訓練用シミュレータのための高速過渡安定度 計算手法の開発と適用

正員 久 和 進 (北陸電力)
 正員 吉 田 忠 美 (北陸電力)
 正員 小 俣 和 也 (東 芝)
 正員 湯 朝 真 司 (東 芝)
 正員 三田村 謙 一 (東 芝)

Development and Application of Fast Transient Stability Calculation Method for a Power System Training Simulator

Susumu Kyuwa, Member, Tadayoshi Yosida, Member (Hokuriku Electric Power Co.), Kazuya Omata, Member, Shinji Yuasa, Member, Kenichi Mitamura, Member (Toshiba Corp.)

Various stabilizing equipments have been installed in modern power systems to enhance power system stability and its stabilizing algorithms have become more complicated⁽³⁾.

Most of training simulators, however, simulate a power system by performing power flows and frequency deviation calculations⁽²⁾. Since these simulators ignore dynamics of individual generators, it is impossible to simulate power swings and out-of-step phenomena which are closely connected with these equipment's actions. To simulate these actions automatically in the training simulator, a transient stability calculation program must be incorporated.

There are two methods. In one method, a transient stability calculation program is linked to a conventional training simulator using an event sequence file and called every time it is required⁽⁴⁾⁽⁵⁾. In the other method, a training simulator involves a transient stability calculation program itself and simulates the generator dynamics and stabilizing equipment continuously⁽⁶⁾. However, to adopt the latter method, a transient stability calculation program that can simulate power swings in real time must be developed. The application of this method to a large power system with more than 100 generators has not been reported so far.

This paper presents a transient stability calculation method which can simulate a large power system with more than 100 generators faster than real phenomena, and its application to a training simulator.

キーワード：訓練用シミュレータ，過渡安定度計算，モデリング，並列処理，マルチプロセッサ

1. ま え が き

近年，社会生活・経済活動の電力依存度が増大し，電力の安定供給が社会的に重要視されている。また，電力系統はますます大規模・複雑化しており，これを安定かつ経済的に運用するための系統運用業務は高度化する一方である。これに伴い，系統運用者の責務は，格段に重要性を増してきており，特に系統事故が発生したときには冷静・沈着な判断力が要求される。これに対処するためには，系統運用者の日ごろの訓練が重要であり，これにはシミュレータによる訓練が有効であることが認識されている。この訓

練用シミュレータは，電力系統の平常時，事故時および復旧時の挙動をリアルタイムで模擬するもので，あらかじめ設定されたシナリオに対してだけではなく，訓練者の操作にも応答しなければならない。

現在まで，訓練用シミュレータは国内・外で数多く開発されているが，そのほとんどは潮流計算と周波数動揺計算を交互に行って，電力系統の挙動を模擬するものであった⁽²⁾。この模擬方法では，電力系統を一つの等価発電機として取り扱っているため，発電機間に発生する脱調現象を模擬することはできない。

一方，最近の電力系統には，系統事故による脱調現象の

進展を防止するため、脱調分離リレーをはじめとするいろいろな系統安定化装置が導入されている。そして、その動作原理は複雑化する一方である⁽³⁾。これに伴い、実系統に即した系統模擬を行うためには、系統安定化装置の応動を模擬しなければならない。しかしながら、従来タイプのシミュレータで系統安定化装置の応動を模擬しようとすると、トレーナが訓練前にその応動を予測し、訓練シナリオに組み込まなければならない。電力系統が大規模化し、系統安定化装置の動作原理も複雑化した今日、各種の系統事故による安定化装置の応動をあらかじめ予測することは非常に困難である。この結果、系統安定化装置の動作をシミュレータで自動的に模擬することが要求される。この要求を満足するためには、シミュレータに個々の発電機の動特性を計算できる過渡安定度計算プログラムを内蔵しなければならない。

これを実現する方法として、次の二つが提案されている。一つは、過渡安定度計算プログラムと従来型シミュレータをイベントシーケンスファイルで結合する方法である⁽⁴⁾⁽⁵⁾。この方法では、訓練シナリオ中の事故に対する安定度が、過渡安定度計算プログラムによりチェックされ、脱調分離リレーなどの応動結果がイベントシーケンスファイルに出力される。シミュレータ側ではその結果を取り込み訓練シナリオに追加する。この間、系統模擬は休止状態となり、安定度計算に時間がかかる場合は、臨場感の高い訓練は不可能となる。

