UDC 621.315.212.1.025.3.011: 621.3.015.34

論文

48-B 80

シースをクロスボンドした三相単心ケーブル系のサージ伝搬特性の数学的一解析

関西大学 田 中 郁 雄

1. ま え が き

現在、我国の 66 kV 以上の三相単心ケーブル系では、シース回路電流を少なくし定格電流を増すため、第 1 図のように適当な区間長ごとにシースを絶縁、クロスボンドし、3 区間ごとにボンド接地している。このとき文献〔1〕の第 1 図のように、線心の転置(Transposition)を同時に行なうと、ケーブルが平形配列であっても、3 区間について見ると相間、対地とも平衡回路とみなされ、正三角形配置と同様に線心間のクロス電流も減少し、定格容量をより改善する効果を生ずる。⁽¹⁾ 最近ケーブルの大形化に伴い定格容量増加の必要性和ともに転置とクロスボンドの併用は今後重要視されるであろう。上述の理由でケーブルは正三角形配置と仮定して考察する。そうすると当然ケーブルは大地に対しても対称と考えられるから等価アースを第 2 図のように仮定できよう。

本論文では、計算にもつづがよいのでケーブル配置は図のように仮定し、シース大地間のサージアドミッタンスのほかにシース間の相互サージアドミッタンス

第 1 図 クロスボンドされた三相単心ケーブル系 6 区間の結線図

Fig. 1. Connections of six sections of crossbonded 3 ϕ single cable system.

第 2 図 線心転置、シースクロスボンドされた三相単心単ケーブルのシース対線心、等価アースとの間の静電容量

Fig. 2. Capacitances among core, equivalent earth and sheath of 3 ϕ single cables laid with transposed-core and crossbonded sheath.

スを考慮に入れることとした。^{*}さて、シースのクロスボンドに関する従来の論文〔1〕～〔10〕はサージの変移点での反射透過の特性を示す基本式またはその等価回路による解析と実測結果とに関するものである。これらの論文の実測波形のひずみは、変移点の理論だけでは説明しにくい。このため文献〔2〕の第 5 章にサージの速度差など考慮すべきことを示唆している。本論文は、上述の 6 導体系のサージがどのような速度のものに分解され、それぞれがどのようなサージアドミッタンスで伝搬するかを考慮した理論的解析の新しい試みで、例示のように伝搬速度差による波形のひずみの解析に役だつものと思う。また、変移点での透過係数行列を誘導する場合、文献〔4〕の方法と異なり、クロスボンドの条件を折込んだ入射反射透過の基本式

Mathematical Analysis of the Surge Performance of 3Phase Single Cable System with Cross-bonded Sheaths. By I. TANAKA, Member (Faculty of Engineering, Kansai University)
田中郁雄: 正員, 関西大学工学部電気工学科

^{*}: 文献〔1〕〔9〕ではシース間の相互サージインピーダンスを省略している。

(8)(9)を用い、変移点透過サージの計算を簡便化している。また、文献〔4〕の緒言に、ケーブル端ならびに線路中間のシース接地点で理論上完全負反射と仮定しているが実際にはわずかの負反射しか起きないと述べ、その理由としてそのボンド、接地の抵抗の影響を示唆している。この解明のため、本論文第1図に示したように、ケーブル接地点に設けた各シースの接地抵抗 $(1/2 G_0)$ とシース間のボンド抵抗 $(1/2 G_m)$ とが反射透過にどう影響するかを、文献〔2〕〔3〕と異なる新しい方法で、本文第5章に解析している*。

2. 線心シースの電位と電荷の重畳及び 静電誘導係数

第2図のケーブル 1 m の線心シース、シースアース、シース間のキャパシタンスを $C_c C_0^{**} C_m^{**}$ とすると、シース間の作用容量は $C_w = C_0 + 3C_m$ となる。

いま、ケーブルの dx 部に電荷 $(q_0)dx$ を与えたとき、その電位 (E) との関係は次の行列で示される。

$$\begin{bmatrix} (q_0)_A \\ \vdots \\ (q_0)_a \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{AA} & \cdots & K_{Aa} & \cdots \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots \\ K_{aA} & \cdots & K_{aa} & \cdots \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (E)_A \\ \vdots \\ (E)_a \\ \vdots \end{bmatrix}$$

ここに $K_{AA}, K_{BB}, \dots; K_{BA}, K_{aA}, \dots$ は単位長さあたりの静電自己及び相互誘導係数で、その行列を $[K]$, $(E)_A, \dots$ の単列行列を $\{(E)_A, \dots\}$ と書くと、上式は $\{(q_0)_A, \dots, (q_0)_a, \dots\} = [K] \{(E)_A, \dots, (E)_a, \dots\} \dots (1)$

さて、線心 A のみに $(E)_A$ を加えたとき（このためには他の線心シースはすべてアースされねばならない）シース a の電荷は $-(q_0)_A$ であり、シースのしゃへいを考えると、他の線心とシースの電荷は零である。それゆえ $[K]$ の第1列目の係数 $K_{AA} = C_c$, $K_{BA} = K_{CA} = 0$, $K_{aA} = -C_c$, $K_{bA} = K_{cA} = 0$ を得る。 $(E)_B, (E)_C$ を順次印加して第2, 第3列目の係数 $0, C_c, 0, 0, -C_c, 0; 0, 0, C_c, 0, 0, -C_c$ を得る。

次に $(E)_a$ のみをシース a に加えたときの誘導電荷は第2図を参照して第4列目の係数 $-C_c, 0, 0, C_c + C_0 + 2C_m = C_c + C_w - C_m, -C_m, -C_m$ を得る。同様に第5, 第6列目の係数を得るので、 $[K]$ は

