

エネルギー関数を用いたニューラル ネットワークによる電力系統過渡安定度推定

Estimation of Power System Transient Stability by Artificial Neural Network Taking Account of Energy Functions

李揚* 山田浩** 雪田和人*** 後藤泰之*** 一柳勝宏***
Yang Li Hiroshi Yamada Kazuto Yukita Yasuyuki Goto Katsuhiro Ichiyanagi
田端康人**** 香田勲****
Yasuhito Tabata Isao Kohda

Abstract Estimation of power system transient stability is more difficult and great importance because the power system becomes larger and larger. Therefore, fast stability to contingency faults is demanded in power system operation. In this paper the neural networks technique is applied for fast classification of system dynamic security status. A suitable topology for the neural network is developed, and the appropriate training method and input and output signals are selected. The procedure developed is successfully applied to the IEEE 10-generator 39-bus test system. Data obtained by Energy Functions are used for training the neural network.

1. まえがき

電力系統は大規模、複雑化し、大容量発電所は負荷中心点から遠方になり、送電線は長距離化している。このような状況において、故障によっては脱調を引き起こし、さらに大規模な停電事故にまで波及することが懸念される。より高品質な電力を供給するために、想定された事故に対する正確な安定度が求められている。しかし、過渡安定度の計算は、刻み時間ごとに連立微分方程式を解く必要があり、膨大な計算時間を要するので、実際の運用において問題となる。従って、オンラインでの計算を考慮した場合などのように、高速な演算が要求される時には、

ニューラルネットワークによる方法を用いることが有効であると考えられる。ニューラルネットワークによる方法は現在までさまざまな検討がなされているが、入力として発電機の出力や角加速度などを用いると大規模系統ではユニット数が多くなり、学習が困難になることが懸念される^{[1][2]}。本報告では、まず、多機系統を1機無限大母線系統に系統縮約を行うことにより検討する。故障送電線が一定の場合について、故障送電線遮断後の安定判別のシミュレーションを行ったところ、系統の負荷状態や故障時間に関係なく、一定の安定範囲が得られた。そこで、故障除去時のエネルギー関数とニューラルネットワークの入力データに用いることにより事故後の安定度判別法を提案している^[3]。また、故障点情報を入力に追加したニューラルネットワークにより、新たな安定度推定システムを構築し、モデル系統により検討している。

* 中国東南大学電力工程系（中国南京市）
** 愛知工業大学大学院電気電子工学専攻（豊田市）
*** 愛知工業大学電気工学科（豊田市）
**** 中部電力（名古屋市）

2. 系統縮約とエネルギー関数

多機系統の全発電機について, 安定な発電機群 S と不安定な発電機群 U とに分ける。さらに, 各発電機群の各発電機動揺を位相中心の考え方で表すと, 次式の 2 機系のモデルに縮約される^{[4][5]}。

$$M_S \frac{d^2 \delta_S}{dt^2} = \sum_{k \in S} (P_{mk} - P_{ek}), \delta_k |_{k \in S} = \delta_S \dots \dots (1)$$

$$M_U \frac{d^2 \delta_U}{dt^2} = \sum_{l \in U} (P_{ml} - P_{el}), \delta_l |_{l \in U} = \delta_U \dots \dots (2)$$

さらに, 集合 S における集合 U からの相対的な位相差をとると, 以下の 1 機無限大母線系統で表される縮約モデルが得られる。

$$M \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - \{P_c + P_{em} \sin(\delta - \nu)\}, \delta = \delta_S - \delta_U \dots (3)$$

