

ニューラルネットワークに基づく電力システムの過渡安定度推定

Estimation of Power System Transient Stability by Artificial Neural Network

山田 浩[†], 雪田 和人^{††}, 後藤 泰之^{††}, 一柳 勝宏^{††}

Hiroshi Yamada, Kazuto Yukita, Yasuyuki Goto, Katsuhiko Ichibanagi

田端 康人^{†††}, 小川 重明^{†††}

Yasuhito Tabata, Shigeaki Ogawa

Abstract The estimation of power system transient stability is more difficult and great importance because the power system becomes larger and larger. Therefore, the fast stability estimation to contingency faults is demanded in the power system operation. In this paper, the neural network technique is applied for the fast classification of system dynamic security status. A suitable topology for the neural network is developed, and the appropriate training system method and input and output signals are selected. The procedure developed is successfully applied to the IEEJ WEST10-generator system and EAST10-generator system. The data obtained by the energy functions are used for training the neural network.

1. まえがき

近年、電力システムは大規模、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。このような状況下では、故障様相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。このようなシステム崩壊を招かないためには、事故時における電源制限⁽¹⁾⁽²⁾、負荷遮断といった適切な安定化対策が必要である。このため、想定される故障に対する正確な安定度を高速に推定することが求められている。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は問題となる。従って、オンラインでの計算を考慮する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を利用する方法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、現在までに様々な検討がなされている。入力情報として発電機の出力や角加速度などを用いると、大規模システムではニューラルネットワークの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⁽³⁾⁽⁴⁾。そこで、本研究では故障除去時のリアプノフ関数の値に着目し、これを入力情報とする過渡安定度推定システムを提案する。串形状やループ状で構成されている電気学会標準モデルシステムを対象として、過渡安定度推定のシミュレーションを実施した結果、比較的

良好な推定結果が得られた。また、過渡安定度推定により得られた結果から電源制限を実施する場合を想定し、負荷脱落事故時における電源制限のシミュレーションを実施した。その結果、適切な解列発電機を選択することにより安定度向上効果が得られることを確認した。

2. 多機電力システムの安定度領域

2・1 系統縮約とリアプノフ関数

電力系統事故時における安定判別にリアプノフの安定理論を適用する場合、リアプノフ関数 V とその安定限界 V_{max} を求める際に、安定平衡点や不安定平衡点の値を算出する必要がある。多機システムの場合には電力潮流の収束不良現象や多根問題などのため、安定平衡点や不安定平衡点の値を一意的に算出することは困難と考えられる⁽⁵⁾⁽⁶⁾。一方、多機システムを1機無限大母線システムに縮約することにより、安定平衡点や不安定平衡点が容易に算出でき、リアプノフ関数 V や安定限界 V_{max} を簡単に得られることになる。そこで本研究では、多機システムを1機無限大母線システムに縮約して取り扱う。多機システムの全発電機について、各発電機動揺を位相中心の考え方で表すと、リアプノフ関数は次式で表される⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

$$V(\delta, \omega) = \frac{\omega^2}{2} + \frac{1}{M} [P_{mn} \{ \sin(\delta - \delta_o) - (\delta - \delta_o) \} + \sqrt{P_{cm}^2 - P_{mn}^2} \{ 1 - \cos(\delta - \delta_o) \}] \quad (1)$$

[†] 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）

δ : 発電機位相, ω : 発電機角速度,
 M : 発電機の慣性定数, δ_0 : 安定平衡点

ここで, 運動エネルギー V_k および位置エネルギー V_p をそれぞれ次式で表す。

$$V_k = \frac{\omega^2}{2} \tag{2}$$

$$V_p = \frac{1}{M} [P_{mn} \{ \sin(\delta - \delta_0) - (\delta - \delta_0) \} + \sqrt{P_{em}^2 - P_{mn}^2} \{ 1 - \cos(\delta - \delta_0) \}] \tag{3}$$

2・2 モデル系統における安定度領域

2・2・1 IEEJ WEST10 機系統における安定度領域

図 1 に, 検討の対象とした IEEJ WEST10 機系統を示す。この系統は東西に長く伸びた, いわゆる串型系統で構成されており, 送電線はすべて 2 回線で構成されている。なお, 同図における発電機 G10 は無限大母線(基準母線)としている。表 1 および表 2 に, 潮流計算に用いた各発電機の出力, 各負荷の値をそれぞれ示す。

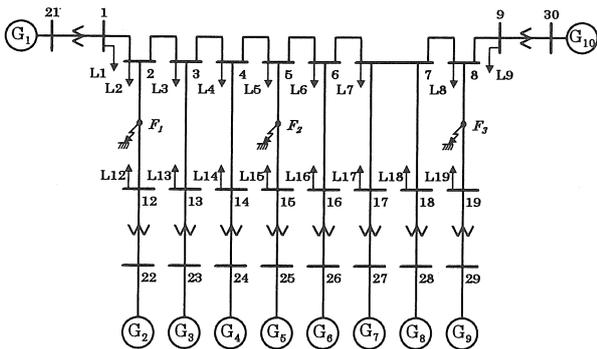


図 1 モデル系統 (IEEJ WEST10 機系統)

