電力ケーブル系統の常時起誘導電流

東京電力株式会社
東京芝浦電気株式会社

野瀬 正 純
山 口 達 郎

1. は し が き

近年大都市における電力需要の伸長に対処し、超高圧地中送電線の直接都心部への導入が広く行なわれるようになってきた。

一方、都市における電話線設備はその大部分が地中ケーブルであり、地中送電線の都心部導入に際しては電力ケーブルが、これら電話ケーブルと同一道路面下あるいは同一洞道内などにおいて並行接近して施設される機会が増してきている。

電力ケーブル系の事故電流による電話線への誘導問題に関しては筆者もすでに述べた⁽¹⁾⁽²⁾が、事故電流ばかりでなく、常時の負荷電流によっても、電力ケーブルが単心 OF ケーブルの場合には近接する電話線に誘導雑音を与える可能性がある。

すなわち、単心 OF ケーブルの場合は各相導体と各ケーブルシースとの間の相互インピーダンスは必ずしも等しくないで、ケーブルシースにクロスボンド接続を施していても、営業運転時シースに電流が流れその電流中の大地を帰路とする成分が付近の電話線に誘導雑音などの障害を与える原因となる。⁽³⁾

電気事業連合会と日本電信電話公社においては、この種の問題を解決すべく両者間で検討を行なう一方、電気学会、電子通信学会宛に、その調査研究を依頼した。これに基づき、昭和 44 年 5 月より誘導調査特別委員会は地中線誘導雑音小委員会を設けて調査活動を行ない、同 47 年 1 月にその結果を得、調査報告⁽⁴⁾を行なった。

Inducing Current on Power Cable Line under Normal Operation. By M. NOSE, Member (Tokyo Electric Power Co.) & T. YAMAGUCHI, Member (Toshiba Heavy Apparatus Engineering Laboratory)

野瀬正純: 正員, 東京電力株式会社新東京火力発電所, コーディネーター

山口達郎: 正員, 東京芝浦電気株式会社, 電機技術研究所

筆者らはその調査活動に従事し、特にケーブル系統の起誘導電流と電話線の誘導電圧との関係を求める予測計算式を確立した。

すなわち、実系統を対象としてケーブル配置を与えることにより、各シース導体の電流を計算する理論式ならびにその理論式に基づくプログラムを開発し、これに基づく計算結果と実系統における実測結果とを比較して両者が一致することを確認した。

また、常時起誘導電流を小とする対策についても検討したので、以下にその概要を報告する。

2. 簡単な系統における現象の検討

〈2・1〉単純な電力ケーブル系のシース電流 第 1 図に示すように、1 クロスボンド区間よりなる 1 回線地中ケーブル系 (3 条直線配置) を考えれば、各シース電流 i_1, i_2, i_3 と各相電流 i_a, i_b, i_c との間には各シースが両端で接続され、かつ大地に抵抗 0Ω で接地されていることより (1) 式の関係が成立する。

$$\frac{l}{3} \begin{bmatrix} 3z_s & z_1 & z_1 \\ z_1 & 3z_s & z_1 \\ z_1 & z_1 & 3z_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} = \frac{l}{3} \begin{bmatrix} z_2 & z_3 & z_2 \\ z_2 & z_3 & z_2 \\ z_2 & z_3 & z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $z_1 = 2z_{m1} + z_{m2}$, $z_2 = z_s - r + z_{m1} + z_{m2}$, $z_3 = z_s - r + 2z_{m1}$, z_{m1}, z_{m2} : 各シース間の相互インピーダンス, z_s : シースの大地帰路自

第 1 図 簡単な地中ケーブル回路

Fig. 1. Simplified circuit diagram of power cable.

己インピーダンス, r : シースの直流抵抗でそれぞれの値は単位長さあたりの Ω , なお, 大地帰路インピーダンスならびに2線間の相互インピーダンスの計算式は付録に示す。

(1)式中の各式の和をとり, $i_1+i_2+i_3=I_e$, $i_b=a^2 i_a$, $i_c=ai_a$ において整理すれば,

$$I_e = \frac{-3a^2(z_{m1}-z_{m2})}{3z_s+4z_{m1}+2z_{m2}} i_a \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに, $a = -0.5 + j\sqrt{3}/2$

