

非ねん架 3 相送電線の高調波特性

大 矢 征 ・ 森 武 昭

Harmonic Characteristics on Untransposed Three Phase Transmission Lines

Susumu OHYA and Takeaki MORI

Abstract

Harmonic currents and voltages are observed not only on a power distribution system, but on a ultra-high voltage transmission system. These harmonic components cause serious interferences. The harmonic transmission characteristics of transposed lines can be obtained by the transmission equations of distributed constant circuits regarding a positive phase sequence circuit. Long-distance untransposed lines, however, must be treated as the distributed constant circuits of a multi-conductor system.

The authors have analyzed these multi-conductor distributed constant circuits by means of the four terminal network theory; in this analysis, the method used for solving a single-conductor system is applied to a multi-conductor system by using the matrix expression. Furthermore, the authors clarified (1) the difference of characteristics of transposed and untransposed system and (2) the effect of the overhead ground wires, by applying this analyzing method to the transmission characteristics of the harmonic voltages regarding the three phase transmission system.

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ほとんど解析されていない。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、3相は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、不平衡線路として考慮する必要がある。そこで、本論文では、わが国で現在運転されている 500 kV 系統の代表的な 3 つの送電線路

- ① 逆相順配列 3 相 2 回線
- ② 三角配列 3 相 1 回線
- ③ 水平配列 3 相 1 回線

をモデル送電線路とし、それぞれ非ねん架方式と完全ねん架方式における比較的低い周波数領域の高調波電圧および電流の伝搬特性を計算した。

非ねん架方式の計算方法は、著者らによってすでに報告されている多線条分布定数回路に 4 端子定数回路網理論を適用する方法を用いた^{5)~8)}。この計算方法は線路の途中に負荷や機器などがあっても計算が可能である。本論文では、鉄塔の接地抵抗を線路に沿って均一に分布しているコンダクタンスとみなし、架空地線を分布定数線路として扱った。

また、最近の架空地線は導電率が大きくなっており、この架空地線の有無が伝搬特性に与える影響も明らかとなっていない。

以上のことから、本論文では3つのモデル送電線路について計算機によりシミュレーションを行い、次の点を明らかにした。

- (1) 非ねん架方式と完全ねん架方式（正相回路）の特性の相違
- (2) 架空地線の影響

2. モデル送電線路と高調波特性の計算方法

2.1. モデル送電線路

わが国の超高压送電系統の中でも、最も代表的な 50 Hz, 500 kV 3 相 2 回線送電線路をモデル送電線路 ① とし、この場合の送電系統図を Fig. 1 に、線路の仕様を Table 1 に示す。A 電気所の実効値 E_a (計算では大きさ 1 とした) の対称 3 相高調波電圧源が生じたものとして解析を行った。なお、定電流源についても同様の方法により解析を行うことができる。また、Fig. 2 は送電線と架空地線の配置を示し、Fig. 2(a) は 2 回線を逆相順に配置した場合である。(b), (c) はそれぞれ、3 相 1 回線の三角配列と水平配列の場合であり、これらをモデル ② とモデル ③ とする。3 相 1 回線の場合の線路仕様は、導体配置を除いてモデル ① と同一である。

なお、次節以降で述べる線路定数と高調波特性の求め方は、モデル ① について述べているが、モデル ② と ③ についても同様の方法で計算することができる。

2.2. 線路定数

非ねん架方式と完全ねん架方式の 2 つの計算方法により高調波に関する伝搬特性を求めるに際して、まず、基本的計算要素となる線路定数を決定しなければならない。以下にその決定方法について述べる。

(1) 内部インピーダンス

高調波における内部インピーダンスは表皮効果を見做することができない。電線 1 条の 1 km 当りの直流抵抗を R_0 [Ω/km]、内部直流インダクタンスを L_0 [H/km] とすると、周波数 f における電線 i の線路抵抗 R_i とインダクタンス L_i は次式により計算できる⁹⁾。

$$R_i = \frac{mr}{2} \cdot \frac{\text{ber}(mr) \cdot \text{bei}'(mr)}{(\text{ber}'(mr))^2} * \frac{-\text{bei}(mr) \cdot \text{ber}'(mr)}{+(\text{bei}'(mr))^2} \cdot R_0 \quad (1)$$

$$L_i = \frac{4}{mr} \cdot \frac{\text{ber}(mr) \cdot \text{ber}'(mr)}{(\text{ber}'(mr))^2} * \frac{+\text{bei}(mr) \cdot \text{bei}'(mr)}{+(\text{bei}'(mr))^2} \cdot L_0 \quad (2)$$