この縮約モデルに対する, リアプノフ関数は以下のようになる。

$$V(\delta, \omega) = \frac{\omega^2}{2} + \frac{1}{M} [P_{mm} \{ \sin(\delta - \delta_S) - (\delta - \delta_S) \} + \sqrt{P_{em}^2 - P_{mm}^2} \{ 1 - \cos(\delta - \delta_S) \}]$$

$$= V_k (\text{運動エネルギー}) + V_p (\text{ポテンシャルエネルギー}) \dots \dots (4)$$

3. モデル系統における安定領域

図 1 に検討の対象として用いた 10 機 39 母線系統を示す。同図において, ある負荷状態における F1

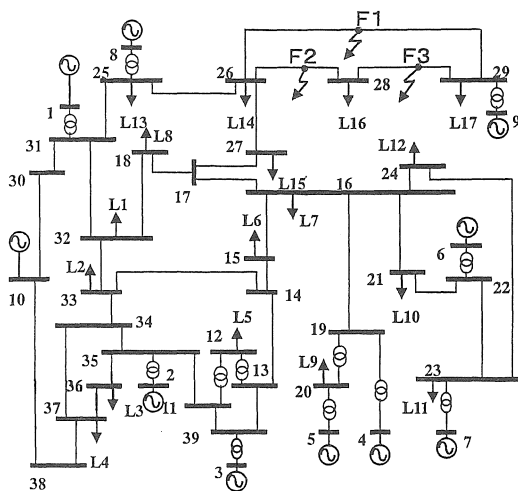


図 1 モデル系統 (IEEE 10 機 39 母線)
Fig.1 IEEE 10-generator 39-bus system

地点での 3 線地絡故障を想定した。故障除去と同時に, その時点で系統の安定判別を可能にすること目的として, 故障回線開放時刻 t_{sw} におけるリアプノフ関数の値 V_{ksw}, V_{psw} を求めた。ここで, 系の不安定平衡点 δ^u におけるリアプノフ関数の値 V_{max} とし, $E_{ksw} = V_{ksw} / V_{max}, E_{psw} = V_{psw} / V_{max}$ を求めた。

具体的に, 全負荷の 60% から 150% まで 10% きざみで変化させた負荷状態と 0.1 秒きざみで変化させた故障回線開放時刻で, F1 点での故障の場合における E_{ksw}, E_{psw} を求めた。その結果を図 2 に示す。同図において, 系統が安定の場合を○印, 不安定の場合を●印で示す。同図から, 故障線路が一定とした場合, ある負荷状態において, 故障除去時間が長ければ長いほど, E_{ksw} と E_{psw} の値が大きくなり, 故障除去後系統が不安定になる傾向がある。それに対して, 軽負荷状態では, 故障時間が長くなるに伴って, E_{ksw} はあまり変化せず, E_{psw} の値が大きくなり, 不安定となる傾向がみられる。また重負荷状態では, 故障時間が長くなるのに伴って, E_{ksw} の値が大きくなり, 不安定となる傾向がみられる。以上のことから, 故障線路が一定の場合, 一定の安定範囲が E_{ksw}, E_{psw} により与えられると言える。

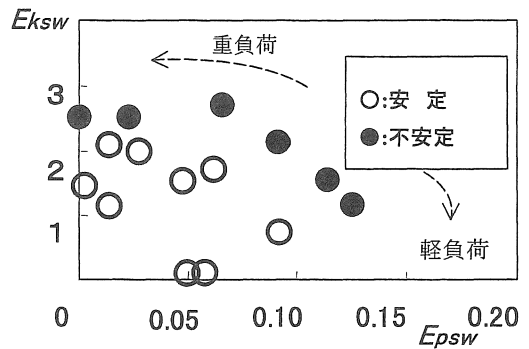


図 2 E_{ksw}, E_{psw} で与えられた安定度シミュレーション結果 (故障点: 図 1 の F1)
Fig.2 Simulation result indicated by using E_{ksw}, E_{psw} (fault point: F1 at Fig.1)

故障送電線を図 1 の F2 および F3 の地点として想定し, 同様のシミュレーションを行った結果を図 3, 図 4 に示す。これらの図からも種々の負荷状態や故障時間に対して, 一定の安定範囲が E_{ksw}, E_{psw} により与えられることが分かる。

