パターン認識に基づく過渡安定度評価を用いた 電力系統の動的予防制御手法

正員 北 裕 幸 (北海道大)

正員 水 野 隆 裕 (北海道電力)

正員 西 谷 健 一 (北海道大)

正員 長谷川 淳 (北海道大)

Dynamic Preventive Control for Power System

Using Transient Stability Assessment Based on the Pattern Recognition

Hiroyuki Kita, Member (Hokkaido University), Takahiro Mizuno, Member (Hokkaido Electric Power Company), Ken-ichi Nishiya, Member, Jun Hasegawa, Member (Hokkaido University)

For the purpose of maintaining the power system security, the authors are developing an Integrated Security Monitoring and Control (ISMAL) system which consists of the three main functions: security monitoring, preventive control and emergency control. This paper focuses on the dynamic preventive control which deals with the transient stability immediately after the contingency has occurred. The proposed method is based on the transient stability assessment using the pattern recognition with two dimensional feature space; therefore we can obtain the preventive control strategy fast. An index which represents the severity of the contingency quantitatively (security index) is defined by the distance from a linear decision surface which divides a feature plane into stable and unstable region. Further, this method has also the advantage that it is possible to consider the effect of the control devices or damping to some extent and specify the operator demand for stabilization flexibly.

The effectiveness of the proposed method is ascertained through numerical examples for model power systems.

キーワード：電力系統，セキュリティ制御，過渡安定度，予防制御，パターン認識法

1. ま え が き

電力系統における大規模な停電事故の発生は，社会に多大な影響を及ぼすため，そのような停電事故の防止，すなわちセキュリティの確保が重要な課題となっている。このため著者らは，オンラインデータにより系統のセキュリティを適切に把握するセキュリティ監視機能と，迅速に予防制御および緊急制御を実施するセキュリティ制御機能とを有機的に結合させた，一つのまとまった運用システム（総合セキュリティ監視制

御システム）を構想し⁽¹⁾，開発を進めている。周知のように，セキュリティの監視制御機能は，事故除去後の定常状態を対象とする静的なもの⁽²⁾⁽³⁾と，事故直後の過渡状態を対象とする動的なもの⁽⁴⁾とに大別される。本システムにおいては，その各々に対して基本となる監視制御論理を確立し，将来的には両者を同時に考慮し得る統一的な手法の開発が必要と考えている。

ところで，動的なセキュリティ制御のうち，過渡安定度を被制御項目とする予防制御に関してはその重要性が認識されているにもかかわらず，現在までのとこ

ろまだ実用の域に達した方式は開発されていない。これは、予防制御の基礎となる過渡安定度解析計算、すなわち事故発生に対する安定判別の計算にかなりの時間を要していたため、オンライン制御としては実用化がかなり難しいと考えられていたこと、また、系統全体としての安全度を表す適切なセキュリティ評価指標が、確定されていなかったことなどの理由によるものとする。一方近年、エネルギー関数法⁽⁴⁾⁽⁵⁾あるいはパターン認識法⁽⁶⁾による高速な解析手法が開発され、また、その精度や計算時間の向上に関する様々な工夫も行われてきている⁽⁷⁾⁽⁸⁾。このような背景から、著者らはまず前者のエネルギー関数法を用いて、過渡安定度予防制御に関する理論的側面からの検討を行い、その基礎を確立した⁽⁹⁾。本論文は、その成果を適用しながら、更なる高速化が期待できる後者のパターン認識法に基づいた過渡安定度予防制御の検討を行うことを目的としている。

パターン認識法は、系統状態を表す幾つかの変数(特徴変数)と、過渡安定度との関係をあらかじめオフラインで学習しておくことにより、オンライン運用時の過渡安定度を特徴変数の計算のみで判別する手法である。従って、学習に要する計算労力は大きいものの、オンライン運用時には高速な判別が可能となる。中でも文献(8)で提案されているパターン認識法は、二つの特徴変数による判別を基本としており、CRTディスプレイのような平面上に直接表示することが可能で、安定判別結果に対する直観的かつ物理的な理解・判断が行いやすいなどの利点をもっている。本論文では、まずこの手法を更に詳細に吟味することにより、予防制御への適用に関連した幾つかの重要な特性を明らかにする。そして、それらの特性を生かし、本手法をベースとして開発した新しい過渡安定度予防制御手法⁽¹⁰⁾について説明する。提案法は、エネルギー関数法に基づく予防制御手法と同様、経済負荷配分との協調を行いながら事故前の発電機出力を調整し、複数の想定事故に対するセキュリティを一括して向上させるものであるが、更に以下の点でより実情に即した手法と考えられる。