ここで、 $mr = \sqrt{2\pi\mu_0\mu_s\chi f r^2} \approx 0.0513 \sqrt{\mu_s f / R_0}$ 、 μ_0 は真空の透磁率、 μ_s は電線の比透磁率、 χ は電線の導電率、 r は電線半径である。また、ber, bei は 0 次の変形ベッセル関数の実部、虚部を表し、ber', bei' はこれらの微分を表す。

(2) 線路定数の行列表示

Fig. 1 に示すように、2 回線の場合の線路部は架空地線を含めて 8 本の電線がある。これらを多線条系大地帰路回路として取り扱う場合、線路部のインピーダ

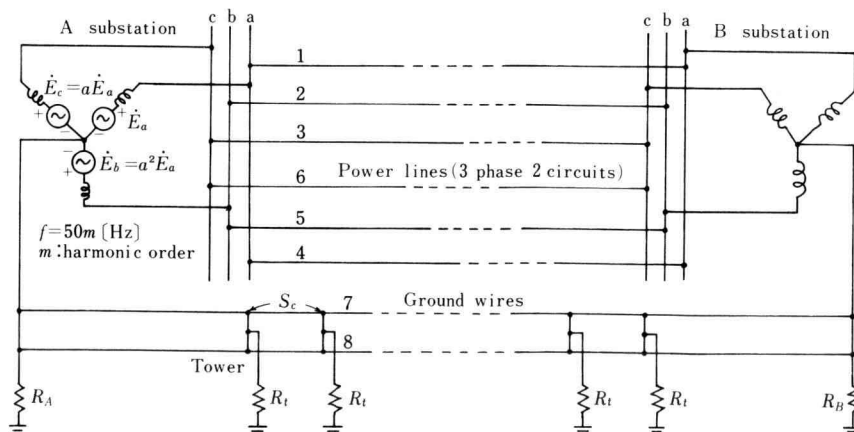


Fig. 1 Schematic diagram of transmission system (3 phase 2 circuits)

Table 1 Specification of model transmission lines

Item		Calculating Condition
Power line		
S : nominal cross-sectional area	[mm ²]	610
R_0 : d.c. resistance	[Ω /km]	0.0474
r : radius	[mm]	17.1
n : number of multi-conductors	[lines]	4
d : distance of multi-conductors	[m]	0.4
Overhead ground wire		
S_g : nominal cross-sectional area	[mm ²]	160
R_g : d.c. resistance	[Ω /km]	0.166
r_g : radius	[mm]	10.5
n_g : number of ground wires	[lines]	2
Line condition		
l : total length of transmission lines	[km]	100
S_c : average span length between towers	[m]	400
R_t : earth resistance of tower	[Ω]	15
A substation		
Z_{0A} : zero-phase-sequence impedance	[Ω]	j 22.72
Z_{1A} : positive-phase-sequence impedance	[Ω]	j 21.80
R_A : earth resistance	[Ω]	0.1
B substation		
Z_{0B} : zero-phase-sequence impedance	[Ω]	j 17.08
Z_{1B} : positive-phase-sequence impedance	[Ω]	j 14.30
R_B : earth resistance	[Ω]	0.1
σ : earth conductivity	[S/m]	0.01
Arrangement of conductors		cf. Fig. 2

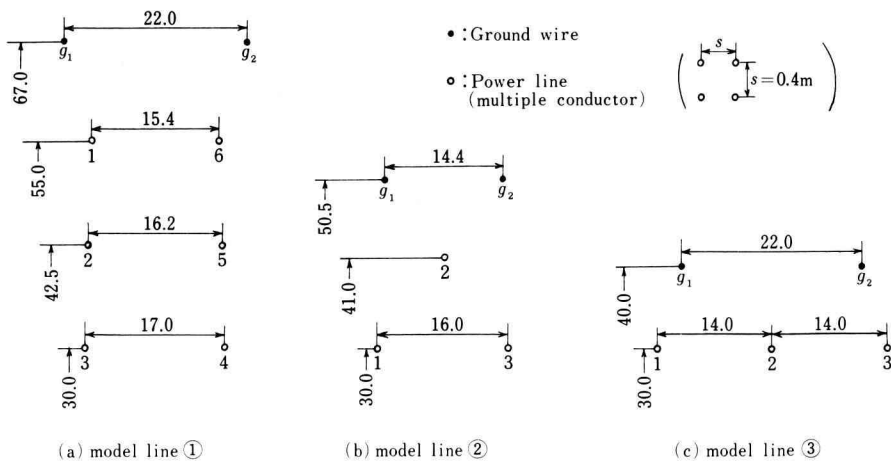


Fig. 2 Lines configuration (unit [m])

