

送電系地絡事故時の故障電流に関する一検討

森 武 昭 ・ 大 矢 征

Study on the Fault Current in Transmission System
during Ground-Fault

Takeaki MORI and Susumu OHYA

Abstract

For the consideration of the electro-magnetic inductive interference with communication lines laying nearby a power line, it is very important to estimate the fault current in transmission system during ground-fault. The calculation of the fault current has hitherto been estimated by the symmetrical coordinate method on the assumption that the phase angle difference between the voltages at the sending-end and at the receiving-end is zero.

This paper proposes a new calculating method which makes it possible to take the phase angle difference into calculation. This method is different only in the first circuit of positive sequence component as compared with the usual symmetrical coordinate method. Furthermore, by the numerical computation we quantitatively study the influences of this phase angle difference and earth conductivity on the fault current and inducing current which is obtained by phasor sum of fault current and overhead ground wire current.

1. ま え が き

近年、送電系統は直接接地方式の採用に伴って高電圧大容量化が進み、一線地絡事故時には大きな故障電流が流れる。この故障電流の大きさを前もって予測することは、遮断器容量や近傍通信線への電磁誘導障害を検討する上で非常に重要である。ところで、従来、故障電流の算出に当っては、

- (1) 計算方法はできるだけ簡易にする。
- (2) 計算をおこなう際に用いる定数で、必ずしもその値が明確になっていないものは、計算目的からして、最も厳しい条件を設定する。即ち、故障電流の計算結果が大きくなるように、定数を設定する。

という前提のもとにおこなってきている。したがって、このことが、地絡時の故障電流や起誘導電流（故障電流と架空地線電流のフェーザ和）を実測すると、予測計算値をかなり下回ることが指摘されている所以であると思われる。前記(1)の事項については、対称座標法

が広く知られているが、¹⁾ 最近では、出来るだけ実際の情況に忠実な計算手法が筆者らによって提案されている。^{2),3)} 他方、(2)の事項については、必ずしもその値を十分明確化できない要素としては、次のようなものが挙げられる。

- (i) 地絡鉄塔におけるアーク抵抗
- (ii) 地絡相の相違による影響
- (iii) 大地導電率
- (iv) 送受電端の電圧の大きさの相違
- (v) 送受電端の電圧の位相差（以下、「相差角」と呼ぶ）

この中で、(ii)に関しては、筆者らが提案した四端子回路理論を多線条系化した方法と対称座標法による計算結果を比較したところ、後者の方法による結果は、前者の方法の中相地絡の場合の結果とほぼ一致し、上相地絡と下相地絡は、中相地絡に対して約±5%相違することが報告されている。^{2),3)} また、(i)に関しては、アーク抵抗を数オーム以下と仮定すると、アーク抵抗を0オームとした計算結果とほとんど相違しないことが確認されている。³⁾ 一方、(iii)～(v)に関しては、いまだ十分検討されていないように思われる。そこで、筆

者らは、これらの点についての検討を試みた。即ち、従来の対称座標法を若干拡張させることより、(iv)と(v)を検討することを可能とする計算方法を第2章で示す。そして、代表的な送電線を取り上げて、(iii)~(v)について、その影響に関しての詳細な検討結果を第3章と第4章で示す。

2. 相差角を考慮した対称座標法

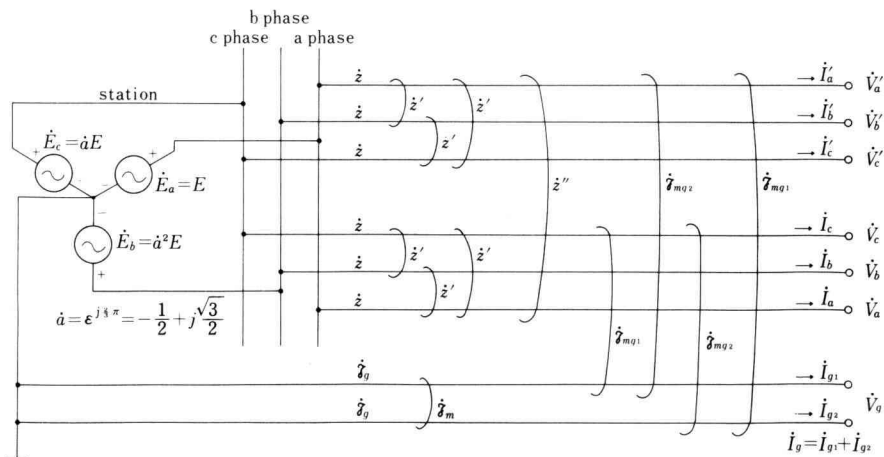
架空地線2条を有する3相2回線送電線において、各相間及び回線間で完全に平衡がとれているものと仮定すると送電系統図は図1のように表わせる。このような送電系統を行列表示し、変換行列を用いて対角化すると次式のように表わせるのは周知の通りである。⁴⁾

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{00} \\ \dot{V}_{10} \\ \dot{V}_{20} \\ \dot{V}_{01} \\ \dot{V}_{11} \\ \dot{V}_{21} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ E \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - I_f \begin{bmatrix} \dot{z} + 2\dot{z}' + 3\dot{z}'' - 6\dot{z}''' & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \dot{z} - \dot{z}' & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dot{z} - \dot{z}' & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dot{z} + 2\dot{z}' - 3\dot{z}'' & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{z} - \dot{z}' & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{z} - \dot{z}' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{00} \\ \dot{I}_{10} \\ \dot{I}_{20} \\ \dot{I}_{01} \\ \dot{I}_{11} \\ \dot{I}_{21} \end{bmatrix} \quad \dots\dots(1)$$

ここで、

l_f : 電気所から送電線の任意の点までの距離 (km)

$$\left. \begin{aligned} \dot{z}''' &= (\dot{z}')^2 / \dot{z}_g \\ \dot{z}_g &= (\dot{z}_g + \dot{z}_m) / 2 \\ \dot{z}' &= (\dot{z}_{mg1} + \dot{z}_{mg2}) / 2 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots(2)$$



E ; phase voltage of power source at terminal station.

