UDC 621.316.91:621.314.21
621.315/316.1.015.38

論 文

47-B 46

送配電線の断線混触故障に対する 補助変圧器の過電圧抑制効果

広島大学 大野木 幸 男

広島大学 奥 本 宏 三

1. ま え が き

送配電線に混触故障が生じると、配電線路に高電圧が侵入して配電線路側機器の絶縁が破壊されて大事故になるおそれがある。筆者のひとり、このような事故を防止するために補助変圧器を設置して配電線路への侵入電圧を機器の耐圧以下に抑制する方法を考案⁽¹⁾し、断線を伴わない混触故障に対する本装置の効果を明らかにした。⁽²⁾しかし、この種の故障形態は混触故障の中の一部であり、送配電線が共架されている線路においては送電線が断線事故によって垂れ下がり配電線と混触することがある。この断線混触故障の形態は断線した電線の電源側と負荷側の混触状況、すなわち

(イ) 混触する、(ロ) 混触しない、(ハ) 接地するの三とおりがあり、これらの組み合わせによる故障形態の種類は数多くなる。これらすべての故障に対して、本装置の効果を明らかにしなければ完全でない。これらの故障を A 相断線を例にとって表にまとめると第 1 表のようになる。(第 1 図参照) B, C 相の断線に対しても同様に考えられるが回路の対称性から A 相断線についてのみ考えればじゅうぶんである。ここで、4, 8, 12 番は結果的に断線を伴わない混触故障と同一条件になるのですでに検討を終えたことになる。また、回路の対称性から 3 番は 2 番と、6 番は 5 番、7, 10, 11 番は 9 番、15 番は 14 番、18 番は 17 番、21 番

第 1 表 断線を伴う混触故障の形態

Table 1. Types of the contact faults by disconnection.

番号	故 障 形 態	番号	故 障 形 態
1	As-a 混触, A Open	12	As-c 混触, A-c 混触
2	As-b 混触, A Open	13	As Open, A-a 混触
3	As-c 混触, A Open	14	As Open, A-b 混触
4	As-a 混触, A-a 混触	15	As Open, A-c 混触
5	As-a 混触, A-b 混触	16	As-a 混触, A 接地
6	As-a 混触, A-c 混触	17	As-b 混触, A 接地
7	As-b 混触, A-a 混触	18	As-c 混触, A 接地
8	As-b 混触, A-b 混触	19	As 接地, A-a 混触
9	As-b 混触, A-c 混触	20	As 接地, A-b 混触
10	As-c 混触, A-a 混触	21	As 接地, A-c 混触
11	As-c 混触, A-b 混触		

は 20 番と同種類の故障と考えられるので、結局、検討すべきものは 1, 2, 5, 9, 13, 14, 16, 17, 19, 20 番の 10 種類の故障形態となる。本文では、これらの断線混触故障に対する補助変圧器の効果について考究した。その結果 1 番の故障形態に対してのみ問題があり、ある特定の条件のもとで補助変圧器の抑制効果が不じゅうぶんになることが明らかとなった。そこで、その対策についても考究し、完全に補助変圧器の抑制効果を発揮させる方法を明らかにした。このような対策を講ずれば、その他の故障形態も含めてすべての故障形態に対して、混触故障時の配電線路側の侵入電圧を機器の耐圧以下に大きく抑制しうることが明らかになったので報告する。なお本文では問題のある故障形態 1 番についてのみ詳述し、その他の故障形態については問題がないので結果のみ示す。

2. 故障計算の仮定

筆者らは 20kV 配電の研究においてこの問題を考えているので以下 20kV 配電を例にとって説明する。第

The Effect of Auxiliary Transformer on Suppressing Over Voltage on Distribution Line Caused by Contact Fault due to Disconnection of Transmission Line. By Y. OHNOGI, Member & K. OKUMOTO, Member (Faculty of Engineering, Hiroshima University)

大野木幸男: 正員, 広島大学工学部電気工学科教授, 電力工学担当
奥本宏三: 正員, 広島大学工学部電気工学科助手

G: 電源, S: 変圧器, T: 配電塔主変圧器, t: 補助変圧器
 Z_1 : 負荷インピーダンス, Z : 中性点接地インピーダンス
 Z_c : 対地静電容量によるインピーダンス

第 1 図 補助変圧器を設置した送配電回路

Fig. 1. Transmission and distribution circuit with an auxiliary transformer.

