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

正員 北 裕 幸 (北海道大)

正員 西 谷 健 一 (北海道大)

正員 長 谷 川 淳 (北海道大)

On-line Preventive Control for Power System Transient Stability Based on the Energy Function Method

Hiroyuki Kita, Member, 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 (ISMAC) system, in which both of the preventive and the emergency control basically have important roles. Static security control strategies, which deal with the steady state after the contingency is cleared, have been studied by various researchers including the authors. However, the basic research on dynamic security control, which deals with the transient state immediately after the contingency has occurred, is seldom found. This paper presents a method of dynamic preventive control for the transient stability considering plural contingencies collectively and coordinating the requirements from both security and economy flexibly.

In the preventive control for the transient stability, it is necessary to judge the transient behaviors properly and also evaluate the security quantitatively for a postulated contingency. The authors define a security index which represents absorbing capacity of post-fault kinetic energy based on the energy function method. The index has several advantages of being possible to calculate the values fast, being easy to understand its physical meanings, etc. The effectiveness of the proposed method is ascertained through numerical examples for model power systems.

キーワード：電力系統，過渡安定度，予防制御，エネルギー関数法

1. ま え が き

近年の電力系統の大規模複雑化および社会の電力への依存度の増加に伴い，電力系統運用におけるセキュリティ監視制御機能の充実がますます重要となってきた。しかし現状では，主としてオンラインセキュリティ監視機能の実用化にとどまっており，総合的なシステムとして監視と制御とを一体化するまでには至っていないように思われる。このような問題意識の下で，著者らは総合セキュリティ監視制御 (ISMAC)

システムを構想し⁽¹⁾，開発を進めている。このシステムでは，基本的には，高精度で収集されたオンラインデータに基づき，系統内の不測の事故を想定して，常時から（例えば，20～30分ごと）予防制御が実施される。また，この予防制御では対処できないような過酷事故に対しては，その緊急制御方策を個別に計算し記憶しておき，実際にそのような過酷事故が発生したときには，直ちにその制御を実行する。具体的な被制御項目としては，潮流，電圧，周波数，安定度など，様々なものが考えられるが，それらは事故除去後の定

常状態における静的なもの（潮流，電圧，定態安定度など）と事故直後の過渡状態における動的なもの（周波数，過渡・中間領域安定度など）とに大別することができる。著者らは，その各々に対し基本となる制御論理を確立すると共に，将来的にはこれらを統合化し，本システムをより有用なものとする必要があると考えている。

静的項目を対象とする制御に関しては，その基本的な概念やアルゴリズムが各方面で既に検討されてきており⁽²⁾，著者らもPQ分離に基づく予防および緊急制御の一手法を提案している⁽³⁾⁽⁴⁾。一方，動的項目を対象とする制御に関しては，高速な安定化対策を実現する緊急制御手法の報告はなされているものの⁽⁵⁾，予防制御，特に過渡安定度を対象としたものは，現在までのところ，単一の想定事故のみに着目した手法⁽⁶⁾があるに過ぎない。常時行われる予防制御においては，いかなる不測の事故発生に対しても系統が安定であるように制御することが望ましく，また完全な安定化が困難な場合でも，すべての想定事故を考慮して系統全体をできるだけ安全側へ移行させておくことが必要である。しかし，事故の発生はそう頻繁に起こるものではないから，経済性をも同時に評価しつつ方策を決定すべきである。以上のことから本論文では，複数の想定事故を一括して考慮でき，更に経済性との協調も柔軟に行い得る過渡安定度予防制御手法を提案する。

ところで，過渡安定度予防制御においては，予想される事故発生に対して系統が安定であるか否かを適切に判定し，その安全性の度合を定量的に評価する（セキュリティ評価）ことが必要である。また複数の事故を考慮する場合には，演算の高速性も要求される。本論文では，エネルギー関数法の考え方⁽⁷⁾⁻⁽⁹⁾をベースとし，事故除去後における運動エネルギーの吸収能力に着目したセキュリティ評価指標を提案する。この指標は高速に計算可能であると共に，指標自体のもつ物理的意味が明確であるなどの特長を有しているため，オンラインでの過渡安定度予防制御において有効な指標と考えられる。

