

電力系統各種故障時の計算法とその応用

Calculation Method of Multi-fault Voltages and Currents in Power Systems and Its Application

磯 野 昭* 八 谷 芳 枝*
Akira Isono Yoshie Yatagaya

要 旨

ディジタル計算機を用いた電力系統の故障計算プログラムについて述べる。本プログラムにより、並行2回線送電線と1回線送電線の両方を含む系統での地絡、短絡、断線が同時に生じた場合の計算ができる。

本方式においては理想変圧器を用いて各故障点での電圧、電流の関係を満足するように対称分回路を結合することにより各故障が独立に存在する等価回路を考え、計算式を導いている。また各接続点の電圧を求める計算において計算時間とメモリを小さくするため各対称分回路電圧の計算と故障点電圧の計算に分解する。

本プログラムは、通常の故障計算のほか特殊な場合の計算も可能である。

1. 緒 言

電力系統の故障計算にディジタル計算機が用いられるようになってから、すでに10年程度経過している。これにより過去に使用されていた交流計算盤などでは困難であった複雑な故障および回路網の計算が容易になり、計算精度もはるかに向上している^{(1)~(3)}。われわれもすでに並行2回線の両回線にまたがる異相地絡計算法とその計算結果として得られる電圧、電流を用いて保護継電方式の動作判定を行なった結果について報告している⁽¹⁾⁽²⁾。

その後、1回線送電線および2回線送電線の混在している一般の電力系統における1回線および2回線の両回線にまたがる地絡、短絡、断線など通常考えられる範囲の故障が単独あるいは同時に存在しているときの故障計算プログラムを作成し、それによって得られた結果については一部すでに発表している⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

本プログラムは通常の故障計算のほか、直列コンデンサ補償系統の不平衡ギャップ放電のような特殊な場合についてもそのまま応用できる。

ここでは、計算方式の概要とその応用例について述べる。

2. 計 算 法

2.1 対称分回路の構成

故障時の電力系統を正相、逆相、零相回路に分け、並行2回線の零相回路はさらに第1回路と第2回路に分ける。おのおの回路は故障点の電圧、電流から得られる関係を利用し、故障種類に応じて4種類の結合変圧器(1:1, 1:a, 1:a²および1:2, a=e^{j2π/3})で結合し等価回路を作る。正相回路において発電機は対象とする故障に応じた単一のインピーダンスとその背後電圧で近似される。これにより故障時を接続点電圧に関する多元連立一次方程式で表現する。多元連立一次方程式は消去法で解くことができるが、2.5で述べる手法によりいくつかの小グループに分けることにより、計算時間とメモリの節約を図る。

2.2 並行2回線における零相回路の等価回路⁽⁶⁾

並行2回線の1号線に地絡故障が発生した場合

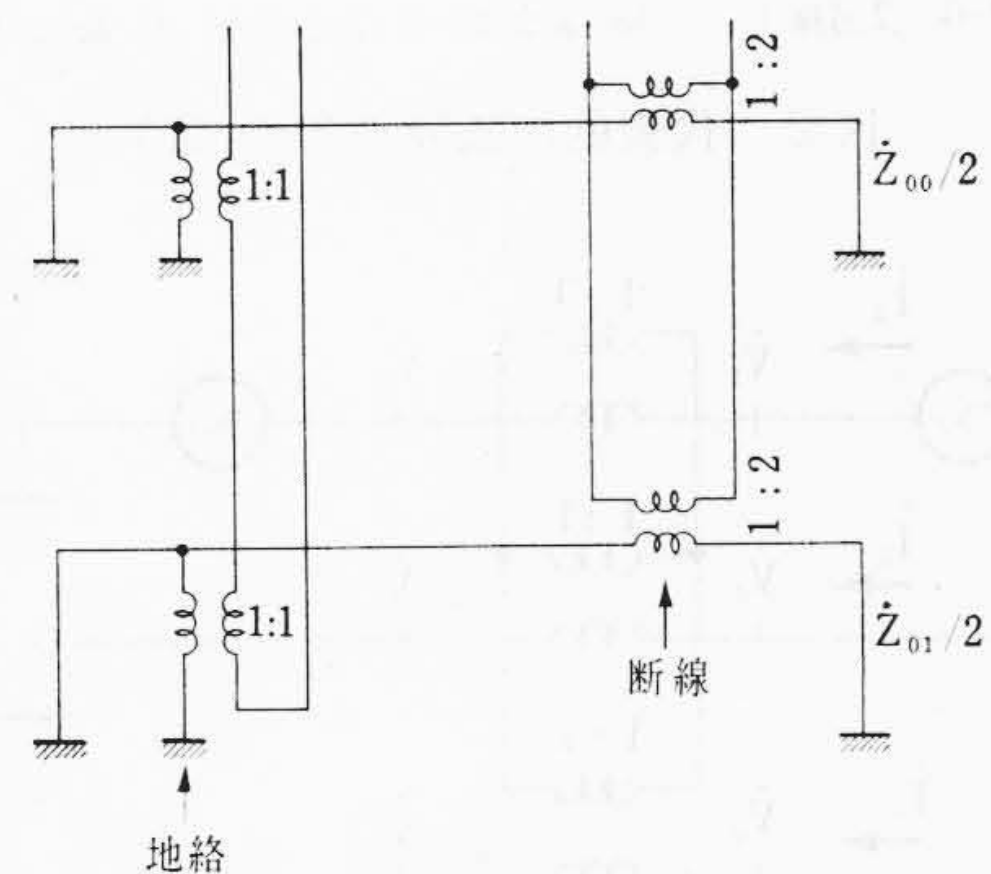
$$\dot{I}_0/2 = \dot{I}_{00} = \dot{I}_{01} \quad (1)$$

$$\dot{V}_0 = \dot{V}_{00} + \dot{V}_{01} = \dot{Z}_{00} \cdot \dot{I}_{00} + \dot{Z}_{01} \cdot \dot{I}_{01} \quad (2)$$

$$\therefore \dot{V}_0/\dot{I}_0 = (\dot{Z}_{00} + \dot{Z}_{01})/2 \quad (3)$$

ただし、 $\dot{V}_0, \dot{I}_0$: 故障点の零相電圧および電流

$\dot{V}_{00}, \dot{V}_{01}, \dot{I}_{00}, \dot{I}_{01}$: 故障点の零相第1回路および第2回路の電圧、電流