図 1 における F_1 地点での故障を想定し, 故障発生後の各発電機の位相動揺曲線を求め, 図 2 および図 3 に示す。図 2 は故障除去後において系統が安定な場合, 図 3 は不安定な場合の例である。いずれの故障についても G10 の発電機位相の変動はほとんどなく, 安定を維持している。しかし, その他の発電機においては故障発生と同時に位相は

表 1 各発電機の出力 (IEEJ WEST10 機系統)

発電機	出力 [p.u.]	発電機	出力 [p.u.]
G1	13.5	G6	9.0
G2	9.0	G7	9.0
G3	9.0	G8	4.5
G4	9.0	G9	9.0
G5	9.0	G10	0.0

1,000MVA ベース

表 2 各負荷の大きさ (IEEJ WEST10 機系統)

負荷	P [p.u.]	Q [p.u.]	負荷	P [p.u.]	Q [p.u.]
L1	12.0	2.438	L12	5.5	1.466
L2	3.5	0.0	L13	5.5	1.439
L3	3.5	0.0	L14	5.5	1.434
L4	3.5	0.0	L15	5.5	1.437
L5	3.5	0.0	L16	5.5	1.444
L6	3.5	0.0	L17	5.5	1.463
L7	5.25	0.0	L18	2.75	0.823
L8	3.5	0.0	L19	5.5	1.483
L9	28.3	4.76			

1,000MVA ベース

増大し, 故障除去後も動揺するか, もしくは脱調に至っている。本研究では, リアプノフ関数を導出する際において, 多機系統を 1 機無限大母線系統に縮約して取り扱っている。安定な発電機を基準母線に相当する G10 とし, 残りすべての発電機を不安定な発電機群として系統縮約を行っている。

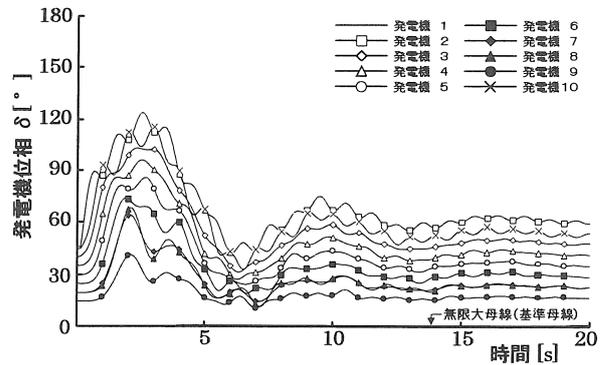


図 2 安定な場合の位相動揺曲線
 (故障点: 図 1 における F_1 , 故障継続時間: 80ms)

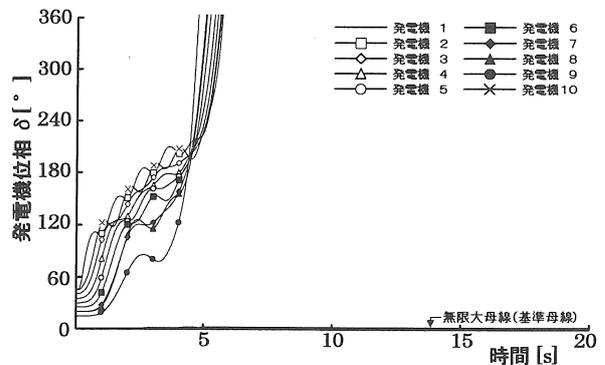


図 3 不安定な場合の位相動揺曲線
 (故障点: 図 1 における F_1 , 故障継続時間: 120ms)

図1において、ある負荷状態におけるF₁地点での1回線3相永久地絡故障を想定した。故障除去と同時に、その時点でシステムの安定判別を可能にすることを目的として、故障送電線除去時刻 t_{sw} におけるリアプノフ関数 V_k 、 V_p の値 V_{ksw} および V_{psw} を算出した。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を V_{max} とし、正規化したリアプノフ関数の値 E_{ksw} および E_{psw} を次式より算出した。

$$E_{ksw} = \frac{V_{ksw}}{V_{max}} \quad (4)$$

$$E_{psw} = \frac{V_{psw}}{V_{max}} \quad (5)$$

図1におけるF₁地点での故障を想定し、全システムの総負荷120p.u.(1,000MVAベース)を基準として、軽負荷(70%)から重負荷(115%)の間で変化させた。また、各々の負荷状態に対して、故障継続時間を不安定脱調となるまで20ms刻みで変化させた場合のリアプノフ関数の値 E_{ksw} 、 E_{psw} を算出した。その結果を図4に示す。同図において、故障除去後のシステムが安定な場合を○印、不安定な場合を●印で示す。ここで、系統縮約前の10機系統における過渡安定度シミュレーションを実施し、各発電機の位相動揺曲線の収束状況から安定および不安定の判別を行っている。すべての発電機が平衡点に収束する場合を安定、1機でも脱調に至る場合を不安定と判別した。

