UDC 621.315.051.2: 621.316.921.93

論文

53 B-11

波動理論による送電線保護 (その 1. 理論)

正 員 穂本 能彬(東京電力)

正 員 山本 隆彦(東京電力)

非会員 細川 洋(東京電力)

正 員 坂口 敏明(三菱電機)

正 員 吉田 敬史(三菱電機)

正 員 西田 正吾(三菱電機)

1. ま え が き

電力需要の増大に伴い、大容量送電の高信頼度化を図る技術開発が各方面で進められている。保護リレー技術との関連では、系統の安定度向上策の一つとして故障検出の性能を高めたいという強い要請がある。一方、 μ プロセッサに代表される電子技術の進歩には目覚ましいものがあり、この影響を受けて電流・電圧の瞬時値を用いるデジタルリレーが出現してきた。

Rockefeller 氏⁽¹⁾はアナログ形リレーの技術をベースに、1 台の制御用計算機による変電所の保護機能の実現を試み、Mann 氏ら⁽²⁾⁽³⁾は電流・電圧の瞬時値から送電線のインピーダンスを計算する方式を提案した。これに対して Poncelet 氏⁽⁴⁾は、送電線の微分方程式を数値積分しインピーダンスを推定する方式を提案、これを Ranjbar 氏ら⁽⁵⁾が高調波成分を巧みに除去する積分法を提案し改良を図った。このように、従来提案されているデジタルリレーは L-R 集中定数回路で表現される送電線のインピーダンスを、電流・電圧の瞬時値から推定するという考えに基づかれている。その意味で、いわばインピーダンスリレーの瞬時値化といえる。

本論文において筆者らは、分布定数回路で表現された送電線に波動理論を適用し、本論文で提案する保護方式の基本となる Bergeron (または Schnyder-Ber-

geron) の関係式⁽⁶⁾を導入する。そして、単相送電線での考察から Bergeron の関係式が送電線保護に応用できることを示す。次にモード変換の手法により、筆者らの提案する保護方式が 3 相送電線に拡張できることを述べる。また Kirchhoff の第 1 法則と組み合わせると、多端子送電線での内部故障も検出できることを示す。送電線の保護では、内部故障の検出に次いで故障相の判別、故障点の標定が正確でなければならないが、Bergeron の関係式に基づく故障相の判別法、故障点の標定法についても述べる。

筆者らの提案する保護方式は、Bergeron の関係式のもつ特徴から、内部故障を速やかに検出できること、内部故障と外部故障 (健全時や開閉器の操作も含む) とを確実に区別できること、送電線の過渡現象の影響を受けないことなどの特徴をもっている。本保護方式は従来のデジタルリレーに対して送電線の進行波の差動に基づいているため、電流差動リレーを一般化した進行波差動リレーの瞬時値化と考えられる。なお、以下の議論では無損失送電線を仮定する。

2. 内部故障の検出

(2・1) 単相送電線 第 1 図に、単位長当りのインダクタンス L 、キャパシタンス c をもつこう長 d の分布定数送電線を示す。このとき、付録で示すように端子 S, R の電流・電圧の瞬時値の間には、次の関係式が成立する (Bergeron の関係式)。

第 1 図 単相送電線

Fig. 1. Single phase line.

Fault Protection Based on Travelling Wave Theory (Part-1 Theory). By Yoshiakira Akimoto, Member, Takahiko Yamamoto, Member, Hiroshi Hosokawa, Non-member (The Tokyo Electric Power Co., Inc. Engineering Research and Development Laboratory), Toshiaki Sakaguchi, Member (Mitsubishi Electric Corp. Central Research Laboratory), Takashi Yoshida, Member (Mitsubishi Electric Corp. Power and Industrial Systems Center) & Syogo Nishida, Member (Mitsubishi Electric Corp. Central Research Laboratory).

穂本能彬: 正員, 東京電力(株)技術開発研究所
山本隆彦: 正員, 東京電力(株)技術開発研究所
細川 洋: 非会員, 東京電力(株)技術開発研究所
坂口敏明: 正員, 三菱電機(株)中央研究所
吉田敬史: 正員, 三菱電機(株)制御製作所
西田正吾: 正員, 三菱電機(株)中央研究所

$$-is(t) + \frac{1}{z} e_S(t) = i_R(t-\tau) + \frac{1}{z} e_R(t-\tau) \quad (1)$$

ここに

$$\tau = \sqrt{L/C} d \quad (\text{サージ伝搬時間})$$

$$z = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (\text{サージインピーダンス})$$

(1) 式は、端子 R を出発した進行波が時間 τ だけ遅れて端子 S に到着することを意味している。ここで系統の種々な状態におけるこの進行波の伝搬を考察する。まず、系統内に全く故障がない場合には、区間 SR での進行波は波形の乱れなく伝搬するから (1) 式は常に成立する。次に区間 SR の外部で故障が発生している場合には、区間 SR に限ると進行波はやはり波形の乱れなく伝搬するから (1) 式は常に成立する。これに対して、区間 SR の内部で故障が発生している場合には、進行波はその故障点で反射/透過現象を生じ、もはや両端での波形は一致せず (1) 式は成立しなくなる。従って $\xi(t)$ なる時間関数を、

$$\xi(t) \triangleq is(t) + i_R(t-\tau) - \frac{1}{z} \{e_S(t) - e_R(t-\tau)\} \quad (2)$$