\dot{z} ; earth-return self impedance per phase per km of transmission line.

\dot{z}' ; earth-return mutual impedance per km between phases.

\dot{z}'' ; earth-return mutual impedance per km between circuits.

\dot{z}_g ; earth-return self impedance per km of overhead ground wire.

\dot{z}_m ; earth-return mutual impedance per km between two overhead ground wires.

$\dot{z}_{mg1}, \dot{z}_{mg2}$; earth-return mutual impedance per km between overhead ground wire and phase conductor of first or second circuit.

Fig. 1 System diagram of transmission lines.

$$\left. \begin{aligned} \dot{V}_{00} &= (\dot{V}_a + \dot{V}_b + \dot{V}_c + \dot{V}'_a + \dot{V}'_b + \dot{V}'_c) / 6 \\ \dot{V}_{10} &= (\dot{V}_a + a\dot{V}_b + a^2\dot{V}_c + \dot{V}'_a + a\dot{V}'_b \\ &\quad + a^2\dot{V}'_c) / 6 \\ \dot{V}_{20} &= (\dot{V}_a + a^2\dot{V}_b + a\dot{V}_c + \dot{V}'_a + a^2\dot{V}'_b \\ &\quad + a\dot{V}'_c) / 6 \\ \dot{V}_{01} &= (\dot{V}_a + \dot{V}_b + \dot{V}_c - \dot{V}'_a - \dot{V}'_b - \dot{V}'_c) / 6 \\ \dot{V}_{11} &= (\dot{V}_a + a\dot{V}_b + a^2\dot{V}_c - \dot{V}'_a - a\dot{V}'_b \\ &\quad - a^2\dot{V}'_c) / 6 \\ \dot{V}_{21} &= (\dot{V}_a + a^2\dot{V}_b + a\dot{V}_c - \dot{V}'_a - a^2\dot{V}'_b \\ &\quad - a\dot{V}'_c) / 6 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(3)$$

$$a = -1/2 + j\sqrt{3}/2 \dots\dots\dots(4)$$

電流 \dot{I} についても (3) 式で示した電位 \dot{V} と同様の関係が存在する。(1) 式で明らかのように、電気所における電源電圧 E は、 \dot{V}_{10} 、 \dot{I}_{10} の関係する正相第 1 回路のみであり、他の対称分回路は、次に示すように従来の対称座標法と全く同様に扱える。

(1) 零相第 1 回路

$$\left. \begin{aligned} \dot{Z}_{00A} &= (\dot{z} + 2\dot{z}' + 3\dot{z}'' - 6\dot{z}''')l_{fA} + 2\dot{Z}_{0A} \\ \dot{Z}_{00B} &= (\dot{z} + 2\dot{z}' + 3\dot{z}'' - 6\dot{z}''')l_{fB} + 2\dot{Z}_{0B} \\ \dot{Z}_{00} &= \dot{Z}_{00A} \cdot \dot{Z}_{00B} / (\dot{Z}_{00A} + \dot{Z}_{00B}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(5)$$

ここで

l_{fA} , l_{fB} : 地絡点から A または B 電気所までの距離 (km)

\dot{Z}_{0A} , \dot{Z}_{0B} : A または B 電気所の零相インピーダンス (Ω)

(2) 逆相第 1 回路

$$\left. \begin{aligned} \dot{Z}_{20A} &= (\dot{z} - \dot{z}')l_{fA} + 2\dot{Z}_{2A} \\ \dot{Z}_{20B} &= (\dot{z} - \dot{z}')l_{fB} + 2\dot{Z}_{2B} \\ \dot{Z}_{20} &= \dot{Z}_{20A} \cdot \dot{Z}_{20B} / (\dot{Z}_{20A} + \dot{Z}_{20B}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(6)$$

ここで、

\dot{Z}_{2A} , \dot{Z}_{2B} : A または B 電気所の逆相インピーダンス (Ω)

(3) 零相第 2 回路

$$\left. \begin{aligned} \dot{Z}_{01A} &= (\dot{z} + 2\dot{z}' - 3\dot{z}'')l_{fA} \\ \dot{Z}_{01B} &= (\dot{z} + 2\dot{z}' - 3\dot{z}'')l_{fB} \\ \dot{Z}_{01} &= \dot{Z}_{01A} \cdot \dot{Z}_{01B} / (\dot{Z}_{01A} + \dot{Z}_{01B}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(7)$$

(4) 正相第 2 回路と逆相第 2 回路

$$\left. \begin{aligned} \dot{Z}_{11A} &= \dot{Z}_{21A} = (\dot{z} - \dot{z}')l_{fA} \\ \dot{Z}_{11B} &= \dot{Z}_{21B} = (\dot{z} - \dot{z}')l_{fB} \\ \dot{Z}_{11} &= \dot{Z}_{21} = \dot{Z}_{11A} \cdot \dot{Z}_{11B} / (\dot{Z}_{11A} + \dot{Z}_{11B}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(8)$$

次に、問題となる正相第 1 回路について、 A , B 両電気所の電圧の大きさの相違及び相差角 δ を考慮して、

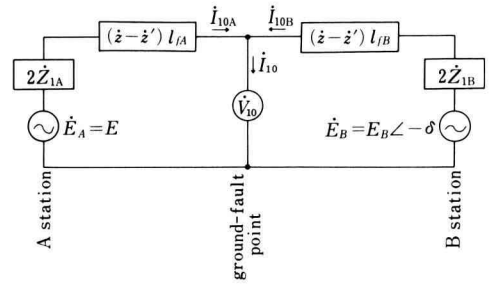


Fig. 2 The first circuit of positive-sequence component.

