

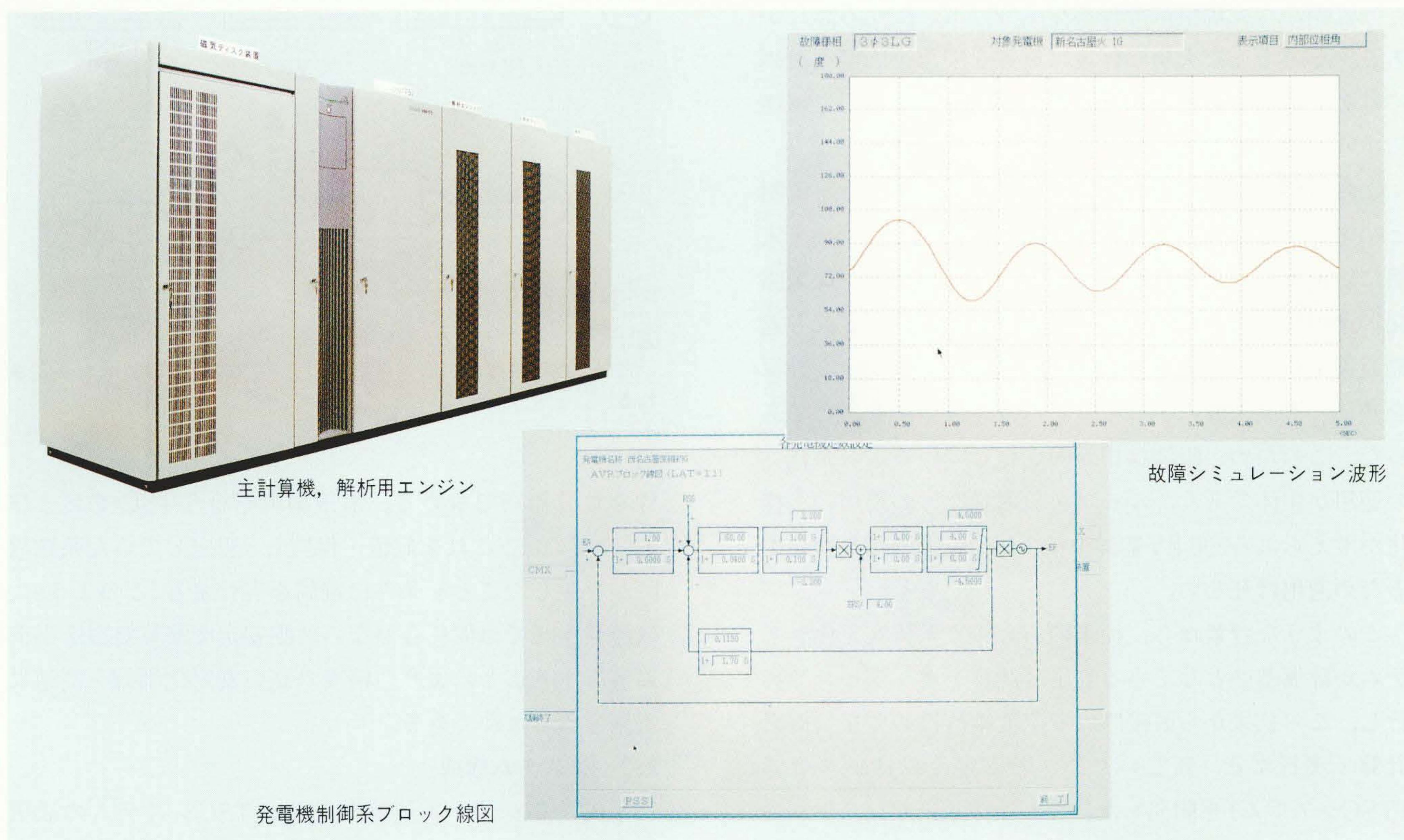
世界初のオンライン安定度計算を適用した 電力系統安定度維持システム

Power Network Transient Stability Control System Based on Online Stability Calculation

須藤義也* Yoshinari Sudô

小海 裕** Yutaka Kokai

福井千尋*** Chihiro Fukui



基幹系安定度維持システムの親局装置“TSC-P”

このシステムでは、500 kV基幹送電線の故障が想定でき、オンライン情報に基づく安定度計算が可能で、適切な電源制限機を選択することができる。

電源の偏在化、大容量化などによって電力系統の安定度特性が厳しくなっていることから、落雷などで故障が発生すると、保護リレー装置で故障を早期に除去しても発電機脱調から大規模電源脱落・広域停電へと広がる恐れがある。この対策として、電力系統の情報をオンラインで取り込み、系統故障発生時に一部の電源を高速に遮断(電源制限)し、脱調を未然に防止する電力系統安定化システムの開発が要求されてきた。

今回、電力系統からのオンライン情報を基に9台

のRISC(縮小命令セットコンピュータ)タイプの高速計算サーバを用いて、系統故障発生時の系統の過渡的な動きを並列にシミュレーションし、適切な遮断発電機を決定する、世界初のオンライン安定度計算を適用した電力系統安定度維持システム(TSCシステム: Transient Stability Control System)を開発した。このシステムは、中部電力株式会社の500 kV基幹送電系統を対象とし、任意の系統形態に対して極小の電源制限で確実に脱調を未然防止することができる特長を持つ。

* 中部電力株式会社 系統運用部

** 日立製作所 大みか工場 工学博士

*** 日立製作所 日立研究所

1 はじめに

近年、中部電力株式会社をはじめとする国内電力会社では、電力系統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・重潮流化が進む傾向にある。これらは系統の安定度特性を厳しくする方向に作用するため、系統故障時に発電機脱調から大規模電源脱落や広域停電に広がる恐れがある。そのような大規模停電に至る要因を排除するためには潮流制約が必要となり、結果として経済運用を犠牲にする問題が生じる。

