UDC 621.311.1: 621.316.9: 681.5.015

論文

60-B2

パターン認識による電力系統の セキュリティ予防制御

正員 山城 迪 (北見工業大)
正員 奈良 宏一 (北見工業大)
正員 小池 東一郎 (北見工業大名誉教授)

1. ま え が き

筆者らは、既に文献(1)などにおいて、電力系統の過渡安定度に関するセキュリティ評価を、二次元のパターン認識法により、高速に行なう手法を提案してきた。

“特徴空間を構成する2個の特徴変数が、過渡安定度に関し、互に相反する特性を持つならば、特徴空間は安定および不安定の二つの領域に区分できるのではないか?”との考えから、安定度に関し、負荷レベルの変化に対して相反する特性を持つ、故障発生時の発電機群の非同期運動エネルギー(または加速力のばらつき)および故障除去時の送電電力余裕を特徴変数に採用した。その結果、提案した手法は、安定判別結果に対する直観的、かつ物理的理解・判断が容易なこと、特徴空間が平面であることから、CRTディスプレイなどを用いた、オンラインでのセキュリティ評価が可能なこと、更に、識別関数が系統の負荷レベルの変化に依存せず、しかも、その設計が容易なこと、などの特長を有することが判明した。しかし、一方で、本手法の有効性を理論的に示すことができていないために、実用上の面からも、その有効性を実規模系統への適用により確かめることの必要性も指摘してきた。

一方、電力系統のセキュリティ制御において、セキュリティの評価と予防制御問題は常に密接な関係にあることは、Dyliacco モデル⁽¹⁾からも容易に理解される。即ち、現在の系統状態が Alert な状態(万一事故が発生すれば、系統は緊急状態に推移する)にあると判断される場合には、仮に、事故が発生したとしても、決して緊急状態におちいらないような“平常状

態”になるように、あらかじめ事故発生以前に何らかの制御方策を決定し実施することが望ましい。これはセキュリティ評価に基づいて採られるセキュリティレベルの向上を目的とした予防制御であり、セキュリティ評価に伴って、必然的に検討されるべき問題である。

以上の議論から、本論文では、提案した過渡安定度評価方法に基づいて、理解・判断の容易な予防制御方策として、経済性を考慮する場合と、考慮しない場合の各種の制御方策を提案する。同時に文献(1)では過渡安定度評価手法を簡単な4機7ノード系統への適用に止まっていたので、実規模系統への適用により同手法の有効性を再び確かめる。

特に経済性を考慮した予防制御については、電力系統のセキュリティと経済性の向上とが、互に相入れない要求であるため、いつも、何らかの協調策が必要となるが、筆者らは発電機出力のシフトに基づく、経済性とセキュリティの協調可能な予防制御方策を提案する。即ち、過渡安定度に関するセキュリティ制約付きの経済負荷配分法(ELD)を示し、これと文献(1)の過渡安定度評価手法を用いた予防制御方策決定のアルゴリズムについて述べ、最後にその有効性をモデル系統への適用により示す。

2. パターン認識による過渡安定度評価

後の説明の都合上、文献(1)で述べた過渡安定度の評価方法について、以下にその概略を述べる。

〈2・1〉 過渡安定度評価指標 (1)式の動揺方程式で表わされる発電機からなる系統において、ある事故を想定した場合、回転体に貯えられる運動エネルギーに注目し、系統の非同期運動エネルギー(AE)を位相角重心系⁽³⁾を用いて、(2),(3)式で定義する⁽¹⁾⁽⁵⁾。過渡安定度からみれば、AEの値は小さければ小さいほど好ましい。

$$\frac{H_i}{\pi f} \frac{d^2 \delta_i}{dt^2} = \Delta P_i \dots\dots\dots (1)$$

Transient Security Enhancement of Power Systems Using Pattern Recognition. By Susumu Yamashiro, Member Koichi Nara (Kitami Institute of Technology) & Toichiro Koike, Member.
山城 迪: 正員, 北見工業大学電気工学科
奈良宏一: 正員, 北見工業大学電気工学科
小池東一郎: 正員, 前北見工大学長, 北大名誉教授

$$AE = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n I_i (\dot{\delta}_i - \dot{\delta}_0)^2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n I_i \dot{\delta}_i^2 - \frac{1}{2} I_0 \dot{\delta}_0^2$$