(2)式で計算される I_e は, 相導体に正相電流だけが流れたときに各シースを流れる電流の和を意味しており, この電流はシースと大地間を環流し常時誘導を発生させる。(2)式中 $z_{m2}=z_{m1}$ とおけば, $I_e=0$ となりシースと大地間を環流する電流(以下, シース大地帰路電流と呼ぶ)は非常に小となる。このような条件はケーブルを俵積み配置とすることにより満足される。すなわち, シース大地帰路電流はケーブル配置の相違により大幅に変化する性質を有している。

〈2.2〉 電力ケーブルと平行した電話線への誘導電圧 第1図に示す電力ケーブルと全区間になわって平行している電話線への誘導電圧は(3)式のようになる。

$$V = l(z_{ma} + a^2 z_{mb} + a z_{mc}) i_a + l(z_{ma} + z_{mb} + z_{mc}) I_e / 3 \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに, z_{ma}, z_{mb}, z_{mc} : 各電力ケーブルと電話線間の相互インピーダンス (同一電力ケーブルの心線と電話線間及びシースと電話線間

第2図 被誘導線の離隔と誘導電圧との関係

Fig. 2. Relation between induced voltage and distance of induced line.

の相互インピーダンスは等しい)

すなわち, 常時の誘導縦電圧は第1項に示される各電力ケーブルと電話線間の離隔による相互インピーダンスのアンバランスによる成分と, 第2項のシース大地帰路電流による成分との和で示される。一例(俵積み配置でケーブル間の距離 0.081m, 大地導電率 0.01 Ω/m)について両成分の大きさを比較すれば第2図のようであり, 相互インピーダンスの相違に原因する正相電流による誘導電圧は離隔とともに急速に低下するが, シース大地帰路電流による誘導電圧はその低下の割合が小さい。なお, 電力系統では常時運転時にもわらずかであるが, 相電流中に零相電流が含まれており, それによる成分も当然考えなければならないが, 零相電流に対してはシースがしゃへい導体として作用するので, 多くの場合, 他の成分に比べ無視し得るものと考えられる。

(3)式は単一周波に対する式であるが, 誘導雑音電圧を対象とする場合には各調波成分に対して(3)式を適用し起誘導電流を求めることが必要となる。

3. 実系統に適用できる計算式の誘導

作成したプログラムは, 回線数を指定して何回線の系統でも計算できるように考えたが, ここでは簡単のため1回線の場合について述べることにする。なお, 当然のことながら電力ケーブルのこう長と関係して高次の調波成分に対しては相導体の分布容量を考慮しなければならないが, ここでは省略してある。

〈3.1〉 クロスボンド区間のインピーダンス行列式

第 n クロスボンド区間の相電流ならびにシース電流を $i_{1n}, i_{2n}, \dots, i_{6n}$ 両端末の電圧を $v_{1n}, v_{2n}, \dots, v_{6n}$ とすれば, それらの間には次の関係が成り立つ。(第3図参照)

$$V_n - V_{n+1} = Z I_n \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに,

第3図 クロスボンド区間

Fig. 3. Circuit diagram of one cross bond section.

$$Z = \begin{bmatrix} Z_1 & Z_2 \\ Z_3 & Z_4 \end{bmatrix} \quad Z_1 = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & z_{13} \\ z_{12} & z_{22} & z_{23} \\ z_{13} & z_{23} & z_{33} \end{bmatrix}$$

$$V_n = \begin{bmatrix} v_{1n} \\ \vdots \\ v_{6n} \end{bmatrix} \quad V_{n+1} = \begin{bmatrix} v_{1(n+1)} \\ \vdots \\ v_{6(n+1)} \end{bmatrix} \quad I_n = \begin{bmatrix} i_{1n} \\ \vdots \\ i_{6n} \end{bmatrix}$$

$$Z_2 = \begin{bmatrix} z_{14} & z_{15} & z_{16} \\ z_{24} & z_{25} & z_{26} \\ z_{34} & z_{35} & z_{36} \end{bmatrix} l_1 + \begin{bmatrix} z_{15} & z_{16} & z_{14} \\ z_{25} & z_{26} & z_{24} \\ z_{35} & z_{36} & z_{34} \end{bmatrix} l_2$$

$$+ \begin{bmatrix} z_{16} & z_{14} & z_{15} \\ z_{26} & z_{24} & z_{25} \\ z_{36} & z_{34} & z_{35} \end{bmatrix} l_3$$

$$Z_4 = \begin{bmatrix} z_{44} & z_{45} & z_{46} \\ z_{45} & z_{55} & z_{56} \\ z_{46} & z_{56} & z_{66} \end{bmatrix} l_1 + \begin{bmatrix} z_{55} & z_{56} & z_{45} \\ z_{56} & z_{66} & z_{46} \\ z_{45} & z_{46} & z_{44} \end{bmatrix} l_2$$

$$+ \begin{bmatrix} z_{66} & z_{46} & z_{56} \\ z_{46} & z_{44} & z_{45} \\ z_{56} & z_{45} & z_{55} \end{bmatrix} l_3$$