以下，本論文では，第2章においてエネルギー関数法に基づくセキュリティ評価指標を定義し，第3章でこの指標を用いた過渡安定度予防制御問題の定式化と最適化のための具体的なアルゴリズムについて述べる。第4章では，重大事故をあらかじめ選択しておくことにより，予防制御計算の高速化を図る手法について説明する。第5章ではモデルシステムを用いた数値例によって本手法の理解を深めると共に，手法の実用可能性について検証する。

2. エネルギー関数法に基づくセキュリティ評価指標

電力系統の予防制御は，系統内で発生した事故ができるだけ他へ波及しないように，あらかじめ系統状態を安全側へ移行させておくものである。従って，系統のある運転点が予想される事故発生に対してどの程度望ましい運転点であるかを，過渡安定度の面から総合的かつ定量的に評価する（セキュリティ評価）ことが必要となる。また，本論文の予防制御のように複数の事故を考慮する場合には，演算の高速性も要求される。

このセキュリティ評価に関しては，既に二次元の特徴空間を用いたパターン認識による手法が検討されている⁽⁶⁾が，オフラインサンプルを求める際に膨大な計算量を必要とするなど，実用化にあたってはいくつかの問題点を残している。一方，エネルギー関数を用いて，系統の安定性が維持され得る最大の事故継続時間，すなわち臨界故障除去時間を高速に計算する手法も開発されている⁽⁷⁾⁻⁽⁹⁾。本論文では，このエネルギー関数法の考え方をベースとしたセキュリティ評価を行う。その場合の具体的な評価指標としては，単に臨界故障除去時間を用いることも考えられるが，ここでは事故除去時の運動エネルギーと臨界故障除去時のそれとの差による新しい指標を定義する。この指標は，不安定な事故の場合に，事故除去後に系統が吸収できない余分な運動エネルギーを表しており，指標自体のもつ物理的意味が把握しやすいという利点をもつ。また，制御変数（具体的には発電機出力）の変化に対して滑らかであり，その感度も比較的容易に計算できるという特長ももっている。以下では，文献(9)で提案されている高速な臨界故障除去時間の計算方法を簡単に説明すると共に，それに基づく具体的なセキュリティ評価指標の定義を行う。

〈2・1〉 臨界故障除去時間の計算 文献(9)においては，付録1に示すような系の定式化とエネルギー関数に基づき，以下のステップで臨界故障除去時間を計算する手法が提案されている。

(1) ステップ1 (付3)式を用いて事故軌跡に沿ってポテンシャルエネルギー(V_p)と運動エネルギー(V_k)を計算する。

(2) ステップ2 V_p が極大となったとき，その V_p を臨界エネルギー $V_{p\max}$ とする。

(3) ステップ3 $V_{p\max} = V(t_{cr})$ となる t_{cr} を探し，これを臨界故障除去時間とする。

このように文献(9)の手法では，事故軌跡に沿った

一回の微分方程式の計算で臨界故障除去時間を求めることができ、またその精度も実用上十分であることが確かめられている。ここで注意しなければならないことは、この手法は事故除去後の第一波動揺に対する安定性を解析するものであるということである。過渡領域の安定度は、通常数秒程度の間の動揺を対象とし、厳密には発電機の飽和や負荷の特性などをも考慮した詳細な解析が必要と考えられる。本論文では、第一波動揺で安定ならば、その後は制御器などの効果が期待できるので安定化可能であろうと仮定し、第一波動揺のみを抑制するための予防制御を考えている。

〈2・2〉 セキュリティ評価指標の定義 本論文では、次式のようなセキュリティ評価指標を提案する。

$$SI = \sum_{j=1}^{NC} W_j (V_{kcj} - V_{kcrj})^2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$W_j = \begin{cases} 0; & t_{cj} \leq t_{crj} \\ \alpha_j; & t_{cj} > t_{crj} \end{cases} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 V_{kc} は事故除去時 (t_c) の運動エネルギーすなわち事故継続中に発電機に蓄えられる運動エネルギーを表している。また、 V_{kcr} は臨界故障除去時の運動エネルギー、すなわち事故除去後に系統が吸収し得る最大の運動エネルギーを表している。これら二つの値は、各々前節のステップ1で計算し格納されている値を取出してくればよい。 α_j は、オフラインで経験的に決定される重みであるが、通常は1.0に設定する。更に、 NC は想定事故の総数である。

