

# オンラインシミュレーション形過渡安定度維持システム

## Transient Stability Control System Based on On-Line Simulation

須藤 義也  
Y. Sudo

福島 宣夫  
N. Fukushima

小俣 和也  
K. Omata

浅野 俊明  
T. Asano

電力系統の規模の拡大とともに、電源の容量増大、送電線の長距離化などが進み、系統の安定度特性が厳しくなってきている。このような送電線で重大な系統事故が発生すると、発電機群が一群となって脱調し、ひいては広域停電への進展が懸念される。こうした事故波及を防ぐため、従来は系統固定形の過渡安定度維持対策が行われてきた。しかし、系統構成や系統運用のいっそうの複雑化に対処するため、新たなシステムが期待されていた。東芝は詳細安定度計算をオンラインで実行し、この結果から直接安定度維持に必要な制御を計算・実行する、新しいタイプの過渡安定度維持システムの開発に世界で初めて成功した。

ここでは、中部電力(株)の基幹系統に適用した TSC (Transient Stability Controller) システムの各種演算アルゴリズムと、システムの特長について紹介する。

The difficulty of siting power plants makes their system stability characteristics worse. If a serious fault occurs, there is a possibility that the fault could expand so that a group of generators become out of step, causing a large-scale power system collapse. The conventional transient stability control countermeasures have not been able to satisfy the needs associated with the growing complexity of power system configurations and system operations, and demand has therefore arisen for a new system designed to meet such needs.

Toshiba has successfully developed a new type of system called a transient stability controller (TSC) for the first time in the world. The TSC system performs detailed stability calculations on-line, calculates the control parameters from them as required in order to directly maintain stability, and executes the results.

This paper discusses the various processing algorithms of a TSC system that was applied to Chubu Electric Power Co., Inc.

### 1 まえがき

電力系統の規模の拡大とともに、電源の容量増大・遠隔地化・偏在化、およびこれに伴う送電線の長距離化・重潮流化が進み、系統の安定度特性が厳しくなってきている。このような送電線で重大な系統事故が発生すると、発電機群が一群となって脱調し、大規模電源脱落や広域停電への進展が懸念される。このような事故波及を防ぐため、従来から系統固定形の過渡安定度維持対策が行われてきた。しかし、系統構成や系統運用のいっそうの複雑化に対処するため、新たなシステムが期待されていた。東芝と中部電力(株)は共同で、系統のリアルタイム情報を用いて、多数の想定故障に対する詳細過渡安定度計算を行い、この結果から直接安定度維持に必要な制御を計算・実行するオンラインシミュレーション形過渡安定度維持システムの開発に、世界で初めて成功した。

従来、このようなシステムが実用化されなかつた理由の一つは、系統の状態変化に追随できるほどの速さで詳細過渡安定度計算を実行できる高速計算機が手に入らなかつたからである。今回開発した TSC システムでは、この問題を最近の高

速計算機の適用、演算順序の最適化を考慮した並列演算、演算論理の高速化などにより解決している。

ここでは、TSC システムの概要、計算方法などについて述べる。

### 2 システム構成

発電機の脱調現象は、故障発生後 1 s 以内の速いものから振動しながら 10 s 以降に脱調するものまで多様にあり、速い脱調現象に対応するためには、高速で（故障発生後 200 ms 程度）発電機遮断を行う必要がある。このため、TSC システムでは、装置を事前演算部と事後制御部に分け、詳細安定度計算で高精度な制御条件を算出しながら、高速な発電機遮断を実現している。

図 1 にシステム構成を示す。TSC システムは、事前演算を担当する中央演算装置 (TSC-P) と事後制御を担当する故障検出装置 (TSC-C), 発電機遮断装置 (TSC-T) から構成される。

それぞれの装置の概要を次に述べる。

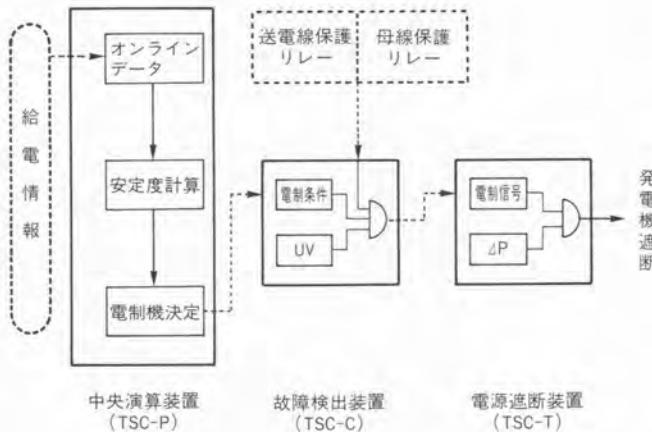


図1. TSCシステムの基本構成 事前演算系に相当するTSC-P、事後制御系に相当するTSC-C、TSC-Tから構成される。

Configuration of TSC system



図2. TSC-Pの外観 主計算機は最新型制御用計算機 VL2060である。

External view of TSC-P

## 2.1 TSC-P

系統のオンライン情報を基に、詳細安定度計算をベースに各想定故障に対する発電機遮断条件を5分周期で求め、結果をTSC-Cに送出するもので、基幹給電制御所に設置される。主計算機は、図2に示す東芝の最新型制御用計算機VL2060である。

