多線条分布定数回路の一解析方法と非ねん架 500kV 三相送電線の高調波伝搬特性

正員 森 武 昭 (幾徳工業大)

正員 大 矢 征 (幾徳工業大)

正員 酒 井 洋 (上 智 大)

1. ま え が き

近年、サイリスタやダイオードなどの半導体整流素子を用いた非線形負荷や電力変換装置が多く使用されるため、これらから発生する高調波電流が問題となっている。この高調波電流は電圧波形をひずませる要因となるだけでなく

(1) 高調波過電圧によるコンデンサなどの機器の絶縁破壊や過熱

(2) 計測装置の誤差や検出制御装置の誤動作

(3) 近接する通信線への誘導障害

など、各種障害の発生原因ともなっている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。高調波電圧は配電系統のみならず、上位系統である超高圧送電系統でも観測されている⁽³⁾。ところで、この系統での高調波伝搬特性は搬送波を考慮した高周波領域については求められているが⁽⁴⁾、比較的低い周波数の特性はあまり解析されていない。従来、長距離送電線路における高調波の取り扱い、回線内および回線間ともねん架されていて、三相とも完全に平衡している(以下、完全ねん架という)と仮定して、正相回路についての分布定数回路の伝搬方程式から求めている。しかし、超高圧送電系統では非ねん架方式が採用されており、不平衡線路となるため多線条系分布定数回路の取り扱いを必要とする。この種の解析は、従来、変換

行列を用いて行列を対角化するか、線路を長さ方向に多分割して、各々の区間を集中定数回路として取り扱い、系統をこれらの縦続接続とする方法が用いられている⁽⁵⁾⁽⁶⁾。ところが、前者においては、変換行列を求めるのが容易でないし、後者においては、分割区間を集中定数回路とした場合の等価回路の表し方や分割区間数による解析結果への影響などが必ずしも十分明確になっていない。そこで、著者らは後者の方法を発展させて、単一導体の分布定数回路の解析に用いられている方法を行列表示により多線条系化する解析方法を検討した⁽⁷⁾。以下に、その計算方法と、非ねん架三相送電系統の高調波伝搬特性の解析に適用した計算例について述べる。計算例では、この解析方法による高調波伝搬特性と完全ねん架送電線路と見なした場合の特性との比較、および、架空地線の有無による高調波伝搬特性への影響について検討した。

2. 多線条系分布定数回路の一解析方法

解析の対象となる導体数を一般的に n とすると、多線条系分布定数回路の基本方程式は、次の形で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} -\frac{d}{dx}[E] &= [Z][I] \\ -\frac{d}{dx}[I] &= [Y][E] \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $[E]$ と $[I]$ は n 行 1 列からなる電位行列と電流行列、 $[Z]$ と $[Y]$ は n 次の正方行列からなる単位 km 当りのインピーダンス行列とアドミタンス行列を示している。また、 x は導体方向の基準点(送電端)からの距離(km)を示している。ここで、

$$[Q]^2 = [Z][Y] \dots\dots\dots (2)$$

A Method of Analyzing the Distributed Constant Circuits of a Multi-conductor System and Harmonic Propagation Characteristics on Untransposed 500kV Three Phase Transmission Lines. By Takeaki Mori, Member, Susumu Ohya, Member (Department of Electrical Engineering, Ikutoku Technical University) & Hiroshi Sakai, Member (Faculty of Science and Technology, Sophia University).

森 武昭: 正員, 幾徳工業大学工学部電気工学科
大矢 征: 正員, 幾徳工業大学工学部電気工学科
酒井 洋: 正員, 上智大学理工学部電気電子工学科

とおくと、(1)式の解は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} [E] &= \cosh([Q]x) \cdot [R] \\ &\quad + \sinh([Q]x) \cdot [S] \\ [Z][I] &= -[Q] \cdot \{\sinh([Q]x) \cdot [R] \\ &\quad + \cosh([Q]x) \cdot [S]\} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $[R]$ と $[S]$ は n 行1列からなる積分定数行列を示している。ところで、双曲線関数を級数展開すると次のような関係が得られる。

$$\left. \begin{aligned} \cosh([Q]x) &= [U_n] + \frac{1}{2!}([Q]x)^2 + \frac{1}{4!}([Q]x)^4 + \dots \\ \sinh([Q]x) &= [Q]x + \frac{1}{3!}([Q]x)^3 + \frac{1}{5!}([Q]x)^5 + \dots \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $[U_n]$ は n 次の単位行列を示している。そこで(3)式に関して、両端での回路条件をあてはめて、 $[R]$ と $[S]$ を決定する。

