ファジー知識ベースに基づく送電線の 故障区間標定システム

正員 浦澤 克行 (東京電力)

正員 狩野 均 (日立電線)

正員 金丸 公春 (日立電線)

正員 杉山 耕一 (日立電線)

Fault Location System for Electric Power Transmission Lines Based on Fuzzy Knowledge Base

Katuyuki Urasawa, Member (The Tokyo Electric Power Co., Inc.), Hitoshi Kanoh, Member,
Kimiharu Kanemaru, Member, Kouichi Sugiyama, Member (Hitachi Cable, Ltd.)

For the efficient operation of power transmission facilities, the authors developed a new fault location method using the current induced in overhead ground wires (GWs) under fault conditions by analysing its distribution pattern along the power line. This method is capable for locating fault sections in complicated secondary systems (66~154 kV classes).

Since GW current distributions change depending on not only operational conditions but also meteorological conditions, it is quite difficult to estimate them exactly by calculation. Also, the measurement data of GW current contain a certain vagueness. We have already proposed a method to evaluate the features of GW current distribution patterns using fuzzy sets, and succeeded to locate fault sections in actual commercial lines.

In many cases, however, secondary power transmission systems are generally combined with complicated line configurations and power sources. It is thus necessary to introduce various domain-specific knowledge for the fault location of all kinds. The new fault location method uses expert system to cope with this requirement.

This paper describes the vagueness of measured GW current and the necessity of the domain-specific knowledge first, and then, the detailed process of the method as (1) the evaluation of heuristics, (2) expression of knowledge and (3) fuzzy inference. And finally, the applicability of the method is confirmed by the detailed simulation for various fault types using EMTP (Electro Magnetic Transients Program).

キーワード：知識ベース，ファジー推論，送電線，故障区間標定，エキスパートシステム

1. ま え が き

送電設備の効率的な運用のため，送電線路に沿って各種のセンサを配置し，その情報を光ファイバ複合架空地線(OPGW)によって一括伝送し，中央で集中監視する送電線監視システムが導入されている⁽¹⁾。その

機能の一つとして，送電線に故障が発生した場合，迅速な復旧を行うために故障が発生した区間を速やかに知る「故障区間標定システム」が検討されており，従来標定が難しいとされていた複雑な送電線路への適用が期待されている^{(2)~(6)}。

著者らは先に，ファジー集合を用いて架空地線(以

下GWと略記)電流の線路方向の分布パターンを解析して故障区間を標定する手法を提案し、分岐を含む実線路での標定に成功した⁽⁶⁾。この手法は、電流と位相に着目した帰属度関数を電流センサ設置区間ごとに評価することによって、精度の良い標定を可能にするものであったが、線路構成や電源構成が複雑に組合される系統では、こうした区間ごとの指標のみでは標定が難しくなるという問題があった。

一方、送電工学の専門家は、このような複雑な系統の情報でも故障区間を正確に推定できる。これは、故障時のGW電流分布全体をながめて大ざっぱな推定をした後、細部を検討し、矛盾が生じた場合は知識や経験から新しい事実を想定し、総合的につつまが合うまでこの推論を繰返しているためである。そこで、この思考法を故障区間標定システムに導入すれば、上記した複雑な故障にも対応ができるものと考え、その検討を行った。

すなわち、既に開発した手法⁽⁶⁾で用いた局所的な指標に加えて電流分布全体を考慮した大局的な指標と、送電線の故障に関する経験的なルールを併用した故障区間標定法を開発した。その結果、相当に複雑な系統でも故障区間を正確に標定できるようになった。

本論文では、まず故障区間標定に特有な測定データのあいまい性と専門知識の必要性について述べ、次にこれらの具体的な標定手法を示し、最後に電磁過渡現象解析プログラム(Electro Magnetic Transients Program: EMTF)⁽⁷⁾を用いた詳細なシミュレーションで本方式の有効性を確認する。

2. 標定上の問題点と対策

〈2・1〉 故障時にGWに流れる電流の特徴 図1は線路構成が比較的簡単な送電線路で典型的な故障が発生したときにGWに流れる電流の線路方向の分布図である。この分布図は、実際の送電線路[図2(a)]を対象にEMTFを用いてシミュレーション計算した結果である。地絡故障の場合には、

- (i) 故障点を境に電源側と負荷側で位相が約180度変わる。
- (ii) 故障点より電源側の電流値が負荷側よりも大きくなる。
- (iii) 故障点付近で電流分布の変化が大きい(ピークが生じる)。

などの特徴あるパターンが見られる。また、短絡故障の場合には、上記(ii)のほか、

- (iv) 故障点で電流の変化が大きい。
- (v) 故障点での電流は電源付近の電流の約1/2に

(a) 地絡故障

(b) 短絡故障

図1 故障時のGW電流分布の例
Fig.1. Example of GW current distribution under fault condition.