*: 文献〔2〕〔3〕では接地抵抗の影響について述べているがボンド線の抵抗の影響については述べていない。

** : クロスボンド系では各相を含む3区間を単位とみなすので $C_0 C_m$ は各相の平均値となる。 C_0 はシース絶縁とそれから等価大地表面までの媒質の寸法と比誘電率で決まり、 C_m は二つのシース間を直接結ぶ（途中大地を経由しない）電気力線に基づく相互キャパシタンスで三相交流印加時の作用容量（Working cap.） $C_w = C_0 + 3C_m$ となる。ゆえに文献〔1〕のケーブルのように表面にしゃへい層を設けたもの、またはケーブル表面が完全アースと考えられる直埋のときは $C_m = 0$ で $C_w = C_0$ となる。トラフ、暗きょ、洞道内布設のときは $C_m \neq 0$ である。

$$\left. \begin{aligned} [K] &= \begin{bmatrix} K_c & & -K_c \\ -K_c & & K_c + K_s \end{bmatrix} \\ [K_c] &= C_c \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = C_c [1] \\ [K_s] &= \frac{C_0 - C_w}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} + C_w [1]^{***} \end{aligned} \right\} \dots (2)$$

のようになる。ゆえに (2) 式を使って (1) 式を線心 ABC とシース abc との小行列に分けると

$$\begin{aligned} [(q_0)_A] &= C_c [(E)_A - (E)_a] \dots (1)_c \\ [(q_0)_a] &= -[(q_0)_A] + C_0 [(e)_0] + C_w [(e)_a] \dots (1)_s \end{aligned}$$

ここに $[A], [a]$ は線心、シースの単列行列を表わす。零相電圧 $(e)_0$ 及びそれ以外の電圧 $(e)_a, \dots$ を

$$\left. \begin{aligned} (e)_0 &= \{(E)_a + (E)_b + (E)_c\} / 3 \\ (e)_a &= (E)_a - (e)_0 \\ (e)_b &= (E)_b - (e)_0 \\ (e)_c &= (E)_c - (e)_0 \end{aligned} \right\} \dots (3)$$

と置き、線心シースの電位差 $(E)_A - (E)_a \equiv (\hat{E})_A$, シースの外部に対する電荷 $(\hat{q}_0)_a \equiv (q_0)_a + (q_0)_A$ とおくと、(1)_c, (1)_s, (1) 式は、(2) 式により、

$$\begin{aligned} [(q_0)_A] &= C_c [(\hat{E})_A] \dots (\hat{1})_c \\ [(\hat{q}_0)_a] &= C_0 [(e)_0] + C_w [(e)_a] \dots (\hat{1})_s \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} (q_0)_A \\ \vdots \\ (\hat{q}_0)_a \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_c & 0 \\ 0 & K_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (\hat{E})_A \\ \vdots \\ (E)_a \end{bmatrix} \dots (\hat{1})$$

$$\therefore (q_0)_0 = C_0 (e)_0, (q_0)_a = C_w (e)_a \dots (4)$$

と置けば、 $(\hat{1})_s$ は次のように表わされる。

$$[(\hat{q}_0)_a] \equiv [(q_0)_a] + [(q_0)_A] = [(q_0)_0] + [(q_0)_a] \dots (\hat{1})'_s$$

ゆえに (1)_s 式はシースの電荷が、線心のシースに対する電位差による内向き電荷と大地に対するシースの零相電圧による外向き電荷と零相分を差引いた電圧（シース間電圧）による外向き電荷との重畳で表わされ、 $(\hat{1})_s$ はシースの外向き電荷の構成を示している。 $(\hat{1})$ は相互係数零の行列で次の二式となる。

$$[(q_0)_A] = [K_c] [(\hat{E})_A], [(\hat{q}_0)_a] = [K_s] [(E)_a] \dots (\hat{1})'$$

前者は特定のキャパシタンス $[K_c] = C_c [1]$ によって、また後者は特定のキャパシタンス行列 $[K_s]$ によって結ばれ、別々の計算でよいことを示している。

***: $[1]$ は単位行列, $\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$ は零相行列ともいうべきものである。

3. 三相単心ケーブル系の電荷と電位の伝搬

第3図のように、単位長さの静電容量 C のケーブルの左端に原点をとり、その右方向に x 軸をとる。いまこのケーブルの左側の分離された長さ $\Delta x/2$ の短いケーブルに電位 $2(E)$ を与えたときの電荷を $2(q_0)\Delta x/2$ とする。この充電された短いケーブルは

$$(q_0) = C(E) \dots\dots\dots (5)$$

が成立つ。これを長いケーブルに接続すると、周知のように電位 (E) 長さ Δx の進行波となり伝搬始める。その伝搬速度は、伝搬媒質の比誘電率 ϵ_0 と比導磁率 μ_0 とで一義的に決まる速度 $v = v_{00}/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$ (v_{00} = 光速) である。伝搬中、無ひずみ無減衰と仮定すると、任意の時刻 $t = x/v$ に、 x 点に到来する長さ Δx の進行波電圧 E は単位ステップ関数を用い

$$E = (E) \{U(vt - x) - U(vt - x - \Delta x)\} \dots (6)$$

と表わされる。この式は Δx 離れた二つのステップ関数の差で示していて、 $t = 0$ で $x = 0$ 点に現われる大きさ (E) の電圧が Δx だけ続く矩形波を示す。

また $U(vt - x)$ で $vt - x = \text{一定}$ を t で微分すると $dx/dt = v$ となる。これは $x = vt$ の場所に到来した E の波頭が x の正の方向に速度 v で伝搬することを示す。

ケーブルの x 点での電荷を $q(x, t)$ と表わすと、 q が x の正方向に移動するとき x 点の Δx 部分での電荷の減少量はその充電電荷量に等しい。また減衰がなければ $-(\partial q / \partial x) = (q_0)$ と表わされる。

$$\therefore -(\partial q / \partial x) = C E = C \cdot (E) \Delta(vt - x) \Delta(vt - x) \equiv U(vt - x) - U(vt - x - \Delta x) \dots\dots (6')$$

となる。この式を t について微分し

$$\frac{\partial^2 q}{\partial t \partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial q}{\partial t} \right) \text{ とし } \frac{\partial q}{\partial t} = i \text{ とおくと}$$

$$-(\partial i / \partial x) = C v (E) \Delta'(vt - x)$$

となる。この式を x について積分すると

Δx : パルス幅 $\Delta(x) \equiv u(x) - u(x - \Delta x)$ $u(x)$: 単位階段関数

第3図 ケーブル導体上の電位、電荷の伝搬モデル
Fig. 3. A propagation-model of potential and charge on the conductor of a cable.