1図に示すように従来の 6kV 配電線に $n=20/6$ kV の変圧比を有する配電塔を介して給電する場合を考える。配電塔主変圧器の一次、二次中性点は図のように配電塔主変圧器と同一変圧比を有する補助変圧器を介して接地する。この補助変圧器が断線混触故障時に 6kV 側線路へ侵入する高電圧を抑制する作用をする。ここで説明を簡単にするために 20kV 線路の対地静電容量は無視した。これは、線路の電圧降下が小さいと考えると、混触故障時の 6kV 側線路の対地電圧を考えるに際して、断線点より電源側の対地静電容量は変圧器 S の中性点接地インピーダンス Z に移行して集約され、また、断線点より負荷側の対地静電容量は 6kV 線路の対地静電容量に移行して集約されていると考えても大きな誤差はないからである。

なお同じ理由で電源および線路のインピーダンスはすべて無視し、配電塔主変圧器および補助変圧器の漏れインピーダンスも無視した。また、故障形態 1 番の場合は無負荷時において、これら変圧器の励磁インピーダンスを無視すると故障電流の流れる通路がなくなり、実際と矛盾を生じるのでこれを考慮に入れ、他の故障形態では励磁インピーダンスによる影響がほとんどないので無視した。

3. A_s - a 混触, A -Open の場合 (故障形態 1 番)

第 1 図において混触故障点 A_s , a を通して流れる故障電流を $3I$ とすれば、 B - b , C - c を通して流れる故障電流は零であるから、故障電流の零相、正相、逆相分 I_0 , I_1 , I_2 は

$$I_0 = I_1 = I_2 = I \quad (1)$$

となる。また断線点に現われる電圧を 3V とすると B , C は断線していないので、その対称分電圧 V_0 ,

第 2 図 第 1 図の等価回路

Fig. 2. Equivalent circuit of Fig. 1.

V_1 , V_2 は

$$V_0 = V_1 = V_2 = V \quad (2)$$

となる。これらの対称分を用いて故障形態 1 番は第 2 図のように表わすことができる。

〈3・1〉 故障条件 A_s と a が混触しているから、それぞれの対地電圧 V_{As} , V_a は等しく、また A 相は断線しているため、断線点の負荷側の電流 I_A は零となる。したがって、故障条件として次式が成立する。

$$V_{As} = V_a \quad (3)$$

$$I_A = 0 \quad (4)$$

〈3・2〉 零相回路 第 2 図から零相回路を描くと第 3 図のようになる。図中 V_{0As} , V_{0a} は零相電圧 I を流す零相電圧であり、電流分布を図のように分解して考える。点線で示す電流通路は以下の解析に無関係となるので省略する。このことは正相、逆相回路においても同様である。また、主変圧器と補助変圧器の変圧比を n , 励磁インピーダンスを Z_{ext} , Z_{ext} とする。図より

$$I_{0A} = -\frac{I}{n} + \frac{nV_{0a}}{3Z_{ext}} + \frac{V_{0a}}{nZ_c} \quad (5)$$

$$V_{0As} = -3Z(I + I_{0A}) \\ = V + nV_{0a} \quad (6)$$

の関係があるから、これより断線点 A を流れる零相電流 I_{0A} , また A_s 点および a 点の零相電圧 V_{0As} , V_{0a} を求めると次式のようにになる。

第 3 図 零相回路

Fig. 3. Zero phase sequence circuit.

第4図 正相回路

Fig. 4. Positive phase sequence circuit.

$$I_{0A} = -\left\{ \frac{I}{n} + \frac{3Z(1-1/n)I+V}{3Z+3Z_{\omega T}} \right\} \dots\dots (7)$$

$$V_{0AS} = -3Z \left\{ \frac{3Z_{\omega T}(1-1/n)I-V}{3Z+3Z_{\omega T}} \right\} \dots\dots (8)$$

$$V_{0a} = (V_{0AS} - V)/n \dots\dots (9)$$

ただし,

$$Z_{\omega T} = \frac{Z_{ext}(n^2 Z_c)/3}{Z_{ext} + (n^2 Z_c)/3}$$

〈3・3〉 正相回路 正相回路は第2図より第4図のようになる。ただし、ここでは 6kV 側回路は 20kV 側に換算している。また、 Z_L は 6kV 側線路の負荷インピーダンスとする。図より

$$I_{1A} = -\frac{I}{n} + \frac{nV_{1a'}}{Z_{ext}} + \frac{nV_{1a'}}{Z_L} \dots\dots (10)$$

$$V_{1AS}' = V + nV_{1a'} = 0 \dots\dots (11)$$

ただし,

$$Z_L = n^2 Z_c Z_L / (Z_c + Z_L)$$

の関係があるから、これより断線点 A を流れる正相電流 I_{1A} を求めると

$$I_{1A} = -\left(\frac{I}{n} + \frac{V}{Z_{\omega T}} \right) \dots\dots (12)$$

ただし,

$$Z_{\omega T} = Z_{ext} Z_L / (Z_{ext} + Z_L)$$

となる。 A_S 点の正相電圧 V_{1AS} は A_S 点における故障前の相電圧を E_A とすれば

$$V_{1AS} = V_{1AS}' + E_A = E_A \dots\dots (13)$$

となり、6kV 側 a 点の正相電圧 V_{1a} は a 点における故障前の相電圧を E_a とすると、次式のようになる。

$$\begin{aligned} V_{1a} &= V_{1a}' + E_a \\ &= E_a - V/n \dots\dots (14) \end{aligned}$$