Z_3 : Z_2 の転置行列

両端末で、シースが相互にボンドされていることを考慮すれば、

$$\begin{bmatrix} i_{4n} \\ i_{5n} \\ i_{6n} \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} i_{1n} \\ i_{2n} \\ i_{3n} \end{bmatrix} + N [v_{dn} - v_{d(n+1)}] \quad \dots (5)$$

ここに、 $M = -Z_3/Z_4$, $v_{4n} = v_{5n} = v_{6n} = v_{dn}$,

$v_{4(n+1)} = v_{5(n+1)} = v_{6(n+1)} = v_{d(n+1)}$, $N: Z_4^{-1}$

の各行の和より得られる 3 行 1 列の行列

(5) 式中の各式の和をとって整理すれば、

$$v_{dn} - v_{d(n+1)} = \sum_{k=1}^3 z_{kdn} i_{kn} + z_{ddn} i_{dn} \quad \dots (6)$$

ここに、 $i_{dn} = i_{4n} + i_{5n} + i_{6n}$, $z_{ddn} = 1/(n_1 + n_2 + n_3)$, $z_{kdn} = -z_{ddn}(m_{1k} + m_{2k} + m_{3k})$, m_{1k} : 行列 M の 1 行 列 k の値, n_k : 行列 N の k 行の値

(6) 式は各シース (導体 4, 5 及び 6) を 1 括した等価シースに関する式であり、この式を用いればシースが何条あっても大地帰路自己インピーダンス z_{dd} をもち、相導体 k との間の相互インピーダンスが z_{kd} なる等価なシースで置き換え得る。

次に、(6) 式を (5) 式に代入して、 V_{dn} , $V_{d(n+1)}$ を消去すれば

$$\begin{bmatrix} i_{4n} \\ i_{5n} \\ i_{6n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M + N(z_{1dn} z_{2dn} z_{3dn}) \\ N z_{ddn} i_{dn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{1n} \\ i_{2n} \\ i_{3n} \end{bmatrix} \quad \dots (7)$$

すなわち、等価シースと各相導体の電流が既知ならば (7) 式により各シース電流を求め得る。

さらに、(4)、(5) 式及び (6) 式の関係より i_{4n} , i_{5n} 及び i_{6n} を消去して i_{dn} で表わせば (付録参照)

$$\begin{bmatrix} v_{1n} \\ v_{2n} \\ v_{3n} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{1(n+1)} \\ v_{2(n+1)} \\ v_{3(n+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{1n}' & z_{1dn} \\ \vdots & z_{2dn} \\ \vdots & z_{3dn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{1n} \\ i_{2n} \\ i_{3n} \\ i_{dn} \end{bmatrix} \quad \dots (8)$$

ここに、 $Z_{1n}' = Z_1 + Z_2(M + N(z_{1dn} z_{2dn} z_{3dn}))$ 得られた (8) 式は等価シースを用いるときの相導体に関する式である。

〈3・2〉 電源及び負荷のインピーダンス行列式

電源側の接続を第 4 図のように仮定すれば、線路側の電流、電圧の間の関係式として次式が得られる。

$$V_1 = -Z_s I - Z_{ms} i_{d1} + E \quad \dots (9)$$

ここに、

$$V_1 = \begin{bmatrix} v_{1s} \\ v_{2s} \\ v_{3s} \end{bmatrix} \quad I = \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} \quad E = \begin{bmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{bmatrix} e$$

$$Z_s = \begin{bmatrix} z_{ss} & z_{sm} & z_{sm} \\ z_{sm} & z_{ss} & z_{sm} \\ z_{sm} & z_{sm} & z_{ss} \end{bmatrix} \quad Z_{ms} = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_1 \\ R_1 \end{bmatrix}$$

$z_{ss} = z_t + 2z_0 + R_1$, $z_{sm} = R_1 - z_0$, z_0 : 電源インピーダンス, z_t : 変圧器の漏れインピーダンス, R_1 : 電気所の所内接地抵抗

次に、第 5 図のように負荷側を仮定すれば (10) 式が得られる。

$$V_{(n+1)} = Z_r I + Z_{mr} i_{dn} \quad \dots (10)$$

ここに、

第 4 図 電源回路

Fig. 4. Equivalent circuit of generator side.