もう一つの方法は、潮流計算と周波数動揺計算を過渡安定度計算に直接置き換える方法で、脱調分離リレーなどの系統安定化装置の動作ロジックを組み込めば、中断のない臨場感の高い訓練が可能になる⁽⁶⁾。しかしながら、この方法では実際の現象より高速に過渡安定度計算を実行する必要がある、100 発電機を超える大規模系統に適用された例はない。

本論文では、100 発電機以上の大規模系統の過渡安定度計算を、リアルタイム以上の速度で計算可能な高速過渡安定度計算手法⁽¹⁾とそれを適用した訓練用シミュレータについて報告する。開発したシミュレータは、前述した後者のアプローチ、すなわち潮流計算と周波数動揺計算を過渡安定度計算に置き換える方法をとっている、臨場感の高い訓練を実施できる。

以下、第2章では要求される過渡安定度計算の速度と精度について説明する。そして、第3章では高速過渡安定度計算手法について、第4章ではその手法の訓練用シミュレータへの適用方法についてそれぞれ説明する。そして最後に、第5章で開発したシミュレータのテスト結果を示す。

2. 過渡安定度計算の要求速度と精度

電力系統の安定度を計算するためには、発電機やその制御系の動特性を表す非線形微分方程式と、送電系統を表す非線形代数方程式を同時あるいは交互に解く必要がある。従来より、系統計画や運用に適用されてきた過渡安定度計

算プログラムでは、発電機は Park の詳細モデルを用い、AVR、ガバナなどの制御系も実ハードに即した詳細モデルを使用している。このため、発電機1台当たりの微分方程式の数は20～30次元となり、時定数は10ms程度のものも存在する。これにより、大規模系統の過渡安定度計算は、大型計算機を用いても実現象の10倍以上の計算時間を必要とする。

一方、訓練用シミュレータは、事故発生時の電力系統の挙動を訓練者にリアルタイムで伝えなければならないため、系統計画や運用への適用とは異なり、計算のリアルタイム性が第一に要求される。

シミュレータに適用する過渡安定度計算プログラムに要求される性能をまとめると次のようになる。

(i) 過渡安定度計算の前後処理も考えて実現象の1.5～2倍の計算速度であること。

(ii) 訓練者から見た系統特性が実系統と一致すること。すなわち、安定/不安定および動揺の傾向がおおむね詳細モデルを用いた過渡安定度計算結果と一致すること。

3. 高速過渡安定度計算手法

訓練用シミュレータで対象とする電力系統は、発電機数約100台、母線数約400の大規模系統なので、通常モデリングや計算処理方法では前述した要求性能を満足することはできない。

そこで、次に示す四つの方法を組み合わせることにより、シミュレータに適用可能な過渡安定度計算プログラムを実現する。

(i) インプリシットな台形積分法をベースとした分割解法の採用。

(ii) モデリングの工夫による積分刻み幅の拡大と演算処理量の低減(積分刻み幅の目標は100ms)。

(iii) 詳細過渡安定度計算結果との整合性をとるための発電機制動係数の調整。

(iv) マルチプロセッサ構成のコンピュータを用いた過渡安定度計算の並列処理。

上述した四つの方法の効果を、計算の高速化と模擬精度の維持に分けて評価すると表1となる。

以下、(i)～(iv)の項目について具体的に述べる。

〈3・1〉 計算方法⁽⁶⁾ 過渡安定度計算で解かなければならない方程式は、(1)式の発電機動特性を表す非線形微分方程式と(2)式の送電系統を表す非線形代数方程式である。

表1 適用手法の効果
Table1. Effect of adopted methods.

適用手法	高速化	精度維持
台形積分法	○	○
モデリングの工夫	○	
制動係数の調整		○
並列処理	○	

$$\dot{X} = AX + BU \dots\dots\dots (1a)$$

$$U = G(X, V) \dots\dots\dots (1b)$$

$$YV = I \dots\dots\dots (2a)$$

$$I = H(X) \dots\dots\dots (2b)$$

ここで、 X ：発電機内部位相角などの状態変数、
 U ：発電機出力などのインタフェース変数、 V ：
 ノード電圧、 I ：ノードへの注入電流、 Y ：ノード
 アドミタンス行列、 A 、 B ：係数行列、 G 、
 H ：非線形関数