で定義すると、 $\xi(t)$ は次の性質をもつ。

$\xi(t) = 0$ ならば内部健全

$\xi(t) \neq 0$ ならば内部故障

かくして $\xi(t)$ を用いることにより、内部故障が検出できる。

上で述べた故障検出法は、送電線の保護にとって望ましい特徴を幾つかもっている。まず、電流・電圧の瞬時値がそのまま使えるため送電線の過渡現象の影響を受けない点である。このことはまた、 μ プロセッサに代表されるデジタル技術で実現する場合、極めて好都合である。次に、故障検出が高速に行なえる点である。(2) 式からわかるように、時刻 $(t-\tau)$ と時刻 t のデータから内部故障の有無が判定できるから、検出に要する時間はサージ伝搬時間プラス相手端からのデータ伝送時間と考えられる。前者は通常数百 μ s 以下であり、後者は数 ms 程度であるから、検出までの時間はほとんどデータ伝送時間により決定される。更に内部故障と外部故障 (健全も含む) とを確実に区別できる点である。これは (1) 式が外部区間でのいかなる故障や、開閉操作にかかわらず常に成立するためである。このように、外部故障に対しては誤動作しにくいから、本リレーは保護リレーの重要な責務の一つを充足している。

(2) 式では、端子 R から S へ向かう進行波 (後進波と呼ぶ) に着目して $\xi(t)$ を定義した。端子 S から R へ向かう進行波 (前進波と呼ぶ) に着目すると、

$$-\frac{1}{z} \{e_R(t) - e_S(t-\tau)\} \quad (3)$$

なる時間関数 $\varepsilon(t)$ を定義でき、 $\xi(t)$ と同様に内部故障の検出に用いることができる。

さて、第 1 図で F 点を内部故障点、 τ_1 を区間 SF のサージ伝搬時間、 τ_2 を区間 RF のサージ伝搬時間とし、図には示していないが故障電流を $i_F(t)$ とする。 $\xi(t)$ 、 $\varepsilon(t)$ はそれぞれ

$$\xi(t) = i_F(t - \tau_1) \quad (4)$$

$$\varepsilon(t) = i_F(t - \tau_2) \quad (5)$$

で与えられる (導出は付録を参照)。すなわち、 $\xi(t)$ は着目している後進波が F 点を通過する時刻 $(t - \tau_1)$ に流出する故障電流に等しく、 $\varepsilon(t)$ は着目する前進波が F 点を通過する時刻 $(t - \tau_2)$ に流出する故障電流に等しいことが示される。

従来の電流差動保護は、

$$\delta(t) = i_S(t) + i_R(t) \quad (6)$$

を原理式としている。(2) 式において $\tau \rightarrow 0$ かつ $z \rightarrow \infty$ の場合を考えると、

$$\lim_{\substack{\tau \rightarrow 0 \\ z \rightarrow \infty}} \xi(t) = \delta(t) \quad (7)$$

従って、(2) 式に基づく保護はその特殊な場合、(6) 式と一致するから、従来の電流差動を包含する最も一般的な差動保護 (進行波差動と呼ぶのが妥当) と考えられる。

〈2.2〉 3 相送電線 第 2 図に、単位長当りのインダクタンス行列 $[L]$ 、キャパシタンス行列 $[C]$ 、この長 d の 3 相送電線を示す。一般に 3 相送電線は次に示すモード変換

$$[e(t)] = [S][e^{(\text{mode})}(t)] \quad (8)$$

第 2 図 3 相送電線

Fig. 2. Three phase line.

$[i(t)] = [Q][i^{(\text{mode})}(t)]$ (9) 式
 により、3 個の単相送電線 (= モード回路) に分解できることが知られている⁽⁷⁾。各モード回路においては、
 (2・1) 節で述べた議論がすべて成立するから、(2)、
 (3) 式に対応する時間関数が次のように定義できる。

$$\xi^{(K)}(t) \triangleq i_S^{(K)}(t) + i_R^{(K)}(t - \tau^{(K)})$$

$$-\frac{1}{z^{(K)}} \{e_S^{(K)}(t) - e_R^{(K)}(t - \tau^{(K)})\} \quad (10)$$

$$\varepsilon^{(K)}(t) \triangleq i_R^{(K)}(t) + i_S^{(K)}(t - \tau^{(K)})$$

$$-\frac{1}{z^{(K)}} \{e_R^{(K)}(t) - e_S^{(K)}(t - \tau^{(K)})\} \quad (11)$$

$K=0, 1, 2$

ここに、 $z^{(K)}$ はモード K 回路のサージインピーダンス、 $\tau^{(K)}$ はサージ伝搬時間である。記号 $\wedge$, $\vee$ でそれぞれ論理積、論理和を表わすと、3 相送電線の内部故障は、