各電気所での電源電圧を、

$$\dot{E}_A = E_A, \dot{E}_B = E_B \angle -\delta \dots\dots\dots(9)$$

とくと、その回路構成は図 2 のようになる。ここで、地絡点から A 電気所または B 電気所までのインピーダンス \dot{Z}_{10A} , \dot{Z}_{10B} は、

$$\left. \begin{aligned} \dot{Z}_{10A} &= (\dot{z} - \dot{z}')l_{fA} + 2\dot{Z}_{1A} \\ \dot{Z}_{10B} &= (\dot{z} - \dot{z}')l_{fB} + 2\dot{Z}_{1B} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(10)$$

となる。ここで、 \dot{Z}_{1A} , \dot{Z}_{1B} は A または B 電気所の正相インピーダンスで、一般的には、 $\dot{Z}_{1A} = \dot{Z}_{2A}$, $\dot{Z}_{1B} = \dot{Z}_{2B}$ が成り立っている。図 2 から明らかなように、地絡点においては、

$$\dot{V}_{10} = \dot{E}_A - \dot{Z}_{10A}\dot{I}_{10A} = \dot{E}_B - \dot{Z}_{10B}\dot{I}_{10B}$$

が成立する。そして、 $\dot{I}_{10A} + \dot{I}_{10B} = \dot{I}_{10}$ の関係が存在するので、次のような関係が得られる。

$$\left. \begin{aligned} \dot{V}_{10} &= \frac{\dot{Z}_{10B}\dot{E}_A + \dot{Z}_{10A}\dot{E}_B}{\dot{Z}_{10A} + \dot{Z}_{10B}} - \dot{Z}_{10}\dot{I}_{10} \\ \dot{Z}_{10} &= \dot{Z}_{10A} \cdot \dot{Z}_{10B} / (\dot{Z}_{10A} + \dot{Z}_{10B}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(11)$$

次に、図 1 の a 相で地絡が生じたとすると、故障点では、

$$\dot{V}_a = 0, \dot{I}_b = \dot{I}_c = \dot{I}'_a = \dot{I}'_b = \dot{I}'_c = 0 \dots\dots\dots(12)$$

という条件が成立する。したがって、(3) 式の変換の関係を考慮すると、

$$\left. \begin{aligned} \dot{V}_{00} + \dot{V}_{10} + \dot{V}_{20} + \dot{V}_{01} + \dot{V}_{11} + \dot{V}_{21} &= 0 \\ \dot{I}_{00} = \dot{I}_{10} = \dot{I}_{20} = \dot{I}_{01} = \dot{I}_{11} = \dot{I}_{21} &= \dot{I}_F / 6 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(13)$$

を得る。ここで、 \dot{I}_F は地絡点における故障点電流 (地絡点での a 相電流 \dot{I}_a に相当) を示している。これらの関係より、

$$\dot{I}_F = 6\dot{I}_{00} = \frac{6}{\dot{Z}_{00} + \dot{Z}_{10} + \dot{Z}_{20} + \dot{Z}_{01} + \dot{Z}_{11} + \dot{Z}_{21}}$$

$$\cdot \frac{\dot{Z}_{10B}\dot{E}_A + \dot{Z}_{10A}\dot{E}_B}{\dot{Z}_{10A} + \dot{Z}_{10B}} \quad \dots\dots\dots(14)$$

という関係を得る。したがって、 A, B 各電気所側へ分流する故障電流 $\dot{I}_{FA}, \dot{I}_{FB}$ 及び地絡点での相電圧は、次のような式で求められる。