ンス行列とアドミタンス行列は8行8列の行列となる。

電線半径(導体数 $n \geq 2$ の場合は等価半径)を r_i [m], 周波数を f [Hz], 大地の導電率を σ [S/m] とし, 電線 i の水平位置と垂直位置を x_i, h_i とする。電線 i の自己インピーダンス Z_{ii} と, 電線 i, j 間の相互インピーダンス Z_{ij} は Carson 氏の式¹⁰⁾を用いて, それぞれ (3), (4) 式で計算できる。

$$Z_{ij} = \frac{R_i}{n} + \omega \left\{ j \frac{L_i}{n} + j2 \ln \frac{2h_i}{r_i} + 4j(2h_i, 0) \right\} \times 10^{-4} [\Omega/\text{km}] \quad (3)$$

$$Z_{ij} = \omega \left\{ j2 \ln \frac{\rho_{ij+}}{\rho_{ij-}} + 4j(h'_i + h'_j, |x'_i - x'_j|) \right\} \times 10^{-4} [\Omega/\text{km}] \quad (4)$$

ここで, $\rho_{ij+} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (h_i + h_j)^2}$,

$$\rho_{ij-} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (h_i - h_j)^2}$$

であり, ダッシュ記号のついたものは, 各値を $\sqrt{4\pi\omega\sigma} \times 10^{-7}$ 倍した値である。また, $j(p, q)$ は $r = \sqrt{p^2 + q^2}$, $\theta = \tan^{-1} q/p$ としたとき, r, θ に関する無限級数で表現される¹⁰⁾。

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行7列で表すことができる。

アドミタンス行列 $[Y]$ の虚数部は, 電位係数行列 $[P]$ の各要素を (5), (6) 式から求め, $[Z]$ と同様に架空地線を等価1条に置換して7行7列とし, この行列の逆行列に ω を乗ずることにより求まる。

$$P_{ii} = 2 \ln \frac{2h_i}{r_i} \times 9 \times 10^6 \quad [\text{S}/\text{km}] \quad (5)$$

$$P_{ij} = 2 \ln \frac{\rho_{ij+}}{\rho_{ij-}} \times 9 \times 10^6 \quad [\text{S}/\text{km}] \quad (6)$$

線路部分の漏れコンダクタンスは無視できるので, アドミタンス行列の実数部は, 鉄塔の接地抵抗のみを考慮すればよい。いま, 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_{77} は分布定数とみなすことができるので次式となる。

$$g_{77} = \frac{1000}{S_c R_t} \quad [\text{S}/\text{km}] \quad (7)$$

以上のような方法で求めた行列 $[Z]$, $[Y]$ はそれぞれ対称行列となり, 50 Hz におけるこれらの値を Table 2 に示す。

(3) 正相回路としての線路定数

Table 2 Impedance matrix $[Z]$ and admittance matrix $[Y]$ of 3 phase 2 circuits transmission lines at 50Hz. (symmetric matrix)

(a) Impedance matrix $[Z]$ [$\text{m}\Omega/\text{km}$]

	1	2	3	4	5	6	7
1	56.2+j541	44.5+j276	45.1+j232	45.0+j221	44.5+j246	44.0+j264	43.5+j260
2		57.3+j540	45.6+j275	45.6+j243	45.0+j259	44.5+j246	44.0+j227
3			58.5+j539	46.2+j255	45.6+j243	45.0+j221	44.5+j204
4				58.5+j539	45.6+j275	45.1+j232	44.5+j204
5					57.3+j540	44.5+j276	44.0+j227
6						56.2+j541	43.5+j260
7							126.0+j491

(b) Admittance matrix $[Y]$ [$\mu\text{S}/\text{km}$]

	1	2	3	4	5	6	7
1	0+j3.56	0-j0.709	0-j0.222	0-j0.127	0-j0.300	0-j0.546	0-j0.382
2		0+j3.65	0-j0.710	0-j0.281	0-j0.429	0-j0.300	0-j0.136
3			0+j3.54	0-j0.471	0-j0.281	0-j0.127	0-j0.064
4				0+j3.54	0-j0.710	0-j0.222	0-j0.064
5					0+j3.65	0-j0.709	0-j0.136
6						0+j3.56	0-j0.382
7							167E3+j0.953

回線内および回線間において完全にねん架されている場合の、1回線当りの正相インピーダンスおよび正相アドミタンスは、回線内の等価線間距離を D_e 、平均地上高を h_e とすると次式で表される。

$$\dot{z} = \frac{R_i}{n} + j\omega \left\{ \frac{L_i}{2n} + 2 \ln \frac{2h_e D_e}{r_i \sqrt{4h_e^2 + D_e^2}} \right\} \times 10^{-4} \quad [\Omega/\text{km}] \quad (8)$$

$$\dot{y} = \frac{j\omega}{2 \ln \frac{2h_e D_e}{r_i \sqrt{4h_e^2 + D_e^2}}} \times 9 \times 10^6 \quad [\text{S}/\text{km}] \quad (9)$$