$$\bigwedge_{K=0}^2 \xi^{(K)}(t) = 0 \quad \text{ならば内部健全}$$

$$\bigvee_{K=0}^2 \xi^{(K)}(t) \neq 0 \quad \text{ならば内部故障}$$

の論理に従い検出される。単相の場合と同様に、
 $\{\xi^{(K)}(t) | K=0, 1, 2\}$ は R から S に向かう各モードの進行波の差動であり、 $\{\varepsilon^{(K)}(t) | K=0, 1, 2\}$ は S から R に向かう各モードの進行波の差動である。(10)、(11) 式のモード電流・電圧は (8)、(9) 式から計算されるが、モード変換行列 $[S]$ 、 $[Q]$ は行列 $[L]$ $[C]$ および $[C]$ $[L]$ の固有ベクトルとして与えられる。従って、一般には固有値問題を解かなければならないが、燃架送電線に対しては線路定数によらない固有ベクトルを与えることができる。よく知られているものを挙げると、

(1) Fortesque 変換

$$[S] = [Q] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad a = \exp\left(j \frac{2}{3} \pi\right)$$

..... (12)

(2) Clarke 変換

$$[S] = [Q] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad \dots\dots (13)$$

(3) Karrenbauer 変換

$$[S] = [Q] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \end{bmatrix} \quad \dots\dots (14)$$

第 3 図 単相 3 端子送電線

Fig. 3. Single phase three terminal line.

などがある。

$\xi^{(K)}(t)$, $\varepsilon^{(K)}(t)$ の物理的意味は単相の場合と同様に、

$$\xi^{(K)}(t) = i_F^{(K)}(t - \tau_1^{(K)}) \quad \dots\dots (15)$$

$$\varepsilon^{(K)}(t) = i_F^{(K)}(t - \tau_2^{(K)}) \quad \dots\dots (16)$$

で与えられる。 $i_F^{(K)}(t)$ はモード K 回路での故障電流、 $\tau_1^{(K)}$ は故障点から S までのサージ伝搬時間、 $\tau_2^{(K)}$ は故障点から R までのサージ伝搬時間である。

〈2・3〉多端子送電線 第 3 図に示す単相 3 端子送電線での内部故障検出について述べる。分岐点を X とすると区間 SX , RX , TX はそれぞれ 2 端子区間であるから、前進波・後進波に関する Bergeron の関係式が成立する。

(1) 区間 SX

$$i_a(t) + \frac{1}{z} e_X(t) = -i_S(t + \tau_S) + \frac{1}{z} e_S(t + \tau_S)$$

..... (17)

$$-i_a(t) + \frac{1}{z} e_X(t) = i_S(t - \tau_S) + \frac{1}{z} e_S(t - \tau_S)$$

..... (18)

(2) 区間 RX

$$i_b(t) + \frac{1}{z} e_X(t) = -i_R(t + \tau_R) + \frac{1}{z} e_R(t + \tau_R)$$

..... (19)

$$-i_b(t) + \frac{1}{z} e_X(t) = i_R(t - \tau_R) + \frac{1}{z} e_R(t - \tau_R)$$

..... (20)

(3) 区間 TX

$$i_c(t) + \frac{1}{z} e_X(t) = -i_T(t + \tau_T) + \frac{1}{z} e_T(t + \tau_T)$$

..... (21)

$$-i_c(t) + \frac{1}{z} e_X(t) = i_T(t - \tau_T) + \frac{1}{z} e_T(t - \tau_T)$$

..... (22)

ここに τ_S , τ_R , τ_T は各 2 端子区間のサージ伝搬時間

である。一方、 X 点において Kirchhoff の第 1 法則から、

$$i_a(t) + i_b(t) + i_c(t) = 0 \dots\dots\dots (23)$$

が成立する。(17)～(23) 式から計測されない $e_x(t)$, $i_a(t)$, $i_b(t)$, $i_c(t)$ を消去すると次式が導かれる。

$$i_s(t + \tau_s) + i_s(t - \tau_s) + i_r(t + \tau_r) + i_r(t - \tau_r)$$

$$+ i_T(t + \tau_T) + i_T(t - \tau_T) - \frac{1}{z} \{e_s(t + \tau_s)$$

$$- e_s(t - \tau_s) + e_r(t + \tau_r) - e_r(t - \tau_r)$$

$$+ e_T(t + \tau_T) - e_T(t - \tau_T)\} = 0 \dots\dots\dots (24)$$

ここで故障検出に用いる時間関数 $\xi(t)$ を

$$\xi(t) = (24) \text{ 式の左辺} \dots\dots\dots (25)$$

で定義すると、 $\xi(t)$ は次の性質をもつ。

$$\xi(t) = 0 \text{ ならば内部健全}$$

$$\xi(t) \neq 0 \text{ ならば内部故障}$$

かくして、 $\xi(t)$ を用いて 3 端子区間 SRT の内部故障が検出できる。第 3 図の F 点での故障を考えると、故障電流を $i_F(t)$ とするとき、

$$\xi(t) = i_F(t + \tau_2) + i_F(t - \tau_2) \dots\dots\dots (26)$$

である。ここに τ_2 は FX 間のサージ伝搬時間。(26) 式は区間 SX の前進波・後進波が故障点 F を通過する時刻に流出する故障電流の和が $\xi(t)$ に等しいことを意味している。