## 2.2 TSC-C

線路保護・母線保護リレーの動作情報などから実際に発生した故障の故障地点・故障様相を、アンダーヴォルテージリレー(UV)の動作をフェールセーフ条件に検出し、TSC-Pの演算結果に基づき発電機遮断信号をTSC-Cに送出するもので、基幹系統の主要変電所に設置される。

## 2.3 TSC-T

TSC-Cからの発電機遮断信号を受信し、フェールセーフのため、電力変化リレー( $\Delta P$ )の動作を条件に発電機を解列するもので、遮断対象となる各大規模発電所に設置される。

## 3 演算アルゴリズム

TSC-Pでは、多数の想定故障の安定度判定と不安定ケースに対する遮断発電機の選択を、5分周期で行う必要がある。現在入手できる計算機システムでこの要求を実現するためには、高速で効率的な演算アルゴリズムの適用が不可欠である。図3にTSC-Pの演算処理の流れを示す。

各ブロックの機能は次のとおりである。

- (1) 状態決定 オンライン計測値を入力データとし、重み付き最小二乗法による状態推定計算を用いて初期系統状態を決定する。
- (2) 系統縮約 短絡容量法により、154 kV系統を縮約し、計算精度を維持しながら計算時間の短縮を図る。
- (3) スクリーニング 簡略計算により想定故障の安定度を仮判定する。ここで安定と判定された想定故障は詳細安定度計算が省略される。
- (4) 詳細安定度計算 スクリーニングで不安定と判定されたケースについて詳細安定度計算を行う。
- (5) 安定度判定 詳細安定度計算から得られた各発電機の内部位相角を用いて、脱調発電機の有無を判定する。
- (6) 電制(電源制限)機選択 不安定ケースに対して、電制効果と運用上の諸制約を考慮し、適切な電制発電機を選択する。

以下、安定化演算の高速化、効率化のために適用したスクリーニング手法と遮断発電機の選択手法について詳細を紹介する。

### 3.1 スクリーニング手法

スクリーニングは、数多くの想定故障の中から不安定ケースを漏らすことなく、安定度の厳しいケースを高速に選別する手法である。具体的にはすべての想定故障に対して、次の

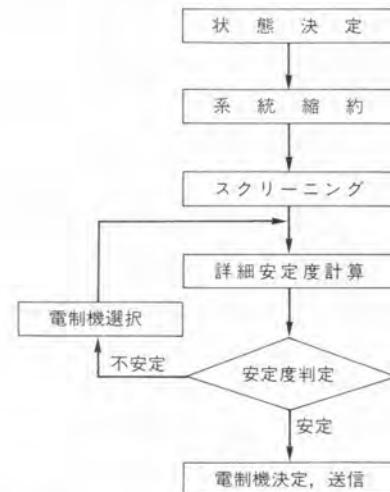


図3. TSC-Pの演算処理の流れ 各ブロックの機能は状態決定、系統縮約、スクリーニング、詳細安定度計算、安定度判定、電制機選択である。

Processing flow of TSC-P

処理を行う。

- (1) 想定故障を設定し、スクリーニング指標値を計算。
  - (2) しきい値と比較し、しきい値より大きい場合は詳細安定度計算ケースとして登録。小さい場合は安定と判定。
- TSC システムが対象とする想定故障の故障継続時間は 3 サイクル (50 ms) と短いため、対象系統の安定度は、故障中の発電機加速力よりも故障除去後の系統構成変化に伴う発電機減速力の低下の影響を強く受ける。そこで、式(1)に示すよう、故障除去後の発電機間の減速力のアンバランス量を表す新しい安定度指標  $DP$  (Deceleration Power) を定義し、これをスクリーニング指標として用いた。

$$DP = \sum_{i=1}^N \{ M_i \cdot |Pd_i| / (\sum_{i=1}^N M_i) \} \quad (1)$$

ただし、 $Pd_i$  は慣性中心軸を基準とした各発電機の減速力であり、次式より計算する。

$$Pd_i = (Pc_i - Po_i) / M_i - \sum_{i=1}^N (Pc_i - Po_i) / (\sum_{i=1}^N M_i) \quad (2)$$