2.3. 高調波特性の計算方法

(1) 非ねん架を考慮した計算方法

前節で示した多線条分布定数線路のインピーダンス行列とアドミタンス行列を用いて、Fig. 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端子定数行列を求める。線路部分全体の4端子定数行列は、1区間当りの行列の縦続接続として求める。また、50 Hzにおける電気所インピーダンスの値は Table 1 に示すように対称分成分で与えられているので、対称座標法により変換行列を用いて各相ごとの値に変換し、4端子定数行列とする。こうして、系統全体の4端子定数行列が決定できるので、Fig. 3(a)に示す端末の境界

条件、すなわち、対称3相高調波電圧源の行列 $[E]_A$ と B 電気所の $[E]_B$ をあてはめて、受電端の電位行列 $[E]_R$ と電流行列 $[I]_R$ を求める。 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式の関係で与えられる。

$$\begin{bmatrix} [E]_x \\ [I]_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [A]_u & [B]_u \\ [C]_u & [D]_u \end{bmatrix}^{N-N_x} \begin{bmatrix} [E]_R \\ [I]_R \end{bmatrix} \quad (10)$$

送電端の電位行列 $[E]_s$ と電流行列 $[I]_s$ も (10) 式より求め、これらの行列と A 電気所の4端子定数行列から求まる電位行列は、先に与えた境界条件を満足していなければならない。

3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。

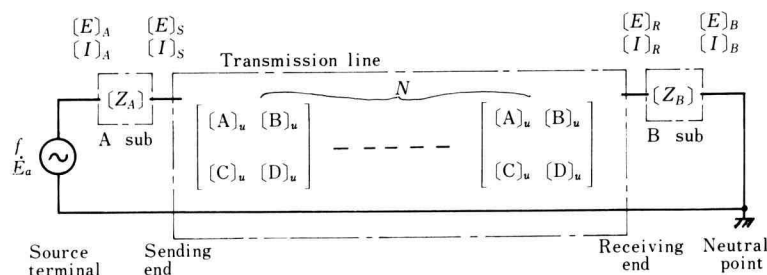
(2) 完全ねん架の場合(正相回路)の計算方法

Fig. 3(b)の回路における正相インピーダンス \dot{z} と正相アドミタンス \dot{y} は (8), (9) 式で与えられている。ゆえに、特性インピーダンス \dot{Z}_0 と伝搬定数 $\dot{\gamma}$ は次式で計算される。

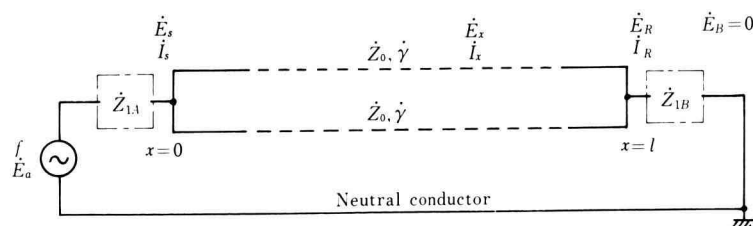
$$\dot{Z}_0 = \sqrt{\dot{z}/\dot{y}} \quad (11)$$

$$\dot{\gamma} = \sqrt{\dot{z}\dot{y}} \quad (12)$$

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



(a) Four Terminal Type



(b) Positive Phase Sequence Type(2 circuits)

Fig. 3 Two simplified circuits for numerical calculation

$$\dot{E}_x = \frac{2\dot{Z}_{1B} \cosh \dot{\gamma}(l-x)}{2(\dot{Z}_{1A} + \dot{Z}_{1B}) \cosh \dot{\gamma}l} * \frac{\dot{Z}_0 \sinh \dot{\gamma}(l-x)}{\left(\dot{Z}_0 + \frac{4\dot{Z}_{1A}\dot{Z}_{1B}}{\dot{Z}_0}\right) \sinh \dot{\gamma}l} \dot{E}_A \quad (13)$$

$$\dot{I}_x = \frac{\dot{Z}_0 \cosh \dot{\gamma}(l-x)}{2(\dot{Z}_{1A} + \dot{Z}_{1B}) \cosh \dot{\gamma}l} * \frac{+2\dot{Z}_{1B} \sinh \dot{\gamma}(l-x)}{\left(\dot{Z}_0 + \frac{4\dot{Z}_{1A}\dot{Z}_{1B}}{\dot{Z}_0}\right) \sinh \dot{\gamma}l} \dot{E}_A \quad (14)$$

で求められる。

3相1回線の場合は、(13)、(14)式の $2\dot{Z}_{1A}$ 、 $2\dot{Z}_{1B}$ をそれぞれ \dot{Z}_{1A} 、 \dot{Z}_{1B} とする。