〈3・4〉 送相回路 逆相回路は正相回路と全く同様となるので、A 点を流れる逆相電流 I_{2A} および A_S 、a 点の逆相電圧 V_{2AS} 、 V_{2a} は次式のようになる。

$$I_{2A} = I_{1A} \dots\dots (15)$$

$$V_{2AS} = 0 \dots\dots (16)$$

$$V_{2a} = -V/n \dots\dots (17)$$

〈3・5〉断線点に現われる電圧および故障電流

断線点 A を流れる電流 I_A は対称分電流と負荷電流（励磁電流を含む）を重畳して

$$I_A = I_0 + I_{1A} + I_{2A} + E_A/Z_{\omega T}$$

となり、これに (7)、(12)、(15) 式を代入して整理すると次式のようなになる。

$$\begin{aligned} I_A &= -\left\{ \frac{I}{n} + \frac{3Z(1-1/n)I+V}{3(Z+Z_{\omega T})} \right\} \\ &\quad -2\left(\frac{I}{n} + \frac{V}{Z_{\omega T}} \right) + \frac{E_A}{Z_{\omega T}} \dots\dots (18) \end{aligned}$$

ここで、故障条件 (4) 式の関係があるから、これより断線点に現われる電圧 V を求めると次式のようなになる。

$$V = \frac{n(1+q)E_a - (Z_{\omega T}/n)\{3+(n+2)q\}I}{2(1+q)+r/3} \dots\dots (19)$$

ただし,

$$q = Z/Z_{\omega T}, \quad r = Z_{\omega T}/Z_{\omega T}, \quad E_A = nE_a$$

次に A_S 点の対地電圧 V_{AS} は対称分を重畳して

$$V_{AS} = V_{0AS} + V_{1AS} + V_{2AS}$$

となり、これに (8)、(13)、(16)、(19) 式を代入して整理すると次式のようなになる。

$$\begin{aligned} V_{AS} &= n\left(1 + \frac{q}{A}\right)E_a \\ &\quad - \frac{1}{n(1+q)}\left\{ \frac{Z_{\omega T}qB}{A} + 3(n-1)Z \right\}I \dots\dots (20) \end{aligned}$$

ただし,

$$A = 2(1+q) + r/3$$

$$B = 3 + (n+2)q$$

また、6kV 側混触点 a の対地電圧 V_a は同様に対称分を重畳して

$$V_a = V_{0a} + V_{1a} + V_{2a}$$

となり、これに (9)、(14)、(17)、(19) 式を代入して整理すれば

$$\begin{aligned} V_a &= \left(1 - \frac{3+2q}{A}\right)E_a + \frac{1}{n^2(1+q)}\left\{ \frac{(3+2q)Z_{\omega T}B}{A} \right. \\ &\quad \left. - 3(n-1)Z \right\}I \dots\dots (21) \end{aligned}$$

となる。ここで、故障条件 (3) 式の関係があるからこれに (20)、(21) 式を代入して故障電流 I を求めると次式のようなになる。

$$I = \frac{n^2(1+q)\{(n-1)A+B\}}{Z_{\omega T}B^2+3(n-1)^2ZA}E_a \dots\dots (22)$$

〈3・6〉 故障時の侵入電圧 6kV 側 a 相対地電圧 V_a は (21) 式に (22) 式を代入して次式のように

求められる。

$$V_a = \left[\left(1 - \frac{3+2q}{A} \right) + \frac{\{(n-1)A+B\} \{rB(3+2q)/A - 3(n-1)q\}}{rB^2 + 3(n-1)^2 Aq} \right] E_a \quad (23)$$