次に各端子でのモード電流・電圧を用いると、3 相 3 端子送電線への拡張が可能になり、(25) 式に相当する時間関数は、3 相送電線の各モード回路に対して

$$\begin{aligned} \xi^{(K)}(t) = & i_s^{(K)}(t + \tau_s^{(K)}) + i_s^{(K)}(t - \tau_s^{(K)}) \\ & + i_r^{(K)}(t + \tau_r^{(K)}) + i_r^{(K)}(t - \tau_r^{(K)}) \\ & + i_T^{(K)}(t + \tau_T^{(K)}) + i_T^{(K)}(t - \tau_T^{(K)}) \\ & - \frac{1}{z^{(K)}} \{e_s^{(K)}(t + \tau_s^{(K)}) - e_s^{(K)}(t \\ & - \tau_s^{(K)}) + e_r^{(K)}(t + \tau_r^{(K)}) - e_r^{(K)}(t \\ & - \tau_r^{(K)}) + e_T^{(K)}(t + \tau_T^{(K)}) - e_T^{(K)}(t \\ & - \tau_T^{(K)})\} \dots\dots\dots (27) \end{aligned}$$

$$K=0, 1, 2$$

で与えられる。このとき、内部故障は

$$\bigwedge_{K=0}^2 \xi^{(K)}(t) = 0 \text{ ならば内部健全}$$

$$\bigvee_{K=0}^2 \xi^{(K)}(t) \neq 0 \text{ ならば内部故障}$$

の判定論理に従い検出される。また、モード回路の故障電流を $\{i_F^{(K)}(t) | K=0, 1, 2\}$ とすると、(26) 式から類推されるように

$$\xi^{(K)}(t) = i_F^{(K)}(t + \tau_2^{(K)}) + i_F^{(K)}(t - \tau_2^{(K)}) \dots\dots\dots (28)$$

である。

第 4 図 多端子送電線 (部分)

Fig. 4. Part of multi-terminal line.

以上 3 端子送電線について述べたが、任意の多端子への拡張も可能であり、次に基本となる考え方を述べる。第 4 図は多端子区間の 1 部であり、 $(n-1)(n)$ を区間内部の分岐点とし、 $(n-1)$ 点に至るまでのノード電圧、ブランチ電流が既知で、 (n) 点以降が未知と仮定する。区間 $(n-1)(n)$ において

$$i_n(t) + \frac{1}{z_n} e_n(t) = -i_{n-1}(t + \tau_n) + \frac{1}{z_n} e_{n-1}(t + \tau_n) \dots\dots\dots (29)$$

$$-i_n(t) + \frac{1}{z_n} e_n(t) = i_{n-1}(t - \tau_n) + \frac{1}{z_n} e_{n-1}(t - \tau_n) \dots\dots\dots (30)$$

が成立する。上式から $i_n(t)$, $e_n(t)$ が次式のように解ける。

$$i_n(t) = -\frac{1}{2} \left[i_{n-1}(t + \tau_n) + i_{n-1}(t - \tau_n) - \frac{1}{z_n} \{e_{n-1}(t + \tau_n) - e_{n-1}(t - \tau_n)\} \right] \dots\dots\dots (31)$$

$$e_n(t) = \frac{1}{2} \{z_n \{i_{n-1}(t + \tau_n) - i_{n-1}(t - \tau_n)\} + e_{n-1}(t + \tau_n) + e_{n-1}(t - \tau_n)\} \dots\dots\dots (32)$$

従って未知のノード電圧、ブランチ電流が帰納的に計算できることがわかる。多端子区間内部の適当な分岐点を取り、その点における Kirchhoff の第 1 法則と、上のようにして計算したブランチ電流を組み合わせることにより、故障検出に用いる時間関数 $\xi(t)$ を構成できる。

3. 内部故障相の判別

第 5 図に示す 3 相ねん架送電線の F 点での内部故障を考える。故障電流ベクトルを $[i_F(t)]$ とすると、これに対応するモード領域での故障電流ベクトルは

$$[i_F^{(\text{mode})}(t)] = [Q]^{-1} [i_F(t)] \dots\dots\dots (33)$$

で与えられる。一方、モード回路での故障判定関数 $\xi^{(K)}(t)$ は故障電流に一致するから

$$\xi^{(K)}(t) = i_F^{(K)}(t - \tau_1^{(K)}) \dots\dots\dots (34)$$

$k=0, 1, 2$

である。いま、 a 相地絡故障 ($1LG$) を考える。モード変換行列に (14) 式の Karrenbauer 変換行列を用いると、モード回路の故障電流は

$$\begin{bmatrix} i_F^{(0)}(t) \\ i_F^{(1)}(t) \\ i_F^{(2)}(t) \end{bmatrix} = [Q]^{-1} \begin{bmatrix} i_F^{(a)}(t) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} i_F^{(a)}(t) \\ \frac{1}{3} i_F^{(a)}(t) \\ \frac{1}{3} i_F^{(a)}(t) \end{bmatrix} \quad (35)$$