この指標は、すべての想定事故に対して安定であれば0で、そうでないときは、不安定な事故の除去後に吸収できずに残る余剰運動エネルギーの2乗和を表すことになる。すなわち、余剰運動エネルギーの大きさにより系統のセキュリティを評価していることになる。不安定になると予想される事故が実際に発生した場合には、脱調に至らないよう直ちに何らかの緊急制御を施すことが必要であるが、その際にはこのような余剰運動エネルギーが発生しないような、あるいはそれを吸収させ得るような方策をとるのが一般的である⁽¹⁰⁾。従って、不安定であっても余剰運動エネルギーが小さいほど事故後の緊急制御が容易となり、安全性は高い状態と考えられる。ただし、同じ余剰運動エネルギー量を持っている事故でも、例えばその発生地点により緊急制御の容易さあるいは事故の起こりやすさなどが異なることが経験的に知られている場合には、事故ごとに α_j を適当な値に設定しこれを考慮することができる。

また2乗和の形で定式化しているのは、余剰運動エ

ネルギーの大きな事故、すなわち緊急制御を施しても脱調に至るような過酷事故を、たとえ他の事故に対するセキュリティが多少悪化するようになって、強く抑制しようという考えに基づくものである。

3. 提案する過渡安定度予防制御アルゴリズム

〈3・1〉 過渡安定度予防制御問題の定式化 常時の予防制御では、発生した場合の影響は大きいが発生確率の比較的小さい事故を対象としているため、経済性を全く無視して制御を実施することは得策ではない。従って、過渡安定度予防制御問題は、経済性を考慮に入れたうえで、系統ができるだけ安定となるような、つまり前章で定義したセキュリティ評価指標ができるだけ小さくなるような火力発電機の制御量を決定する問題として記述できる。

経済性と過渡安定度という、いわば異質ともみなせる目標の協調を図る方法としては、主として二つの考え方が⁽¹¹⁾ある。一つは、いずれか一方の目標（例えば、過渡安定度）をある望ましいレベル内に保つという制約条件の下で、残りの目標を最大限追求する考え方である。他の一つは、両方の目標をある重みづけを行うことにより一つの評価関数にまとめ、これを最適化する考え方である。本論文においては後者を採用する。これは、前者の方法では系統規模の増大に伴い想定事故の数が増し、制約条件を満足するような解が存在しない可能性が大きくなるためである。

従って、セキュリティ指標に運用コストを加え、次式のような目的関数 (PI) を定義する。

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

ここで、 C は電力系統内の発電機の総燃料費である。また p_c は、経済性とセキュリティとの兼ね合いをとるための重み係数を表している。ただし、この具体的な値は、系統規模や運用状態などを十分考慮し、詳細なオフライン計算などから、いわば経験的に決定しなければならない。その場合、一つの方針として、重負荷、中負荷、軽負荷に相当する p_c の値をそれぞれ用意し、状況に応じて切換え使用する方法が考えられよう。

(3)式の目的関数を種々の制約条件の下で制御変数に関して最小化し、最適な予防制御量が算出される。制御可能な変数としては、一般に発電機出力の指定値や発電機の端子電圧など、種々のパラメータが考えられるが、本論文ではこのうち効果が大きいと考えられる発電機出力 (= 事故前の機械的入力) に注目し、これを制御変数とする。つまり、予防制御問題を次のよ

うな非線形最適化問題として定式化する。

$$\min PI(\mathbf{P}_m) \dots\dots\dots (4)$$

$$\text{subj. to } h(\mathbf{P}_m)=0 \dots\dots\dots (5)$$

$$\mathbf{P}_{m \min} \leq \mathbf{P}_m \leq \mathbf{P}_{m \max} \dots\dots\dots (6)$$

ただし、 $h=0$ は事故前の状態すなわち平常状態における需給平衡条件を表している。また、 $\mathbf{P}_m$ は平常状態の発電機出力ベクトルで、 $\min, \max$ は各々下限および上限を意味している。

〈3・2〉 最適化手法 前節で定式化した問題を適当な数値計画法を用いて最小化する。ここで、運用コスト (C) やセキュリティ指標 (SI) は制御変数の変化に対して滑らかな関数であるため、最小化に際しては通常の微分可能な関数に対する最適化手法をそのまま適用できる。本論文では、アルゴリズムが簡単でしかも大域的収束性が保証されている最急降下法を採用することとしたが、その場合の具体的な最適化アルゴリズムは次のとおりである。