この問題を解決する方策として、電源制限(以下、電制と略す。)などによって発電機の加速を抑制し、脱調を未然に防止することを目的とする系統安定化装置が従来開発・適用されてきた。しかし、従来の装置はいずれも過酷運用系統での故障を想定したオフラインの安定度計算を基に、潮流条件によって電制台数を設定するものであった。このため、脱調様相が固定化している電源系統への適用が主体であり、ループ・放射状などの運用の多様化が考えられる500 kV基幹系統では、脱調様相も変化するため適用は難しい。

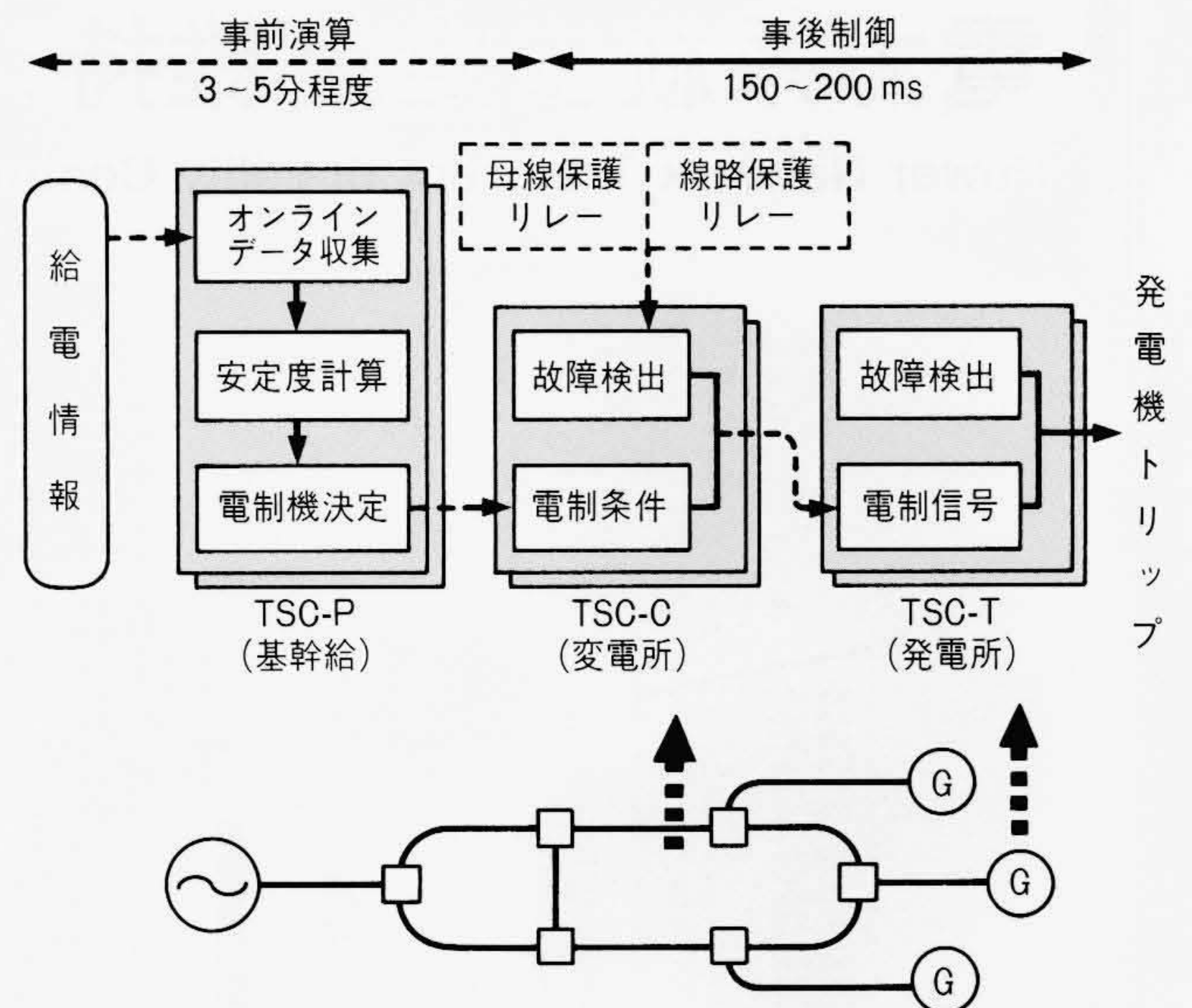
このような背景から、従来のあらゆる系統安定化システムが評価基準としている安定度計算をオンラインで実行し、この結果から直接的に安定度維持に必要な制御を計算・実行する、新しいタイプの安定度維持システム(TSCシステム)を開発した。ここでは、TSCシステムの概要、アルゴリズム、実用化システムの特徴、およびフィールド検証結果について述べる。

2 安定度維持システムの概要

2.1 系統安定化原理

系統故障時の発電機脱調現象は、故障発生→故障除去→発電機脱調まで、経験的に1秒以内と短時間のものから10秒程度に至るものまで多様である。短時間の脱調現象にも適用するためには、故障発生から100～200 ms程度で電制を実施する必要がある。しかし現状の計算機技術では、この時間内で詳細な安定度計算を行い、その結果に基づいて安定化制御を実施することは不可能である。

TSCシステムでは、この問題を事前演算と事後制御に分割して解決する。TSCシステムはTSC-P(Parent)、TSC-C(Children)およびTSC-T(Transfer Terminal)の3種類の装置で構成している(図1参照)。事前演算を行うTSC-Pでは、故障発生前に想定故障に対する電制条



注：略語説明 G (Generator)