となる。従って、 $\xi^{(0)}(t) \neq 0$, $\xi^{(1)}(t) \neq 0$, $\xi^{(2)}(t) \neq 0$ である。ところで (35) 式は a 相を基準にしたモード変換であるが、モード変換の基準相を a 相から b 相に変えると、 a 相 $1LG$ 時のモード故障電流は、

$$\begin{bmatrix} i_F^{(0)}(t) \\ i_F^{(1)}(t) \\ i_F^{(2)}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} i_F^{(a)}(t) \\ 0 \\ \frac{1}{3} i_F^{(a)}(t) \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (36)$$

で与えられ (35) 式とは異なる。この場合は $\xi^{(0)}(t) \neq 0$, $\xi^{(1)}(t) = 0$, $\xi^{(2)}(t) \neq 0$ である。更に c 相を基準相に選ぶと、

$$\begin{bmatrix} i_F^{(0)}(t) \\ i_F^{(1)}(t) \\ i_F^{(2)}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} i_F^{(a)}(t) \\ \frac{1}{3} i_F^{(a)}(t) \\ 0 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (37)$$

となり、 $\xi^{(0)}(t) \neq 0$, $\xi^{(1)}(t) \neq 0$, $\xi^{(2)}(t) = 0$ である。従ってモード変換の基準相の選び方により故障電流が異なることがわかる。Karrenbauer 変換を用いた場合、すべての故障に対する $\xi^{(k)}(t)$ を第 1 表にまとめる。その結果から、 $2LG$ と $3LG$, $2LS$ と $3LS$ と第 1 表 Karrenbauer 変換における $\xi^{(0)}$, $\xi^{(1)}$, $\xi^{(2)}$ の真理値

Table 1. Truth value table on $\xi^{(0)}$, $\xi^{(1)}$, and $\xi^{(2)}$ in Karrenbauer transform.

“変換 (p)” は p 相基準のモード変換、記号 $\bigcirc$ は $\xi^{(k)} \neq 0$ 、記号 $\times$ は $\xi^{(k)} = 0$ をそれぞれ表わす。

判別	故障	1 LG			2 LG			2 LS			3LG 3LS	
		a	b	c	a-b	b-c	c-a	a-b	b-c	c-a	3LG	3LS
変換 (a)	$\xi^{(0)}$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\times$	$\times$	$\times$	$\bigcirc$	$\times$
	$\xi^{(1)}$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\times$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$
	$\xi^{(2)}$	$\bigcirc$	$\times$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$
変換 (b)	$\xi^{(0)}$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\times$	$\times$	$\times$	$\bigcirc$	$\times$
	$\xi^{(1)}$	$\times$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$
	$\xi^{(2)}$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\times$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$
変換 (c)	$\xi^{(0)}$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\times$	$\times$	$\times$	$\bigcirc$	$\times$
	$\xi^{(1)}$	$\bigcirc$	$\times$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$
	$\xi^{(2)}$	$\times$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$

第 5 図 a 相 $1LG$ 時の故障電流源

Fig. 5. Fault Current injection in $1LG$ of phase- a .

がそれぞれ同じパターンになっているため、これらの故障に対する相判別はできず、 $1LG$ 故障のみ相判別可能なことが導かれる。

モード変換行列として (13) 式の Clarke 変換行列を用いた場合の $\xi^{(k)}(t)$ を第 2 表に示す。この場合、 $2LG$ と $3LG$ に対するパターンが一致しているため、これらの故障の相判別はできないが $1LG$, $2LS$, $3LS$ 故障時には、相判別は可能である。従って、故障相判別の観点からは、Clarke 変換を用いる方が有利といえる。しかし、実用的には $1LG$ 故障が大半を占めているから、両変換の差異はそれほど大きくない

第 2 表 Clarke 変換における $\xi^{(0)}$, $\xi^{(1)}$, $\xi^{(2)}$ の真理値

Table 2. Truth value table on $\xi^{(0)}$, $\xi^{(1)}$, and $\xi^{(2)}$ in Clarke transform.

