

電力システムにおける系統状態の安定度限界判定法

日大生産工（院） ○木内 徹
日大生産工（院） 及川 昭
日大生産工 佐藤 正弘

1. まえがき

電力系統は、発電所で発生した電力を送電線・変電所・配電線を介して工場や我々の家庭などの負荷に供給する設備、装置などから構成される大規模なシステムである。

また、電力系統はライフラインとして欠かすことのできないシステムであり、系統事故から広域停電へと進展し、電力供給に支障が発生した場合の国民生活一般、そして経済活動に甚大な影響をあたえることが懸念されている。例として、2003年8月14日に起こった北米北東部停電事故では表1に示すような被害⁽¹⁾があった。

このような広域停電事故を未然に防止するためには、あらかじめ電力系統の状態を、系統事故が発生しても安定を維持するように制御しておく予防制御が考えられる。予防制御において過渡安定度判定を行う場合、多数の事故を想定し、各想定事故ごとに多くの過渡安定度計算を行うため、長い演算時間を要する⁽²⁾。現在、提案されている予防制御の過渡安定度判定手法には、エネルギー関数法を用いた手法⁽³⁾、臨界故障除去時間感度を用いた手法⁽⁴⁾、パターン認識を用いた手法⁽⁵⁾などがある。

過渡安定度判定をパターン認識で行う場合、事前に過渡安定度計算によって学習サンプルを準備する必要がある。この準備作業を軽減するためには、判定に用いる変数を削減し、用意すべき学習サンプルの数を減少すればよい。しかし、このように変数を削減しても収集した学習サンプルは多次元になるため、その分布を把握することは困難で、安定限界にあるサンプルに対しては誤判定をしてしまうことが考えられる。

本稿では、過渡安定度判定に用いる有効な変数を選択し、過渡安定度判定に際して誤判定をした未知サンプルが学習サンプルの分布に対してどのような位置にあるのかを判定し、安定度限界の状態を判定することを検討した。

2. 過渡安定度判定手法

本稿では過渡安定度の判定に k-nearest neighbor rule

(6) (以降 k-NN 法とする) を用いる。k-NN 法はパターン認識手法の一種で、判定は次のように行う。

安定な系統状態を表す学習サンプルの集合（安定群）と不安定な系統状態を表す学習サンプルの集合（不安定群）が与えられたとき、安定か不安定か未知の系統状態を、その近傍の学習サンプルの属する集合に一致するものと推定する。

k-NN 法では学習サンプルの分布における安定群と不安定群の境界が明確な場合は精度の高い推定が可能であるが、境界付近で安定群と不安定群が混在する場合には、誤判定することが考えられる。

3. 変数の選択方法⁽⁷⁾

〈3・1〉 変数選択のながれ 図1に変数選択のフローチャートを示す。まず各変数より後述する相関係

表1 北米北東部停電事故

停電地域	アメリカ8州, カナダ1州
供給支障	約6180万kW
被災者数	約5000万人
被害総額	40～60億ドル（AP通信）
完全復旧に要した時間	最大1週間

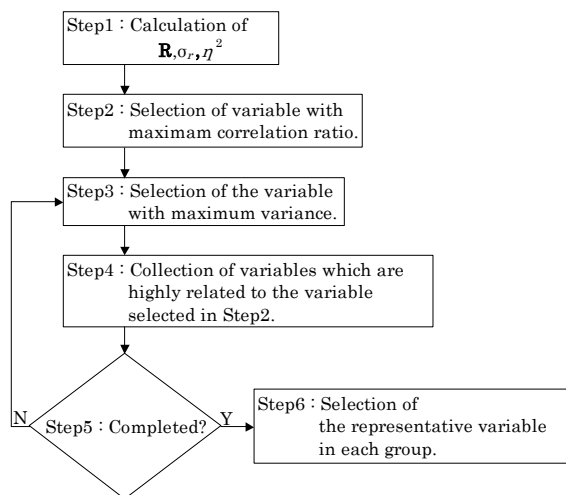


図1 変数選択のフローチャート

Method to determine the stability limit of state in electric power system

Toru KIUCHI, Akira OIKAWA and Masahiro SATO

数行列⁽⁸⁾、各変数の相関係数⁽⁸⁾の分散、相関比⁽⁸⁾を算出する。初めに、全変数の中から相関比最大となった変数を第1の変数として選択する。次に、相関係数の絶対値の分散が最大となる変数を基準とし、基準の変数に対して相関係数の絶対値の大きな変数どうしを一つのグループとする。グループ化された変数の合計数が全変数の一定の割合をこえるまでこれを繰り返す。