(1) 制御器や制動などによる動揺抑制効果を考慮に入れた予防制御方策を得ることができる。

(2) 予防制御によってどの程度の過渡安定度向上を図るかという安定化の目標を、ある程度柔軟に設定することができる。

(3) セキュリティ評価指標の値は、最大でも事故除去時点までの数値積分で求められるため、予防制御計算を高速に実行することができる。

本手法は、簡単なモデル系統を用いた数値例によりその有効性が確認されている。

2. パターン認識に基づく過渡安定度解析

前章で述べたように、予防制御方策をオンラインで求めるためには、事故発生に対する過渡安定度を高速に判定することが必要である。本論文では、山城らにより提案された、パターン認識に基づく過渡安定度解析手法⁽⁸⁾を適用する。本章では、この手法の概要を説明すると共に、これを更に吟味し、予防制御への適用に関連した幾つかの重要な特性を明らかにする。

〈2・1〉 手法の概要 文献(8)の手法は、事故発生時の非同期運動エネルギー(AE)と、事故除去時の送電電力余裕(TM)の二つの特徴変数を、それぞれ横軸・縦軸にとった二次元の空間(特徴空間)を考え、様々なオフラインサンプルに対する過渡安定度シミュレーションにより、あらかじめこの空間を安定・不安定の二つの領域に分離する(AE と TM の計算式は付録に示す)。そして、オンライン運用時には、仮想事故発生に対して特徴変数の値を計算し、現在の運用点がそのいずれの領域に属しているかを求めることで過渡安定度を判定するものである。なお、特徴空間は想定事故ごとに作成する。

特徴変数の値は、事故除去時点までの数値積分によって計算されるため、この判定を高速に実行することができ、また判定に対する適中率も90%以上であることが確認されている⁽⁸⁾。予防制御においては、図1に示されているように、系統状態を不安定領域から安定領域へと移行させることを考えればよい。

〈2・2〉 予防制御への適用に関する検討

(1) 識別関数決定に関する考察 特徴空間において安定・不安定の領域を分離する境界を識別関数と言うが、この方法ではほとんどの場合、図1に示されているような右上りの線形関数で表される。ただし、二つの領域は必ずしも明確に分離されるとは限らず、

図1 パターン認識法の説明

Fig. 1. Explanation of pattern recognition method.

対象系統，事故種類などによって，空間の境界付近に安定なサンプルと不安定なサンプルの混在する領域が存在する場合がある。本論文では，このような場合にはその混在する領域を不安定領域に含め，図式的方法で識別関数を決定することとする。これは，予防制御の実務的観点からは安全なものが不安定と判定されるよりも，不安定なものが安定と判定されることを避けることが望ましいと考えられるためである。

(2) 学習段階のシミュレーションに関する考察

オフラインの学習においては，様々なサンプルに対して事故後の動揺をシミュレーションによって求め，あらかじめ設定された何らかの条件により安定・不安定の分類が行われる。予防制御の目標ラインとなる識別関数は，この結果に基づいて決定されるため，学習の際に指定する様々な仮定や条件は，その後の予防制御方策に大きな影響を与えることになる。すなわち，制御器や制動などによる動揺抑制効果を厳密にモデル化してシミュレーションを行えば，予防制御ではこれらの効果を間接的に考慮することになり，また安定判別条件は，予防制御でどの程度の安定度向上を図るかという安定化の目安として寄与する。しかも，これらの仮定や条件は，特徴空間が極端に分離不可能とならない範囲内で比較的自由に指定することができる。この性質は，エネルギー関数法による過渡安定度解析法では，一般に制御器などの効果が厳密に考慮され得ず，しかも事故除去後の第一波でしか過渡安定度を判定できなかったことと比較して，パターン認識法の特徴的な点といえよう。