判別	故障	1 LG			2 LG			2 LS			3LG 3LS	
		a	b	c	a-b	b-c	c-a	a-b	b-c	c-a	3LG	3LS
変換 (a)	$\xi^{(0)}$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\times$	$\times$	$\times$	$\bigcirc$	$\times$
	$\xi^{(1)}$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\times$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$
	$\xi^{(2)}$	$\times$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$
変換 (b)	$\xi^{(0)}$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\times$	$\times$	$\times$	$\bigcirc$	$\times$
	$\xi^{(1)}$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\times$	$\bigcirc$	$\bigcirc$
	$\xi^{(2)}$	$\bigcirc$	$\times$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$
変換 (c)	$\xi^{(0)}$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\times$	$\times$	$\times$	$\bigcirc$	$\times$
	$\xi^{(1)}$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\times$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$
	$\xi^{(2)}$	$\bigcirc$	$\times$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$

—, --- は進行波を意味する

第 6 図 標定法 1 の原理

Fig. 6. Illustration of location scheme-1.

と考えられる。

4. 内部故障点の標定

波動理論に基づく故障点標定法を二つ述べる。以下では単相送電線の場合について述べるが、モード変換法を用いると三相送電線への拡張は容易である。

〈4.1〉 標定法 1 この方法は、自端のみの電流・電圧に基づいて標定を行なうものである。第 1 図の F 点での故障を考え、端子 S の電流 $i_s(t)$ 、電圧 $e_s(t)$ のみ得られるものと仮定する。区間内の任意の点 X の電圧は、(32)式を用いて

$$\begin{aligned} e_x(t, \tau_x) = & \frac{1}{2} [e_s(t + \tau_x) + e_s(t - \tau_x) \\ & - z \{i_s(t + \tau_x) - i_s(t - \tau_x)\}] \quad (38) \end{aligned}$$

より推定できる。ここに τ_x は区間 SX のサージ伝搬時間。さて、故障インピーダンス $z_F = 0$ の理想の場合には、故障点 F の電圧は

$$e_F(t) \begin{cases} \neq 0 & \text{故障前} \\ = 0 & \text{故障後} \end{cases} \quad (39)$$

となる。従って、故障検出後の任意の時刻 t に対し

$$e_x(t, \tau_x^*) = 0 \quad (40)$$

なる τ_x^* を求めると、故障点までのサージ伝搬時間が決定でき、従って故障点が標定される。第 6 図に標定の原理図を示す。この方式は (39) 式を前提としているため $z_F \neq 0$ になると標定の精度が悪くなることが考えられるが、自端データのみで標定が行なえる利点もある。

〈4.2〉 標定法 2 本手法は前進波・後進波の両者を用いて行なうものである。内部故障を検出する時間関数 $\xi(t)$ 、 $\varepsilon(t)$ は既に述べたように、故障電流に等しい。すなわち、

$$\xi(t) = i_F(t - \tau_1) \quad (41)$$

第 7 図 標定法 2 の原理

Fig. 7. Illustration of location scheme-2.

$$\varepsilon(t) = i_F(t - \tau_2) \quad (42)$$

第 7 図において、時刻 t に S 端に到着する後進波 ($R \rightarrow S$ に向かう) に関する差動値は $\xi(t)$ で与えられる。一方、時刻 $(t + \Delta t)$ に R 端に到着する前進波に関する差動値を $\varepsilon(t + \Delta t)$ とすると、 $\varepsilon(t + \Delta t) \neq \xi(t)$ である。なぜなら、上記二つの進行波は F 点で交差しないためである。これに対して F 点で上記の後進波と交差する前進波の R 端への到着時刻を $(t + \Delta t^*)$ とすると、(41)、(42) 式より

$$\varepsilon(t + \Delta t^*) = \xi(t) \quad (43)$$

となる。従って、故障検出後の任意の時刻 t に対して、(43)式を満たす Δt^* を見いだせば

$$\tau_x^* = \frac{\tau - \Delta t^*}{2} \quad (44)$$

から、故障点までのサージ伝搬時間 τ_x^* が求まり、故障点が標定される。この手法は前進波と後進波から推定した故障電流のマッチングをとることにより標定を行なうものである。従って故障電流の大きさ、すなわち故障インピーダンス z_F に関係なく標定できる特徴をもっている。

さて、以上の 2 標定法を 3 相送電線に適用してみる。この場合、モード回路で考えれば上記の議論がそのまま成立する。まず、Karrenbauer 変換を用いたときのモード回路では第 1 表で記号 O がエンタリーされている回路で故障電流源がそう入される。従って、そのモード回路では故障点標定が可能である。一方、記号 X がエンタリーされている回路では故障電流源がそう入されないため、 $\varepsilon^{(K)}(t) = \xi^{(K)}(t) \equiv 0$ となり故障点標定が不可能である。例えば、ab 相地絡故障 (2LG) に対してはすべてのモード回路に故障電流源が存在し、すべてのモード回路で故障点の標定が可能となる。第 1 表をこのように調べると、どのモード回路においても少なくとも一つ記号 X がエンタリーされている。

従って、一つのモード回路単独ではあらゆる種類の故障を標定できないことが結論付けられる。もちろん、二つ以上のモード回路を併用すると、すべての種類の故障を標定できることは言うまでもない。