図1 TSCシステムの基本構成

TSC-P親局装置での安定度計算により、適切な電制機が決定される。

件を数分周期で求める。事後制御を行うTSC-CおよびTSC-Tでは、これを記憶・保持し、想定していた系統故障が発生したことを条件に電制を実行する。このように、故障発生後では間に合わない詳細安定度演算処理を事前実施することにより、精度の高い安定化制御を高速に実施することができる。

2.2 システム構成

平成7年システム運転開始時のTSCシステムの設置状況を図2に示す。TSCシステムを構成する各装置の機能について以下に述べる。

(1) 中央演算装置(TSC-P)

主要系統の遮断器、断路器の開閉状態および送電線、変圧器、発電機の有効・無効電力値、母線の電圧値をオンライン入力情報として、あらかじめ設定した想定故障様相ごとの安定度計算を実行する。安定度計算結果が不安定、すなわち発電機が脱調する場合、安定度を維持するために必要な電制発電機を決定し、電制条件を付してTSC-Cに伝送する。オンライン系統に追従した安定度計算を実施するため、RISCタイプの高速制御用計算機を使用する。またこの装置は、基幹給電制御所と同じビルに設置し、基幹給電制御所の運転員への安定度情報支援も行う。

(2) 故障検出装置(TSC-C)

線路保護・母線保護リレーの動作情報などを入力して、発生した故障地点・故障様相を判定する。TSC-Pの

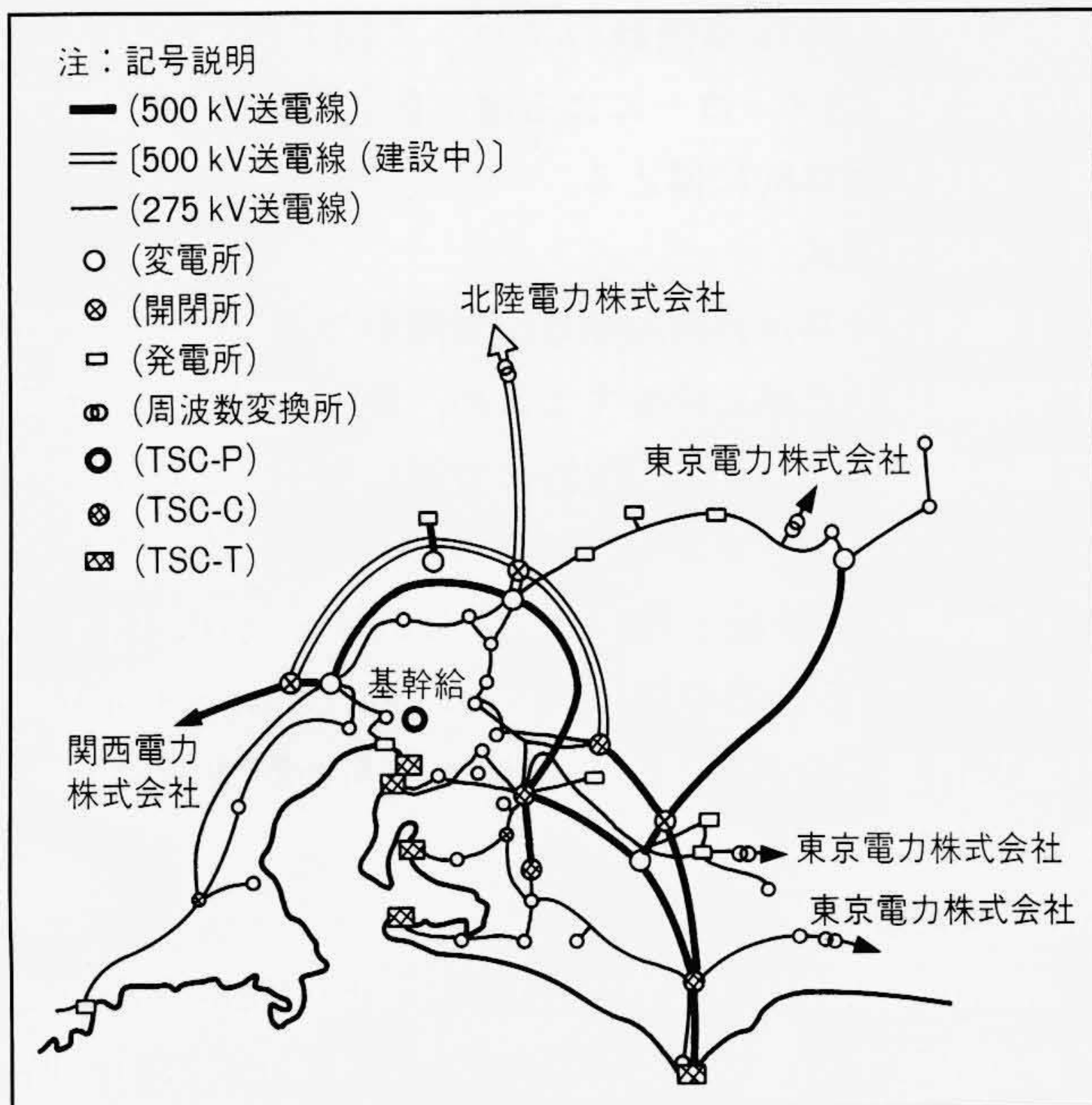


図2 TSCシステム装置設置状況(平成7年)
500 kV第二外輪線建設に合わせてTSCシステムの各装置が設置されている。

想定故障に該当する電制条件に基づき、フェイルセーフリレー(電圧低下リレー、地絡過電流リレー)動作を条件に電制信号をTSC-Tに送出する。この装置は故障検出が可能な個所、すなわち基幹系統変電所に設置する。

(3) 電源遮断装置(TSC-T)

