過渡・中間領域安定度を考慮した電力系統の 動的予防制御手法

正員 北 裕 幸 (北海道大)
正員 佐 藤 直 洋 (北海道電力)
正員 西 谷 健 一 (北海道工大)
正員 長谷川 淳 (北海道大)

Dynamic Preventive Control Strategies for Power Systems Considering Transient and Mid-Term Stabilities

Hiroyuki Kita, Member (Hokkaido University), Naohiro Sato, Member (Hokkaido Electric Power Company), Ken-ichi Nishiya, Member (Hokkaido Institute of Technology), Jun Hasegawa, Member (Hokkaido University)

This paper proposes a new dynamic preventive control strategy for maintaining power system security, considering both of transient and mid-term stabilities. While the authors have already presented preventive control strategies for transient stability, a new problem has occurred recently regarding mid-term instability in which some generators lose synchronism after 10 second or more from a fault clearance. It becomes clear that the cause of the instability is mainly post-contingency dynamic steady state instability. First, this paper shows a preventive control strategy for improving the mid-term stability using a dominant eigenvalue of post-contingency equilibrium point. Further, this paper presents a unified dynamic preventive control algorithm which can maintain both stabilities together. In this algorithm, the time domain for each stability problem is considered appropriately and the difference between the classical model and the detailed model is analyzed in detail. The effectiveness of the proposed method is examined by numerical examples for a model system.

キーワード：電力系統，予防制御，過渡安定度，中間領域安定度，固有値法，エネルギー関数法

1. ま え が き

電力系統の運用においては、広範囲に及ぶ事故波及を極力抑制し、系統を常に安全な状態に維持することが必要である。事故波及の主要因としては、事故後の定常状態における送電線や機器の過負荷、母線の過不足電圧などの静的な要因と、過渡状態における安定度崩壊などの動的な要因とが考えられる。著者らは、事故発生前の運用点をあらかじめ安全な状態に移行させる予防制御方式に関する検討を行っており、既に事故後潮流計算に基づく静的要因を対象とした予防制御（静的予防制御と呼ぶ）について検討した⁽¹⁾。また、動的要因に対する予防制御（動的予防制御と呼ぶ）についても、特に事故後1～2秒程度の過渡安定度維持を目的とした制御手法を開発している⁽²⁾⁽³⁾。

ところで、電力系統においては過渡的には安定であるが、その後、数秒から数十秒後に発電機が脱調するいわゆる中間領域不安定現象があることが指摘されている。従っ

て、動的予防制御をより適切に実行するためには、過渡領域の安定化のみでは必ずしも十分とはいえず、中間領域安定度をも同時に考慮して制御方を決定することが必要である。中間領域安定度についての一般の性質はほぼ明らかにされているが⁽⁴⁾⁽⁵⁾、この不安定現象は主に、事故後平衡点の動態安定度が維持されていないことに起因するものと考えられている。

本論文では、中間領域安定度の予防制御に対して、動態安定度判別のための固有値法をベースに考えることとし、まず予防制御のための一般的な定式化を検討する。基本的には、文献(5)～(7)の固有値制御と同様、事故後系統における実部最大の固有値を制御の目安とし、事故前の動作状態（発電機有効電力、発電機端子電圧）を調整することによって、これをできる限り安定側に移行させようとするものである⁽⁶⁾。更に、検討した中間領域安定度予防制御手法を従来の過渡安定度予防制御と統合することを考え、扱う時間領域や解析モデルの違いを考慮した動的予防制御の

統一アルゴリズムを提案する⁽⁹⁾。これにより、過渡領域から中間領域に至る安定度を、総合的に向上させるような予防制御方策を得ることが可能となる。また、数値計算例により提案手法の有効性を検証するとともに、今後に残されたいいくつかの問題点を指摘する。

2. 中間領域安定度予防制御の定式化

〈2・1〉 固有値法に基づくセキュリティ指標 予防制御の実行にあたっては、まず現在の運用点が中間領域安定度の観点からどの程度望ましい運転点であるかを定量的に、しかも系統全体として評価できるスカラ指標を定義することが必要となる（セキュリティ評価）。一般に、事故後の系統状態は、過渡時間領域で安定であれば、その後の调速機などの制御動作によって発電機の機械的入力と電氣的出力の平衡がとれた、いわゆる周波数平衡点の近傍に到達する。中間領域不安定現象は、主にこの周波数平衡点の動態安定度が維持されていないことに起因しているため、安定判別は固有値法を用いて行うことができる。すなわち、系統ダイナミクスをある程度詳細にモデル化した非線形微分方程式[例えば、第4章の(12)～(17)式]を、着目する周波数平衡点の周りで線形化し、そのシステム行列の実部最大の固有値（支配的固有値と呼ぶ）の符号により判定を行う。セキュリティ評価ではこの手法をベースとし、支配的固有値実部の大きさに着目した次式の指標、 TSI_M を定義する。

$$TSI_M = \sum_{i=1}^{NC} \omega_{Mi} \lambda_i^2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 λ_i ：事故 i の周波数平衡点における支配的固有値実部、 $\omega_{Mi} : \lambda_i > 0$ （不安定）のときのみ正值をもつ重み係数、 NC ：想定事故総数