.....(2)

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

.....(3)

ここで、 $H, I, \Delta P, \delta, f$ は、各々、発電機の単位慣性定数、慣性モーメント、加速電力、内部電圧位相角、および周波数で、添字 i と 0 は各々、発電機番号と位相角重心系を示し、 $\dot{\delta}_0 = \left(\sum_{i=1}^n I_i \dot{\delta}_i \right) / I_0$ 、 $I_0 = \sum_{i=1}^n I_i$ である。 Δt は、故障発生後、発電機への加速電力が一定とみなし得る微小時間、 S_B は基準容量を示す。

また、(4) 式の故障発生時の発電機間の加速力のばらつき (Φ) によっても、過渡安定度を評価できる。

$$\Phi = \sum_{i=1}^n \left| \left(\Delta P_i / H_i \right) - \frac{\sum_{j=1}^n \Delta P_j}{\sum_{j=1}^n H_j} \right| \pi f \quad \text{.....(4)}$$

AE および Φ の値が大きいほど、系統は不安定に落ちやすいが、一方、(5) 式で定義する故障除去時の送電電力余裕(TM) は、逆にその値が大きければ大きいほど、系統は安定であると考えられる。

$$TM = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \{ E_i B_{ij} E_j (1 - \sin \gamma_{ij}) \} \quad (5)$$

ここで、 B_{ij}, E_i, γ_{ij} は、各々故障除去時のアドミタンス行列のサセプタンス、母線電圧の大きさ、母線 $i-j$ 間の相差角。

このように、AE および Φ と、TM とでは、過渡安定度に関し互に相反する特性を有するので、これらの指標の組み合わせによって、(AE-TM) および (Φ -TM) の 2 種類の特徴空間を考えるものとする。

〈2・2〉 オンライン過渡安定度評価 パターン認識による過渡安定度の評価は、まず、多数の事故ケースについて、デジタルシミュレーションにより、オフラインでの過渡安定度計算を行ない、その結果得られるサンプルセットに基づいて、パーセプトロン法あるいは単に図式的方法によって識別関数 ϕ を決めておく。次に、オンライン系統データから、ある想定事故について、特徴変数の値を求めこれによって ϕ を計算する。安定判別は(6)式による。

$$\phi(\mathbf{X}) \geq 0 \text{ 安定, } \phi(\mathbf{X}) < 0 \text{ 不安定} \dots (6)$$

ここで、特徴変数ベクトルは $\mathbf{X} = (AE, TM)$ または $\mathbf{X} = (\Phi, TM)$ で、この場合、識別関数は特徴空間を安定、不安定の 2 領域に分割する直線となる。

3. 予防制御方策

過渡安定度に関するセキュリティレベル向上のための予防制御の制御対象としては、発電機、負荷あるいは系統構成などが考えられるが、ここでは、理解が容易で、かつ、効果的と考えられる発電機出力の変更にのみ注目するものとする。

〈3・1〉 経済性を考慮しない場合の予防制御

いま、図 1 に示すような特徴空間 (AE-TM 空間) において、既に識別関数が求まっているものとする。この場合、予防制御の目的は、想定事故のサンプルベクトルが不安定領域内の点 (例えば、図 1 の A 点) で示されるときに、発電機出力をあらかじめシフトさせて A 点を安定領域に移行させることであるが、ここで、もしも安定領域内に移行の目標となるような点 (ターゲット) が設定されていれば都合がよい。即ち、仮りに図 1 の T 点のように予防制御のターゲットが設定されている場合には、このターゲットに対応する発電機出力になるように、現在の発電機出力をシフトさせればよい。ターゲットの設定は、特徴空間の左上部に置くほどセキュリティレベル向上の点からは好ましいが、この場合、予防制御によって発電機出力の大幅な変化も予想されるので、その意味では識別関数近傍に設定する方が望ましいと言える。