3. 送電線の高調波特性

3.1. 3相2回線

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、数値計算を行った結果をFig. 4~Fig. 9に示す。Fig. 4は高調波電圧(周波数 f 、実効値1V)が印加されたときの、架空地線がない場合の高調波次数 m に対する受電端電圧を示す。また、Fig. 5はこの場合の共振周波数付近を拡大したものであり、架空地線がある場合の正相分と零相分についても一緒に図示した。

(1) 架空地線の影響

Fig. 5より、非ねん架の場合の正相分電圧に対する架空地線の影響は、共振周波数が約1Hz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、ほとんどない。零相分電圧は架空地線がある方が全般に1.2~2倍の大きさとなるが、正相分と比較すると10%程度であり、ほとんど無視できる。しかし、Fig. 4でわかるように、共振点付近を除くと零相分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

Fig. 4, Fig. 5から次のことが明らかとなった。

(a) 正相分電圧について

(i) 非ねん架の場合は共振点が2つ表れる。低い方の周波数を 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。

(ii) 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。

(iii) 共振周波数付近を除くと、2つの計算方法に

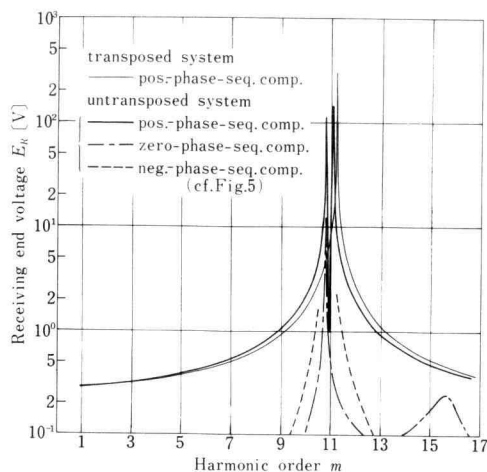


Fig. 4 Harmonic characteristics at receiving end (3 phase 2 circuits)

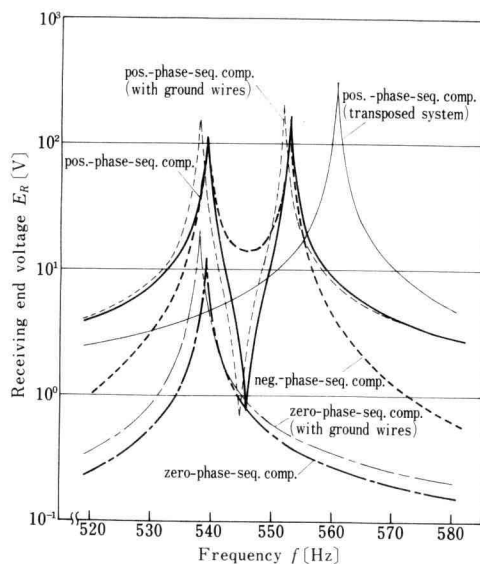


Fig. 5 Harmonic characteristics at receiving end (a part of Fig. 4)

よる差はあまりない。

(b) 零相分電圧について

f_1 で共振点をもつほか、 f_1 の約1.4倍の周波数(Fig. 4の第16調波)付近に、 f_1 での大きさの1/50ぐらいのピーク値がある。

(c) 逆相分電圧について

共振周波数は正相分電圧の共振周波数と等しい。周

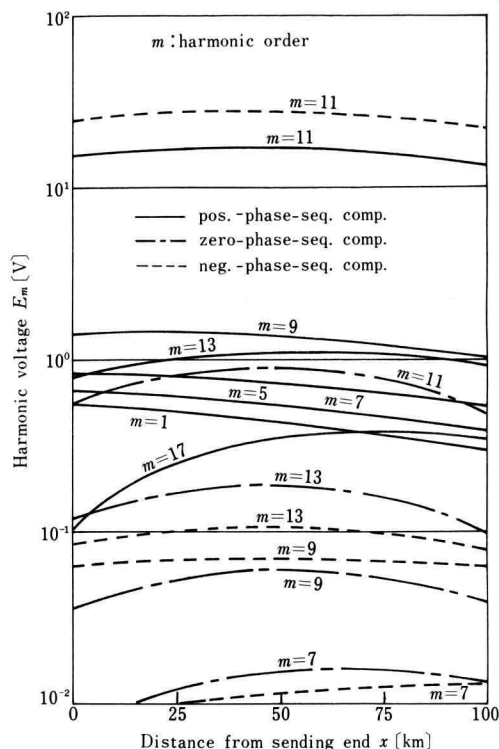


Fig. 6 Distribution of harmonic voltage

波数が $f_1 \leq f \leq f_2$ の範囲内では、逆相分電圧の方が正相分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。