グループ化終了後、各グループの代表として、グループの中で相関比が最大の変数を選択する。

〈3・2〉 変数のグループ化 変化の傾向が類似している変数どうしをまとめるために相関係数の絶対値を用いて変数のグループ化を行う。(1)式により変数 $\mathbf{x}_i$ の任意の変数 $\mathbf{x}_j$ に対する相関係数 r_{ij} が求まる。相関係数は $-1 \leq r_{ij} \leq 1$ の範囲となり、1または-1に近ければその変数どうしの関係が大きいことを表し、0に近ければ変数どうしが無関係であることを表す。

$$r_{ij} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_i^n \sum_j^n (x_i - \bar{x}_i)(x_j - \bar{x}_j)}}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_i^n (x_i - \bar{x}_i)^2} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_j^n (x_j - \bar{x}_j)^2}} \quad \dots (1)$$

$\bar{x}_i$: x_i の平均値 $\bar{x}_j$: x_j の平均値 n : 個数

次に相関係数行列 $\mathbf{R}$ で表すと (2) 式となる。

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & 1 & \dots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad \dots (2)$$

各変数の相関係数の絶対値の分散 σ_r は (3) 式で表される。この値が大きいほど、相関係数の大きい変数から小さい変数まで含んだ偏りの少ない変数であると考えられる。

$$\sigma_r = \frac{1}{n} \sum_j \left(|r_{ij}| - \bar{r}_i \right)^2 \quad \dots (3)$$

$\bar{r}_i$: x_i の各変数に対する相関係数の平均値

そこで、 σ_r の大きな変数を基準として、相関係数の大きな変数どうしをグループ化する。

〈3・3〉 変数の選択 各変数の安定群と不安定群の分離の度合いを表す相関比 η^2 を (4) 式によって求め、全変数のうち相関比最大の変数の一つを選択する。

$$\eta^2 = \frac{S_B}{S_T} \quad \dots (4)$$

S_B : 各群の平均値の分散 S_T : 全分散

次に、それ以外の変数を〈3・2〉によっていくつかのグループに分けた後、各グループから一つずつ、相関比の最も大きな変数をグループの代表として選択する。

4. 安定度限界判定法

〈4・1〉 安定度限界判定のながれ 図2に安定度限界判定のフローチャートを示す。まず、安定群の近傍に

分布する不安定群の学習サンプルを収集するために、安定群の任意の学習サンプル $\mathbf{x}_{si}$ から見た不安定群の各学習サンプル $\mathbf{x}_{uj}$ への距離 d_{sui} を算出する。これをすべての安定群の学習サンプルについて繰り返す。次に d_{sui} の小さい不安定群の学習サンプルを安定群近傍に分布する $\mathbf{x}_{uj}$ の集合 U_n とする。

同様に、不安定群近傍に分布する安定群の学習サンプルを収集する。任意の $\mathbf{x}_{uj}$ のから見た $\mathbf{x}_{si}$ への距離 d_{usj} を算出し、これをすべての不安定群の学習サンプルについて繰り返す。次に d_{usj} の小さい不安定群の学習サンプルを安定群近傍に分布する $\mathbf{x}_{si}$ の集合を S_n とする。

次に、安定限界の領域を決定するために、最小二乗法⁽⁹⁾を用いて S_n と U_n を貫く近似平面 P_s , P_u をそれぞれ求める。 S_n および U_n は安定群と不安定群の境界に沿うように分布すると考えられるので、 P_s , P_u も安定群と不安定群の境界に沿うような平面が求まる。この P_s , P_u の間を安定限界の領域とし、この領域にある系統状態を安定限界と判定する。

5. シミュレーションによる有効性の確認

本稿では、図3に示す電気学会 EAST10 機系統モデル⁽¹⁰⁾を用いて検討を行った。まず各発電機出力、各負荷に乱数を用いてランダムにばらつきを与えた。同様に各母線の電圧についても基準電圧に対してばらつきを与