過渡安定度計算手法には、(1)式と(2)式を交互に解く
 分割解法と、(1)式を代数方程式に変換し(2)式と同時に
 解く同時解法がある。後者の方法では、ヤコビアン行列が
 積分ステップごとに变化するので、LDU 分解に多くの時
 間がかかり、高速計算に適していない。一方、前者の方法
 では、系統構成が変化しないかぎり、ノードアドミタンス
 行列は定数として取り扱えるので高速計算が期待できる。
 そこで、前者の分割解法を採用する。

次に、数値積分法に関しては、高速性、安定度計算に対
 する適性面から幾つかの手法が提案されている⁽⁷⁾⁽⁸⁾。訓練
 用シミュレータでは、高速なシミュレーションを数時間継
 続する必要があることから、高速性ととも数値安定性が
 要求される。そこで、次の理由によりインプリシットな台
 形積分法を採用する。

- (i) 発電機の動揺（振動波形）を精度良く計算するこ
 とができる。
- (ii) 次数が低く、高速計算に適している。
- (iii) 数値安定性が良く、長時間のシミュレーションに
 適している。

図1にインプリシットな台形積分法をベースとした分割
 解法の処理フローを示す。同図において Δt は積分刻み

幅、 t は現時点のシミュレーション時間である。

〈3・2〉 モデリング 積分刻み幅を目標の 100 ms に
 するためには、数値安定性から考えて 100 ms 以下の時定
 数をもつ動特性を省略する必要がある。これらの特性に
 は、発電機のダンパ回路、AVR の PSS 回路が含まれる。
 また、計算の中には負荷特性のように繰返し計算の必要な
 ものも含まれる。そこで、次のような方法により、積分刻
 み幅の拡大と演算量の低減を図る。

(i) 100 ms 以下の時定数をもつ発電機のダンパ回路、
 AVR の PSS 回路はモデル化しない。これにより失われ
 る発電機の制動力は、発電機の制動係数に付加する。制動
 係数の調整方法については、〈3・3〉節で述べる。

(ii) AVR モデルは、模擬すべき周波数領域、すなわ
 ち、0 Hz から電力動揺の周波数領域である数 Hz 程度ま
 で、詳細モデルと周波数特性が一致するように低次元化す
 る。

(iii) ガバナタービンモデルは、安定度に対する影響度
 が小さいことから、定常特性を合わせることを基本に、詳
 細モデルの応答特性を考慮して、一次遅れあるいは二次遅
 れ回路で模擬する。

(iv) 負荷特性計算は、繰返し計算の必要ない近似計算
 法を用いる。

(1) 発電機モデル (3)式に示すように、ダンパ回
 路を無視した過渡モデルを適用する。ダンパ回路の制動効
 果は、前述したように発電機の制動係数に付加する。また、
 過渡凸極性は、収束計算が必要になることから考慮しな
 い。なお、全体の演算量を少なくするため、下位系の小
 容量水力機は、 X_d' 背後電圧一定モデルで模擬している。

$$\delta = \omega_0 \Delta \omega \dots\dots\dots (3a)$$

$$\Delta \dot{\omega} = \frac{1}{M} \{P_m - P_e - D(\Delta \omega - \Delta \omega_{col})\} \dots\dots\dots (3b)$$

$$\dot{e}_q' = \frac{1}{T_{d0}} (E_{fd} - E_{ld}) \dots\dots\dots (3c)$$

$$\dot{e}_d' = \frac{1}{T_{q0}} (-E_{lq}) \dots\dots\dots (3d)$$

$$E_{ld} = e_q' + (X_d - X_d') i_d \dots\dots\dots (3e)$$

$$E_{lq} = e_d' + (X_q - X_q') i_q \dots\dots\dots (3f)$$

ここで、 δ ：内部位相角、 $\Delta \omega$ ：角速度偏差、 e_d' 、
 e_q' ：内部電圧の d 、 q 軸成分、 P_m ：発電機への
 機械入力、 E_{fd} ：界磁電圧、 P_e ：発電機出力、 i_d 、
 i_q ：電流の d 、 q 軸成分、 ω_0 ：定格角速度、
 $\Delta \omega_{col}$ ：発電機の平均角速度偏差、 M ：慣性定
 数、 D ：制動係数、 T_{d0} ：界磁開路時定数、 T_{q0} ：
 q 軸の開路時定数、 X_d 、 X_q ： d 、 q 軸の同時リ
 アクタンス、 X_d' ： d 軸過渡リアクタンス、 X_q' ：
 q 軸過渡リアクタンス ($=X_d'$)

(2) AVR モデル AVR の構成を図2に示す。こ
 のモデルは、ゲイン K_1 、 K_2 、 K_3 と時定数 T_1 、 T_2 を調整
 することにより、模擬すべき周波数領域 (0～数 Hz 程度)
 で、オリジナルな詳細モデルと、周波数特性をほぼ一致さ
 せることができる。特に、AVR の応答特性として重要な

図1 分割解法の処理フロー
 Fig.1. Flow of partitioned solution method.