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{FA} &= \frac{\dot{Z}_{00B}}{\dot{Z}_{00A} + \dot{Z}_{00B}} \dot{I}_F = \frac{\dot{Z}_{00}}{\dot{Z}_{0A}} \dot{I}_F \\ \dot{I}_{FB} &= \frac{\dot{Z}_{00A}}{\dot{Z}_{00A} + \dot{Z}_{00B}} \dot{I}_F = \frac{\dot{Z}_{00}}{\dot{Z}_{0B}} \dot{I}_F \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(15)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{V}_a &= 0 \\ \dot{V}_b &= a^2 \frac{\dot{Z}_{10B}\dot{E}_A + \dot{Z}_{10A}\dot{E}_B}{\dot{Z}_{10A} + \dot{Z}_{10B}} - (\dot{Z}_{00} + a^2 \dot{Z}_{10} \\ &\quad + a\dot{Z}_{20} + \dot{Z}_{01} + a^2 \dot{Z}_{11} + a\dot{Z}_{21}) \frac{\dot{I}_F}{6} \\ \dot{V}_c &= a \frac{\dot{Z}_{10B}\dot{E}_A + \dot{Z}_{10A}\dot{E}_B}{\dot{Z}_{10A} + \dot{Z}_{10B}} - (\dot{Z}_{00} + a\dot{Z}_{10} \\ &\quad + a^2 \dot{Z}_{20} + \dot{Z}_{01} + a\dot{Z}_{11} + a^2 \dot{Z}_{21}) \frac{\dot{I}_F}{6} \\ \dot{V}_a' &= \frac{\dot{Z}_{10B}\dot{E}_A + \dot{Z}_{10A}\dot{E}_B}{\dot{Z}_{10A} + \dot{Z}_{10B}} - (\dot{Z}_{00} + \dot{Z}_{10} \\ &\quad + \dot{Z}_{20} - \dot{Z}_{01} - \dot{Z}_{11} - \dot{Z}_{21}) \frac{\dot{I}_F}{6} \\ \dot{V}_b' &= a^2 \frac{\dot{Z}_{10B}\dot{E}_A + \dot{Z}_{10A}\dot{E}_B}{\dot{Z}_{10A} + \dot{Z}_{10B}} - (\dot{Z}_{00} + a^2 \dot{Z}_{10} \\ &\quad + a\dot{Z}_{20} - \dot{Z}_{01} - a^2 \dot{Z}_{11} - a\dot{Z}_{21}) \frac{\dot{I}_F}{6} \\ \dot{V}_c' &= a \frac{\dot{Z}_{10B}\dot{E}_A + \dot{Z}_{10A}\dot{E}_B}{\dot{Z}_{10A} + \dot{Z}_{10B}} - (\dot{Z}_{00} + a\dot{Z}_{10} \\ &\quad + a^2 \dot{Z}_{20} - \dot{Z}_{01} - a\dot{Z}_{11} - a^2 \dot{Z}_{21}) \frac{\dot{I}_F}{6} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(16)$$

(14)~(16)式で、 $\dot{E}_A = \dot{E}_B$ とおけば、対称座標法でよく知られた結果と一致することは言うまでもない。したがって、本計算方法では、 $(\dot{Z}_{10B}\dot{E}_A + \dot{Z}_{10A}\dot{E}_B)/(\dot{Z}_{10A} + \dot{Z}_{10B})$ の項が付加される点に特に注意する必要がある。

3. 計算条件と故障電流曲線

3-1 計算条件

本稿では、次のような諸定数で構成されるモデル送電線を想定する。なお、これらの数値は、現在の我が国における最も代表的な超高圧送電線の定数である。

亘長； $l_{AB} = 100$ (km)，周波数； $f = 50$ (Hz)

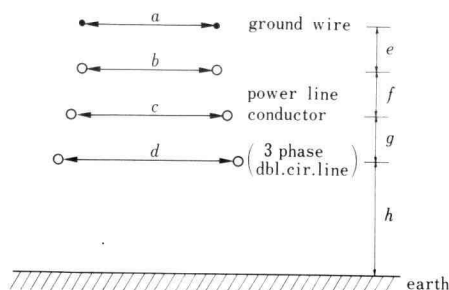


Fig. 3 Disposition of conductors.

送電端相電圧； $E_A = 500/\sqrt{3}$ (kV)

導体配置；図3において、

$a = 19.2$ (m)， $b = 19.2$ (m)

$c = 19.6$ (m)， $d = 20.0$ (m)

$e = 12.6$ (m)， $f = 13.5$ (m)

$g = 13.5$ (m)， $h = 30.0$ (m)

送電導体；ACSR (鋼心アルミより線)

240 mm² × 4 導体 直径 22.4 mm

素導体直流抵抗 0.12 Ω/km

素導体間隔 40 cm

架空地線；AS (アルミ被鋼より線)

160 mm² 直径 21.0 mm

直流抵抗 0.166 Ω/km

電気所インピーダンス；

$\dot{Z}_{0A} = j22.72 \Omega$ $\dot{Z}_{1A} = j21.80 \Omega$

$\dot{Z}_{0B} = j17.08 \Omega$ $\dot{Z}_{1B} = j14.30 \Omega$

なお、受電端相電圧は、 $E_B = 500/\sqrt{3}$ (kV) = E_A と $E_B = 475/\sqrt{3}$ (kV) について、相差角は、 $\delta = 0^\circ \sim 90^\circ$ について、大地導電率は、 $\sigma = 0.01$ (S/m) と $\sigma = 0.001$ (S/m) についてそれぞれ計算をおこなった。

3-2 標準的な場合の故障電流曲線

前述の計算条件で、 $E_A = E_B = 500/\sqrt{3}$ (kV)， $\delta = 0^\circ$ ， $\sigma = 0.01$ (S/m) の場合について、故障電流曲線を求めると図4のようになる。 $E_A = E_B$ ， $\delta = 0^\circ$ は、従来おこなわれている計算条件であり、故障電流が大きくなるように設定することにより、遮断器容量の決定や近傍通信線への電磁誘導障害予測計算等に用いられている。また、大地導電率は、送電線経過地により異なるのは言うまでもないが、 $\sigma = 0.01$ (S/m) は比較的導電率のよい地域を想定した値であり、後述するように、故障電流としては大きい値の傾向を示すように設定している。図4からも明らかのように、故障点に近い方の電気所から流れる故障電流は、遠い方の電気所から流れ

る故障電流より、線路部分のインピーダンスの影響により大きくなっている。そして、電気所の近傍では、この傾向が最も大きく表われている。また、 I_{FA} と I_{FB} を比べると、その傾きは I_{FB} が若干大きくなっているが、これは電気所インピーダンスの値が零相分、正相分ともに B 電気所の方が小さい値となっているためである。もし、両電気所インピーダンスの値が各対称成分とも等しいなら、送電線の間接点を中心に両側へ対称な曲線となる (付録参照)。