$$i = C v \cdot (E) \Delta(vt - x) = C v E \dots\dots\dots (5')$$

これは電荷も電位と同じ速度で伝搬することを示す。(5)式の電荷が伝搬するとき任意の点のサージ電流と電圧との関係式(5')は、(5)式の (q_0) を i , C を $C v$, (E) を E として得られる。ゆえに線心の電荷によるサージ電流と線心シース間のサージ電圧とは

$$[i_A] = C_c v_c [E_A - E_o] = C_c v_c [\hat{E}_A] \dots (1')_c$$

シース上の電荷 $(q_0)_o$, $(q_0)_a$ とその電位 $(e)_o$, $(e)_a$ との関係式(4)と(1'), とに適用すると

$$i_o = C_o v_o \cdot e_o, \quad i_a = C_w v_w \cdot e_a \dots\dots (4')$$

$$[i_a] = -C_c v_c [\hat{E}_A] + C_o v_o [e_o]^* + C_w v_w [e_a] \dots\dots\dots (1'')_s$$

ここに v_c , v_o , v_w は線心シース間の媒質中のサージ $[\hat{E}_A]$, シース大地間の媒質中の零相サージ $[e_o]$, シース間容量を含めた対地容量(作用容量)を形成する媒質中のサージ $[e_a]$ の速度である。(1')_c (1')_s 中の

$$C_c v_c = y_c, \quad C_o v_o = y_o, \quad C_w v_w = y_w \dots (7)$$

は3種のサージに対する特性アドミタンスである。

(1')_c, (1')_s 式から分るように、シース上のサージは v_c , v_o , v_w の三つの速度のものの重畳である。しかし、シースの外からの観測では、線心シース間のサージが打消され測定されるため、速度 v_o と v_w との二つのシース・サージが観測されることとなる。

線心及びシースの電流の行列は(7)式により

$$[i_A] = y_c [E_A - E_o] = [Y_c] [E_A] + [-Y_c] [E_o] \dots\dots\dots (1'')_c$$

$$\begin{aligned} [i_a] &= -y_c [E_A - E_o] + y_o [e_o] + y_w [e_a] \\ &= [-Y_c] [E_A] + [Y_c + Y_w] [E_o] \\ &\quad + (y_o - y_w)/3 \cdot [E_a + E_b + E_c] \\ &= [-Y_c] [E_A] + [Y_c + Y_s] [E_o] \dots (1'')_s \end{aligned}$$

それゆえ上の両式を組合せて書くと

$$\begin{aligned} \langle i_A \ i_B \ i_C \ i_a \ i_b \ i_c \rangle \\ = [Y_I] \langle E_A \ E_B \ E_C \ E_a \ E_b \ E_c \rangle \dots\dots\dots (1') \end{aligned}$$

ここに

$$\begin{aligned} [Y_I] &= \begin{bmatrix} Y_c & -Y_c \\ -Y_c & Y_c + Y_s \end{bmatrix} \\ [Y_s] &= y_w [1] + \frac{y_o - y_w}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \\ [Y_c] &= y_c [1] \end{aligned} \dots (2')$$

三相単心ケーブルの6導体系の静電誘導係数で結ばれている(1), (2)式と同じ形の(1')(2')式は、3種の速度を有するサージ電流とサージ電圧とが、(7)

* $[e_o] = \langle e_o e_o e_o \rangle$

式から判るように、線心・シース間、シース・アース間のキャパシタンス C_c , C_0 , シースの Working capacitance C_w とそれぞれの伝搬速度 v_c , v_0 , v_w との積で表わされる特性アドミタンスで結ばれている状態を示している。

4. クロスボンド点透過サージの透過係数行列

第4図のようにケーブル系 I, II の線心を直列に接続し、シースを絶縁しクロスボンドするとしよう。

いまケーブルの左端からの入射サージの電圧、電流を $E_A, E_B, E_C, E_a, E_b, E_c; i_A, i_B, i_C, i_a, i_b, i_c$ とすると、クロスボンド点での反射サージの電圧、電流 $E_A', \dots, i_A', \dots$ の順序は入射波のそれと同じであるが、クロスボンドされたシースを透過したサージの電圧、電流は入射波の順序 abc と異なり、 $E_b'', E_c'', E_a''; i_b'', i_c'', i_a''$ となる。 $*$ ゆえに入射、反射、透過サージの電圧、電流間の関係は次のようになる。

$$\begin{aligned} & \langle \langle E_A'' \ E_B'' \ E_C'' \ E_b'' \ E_c'' \ E_a'' \rangle \rangle \\ &= \langle \langle E_A \ E_B \ E_C \ E_a \ E_b \ E_c \rangle \rangle \\ &+ \langle \langle E_A' \ E_B' \ E_C' \ E_a' \ E_b' \ E_c' \rangle \rangle \dots (8) * \\ & \langle \langle i_A'' \ i_B'' \ i_C'' \ i_b'' \ i_c'' \ i_a'' \rangle \rangle \\ &= \langle \langle i_A \ i_B \ i_C \ i_a \ i_b \ i_c \rangle \rangle \\ &- \langle \langle i_A' \ i_B' \ i_C' \ i_a' \ i_b' \ i_c' \rangle \rangle \dots (9) * \end{aligned}$$

また、反射サージに対するアドミタンス行列は、入射サージに対するものと同じであるが、透過サージに対するそれはシース a から b へ……とクロスボンドされているから異なる。すなわち、線心とシースとの間の相互アドミタンス $-y_c$ の位置は、 i_A, E_a 間の相互アドミタンスの位置から i_a, E_c 間の相互アドミタンスの位置へ、……と置き換えねばならないから

$$\langle \langle i_A'' \ i_B'' \ i_C'' \ i_b'' \ i_c'' \ i_a'' \rangle \rangle$$

$$= [Y_{II}] \langle \langle E_A'' \ E_B'' \ E_C'' \ E_b'' \ E_c'' \ E_a'' \rangle \rangle \quad (10)$$