(1)式は、すべての想定事故に対して支配的固有値実部が負であれば零で、そうでなければ、不安定事故に対する支配的固有値の重み付き二乗和を表すことになる。各々の想定事故は、少なくとも動揺モードが不変であれば、不安定であっても支配的固有値実部が大きいほどより短い時定数で急速に発散すると考えられるため、本指標は中間領域不安定性の相対的な厳しさを示している。従って、予防制御において指標の値をできる限り小さくするような調整を行えば、完全な安定化が困難な場合でも脱調までの時間を全体として長くすることができ、その意味でより安全な状態へ移行させることができることとなる。なお、 ω_{Mi} は通常は全想定事故に対して同じ値（例えば1.0）に設定するが、重点的に制御すべき事故ケースがあらかじめ知られているときには、その事故に対する値を他よりも多少大きめに設定することとなる。

〈2・2〉 事故後平衡点の算定 事故後の周波数平衡点は、前節の微分方程式、 $\dot{x} = f(x)$ の右辺を零とおいた平衡方程式を満足する点であり、適当な数値計算法によって求めることができる⁽⁴⁾。例えば、最も基本的なニュートン法を適用した場合、次式の修正を f の値が十分小さくな

るまで繰り返せばよい。

$$x^{k+1} = x^k + \Delta x^k \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\Delta x^k = -[\partial f / \partial x] x^{k-1} f(x^k) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし、事故後平衡点は通常複数個存在し、セキュリティ評価で重要となる平衡点、すなわち実際に事故後の系が向かう平衡点を得るためには、ニュートン法の初期値の選定に十分注意する必要がある。一般に、発電機端子電圧の変動はAVRによりかなり抑制されており、また中間領域安定性の対象とするような過渡的に問題のない送電線事故の場合には、機械的入力の変化もそれほど大きくないと予想されることから、事故後平衡点の発電機電圧と機械的入力、事故前の指定条件に比較的近い値になると考えられる。本論文では、事故前の指定条件（負荷母線ではインピーダンス値）の下で、事故除去後の系統構成に対する潮流計算を実行し、得られた母線電圧の大きさと位相角から従属的に定まる⁽¹⁰⁾発電機状態変数 (x) を初期値とする。このようにして計算された初期状態変数値では、系統構成が事故の前後で変化する場合には平衡方程式を満足しないので、当然、上記の修正計算が必要となる。また、事故後潮流計算としては、高速化のため、既に提案されている想定事故解析手法⁽¹¹⁾を用いる。

なお、ニュートン法により収束解を求めようとするとき、解が不安定平衡点であるときには難収束となる場合があり、また逆行列演算を含むため計算負担が大きくなることが考えられる。このため本論文では、(2)、(3)式の修正計算を1回のみ行うこととし、これに伴う固有値の誤差については、安定判別のしきい値（通常は零）を負側に設定し、多少厳しめに判定することで対処する。

以上の議論の妥当性については、数値計算例の中で定量的に検証する。

〈2・3〉 問題の定式化 上記の検討に基づき、中間領域安定度に対する予防制御問題を、次のような非線形最適化問題として定式化する。

$$\min TSI_M(u) = \sum_{i=1}^{NC} \omega_{Mi} (\lambda_i - \lambda^*)^2$$

$$\text{subj. to} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\lambda_0 < 0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$u_{\min} \leq u \leq u_{\max} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$h(u) = 0 \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 TSI_M ：しきい値を付加したセキュリティ評価指数、 λ^* ：セキュリティ評価の誤差を考慮するための負のしきい値、 $\omega_{Mi} : \lambda_i > \lambda^*$ のときのみ正值をもつ重み係数、 λ_0 ：事故前の支配的固有値実部、 u ：制御変数ベクトル、 $h=0$ ：制御後の需給平衡条件、 $\min, \max$ ：下限および上限

しきい値の具体的な値としては、例えば前述の修正計算後の f の値を目安として設定することも可能であるが、ここでは簡単のため、経験的にオフラインで定めるものとする。また、本予防制御においては、発電機の動作状態を変更して安定化を図ることを考え、スラックを除く発電機

の機械的入力および発電機端子電圧を制御変数とする。

3. 過渡・中間領域安定度を考慮した予防制御手法

過渡安定度や中間領域安定度を維持するため各々の予防制御を独立に実行すると、過渡的には安定となっても事故後の動態安定度が維持されずに中間領域不安定現象が現れる場合、あるいは動態安定度は維持されても過渡的に不安定となってしまう場合が考えられる。このような不都合を解消するためには、両要因を同時に考慮して制御方を決定する必要がある（統合化予防制御と呼ぶ）。本章では、文献(2)の過渡安定度予防制御手法と、上で定式化された中間領域安定度予防制御を用いて、系統を過渡的にも中間領域的にも安定化する予防制御手法について説明する。

〈3・1〉 過渡安定度予防制御手法の概要 文献(2)の予防制御では、エネルギー関数法に基づいた次式の過渡安定度セキュリティ指標、 TSI_T を提案している。

$$TSI_T = \sum_{i=1}^{NC} \omega_{Ti} (W_{kci} - W_{kcri})^2 \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 W_{kci} ：事故除去時の運動エネルギー、
 W_{kcri} ：臨界故障除去時の運動エネルギー、 ω_{Ti} ：
 $W_{kci} > W_{kcri}$ （不安定）のときのみ正値をもつ重み係数、 NC ：想定事故総数