定常ゲインとカットオフ周波数は詳細モデルと一致する。

PSSが付いている場合は、その制動効果を発電機の制動係数に付加することにより等価的に模擬する。

(3) ガバナタービンモデル 火力機用ガバナタービンモデルを図3に、水力機用モデルを図4に示す。火力機用は、周波数変化に対して高速に応答する高圧タービン部と、再熱器を介してゆっくり応答する中／低圧タービン部に大きく分けられるので、図3に示すように二つの一次遅れ回路とゲインおよび低値優先回路でモデル化する。一方、水力機用は、火力機のような応答速度の異なる系が存在しないので、一次遅れ回路とゲインおよび低値優先回路でモデル化する。

(4) 負荷特性 負荷の電圧特性は、計算量の最も少ない定インピーダンス特性を用いる。負荷の周波数特性に関しては、系統分離などの大外乱による周波数上昇や周波数低下を高精度に模擬したいことから、全体の負荷特性は(4)式に示す周波数特性を考慮した定インピーダンス特性とする。

$$\left. \begin{aligned} P_L &= P_{L0}(1 + k_P \Delta f_L) \left(\frac{|V_L|}{|V_{L0}|} \right)^2 \\ Q_L &= Q_{L0}(1 + k_Q \Delta f_L) \left(\frac{|V_L|}{|V_{L0}|} \right)^2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

図2 AVRモデルの構成図
Fig. 2. Block diagram of AVR model.

図3 火力機用ガバナタービンモデル
Fig. 3. Block diagram of governor turbine model for thermal generator.

図4 水力機用ガバナモデル
Fig. 4. Block diagram of governor model for hydroelectric generator.

ここで、 P_{L0} , Q_{L0} :有効および無効電力の初期値、 V_L , V_{L0} :ノード電圧とその初期値、 Δf_L :ノード電圧の周波数偏差、 K_P , K_Q :有効および無効電力の周波数特性定数

通常、負荷の周波数特性を考慮すれば、負荷特性は非線形となり、系統計算($YV=I$)の各ステップごとに収束計算が必要になる。そこで、1積分ステップ前の系統周波数を用いた繰返し計算の必要ない近似計算法を適用する。以下にその計算手順を示す。

(S1) ノードアドミタンス行列に負荷の定インピーダンス分をうめ込む。

(S2) 1積分ステップ前のノード電圧と周波数を用いて、(4)式の負荷特性と定インピーダンス負荷特性間の注入電流の差分 ΔI_L を(5)式より計算する。

(S3) ΔI_L を補正量として、対象ノードの注入電流に加え、系統計算($YV=I$)を行うことにより、負荷の周波数特性を考慮した系統電圧を求める。

$$\begin{aligned} \Delta I_L(t) &= P_0 \frac{k_P \Delta f(t-\Delta t)}{V_L^*(t-\Delta t)} \left(\frac{|V_L(t-\Delta t)|}{|V_{L0}|} \right)^2 \\ &\quad - jQ_0 \frac{k_Q \Delta f(t-\Delta t)}{V_L^*(t-\Delta t)} \left(\frac{|V_L(t-\Delta t)|}{|V_{L0}|} \right)^2 \end{aligned} \dots\dots\dots (5)$$

通常、系統周波数は、発電機の慣性などにより積分刻み幅に比べてゆっくり変動するので、この模擬方法でも精度は十分であると考えられる。

〈3・3〉 発電機制動係数の調整 積分刻み幅を目標の100 msにするために、発電機のダンパ回路とAVRのPSS回路はモデル化していない。これらの模擬を省略すると、発電機の制動力が低下し、動揺時のダンピングが悪化する。このため、ダンパ回路とPSS回路の制動効果を発電機の制動係数に付加することで精度低下を防止する。

図5に制動係数 D のチューニング手順を示す。チューニングの目的は、与えられた複数の詳細過渡安定度計算結果と安定／不安定および動揺の傾向を合わせることにある。これにより得られた制動係数を使用することにより、チューニングに使用したケース以外でも妥当な結果を得ることができる。

図5 制動係数の調整手順
Fig. 5. Tuning procedure of damping coefficient.

