

自動復旧操作のための事故区間推定論理*

奈良 宏 一**

(昭和54年4月23日受理)

A Discriminative Logic of Faulted Elements for Power Systems Automatic Restorative Operation

by Koichi NARA

When power system's constitutional elements are dropping off by a fault, it is necessary to find and remove the cause of the fault, and to restore the power system except faulted elements, because of the reduction of blacked out area and to maintain stability of the power system. So, in such cases, the faulted elements must be found immediately.

If we want to find the faulted elements at the dispatching center, we must infer them from the state of protective relays and circuit breakers, after the faulted elements have been removed from the energized power system. (we can not obtain the information of the sequence of these apparatus' action owing to the communication system.)

Although some reports have been published by which we can infer the faulted elements from the state of the protective relays, a redesigning of existing protective relays must be necessary for practical application of these logics. So, the author proposes the discriminative logic of faulted elements by which we can infer a faulted elements from the state of existing protective relays.

In this paper, at first, the author proposes a discriminative logic of faulted elements by which we can infer the faulted elements from the digital information that is made from the state of existing protective relays and circuit breakers after the fault.

Next, the author confirms that the proposed logic is very effective for practical application, by simulating the logic using the data of real complex faults which have happened in some electric utility.

1. ま え が き

電力系統に事故が発生し、再閉路の失敗を含め、構成機器の脱落があった場合、事故区間を感知して事故原因を究明、除去するとともに、事故区間を除いた系統の復旧を行なって停電の減少、系統の安定化を図る必要がある。そのため、このような場合、すみやかに事故区間を感知しなければならない。

* 昭和52年電気学会全国大会で一部発表(昭和52年7月)

** 北見工業大学電気工学科

給電所または制御所から事故区間を探知しようとする場合、事故が持続しているうちに系統の必要な箇所の必要な状態をすべて認識できるならば正確な探知が可能である。しかし、情報の伝送速度や電子計算機による判断速度から、この認識に要する時間は数十～数百サイクルを必要としている。事故発生時、長時間に渡って短絡(地絡)電流を流したり電圧低下を許すことは、系統の不安定化や構成機器の破壊を引き起し、系統崩壊の原因ともなることから、すみやかに事故区間を分離する必要がある、その余裕は、系統安定度や機器破壊の観点から、数サイクルにすぎない。このように、短時間に1カ所に情報を収集して判断することは、現状の情報収集装置では困難であることから、現在は分散した保護継電装置を利用してローカルに故障点を除去している。したがって、系統復旧操作のために給電所または制御所で事故区間を探知するためには、保護継電装置としゃ断器によって事故区間が系統から分離された後、これらの機器の動作状況から(途中の情報伝送速度との関係から動作順序についての情報は得られない)、事故区間を推定する必要がある。

保護継電装置の動作状況から事故区間を推定するため、従来、種々の努力がなされてきているが²⁾、その場合、一度トリガがかかって動作直前で復旧した保護継電装置についても、その動作状況を知る必要があるなど、現在の保護継電装置の大幅な改良を伴わねばならないことが多かった。それゆえ、筆者らは、保護継電装置としゃ断器の最終的な動作状態のみから、事故区間を推定する論理について以前から提案してきている¹⁾。

本稿では、まず、これらの接点情報のみから事故区間を推定する論理について、文献(1)で発表した以後の研究の成果も含めて述べ、次に、実際の事故データを用いたこの論理のシミュレーションの結果から、提案する論理が、実用上、極めて有効であることを示す。

2. 本手法の特徴

事故区間を推定する場合、多重事故や複雑な波及事故になると、極めて広範囲な区間の推定しかできないことが多い。本手法は、しゃ断器と保護継電装置の動作状況を利用しているため、単純事故はもちろん、多重事故や複雑な事故波及に対しても情報さえ得られれば極めて正確にすべての事故点を推定できる。また、しゃ断器と保護継電装置の接点情報のみから事故区間を推定できるため、現在設置されている保護継電装置をそのまま利用でき、新たな装置への取替えや大幅な改良などを必要としない。さらに、少ない情報からでも事故区間の推定が可能であり、情報量の増加と共に推定の精度が上がる。したがって、段階的に情報量を増加していくよう装置を徐々に改良していくことも可能である。

一方、判断論理は人間の判断順序を一般化したものであることから運転員になじみやすく、本論理により誤った事故点を推定するかもしれないケースの予測が事前に可能であるといった特徴を有している。