(3) 安全性の度合に関する考察 この方法では安定・不安定といった系統の定性的な把握が可能であると同時に，もし不安定であればそれはどの程度不安定なのかという定量的な把握も可能と考えられる。すなわち，物理的に AE の値が大きいほど，あるいは TM の値が小さいほど，系統の不安定性は増すため，特徴空間においては左上に行くほど安定で右下に行くほど不安定となる。つまり，識別関数との距離によって，事故発生に対する相対的な安全度を評価することができる。図2は後に述べる例題系統において，送電線4-5の母線5至近端における三相地絡故障（故障除去時間を0.30秒とする）を想定したときの特徴空間である。ここで，図中の点A, B, Cのサンプルに対する動揺波形を図3に示す。これらの図より，本論文で対象としている過渡時間領域（故障除去後1~3秒程度まで）においては，空間の左上から右下へ向かうに従って，系の不安定性が増していくことが確かめられる。以上のことは，たとえ系統状態を安定領域内に

図2 特徴空間
Fig. 2. Feature space.

図3 動揺波形
Fig. 3. Swing curve.

移行させることができなくても，できる限り識別関数に近づけておくような予防制御を行えば，過渡安定度に関する系統の安全度は向上するということを示している。

(4) 特徴変数の相関性に関する考察 この方法では，特徴変数として AE と TM の二つの変数を考えているが，事故によってはこれらの変数の間に比較的強い相関が見られる場合がある。すなわち， AE の値が大きければ TM の値は小さくなり，逆に AE の値が小さければ TM の値は大きくなるという関係で

ある。このとき、オフラインサンプルは特徴空間全体にわたって分布するのではなく、図1のようにある幅をもった狭いバンド内に分布することになる。これは、二つの特徴変数のうちどちらか一方の変数のみを用いても、ある程度の過渡安定度解析が可能であることを示しており、特に演算の高速性という点からは、事故発生時の変数である AE による判定が有効と考えられる。

3. 提案する過渡安定度予防制御手法

〈3・1〉 セキュリティ評価指標 過渡安定度予防制御方策を数値計算で求めるためには、現在の系統状態が過渡安定度に関してどの程度望ましい運転点であるかを、定量的に評価すること（セキュリティ評価）が必要となる。パターン認識法では、第2章で述べたように運用点と識別関数との距離がその有効な指標になり得ると考えられるため、本論文ではこれを用いた次式のようなセキュリティ評価指標を定義する。

$$SI = \sum_{i=1}^{NC} W_i \cdot D_i^2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$W_i = \begin{cases} 0; & \text{運用点が安定領域にあるとき} \\ \alpha_i; & \text{運用点が不安定領域にあるとき} \end{cases}$$

ここに、 α_i ：各事故の重み係数、 D_i ：運用点と識別関数との距離、 NC ：想定事故の総数

ただし、 α_i の値は事故の起こりやすさや各事故に対する安定性と距離の関係などからオフラインで経験的に定める。また、 D_i の算出にあたっては、次式のように AE と TM をオフラインサンプルの平均値および標準偏差を用いてそれぞれ正規化し、両変数のオーダをそろえてから計算を行う。

$$AE_{ni} = (AE_i - E_{AEi}) / \sigma_{AEi} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 i ：想定事故番号、 AE_n ：正規化された特徴変数、 E ：オフラインサンプルの平均値、 σ ：オフラインサンプルの標準偏差 (TM についても同様)

(1)式は、いわば系統全体としての不安全度を表す指標であるため、予防制御計算ではこの値をできるだけ小さくすることを考えればよい。その場合、指標が2乗和形式で定義されているため、不安定性の度合の大きな事故ほど強い制御が施されると期待される。また、第2章で述べたように識別関数には、予防制御に対する運用者の意図が反映されているため、上記のセキュリティ指標を用いることで、運用者が望むような予防制御に可能な限り近い方策を得ることができる。

〈3・2〉 過渡安定度予防制御問題の定式化と解法⁽⁹⁾

予防制御は前述のごとく、系統全体のセキュリティ

レベルの向上を図ることが第一の目的であるが、そこで対象とされている事故は、発生した場合の影響は大きい、発生する頻度は比較的小さい事故であるため、経済性を全く無視してセキュリティのみを追求した制御を行うことは得策ではない。このため、セキュリティと経済性との何らかの協調策が必要となるが、著者らは、エネルギー関数法を用いた過渡安定度予防制御において、セキュリティ指標と発電機の運用コストとをある重みづけを行うことにより一つの目的関数にまとめ、これを最小化する考え方を提案した⁽⁹⁾。本論文でもこの考え方を適用するが、具体的な定式化は以下のとおりである。ただし、制御変数としては、効果が大きいと考えられる発電機出力の指定値（＝事故前の機械的入力）のみを採用する。

$$\min PI(P_g) = p_c C(P_g) + SI(P_g) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{subj. to } h(P_g) = 0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$P_{g\min} \leq P_g \leq P_{g\max} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 C ：平常時の発電機の総運用コスト、 p_c ：コストの重み係数、 $h=0$ ：需給平衡条件、 P_g ： $[P_{g1}, \dots, P_{gMG}]$ ：発電機出力ベクトル、 $\min, \max$ ：下限および上限