(a) 単純な送電線路

(b) 複雑な送電線路

図2 二次系統送電線路の例(太線線路を標定対象とする)
Fig.2. Example of transmission line for secondary systems (fault location is for thick line).

なる。
などの特徴がある。

〈2・2〉 測定データに付随するあいまい性 ファジー集合を用いて測定データのあいまい性を処理する手法は既に詳しく述べた⁽⁶⁾。ここではその要点を述

べる。

〈2・1〉節に示した特徴量を定量化し、それらが最大となる位置を求め、これに線路構成に関する知識を当てはめることにより、標定の自動化は一見容易と思われる。しかし、実線路におけるGW電流分布は次の理由から必ずあいまい性がつきまとい、故障点の特徴が不明確となる。このため、このような方法だけでは対処できない。

(i) OPGWの設置形態から全鉄塔に電流センサを設置できない場合があり、GW電流の分布パターンを詳細に知ることができない。

(ii) GW電流分布を決定するパラメータのうち、アーク抵抗、鉄塔の接地抵抗、電線弛度などは気象状況などによって変動するため、実線路でのGW電流の絶対値は予測計算値からは正確に求められない。

(iii) 送電設備全体の効率運用のため各送電線の使用状況は時々刻々変化し、これに伴ってGW電流も大きく変動する。

このような状況にもかかわらず、送電工学の専門家は、上記の(i)～(iii)の要因が故障の特徴にどのような傾向に影響するかをその経験から知っており、前述した〈2・1〉節の(i)～(v)のような故障の特徴が顕著に表れない場合でも、データをつじつもの合うように解釈して、少なくともどの位置が最も故障の可能性が高いかを判断することができる。

このような柔軟な判断をシステムに取入れるため、ファジー集合を用いて専門家の経験則を定量化して故障点を標定することにした。

〈2・3〉 専門知識の必要性 図3は、複雑な二次系統送電線路[図2(b)]で短絡故障が発生したときのGW電流分布のシミュレーション結果である。図2(b)の送電線路は、電源1から供給される線路1に、

図3 複雑な線路のGW電流分布
(図2の例)

Fig.3. GW current distribution of complex line (model: Fig.2).

電源2から供給される線路2が併設された構成であり、図3の故障は、線路2の短絡故障を示したものである。この場合、故障点(鉄塔#31)における短絡故障の特徴(ii), (iv), (v)よりも、故障が発生していない鉄塔番号#27付近で地絡故障の特徴(i), (iii)が顕著であり、単純な判定だけでは標定を誤ることになる。

しかしながら、専門家はこのような場合でも次のように推論して故障点を正しく標定することができる。

(i) 線路2が併設されていない区間(#1～26, および#43～52)で線路1の電流値が小さいことから、故障は線路2で発生した可能性が高い。

(ii) #27は線路2が合流する鉄塔なので、故障点でも電流値と位相が大きく変化することがある。

(iii) 一方、#30～31には短絡故障の特徴(iv)が見られる。

(iv) 従って、故障は線路2の#30～31で発生した可能性が高い。

このような推論をコンピュータに行わせるため、GW電流パターンの特徴を詳細に記述する多くの指標(特徴量)をファジー集合を用いて設定し、これに専門家から獲得した定性的な知識を当てはめてファジー推論するエキスパートシステムを開発することにした。

3. 標定システム

〈3・1〉 システムの構成

(1) 標定システムの概要 故障区間標定システムは図4に示すように、OPGWに設置した電流センサで故障時のGW電流を検出し、変電所などの中央監視所に一括伝送して総合的に判定し、標定結果、GW電流分布図などをオンラインで表示するものである。

本システムは電流収集用の8bitマイコンと、通信、標定、表示、データ管理用の16bitファクトリーコンピュータで構成する。

本システムの規模は、アセンブラ言語が約10,000ステップ、C言語が約20,000ステップ、Prologが約2,000ステップ、知識ベースが約1,000ステップ程度である。

(2) エキスパートシステムの構成 故障区間標定エキスパートシステムは、図4に示すように次の四つの要素で構成する。

(i) GW電流分布図から標定に有効な指標をファジー集合として抽出し、「～は～である」という形

図 4 故障区間標定システムの構成
Fig. 4. Configuration of fault location system.