ここで、 $N$ ：発電機台数、 $M_i$ ：発電機の慣性定数、 $Po_i$ ：各発電機の故障発生前の出力、 $Pc_i$ ：各発電機の故障除去瞬時の出力。

$DP$  を計算するためには、故障除去瞬時の発電機出力である  $Pc_i$  が必要になるが、数秒～10 秒間のシミュレーションを必要とする詳細安定度計算に比べると、その計算量は数十分の 1 以下となる。

### 3.2 遮断発電機の選択手法

TSC システムでは、数台から十数台の発電機が脱調する不安定モードを対象としており、安定化のためには 1 台から数台の発電機遮断が必要になる。十数台の脱調発電機の中から数台の遮断発電機を選択する場合を考えると、その組合せは 100 通り以上となり、その最適解を一度に決定することは難しい。このため、TSC システムでは、詳細安定度計算の繰返しにより遮断発電機を選択する方法を採用した。この方法では、 $n$  台目の遮断発電機は  $(n-1)$  台の発電機を遮断したときの詳細安定度計算結果をベースに選択される。

図 4 に遮断発電機の選択処理を示す。まず (ステップ 1) で詳細安定度計算を行う。次に (ステップ 2) で、(ステップ 1) の結果を用いて、各発電機の基準発電機との相対位相角を計算し、あらかじめ設定したしきい値以上になったものを脱調発電機として抽出する。脱調発電機がある場合は、(ステップ 3) でその遮断効果指標  $AE_i$  を式(3)から計算する。ここで、 $AE_i$  は各発電機に蓄積された脱調時の加速エネルギーであり、その値が大きい発電機ほど遮断効果が高い。

$$AE_i = M_i (\omega_i - \omega_s)^2 / 2 \quad (3)$$

ここで、 $\omega_i$ ：各発電機の角速度、 $\omega_s$ ：基準発電機の角速度、 $M_i$ ：慣性定数。

(ステップ 4) では、(ステップ 3) で計算した遮断効果指標

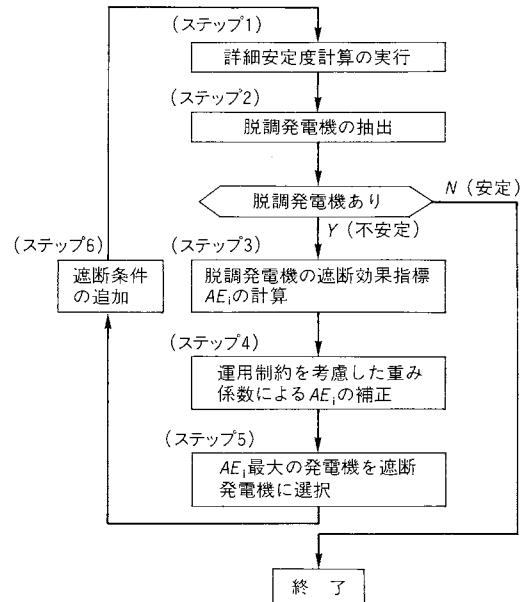


図 4. 遮断発電機の選択処理 脱調発電機群から遮断効果の高い発電機を効率的に選択できる。

Selection flow of generators to be shed

$AE_i$  に運用制約条件を考慮した発電機固有の重み係数を掛け、 $AE_i$  を補正する。例えば、遮断後の再起動が短時間に行える FCB (Fast Cut Back) 発電機の重み係数を 1.1 にするなどである。そして (ステップ 5) で、 $AE_i$  最大の発電機を遮断発電機として選択し、最後に (ステップ 6) で、次の詳細安定度計算のために、選択された発電機の遮断がシミュレーション条件に追加される。

図 4 の処理の流れにより、運用制約条件を考慮しながら、必要電制台数プラス 1 回の詳細安定度計算の実行により、遮断効果の高い発電機を効率的に選択することができる。

## 4 システムの特長

### 4.1 並列演算による高速化

5 分周期の演算を実現するため、次の並列演算型システムを適用する。

- (1) システム構成 管理用 CPU の制御下に  $n$  個の演算 CPU を配置し、TSC-P の演算処理の中でもっとも時間がかかるスクリーニング、詳細安定度計算、遮断発電機選択を並列処理する。
- (2) 並列演算処理方法 計算全体のスループットを向上するため、演算 CPU に計算処理を適正に割り付ける。スクリーニングは、故障ケースによる差が少ないので、演算 CPU に計算ケース数を均等に割り付ける。詳細安定度計算、不安定なケースほど遮断発電機を決定するための演算量が多くなるので、異なる故障地点、故障様相間で優先処理を行ったうえ、演算 CPU の待ち時間が少なくなる。