上記の問題は凸計画問題であるため、基本的には非線形計画法に基づく最適化計算によって解くことができる。しかしながら、最適化の過程で目的関数 (PI) の値を求める際、すべての想定事故に対して逐一過渡安定度解析を行わなければならない、系統が大規模になると計算時間は膨大になることが予想される。文献

図4 予防制御のアルゴリズム
Fig. 4. Algorithm for preventive control.

(9)ではこれに対処するため、重大事故と呼ばれる比較的過酷な事故をオンラインで選択し、その事故に対してのみ最適化計算を行う新しいアルゴリズムを考案している〔この流れ図を図4に示すが、詳細については文献(9)を参照されたい〕。本論文でもこの考え方を適用するが、基本的な原理は以下のとおりである。すなわち、(1)式からわかるように安定な事故に対するセキュリティ指標の値を零として定義しているため、安定度の余裕が比較的大きく、系統状態が多少変化しても容易に不安定となることがないと予想される事故については、指標の値は常時零のままであると考えられる。従って、それらの事故を除外し計算を行っても、最終的な解にはほとんど影響を及ぼさないであろう。このとき問題となるのが、パターン認識法ではこの重大事故をどのような基準で選択すれば良いかということである。次節ではこの点について論述する。

〈3・3〉 重大事故の選択法 重大事故を適切に選択するために本論文では、前述の左上に行くほど安定で、右下に行くほど不安定性が増すという特徴空間の性質に基づきその選択基準を設定する。具体的には、特徴空間における安定領域を、図5に示すように安全領域とそれより不安定側にある警戒領域と呼ばれる二つの領域に分割する。このとき、安全領域と警戒領域の境界となる線形関数を安全直線と呼ぶこととし、その傾きは識別関数と同じ方向にとり、識別関数から距離

図5 警戒領域の導入
Fig. 5. Introduction of alert region.

図6 AEのみによるセキュリティ評価
Fig. 6. Security evaluation only by AE.

離 γ だけ離れた位置に設定する。この γ の値はオフラインでの詳細な検討などを元に、各事故の特徴空間ごとに系統解析者の判断で経験的に設定する。ただし先にも述べたように、特徴空間は平均が0、標準偏差が1となるように正規化されているため、その値はほとんどの場合0~1範囲内に限定される。警戒領域内の事故は、一応安定側にあるが不安定領域に比較的近く、最適化の過程で系統状態が変化するに伴い、不安定領域内へ移行する可能性を無視できない。従って、重大事故としては、不安定領域内の事故はもちろんのこと、警戒領域内の事故をも選択することが望ましいと考えられる。

〈3・4〉 単一特徴変数による予防制御計算の高速化

これまで述べてきた予防制御手法では、特徴変数として AE と TM の二つを用い、二次元の特徴空間上でセキュリティを評価していた。しかしながら、第2章で述べたように、事故によってはこれら二つの変数が比較的強い相関をもっている場合があり、そのような事故に対してはどちらか一方の変数によってもセキュリティの評価が可能と考えられる。本論文では、事故発生時の変数である AE のみによってセキュリティを評価し、それに基づいて制御方針を決定することを考える。すなわち、特徴変数間の相関性の強い事故(i)に対しては、識別関数を図6のように縦軸と平行に引くこととし、次式に従って識別関数との距離を評価する。

$$D_i = AE_i - AE_{ci} \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 AE_c : オフラインサンプルから算定した AE の臨界値

従って、その事故に対する動揺方程式の計算が全く不要になり、しかも発電機出力に対する D_i の感度も簡単な代数計算で求められるため大幅な高速化が期待できる。ただし、図6からもわかるように、この手法で得られる解(A)は、実際の解(B)よりも多少過剰制御ぎみの方策となる可能性をもっていることに注意する必要がある。

4. 数値計算例

提案した手法の有効性を検証するため、図7に示すCIGRE 7機10母線系統⁽¹¹⁾を用いてシミュレーションを行った。想定事故としては、過渡安定度にとって厳しい条件と考えられる幾つかの母線至近端での三相地絡故障(故障除去時間0.30秒)を考える。また、オフラインサンプルに対する安定度は、制動項を考慮して微分方程式を解き、故障発生後1.20秒までに発電機間の相差角の最大値が180度より大きくなるか否

図 7 CIGRE 7 機 10 母線系統
Fig. 7. 7 machine CIGRE test system.

