UDC 621.315.051.2: 621.316.925.4

論文

53-B 87

波動理論による送電線保護 (その2. 実用化方式の検討)

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

リレー性能の向上を目的として、1960年代より“デジタルリレー”が提案されており、その多くは集中定数回路で表わされる送電線モデルから導かれる判定アルゴリズムを用いている。筆者らは、大容量・広域化する現在の送電線では、従来のモデルが妥当ではなくなりつつあるとの立場をとる。更に欧米とは異なり我が国では都心のケーブル系統にみられるような大容量短距離送電線が次第に増えるものと思われる。こうした送電線ではインピーダンスリレーは不適当で、差動リレーが最も適当であろう。筆者らはこうした動機づけの下に新しいタイプの保護リレーを開発するに至った。

既に筆者らは前稿⁽¹⁾において、送電線に分布定数モデルを用いることを提案している。このモデルで各種の過渡現象を解析すると、“進行波”がその現象を支配していることに気づく。かくして筆者らは進行波の差動を原理とする新しいリレー方式を開発した。同方式によると、三相送電線では

$$\xi^{(k)}(t) = i_R^{(k)}(t) + i_S^{(k)}(t - \tau^{(k)})$$

$$- \frac{1}{z^{(k)}} \{ e_R^{(k)}(t) - e_S^{(k)}(t - \tau^{(k)}) \}$$

$$(k=0, 1, 2) \dots \dots \dots (1)$$

で定義される判定関数が各モード回路での故障検出を可能にする。しかし、(1)式を忠実に実現するとリレー H/W や保護アルゴリズムが複雑になる恐れがある。そこで本稿では(1)式を簡略化した判定関数：

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

$$\dots \dots \dots (2)$$

を実用式として提案する。ここに(2)式は各相独立に計算されるものである。 $\xi(t)$ の整定値は τ (サージ伝搬時間)と z (サージインピーダンス)を含むが、それぞれ正相値を用いるものとする。

さて、簡略化した $\xi(t)$ に基づくリレー(本稿ではダランベールリレーと呼ぶ)は、厳密な関係式を近似していることも含めて幾つかの誤差要因を含んでいる。まず第一に、ダランベールリレーでは相間結合を無視しているため、それに起因する誤差がある。次に線路定数の真値を正確に知ることはできないから、正相値 $\tau^{(1)}$ 、 $z^{(1)}$ の整定にもある程度の誤差は避けられない。更に電流・電圧をサンプリングした瞬時値で $\xi(t)$ を計算する場合には、保護区間の各端子でサンプリング時刻のずれも現実には起り得る。最後に、前稿の議論においてダランベールリレーは周波数依存効果のない送電線モデルを仮定しているが、現実には同効果に起因する誤差も予想される。本稿は、ダランベールリレーを実用化するにあたって検討しておかねばならない上記の各問題点について、数値的ならびに解析的に取扱い、実用化方式を与えるものである。なお最

Fault Protection Based on Travelling Wave Theory: Part 2
Feasibility Study. Yoshiakira Akimoto, Member, Takahiko
Yamamoto, Member, Hiroshi Hosokawa, Non-member (The
Tokyo Electric Power Co., Inc.), Toshiaki Sakaguchi, Member
Takashi Yoshida, Member & Shogo Nishida, Member
(Mitsubishi Electric Co.).

穂本能彬：正員，東京電力(株)中央給電指令所
山本隆彦：正員，東京電力(株)東部送変電建設所
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

近, 欧米でも進行波に着目した新しい保護リレーが発表されている⁽²⁾⁽³⁾が, 筆者らとほぼ機を一にしてこうした研究開発が進んでいることは大変興味深いものがある。

2. 実用式によるダランベールリレーシミュレーション

〈2・1〉 モデル系統での故障計算 ダランベールリレーの性能を検証するにあたり, リレーへの入力となる原データを得るため, 第1図のモデル系統において各種の故障計算をデジタル計算機を用いて行なった。モデル系統は 500 kV 長距離架空送電線および 275 kV 地中ケーブル系から構成されており, 送電線各区間の零相・正相パラメータは第1表に示してある。本系統の特徴は地中ケーブルにあり, 特にそのサージインピーダンスが低い点に注目する必要がある。これは対地静電容量が架空線と比して1けた大きくなっているため, ケーブル系で故障が発生すると波形ひずみも大きくなることが容易に予想される。