3. 事故区間推定のための仮定

3.1 保護継電装置より入力可能な情報に関する仮定

一次、二次系統の線路保護に用いられる保護継電装置は、一般に表示線（搬送波）保護リレー、バランスリレー、方向過電流リレーである。これらの装置から入力可能な接点情報は、内部方向故障、故障発生、主保護・後備保護（ x 段）の別、外部方向故障である。これらの接点の関係を最も一般的な搬送波保護リレーの例で図-1に示している³⁾。

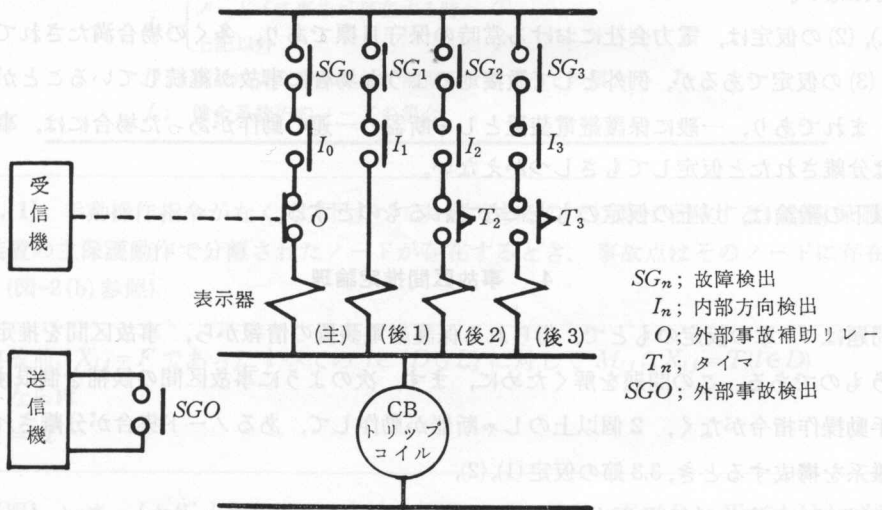


図-1 保護継電装置からの接点情報

Fig. 1. Digital information from the protective relay.

これらの情報をまとめるならば、

- (1) 保護継電装置の動作・不動作（主保護・後備保護の別を含む）
- (2) 故障が発生している方向（外部方向は表示線並びに搬送波リレーのみ）
- (3) その装置から事故点までの推定される距離（後備 x 段の別）

が保護継電装置からの情報として得られる。

この他に、母線保護リレー、変圧器保護リレーなどが設置されているが、これらの装置が動作した場合は、保護区間の主保護動作として扱う。また、選択負荷しゃ断、電源制限、転送しゃ断等の継電器動作については、その動作により分離された区間を事故区間より除外する。

3.2 情報の信頼性に関する仮定

情報伝送途中で情報を誤ることはないとは仮定する。すなわち、情報は情報源で発生したままの形で監視箇所へ到着するものとする。この仮定は、情報伝送時の誤り率が反転2連送照合+パリティ検定を行った場合、 10^{-16} のオーダーであるとの報告がある⁴⁾ことから納得できる仮定である。

3.3 保護継電装置の動作に関する仮定

保護継電装置としゃ断器の動作に関して、以下の3つの仮定を設ける。

(1) 手動による操作指令または保護継電装置からのトリップ指令がない限りしゃ断器は動作しない。

(2) 保護継電装置の不良は、全監視範囲内において1装置の1要素に限られる。(図-1より、誤方向を示すことはない)と仮定できる)

(3) 保護継電装置ならびにしゃ断器動作がすべて完了した後、健全系で事故が継続していることはない。

(1), (2)の仮定は、電力会社における常時の保守目標であり、多くの場合満たされている。一方、(3)の仮定であるが、例外として微接地のような場合に事故が継続していることがあり得るが、まれであり、一般に保護継電装置としゃ断器の一連の動作があった場合には、事故点は一旦は分離されたと仮定してもさしつかえない。

以下の議論は、以上の仮定のもとになされるものとする。

4. 事故区間推定論理

問題は「3章の仮定のもとで、得られる保護継電装置の情報から、事故区間を推定せよ」というものである。この問題を解くために、まず、次のように事故区間の候補を制限する。

手動操作指令がなく、2個以上のしゃ断器が動作して、あるノード集合が分離され、無電圧分離系を構成するとき、3.3節の仮定(1), (2),

(3)より明らかに事故が無電圧分離系に含まれるノードに存在していたと考えて良い。(但し、再閉路が成功しても、一旦分離された区間は分離系として扱うものとする) すなわち、

