

UDC 621.315.1.052.3.025.4:621.3.014.7

論文
54-B 706相送電系統の故障解析と故障電流抑制の
一方法

正員 大野木 幸 男 (広島大)

准員 奥 本 芳 治 (広島大)

1. ま え が き

一般に超高压送電系統においては、中性点直接接地方式が採用されているが、送電電圧が50万V、更に将来100万Vと高くなってくると、故障電流が非常に大きくなり、誘導障害、しゃ断容量および安定度の面で問題が起ってくる。この問題を打開するためには、直接接地の電圧面での利点を生かしながら、故障電流を抑制することを考えなければならない。しかし、従来の抵抗およびリアクトル接地方式によっては、地絡電流を抑制することと、健全線の電位上昇を抑制することとは相反する関係にあり、また短絡電流の抑制ができないので、これは非常に困難な問題である。

著者はこの問題について考究し、直接接地方式でありながら、故障電流が抑制され、更に健全線の電位上昇も抑制される方法を見出した⁽¹⁾。この方法は、送受電端の電力用変圧器を1相分について単相変圧器2台かまたは単相3脚鉄心変圧器1台で構成して直接接地の6相で送電するもので、その三次巻線回路にそう入したインピーダンスが故障電流を抑制する。この方式によれば、地絡電流が従来方式の1/2に抑制されるように三次巻線回路のインピーダンスを調整すると、地絡故障時の健全線の対地電圧は故障前のそれに等しくなり、また短絡電流も抑制される。インピーダンスの値をそれ以上に大きくすると、対称相の対地電圧が上昇するかわりに地絡電流が更に抑制され、インピーダンスを無限大にすれば対称相の対地電圧が2倍に上昇するが、地絡電流は変圧器の励磁インピーダンスによって励磁電流相当の小さい値に抑制される。また短絡電流も同様に抑制される。

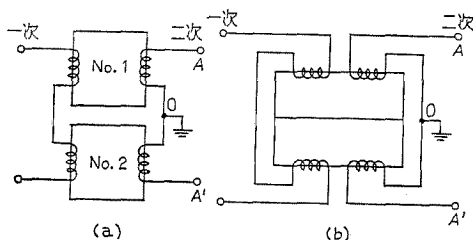
本論文では、このインピーダンスを無限大に選定した場合、すなわち三次巻線回路が無い場合をとりあげ

て、本方式の原理を詳細に説明する。この方法は電圧面で問題があるが、電流面で非常に優れており電圧面での問題を解決する方策が考えられるとともに、無停電が要求される重要な給電線への適用なども考えられるので、検討するに価するものとする。なお、6相送電系統の故障解析は6相の対称座標法によるのが一般的であるが、これが2相と3相の対称座標法によってできることが判明したので、本論文ではこの方法により故障解析を行なっている。この方法によれば、3相と6相が連けいしている送電系統の対称分インピーダンスの取扱いが容易になる。

2. 送受電端変圧器の構成

まず送受電端に設置する変圧器の1相分の構成について述べる。第1図(a)は単相変圧器2台による場合で、励磁インピーダンスおよび巻数の等しいNo.1およびNo.2の2台の単相変圧器の一次、二次巻線をそれぞれ直列に接続し、二次側の中性点0を直接接地する。同図(b)は3脚鉄心単相変圧器1台による場合で、3脚鉄心の外側の鉄心脚にそれぞれ一次、二次巻線を巻き、正常の送電状態においては励磁電流による磁束は外側の両鉄心脚を通り、中央脚の磁束は打消されて零になるように結線する。

次にこれを3相2回線送電系統に適用すると第2図のようになる。図において、No.1回線ABCの正常の送電状態における対地電圧は、相電圧をE、ベクトル

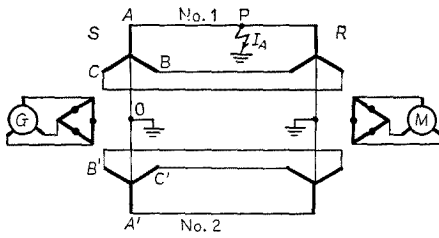


第1図 変圧器1相分の構成

Fig. 1. Construction of the transformer per phase.

A Method of Fault Analysis and Suppression of Fault Current in Six-Phase Power Transmission System. By Yukio Onogi, Member & Yoshiharu Okumoto, Associate (Faculty of Engineering, Hiroshima University)

大野木幸男: 正員, 広島大学工学部第2類 (電気系)
奥本芳治: 准員, 広島大学大学院工学研究科



第 2 図 6 相送電システムの構成

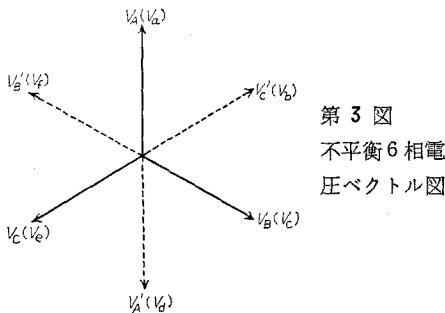
Fig. 2. Construction of the six-phase power transmission system.