この指標は、すべての想定事故が過渡的に安定であれば零であり、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重み付き二乗和を表すことになる。つまり、中間領域安定度に対する指標と同様、系統全体の不安定度を示しており、予防制御ではこの指標をできる限り小さくすることを考えればよい。

ところで、上記の運動エネルギーは、一般に過渡リアクタンス背後電圧および機械的入力を事故の前後で不変とするいわゆる古典的モデルに基づき計算されるため〔付録(1)参照〕、故障に伴う磁束減衰効果（過渡リアクタンス背後電圧の変動に相当）を考慮できず、多少安定側に判定されることが知られている⁽¹²⁾。すなわち、事故中に蓄えられる運動エネルギー（ W_{kc} ）が、事故除去後に吸収しうる最大の運動エネルギー（ W_{kcr} ）より小さいと判定されても、実際には不安定で脱調してしまう場合がある。詳細な発電機モデルに対するエネルギー関数法も提案されている⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾が、ここでは計算の簡略化のため、磁束減衰の影響を等価的な運動エネルギー（ W_k^* ）のかたちで経験的に求めておき、古典的モデルで得られた W_{kcr} の値からその分を減じてセキュリティを評価することを考える。この妥当性については、〈2・2〉節の検討と一緒に数値例の中で詳述する。

〈3・2〉 統合化予防制御に対するセキュリティ指標

統合化予防制御においては、過渡・中間領域安定度の両面からセキュリティを評価できる指標が必要となるが、その際、過渡的な動揺が収まった後に中間領域安定性が問題となるという、安定度の時間的なシーケンスを考慮に入れるべきである。すなわち、過渡安定度が維持されていない

事故は、事故後の平衡状態が存在し得ないため、中間領域安定度を考慮する必要がなく過渡安定度指標のみで評価を行える。一方、過渡的に安定な事故は、本論文のように不安定性の度合でセキュリティ指標を定義すると、中間領域安定度の指標のみが陽に現れてくる。結局、両方の安定度を考慮したある想定事故に対するセキュリティは、過渡安定度が維持されているか否かに依存して、どちらか一方の指標で評価することができる。

〈3・3〉 統合化予防制御の定式化 統合化予防制御の制御量は、上記のセキュリティ指標を用いて計算することができるが、その場合の具体的な計算法として、次の二つのアプローチが考えられる。

(1) 最小化すべき目的関数を各事故に対するセキュリティ指標の総和とすることにより、最初から両方の安定性を考慮して制御方を計算する。

(2) まず過渡安定度予防制御計算を実行し、その後過渡的に安定な事故に対してのみ、中間領域安定度を維持するための制御方を計算する。

(1)では、制御によって過渡的に不安定な事故が安定化されても（すなわち過渡安定度指標の値は零）、その後直ちに中間領域安定度指標が値をもつ可能性があり、目的関数は不連続となる。一方、(2)では、最初の過渡安定度予防制御で安定化されなかった事故が、その後の中間領域安定度予防制御により更に不安定性を増すことになるが、それ以外の事故については、両方の安定性ともなるべく維持しようとする制御方が得られる。本論文では、できる限り多くの事故をすべての領域について安定化することを目的とし、(2)のアプローチを採用する。従って、この問題は次のような2ステップの最適化問題として定式化される。

〔ステップ1〕 過渡安定度制御問題

目的関数：

$$TSI_T(u) = \sum_{i=1}^{NC} \omega_{Ti} SI_{Ti}^2 = \sum_{i=1}^{NC} \omega_{Ti} \{W_{kci} - (W_{kcri} - W_k^*)\}^2 \dots\dots\dots (9)$$

制約条件：(5)～(7)式

ここに、 SI_{Ti} ：磁束減衰効果を考慮した事故 i の過渡安定度セキュリティ指標、 TSI_T ：磁束減衰効果を考慮した系統全体の過渡安定度セキュリティ指標、 ω_{Ti} ： $W_{kci} > W_{kcri} - W_k^*$ のときのみ正値をもつ重み係数

〔ステップ2〕 中間領域安定度制御問題

目的関数：

$$TSI_M(u) = \sum_{i \in S} \omega_{Mi} SI_{Mi}^2 = \sum_{i \in S} \omega_{Mi} (\lambda_i - \lambda^*)^2 \dots\dots\dots (10)$$

制約条件：(5)～(7)式、

$$W_{kci} - (W_{kcri} - W_k^*) < 0, i \in S \dots\dots\dots (11)$$

ここに、 SI_{Mi} ：事故 i に対する中間領域安定度セキュリティ評価指標、 S ：過渡的に安定な事故の

集合

中間領域安定度予防制御は、過渡安定度が維持されている場合に限り意味をもつものであるため、制御対象としている事故が過渡安定度を逸脱しないよう、(11)式の制約条件が必要となる。

