UDC 621.311.15:621.318.5-52:681.3.02

論文

59-B77

保護リレーシステムの構造と機能の記述に基づく事故設備の判定

正員 和 気 朝 臣 (三菱電機)

正員 坂 口 敏 明 (三菱電機)

1. ま え が き

大規模・複雑な電力システムに対し、計算機を用いた運用の自動化が進んでいるが、こうしたシステムが具備すべき機能の一つに事故時に正しく事故設備を判定する機能がある。電力系統内の事故に対し、その事故を速やかに除去し、システムを保護するのは保護リレーシステムである。保護リレーシステムは確実に信頼性の高い系統保護を図るために、リレーの数や種類が多く、それらの協調をとるためにリレーシーケンスは相互に複雑に関連し合っている。そのため系統事故発生時に保護リレーの動作をもとにした事故設備の判定は次第に困難となりつつあり、その自動化手法の開発が望まれている。

本論文では、リレーとしゃ断器の動作情報をもとにした事故設備の判定法を提案する。対象とするリレーは事故除去リレーで、UFRのような事故波及防止リレーは考えない。事故設備判定の手順は、まず、保護リレーシステムをその機能と構造に着目して論理回路で表現する。次にそのような論理回路と推論の手続きをproduction rule (以下、規則と呼ぶ) で記述し⁽¹⁾⁽²⁾、得られた観測値を論理回路に与え、これらの規則を適用してリレーシーケンス内で推論をすすめることにより、事故設備を判定する。給電所員が事故設備を判定する場合も、このような演えきの手法を駆使していると考えられる。本手法は、記号処理によって論理回路をたどるので、それに適したプログラム言語 LISP によって実現されている。

本論文で提案する事故設備判定法は例えば、事故時

自動復旧システム⁽³⁾に組み込み、復旧手順の作成に先立って事故状況の把握などに適用することをねらいとしている。

2. 保護リレーシステムの構造と機能の表現

〈2・1〉 論理回路によるモデル化

事故設備自動判定の基礎となる論理回路として、事故とリレーの起動入力、ならびにトリップ信号と、しゃ断器の動作に関する因果関係をリレーシーケンスに加えたものを考える。例として、図1のようなモデルシステムに対して保護リレーシステムを論理回路によって表現したものを次に示す。

図1において、A, B, Cは各母線の名前で、T1, T2は変圧器名で、L1, L2は送電線名である。A1やA2はそれぞれ母線Aの甲側母線と乙側母線を示す。

図1 モデル系統

Fig. 1. Model system.

Method to Determine the Fault Components of Power System Based on Description of Structure and Function of Relay System.
By Tomooomi Wake, Member & Toshiaki Sakaguchi, Member
(Mitsubishi Electric Corporation, Central Research Laboratory).
和気朝臣: 正員, 三菱電機(株)中央研究所
坂口敏明: 正員, 三菱電機(株)中央研究所

T1P87 から T1S51 は変圧器 T1 の一次側および二次側に設置されたリレー要素を示す。L1B78 から L1B51 は送電線 L1 の母線 B 側に設置されたリレー要素を示している。しゃ断器は CB で示され、CB1 から CB11 までが設置されている。系統設備の事故は F で示され各設備に対応して F1 から F10 までを考える。主保護リレーには送電線用として位相比較リレー 78 や母線・変圧器用として差動リレー 87 を用いる。後備 1 段リレーや後備 2 段リレーには距離リレー 44-1, 44-2 をそれぞれ用いる。不足電圧リレー 27 と過電流リレー 51 は主保護および後備保護リレーの誤動作防止用として用いる。

保護対象となる系統設備には、送電線、変圧器、母線があり、それぞれのリレーシケンスに基づく論理回路によって保護リレーシステムをモデル化した。例えば、図2には図1のモデル系統における送電線 $L1$ の保護リレーシステムが表現されている。図において $L1B78$ や $L1B51$ などは送電線 $L1$ の母線 B 側に設置された位相比較リレーと不足電圧リレーである。各リレーはある特定の事故に対してのみ動作するという点から、事故を入力としその事故によるリレー動作を出力とするような AND ゲートによって表わされている。但し、 $L1B44-2$ のような後備2段リレーでは保護範囲が2設備以上にわたるので、入力となる事故が複数考えられ、どの事故が発生してもリレー動作があるように OR ゲートを用いている。

一般に、リレーシーケンスにはタイマが使われているが、本論文ではその機能を等価な論理回路で表現した。例えば、送電線 $L1$ の母線 B 側に設置された後備 1 段リレーに使われるタイマは、主保護リレーが誤動作したときに、ある一定時間後に後備一段リレーが動作するようになっており、論理素子 $L1B-3$ は等価的にそれを表わしている。