ここに

$$\begin{aligned} [Y_{II}]^* &= \begin{bmatrix} Y_c & Y_{cs} \\ Y_{sc} & Y_c + Y_{cs} \end{bmatrix} \\ [Y_{cs}] &= -y_c \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} = [Y_{cs}]^T ** \end{aligned} \quad \dots (11)$$

反射サージ電流と電圧との関係は、入射サージのそれと同じ $[Y_I]^*$ ((2') 参照) で結ばれ次のようになる。

$$\langle \langle i_A' \ i_B' \ i_C' \ i_a' \ i_b' \ i_c' \rangle \rangle$$

*: 入射反射透過の基本式 (8) (9) ではシースの透過波を…… E_b'' E_c'' E_a'' , …… i_b'' i_c'' i_a'' の順としクロスボンドを折り込んでいるが、文献 [4] の基本式 (1) (2) では…… E_a'' E_b'' E_c'' …… i_a'' i_b'' i_c'' の順として、後でクロスボンドを折り込んでいる。

** : $[]^T$ は $[]$ の転置行列である。

() 内の数字は、入来、反射、透過それぞれの単行列の要素の順序を示す。[(8) (9) 式参照]

第4図 三相単心ケーブル I, II 群間のクロスボンディングの結線と入来、反射、透過波の位置

Fig. 4. Connections of "crossbonding" bet. the 3φ single cable groups I and II, and the places of incident, reflected and transmitted waves.

$$= [Y_I] \langle \langle E_A' \ E_B' \ E_C' \ E_a' \ E_b' \ E_c' \rangle \rangle \dots (12)$$

(8) 式に $[Y_I]$ を作用させると、次式を得る。

$$\begin{aligned} & [Y_I] \langle \langle E_A'' \ E_B'' \ E_C'' \ E_b'' \ E_c'' \ E_a'' \rangle \rangle \\ &= [Y_I] \langle \langle E_A \ E_B \ E_C \ E_a \ E_b \ E_c \rangle \rangle \\ &+ [Y_I] \langle \langle E_A' \ E_B' \ E_C' \ E_a' \ E_b' \ E_c' \rangle \rangle \dots (13) \end{aligned}$$

(9) 式に (1'), (12) 式と (10) 式とを代入して

$$\begin{aligned} & [Y_{II}] \langle \langle E_A'' \ E_B'' \ E_C'' \ E_b'' \ E_c'' \ E_a'' \rangle \rangle \\ &= [Y_I] \langle \langle E_A \ E_B \ E_C \ E_a \ E_b \ E_c \rangle \rangle \\ &- [Y_I] \langle \langle E_A' \ E_B' \ E_C' \ E_a' \ E_b' \ E_c' \rangle \rangle \quad (14) \end{aligned}$$

$$[Y_I] \langle \langle E_A'' \ E_B'' \ E_C'' \ E_b'' \ E_c'' \ E_a'' \rangle \rangle$$

$$= 2[Y_I] \langle \langle E_A \ E_B \ E_C \ E_a \ E_b \ E_c \rangle \rangle \quad (15)$$

(2'), (11) 式を用い線心、シースの小行列に分けて

$$[2Y_c][E_A''] + [-Y_c + Y_{cs}][E_b'']^*$$

$$= 2[Y_c][E_A] - 2[Y_c][E_a] \dots (15)_c$$

$$[-Y_c + Y_{sc}][E_A''] + [2Y_c + 2Y_s][E_b'']$$

$$= 2[Y_c][E_A] - [E_a] + 2[Y_s][E_a] \quad (15)_s$$

上の両式の和は

$$[Y_c + Y_{sc}][E_A''] + [Y_c + Y_{cs}][E_b'']$$

$$+ 2[Y_s][E_b''] = 2[Y_s][E_a]$$

(2') (11) の値を入れ、行列の3式を辺々加えると

$$E_a'' + E_b'' + E_c'' = E_a + E_b + E_c \dots (16)$$

(15)_c に $Y_c Y_{cs}$ の値を入れ y_c で割ると

$$2[E_A''] - [E_a'' + E_b''] = -2[E_A - E_a] \quad (15')_c$$

*: $[Y_I]$ $[Y_{II}]$ はクロスボンド点から見た入射波側及び透過波側のアドミタンス行列で文献 [1] の $Y_L Y_R$ に相当する。

この行列の3式を辺々加えると

$$\hat{E}_A'' + \hat{E}_B'' + \hat{E}_C'' = \hat{E}_A + \hat{E}_B + \hat{E}_C \dots\dots (17)$$

(16), (17)式はシースと線心シース間の入射波の零分がクロスボンド点を無反射で透過することを示す。

(15)_c式に Y_w, Y_c, Y_s の値及び (16) 式の関係を入れ、 $y_w/y_c = y'$ と置くと

$$-[E_A'' + E_B''] + 2(1+y')[E_b''] \\ = 2[E_A] + 2(1+y')[E_a] \dots\dots (15')_s$$

さて、入射サージ $\langle E_A \ E_B \ E_C \ E_s \ E_b \ E_c \rangle$ に対し、透過サージ $\langle E_A'' \ E_B'' \ E_C'' \ E_a'' \ E_b'' \ E_c'' \rangle$ を得る透過係数行列 $[T]$ は次式で示される。

$$\begin{bmatrix} E_A'' \\ E_B'' \\ E_C'' \\ E_a'' \\ E_b'' \\ E_c'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{AA} & T_{AB} & T_{AC} & T_{Aa} & T_{Ab} & T_{Ac} \\ T_{BA} & T_{BB} & T_{BC} & T_{Ba} & T_{Bb} & T_{Bc} \\ T_{CA} & T_{CB} & T_{CC} & T_{Ca} & T_{Cb} & T_{Cc} \\ T_{aA} & T_{aB} & T_{aC} & T_{aa} & T_{ab} & T_{ac} \\ T_{bA} & T_{bB} & T_{bC} & T_{ba} & T_{bb} & T_{bc} \\ T_{cA} & T_{cB} & T_{cC} & T_{ca} & T_{cb} & T_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_A \\ E_B \\ E_C \\ E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} \dots\dots (18)**$$