図4から、故障送電線を一定とした場合、ある負荷状態において、故障継続時間が長くなるに伴って運動エネルギー E_{ksw} の値が大きくなり、不安定に至る傾向が見られる。また、軽負荷から重負荷になるに伴って、位置エネルギー E_{psw} の値が大きくなり、不安定に至る傾向が見られる。以上のことから、故障送電線が一定の場合、一定の安定度領域が E_{ksw} および E_{psw} により与えられると言える。

故障点を図1におけるF₂地点およびF₃地点と想定し、同様の過渡安定度シミュレーションを実施した結果を図5および図6に示す。リアプノフ関数 E_{ksw} 、 E_{psw} の値によ

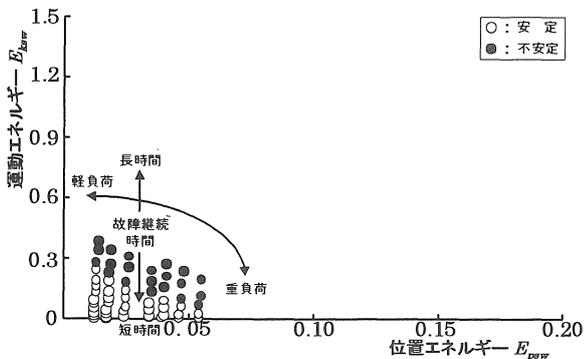


図4 過渡安定度シミュレーション結果 (故障点: 図1におけるF₁)

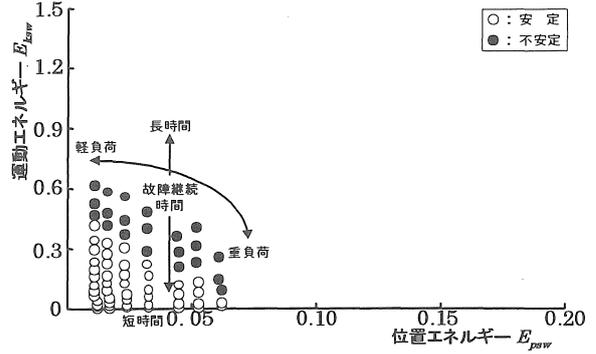


図5 過渡安定度シミュレーション結果 (故障点: 図1におけるF₂)

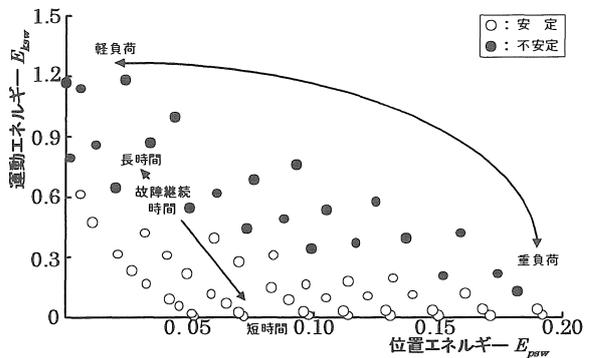


図6 過渡安定度シミュレーション結果 (故障点: 図1におけるF₃)

り与えられる安定度領域は、想定した故障点がF₁、F₂、F₃地点の順で大きくなっていることがわかる。これらの結果からも、種々の負荷状態や故障継続時間に対して、一定の安定度領域が E_{ksw} および E_{psw} により与えられると言える。

2・2・2 IEEJ EAST10 機系統における安定度領域

図7に、検討の対象としたIEEJ EAST10機系統を示す。この系統はループ系統が主体となっており、送電線はすべて2回線で構成されている。なお、同図における発電機G1は無限大母線(基準母線)としている。表3および表4に、潮流計算に用いた各発電機の出力、各負荷の値をそれぞれ示す。

図7におけるF₁地点での1回線3相永久地絡故障を想定し、前節と同様の方法で、系統縮約前の10機系統における過渡安定度シミュレーションを実施した。さらに、安定な発電機を基準母線に相当するG1とし、残りすべての発電機を不安定な発電機群として系統縮約を行い、故障送電線除去時刻 t_{sw} におけるリアプノフ関数の E_{ksw} (運動エネルギー)および E_{psw} (位置エネルギー)を算出した。故障点を図7におけるF₁地点と想定し、全システムの総負荷80p.u.(1,000MVAベース)を基準として、軽負荷(60%)から重負荷(85%)の間で変化させた。また、各々の負荷状態に

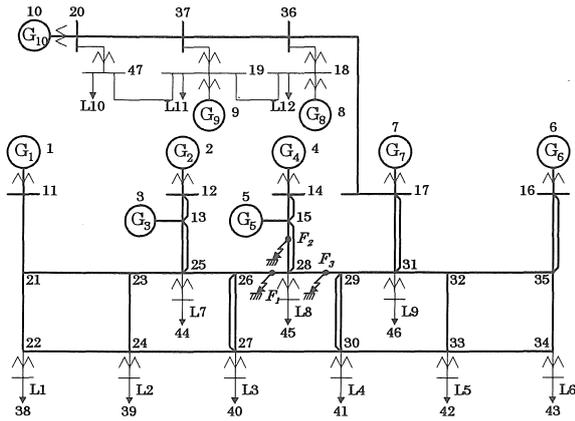


図 7 モデル系統 (IEEJ EAST10 機系統)