(1) ステップ1 〈2・1〉節のアルゴリズムにしたがって高速に V_{kcr} , V_{hc} を計算し、 PI の値を求め、繰返し回数を表すインデックス l を1とおく。

(2) ステップ2 PI の各発電機出力 (スラック発電機を除く) に関するこう配 ∇PI を計算する。この具体的な計算方法については次節で説明する。

(3) ステップ3 次式に従って発電機出力の値を更新する。

$$\mathbf{P}_m^l = \mathbf{P}_m^{l-1} - \beta [\nabla PI]^T \dots\dots\dots (7)$$

ただし、 β はステップ2で求められたこう配において、 PI を発電機出力の上下限制約内で最小とする値で、二次内挿法により求める。また、 $\mathbf{P}_m^l$ は、スラック発電機を除いた発電機出力ベクトルを表している。

(4) ステップ4 $\mathbf{P}_m^l$ を用いて潮流計算を行い、更に V_{kcr} , V_{hc} を計算し、 $PI(\mathbf{P}_m^l)$ の値を求める。このように、発電機出力を更新するごとに潮流計算を実行すれば平常状態の需給平衡条件が満足される。

(5) ステップ5 収束判定条件：

$$|PI(\mathbf{P}_m^l) - PI(\mathbf{P}_m^{l-1})| < \varepsilon \dots\dots\dots (8)$$

を満足していれば終了。そうでなければ $l=l+1$ としてステップ2へ戻る。ただし、 ε は十分小さな正の値である。

また、スラック発電機出力に対する制約は、その制約逸脱量という形で目的関数に加えた拡張目的関数を導入し、それに付加されている重みを徐々に増加させていくことによって満足させる。

〈3・3〉 こう配の計算 目的関数の発電機出力に関するこう配は次式で表現される。

$$\frac{dPI}{d\mathbf{P}_m} = \frac{\partial PI}{\partial \mathbf{P}_m} + \frac{\partial PI}{\partial \mathbf{P}_{ms}} \frac{d\mathbf{P}_{ms}}{d\mathbf{P}_m} \dots\dots\dots (9)$$

ただし、 $\mathbf{P}_{ms}$ はスラック発電機の出力を表している。ここで、 $[d\mathbf{P}_{ms}/d\mathbf{P}_m]$ は潮流計算用に構成されている PQ 分離線形モデルと相反定理の考え方を適用することによって高速に計算される〔文献(3)参照〕。従って、(9)式の計算においては、 $[\partial PI/\partial \mathbf{P}_m]$ ($[\partial PI/\partial \mathbf{P}_{ms}]$ も同様) を如何にして求めるかということが問題となる。説明を簡単にするため、この項の i 番目の発電機に関する要素のみを抽出し、更に(1)～(3)式の関係を用いると以下のように表される。

$$\begin{aligned} \frac{\partial PI}{\partial P_{mi}} = & p_c \frac{\partial C}{\partial P_{mi}} + 2 \sum_{j=1}^{NC} W_j (V_{kcj} - V_{kcrj}) \\ & \times \left(\frac{\partial V_{kcj}}{\partial P_{mi}} - \frac{\partial V_{kcrj}}{\partial P_{mi}} \right) \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

右辺第1項の値は、 C の関数形が具体的に与えられると容易に計算できる。また第2項も、適当な近似を行えば、偏微分の項が次式のように比較的簡単な代数演算形となるため (具体的な導出過程を付録2に示す)、その値を高速に計算することが可能である。

$$\frac{\partial V_{kj}}{\partial P_{mi}} = \left\{ \frac{P_{mi} - P_{eij}}{M_i} - \frac{\sum_{i=1}^n (P_{mi} - P_{eij})}{M_T} \right\} t^2 \dots\dots\dots (11)$$

上式において、 t は事故発生時点からの時刻を表している。従って、 $t=t_{cj}$ のとき、 V_{kj} は V_{kcj} に、 $t=t_{crj}$ のとき、 V_{kj} は V_{kcrj} に対応する。