送電線の過渡現象解析法として, 大別すると(1)時間領域での数値積分法⁽⁴⁾, (2)周波数領域での数値積分法⁽⁵⁾がある。本稿では, 前者に属する Bergeron 法に基づく解析手法によった。第1図の F1~F4 の各

第1図 モデル系統
Fig. 1. Model system.

第1表 モデル系統の線路定数

Table 1. Line constants of model system.

帯域	定数	$R^{(0)}$	$L^{(0)}$	$C^{(0)}$	$\tau^{(0)}$	$Z^{(0)}$
A-B		0.00047	0.00252	0.00066	0.2321	1.954
C-D		0.00152	0.00955	0.00013	0.0301	8.571
D-E		0.00246	0.00228	0.00834	0.0972	0.529
E-F		0.00246	0.00234	0.00834	0.0985	0.530

帯域	定数	$R^{(1)}$	$L^{(1)}$	$C^{(1)}$	$\tau^{(1)}$	$Z^{(1)}$
A-B		0.00008	0.00114	0.00099	0.1912	1.073
C-D		0.00026	0.00331	0.00034	0.0286	3.120
D-E		0.00027	0.00156	0.00844	0.0819	0.432
E-F		0.00027	0.00153	0.00844	0.0797	0.428

$R^{(k)}, L^{(k)}, C^{(k)}$: pu/km

$\tau^{(k)}$: rad

$Z^{(k)}$: pu

第2図 電圧・電流波形

Fig. 2. Voltage and current waveforms.

点で, a 相地絡および $a-b$ 相短絡故障の計算を行なった。この2種類の故障を選んだのは, 零相回路を含む代表的な故障と, それを含まない故障という観点からである。第2図に F4 での $a-b$ 相短絡時の故障波形を示す。とりわけ特徴的なことは, 同図に見られるように電流波形のひずみである。(c), (d)は E 点, F 点におけるそれぞれ F 方向, E 方向の電流を示しているが, E 点側の波形ひずみが顕著である。もし, 区間 EF を電流差動で保護すれば, 第2図の(c)+(d)がリレー動作出力となるから, 外部故障に対して誤動作する可能性が極めて高い。

〈2・2〉 ダランベールリレーのシミュレーション

前節で得られた故障波形に基づき, デジタルシミュレーションの各時刻ごと(時間幅=40 μ s)に(2)式の計算を行なった。ここではケーブル区間での各リレーに着目し, F4 点での地絡・短絡故障時の $\xi(t)$ の代表波形を第3図に示す。同図(a)~(c)は地絡故障時の故障区間内故障相, 同健全相, 健全区間内故障相の3種類の $\xi(t)$ を, また同図(d)~(f)は短絡故障時の同種の波形をそれぞれ示している。故障区間内故障相の判定関数は, 故障後いずれの場合も十分大きな値をとっている。一方, 健全相の $\xi(t)$ は地絡時には振

第3図 判定関数 $\xi(t)$ Fig. 3. Criteria function $\xi(t)$.

幅の絶対値は小さいが高周波を含む波形となり、短絡時には $\xi(t) \approx 0$ となっている。健全相におけるこの相違は、ダランベールリレーが零相回路のサージ伝搬を正相パラメータに近似していることに起因している。第2図の(c)+(d)の差動電流と、第3図(f)の $\xi(t)$ を比較するとダランベールリレーの有効性が良く示されている。本節でのシミュレーションリレー整定値の真値が知られており、かつ線路定数にも周波数依存効果がないものと仮定している。次章ではこうした仮定と現実とずれがある場合の影響を考察する。

3. 実用式の誤差に関する数値的検討

(3.1) τ の不確定性の影響 τ に不確定性を生じる要因としては、既に述べたように正相と零相の伝搬時間の相違、保護区間各端子でのサンプリング時刻のずれのほかに、無ねん架送電線を完全ねん架とした場合もそれに含めて考えられる。 τ に $\Delta\tau$ の誤差があるときの影響は(2)式の判定関数を