表 3 各発電機の出力 (IEEJ EAST10 機系統)

発電機	出力 [p.u.]	発電機	出力 [p.u.]
G1	0.0	G6	9.0
G2	11.0	G7	9.0
G3	5.632	G8	4.5
G4	9.0	G9	9.0
G5	9.0	G10	0.0

1,000MVA ベース

表 4 各負荷の大きさ (IEEJ EAST10 機系統)

負荷	P [p.u.]	Q [p.u.]	負荷	P [p.u.]	Q [p.u.]
L1	5.0	-1.200	L7	5.0	-2.499
L2	10.0	-2.416	L8	5.0	-2.480
L3	10.0	-2.671	L9	5.0	-2.532
L4	10.0	-2.593	L10	4.0	1.368
L5	10.0	-2.378	L11	5.5	1.413
L6	5.0	-1.260	L12	5.5	1.050

1,000MVA ベース

対して, 故障継続時間を不安定脱調となるまで 20ms 刻みで変化させた場合のリアプノフ関数の E_{ksw} , E_{psw} を求めた。その結果を図 8 に示す。同図において, 故障除去後の系統が安定な場合を○印, 不安定な場合を●印で示す。系統縮約をせず, 10 機系統における過渡安定度シミュレーションを実施し, 各発電機の位相動揺曲線の収束状況により安定および不安定の判別を行っている。

図 8 から, 故障送電線を一定とした場合, ある負荷状態において故障継続時間が長いほど運動エネルギー E_{ksw} の値が大きくなり, 不安定に至る傾向が見られる。また, 軽負荷から重負荷になるに伴って, 位置エネルギー E_{psw} の値

が大きくなる傾向が見られる。以上のことから, 故障送電線が一定の場合, 一定の安定度領域が E_{ksw} および E_{psw} により与えられると言える。

故障点を図 7 における F_2 地点および F_3 地点と想定し, 同様の安定度シミュレーションを実施した結果を図 9 および図 10 に示す。これらの結果からも, 種々の負荷状態や故障継続時間に対して, 一定の安定度領域が E_{ksw} および E_{psw} により与えられると言える。

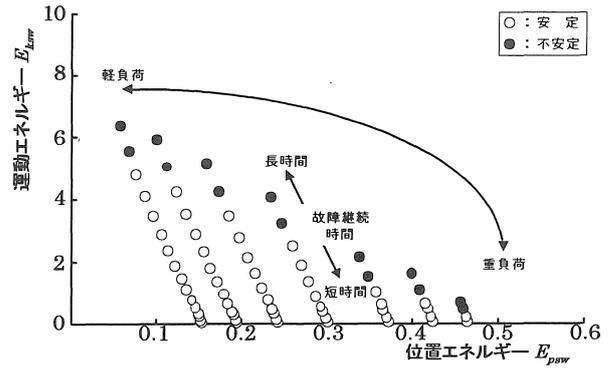


図 8 過渡安定度シミュレーション結果 (故障点: 図 7 における F_1)

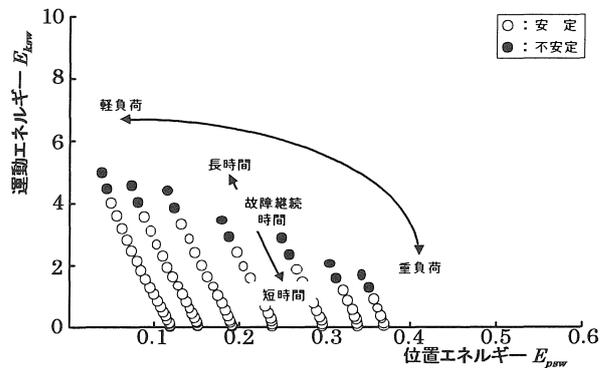


図 9 過渡安定度シミュレーション結果 (故障点: 図 7 における F_2)

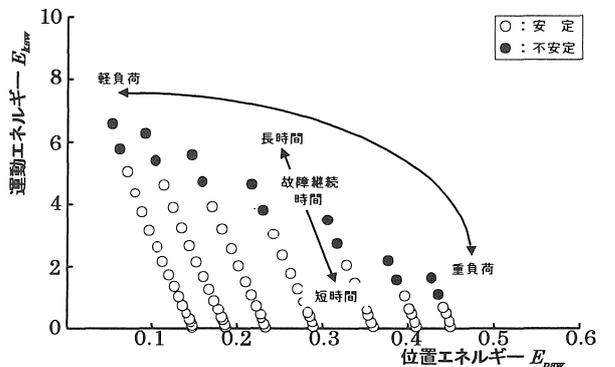


図 10 過渡安定度シミュレーション結果 (故障点: 図 7 における F_3)