まず図5の(Step 1)で、ダンパ回路とPSSの制動効果を見積もり、その総和をチューニングの初期値とする。通常、ダンパ回路の制動効果は小さく、数puといわれているので、その制動効果を一律1ないし2puにセットしても問題ない。一方、PSSの制動効果は、ダンパ回路に比べて大きく、発電機や対象とする動揺モードによって変化するので、経験的な値を用いることはできない。そこで、一機対無限大母線システムを対象とした動態安定度ブロック図からPSSの制動効果を推定する⁽⁹⁾。その手順は以下となる。

(S1) PSSのついた発電機を対象に、システムを一機対無限大母線システムに縮約し、線形化した動態安定度ブロック図を得る。

(S2) 周波数応答法を用いて、PSS回路がある場合とない場合の制動トルク係数の周波数特性を求める。

(S3) 詳細過渡安定度計算結果などから対象発電機の主動揺モードの振動周波数を求める。

(S4) この振動周波数に対して、PSSのありなしによる制動トルク係数の差分を求め、その値を制動効果の初期値とする。

図6はこの方法による制動効果の推定例である。対象発電機の主動揺モードの振動周波数は6rad/sである。この振動周波数において、PSSがある場合の制動トルク係数は24puで、ない場合は9puである。これらの結果より、PSSによる制動効果は15puであると推定される。

次に図5のStep 2で、代表ケースを対象に、詳細過渡安定度計算結果と動揺傾向が一致するように発電機の制動係数を調整する。そしてStep 3で、調整した制動係数を残りのケースで検証する。もし、詳細計算結果との整合性が十分でない場合は、Step 4にて制動係数を微調整する。

〈3・4〉 並列処理手法 前述した高速化手法だけでは、第2章で述べた計算速度の要求を満足することはできない。そこで、マルチCPU構成のコンピュータシステムを用いて更なる高速化を図る。これに適用する並列計算手法を以下に説明する。

(1) 微分方程式の並列処理 図1のStep 1, 2およ

び5~8が微分方程式の求解に対応する。この処理は、発電機ごとに完全に独立して行うことができるので、処理する発電機数をプロセッサ間で等しくすることにより最適な並列処理が可能になる。

(2) 系統方程式($YV=I$)の並列処理 系統方程式($YV=I$)を解くためには、図1のStep 3, 4を処理しなければならない。これに加えて、系統構成に変化が生じた場合は、ノードアドミタンス行列の修正とそのLDU分解が必要になる。

系統方程式の並列処理方法として幾つかのアルゴリズムが提案されているが、以下の理由により文献(10)、(11)のBDBF(Block Diagonal Bordered Form)アルゴリズムを適用する。

(i) 訓練用シミュレータに適用する計算機システムは、密結合型マルチプロセッサ構成であり、プロセッサ間のデータ転送時間は無視できる。

(ii) 訓練対象系統の基本構成が放射状である。このため、系統を分割したときのカットセットブロック(分割された部分系統間を結ぶ連絡ノード群)が小さくなり、直列処理部分の演算量が少なくなる。これにより、並列処理の利得が向上する。

4. 訓練用シミュレータへの適用方法とシステム構成

〈4・1〉 シミュレーションモデル 実系統にそくした訓練を実施するためには、電力系統を構成するすべての要

表 2 シミュレータで模擬される電力系統モデル
Table 2. Power system models.

要素	モデルの分類		
	高速モデル	中速モデル	低速モデル
発 電 プ ラ ン ト	発電機	自動 Var 調整	
	ガバナタービン	自動力率調整	
	AVR		
負 荷	周波数特性	需要の短周期変化	需要の長周期変化
	電圧特性		
	瞬時電圧低下による 負荷脱落		
送 電 線 変 圧 器 回 路	正相回路のπ型等価	母線モデル	
リ レ ー	主/後備保護リレー	過/不足電圧リレー	
	過/不足周波数リレー	過負荷リレー	
	脱調分離リレー		
	電力動揺検出リレー		
ローカル 自動制御		自動再閉路装置	
		変圧器のタップ制御	
		スタコンリアクトル の投入・開放制御	
中央給電 指令所の 自動制御		負荷周波数制御 (LFC)	電力・無効電力 制御(VQC)
			過負荷解消制御

図 6 PSS による制動効果の推定例
Fig. 6. Example of estimated result of damping effect due to a pss.