ルオペレータを $a = \exp(j2\pi/3)$ として A 相を基準にとると、それぞれ E, a^2E, aE となり、No. 2 回線 $A'B'C'$ のそれは、それぞれ $-E, -a^2E, -aE$ となる。従って、電力は送電線において 6 相で送電されることになり、電源 G から負荷 M へ支障なく供給される。

3. 2 相と 3 相の対称座標法による故障解析の理論

6 相送電システムの故障解析は、6 相の対称座標法によって行なうのが一般的である。しかし、第 2 図のような 3 相と 6 相が連結している系統においては、故障点から眺めた系統の 6 相の対称分インピーダンスを求めるときに、3 相部分の取扱いが困難になる。そこでこのような系統の故障解析を 2 相と 3 相の対称座標法によって行なうことを考える。

〈3・1〉 電圧の変換 6 相送電システムの故障点における対地電圧を考える。対地電圧は大地から線路に向う方向を正とし、各相対地電圧 V_a, V_b, \dots, V_f を第 3 図に示すように二つの 3 相電圧 V_A, V_B, V_C と $V_{A'}, V_{B'}, V_{C'}$ の組合せと考えると、これらを 3 相対称座標法による零相、正相、逆相の対称分電圧 V_0, V_1, V_2 と V_0', V_1', V_2' で表現すると次式のようにになる。



第 3 図 不平衡 6 相電圧ベクトル図

Fig. 3. Diagram of six unbalanced voltage phasors.

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_{A'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & 0 \\ 0 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \\ V_0' \end{bmatrix} \dots\dots\dots (1)$$

但し

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} V_{A'} \\ V_{B'} \\ V_{C'} \end{bmatrix}, a = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} V_0' \\ V_1' \\ V_2' \end{bmatrix}$$

次に 3 相対称座標法による対称分電圧を、それぞれ 2 相対称座標法による第 1 および第 2 の対称分電圧 V_{00}, V_{10}, V_{20} と V_{01}, V_{11}, V_{21} で表現すると次式のようなになる。

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_0' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U & U \\ U & -U \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{00} \\ V_{01} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2)$$

但し

$$\begin{bmatrix} V_{00} \\ V_{10} \\ V_{20} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} V_{01} \\ V_{11} \\ V_{20} \end{bmatrix}, U = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(1), (2) 式から 6 相の各相対地電圧を 3 相および 2 相の対称座標法による対称分電圧によって表現すると次式のようなになる。

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_{A'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & 0 \\ 0 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U & U \\ U & -U \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{00} \\ V_{01} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} a & a \\ a & -a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{00} \\ V_{01} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (3)$$

次に 6 相のベクトルオペレータ $b = \exp(j2\pi/6)$ を考え、3 相のベクトルオペレータ a との関係を探ると次式のようなになる。

$$a = b^2 \dots\dots\dots (4)$$

(4) 式を (3) 式に代入し、更に 3 相で表現した各相対地電圧を 6 相のそれで置換えて (3) 式を整理すると次式のようなになる。

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ V_d \\ V_e \\ V_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & b^5 & b^4 & b^3 & b^2 & b \\ 1 & b^4 & b^2 & 1 & b^4 & b^2 \\ 1 & b^3 & 1 & b^3 & 1 & b^3 \\ 1 & b^2 & b^4 & 1 & b^2 & b^4 \\ 1 & b & b^2 & b^3 & b^4 & b^5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{00} \\ V_{11} \\ V_{20} \\ V_{01} \\ V_{10} \\ V_{21} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (5)$$

ここで 6 相の対称座標法による対称分電圧 $V_{a0}, V_{a1}, \dots, V_{a5}$ を考え、

$$\begin{bmatrix} V_{a0} = V_{00}, V_{a1} = V_{11}, V_{a2} = V_{20} \\ V_{a3} = V_{01}, V_{a4} = V_{10}, V_{a5} = V_{21} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (6)$$

とすれば (5) 式は 6 相の対地電圧が 6 相の対称分電圧で表現されることになる。この関係は Fortescue の理

論と一致しているので⁽²⁾、6相電圧は2相と3相の対称分電圧で表現できることになる。

(3.2) 電流の変換 故障点における地絡電流を考える。地絡電流は線路から大地に向う方向を正にとる。次に6線に地絡故障が生じたと考えて、この6相電流を I_a, I_b, \dots, I_f とし、電圧の場合と同様にこれらを二つの3相電流 I_A, I_B, I_C と $I_{A'}, I_{B'}, I_{C'}$ の組合せとみなし、更に3相対称座標法による対称分電流 I_0, I_1, I_2 と I_0', I_1', I_2' で表現すると次式のようになる。

$$\begin{pmatrix} I_A \\ I_{A'} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & 0 \\ 0 & a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_0 \\ I_0' \end{pmatrix} \dots\dots\dots (7)$$

但し

$$I_A = \begin{pmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{pmatrix}, \quad I_{A'} = \begin{pmatrix} I_{A'} \\ I_{B'} \\ I_{C'} \end{pmatrix}, \quad I_0 = \begin{pmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{pmatrix},$$

$$I_0' = \begin{pmatrix} I_0' \\ I_1' \\ I_2' \end{pmatrix}$$

次に3相対称座標法による対称分電流をそれぞれ2相対称座標法による第1および第2の対称分電流 I_{00}, I_{10}, I_{20} と I_{01}, I_{11}, I_{21} で表現し、これらの電流の正方向を大地から線路に向う方向⁽³⁾にとれば次式のようになる。

$$\begin{pmatrix} I_0 \\ I_0' \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} U & U \\ U & -U \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{00} \\ I_{01} \end{pmatrix} \dots\dots\dots (8)$$

但し

$$I_{00} = \begin{pmatrix} I_{00} \\ I_{10} \\ I_{20} \end{pmatrix}, \quad I_{01} = \begin{pmatrix} I_{01} \\ I_{11} \\ I_{21} \end{pmatrix}$$