(1号線断線、地絡時)

図1 並行2回線零相回路の等価回路

$\dot{Z}_{00}, \dot{Z}_{01}$: 故障点からみた零相第1回路および第2回路のインピーダンス

同じく並行2回線の1号線に断線があった場合

$$\dot{V}_0/2 = \dot{V}_{00} = \dot{V}_{01} \quad (4)$$

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_{00} + \dot{I}_{01} = \dot{V}_{00}/\dot{Z}_{00} + \dot{V}_{01}/\dot{Z}_{01} \quad (5)$$

$$\therefore \dot{V}_0/\dot{I}_0 = 2\dot{Z}_{00} \cdot \dot{Z}_{01} / (\dot{Z}_{00} + \dot{Z}_{01}) \quad (6)$$

ただし、 $\dot{V}_0, \dot{V}_{00}, \dot{V}_{01}$: 断線箇所両端に表われる零相および零相第1回路、第2回路の電圧

$\dot{I}_0, \dot{I}_{00}, \dot{I}_{01}$: 断線箇所を流れる零相および零相第1回路、第2回路の電流

$\dot{Z}_{00}, \dot{Z}_{01}$: 断線箇所からみた零相第1回路および第2回路インピーダンス

(1)~(6)式を満足する零相回路の等価回路は結合変圧器を用いて図1のように表わされる。

2.3 対称分回路間の結合

図1に示すように結合変圧器を利用して故障点の電圧、電流からきまる関係を用いれば、一つの故障がほかの故障に制約を与えることはなく、多地点での多重故障に対しても基本的な故障種類を表わす計算式を作っておき、それらの幾つかを組合せればよい。極端な場合、並行2回線送電線の1号線、2号線、1回線送電線に対し、a, b, c各相の地絡故障とab, bc, ca相の短絡故障およびa, b, c各相の断線故障の計算式だけですべての故障を表現することができる。ここではディジタル計算機を用いる際の入力データが複雑になるのをさけるため、故障種類としては1線地絡、2線地絡および短絡、3線地絡、1線、2線および3線の断線を準備しておく。