4. 重大事故選択による予防制御計算の高速化

前章で述べた予防制御アルゴリズムでは、目的関数の値を求める際、すべての想定事故に対して臨界故障除去時間を計算することが必要であった。この計算は各事故ごとに微分方程式を解くため、系統規模の増大に伴い膨大な計算時間になると予想される。一方、(2)式からわかるように、安定な事故に対しては重みの値が0で、目的関数の値には寄与しない。従って、事故発生に対して系の安定度が十分維持されると予想される事故は、最適化の過程で制御変数を更新するごとに逐一臨界故障除去時間を計算しなくてもよいと考えられる。

本章では、この考えに基づき本アルゴリズムの高速化を図る手法について説明する。

〈4・1〉 重大事故の選択⁽¹²⁾ 臨界故障除去時間の計算を必要とする事故 (重大事故と呼ぶ) を適切に選択するため、全想定事故をその臨界故障除去時間によって安全、警戒、危険の三つの集合に分類する。ただ

し、各集合は次式のように定義される。

$$\left. \begin{array}{ll} t_c' < t_{cr} & \cdots \text{安全集合} \\ t_c \leq t_{cr} < t_c' & \cdots \text{警戒集合} \\ t_{cr} \leq t_c & \cdots \text{危険集合} \end{array} \right\} \cdots \cdots \cdots (12)$$

ここで、 t_c' は次式により計算する。

$$t_c' = \gamma t_c \cdots \cdots \cdots (13)$$

ただし、 γ は1より大きい正の数である。

(12)式から明らかなように、制御前に警戒集合に属している事故は、一応安定ではあるが危険集合に比較的近く、制御による系統状態の変化に伴い、危険集合内に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、制御前の系統状態で危険集合内にある事故はもちろん、警戒集合内にある事故をも選択することが望ましいと考えられる。また、 γ の値を適当に調整することによって、どの程度までを警戒集合とするかというオペレータの意図を反映させることができる。

〈4・2〉 予防制御計算の高速化手法 前節の重大事故選択に基づき、以下に述べるようなアルゴリズムで予防制御計算の高速化を図る。まず、予防制御を施す前の初期状態で、全想定事故に対して臨界故障除去時間を計算し、重大事故を選択する。次に、第3章のアルゴリズムに従い、選択された事故のみを対象として(4)～(6)式を解く。得られた解に対して無視した事故の安全性をチェックし、それらがすべて安定であるならば計算を終了する。そうでなければ、再び重大事故の選択を行い同様の操作を繰返す。ただし、新た

図1 予防制御の高速化アルゴリズム

Fig.1. An algorithm for the fast preventive control calculation.

な重大事故の集合は前に選択されていた事故をも含めるように構成する。このようにすれば、最悪の場合でも全部の事故を選択した段階で、計算が終了することになる。以上のアルゴリズムの全体の流れを図1に示す。

もっとも、この手順を繰返していても必ず高速に解が得られるという保証はなく、上記のように全部の想定事故を考慮せねばならないこともあり得る。どの程度計算の手間が省けるかは、あらかじめ知ることできないが、常時から予防制御による運用が行われている場合は、制御による系統状態の変化はそれほど大きくはなく、かなりの効果が期待できるものと考えられる。

5. 数 値 例

提案した手法の有効性を検証するため、図2に示すようなCIGRE 7機10母線系統⁽¹³⁾を用いてシミュレーションを行った。想定事故としては、極めて過酷である母線近傍における送電線の三相地絡故障を考える。また、本シミュレーションではすべての想定事故に対して故障発生後、0.12秒で事故が除去されるものと仮定する。表1は各想定事故に対する臨界故障除去時間と余剰運動エネルギーを、表2はそのときの各発電機出力の値を示している。ただし、表中の臨界故障除去時間はシミュレーション法により求めた厳密な値である。これらの表において、ケース1は最経済で運用されている初期状態、ケース2およびケース3は各々セキュリティのみを考慮して($p_c=0.0$)およびセキュリティと経済性を同時に考慮して($p_c=0.03$)予防制御を行った状態である。また、すべての事故に対し重み係数(α)の値を1.0とし、更に(8)式の収束判定定数(ε)および(13)式の係数(γ)を各々0.01および1.3と設定した。この表から、予防制御を施すことによって不安定となる事故ケース(表1中の下線部

図2 CIGRE 7機系統

Fig.2. 7 machine CIGRE test system.