(1) $x=0$ で、 $[E]=[E_1]$ 、 $[I]=[I_1]$ とする。

$[E_1]=[R]$ 、 $[Z][I_1]=-[Q][S]$ より

$$\left. \begin{aligned} [R] &= [E_1] \\ [S] &= -[Q]^{-1}[Z][I_1] \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

(2) $x=x$ で、 $[E]=[E_2]$ 、 $[I]=[I_2]$ とする。

(5)式の関係を考慮すると次式を得る。

$$\begin{aligned} [E_2] &= \cosh([Q]x) \cdot [E_1] \\ &\quad - \sinh([Q]x) \cdot [Q]^{-1}[Z][I_1] \end{aligned} \dots\dots\dots (6-1)$$

$$\begin{aligned} [Z][I_2] &= -[Q] \sinh([Q]x) \cdot [E_1] \\ &\quad + [Q] \cosh([Q]x) \\ &\quad \times [Q]^{-1}[Z][I_1] \\ &= -[Q] \sinh([Q]x) \cdot [E_1] \\ &\quad + \cosh([Q]x) \cdot [Z][I_1] \end{aligned} \dots\dots\dots (6-2)$$

なお、(6-2)式の右辺第2項は、(4)式の関係を考慮することにより求めることができる。次に、(6)式に関して $[I_1]$ を消去すると次の関係が得られる。

$$\begin{aligned} [E_1] &= \cosh([Q]x) \cdot [E_2] \\ &\quad + [Q]^{-1} \sinh([Q]x) \cdot [Z][I_2] \end{aligned} \dots\dots\dots (7)$$

同様に、(6)式に関して $[E_1]$ を消去すると次の関係が得られる。

$$\begin{aligned} [Z][I_1] &= [Q] \sinh([Q]x) \cdot [E_2] \\ &\quad + \cosh([Q]x) \cdot [Z][I_2] \dots\dots (8) \end{aligned}$$

次に、

$$\begin{bmatrix} [E_1] \\ [I_1] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [A] & [B] \\ [C] & [D] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [E_2] \\ [I_2] \end{bmatrix} \dots\dots\dots (9)$$

なる式を考え、(7)、(8)式と対応させると、 $[A]$ 、 $[B]$ 、 $[C]$ 、 $[D]$ の4端子定数行列は、(4)式を考慮して次のような形で表現することができる。

$$\begin{aligned} [A] &= \cosh([Q]x) \\ &= [U_n] + \frac{1}{2!}[Z][Y]x^2 + \frac{1}{4!} \\ &\quad \times \{[Z][Y]\}^2 x^4 + \dots\dots\dots (10-1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} [B] &= [Q] \sinh^{-1}([Q]x) \cdot [Z] \\ &= [Z]x + \frac{1}{3!}[Z][Y][Z]x^3 \\ &\quad + \frac{1}{5!}\{[Z][Y]\}^2[Z]x^5 + \dots\dots\dots (10-2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} [C] &= [Z]^{-1}[Q] \sinh([Q]x) \\ &= [Y]x + \frac{1}{3!}[Y][Z][Y]x^3 \\ &\quad + \frac{1}{5!}\{[Y][Z]\}^2[Y]x^5 + \dots\dots\dots (10-3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} [D] &= [Z]^{-1} \cosh([Q]x) \cdot [Z] \\ &= [U_n] + \frac{1}{2!}[Y][Z]x^2 \\ &\quad + \frac{1}{4!}\{[Y][Z]\}^2 x^4 + \dots\dots\dots (10-4) \end{aligned}$$

以上のように取り扱うと、 x を線路の全長 l で置き換えれば、(10)式より線路全体の4端子定数行列を求めることができる。また、問題の必要性に応じては、線路全体を長さ方向に分割して、各分割区間について(10)式より4端子定数行列を求め、各区間の4端子定数行列の縦続接続として線路全体を取り扱うことも可能である。それゆえ、(10)式を用いると、線路を分割して各区間を集中定数回路として取り扱う際の、分割区間数の決定方法や各区間の集中定数回路の表現方法といった点を考慮しなくてよい点が、本解析方法の大きな特徴となっている。