TC7 はリレー動作によって発生したしゃ断命令を受けてしゃ断器 CB7 をトリップさせるためのトリップコイルを表わしている。CB7 は送電線 L1 の事故のみでなく母線 B1 の事故時にも動作する。そこで、どちらの場合にもしゃ断指令を出すように、TC7 に OR ゲートを用いる。しゃ断器 CB7 には、トリップコイル TC7 のしゃ断指令を入力とし、しゃ断すれば出力がある AND ゲートが使用されている。

1 リレーシーケンスを、例えば事故 $F7, F8, F9, F10$ を入力とし、しゃ断器 $CB7$ を出力とする $L1B78$ から $L1B51$ と $L1B-1$ から $L1B-13$ と $TC7$ により構成される論理回路によって定義する。この定義に従えば、送電線 $L1$ の保護リレーシステムは $L1B$ と $L1C$ で示される二つのリレーシーケンスより成り立っている。更に、図2の論理素子 $L1B-12$ の入力の一つに $CB10$ の出力があり、 $TC7$ の入力に母線保護リレーの出力 $B1-1$ がある。このことからわかるように、各設備の保護リレーシステムはそれぞれ独立しているだけでなく、相互に関連し合って全体として図1の系統の保護リレーシステムを構成している。

事故により観測されたリレーやしゃ断器の動作情報は論理値によって表現され、相当する論理素子の端子の値となる。1 はリレーやしゃ断器が動作したことを、0 は動作していないことを表わす。ここでいうリレー情報とは、個別リレーの動作情報を意味しているのではなく、給電所などで実際に得られる集約されたリレー情報である。つまり、トリップ指令を出したリレーが主保護によるものか後備1段または後備2段によるものかだけがわかっているものとする。例えば、図1のようなモデル系統において、送電線 $L1$ の母線 B 側に設置されたリレーのうち、主保護リレー ($L1BMry$) が動作して、しゃ断器 ($CB7$) がトリップしたという情報が観測されたとする。主保護リレーの動作により図2の論理素子 $L1B-1$ の入力端子 $X1$ には1が与えられ、しゃ断器の動作から $CB7$ の出力 $X2$ にも1が与えられる。この場合、後備1段、2段リレーはともに動作していないので、論理素子 $L1B-1$ の入力 $X2$ と $X3$ には0が与えられる。ほかのリレー設備から得られる動作情報も同様に論理素子 $L1C-1, T1P-1,$

図 2 送電線 $L1$ の保護リレーシステム
Fig. 2. Relay system for line $L1$.

B-1 などの入力に与えられ、しゃ断器情報は CB の出力に与えられる。

以上のようにして、保護リレーシーケンスとしゃ断器の事故時の動作モデルが、論理回路によって表現できる。

〈2・2〉 規則を用いた論理回路の記述 本論文でいう規則とは前提部 (PREMISE) と結論部 (ACTION) とをもつ production rule である。それは、前提部が真であることがわかれば結論部を実行するもので、論理素子の端子の値を決定するために用いられ、論理関係を自動的にたどることができる。

保護リレーシステムの構造と機能は図 2 に示すような論理回路によって表現することができた。このような論理回路を規則で記述するには、各論理素子の端子間の接続関係と論理素子の入出力端子間の論理関係を記述する必要がある。図 2 の論理回路の一部を取り出した図 3 の例を用いて、それらをどのように規則で記述するかについて述べる。

論理素子 L1B-1 の端子 X1 と別の論理素子 L1B-2 の端子 X3 とを接続するには図 4 のような規則があればよい。第 1 番目の規則は、素子 L1B-1 の端子 X1 の値がわかれば (KNOWN), その値 (VALUEOF) を L1B-2 の端子 X3 の値とする (CONCLUDE) ことを意味している。2 番目の規則はその逆である。これらの規則を評価し、結論部を実行すると、それぞれ図 3 の rule 1 と rule 2 の矢印が示す方向に値が伝わっていく。

図 3 の論理素子 L1B-2 のような AND ゲートの論理関係を記述するには図 5 の規則があればよい。第 1 番目の規則は、論理素子 L1B-2 の入力 X2 と出力

図 3 論理回路の記述例

Fig. 3. Example of a logic circuit.

```

RULE1
PREMISE (KNOWN L1B-1 X1)
ACTION (CONCLUDE L1B-2 X3
        (VALUEOF L1B-1 X1))

RULE2
PREMISE (KNOWN L1B-2 X3)
ACTION (CONCLUDE L1B-1 X1
        (VALUEOF L1B-2 X3))