そこで、地絡点を 0, 50, 100 km とした時に、地絡点から A 電気所側または B 電気所側に向かって流れる故障電流 I_{FA} , I_{FB} について、図 4 で得られた値を基準として、 E_B , δ , σ を変化させた時の計算結果について、次章で詳細に述べることにする。

4. 各種の条件における故障電流と起誘導電流

4-1 故障電流

前述のように、 $E_A = E_B$, $\delta = 0^\circ$ の際の故障電流の値 I_{FAS} , I_{FBS} を基準として、本稿でおこなった各種の条件について求めた故障電流 I_{FA} , I_{FB} から、

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{FA} &= (1 - I_{FA}/I_{FAS}) \times 100 (\%) \\ \varepsilon_{FB} &= (1 - I_{FB}/I_{FBS}) \times 100 (\%) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (17)$$

という計算をおこない、図示することを試みた。即ち、基準とした故障電流の値より何%増減 (ε_{FA} または ε_{FB} が正であれば減、負であれば増) したかを示している。なお、ここで検討した計算条件としては、

条件 (1); $E_A = E_B = 500/\sqrt{3}$ (kV),

$\sigma = 0.01$ (S/m)

条件 (2); $E_A = 500/\sqrt{3}$ (kV), $E_B = 475/\sqrt{3}$ (kV),

$\sigma = 0.01$ (S/m)

条件 (3); $E_A = E_B = 500/\sqrt{3}$ (kV),

$\sigma = 0.001$ (S/m)

条件 (4); $E_A = 500/\sqrt{3}$ (kV), $E_B = 475/\sqrt{3}$ (kV),

$\sigma = 0.001$ (S/m)

の 4 種類であり、いずれの場合も $\delta = 0^\circ \sim 90^\circ$ について求めている。これらの計算結果を示すと、図 5～図 7 の通りである。これらの図より、次のような点が明らかとなっている。

- ① 相差角 δ が大きくなると、いずれの場合も ε_F が大きくなっている。即ち、故障電流は $\delta = 0^\circ$ の場合より小さくなっている。
- ② $E_A \neq E_B$ と $\sigma = 0.001$ (S/m) としたことによる影響は、0 km 地絡における ε_{FB} , 100 km 地絡に

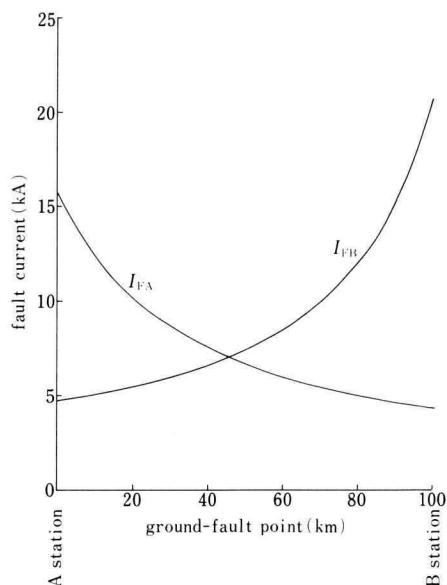
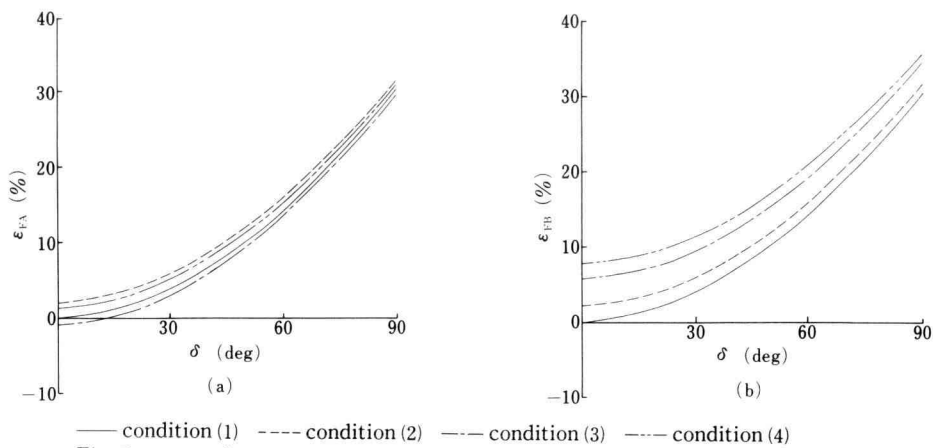
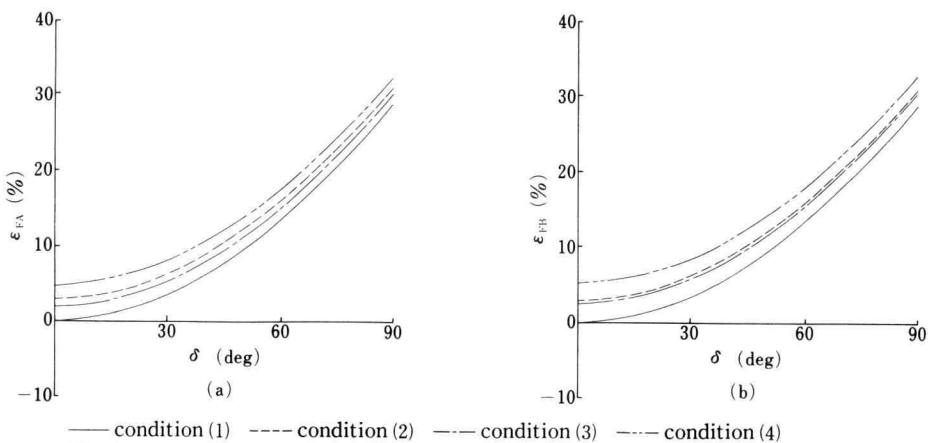
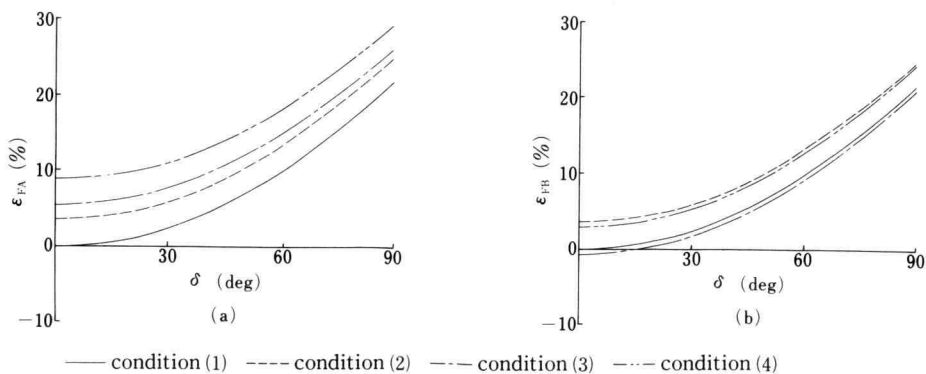