第 5 図 負荷側の回路図

Fig. 5. Equivalent circuits of load side.

$$V_{(n+1)} = \begin{bmatrix} v_{1r} \\ v_{2r} \\ v_{3r} \end{bmatrix} \quad Z_r = \begin{bmatrix} z_{rr} & z_{rm} & z_{rm} \\ z_{rm} & z_{rr} & z_{rm} \\ z_{rm} & z_{rm} & z_{rr} \end{bmatrix}$$

$$Z_{mr} = \begin{bmatrix} R_{(n+1)} \\ R_{(n+1)} \\ R_{(n+1)} \end{bmatrix} \quad z_{rr} = z_{l1} + z_{l2} + z_e + z_{rm}$$

$$Z_{rm} = R_{(n+1)} - R_r - (z_e + z_{l2} + 3R_r)^2 / \{3(z_e + z_{l2} + 3R_r + z_{l3})\}$$

z_{l1}, z_{l2}, z_{l3} : 変圧器の1次, 2次及び3次巻線の漏れインピーダンス, z_e : 負荷インピーダンス, R_r : 2次系の中性点インピーダンス, $R_{(n+1)}$: 電気所の所内接地抵抗

〈3・3〉 電流分布の計算 (6)式の等価シースに関する式を用い, 各クロスボンド区間にキルヒホッフの法則を適用すれば, 次の連立方程式を得ることができる。〔第6図参照, 図中の Z_s, Z_r は(9), (10)式中の行列, なお, (6)式中の各相導体電流は各区間等しいと仮定して, i_{kn} を i_k のように n を付けずに考える〕

$$\begin{bmatrix} z_{d1} + R_1 + R_2 & -R_2 & * \\ -R_2 & z_{d2} + R_2 + R_3 & * \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -R_n & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{d1} \\ i_{d2} \\ \vdots \\ i_{dn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sum_{k=1}^3 (z_{kd1} + R_1) i_k \\ -\sum_{k=1}^3 z_{kd2} i_k \\ \vdots \\ -\sum_{k=1}^3 (z_{kdn} + R_n) i_k \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (11)$$

(11)式は消去法により解くことが可能であり, 相導体電流 i_1, i_2 及び i_3 を既知として等価シース電流 $i_{d1}, \dots\dots, i_{dn}$ を求め得る。

次に相導体指電流 i_k を求めるための式を誘導する。(8)式の相導体に関する式を各区間に対して書き

第6図 ケーブル系の等価回路

Fig. 6. Equivalent circuit of power cable for calculation.

直せば,

$$V_n - V_{(n+1)} = Z_{1n}' I + Z_{mn}' i_{dn} \quad \dots\dots\dots (12)$$

ここに, $n=1, 2, \dots\dots, n$, V_n 及び $V_{(n+1)}$ は V_{kn} 及び $V_{k(n+1)}$ より成る3行1列の行列, I は i_k より成る3行1列の行列, Z_{mn}' は z_{kdn} より成る3行1列の行列

(12)式中の各式の和をとれば,

$$V_1 - V_{(n+1)} = (Z_{11}' + Z_{12}' + \dots\dots + Z_{1n}') I + \sum_{n=1}^n (Z_{mn}') i_{dn} \quad \dots\dots\dots (13)$$

(13)式に先きに求めた(9), (11)式を代入すれば,

$$E = (Z_s + Z_r + \sum_{n=1}^n Z_{1n}') I + \{ (Z_{ms} + Z_{m1}') i_{d1} + Z_{m2}' i_{d2} + \dots\dots + (Z_{mr} + Z_{mn}') i_{dn} \} \quad \dots\dots\dots (14)$$