いま、しゃ断器(保護継電装置を含む)をブランチ、しゃ断器によって分離される区間(線路、母線等)をノードとして、図-2(a)の系統に対して図-2(b)のようなグラフを描くと、しゃ断器によって分離されたノード集合の中に事故区間が含まれていると考えて良い。この結論と、3.3節の仮定(1), (2), (3)から、以下に示すように、事故区間を分離(推定)するための [Th. 1]~[Th. 4], [Inf. 1] の論理を導くことができる。

なお、以下で使用する記号の説明を表-1に示している。

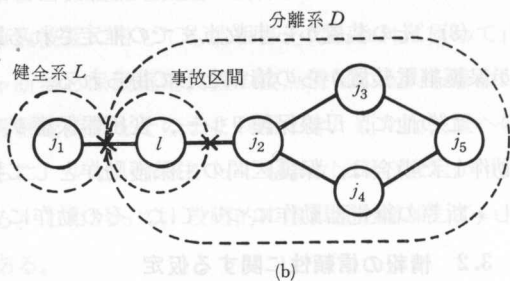
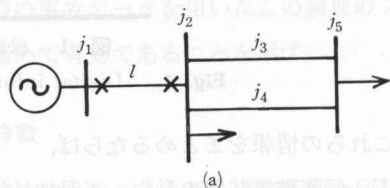


図-2 全端主保護動作の場合の(a)系統例と(b)等価グラフ

Fig. 2. (a) Example system & (b) Equivalent graph of the case that main protective relay act.

表-1 使用記号の説明

Table 1. Explanation of symbols

X_{ij} ;	ノード i とノード j を接続するしゃ断器が OFF の時: T ノード i とノード j を接続するしゃ断器が ON の時: F
M_{ij} ;	ノード i とノード j を接続するしゃ断器に対応する $j \rightarrow i$ 方向の保護継電器の主保護動作のとき: T 上記以外: F
d_{ij} ;	保護継電器の動作方向がノード $j \rightarrow$ ノード i の時: T 保護継電器の動作方向がノード $i \rightarrow$ ノード j の時: F
J_i ;	ノード i に事故が存在する時: T 上記以外: F
D ;	事故により分離された無電圧分離ノードの集合
L ;	健全系統内のノードの集合

[Th. 1] 手動操作指令がなく (以下すべて共通であるので以降は省略する) 全端保護継電装置の主保護動作で分離されたノードが存在するとき、事故点はそのノードに存在する。(図-2(b) 参照)

事故前, $X_{lj} = F$ であったすべての $j \in \{D \cup L\}$ に対して $M_{lj} \cap X_{lj} = T (l \in D)$
ならば
 $J_l = T$

[証明] いま, $J_l \neq T$ と仮定すると, $J_i = T (l \neq i \in D)$, $M_{lj} = F$, $M_{lk} = T$ でなければならない。しかるに, $M_{lj} = T$, $M_{lk} = F$ であるから 2 つ以上の保護継電要素が不良であったことになり, 3.3 節の仮定 (2) に反する(脚注 1)。これは, $J_l \neq T$ と仮定したためである。よって, $J_l = T$ でなければならない。(証明終)

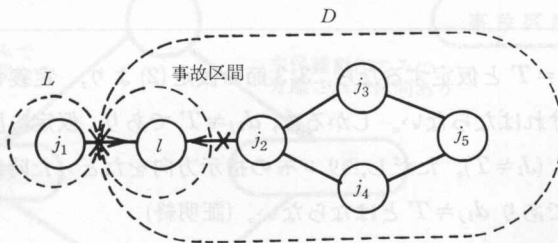


図-3 すべての保護継電器動作が同一方向の例

Fig. 3. Example of that all protective relays' directions are the same node.

(脚注 1) 線路保護の場合は端子毎に異った保護継電装置が設置されており, 2 要素以上の不良は明らかであるが, 母線または機器保護の場合には全端を 1 個の保護継電装置で保護していることが多く, その場合, 直観的には 2 要素以上の不良とは判断し難い。しかし, 一般には, 1 装置で 2 種類以上の故障検出要素を並用しており, 1 つの装置の誤(不)動作は, 2 要素以上が不良の場合のみに発生する。

[Th. 2] 他の1つ以上のノードと接続があるノードにおいて、すべての保護継電装置が、故障点をそのノード方向として動作しているとき、そのノードが事故区間である。(図-3)

事故前、 $X_{lj} = F$ であったすべての $j \in \{D \cup L\}$ に対して $d_{lj} = T (l \in D)$
 ならば
 $J_l = T$

