

複素行列法による電力系統の高調波電流の理論的解析法 そのⅣ

日 原 良 造

Theoretical analysis of harmonic currents in ac power systems by complex method Part IV

RYOZO HIHARA

Last year the author published the theoretical analysis of harmonic currents in ac power systems by complex matrix method Part III.

Now the author reports the sequel of above stated paper, which contains as following items ;

1. The determination of input data on each power system element, which is necessary to numerical calculation.
2. The method of making main program and it's flow chart by digital computer.
(M-760/8).

1. ま え が き

昨年度複素行列法による電力系統の高調波電流分布の理論的解析法そのIII¹⁾について発表している。

今回、上述の理論にもとづく続編として、次の2項目について報告する。

- (1) 数値解析に必要な各電力系統要素の入力値の決定。
- (2) 電子計算機(M-760/8)によるメインプログラムの作成法とそのフローチャートについて。

2. モデル電力系統

詳細は第III報に述べているので、モデル系統のみ再録すると図1となる。すなわち受電変電所の総容量は300MVAで、1次、2次中性点はそれぞれ高抵抗接地式、消弧リアクトル接地式を採用している。

この変電所より亘長12kmの63KV送電系4ファイダに電力を供給している。また各ファイダに2

km間隔で10MVAの配電用変電所が6ヶ所設置されている。したがって合計24の配電用変電所と144フィーダの6.9KV配電系が接続されていることになる。

3. 3巻線変圧器の入力値決定

3.1 3巻線変圧器のインピーダンス。表1の備考に示す、3巻線変圧器1バンク分の各巻線間%インピーダンスを用いて、3バンク分の各巻線の等価%インピーダンス、およびオームインピーダンスを求めると表1となる。

3.2 供試変圧器のアドミタンス。実物大変圧器の値が直接入手出来ないので、供試変圧器のアドミタンスを実測した。その特性値を示すと表2となる。

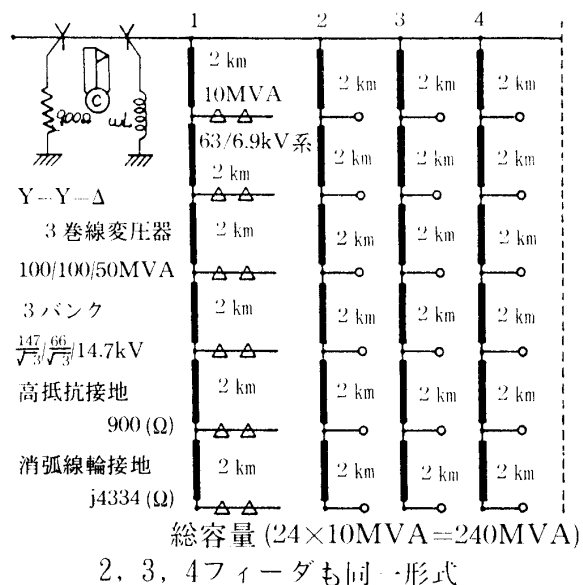


図1 モデル電力系統

表1 3巻線変圧器特性値

	容量 (MVA)	電 圧 (KV)	インピーダンス (3バンク)	
			% (100MVA)	Ω
1次	100	$147/\sqrt{3}$	j 3.33333	j 7.203
2次	100	$66/\sqrt{3}$	$-j 3.33333 \times 10^{-1}$	$-j 1.452$
3次	50	14.7	j 2.33333	$j 0.50421 \times 10^{-1}$
備考 (1バンク分)			各巻線間%インピーダンス (100MVA)	
励磁電流 (A)	1.25682		1-2	9
定格電流 (A)	392.735		2-3	6
			1-3	17

表2 供試変圧器特性

鉄心G-11, 方向性けい素鋼板	
容 量 (kVA)	1.0
巻線電圧 (V)	100
励磁アドミタンス (Y_e')(S)	$-j 0.277$
励磁アドミタンス ($Y_a' = Y_c'$)(S)	$3.809 \times 10^{-4} - j 1.906 \times 10^{-3}$
励磁アドミタンス (Y_b')(S)	$1.124 \times 10^{-4} - j 5.646 \times 10^{-4}$
磁路不平衡率	3.42155
励磁電流 (A)	153.7×10^{-3}