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

事故ケース $i-j$	臨界故障除去時間 (秒)		
	ケース1	ケース2	ケース3
1*-3	0.09 (2.84)	0.13 (-)	0.11 (0.80)
1 -3*	0.21 (-)	0.32 (-)	0.27 (-)
1*-4	0.09 (2.84)	0.12 (-)	0.11 (0.80)
1 -4*	0.20 (-)	0.33 (-)	0.26 (-)
2*-3	0.33 (-)	0.26 (-)	0.29 (-)
2 -3*	0.22 (-)	0.32 (-)	0.27 (-)
2*-10	0.33 (-)	0.26 (-)	0.29 (-)
3*-4	0.22 (-)	0.32 (-)	0.27 (-)
3 -4*	0.20 (-)	0.34 (-)	0.27 (-)
3*-9	0.22 (-)	0.32 (-)	0.28 (-)
4*-5	0.21 (-)	0.33 (-)	0.27 (-)
4 -5*	0.23 (-)	0.20 (-)	0.21 (-)
4*-6	0.21 (-)	0.34 (-)	0.27 (-)
4*-9	0.21 (-)	0.34 (-)	0.27 (-)
4*-10	0.21 (-)	0.34 (-)	0.27 (-)
6 -8*	0.09 (0.80)	0.21 (-)	0.16 (-)
7*-8	0.03 (3.98)	0.11 (0.36)	0.08 (1.59)
7 -8*	0.05 (1.53)	0.19 (-)	0.14 (-)
8*-9	0.11 (0.29)	0.22 (-)	0.18 (-)
COST(\$/h)	9046.9	9147.3	9085.7
計算時間 (S)	-	4.0	5.2

注) * 事故ケースの $i-j$ における *印は事故母線を示す。
() 内の値は余剰運動エネルギー (pu) である。

表 2 発電機出力の値
Table 2. Values of generator outputs.

発電機 (母線) 番号	発電機出力 (MW)		
	ケース 1	ケース 2	ケース 3
1	798.01	653.98	717.91
2	234.02	299.86	265.95
3	351.02	401.84	382.85
4	390.10	449.03	426.64
5	429.00	477.32	459.70
6	351.02	395.90	382.44
7	626.01	480.00	529.82

分) の数が減少し、また不安定であっても余剰運動エネルギーが減少し、セキュリティが向上していることがわかる。また、経済性を考慮すると無視した場合に比べて不安定となる事故が多少増加するが、総燃料費は減少している。つまり、この運用状態は最経済の運用状態と最安定の運用状態の中間の状態である。図 3 は p_c の値によって運用コストおよび余剰運動エネルギーがどのように変化するかを示したものである。当然のことながら、 p_c の値が大きくなるにつれて、予防制御方針は経済性を重視した状態に近づいてくるといふことがわかる。

更に、図 4 は重大事故選択による効果を示すため、種々の γ の値に対してその計算時間を表したもので

図 3 p_c に対する最適解の変化
Fig. 3. Optimal solutions versus p_c .

図 4 γ に対する計算時間の変化
Fig. 4. Computation time versus γ .

ある。ただし、いずれも p_c の値を 0.03 に設定しており、その場合の最適解は等しい点に収束している。また図中の破線は、最初からすべての想定事故を対象として計算を行った場合の計算時間を示している。この図から明らかなように、 γ を適切な値に設定し重大事故をあらかじめ選択しておくことによって、大幅に高速化が図られることがわかる。また、 γ の値が異なるのにもかかわらず計算時間が等しい場合があるのは、最初の選択で全く同じ事故が選ばれ、しかも 2 回目の選択においてどちらも新たに危険集合に入る事故がなく計算を終了したためである。

次に、提案した手法の実規模系統への適用可能性を評価するために、IEEE 118 母線系統 (発電機 18 台、想定事故 358 ケース) を用いてシミュレーションを行った。実運用においては常時から予防制御を実行することになるため、制御前の初期点はほとんどの場合、最適解の近傍に存在していると考えられるが、ここではセキュリティ改善効果が顕著に現れるよう、最適解から比較的離れた最経済運用点を初期状態とした。また、 p_c, γ の値をそれぞれ 0.03, 1.3 に設定した。得られた結果は、上述の小規模系統に対する結果と大きく

