超電導エネルギー貯蔵装置を連系した電力系統の 2 時間軸並列シミュレーション手法

正 員 内 藤 文 信 (東 北 大)

正 員 豊 田 淳 一 (東 北 大)

正 員 上 所 操 (東北電力)

正 員 佐 藤 卓 (東北電力)

Dual-Time-Scale Simulation of Electric Power Systems with Superconducting Magnetic Energy Storage

Fuminobu Naito, Member, Junichi Toyoda, Member (Tohoku University), Misao Jousho,
Member, Takashi Sato, Member (Tohoku Electric Power Co., Inc.)

In a detailed dynamical analysis of SMES installed in power systems, it is important to coordinate the digital simulations for the slow dynamic model of multi synchronous machines and for the fast dynamic model of SMES in which the commutation characteristics in converter can be included.

In this paper, a practical simulation method is developed for the aim to dual-time-scale modeling. Concurrent processes are built with parallel constructions of the phasor based numerical analysis for multi synchronous machines coupled through the network and the instantaneous voltage and current analysis for SMES and its converter system. The concurrent processes for a dual-time-scale simulation are realized by multi transputer network.

Proposed simulation technique is successfully applied to verify the experimental results obtained by a 1 MJ-SMES test system which has been developed at Tohoku Electric Power Company in 1991.

キーワード：超電導エネルギー貯蔵装置，電力系統，高速シミュレーション，PWM 変換器，過渡現象

1. ま え が き

大規模な超電導エネルギー貯蔵装置(SMES)が、負荷平準化による省エネルギー効果を目的とするのに対して、中小規模 SMES は運転予備力の確保、電圧安定化、電力動揺の抑制、AFC の調整容量としての役割が期待されている。

本論文では、電力系統における中小規模 SMES の動的な振舞いを変換器のサイリスタパルス開閉動作を含めた形で、高速に模擬する 2 時間軸シミュレーション手法を提案している。

従来の中小規模 SMES を含む、電力系統のシミュレーションについては二つのアプローチがある。第一のアプローチは、電力系統に生じる電気機械的動揺に

時間軸を合わせて、SMES は有効・無効電力の入出力装置として系統の動特性モデルに組み込み、シミュレーションを行う方法であり、これによって系統に導入した SMES の基本的な機能を評価することができる⁽¹⁾。また、第二のアプローチは、SMES の応答特性を変換器のパルス開閉動作を含めて解析する方法であり、SMES、変換器、高調波フィルタなどの機器構成、変換器の制御アルゴリズムなどを実際の状態に近い状態で検討することができる⁽²⁾。

本論文では、二つのアプローチの特長を生かしたシミュレーション手法を提案している。すなわち、シミュレーションの効率化を図るために発電機、ネットワークの遅い現象解析のための電力系統モデルと、SMES・変換器側の速い現象解析のためのモデルの二

つのサブシステムに分割し、各サブシステムの動特性解析に最も適した数値解法を、同期をとりながら並列に実行する2時間軸並列シミュレーションの実現方法について述べている。このため系統側およびSMES側のサブシステムの動特性シミュレーションにおける特徴、並列化のための条件などを整理し、並列プロセッサを構成するためにトランスピュータネットワークの利用法について述べている。また、シミュレーション結果の妥当性を検証するために、東北電力(株)における1MJ-SMES実証試験装置による試験結果についてシミュレーション結果との比較検討を行っている。

2. SMES連系システムの2時間軸シミュレーション

SMESを含む電力系統の動特性解析について、本論文で提案するような変換器のバルブ開閉動作を考慮した2時間軸シミュレーション手法を開発する目的は次のような点にある。

- (1) 系統側で発生するじょう乱に対するSMESの変換器を含めた安定性の評価
- (2) SMES変換器側で発生する事故が系統側に及ぼす影響の評価
- (3) 変換器から発生する高調波電流レベルの推定と高調波フィルタの効果
- (4) 高調波電流による系統電圧ひずみがSMES変換器の電力制御特性に及ぼす影響の評価