Clarke 変換を用いたときも第2表の結果から Karrenbauer 変換の場合と全く同じ結論が導かれる。

5. むすび

本論文では波動理論に基づく新しい送電線保護方式を提案し、内部故障の検出、故障相の判別、および故障点の標定について論じた。まず、内部故障の検出に関して本手法は内部故障を高速に検出できること、外部故障および外部区間での開閉器などの操作と内部故障とを安全に識別できること、故障に伴う送電線の過渡現象の影響を受けないことなどの特徴を有することを明らかにした。これらはすべて本保護方式の原理式である Bergeron の関係式のもつ特徴に属するものである。単相2端子区間の議論をベースに、モード変換を行なうことにより3相2端子区間、3相多端子区間へも拡張されることを示した。次に、故障相の判別に関して、モード変換して得られる各モード回路での内部故障検出結果を合すると相判別可能であることを明らかにした。更に故障点の標定に関して、自端情報のみで標定する方式と、自端・相手端の情報に基づいて標定する方式とを提案した。

本論文は新しい送電線保護方式の理論的側面を中心に述べたが、理論的展開にあたり筆者らは、無損失送電線を仮定した。しかし、実際の送電線では直列抵抗があり、また線路パラメータには周波数依存性がある。更に、最近の超超高压架空線では非ねん架が一般的であり、この影響も無視できないものがあると思われる。また、我々が知り得る線路定数はあくまでも近似値であり、ある程度の誤差を含んでいることを念頭に置かなければならない。このように、実際の送電線保護に適用するためには、こうした諸要因の影響を十分検討する必要がある。この点に関しては稿を改めて報告したい。

最後に、本研究の遂行にあたり御指導いただいた東京電力(株)取締役技術開発研究所長 高木利夫氏並びに三菱電機(株)中央研究所副所長 馬場準一博士、同主任研究員 上村勝彦博士に感謝の意を表する次第である。

(昭和52年3月31日受付、同52年6月9日再受付)

文 献

- (1) G.D. Rockefeller: IEEE Trans. Power Apparatus Syst.

PAS-88, 438 (1969)

- (2) B. J. Mann & I. F. Morrison: *ibid* PAS-90, 270 (1971)
 (3) *ibid*: *ibid* PAS-90, 742 (1971)
 (4) R. Poncelet: CIGRE Int. Conf. 32-08 (1972)
 (5) A. M. Ranjbar & B. J. Cory: IEEE PES Meeting T 74, 380-2 (1974)
 (6) W. Frey & P. Althammer: Brown Boveri Rev. 48, 5/6, 344 (1961)
 (7) H. W. Dommel & W. S. Meyer: Proc. IEEE 62, 983 (1974)

付 録

(1) Bergeron の関係式の導出 第1図に示す単相送電線において、次の波動方程式が成立する。

$$-\frac{\partial e}{\partial x} = L \frac{\partial i}{\partial t} \quad \text{..... (付1)}$$

$$-\frac{\partial i}{\partial x} = C \frac{\partial e}{\partial t} \quad \text{..... (付2)}$$

この波動方程式の解は d'Alembert の解として知られており、次式で与えられる。

$$e(t) = z \left\{ F \left(t - \frac{x}{v} \right) + f \left(t + \frac{x}{v} \right) \right\} \quad \text{..... (付3)}$$

$$i(t) = F \left(t - \frac{x}{v} \right) - f \left(t + \frac{x}{v} \right) \quad \text{..... (付4)}$$

ここに、

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (\text{サージ伝搬速度}) \quad \text{..... (付5)}$$

$$z = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (\text{サージインピーダンス}) \quad \text{..... (付6)}$$

である。 $F(\bullet)$ および $f(\bullet)$ は境界条件から決定される任意関数である。(付3)、(付4)式から $f(\bullet)$ を消去すると、

$$i(t) + \frac{1}{z} e(t) = 2F \left(t - \frac{x}{v} \right) \quad \text{..... (付7)}$$

第1図の端子 S , R において (付7) 式は

$$i_S(t) + \frac{1}{z} e_S(t) = 2F(t) \quad (\because x=0) \quad \text{..... (付8)}$$

$$-i_R(t) + \frac{1}{z} e_R(t) = 2F \left(t - \frac{d}{v} \right) \quad (\because x=d) \quad \text{..... (付9)}$$

と書かれる。ここで (付8) 式の t に $t-d/v$ を代入すると、求める Bergeron の関係式が導かれる。

$$i_S(t-\tau) + \frac{1}{z} e_S(t-\tau) = -i_R(t) + \frac{1}{z} e_R(t) \quad \text{..... (付10)}$$

但し、

$$\tau = \frac{d}{v} \quad (\text{サージ伝搬時間}) \quad \text{..... (付11)}$$

一方、(付3)、(付4)式から $F(\bullet)$ を消去すると別

の Bergeron の関係式が導かれる。

$$-i_S(t) + \frac{1}{z} e_S(t) = i_R(t - \tau) + \frac{1}{z} e_R(t - \tau) \quad \text{..... (付12)}$$

(付 10) 式は $S \rightarrow R$ に向かう前進波から導かれるもので、(付 12) 式は $R \rightarrow S$ に向かう後進波から導かれるものである。