すなわち, 得られた(14)式とさきに求めた(11)式とより消去法で E を既知として, i_k ならびに各区間の i_{dn} が求め得る。

4. 実系統における実測結果と計算値の比較

〈4・1〉 線路の概要と試験方法 供試回線は単心OFケーブル(1×800φ)4回線の154kV系(こう長約4.6km)で第7図にケーブル配置を示す。図中()内の数値は電力ケーブルの回線番号をまた信1なる記号は誘導電圧を測定した漏油警報線を意味している。なお, ケーブル間の離隔を示す数値の単位はmmである。第7図に示す配置がどの部分に存在するかを第8図に示したが, 大部分の区間はB配置であり, 他の配置は両端に存在しているに過ぎない。なお, 第8図に

第7図 実測線路のケーブル配置

Fig. 7. Cable arrangement of testing transmission.

第 8 図 実測線路の中間接続配置

Fig. 8. Schematic diagram of cable connection of testing transmission line.

は各マンホール間の間隔 (単位は m)、シースの接地抵抗値及びクロスボンドの状況 (○なる記号は絶縁接続マンホールを、また○なる記号は普通接続マンホールを意味する) なども示してある。

試験に当っては、各回線にそれぞれ同じ負荷電流 (回線当たり約 180 Amp) を流した場合と、3, 4 番線を停止し 1, 2 番線のみに負荷電流 (回線あたり約 540 A) を流した場合について、両端の開閉所、変電所、中間の絶縁接続のマンホール (M 6) と普通接続のマンホール (M 5) で各シース電流ならびにシース大地帰路電流を測定した。なお、誘導電圧は第 7 図の信 1 で示す漏油警報線 (アルベスケーブル) のほか、同一道路内の配電柱に添架した被誘導線 (マンホール中心からの水平離隔約 2m、垂直離隔約 7m) でも測定した。

〈4.2〉 実測結果の検討 次の三つの条件で計算を行ない実測値と比較した。すなわち、

ケース 1: 各区間のケーブル配列を B 配置で一樣とし、漏油警報線を収容している鋼管を考えた場合

ケース 2: B 以外の配列が属している区間全部をその配列と仮定した以外はケース 1 と同じ

ケース 3: ケース 2 で漏油警報線の存在を無視した場合。

なお、計算には大地導電率 0.03 u/m 、鋼管の大地帰路インピーダンスとして $(0.532 + j0.851) \Omega/\text{km}$ (その内容は外部インピーダンス $0.049 + j0.593$ 、電流 1 Amp に対する内部インピーダンス 実測値 $0.258 + j0.258$ 、接続部 1 箇所室内実測値から推定した鋼管のつき目抵抗 0.225) なる値を用いた。

(a) シース電流とシース大地帰路電流 第 1 表に 2 回線送電時のシース電流計算結果を実測結果とともに示す。表中の値は相電流 100 Amp あたりに換算した値であり、実測値が二つ書いてあるのは開閉所と M4 で測定した値である。

これらの計算値を実測値と比較するに、実測値はほとんどの値がケーブル配置の相違するケース 1 と 2 の間に入っていることが認められる。なお、変電所における 2 回線 1 括の値だけは両者の一致の程度が悪いが

第 1 表 シース電流の実測値と計算値の比較
Table 1. Comparison between measured and calculated value of shieth current.

回線番号	相	開閉所～M4				変電所			
		計算値			実測値	計算値			実測値
		ケース 1	ケース 2	ケース 3		ケース 1	ケース 2	ケース 3	
1	黒	6.7	9.7	8.7	5.5 4.95	10.1	6.9	7.0	8.7
	赤	13.9	11.9	11.9	14.1 13.2	15.1	13.6	13.6	13.1
	白	10.3	8.6	8.5	9.8 9.0	8.7	11.0	10.8	11.0
	1括	15.4	5.2	5.1	8.4 7.6	15.2	6.0	5.6	6.9
2	黒	13.5	10.9	11.3	11.4 11.0	14.6	11.4	11.9	9.8
	赤	8.2	9.6	9.6	9.8 8.2	7.2	11.1	11.2	8.0
	白	7.7	7.9	7.8	6.0 6.0	10.2	10.2	10.1	12.0
	1括	12.4	4.6	5.3	6.6 7.1	12.4	7.9	9.3	6.5
3	黒	3.7	1.4	1.4	2.4 2.8	3.8	3.2	3.1	1.5
	赤	3.1	3.3	3.3	0.7 0.6	2.9	1.1	0.8	1.3
	白	2.7	1.7	1.7	1.9 1.9	2.9	2.5	2.4	0.7
	1括	9.5	3.2	3.2	4.1 4.3	9.6	6.6	6.0	3.2
4	黒	3.2	4.4	4.0	2.5 2.6	3.3	0.4	0.4	0.6
	赤	2.8	1.8	1.7	1.2 1.7	2.8	0.9	1.0	1.2
	白	2.8	2.8	2.8	0.8 0.5	2.9	1.9	1.8	1.2
	1括	8.8	3.7	3.5	4.3 4.4	9.0	2.8	2.6	2.7
1,2 回線 1 括		11.8	5.0	5.2	5.5	11.4	4.4	6.0	0.7
3,4 回線 1 括		15.8	6.2	6.0	7.0	16.1	8.4	7.4	2.7