TSC-Cからの電制信号を受信し、フェイルセーフリレー(電力変化幅リレー)動作を条件に発電機を解列する。この装置は電制対象となる大規模発電機に設置する。

2.3 システム諸元

TSCシステムの諸元を表1に示す。対象系統規模および装置数は、将来の基幹系統全個所の故障に適應できる規模としている。想定故障件数はループ・放射状の系統切換で変化する。また系統自体の安定度の厳しさも変化するため、TSC-PのCPU(Central Processing Unit)負荷は一定していない。このため演算周期は可変とし、通常の状態変化で問題のない5分程度を目標としている。

3 アルゴリズム

TSC-Pでは、図3に示すプロセスに従い、約5分周期に安定度を維持するために必要な電制発電機を決定する。各プロセスの概要について以下に述べる。

3.1 系統モデル作成

系統のオンライン情報、および電力系統設備データベースから、現在の系統状態を計算機上に生成する。遮断

表1 TSCシステムの諸元

対象系統規模や装置数は、将来の基幹系統全個所の故障に適應できる規模としている。

		システム仕様	平成7年運転開始時
系統規模	発電機	最大110機 (縮約後80機)	約50機 (縮約後約40機)
	系統	500, 275 kV全系 一部15.4 kV系統	約100電気所
装置数	TSC-P	1	1
	TSC-C	最大20	4
	TSC-T	最大100	17
想定故障件数		最大100件 (線路、母線、 変圧器合計)	線路：28件 母線：28件 変圧器：6件
TSC-P演算周期		5分程度(可変)	3分程度
制御仕上がり時間		約150 ms	同左

器や断路器の接続状態に合わせて系統モデルを作成するため、発電機や線路の停止や母線分割運用など任意の系統形態を表現することができる。

3.2 状態推定

作成した系統モデルに対して、有効・無効電力、電圧、変圧器タップ位置のオンライン情報を与え、現在の潮流状態を決定する。これらオンライン情報には観測誤差が含まれているため、重みつき最小二乗法状態推定計算により、誤差を最小化する系統状態を推定する。