るよう割り付ける。

#### 4.2 演算 CPU 演算余力の有効活用

TSC システムでは、系統が安定度上厳しい状態で 5 分周期の演算能力があるため、常時は演算 CPU に演算余力がある。そこで次のように有効活用している。

- (1) 安定度余裕量 すべての故障ケースが、スクリーニングで安定な場合、代表ケースについて発電機遮断なしで安定度が維持できる限度の線路潮流、すなわち安定度余裕量を計算する。計算された安定度余裕量は、運用者に常時表示される。
- (2) スクリーニングしきい値の自動調整 系統状態が変化すると、スクリーニングの安定度判別用しきい値の最適値も変化するため、しきい値を自動調整し、整定値業務から運用者を解放する。
  - (a) しきい値の初期設定 系統切換え時や、システム立ち上げ時などしきい値の最適値が不確定の場合、すべての想定故障に対して詳細安定度計算を行い、新しいしきい値を設定する。
  - (b) しきい値の補正 各想定故障に対して、定期的に詳細安定度計算を実行し、その安定度判定結果と DP 値の関係を用いてしきい値を自動的に補正する。

#### 4.3 潮流補正制御

TSC システムは、演算インターバル中の状態変化を吸収するために、ある程度のマージンをもって遮断発電機を選択している。しかし、昼休みなど短時間に大きな状態変化があると不足遮断となる可能性があるので、遮断発電機を 1 台追加し、遮断不足を回避する潮流補正制御機能を付加した。

#### 4.4 システム試験機能

システム導入時や設備新增設時には対向試験、状態決定機

能試験、計算機能試験が必須(す)となるが、TSC システムでは、個別に動作させ試験を行う単独試験機能と、実際の運用と同様に連続動作させながら試験を行う総合試験機能を付加した。

図 5 に試験実行管理の画面の例を示す。

## 5 あとがき

詳細安定度計算をオンラインで実行する TSC システムの実用化では、計算の高速化が最大の問題であり、これをスクリーニングや発電機遮断選択の演算論理と、並列演算順序の最適化の組合せにより解決し、一連の演算を 5 分周期で行うという要求仕様を満たすことができた。TSC システムは、1995 年 6 月に運用を開始し、運用者には安定度余裕量が常時見ることができるようになるなど、好評である。

今回の TSC システムの開発は世界初のオンラインシミュレーション形の過渡安定度維持システムであり、国内だけでなく海外でも高い評価と大きな反響を呼んでいる。TSC システムは基幹系統への適用はもちろん、適用する系統の特性や、運用条件に左右されない。この考えを電源系統に適用したシステムを現在製作中であり、今後とも TSC システムの適用拡大と技術開発を進めていく所存である。

## 文 献

- (1) 太田宏次、他：オンライン安定度計算による脱調未然防止システム（TSC）の開発、電気学会論文誌 B, 115, 1, pp.75-84 (1995)

須藤 義也 Yoshiya Sudo

1978 年中部電力㈱入社。主に電力系統安定化および系統計画業務に従事。現在、系統運用部主幹。  
Chubu Electric Power Co., Inc.

福島 宣夫 Nobuo Fukushima

1967 年入社。国内外の系統制御システムの技術調査開発に従事。現在、電力事業部電力系統技術部主幹。  
Power Systems Div.

小俣 和也 Kazuya Omata

1980 年入社。電力系統の解析手法、信頼度制御などの研究に従事。現在、重電技術研究所システム技術開発部主査。  
Heavy Apparatus Engineering Lab.

浅野 俊明 Toshiaki Asano

1982 年入社。電力系統計算機システムの開発設計に従事。現在、府中工場電力計算機システム部主査。  
Fuchu Works

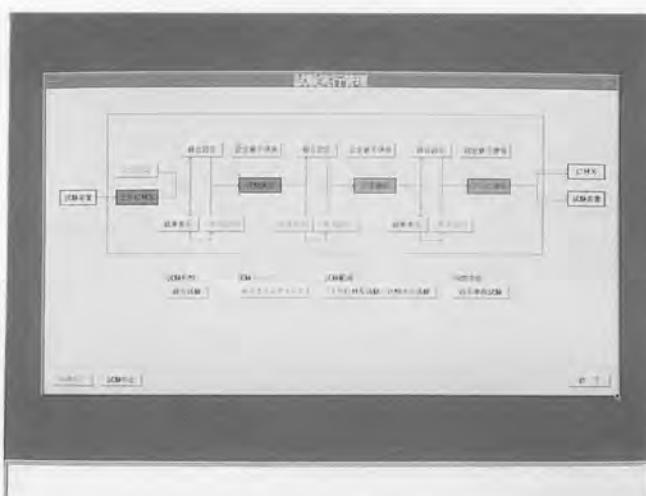


図 5. 試験実行管理の画面の例 試験の実行状況を表示する。

Example of MMI (management of executing test)