〈2・1〉 SMES連系系統動特性モデルの特徴

図1に示すSMES連系システムの動特性は三つの基本的な要素、すなわち、(i)発電機群の電気機械的慣性、(ii)送電線、変圧器など流通ネットワークにおける電力潮流および、(iii)SMES変換器のバルブ開閉動作によって制御される交直電力変換によって特徴づけられる。発電機群とネットワークから構成される電力系統の動特性は、同期発電機のParkモデルとネッ

トワークの潮流計算モデルにより解析される。このモデルは、発電機のゆっくりとした機械的な動揺とネットワークの潮流変動との相互作用を解析するもので、比較的低速な現象を対象にしている。一方、SMES側の電力制御は変換器によってなされるので、応答特性を詳細に検討するには、サイリスタバルブの開閉動作を模擬する変換器モデルについて過渡現象解析が必要である。これは発電機の動揺解析に比較すると現象が高速であり、シミュレーションを行う場合、時間刻みはかなり短く設定する必要がある。

SMES連系システムでは、変換器から系統側に流出する高調波の影響を考慮する必要がある。一般に、高調波の介在する系統については、ネットワークを本来のLC等価回路によってモデル化し、回路の微分方程式と発電機群の運動方程式を連立させたかたちで解析するので、非常に複雑なものとなる。SMES連系システムについても、高調波レベルの高い部分では、このような解析が必要である。しかし、高調波は発生源からある程度距離をおいた地点では低減するので、系統内で高調波レベルの低い領域については、基本波成分のみを対象とする動特性解析モデルを適用することが可能である。

SMESについては従来から変換器の交流側実効値ベースの特性と、直流側平均値ベースの特性を基にしたマクロな等価モデルが利用されている。このモデルでは、SMESの吸収電力 $S = P_s + jQ_s$ に対して、等価なアドミタンス $Y = (P_s - jQ_s) / |v_s|^2$ を対応させている。その時間応答特性は、変換器の制御回路を等価的に置き換えた伝達関数によって評価されている。このSMESモデルは、発電機のParkモデルおよびネットワークの電力潮流モデルとの組合せが容易であり、SMES連系システムの動特性解析に広く利用されている。

〈2・2〉 SMESモデルと系統モデルを結合した2時間軸並列シミュレーション 系統側の低速モデルとSMES・変換器側的高速モデルを組み合わせた2時間軸シミュレーションのイメージは図2のようであり、それぞれの時間軸シミュレーションの特徴は表1のようにまとめられる。表1に示すように系統側モデルとSMES変換器側モデルでは扱う変量が異なり、系統側では基本波成分のフェーザをベースとするのに対し、SMES側では電圧電流の瞬時値をベースにする。このため両モデルを結合するには変量の相互変換を工夫して整合をとり、全体のシミュレーションの妥当性を保証する必要がある。

SMES連系システムでは、変換器から発生する高調波電流の一部が系統側のネットワークに流出する。

図1 SMES連系システムのモデル化

Fig.1. Modeling of power systems with SMES.

SMES 側モデルでは高調波成分についても十分な計算精度が保証されるが、系統側モデルにおける潮流計算では基本波成分のフェーザをベースとしており、高調波成分は無視される。このため、SMES 側と系統側のモデルの変量の相互変換を行う両モデルの結合点は、SMES の設置点からある程度距離をおいた高調波レベルの低い地点に選ぶ必要がある。本論文では、結合点の選び方として複数の結合点候補を選び、系統側の基本波無ひずみ電圧波に対して、結合点を流れる電流に含まれる高調波成分を求め、これが許容できるような地点を結合点としている。そのようにすれば、SMES 設置点近傍のネットワークは SMES 側のモデルに組み込まれるので、高調波成分の評価に都合がよい。

(1) シミュレーションの時間刻み 系統側の動特性は発電機の機械的な慣性、電機子反作用の磁気的な慣性、ガバナ、AVR、PSS などの発電機制御系統の応答特性によって特徴づけられるが、これらは比較的応答が低速であり、時間刻みを 0.01 秒程度とする

図 2 SMES 連系系統の 2 時間軸シミュレーションモデル

Fig. 2. Dual-time-simulation model of power systems with SMES.

表 1 電気機械モデルと SMES モデルの動特性比較
Table 1. Comparison of electromechanical model and transient SMES model in power system.