また、6 kV 側 b 相および c 相対地電圧 V_b , V_c は

$$V_b = V_{0a} + a^2 V_{1a} + a V_{2a}$$

$$V_c = V_{0a} + a V_{1a} + a^2 V_{2a}$$

$$a = \epsilon^{j\frac{2\pi}{3}}, \quad a^2 = \epsilon^{j\frac{4\pi}{3}}$$

で与えられるから前と同様にして次式ようになる。

$$V_b = E_b + \left[\frac{1}{A} - \frac{\{(n-1)A+B\} \{rB/A + 3(n-1)\}}{rB^2 + 3(n-1)^2 Aq} \right] q E_a \quad (24)$$

$$V_c = V_b - E_b + E_c \quad (25)$$

ただし、 $E_b = a^2 E_a$, $E_c = a E_a$

〈3・7〉 補助変圧器を設置しないときの侵入電圧

補助変圧器の侵入電圧抑制効果を明らかにするために、補助変圧器を設置しないときの 6 kV 側侵入電圧を求めている。前と同様の手順により、故障時の 6 kV 側対地電圧 V_a は次式ようになる。

$$V_a = \frac{n E_a}{1 + 3Z/(Z_c + 2Z_{\omega T}/n^2)} \quad (26)$$

ここで、対地静電容量によるインピーダンス Z_c の侵入電圧に対する影響を考察してみるに、 $Z_c = \infty$ のとき V_a が最大となるからこの状態における補助変圧器の効果を明らかにするために、 $Z_c = \infty$ のときの V_a を求めると次式のようにになる。

$$V_a = n E_a \quad (27)$$

同様に

$$\left. \begin{aligned} V_b &= (n+1/2)E_a + E_b \\ V_c &= (n+1/2)E_a + E_c \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

〈3・8〉 補助変圧器の侵入電圧抑制効果 (23)~(25) 式において $Z_c = \infty$ とすれば 6 kV 側各相対地電圧は Z_l の関数となる。したがって、侵入電圧は負荷インピーダンスによって変化する。いま、変圧器の励磁インピーダンス Z_{exl} , Z_{exT} が負荷インピーダンス Z_l に比べ非常に大きいとし、これを無視して、 $Z_{exl} = Z_{exT} = \infty$ と仮定すれば、 $Z_{\omega T} = Z_l$, $Z_{\omega l} = \infty$ となるから、 V_a は次式のように簡単になる。

$$V_a = \left[-\frac{1}{2} \right.$$

第 5 図 侵入電圧 V_a の軌跡

Fig. 5. Locus of the incident voltage V_a .

$$+ \frac{\{2(n-1)+3\} \{9S/2 - 3(n-1)\}}{9S + 6(n-1)^2} \Big] E_a \quad (29)$$

ここで、

$$S = |S| \epsilon^{j\theta} = Z_l/Z (= r/q)$$

とおき、負荷インピーダンスと中性点インピーダンスとの比で負荷を表現した。そこで、 Z を純抵抗とし負荷 S の大きさ $|S|$ およびその力率角 θ をパラメータにとり V_a/E_a の軌跡を求めると円になることがわかる。一例として $n=4$ の場合を図示すると第 5 図のようになる。 $S=0.1, 1, 2, 4, \dots$ および $\theta = \pm 0^\circ, \pm 30^\circ, \dots$ の曲線群は $|S|$, θ を一定としたときの侵入電圧 V_a/E_a の軌跡を表わす。任意の負荷インピーダンスにおける侵入電圧はこれらの曲線群の交点で与えられる。これより負荷インピーダンス一定で負荷力率が変化した場合、低力率になるほど侵入電圧が大きくなることがわかる。

たとえば $|S|=10$ とすると $\theta=0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ となるに従って侵入電圧は $V_a(1)$, $V_a(2)$, $V_a(3)$, $V_a(4)$ のように増大する。進み力率の場合も全く対称的である。それゆえ、負荷力率は遅れの零力率とき、負荷の大きさ $|S|$ をパラメータにとって変圧比 n と侵入電圧の大きさ $|V_a|/|E_a|$ を求めると第 6 図のようになる。横軸は変圧比 n をとり、縦軸は侵入電圧の大きさで $|E_a|$ との比で表わした。この図からわかるように、 n が約 3 以下では負荷インピーダンス $|S|$ が小さくなるほど侵入電圧が高くなるが、その大きさは 3 以上になることはない。しかるに n が 3 以上になると、逆に負荷インピーダンスが大きくなるほど侵入電圧は高くなり、補助変圧器による侵入電圧抑制効果が

第 6 図 侵入電圧 V_a と変圧比の関係Fig. 6. Relationship between the incident voltage V_a and the transformation ratio.

第 7 図 侵入電圧と変圧比の関係 (1 番の故障形態)

Fig. 7. Relationship between the incident voltages and the transformation ratio.