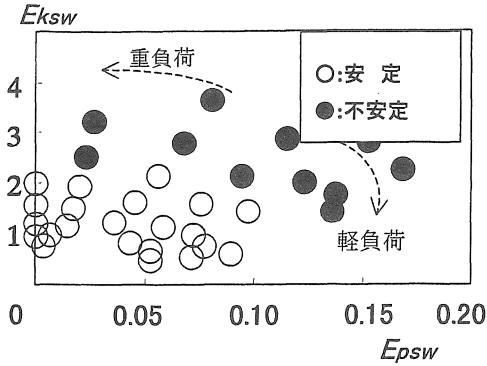


図3 Eksw, Epsw で与えられた安定度シミュレーション結果 (故障点: 図1のF2)

Fig.3 Simulation result indicated by using Eksw, Epsw(fault point:F2 at Fig.1)

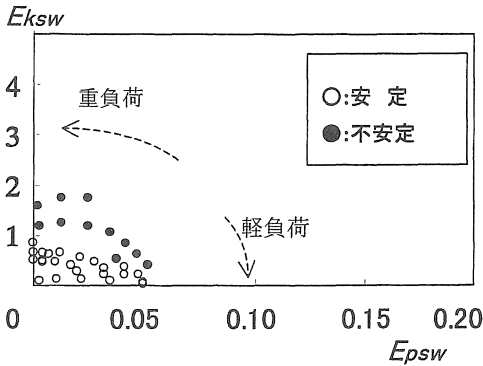


図4 Eksw, Epsw で与えられた安定度シミュレーション結果 (故障点: 図1のF3)

Fig.4 Simulation result indicated by using Eksw, Epsw(fault point:F3 at Fig.1)

4. 安定度推定のシミュレーション

4.1 安定度推定システム

前節の安定度シミュレーション結果によれば、個々の故障送電線に対して、一定の安定領域が Eksw, Epsw で与えられることから、安定度の推定システムを図5のように構築した。この推定システム構成は3層の階層型ニューラルネットワークとした。同図に示すように、入力層は故障線路が遮断された時点における Eksw, Epsw の値、出力層は安定度の推定値(安定:0, 不安定:1)を対応させた。

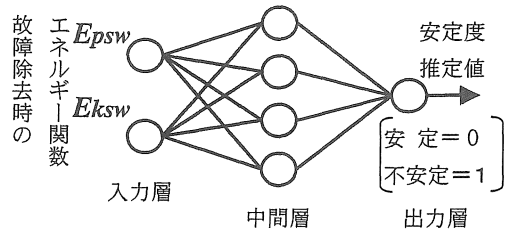


図5 安定度推定システム

Fig.5 Estimation system of transient stability

4.2 安定度推定の具体例

故障送電線を図1のF1点とし、図2の Eksw, Epsw の値に対する安定, 不安定の関係を安定度推定システム図5に学習させた。学習の方法としては、BP (Back Propagation) 法を用いた。あらかじめ想定した故障送電線に対して安定度のシミュレーションを行った。得られた結果を教師データとしてニューラルネットワークの学習を行った。学習データは表1の値を用いた。学習は20000回程度繰り返した時点で学習データによる推定誤差が小さくなり(推定誤差 10^{-3} 程度)、この時点で学習を終える。

表1 学習データと学習結果

Table 1 Training data and results

No.	負荷状態 (p.u.)	E_{psw}	E_{ksw}	t_{sw}	教師値	学習結果
1	0.8	0.090	0.812	0.949	0	0.0000
2		0.127	1.223	1.199	1	0.9999
3	1.2	0.046	1.601	0.599	0	0.0000
4		0.060	1.768	0.629	0	0.0005
5	1.4	0.094	2.132	0.699	1	1.0000
6		0.026	2.058	0.509	0	0.0026
7	1.5	0.067	2.776	0.599	1	0.9972
8		0.001	1.533	0.399	0	0.0000
9	1.5	0.012	2.159	0.459	0	0.0000
10		0.024	2.497	0.499	1	0.996