素を模擬しなければならない。模擬要素には、発電プラント、負荷、送電線、変圧器、保護リレーおよび中央給電指令所や発電所などで行われている自動制御が含まれる。表2は訓練用シミュレータで模擬する要素を示したもので、その応答速度により高速モデル、中速モデル、低速モデルに分類されている。この中で、高速モデルの部分が第3章で述べた高速過渡安定度計算手法により計算される。

〈4・2〉 系統模擬方法 表2に示したすべての要素を1台の計算機システムで模擬することは、計算処理能力から考えて困難である。そこで、2台の計算機システムを適用した負荷分散システムによりシミュレータを実現する。

図7に2台の計算機システムを用いた電力系統のシミュレーションフローを示す。安定度計算用計算機は、訓練管理・系統模擬用計算機から電力系統モデルや事故シーケンスを受け取り、100 ms 刻みで過渡安定度計算を行い、高速モデルの応動を計算する。一方、訓練管理・系統模擬用計算機は、安定度計算用計算機からノード電圧や周波数あるいは高速モデルの応動結果を受け取り、中速モデル(2~30 秒間隔の模擬)および低速モデル(1分あるいはそれ以上の間隔での模擬)の応動を計算する。これら2台の計算機は、共有メモリーを通して2秒間隔でデータを交換

図7 電力系統のシミュレーションフロー
Fig. 7. Simulation flow of power system.

図8 訓練用シミュレータのシステム構成
Fig. 8. System configuration of simulator.

する。

〈4・3〉 システム構成 図8に北陸電力の総合制御所向けに開発した訓練用シミュレータのシステム構成図を示す。シミュレータは、訓練対象となる総合制御所を模擬する総合制御所模擬システムと、電力系統の挙動を模擬する系統模擬システムから構成される。

系統模擬システムは、2台の計算機システムが適用され、図7の流れにより電力系統の挙動を計算する。これらの計算機システムは、マルチプロセッサ構成で、10 MIPSの処理能力をもつプロセッサを最大4台まで実装できる。図7、図8に示した安定度計算用計算機は、4台のプロセッサを、訓練管理・系統模擬用計算機は、2台のプロセッサをそれぞれ実装している。

総合制御所模擬システムは、実際の総合制御所と全く同じハードウェア、ソフトウェアから構成されている。これにより、臨場感の高い訓練が可能になる。

なお、開発したシミュレータはデータベースの切換えにより、4箇所のご総合制御所を模擬することができる。

5. 過渡安定度計算プログラムの検証

第3章で述べた高速過渡安定度計算手法を適用した過渡安定度計算プログラムの検証結果を示す。検証に用いた系統モデルは、訓練対象となる電力系統を模擬したもので、発電機数が約100台、ノード数が約400である。

〈5・1〉 過渡安定度計算結果 三相短絡事故を対象に事故点、事故継続時間および潮流条件を変えて詳細過渡安定度計算を行い、20のテストケースを用意した。そのうちの1ケースを代表ケースとして〈3・3〉節で述べた方法により発電機の制動係数を調整した。図5の流れに従って、各発電機の制動係数をチューニングした結果、3回の調整で望ましいシミュレーション結果が得られた。図9に調整後の制動係数を用いた計算結果と詳細過渡安定度計算結果とを比較する。同図より、動揺周期、減衰の傾向ともほぼ一致していることがわかる。

図9 詳細過渡安定度計算結果との比較
(制動係数の調整に用いたケース)

Fig. 9. Comparison with result of detailed transient stability calculation for a tuning case.

(a) 開発プログラムでの結果

(b) 詳細プログラムでの結果

図 10 詳細過渡安定度計算結果との比較
(検証ケース)

Fig. 10. Comparison with result of detailed transient stability calculation for a verification case.

図 11 周波数変動計算結果

Fig. 11. Frequency deviation calculation result.