(7), (8)式から6相の地絡電流を3相および2相の対称座標法による対称分電流によって表現すると次式のようになる。

$$\begin{pmatrix} I_A \\ I_{A'} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & a \\ a & -a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -I_{00} \\ -I_{01} \end{pmatrix} \dots\dots\dots (9)$$

次に6相の対称座標法による対称分電流を $I_{a0}, I_{a1}, \dots, I_{a5}$ とすれば、電圧の場合と同様6相電流も3相と2相の対称分電流で表現でき、両者の対称分電流の間に(6)式と同様な次式の関係が成立する。

$$\begin{cases} I_{a0} = -I_{00}, & I_{a1} = -I_{11}, & I_{a2} = -I_{20} \\ I_{a3} = -I_{01}, & I_{a4} = -I_{10}, & I_{a5} = -I_{21} \end{cases} \quad (10)$$

(3.3) 対称分電圧と電流の関係 2相および3相対称座標法による対称分電圧と電流の関係を求める。まず零相電圧および電流 V_0, I_0 と V_0', I_0' を考え、これらを4端子回路の入出力電圧および電流と

考え、故障点から眺めた零相の系統の4端子定数を A_0, B_0, C_0, D_0 として、 V_0, V_0' を I_0, I_0' で表わせれば系統の対称性から次式となる。

$$\begin{pmatrix} V_0 \\ V_0' \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} Z_0 & Z_{0m} \\ Z_{0m} & Z_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_0 \\ I_0' \end{pmatrix} \dots\dots\dots (11)$$

但し、 $Z_0 = A_0/C_0$

$$Z_{0m} = (A_0 D_0)/C_0 - B_0 = 1/C_0$$

同様にして正相および逆相の電圧と電流の関係は(12), (13)式のようになる。ここで正相回路は電源電圧を含む能動回路になり、故障前の A, A' 相対地電圧が $E, -E$ であるからこれが式中に含まれる。

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ V_1' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E \\ -E \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} Z_1 & Z_{1m} \\ Z_{1m} & Z_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_1' \end{pmatrix} \dots\dots\dots (12)$$

$$\begin{pmatrix} V_2 \\ V_2' \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} Z_2 & Z_{2m} \\ Z_{2m} & Z_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_2 \\ I_2' \end{pmatrix} \dots\dots\dots (13)$$

(11)~(13)式を合成すると次式となる。

$$\begin{pmatrix} V_0 \\ V_0' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E \\ -E \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} Z_0 & Z_{0m} \\ Z_{0m} & Z_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_0 \\ I_0' \end{pmatrix} \dots\dots\dots (14)$$

但し

$$E = \begin{pmatrix} 0 \\ E \\ 0 \end{pmatrix}, \quad -E = \begin{pmatrix} 0 \\ -E \\ 0 \end{pmatrix},$$

$$Z_0 = \begin{pmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{pmatrix}, \quad Z_{0m} = \begin{pmatrix} Z_{0m} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{1m} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{2m} \end{pmatrix}$$

(14)式は更に次式のように変形できる。

$$\begin{pmatrix} V_{00} \\ V_{01} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ E \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} Z_0 + Z_{0m} & 0 \\ 0 & Z_0 - Z_{0m} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -I_{00} \\ -I_{01} \end{pmatrix} \dots\dots\dots (15)$$

(15)式を成分で表わして整理すると次式となる。

$$\begin{pmatrix} V_{00} \\ V_{10} \\ V_{20} \\ V_{01} \\ V_{11} \\ V_{21} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ E \\ 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} Z_{00} & & & & & \\ & Z_{10} & & & & \\ & & Z_{20} & & & \\ & & & Z_{01} & & \\ & & & & Z_{11} & \\ & & & & & Z_{21} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -I_{00} \\ -I_{10} \\ -I_{20} \\ -I_{01} \\ -I_{11} \\ -I_{21} \end{pmatrix} \dots\dots\dots (16)$$

但し

$$\begin{cases} Z_{00} = Z_0 + Z_{0m}, & Z_{10} = Z_1 + Z_{1m} \\ Z_{20} = Z_2 + Z_{2m}, & Z_{01} = Z_0 - Z_{0m} \\ Z_{11} = Z_1 - Z_{1m}, & Z_{21} = Z_2 - Z_{2m} \end{cases}$$

次に2相および3相対称座標法によって表現した対称分電圧と電流を、6相の対称座標法によるそれらで置換えて(16)式を整理すると次式となる。

$$\begin{pmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \\ V_{a3} \\ V_{a4} \\ V_{a5} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ E \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} Z_{00} & & & & & \\ & Z_{11} & & & & \\ & & Z_{20} & & & \\ & & & Z_{01} & & \\ & & & & Z_{10} & \\ & & & & & Z_{21} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \\ I_{a3} \\ I_{a4} \\ I_{a5} \end{pmatrix} \dots\dots\dots (17)$$

ここで6相の対称座標法による対称分インピーダンス \$Z_{a0}, Z_{a1}, \dots, Z_{a5}\$ を考え、

$$\begin{matrix} Z_{a0}=Z_{00}, & Z_{a1}=Z_{11}, & Z_{a2}=Z_{20} \\ Z_{a3}=Z_{01}, & Z_{a4}=Z_{10}, & Z_{a5}=Z_{21} \end{matrix} \dots\dots (18)$$

とすれば、(17)式は6相の対称座標法による対称分電圧と電流の関係式と一致しているので⁽²⁾、6相送電システムの故障解析は2相および3相の対称座標法によってできることになる。但し文献(2)では線路部分のみ考えており、本論文では変圧器のインピーダンスに主眼をおいているので両者に多少の表現の相違がある。