モデル	電気機械モデル (低速モデル)	SMES 過渡現象モデル (高速モデル)
動特性要素	発電機の電氣的 機械的慣性	変換器パルプの転流
動特性の周期	数秒オーダー	0.1~1 ミリ秒
変 量	フェーザ量 (pu 値)	瞬時値 (実量)
解析法	潮流計算安定度解析	過渡現象解析
座標系	dq 座標系	三相座標系

数値解析によってシミュレーションが可能である。一方、SMES 側について変換器のパルプ開閉動作をシミュレーションするには、時間刻み 0.1 ミリ秒程度を設定する必要がある。すなわち、系統側モデルのシミュレーションにおいて数値計算の時間刻み 1 ステップ進める間に、SMES 側では 100 ステップの計算が必要となる。

(2) 系統側の処理 発電機、ネットワーク側では、SMES の吸収する有効電力 P_s 、無効電力 Q_s を SMES 側の解析から求められる外部入力変数とみなし、ネットワークについての潮流計算および発電機の動揺解析を行う。すなわち、ネットワークに関する潮流計算では、SMES を P_s 、 Q_s が一定な電力源とみなし、発電機から系統に注入される有効電力 P_g 、発電機端子電圧 V_t 、スラック母線電圧 $V_b \angle 0^\circ$ を既知量として、SMES の設置母線電圧 $V_b \angle \delta_b$ および発電機の端子電圧 $V_t \angle \delta_t$ を求める。発電機の動特性は P_g 、 Q_g 、 $V_t \angle \delta_t$ および発電機の原動機入力 P_m 、励磁電圧 E_{fd} を既知量として発電機の電気・機械動揺方程式を数値積分法によって解析する。

(3) SMES 側の処理 SMES 側については、系統モデルとの接点における系統側の電圧 $V_b \angle \delta_b$ を既知量として、SMES、変換器の過渡現象解析を行う。この場合、SMES 側からみて系統側は理想電圧源として扱うことになる。変換器は三相回路モデルで解析するため、系統側との接点における電圧 $V_b \angle \delta_b$ を次式で与えられる瞬時値ベースの三相電圧源で近似する。

$$v_a = E_0 [v_d \cos(\omega t + \delta_b) - v_q \sin(\omega t + \delta_b)] \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$v_b = E_0 [v_d \cos(\omega t + \delta_b - a) - v_q \sin(\omega t + \delta_b - a)] \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$v_c = E_0 [v_d \cos(\omega t + \delta_b + a) - v_q \sin(\omega t + \delta_b + a)] \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 $E_0 = \sqrt{2/3} V_b$: 単位法による系統側の電圧と実量単位の SMES 側の電圧 (基準電圧: V_b) の換算係数、 v_d 、 v_q : 電圧 $V_b \angle \delta_b$ の dq 座標系における各成分 (pu 値) を与える、 ω : 系統の角周波数であり $a = 2\pi/3$

(4) SMES 制御信号の処理 SMES の電力制御は系統側の発電機回転数偏差 $\Delta\omega$ 、出力偏差 ΔP_g 、母線電圧 V_b の変動などを制御信号として SMES の吸収/放出電力の設定値 (P_{sr} 、 Q_{sr}) を決定し、これから変換器の制御角 α 、通流比 D などの制御量を算定する。この制御信号処理系統の動特性は伝達関数に

より与えられるが、シミュレーションでは変換器主回路の過渡現象解析と並列させるかたちで伝達関数からデジタル信号処理により変換器の制御量を算定している。

3. 2時間軸並列シミュレーションモデルの並列処理

〈3・1〉 シミュレーションプログラムの並列化

発電機、ネットワーク、SMESはそれぞれ内部の構成、接続は複雑であるが、これらのサブシステムの接点における結合は比較的粗である。このため、接点における条件を満足させるようなかたちで各サブシステムを分割し、動特性について数値解を求めることは比較的容易である。

SMES連系システムの動特性シミュレーションは発電機の動揺方程式の数値解析、ネットワークにおける電力潮流計算およびSMES、変換器のバルブ開閉動作を扱う過渡現象解析から構成され、全体フローは図3に示される。

2時間軸並列シミュレーションを実行する前に発電機ネットワーク側の電力電圧の初期値を別計算により求める。また、SMES側については超電導コイルを初期充電の段階からシミュレーションを開始する。

SMES連系システムのある時間断面において、まず系

図3 2時間軸並列シミュレーションの計算フロー図

Fig. 3. Flow diagram of dual-time-scale simulation.