このようにして、線路全体の4端子定数行列が求められると、両端末(送電端と受電端)での回路条件を適用することにより、受電端での電位と電流の行列を求めることができる。そうすると、4端子定数理論の基本方程式と(10)式を用いることにより、任意の点の電位と電流の分布を求めることができる⁽⁵⁾⁽⁷⁾。

なお、(10)式は双曲線関数の級数展開を用いているため、架空地線がある場合で、かつ、周波数が高い場

図 1 導体配置 [単位 (m)]

Fig. 1 Lines configuration (unit (m)).

合や線路長が非常に長い場合には収束が悪くなる。このような場合、この計算方法の適用限界については第 4 章で述べる。架空地線がない場合には、(10) 式の 3~4 項までを計算することにより、精度良く 4 端子定数行列を求めることができる。

3. 非ねん架三相送電線の高調波特性の解析

(3・1) モデル線路⁽⁸⁾ 本解析方法の適用例として、我が国の超高压送電系統の中でも、最も代表的な 500 kV 三相 2 回線送電線路(モデル線路①)、三相 1 回線三角配列線路(モデル線路②)および 1 回線水平配列線路(モデル線路③)の高調波伝搬特性について解析を行なった。これらの導体配置図を図 1 に示し、系統各部の仕様を表 1 に示す。図 2 は三相 2 回線の場合の送電系統概略である。線路部分は逆相順配列であり、架空地線は径間長 S_c (m) ごとに、鉄塔の接地抵抗 R_t (Ω) で接地されている。また、A 電気所の二次側に実効値 E_a (計算では大きき 1 とした) の対称三相高調波電圧源が生じたものとして解析を行なった。なお、定電流源として見なす必要がある場合でも、同様の方法により解析を行なうことができる。

(3・2) 線路定数 周知のように線路の内部インピーダンスは表皮効果を考慮して求められ⁽⁹⁾、大地帰路インピーダンスは Carson の式⁽¹⁰⁾を用いて求められる。図 2 に示すように、2 回線の場合の線路部分は架空地線を含めて 8 本の電線があるので、インピーダンス行列は 8 次の行列となる。ここで、架空地線の電位と電流は 2 条とも等しいと仮定すると等価的に 1 条として置換できるので⁽⁸⁾、インピーダンス行列 $[Z]$ は 7 次の行列で表現できる。表 2 (a) は 50 Hz におけるインピーダンス行列で、対称行列となっている。 $[Z]$ の実数部は周波数にほぼ比例するが、虚数部は大地帰路回路の影響で周波数に比例しない。

アドミタンス行列 $[Y]$ の実数部は、線路部分の漏れ

表 1 計算に用いたモデル送電線路の仕様

Table 1. Specification of model transmission lines.

項 目			計算条件
送電線	S	公称断面積 (mm ²)	610
	R_o	直 流 抵 抗 (Ω/km)	0.0474
	r	半 径 (mm)	17.1
	n	素 導 体 数 (本)	4
	d	素導体間隔 (m)	0.4
架空地線	S_g	公称断面積 (mm ²)	160
	R_g	直 流 抵 抗 (Ω/km)	0.166
	r_g	半 径 (mm)	10.5
	n_g	本 数 (本)	2
線路条件	l	こ う 長 (km)	100
	S_c	平均径間長 (m)	400
	R_t	鉄塔接地抵抗 (Ω)	15
A 電気所	Z_{oA}	零相 Impedance (Ω)	$j22.72$
	Z_{1A}	正相 Impedance (Ω)	$j21.80$
	R_A	接 地 抵 抗 (Ω)	0.1
B 電気所	Z_{oB}	零相 Impedance (Ω)	$j17.08$
	Z_{1B}	正相 Impedance (Ω)	$j14.30$
	R_B	接 地 抵 抗 (Ω)	0.1
σ 大地導電率 (S/m)			0.01
導 体 配 置			図 1

図 2 送電系統概略図(三相 2 回線)

Fig. 2. Schematic diagram of transmission system (3 phase 2 circuits).