3.3 実物大変圧器への換算。実物大変圧器のアドミタンスは(1)式より求めている。

$$Y = Y' \times \frac{I_{OR}}{I_{OMR}} \times \frac{E_{MR}}{E_R} \quad (1)$$

ただし

I_{OR} , E_R ; 実物大変圧器の励磁電流と定格電圧

I_{OMR} , E_{MR} ; 供試変圧器の励磁電流と定格電圧

3.4 3巻変圧器の入力値。3巻変圧器の各入力値を示すと表3となる。なお変圧器1次、2次側中性点の入力値の決定法については後述する。

3.5 3巻線変圧器n次調波電流近似式の係数。第I報²⁾で詳述しているn次調波電流源の求め方に従い、供試変圧器を対象に近似式の係数を求めている。表4に近似式の係数を示している。

表3 Y-Y-Δ変圧器の入力値

諸 特 性	入 力 値
1次インピーダンス	$j 7.203 (\Omega)$
2次インピーダンス	$-j 0.1452 (\Omega)$
3次インピーダンス	$j 0.050421 (\Omega)$
気中励磁アドミタンス Y_e	$-j 8.00652 \times 10^{-3} (S)$
鉄心励磁アドミタンス $Y_a=Y_c$	$1.12335 \times 10^{-5} - j 5.56619 \times 10^{-5} (S)$
" Y_b	$3.28317 \times 10^{-6} - j 1.6268 \times 10^{-5} (S)$
1~2次間巻線比	0.44898
1~3次間巻線比	0.173205
1次中性点接地抵抗	900 (Ω)
2次中性点消弧リアクトル	$j 4.33402 \times 10^3 (\Omega)$

表4 Y-Y-Δ変圧器高調波近似式の諸係数

	正 相 分				逆 相 分			
	大 き さ		位 相		大 き さ		位 相	
第 3 調 波	a_0	-1.7482×10^1	b_0	-8.3794×10^1	a_0	-1.9707×10^1	b_0	8.6265×10^2
	a_1	5.4767×10^{-1}	b_1	3.8287×10^0	a_1	6.1346×10^{-1}	b_1	-2.4566×10^1
	a_2	-1.5195×10^{-4}	b_2	-1.3373×10^{-2}	a_2	1.8928×10^{-3}	b_2	2.9115×10^{-2}
	a_3	-1.4263×10^{-4}	b_3	-1.0235×10^{-3}	a_3	-1.6346×10^{-4}	b_3	6.8370×10^{-3}
	a_4	1.3568×10^{-6}	b_4	1.1514×10^{-5}	a_4	1.5176×10^{-6}	b_4	-6.7476×10^{-5}
	a_5	3.3979×10^{-10}	b_5	-2.0508×10^{-9}	a_5	5.7899×10^{-10}	b_5	-1.7350×10^{-8}
	a_6	-2.8960×10^{-11}	b_6	-2.4902×10^{-10}	a_6	-3.2814×10^{-11}	b_6	1.5097×10^{-9}
第 5 調 波	a_0	-2.9641×10^1	b_0	6.9593×10^2	a_0	-2.8466×10^1	b_0	6.3593×10^2
	a_1	9.3764×10^{-1}	b_1	-1.5124×10^1	a_1	9.3764×10^{-1}	b_1	-1.5124×10^1
	a_2	-1.2757×10^{-3}	b_2	2.9441×10^{-2}	a_2	-1.2757×10^{-3}	b_2	2.9441×10^{-2}
	a_3	-2.4974×10^{-4}	b_3	3.9606×10^{-3}	a_3	-2.4974×10^{-4}	b_3	3.9606×10^{-3}
	a_4	2.5516×10^{-6}	b_4	-3.9207×10^{-5}	a_4	2.5516×10^{-6}	b_4	-3.9207×10^{-5}
	a_5	1.9030×10^{-10}	b_5	-3.9107×10^{-8}	a_5	1.9030×10^{-10}	b_5	-3.9107×10^{-8}
	a_6	-5.6062×10^{-11}	b_6	8.1686×10^{-10}	a_6	-5.6062×10^{-11}	b_6	8.1686×10^{-10}
第3調波倍率	2				2			
第5調波倍率	1				1			
励磁電流比	8.17697				8.17697			

4. 63KV送電系の入力値決定

4.1 モデル鉄塔。図2に示す通り一回線乗鉄塔で、電圧線3本と架空地線が配置されている。また電線は完全懸架されている。

4.2 使用電線。送電容量60MVAに対して、電圧線にACSR410mm²、架空地線に鋼心イ号アルミ合金線120mm²を採用している。これら電線の実用値を示すと表5となる。