の事実を作成する特徴抽出プログラム。

(ii) 送電工学の専門家から獲得した標定ルールからなり、大きい、小さいなどのあいまいな言葉で表現されている知識ベース。

(iii) 事実と知識ベースから推論を繰返して故障区間を標定する、ファジィ推論プログラム。

(iv) 上記(i), (ii)の実行結果として得られる、事実と推論経過を記述するためのワークエリア。

本エキスパートシステムは、ファクトリーコンピュータのMS-DOS上で稼働する。特徴抽出プログラムはC言語、ファジィ推論プログラムはPrologで記述した。また、ルールはPrologの項で表現し、ワークエリアはPrologのデータベースを利用した。

〈3・2〉 標定システムの構築

(1) ファジィ集合による定量化 送電線を電流センサの設置された鉄塔ごとに区切って小さな区間を作り、これらの区間について図5のようなファジィ集合を考える。これらは送電工学の専門家が交流理論をふまえたうえで直感的に決めたものであって、純理論的に導出したものではない。これらを組合せた評価関数が標定に有効であることは文献(6)述べた。ここでは、この評価関数を具体的なシステムに応用するうえで有用な導出方法と、標定上特に重要と思われる評

- S_1 : 電流値差が大きい区間の集合
 S_2 : 位相差が大きい区間の集合
 S_3 : 電流値が大きい区間の集合
 S_4 : 電流値が電源付近の約1/2の区間の集合
 S_5 : ベクトル電流値差が大きい区間の集合
 S_6 : 電流値が減少する区間の集合

図 5 ファジィ集合の例
Fig. 5. Example of fuzzy sets.

表 1 経験則の例
Table 1. Example of knowledge on experience for fault location.

- ① 電流値差が大きく、かつ位相差が大きく、かつ電流値が大きいならば、その付近で鉄塔地絡故障が発生した可能性がある。
- ② 電流値が電源付近の電流値の約1/2、かつ位相差があまり大きくなくかつ電流値が大きいならば、その付近で短絡または大地地絡故障が発生した可能性がある。
- ③ ベクトル的な電流値差が大きく、かつ電流値が大きい区間は故障が発生した可能性がある。
- ④ 電流値差の大きい区間が複数箇所あるならば、位相差と電流値が大きいか、またはベクトル電流差が大きい区間で故障が発生した可能性が高い。
- ⑤ 電流値またはベクトル電流差が大きく、かつ電流値が減少する区間は故障が発生した可能性がある。