コンダクタンスが無視できるので、鉄塔の接地抵抗のみを考慮すればよい。全線路にわたり、鉄塔が等間隔(径間長 S_c)に建設されていて、それらの接地抵抗 R_t がすべて等しいと仮定すると、架空地線の単位 km 当りのコンダクタンス g は分布定数とみなすことができるので(11)式となる。

$$g = \frac{1,000}{S_c R_t} \text{ (s/m)} \dots \dots \dots (11)$$

虚数部は電位係数行列から求め、 $[Z]$ と同様に等価 1 条に置換して 7 次の行列とする。表 2 (b) は 50 Hz におけるモデル線路①のアドミタンス行列 $[Y]$ で、この値の虚数部は周波数に比例する。なお、径間長や接地抵抗が等しくない場合には、鉄塔部分を集中定数で表し、径間長に相当する線路定数との連続接続として、

表 2 50 Hz における三相 2 回線のインピーダンス行列 $[Z]$ とアドミタンス行列 $[Y]$ Table 2. Impedance matrix $[Z]$ and admittance matrix $[Y]$ of 3 phase 2 circuits transmission lines at 50 Hz. (symmetric matrix).

(a) インピーダンス行列 $[Z]$ [単位 (m Ω /km)]							
	1	2	3	4	5	6	7
1	56.2 + j 541	44.5 + j 276	45.1 + j 232	45.0 + j 221	44.5 + j 246	44.0 + j 264	43.5 + j 260
2		57.3 + j 540	45.6 + j 275	45.6 + j 243	45.0 + j 259	44.5 + j 246	44.0 + j 227
3			58.5 + j 539	46.2 + j 255	45.6 + j 243	45.0 + j 221	44.5 + j 204
4				58.5 + j 539	45.6 + j 275	45.1 + j 232	44.5 + j 204
5					57.3 + j 540	44.5 + j 276	44.0 + j 227
6						56.2 + j 541	43.5 + j 260
7							126.0 + j 491

(b) アドミタンス行列 $[Y]$ [単位 (μ S/km)]							
	1	2	3	4	5	6	7
1	0 + j 3.540	0 - j 0.714	0 - j 0.224	0 - j 0.125	0 - j 0.295	0 - j 0.528	0 - j 0.764
2		0 + j 3.644	0 - j 0.711	0 - j 0.281	0 - j 0.428	0 - j 0.295	0 - j 0.271
3			0 + j 3.536	0 - j 0.470	0 - j 0.281	0 - j 0.125	0 - j 0.129
4				0 + j 3.536	0 - j 0.711	0 - j 0.224	0 - j 0.129
5					0 + j 3.644	0 - j 0.714	0 - j 0.271
6						0 + j 3.540	0 - j 0.764
7							167 E 3 + j 3.813

表 3 50 Hz における三相 1 回線のインピーダンス行列とアドミタンス行列

Table 3. Impedance matrix and admittance matrix of 3 phase 1 circuit transmission lines at f=50 Hz.

(a) 三角配列のインピーダンス行列 $[Z]$ (m Ω /km) (モデル線路②)				
	1	2	3	4
1	58.5 + j 539	45.7 + j 270	46.2 + j 259	45.3 + j 237
2		57.5 + j 540	45.7 + j 270	44.8 + j 279
3			58.5 + j 539	45.3 + j 237
4				127.6 + j 502

(b) 三角配列のアドミタンス行列 $[Y]$ (μ S/km) (モデル線路②)				
	1	2	3	4
1	0.0 + j 3.472	0.0 - j 0.664	0.0 - j 0.540	0.0 - j 0.212
2		0.0 + j 3.609	0.0 - j 0.664	0.0 - j 0.511
3			0.0 + j 3.472	0.0 - j 0.212
4				167 E 3 + j 0.926

(c) 水平配列のインピーダンス行列 $[Z]$ (m Ω /km) (モデル線路③)				
	1	2	3	4
1	58.5 + j 539	46.2 + j 267	46.2 + j 224	45.7 + j 256
2		58.5 + j 539	46.2 + j 267	45.7 + j 264
3			58.5 + j 537	45.7 + j 256
4				128.5 + j 488

(d) 水平配列のアドミタンス行列 $[Y]$ (μ S/km) (モデル線路③)				
	1	2	3	4
1	0.0 + j 3.475	0.0 - j 0.649	0.0 - j 0.201	0.0 - j 0.367
2		0.0 + j 3.590	0.0 - j 0.649	0.0 - j 0.362
3			0.0 + j 3.475	0.0 - j 0.367
4				167 E 3 + j 1.009

表 4 50 Hz における正相インピーダンスと正相アドミタンス

Table 4. Positive-phase-sequence impedance and admittance at 50 Hz.