図2に代表的な故障種類に対する対称分回路の関係を示す。図2でGは地絡、Sは短絡、Oは断線故障を示すものである。また故障

* 日立製作所日立研究所

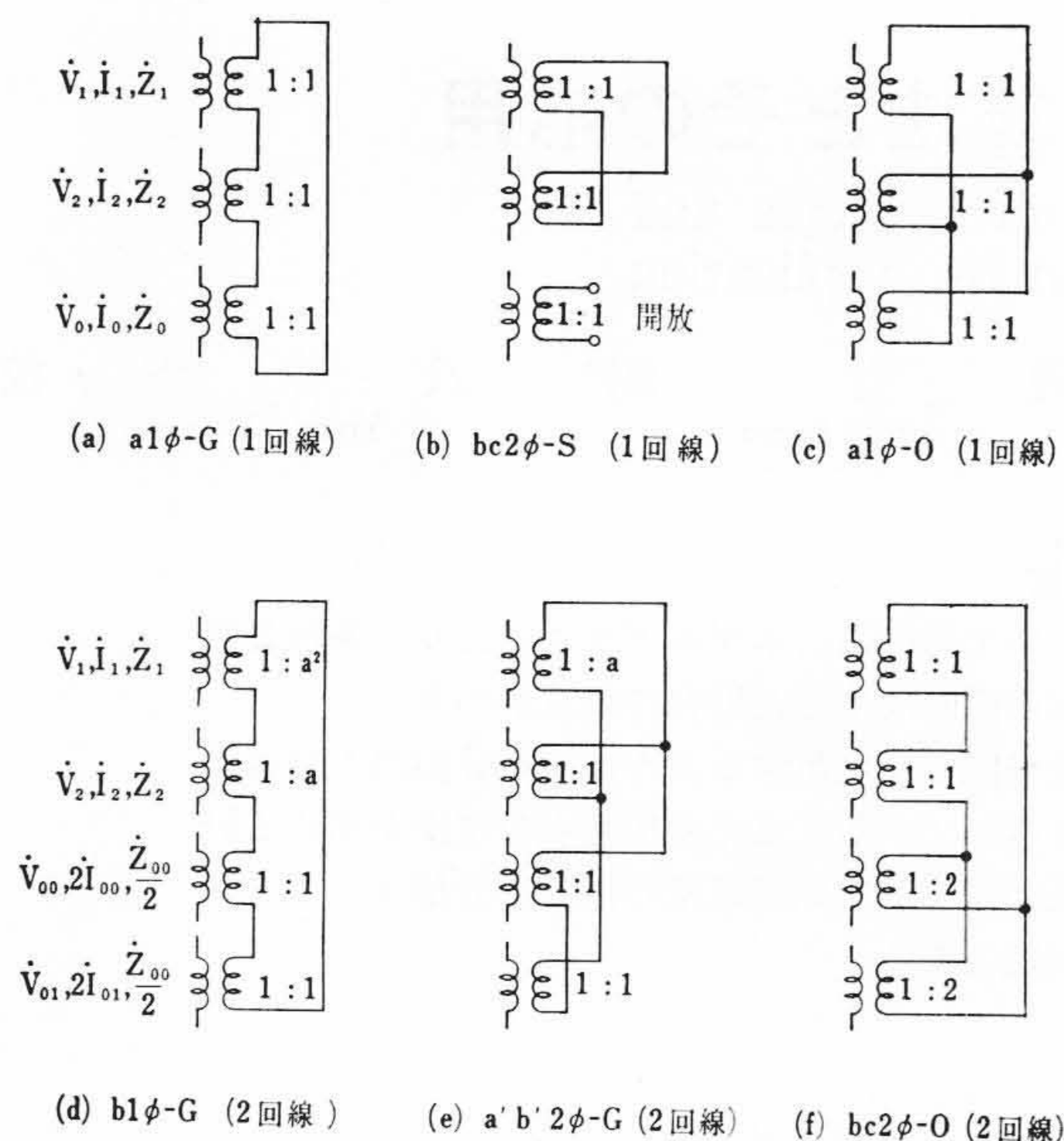


図2 代表的な故障の等価回路

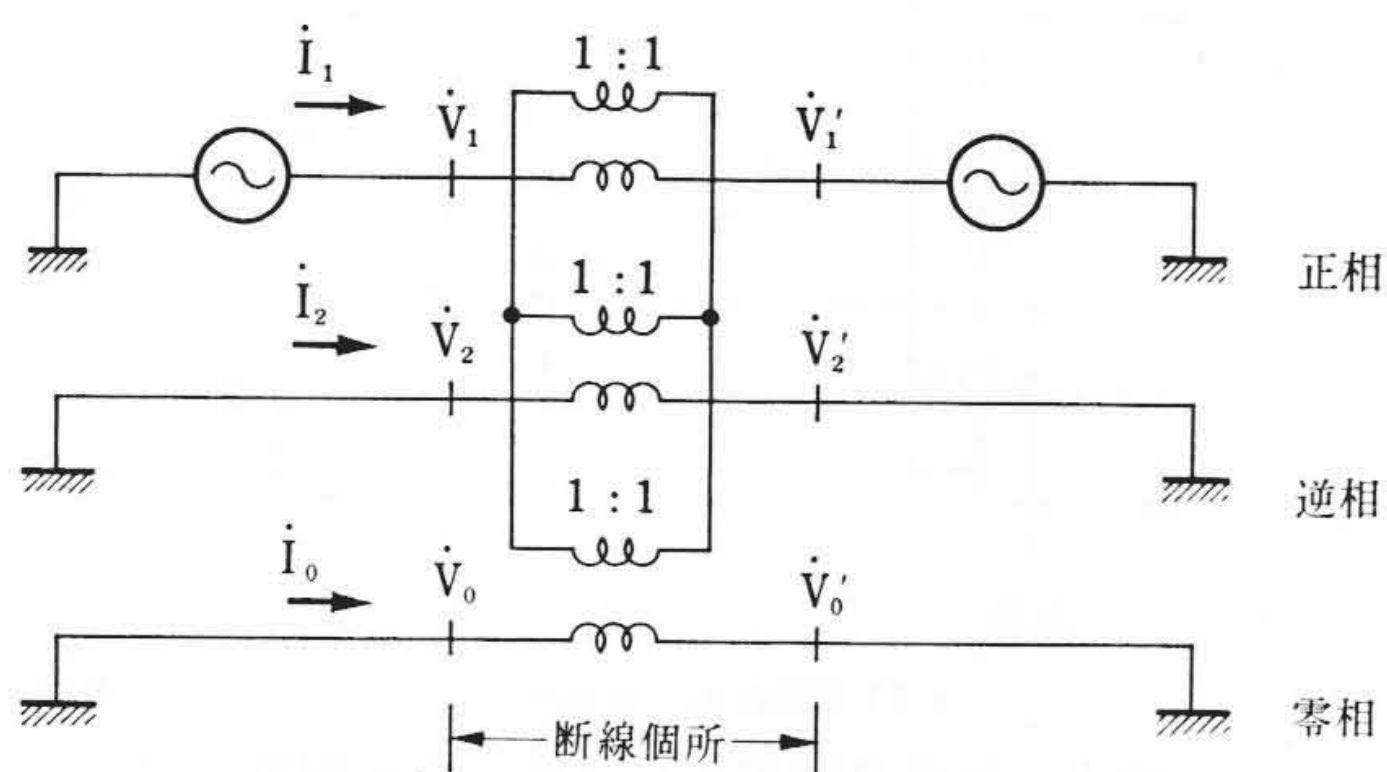


図3 1回線 a1φ-O 時の対称分回路結合法

相に「'」を付けたのは2回線送電線の2号線を示している。故障例(b)bc2φ-Oで零相回路2次が開放されているのはほかの故障種類によりこの点に零相電圧が発生することがあるからである。

2.4 接続点電圧に関する計算式

2.1で述べたように計算の主要部は接続点電圧に関する多元連立一次方程式を解くことにある。等価回路から接続点電圧に関する連立一次方程式を作る場合、接続点は(1)正相回路の発電機内部誘起電圧点、(2)故障点、(3)それ以外の点の三つのグループに分けられる。