表 1 予防制御の結果
Table 1. Results under preventive control.

事故 番号	事故 ケース i-j	識別関数との距離			
		初期状態	ケース 1	ケース 2	ケース 3
1	1*-3	1.23 (U)	-0.38 (S)	0.02 (S)	-0.41 (S)
2	1-3*	-1.52 (S)	-1.18 (S)	-1.24 (S)	-1.53 (S)
3	1*-4	1.23 (U)	-0.38 (S)	0.01 (S)	-0.42 (S)
4	2*-3	1.30 (U)	-0.03 (S)	-0.15 (S)	-0.16 (S)
5	2-3*	-1.56 (S)	-1.18 (S)	-1.24 (S)	-1.53 (S)
6	2*-10	1.28 (U)	-0.04 (S)	-0.16 (S)	-0.16 (S)
7	3*-4	-1.54 (S)	-1.20 (S)	-1.26 (S)	-1.55 (S)
8	3*-9	-1.53 (S)	-1.19 (S)	-1.25 (S)	-1.54 (S)
9	4*-5	-3.38 (S)	-4.63 (S)	-4.54 (S)	-4.60 (S)
10	4-5*	-3.03 (S)	-2.63 (S)	-2.66 (S)	-2.54 (S)
11	4-6*	0.17 (U)	-0.93 (S)	-0.81 (S)	-1.15 (S)
12	6*-8	-0.32 (S)	-1.29 (S)	-1.17 (S)	-1.50 (S)
13	6-8*	0.56 (U)	-1.33 (S)	-1.20 (S)	-1.35 (S)
14	7*-8	1.50 (U)	-0.09 (S)	0.05 (U)	-0.08 (S)
15	7-8*	0.81 (U)	-1.08 (S)	-0.93 (S)	-1.08 (S)
16	8*-9	0.57 (U)	-1.32 (S)	-1.19 (S)	-1.33 (S)
コスト(\$/h)		4506.0	4594.1	4586.1	4607.6
計算時間(秒)		-	9.4	14.0	0.5

注) 事故ケースのi-jにおける*印は事故母線を示す。

かという条件により判定した。つまり、その後の予防制御計算では、制動を考慮したうえで、前記の安定条件をできる限り満足させる方策が得られることを期待している。ただし、ここでは制御器の効果は考慮していない。更に、重大事故選択のための安全直線は、識別関数から $\gamma=0.6$ だけ離れた位置に引くものとした。

前章の予防制御アルゴリズムに基づき、最経済の初期データに対して実際に制御を行った結果を表 1 に示す。同表は、各事故に対する識別関数との距離などを表したもので、負号の付いた距離はその事故が特徴空間上の安定領域内にあることを示している。また、() 内の S および U はそれぞれ安定、不安定を表すが、これは上記の学習段階における安定判別条件によって判定した厳密な結果である[従って、距離の正負と() 内の判定とは必ずしも一致するとは限らない]。また、ケース 1 は $p_c=0.0$ としてセキュリティ

図 8 事故 14 の特徴空間
Fig. 8. Feature space of contingency 14.

図 9 事故 14 の動揺波形
Fig. 9. Swing curve of contingency 14.