〈3.4〉 故障電流および電圧の解法 故障点における電圧および電流を求めることを考える。まず(3)、(9)式の逆変換を求め、これらを(15)式に代入して整理すると次式のようになる。

$$\begin{pmatrix} V_A \\ V_{A'} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & a \\ a & -a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ E \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} a & a \\ a & -a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Z_{00} & 0 \\ 0 & Z_{01} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} a & a \\ a & -a \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} I_A \\ I_{A'} \end{pmatrix} \\ = \begin{pmatrix} a & a \\ a & -a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ E \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} a(Z_{00}+Z_{01})a^{-1}/2 \\ a(Z_{00}-Z_{01})a^{-1}/2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_A \\ I_{A'} \end{pmatrix} \dots (19)$$

但し、

$$Z_{00} = \begin{pmatrix} Z_{00} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{10} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{20} \end{pmatrix}, \quad Z_{01} = \begin{pmatrix} Z_{01} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{11} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{21} \end{pmatrix}$$

上式のインピーダンスの成分は次式のようになる。

$$a(Z_{00}+Z_{01})a^{-1}/2 = \begin{pmatrix} \alpha & \beta & \gamma \\ \gamma & \alpha & \beta \\ \beta & \gamma & \alpha \end{pmatrix} \\ a(Z_{00}-Z_{01})a^{-1}/2 = \begin{pmatrix} \alpha' & \beta' & \gamma' \\ \gamma' & \alpha' & \beta' \\ \beta' & \gamma' & \alpha' \end{pmatrix}$$

但し、

$$\begin{matrix} \alpha = (Z_{00} + Z_{01} + Z_{10} + Z_{11} + Z_{20} + Z_{21})/6 \\ \beta = \{Z_{00} + Z_{01} + a(Z_{10} + Z_{11}) \\ + a^2(Z_{20} + Z_{21})\}/6 \\ \gamma = \{Z_{00} + Z_{01} + a^2(Z_{10} + Z_{11}) \end{matrix}$$

$$+ a(Z_{20} + Z_{21})\}/6$$

$$\alpha' = (Z_{00} - Z_{01} + Z_{10} - Z_{11} + Z_{20} - Z_{21})/6$$

$$\beta' = \{Z_{00} - Z_{01} + a(Z_{10} - Z_{11})$$

$$+ a^2(Z_{20} - Z_{21})\}/6$$

$$\gamma' = \{Z_{00} - Z_{01} + a^2(Z_{10} - Z_{11})$$

$$+ a(Z_{20} - Z_{21})\}/6$$

従って(19)式は次式のようになる。

$$\begin{pmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \\ V_{A'} \\ V_{B'} \\ V_{C'} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E \\ a^2 E \\ a E \\ -E \\ -a^2 E \\ -a E \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \alpha & \beta & \gamma & \alpha' & \beta' & \gamma' \\ \gamma & \alpha & \beta & \gamma' & \alpha' & \beta' \\ \beta & \gamma & \alpha & \beta' & \gamma' & \alpha' \\ \alpha' & \beta' & \gamma' & \alpha & \beta & \gamma \\ \gamma' & \alpha' & \beta' & \gamma & \alpha & \beta \\ \beta' & \gamma' & \alpha' & \beta & \gamma & \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \\ I_{A'} \\ I_{B'} \\ I_{C'} \end{pmatrix} \dots\dots\dots (20)$$

上式において合計12個の電圧・電流のうち、故障条件によって6個の電圧・電流が定まるから、残る6個の電圧・電流が上式を解くことによって求められる。

4. 対称分インピーダンス

第2図のP点に故障が生じた場合を考え、本送電方式の原理を理解し易くするために、線路定数を無視して電源のインピーダンスと変圧器の励磁インピーダンスに着目し、2相および3相の対称座標法による故障点から眺めた系統の対称分インピーダンスを求めると。

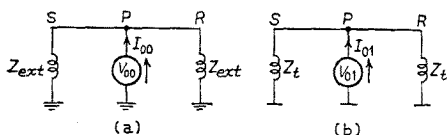
〈4.1〉 零相第1および第2回路 まず零相第1回路を考える。第1図によって変圧器の零相第1分電流に対するAO端子から見たインピーダンスを考えるに、変圧器の二次巻線に流れる零相第1分電流に対する一次巻線の補償電流が変圧器の極性から見て流れ得ないので、これは励磁インピーダンス \$Z_{ext}\$ となる。従って、零相第1回路は第4図(a)のようになる。図から故障点Pから眺めた系統のインピーダンス \$Z_{00}\$ を求めると次式のようになる。

$$Z_{00} = V_{00}/I_{00} = Z_{ext}/2 \dots\dots\dots (21)$$

次に零相第2回路を考える。第1図によって変圧器の零相第2分電流に対するAO端子から見たインピーダンスを考えるに、この場合の補償電流は流れ得るので、これは漏れインピーダンス \$Z_t\$ となる。従って零相第2回路は第4図(b)のようになり、図より故障点から眺めた系統のインピーダンス \$Z_{01}\$ を求めると次式のようになる。

$$Z_{01} = V_{01}/I_{01} = Z_t/2 \ll Z_{00} \dots\dots\dots (22)$$

上式の \$Z_{01} \ll Z_{00}\$ の関係が成立するのは、一般に変圧器においては \$Z_t \ll Z_{ext}\$ の関係があるからである。



第 4 図 零相第 1 および第 2 回路

Fig. 4. Zero-phase-first and second-sequence circuit.