(1)のグループは単一インピーダンスの背後電圧で近似される。したがって故障前の状態から求まる既知の値であって計算から除外される。

(3)のグループは一点に流入する電流の和がゼロになることから

$$-\left(\sum_{L=1}^N \dot{Y}_{KL}\right) \dot{V}_K + \sum_{\substack{L=1 \\ L \neq K}}^N (\dot{Y}_{KL} \dot{V}_L) = 0 \quad \dots\dots\dots (7)$$

ただし、 $\sum Y_{KL}$: 接続点Kに集まる枝路アドミッタンスの総和

Y_{KL} : 接続点KとL間のアドミッタンス

となる。連立方程式の係数行列において($\sum Y_{KL}$)は対角線要素に来るよう配列する。

(2)のグループは結合変圧器を通して流れる電流があるため(7)式は成立しない。したがって故障点については故障種類に応じて定まる故障点流出電流と各対称分回路の電圧の関係を拘束条件として与える。地絡、短絡故障については逆相回路および零相第2回路の故障点流出電流を用いて(7)式を修正しているが、これについてはすでに詳述してある⁽²⁾ので省略する。断線個所に対する修正を1回

線送電線でのa1φ-Oを例にとって説明する。

図3の等価回路から

$\dot{V}_1$ に関しては、断線個所両端の正相電圧と零相電圧が等しいという条件から

$$(\dot{V}_1 - \dot{V}_1') - (\dot{V}_0 - \dot{V}_0') = 0 \quad \dots\dots\dots (8)$$

$\dot{V}_1'$ に関しては断線個所の両端の対称分回路電流が等しいことから

$$-\left(\sum_{L=1}^N \dot{Y}_{KL}\right) \dot{V}_K + \sum_{\substack{L=1 \\ L \neq K}}^N (\dot{Y}_{KL} \dot{V}_L) + \dot{I}_1 = 0, \quad (\dot{V}_K = \dot{V}_1') \quad \dots\dots\dots (9)$$

$\dot{V}_2$ に関しては

$$(\dot{V}_2 - \dot{V}_2') - (\dot{V}_0 - \dot{V}_0') = 0 \quad \dots\dots\dots (10)$$

$\dot{V}_2'$ に関しては

$$-\left(\sum_{L=1}^N \dot{Y}_{KL}\right) \dot{V}_K + \sum_{\substack{L=1 \\ L \neq K}}^N (\dot{Y}_{KL} \dot{V}_L) + \dot{I}_2 = 0, \quad (\dot{V}_K = \dot{V}_2') \quad \dots\dots\dots (11)$$

$\dot{V}_0$ に関しては、各対称分電流の和がゼロであることから

$$\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_0 = 0$$

$\dot{V}_0'$ に関しては

$$-\left(\sum_{L=1}^N \dot{Y}_{KL}\right) \dot{V}_K + \sum_{\substack{L=1 \\ L \neq K}}^N (\dot{Y}_{KL} \dot{V}_L) + \dot{I}_0 = 0, \quad (\dot{V}_K = \dot{V}_0') \quad \dots\dots\dots (12)$$

と修正してそれぞれの電圧の係数が対角線要素になるよう配列する。ここで $\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_0$ は、 $\dot{V}_1, \dot{V}_2, \dot{V}_0$ に対応する接続点から結合変圧器に流入する電流であって

$$\dot{I}_K = -\left(\sum_{L=1}^N \dot{Y}_{KL}\right) \dot{V}_K + \sum_{\substack{L=1 \\ L \neq K}}^N (\dot{Y}_{KL} \dot{V}_L), \quad (K=1, 2, \text{または} 0) \quad \dots\dots\dots (13)$$

となり、いずれも電圧に関する一次式の形で表現される。

bc2φ-O時には、 $\dot{V}_1, \dot{V}_2, \dot{V}$ に関しては $\dot{I}_1 - \dot{I}_0 = 0, \dot{I}_2 - \dot{I}_0 = 0, (\dot{V}_1 + \dot{V}_1') + (\dot{V}_2 + \dot{V}_2') + (\dot{V}_0 - \dot{V}_0') = 0$ の関係を用いる。 $\dot{V}_1', \dot{V}_2', \dot{V}_0'$ に関する修正は故障種類に関係なく常に同一式である。2回線送電線に対しても修正式が二つ多くなるだけで全く同様である(図2の(c), (f)参照)。

b相またはc相、あるいはab相、ca相の断線に対しては、正相、逆相に1:aまたは1:a²の移相のある結合変圧器のはいった回路から(8)~(13)式に相当する関係式を作る。

2.5 数値計算法

前述の操作を行えば、接続点N個の系統ではN個の独立した式からなる連立一次方程式ができる。ただし発電機内部電圧点はあらかじめ値が与えられるので、実際の計算は(N-N')元の連立方程式を解くことになる。ただしN'は発電機台数である。

多元の連立一次方程式は消去法で解かれる。この場合直接(N-N')元の方程式を解けばほぼ(N-N')³に比例した計算時間と(N-N')²個の係数行列のすべてにメモリを必要とする。そのため実際の計算は下記のように行なわれる。