じゅうぶん現われなくなる。したがって、この種の故障形態では特に軽負荷時の場合について検討する必要がある。そこで $Z_c = \infty$, 無負荷 ($Z_l = \infty$) 時における各相侵入電圧を、補助変圧器を設置した場合と設置しない場合について比較検討し、補助変圧器の侵入電圧抑制効果を考察する。

(23)~(25), (27) および (28) の各式から侵入電圧を求めて図示すると第 7 図のようになる。図において点線は補助変圧器を設置しない場合の侵入電圧の大きさで、変圧比が大きくなるほど高くなり、6 kV 線路

側の機器の絶縁が、混触故障時に破壊されるおそれがある。実線は中性点接地インピーダンス Z を純抵抗、変圧器の励磁インピーダンス Z_{exi} , Z_{exT} を純リアクタンスで Z の 100 倍、すなわち、 $q = -j0.01$, $r = 1$ と仮定して計算した結果である。 b, c 相の対地電圧 V_b, V_c はじゅうぶん抑制されているが a 相の対地電圧 V_a に対してはほとんど抑制効果が現われていない。これは第 4 章に述べる他の故障形態においては生じない特異な現象である。

一点鎖線は $q = 0.03 - j0.069$, $r = 1$ として計算したときの侵入電圧である。この q, r の値は模擬実験に用いた変圧器の励磁インピーダンス Z_{exi} , Z_{exT} を実測し $Z = 80 \Omega$ (純抵抗) としたときの値である。この励磁インピーダンスは実線の場合に仮定した励磁インピーダンスよりかなり小さい値であり、 a 相の対地電圧が小さくなっている。

以上のことから励磁インピーダンスが比較的小さい場合は問題がないが、大きくなると a 相対地電圧が高くなり補助変圧器の抑制効果がじゅうぶん発揮されなくなるので、なんらかの対策が必要である。この防護対策については第 5 章に述べる。なお図中の点線および一点鎖線上の○印は $Z = 80 \Omega$, $|E_a| = 20 \text{ V}$, $n = 4$ のときの模擬実験による実験値を示し計算値とよく一致した。

4. その他の断線混触故障の場合

その他の断線混触故障に対しても前と全く同様にして混触故障時の侵入電圧を求めることができる。そこで $Z_c = \infty$ とした場合の 6 kV 線路側侵入電圧 V_a, V_b, V_c を求め、故障形態別に結果のみを示すと次のようになる。ここで (I) は補助変圧器を設置した場合、(II) は設置しないときの各相侵入電圧を示す。

〈4・1〉 $As-b$ 混触, A -Open の場合 (故障形態 2 番)

(I)

$$\left. \begin{aligned} V_a &= \frac{1}{2(n-1)} \{ (1-3n)E_a + 2E_b \} \\ V_b &= \frac{n}{n-1} (E_b - E_a) \\ V_c &= E_c - \frac{1}{n-1} (nE_a - E_b) \end{aligned} \right\} \dots\dots (30)$$

(II)

$$\left. \begin{aligned} V_a &= (n-1/2)E_a - E_b, \quad V_b = nE_a \\ V_c &= nE_a - (E_b - E_c) \end{aligned} \right\} \dots\dots (31)$$

〈4・2〉 $As-a$ 混触, $A-b$ 混触の場合 (故障形態 5

番)

(I)

$$\left. \begin{aligned} V_a &= \frac{n}{n^2-1} (E_b - E_a) \\ V_b &= \frac{n^2}{n^2-1} (E_b - E_a) \\ V_c &= \frac{1}{n^2-1} \{n^2(E_c - E_a) + (E_b - E_c)\} \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

(II)

$$\left. \begin{aligned} V_a &= n E_a, \quad V_b = \frac{n}{n+1} (n E_a + E_b) \\ V_c &= V_b - E_b + E_c \end{aligned} \right\} \dots\dots (33)$$

<4.3> **As-b** 混触, **A-c** 混触の場合 (故障形態 9

番)

(I)

$$\left. \begin{aligned} V_a &= \frac{1}{n(n-1)} \{n(E_c - E_a) + (E_b - E_c)\} \\ V_b &= \frac{n}{n-1} (E_b - E_a) \\ V_c &= V_b - E_b + E_c \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

(II)

$$\left. \begin{aligned} V_a &= n E_a + (E_a - E_b) - (E_b - E_c)/n \\ V_b &= n E_a, \quad V_c = n E_a - (E_b - E_c) \end{aligned} \right\} \dots (35)$$

<4.4> **As-Open**, **A-a** 混触の場合 (故障形態 13

番)

(I)

$$V_a = 0, \quad V_b = E_b + E_a/2, \quad V_c = E_c + E_a/2 \quad (36)$$

(II)

$$\left. \begin{aligned} V_a &= -n E_a/2, \quad V_b = E_b + (1-n)E_a/2 \\ V_c &= E_c + (1-n)E_a/2 \end{aligned} \right\} \dots (37)$$