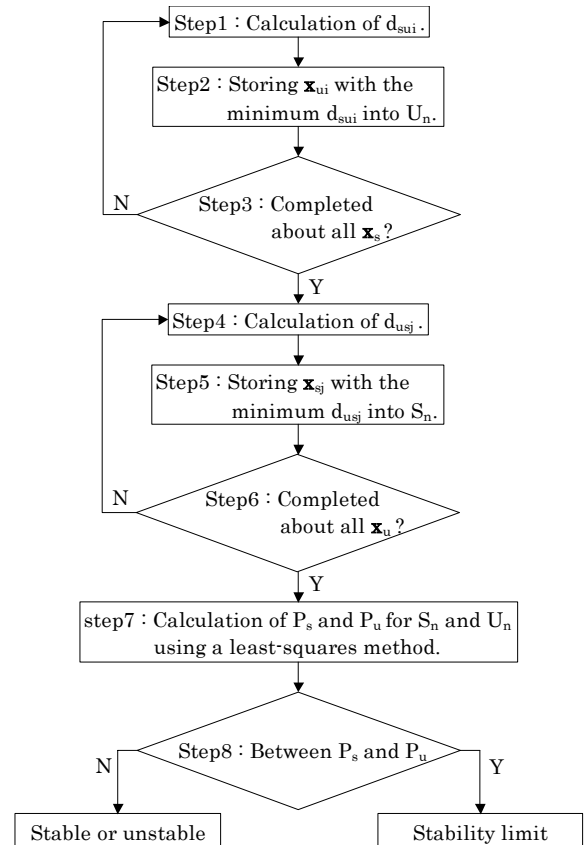


図2 安定度限界判定のフローチャート

えた。想定事故として線路 11 の母線 11 側において一回線地絡事故が 0.07[s]継続したものとした。対象は一波脱調とし、脱調パターンは G1 が単機で脱調する型である。この想定事故について 185 ケース（安定 119 ケース，不安定 66 ケース）の過渡安定度計算を行い，この場合の各母線の電圧 V ，電圧位相 θ を過渡安定度判定の変数として用いる。

〈5・1〉変数の選択 まず各変数より相関係数行列，相関係数の分散，相関比を算出する。その結果，93 変数のうちで相関比が最大となった V_{11} が第 1 の変数として選択する。次に，残った変数の中で相関係数の分散が最大となった θ_{29} を基準に，グループ 1 として θ_{29} との相関係数が 0.8 以上の 30 変数をグループ化した。次に，グループ 1 でない変数のうちで相関係数の分散が最大となった V_{27} を基準として，グループ 2 をグループ化した。以下同様に，グループ化された変数が全体の 70[%]となるまで繰り返した。その結果，93 変数のうち 66 変数を 6 グループにグループ化し，各グループから相関比が最大となる変数をグループの代表として選択した。以上の結果をまとめたものを表 2 に示す。

〈5・2〉k-NN 法による過渡安定度判定 選択された 7 変数を用いて k-NN 法による過渡安定度判定を行った。全 185 ケースのうち，103 ケースを学習サンプル，82 ケース（安定 41 ケース，不安定 41 ケース）をテストサンプルとした。その結果，誤判定点は 9 点あり，テストサンプルに対する識別率は 89.0[%]となった。

変数選択手法の有効性を確認するために，93 変数からランダムに 7 変数を選択して得た，100 通りの組み合わせについて同様に k-NN 法によって判定を行い，その結果を比較した。識別率とその出現頻度の関係を度数分布表にして図 4 に示す。

この結果をみると，ほとんどの組み合わせの結果が識別率 80.0[%]以下の範囲にある。提案手法によって変数を選択した場合は，89.0[%]の識別率を示しており，ランダムに変数を選択した場合，これを超える識別率を示したものはなかった。したがって，この変数選択手法が有効であることが確認できる。

〈5・3〉安定度限界の判定 まず，誤判定したテストサンプルが安定度限界に存在することを説明するために目視可能な二次元の場合について，図 5 に示す一機無限大母線系統モデルの発電機母線の電圧 V_G ，電圧位相 θ_G を過渡安定度判定の変数として用いて安定度限界の判定を行う。次に〈5・2〉において誤判定したサンプルについて同様に安定度限界の判定を行う。

(1) 二次元の場合 一機無限大母線系統モデルを用いて変数が二次元の場合を検討する。シミュレーション条件は，発電機出力 P_G を $2.55[\text{p.u.}] \pm 10.0[\%]$ ， $V_G 1.00[\text{p.u.}] \pm 5.0[\%]$ の範囲でそれぞれ指定し，線路 231 に一回線地絡事故が 0.07[s]継続したものとした。この