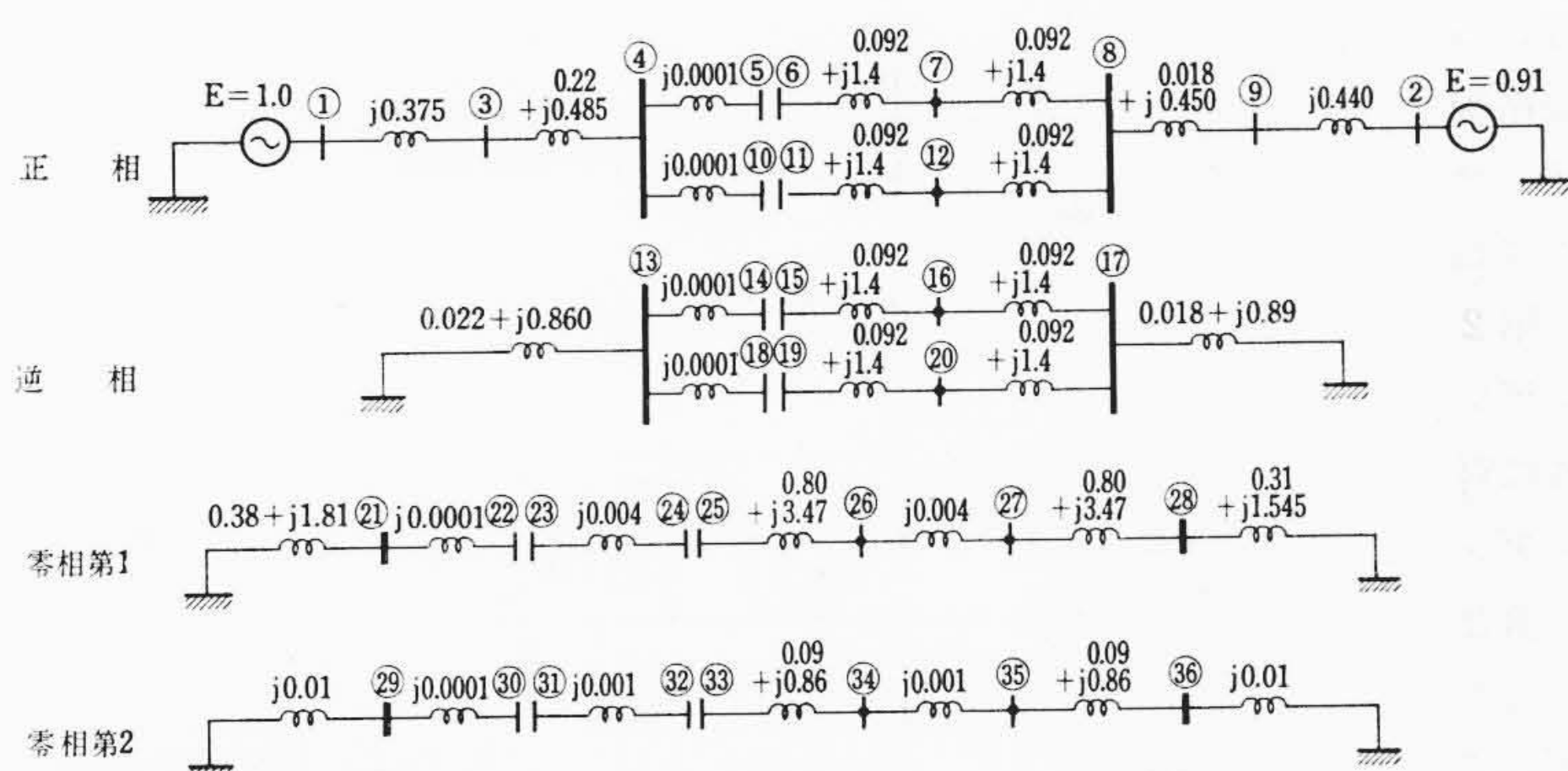
各対称分回路について故障種類による修正前の関係を(14)式のように表現する。

$$\begin{bmatrix} AA & AB \\ BA & BB \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ b_b \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (14)$$