次に、制動係数の調整結果を残りの 19 ケースに適用し、その妥当性を検証した。幾つかのケースで制動力の小さな差がみられたが、詳細計算結果との一致度はほぼ満足できるものであった。一例として、安定限界に近いケースの比較結果を図 10 に示す。詳細計算結果と比べると、ダンピングが若干良くなっているが、訓練用シミュレータへの適用に対しては十分な精度であると考えられる。

〈5・2〉 周波数変動計算結果 図 11 に 1,000 MW の電源脱落時のシミュレーション結果を詳細計算結果と比較する。同図からわかるように、周波数の最終状態値は詳細計算結果と一致しているが、最大低下量には多少の差が見られる。これは、ガバナタービンモデルの低次元化の影響であるが、過渡安定度計算結果の場合と同様に、訓練用シミュレータへの適用に対しては十分な精度であるといえる。

〈5・3〉 計算時間 表 3 に訓練用シミュレータの対象としている電力システムの系統規模を示す。表 4 に、表 3 の電力システムに対する過渡安定度計算時間の実測結果を示す。対象計算機は〈4・3〉節で述べたマルチプロセッサ構成の計算機システムである。

表 4 において、ケース 1 は系統事故がない場合の 2 秒間

表 3 対象系統規模
Table 3. Size of power system.

総合制御所	対象系統規模				
	発電機数		負荷の数	ノード数	ブランチ数
	過渡モデル	X_d' モデル			
A	53	24	160	324	449
B	57	22	178	355	498
C	67	15	147	354	445
D	60	41	163	387	528

表 4 計算時間
Table 4. Calculation time.

条件	計算時間(秒)	総合制御所			
		A	B	C	D
ケース 1	詳細計算(X)	94.90	102.31	104.10	130.71
	開発直列(Y)	2.65	2.82	2.97	3.48
	開発並列(Z)	0.97	0.98	1.07	1.10
ケース 2	詳細計算(X)	97.89	110.95	111.96	136.10
	開発直列(Y)	3.79	4.06	4.20	4.60
	開発並列(Z)	1.34	1.40	1.46	1.50

表 5 系統分割結果
Table 5. Result of network partitioning.

総合制御所	各部分系統のノード数				
	1	2	3	4	CN
A	81	79	82	74	8
B	88	85	87	89	6
C	83	93	84	86	8
D	96	98	90	95	8

のシミュレーションに要する計算時間、ケース 2 は送電線に三相短絡事故 (100 ms 後に事故送電線を遮断) を発生させた場合の計算時間である。また、詳細計算 (X) は、四次のルンゲ・クッタ法と詳細モデルを用いたプログラムにより、1 台のプロセッサを用いて、10 ms の積分刻みでシミュレーションしたときの計算時間、開発直列 (Y) は、表 1 中の最初の三つの手法を適用し、1 台のプロセッサを用いて、100 ms の積分刻みでシミュレーションした場合の計算時間、同並列 (Z) は、更に、表 1 の最後の手法を追加し、4 台のプロセッサにより並列処理を実施した場合の計算時間である。

表 5 は、開発並列 (Z) のケースを実測するための系統の分割結果であり、各部分系統のノード数を均等化し、かつカットセットノード数 (表 5 中の CN) が少なくなるように分割した。

表 4 の結果を要約すると以下となる。

(i) 詳細計算 (X) の結果より、詳細モデルを用いて、実現象以上の速度で過渡安定度計算を行うためには、対象

計算機（処理能力は10 MIPS）の50～70倍の処理能力が必要になる。

(ii) 台形積分法の適用と制動係数の調整を含むモデリングの工夫による高速化率(X/Y)は、無事故のケースで35～40倍、事故時のケースで25～30倍である。無事故時と事故時の高速化率の差は、台形積分法1ステップ当たりの収束回数の相違によるものである。すなわち、事故が発生すると、図1中のStep 3～8の繰返し回数が増加し、ルンゲ・クッタ法に対する利得が減少する。

(iii) 並列処理による高速化率(Y/Z)は、無事故時、事故時ともほぼ同じで、2.5～3倍である。4台のプロセッサを使って4倍の高速化率とならない原因は、並列アルゴリズム自体のオーバヘッドと4台のプロセッサを管理するための計算機システムのOS（オペレーティングシステム）のオーバヘッドである。

(iv) 表1に示した四つの手法を適用することにより、2秒間のシミュレーションを1～1.5秒で計算することができる。この結果は、第2章で述べた計算時間の要求をほぼ満足している。

以上、〈5・1〉～〈5・3〉節で示した検証結果より、高速過渡安定度計算手法の訓練用シミュレータへの適用性が確認できた。

6. む す び

本論文では、訓練用シミュレータのための高速過渡安定度計算手法とそれを適用したシミュレータシステムについて報告した。提案した高速計算手法は以下の四つの高速化手法の組合せであり、これにより大規模電力システムのリアルタイム過渡安定度計算が可能になった。