4.3 電線の地上高と線間距離。図2に示す鉄塔を対象に、径間長を250mにとり標準的弛度計算式を用い、また2連式碍子長を考慮して各電線の地上高、線間距離、およびこれらの平均値を求めると表6となる。

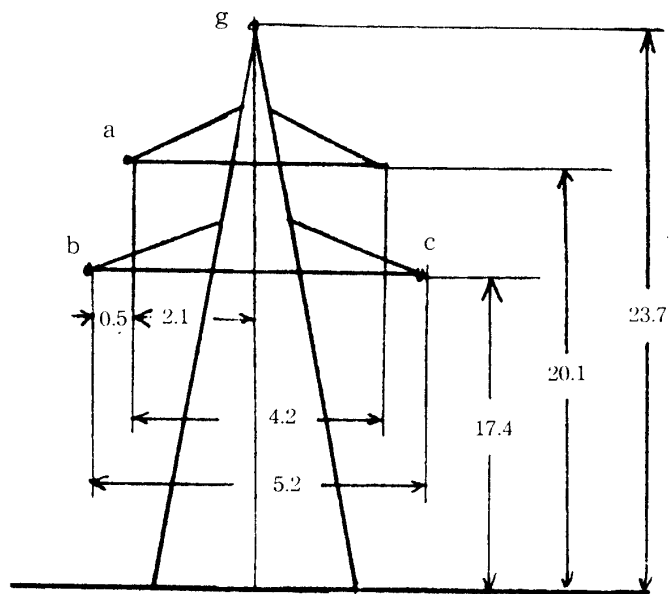


図2 63KV送電系鉄塔

表5 63KV送電線の使用電線

	電 圧 線	架 空 地 線
種 類	ACSR 410mm ²	鋼心イ号アルミ合金線 120mm ²
引張荷重 kg	13890	11150
重量 kg/m	1.673	0.8456
抵抗 Ω/km	0.0702	0.293
半径 mm	12.3704	7.62909
径間長 m	250	250
弛 度 m	2.35247	1.48122

表6 63KV送電線の電線地上高および線間距離

地 上 高 (m)		線 間 距 離 (m)		線 間 距 離 (m)	
ha	17.6317	D _{ab}	2.74591	D _{ag}	5.49768
hb	14.9317	D _{bc}	5.2	D _{bg}	8.20371
hc	14.9317	D _{ca}	5.42033	D _{cg}	8.20371
he	15.7823 (平均値)	De	4.26159 (平均値)	D _g	7.17905 (平均値)
hg	22.7125	R (半径)	0.123704 × 10 ⁻¹	R _g (半径)	0.762909 × 10 ⁻²

4.4 線路アドミタンスの決定。

(1) 静電容量係数と静電誘導係数の決定

図2において、各線電位と電荷の関係を求めると

$$\begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ V_g \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p & p' & p' & p_g' \\ p' & p & p' & p_g' \\ p' & p' & p & p_g' \\ p_g' & p_g' & p_g' & p_g \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} Q_a \\ Q_b \\ Q_c \\ Q_g \end{pmatrix} \quad (2)$$

(2) 式において $V_g = 0$ とすれば

$$\begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_s & p_s' & p_s' \\ p_s' & p_s & p_s' \\ p_s' & p_s' & p_s \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} Q_a \\ Q_b \\ Q_c \end{pmatrix} \quad (3)$$

ただし

$$p_s = p - p_k'^2 \times \frac{1}{p_k} \quad p_s' = p' - p_k'^2 \times \frac{1}{p_k}$$

$$p = 2 \log_e (2 h_e / r) \times 9 \times 10^9 \text{m/F}$$

$$p' = 2 \log_e (\sqrt{D_e^2 + 4 h_e \cdot h_g}) / D_e \times 9 \times 10^9 \text{m/F}$$

$$p_k = 2 \log_e (2 h_g / r_g) \times 9 \times 10^9 \text{m/F}$$

$$p_k' = 2 \log_e (\sqrt{D_g^2 + 4 h_e \cdot h_g}) / D_g \times 9 \times 10^9 \text{m/F}$$

(3) 式より電荷を求めると

$$\begin{pmatrix} Q_a \\ Q_b \\ Q_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_s & K_s' & K_s' \\ K_s' & K_s & K_s' \\ K_s' & K_s' & K_s \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} \quad (4)$$