〈3・4〉 最適化手法 前節で定義された両方の問題とも、適当な数理計画法を用いて比較的容易に解くことができるが、計算の効率化を図るため各々の問題を発電機出力を制御変数とする P 問題と、発電機電圧を制御変数とする V 問題の二つの部分問題に分け、これを交互に繰り返し解くことで最適化を行う。すなわち、各部分問題で安定化（目的関数の値が零）されれば終了、そうでなければ目的関数がある正の値に収束するまで解き、次の部分問題へと進む。 $P \cdot V$ の各部分問題間で目的関数がある値以上改善されなくなれば、安定な解はないとして終了する。なお、部分問題の最適化は、制約条件を目的関数に組み入れた無制約最適化問題を構成し、最急降下法を用いて解く手法を用いる。このとき、特に過渡安定度制御問題に対しては、詳細モデルに対する臨界故障除去時間を用いて、 $W_{kcr} - W_k^*$ の値を定加速度近似することで、最急降下の方向を簡単な代数演算によって求めることができる⁽²⁾。

ところで、最適化の過程で目的関数（すなわちセキュリティ指標）の値を求める際に、逐一全想定事故に対して運動エネルギーおよび固有値を計算することは、計算時間の観点から好ましくない。そこで、最適化の前に、「不安定な事故」および「一応安定であるが不安定となりやすい事故」を選択し、その事故のみを考慮して最適化計算を行うこととしている⁽²⁾。

4. 数値計算例

〈4・1〉 対象とする発電機および制御系モデル 本論文では、発電機は四次、制御系については一次遅れの AVR と調速機からなる次式のモデル⁽⁴⁾を用いるが、更に詳細なモデルを考えることも可能である。

（発電機モデル）

$$\dot{E}_{di}' = -[E_{di}' - (X_{qi} - X_{di}')I_{qi}]/\tau_{q0i} \quad (12)$$

$$\dot{E}_{qi}' = [E_{fdi} - E_{qi}' - (X_{di} - X_{di}')I_{di}]/\tau_{d0i} \quad (13)$$

$$\dot{\omega}_i = [P_{mi} - (I_{di}E_{di}' + I_{qi}E_{qi}') - D_i(\omega_i - \omega_0)]/M_i \quad (14)$$

$$\delta_i = \omega_i - \omega_n \quad (15)$$

ここに、発電機 i に対して、 E_{di}' 、 E_{qi}' ：内部誘起電圧（過渡リアクタンス背後電圧）の d 軸、 q 軸成分、 ω_i ：回転子角速度の同期速度からの偏差、 δ_i ：同期速度で回転する仮想的基準ベクトルから見た同期機横軸の角度、 ω_n ：相角基準にとった発電機の回転子角速度、 X_{di} 、 X_{qi} ： d 軸、 q 軸同期リアクタンス、 X_{di}' ： d 軸過渡リアクタンス、 E_{fdi} ：界磁電圧、 D_i ：制動定数、 I_{di} 、 I_{qi} ： d 軸、 q 軸電機子電流、 P_{mi} ：機械的入力、 τ_{d0i} 、 τ_{q0i} ： d 軸、 q 軸開路過渡時定数、 M_i ：慣

性定数

ただし、(15)式は基準発電機 n には適用されない。

（制御系モデル）

$$\dot{E}_{fdi} = -[K_{ai}(V_{ti} - V_{ti0}) + (E_{fdi} - E_{fdi0})]/T_{ai} \quad (16)$$

： AVR

$$\dot{P}_{mi} = -[K_{gi}(\omega_i - \omega_0) + (P_{mi} - P_{mi0})]/T_{gi} \quad (17)$$

： 調速機

ここに、 i 番目の発電機に対して、 V_{ti} ：端子電圧、 K_{ai} 、 T_{ai} ：AVR のゲインおよび時定数、 K_{gi} 、 T_{gi} ：調速機のゲインおよび時定数、添字 0：設定値、基準値

〈4・2〉 モデルシステムの概要 本数値計算では、図 1、表 1 に示されるような 7 機 25 母線モデル系統⁽⁴⁾（2 回線構成）を用いる。想定事故としては、送電線の母線端付近で三相地絡故障が発生し、0.16 秒後に故障除去、その後、一回線送電を継続するという状況を仮定する。すなわち、事故の総数は各送電線に対して 2 ケース、計 52 ケースを考慮する。表 2 は、想定した初期状態に対する発電機指定値とその上下限値を示している。この状態における支配的固有値実部の値は $-4.4 \times 10^{-5} \text{ rad}^{-1}$ で、事故前の動態安

図 1 モデルシステム
Fig. 1. Model system.

表 1 発電機定数

Table 1. Constants of generators.

発電機	G1, G7	G2, G4, G6	G3, G5
容量 (MVA)	1280	483	590
X_d (pu)	2.02	1.80	2.11
X_q (pu)	1.86	1.72	2.11
X_d' (pu)	0.358	0.285	0.280
τ_{d0} (s)	9.1	3.7	4.2
τ_{q0} (s)	0.460	0.480	0.565
H (s) (=50πM)	117.25	15.825	34.20
D (pu)	2.0	2.0	2.0

各々の発電機容量ベース

表 2 発電機指定値および上下限值

Table 2. Specified and upper-lower values of generators.