第4図 $\xi_{\Delta\tau}(t)$.Fig. 4. $\xi_{\Delta\tau}(t)$.

$$\xi_{\Delta\tau}(t) = i_R(t) + i_s(t - (\tau + \Delta\tau))$$

$$- \frac{1}{z} \{ e_R(t) - e_s(t - (\tau + \Delta\tau)) \} \dots (3)$$

として演算すれば検討できる。第3図の(f)を与える区間および故障について、 $\Delta\tau = \pm 15\%$ として(3)式を計算すると第4図が得られる。第3図(f)と比較して、インパルス状の動作出力が顕著に見られる。もし、高いピーク値を与える時刻とリレー演算時刻とが一致すると、誤動作の可能性がでてくる。従って、この誤動作出力は何らかの方策で小さく抑える必要があり、その対策については後述する。 E 点の EF を保護区間とする α 相リレーについて、短絡故障地点をパラメータとし $\Delta\tau$ が 15% および 30% の場合の $\xi_{\Delta\tau}^{\max}$ を第6図(a)に示す。ここに

$$\xi_{\Delta\tau}^{\max} \triangleq \max_t |\xi_{\Delta\tau}(t)| \dots (4)$$

である。同図から、 $\xi(t)$ の $\Delta\tau$ に対する感度は大きいことがわかる。故障地点がリレー設置点より遠くなるにつれて $\xi_{\Delta\tau}^{\max}$ は小さくなるが、これは進行波が伝搬中に減衰するためである。

(3.2) z の不確定性の影響 z の不確定性は、線路定数の不確定性に起因する。前節と同様にして、その影響は(2)式の判定関数を

$$\xi_{\Delta z}(t) = i_R(t) + i_s(t - \tau)$$

$$- \frac{1}{z + \Delta z} \{ e_R(t) - e_s(t - \tau) \} \dots (5)$$

として計算すれば検討できる。前節と同じ区間および同じ故障について、 $\Delta z = \pm 15\%$ として(5)式を計算すると第5図が得られる。同図は第4図と比較すると容易にわかるようにインパルス状の動作出力が見られない。 E 点の α 相リレーについて短絡故障地点をパラメータとし Δz が 15% および 30% の場合の $\xi_{\Delta z}^{\max}$ を第6図(b)に示す。ここに

$$\xi_{\Delta z}^{\max} \triangleq \max_t |\xi_{\Delta z}(t)| \dots (6)$$

である。同図には、 $\xi(t)$ の Δz に対する感度が小さ

第 5 図 $\xi_{\Delta Z}(t)$.Fig. 5. $\xi_{\Delta Z}(t)$. 第 6 図 $\xi_{\Delta Z}^{\max}$ および $\xi_{\Delta Z}^{\max}$ の感度Fig. 6. Sensitivity of $\xi_{\Delta Z}^{\max}$ and $\xi_{\Delta Z}^{\max}$.

く、また故障点によってはあまり変わらないことが示されており、ダランベールリレーの実用化に際しては ΔZ の影響は無視して差支えないであろう。

〈3・3〉 送電線損失の影響 送電線の損失分は、全抵抗を R とするとき $(R/2)$ を送電線の中央部に、 $(R/4)$ を送電線の両端子にそう入すればほぼ等価的に取扱うことが可能である。第 7 図はその近似モデルを表わしている。同モデルでは、中央部および両端部の抵抗で進行波の(反射)/(透過)があるから、自端に到着する進行波は相手端および自端を同時刻に出発した進行波の和で表わされる。従って、第 7 図のモデルにおけるダランベールリレーの判定関数は厳密には次の式となるべきである。

$$\begin{aligned} \xi_R(t) = & i_R(t) + \left(\frac{1+h}{2}\right) h i_s(t-\tau) \\ & + \left(\frac{1-h}{2}\right) h i_R(t-\tau) \\ & - \frac{1}{z'} \left\{ e_R(t) - \left(\frac{1+h}{2}\right) e_s(t-\tau) \right. \\ & \left. - \left(\frac{1-h}{2}\right) e_R(t-\tau) \right\} \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

ここに

第 7 図 損失のある送電線の近似モデル

Fig. 7. Approximate model of a lossy line.