また、制御対象とする発電機数を少なくし、故障発生時の加速力 ($\Delta P/H$) の最も大きな発電機と小さな発電機にのみ注目する考え方⁽⁶⁾も、現状からの大幅な状態変化なしに効果的にセキュリティレベルを向上させるという点で有効であると考えられる。この場合の予防制御は次のアルゴリズムに従って発電機出力をシフトさせる。

〈予防制御方策 I〉

- step 1 安定領域内にターゲットを設定し、その点に対応する発電機出力を求める。
- step 2 想定事故に対して、そのサンプルベクトルの値が不安定領域におちいる場合、即ち、

図 1 特徴空間 (AE-TM 空間)

Fig. 1. Feature space.

$\phi(\mathbf{X}) < 0$ の場合、故障発生時に発電機に現われる加速力の、最大および最小の発電機を求める。

[step 3] 最大加速力となる発電機出力を、ターゲット状態の発電機出力に変更する。即ち、シフト(減少)すべき電力 ΔG は、一般に $\Delta G = (A \text{ 点における出力})$

$-(T \text{ 点における出力}) \dots \dots \dots (7)$

step 4 需給バランスから、加速力最小となる発電機出力を ΔG だけ増加する。

以上のアルゴリズムは、A点およびターゲットのT点と同じ系統負荷レベルにあることを前提としているが、両者の負荷レベルが異なる場合には、以下に述べる方法で発電機出力を変更する。

いま、異なる二つの負荷レベルにおいて、発電機間の負荷配分のパターンが同じならば、(3)式から AE は負荷レベル α のほぼ自乗に比例して変る。そこで、例えば AE-TM 空間で、ターゲットを設定した状態の負荷レベルを基準として ($\alpha=1$)、任意の α での AE_α を与える負荷配分を、 $\alpha=1$ に換算し、図2の ΔG_i を求める。次にレベル α で出力を $\alpha \Delta G_i$ シフトさせれば、ターゲットと同様の負荷配分パターンが得られるから、(8)式により y の大きさだけ、最大および最小加速力となる発電機出力をシフトさせる。また、 ϕ -TM 空間を用いる場合は、加速力のばらつきをほぼ α に比例すると考え、(8)式の α^2 を α に、AE を ϕ に置き換え出力のシフト量 y を求める。

$$y = \frac{(AE_\alpha) - (AE_t)}{(AE_\alpha) - (AE_t)} \alpha^2 \Delta G \dots \dots \dots (8)$$

ここで、 (AE_α) は負荷レベル α における非同期運動エネルギーで、想定事故発生時の潮流計算から求まる量。 AE_t はターゲットの非同期運動エネルギー。

(3.2) 経済性を考慮する場合—セキュリティ制約

図2 セキュリティ維持のための発電機出力の変更 [(8)式参照]

Fig. 2. Modification of output for system security.

付き ELD による予防制御—現在の運用状態が ELD に従って、経済的には最も好ましい状態にあるものとする。また、制御対象となる発電機はすべて火力発電機から成っているものとする。いま、ある想定事故に対して、前章の方法により、セキュリティ評価を行なった結果、系統は Alert な状態にあると判断される場合を考える。このとき、発電機出力のシフトによる経済的損失をできる限り少なくし、かつ、過渡安定度に関するセキュリティレベルの向上を図るためには、以下に示すセキュリティ制約付きの ELD によって発電機出力を決定するとよい。

(2)式の非同期運動エネルギー AE は、その値が小さければ小さいほど、系統は同期平衡状態を保つことができ、 $AE=0$ の条件は過渡安定度の面からは最も好ましい。このことから、通常の ELD における、需給バランスを考慮した目的関数を拡張して、(9)式の目的関数を設定する。

$$f(G) = \sum_{i=1}^n F_i + \lambda \left(PR - \sum_{i=1}^n G_i + PL \right) + \mu \cdot AE \frac{2}{\Delta t^2 S_B} \dots \dots \dots (9)$$

ここで、PR, PL は各々、系統の負荷および送電損失、 λ および μ はラグランジュの未定乗数、 F は燃料費で、 $F = a + bG + cG^2$ 、 a, b, c は定数である。