上述のように非ねん架の場合に共振周波数が2つ現れるのは、Table 3 に示すように、対称成分で表示したインピーダンス行列 $[Z_{012}]$ とアドミタンス行列 $[Y_{012}]$ の非対角要素が、非ねん架のために零とならないためである。第1回路における正相分に対する非対角要素の最大値は、 $[Z_{012}]$ と $[Y_{012}]$ ではそれぞれ 8.37% と 3.71% を占める。この非対角要素の部分を零と仮定して計算すると、共振周波数は約 546 Hz となり、回線内ねん架で逆相順配列とした場合の周波数特性とほぼ一致する。この場合の共振周波数 f_0 は $f_1 < f_0 < f_2$ となる。

Fig. 6 は高調波次数 m をパラメータとして、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。

Fig. 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電流ベクトルを図示したものであ

Table 3 Impedance matrix and admittance matrix expressed by symmetrical component at 50Hz.
(3 phase 2 circuits transmission lines)

(a) Impedance matrix $[Z_{012}]$ (unit $[\Omega/\text{km}]$)

	1	2	3	4	5	6	7
1	1.818 \angle 81.1	0.022 \angle -30.0	0.022 \angle -150.0	0.000 \angle -134.1	0.005 \angle 82.2	0.005 \angle 142.2	0.235 \angle 79.2
2	0.022 \angle -150.0	0.263 \angle 87.3	0.006 \angle 150.0	0.002 \angle -60.1	0.001 \angle 0.1	0.000 \angle 144.2	0.002 \angle 29.9
3	0.022 \angle -30.0	0.006 \angle 30.0	0.263 \angle 87.3	0.002 \angle -120.1	0.000 \angle -155.8	0.001 \angle -179.9	0.002 \angle 149.9
4	0.000 \angle -90.0	0.002 \angle -120.1	0.002 \angle -60.1	0.329 \angle 87.9	0.007 \angle -30.0	0.007 \angle -150.0	0.000 \angle -90.0
5	0.005 \angle 142.2	0.001 \angle -179.9	0.000 \angle 144.2	0.007 \angle -150.0	0.295 \angle 87.6	0.052 \angle 150.0	0.016 \angle 121.1
6	0.005 \angle 82.2	0.000 \angle -155.8	0.001 \angle 0.1	0.007 \angle -30.0	0.052 \angle 30.0	0.295 \angle 87.6	0.016 \angle 61.1
7	1.407 \angle 79.2	0.010 \angle 149.9	0.010 \angle 29.9	0.000 \angle 180.0	0.096 \angle 61.1	0.096 \angle 121.1	0.507 \angle 75.6

(b) Admittance matrix $[Y_{012}]$ (unit $[\mu\text{S}/\text{km}]$)

	1	2	3	4	5	6	7
1	1.532 \angle 90	0.158 \angle 150	0.158 \angle 30	0.000 \angle -90	0.020 \angle -120	0.020 \angle -60	0.194 \angle -90
2	0.158 \angle 30	4.262 \angle 90	0.112 \angle -30	0.034 \angle 120	0.011 \angle -180	0.006 \angle 60	0.029 \angle -150
3	0.158 \angle 150	0.112 \angle -150	4.262 \angle 90	0.034 \angle 60	0.006 \angle 120	0.011 \angle 0	0.029 \angle -30
4	0.000 \angle -90	0.034 \angle 60	0.034 \angle 120	3.440 \angle 90	0.102 \angle 150	0.102 \angle 30	0.000 \angle 90
5	0.020 \angle -60	0.011 \angle 0	0.006 \angle 60	0.102 \angle 30	3.991 \angle 90	0.604 \angle -30	0.092 \angle -60
6	0.020 \angle -120	0.006 \angle 120	0.011 \angle -180	0.102 \angle 150	0.604 \angle -150	3.991 \angle 90	0.092 \angle -120
7	1.164 \angle -90	0.175 \angle -30	0.175 \angle -150	0.000 \angle 90	0.550 \angle -120	0.550 \angle -60	167E3 \angle 0

る。送電端における第13調波の電流ベクトルは、電圧ベクトルに対して 90° 進相となり、他の電流は 90° 遅相であることが明らかである。また、第13調波では、電圧、電流ともb相の値が他の相よりも小さな値となる。架空地線の電流は正相分電流に対して、50 Hzで約6%、第5調波で約4~7%、第13調波で約24~32%である。しかし、架空地線の電圧は正相分電圧に対して0.01%以下と極めて小さい。

Fig. 8, Fig. 9は同一条件で計算したときの受電端における正相分電流の高調波特性と、送電端からの距離に対する高調波電流分布を示す。Fig. 4とFig. 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、正相分、零相分とも電圧の高調波特性と同様の傾向を示す。

3.2. 3相1回線

3相1回線の場合も、全体としての傾向は3相2回線におけるFig. 4とほとんど同じ傾向を示した。そこで、Fig. 5に対応して共振点付近を拡大して示すとFig. 10の通りである。Fig. 10(3相1回線)をFig. 5(3相2回線)と対比すると、ほとんど同じような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