```

図 4 接続関係を記述する規則例

Fig. 4. Example of connective relation rules.

```

L1B-2$AND-RULE1
PREMISE (AND (KNOWN L1B-2 X2)
            (KNOWN L1B-2 X3))
ACTION (CONCLUDE L1B-2 X1
        (LOGAND L1B-2 X2 X3))

L1B-2$AND-RULE2
PREMISE (AND (KNOWN L1B-2 X1)
            (KNOWN L1B-2 X3))
ACTION (CONCLUDE L1B-2 X2
        (LOGAND L1B-2 X1 X3))

L1B-2$AND-RULE3
PREMISE (OR (KNOWN L1B-2 X1)
            (KNOWN L1B-2 X2))
ACTION (CONCLUDE L1B-2 X3
        (LOGAND L1B-2 X1 X2))

L1B-2$AND-RULE4
PREMISE (AND (KNOWN L1B-2 X3)
            (SAME L1B-2 X3 1))
ACTION (AND (CONCLUDE L1B-2 X1 1)
            (CONCLUDE L1B-2 X2 1))

```

図 5 論理関係を記述する規則例

Fig. 5. Example of logical relation rules.

表 1 関数 LOGAND の引数と関数値

Table 1. Arguments and a value of the function LOGAND.

引数 X 2	引数 X 3	値 X 1	引数 X 1	引数 X 3	値 X 2	引数 X 1	引数 X 2	値 X 3
1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	0	0	1	0	0	1	0	0
0	1	矛盾	0	1	矛盾	0	1	0
0	0	不定	0	0	不定	0	0	0

X3 の値がわかれば (KNOWN), それらの値を引数とする関係

(LOGAND L1B-2 X2 X3)

を実行して入力 X1 の値を決定している (CONCLUDE)。関数 LOGAND は、表 1 に示すように、AND ゲートの端子 X1, X2, X3 のうち二つの値から、残りの一つの値を決定している。その値が矛盾や不定であれば、残りの端子の値は決定されない。第 2 番目の規則は第 1 番目と同様である。第 3 番目の規則は、第 1 番目の規則と同様に 2 入力値が既知であれば、LOGAND を使用して出力値を決定するほかに、1 入力が 0 で、他の入力が未知の場合にも LOGAND を使い出力値を 0 と推論できるよう、前提部に OR が使われている。第 4 番目の規則は出力値が 1 であれば (SAME), 入力がすべて 1 でなければならないことを示している。以上の規則によって、AND ゲートの端子の値をすべて推論することができる。

論理回路の接続関係と論理関係は、図 4 や図 5 に示したような規則を用いて、記述することができる。AND ゲート以外の論理素子に対しては、図 5 と同様な規則を用意して、LOGAND に相当する各端子の値を決定する関数を定義しておけばよい。図 2 の論理回路も同様な規則によって記述できるが、その際、多数

の規則を個々に作成しなければならず労力を要する。そこで、接続関係や論理関係を記述する標準の規則を用意して、簡単な置き換え操作を行なう関数を定義することにより、必要な規則を自動的に作成した。

3. 事故設備判定と故障要素の検出

〈3.1〉 事故設備判定のための仮設 観測値を論理回路に与えて、〈2.2〉節で述べた規則を用いて事故 F の値を求め、事故設備を判定する。しかし、現実には保護リレーやしゃ断器の故障を伴うことがあるため、この故障を判定論理に組込んでおく必要がある。このため、事故設備の判定を行なう上で、故障に関する次のような仮説をたてる。

(仮 説)

1. 論理回路によって記述されていない要素や論理関係は考慮しない。
2. 故障は主保護リレーとしゃ断器に限定する。
3. 故障要素は誤不動作するものとし、誤動作はしないものとする。
4. 1 リレーシーケンスに対し、リレーとしゃ断器のどちらかが故障するものとし、同時には故障しないものとする。

仮説1により故障として考える要素は論理回路に記述したものだけに制限される。保護リレーシステム内のすべての要素ごとに故障を考えると、膨大な数の組合せを調べる必要がある。例えば、要素の数を N とすると、 2^N の組合せがある。そこで、実際に故障する頻度を考慮して、考えられる故障要素の数を制限するために仮説2をたてた。すなわち、リレーの故障は主保護のみを考えて、後備保護リレーは故障しないものとする。仮説3により、故障様相は誤不動作のみに制限される。それゆえ、動作した観測情報が得られればその情報を出力する要素は正しく動作している。仮説4は、故障の生じた要素を指定するために用意されている。例えば、〈2.1〉節で述べた1リレーシーケンスとして、送電線 $L1$ の母線 B 側に設置されたリレーのシーケンスを考えると、主保護リレー $L1B78$ としゃ断器 $CB7$ のどちらかが故障するものとし、同時には故障しないことを仮定する。