[証明] 3.3節の仮定(2)より保護継電装置が反対方向を示すことはなく、 $d_{lj}(=T)$ が定義されるならば、これはすべて正しい方向を示していることになる。したがって、いま $J_l \neq T$ と仮定するなら、少なくとも1つの保護継電装置において $d_{lj} \neq T$ でなければならず、条件に反する。よって $J_l = T$ でなければならない。(証明終)

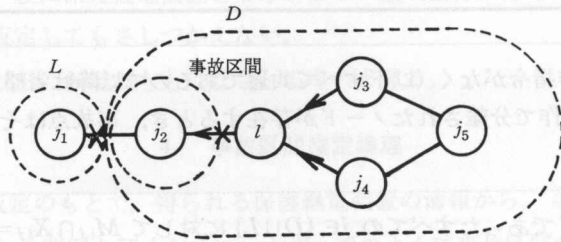


図-4 いくつかの保護継電器動作が外部方向の例
 Fig. 4. Example of that some protective relays' directions are external.

[Th. 3] 保護継電装置の動作が外部方向を示しているノードは事故区間ではない。(図-4)

d_{lj} が定義される少なくとも1つの $j \in \{D \cup L\}$ に対して $d_{lj} \neq T (l \in D)$
 ならば
 $J_l \neq T$

[証明] いま、 $J_l = T$ と仮定するなら、3.3節の仮定(2)より、定義されるすべての d_{lj} について $d_{lj} = T$ でなければならない。しかるに、 $d_{lj} \neq T$ であり、仮定に反する。よってノード l は事故区間ではない ($J_l \neq T$)。ただし、リレーの指示方向をたどった時に、再び当該ノードに至る場合は $d_{lj} = T$ であり $d_{lj} \neq T$ とはならない。(証明終)

また、リレーの示指方向にしたがってたどった時に、事故区間より除外されたノードに至るようなノードについても同様に事故区間ではないことがわかる(脚注2)。

[Th. 3] により事故区間以外のノードを除外した後、[Th. 1], [Th. 2] を満足するノードがなく、かつ、ノードが1つも残らないならば事故区間は不明である。しかし、もし、1つでもノードが残った場合には、以下のように事故区間の推測が可能である。

(脚注 2) 枝の方向(リレーの動作方向)が不明の場合は、その枝の向きを両方向性として扱うものとする。

[Th. 4] [Th. 3] により事故区間対象外のノードを除いた後、残ったノードのいずれかに事故区間が存在し、残ったノードが唯一つならば、これが事故区間である。(図-4)

[証明] 3.3 節の仮定 (1), (3) から事故は必ず D の要素に存在し, [Th. 3] で明らかに事故区間でないとされたノード以外のノードに存在しなければならない。したがって, 残りのノードが唯一つであるならこのノード以外に事故が存在し得るノードはなく, このノードが事故区間でなければならない。(証明終)