(9)式を最小にする発電機出力 G_i は、(10)式に従って(11)式から求めることができる。

$$\frac{\partial f(G)}{\partial G_i} = \frac{dF_i}{dG_i} - \lambda \left(1 - \frac{\partial PL}{\partial G_i} \right) + \mu \left(\frac{\Delta P_i}{H_i} - \frac{\sum_{j=1}^n \Delta P_j}{\sum_{j=1}^n H_j} \right) = 0 \dots \dots \dots (10)$$

ここで、 $\Delta P = G - P_e$ 、 P_e は故障発生時の電氣的出力。

$$G_i = \frac{1}{2c_i} \left(\lambda \left(1 - \frac{\partial PL}{\partial G_i} \right) - b_i - \mu \left(\frac{\Delta P_i}{H_i} - \frac{\sum_j \Delta P_j}{\sum_j H_j} \right) \right) \dots \dots \dots (11)$$

上式は、物理的には次のように理解される。即ち、セキュリティ制約を考慮する以前の状態と比較して、“加速力の大きい発電機ほど、見掛け上、増分燃料費特性が悪化すると考え、相対的に出力の減少となるように、発電機間の負荷配分を行なうこと”を意味している。

なお、加速力のばらつき ϕ をセキュリティ制約とする場合には、(4)式では減速力も正の加速力として扱っているが見掛けの燃料費特性向上のため、これを負の加速力とみなし、次式によって出力を決定する。

$$G_i = \frac{1}{2c_i} \left(\lambda \left(1 - \frac{\partial PL}{\partial G_i} \right) - b_i - \mu \left(\frac{1}{H_i} - \frac{n}{\sum_{j=1}^n H_j} \right) \right) \quad \dots\dots\dots (12)$$

パターン認識によるオンライン過渡安定度評価手法と、(11)式ないしは(12)式のセキュリティ制約下でのELDとを組み合わせ、経済性を考慮した予防制御方策の決定を次のアルゴリズムによって求めることができる。

《予防制御方策Ⅱ》

- step 1 ある想定事故について、特徴変数AE, TMの値を求める。
- step 2 $\phi(AE, TM) \geq 0$ の場合は次の想定事故へ、そうでなければ step 3 へ。
- step 3 特徴空間の点(AE, TM)から、識別関数 ϕ へ向けて垂線を引き、この線上の安定領域内の適当な点をターゲットとし、そのときのAEの値を AE_i とする。
- step 4 (11)式のラグランジュ乗数 μ の値を設定する。
- step 5 セキュリティ制約付きELDによって、新しい発電機出力 G_i^{new} を求める。
- step 6 G_i^{new} の発電機出力のもとで、想定事故から新しい非同期運動エネルギー AE^{new} を決定する。
- step 7 $AE^{new} < AE_i$ の場合、 G_i^{new} が最適出力。
 $AE^{new} > AE_i$ の場合、 μ の値を変更してstep 5へ戻る。

なお、(11)式の解は高速性の面で優れている。文献(2)の最適化手法によって行なうものとする。また、上記のアルゴリズム中、特徴変数AEのみをターゲット値として選んだのは次の理由による。即ち、一つには、AEの値は故障発生時の状態で決まるのに対して、TMは故障除去時の値で、その間の動揺方程式の数値積分による計算時間の損失を避けるためである。更には、step 3の ϕ への垂線を引くことも関連するが、AEとTMの値は安定度に関して相反する特性があるため、多数の想定事故について得られる(AE, TM)の値は、一般的な傾向として、ほぼ ϕ に直交した変化を示すことから、いずれか一方の値だけをターゲットに選んでもよい、という考えに基づいている。

以上、(AE-TM)の特徴空間を対象に議論してきたが、同様のアルゴリズムは(ϕ -TM)空間を対象とする場合にも適用可能であり、これを予防制御方策Ⅲと呼ぶものとする。なお、この場合は(12)式からも判るように、故障発生時の加速電力の算定は不要なので、

(11)式に比べて計算時間の短縮が期待される。

4. モデル系統での試算結果および考察

〈4.1〉パターン認識による過渡安定度評価

図3に考察の対象としたモデル系統⁽⁴⁾を、また、発電機の諸元を表1に示す。対象とする想定事故としては、過渡安定度にとって厳しい条件と考えられる発電機母線近傍での三相故障(線路2-3間の母線2近傍の故障)を考える。また、サンプルセットの構成における多数のサンプルベクトルの決定では、動揺方程式をstep-by-

図3 モデル系統 (10機 39母線系統)

Fig. 3. Model power system.