第 2 表 代表的な h -定数Table 2. Typical value of h -constant.

定数	送電線	EHV	HV
$h^{(0)}$		0.99988	0.99988
$h^{(1)}$		0.99996	0.99993

$$h = \frac{z - R/4}{z + R/4} \dots\dots\dots (8)$$

$$z' = z + R/4 \dots\dots\dots (9)$$

h は原判定関数 $\xi(t)$ が送電線損失の影響をどの程度受けるかを示すパラメータと考えてよい。 h が 1 より小さくなるにつれて損失の影響が大きくなっていく。第 2 表は代表的な EHV および HV 送電線について、各モード領域での h を計算したものである。同表は電圧階級の高い送電線と低い送電線で、同程度のしかも無視し得る程度に小さい影響があることを意味している。一般に、電圧階級が低くなるにつれて損失分が大きくなることが認められるが、筆者らのダランベールリレーに対しては、サージインピーダンスとの比で効いてくるため、電圧階級の低い送電線でも損失分の影響は小さいのである。

〈3・4〉 周波数依存効果の影響 線路定数の周波数依存効果の影響を、ダランベールリレーの判定関数の周波数スペクトラムを用いて定性的に検討する。第 4 図から、故障発生直後の 1 サイクル間の判定関数値を取り出し、そのスペクトラムを求めたのが第 8 図である。時間ステップが $40 \mu s$ 、周期が $20 ms$ のデジタルデータに関して Discrete Fourier Transform を用いているため、第 8 図の最高周波数は $(1/2) \times (1/40$

第 8 図 $\xi_{\Delta Z}(t)$ の周波数スペクトラム ($\Delta\tau=15\%$)Fig. 8. Frequency spectrum of $\xi_{\Delta Z}(t)$ ($\Delta\tau=15\%$).

μs)=12.5 kHz である。さて、同図より数 kHz の付近にスペクトラムのピークが多数認められ、これらの成分が $\xi(t)$ の誤差出力に大きく貢献していることが伺える。ところで、周波数依存効果は線路の抵抗分に顕著にみられ、一般には周波数が高くなると共に抵抗値も大きくなる。こうした効果は $\xi(t)$ の高周波成分を減衰させる方向に働くため、第 8 図のスペクトラムのピークは高周波の領域で小さくなると考えられる。従って、 $\xi(t)$ の誤差出力を小さくするという点で、周波数依存効果はダランベールリレーにとって望ましい影響を与えることが結論づけられる。

〈3・5〉 実用化への対策 本節ではフィルタを用いて、例えば第 4 図に見られるような誤動作出力を抑える方法を述べる。健全相の $\xi(t)$ に現われる誤動作出力のうちで、ダランベールリレーにとって望ましくないのはインパルス状の動作出力であるから、 $\xi(t)$ から高周波成分を除去すればピーク値の最大値を小さくすることができる。筆者らはそのために、シャ断周波数の比較的高い(数 kHz 程度)ローパスフィルタを用いることを提案する。従来のリレーでは、主として系統周波数成分をピックアップするため、バンドパスフィルタを用いることが多い。これに対してダランベールリレーは許容周波数範囲に特に制限を課さないため、こうしたフィルタの使用が可能になる。本節においては、伝達関数が $K/(1+sT)$ なる一次遅れ要素で表現される最も簡単なフィルタを用いる。デジタル計算機で求められた電流・電圧値が、それぞれ同じ特

第 9 図 フィルタ使用時の $\xi(t)$

Fig. 9. Filtered $\xi(t)$.

第 10 図 フィルタによる $\xi_{\Delta T}^{\max}$ の改善

Fig. 10. Improvement by filter of $\xi_{\Delta T}^{\max}$.