学習を終えたニューラルネットワークを用いることにより、系統故障時の Eksw, Epsw の値から過渡安定度の判別が可能となる。そこで学習に用いなかった負荷状態の下で、故障後における安定度推定のシミュレーションを行った。具体的に図1のF1点での故障を想定し、故障除去時の Eksw, Epsw の値

から過渡安定度を推定した。安定度推定の評価に用いたデータを表 2 に示す。得られた安定度の推定結果を図 6 に示す。

表 2 推定結果の評価に用いたデータ

Table 2 Test data

No.	負荷状態 (p.u.)	t_{sw}	E_{psw}	E_{ksw}
1	0.6	0.899	0.032	0.262
2		1.199	0.071	0.346
3	0.7	1.069	0.086	0.574
4		0.849	0.089	1.060
5	0.9	0.999	0.136	1.255
6		0.699	0.075	1.563
7	1.1	0.799	0.123	2.003
8		0.499	0.017	1.481
9	1.3	0.619	0.069	2.289
10		0.399	0.001	1.972
11	1.6	0.489	0.023	3.110
12		0.279	0.026	1.335
13	1.8	0.399	0.000	3.251

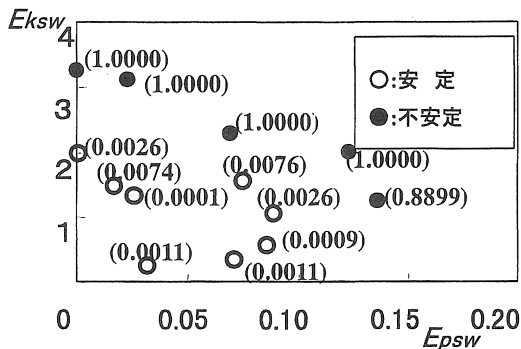


図 6 安定度の推定結果 (故障点: F1)

Fig.6 Estimated results of stability at fault point F1.

同図の○, ●は系統動揺から判定した安定, 不安定状況をそれぞれ示し, 同記号に隣接する()内数値は安定度推定システムの出力値を示している。同数値はいずれも安定=0, 不安定=1に近い値で推定されている。故障送電線を図 1 の F2 および F3 の地点として想定し, 同様の安定度推定を試みた。その結果を図 7, 図 8 にそれぞれ示す。これらの図においても安定=0, 不安定=1に近い値で推定されていることがわかる。

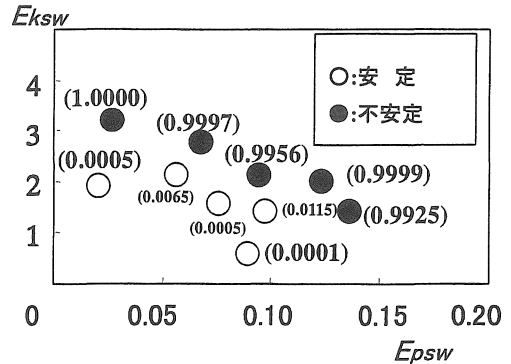


図 7 安定度の推定結果 (故障点: F2)

Fig.7 Estimated results of stability at fault point F2.

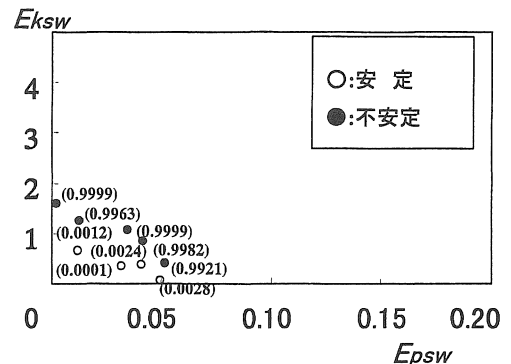


図 8 安定度の推定結果 (故障点: F3)

Fig.8 Estimated results of stability at fault point F3.