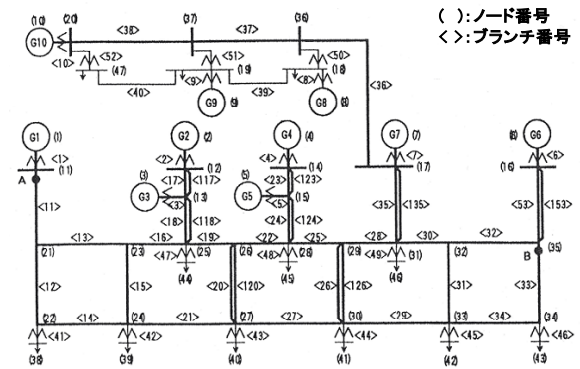


図3 電気学会 EAST10 機系統モデル

表2 変数選択の結果

Group	Variable with maximum variance	selected variable	Variables in group
1	θ_{29}	θ_{41}	$\theta_4 \sim \theta_7, \theta_{13} \sim \theta_{17}, \theta_{21} \sim \theta_{35}, \theta_{40} \sim \theta_{46}$
2	V_{27}	V_{21}	$V_{21} \sim V_{26}, V_{28} \sim V_{34}, V_{38} \sim V_{46}$
3	θ_{36}	θ_8	$\theta_8 \sim \theta_{10}, \theta_{18} \sim \theta_{20}, \theta_{37}, \theta_{47}$
4	θ_{21}	θ_1	$\theta_1, \theta_{11}, \theta_{38}$
5	θ_{39}	θ_{39}	θ_{39}
6	V_{35}	V_{35}	V_6, V_{16}, V_{35}

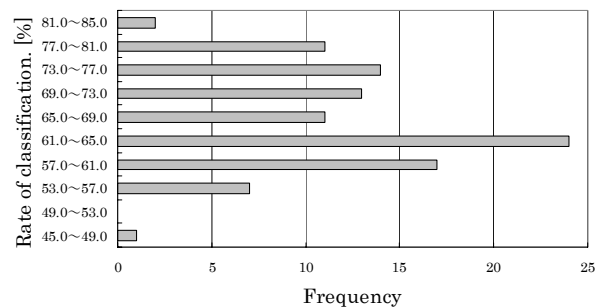


図4 変数のランダム組み合わせによる識別率

想定事故について 480 ケース（安定 241 ケース，不安定 239 ケース）の過渡安定度計算を行った。

次に k-NN 法による過渡安定度判定を行った。全 480 ケースのうち，380 ケースを学習サンプル，100 ケース（安定 50 ケース，不安定 50 ケース）をテストサンプルとした。また，安定度限界判定法に基づいて学習サンプルを用いて P_s, P_u を求める。学習サンプルの分布，誤判定したテストサンプル A, B および P_s, P_u について図 6 に示す。

過渡安定度判定の結果，誤判定点は 2 点あった。また， P_s, P_u を求める際， S_n を 12 点， U_n を 17 点収集し，求めた P_s, P_u の間に安定群の学習サンプルが 9 点，不安定群の学習サンプルが 13 点あった。以下に S_n, U_n より求めた P_s, P_u の式を示す。

$$P_s : \theta_G = 0.265V_G - 0.157 \quad \dots (5)$$

$$P_u : \theta_G = 0.314V_G + 0.130 \quad \dots (6)$$

次に，図 6 に示す誤判定点から P_s, P_u への距離をみる

と、A については、 P_s への距離が-0.087、 P_u への距離が 0.264 となり、B については、 P_s への距離が-0.049、 P_u への距離が 0.200 となった。この 2 点と安定群の重心と不安定群の重心からの P_s 、 P_u への距離とそれぞれ比較すると、安定群の重心から P_s への距離が 1.344、 P_u への距離が 1.653 となり、不安定群の重心から P_s への距離が-1.671、 P_u への距離が-1.406 となっていることから、誤判定点から P_s 、 P_u への距離は、重心から P_s 、 P_u への距離に対して 5[%]程度と、十分に小さいことが判る。

図 6 をみると、境界に沿って P_s 、 P_u 求められており、誤判定点が P_s 、 P_u の間にあることが判る。よって、誤判定した点は、安定限界にあると判定する。

(2) 多次元の場合 〈5・2〉において誤判定した 9 点のテストサンプルについて安定度限界の判定を行う。

まず、学習サンプルを用いて S_n 、 U_n を収集すると、 S_n が 41 点、 U_n が 40 点となった。 S_n 、 U_n より最小二乗法を用いて算出した P_s 、 P_u の式を以下に示す。

$$P_s : V_{35} = 0.904V_{11} - 0.379\theta_{41} + 0.676V_{21} - 0.197\theta_8 - 0.050\theta_1 - 0.125\theta_{39} - 1.114 \quad \dots (7)$$

$$P_u : V_{35} = 1.233V_{11} - 0.413\theta_{41} + 1.055V_{21} - 0.242\theta_8 - 0.215\theta_1 - 0.326\theta_{39} - 1.297 \quad \dots (8)$$