指標のみを最小化した制御、ケース 2 は $p_c=4.0 \times 10^{-3}$ としてセキュリティと経済性を同時に考慮した制御である。ケース 3 は、単一の特徴変数のみによる予防制御(ただし、 $p_c=0.0$)の結果で、すべての想定事故に対して AE のみでセキュリティ評価を行っている。更に、三つのケースとも重み係数 α_i の値をすべての事故に対して 1.0 と設定している。

まず、ケース 1 では、初期状態で不安定側にあった 1, 3, 4, 6, 11, 13~16 番の事故が、予防制御を施すことにより制御後はすべて安定側に移行されている。このことから、提案したセキュリティ指標を最小

化することにより想定事故全体にわたるセキュリティの改善が可能であることがわかる。また、ケース2では、ケース1において安定となった14番の事故が、識別関数との距離は減少しているものの依然として不安定のままで、ケース1ほどのセキュリティの改善はなされていない。しかしながら、運用コストはケース1よりも減少していることから、この状態は経済性を極端に悪化させない範囲内でできる限りのセキュリティ向上を図ったものであることがわかる。このように、経済性とセキュリティの間の重みを適切に設定することにより、両者の協調をとった制御を行うことが可能である。また、この14番の事故に対する特徴空間と事故後の動揺波形を各々図8、図9に示す。この図からも、防制御によってセキュリティの向上が図られている様子がわかるが、特にケース2の状態は、不安定であるものの初期状態に比べ脱調に至るまでの時間が長くなっており、提案するセキュリティ指標の有効性を裏付けている。

また、ケース3の結果から、AEのみを用いた予防制御においても先の結果と同様に十分安定化が図り得ることがわかる。計算時間も0.5秒と大幅に短縮されているため、特徴変数間の相関性を利用することは、本手法のオンライン化にかなりの効果があると考えられる。なお、シミュレーションした三つのケースは、いずれも1回の重大事故選択で最適解が得られている。

5. む す び

本論文では、総合セキュリティ監視制御システム開発の一環として、事故直後の過渡安定度維持を目的とした予防制御に関する検討を行った。提案した予防制御手法の特徴をまとめると、以下のようになる。

(1) パターン認識に基づく過渡安定度解析法をベースとしているため、高速に制御方策を計算できる。

(2) 得られる制御方策は、経済性を極端に損なうことなく系統全体のセキュリティを向上させるようなもので、また、制御器や制動などの有無、あるいは予防制御の安定化の目安をある程度柔軟に設定することができる。

(3) 事故発生時の特徴変数のみを用いてセキュリティを評価することにより、更なる高速化を図ることができる。

ただし、本手法では、オフラインサンプル構成のための過渡安定度計算が膨大であるため、電源構成や系統構成などの電力系統の変化に対する柔軟性があまり良くないという欠点をもっている。従って、この負担

を減少させる何らかの効率的なシミュレーション法の開発が望まれる。

また、本論文では、既に提案したエネルギー関数法に基づく予防制御手法との詳細な比較は行っていないが、これは前述までの議論からわかるように、両手法にはそれぞれ一長一短があり、どちらが良いかを定めることは意味が薄いと考えられるためである。実運用においては、状況に応じて適宜いずれかの手法を採用するか、あるいは両者の特長のみを抽出した総合的なアルゴリズムを開発することが必要であろう。ところで、予防制御により過渡的には安定となっても、その後振動が増大し、いわゆる定態・中間領域不安定現象を引き起こす場合が考えられる(図3の点Bの波形参照)。しかし、この現象は系統状態を決定するパラメータや制御系の諸定数などの組合せの不適切によって生ずるものであり、これを厳密に考慮する際には、より詳細なモデルを用いた固有値解析などによる検討が必要となる。その意味から、定態・中間領域安定度問題は、過渡安定度問題とは別個に議論すべきものと考えられ⁽¹²⁾、本論文ではこれをあえて考慮していない。現在著者らは、定態・中間領域不安定現象に対する予防制御に関しても、上記の固有値解析法をベースとして基本的な検討を進めているところである。また、これらの点に加え、提案手法の実規模系統への適用なども検討すべき主要な課題と考えている。

最後に、本研究を行うにあたり、種々御討論いただいた北見工業大学山城迫教授に対し、心より感謝の意を表する次第である。また、本論文の数値計算は、すべて北海道大学大型計算機センターのHITAC M-682 Hを使用したことを付記し、関係各位に謝意を表す。

(平成2年9月21日受付)