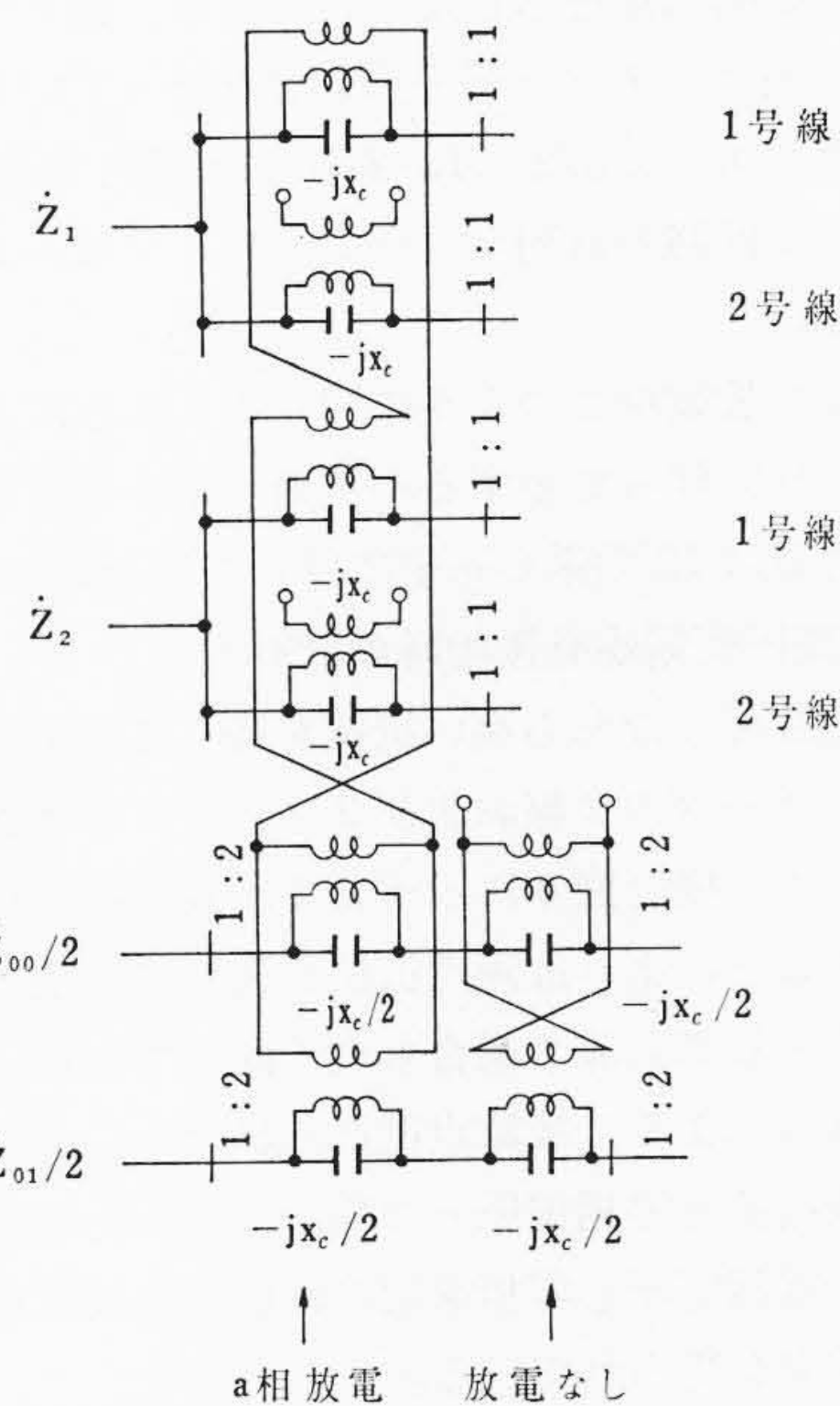
ただし、 V_A : 故障点電圧の列ベクトル

V_B : 故障点以外の電圧の列ベクトル

b_b : 発電機内部電圧によって生ずる定数項で、正相回路以外はゼロになる。



接続点 ④, ⑬, ⑳, ㉑ はそれぞれ測定点1の正相, 逆相, 零相第1, 2回路における接続点
 接続点 ⑧, ⑰, ㉒, ㉓ はそれぞれ測定点2の正相, 逆相, 零相第1, 2回路における接続点
 接続点 ⑤ ⑥, ⑭ ⑮, ㉔～㉖, ㉗～㉙ はそれぞれ1号線における断線個所の正相, 逆相, 零相第1, 2回路の両端の接続点
 接続点 ⑩ ⑪, ⑱ ⑲, ㉚～㉜, ㉝～㉞ はそれぞれ2号線における断線個所の正相, 逆相, 零相第1, 2回路の両端の接続点
 接続点 ⑦, ⑱, ㉑ はそれぞれ故障点1号線の正相, 逆相, 零相第1, 2回路における接続点
 接続点 ⑫, ⑳, ㉒, ㉓ はそれぞれ故障点2号線の正相, 逆相, 零相第1, 2回路における接続点



*** CASE NO 130 ***

FAULT POINT PERCENTAGE, FP1 IS 50.0, FP2 IS 50.0
LINE NO 1 A PHASE GROUND, A PHASE OPEN CIRCUIT
LINE NO 2 A PHASE OPEN CIRCUIT

1.0000	0.0000	0.9100	0.0100	0.0002	-0.0003	0.9981	-0.0037	0.9981	-0.0007
0.6950	-0.0104	0.6950	0.0104	0.0225	-0.0065	0.8698	-0.0048	0.9981	-0.0007
0.8363	-0.0064	0.8363	0.0064	0.0227	-0.0003	0.9327	-0.0003	-0.2804	-0.0100
-0.2804	0.0113	-0.0059	-0.0071	0.0227	-0.0003	-0.1391	-0.0057	-0.1230	-0.0084
-0.0435	0.0101	-0.7405	0.0101	-0.1951	0.0053	-0.1902	0.0053	-0.2761	0.0020
-0.3597	0.0238	-0.3594	0.0238	-0.1103	0.0051	-0.3001	0.0000	-0.0001	0.0100
-0.1516	-0.0047	-0.1516	-0.0047	-0.0707	-0.0022	-0.9765	-0.0018	-0.0764	-0.0012
-0.0009	-0.0001								

↑
各接続点電圧の実数部と虚数部

RY1: 1号線側
RY2: 2号線側

PT 1
RY 1
RY 2

	VALUE	ANGLE		VALUE	ANGLE
VA	0.9773	0.54		0.5773	0.54
VB	0.0000	-90.85		0.0000	-61.90
VC	1.0011	-123.61		1.0015	-123.61
VB	0.0271	-118.72		0.0185	-132.55
VC	1.0189	122.91		1.0189	122.91
IC	0.0255	-62.79		0.0175	-45.81
VAB	1.7484	28.84		1.7484	28.84
IAB	0.0271	61.28		0.0185	47.45
VBC	1.6895	-90.02		1.6895	-90.02
IBC	0.0247	-177.63		0.0247	-177.60
VCA	1.7492	151.07		1.7492	151.07
ICA	0.0255	-62.79		0.0175	-45.81
V0	0.0448	166.90		0.0448	156.00
I0	0.0159	-91.64		0.0067	-90.90

PT 2
RY 1
RY 2

	VALUE	ANGLE		VALUE	ANGLE
VA	0.6105	-0.01		0.6105	-0.01
VB	0.2822	-83.85		0.0000	97.49
VC	0.9271	-120.57		0.9271	-120.57
IB	0.0271	61.28		0.0185	47.45
VBC	0.9480	119.89		0.9480	119.89
IC	0.0255	-17.21		0.0175	134.19
VAB	1.3394	-16.12		1.3394	-16.12
IAB	0.3049	-66.77		0.0185	-132.55
VBC	1.6202	-89.97		1.6202	-89.97
IBC	0.0247	2.40		0.0247	2.40
VCA	1.3647	142.51		1.3647	142.51
ICA	0.3066	97.85		0.0175	134.19
V0	0.3113	177.45		0.3113	177.45
I0	0.0785	-82.34		0.0087	59.42