3. 過渡安定度推定のシミュレーション

3.1 過渡安定度推定システム

前章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度領域が故障除去時のリアプノフ関数の E_{ksw} , E_{psw} で与えられることから、安定度推定システムを図 11 のように構築した。この推定システムは、中間層を 1 層とした 3 層階層型ニューラルネットワークで構築されている。入力層は故障送電線が除去された時点におけるリアプノフ関数の値 E_{ksw} , E_{psw} とし、想定される様々な故障線路に対して適用できる推定システムとするため故障点情報 $F_1 \sim F_N$ の計 N ユニットを追加した。出力層は安定度の推定値(安定: 0, 不安定: 1)に対応させた。ここで故障点情報は、故障ありの場合を 1, 故障なしの場合を 0 として対応させ、想定した故障点 $F_1 \sim F_N$ のうち、必ず 1 ヶ所で故障発生するという場合を想定した。

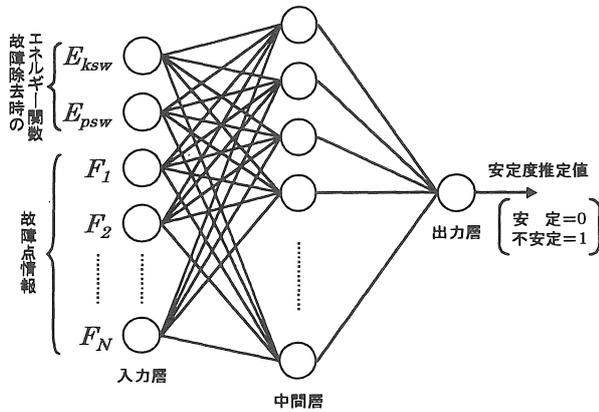


図 11 過渡安定度推定システム

3.2 過渡安定度推定の具体例

3.2.1 IEEJ WEST10 機系統における安定度推定

串型状で構成された系統における具体例として、図 1 に示す IEEJ WEST10 機系統を対象として過渡安定度推定のシミュレーションを実施した。予め想定した故障送電線に対して過渡安定度シミュレーションを実施し、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。学習方法として逆誤差伝播法(BP 法: Back Propagation Method)を用いた⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。なお、教師データは安定の場合を 0, 不安定の場合を 1 に対応させている。

具体的な方法として、故障点を図 1 における $F_1 \sim F_3$ 地点($N=3$)のうちいずれか 1 ヶ所と想定し、図 4~図 6 における故障除去時のリアプノフ関数の E_{ksw} , E_{psw} に対する安定, 不安定の関係を、安定の場合を 0, 不安定の場合を 1 として図 11 示す過渡安定度推定システムに学習させた。学習誤差が $10^{-1} \sim 10^{-2}$ となった時点で学習を終了した。

次に、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、故障除去時のリアプノフ関数の E_{ksw} , E_{psw} か

ら過渡安定度の推定が可能となる。そこで、学習に用いなかった系統状態における E_{ksw} , E_{psw} の値を用いて、故障除去後における過渡安定度推定のシミュレーションを実施した。その結果を図 12~図 14 に示す。同図の○印および●印は、各発電機の位相動揺曲線の収束状況から判定した安定, 不安定状況をそれぞれ示し、同記号に隣接する()内の数値は安定度推定値を示している。同数値は殆ど安定=0, 不安定=1 に近い値で推定されているが、安定, 不安定の境界付近において、予め実施した過渡安定度シミュレ

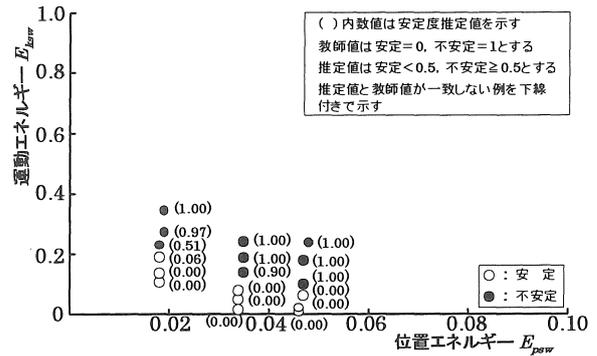


図 12 過渡安定度推定結果 (故障点: 図 1 における F_1)

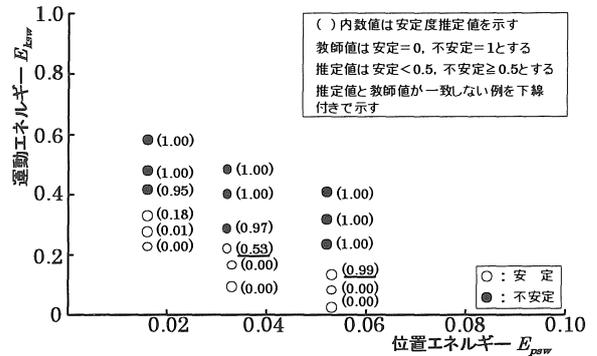


図 13 過渡安定度推定結果 (故障点: 図 1 における F_2)

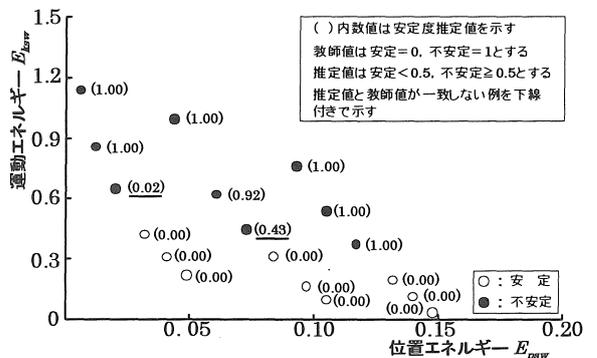


図 14 過渡安定度推定結果 (故障点: 図 1 における F_3)