性をもつデジタルフィルタに入力され、その出力値から $\xi(t)$ が計算される。代表例を第 9 図に示す。同図は第 4 図の $\xi(t)$ 計算にシャ断周波数が 4.0, 2.0, 1.0, 0.5 kHz の 4 種類のフィルタを前置したときの結果である。高いピーク値が小さく抑えられ、フィルタの効果が十分認められる。第 10 図は、区間 EF のダランベールリレーに上記 4 種類のフィルタを使用したときの $\xi_{\Delta T}^{\max}$ を改善具合を示す。同図より、シャ断周波数が低いほど、 $\xi_{\Delta T}^{\max}$ はより改善されている。しかしフィルタの時間遅れはシャ断周波数の逆数にほぼ比例するため、動作時間の観点からはシャ断周波数は高くとるほうが望ましい。実リレーでは、要求されるリレー感度とリレー動作時間の両責務から、シャ断周波数が決定されるであろう。

本章では、各種誤差要因について数値計算ベースに検討した。以上の要因の影響はまた解析的に厳密に取扱うことができ、その議論は次章で述べる。

4. 実用式の誤差に関する解析的検討

〈4・1〉 送電線の伝達特性 三相送電線において新しい変数 $f(t)$, $b(t)$ を次のように定義する。

$$f(t) = i(t) + 1/z \cdot e(t) \quad (10)$$

$$b(t) = -i(t) + 1/z \cdot e(t) \quad (11)$$

Snelson 氏が指摘した⁽⁶⁾ように、各モード領域の $f(t)$ および $b(t)$ のフーリエ変換は次の関係を満足している。

$$\begin{bmatrix} B_s^{(k)}(j\omega) \\ B_R^{(k)}(j\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1^{(k)}(j\omega) & A_2^{(k)}(j\omega) \\ A_2^{(k)}(j\omega) & A_1^{(k)}(j\omega) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} F_s^{(k)}(j\omega) \\ F_R^{(k)}(j\omega) \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$k=0, 1, 2$$

ここに

$$A_1^{(k)}(j\omega) = \frac{(z_0^{(k)}/z^{(k)} - z^{(k)}/z_0^{(k)})_*}{2 \cosh \lambda^{(k)} d + (z_0^{(k)}/z^{(k)})_*} \dots (13)$$

$$* \frac{\sinh \lambda^{(k)} d}{+ z^{(k)}/z_0^{(k)} \sinh \lambda^{(k)} d} \dots$$

$$A_2^{(k)}(j\omega) = \frac{2_*}{2 \cosh \lambda^{(k)} d + (z_0^{(k)}/z^{(k)})_*} \dots (14)$$

$$* \frac{z^{(k)}/z_0^{(k)} \sinh \lambda^{(k)} d}{+ z^{(k)}/z_0^{(k)} \sinh \lambda^{(k)} d} \dots$$

$$z_0^{(k)} = \sqrt{\frac{R^{(k)} + j\omega L^{(k)}}{G^{(k)} + j\omega C^{(k)}}} \dots (15)$$

$$\lambda^{(k)} = \sqrt{(R^{(k)} + j\omega L^{(k)})(G^{(k)} + j\omega C^{(k)})} \dots (16)$$

$$z^{(k)} = \text{real constant}$$

Bergeron 法による解析法では、通常 $z^{(k)}$ を

$$z^{(k)} = \lim_{\omega \rightarrow \infty} z_0^{(k)} \dots (17)$$

とにおいて、線路の周波数依存効果を考慮した“たまたみ積分”が用いられる⁽⁷⁾。筆者らのダランベールリレーでは簡略化のため、すべてのモードに共通の $z^{(k)}$ を用いる必要がある、

$$z^{(k)} = \sqrt{\frac{L^{(1)}(\omega_0)}{C^{(1)}(\omega_0)}} \dots (18)$$

を用いるのが適当である。ここに ω_0 は系統角周波数である。(18)式の $z^{(k)}$ を用いると各モードの $A_1^{(k)}(j\omega)$, $A_2^{(k)}(j\omega)$ は多少変化するが、(12)式の関係は依然として成立している。 $f(t)$ を前進波、 $b(t)$ を後進波とみなすと $A_1^{(k)}(j\omega)$ は、(自端の後進波)/(自端の前進波)であるから、送電線の backward 応答と呼び、 $A_2^{(k)}(j\omega)$ は(自端の後進波)/(相手端の前進波)であるから forward 応答と呼ぶことにする。