〈4.2〉 正相第 1 および第 2 回路 正相第 1 回路は第 5 図 (a) になり、図より故障点 P から眺めた系統のインピーダンス Z_{10} を求めると次式となる。

$$Z_{10} = V_{10}/I_{10} = Z_{ext}/2 \dots\dots\dots (23)$$

次に正相第 2 回路を考える。電源電圧を E_s 、電源の正相インピーダンスを Z_{G1} 、負荷のインピーダンスを Z_M とすれば、正相第 2 回路は第 5 図 (b) のようになる。従って図において、故障点 P から眺めた系統のインピーダンスを Z_{11} とすれば次式が成立する。

$$V_{11} = E + I_{11} \cdot Z_{11}, Z_{11} \ll Z_{10} \dots\dots\dots (24)$$

但し、 E は故障点における故障相故障前の対地電圧。上式の $Z_{11} \ll Z_{10}$ の関係が成立するのは、一般に $Z_t, Z_{G1} \ll Z_{ext}$ の関係があるからである。

〈4.3〉 逆相第 1 および第 2 回路 逆相第 1 回路は正相第 1 回路と同様で、故障点 P から眺めた系統のインピーダンス Z_{20} は次式のようになる。

$$Z_{20} = V_{20}/I_{20} = Z_{ext}/2 \dots\dots\dots (25)$$

次に逆相第 2 回路は故障直後を考えれば電源電圧を含まない正相第 2 回路と同様で、故障点 P から眺めた系統のインピーダンス Z_{21} は次式のようになる。

$$Z_{21} = V_{21}/I_{21} \ll Z_{20} \dots\dots\dots (26)$$

5. 故障電流および電圧

第 2 図において、故障が P 点に生じたときの故障電流と健全線の対地電圧を求める。

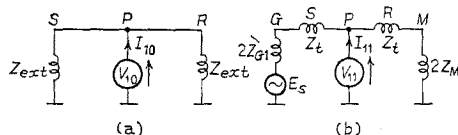
〈5.1〉 1 線地絡 No.1 回線の P 点の A 線に地絡故障が生じた場合を考える。まず故障条件から次式が成立する。

$$V_A = 0, I_B = I_C = I_{A'} = I_{B'} = I_{C'} = 0 \dots (27)$$

上式を (20) 式に代入すると次式のようになる。

$$\begin{pmatrix} 0 \\ V_B \\ V_C \\ V_{A'} \\ V_{B'} \\ V_{C'} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E \\ a^2 E \\ a E \\ -E \\ -a^2 E \\ -a E \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \alpha \\ \gamma \\ \beta \\ \alpha' \\ \gamma' \\ \beta' \end{pmatrix} [I_A] \dots\dots\dots (28)$$

上式の α, β, γ および α', β', γ' に (21)~(26) 式の関係代入し、地絡電流と健全線の対地電圧を求め



第 5 図 正相第 1 および第 2 回路

Fig. 5. Positive-phase-first and second-sequence circuit.

ると次式のようになる。

$$\left. \begin{aligned} I_A &\doteq 4E/Z_{ext}, V_B \doteq a^2 E, V_C \doteq a E \\ V_{A'} &\doteq -2E, V_{B'} \doteq -a^2 E, V_{C'} \doteq -a E \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (29)$$

上式から明らかなように、 E/Z_{ext} は変圧器の励磁電流に相当するものであるから、地絡電流 I_A は変圧器の励磁電流相当の小さい値に抑制されることになる。

線路を考えると、この地絡電流に線路の充電電流が重畳する。従って短距離送電線においては地絡電流が消弧リアクトル接地に、長距離送電線においては非接地方式に近づく。いずれも従来の直接接地方式のそれに比べて非常に小さくなる。更に非接地方式と比較すると、本方式は直接接地方式であるから中性点電位が上昇しないこと、および変圧器の段絶縁ができることで優れている。なお $V_{A'}$ は故障前の 2 倍になり、その他の健全線の対地電圧は故障前後において変化しない。 $V_{A'}$ が故障によってこのように変化することは、A 線の地絡によって AA' の線間電圧を変圧器の A' 相巻線が全部分担し、A 相巻線の誘起電圧が零になることを意味している。従って、地絡の自然消弧が期待できる。なお A 相の送電電力は故障によって零になるが、A' 相のそれは 2 倍となり、 $A \cdot A'$ 相合計の送電電力は故障前後において変化しないことになる。

以上の結果から類推して、自回線および両回線にまたがる 2 線および 3 線地絡においても、A と A' のような対称相を含まなければ、すべての地絡電流が変圧器の励磁電流相当の小さい値に抑制可能となる。

〈5.2〉 2 線短絡 No.1 回線の P 点の A, B の 2 線間に短絡故障が生じた場合を考える。この場合の故障条件は次式のようになる。

$$V_A = V_B, I_C = I_{A'} = I_{B'} = I_{C'} = 0, I_A = -I_B \dots\dots\dots (30)$$

上式を (20) 式に代入して整理すると次式になる。

$$\begin{pmatrix} V_A \\ V_A \\ V_C \\ V_{A'} \\ V_{B'} \\ V_{C'} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E \\ a^2 E \\ a E \\ -E \\ -a^2 E \\ -a E \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \alpha & \beta \\ \gamma & \alpha \\ \beta & \gamma \\ \alpha' & \beta' \\ \gamma' & \alpha' \\ \beta' & \gamma' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_A \\ -I_A \end{pmatrix} \dots (31)$$