3.3 系統縮約

計算時間を短縮するため、短絡容量法と呼ばれる縮約

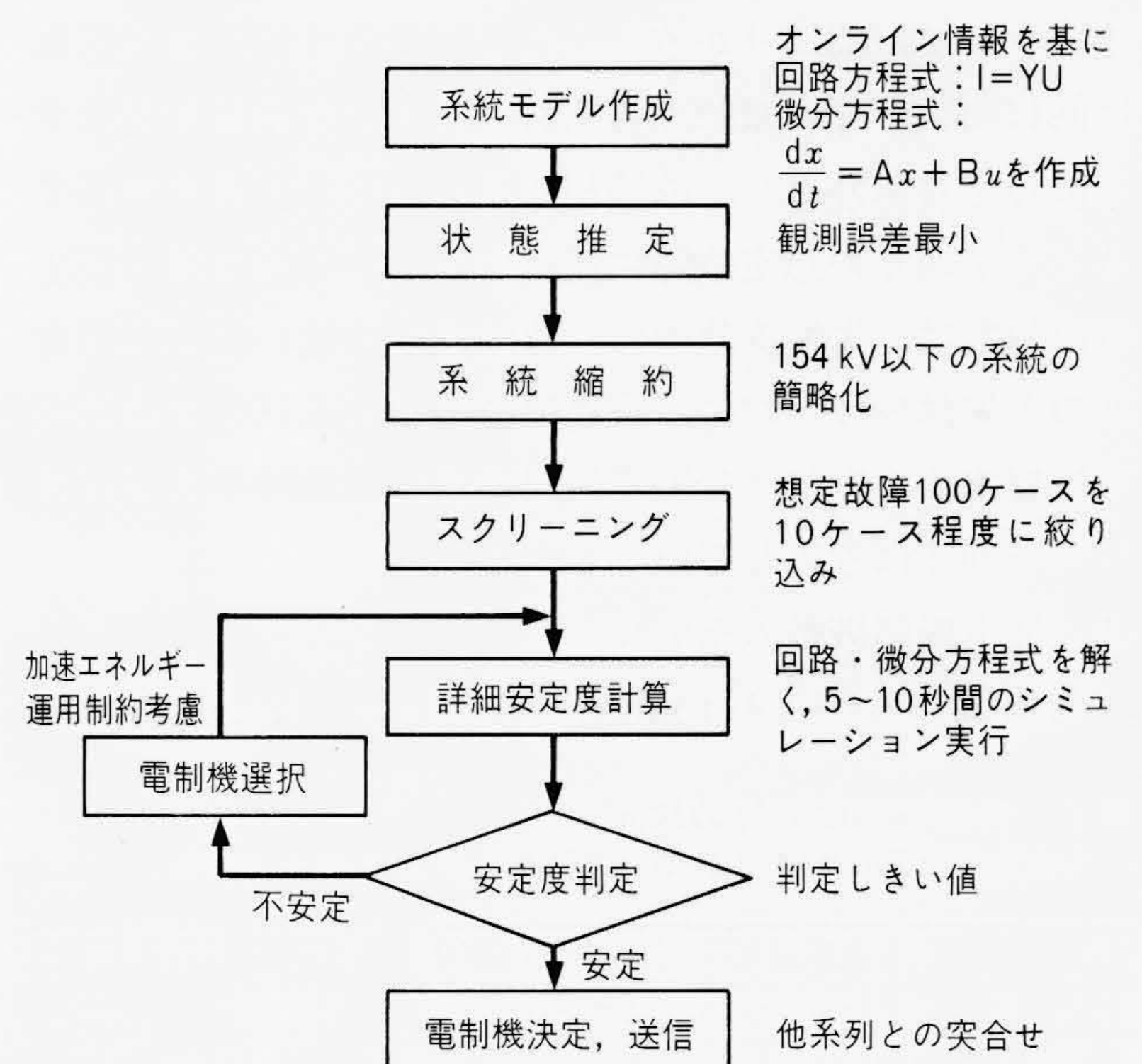


図3 TSC-Pの演算フロー

TSC-P親局装置で周期的に演算が実行され、電制機が決定される。

方法により、基幹系統の安定度にあまり影響を与えない154 kV火力系統などを、系統ごとに等価な簡略系統に縮約する。

3.4 スクリーニング

多数の想定故障に対して、電制が必要な故障は通常限られている。そこで、スクリーニングと呼ぶ簡略計算を行い、明らかに安定な想定故障では詳細安定度計算を省略することで演算時間の短縮を図っている。詳細安定度計算と比べて計算精度は若干落ちるが、高速にシミュレーション計算が実行できる簡略安定度計算方式をスクリーニングとして採用している。この方式では、スクリーニング指標値は簡易安定度計算から得られた発電機内部位相角の第一波ピーク値としている。積分法として台形積分法を用い、発電機ガバナを省略したり、シミュレーション時間を1秒と短くするなどの計算簡略化により、詳細安定度計算を行う場合に比べて約30倍高速である。

3.5 詳細安定度計算

スクリーニングで不安定と判定された想定故障について詳細安定度計算を行う。詳細安定度計算では、系統故障時に脱調するかどうかを正確に判定するため、系統を詳細に模擬したシミュレーションを行う。詳細安定度計算の諸元を表2に示す。その概要について以下に述べる。

(1) 故障シーケンス

送電線、母線、変圧器の想定故障に合わせて、実系統で動作する主保護リレーの応動を模擬する。送電線故障では、平行2回線六相についてすべての故障の組合せを考慮すれば、63通りが考えられる。このうち、通常安定度的に問題がない故障や再閉路方式上分離系統が発生する故障を対象外とし、故障相の違いによる差異を無視すると、7通りの想定故障に集約できる。母線故障・変圧器故障では、送電線故障ほど故障様相の違いによる安定度の差異は少ないため、最過酷故障である三相地絡故障で模擬する。なお、TSCでは異地点同時故障や後備保護リレー動作は考慮していない。

(2) 発電機制御系のモデル

発電機のAVR(Automatic Voltage Regulator)、

表2 詳細安定度計算の諸元

系統設備計画に利用されている詳細な計算モデルである。

系	統	アドミッタンス行列、正相・零相 π 形等価回路
発	電	Parkモデル、飽和特性付き
励	磁	PSS付き詳細モデル(AVR：8種類、PSS：3種類)
調	速	水力、火力・原子力代表モデル(3種類)
負	荷	定Z、定電流、定電力特性(切換式)

注：略語説明 PSS(Power System Stabilizer)

PSS、ガバナは伝達関数のブロック図で表現される。AVRは発電機メーカーによる違いを考慮し、8種類のブロック図を標準的に備える。

(3) 回路方程式

1線地絡や高速再閉路無電圧時間中の1線欠相などの不平衡故障を正確に模擬するため、故障様相に合わせて正相・逆相・零相の等価回路に分解して計算を行う。

(4) シミュレーション計算

10 ms刻みに系統と発電機の積分計算を交互に行う。したがって、5秒間のシミュレーションでは、500回の繰り返し計算となる。積分法は精度の高い四次のRunge-Kutta法を採用している。

3.6 安定度判定

詳細安定度計算の結果により、発電機が脱調するかどうかを判定する。安定度判定には、シミュレーション時間内に発電機内部位相角が脱調状態になったことを検出する過渡脱調判定と、脱調状態には至らないが、動揺振動が発散傾向にあっていずれは脱調に至ると考えられる状態を検出する3波判定を備えている。

3.7 電制機選択

安定度判定で不安定と判定された場合、詳細安定度計算で得られた動揺波形に基づいて電制機を選択する。電制効果を確認するため再度安定度計算を実行し、安定になるまで繰り返す。電制機の実行は以下の手順で行う。