ーションの結果では安定であったにもかかわらず, 不安定と推定してしまった例やその逆を示す系統状態が数ヶ所見られた(図中の推定値にアンダーラインで示す)。

3・2・2 IEEJ EAST10 機系統における安定度推定

ループ状で構成された系統における具体例として, 図 7 に示す IEEJ EAST10 機系統を対象として過渡安定度推定のシミュレーションを実施した。串型系統の場合と同様に, 教師データを準備するために予め想定した故障送電線に対して過渡安定度シミュレーションを実施した。ニューラルネットワークの学習方法として逆誤差伝播法を用い, 教師データは安定の場合を 0, 不安定の場合を 1 とした。故障点を図 7 における $F_1 \sim F_3$ 地点(N=3)のうちいずれか 1ヶ所と想定し, 故障除去時のリアプノフ関数の値 E_{ksw} , E_{psw} に対する安定, 不安定の関係を, 安定の場合を 0, 不安定の場合を 1 としして図 11 に示す過渡安定度推定システムに学習させた。

次に, 学習を終えたニューラルネットワークに対して学習に用いなかった系統状態における E_{ksw} , E_{psw} の値を用いることにより, 故障除去後における過渡安定度推定を実施した。その結果を図 15~図 17 に示す。同図の○印および●印は, 各発電機の位相動揺曲線の収束状況から判定した安定, 不安定状況をそれぞれ示し, 同記号に隣接する()

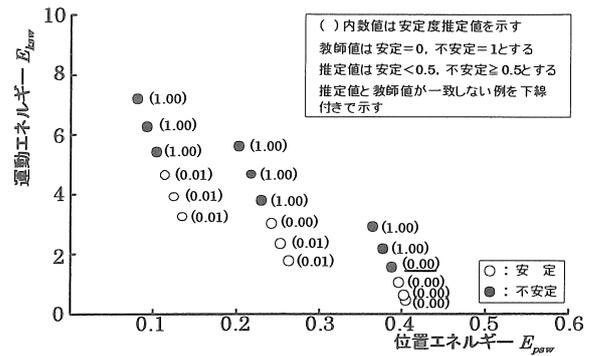


図 17 過渡安定度推定結果
(故障点: 図 7 における F_3)

内の数値は安定度推定値を示している。同数値は殆ど安定=0, 不安定=1 に近い値で推定されているが, 安定, 不安定の境界付近において, 予め実施した過渡安定度シミュレーションの結果と安定度推定値が一致しない系統状態が数ヶ所見られた(図中の推定値にアンダーラインで示す)。

4. 負荷脱落を想定した電源制限のシミュレーション

検討の対象とした IEEJ WEST10 機系統を図 18 に示す。同図における発電機 G_{10} は, 無限大母線(基準母線)に相当する発電機としている。連系線に接続された負荷が事故により永久脱落したという想定で, 電源制限のシミュレーションを実施した(図 18 中の×印で示す)。例として, 系統中央部におけるノード 6 に接続された負荷 L_6 が永久脱落した場合に, 図 19 に示すタイムシーケンスに従って発電

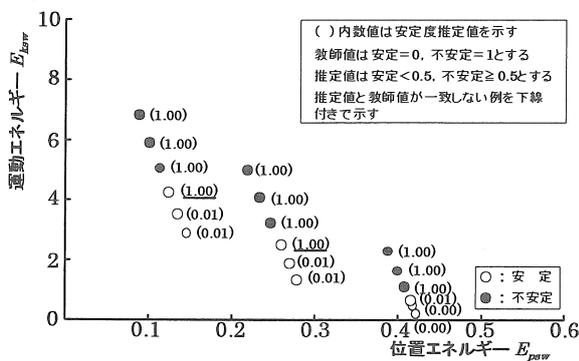


図 15 過渡安定度推定結果
(故障点: 図 7 における F_1)

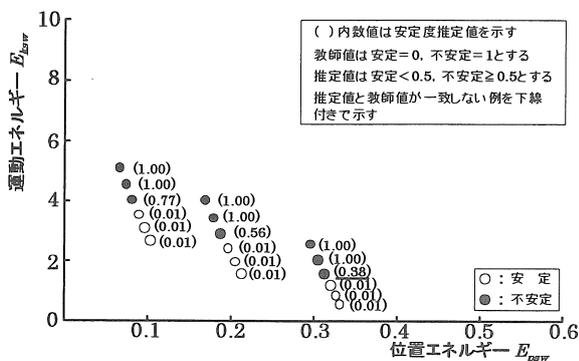


図 16 過渡安定度推定結果
(故障点: 図 7 における F_2)