上式の α, β, γ および α', β', γ' に (21)~(26) 式
の関係を代入し、故障電流および電圧を求めると次式
のようになる。

$$\left. \begin{aligned} I_A &= -I_B = 2(1-\alpha^2)E/Z_{ext} \\ V_A &= V_B = -aE/2, \quad V_C = aE \\ V_{A'} &= (\alpha^2-3)E/2, \quad V_{B'} = (1-3\alpha^2)E/2 \\ V_{C'} &= -aE \end{aligned} \right\} (32)$$

上式から明らかなように、 E/Z_{ext} は変圧器の励磁電
流に相当するものであるから、短絡電流 I_A は変圧器
の励磁電流相当の小さい値に抑制されることになる。
なお故障線 A, B の対地電圧の大きさは故障前の 1/2
になり、健全線 A', B' のそれは約 1.8 倍になる。
また、健全線 C, C' の対地電圧は故障前後において
変化しない。

以上の結果から類推して、自回線および両回線にま
たがる 2 線および 3 線短絡においても、対称相を含ま
なければ、すべての短絡電流が変圧器の励磁電流相当
の小さい値に抑制されることがわかる。

〈5・3〉 対称相の 2 線地絡 故障点 P において、
No.1 回線の A 線と No.2 回線の A' 線の 2 線に地
絡故障が生じた場合を考える。この場合の故障条件は
次式のようになる。

$$\left. \begin{aligned} V_A &= V_{A'} = 0 \\ I_B &= I_C = I_{B'} = I_{C'} = 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (33)$$

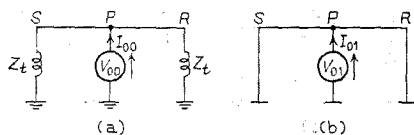
上式を (20) 式に代入して整理すると次式になる。

$$\begin{pmatrix} 0 \\ V_B \\ V_C \\ 0 \\ V_{B'} \\ V_{C'} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E \\ a^2 E \\ aE \\ -E \\ -a^2 E \\ -aE \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \alpha & \alpha' \\ \gamma & \gamma' \\ \beta & \beta' \\ \alpha' & \alpha \\ \gamma' & \gamma \\ \beta' & \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_A \\ I_{A'} \end{pmatrix} \dots (34)$$

上式から $I_A, I_{A'}$ を求めると次式のようになる。

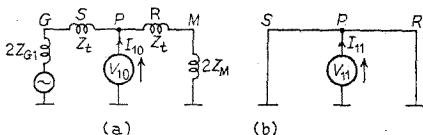
$$\begin{aligned} I_A &= -I_{A'} = (\alpha + \alpha')E/(\alpha^2 - \alpha'^2) \\ &= 3E/(Z_{01} + Z_{11} + Z_{21}) \dots\dots\dots (35) \end{aligned}$$

上式からわかるように、 Z_{01}, Z_{11}, Z_{21} は一般にそ
の値が小さいから、 I_A および $I_{A'}$ は大きな地絡電流
となる。しかし、 I_A と $I_{A'}$ は逆位相の関係にあるか
ら、同一地点での地絡ならば、大地帰路電流は打消さ
れて零となり、全送電区間に互って通信線への電磁誘
導障害がなくなる。なお、本送電方式においては正常
の送電状態における V_A と $V_{A'}$ が逆位相の関係にあ
るので、この種の対称相の雷による 2 線地絡は起りに
くいと考えられる。更に故障線をしゃ断した場合、従
来方式とちがって負荷電流が大地を通じて流れないの



第 6 図 従来の送電方式における零相第 1
および第 2 回路

Fig. 6. Zero-phase-first and second-sequence cir-
cuit in the conventional transmission system.



第 7 図 従来の送電方式における正相第 1
および第 2 回路

Fig. 7. Positive-phase-first and second-sequence
circuit in the conventional transmission system.

で、この状態でも通信線への電磁誘導障害はない。

さて (35) 式の地絡電流が、従来の送電方式の 1 線地
絡電流に比べてどの程度の大きさであるかを検討して
みる。まず第 4 図および第 5 図に相当する従来方式に
おける対称分回路は、第 6 図および第 7 図のようにな
る。従って、従来方式における各種対称分インピーダ
ンスを本方式に習って $Z_{00'}, Z_{01'}, Z_{10'}, Z_{11'}, Z_{20'},$
 Z_{21}' とすれば、第 4 図~第 7 図を対比して次式の関係
があることがわかる。

$$\left. \begin{aligned} Z_{00}' &= Z_{01}, \quad Z_{01}' = 0, \quad Z_{10}' = Z_{11} \\ Z_{11}' &= 0, \quad Z_{20}' = Z_{21}, \quad Z_{21}' = 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (36)$$

上式の関係を用いて従来方式における 1 線地絡故障時
の地絡電流 I_e を求めると次式のようになる。

$$\begin{aligned} I_e &= 6E/(Z'_{00} + Z_{01}' + Z_{10}' + Z_{11}' + Z_{20}' \\ &\quad + Z_{21}') \\ &= 6E/(Z_{01} + Z_{11} + Z_{21}) \dots\dots\dots (37) \end{aligned}$$

上式を (35) 式と比較して次式が得られる。

$$I_A = I_e/2 \dots\dots\dots (38)$$

すなわち、本方式における対称相の 2 線地絡におい
ては大きな地絡電流が流れるが、しかし、従来方式の 1
線地絡電流の 1/2 である。健全線の対地電圧は、この
場合は上昇しないので問題はない。