発電機	発電機出力 (pu)			発電機端子電圧 (pu)		
	指定値	下限値	上限値	指定値	下限値	上限値
G1	10.75	10.00	12.80	1.050	0.950	1.060
G2	3.00	2.50	4.83	1.024	0.950	1.060
G3	5.25	4.50	5.90	1.024	0.950	1.060
G4	3.00	2.50	4.83	1.024	0.950	1.060
G5	3.00	2.50	5.90	1.024	0.950	1.060
G6	4.00	3.50	4.83	1.024	0.950	1.060
G7	11.00	9.00	12.80	1.024	0.950	1.060

100 MW ベース, G7 はスラック発電機

表 3 支配的固有値と安定性

Table 3. Dominant eigenvalues and stability.

事故番号	事故線路 (事故母線)	$\lambda(\times 10^{-4} \text{ rad}^{-1})$ (順位)	シミュレーション法 (脱調時間 (s))
19	L10 (B 8)	43.71 (1)	中間不安定 (21.36)
20	L10 (B19)	43.71 (1)	中間不安定 (26.51)
31	L16 (B11)	21.21 (3)	中間不安定 (33.98)
32	L16 (B23)	21.21 (3)	中間不安定 (37.52)
29	L15 (B11)	3.48 (5)	中間不安定 (63.60)
30	L15 (B12)	3.48 (5)	中間不安定 (74.24)
41	L21 (B15)	2.78 (7)	中間不安定 (16.25)
33	L17 (B12)	2.29 (8)	中間不安定 (71.81)
34	L17 (B22)	2.29 (8)	中間不安定 (75.16)
17	L 9 (B 8)	1.18 (10)	中間不安定 (11.52)
18	L 9 (B11)	1.18 (10)	中間不安定 (14.43)
23	L12 (B 9)	0.81 (12)	中間不安定 (120.38)
24	L12 (B21)	0.81 (12)	中間不安定 (129.74)
27	L14 (B10)	0.37 (14)	中間不安定 (192.62)
28	L14 (B21)	0.37 (14)	中間不安定 (182.42)
3	L 2 (B 2)	0.14 (16)	中間不安定 (154.50)
4	L 2 (B19)	0.14 (16)	中間不安定 (148.46)
35	L18 (B13)	-0.12 (18)	安定
.	.	.	以下, 安定
.	.	.	
.	.	.	

過渡的に不安定な事故を除く

定度は保持されている。

〈4・3〉 安定度評価指数の有効性の検討 ここではまず、〈2・2〉、〈3・1〉節で述べた安定度評価の妥当性を、上記の状態を用いて定量的に検証する。

(1) 平衡点簡易算定法に基づく中間領域安定度評価

表 3 は、事故後 300 秒までの動特性シミュレーションによる厳密な安定性と、〈2・2〉節の平衡点算定法に基づいて計算された支配的固有値実部の値を示したものである。この表から、実際に中間領域不安定現象を示す 17 ケースの事故は、相対的にほかよりも大きな固有値をもっており、この不安定現象の存在をかなりの確に評価していることがわかる。特に、事故後百数十秒後に脱調に至るようなケースも、数値シミュレーションによらず適切に把握できるという点は注目に値する。なお、この例の場合には、固有値実部の正負と実際の安定性とが厳密に対応しており、得られる固有値そのものの信頼性もかなり高いことが理解でき

表 4 余剰運動エネルギーと安定性

Table 4. Surplus kinetic energy and stability.

事故番号	事故線路 (事故母線)	余剰運動エネルギー (順位)	シミュレーション法 (脱調時間 (s))
1	L 1 (B 1)	0.987 (1)	第一波脱調 (1.00)
2	L 1 (B17)	0.977 (2)	第一波脱調 (1.07)
13	L 7 (B 7)	0.100 (3)	第一波脱調 (1.52)
14	L 7 (B25)	0.000 (4)	第一波脱調 (1.68)
11	L 6 (B 6)	-0.439 (5)	第一波脱調 (0.94)
5	L 3 (B 3)	-0.484 (6)	第一波脱調 (0.94)
6	L 3 (B20)	-0.629 (7)	第一波脱調 (1.17)
26	L13 (B20)	-0.805 (8)	第一波脱調 (1.28)
21	L11 (B 9)	-0.987 (9)	安定
23	L12 (B 9)	-0.987 (9)	安定
42	L21 (B16)	-1.409 (11)	第一波脱調 (2.89)
25	L13 (B10)	-1.467 (12)	安定
.	.	.	
.	.	.	以下, 安定または
.	.	.	中間領域不安定