3 10 13 65

図5 計算例

(14)式から

$$V_B = BB^{-1} \cdot b_B - BB^{-1} \cdot BA \cdot V_A \dots\dots\dots (15)$$

$$(AA-AB \cdot BB^{-1} \cdot BA) \cdot V_A = -AB \cdot BB^{-1} \cdot b_B \dots \dots \dots (16)$$

V_A が求まれば(15)式から V_B が計算される。各対称分回路の V_A に関する故障発生前の関係は(17)式のようになる。

$$\begin{pmatrix} A_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_{00} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A_{01} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{A1} \\ V_{A2} \\ V_{A00} \\ V_{A01} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \dots\dots\dots (17)$$

ここで A_n は、(16) 式の $(AA-AB\cdot BB^{-1}\cdot BA)$ を表わす。ただし、添字 n は正相、逆相、零相第 1、第 2 回路を表わす 1, 2, 00, 01 である。1 回線送電線の零相回路は零相第 1 回路の項に含まれ、2 回線送電線の部分に故障がなければ零相第 2 回路の項は除かれる。

2.4で述べた故障点電圧に関する修正は実際には(17)式に対して行なわれ、(18)式となる。

$$\begin{pmatrix} A \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{A1} \\ V_{A2} \\ V_{A00} \\ V_{A01} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b' \end{pmatrix} \dots\dots\dots (18)$$

ただし A, b' は故障種類によって修正された係数行列および列ベクトルである。

(18)式から得られた故障点電圧を(15)式に代入して、各対称分回

路の接続点電圧を求め、接続点間の電位差とアドミタンスから必要とする点の電流を求める。さらに各対称分の値から3相量に変換する。

3. 計 算 例

図4は計算例に用いた系統の対称分インピーダンスを示したものである。図5は図4の1号線で $a1\phi$ -G, $a1\phi$ -O, 2号線で $a1\phi$ -O故障の発生したときの計算結果である。

図5で同一値になるべき測定点1と2のb相およびc相電流は大きさが小数点以下4けた(p.u),位相で小数点以下2けた(deg.)まで完全に一致しており計算精度の高いことがわかる。また,計算結果は実際の故障時に生ずる現象と合致しており,簡単な条件で求めた交流計算盤および手計算の結果ともよく一致している。

4. プログラムの応用例

以上、述べた故障計算プログラムは一般の故障計算のほか、やや特殊な条件に対しても応用できる。ここでは、二つの応用例について簡単に述べる。

4.1 直列コンデンサ補償系統不平衡ギャップ放電時の計算⁽⁴⁾

直列コンデンサ補償系統において地絡，短絡故障が発生したとき通常コンデンサ保護のため並列保護ギャップにより故障相のコンデンサを短絡する。

この場合、ギャップ放電を断線に置換える。すなわち、1回線送電線であれば図6のようにa相放電は定常時短絡されていたコンデンサ両端のbc相2線断線であるとする。並行2回線送電線ではこの関係が多少複雑になる。(4)～(6)式で並行2回線送電線1号線の断線個所では2号線は接続されており、同様に2号線の断線個所では1号線は接続されているとして扱っている(両回線に断線があれば

1号線と2号線の断線箇所はきわめて小さい距離だけ異なっているとして近似される)。ここでは断線箇所を直列コンデンサの短絡線に取っており、1号線の断線に対しては2号線の直列コンデンサは短絡され、2号線の断線に対しては1号線の直列コンデンサは短絡されているものとしている。したがってその零相第1回路、第2回路ともコンデンサが2個直列にあるものとして、一方のコンデンサを1号線のコンデンサに、他方のコンデンサを2号線のそれに対応させる。図7は1号線a相放電、2号線放電なしの直列コンデンサ部分の等価回路を示したものである。図7で零相第1回路、第2回路の直列コンデンサが $-jX_c/2$ となっているのはここに用いるインピーダンスが $\dot{Z}_{00}/2$, $\dot{Z}_{01}/2$ のため(図1参照)であって、零相第1回路、第2回路の直列コンデンサのインピーダンス値を1/2にしたのではない。

ギャップ放電をこのように取り扱うことにより、地絡、短絡故障およびこれに伴って生ずる不平衡ギャップ放電時の電圧、電流を求めた。計算は12機系の系統に対して行なわれた。

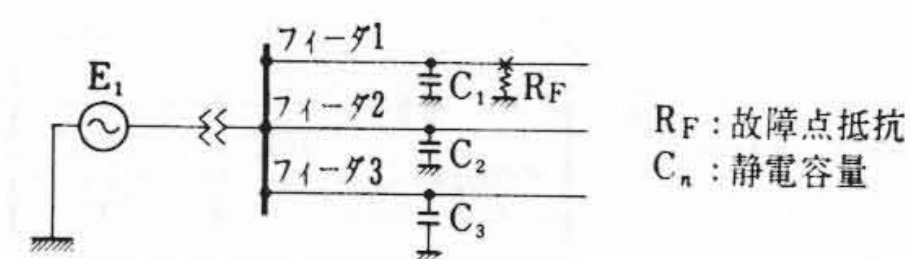
4.2 高圧配電線微接地時の計算⁽⁵⁾

微接地故障すなわち高い抵抗を通しての地絡故障時の電圧、電流を同一フィーダの2線および2フィーダにまたがる故障を中心に検討した。この場合図8に示すように故障点抵抗の先に結合変圧器を接続することにより故障点抵抗を表わす。故障点抵抗の表現法としては一般の故障計算の場合も全く同じである。