<4.5> **As-Open**, **A-b** 混触の場合 (故障形態 14

番)

(I)

$$\left. \begin{aligned} V_a &= -\frac{E_a}{2} + \left(\frac{n-1}{n^2} + \frac{3n}{2DZ} \right) \\ &\quad \times \frac{n E_a/2 + E_b}{(n-1)^2/n^2 + 3n^2/2DZ} \\ V_b &= E_b - \left\{ (n E_a - E_b) - \frac{3n E_a}{2} \right\} \\ &\quad \times \frac{1}{(n-1) + 3n^4/\{2(n-1)DZ\}} \\ V_c &= V_b - E_b + E_c \end{aligned} \right\} \dots (38)$$

ただし, $D = 1/Z_t$

(II)

$$\left. \begin{aligned} V_a &= -(n+1)E_a/2 - E_b, \quad V_b = -n E_a/2 \\ V_c &= (E_c - E_b) - n E_a/2 \end{aligned} \right\} \quad (39)$$

<4.6> **As-a** 混触, **A**-接地の場合 (故障形態 16

番)

(I)

$$V_a = 0, \quad V_b = E_b - E_a, \quad V_c = E_c - E_a \dots (40)$$

(II)

$$\left. \begin{aligned} V_a &= n E_a + \frac{DZ}{2DZ + 3n^2} n E_a \\ V_b &= \left(n + \frac{1}{2} \right) E_a + E_b + \frac{2DZ - 3n}{2(2DZ + 3n^2)} n E_a \\ V_c &= V_b - E_b + E_c \end{aligned} \right\} \dots\dots (41)$$

<4.7> **As-b** 混触, **A**-接地の場合 (故障形態 17

番)

(I)

$$\left. \begin{aligned} V_a &= 0, \quad V_b = \frac{n}{n-1} (E_b - E_a) \\ V_c &= E_c - \frac{1}{n-1} (n E_a - E_b) \end{aligned} \right\} \dots\dots (42)$$

(II)

$$\left. \begin{aligned} V_a &= \frac{\{DZ(3n-1) + 3n^3\} E_a}{2DZ + 3n^2} - E_b \\ V_b &= \frac{3n(DZ + n^2) E_a}{2DZ + 3n^2}, \quad V_c = V_b - E_b + E_c \end{aligned} \right\} \dots\dots (43)$$

<4.8> **As**-接地, **A-a** 混触の場合 (故障形態 19

番)

(I)

$$V_a = 0, \quad V_b = E_b - E_a, \quad V_c = E_c - E_a \dots (44)$$

(II)

$$\left. \begin{aligned} V_a &= -3n E_a/2, \quad V_b = (1-3n)E_a/2 + E_b \\ V_c &= (1-3n)E_a/2 + E_c \end{aligned} \right\} \quad (45)$$

<4.9> **As**-接地, **A-b** 混触の場合 (故障形態 20

番)

(I)

$$\left. \begin{aligned} V_a &= (E_b - E_a)/n, \quad V_b = E_b - E_a, \quad V_c = E_c - E_a \\ &\dots\dots (46) \end{aligned} \right\}$$

(II)

$$\left. \begin{aligned} V_a &= -(3n+1)E_a/2 - E_b, \quad V_b = -3n E_a/2 \\ V_c &= -3n E_a/2 - (E_b - E_c) \end{aligned} \right\} \dots\dots (47)$$

<4.10> 補助変圧器の侵入電圧抑制効果 (30)~

(47) 式を故障形態別に図示すると第 8 図~第 16 図の

第 8 図 侵入電圧と変圧比の関係 (2 番の故障形態)

Fig. 8. Relationship between the incident voltages and the transformation ratio.

第 10 図 侵入電圧と変圧比の関係 (9 番の故障形態)

Fig. 10. Relationship between the incident voltages and the transformation ratio.

第 9 図 侵入電圧と変圧比の関係 (5 番の故障形態)

Fig. 9. Relationship between the incident voltages and the transformation ratio.

第 11 図 侵入電圧と変圧比の関係 (13 番の故障形態)

Fig. 11. Relationship between the incident voltages and the transformation ratio.