価関数の具体例、ならびに新たに設定した故障の特徴を表す指標の例について述べる。

以下の議論において、ファジィ集合間の演算を次のように定義する⁽⁸⁾。すなわち、ファジィ集合 A , B の帰属度関数を $m(A)$, $m(B)$ とすると、

(i) A と B の和集合 C を $C=A \cup B$ と書き、その帰属度関数を

$$m(C) = m(A) + m(B) - m(A) \times m(B)$$

とする。また、

(ii) A と B の積集合 D を $D=A \cap B$ と書き、その帰属度関数を

$$m(D) = m(A) \times m(B)$$

とする。

表1は、故障区間標定に用いた経験則の一例である

が、図5のファジー集合を用いると、経験則①は次のように言い換えることができる。

「ある区間が、ファジー集合 F_1 に属する度合いが大きいならば、その区間で鉄塔地絡故障が発生した可能性が高い」

ただし、

$$F_1 = S_1 \cap S_2 \cap S_3 \dots\dots\dots (1)$$

(1)式を帰属度関数で表すことにより、鉄塔地絡故障が発生した可能性を示す量 f_1 を

$$f_1 = m(S_1) \times m(S_2) \times m(S_3) \dots\dots\dots (2)$$

と書くことができる。従って、送電線故障時に各区間ごとに(2)式の f_1 を計算し、この値が最大となる区間で鉄塔故障が発生したと推定することができる。

表1に示した②～⑤の経験則についても同様にし、次の $f_2 \sim f_5$ のように定量化することができる。

$$f_2 = m(S_4) \times \{1 - m(S_2)\} \times m(S_3)$$

$$f_3 = m(S_5) \times m(S_3)$$

$$f_4 = m(S_2) \times m(S_3) + m(S_5) - m(S_2) \times m(S_3) \times m(S_5)$$

$$f_5 = \{m(S_5) + m(S_3) - m(S_5) \times m(S_3)\} \times m(S_6)$$

ここでは、以上の $f_1 \sim f_5$ を故障評価関数と称する。

通常の送電線路では、これらの故障評価関数の値が最大となる区間を選ぶことによって故障区間を正しく標定することができる。しかしながら、<2・3>節に述べたように、図2(b)の複雑な線路の故障区間を確実に標定するためには、GW電流パターンを詳細に記述する多くの指標(特徴量)が必要である。本システムでは、帰属度関数で定義する約50個の指標を設定した。この一例を図6および表2に示す。

図6(a)は、電流ピーク値が大きく、明確に存在する(明確)か、小さく認めにくい(無)か、あるいはその中間(不明確)かを示す指標であり、(b)図は、特定区間の電流の大きさの程度を示す指標である。例えば(a)図の指標と電流測定結果とから、電流ピーク値指標として[明確=1, 不明確=0.2, なし=0]が得られると、「明確」という指標が最大となり他は小さ

図6 故障の特徴を表す指標の例
Fig.6. Example of indices showing fault features.

いので、電流ピークは明確にある(1, 0.2, 0)という事実が導かれたことになる。

表2は、図6に示したのと同様な他の指標のうち、後で述べる標定ルール(表3)に登場する指標のとり状態を示したものである。例えば表2の①において、「送電線故障は」図6(a)の「ピークの大きさ」に相当し、「(あり, なし)」は「(明確, 不明確, 無)」に相当する。すなわち①の意味は、送電線路で故障が発生した可能性を「送電線故障は[あり= m_1 , なし= m_2]]」という書式で表すということである。ただし、 m_1 , m_2 はそれぞれ、送電線故障はあり, なし, の帰属度である。

(2) 知識の表現形式 本システムにおける知識の表現形式は、(i)個々のルールが作りやすく、わかりやすい、(ii)追加変更が容易である、(iii)推論メカニズムが簡単である、(iv)処理スピードが速い、という理由から IF-THEN ルールとした。ルールの一般的な書式は、故障区間標定に应用することを考慮して次のように決めた。

$$\begin{aligned} &\text{ルール } G, N, [M_1, \dots, M_m], \\ &[\text{if}, A_1, A_2, \dots, A_n], \\ &[\text{then}, B_1, B_2, \dots, B_m] \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

(3)式で、 $A_i (i=1 \dots n)$, $B_j (j=1 \dots m)$ はそれぞれ独立した事実であり、次のいずれかの形とする。

$A_i: X$ は $[Y_1$ または $Y_2 \dots$ または $Y_n]$ であるという形の事実

prolog の項

C 言語の関数

$B_j: X$ は Y であるという形の事実

Prolog の項

C 言語の関数

表2 故障の特徴を表す指標の例
Table 2. Example of indices showing fault features.

- ① 送電線故障は (あり, なし)
- ② センサ故障は (あり, なし, 不明)
- ③ 電流波形は (正常, ひずみあり, ひずみ大, 異常)
- ④ 測定状況は (正常, ほぼ正常, 悪い, 最悪)
- ⑤ 全区間の平均電流値は (小さい, 中くらい, やや大きい, 大きい)
- ⑥ 併設線路の電源側の平均電流値は (大きい, 中くらい, 小さい, 非常に小さい)
- ⑦ 併設線路の負荷側の平均電流値は (大きい, 中くらい, 小さい)
- ⑧ 電流ピークは (明確にある, はっきりしない, なし)
- ⑨ 線路上流付近の位相変化は (小さい, 中くらい, 大きい)
- ⑩ #30~34の位相変化は (大きい, 中くらい, 小さい)
- ⑪ 故障区間は (評価関数 f_1 が大きい区間, ..., 評価関数 f_5 が大きい区間, 線路上流付近, 線路上流付近, 併設線路内, 分岐線路内)

表 3 標定ルールの例
Table 3. Example of fault location rules.