次にこの透過係数行列 $[T]$ の誘導を試みる。

線心 A に E_A のみを加えるとき、(17), (16) 式は

$$E_A'' + E_B'' + E_C'' = E_A \quad (E_B = E_C = 0) \dots (17')$$

$$E_a'' + E_b'' + E_c'' = 0 \quad (E_a = E_b = E_c = 0) \dots (16')$$

(15')_c 式に (17') (16') 式の関係を入れると

$$2 \begin{bmatrix} E_A'' \\ E_B'' \\ E_C'' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_c'' \\ E_a'' \\ E_b'' \end{bmatrix} = 2 \begin{bmatrix} E_A \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \dots\dots (15')_c$$

また (15')_s に (17') (16') 式の関係を入れ、 $[\]$ 内の最上行を最下行に組かえると

$$\begin{bmatrix} E_A'' \\ E_B'' \\ E_C'' \end{bmatrix} + 2(1+y') \begin{bmatrix} E_c'' \\ E_a'' \\ E_b'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_A \\ E_A \\ -E_A \end{bmatrix} \dots\dots (15'')_s$$

(15'')_c 式の $2(1+y')$ 倍から上式を辺々差引くと

$$(3+4y') \begin{bmatrix} E_A'' \\ E_B'' \\ E_C'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (3+4y')E_A \\ -E_A \\ E_A \end{bmatrix} \dots\dots (19)$$

$$\therefore E_A'' = E_A, \ E_B'' = -m E_A, \ E_C'' = m E_A \dots\dots (19')$$

ここに

$$m = 1/(3+4y'), \ y' = y_w/y_c \dots\dots (20)$$

(15'')_c 式に (19') 式を代入して

*: $[E_b''] = \langle E_b'' \ E_c'' \ E_a'' \rangle$
 **: 基本式 (8) (9) では $\langle \dots E_b'' \ E_c'' \ E_a'' \rangle = \langle \dots E_a \ E_b \ E_c \rangle$
 $+ \langle \dots E_a' \ E_b' \ E_c' \rangle$ としているが、ここでは $\langle \dots E_a'' \ E_b'' \ E_c'' \rangle$
 $= [T] \langle \dots E_a \ E_b \ E_c \rangle$ としている点に留意されたい。

$$E_a'' = 2m E_A, \ E_b'' = -2m E_A, \ E_c'' = 0 \dots (21)$$

したがって、(19') と (21) 式から $[T]$ の第1列目の係数 $K_{AA}=1, \ K_{BA}=-m, \ K_{CA}=m, \ K_{aA}=2m, \ K_{bA}=-2m, \ K_{cA}=0$ を得る。同様にして第2, 第3列目の係数 $m, 1, -m, 0, 2m, -2m; -m, m, 1, -2m, 0, 2m$ を得る。

シース a のみに E_a を加えると (17), (16) 式は

$$E_A'' + E_B'' + E_C'' = 0 \quad (E_A = E_B = E_C = 0) \dots (17'')$$

$$E_a'' + E_b'' + E_c'' = E_a \quad (E_b = E_c = 0) \dots\dots (16'')$$

となり (15')_c に (17'') (16'') 式の関係を入れると

$$2 \begin{bmatrix} E_A'' \\ E_B'' \\ E_C'' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_c'' \\ E_a'' \\ E_b'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -E_a \\ E_a \\ E_a \end{bmatrix} \dots\dots (15''')_c$$

となる。また、(15')_s 式に (17'') (16'') 式の関係を入れ、 $[\]$ 内の最上行を最下行にすると

$$\begin{bmatrix} E_A'' \\ E_B'' \\ E_C'' \end{bmatrix} + 2(1+y') \begin{bmatrix} E_c'' \\ E_a'' \\ E_b'' \end{bmatrix} = 2(1+y') \begin{bmatrix} 0 \\ E_a \\ 0 \end{bmatrix} \dots\dots (15''')_s$$

$2 \times (15''')_s$ 式 - $(15''')_c$ 式を作ると

$$(3+4y') \begin{bmatrix} E_A'' \\ E_B'' \\ E_C'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -E_a \\ (3+4y')E_a \\ E_a \end{bmatrix} \dots\dots (22)$$

$$\therefore E_a'' = -m E_a, \ E_b'' = E_a, \ E_c'' = m E_a \dots (22')$$

(15'') 式と (22') 式とから

$$E_A'' = -E_a(1+m)/2,$$

$$E_B'' = E_a(1+m)/2, \ E_C'' = 0 \dots\dots (23)$$

したがって、(22'), (23) 式から (T) の第4列目の係数は、 $-(1+m)/2, (1+m)/2, 0, -m, 1, m$ となる。同様に第5, 第6列目の係数も得るので、透過係数行列 $[T]$ が決まり* (18) 式は

$$\langle E_A'' \ E_B'' \ E_C'' \ E_a'' \ E_b'' \ E_c'' \rangle =$$

$$\begin{bmatrix} 1 & m & -m & \frac{-(1+m)}{2} & 0 & \frac{(1+m)}{2} \\ -m & 1 & m & \frac{(1+m)}{2} & \frac{-(1+m)}{2} & 0 \\ m & -m & 1 & 0 & \frac{(1+m)}{2} & \frac{-(1+m)}{2} \\ 2m & 0 & -2m & -m & m & 1 \\ -2m & 2m & 0 & 1 & -m & m \\ 0 & -2m & 2m & m & 1 & -m \end{bmatrix}$$

$$\langle E_A \ E_B \ E_C \ E_a \ E_b \ E_c \rangle \dots\dots (18')$$

となる。さて

$$\begin{bmatrix} E_0'' \\ e_0'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (E_A'' + E_B'' + E_C'')/3 \\ (E_a'' + E_b'' + E_c'')/3 \end{bmatrix} \dots\dots (24)$$

$$\left. \begin{aligned} E_a'' &= E_A'' - E_0'', & e_a'' &= E_a - e_0'' \\ E_\beta'' &= E_\beta'' - E_0'', & e_\beta'' &= E_\beta - e_0'' \\ E_\gamma'' &= E_\gamma'' - E_0'', & e_\gamma'' &= E_\gamma - e_0'' \end{aligned} \right\} \dots (25)$$