表1 発電機特性定数

Table 1. Characteristic constant of generators.

No.	H	X_d'	D	$\frac{b}{(\text{千円/MWh})}$	$\frac{c}{(\text{千円/MWh}^2\text{h})}$
1	42.0	0.031	4	7.958	0.00374
2	30.3	0.0697	9.75	6.022	0.00205
3	35.8	0.0531	10.0	5.933	0.00219
4	28.6	0.0436	10.0	6.176	0.00218
5	26.0	0.132	3.0	6.522	0.00251
6	34.8	0.05	10.0	5.998	0.00219
7	26.4	0.049	8.0	6.047	0.00254
8	24.3	0.057	9.0	6.005	0.00199
9	34.5	0.057	14.0	5.367	0.00229
10	500.0	0.006	10.0	5.670	0.00175

* 100MVA base, X_d' : 過渡リアクタンス, D: 制御係数

図4 負荷-AE, ϕ , TM 特性

Fig. 4. Characteristics of load-AE, ϕ , TM.

step に解き、故障発生後 1.6 秒の時点で発電機間の最大相差角が 180° を越える場合には不安定とみなした。なお、このデジタルシミュレーションでは、故障発生後、 $T_e=0.26$ 秒で線路両端のしゃ断器が動作するものとし、種々の系統状態、即ち、種々の負荷レベルと発電機出力分布の組み合わせを考え、合計 74 個のサンプルベクトルについて検討した。負荷には定インピーダンスモデルを用いた。

図 4 は同じ発電機出力パターンのもとで、負荷レベルを変えた場合の過渡安定度指標、AE、 ϕ 、TM の変化を示している。一般にある想定事故に対して、系統が重負荷時には不安定におちいり易いと考えられ、このとき、AE および ϕ の値も大きくなり、反対に TM の値は小さくなる。軽負荷の場合はこれと全く逆のことが言える。このことから、特徴空間の X 軸に AE または ϕ を、Y 軸に TM を採れば、図 5 の如く、X-Y 平面の左上部が安定領域、右下部が不安定領域となり、しかも、負荷レベルの変化に左右されない識別関数の設計が可能になる。図 5 は、安定を○印で、不安定を×印で表わした 74 個のサンプルベクトルの分布と、これに基づいて決定した識別関数を示しており、本手法の有効性が確かめられる。また、特徴空間として ϕ -TM を選んだ場合の同様の結果を図 6 に示す。

本モデル系統の特徴としては、表 2⁽⁴⁾に示されるよ

Fig. 5. Distribution of samples in AE-TM space.

Fig. 6. Distribution of samples in AE- ϕ space.

表 2 臨界故障除去時間⁽⁴⁾

Table 2. Critical clearing times.

line $i-j$	故障除去時間 (秒)	
	stable	unstable
2*-3	0.24	0.26
4*-14	0.22	0.24
6*-11	0.20	0.22
15*-16	0.22	0.24
23*-24	0.18	0.20
25*-26	0.18	0.20
28-29*	0.04	0.06

*: 3 ϕ 故障発生母線

うに、No. 9 機が単独で系統から脱調・分離する脱調モードを示す母線 29 至近端での三相故障に対して、その臨界故障除去時間が他の例に比べて著しく短いという特徴がある。このことから、いま考えている母線 2 至近端での故障においても、No. 9 機が重負荷の場合には、仮に系統全体の負荷レベルが低くても、No. 9 機は単独で他の発電機群と脱調・分離し易いと理解される(図 7 参照)。