る。つまり、誤判定を避けるためのしきい値としては、零近辺の値を与えることで、十分であると考えられる。

(2) 古典的モデルによる過渡安定度評価 表 4 は、古典的モデルに基づいて求められる余剰運動エネルギー ($W_{kc} - W_{kcr}$) の値を、表 3 と同様の形式で示したものである。ただし、極端な過渡不安定性を示す事故、すなわち同期平衡の立場での安定平衡点が存在しない事故 (L8, L23, L24 における事故) は、本手法では臨界エネルギーが求まらないため、解析の対象から除外している。このようなケースについては、例えば、パターン認識法に基づく過渡安定度評価⁽³⁾を用いるなど、何らかの特別の考慮が必要になると考えている。この表から、余剰運動エネルギーの値は実際に第一波で不安定となる事故 (9 ケース) を、大きさの順位で 11 位までの中にすべて含んでおり、詳細モデルで過渡不安定となる事故を、潜在的に評価している様子がわかる。また、磁束減衰効果を無視したことにより、脱調する幾つかの事故が安定と判定されている (指標の値が負) が、オフラインで W_k^* の値を適切に設定すれば、この影響を容易にクリアできることもわかる。この例の場合、 W_k^* として 1.5 程度の値が適当と考えられる。なお、〈3・4〉節でも述べたように、予防制御計算においては詳細モデルに対する臨界故障除去時間をも同時に算定する必要性から、数値計算上は、 $W_{kcr} - W_k^*$ の値を実在の運動エネルギーと対応させて評価する〔付録 (2) 参照〕。

〈4・4〉 予防制御の実行に関する検討 提案した動的予防制御手法の有効性を検証するため、表 2 の状態に対して実際に制御方策を計算した。想定事故としては、前述の極端な過渡不安定事故を除く全 49 ケースを対象とした。 W_k^* および λ^* の値は、前節の考察に基づいて各々 1.5、 $-1.0 \times 10^{-5} \text{ rad}^{-1}$ とした。また、過渡安定度については、電源線付近の事故による不安定を強く抑制するというポリシーを採用して、(9) 式の重みを L1~L6 の事故 (事故番号 1~12) に対しては 0.1, L7 (同 13, 14) は 0.2, 他の事故はすべて 0.01 に設定した。一方、中間領域安定度

に関する(10)式の重みは、特別の意味づけを与えずに、制御効果が明確に示されようよう適当な値に設定した(L2, L7, L21 (事故番号3, 4, 13, 14, 41, 42)は0.01, 他はすべて0.1)。なお、固有値計算は高速化のため内田により提案されたS行列法⁽¹⁵⁾を用いる。

得られた結果を表5, 表6に示す。表5は提案法を用い

表5 制御後の発電機出力および電圧の値

Table 5. Real power outputs and voltage magnitudes of generators after control.

発電機	ステップ1		ステップ2	
	発電機出力 (pu)	発電機端子電圧 (pu)	発電機出力 (pu)	発電機端子電圧 (pu)
G1	10.949	1.05032	10.268	1.05032
G2	3.494	1.02402	3.638	1.02402
G3	5.135	1.02401	5.297	1.02401
G4	3.397	1.02402	3.542	1.02402
G5	4.146	1.02401	4.288	1.02401
G6	3.607	1.02401	3.756	1.02401
G7	9.254	1.02401	9.211	1.02401

て計算された各ステップでの予防制御方策を示しており、表6は各々の状態に対する各事故のセキュリティ評価指標[(9), (10)式の SI_r および SI_M]と、動特性シミュレーションによる厳密な安定性を示したものである。ただし、表中には、初期状態, ステップ1, ステップ2の少なくとも一つの状態で、指標の値が正となる事故のみを記している(それ以外の事故はすべて安定性が維持されている)。まず初期状態では、第一波脱調となる事故が9ケースあり、過渡安定度的にかなり不安全な状態である。このため、提案手法はまずステップ1の予防制御を評価し、過渡安定度を向上させるような制御方策を求めた。その結果、過渡的に不安定であった、#13, #14, #42の事故のセキュリティ指標が負となり第一波脱調が抑制された。また、#11の事故も、指標の値は零となっていないが、数値シミュレーションでは安定化されている。この不一致は、不安定な事故が安定と判定されることを避けるため、 W_k^* を多少厳しめに与えたことによる。

ところで、この状態では、中間時間領域で脱調を引き起

表6 各状態におけるセキュリティ指標

Table 6. Security indices in each condition.