などと置くと (16), (17), (24) 式と (25) 式から

$$\left. \begin{aligned} 3E_0'' &= 3E_0, & 3e_0'' &= 3e_0 \\ E_a'' + E_\beta'' + E_\gamma'' &= E_a + E_\beta + E_\gamma = 0 \\ e_a'' + e_\beta'' + e_\gamma'' &= e_a + e_\beta + e_\gamma = 0 \end{aligned} \right\} \dots (26)$$

(18') 式に (25) 式を代入して (26) 式を用いると

$$\langle \langle E_a'' \ E_\beta'' \ E_\gamma'' \ e_a'' \ e_\beta'' \ e_\gamma'' \rangle \rangle$$

$$= [T] \langle \langle E_a \ E_\beta \ E_\gamma \ e_a \ e_\beta \ e_\gamma \rangle \rangle \dots (18'')$$

を得る。(18') と (18'') 式とを比較して、クロスボンド点では、入射サージから零相サージを差引いた線心及びシースのサージについても、全サージのときと同じ透過係数行列 $[T]$ で透過サージを得ることが分かる。これは $[T]$ が v_0 に無関係な (15'), (15''), から導かれたものであることから容易に理解できる。

次に第2接続部透過サージ $\langle \langle E_a''' \dots e_a''' \dots \rangle \rangle$ は上の透過係数行列 $[T]$ を第1接続部透過サージ $\langle \langle E_a'' \dots e_a'' \dots \rangle \rangle$ の左側に作用させ直に得る。

$$\begin{aligned} &\langle \langle E_a''' \ E_\beta''' \ E_\gamma''' \ e_a''' \ e_\beta''' \ e_\gamma''' \rangle \rangle \\ &= [T] \cdot \langle \langle E_a'' \ E_\beta'' \ E_\gamma'' \ e_a'' \ e_\beta'' \ e_\gamma'' \rangle \rangle \\ &= [T][T] \langle \langle E_a \ E_\beta \ E_\gamma \ e_a \ e_\beta \ e_\gamma \rangle \rangle \dots (27) \end{aligned}$$

ここに

$$[T][T] \equiv [T]^2 = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \dots (28)$$

$$\begin{aligned} [T_{11}] &= \begin{bmatrix} 1-m-3m^2 & m & 3m^2 \\ 3m^2 & 1-m-3m^2 & m \\ m & 3m^2 & 1-m-3m^2 \end{bmatrix} \\ [T_{12}] &= \frac{1-2m-3m^2}{2} \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \\ [T_{21}] &= \begin{bmatrix} 2m-6m^2 & -2m+6m^2 & 0 \\ 0 & 2m-6m^2 & -2m+6m^2 \\ -2m+6m^2 & 0 & 2m-6m^2 \end{bmatrix} \\ [T_{22}] &= \begin{bmatrix} m & 1-m-3m^2 & 3m^2 \\ 3m^2 & m & 1-m-3m^2 \\ 1-m-3m^2 & 3m^2 & m \end{bmatrix} \end{aligned} \dots (29)$$

*: このときの反射係数行列 $[T']$ は $\langle \langle E_a' \dots E_a' E_\beta' E_\gamma' \rangle \rangle = \langle \langle E_a'' \dots E_\beta'' E_\gamma'' E_a'' \dots \rangle \rangle - \langle \langle E_a'' \dots E_\beta'' E_\gamma'' E_a'' \dots \rangle \rangle = [T]_x - [1] \langle \langle E_a'' \dots E_\beta'' E_\gamma'' E_a'' \dots \rangle \rangle$ から $[T'] = [T]_x - [1] \langle \langle E_a'' \dots E_\beta'' E_\gamma'' E_a'' \dots \rangle \rangle$ の対角要素を0としたもの

$$= \begin{bmatrix} 0 & m & -m & \frac{1+m}{2} & 0 & \frac{1+m}{2} \\ -m & 0 & m & \frac{1+m}{2} & -\frac{1+m}{2} & 0 \\ m & -m & 0 & 0 & \frac{1+m}{2} & -\frac{1+m}{2} \\ -2m & 2m & 0 & 0 & -m & m \\ 0 & -2m & 2m & m & 0 & -m \\ 2m & 0 & -2m & -m & m & 0 \end{bmatrix}$$

ここに $[T]_x = [T]$ の第4行を最下行に組みかえたもの

この $[T]$ はテブナンの等価回路から得た文献(2) [3] の(4)式, 文献(1)の(32)式と一致した。

上述の解析法では n 回透過後のサージが入射波の左側に $[T]^n$ を作用させ直に得られる特長がある。ゆえに一例として線心 A のみに $E_A=1$ を加えたとき, 第1, 第2接続部透過後のシース電圧は, 上述の $[T]$, $[T]^2$ の第1列下半分の要素, すなわち (18') 式から $2m, -2m, 0$ と, $[T_{21}]$ から $(2m-6m^2), 0, -(2m-6m^2)$ とをとり直に得られるが, 文献(4)の方法ではこのように簡単にはゆかない。

次に伝搬速度差を考慮した波形ひずみにつき考察しよう。このため第2章, 第3章に述べた線心シース間のサージ $\hat{E}_A \ \hat{E}_B \ \hat{E}_C$ とシースサージ $e_a \ e_\beta \ e_\gamma \ e_0$ とに分けねばならない。(18') 式の入射波を $\hat{E}_A \dots (e_a + e_0) \dots$ 透過波を $\hat{E}_A'' \dots (e_a'' + e_0'') \dots$ とした式に変形すると透過係数行列の形も変わり, 次の2式を得る。

$$\begin{aligned} &\langle \langle \hat{E}_A'' \ \hat{E}_B'' \ \hat{E}_C'' \ e_a'' \ e_\beta'' \ e_\gamma'' \rangle \rangle = \\ &\left\{ \begin{bmatrix} 1-2m & m & m & \frac{1-3m}{2} & 0 & -\frac{1-3m}{2} \\ m & 1-2m & m & -\frac{1-3m}{2} & \frac{1-3m}{2} & 0 \\ m & m & 1-2m & 0 & -\frac{1-3m}{2} & \frac{1-3m}{2} \\ 2m & 0 & -2m & m & m & 1-2m \\ -2m & 2m & 0 & 1-2m & m & m \\ 0 & -2m & 2m & m & 1-2m & m \end{bmatrix} \right. \\ &\quad \left. \times \langle \langle \hat{E}_A \ \hat{E}_B \ \hat{E}_C \ e_a \ e_\beta \ e_\gamma \rangle \rangle \right\} \quad (30) \\ &\quad e_0'' = e_0 \end{aligned}$$