表 3 にこの誤判定点から P_s への距離と P_u への距離をそれぞれ示す。ここで、安定群の重心から P_s への距離は 0.492、 P_u への距離は 0.883 となり、不安定群の重心から P_s への距離は 1.776、 P_u への距離は 1.996 となっている。これらと表 4 の値とを比較すると、各誤判定点から P_s 、 P_u への距離は、十分に小さいことが判る。

しかし、誤判定点から P_s 、 P_u への距離の符号をみると、誤判定点は P_s 、 P_u の間 (121, 130, 142) だけでなく、 P_s 、 P_u の上側 (155, 173) と下側 (143, 149, 169, 184) にもあり、必ずしも P_s と P_u の間に存在していないことが判る。

提案手法では、安定群と不安定群の境界が線形であると仮定して P_s と P_u を平面近似によって求めているが、実際には、境界は線形ではなく、すべての誤判定点が P_s 、 P_u の間に入らなかったと考えられる。

6. まとめ

本稿では、過渡安定度判定に用いる有効な変数を選択し、過渡安定度判定に際して誤判定をした未知サンプルについて安定度限界の状態の判定を行った。

その結果、変数選択の有効性を確認した。安定度限界の判定については、安定群と不安定群の境界が線形とみなせる場合には有効であるが、そうでない場合は線形とみなせる範囲で適用する必要がある。

文 献

- (1) 資源エネルギー庁 <http://www.enecho.meti.go.jp/>, 2003 年 8 月 14 日北米北東部停電事故に関する調査報告書。

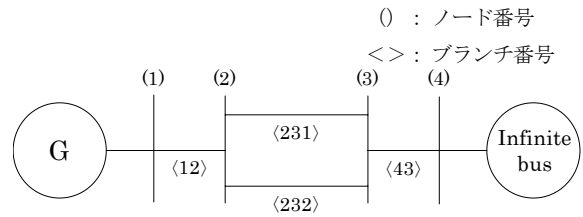


図 5 一機無限大母線系統モデル

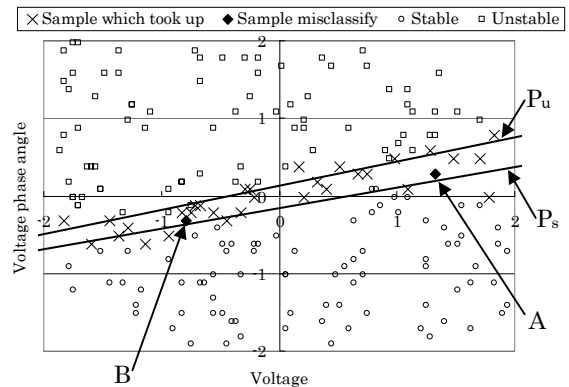


図 6 一機無限大母線系統モデルの学習データの分布

表 3 誤判定点の位置

Number of sample	class	Distance to P_s	Distance to P_u
121	u	0.159	-0.083
130	u	-0.048	0.352
142	u	0.029	-0.212
143	u	0.184	0.362
149	u	0.006	0.044
155	u	-0.148	-0.176
169	u	0.190	0.143
173	u	-0.494	-0.793
184	u	0.065	0.355

- (2) 関根他：電力系統工学，コロナ社，(1979)，PP. 165-165.
- (3) 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」，電学論 B, 110, 9, pp.745-751 (1990-9).
- (4) 高橋・岩本：「臨界故障除去時間感度を用いた過渡安定度予防制御」，電学論 B, 122, 7, pp.829-839 (2002-7).
- (5) 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, 10, pp.505-512 (1976-10).
- (6) 石井・上田・前田・村瀬：わかりやすいパターン認識，オーム社，(1998)，PP. 7-9.
- (7) 木内・高岡・佐藤：「過渡安定度判定に用いる変数の選法」，平成 16 年電気学会全国大会，No.6, pp.235-236.
- (8) 大野：多変量解析入門，同友館，(1998)，pp.19-120.
- (9) 星・小野・吉田：入門数値計算—チャートによる解説とプログラム，オーム社，(1999)，pp.104-111.
- (10) 電力系統モデル標準化調査専門委員会：「電力系統の標準モデル」，電気学会技術報告，第 754 号(1999-11). (