図 8 は図 5 の 74 個のサンプルベクトル以外に、特に脱調が生じる場合には、図 7 の様になる負荷配分パターンに注目して得たサンプルセットを示している。このような、いわば特例に属するケースに対しては、図 5 の識別関数による安定判別は適当でなく、例えば図 8 の識別関数 ϕ' を用いるのが望ましいと言える。また、どのような系統状態のとき ϕ' を用いるのかの判断は、想定事故発生時の負荷レベルと No. 9 機の出力とに依存する(具体的には 6,150 MW を $\alpha=1$ としたとき、負荷レベル $\alpha=0.9$ までは ϕ を用いる。

図 7 動揺曲線 (No. 9 重負荷時の脱調パターン)

Fig. 7. Swing curves.

図 8 識別関数の選択

Fig. 8. Selection of discriminant function.

表 3 ターゲットにおける発電機出力

Table 3. Generator outputs.

unit No.	out put (MW)
1	247
2	573
3	650
4	832
5	508
6	650
7	560
8	340
9	730
10	1,100

図 9 不安定サンプルベクトルとターゲット (T)

Fig. 9. Unstable sample vectors and target.

それ以下の α で、かつ、No. 9 機の出力が 800 MW 以上の場合には ϕ' を用いる。

以上は、母線 2 至近端事故についての検討であるが、一般に、本手法による安定判別の精度を向上させるためには、多数のサンプルベクトルの収集と同時に特に上記のような特例に属するケースの有無の検討も含めて、系統特性の十分な把握が必要である。

〈4.2〉 経済性を無視した予防制御 ここでは、図 5 の 74 個のサンプルベクトルに対して、前章で示した予防制御方策 I の適用結果について述べる。

まずターゲットとしては、任意に図 9 に示す、 $AE_t = 34.8$ 、 $TM_t = 3,462$ の点を選んだ。ターゲットにおける発電機出力を表 3 に示す。図 9 は 74 個のサンプルベクトル中、不安定となるものだけを抽出したもので、 $\times$ 印で示される Alert な状態は予防制御によって、ターゲット近くまでセキュリティレベルが向上するよう発電機出力を変更するものとする。

図 10 は予防制御実施後のサンプルベクトルの分布を示す。例えば、図 9 の $\times$ 印は予防制御の実施によって図 10 の $\odot$ 印に移行し、このとき、発電機出力の変

図 10 予防制御方策 I によるセキュリティレベルの向上

Fig. 10. Security enhancement through preventive control strategy I.

表 4 予防制御方策 I 実施前後の発電機出力

Table 4. Generator outputs before and after preventive control.

unit No.	out put (MW)	
	$\otimes$	$\odot$
1	154	144
2	573	573
3	650	650
4	632	632
5	508	508
6	650	650
7	560	560
8	640	340*
9	830	830
10	1,000	1,300

* : target

(注) : 母線 30 をスラックスとする。

化は表 4 に示す通りである。なお、図 9 の不安定なサンプルベクトル 28 個は、予防制御によって、24 個は安定領域に、また、残り 4 個は不安定領域に留まっているが、これらは皆、ほぼ識別関数に近接しており、このことは一方で、設定した識別関数の妥当性を示している。また、ターゲットに多少余裕を加えれば (AE_t の値を大きくとれば) 容易にこれらの四つの点を安定領域に追込むことが可能である。筆者らの経験では AE および TM に関し識別関数から、各々、約 10% および 2% 以上の余裕をみた安定領域内にターゲットを設定するのが望ましい。

図 11 は図 6 の $\times$ 印について、前述の予防制御実施後の特徴変数の分布を ϕ - TM 空間で示している。

〈4.3〉 経済性を考慮した予防制御 いま、想定事故時の系統状態を図 12 の $\otimes$ 印の状態に選んだ場合について考える。〈3.2〉 節の予防制御方策 II によるとまず $\otimes$ 印の点から ϕ に向けて垂線を引き、その線上の任意の点に AE のターゲット値 AE_t を設定する。 ϕ と $\otimes$ 印点からの垂線の交点は、 $AE_t = 38.5$ となるの

図 11 予防制御方策 I 実施後のサンプルベクトル

Fig. 11. Sample vector after preventive control strategy I.