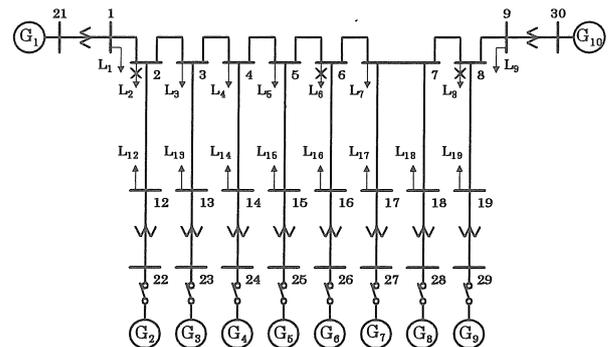


図 18 電源制限を想定したモデル系統
(IEEJ WEST10 機系統)

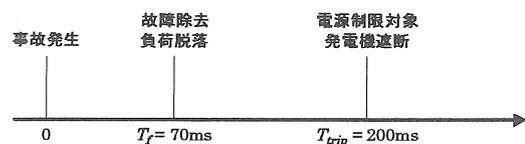


図 19 電源制限のタイムシーケンス

機 G2~G9 のうち 1 機を解列した。電源制限実施後における各発電機の位相動揺曲線の一例を図 20~図 22 に示す。図 20 は 負荷脱落事故発生後、電源制限を実施しなかった場合の位相動揺曲線であり、無限大母線に相当する発電機とした G10 を除くすべての発電機が脱調に至っている。図 21 は、事故発生後 G7 を解列した場合である。G7 を除くすべての発電機が平衡点に収束しており、電源制限の効果が確認できたと言える。また図 22 は、事故発生後 G8 を解列した場合である。この場合、G10 を除くすべての発

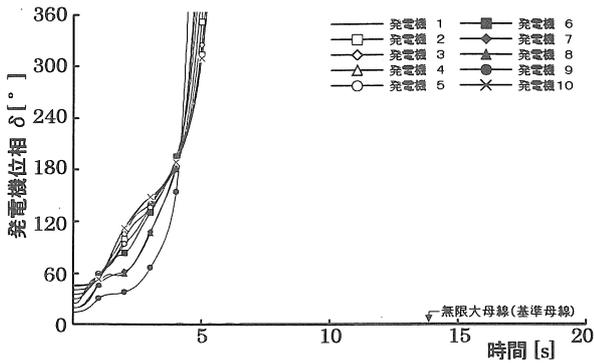


図 20 L6 負荷脱落時における位相動揺曲線 (電源制限なし)

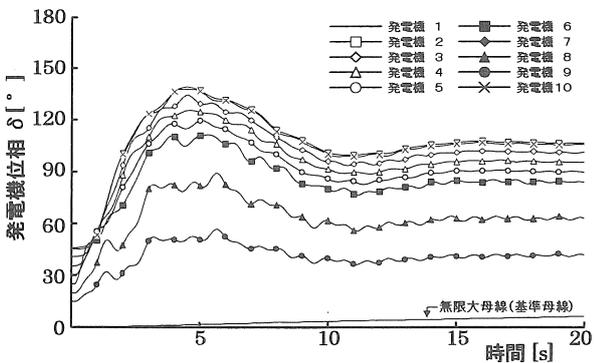


図 21 L6 負荷脱落時における位相動揺曲線 (安定な場合: G7 解列)

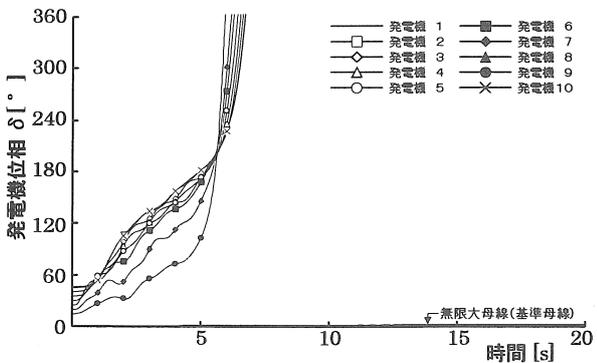


図 22 L6 負荷脱落時における位相動揺曲線 (不安定な場合: G8 解列)

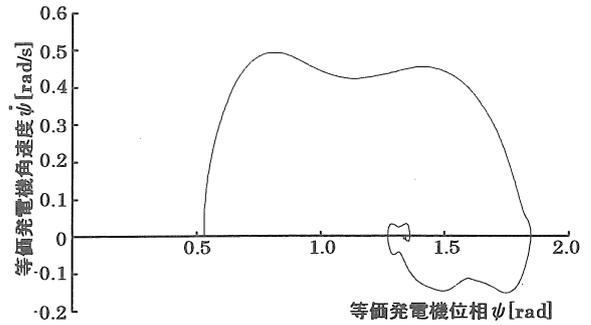


図 23 L6 負荷脱落時における等価位相面軌跡 (安定な場合: G7 解列)