ただし

$$K_s = \frac{p \cdot p_k + p' \cdot p_k - 2 p_k'^2}{(p - p')(p \cdot p_k' + 2 p' \cdot p_k - 3 p_k'^2)}$$

$$K_s' = \frac{p' \cdot p_k - p_k'^2}{(p - p')(p \cdot p_k' + 2 p' \cdot p_k - 3 p_k'^2)}$$

(4) 各種静電容量の求めかた。(4)式より

$$\left. \begin{aligned} Q_a &= (K_s + 2 K_s') V_a + (-K_s')(V_a - V_b) + (-K_s')(V_a - V_c) \\ Q_b &= (-K_s')(V_b - V_a) + (K_s + 2 K_s') V_b + (-K_s')(V_b - V_c) \\ Q_c &= (-K_s')(V_c - V_a) + (-K_s')(V_c - V_b) + (K_s + 2 K_s') V_c \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

(5) 式より C_s (対地), C_m (線間), C_w (作用) 各キャパシタンスを求めると

$$\left. \begin{aligned} C_s &= K_s + 2 K_s' \\ C_m &= -K_s' \\ C_w &= C_s + 3 C_m = K_s - K_s' \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

となる。

(3) アドミタンスの計算。(6)式より各アドミタンスを求めると

$$\left. \begin{aligned} Y &= j\omega \cdot (Cs + 2 Cm) \\ Y' &= j\omega \cdot Cm \\ Y_w &= j\omega \cdot Cw \end{aligned} \right\} \text{S/km} \quad (7)$$

(4) 対称分アドミタンス。(7)式に示すY, Y' より対称分アドミタンスを求めると

$$\begin{vmatrix} Y_0 \\ Y_1 \\ Y_2 \end{vmatrix} = \frac{1}{3} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} Y & Y' & Y' \\ Y' & Y & Y' \\ Y' & Y' & Y \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} (Y + 2 Y') & 0 & 0 \\ 0 & (Y - Y') & 0 \\ 0 & 0 & (Y - Y') \end{vmatrix} \quad (8)$$

となる。

(5) 数値計算結果。表5, 表6の数値を(6), (7), (8)式に代入して, それぞれの値を計算すると表7となる。

(6) 線路アドミタンスの入力値。表7から対称分線路アドミタンス入力値行列を作成すると表8となる。

(7) 消弧リアクトル容量決定。亘長12kmの4ファイダの対地静電容量Csに対応する消弧線輪のリアクトル値を求めると

$$j\omega L = \frac{1}{j 12 \cdot \omega \cdot Cs} \quad (9)$$

となる。(9)式より $j\omega L = j 4.334 \times 10^3 (\Omega)$ が得られ, また受電変電所1次側中性点の抵抗は900 (Ω) にとっている。

表7 63KV線路静電容量, アドミタンス計算値

静電容量 (F/km)		アドミタンス (S/km)	
Ks	8.04967×10^{-9}	$Y_w = j 2 \pi f \cdot Cw$	$j 2.99216 \times 10^{-6}$
Ks'	-1.47468×10^{-9}	$Y_0 = j 2 \pi f \cdot Cs = Y + 2 Y'$	$j 1.60231 \times 10^{-6}$
$Cs = Ks + 2Ks'$	5.10031×10^{-9}	$Y = j 2 \pi f \cdot (Cs + 2 Cm)$	$j 2.52888 \times 10^{-6}$
$Cm = -Ks'$	1.47468×10^{-9}	$Y' = -j 2 \pi f \cdot Cm$	$-j 0.463284 \times 10^{-6}$
$Cw = K - Ks'$	9.52435×10^{-9}	$Y_1 = Y_2 = Y - Y'$	$j 2.99216 \times 10^{-6}$

表8 対称分線路アドミタンス入力値行列 (S/km)

$0 + j 0.160231 \times 10^{-5}$	0	0
0	$0 + j 0.229216 \times 10^{-5}$	0
0	0	$0 + j 0.299216 \times 10^{-5}$

4. 5 線路インピーダンスの求め方。

(1) インダクタンスとインピーダンス。完全燃架した電圧線の大地帰路自己ならびに相互インダクタンス, およびそれぞれのインピーダンスは

$$\begin{aligned}
 L &= 0.1 + 0.4605 \log_{10} 2 \text{ He}/r && \text{mH/km} \\
 M &= 0.05 + 0.4605 \log_{10} 2 \text{ He}/D_e && \text{''} \\
 Z &= R_a + R_g + j\omega L && \Omega/\text{km} \\
 Z_M &= R_g + j\omega M && \text{''}
 \end{aligned} \tag{10}$$