①	ルール (測定用 1 {1, 0.8, 0, 0}, [if, [送電線故障は, [あり]], [センサ故障は, [なし]], [電流波形は, [正常, ほぼ正常]], [then, [測定状況は, 正常]])
②	ルール (標定用, 42, {0, 0, 1, 0.7, 1}, [if, [測定状況は, [正常]], [全区間の平均電流値は, [大きい]], [線路下流付近の位相変化は, [小さい]], [then, [故障区間は, 線路下流付近]])
③	ルール (標定用, 16, {1, 0.3}, [if, [測定状況は, [正常]], [併設線路の電流側の平均電流値, [小さい]], [併設線路の負荷側の平均電流値, [小さい]], [then, [故障区間は, 併設線路内]])
④	ルール (標定用, 20, {0.7, 1, 0.7}, [if, [故障区間は, [併設線路内]], [式 (変数(ベクトル電流差が最大の区間, [T_1, T_2], $T_1 > 30, T_2 < 42$))], [then, [故障区間は, 評価関数 f_1 が大きい区間]])
⑤	ルール (標定用, 95, {0.5, 1, 0.5}, [if, [故障区間は, [併設線路内]], [電流ピークは, [明確にある]], [$\#30 \sim 34$ の位相変化は, [小さい]], [then, [故障区間は, 評価関数 f_5 が大きい区間]])

このとき(3)式は,

$$A_1 \cap A_2 \cap \cdots \cap A_n \\ \Rightarrow B_1 \cap B_2 \cap \cdots \cap B_m$$

という意味である。

また、 G はルールを用途ごとに分類したときのグループ名、 N はグループ内の通し番号、 M_j は then 部に対応する指標の帰属度 $m(B_j)$ である。 a_i という事実(3)式のルールを適用した場合の結果 b_i は、次式で計算される。

$$m(b_j) = \min\{m(a_1) \cdot m(A_1), \cdots, \\ m(a_n) \cdot m(A_n)\} \times M_j \quad \cdots \cdots (4)$$

ただし、「 $\cdot$ 」は通常の行列計算において各要素を計算するとき $a+b = \max(a, b)$ 、また $a \times b = \min(a, b)$ と置換えて演算することを意味する演算記号とする(以下・を min-max 演算と称す)。

知識ベースの例を表 3 に示す。

表 3 のルール①～⑤で $M_j (j=1)$ の意味は、then 部の指標「故障区間は」のとり値によって次のようになる。

(i) 「評価関数 f が大きい区間」のときは、 f が大きい区間で故障が発生した可能性と、その両側の区間で故障が発生した可能性との比。

(ii) 「線路上(下)流付近」のときは、後述する(6)式の帰属度。

(iii) 「併設(分岐)線路内」のときは、併設(分岐)線路内で故障が発生した可能性と併設(分岐)線路外で故障が発生した可能性との比。

また、then 部の指標が「故障区間は」以外のとき、すなわち、ルール①の $M_1 = \{1, 0.8, 0, 0\}$ の意味は、表 3 の指標④で、測定状況が正常、ほぼ正常、悪い、最悪である可能性の比が $1:0.8:0:0$ ということである。

知識の表現形式の一例として、図 3 に示した故障の標定に関する知識「電流の測定は正常に行われ、かつ電源側で他線路の併設していない区間の平均電流値が小さく、かつ負荷側で他線路の併設していない区間の平均電流値も小さいならば、故障が他線路の併設している区間で発生した可能性とそうでない可能性の比は 1 対 0.3 と言える。」および「故障は、他線路の併設している区間で発生した可能性が大きく、かつ電流分布図中に明確なピークがあり、かつ鉄塔番号 #30～34 の位相の変化が小さいならば、故障は評価関数 f_5 が最大の区間で発生した可能性が高い。また、その両側の区間でも半分の可能性で故障が発生したと言える」を上記の書式で表すと表 3 のルール③、⑤のようになり、簡潔な知識の表現ができる。