〈3.2〉 事故設備判定のための推論方式 本論文でいう事故設備判定とは、観測されるリレーやしゃ断器の動作情報をもとに、規則を適用して次々と端子の値を決定してゆき、事故 F の値を推論することである。その際の規則の適用手順を以下に述べる。

規則評価の最初の段階には、観測値のみが与えられている。つまり、素子 $L1B-1$ の入力や $CB7$ の出力

などにのみ値が定まっている。この状態でまず接続関係を記述した規則が評価される。これにより、既知なる値が接続する別の素子の端子へと伝達されてゆく。具体的には次のようになる。接続関係を記述した任意の一つの規則が選ばれて、その前提部が評価される。前提部に現れる端子の値が定まっていれば、前提部は真となるので、結論部が実行され接続する端子へと値が伝達されて、この規則は棄却される。前提部の端子の値が定まっていなければ、この規則の評価は保留され別の規則が評価される。このように、次々と規則を評価し、棄却してゆくと、これ以上規則が棄却されなくなる状態となる。この段階で次に論理関係を記述した規則の評価を行なう。

論理関係を記述した規則の評価も全く同様で、前提部を真とすれば、結論部が実行されて、その素子の別の端子の値が決定されて、規則は棄却される。前提部を偽とする場合には、そこに現れる端子の値が未知なるためか、または前提部の評価が常に偽となるためによって規則の取り扱い異なる。前者の場合には、この規則の評価は保留され、別の規則が評価される。しかし、後者の場合には、この規則は棄却される。

後者の例として、図5の第4番目の規則を適用する場合、 $L1B-2$ の $X3$ の値が0となるときのなどが考えられる。このように規則を適用すると、ある素子の端子の値から、その素子の別の端子の値が決定される。事故設備判定のためには、出力から入力を決定するように論理関係を逆にたどることも必要で、図5の第4番目のような規則が用意されている。

以上のように、接続関係をたどり、次に論理関係をたどるという操作をすべての規則が棄却されるまで繰り返す。これによって、論理回路のすべての端子の値が矛盾なく求まれば、事故 F の値をもとに事故設備を判定することができる。

〈3.3〉 矛盾発生と故障要素の検出 前節の手順に従えば、各端子は接続関係と論理関係の規則を用いて、少なくとも2回その値が決定されている。あらかじめ値が定まっても、規則によって新しく結論づけられる値と以前の値とに矛盾がないか調べられる。その際に矛盾が検出されたなら、保護リレーシステム内に故障が生じていることがわかる。

例えば、図2の素子 $L1B-1$ や $TC7$, $CB7$ に矛盾が発生していれば、しゃ断器 $CB7$ が故障していることがわかる。ほかのしゃ断器の故障も同様な矛盾発生箇所により検出できる。後備1段リレーは主保護リレーの故障に対して働くので、それに関連した素子に矛盾があれば、主保護リレーの故障であるといえる。そ

れゆえに、 $L1B44-1$, $L1B-6$, $L1B-3$ などに矛盾が発生すれば、主保護リレー $L1B78$ が故障していることがわかる。

後備2段リレーの場合には、その保護する範囲が2設備以上にわたるので、故障要素がいくつか考えられる。例えば、 $L1B78$ に対して、 $L1B-4$ に矛盾が発生すれば、その入力 $F7$ のほかに $F8$, $F9$, $F10$ をもつので、それぞれの事故を除去する主保護リレーが故障している可能性がある。ほかの動作した後備2段リレーについても、このような故障の可能性が考えられる。後備2段リレーは正動作することを仮定しているため、これらの故障の可能性をもつ要素の集まりに共通なものを故障候補と考える。

上記のようにして、故障候補の検出を行なうが、それが実際に故障していることを調べるには、故障要素の入出力論理関係を新しく記述しなおす方法もあるが、本論文では、故障要素を論理回路から切り離す方法を採用した。具体的には、故障要素の論理関係を記述した規則を事故設備判定には用いないようにすることである。故障要素と考えられる論理素子をいくつか除去することにより矛盾が発生しなくなれば、除去した要素が故障していたことがわかると同時に、事故 F の値は正しく求められる。このようにして、故障要素の検出と事故設備の判定を自動化することができる。