ようになる。点線は補助変圧器を設置しない場合の侵入電圧を表わし、いずれの故障形態においても変圧比の増加とともに侵入電圧は高くなる。また (41), (43) 式からもわかるように故障形態 16 番, 17 番は負荷インピーダンス ($D=1/Z_i$) が侵入電圧に影響するが、負荷力率による影響は小さいので Z と同種のインピーダンスとし、無負荷状態として $DZ=0$, 重負荷状態として $DZ=100$ の場合を示した。(第 13 図, 第

14 図参照) なお, $DZ=100$ の場合は図面が複雑になるので、電圧が最も高くなる相のみ描いた。

実線は補助変圧器を設置した場合の侵入電圧の大きさを表わす。この場合は侵入電圧が変圧比 n に関係する場合と無関係に一定の場合とがあるが、変圧比に関係する場合は必ず侵入電圧は変圧比の増加とともに減少する。また負荷インピーダンスが影響する故障形態

第 12 図 侵入電圧と変圧比の関係
(14 番の故障形態)

Fig. 12. Relationship between the incident voltages and the transformation ratio.

第 13 図 侵入電圧と変圧比の関係
(16 番の故障形態)

Fig. 13. Relationship between the incident voltages and the transformation ratio.

は (38) 式からもわかるように 14 番の故障のときである。したがって、前と同様 $DZ=0$, $DZ=100$ について計算した結果を第 12 図に示す。負荷の影響は余り大きくない。

なお、図中の○印は〈3・8〉節で検討したと同一模擬実験回路定数での実験値であり、計算値とよく一致し

第 14 図 侵入電圧と変圧比の関係
(17 番の故障形態)

Fig. 14. Relationship between the incident voltages and the transformation ratio.

第 15 図 侵入電圧と変圧比の関係
(19 番の故障形態)

Fig. 15. Relationship between the incident voltages and the transformation ratio.

た。

補助変圧器による侵入電圧抑制効果は故障形態により多少変化するが変圧比が約 3 以上で現われる。一般の電気機器の試験電圧は相電圧の 3.5 倍、線間電圧の 2 倍 (6 kV のときは 3 倍) であるから、故障形態 1

第 16 図 侵入電圧と変圧比の関係
(20 番の故障形態)

Fig. 16. Relationship between the incident voltages and the transformation ratio.

番を除く他の断線混触故障はすべて補助変圧器を設置することによって、侵入電圧を機器の耐圧以下に抑制しうることになる。

5. 故障形態 1 番に対する防護対策

補助変圧器を配電塔主変圧器の一次、二次中性点と大地間に接続すれば、断線混触故障時の 6 kV 側配電線への侵入電圧は、故障形態 1 番を除く他の故障形態に対しては問題なく機器の耐圧以下に大きく抑制されるが、故障形態 1 番においては侵入電圧が高くなる場合が生じることが明らかになった。これに対する防護対策として次のようなものが考えられる。

配電塔の設置場所は線路の電圧降下、損失ならびに経済的な面から決定されるため、任意の場所に自由に移動することはできない。また、断線混触故障は 20 kV 送電線と 6 kV 配電線の共架区間のみで発生すると考えられる。そこで中性点引出用変圧器を用いて補助変圧器を共架区間の電源側（第 1 図の P 点）へ移し第 17 図のようにする。このようにすれば、As-a 混触、A-Open という 1 番の最悪故障形態も補助変圧器に対しては断線を伴わない単なる混触故障と同じ回路条件になり、補助変圧器がじゅうぶん作動するため侵入電圧は低減されることになる。このような位置に補助変圧器を設置した場合、他の断線混触故障に対しても断線を伴わない混触故障と同じ回路が補助変圧器に対して形成されるので、侵入電圧抑制効果はじゅう

第 17 図 補助変圧器とを電源側に設置したときの送配電回路

Fig. 17. Transmission and distribution circuit when an auxiliary transformer is installed in the source side.

ぶん期待できる。第 2 表にこの場合の実験結果を示す。なお、この実験では $Z=38\Omega$ (純抵抗)、 $Z_c=\infty$ 、 $Z_L=\infty$ 、 $n=4$ とした。この表からわかるように、すべての故障形態に対して補助変圧器を設置すれば、侵入電圧は大きく抑制される。

その他の方法としては

- (イ) 配電線路が、無負荷の状態になることをさける。
 - (ロ) 配電線路に適当な零相インピーダンスをそう入する。
 - (ハ) 中性点接地インピーダンス Z を補助変圧器側へ移す。
- などが考えられる。

6. むすび

以上、送配電線路の断線混触故障のうち発生する確率の高いと考えられる 1 線断線による混触故障形態 21 種類について、補助変圧器の設置効果を検討した。その結果、配電線路が全線しゃ断されているような状態で、故障形態 1 番のような断線混触故障が発生すると、侵入電圧が機器の耐圧以上に高くなるおそれがあることが明らかとなった。これは故障電流が変圧器の励磁インピーダンスによって制限されるため、励磁インピーダンスが大きいと補助変圧器を作動させるにじゅうぶんな電流が流れえないためである。したがって、このような故障状態が生じないようにしなければならぬ。これをさけるには補助変圧器を送配電線の共架区間の電源側に設置すれば解決できるとともに、他の断線混触故障に対しても補助変圧器は有効に作動し、配電線路への侵入電圧を機器の耐圧以下に大きく抑制することができる。

なお、断線混触故障の形態にはこのほか発生する確

第 2 表 測 定 値
Table 2. Measured values.