表中の値は Amp/100 Amp

実際には 1, 2 番線と 3, 4 番線の長さがその区間で約 70m 相違していることを計算では考慮しなかったのもその原因の一つと考えられる。

次に 4 回線、2 回線送電時に対して、両端における所内接地、鋼管電流などを示す第 2 表で実測値と計算値を比較するに、両者はだいたい一致していることがわかる。この場合には所内接地電流よりも一括シース電流と鋼管電流は大きく、かつ一括シース電流と鋼管電流の方向は逆でシースと鋼管の間を環流する成分が大地帰路成分より大きいことを示している。

(b) 誘導電圧 第 3 表に誘導電圧の計算値を示す。表中には相電流による成分とシース及び鋼管電流による成分の計算値も示したが、2 回線送電時の配電添架線に対する誘導電圧を除き、両成分は互いに逆向きになっている。また、ケース 3 の漏油警報線の計算値 (合成値) がケース 1, 2 に対して大きいのは当然のことながらケース 3 では警報線を収容している鋼管の誘導しゃへい効果を考慮してないためである。しかし、配電添架線の計算値は各ケースとも大略等しい値であり、鋼管の影響は配電添架線にはほとんど現われていないことがわかる。

最後に実測値と計算値を比較するに、漏油警報線は計算値のほうが実測値よりやや大き目に出ているもの

第2表 両端における所内接地, 1括シースならびに鋼管電流

Table 2. Calculated values of station earth, sum of sheath and pipe current at both ends.

		開 閉 所				変 電 所			
		実 測 値	計 算 値			実 測 値	計 算 値		
			ケース 1	ケース 2	ケース 3		ケース 1	ケース 2	ケース 3
4 回線 送電	所内接地電流	0.74~0.76	0.22	0.20	} 0.08	—	0.34	0.5	} 0.20
	1括シース電流	3.4~3.5	3.83	1.66		—	3.68	3.82	
	鋼管電流	2.7	4.01	1.86		3.2~3.6	4.01	4.26	
2 回線 送電	所内接地電流	0.86~0.9	1.16	0.69	} 0.78	2.0~2.1	1.83	1.14	} 1.37
	1括シース電流	2.4~3.2	5.55	1.65		2.1~2.5	5.75	4.23	
	鋼管電流	2.3~2.5	4.47	1.19		1.1	4.41	3.4	

(註) 表中の値は Amp/100 Amp

第3表 電磁誘導電圧の計算値と実測値の比較

Table 3. Comparison between measured and calculated value of induced voltage.

		ケ ー ス	計 算 値			実 値 値
			相電流による成分	シース(鋼管)電流成分	合 成 値	
漏油 警報 線	2 送 回電 線	1	$ -1.45+j9.37 =9.48$	$ 1.00+j1.69 =1.97$	$ 3.26+j4.64 =5.67$	2.4~2.8
		2			$ 2.90+j3.96 =4.91$	
		3			$ -0.45+j11.06 =11.07$	
	4 送 回電 線	1	$ -2.69+j15.43 =15.7$	$ 2.64-j4.18 =4.94$	$ 3.54+j4.46 =5.70$	2.5~2.7
		2			$ 3.29-j4.12 =5.28$	
		3			$ -0.05+j11.25 =11.25$	
配電 添架 線	2 送 回電 線	1	$ -0.05+j0.73 =0.74$	$ 0.14+j1.21 =1.21$	$ 0.09+j1.58 =1.58$	0.94~1.1
		2		$ 0.14+j1.10 =1.11$	$ 0.09+j1.47 =1.48$	
		3		$ -0.08+j1.28 =1.28$	$ -0.13+j0.65 =1.66$	
	4 送 回電 線	1	$ -0.10+j0.73 =0.74$	$ 0.31-j0.43 =0.54$	$ 0.21+j0.30 =0.37$	0.43~0.64
		2		$ 0.30-j0.39 =0.49$	$ 0.20+j0.34 =0.39$	
		3		$ 0.09-j0.22 =0.24$	$ -0.01+j0.51 =0.51$	