となる。ただし $\text{He} = 300\text{m}$, $R_a = 0.0702 \Omega/\text{km}$, $R_g = 0.11 \Omega/\text{km}$

(2) 対称分インピーダンス。Z, Z_M より各対称分インピーダンスを求めると

$$\begin{vmatrix} Z_0 \\ Z_1 \\ Z_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} (Z + 2Z_M) & 0 & 0 \\ 0 & (Z - Z_M) & 0 \\ 0 & 0 & (Z - Z_M) \end{vmatrix} \tag{11}$$

となる。

(3) 数値計算結果。(10), (11)式に表5, 表6の数値を代入すると表9となる。

(4) 対称分線路インピーダンス入力値。表9より線路インピーダンスの入力値行列を求めると表10となる。

表9 63KV線路インダクタンス, インピーダンス計算値 (/km)

$L = 2.25708 \times 10^{-3} \text{ (H)}$	$M = 1.03942 \times 10^{-3} \text{ (H)}$
$Z = 0.1802 + j 0.709309 \text{ (}\Omega\text{)}$	$Z_M = 0.11 + j 0.326543 \text{ (}\Omega\text{)}$
$Z_0 = Z + 2Z_M = 0.4002 + j 1.3624 \text{ (}\Omega\text{)}$	$Z_1 = Z_2 = Z - Z_M = 0.0702 + j 0.382766 \text{ (}\Omega\text{)}$

表10 対称分線路インピーダンス入力値行列 (/km)