Fig. 4 Fault current vs. ground-fault point.

おける ε_{FA} が若干顕著となっている。

- ③ 安定度などの面から、一般に送受電端間の相差角は $30^\circ \sim 40^\circ$ 程度と考えられており、⁵⁾ 本計算結果で見ると、この範囲での ε_F の最大値は約 15% 程度である。

① と ② に関しては、次のような理由が考えられる。即ち、(13) 式の右辺の $(\dot{Z}_{10B}\dot{E}_A + \dot{Z}_{10A}\dot{E}_B) / (\dot{Z}_{10A} + \dot{Z}_{10B})$ に関して、基準としている $E_A = E_B = E$ の場合にはこの項は E となり、 $\delta \neq 0^\circ$, $E_A \neq E_B$ ($E_A > E_B$) の場合には必ず E_A よりも小さな値となる。それ故、故障電流は (14) 式で明らかのように、基準の場合よりも小さくなり、 $\varepsilon > 0$ となる。このことは、 δ が大きくなるとより顕著になることも (14) 式より明らかになっている。次に、大地導電率が低く (悪く) になると、大地帰路インピーダンスは大きくなり、それ故、零相第一インピーダンスも大きくなる。従って、(14) 式における \dot{Z}_{00} が大きくなるため、故障電流 \dot{I}_F は小さくなり、 $\varepsilon_F > 0$ となる。ただし、地絡点 0 km における ε_{FA} と 100 km における ε_{FB} が $\delta \neq 0^\circ$ 付近で $\varepsilon_F < 0$ となっているのは、次のことに起因している。即ち、電気所地絡、例えば 0 km 地絡では、(5) 式において、 $\dot{Z}_{00A} = 2\dot{Z}_{0A}$ となり σ には依存しない。一方、 \dot{Z}_{00B} は $l_{FB} = l_{AB}$ で全長となるため σ に大きく依存し、 σ が低くなると \dot{Z}_{00B} は大きくなる。それ故、(15) 式で、 $\dot{I}_{FA} = \dot{I}_F / (1$

Fig. 5 ε_F vs. phase angle difference (ground-fault point : 0 km from A station)Fig. 6 ε_F vs. phase angle difference (ground-fault point : 50 km from A station)Fig. 7 ε_F vs. phase angle difference (ground-fault point : 100 km from A station)

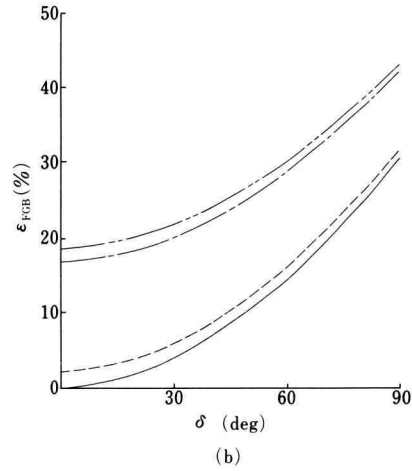
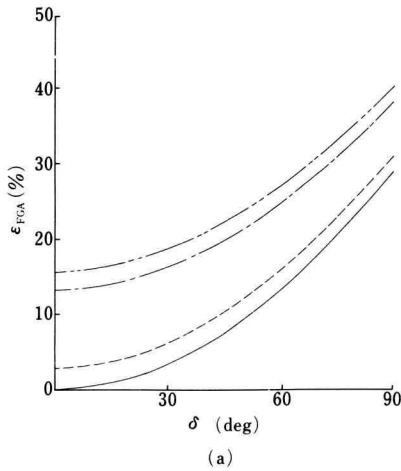
$+\dot{Z}_{00A}/\dot{Z}_{00B}$ の $\dot{Z}_{00A}/\dot{Z}_{00B}$ は σ が低くなると小さくなる。従って、 \dot{I}_{FA} は前に述べた理由により \dot{I}_F が小さくなる一方、その分母も小さくなる。そして、 $E_A=E_B$ 、 $\delta < 20^\circ$ の範囲では分母の影響がより大きいので $\varepsilon_F < 0$ になっているものと思われる。他方、 $\dot{I}_{FB}=\dot{I}_F/(1+\dot{Z}_{00B}/\dot{Z}_{00A})$ は、 \dot{I}_F も分母も小さくなるため $\varepsilon_F > 0$ となり、他の地絡点の場合よりもその影響は顕著に生じる。