	正相インピーダンス z (m Ω /km)	正相アドミタンス y (μ S/km)
モデル線路①	12.27 + j 275	0.0 + j 4.25
モデル線路②	12.27 + j 272	0.0 + j 4.10
モデル線路③	12.27 + j 283	0.0 + j 3.93

線路の 4 端子定数行列を決定することもできる。

三相 1 回線の線路定数も同様に求められる。50 Hz におけるインピーダンス行列とアドミタンス行列を表 3 に示す。

回線内および両回線間相互において完全にねん架されていると仮定した場合、各モデル線路の 50 Hz における正相インピーダンス z と正相アドミタンス y の値は表 4 のようになる。

〈3.3〉 高調波伝搬特性の計算方法

(1) 非ねん架を考慮した計算方法 第 2 章で述べた解析方法では、線路部分の任意の長さについて 4 端子定数行列を求めることができる。図 3 (a) に示すように、全長を N 分割したときの 1 区間当りの 4 端子定数行列を $[A]_n \sim [D]_n$ とすると、任意の分割点における電位と電流が求まる。ここで、 $[A]_n \sim [D]_n$ は (10) 式を用いて、次のようにして計算した。1 例として、(10-1) 式の行列 $[A]$ について述べるが、ほかの行列も同様であり、(12) 式の条件を $[A]$, $[B]$, $[C]$, $[D]$ が共に満たす項まで計算した。

図3 数値計算のための二つの簡略回路

Fig. 3. Two simplified circuits for numerical calculation.

- ① 分割区間長 $u=l/N$ (km) を $[Z]$, $[Y]$ に掛ける。
- ② $[A]_i$ (i は項数) を計算する。
- ③ $[A]_k = \sum_{i=1}^k [A]_i$ を求める。
- ④ $\frac{\max |[A]_i \text{ の要素}|}{|\text{分子の要素と同じ行と列の } [A]_k \text{ の要素}|} \leq 10^{-4}$ (12)
- ⑤ (12) 式の条件を満たすまで、②に戻って計算する。

50 Hz における電気所インピーダンスの値は、表1に示すように対称成分で与えられているので、各相ごとの値に変換する必要がある。対称座標法を応用した架空地線の要素を含めた変換行列 $[S]$, $[S]^{-1}$ は、三相2回線の場合、次のようにとる⁽¹¹⁾。

$$[S] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & a^2 & a & 1 & a^2 & a & 0 \\ 1 & a & a^2 & 1 & a & a^2 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & 0 \\ 1 & a^2 & a & -1 & -a^2 & -a & 0 \\ 1 & a & a^2 & -1 & -a & -a^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots (13)$$

$$[S]^{-1} = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & a & a^2 & 1 & a & a^2 & 0 \\ 1 & a^2 & a & 1 & a^2 & a & 0 \\ 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & 0 \\ 1 & a & a^2 & -1 & -a & -a^2 & 0 \\ 1 & a^2 & a & -1 & -a^2 & -a & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6 \end{bmatrix} \dots (14)$$

A 電気所の対称分インピーダンス行列は

$$[Z_A]_{\text{対}} = \begin{bmatrix} 2Z_{0A} + 6R_A & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_A \\ 0 & 2Z_{1A} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2Z_{1A} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 6R_A & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_A \end{bmatrix} \dots (15)$$