(註) 表中の値は V/100 Amp

第4表 相配置によるシース電流の変化

Table 4. Variation of calculated sheath current due to phase disposition.

a_1	b_1	c_1	a_2	b_2	c_2	a_3	b_3	c_3	1 番線シース	2 番線シース	3 番線シース	1括シース
1	2	3	4	5	6	7	8	9	$-0.41+j1.37$	$-1.68-j8.38$	$-0.41+j1.37$	6.16
1	2	3	4	5	6	7	9	8	$1.36-j7.21$	$-1.39-j8.04$	$-2.88+j13.06$	3.64
1	2	3	4	6	5	7	9	8	$3.86-j12.02$	$-6.71+j5.31$	$-0.38+j8.25$	3.57
1	2	3	4	6	5	8	9	7	$-4.46-j9.26$	$-6.57+j4.89$	$10.98+j4.55$	0.18

(註) (1) 表中の値は Amp/100 Amp, (2) b_1 とその下の数字 2 などとは一番線 b 相は第 9 図のケーブル 2 であることなどを意味する。

の, 両者は実用的によく一致しているものと考えられる。

5. モデル系統に対する計算例

〈5・1〉 ケーブル配置による影響 回線ごとにクロスボンド接続されたシースの外径及び直流抵抗がそれぞれ 0.0866m 及び 0.0493Ω/km なる単心 OF ケーブルが, 第 9 図のように配置されかつ両端電気所で 0Ω で接地されているものと考えて, 各シース電流を計算し, 第 4 表の値を得た。なお, 計算ではクロスボンド区間内のマンホール間隔は等しく, さらに各回線は, 等しい値の正相電流が流れているものと仮定し

3 回線配置

第 9 図 モデル計算におけるケーブル配置

Fig. 9. Cable arrangement of model circuit.

た。

表中 1 括シース電流に注目すると, 一番下の配置が他の配置の値に比し, 大幅に小さく, 相配列を適当に

選ぶことにより1括シース電流を減少させることがわかる。なお、各回線のシース電流(3条1括)の最小値と1括シース電流の最小値を示す相配置は等しくない。

(5・2) 燃架の影響 各クロスボンド区間の長さが750m(マンホール間隔250m一定、マンホールの接地抵抗は10Ω一定で両端のみ0.1Ω)で、こう長9kmなる一回線単心OFケーブル系統を想定し、4クロスボンド区間、2クロスボンド区間及び1クロスボンド区間ごとに第10図に示すように燃架した場合のケースについて相電流100Ampとして燃架の影響を計算した。

燃架した場合の1括シース電流は場所により位相及び値が大幅に変化するので、1括シース電流のこう長を変数とした積分値すなわちAmp. kmを求め第11図に示す。これより次のことがわかる。(1)いずれの場合にも、0km地点よりのAmp. kmの最大値は4.5km地点に生じており、長い電話線に対しては燃架の効果が大きく現われる。(2)したがって、電力ケーブルと電話線とが一部分で平行する場合には、その部分だけに燃架をすることにより大幅に誘導電圧を軽減し得る。(3)図中には燃架しない場合のAmp. kmも一部示してあるが、4区間ごとに燃架した場合の0～4.5km区間のAmp. kmは燃架しない場合の同区間のAmp. km(74.3)の約28%である。

第10図 ケーブル燃架状況
Fig. 10. Transposition method of cable.

第11図 Amp. km の計算結果
Fig. 11. Calculation values of Amp. km.