もし, 残ったノードが2つ以上であるならば, さらに, 次のように推測が可能である。

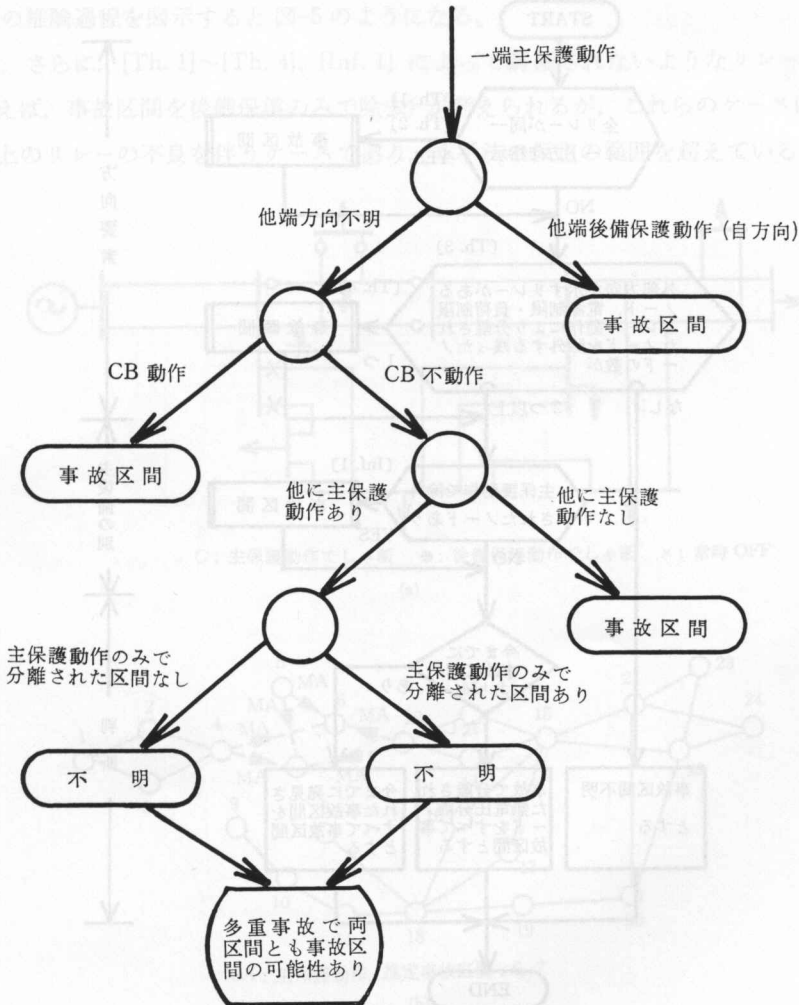


図-5 一端主保護動作の場合の推論過程

Fig. 5. Inference flowchart for main protective relays' act.

[Inf. 1] 一端主保護（または後備保護1段）で動作した保護継電装置を持つノードが存在するときは、そのノードが事故区間である可能性がある。

一端主保護動作とは、他端が不動作または後備保護動作であることをいう。もし、他端がすべて後備保護動作（自方向）であるならば、[Th. 2] より明らかにこのノードが事故区間とされる。しかし、他端が不動作の場合には、そのノードを事故区間として確定することは困難であり、次のように場合によって推論する必要がある。

いま、他に主保護動作がなければ（仮定よりどこかに事故が存在しなければならないので）、

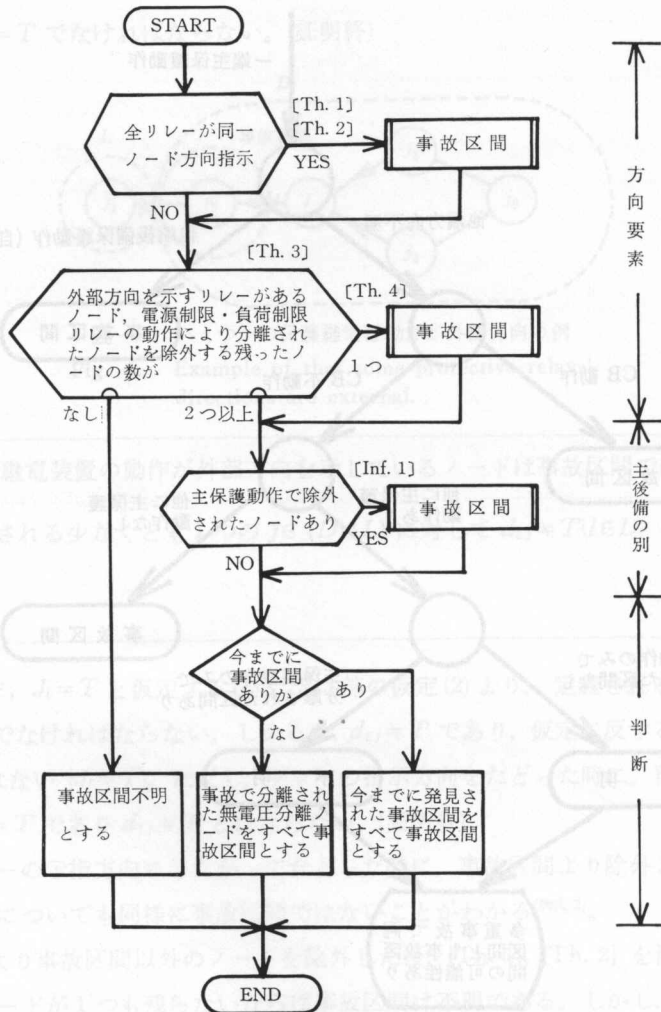


図-6 事故区間推定論理のフローチャート

Fig. 6. Flowchart of the discriminative logic of faulted elements.