すなわち, この第2式は伝搬速度 v_0 の零相サージが別計算されることを, また, 第1式は, $[\hat{E}_A]$ が v_c , $[e_a]$ が v_w の速度で伝搬するときクロスボンド点での分波の状況を示す。

いま, 一例として三相単心ケーブル系の端で A 相線心シース間に単位ステップ電圧を $t_0(\mu s)$ 間印加したとすると, $[e_a]=0, e_0=0=e_0''$ で, $\hat{E}_A$ のみ $v_c(m/\mu s)$ で伝搬する。 $x_1/v_c(\mu s)$ 後に $x_1(m)$ 離れた第1接続部に到着する。ここを透過すると, (30)式から分かるように, 線心シース間の透過サージは大きさ $\hat{E}_A''=1-2m, \hat{E}_B''=m, \hat{E}_C''=m$, 速度 $v_c(m/\mu s)$ で, またシースへの透過サージは, 大きさ $e_a''=2m, e_\beta''=-2m, e_\gamma''=0$, 速度 $v_w(m/\mu s)$ で第2接続部に向って伝搬する。(第1表参照) 一般に $v_c \neq v_w$ で $v_c > v_w$ とすると, * $x_2/v_c(\mu s)$ 後に線心シース間サージは第2接続部に到着し, 第1表(i)に示す6分波となるが, シー

*: PE 絶縁ケーブルでは $v_c=200 \text{ m}/\mu s$, OF ケーブルでは $v_c=154 \text{ m}/\mu s$ ネオブレンまたは PVC, PE シース絶縁ケーブルでは $v_w \approx 110 \sim 200 \text{ m}/\mu s$

第 1 表 ある時刻に三相単心ケーブル系のある区間を v_c または v_w で進行する継続時間 t_0 の矩形サージ電圧の分波

Table 1. Decomposition of the rectangular surge-voltage of t_0 -duration with the velocity of v_c or v_w , at any time, traveling on a section of the 3ϕ single cable system.

区 間		x_1	x_2	x_3	
				(i) x_2 のサージによる分波	(ii) x_2 のサージによる分波
線心シース間	A-a	1	第 1 ジョイント (シース・ク ロスボンド)	(1-2m)・* m・* m・*	第 2 ジョイント (シース・ク ロスボンド)
	B-b	0			
	C-c	0			
シース	a	0	(シースボン ド接地)	2m・** -2m・** 0	(シース・ク ロスボンド)
	b	0			
	c	0			

*: $T_0(t-x/v_c) U(t) U(x_2/v_c-t)$

Δ $T_0(t'-x/v_c) U(t') U(x_3/v_c-t')$

$\Delta\Delta$ $T_0(t'-x/v_w) U(t') U(x_3/v_w-t')$

** $T_0(t-x/v_w) U(t) U(x_2/v_w-t)$

$\times$ $T_0(t''-x/v_c) U(t'') U(x_3/v_c-t'')$

$\times\times$ $T_0(t''-x/v_w) U(t'') U(x_3/v_w-t'')$

$T_0(t-x/v) = U(t-x/v) - U(t-t_0-x/v)$ $t' = t - x_2/v_c$, $t'' = t - x_2/v_w$

スサージはそれより $x_2/v_w - x_2/v_c = t_d(\mu s)$ 遅れて第 2 接続部に到着し、第 1 表 (ii) に示す 6 分波となる。これらの分波は v_c または v_w の速度で第 3 接続部に向かって伝搬する。それゆえ、 x_3 区間では第 2 接続部を透過したサージの継続時間 t_0 が t_d より小さければ、(i) (ii) の両波は別々の波となるが、 t_d より大きければ初めの $t_d(\mu s)$ 間は (i) のサージの単独波となり、次の $t_0 - t_d(\mu s)$ 間は (i) (ii) の合成波となり、その後の $t_d(\mu s)$ 間は (ii) の単独波となって第 3 接続部に向い伝搬することになる。また、第 1 表で c 相のシースサージについて見ると、 x_2 区間で零であるが、 x_3 区間に $-(2m-6m^2)$ のサージが $x_2/v_w(\mu s)$ 後発生することを示している。このように近くの区間で小さく観測されたサージが、それより遠い区間で大きな値に観測されるという現象も生じる。以上の例では零相サージ零の場合であるが、一般に零相分が重畳するほかに、時間の経過とともに反射波が重畳するようになるから、実際の波形はさらに複雑に変わりひずむことになる。

5. シースのボンド接地点での透過係数行列

シース間のボンド抵抗 $1/2 G_m$ で各シースの接地抵抗 $1/2 G_0$ の第 3 接続部透過サージにつき考える。

このボンド接地のアドミタンス行列を $[Y_m]$ とすると、第 3 接続部から見た総アドミタンス行列は $[2Y_I + Y_m]$ となるから (15) 式に相当する式は

$$[2Y_I + Y_m] \begin{bmatrix} E_A'' & E_B'' & E_C'' & E_a'' & E_b'' & E_c'' \end{bmatrix} = 2[Y_I] \begin{bmatrix} E_A & E_B & E_C & E_a & E_b & E_c \end{bmatrix} \dots (31)$$

となる。ここに

$$[Y_m] = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 2Y_G \end{bmatrix} \dots (32)$$

さて、 $i = GE$ において、 G に流れ込む側の電流を

$+i$, G から流れ出る側の電流を $-i$ とすると、 $(q) = C(E)$ に対する C の行列 $[K_s]$ と同様に $i = GE$ に対する G の行列 $[Y_G]$ は

$$[Y_G] = G_w [1] + \frac{G_0 - G_w}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \dots (33)$$