以上の結果から類推して、対称相の 2 線短絡におい
ても同様な結果が得られることは明白なことである。

6. 模 擬 実 験

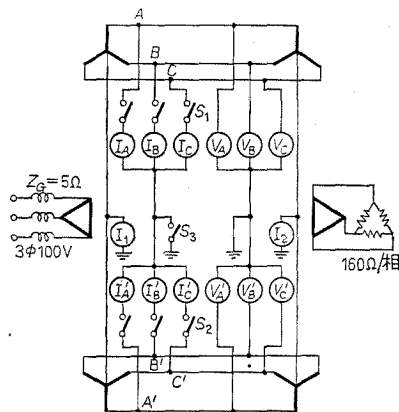
以上の理論を確かめるために模擬実験を行なった。
本方式の実験回路は第 8 図に示すとおりで、送受電端
の変圧器は第 1 図 (b) の単相 3 脚鉄心変圧器 6 台で

第 1 表 故障電流および電圧の測定値

Table 1. Measured values of fault currents and voltages.

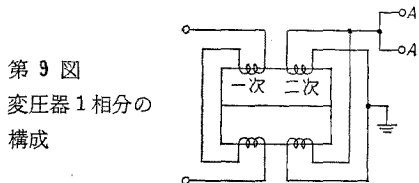
故障条件	No. 1 回線故障電流 [A]			No. 2 回線故障電流 [A]			大地帰路電流 [A]		No. 1 回線対地電圧 [V]			No. 2 回線対地電圧 [V]						
	I_A	I_B	I_C	$I_{A'}$	$I_{B'}$	$I_{C'}$	I_1	I_2	V_A	V_B	V_C	$V_{A'}$	$V_{B'}$	$V_{C'}$				
正常の送電状態	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	47(48)	48(48)	48(48)	47(48)	47(48)	48(48)	
地絡故障	A	B'	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	AB	A'	0.7(20)	0.7(24)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	A	B'	0.7(24)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	AB	A'	0.7(24)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	A	B'	9.5(10)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	ABC	A'	0.7(14)	0.7(15)	0.7(14)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	AB	C'	0.7(14)	0.7(15)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	AB	A'	10 (12)	0.7(24)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	ABC	A'	9.4 (7)	0.7(15)	0.6(14)	9.4 (7)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	AB	A'B'	11 (12)	12 (12)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	AB	A'C'	9.4 (7)	0.7(15)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	ABC	A'B'	11 (7)	12 (8)	0.2(14)	11 (8)	12 (8)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
ABC	A'B'C'	6.0 (7)	7.0 (8)	7.1 (7)	6.0 (7)	6.8 (8)	7.0 (7)	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
短絡故障	AB	B'	0.6(12)	0.6(12)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	A	A'	0.4(12)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	A	A'	9.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	ABC	C'	0.7(13)	0.7(15)	0.7(14)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	AB	C'	0.7(13)	0.6(15)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	AB	A'	9.4 (6)	0.5(12)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	ABC	A'	9.5 (7)	0.7(15)	0.6(14)	9.4 (7)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	AB	A'B'	11 (6)	12 (6)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	ABC	A'B'	11 (7)	12 (8)	0.2(14)	11 (8)	12 (8)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	ABC	A'B'C'	5.9 (7)	6.9 (8)	7.1 (7)	6.0 (7)	6.8 (8)	7.0 (7)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	混合故障	AB短絡 C地絡		0.6(12)	0.6(12)	0.7(21)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		AB " C "		0.6(12)	0.6(12)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
AB " A' "			1.7(22)	1.7(22)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
AB " C "			0.4(12)	—	0.7(21)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
AB " A' "			1.1(22)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
AA' " B "			9.5	0.6(20)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
ABC " A' "			2.6(10)	1.4(14)	1.6(13)	3.2 (5)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
ABC " A' "			2.4(10)	1.5(14)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
AA' " B "			9.5	0.6(20)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
ABC " A' "			2.6(10)	1.4(14)	1.6(13)	3.2 (5)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
ABC " A' "			2.4(10)	1.5(14)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	

構成した。変圧器の4個の巻線の定格電圧および電流はともに 200 V 10 A で、すべて同一巻数である。なお電源容量の関係から故障電流を制限するために、電源に $Z_0=5\Omega$ のリアクトルをそう入し、電源電圧は 3 相 100 V、1 相の負荷抵抗は 160 Ω で実験した。本方式および従来方式による正常の送電状態においては、線路の対地電圧および線路電流は多少の不均衡はあるが、ともに 48 V および 0.68 A であった。次に地絡および短絡の操作を S_1 , S_2 および S_3 によって行ない、第 1 表に示す実験結果が得られた。表中の () 内の数値は従来の直接接地 3 相 2 回線送電方式による場合で、この場合の変圧器の結線は、本方式におけるものと等価になるように、第 9 図に示すように 2 個の 2 次巻線を並列に接続して 1 相分を構成した。まず第 1 表の A 線の 1 線地絡故障について見ると、従来方式における地絡電流 I_A および大地帰路電流 I_1 , I_2 はそれぞれ $I_A=20$ A および $I_1=11$ A, $I_2=10$ A であるが、本方式においては、 $I_A=0.7$ A, $I_1=0.4$ A, $I_2=0.4$ A で、本方式における故障電流は従来方式に比べて大きく抑制されている。なお健全線の対地電圧は、本方式においては対称相 A' において $V_{A'}=92$ V で、故障前の約 2 倍に上昇しており、理論とよく一致している。次に対称相 A A' の 2 線地絡故障について見ると、本方式における地絡電流は $I_A=9.5$ A, $I_{A'}=9.5$ A で、従来方式における 1 線地絡故障時の地



第 8 図 実験回路

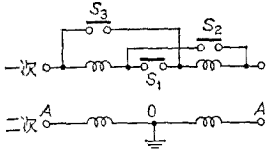
Fig. 8. Experimental circuit.