	事故番号	事故送電線 (母線端)	初期状態		ステップ1		ステップ2	
			SI_r	シミュレーション法 〔脱調時間 (s)〕	SI_r	シミュレーション法 〔脱調時間 (s)〕	SI_r	シミュレーション法 〔脱調時間 (s)〕
過渡安定度指標の推移	1	L 1 (B 1)	1.22	T (1.00)	1.32	T (0.89)	1.01	T (1.28)
	2	L 1 (B17)	1.08	T (1.07)	1.16	T (0.96)	0.90	T (1.55)
	3	L 2 (B 2)	-0.36	M (154.50)	0.29	安定	0.32	安定
	5	L 3 (B 3)	1.03	T (0.94)	0.87	T (0.99)	1.20	T (0.91)
	6	L 3 (B20)	0.94	T (1.17)	0.60	T (1.34)	0.73	T (1.14)
	11	L 6 (B 6)	1.14	T (0.94)	0.32	安定	0.79	安定
	13	L 7 (B 7)	0.84	T (1.52)	-0.61	安定	-0.95	安定
	14	L 7 (B25)	0.76	T (1.68)	-0.82	安定	-1.12	安定
	21	L11 (B 9)	0.56	安定	-0.50	安定	-0.91	安定
	23	L12 (B 9)	0.56	M (120.38)	-0.50	M (136.11)	-0.91	安定
	26	L13 (B20)	0.70	T (1.28)	0.38	T (1.62)	0.73	T (1.25)
	42	L21 (B16)	0.16	T (2.89)	-0.67	M (215.08)	-0.58	安定
中間領域安定度指標の推移			SI_M	シミュレーション法 〔脱調時間 (s)〕	SI_M	シミュレーション法 〔脱調時間 (s)〕	SI_M	シミュレーション法 〔脱調時間 (s)〕
	3	L 2 (B 2)	0.24 {	M (154.50)	-0.22 {	安定	-1.92 {	安定
	4	L 2 (B 9)		M (148.46)		安定		安定
	17	L 9 (B 8)	1.28 {	M (11.52)	0.65 {	M (12.51)	0.02 {	M (90.80)
	18	L 9 (B11)		M (14.43)		M (15.21)		M (95.32)
	19	L10 (B 8)	43.81 {	M (21.36)	42.63 {	M (21.58)	-1.17 {	安定
	20	L10 (B19)		M (26.51)		M (26.86)		安定
	23	L12 (B 9)	0.91 {	M (120.38)	0.63 {	M (136.11)	-1.75 {	安定
	24	L12 (B21)		M (129.74)		M (144.97)		安定
	27	L14 (B10)	0.47 {	M (192.62)	0.78 {	M (147.35)	-1.74 {	安定
	28	L14 (B21)		M (182.42)		M (140.26)		安定
	29	L15 (B11)	3.58 {	M (63.60)	2.25 {	M (68.40)	-1.65 {	安定
	30	L15 (B12)		M (74.24)		M (78.64)		安定
	31	L16 (B11)	21.31 {	M (33.98)	9.25 {	M (37.88)	-1.41 {	安定
	32	L16 (B23)		M (37.52)		M (41.59)		安定
	33	L17 (B12)	2.39 {	M (71.81)	1.41 {	M (87.04)	-1.69 {	安定
	34	L17 (B22)		M (75.16)		M (90.34)		安定
	41	L21 (B15)	2.88 {	M (16.25)	98.34 {	M (168.45)	-1.57 {	安定
	42	L21 (B16)		T (2.89)		M (215.08)		安定

注) 表中の T, M は各々の過渡的不安定 (第一波脱調), 中間領域不安定を示す

文 献

- (1) 北 裕幸・田中英一・長谷川 淳：「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)
- (2) 北 裕幸・西谷健一・長谷川 淳：「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)
- (3) 北 裕幸・水野隆裕・西谷健一・長谷川 淳：「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」, 同上 B, 111, 611 (平 3-6)
- (4) 大山 力・芹澤康夫：「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」, 同上 B, 107, 229 (昭 62-5)
- (5) 横山明彦・関根泰次・前田隆文：「固有値制御のための系統動作点に対する固有値感度解析」, 同上 B, 107, 181 (昭 62-4)
- (6) 田村信次・鈴木 勇・杉浦徳廣・小岩克己・小柳 薫・佐藤 茂・下田俊雄：「固有値感度解析による系統動態安定度の予防制御方式」, 電気学会電力技術研資, PE-86-125 (昭 61)
- (7) 内田直之・高崎昌洋・吉村健司：「電力系統の安定運用のための予防制御論理(2)」, 電力中研研報, T86039 (昭 53)
- (8) 佐藤直洋・北 裕幸・西谷健一・長谷川 淳：「PV 分離型最適化による事故後系統状態の固有値予防制御に関する研究」, 電気学会電力技術研資, PE-91-28 (平 3)
- (9) 佐藤直洋・北 裕幸・西谷健一・長谷川 淳：「過渡・定態安定度に対する電力系統予防制御の統合化に関する検討」, 平 4 電気学会全大, No. 1133
- (10) 関根泰次：電力系統過渡解析理論(昭 59) オーム社
- (11) 李 東健・田中英一・長谷川 淳：「PQ 分離等価回路による高速想定事故解析手法」, 電学論 B, 107, 9 (昭 62-1)
- (12) 「電力系統の安定度」, 電気共同研究, 34, No. 5 (昭 54)
- (13) 佐々木博司・菊地敏治・橋本光昭：「リアプノフ法による過渡安定度解析における界磁鎖交磁束減衰効果の近似的組み込み」, 電学論 B, 98, 837 (昭 53-10)
- (14) P. W. Sauer, A. K. Behera, M. A. Pai, J. R. Winkelmann & J. H. Chow: "A direct method for transient stability analysis of power systems", IEEE Trans., Power Systems, PWR-4, No. 2, 499 (1989-5)
- (15) 内田直之：「新しい固有値解法による電力系統の動的定態安定度解析」, 電学論 B, 100, 389 (昭 55-7)
- (16) 餘利野直人・久保喜義・佐々木博司・田村康男：「電力系統の内部共振回避に関する基礎的検討」, 同上 B, 110, 40 (平 2-1)
- (17) 岩本伸一：「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)