4-2 起誘導電流

電磁誘導障害を検討する場合には、架空地線電流も

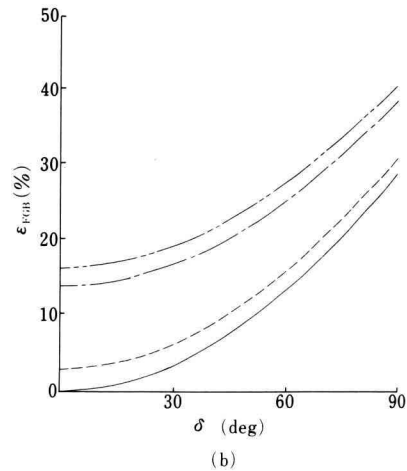
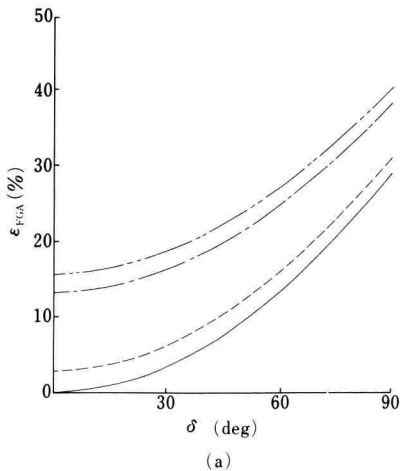
含めた $\dot{I}_F+\dot{I}_G$ が問題となる。そこで、 $E_A=E_B$ 、 $\delta=0^\circ$ 、 $\sigma=0.01$ (S/m) の際の起誘導電流 $I_{FGA}=|\dot{I}_{FA}+\dot{I}_{GA}|$ 、 $I_{FGB}=|\dot{I}_{FB}+\dot{I}_{GB}|$ を基準として、(17)式と全く同じ方法により、 ε_{FG} についての検討を試みた。その結果を図示すると、図8～図10の通りである。これらの図より、次のような点が明らかとなっている。

- ① $|\dot{I}_F+\dot{I}_G|$ についても、相差角 δ が大きくなるといずれの場合も ε_{FG} が大きくなっている。即ち、起誘導電流 $|\dot{I}_F+\dot{I}_G|$ は、 $\delta=0^\circ$ の場合より小さくなっている。
- ② $\sigma=0.001$ (S/m) としたことによる影響は、 E_A



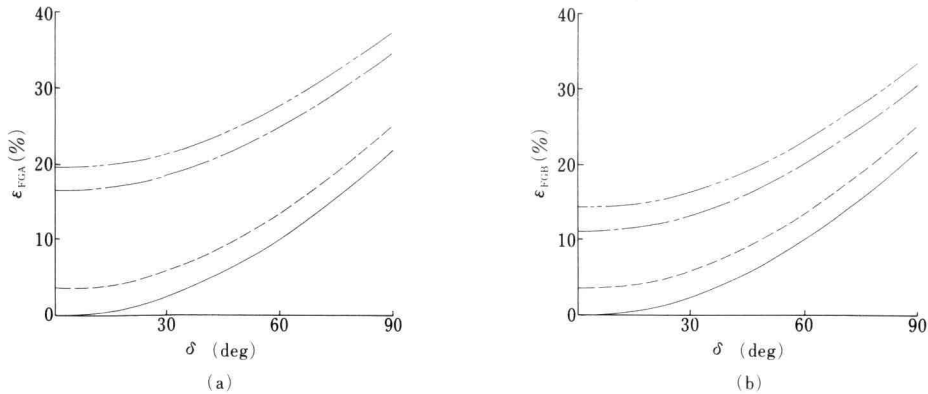
— condition (1) ---- condition (2) -.- condition (3) -.- condition (4)

Fig. 8 ε_{FG} vs. phase angle difference (ground-fault point : 0 km from A station)



— condition (1) ---- condition (2) -.- condition (3) -.- condition (4)

Fig. 9 ε_{FG} vs. phase angle difference (ground-fault point : 50 km from A station)



— condition (1) ---- condition (2) -.- condition (3) condition (4)
Fig. 10 ε_{FG} vs. phase angle difference (ground-fault point: 100 km from A station)

キ E_B についてよりもいずれの場合も非常に顕著に表われている。

- ③ $\delta = 30^\circ \sim 40^\circ$ とすると, ε_{FG} は 15~25% 程度である。

① については, 故障電流について述べたのと同じ理由によるものと考えられる。② については, 次のような理由が考えられる。即ち, 架空地線を流れる電流は, 送電導体と架空地線との電磁誘導作用によって生じるので, $I_G = -I_F \dot{z}' / \dot{z}_g$ となる。従って, $I_F + I_G = (1 - \dot{z}' / \dot{z}_g) I_F$ となる。そこで, 本計算例について各要素の値を示すと表 1 の通りである。この表より, $\sigma = 0.001$ S/m の時の $|1 - \dot{z}' / \dot{z}_g|$ の値は, $\sigma = 0.01$ S/m の時のその値に比して約 7% 小さくなっている。それ故, 大地導電率の影響がいずれの場合も ε_{FG} に顕著に表われているものと考えられる。