統構成の変更の有無、事故の発生状況をチェックする。発電機、ネットワークの低速モデルについては、潮流計算と発電機の動揺解析を行う。SMES側への注入電力 P_s , Q_s , 発電機母線電圧の設定値 $|V_i|$, スラック母線の電圧 $V_0 \angle 0^\circ$, 発電機の原動機入力 P_m を既知量として発電機電力動揺方程式を時間刻み $\Delta t_1 = 0.01$ 秒の RKG 法により数値解析する。

また、SMES側の高速モデルについて、母線電圧 $V_0 \angle \delta_0$ を既知量とし、変換器について $\Delta t_2 = 0.1$ ミリ秒の繰返し計算により過渡現象解析を行い、SMES 吸収電力 P_s , Q_s を求める。高速モデルではサイリスタバルブの開閉状態によって定まる区間線形な微分方程式を、時間刻み Δt_2 で離散化し台形法によって解を求め、高速、低速モデルの間のデータ交換は Δt_1 ごとに行うことになる。

〈3・2〉 トランスピュータの応用 2時間軸並列シミュレーションのために、図4のようなトランスピュータネットワークを試作し並列計算について実験した。これは試験的な構成であるが、トランスピュータ Tr_1 によって発電機の動揺方程式とネットワークの潮流計算を行い、トランスピュータ Tr_2 によって SMES の過渡現象解析を行う。

ホストコンピュータはキーボード入力、ディスプレイ出力、ファイル出力に用いる。SMES側の計算を行うトランスピュータ Tr_2 はデータ出力量が多いので、ホストコンピュータとの通信距離が短くなるように配置している。

SMESを含む1機無限大母線システムモデルによるシミュレーション結果によると、SMES側の計算量が発電機、ネットワーク側の計算より圧倒的に大きいため並列計算による計算時間の短縮については顕著な効果は得られなかったが、システム内に変換器を利用する SMES, SVC, HVDC などの電力設備が複数連系されるようなシステムでは、各設備について本手法による並列化が可能であり、計算時間についても大幅な短縮化の可能性が見込まれる。

図4 トランスピュータネットワークの構成
Fig. 4. Allocation of processes on transputer network.

4. 1機無限大母線系統のシミュレーション

東北電力(株)の1MJ-SMES実証試験装置を, SMESの連系系統モデルとして, 本論文で提案している2時間軸シミュレーションを行った結果について述べる。SMESは図5に示すように, 模擬系統(基準容量20kVA, 基準電圧440V)の発電機母線に接続されており, 1機無限大母線系統における電力動揺, 電圧変動についてSMESの抑制効果が検討できる⁽⁹⁾⁽⁴⁾。

2時間軸シミュレーションは系統側低速モデルによるフェーザベースのシミュレーションとSMES側の高速モデルによる瞬時値ベースのシミュレーションを統合する点に特徴があるが, ここではまずSMES側の高速モデルによるシミュレーション結果について述べ, 統合モデルによる過渡安定度シミュレーションについては実証試験結果との対比をしつつ後述する。

(4・1) SMES変換器側の高速シミュレーション

SMES実証試験モデルでは, 図6に示すように発電機の回転数偏差 $\Delta\omega$ あるいは出力偏差 ΔP_g , 母線電圧 V_b , 超電導コイルの充電電流 I_{dc} を制御信号として検出し, 制御方式に応じてPWM変換器(550

図5 SMESの系統安定化シミュレーションモデル
Fig. 5. Simulation model for power system stability analysis.

図6 SMES制御系モデル
Fig. 6. Model of SMES control system.