$0.4002 + j 1.3624$	0	0
0	$0.0702 + j 0.382766$	0
0	0	$0.0702 + j 0.382766$

5. 10MAV配電系の入力値

10MVA配電系の各要素の入力値は第I報²⁾のものを採用しているため、ここでは省略する。

6. メインプログラムの作成

第II報の理論的解析法に基づき、プログラム作成法について述べる。

6. 1 プログラム作成上の留意点。

対象モデルシステムのプログラム作成に当たり留意した点について述べる。

(1) 63KV系フィーダ分岐部を母線化して、4組のMBCR1(109, 109)~MBCR4(109, 109)行列を作成している。

(2) 10MVA配電系を63KV系化して6組のDIS1(98, 98)~DIS6(98, 98)行列を作成している。

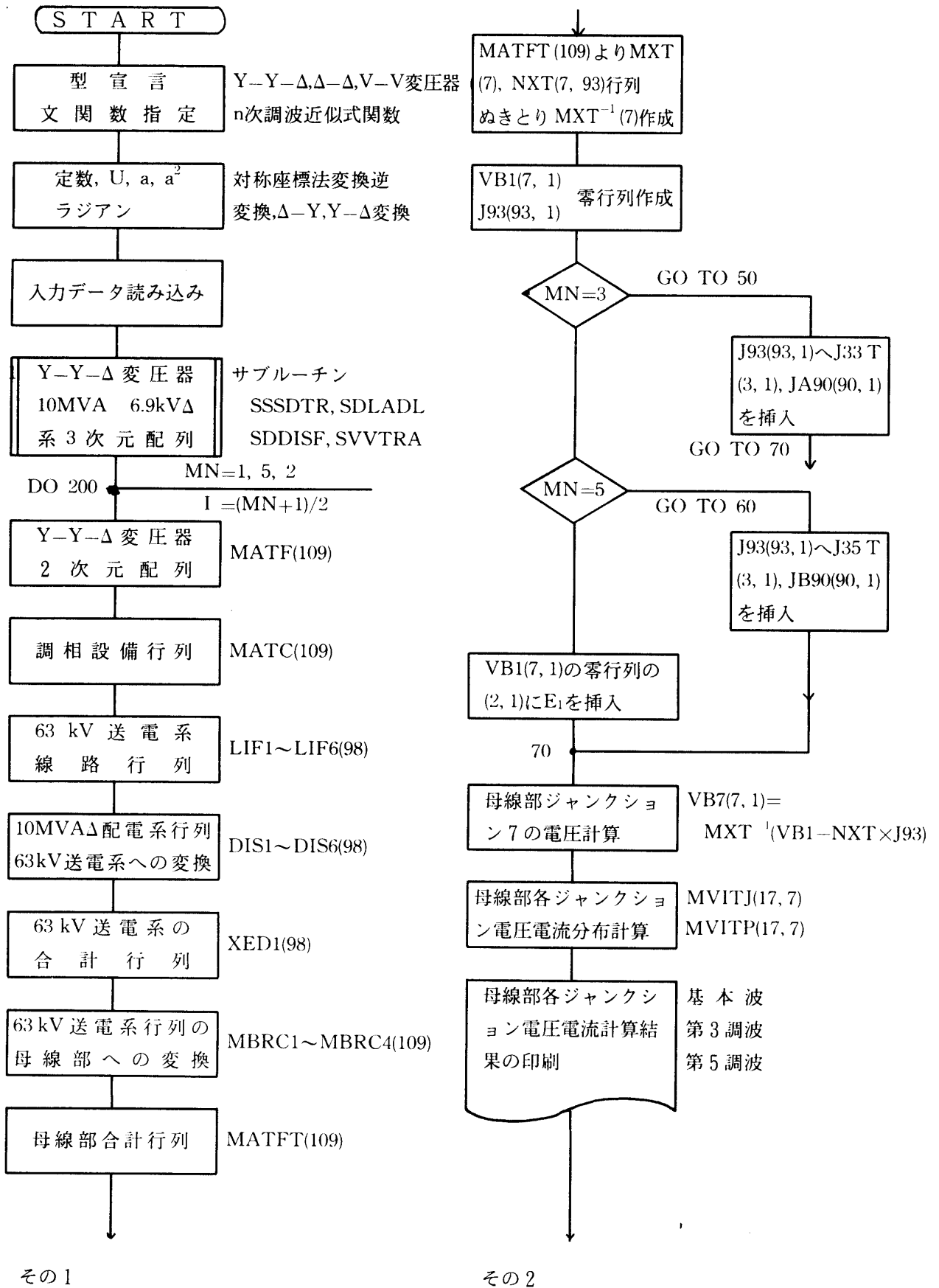


図3 フローチャート

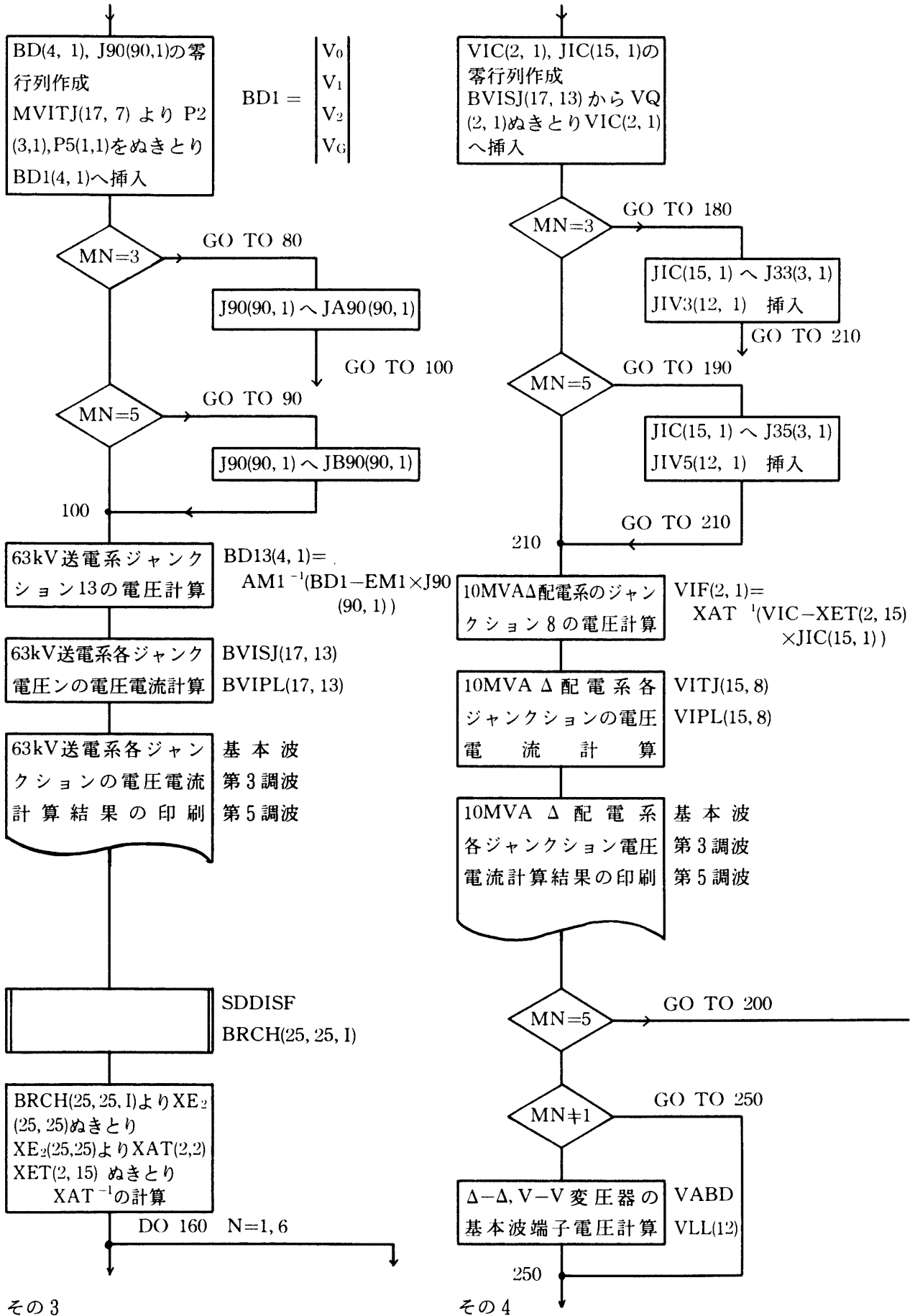
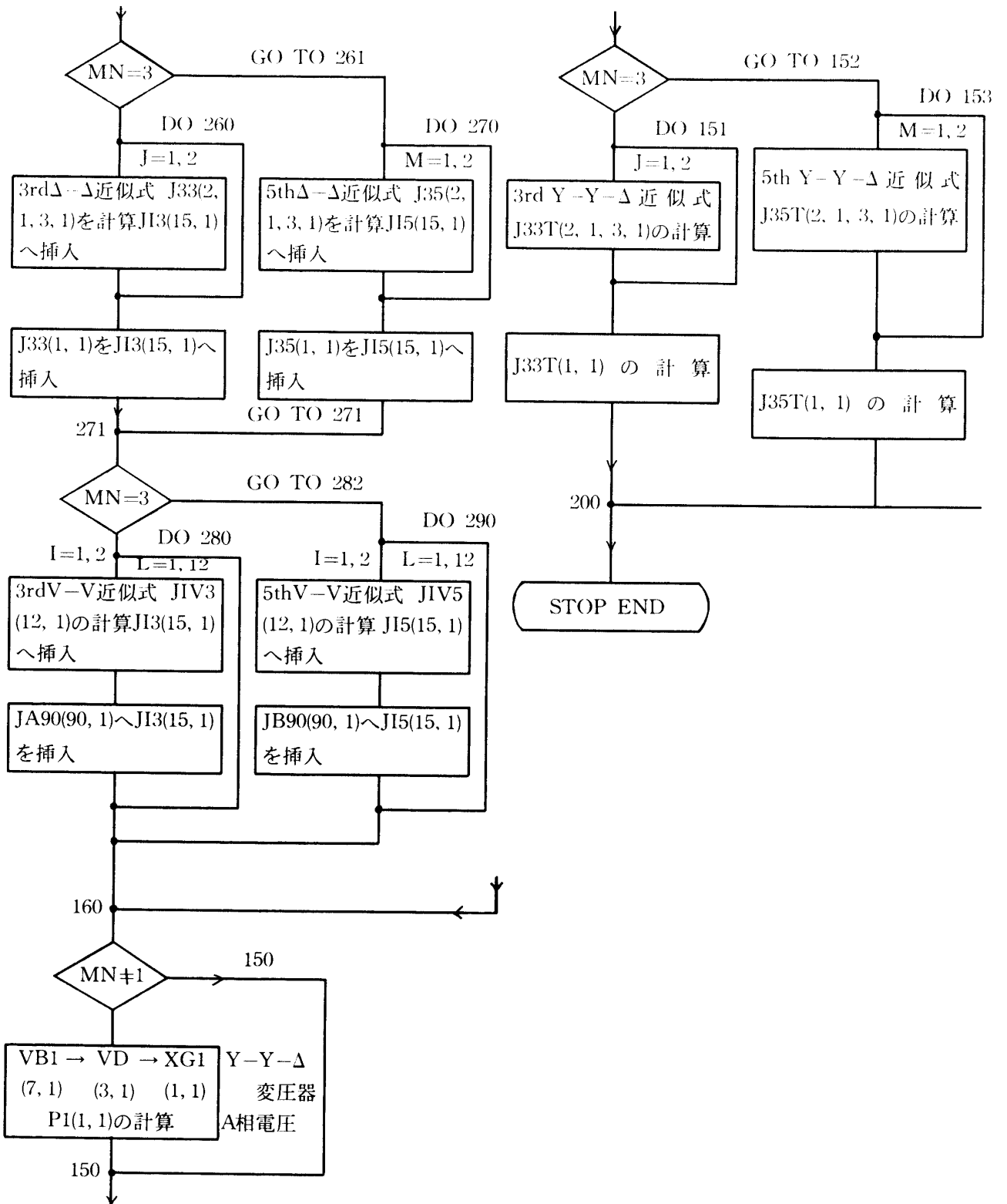