付 録

発電機の運動エネルギー

(1) 古典的モデルに基づく運動エネルギー 古典的モデルは、直軸過渡リアクタンス背後電圧および機械的入力を過渡期間中一定と仮定するもので、発電機の動特性は、例えば次式のように表現される。

$$\dot{\theta}_i = \bar{\omega}_i \dots\dots\dots (付 1)$$

$$\dot{\bar{\omega}} = (P_{mi} - P_{ei} - R_i P_{coa}) / M_i \dots\dots\dots (付 2)$$

ここに、

$$P_{coa} = \sum_{i=1}^{NG} (P_{mi} - P_{ei}) : \text{総電力ミスマッチ,}$$

$$M_T = \sum_{i=1}^{NG} M_i, R_i = M_i / M_T$$

発電機 i に対して、 θ_i : 慣性中心からみた過渡リアクタンス背後電圧の位相角、 M_i : 慣性定数、 P_{mi} : 機械的入力、 P_{ei} : 電氣的出力、 NG : 発電機総数

この系に対してエネルギー関数を構成すると、運動エネルギーについては次式のように定義され得る。

$$W_k(t) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{NG} M_i \bar{\omega}_i(t)^2 \dots\dots\dots (付 3)$$

こす事故が存在しており、更なる安全化が必要であることがわかる。そこで、次にステップ2の予防制御が評価され、中間領域不安定性を示していた#19, #20, #23, #24, #27~#34, #41, #42の事故が安定となった。また、不安定のままであった#17, #18の事故についても、表にあるように脱調までの時間が長くなっており、より安定側へ制御されたことがわかる。

結局、初期状態においては、26ケースが事故後脱調現象を示していたが、本予防制御の実施により、7ケースにまで減少させることができる。また、全体の計算時間は、HITAC-M682H(日立)を用いて2分24秒を要したが、オンラインでの適用を考えれば、更なる高速化が必要と思われる。

5. む す び

本論文では、過渡および中間領域安定度を同時に考慮できる動的予防制御手法について提案した。初めに、中間領域安定度予防制御に対して、動態安定度判別のための固有値法をベースとして、セキュリティ評価指標および基本的な定式化について検討を行った。更に、この手法と、従来のエネルギー関数法に基づく過渡安定度予防制御手法とを統合することを考え、両安定度の解析モデルの違いや時間的な連続性を考慮して具体的な最適化アルゴリズムを確立した。提案手法を、中規模のモデル系統に適用した結果、系統安定度を過渡領域から中間領域にわたり総合的に向上させる予防制御方策が得られ、本手法の有効性が確認された。

ところで、本論文においては、セキュリティ評価指標およびアルゴリズムの有効性を検証することを主たる目的としたため、制御に伴う運用コストの増加をあえて考慮しなかった。しかし、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するため、経済性を全く無視して制御を施すことは得策ではない。経済性との協調に関しては、既に静的予防制御および過渡安定度予防制御において基本的な検討を行っているが、統合化予防制御においては、系統状態が最経済の状態から大きく変化する可能性があるため、特別の考慮が必要になるものと考えられる。

また、中間領域不安定現象は、本論文で対象とした要因のほかに、システムのもつ非線形性が影響して発生する場合があることも指摘されている⁽⁴⁾⁽¹⁶⁾。従って予防制御においては、このような要因も順次考慮していくことが必要と考えられ、静的予防制御との協調をも含めて今後検討すべき重要な課題と考えている。

最後に、本研究を行うにあたり、貴重な資料を提供していただいた横浜国立大学 大山 力助教授、および計算機プログラムの作成などに協力していただいた北海道大学大学院生 加藤 彰君に対し、心より感謝の意を表する次第である。

(平成5年8月19日受付)

従って、(8)式の W_{kc} および W_{kcr} は、上記微分方程式を数値積分(刻み幅を Δt とする)によって解き、故障除去時点および古典的モデルに対する臨界故障除去時点の $\bar{\omega}$ を用いて算出される[古典的モデルに対する臨界故障除去時間は、例えば文献(17)の手法を用いて計算する]。

(2) $W_{kcr} - W_k^*$ の評価 $W_{kcr} - W_k^*$ の値は、数値計算上、上記の W_{kcr} を得る際に既に計算し、格納されている各 n 時点 ($n: 0$ 以上の整数) の運動エネルギーを用いて、

$$W_k(n\Delta t) \leq W_{kcr} - W_k^* \leq W_k\{(n+1)\Delta t\} \quad \dots\dots\dots (付4)$$

を満たす n を見つけ、 $W_k(n\Delta t)$ の値として評価する(ただし、 $W_{kcr} - W_k^*$ が負となる場合には n を零とする)。このとき、 $n\Delta t$ の値は、近似的に詳細モデルに対する臨界故障除去時間を与えることとなる。

佐藤 直 洋 (正員) 1967年10月1日生。1992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、電力系統制御に関する研究に従事。

西谷 健 一 (正員) 1947年2月11日生。1969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、同助教授を経て、1991年4月北海道工業大学電気工学科教授、現在に至る。電力系統工学、特に電力系統状態推定、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。

北 裕 幸 (正員) 1963年5月7日生。1988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。1989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。

長谷川 淳 (正員) 1943年12月13日生。1971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、1985年4月同教授、現在に至る。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。工学博士。IEEE、日本OR学会、照明学会、エネルギー・資源学会、低温工学協会会員。