〈4・2〉 実用式の誤差要因の伝達特性 ダランベールリレーの原理である Bergeron の式は

$$-i_R(t) + \frac{1}{z} e_R(t) = i_S(t - \tau) + \frac{1}{z} e_S(t - \tau) \dots (19)$$

であるが、同式をフーリエ変換すると、

$$B_R(j\omega) = e^{-j\omega\tau} F_S(j\omega) \dots (20)$$

が得られる。従って、簡略形ダランベールリレーは送電線の伝達特性を

$$A_1(j\omega) \simeq 0 \dots (21)$$

$$A_2(j\omega) \simeq e^{-j\omega\tau} \dots (22)$$

と近似していることにはかならない。前章で数値的に検討した誤差は、こうした近似に基づくものである。

(1) 外部故障の場合 いま、 $\Delta_1(j\omega)$, $\Delta_2(j\omega)$, $\Delta_3(j\omega)$, $\Delta_4(j\omega)$ を次式で定義する。

$$\Delta_1(j\omega) \triangleq A_2^{(0)}(j\omega) - e^{-j\omega\tau} \dots (23)$$

$$\Delta_2(j\omega) \triangleq A_2^{(0)}(j\omega) - A_2^{(1)}(j\omega) \dots (24)$$

$$\Delta_3(j\omega) \triangleq A_1^{(1)}(j\omega) \dots (25)$$

$$\Delta_4(j\omega) \triangleq A_1^{(0)}(j\omega) - A_1^{(1)}(j\omega) \dots (26)$$

(12)式を相領域に変換すると、各相成分に関して

$$B_R(j\omega) = e^{-j\omega\tau} F_S(j\omega) + \Delta_1(j\omega) F_S(j\omega) + \Delta_2(j\omega) F_S^{(0)}(j\omega) + \Delta_3(j\omega) F_R(j\omega) + \Delta_4(j\omega) F_R^{(0)}(j\omega) \dots (27)$$

が成立する。但し $(\cdot)^{(0)}$ は零相成分を表わす。これを(20)式と比較すると、ダランベールリレーの誤差 $\varepsilon(j\omega)$ は、

$$\varepsilon(j\omega) = \Delta_1(j\omega) F_S(j\omega) + \Delta_2(j\omega) F_S^{(0)}(j\omega) + \Delta_3(j\omega) F_R(j\omega) + \Delta_4(j\omega) F_R^{(0)}(j\omega) \dots (28)$$

で与えられる。従って、 $\Delta_1(j\omega) \sim \Delta_4(j\omega)$ は誤差成分に関する伝達特性を規定している。 $\Delta_1(j\omega) \sim \Delta_4(j\omega)$ の物理的意味は(23)~(26)式から明らかである。このうち $\Delta_2(j\omega)$, $\Delta_4(j\omega)$ は零相成分が発生しない故障に対しては全く関与しない点に注意する必要がある。

(2) 内部故障の場合 第11図に示すような F 点での内部故障時には、各モード回路で

$$B_R^{(k)}(j\omega) = A_2^{(k)}(j\omega) F_S^{(k)}(j\omega) + A_1^{(k)}(j\omega) F_R^{(k)}(j\omega) - A^{(k)}(j\omega) I_F^{(k)}(j\omega) \dots (29)$$

が厳密に成立する。

$$A^{(k)}(j\omega) = A_{22}^{(k)}(j\omega) \times \{1 - A_{11}^{(k)}(j\omega) A_{12}^{(k)}(j\omega)\}^{-1} \times \{1 + A_{11}^{(k)}(j\omega)\} \dots (30)$$