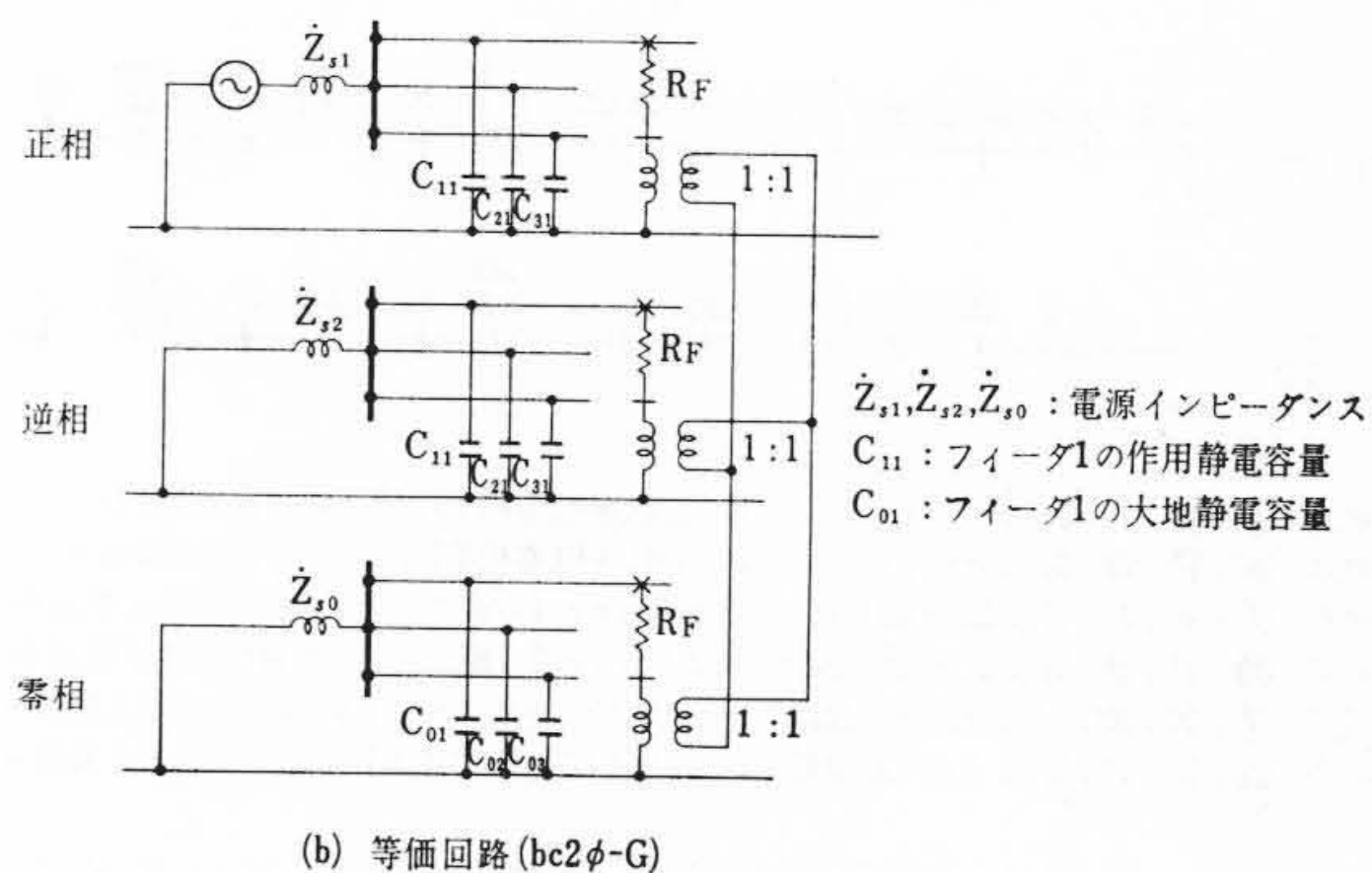
この計算により、故障点抵抗の異なる二つの相での故障時における故障点抵抗と零相電圧との関係、あるいは2フィーダにまたがる故障時の零相電圧と零相電流の位相差と故障点抵抗との関係など興味ある結果が得られている。

5. 結 言

デジタル計算機を用いた電力系統の故障計算プログラムについて述べた。この計算法は従来の交流計算盤による方法では困難である故障まで精度よく解くことができ、電力系統解析の有力な手段となっている。



(a) 系統の構成



(b) 等価回路 (bc2φ-G)

図8 故障点抵抗を通しての2線故障等価回路

また、本プログラムは等価回路での物理的な意味を考慮すれば、特殊な条件に対してもそのまま応用できる。

終わりに臨み、種々ご助言いただいた日立製作所日立研究所高林部長、奥田主管研究員ならびに大みか工場中山部長に対し厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- (1) 奥田, 磯野: 日立評論 45, 503 (昭38-3)
- (2) 奥田, 磯野: 電学誌 83, 1745 (昭38-10)
- (3) 林, 岸: 電学誌 84, 105 (昭39-1)
- (4) 磯野, 久保: 昭和43年電気関係学会関西支部連合大会 No. 1, 1A-9 (昭43-11)
- (5) 磯野, 後藤, 柴田: 日立評論 51, 395 (昭44-5)
- (6) 磯野, 後藤: 昭和42年電気四学会連合大会 No. 905 (昭42-4)