図 12 予防制御方策 II

Fig. 12. Preventive control strategy II.

図 13 セキュリティ制約による増分燃料費特性のシフト ($\mu=0.07$)

Fig. 13. Shift of incremental fuel cost curve by security constraint.

で、約 10% の余裕をとって、 $|AE_t|=34.8$ とする。

(4)式からも判るように、セキュリティ制約を考慮した場合の、各発電機の見掛け上の増分燃料費特性 (dF/dG) は、故障発生時の加速力の大きさと、ラグランジュ乗数 μ の値によって変り、例えば、この例では No. 8 機の特性は悪くなり、逆に No. 10 機の特

性は見掛け上改善されたものとして ELD を行なうことになる (図 13 参照。点線が見掛け上の増分燃料費)。

図 14 および表 5 は、 μ とコストおよび AE の関係を示し、コストとセキュリティレベルが相反する要求の関係にあることが判る。表 5 で modified cost は次のようにして求めた。即ち、火力の協調方程式を解く際に、文献 (2) の直流法潮流計算による最適化手法を用いたために、送電損失が多少控えめに算定される。そこで、見掛け上、例えば $\mu=0.01$ の場合はセキュリティ制約無しの場合の $\mu=0$ に比べてコストの少ない ELD となっているので、各 μ で送電損失を $\mu=0$ の場合にほぼ等しいと考えて、コストを再計算したものが、modified cost である。

図 14 から $\mu=0.07$ で $AE=34.7$ となり、 $AE < AE_t$ の関係を満足するので、予防制御策としては、図 12 の◎印の点に相当する発電機出力にシフトさせることによって、系統を Alert な状態を脱して、安全な平常状態に移行させることができる。表 6 は発電機

図 14 μ と AE および燃料費の関係

Fig. 14. Relation between μ and AE, modified fuel cost.

表 5 μ と AE およびコストの関係
Table 5. AE and fuel cost for various values of μ .

μ	cost (10^3 yen)	loss (MW)	AE	ϕ	modified cost	TM
0.00	46,084	48.0	47.0	110	46,084	
0.01	46,068	45.0	44.0	108	46,090	
0.02	46,066	42.5	41.7	106	46,107	
0.03	46,074	40.6	39.8	104	46,129	
0.04	46,089	39.2	38.2	103	46,154	
0.05	46,108	37.9	36.9	101	46,183	
0.06	46,131	36.9	35.7	100	46,214	
0.07	46,155	36.0	34.7	98.9	46,244	3,489

表 6 発電機出力の変更 ($\mu=0 \rightarrow 0.07$)

Table 6. Modification of outputs ($\mu=0 \rightarrow 0.07$)

unit No.	output (MW) $\mu=0$	output, after preventive control ($\mu=0.07$)	$(\Delta P_i/H_i - \sum \Delta P_i / \sum H_i) \times 100$
1*	153	186	0.99
2*	573	639	4.82
3*	650	672	4.92
4	632	613	6.48
5*	508	532	2.98
6*	650	662	5.10
7	560	525	5.86
8	640	477	15.29
9	830	729	9.40
10*	1,000	1,152	-3.25

*: 予防制御によって出力増となる発電機を示す。
最終項は位相角重心系からみた故障発生時の発電機加速力。

図 15 予防制御方策Ⅱの step5 の計算

Fig. 15. Detail of step 5 in preventive control strategy II.

表 7 予防制御実施前後のコスト, AE, Φ および TM の値Table 7. Cost, AE, Φ , and TM Before and after preventive control.