$I_F^{(k)}(j\omega) = F$ 点から流出する故障電流

$A_{11}^{(k)}(j\omega)$, $A_{21}^{(k)}(j\omega)$ は区間 SF の伝達特性、 $A_{12}^{(k)}(j\omega)$, $A_{22}^{(k)}(j\omega)$ は区間 FR の伝達特性である。新たに $\Delta_5(j\omega)$ を

$$\Delta_5(j\omega) \triangleq A^{(0)}(j\omega) - A^{(1)}(j\omega) \dots (31)$$

で定義する。(27)式に相当する各相での関係式は、

$$B_R(j\omega) = e^{-j\omega\tau} F_S(j\omega) + \Delta_1(j\omega) F_S(j\omega) + \Delta_2(j\omega) F_S^{(0)}(j\omega) + \Delta_3(j\omega) F_R(j\omega) + \Delta_4(j\omega) F_R^{(0)}(j\omega) - \Delta_5(j\omega) I_F^{(0)}(j\omega)$$

第11図 三相送電線

Fig. 11. Three phase transmission line.

$$-A^{(1)}(j\omega)I_F(j\omega) \dots\dots\dots (32)$$

となり、内部故障時には(27)式のほかに $-A_s(j\omega) \times I_F^{(0)}(j\omega)$ が誤差成分に加わる。(32)式で $-A^{(1)}(j\omega) \times I_F(j\omega)$ は誤差ではないことを注意しておく。 $A(j\omega)$ の物理的意味は(30)式を級数展開すると明らかになる。

$$\begin{aligned} A &= A_{22}(1 - A_{11} A_{12})^{-1}(1 + A_{11}) \\ &= A_{22}\{1 + A_{11} + A_{11} A_{12} + A_{11} A_{12} A_{11} \\ &\quad + (A_{11} A_{12})^2 + \dots\} \dots\dots\dots (33) \end{aligned}$$

第1項は $F \rightarrow R$ への forward 応答、第2項は $F \rightarrow S \rightarrow F$ の backward 応答の $F \rightarrow R$ への forward 応答、第3項は $F \rightarrow R \rightarrow F \rightarrow S \rightarrow F$ なる一連の backward 応答の $F \rightarrow R$ への forward 応答、… というふうに、 F 点から R 点へのあらゆる伝達特性を規定するものである。

以上でダランペールリレーにおける誤差要因の伝達特性が解析的に記述された。以下では上記誤差要因の伝達特性をベースに、前章で検討した内容の裏付けを行なうことにする。

$\Delta_1(j\omega) \sim \Delta_5(j\omega)$ のうち、整定値 τ の選択が影響を与えるのは、その定義から明らかなように $\Delta_1(j\omega)$ のみである。モデル系統の区間 EF について、 $\Delta\tau=0, 15, 30\%$ の不確実性がある場合の $\Delta_1(j\omega)$ を第12図にプロットする。 $\Delta\tau$ が大きくなるにつれて $\Delta_1(j\omega)$ のベクトル線図は急激に大きくなっており、 $\Delta_1(j\omega)$ の従って $\varepsilon(j\omega)$ の $\Delta\tau$ に対する感度が極めて大きいことが結論づけられる。また $\xi(t)$ の計算時に誤動作抑制力を抑える目的でローパスフィルタの使用を提案したが、それを用いると第12図のようなベクトル線図が、

図中の数字は周波数 (kHz) を示す。

第12図 $\Delta_1(j\omega)$ のベクトル線図

Fig. 12. Vector diagram of $\Delta_1(j\omega)$.

原点近くのみ存在するベクトル線図に変換され、その結果、誤差に寄与する伝達特性が改善されるからである。次に、整定値 z の選択はすべてに影響を与えているが最も大きな影響を与える $\Delta_s(j\omega)$ についてのみ、 $\Delta z=0, 15, 30\%$ の不確実性がある場合を第13図にプロットする。第12図と比べてベクトル線図に変化はみられるものの、その程度は小さく、時間領域の値に変換してもほとんど値は変わらない。従って、 $\varepsilon(j\omega)$ の Δz に対する感度は小さいことがわかる。また送電線の損失分に関して、 $R=0$ と $R \neq 0$ の場合でベクトル線図が最も大きく異なるのは $\Delta_2(j\omega)$ であるが、第14図にその両者をプロットしてもその差は極めて小さく、ほとんど無視し得る程度である。従って、損失分の影響は実用化に際しては無視してよいといえる。最後に周波数依存効果がある場合の影響を検討する。第15図(a)に $\Delta_2(j\omega)$ 、(b)図に $\Delta_5(j\omega)$ つ

第13図 $\Delta_s(j\omega)$ のベクトル線図

Fig. 13. Vector diagram of $\Delta_s(j\omega)$.