番 号	各相対地電圧		$V_a(V)$		$V_b(V)$		$V_c(V)$	
	故障形態	補助変圧器	有	無	有	無	有	無
1	As-a	A-Open	0 (0)	83 (4.15)	33 (1.65)	55 (2.75)	34 (1.7)	55 (2.75)
2	As-b	"	9.5 (0.48)	113 (5.65)	42 (2.1)	83 (4.15)	40 (2.0)	90 (4.5)
3	As-c	"	10 (0.5)	113 (5.65)	38 (1.9)	90 (4.5)	44 (2.2)	82 (4.1)
4	As-a	A-a	1 (0.05)	82 (4.1)	34 (1.7)	55 (2.75)	34 (1.7)	54 (2.7)
5	"	A-b	3 (0.15)	"	32 (1.6)	58 (2.9)	"	59 (2.95)
6	"	A-c	4 (0.2)	83 (4.15)	33 (1.65)	59 (2.95)	33 (1.65)	58 (2.9)
7	As-b	A-a	6 (0.3)	112 (5.6)	43 (2.15)	80 (4.0)	41 (2.05)	86 (4.3)
8	"	A-b	9 (0.45)	113 (5.65)	42 (2.1)	82 (4.1)	40 (2.0)	90 (4.5)
9	"	A-c	7.5 (0.38)	114 (5.7)	43 (2.15)	"	"	89 (4.45)
10	As-c	A-a	6.5 (0.33)	115 (5.75)	40 (2.0)	86 (4.3)	45 (2.25)	81 (4.05)
11	"	A-b	8.5 (0.43)	115 (5.75)	38 (1.9)	90 (4.5)	"	83 (4.15)
12	"	A-c	10 (0.5)	114 (5.7)	"	"	44 (2.2)	"
13	As-Open	A-a	4 (0.2)	80 (4.0)	27 (1.53)	52 (2.6)	31 (1.55)	53 (2.65)
14	"	A-b	2.5 (0.13)	110 (5.5)	32 (1.6)	80 (4.0)	35 (1.75)	88 (4.4)
15	"	A-c	8 (0.4)	"	27 (1.35)	88 (4.4)	37 (1.85)	80 (4.0)
16	As-a	A-接地	1 (0.05)	17 (0.85)	34 (1.7)	14 (0.7)	34 (1.7)	31 (1.55)
17	As-b	"	3 (0.15)	50 (2.5)	40 (2.0)	17 (0.85)	40 (2.0)	47 (2.35)
18	As-c	"	4 (0.2)	44 (2.2)	39 (1.95)	29 (1.45)	42 (2.1)	17 (0.85)
19	As-接地	A-a	0 (0)	2 (0.1)	34 (1.7)	36 (1.8)	35 (1.75)	37 (1.85)
20	"	A-b	2.5 (0.13)	33 (1.63)	31 (1.55)	2 (0.1)	33 (1.65)	36 (4.3)
21	"	A-c	"	32 (1.6)	34 (1.7)	34 (1.7)	32 (1.58)	2 (0.1)

() 内は E_a に対する倍数を示す。

率は小さいが、断線した送電線が配電線の 2 線または 3 線にまたがって混触する場合とか、送電線の 2 線または 3 線断線による混触などが考えられる。これら多くの故障形態に対して補助変圧器がどの範囲までその能力を発揮しうるかは興味ある問題である。今後さらに研究を進めてゆきたいと考えている。

また、従来送電線と配電線は混触事故に対する有効な防護対策がないためにその共架がさけられてきた。しかし、それはあまりにも消極的かつ不経済であり、最近のように市街地での線路建設用地の取得が困難に

なってくると、20kV 配電を実施するに際してますます共架の必要性が高まってくる。本研究の成果が送配電線の共架の実現に役だてば幸いである。

最後に実験に協力された重丸技官に謝意を表する。

(昭和 46 年 7 月 29 日受付, 同 47 年 3 月 6 日再受付)

文 献

- (1) 大野木: 特許出願番号 46-2553
- (2) 大野木: 電学誌 91, 2314 (昭 46-12)