(3) ファジー推論機構 通常の前向き推論は、 P という事実と、 $P \Rightarrow Q$ というルールから、 Q という事実を導く。これに対してファジー推論では、 A, B, a, b をファジー集合として、 a という事実と $A \Rightarrow B$ というルールから、 B と少し異なる事実 b を導く。

このファジー推論は通常、事実 A, B, a, b をベクトルとみなして次のように計算する⁽⁹⁾。

$$b = (a \cdot A) \cdot B \quad \cdots \cdots (5)$$

ただし、「 $\cdot$ 」は転置行列とする。

次に、本システムにおけるファジー推論の具体例を示す。まず、

$A = \{\text{小さい, 中くらい, やや大きい, 大きい}\}$ という四次元空間を考えて、各要素が 0 または 1 をとると

B は次の帰属度関数で示すような、「線路の下流で発生した故障」を表すファジー集合とする。

$$m(B) = \begin{cases} 0 & (\text{故障点が上流から 2 km 以内}) \\ 0.1 & (\quad \quad \quad 2 \sim 4 \text{ km}) \\ 0.4 & (\quad \quad \quad 4 \sim 6 \text{ km}) \\ 0.8 & (\quad \quad \quad 6 \sim 8 \text{ km}) \\ 1 & (\quad \quad \quad 10 \text{ km 以上}) \\ \dots\dots\dots (6) \end{cases}$$

以上の例 A, B, a を(5)式に代入して結論 b を求めると,

となり、この b は、「線路の下流で発生した故障」を表していることがわかる。また、測定データとして、「GW 電流の平均値がやや大きい故障」、例えば

を考えると, (5)式に A, B, a' を代入して

となり、この b' は、「線路下流付近で発生した故障」と解釈することができる。

〈3・3〉 故障区間標定手順 次に、以上述べた手法による故障区間標定手順を示す。

〔ステップ2〕 故障評価関数 $f_1 \sim f_5$, ならびにこれらが最大となる区間の铁塔番号を求める。

〔ステップ4〕 指標 a に標定ルール(表3)を適用し、新たな指標 b の帰属度を(4)式から計算する。ただし、 $m(b)$ の要素がすべて0.3以下になったときは、ルールが成立しなかったものとしてワークエリアへの追加は行わない。

〔ステップ5〕 〔ステップ4〕を全ルールに適用し、新たな指標が追加されたときは、再び〔ステップ4〕を全ルールに適用する。また、追加されなかったときは推論を終了する。

〔ステップ6〕 ファジー集合「故障区間は」の帰属度が最大の区間で故障が発生した、と標定する。最大の区間が複数個あったときは、それらすべてを故障が発生した区間の候補として出力する。

〔ステップ7〕 標定結果「故障区間は～」に対応する鉄塔番号と帰属度を CRT に表示する。

分岐，他線路の併設を含む複雑な 66 kV 送電線路〔図 2 (b)〕を対象として，送電線故障時の GW 電流分布を EMTP を用いて計算し，その結果に本方式を適用して故障区間の標定を試みた。

図 8 EMTF シミュレーションによる
標定結果

Fig. 8. Fault location result by EMTF simulation.

この一例として、図 3 に示した故障について標定の途中経過を図 7 に示す。同図中の GW 電流分布図は、〈2・2〉節の(i)に示した制約のため、詳しい分布パターンが得られない場合を想定し、11箇所のセンサで電流を測定したときのものである。この例では、評価関数 f_1 , f_2 , f_3 は区間(5~6)で最大値をとるのに対して、 f_4 は別の区間(6~7)で最大となっているので評価関数だけでは判定できない。しかし、この故障では、「電流ピークが明確に表れている」という特徴をファジー集合を用いて GW 電流分布図から抽出し、これに「電流ピークが明確なときは評価関数 f_4 で判定する」という知識を当てはめて f_4 のみを選択することにより、正しく標定することができた。

図 8 は、実線路での GW 電流分布が、〈2・2〉節の(ii)に示した測定データのあいまい性のために、予想計算値から線路方向にランダムにずれたときの標定をシミュレーションした結果である。図 8 の横軸は計算結果に重畳したランダム雑音の大きさ、縦軸は計算した全 250 ケースの中で正しく標定できた割合(良標定率)を示す。なお、シミュレーションは、1 線鉄塔地絡、地絡短絡、大地地絡、相間短絡の四種類の故障について、それぞれ上, 中, 下相の全組合せについて行った。これにより、あらゆる故障形態をテストしたことになる。