く変わるものではなかった。すなわち、初期状態では不安定となる事故が9ケース存在していたのに対し、予防制御を施すことによりすべての事故が安定範囲内に抑え込まれた。また、重大事故としては最初に26ケース（危険9、警戒17）が選択されたが、2回目には、新たに危険集合内に入る事故がなかったため計算を終了した。この場合の計算時間は約18分であった。上述のように、本シミュレーションでは比較的過酷な条件を想定しているため、予防制御を仮に20～30分ごとに行うものとするれば、この計算時間は実運用上許容できる範囲内にあるといえよう。

ところで、計算時間をアルゴリズムの部分ごとに詳細に検討したところ、重大事故選択のための想定事故の分類および(4)～(6)式を解く際の目的関数値の計算が全体の計算時間の大部分を占めていることが明らかになった。この計算は主に、すべてのあるいは幾つかの想定事故に対する臨界故障除去時間の計算であり、ここではこれを一事故ずつ順次計算している。しかし、個々の事故の計算では、他の事故に対する結果を待つ必要がないため、適切な並列計算を行えば、更なる高速化が期待できるものと考えられる。

6. 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、事故後の過渡安定度を対象とした予防制御手法を提案した。また、モデル係数を用いた数値例により本手法がオンラインでも十分に機能できるという見通しを得た。提案手法の特長は以下のとおりである。

(1) 本論文の予防制御は、事故中に蓄えられる余剰運動エネルギーを減少させることを目的としているため、事故後の安定化制御の容易さという点において実際の方策が得られる。

(2) 系統全体のセキュリティ向上を図るために複数の想定事故を制御対象とし、更に経済性との協調をも考えている。

(3) 重大事故をあらかじめ選択しているので、計算は効率的かつ高速に実行できる。

本論文では、平常状態における制約条件として需給平衡条件および発電機出力の上下限制約のみを考えていたが、実際には送電線潮流や負荷母線電圧などに関する上下限制約および定態安定度に関する制約をも考慮する必要がある。線路潮流などに関する制約は、既に著者らが提案した静的な被制御項目を対象とする予防制御手法の中では考慮されており、この考え方をそのまま適用すれば容易に拡張することができる。一

方、定態安定度に関しても、本論文の予防制御が比較的大きな擾乱に対する過渡安定度を向上させるものとなっていることから、結果的にほぼ維持されていると考えてもよいと思われる。事実、本シミュレーションでは、定態安定度を逸脱するケースはなかった。

ところで、著者らは、本手法と並行して、高速な過渡安定度判定が可能であるパターン認識を用いた予防制御の基本的な検討も行っている⁽¹⁴⁾。過渡安定度予防制御をより有用なものとするためには、両手法の特徴を最大限に生かした総合的なアルゴリズムの開発が必要であると思われる。

最後に、本研究を行うにあたって貴重な御意見をいただいた北見工業大学 山城 迪教授および北海道大学工学部 田中英一助手に心から感謝の意を表する次第である。また、数値計算には北海道大学大型計算機センター HITAC M-682 H を使用したことを付記し、関係各位に感謝の意を表する。

(平成元年 11 月 24 日受付)

文 献

- (1) J. Hasegawa, E. Tanaka, T. Yamada & D. J. Li: "Fundamental Research on Integrated Security Monitoring and Control (ISM/C) Systems", *Int. J. Energy Syst.*, 8, 173 (1988)
- (2) 例えば, D. T. Sun & R. R. Shoults: "A Preventive Strategy Method for Voltage and Reactive Power Dispatch", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, PAS-104, 1670 (1985)
- (3) 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)
- (4) 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)
- (5) 例えば, 西田・武田: 「電力系統の緊急制御におけるエネルギー法に基づいた制御量決定アルゴリズム」, 同上 B, 102, 653 (昭 57-10)
- (6) 山城・奈良・小池: 「パターン認識による電力系統のセキュリティ予防制御」, 同上 B, 105, 7 (昭 60-1)
- (7) 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)
- (8) N. Kakimoto, Y. Ohsawa & M. Hayashi: "Transient Stability Analysis of Electric Power System via Lur'e Type Liapunov Function, Part I, New Critical Value for Transient Stability", *Trans., IEE of Japan*, 98, 63 (1978)
- (9) 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」, 電学論 B, 105, 873 (昭 60-10)
- (10) 川畑・木戸: 「電力系統の直列コンデンサおよび直列抵抗による過渡安定度制御」, 同上 B, 99, 253 (昭 54-4)
- (11) 長谷川・小池: 「新しい観点になった電力系統の最適負荷配分問題」, 同上 B, 94, 241 (昭 49-5)
- (12) 奈良・山城・長谷川: 「電力系統の電圧・潮流に関するセキュリティ評価指標」, 同上 B, 107, 373 (昭 62-8)
- (13) M. A. Pai: *Power system stability* (1981) North Holland Publishing Company
- (14) 永野・北・西谷・長谷川: 「パターン認識に基づく電力系統の動的予防制御」, 電気学会電力技術研資, PE-89-77 (平元)