次に第 2 図の 3 相送電線について考える。送電線の波動方程式は、

$$-\frac{\partial[e]}{\partial x} = [L] \frac{\partial[i]}{\partial t} \quad \text{..... (付13)}$$

$$-\frac{\partial[i]}{\partial x} = [C] \frac{\partial[e]}{\partial t} \quad \text{..... (付14)}$$

で与えられる。(付 13), (付 14) 式にモード変換

$$[e] = [S][e^{(mode)}] \quad \text{..... (付15)}$$

$$[i] = [Q][i^{(mode)}] \quad \text{..... (付16)}$$

を施すと、モード領域の量に関して

$$-\frac{\partial[e^{(mode)}]}{\partial x} = [S]^{-1}[L][Q] \frac{\partial[i^{(mode)}]}{\partial t} \quad \text{..... (付17)}$$

$$-\frac{\partial[i^{(mode)}]}{\partial x} = [Q]^{-1}[C][S] \frac{\partial[e^{(mode)}]}{\partial t} \quad \text{..... (付18)}$$

が得られ、 $[e^{(mode)}]$, $[i^{(mode)}]$ はそれぞれ次式を満足する。

$$\frac{\partial^2[e^{(mode)}]}{\partial x^2} = [S]^{-1}[L][C][S] \frac{\partial^2[e^{(mode)}]}{\partial t^2} \quad \text{..... (付19)}$$

$$\frac{\partial^2[i^{(mode)}]}{\partial x^2} = [Q]^{-1}[C][L][Q] \frac{\partial^2[i^{(mode)}]}{\partial t^2} \quad \text{..... (付20)}$$

$[S]$, $[Q]$ として、それぞれ行列 $[L][C]$, $[C][L]$ の固有ベクトルから成る行列をとると、(付 19), (付 20) 式は各モード成分に関して独立な方程式を与える。同時に、(付 17), (付 18) 式は各モードに関して単相送電線と等価な関係式を与える。

$$-\frac{\partial[e^{(mode)}]}{\partial x} = [L^{(mode)}] \frac{\partial[i^{(mode)}]}{\partial t} \quad \text{..... (付21)}$$

$$-\frac{\partial[i^{(mode)}]}{\partial x} = [C^{(mode)}] \frac{\partial[e^{(mode)}]}{\partial t} \quad \text{..... (付22)}$$

ここに、

$$[L^{(mode)}] = \begin{bmatrix} l^{(0)} & 0 \\ 0 & l^{(2)} \end{bmatrix}$$

$$[C^{(mode)}] = \begin{bmatrix} c^{(0)} & 0 \\ 0 & c^{(2)} \end{bmatrix}$$

単相送電線において成立する Bergeron の関係式を (付 21), (付 22) 式の各モードについて求めると、3 相送電線における Bergeron の関係式が導かれる。

$$\begin{aligned} i_S^{(K)}(t - \tau^{(K)}) + \frac{1}{z^{(K)}} e_S^{(K)}(t - \tau^{(K)}) \\ = -i_R^{(K)}(t) + \frac{1}{z^{(K)}} e_R^{(K)}(t) \quad \text{... (付23)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} -i_S^{(K)}(t) + \frac{1}{z^{(K)}} e_S^{(K)}(t) \\ = i_R^{(K)}(t - \tau^{(K)}) + \frac{1}{z^{(K)}} e_R^{(K)}(t - \tau^{(K)}) \quad \text{..... (付24)} \end{aligned}$$

ここに、

$$\tau^{(K)} = \sqrt{L^{(K)} C^{(K)}} d \quad \text{..... (付25)}$$

$$z^{(K)} = \sqrt{\frac{L^{(K)}}{C^{(K)}}} \quad \text{..... (付26)}$$

$$K = 0, 1, 2$$

(2) (4), (5) 式の導出 第 1 図の区間 SF , FR において、後進波に関する Bergeron の関係式が成立する。

$$-i_S(t) + \frac{1}{z} e_S(t) = i_{FS}(t - \tau_1) + \frac{1}{z} e_F(t - \tau_1) \quad \text{..... (付27)}$$

$$\begin{aligned} i_R(t - \tau_1 - \tau_2) + \frac{1}{z} e_R(t - \tau_1 - \tau_2) \\ = -i_{FR}(t - \tau_1) + \frac{1}{z} e_F(t - \tau_1) \quad \text{..... (付28)} \end{aligned}$$

上式から $e_F(t - \tau_1)$ を消去すると、

$$\begin{aligned} i_S(t) - \frac{1}{z} e_S(t) + i_R(t - \tau) + \frac{1}{z} e_R(t - \tau) \\ = -i_{FS}(t - \tau_1) - i_{FR}(t - \tau_1) \quad \text{... (付29)} \end{aligned}$$

従って求める関係式

$$\xi(t) = i_F(t - \tau_1) \quad \text{..... (付30)}$$

が導かれる。 $S \rightarrow R$ へ向かう前進波について定様の考察を行なえば、(5) 式が導かれる。