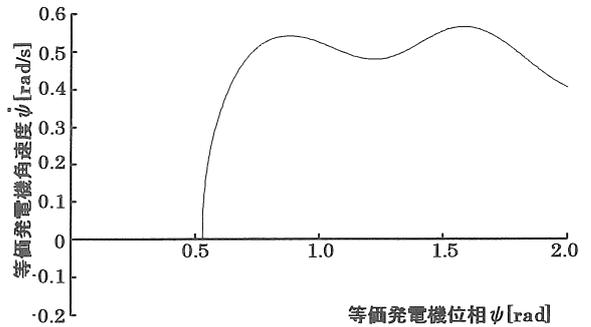


図 24 L6 負荷脱落時における等価位相面軌跡 (不安定な場合: G8 解列)

電機が脱調するに至っている。これは電源制限の効果がなかった場合の例である。このように事故発生後において、いずれの発電機を解列するかによって電源制限効果がある場合とない場合が見られるため、解列発電機の種類が重要となる。また、等価位相面軌跡から見た結果を図 23 および図 24 に示す。

L6 負荷脱落時において、解列する発電機を G2~G9 と変化させた場合の電源制限効果の有無を表 5「L6 脱落」の欄にまとめた。無限大母線 G10 から比較的遠方に設置された発電機 G2~G7 を解列した場合、いずれも電源制限効果が確認された。逆に無限大母線から比較的近い発電機 G8, G9 を解列した場合、電源制限効果は見られず、G10 を除くすべての発電機が脱調するに至った。脱落負荷を L2, L8 と想定し、同様のシミュレーションを実施した結果を表 5 にあわせて示す。L8 負荷脱落時においては、いずれの発電機を解列した場合も電源制限効果が確認されたが、L2 負荷脱落時においては、いずれの場合も電源制限効果は見られなかった。以上の結果より、想定した系統条件においては、無限大母線に比較的近い負荷が脱落した場合には解列発電機を選択することによって電源制限効果が得られるが、無限大母線から遠方の負荷が脱落した場合には、いずれの発電機を解列しようとも電源制限効果を得ることができないと言える。また解列発電機を選択する

場合, 無限大母線から比較的遠方の発電機を解列した場合において, 電源制限効果が得られると言える。

表 5 脱落負荷別の電源制限効果の比較

解列発電機	電源制限効果の有無		
	L2 脱落	L6 脱落	L8 脱落
G2	×	○	○
G3	×	○	○
G4	×	○	○
G5	×	○	○
G6	×	○	○
G7	×	○	○
G8	×	×	○
G9	×	×	○
解列なし	×	×	○

5. あとがき

故障除去時におけるリアプノフ関数から導出した運動エネルギー関数値 E_{ksw} および位置エネルギー関数値 E_{psw} と, 故障点情報と入力情報とするニューラルネットワークによる過渡安定度推定システムを適用することによって, 電力系統事故後の過渡安定度推定のシミュレーションを実施した。IEEJ WEST10 機系統(串形状)ならびに EAST10 機系統(ループ状)を対象として過渡安定度推定のシミュレーションを実施したところ, 比較的良好な推定結果が得られ, 提案した推定システムは適用するモデル系統によらず有効であることを確認した。

また, 負荷脱落事故を想定して, 一部の発電機を一時的に解列する電源制限の計算機シミュレーションを実施した。IEEJ WEST10 機系統を対象に検討した結果, 無限大母線に比較的近い負荷が脱落した場合においては, 適切な解列発電機を選択することによって電源制限効果が得られることを確認した。

今後の課題として, IEEJ WEST30 機ならびに EAST30 機を対象として過渡安定度推定システムを適用するとともに, 電源制限を想定した最適解列発電機推定システムの開発を目指すこととする。

文 献

- (1) Y.Ohura, et al. : "Development of generator tripping system for transient stability augmentation based on the energy function method", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.PWRD-1, No.3, July 1986
- (2) 大浦, 鈴木, 柳橋, 佐藤, 津久井, 松島, 小俣 : 「電源系統の事故波及防止システムの方式と構成」, 電学論 B, 112, 593~601, 1992-7
- (3) Dejan J.Sobajic, et al. : "Artificial neural-net based dynamic security assessment for electric power systems", IEEE Trans. On Power System, Vol.4, No.1, pp.220-228, 1989.
- (4) Qin Zhou, et al. : "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.
- (5) 岡本 : 「電力潮流解の重根状態と定態安定度実測結果の考察」, 電学論 B, 101, 727~734, 1981-12
- (6) 東, 宮城, 谷口 : 「多機電力系統のリアプノフ関数構成」, 電学論 B, 102, 589~596, 1982-9
- (7) Y.Xue, et al. : "A simple direct method for fast transient stability assessment of large power systems", IEEE Trans. Power System, p400-412, Vol.3, No.2, 1988.
- (8) Y.Xue, et al. : "Dynamic extended equal area criterion, part 1 basic formulation", Athens Power Tech, September 1993.
- (9) 関根泰次 : 「電力系統解析理論」, 電気書院, 1971
- (10) 馬場則夫, 小島史男, 小澤誠一 : 「ニューラルネットの基礎と応用」, 共立出版, 1994-9
- (11) 中野馨, 飯沼一之, ニューロネットグループ, 桐谷滋 : 「入門と実習・ニューロコンピュータ」, 技術評論社, 1889-9

(受理 平成13年 3月19日)