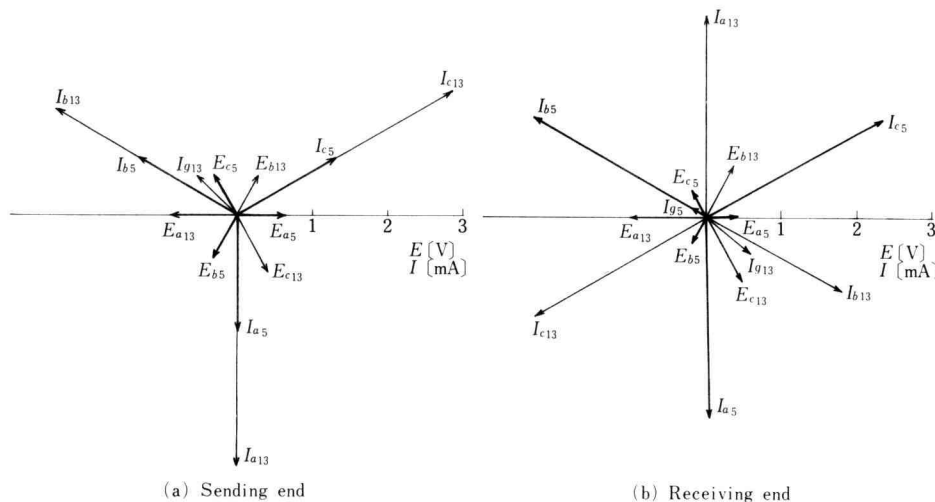


Fig. 7 5th and 13th order vector diagram (model line ①)

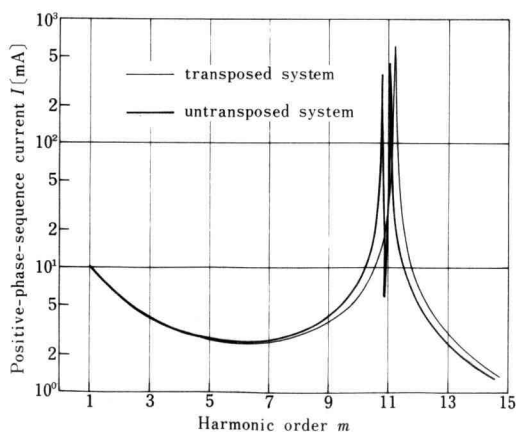


Fig. 8 Harmonic characteristics of positive phase sequence current at receiving end

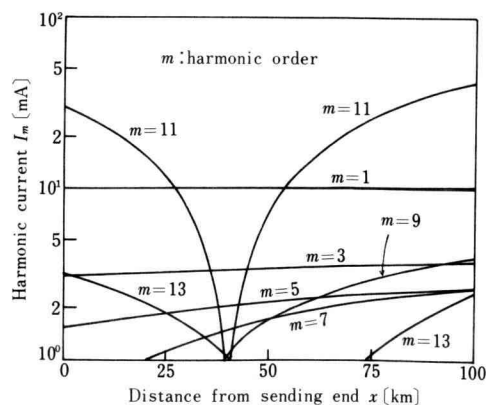


Fig. 9 Distribution of harmonic current

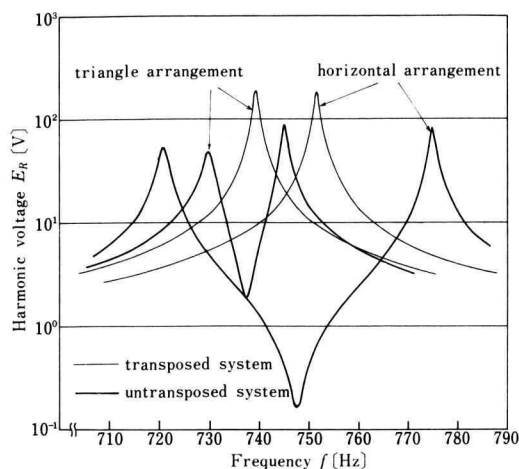


Fig.10 Harmonic voltage at receiving end (3 phase 1 circuit)

れは、電気所インピーダンスが等しくても、線路のインピーダンスの影響によるものと思われる。

つぎに三角配列(モデル②)と水平配列(モデル③)について比較すると、次のような特徴があげられる。

(1) 非ねん架の場合はモデル②、③とも2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。

(3) 2つの配列とも、共振周波数における正相分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、共振周波数の差 $f_2 - f_0, f_0 - f_1$ はともに小さい。水平配列の場合は不平衡

Table 4 Impedance matrix and admittance matrix expressed by symmetrical component at $f=50\text{Hz}$.
(3 phase 1 circuit transmission lines)