(1) 電制候補機の抽出

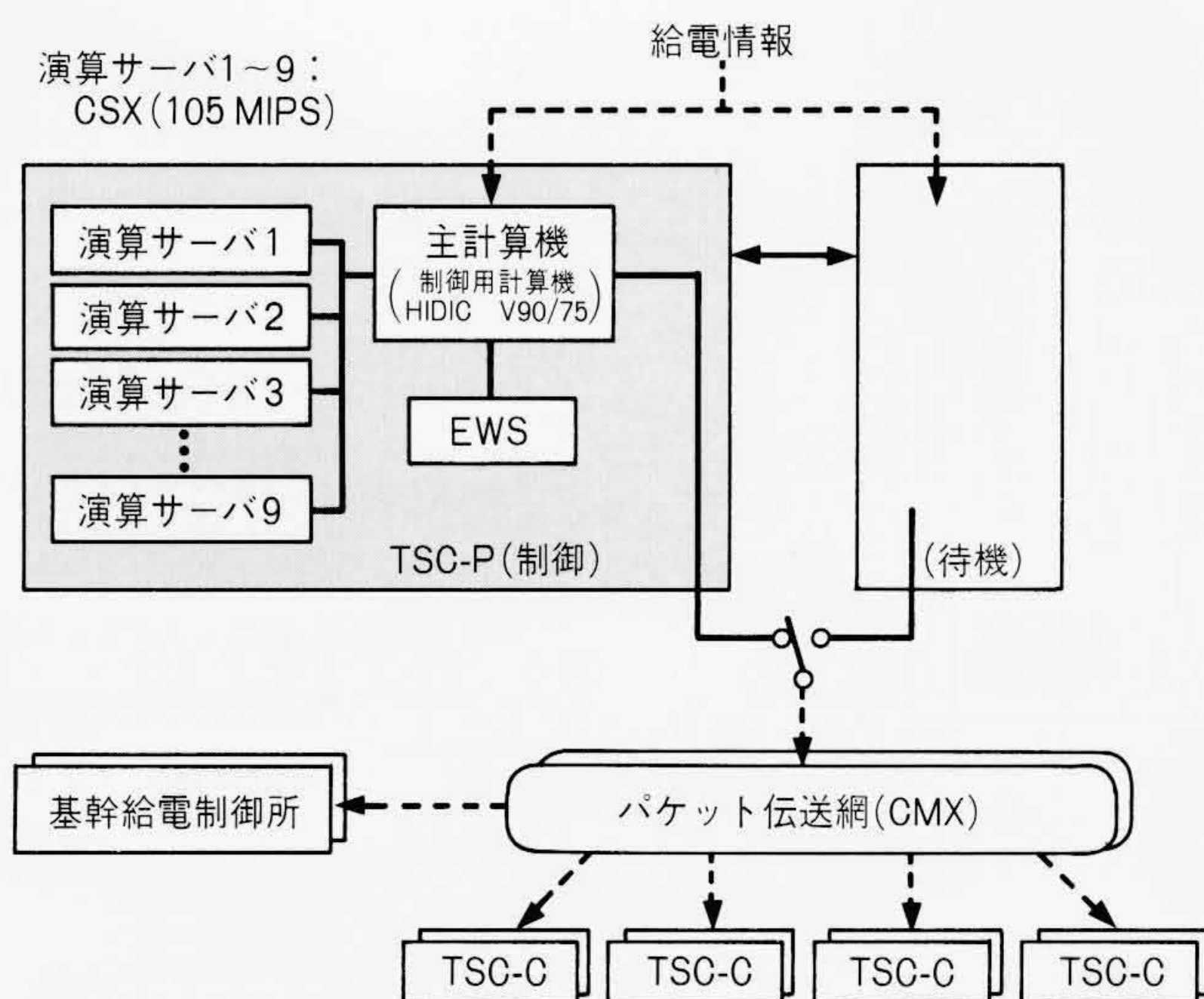
脱調現象には、ある特定の発電機群の脱調が他の発電機群に波及し、全体として脱調に至ることがある。脱調の引き金となった発電機群の内部位相角は、他の発電機群よりも先行して増加していくことから、脱調発電機抽出時間を導入してこれらを抽出する方法を採用した。

(2) 電制効果指標AE(Acceleration Energy)の算出

抽出された電制候補機の中から、電制量や電制台数を少なくするような電制機を選ぶためには、各候補機の安定化効果を定量的に表現する必要がある。そこで、脱調開始時の各発電機の加速エネルギーを効果指標として適用した。

(3) 運用条件を考慮した電制機選択処理

実際の系統運用では、電制後の復旧なども考慮して電制機を選択すべきである。運用条件を考慮した優先係数を加速エネルギーに掛けて、補正した総合電制効果指標を算出する。さらに、2台以上の電制時は同一BTG(Boiler Turbine Generator)の発電機を同時に電制しないなどの条件を加えている。



注：略語説明

MIPS (Million Instructions per Second)

EWS (Engineering Workstation)

図4 実用化システム(TSC-P)の構成

9台の演算サーバを用いた並列計算システムである。

4 実用化システムの特徴

4.1 2系列構成による高信頼化

今回開発したTSC-Pの構成を図4に示す。TSC-Pは二重系で構成し、常時は制御・待機で運転し、各系で求められた電制機は、系列間交信機能を介して相互に比較・決定され、その結果を子局装置へ伝送する。

4.2 並列演算による高速化

スクリーニングなどの計算高速化手法を適用しても、数十ケースの詳細安定度計算を行う必要があり、演算サーバ単体で演算周期5分を実現することはできない。そこでTSC-Pを図4に示すように、主計算機HIDIC V90/75の制御下に9台のRISCタイプの演算サーバCSX(1台105 MIPS)を備えた並列演算型システムで構成し、演算サーバでは、スクリーニング・詳細安定度計算・電制機選択を並列処理する。さらに、演算サーバに計算処理を適正に割り付け、演算待ち時間を少なくするため、以下の処理を行っている。

(1) 異なる故障地点間の優先処理

安定度が厳しい故障ケースほど電制機選択の繰り返し計算回数が多くなり、これが全体の計算時間を支配する可能性がある。このため、スクリーニング結果を用い、安定度的に厳しい故障ケースから順に計算を開始することにより、計算全体のスループット時間を短縮する。

(2) 異なる故障様相間の優先処理

同一地点の2回線にわたる故障様相の場合、安定度の厳しさは三相4線地絡、二相3線地絡、一相2線地絡の順になる。この関係から、安定度的に厳しい上位故障、例えば三相4線地絡を下位故障の二相3線地絡よりも先に演算を開始し、上位故障が安定の場合は下位故障の計算を省略することで演算ケース数を削減する。

4.3 演算余力の有効活用

TSC-Pでは系統が安定度的に厳しい状態で、演算時間5分を満足できるだけの演算能力を持っている。したがって、系統安定時は演算余力があり、運転員への支援情報を作り出している。

一部の安定度的に常時過酷な系統を除き、すべての想定故障に対してスクリーニングが安定な場合、代表的な想定故障について安定度余裕量を計算する。安定度余裕量は、無電制で安定度が維持できる限度潮流と定義する。