文 献

- (1) J. Hasegawa, E. Tanaka, T. Yamada & D. J. Li: "Fundamental Research on Integrated Security Monitoring and Control (ISM) Systems: Contingency Analysis and Preventive Control Strategies", *Int. J. Energy Syst.*, 8, 173 (1988)
- (2) 北・田中・長谷川: 「経済性を考慮したオンライン PQ 分離形予防制御手法」, 電学論 B, 108, 475 (昭63-10)
- (3) 北・田中・西谷・長谷川: 「総合セキュリティ監視制御システムにおけるオンライン PQ 分離形緊急制御手法」, 同上 B, 109, 467 (平元-10)
- (4) N. Kakimoto, Y. Ohsawa & M. Hayashi: "Transient Stability Analysis of Electric Power System via Lur'e Type Lyapunov Function, Part I New Critical Value for Transient Stability", *Trans., IEE of Japan*, 98, 63 (1978)
- (5) T. Athay, R. Podmore & S. Virmani: "A Practical Method for the Direct Analysis of Transient Stability", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, PAS-98, 573 (1979)
- (6) 斉藤・小泉・有働・佐藤: 「パターン認識法による高速過渡安定度判定法」, 電学論 B, 96, 505 (昭51-10)

- (7) 岩本：「エネルギー関数法による過渡安定度問題の一つの定式化と解法」，同上 B, 105, 873 (昭 60-10)
- (8) 山城・小池：「電力系統のオンライン過渡安定度評価手法」，同上 B, 104, 561 (昭 59-9)
- (9) 北・西谷・長谷川：「エネルギー関数法に基づいた電力系統のオンライン過渡安定度予防制御手法」，同上 B, 110, 745 (平 2-9)
- (10) 水野・北・西谷・長谷川：「パターン認識に基づく過渡安定度評価を用いた電力系統の動的予防制御手法」，第 1 回電気学会電力エネルギー部門大会論文集 (論文 I)，181 (平 2)
- (11) M. A. Pai: Power system stability (1981) North Holland Publishing Company
- (12) 大山・芹澤：「近接不安定平衡点が電力系統の中間領域安定度に及ぼす影響」，電学論 B, 107, 229 (昭 62-5)

付 録

AE と TM の計算式

(1) AE の計算式

$$AE = \frac{1}{2} \left\{ \sum_{i=1}^{MG} (\Delta P_i^2 / 2H_i) - \left(\sum_{i=1}^{MG} \Delta P_i \right)^2 / 2 \sum_{i=1}^{MG} H_i \right\} \Delta t^2 S_B$$

..... (付 1)

ここに， ΔP_i ： i 番目の発電機の加速電力，
 H_i ： i 番目の発電機の単位慣性定数， S_B ：定格容量， Δt ：故障発生直後，発電機の加速トルクが一定とみなし得る微小時間

実際の計算においては， Δt は便宜上無視し，加速電力 ΔP は故障発生時の値をとる。

(2) TM の計算式

$\theta_{ij} \leq \pi/2$ の場合

$$TM = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \{E_i B_{ij} E_j (1 - \sin \theta_{ij})\}$$

$\theta_{ij} > \pi/2$ の場合

$$TM = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \{E_i B_{ij} E_j (\sin \theta_{ij} - 1)\}$$

..... (付 2)

ここに， B_{ij} ：故障除去時の母線 i - j 間のアドミタンス行列のサセプタンス， θ_{ij} ：故障除去時の母線 i - j 間の相差角， E_i ：故障除去時の母線 i の電圧の大きさ， N ：母線総数

北 裕 幸 (正員)

昭和 38 年 5 月 7 日生。63 年 3 月北海道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 月同博士課程進学。平成元年 4 月同大学工学部電気工学科助手となり，現在に至る。主として，電力系統の解析・制御に関する研究に従事。

水 野 隆 裕 (正員)

昭和 40 年 11 月 19 日生。平成 2 年 3 月北海道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 月北海道電力(株)入社，現在に至る。在学中，主として電力系統のセキュリティ制御に関する研究に従事。

西 谷 健 一 (正員)

昭和 22 年 2 月 11 日生。44 年 3 月北海道大学理学部物理学科卒業。同年 4 月同大学工学部電気工学科助手，同講師を経て，平成元年 4 月同助教授，現在に至る。電力系統工学，特に電力系統の状態推定，解析および運用・計画に関する研究に従事。工学博士。システム制御情報学会会員。

長谷川 淳 (正員)

昭和 18 年 12 月 13 日生。46 年 3 月北海道大学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程修了。同年 4 月同大学工学部講師，同助教授を経て，60 年 4 月同教授，現在に至る。工学博士。主として，電力系統の計画・運用・制御・解析およびエネルギー貯蔵に関する研究に従事。日本 OR 学会，IEEE 会員。