付 録

1. 系の定式化とエネルギー関数

Athay らは、同期平衡という概念から、位相角中心の座標を用いて、次のような系の定式化とエネルギー関数を提案している⁽⁷⁾。

$$\dot{\theta}_i = \omega_i \dots\dots\dots(\text{付 1})$$

$$\dot{\omega}_i = M_i^{-1}(P_{mi} - P_{ei} - R_i P_{coa}) \dots\dots\dots(\text{付 2})$$

ただし、 $P_{coa} = \sum_{i=1}^n (P_{mi} - P_{ei})$: 総電力ミスマ

ツチ、 $M_T = \sum_{i=1}^n M_i$, $R_i = M_i/M_T$, θ_i : 第 i 発電

機の位相角中心系における内部電圧の位相角、 ω_i : 第 i 発電機の位相角中心における角速度、 M_i : 第 i 発電機の慣性定数、 R_i : 第 i 発電機のミスマツチ振り分け定数、 P_{mi} : 第 i 発電機の機械的入力 (= 事故前の発電機出力)、 P_{ei} : 第 i 発電機の電氣的出力、 n : 発電機総数

この定式化に基づくエネルギー関数は次式となる。

$$\begin{aligned} V = & \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i \omega_i^2 - \sum_{i=1}^n P_i (\theta_i - \theta_i^s) \\ & - \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n B_{ij} E_i E_j (\cos \theta_{ij} - \cos \theta_{ij}^s) \\ & + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \int_{\theta_i^s + \theta_j^s}^{\theta_i + \theta_j} G_{ij} E_i E_j \cos \theta_{ij} d(\theta_i + \theta_j) \\ & \dots\dots\dots(\text{付 3}) \end{aligned}$$

ただし、 E_i : 第 i 発電機の内部電圧の大きさ、 θ_i^s : 安定平衡点での θ_i , $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$, $Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}$: 縮小アドミタンス行列の (i, j) 要素、 $P_i = P_{mi} - G_{ii} E_i^2$

(付 3) 式において第 1 項が運動エネルギー (V_k) で、第 2 項以下がポテンシャルエネルギー (V_p) である。

2. (11) 式の導出

まず、事故除去までの短時間であれば事故中の加速電力はほぼ一定と考えてもよいので⁽⁵⁾、事故 j におけるある時点 t の角速度 ω_{ij} は (付 2) 式より、

$$\omega_{ij} = \frac{P_{mi} - P_{ej} - R_i P_{coaj}}{M_i} t \dots\dots\dots(\text{付 4})$$

となる。ただし、 P_{ej} や P_{coaj} は、ともに事故発生時の値である。ゆえに、運動エネルギー V_{kj} は、

$$V_{kj} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} M_i \omega_{ij}^2$$

$$\begin{aligned} = & \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \frac{(P_{mi} - P_{ej})^2}{M_i} t^2 \\ & - \frac{1}{2} \left\{ \sum_{i=1}^n (P_{mi} - P_{ej}) \right\}^2 \frac{t^2}{M_T} \dots\dots\dots(\text{付 5}) \end{aligned}$$

となる。このとき、 P_{mi} の微小変化に対する P_{ej} や t_{crj} の変化は比較的小さいと考えられるため、これを 0 と仮定すると、運動エネルギーのこう配は (11) 式となる。

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、電力システムの解析・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。電力システム工学、特に電力システムの状態推定、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、同助授を経て、60 年 4 月同教授、現在に至る。主として、電力システムの計画・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。工学博士。日本 OR 学会、IEEE 会員。