* k_i)^2\} \end{aligned}$$

但し, $\lambda_i - b_i^* k_i > 0$ とする。このとき(付 3)式は

$$\begin{aligned} \sigma_i &\simeq \pm \sqrt{(1 - \cos \theta) (b_i^* k_i)^2 / \{2(\lambda_i - b_i^* k_i)\}} \\ &= b_i^* k_i \sin(\theta/2) / \sqrt{\lambda_i - b_i^* k_i} \\ &\simeq \{b_i^* k_i / \sqrt{2(\lambda_i - b_i^* k_i)}\} \theta \dots\dots (付 4) \end{aligned}$$

(付 2)式で, $\cos \theta \simeq 1$ とすると

$$\omega_i \simeq \sqrt{\lambda_i - b_i^* k_i} \dots\dots (付 5)$$