図3 フローチャート



その5

その6

図3 フローチャート

(3) DIS(98, 98) 行列の作成を容易にするため、第 I 報のメインプログラムよりサブルーチン SDDISF を新しく開発している。

(4) 上記サブルーチンと第 I 報のメインプログラムを組合せて、6 組の 10MVA 配電系の高調波電圧電流分布計算結果も印刷しうるようになっている。

6. 2 フローチャート。図 3 に示すフローチャートの概要について述べる。

(1) 型宣言、文関数指定、各種定数の指定、入力値の読み込み、サブルーチンの指定などを行った後、母線部 6 組の行列、および母線部の合成行列 MAT FT (109, 109) を作成している。

(2) 合成行列より MXT (7, 7), NXT (7, 93) を抜き取り、高調波電流源行列 J93 (93, 1) と組合せて(12)式により母線部末端の未知量を求める。

$$VB7(7, 1) = MXT^{-1} \cdot (VB1 - NXT \cdot J93) \quad (12)$$

これを元にして母線部各地点の各調波に対する電圧電流分布計算を行い、またその結果を印刷する。

(3) 63KV 系の合成行列 XED1 (98, 98) より AM1 (4, 4), EM1 (4, 90) を抜きとり、高調波電流源行列 J90 (90, 1) と組合せて(13)式で 63KV 系分岐線の末端の未知量を求める。

$$BD13(4, 1) = AM1^{-1} \cdot (BD1 - EM1 \cdot J90) \quad (13)$$

これを元にして 63KV 分岐線の各地点の各調波の電圧電流分岐計算を行い、またその結果を印刷する。

(4) サブルーチン SDDISF を用いて、3 次元配列 BRCH (25, 25, 1) より 2 次元配列 XE2 (25, 25) を抜きとる。この行列によりさらに XAT (2, 2), XET (2, 15) を抜きとる。

上記の 2 つの行列と高調波電流源行列 JIC (15, 1) と組合せて(14)式より 10MVA 配電系の末端の未知量を求める。

$$VIF(2, 1) = XAT^{-1} \cdot (VIC - XET \cdot TIC) \quad (14)$$

これを元にして 10MVA 配電系の各地点の電圧電流分布の計算を行い、またその結果を印刷する。

MN=1 の場合、10MVA 配電系の $\Delta - \Delta$ 、変圧器 1 次 AB 相端子電圧と 6 組の V-V 結線変圧器の共用相をはさむ 1 次側端子電圧 12 ケを計算する。(基本波電圧のみ)

(5) MN=1 の場合、 $\Delta - \Delta$ 、V-V 変圧器における 15 組の第 3 調波電流源を近似式を用いて決定する。これを 6 回繰返して 90 個の第 3 調波電流源を JA90 (90, 1) に格納する。

MN=3 の場合、同一手法で第 5 調波電流源 JB90 (90, 1) に格納する。

また MN=1 の場合 Y-Y- Δ 変圧器の基本波 1 次側 A 相電圧を求める。

(6) MN=1 の場合 Y-Y- Δ 変圧器の第 3 調波電流源を求めて J33T (3, 1) に格納する。MN=3 の場合、同一手法で第 5 調波電流源を J35T (3, 1) に格納する。

上述の方法でプログラムを作成しているため、全ステップ数は 769 に圧縮されている。

7. む す び

本論で述べたように、3次送電系および配電系の入力値はすべて決定され、メインプログラムも完成された。

目下本研究室で開発した複素行列処理ライブラリ (HIHARA/MATRAN) を本学の大型電子計算機 (M-760/8) 用に修正しているが、これらの完成を待って数値解析をしたいと考えている。

最後に本研究の実施にあたり、本学の電子計算機センターの石井、清水両教官の御指導、御助力に深湛なる謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 福井工業大学研究紀要, 1988 (18号), 日原良造
- 2) " " , 1986 (16号), 日原良造