第 9 図 変圧器 1 相分の構成

Fig. 9. Construction of the transformer per phase.

絡電流 $I_A=20$ A の約 1/2 になっており、理論とよく一致している。更に AB 線の短絡故障について見ると、本方式においては短絡電流が $I_A=-I_B=0.6$ A



第10図
変圧器巻線の
直並列切替

Fig. 10. Series-parallel exchange of the transformer coils.

で、変圧器の励磁電流相当の小さい値に抑制されている。なおこのとき A, A', B' 線の対地電圧は $V_A = 20\text{ V}$, $V_{A'} = 83\text{ V}$, $V_{B'} = 87\text{ V}$ で、 V_A は故障前の約 $1/2$, $V_{A'}$ および $V_{B'}$ は故障前の約 1.8 倍になっており、理論とよく一致している。次に地絡と短絡の混合故障は、その発生の確率が小さいと考えられるので、理論的な解析は省略しているが、実験結果によると故障条件によって線路の対地電圧が高くなる場合がある。このように高い電圧が発生したのは変圧器の定格電圧の $1/4$ の低い電圧で実験したことによるもので、実際には変圧器の飽和によってこのような高い電圧は発生しないと考えられる。またこの点から、3脚鉄心変圧器の中央鉄心脚が過電圧に対して飽和するように設計すればよいと考えられる。

7. 考 察

以上のように本方式は従来方式に比べて電流面では非常に優れているが、問題は地絡故障時の対称相の電位上昇である。この電位上昇は、安定度の面から見ると、電位上昇により故障後の送電電力の減少が防げるので望ましいことであるが、一方、直接接地の本来の目的である変圧器の絶縁費を軽減することから見ると好ましくない。そこで次にこの電位上昇に対する対策を考える。この対策には次の二つの方法が考えられる。

まず第1の方法は、常時は従来方式の6相による送電を行ない、雷および塩害などの警報が発令されたときに本方式に切替える方法である。この切替は次に述べるように無停電で行なうことができる。まず第10図により、送電端変圧器の1相分についての切替方法を説明する。もちろん他相および受電端変圧器においても同様である。図において常時は二つの一次巻線が並列に接続されるように S_1 が開放され、 S_2 および S_3 が投入された状態で送電する。次に本方式に切替えるときは、まず S_3 を開放し、次に S_1 を投入して、最後に S_2 を開放する。これで一次巻線が直列に接続された状態になる。この切替え操作の途中において一つの一次巻線が一時的に短絡されるが、短絡電流は変圧器の励磁電流程度の小さい値に抑制される。さてこの状態での一次、二次巻線の誘起電圧は常時の

$1/2$ となり、従って地絡により対称相の電圧が2倍に上昇しても定格電圧に留まるので支障がない。もちろん常時の送電状態において故障が起こらない保証はないが故障発生の確率が非常に小さいので、このときの通信線への電磁誘導対策は、通信用避雷器に依存すればよいと考えられる。この場合は地絡故障時に健全線の対地電圧が上昇しないので電圧面での支障はない。

次に第2の方法は、常時本方式により定格電圧の $1/2$ で送電する方法である。この方法によれば、地絡により対称相の電圧が2倍に上昇しても定格電圧に留まるので支障はないが、変圧器容量が従来方式の2倍になり、従来方式の予備変圧器を考慮すると 1.5 倍になる。このように変圧器への投資は増大するが、故障電流の減少による送電の安定度の向上としゃ断器容量の減少および通信線への電磁誘導障害の防止などに大きなメリットがあり、検討の価値があると考えられる。

8. あとがき

本論文の成果を要約すると次のとおりである。

1. 6相送電系統の故障解析が6相対称座標法とは別に、2相および3相対称座標法によってできることを明らかにした。
2. 1線地絡はもちろんのこと、2線および3線の地絡あるいは短絡においても故障電流が変圧器の励磁電流相当の小さい値に抑制される。
3. 地絡故障相の変圧器の誘起電圧が零になるので、自然消弧が期待できる。
4. 両回線にまたがる対称相の2線地絡においては大きな地絡電流が流れる。しかし同一地点での地絡ならば大地帰路電流は零になる。この地絡電流の大きさは従来方式の1線地絡故障電流の $1/2$ である。
5. 1線から6線までのあらゆる地絡、短絡およびそれらの混合故障において、同一地点での故障ならば、通信線への誘導障害はない。また、故障相をしゃ断しても、負荷電流による誘導障害もない。
6. 地絡故障時に対称相の対地電圧が2倍になる。この対策として二つの方法を提案している。

(昭和53年9月11日受付, 同54年2月28日再受付)

文 献

- (1) 大野木: 「直接接地送電系統における故障電流の一抑制法」電学論 B 98, p. 724 (昭 53-8)
- (2) S.S. Venkata & W.H. Booth: "Six-Phase(Multi-Phase) power transmission systems; fault analysis" *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.* PAS-96, No. 3, pp. 758 (1977)
- (3) 前川: 2相回路の理論と3相2回線の送電問題, 東京電機大学出版局 p. 6 (昭 44-9)