5. 故障線路情報を与える安定度推定システム

5. 1 安定度推定システム

先の図 5 に示した推定システムは個々の故障送電

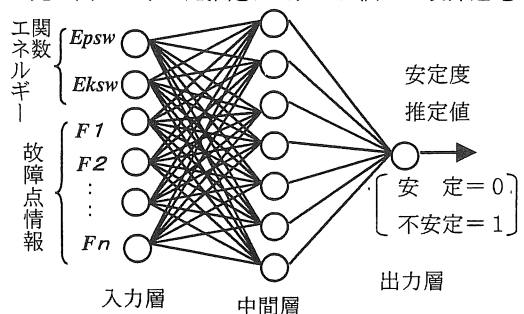


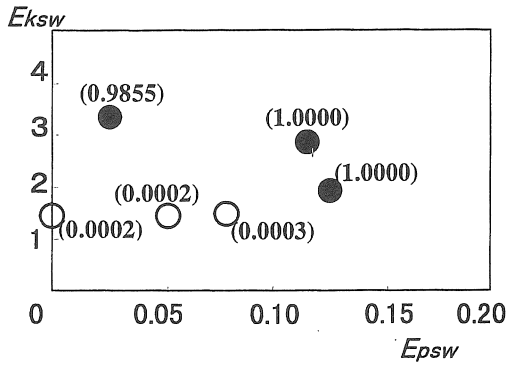
図 9 故障点情報を追加した安定度推定システム

Fig.9 Estimation system of transient stability with additional fault point information

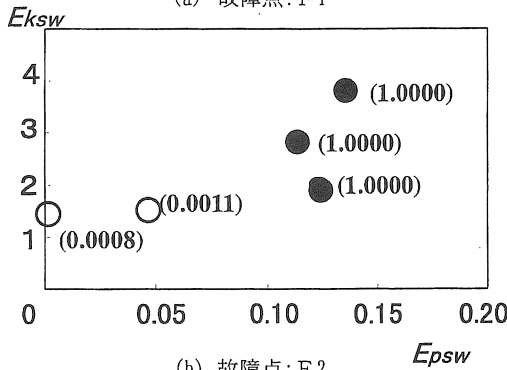
線に対応して構築される。故障発生と同時に、故障点情報が与えられる場合を想定し、これを入力に加えた安定度推定システムを図9のように構築した。同図に示すように、入力層は故障線路が遮断された時点における E_{ksw}, E_{psw} の値の他に故障点情報を与えた。

5. 2 安定度推定の具体例

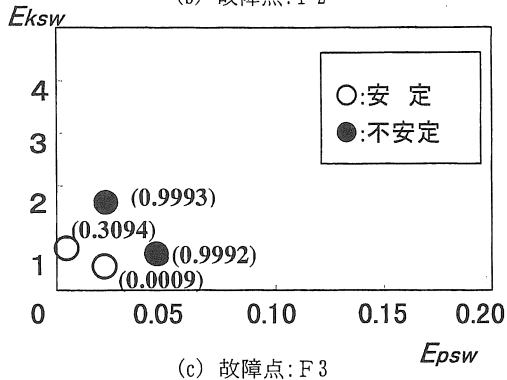
例として、系統の中心から比較的遠隔地での故障



(a) 故障点: F1



(b) 故障点: F2



(c) 故障点: F3

図10 故障点情報を追加した安定度の推定結果

Fig.10 Estimated results of stability taking account of fault point

を想定した。故障送電線を図1のF1, F2, F3点とし、故障点情報はそれぞれ1(故障あり)および0(故障なし)で対応させた。出力層は安定度の推定値(安定:0, 不安定:1)を対応させた。前節と同様に、 E_{ksw}, E_{psw} の値に対する安定, 不安定の関係を図9の安定度推定システムに学習させた。学習に用いなかった負荷状態の下で、故障除去時の E_{ksw}, E_{psw} の値から安定度を推定し、その結果を図10(a)~(c)に、それぞれ示す。いずれも安定=0, 不安定=1に近い値で推定できている。また、これらの図を見ると、各線路に対応する安定領域の広さが大きく異なっているが、安定度推定は正確にできていることがわかる。