第14図 $\Delta_2(j\omega)$ のベクトル線図

Fig. 14. Vector diagram of $\Delta_2(j\omega)$.

(a) $D_s(j\omega)$ のベクトル線図 (b) $D_s(j\omega)$ のベクトル線図

f.i.p.: 周波数依存効果なし

f.d.p.: 周波数依存効果あり

第 15 図 周波数依存効果の影響

Fig. 15. Effect of frequency dependency.

いて周波数依存効果がある場合とない場合のベクトル線図を与える。いずれも依存効果のあるほうが小さいベクトル線図となっている。特に周波数の高い部分で顕著である。従ってダランベールリレーにとっては、周波数依存効果のあるほうが誤動作出力を小さくするという点で望ましい結果を与えると結論できる。かくして、前章で数値計算ベースで導かれた結論がすべて解析的にも証明された。

5. む す び

本稿は前稿に引続いて、ダランベールリレーの実用化に際して検討を要する項目について、ディジタルシミュレーションベースでの数値的検討ならびにそれを理論的に裏付ける解析的検討を行ない、実用化方式を提案した。本稿で明らかになったことは次の諸点であ

る。

(1) ダランベールリレーの整定値 τ, z に正相値を用い、各相独立に判定関数を演算する簡略形のリレー方式が実用的である。

(2) τ の整定誤差はリレー性能に最も敏感に影響する。現実にはこの誤差はやむを得ないから、それに対する手段としてローパスフィルタを用いるのが適当である。その場合、シャ断周波数はリレー感度とリレー動作速度の両責務から決定されよう。

(3) z の整定誤差はリレー性能にほとんど影響を与えない。

(4) 送電線損失の影響は無視できる程度に小さい。

(5) 送電線の周波数依存効果は、判定関数においてダランベールリレーの誤動作出力を小さくする方向に働くため、同リレーにとってはむしろ望ましい効果である。

筆者らは、送電線の現象論を中心とする本稿までの検討により、理論的にはダランベールリレー実用化の見通しを得ることができたと考える。実リレーに関しては現在、実用化方式に基づく試作器の工場試験を行っており、その結果については改めて報告したい。

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)顧問 高木利夫氏ならびに三菱電機(株)中央研究所長 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 10 月 11 日受付, 同 53 年 1 月 30 日再受付)

文 献

- (1) 磯本, 他: 「波動理論による送電線保護 (その 1) 理論」 電学論 B, **98**, 79 (昭 53-1)
- (2) J. Kohlas: "Estimation of fault locations on power lines". Proc. of the 3rd IFAC symposium, the Hague/Delft, June, 393 (1973)
- (3) M. Vitins: "A correlation method for transmission line protection". IEEE PES Summer Meeting, F77 739-9, July (1977)
- (4) H. W. Dommel: "Digital computer solution of electromagnetic transients in single-and multiphase networks". IEEE Trans. Power Apparatus Syst. **PAS-88**, 4, 388 (1969)
- (5) L. M. Wedepohl & S. E. T. Mohamed: "Multiconductor transmission lines-theory of natural modes and Fourier integral applied to transient analysis." Proc. Instn. Elect Engrs. **116**, 9, 1553 (1969)
- (6) J. K. Snellson: "Propagation of travelling waves on transmission lines-frequency dependent parameters". IEEE Trans. Power Apparatus Syst. **PAS-91**, 1/2, 85 (1972)
- (7) W. S. Meyer & H. W. Dommel: Numerical modelling of frequency-dependent transmission-line parameters in an electromagnetic transients program". *ibid.* **PAS-92**, 9/10, (1974)