(1) インプリシットな台形積分法をベースとした分割解法の採用。

(2) モデリングの工夫による積分刻み幅の拡大と演算処理量の低減。具体的には、発電機とその制御系モデルの低次元化、簡略負荷特性計算の適用である。

(3) モデルの低次元化により生じる精度低下を防ぐための発電機制動係数の調整。

(4) マルチプロセッサ構成のコンピュータを用いた過渡安定度計算の並列処理。

テスト結果より、本計算手法を適用したプログラムは、計算精度を維持しながら、100発電機、400ノードの電力システムの過渡安定度計算を、実現象の1.5～2倍のスピードで計算できることが確認された。

本計算手法をベースに開発されたシミュレータは北陸電力の研修センタに導入され、初心者から熟練者まで幅広いオペレータの訓練に利用されている。シミュレータの年間スケジュールは、初級者の訓練に3か月、中・上級者の訓練に6か月、シナリオ作成に1か月、ソフトウェアのメンテナンスに2か月が割当てられている。訓練は、3人のトレーナが3人程度のオペレータを対象に行っており、1回の訓練は目的により異なるが、1日から多くて5日程度で

ある。

このほか、本シミュレータは、実系統で発生した事故の再現や系統特性の把握にも用いられている。

最後に、訓練用シミュレータの開発に御援助・御協力していただいた北陸電力(株)と(株)東芝の多くの方々に感謝します。

(平成5年7月15日受付, 同5年12月21日再受付)

文 献

- (1) 久和・吉田・林・小俣・三田村:「並列計算手法を用いたリアルタイム過渡安定度計算ソフトの開発」, 平3電気学会電力・エネルギー部門大会(論文I)-12, p.67
- (2) K. Sato, et al.: "Dynamic Simulation of a Power System Network for Dispatcher Training", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, PAS-101, No. 10 (1982)
- (3) 大浦, 他:「電源系統の事故波及防止システムの方式と構成」, 電学論B, 112, 593 (平4-7)
- (4) G. Zhang & A. Bose: "Scenario for Operator Training Simulator Using a Transient Stability Program", *IEEE Trans. Power Syst.*, 4, No. 4 (1989)
- (5) S. Vadari, et al.: "An Online Implementation of Transient Stability in a Dispatcher Training Simulator", *ibid.*, 6, No. 1 (1991)
- (6) K. Saikawa, et al.: "Real Time Simulation System of Large-scale Power System Dynamics for a Dispatcher Training Simulator", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, PAS-103, No. 12 (1984)
- (7) H. W. Dommel & N. Sato: "Fast Transient Stability Solutions", *ibid.*, PAS-91, No. 4 (1972)
- (8) 横山・岩本:「電力系統の長時間安定度計算における数値解析手法に関する考察」, 電学論B, 110, 465 (平2-6)
- (9) P. Demello & C. Concordia: "Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, PAS-88, No. 4 (1969)
- (10) W. L. Hatcher, et al.: "A Feasibility Study for the Solution of Transient Stability Problems by Multiprocessor Structures", *ibid.*, PAS-96, No. 6 (1977)
- (11) J. Fong & C. Pottle: "Parallel Processing of Power System Analysis Problems via Simple Parallel Microcomputer Structures", *ibid.*, PAS-97, No. 5 (1978)

久 和 進 (正員) 1949年6月22日生。1972年3月京都大学工学部電気工学第2学科卒業。同年4月北陸電力(株)入社。主として、系統運用業務、水力開発計画業務、通信業務などに従事。現在、系統運用部通信課課長。

吉 田 忠 美 (正員) 1958年11月24日生。1983年3月慶応義塾大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年4月北陸電力(株)入社。主として、電力系統運用に関する業務に従事。

小 俣 和 也 (正員) 1955年6月19日生。1978年3月早稲田大学理工学部電気工学科卒業。1980年3月同大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年4月(株)東芝入社。以来、重電技術研究所にて電力系統の解析手法、信頼度制御などの研究に従事。

三田村 謙 一 (正員) 1960年6月10日生。1983年3月広島大学工学部第二類卒業。1985年3月同大学大学院システム工学研究科修士課程修了。同年4月(株)東芝入社。以来、府中工場にて、主として電力系統の監視・制御システムの開発に従事。

湯 朝 真 司 (正員) 1956年1月13日生。1974年3月日田林工高等学校電気科卒業。同年4月(株)東芝入社。以来、電力系統の監視制御システムに関する業務に従事。