図 8 より、本システムは実線路における GW 電流の測定値が予想計算値から±10%程度ずれても、ほぼ 100% 標定できることがわかる。

なお、線路方向に一樣のずれが生じた場合や電流分布全体が相似的に変化した場合については、評価関数を規格化してあるので標定には影響しない。

また、〈2・2〉節の(iii)に示した線路運用状況の変化

があった場合は、対応する知識ベースを追加することで対処できる。

本システムは東京電力の実線路に適用され、順調に稼働中である。

5. む す び

構成の複雑な二次系統(66~154 kV 級)送電線路の故障区間標定方式として、あいまいな知識ベースに基づいたエキスパートシステムを用いる方法を提案し、詳細なシミュレーションでその有効性を確認した。

本論文で述べた、あいまいな経験則の定量化手法とファジー推論手法は他のシステムにも広く応用できる。

電力系統設備の保守監視はベテラン監視員の勘や経験にたよるところが多く、これを自動化する方法として、あいまいな知識ベースを用いるという考え方は極めて有効であると考えられるので、今後も広く研究を進める予定である。

最後に、本研究の遂行にあたって多くの御指導と御協力をいただいた、東京電力と日立電線の関係者の皆様に深く感謝いたします。

(昭和63年10月27日受付, 平成元年 5 月22日再受付)

文 献

- (1) 江川・佐藤・豊田・金丸:「OPGW 利用送電線保守監視システムの実用化」, 日立電線, No. 6, 11 (昭 61-12)
- (2) 金丸・皆藤・小山・藤枝:「送電線地絡事故区間標定システムの検討」, 昭 60 電気学会大会, No. 1059
- (3) 佐藤・江川・金丸・皆藤:「送電線故障区間標定システムの開発」, 昭 61 同上, No. 1068
- (4) 黒沢:「送電線の設備監視システムへの光ファイバ技術の適用(2)」, OHM, 74, No. 10 (昭 62-10)
- (5) K. Okada, K. Urasawa, K. Kanemaru & H. Kanoh: "Knowledge-based fault location system for electric power transmission lines with OPGW" International workshop on artificial intelligence for industrial application 1988 IEEE, p. 52
- (6) 江川・杉山・金丸・狩野:「ファジー理論を応用した OPGW 送電線故障区間標定手法」, 電学論 B, 108, 509 (昭 63-11)
- (7) 雨谷・室谷・浅野, 他:「過渡現象解析プログラム(EMTP)の適用性について」, 日新電機技報, 27, 53 (昭 57-1)
- (8) 西田・竹田: ファジィ集合とその応用 (昭 58) 森北出版
- (9) 上野・石塚: 知識の表現と利用 (昭 62) オーム社

浦 沢 克 行 (正員)

昭和 33 年 7 月 22 日生。58 年 3 月東京大学工学部電気工学科卒業。同年 4 月東京電力(株)入社。架空送電線の設計・技術管理業務に従事。

現在、同社送変電調査所勤務。

狩 野 均 (正員)

昭和 29 年 7 月 5 日生。55 年 3 月
筑波大学大学院理工学研究科物理専
攻修士課程修了。同年 4 月日立電線
(株)入社。現在、同社電線研究所に
おいて人工知能・神経回路網の応用に関する研究に従
事。計測自動制御学会、情報処理学会会員。

金 丸 公 春 (正員)

昭和 23 年 7 月 5 日生。48 年 3 月
山梨大学大学院工学研究科修士課程
修了。同年 4 月日立電線(株)入社。
現在、同社電線研究所主任研究員。

電力ケーブルの大容量化の研究の後、現在、電力分野
への光応用技術の研究に従事。IEEE 会員。

杉 山 耕 一 (正員)

昭和 17 年 2 月 5 日生。43 年 3 月
宮崎大学工学部電気工学科卒業。45
年 3 月名古屋大学大学院工学研究科
電気工学専攻修士課程修了。同年 4
月日立電線(株)入社。現在、同社電線研究所主任研究
員。大容量送電技術の研究後、現在、主として光技術
応用製品の開発研究に従事。