4.4 潮流補正制御

TSCシステムでは演算インターバル中の系統変化を吸収するため、ある程度のマージンを持って電制条件を決定する。しかし、昼休みのように短時間に大きな系統変化がある場合、このマージンで吸収しきれないことが予想される。そこで不足電制を回避するため、設定したマージン以上の系統変化があったときに電制機を1台追加する潮流補正制御を行っている。具体的には、図5に示すように、TSC-Pでは状態推定で求めた制御対象線路の潮流値(P_0)に、設定された潮流マージンを加えて該当電制条件での安定化可能限度潮流(P_m)を求める。TSC-Cでは、当該線路潮流を常時計測し、数秒以上 P_m を超えた場合は電制機を1台追加する。

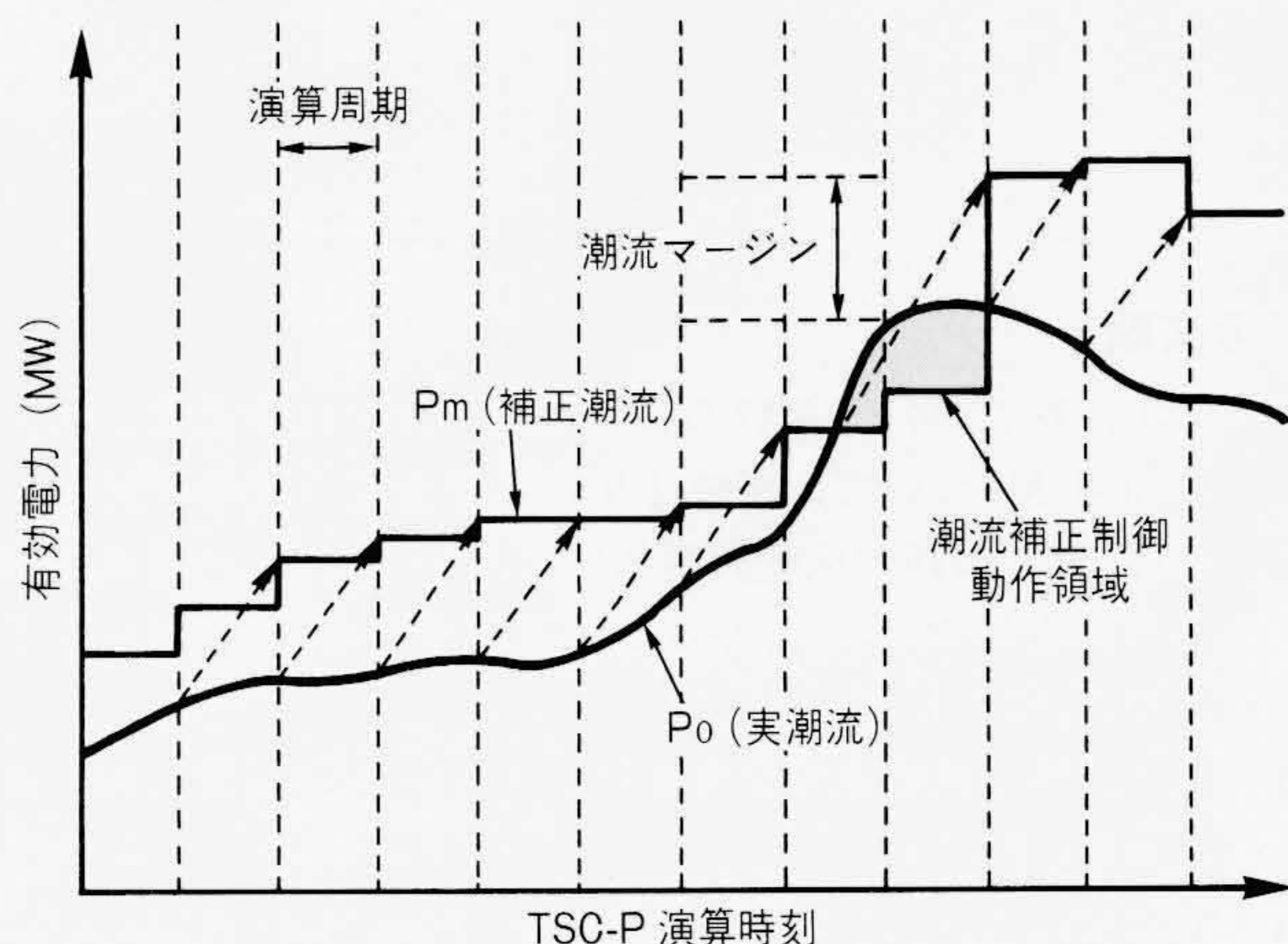
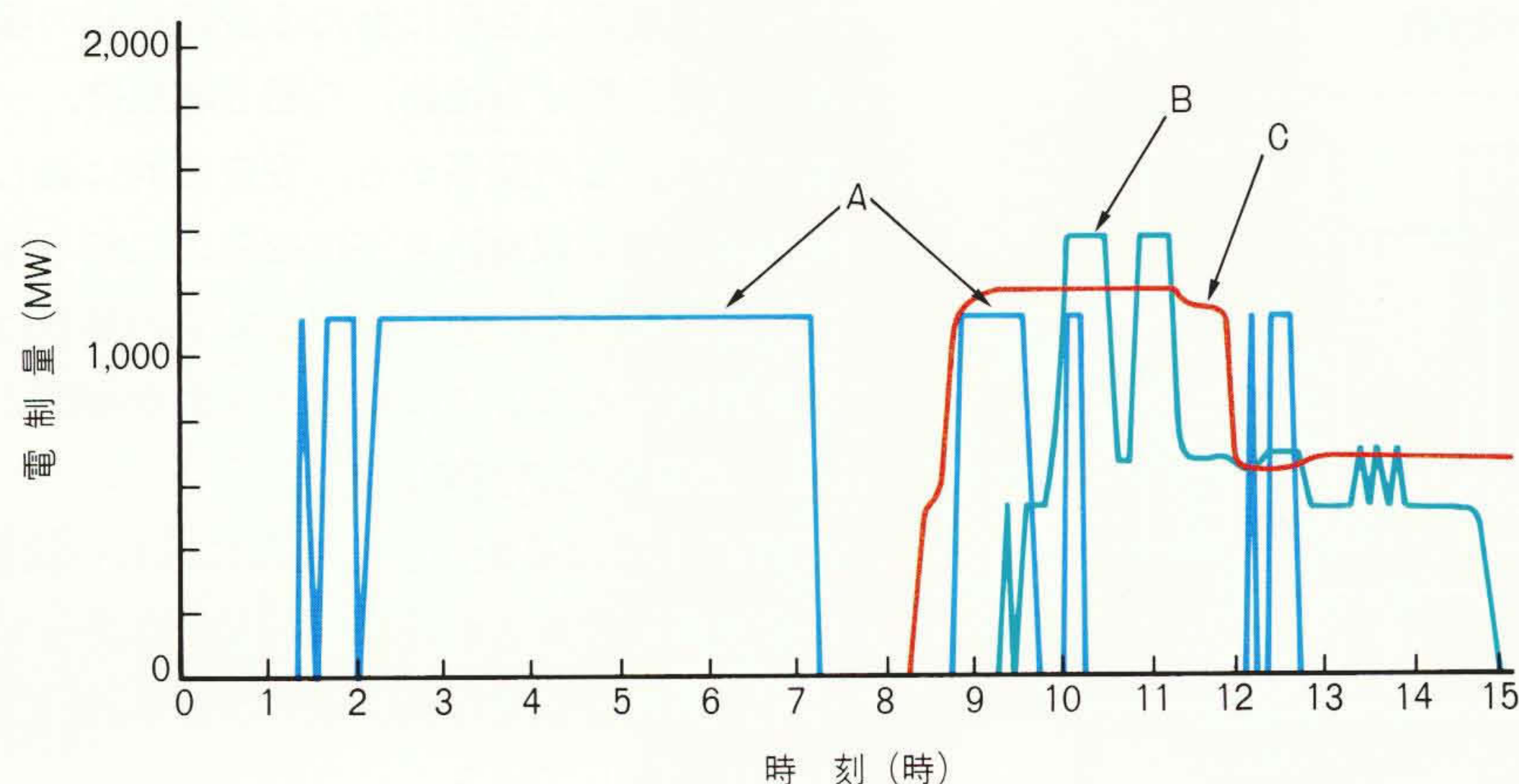