と表わされる。ここに

(1) は単位行列 $G_w = G_0 + 3G_m$

(33) と (2') 式の第 1 式を用いると (31) 式は

$$\begin{bmatrix} Y_c & -Y_c \\ -Y_c & Y_c + Y_s + Y_G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_A'' \\ E_a'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_c & -Y_c \\ -Y_c & Y_c + Y_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_A \\ E_a \end{bmatrix} \dots (31')$$

この式に線心シース間電圧の行列 $[\hat{E}_A] = [E_A] - [E_a]$, $[\hat{E}_A''] = [E_A''] - [E_a'']$ を入れ簡単化すると $[\hat{E}_A''] = [\hat{E}_A] \dots (31')_c$

$$[Y_s + Y_G][E_a''] = [Y_s][E_a] \dots (31')_s$$

(31')_s に Y_G , Y_s の値を入れ (25) 式の関係を用い

$$(G_w + y_w)[e_a''] + (G_0 + y_0)[e_0''] = y_w[e_a] + y_0[e_0] \dots (31')_s$$

(31')_s 式の行列の 3 式を辺々加えると

$$\begin{bmatrix} (G_0 + y_0)e_0'' = y_0 e_0 \\ \therefore e_0'' = e_0 / (1 + G_0/y_0) \end{bmatrix} \dots (34)$$

(34) を (31')_s 式に入れて $[e_a'']$ を求めると

$$[e_a''] = [e_a] / (1 + G_w/y_w) \dots (35)$$

(31')_c 式は線心シース間電圧が Y_G , Y_s に無関係で、シースのボンド接地の影響も受けずにそのまま透過することを示している。(34) 式はシースの零相分が G の影響で $(1 + G_0/y_0)$ 分の 1 に減少することを示し、完全接地 $G_0 = \infty$ の場合 $e_0'' = 0$ となる。また、(35) 式は残りのシースサージ $[e_a]$ が G_0 と G_m との影

響をうけ $(1+G_w/y_w)$ 分の 1 に減少することを示し、シース間ボンド $2G_m$ かシース接地 $2G_0$ かのいずれかが完全 (∞) のとき $[e_a'']=0$ すなわち、そこで完全に消滅する。

また、ケーブル端のシース接地が完全であれば e_0 は発生しないから、クロスボンド点や抵抗で結ばれたシースのボンド、接地点を何回通過してもシースの零相サージは発生しないはずであるが、実際はケーブル端接地の不十分さと三相回路の多少の不均衡とによりシースに零相サージ電圧の侵入が考えられるから、第 3、第 6 接続部の接地は必要である。完全にボンド接地された点では、シースサージのすべてが消滅するから、その点の透過サージは線心シース間サージのみとなって、次の区間に伝搬することとなる。

6. むすび

この論文は、シースをクロスボンドした点とシース間をコンダクタンス $2G_m$ でボンドし、各シースを $2G_0$ で接地した接続部のある三相単心ケーブル系の進行波の特性を解析したもので、次の結果を得た。

1. シース上の進行波は伝搬速度の異なる三つのサージ、すなわち、負の線心シース間サージ、シースの大地に対する零相サージと零相サージを差引いたシースサージ (シースの Working capacity に対するサージ) との重畳であることを明かにした。

2. その 3 種のサージの特性アドミッタンスと伝搬速度との関係を誘導した。

3. この三つのサージは相互に干渉せず各特有の伝搬特性を示し、別々に計算できることを明かにした。

4. クロスボンド点での透過サージを得る透過係数行列 $[T]$ を、文献 [4] の方法と異なり、クロスボンドを折込んだ入射反射透過の基本式 (8)(9) を用いた。その結果、クロスボンド点を n 回透過したときのサージも容易に得られる行列演算法が見出された。すなわち、6 導体クロスボンド系の演算が単導体系と

同様簡単にできることが分った。この方法の正しいことはテブナンの等価回路による解析文献 [1]~[3] との対応比較により確認された。

5. 伝搬速度の異なる分波に対する透過係数行列を新たに導いた。[(30) 式] そして例として A 相線心シース間に入来した短い矩形サージが、第 1、第 2 接続部透過の際次々と分波し異なる速度で伝搬していくサージを示す数式を与えた。速度差を考慮すると、考慮しない場合に比べ波形ひずみが大きく、また、ある相に着目して、近い区間で現れないサージが次の遠い区間で現われるという現象も解説した。

6. 最後にシース間をコンダクタンス $2G_m$ でボンドし各シースを $2G_0$ で接地した第 3 接続部では、線心シース間のサージは G_0 、 G_m の影響をうけずにそのまま透過するが、そこを通るシースの零相サージは $(1+G_0/y_0)$ 分の 1 に減少し、零相以外のサージは $\{1+(G_0+3G_m)/y_w\}$ 分の 1 に減少することを導いた。

以上の研究結果は伝搬サージを利用するケーブル系のフォルトロケータの研究に役だつものと思う。

最後に本稿に省いたがこの研究の実験に種々援助いただいた住友電工の三井 勉氏に感謝します。

(昭和 47 年 11 月 10 日受付、同 48 年 8 月 31 日再受付)

文 献

- [1] A.G. Heaton & A.M.H. Issa: Proc. Inst. Elect. Engrs 117, 578 (1970)
- [2] 石原: 電学誌 86, 425 (昭 41-3)
- [3] 石原: 関西電力技術研究所研究資料 No. 39-1007 (昭 39-8)
- [4] 芳賀, 草野: 電学誌 79, 1580 (昭 34-12)
- [5] R. Uram & R.W. Miller: IEEE Trans. Power Apparatus Syst. PAS-84, 1116 (1964)
- [6] A.E. Grant & A.G. Heaton: Proc. Inst. Elect. Engrs 114, 803 (1967)
- [7] A.G. Heaton & I.A. Reid: Proc. Inst. Elect. Engrs 113, 461 (1966)
- [8] J.H. Anderson & A.G. Heaton: Proc. Inst. Elect. Engrs 113, 2017 (1966)
- [9] W. Watson & C.C. Erven: IEEE Trans. Power Apparatus Syst. PAS-66, 239 (1963)
- [10] A.I.E.E. Committee Report: Trans. Amer. Inst. Elect. Engrs 69, Part II, 1189 (1950)