となるので、各相成分は

$$[Z_A]_{\text{相}} = [S][Z_A]_{\text{対}}[S]^{-1} \dots (16)$$

として計算できる。

B 電気所のインピーダンス行列も同様に計算できるので、これらを4端子定数行列とし、A 電気所、送電線路、B 電気所の4端子定数行列を連続接続すると系統全体の4端子定数行列 $[A]_T \sim [D]_T$ が求まる。図3(a)に示した端末の境界条件を、A 電気所においては対称三相高調波電圧源の行列 $[E]_A$ とし、B 電気所においては $[E]_B = 0$ とすると、B 電気所の行列は $[I]_B = [B]^{-1}[E]_A$ となる。受電端の電位、電流行列は $[E]_R = [Z_B][I]_B$, $[I]_R = [I]_B$ として求まるので、 N_x を送電端からの分割区間数とすると、この地点における電位と電流の行列は次の関係で与えられる。

$$\begin{bmatrix} [E]_x \\ [I]_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [A]_u & [B]_u \\ [C]_u & [D]_u \end{bmatrix}^{N-N_x} \begin{bmatrix} [E]_R \\ [I]_R \end{bmatrix} \dots (17)$$

送電端の電位行列 $[E]$ と電流行列 $[I]$ は (17) 式で $N_x = 0$ とすることにより求め、入力端電圧

$$[E]_A' = [E]_s + [Z_A][I]_s \dots (18)$$

は先に与えた境界条件 $([E]_A)$ を満足していなければならないことは言うまでもない。

三相1回線の場合も、架空地線がない場合も、行列の次数が異なるだけで同様に計算できる。

(2) 完全ねん架の場合 (正相回路) の計算方法

表4に与えた正相インピーダンス $\hat{z}$ と正相アドミタンス $\hat{y}$ から、図3(b)における特性インピーダンス $\hat{Z}_0$ と伝搬定数 $\hat{\gamma}$ は次式で計算できる。

$$\hat{Z}_0 = \sqrt{\hat{z}/\hat{y}} \dots (19), \quad \hat{\gamma} = \sqrt{\hat{z}\hat{y}} \dots (20)$$

A 電気所の正相インピーダンスを $\hat{Z}_{1A}$, B 電気所の正相インピーダンスを $\hat{Z}_{1B}$ とし、線路の全長を l (km) とすると、送電端から x (km) の点の電圧、電流ベクトルは

$$\begin{aligned} \hat{E}_x = & \frac{2\hat{Z}_{1B} \cosh \hat{\gamma}(l-x)}{2(\hat{Z}_{1A} + \hat{Z}_{1B}) \cosh \hat{\gamma} l} * \\ & * \frac{\hat{Z}_0 \sinh \hat{\gamma}(l-x)}{\hat{Z}_0 + \frac{4\hat{Z}_{1A}\hat{Z}_{1B}}{\hat{Z}_0} \sinh \hat{\gamma} l} \hat{E}_A \dots (21) \end{aligned}$$

$$I_x = \frac{\tilde{Z}_0 \cosh \gamma(l-x)}{2(\tilde{Z}_{1A} + \tilde{Z}_{1B}) \cosh \gamma l} * \frac{+ 2\tilde{Z}_{1B} \sinh \gamma(l-x)}{+ \left(\tilde{Z}_0 + \frac{4\tilde{Z}_{1A} + \tilde{Z}_{1B}}{\tilde{Z}_1} \right) \sinh \gamma l} \tilde{E}_A \dots (22)$$

で求められる。三相 1 回線の場合は, (21), (22) 式の $2\tilde{Z}_{1A}$, $2\tilde{Z}_{1B}$ をそれぞれ, $\tilde{Z}_{1A}$, $\tilde{Z}_{1B}$ とする。

4. 計算結果および考察

〈4・1〉 三相 2 回線の高調波伝搬特性 前章で述べた計算条件(モデル線路①)および計算方法により, 数値計算を行なった結果を図 4～図 9 に示す。図 4 は高調波電圧(周波数 f , 実効値 1 V)が印加されたときの, 架空地線がない場合の受電端電圧を示す。また図 5 は図 4 の共振周波数付近を拡大したものに, 架空地線がある場合の正相電圧と零相電圧を一緒に図示したものである。

(1) 架空地線の影響 図 5 より, 非ねん架の場合の正相電圧に対する架空地線の影響は, 共振周波数が約 1 Hz 低くなり, 共振点付近の電圧が若干大きな値となるほかは, あまり表れない。零相電圧は架空地線のある方が全般に大きな値となるが, 正相電圧と比較すると 10% 程度の大きさでありほとんど無視できる。更に, 図 4 でわかるように, 共振点付近を除くと零相電圧は極端に小さな値となり問題にならない。

(2) 非ねん架と完全ねん架の比較 図 4, 図 5 から正相電圧に関して次のことが言える。

(a) 非ねん架の場合は共振点が二つ表れる。低い

図 4 高調波特性(三相 2 回線)

Fig. 4. Harmonic characteristics at receiving end.