Hz, 三角波比較方式)の制御角 α , 通流比 D が算定され, その結果SMESの吸収あるいは放出する電力(P_s , Q_s)が決められている。

総合モデルによるシミュレーションでは, 変換器の動きが複雑になり理解しにくい面があるので, ここでは変換器に対して比較的単純な出力指令を行う場合のシミュレーション結果を示したい。

図7はPWM変換器の通流比 D を一定に保ち, 制御角 α を時間0.25秒間に 0° から -180° まで変化させたときの変換器応答特性を示している。超電導コイルの充電電圧 V_{dc} , PWM変換器の電流 I_{pwc} の電圧・電流パターンおよび系統側の電圧 V_b に対する位相関係が制御角 α によって変化していく様子が正しく模擬されている。また, 変換器にはパルス開閉時に発生する過電圧, 高調波を抑制するためにACコンデンサ(入力端コンデンサ C_i)が組み込まれているが,

図7 SMES側高速モデルのシミュレーション
Fig. 7. Simulation of a fast dynamic model of SMES.

V_{AC} , I_{AC} の波形から高調波によるひずみ率、フィルタの効果を推定することができる。

SMES の吸収・放出電力 (P_s , Q_s) について、母線電圧 V_b および変換器に流れる電流の瞬時値データを基にデジタルデータ処理により求めている。このときに平滑化処理を行っているため、これらのデータには 0.05~0.06 秒の時間遅れが生じている。本シミュレーションでは、この時間遅れを SMES 制御系の時間遅れ要素に含めるかたちで処理している。

〈4・2〉 SMES による系統安定化 図 5 の系統モデルにおいて、送電区間に三相地絡事故が発生する場合を仮定し、系統じょう乱を SMES によって安定化するときの SMES の応答特性および系統側の動特性について 2 時間軸シミュレーションを行った。発電機は Park の七次モデル⁽⁵⁾⁽⁶⁾ により模擬しているが、AVR, PSS 制御については不動作の状態を仮定している。図 8 は SMES, 変換器の瞬時値ベースの応答特性について〈4・1〉節で述べたように実効値, 平均値ベースで処理した結果である。低速モデルによる系統側の動特性シミュレーションの結果は図 9 に示される。

超電導コイルの充電電流レベル、変換器の運転状態を任意のモードに設定するために、SMES については初期充電の段階からシミュレーションを行っている。

図 8 SMES の応答特性シミュレーション結果
Fig. 8. Simulation results of SMES system response.

る。時間 $t=0\sim5$ 秒における初期充電が終了した後、SMES は通流比を $D=0$ として待機状態にしている。時間 $t=15$ 秒において三相地絡事故 (事故継続時間 0.15 秒) が発生する場合を想定して、

- (i) SMES による所定の安定化制御を行う場合 ($\Delta\omega$ による P_s の電力動揺抑制制御と V_b による Q_s の電圧安定化制御の組合せ)
- (ii) SMES を無制御にする場合 (通流比を 0 として SMES を待機状態)

の 2 通りの SMES 動作についてシミュレーションを行った。

時間 $t=0\sim5$ 秒における SMES の充電時、発電機出力 P_g は一定であり、線路潮流 ($P_g - P_s$) は SMES 充電電力 P_s の増加に伴って減少する。このため発電機の相差角 δ は図 9 に示すように $t=0\sim5$ 秒において減少している。また $t=5$ 秒において、SMES の充電を停止しているため、図 9 に示すように系統にはその影響による電力動揺が発生している。

図 8, 図 9 を比較すると、SMES は発電機の回転数

図 9 系統の過渡安定度シミュレーション結果
Fig. 9. Simulation results of transient power system stability.

図 10 1 MJ-SMES 実証試験結果

Fig. 10. Experimental results of transient stability enhancement of power system by SMES.

偏差 $\Delta\omega$ を低減するように有効電力 P_g が制御されているのが確認される。すなわち $\Delta\omega > 0$ の加速時には SMES は電力吸収として動作し、 $\Delta\omega < 0$ の減速時には電力放出として動作しているのが確認される。

地絡事故の除去後、発電機の相差角 δ が大きく開き、出力 P_g は一時増大する。このとき線路潮流が増加するため、発電機母線電圧は低下する。また、AVR 機能を不動作（励磁電圧一定）とした発電機では、 P_g の増加に対して無効電力 Q_g の供給が減少している。このため、図 8 に示すように、SMES には母線電圧を安定化するための比較的大きな無効電力の補償動作が生じる。