(a) Impedance matrix of triangle arrangement (model line ②)

	1	2	3	4
1	$1.082 \angle 82.0$	$0.004 \angle -22.8$	$0.004 \angle -142.8$	$0.255 \angle 79.8$
2	$0.004 \angle -142.8$	$0.273 \angle 87.4$	$0.007 \angle 150.0$	$0.014 \angle -149.3$
3	$0.004 \angle -22.8$	$0.007 \angle 30.0$	$0.273 \angle 87.4$	$0.014 \angle -29.3$
4	$0.766 \angle 79.8$	$0.042 \angle -29.3$	$0.042 \angle -149.3$	$0.518 \angle 75.8$

(b) Admittance matrix of triangle arrangement (model line ②)

	1	2	3	4
1	$2.273 \angle 90$	$0.004 \angle -30$	$0.004 \angle -150$	$0.312 \angle -90$
2	$0.004 \angle -150$	$4.140 \angle 90$	$0.128 \angle -30$	$0.100 \angle 30$
3	$0.004 \angle -30$	$0.128 \angle -150$	$4.140 \angle 90$	$0.100 \angle 150$
4	$0.935 \angle -90$	$0.299 \angle 150$	$0.299 \angle 30$	$167\text{E}3 \angle 0$

(c) Impedance matrix of horizontal arrangement (model line ③)

	1	2	3	4
1	$1.055 \angle 81.8$	$0.015 \angle -30.1$	$0.015 \angle -150.0$	$0.263 \angle 80.0$
2	$0.015 \angle -150.0$	$0.286 \angle 87.5$	$0.029 \angle 150.0$	$0.003 \angle -150.1$
3	$0.015 \angle -30.1$	$0.029 \angle 30.0$	$0.286 \angle 87.5$	$0.003 \angle -30.1$
4	$0.789 \angle 80.0$	$0.008 \angle -30.1$	$0.008 \angle -150.1$	$0.505 \angle 75.3$

(d) Admittance matrix of horizontal arrangement (model line ③)

	1	2	3	4
1	$2.514 \angle 90$	$0.111 \angle 150$	$0.111 \angle 30$	$0.365 \angle -90$
2	$0.111 \angle 30$	$4.013 \angle 90$	$0.337 \angle -30$	$0.002 \angle -150$
3	$0.111 \angle 150$	$0.337 \angle -150$	$4.013 \angle 90$	$0.002 \angle -30$
4	$1.095 \angle -90$	$0.005 \angle -30$	$0.005 \angle -150$	$167\text{E}3 \angle 0$

の度合いが大きいためこれらの値が大きくなる。それぞれの 50 Hz におけるインピーダンス行列とアドミタンス行列の対称分表示は Table 4 のとおりである。水平配列の非対角要素は三角配列に比べて約 3~4 倍ある。

4. あとがき

3 相 2 回線と 1 回線の送電線路に高調波電圧を加えた場合について、非ねん架多線条系における計算と正相回路（完全ねん架）における計算を行い、周波数特性を求めた。まとめると次のようになる。

(1) 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に、共振点付近ではかなりある。特に、逆相分電圧は正相分電圧よりも大きくなる部分がある。また、共振点における零相分電圧値は正相分の約 1/10 である。

(3) 非ねん架の場合には、ごく近い周波数で 2 つの共振点が生じる。特に水平配列の場合には、共振周波数の差 $f_2 - f_1$ が 54 Hz であり、他のモデルの約 3.5 倍もある。

以上のように、送電線路の共振周波数付近における高調波特性を論ずる場合、本論文で取り扱った多線条系の計算方法を用いる必要がある。

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、本論文で用いた計算方法を用いることにより同様に計算できる。

おわりに、本研究を進めるに当って、御指導、御助

言をいただいた上智大学酒井洋教授、本学北島憲之教授に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 山口：「電力系統の高調波とその対策」電学誌 95, p. 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」電学論 101-B53, p. 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」電学論 103-B57, p. 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, p. 342 (昭 37-3)
- 5) 森・酒井：「対称座標法と梯子形回路論の組合せによる送電系地絡事故時の起誘導電流計算法」電学論 99-B65, p. 533 (昭 54-8)
- 6) 森・大矢・酒井：「多線条系分布定数回路の一解析法」昭 57, 電気学会全大 No. 1171
- 7) 森・大矢：「多線条系分布定数回路の一解析方法」幾徳工大紀要 B-7, p. 179 (昭 57 年)
- 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」p. 22 (昭 54-4)
- 9) W.D. Stevenson: "Elements of Power System Analysis" McGRAW HILL, Inc., p. 76 (1962)
- 10) J.R. Carson: "Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return" Bell system Tech. J., Vol. 5, p. 539 (1926-10)