事故区間が片端のみ主保護で分離された（他端は誤不動作）と推測することができ、この区間を事故区間として推定できる。

また、もし、他に主保護動作のみで分離された区間がすでに存在するならば、多重事故かまたは主保護が誤動作と推定できる。すなわち、多重事故で他端の主保護誤不動作かまたは注目している主保護それ自体が誤動作かのいずれかであり、そのいずれとも断定はできない。

さらに、一端主保護動作のノードが数ノード存在する場合（2つ以上のリレーが不良でなければならず、2.3節の仮定(2)から本来起り得ないのだが）も同様に事故区間を断定できない。

しかし、このような状態が発生した場合には、運転員の注意を喚起するため、一端主保護動作で断されたノードをすべて事故区間の可能性ありとするものとした。

以上の推論過程を図示すると図-5のようになる。

さて、さらに、[Th. 1]~[Th. 4], [Inf. 1] によって網羅されないようなリレーの動作ケース（たとえば、事故区間を後備保護のみで除去）が考えられるが、これらのケースは、すべて、2要素以上のリレーの不良を伴うケースであり、本手法の仮定の範囲を超えている。したがっ

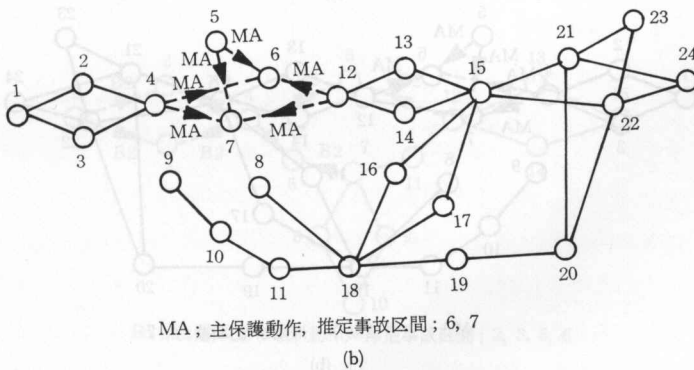
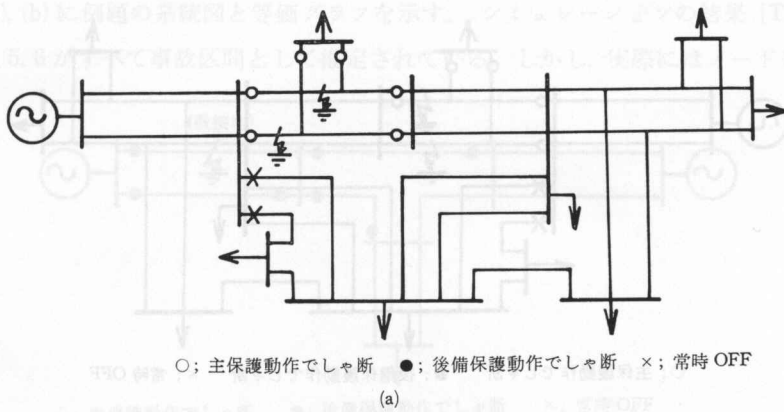


図-7 例題1の(a)系統図と(b)等価グラフ

Fig. 7. (a) Example system & (b) Equivalent graph of Example-1.

て、本稿で対象とするケースは以上に尽くされている。

そこで、[Th. 1]~[Th. 4], [Inf. 1] をこの順序で調査し、これらの条件を満足する区間をすべて事故区間として列挙することによって、事故区間を推定することができる。この手順をフローチャートの形で図-6 に示している。

5. 例題による論理のシミュレーションと考察

以上に説明した論理では、保護継電装置が正しく動作し、主保護で事故区間のみを正確に除去した場合には、誤りなく事故区間を推測可能であることは明らかである。そこで、ここでは本論理の有効性を検討するため、実際に系統で発生した複雑な事故 15 例の事故区間の推定を電子計算機を用いてシミュレーションした結果について示す。(特に複雑な事故例をとり上げたため、仮定に反して 2 個以上の保護継電装置が誤動作または誤不動作した例も含まれている) 15 例すべてについて詳細に紹介することが望ましいが、紙面の都合から、正しく推定する場合と推定を誤る場合の代表的であると思われる 3 例のみを詳細にとり上げ、他の例については