図 10 は実証試験装置による過渡安定度試験結果の一例である。実証試験の場合は、故障除去後 0.4 秒間一定の有効電力 (7.5 kW) を吸収し、その後

(i) P_g 、 V_b を入力信号として SMES の P_s 、 Q_s を制御する場合

(ii) SMES による P_s 、 Q_s の制御を行わない場合について試験している。

実証試験とシミュレーションとでは SMES の制御方式に若干の違いがあり、またシステムパラメータも完全に同一ではないが、幾つかの点で結果の一致性が見られる。それらは

(1) SMES により安定化制御を行う場合について、三相地絡事故の臨界事故除去時間はシミュレーションと実証試験でほぼ同程度となっている。

(2) 事故除去後の SMES による無効電力 Q_s の補償、および発電機端子・母線電圧、 V_b はシミュレ

ーションと実証試験に一致が見られる。

(3) SMES により安定化制御を行う場合と無制御の場合について事故除去後の発電機出力 P_g 、端子電圧 V_t の時間変動波形に相似性が見られる。

実証試験装置に組み込まれている発電機は、小容量機 (20 kVA) であるため磁気的な慣性が小さく大型機に比較し、系統じょう乱に対して電圧の変動しやすい傾向がある。このため SMES の無効電力 Q_s による母線電圧 V_b の安定化が系統の安定度向上に関して比較的有效であることがシミュレーションによって確認された。また、実証試験でも同様の傾向が見られた。

5. む す び

本論文では、SMES を含む電力系統の動特性シミュレーションを効率的に実行するために、2 時間軸シミュレーション手法を提案している。本手法は、SMES・変換器側の瞬時値データをベースとするシミュレーションと発電機・ネットワーク側の実効値データをベースとするシミュレーションを、時間刻みの異なる二つのプロセスによって並列に処理する点に特徴がある。

本論文では、この 2 時間軸シミュレーションを実現するための系統側および SMES 側のモデル化、計算アルゴリズム、プロセス間のデータ処理法について検討している。また、このシミュレーション手法について、トランスピュータネットワークによる並列処理の応用可能性を検討し、各サブシステム解析ツールのモジュール化、並列処理の最適化について考察している。

1 機無限大母線系統を用いた SMES の安定化制御を提案手法によりシミュレーションして、SMES 変換器側の高速モデルについて妥当性を検証し、併せて統合モデルのシミュレーションと東北電力 (株) の 1 MJ-SMES の実証試験結果との比較を行い、提案手法の応用可能性を確認した。

(平成 5 年 2 月 15 日受付、同 5 年 6 月 14 日再受付)

文 献

- (1) 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，101，23 (昭 60-1)
- (2) 白井・仁田・岡田：「超電導エネルギー貯蔵装置を含む電力系統の特性解析法」，同上 B，111，441 (平 3-4)
- (3) 佐藤・本間・上所・白崎・藤林：「SMES と模擬送電設備を接続した系統試験」，平 4 電気学会電力・エネルギー部門大会，171
- (4) 内藤・豊田・上所：「電力システムにおける超電導エネルギー貯蔵装置の動特性分析」，平 4 同上，170
- (5) Yao-Nan Yu: Electric Power System Dynamics (1983) Academic Press
- (6) John R. Smith: "Response Analysis of A.C. Electrical Machines", RSP (1990)

内 藤 文 信 (正員)

昭和17年3月7日生。42年3月山形大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年6月東北大学工学部助手。電力系統工学，高電圧工学に関する

研究に従事。

上 所 操 (正員)

昭和22年7月15日生。45年3月北海道大学工学部電気工学科卒業。同年4月東北電力(株)入社。現在，電力技術研究所勤務。主として，超電導エネルギー

貯蔵システムの研究に従事。

豊 田 淳 一 (正員)

昭和9年7月9日生。38年3月東京大学大学院数物系研究科電気工学専攻博士課程修了。同年4月成蹊大学工学部電気工学科助教授，47年4月同教授。58

年4月東北大学工学部電気工学科教授。IEEE，CIGRE SC 39 会員。

佐 藤 卓 (正員)

昭和34年2月24日生。58年3月日本大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年4月東北電力(株)入社。系統運用業務を経て，現在，電力技術研究所勤務。超電導エネルギー貯蔵システムの研究に従事。