6. オンライン安定度推定

図9で提案する安定度推定法はオンライン運用に利用できる。ある実際の電力系統に対し、運転中の負荷データを使用して、オンライン安定度推定の計算手順を図11に示す。同図に示すようにニューラルネットワークを用いて安定度推定のオフライン学習を行う。系統故障時に系統状態を入力し、 E_{ksw}, E_{psw} の値からニューラルネットワークにより、安定判別を瞬時に行うことができる。

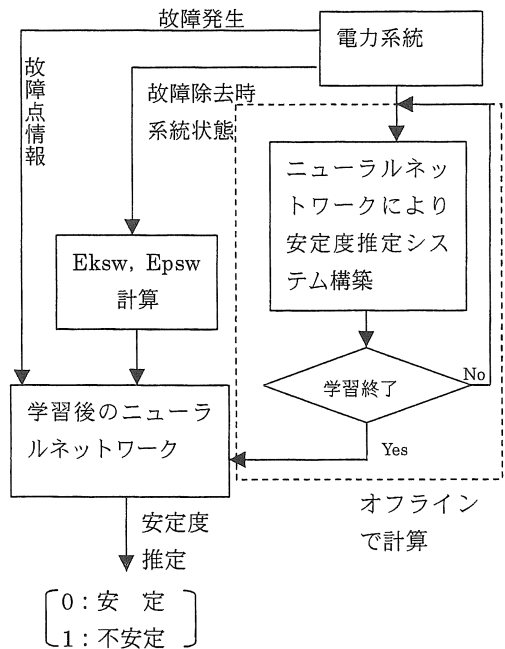


図11 オンライン安定度推定の計算フロー図

Fig.11 Calculation program on line

7. あとがき

本報告では, 電力系統過渡安定度に関して, 安定判別推定システムを構築し, モデル系統 (10機39母線) に対して推定を行った。まず各故障送電線に対応したニューラルネットワークにより安定度推定のシミュレーションを行った。これにより比較的良好な推定結果得られた。さらに, 故障点情報を付加することにより, 故障点に対して共通の安定判別推定システムを構築した, その結果, さまざまな系統状態に対し, 系統安定度が推定できた。また本推定法はニューラルネットワークがオフライン学習できることから, 安定度推定がオンラインで利用できると考える。今後の課題として, 実際の電力系統モデルを用いて種々の故障点での検討及び電力系統の構成変更時における検討を行う必要がある。さらに, すべての故障点に共通に利用できる推定システムとして改良を図る。

参考文献

- [1]Dejan J.Sobajic,Yoh-han Pao, : “Artificial neural-net based dynamic security assessment for electric power systems”, IEEE Trans. On Power System, Vol.4, No.1, pp.220-228, 1989.
- [2]Qin Zhou, Jennifer Davidson, A.A.Fouad : “Application of artificial neural networks in power system security and vulnerability assessment”, IEEE Trans.on Power System, Vol.9, No.1, pp.525-531, 1994.
- [3]李 揚,山田富士宏,雪田和人,後藤泰之,一柳勝宏 : 「エネルギー関数を用いたニューラルネットワークによる電力系統過渡安定度推定」,平成 11 年電気学会全国大会,No.1350,平成 11 年 3 月.
- [4]Y.Xue, et al. : “A simple direct method for fast transient stability assessment of large power systems”, IEEE Trans. Power System, pp400-412, Vol.3, No.2, 1988.
- [5]Y.Xue, et al. : “Dynamic extended equal area criterion, part 1 basic formulation”, Athens Power Tech, September 1993.
- [6]関根泰次 : 「電力系統過渡解析論」オーム社,1984.

(受理 平成12年 3 月18日)