6. む す び

以上、検討した結果を要約すれば、以下のようである。

(1) 営業運転時にケーブルシースを流れる電流の大地帰路成分は、各ケーブルシースとケーブルの各相導体間の相互インピーダンスの相違に原因している。

(2) 各ケーブルシースとケーブルの各相導体間の相互インピーダンスの相違を見かけ上小とする方法として、(i)ケーブル系の燃架、(ii)ケーブル系が多回線の場合にはケーブル系の相配列を適当に選定すること、などが考えられる。

(3) 電話線に対する常時の誘導電圧は、ケーブルシースを流れる大地帰路電流による成分と各相導体と被誘導電話線間の相互インピーダンスの相違による成分とがあるが、電力ケーブルと被誘導線との離隔が大なるに従い前者の成分のほうが大となる。

(4) ケーブル系の燃架を施せば、各相導体と被誘導線間の相互インピーダンスの相違による誘導電圧成分も軽減できる。

(5) 実系統における実測結果と今回開発した計算式に基づく理論計算結果とは大略一致しており、常時誘導電圧の実用的な予測が可能であることを示している。

終わりに、本研究に対しご指導とご討論いただいた誘導調査特別委員会、地中線誘導雑音小委員会の関係各位、ならびに東京電力株式会社の実測に参加した関係各位に対し深甚なる謝意を表します。

(昭和48年3月3日受付、同48年8月8日再受付)

文 献

- (1) 山口：電学誌 85, 1445 (昭40-9)
- (2) 山口：電気学会東京支部大会 No. 288 (昭38)
- (3) 山口：電気学会東京支部大会 No. 299 (昭45)
- (4) 誘導調査特別委員会・地中線誘導雑音小委員会：超高压地中送電線により通信線への電磁誘導に関する研究 (昭47-1)

付 録

(I) 大地帰路自己インピーダンス及び相互インピーダンスの計算式 導体半径 x (m) なる導体の大地帰路自己インピーダンス z_{11} は、導体内の磁束による影響を無視し、(導体が磁性体の場合には実測で得られる内部インピーダンスを付加して考える)

$$z_{11} \approx R_{dc} + 2\pi f \left\{ \frac{\pi}{2} + j \left(2 \log_e \frac{2}{kx} - 0.1544 \right) \right\} \times 10^{-4} \text{ (}\Omega/\text{km)} \quad \dots\dots (\text{付1})$$

ここに、 $k = \sqrt{8\pi^2 f \sigma \times 10^{-7}}$, f = 周波数,

R_{dc} = 直流抵抗

次に、導体 1, 2 間の直線離隔を x , 大地導電率を σ とすれば 2 線間の相互インピーダンス z_{12} は次式で求められる。 $(kx < 0.5)$

$$z_{12} \simeq 2\pi f \left\{ \frac{\pi}{2} + j \left(2 \log_e \frac{2}{kx} - 0.1544 \right) \right\} \times 10^{-4} \text{ (}\Omega/\text{km)} \dots\dots\dots \text{(付 2)}$$

なお、同一電力ケーブルのシースと相導体間の相互インピーダンスは、シースの外部にできる磁束のみを考慮してシースの大地帰路自己インピーダンスからシースの直流抵抗を差引いた値に等しいと仮定した。

(II) (8)式の誘導 (5)式を(4)式の上3行に代入し、 N の $1/Z_4$ 形で表わせば

$$\begin{pmatrix} v_{1n} - v_{1(n+1)} \\ v_{2n} - v_{2(n+1)} \\ v_{3n} - v_{3(n+1)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_1 + Z_2 M \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{1n} \\ i_{2n} \\ i_{3n} \end{pmatrix}$$

$$+ \frac{Z_2}{Z_4} \begin{pmatrix} v_{dn} - v_{d(n+1)} \\ v_{dn} - v_{d(n+1)} \\ v_{dn} - v_{d(n+1)} \end{pmatrix} \dots\dots\dots \text{(付 3)}$$

ここで、 $M = -Z_3/Z_4$ で、かつ Z_2 が Z_3 の転置行列であることに注目すれば、 $z_{kdn} = -z_{ddn}(m_{1k} + m_{2k} + m_{3k})$ なる関係〔(6)式参照〕より(付3)式の右辺第2項は

$$\frac{Z_2}{Z_4} \begin{pmatrix} v_{dn} - v_{d(n+1)} \\ v_{dn} - v_{d(n+1)} \\ v_{dn} - v_{d(n+1)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} z_{1dn} \\ z_{2dn} \\ z_{3dn} \end{pmatrix} (v_{dn} - v_{d(n+1)}) / z_{ddn} \dots\dots\dots \text{(付 4)}$$

したがって、上式に(6)式を代入することにより容易に(8)式を導き得る。