予防制御の種類	modified cost (千円/h)	AE	Φ	TM	備考
予防制御前	46,084	47.0		3,315	不安定
予防制御方策Ⅰ	46,503	31.5		3,510	安定
"Ⅱ	46,244	34.7		3,489	"
"Ⅱ'	46,269	34.3		3,469	"
"Ⅲ	46,247		98.0	3,490	"

AE_I=34.7, Φ _I=98.4

出力シフトの詳細を示している。なお、この場合、セキュリティレベルの向上によって損なわれるコストの損失を〈4.1〉節の予防制御を含めて表7に示す。表7で、予防制御方策Ⅱ'とあるのは、予防制御方策Ⅱのアルゴリズム中、加速電力を常に一定とした場合を示しており、これは、step5で(11)式から G_i^{new} を決定する際、図15(a)の手順を避けて、同図(b)の手順によって出力を決定する方法に相当する。なお予防制御方策Ⅲについても方策Ⅱと同様な結果が得られ、手順としては、図15(b)で $\Delta P_i=1$ として G_i^{new} を決定する。最後に計算時間についてみると北海道大学大形計算機センターの HITAC M-200 (を使用)、制御方策Ⅰで約 0.9 秒、Ⅱ'およびⅢでは一つの μ の値につき約 5.6 秒、Ⅱでは同じく約 31.2 秒を要した。これらの計算量の主要部分は Newton-Raphson 法の潮流計算であり各種の高速潮流計算法⁽⁷⁾⁽⁸⁾を用いれば、ほぼ 1/5~1/10 程度の計算時間の短縮が期待される。

表7から、経済性を考慮する場合とそうでない場合の予防制御では経済的損失に大きな差が現われる(制御方策Ⅰは、他の方策と比べ約 2.5 倍の損失となる)ことが判る。また、経済性を考慮する場合については

方策Ⅱ'およびⅢ、とⅡとの経済的損失の差は少ないことから、高速性に優れる、Ⅱ'およびⅢの制御方策の方が実用上の面からは有効であると考えられる。

5. 結 言

二次元のパターン認識による過渡安定度評価手法⁽¹⁾に基づいて、現在の系統状態が Alert な状態にあると判断される場合に採るべき予防制御方策について述べた。経済性を無視する場合、考慮する場合について検討を行ない後者においては過渡安定度に関するセキュリティ制約付きの経済負荷配分の決定法を示した。

パターン認識法と直流法による潮流最適化手法の適用により、直観的、および物理的に理解・判断が容易で、かつ、高速なセキュリティ予防制御策の決定が可能なることをモデル系統への適用により明らかにした。

本論文では、一つの想定事故に対する予防制御方策を述べたが、実際には、その結果生じる新しい系統状態が他のすべての想定事故に対しても安定なときに、初めて予防制御策が確定されることになる。また、仮に、不安定となる想定事故が見つかる場合は、本論文の予防制御方策を繰り返し適用することによって、最終的な予防制御策の決定が期待できる。

現実の系統は、大部分のじょう乱に対して、過渡安定度が維持されるように設計・運用されていると考えられるが、どんな予防制御を行なっても、その結果に対して不安定となる他の想定事故が必ず存在する場合には、予防制御実施そのものも含めて、制御の対象となる想定事故の決定が新たな問題となろう。また、送電線路などにおける過負荷発生の有無を考えた予防制御方策の決定も重要な問題であり、これらは今後の検討課題と考えられる。

(昭和 59 年 4 月 18 日受付, 同 59 年 7 月 4 日再受付)

文 献

- (1) 山城・小池:「電力系統のオンライン過渡安定度評価手法」電学誌 B 104, 561 (昭 59-9)
- (2) 山城:「直流法による電力潮流最適化」電学誌 B 97, 679 (昭 52-11)
- (3) C. J. Tavora & O. J. M. Smith: "Characterization of Equilibrium and Stability in Power Systems", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, PAS-91, No. 3, p. 1127 (1972)
- (4) T. Athey, et al.: "Transient Energy Stability Analysis" *Systems Engineering for Power*, U.S. DOE (1979)
- (5) M. Sato: "A Pattern Recognition Approach for Transient Security Assessment", *Purdue Univ. TR-EE*, 79-9 (1978)
- (6) 斎藤・小泉:「大電力系統におけるセキュリティ自動監視システムの開発」電学誌 95, 128 (昭 50-2)
- (7) 高橋・関根:「フロー交流法による潮流計算」電学誌 88, 1921 (昭 43-10)
- (8) 岩本・田村:「非線形性を保存した高速潮流計算法」電学誌 B88, 192 (昭 53-2)