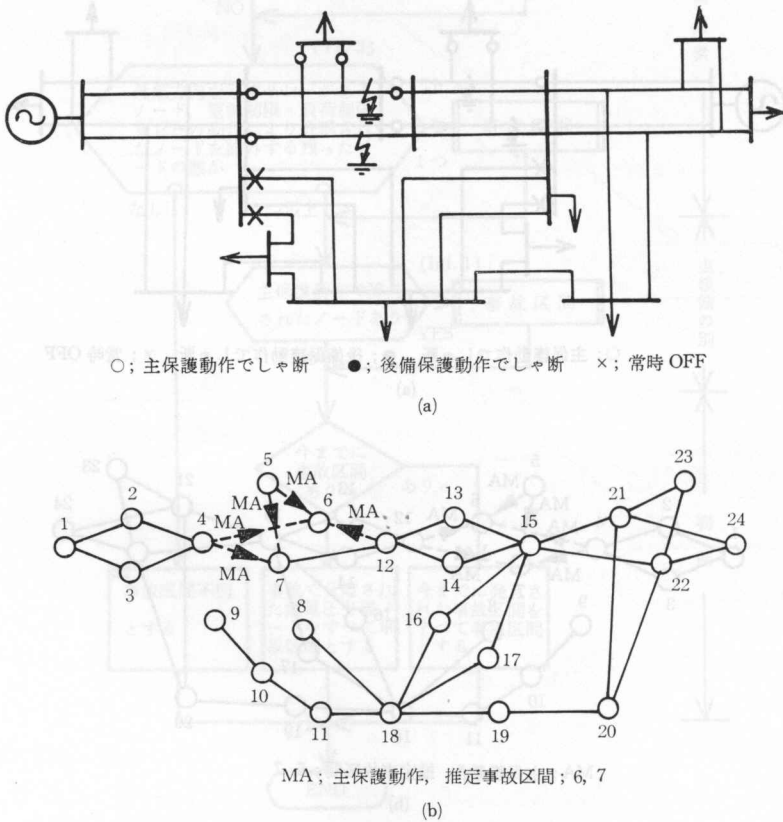


図-8 例題 2 の (a) 系統図と (b) 等価グラフ
Fig. 8. (a) Example system & (b) Equivalent graph of Example-2.

表-2の一覧表に結果のみを示すにとどめた。

なお、シミュレーションには、北大大型計算機センタのFACOM-230/75を用い、事故前、事故後のしゃ断器とリレーの動作状況はデータとして入力した。

[例 1] 全リレー正動作で事故区間を除去した場合 (ケース 4)

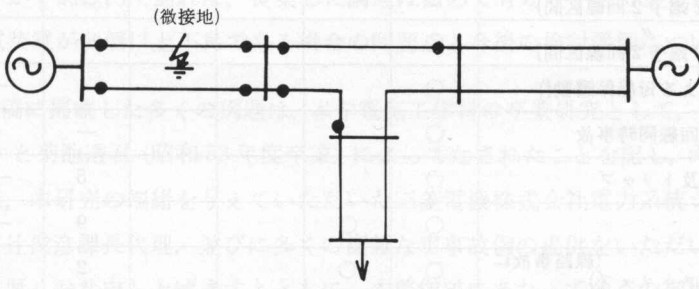
例題の系統図と等価グラフを図-7 (a), (b) に示す。図-7 (b) より、全端主保護でノード 6, 7 が分離されているゆえ、[Th. 1], [Th. 2] から、ノード 6, 7 が事故区間として正しく推定されている。

[例 2] 負荷側端子不動作の場合 (ケース 5)

例題の系統図と等価グラフを図-8 (a), (b) に示す。図-8 (b) から明らかなように、[Th. 1] [Th. 2] によりノード 6 が、[Inf. 1] によりノード 7 が事故区間として推定されている。ノード 7 は事故区間にもかかわらず、負荷側端子不動作のため、[Th. 1]~[Th. 4] で確定できず、[Inf. 1] による推定で事故区間とされている。

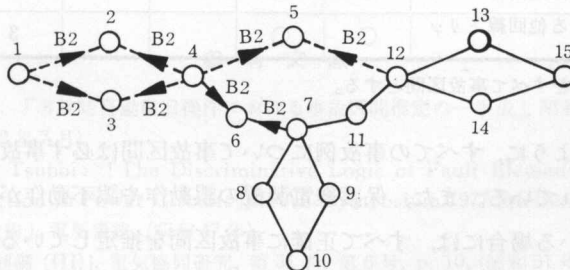
[例 3] 微接地による後備保護動作の場合 (ケース 14)

図-9 (a), (b) に例題の系統図と等価グラフを示す。シミュレーションの結果 [Th. 2] よりノード 2, 3, 5, 6 がすべて事故区間として推定されている。しかし、実際にはノード 2 のみで微



○; 主保護動作でしゃ断 ●; 後備保護動作でしゃ断 ×; 常時 OFF

(a)



B2; 後備保護 (2段) 動作, 推定事故区間; 2, 3, 5, 6

(b)

図-9 例題 3 の (a) 系統図と (b) 等価グラフ

Fig. 9. (a) Example system & (b) Equivalent graph of Example-3.