図 5 高調波特性(図 4 の一部)

Fig. 5. Harmonic characteristics at receiving end.

方の周波数を f_1 , 高い方の周波数を f_2 とすると, $f_2 - f_1$ は約 14 Hz である。 f_2 における電圧値は f_1 における電圧値より若干大きい。

(b) 完全ねん架の場合の共振周波数を f_0 とすると, $f_1 < f_2 < f_0$ の関係がある。

(c) 共振周波数付近を除くと, 二つの計算方法による差はあまりない。

また, 正相電圧以外については, 次のようなことがわかる。

(d) 零相電圧は f_1 で共振点をもつほか, f_{11} の約 1.4 倍の周波数(図 4 の第 16 調波)付近にピーク値がある。しかし, この電圧の大きさは f_1 での大きさの 1/50 ぐらいであり無視できる。

(e) 逆相電圧の共振周波数は正相電圧の共振周波数と等しい。周波数が $f_1 \leq f \leq f_2$ の範囲内では, 逆相電圧の方が正相電圧より大きな値となるが, この範囲外では急速に減少する。

図 6 は線路上の各位置における高調波電圧の分布を示している。基本周波数の 50 Hz においては, 受電端に近づくほど正相電圧の値は小さくなるが, 共振周波数を超えると受電端電圧の方が大きくなる。これは周波数が高いため, 線路の静電容量による影響が顕著になり, フェランチ効果と同様に, 送電端電流の位相が電圧に対して約 90° 進むためである。

図 7 は第 5 調波と第 13 調波の送電端と受電端における各相の電圧と電流のベクトルを図示したもので,

図 6 高調波電圧分布

Fig. 6. Distribution of harmonic voltage.

図 7 5次と13次の電圧、電流ベクトル図
(モデル線路①)

Fig. 7. 5th and 13th order vector diagram.

$m=13$ では 90° 進相となることが明らかである。また、 $m=13$ では、電圧、電流とも b 相の値が他の相よりも小さな値となっている。架空地線の電流は正相電流に対して、50 Hz で約 6%、 $m=5$ で約 4~7%、 $m=13$ で約 24~32% である。しかし架空地線の電圧は正相電圧に対して 0.01% 以下で極めて小さい。

図 8、図 9 は同一条件で計算したときの受電端における正相電流の高調波伝搬特性と、送電端からの距離に対する高調波電流分布を示している。図 4 と図 8 を比較すると、高調波電流の場合は $m=10$ ぐらいまでは、基本波成分よりも小さな値となるほかは、正相電流、零相電流とも電圧の高調波伝搬特性と同様の傾向を示す。

〈4.2〉 三相 1 回線の高調波伝搬特性 三相 1 回線の場合の伝搬特性は全体的に三相 2 回線における図

図 8 受電端における正相電流の高調波特性

Fig. 8. Harmonic characteristics of positive-phase-sequence current at receiving end.

図 9 高調波電流分布

Fig. 9. Distribution of harmonic current.

4 とほとんど同じ傾向を示した。そこで、図 5 に対応して共振点付近を拡大して示すと図 10 のとおりである。架空地線がない場合の周波数特性の図 10 (三相 1 回線と図 5 (三相 2 回線) とを対比すると、ほとんど同じ傾向を示しているが、受電端電圧の大きさは全体的に小さくなり、共振周波数は高くなっている (1 回線では 720~770 Hz に対して、2 回線では 540~550 Hz 付近)。これは電気所のインピーダンスが等しくても、線路のインピーダンスによる影響であると思われる。

次に、三角配列 (モデル線路②) と水平配列 (モデル線路③) について比較すると、次のような特徴があげられる。

(1) 非ねん架の場合は面計算モデルとも二つの共振周波数 (f_1, f_2) がある。完全ねん架の場合の共振周波数 f_0 との関係は $f_1 < f_0 < f_2$ である。

(2) 共振周波数の差 $f_2 - f_1$ は、三角配列の場合は 15.5 Hz であるが、水平配列の場合は 54 Hz と非常に大きい。

図 10 受電端における正相電圧(三相 1 回線)

Fig. 10. Positive-phase-sequence voltage at receiving end.