図5 潮流変動と潮流補正制御

TSC-P親局の演算周期中に急激な潮流変動があるとTSC-C子局装置で補正制御が働く。



注：記号説明

- A (発電機出力がほとんど変化しない高効率火力系統)
B (需要に合わせた出力調整が行われる火力系統)
C (同上)

図6 代表的な三相4線地絡故障の電制量
一日の需要の変動に応じて電制量が変化する。

5 フィールド試験結果

平成6年8月からオンライン情報を基にフィールド検証試験を行った。模擬系統では、中部電力株式会社の275 kV以上の全系統と一部154 kV火力系統、および関西電力株式会社以西の系統では6電気所3発電機に簡略化した。想定故障箇所は比較的安定度が厳しい電源系統を対象とした。これは、TSCシステムが本来対象とする基幹系統が一部建設中であり、また検証試験のためには安定度の厳しい箇所のほうが好ましいためである。

代表的な電源線の三相4線地絡故障に対する電制量の時間的推移を図6に示す。同図中のAは発電機出力がほとんど変化しない高効率火力系統、BおよびCは需要に合わせた出力調整が行われる火力系統の特性をそれぞれ示す。高効率火力系統では、夜間需要が少なくなると相対的に送電潮流が増加して安定度が厳しくなる傾向がある。一方、出力調整が行われる火力系統では夜間は安定であるが、朝の需要の立ち上がりに合わせて発電機出力

が増加し、安定度も急激に厳しくなることがわかる。このように、このTSCシステムを導入することにより、系統状態に応じた適切な電制が可能となり、系統運用に大きな利点をもたらすことがわかる。

6 おわりに

基幹系統に適用する広域脱調未然防止システムとして、想定故障に対して安定度計算をオンラインで実行し系統安定化を図る、新しいタイプの系統安定化システムを開発した。このシステムの実用化では計算高速化が最大の鍵(かぎ)となり、これはスクリーニングなどの演算論理と、並列演算順序の最適化の組合せによって解決した。TSCシステムに適用される各種アルゴリズムについては、フィールド試験を実施した結果、実系統に十分適用できることを証明した。

このシステムは平成7年6月に運用開始した。今後は、今回の開発成果を基に、さらに高機能な系統安定化制御システムの開発を目指して努力していく考えである。

参考文献

- 井上, 外: 500 kV基幹系統のための新系統安定化システムの開発について, 平成4年電気学会電力技術研究会
- 小林, 外: 最新の広範囲事故防止リレー技術, 一電源脱調未然防止システム, 平成5年電気学会全国大会(シンポジウム)S17-4
- 井上, 外: 基幹系安定度維持装置(TSC)の設置計画, 電気評論(平5-7)
- T. Inoue, et al.: Development Plan for Wide-Area Power Network Blackout Prevention System Based on Online Stability Calculation, 1993 CIGRE SC-39 Colloquium 4.3
- S. Kumano, et al.: Evaluation of Transient Stability Controller System Model, 1994 CIGRE Paris, 38-303
- 太田, 外: 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(平7-2)
- H. Ota, et al.: Development of Transient Stability Control System (TSC System) Based on On-line Stability Calculation, 1995 IEEE PES Summer Meeting, 95 SM 585-0 PWRS