4. 応用例

図1のモデル系統の例では、8種類、104個の論理素子を用いて保護リレーシステムが構成されており、914個の規則によってそれが記述されている。事故設備判定には LISP マシン CADR を使用した。

図6に示した例は、母線 B の甲側母線 $B1$ に設置された主保護リレーが動作し、しゃ断器 $CB4$, $CB6$, $CB7$ がトリップした場合である。この例で事故設備判定を行なうと、矛盾を生じることなく、事故のうち $F5$ の入力のみが1となった。従って、事故設備は、甲側母線 $B1$ であることがわかる。判定に要した時間は約1分30秒であった。

図7では甲側母線 $B1$ の主保護リレーと変圧器 $T1$, $T2$ と送電線 $L1$, $L2$ の後備2段リレーが動作して、図に示す五つのしゃ断器がトリップした。判定を行なうと、論理回路に矛盾が生じ、故障候補として $CB4$, $CB6$, $CB7$ が検出された。そこで、これらを除去して再び判定を行なうと矛盾がなくなり。事故 $F5$ のみが1となった。すなわち、しゃ断器 $CB4$, $CB6$, $CB7$ の故障により、後備保護リレーが動作して、母線 $B1$ の事故が除去されていることがわかる。この場合の判定

図6 事故ケース1 (母線事故)

Fig. 6. Case 1 (BUS fault).

図7 事故ケース2 (母線事故, しゃ断器故障)

Fig. 7. Case 2 (BUS fault, CB trouble).

には故障候補を除去して矛盾が解消できるか調べるために繰返して規則を適用したので、約3分を要した。

図8では、変圧器 $T1$, $T2$ と送電線 $L1$, $L2$ の後備2段リレーが動作して、同図に示す六つのしゃ断器がトリップしている。判定を行なうと、矛盾が検出され主保護リレー $B187$, $B127$ を取り除くと矛盾が解消して、事故 $F5$ の入力のみが1となった。また、 $B287$, $B227$ を取り除いても矛盾が解消して、事故 $F6$ の入力のみが1

図 8 事故ケース 3 (母線事故, リレー故障)

Fig. 8. Case 3 (BUS fault, RELAY trouble).

となる。この場合には事故設備を明確に指定することはできないが、母線 B の甲乙どちらかでの事故において、主保護リレーが故障していたことがわかる。判定に要した時間は約 4 分であった。

ここでは、母線事故についての判定例を示したが、それ以外の系統設備についても同様な判定を行なうことができる。

5. あとがき

保護リレーシステムを論理回路で表現し、その接続関係と論理関係を一定形式の規則によって記述した。そして、得られた観測値をもとに、これらの規則を適

用して、事故設備を自動的に判定する手法について述べた。更に、モデル系統に対し、事故設備を判定した例についても述べた。その結果、本手法によって正しく事故設備を判定することができ、故障要素の検出も行なえることが示された。

実系統に対して本手法を応用するには、より多くの規則が必要となるだろう。規則数が増すと判定に時間がかかるので、規則を減らすことを考えなければならない。そのためには、論理回路を検討して論理素子を減らすように等価回路を考えればよい。例えば、主保護リレーとして L1B78 と L1B27 とが組み合わされているが、これらを一つの論理素子で表しても同様な効果が得られるであろう。また、事故設備判定を行なうために、全系統すべてを一括してとらえるのではなく、リレーやしゃ断器の動作から考慮すべき系統を縮小することにより規則数を減らすこともできる。このほか、事故除去リレーだけでなく、事故波及防止リレーなどをどのように取り扱えばよいか、更に、リレーの整定値から保護範囲をどのように表現するかなど、今後の課題にしたい。

(昭和 58 年 10 月 3 日受付, 同 59 年 3 月 16 日再受付)

文 献

- (1) G. Sussman & G. Steele: "CONSTRAINTS...A Language for Expressing Almost-Hierarchical Descriptions", *Artificial Intelligence*, 14, pp.1 (1980)
- (2) R. Davis, H. Shrobe, et al.: "Diagnosis Based on Description of Structure and Function", *Proceedings of the 1982 National Conference on Artificial Intelligence*,
- (3) 松本・坂口: 「知識ベースに基づく電力系統復旧方式の決定法」電気論 B 103, 175 (昭 58-3)
- (4) 和気・坂口: 「保護リレーシステムの構造と機能の記述に基づく事故設備の判定」電気学会情報処理研究会資料 IP-83-8 (昭 58-5)