Fig. 11. Application limit of this calculating method (with ground wire).

(3) 二つの配列とも、共振周波数における正相電圧の値はほとんど等しい。

特に、(2)に関しては、三角配列は完全ねん架とみなした対称配列に近い配置なので、 f_0 と f_1 および f_2 とのずれも小さい。水平配列の場合は不平衡の度合いが大きいためずれが大きくなる。

なお、架空地線を含めた解析では、第 2 章で述べたように 4 端子定数行列の計算で収束が悪くなる場合が生じる。本論文では、入力端に平衡三相電圧 1 V を印加したと仮定したので、入力端の正相電圧は 1 V、零相電圧および逆相電圧はともに 0 V であり、架空地線電圧 V_g も 0 V である。ところで、〈3・3〉節の計算方法で(18)式の入力端電圧 $[E]_A'$ を計算すると、周波数と線路長により V_g' が 0 V とみなせない場合が生じる。図 11 は $V_g' > 10^{-3}$ V となる場合を、計算不安定領域として、本計算方法の適用限界を明示したものである。この V_g' が 10^{-3} V の線上における正相

電圧は 1 V であり、零相電圧と逆相電圧は、ともに 10^{-3} V 以下である。

5. あとがき

非ねん架送電線の高調波伝搬特性の解析は、多線系系分布定数回路となるため複雑な計算を必要とする。本稿で述べた解析方法は、系統を長さ方向に分割して集中定数回路として取り扱う方法と比較して

(1) 分割区間数の決定方法

(2) 各区間の集中回路の表現方法

といった点を考慮しなくてよい点が特徴となっている。

また、この解析方法の適用計算例より、非ねん架三相長距離送電線における高調波伝搬特性は、正相回路(完全ねん架)における特性と比較して

(1) 三相 2 回線の場合には架空地線の影響はほとんど無視できる。

(2) 非ねん架の影響は、線路が三相不平衡となるため、共振点付近ではかなり現れる。特に、逆相電圧が正相電圧より大きくなる場合がある。また、1 回線で水平配列の場合には非ねん架の影響が顕著である。

なお、電気所ではコンデンサなどの調相設備を使用しているが、この影響は考慮しなかった。しかし、本稿で用いた解析方法を用いることにより、同様に計算できる。

終わりに、本研究を進めるに当たって御指導いただいた京都大学上之園親佐名誉教授と、木嶋 昭教授に感謝の意を表します。また、貴重な御助言をいただいた、本学北島憲之教授に謝意を表します。

(昭和 58 年 10 月 20 日受付、同 59 年 7 月 24 日再受付)

文 献

- (1) 山口:「電力系統の高調波とその対策」電学誌 95, 287 (昭 50-4)
- (2) 井上:「配電線負荷の第 5 調波電流発生源と負荷の等価回路の推定法」電学誌 B 101, 451 (昭 56-8)
- (3) 井上:「電力系統の高調波伝搬特性に関する一考察」電学誌 B 103, 459 (昭 58-7)
- (4) 後沢:「無ねん架送電線高調波伝送特性」電学誌 82, 342 (昭 37-3)
- (5) 酒井・森・岸野:「多線系系への四端子回路網理論の適用による AT き電回路の解析」電学誌 B 94, 351 (昭 49-7)
- (6) 酒井・森:「四端子回路網理論の多線系系化と同軸ケーブルき電方式の回路解析」電学誌 B 95, 315 (昭 50-7)
- (7) 森・大矢・酒井:「多線系系分布定数回路の一解析法」昭 57 電気学会全大 No. 1171
- (8) 電気学会・電子通信学会:誘導調査特別委員会報告書「電磁誘導に関する最新の動向と課題」22 (昭 54-4)
- (9) W.D. Stevenson: Elements of Power System Analysis McGRAW-HILL, Inc. 76 (1962)
- (10) J.R. Carson: "Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return", Bell system Tech. J 5, 539 (1926-10)
- (11) 文献(8)と同じ, 26 (昭 54-4)