接地が発生し、十分な故障電流が得られず、ノード2の主保護が動作できないために他回線並びに近接区間の後備保護リレーが動作してこのような結果に至ったものであり、リレーの誤動作、誤不動作の影響で事故区間以外の区間が事故区間として推定されていることがわかる。

他の例についても、同様に図-6のフローチャートにしたがってシミュレーションがなされ表-2に示すような結果を得ている。

表-2 事故区間推定結果の一覧表

Table 2. Table for the results of the simulation of the discriminative logic of faulted elements

ケース No.	事故様相	真の事故区間を正しく推定	事故区間以外も事故区間として推定	真の事故区間を事故区間としない	事故区間不明*	誤動作リレー数	誤不動作リレー数	備考
1	全端主保護動作	○				—	—	
2	同一区間2回線同時事故	○				—	—	2重事故
3	構内向きリレー動作	○				—	—	母線事故
4	3端子線路2回線同時事故	○				—	—	2重事故
5	負荷端子リレー不動作	○				—	1	
6	1つの線路区間でリレーが互い違いに動作(2端子2回線区間)	○				—	1	
7	〃 (3端子2回線区間)	○				—	2	
8	線路事故による母線保護動作	○				1	—	
9	2区間で2回線同時事故	○				—	4	4重事故
10	近接区間波及トリップ	○				5	—	
11	〃	○	○			9	—	
12	〃 (線路事故によるトランストリップ)	○	○			2	1	
13	〃 (線路事故によるトランス2次側過電流リレー動作)				○	1	1	推定のための情報不足
14	微接地による後備保護動作	○	○			6	2	
15	一端子不動作による他回線トリップ	○	○			3	1	

* 無電圧分離ノードをすべて事故区間とする。

表-2からわかるように、すべての事故例について事故区間は必ず事故区間として推定されたノード集合に含まれている。また、保護継電装置の誤動作や誤不動作がない場合、並びにそれが1個に限られている場合には、すべて正確に事故区間を推定している。また、事故区間の推定を誤る場合でも(このような場合は、2個以上のリレーの誤動作または誤不動作を含んでいて明らかに設定された仮定の範囲を超えており、発生することは極めてまれであるのだが)、真の事故区間は必ず事故区間として推定されており、真の事故区間を事故区間ではないとする誤りはまったく発生していない。

以上から、保護継電装置の誤動作または誤不動作が1個以内の事故に関しては、本手法が極めて有効であることがわかる。さらに、まれにしか発生することがないように2個以上の保護継電装置の誤動作または誤不動作による事故除去に対しても、真の事故区間は、事故区間として推定されたノード集合内に含まれており、この場合にも、事故区間の確定こそできないが、その存在範囲を限定する意味で有効であることが実証された。

一般に事故区間の推定が複雑になるのは、保護継電装置が2個以上誤不動作または誤動作した場合と多重事故との見分けを必要とする場合であるが、本手法によれば、安全のため、いずれの場合も多重事故であるとして事故区間を推定してしまうことになる。しかしながら、今後、保護継電装置の動作情報から、多重事故なのかリレーの誤動作(誤不動作)なのかを判断できないか検討し、それによってリレーが2個以上不良の場合にも事故区間の確定が可能なよう、論理の改良を重ねていきたいと考えている。

6. 結 言

本稿では、電力系統に事故が発生した場合、保護継電装置としゃ断器の情報から事故区間を推定する論理について提案した。そのシミュレーションの結果から、保護継電装置の誤動作または誤不動作が1個以内であれば、提案した論理は極めて有効な手法であることを示し、さらに、保護継電装置が2個以上不良である場合の問題点と今後の検討課題について述べた。

最後に、本稿に掲載した多くの例題は、本学電気工学科の卒業研究として、今井秀信君(昭和52年度卒業)と菊池透君(昭和53年度卒業)によってなされたことを記し、両君への謝辞にかえたい。また、本研究の端緒を与えていただいた三菱電機株式会社電力系統システム部山田郁夫部長代理、辻俊彦課長代理、並びに多くの複雑な実事故例の提供をいただいた国内電力会社の関係各位に厚くお礼申し上げますとともに、本稿作成にあたって多くの御指導と助言をいただいた小池東一郎北見工業大学長、山城迪北見工業大学教授、長谷川淳北海道大学工学部助教授に深謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 森田・吉田・辻・奈良: 「事故時自動復旧操作における事故区間推定の一手法」, 昭和52年電気学会全国大会 1135 (昭和52年7月).
- 2) 例えば, Matsuoka, Tsuboi: 「The Discriminative Logic of Fault Elements for a Centralized Backup Protection in Power Circuits」, IFAC Symposium 1977 (Melbourne, February 1977).
- 3) 小林: 「保護継電技術」, 電気書院, (昭和47年).
- 4) 「発電所遠方監視制御 (III)」, 電気協同研究, 第31巻, 第6号, p. 10, (昭和51年1月).