4-3 考察

前項までに取り上げた計算例は比較的長距離送電線であるが, 短距離の大容量送電線についても検討したので, その計算結果を付録に示す。故障電流曲線は, 短距離大容量のため傾きが大きくなっているものの, ε_F と ε_{FG} については, ほとんど同じ傾向を示している。

以上のような計算結果から見る限り, 故障電流に関して, 第 1 章で述べた (iii)~(v) の要因について, 非常に大きく影響する要素を特定することは難しいものと考えられる。従って, 故障電流の実測値が計算値を下回る理由としては, (ii)~(v) の要因が複雑に絡みあって全体としてかなりの差を生じているものと考えられる。また, 起誘導電流に関してもほぼ同じような

表1 大地導電率に対する各要素の値

算出要素 大地導電率(S/m)	\dot{z}_g (Ω /km)	\dot{z}' (Ω /km)	$1 - \frac{\dot{z}'}{\dot{z}_g}$
$\sigma = 0.01$	0.1257 +j0.4959	0.0439 +j0.2202	0.5623 $\angle -2.3^\circ$
$\sigma = 0.001$	0.1298 +j0.5627	0.0473 +j0.2880	0.4967 $\angle -3.7^\circ$

ことが言えるが, 故障電流の場合よりも大地導電率の影響が若干顕著に表われている。ところで, 本稿で検討したこれらの要因の他に,

- ① 電気所インピーダンスの値の妥当性
- ② 本稿で述べた計算方法では全く考慮していないが, 鉄塔の接地抵抗による地絡点付近の電位上昇による影響 (特に, 電気所近傍での地絡の場合)^{2),3)}

などが考えられる。これらの点については, 本稿で取り扱った (ii)~(v) の要因とともに, 実際の送電線における実測結果と各要因の定数の設定などを詳細に比較検討することにより, 個々のケースについてその主要因を明確にすることが必要である。

5. む す び

送電系地絡事故時の故障電流と起誘導電流に関する本検討内容より, 次のような成果が得られた。

- (1) 両端電気所の相電圧の大きさ及び位相が異なる場合の故障電流について, 従来の対称座標法を

若干拡張するだけで求められる計算方法を提示した。

- (2) 大地導電率、送受電端の電圧の大きさの相違及びその相差角による故障電流への影響を検討したが、実際の値とされている相差角 $30^\circ \sim 40^\circ$ では、基準とした計算条件に対して、故障電流について最大 15% 程度、起誘導電流について最大 25% 程度の減少であった。
- (3) 本計算例で見る限り、故障電流の実測値が計算値を下回る主要因を特定することは難しく、各要因が複雑に絡みあっているものと判断される。一方、起誘導電流に関しても同じようなことが言えるが、大地導電率の影響が若干顕著に生じている。

故障電流や起誘導電流の実測値が計算値を下回る理由を明確にするためには、多くの実測データについて、個々のケースに対する各要因を詳細に検討し、その主要因を明確にすることが必要である。この点に関しては、今後さらに検討する予定である。

最後に、本研究を進めるに当たって御指導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。

文 献

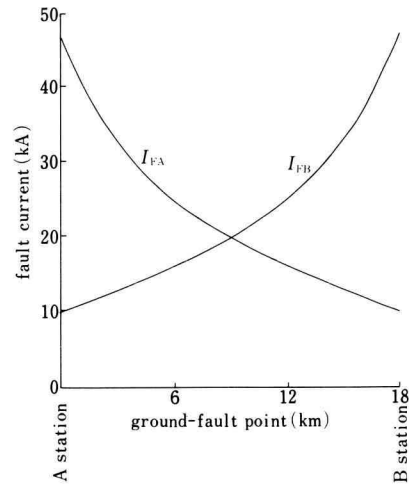
- 1) 例えば、小池東一郎：「送配電工学」(上巻)p. 195 ~p. 230 養賢堂 (昭 40-10)
- 2) 森・酒井：「対称座標法と梯子形回路論の組合せによる送電系地絡事故時の起誘導電流計算法」電気

学会論文誌 99 巻 8 号 p. 533~p. 540 (昭 54-8)

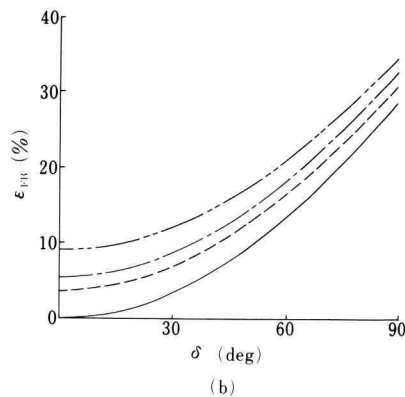
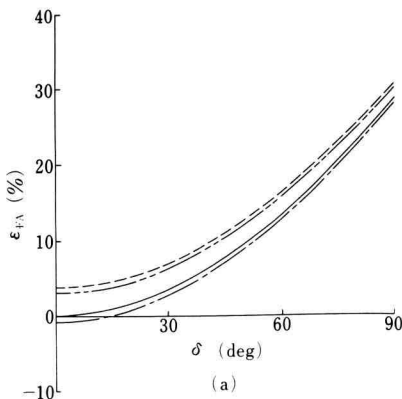
- 3) 電気学会・電子通信学会 誘導調査特別委員会 報告書：「電磁誘導に関する最新の動向と課題」p. 19~61, p. 302~p. 325 (昭 54-3)
- 4) 文献 3) の p. 303 (付 4) 式
- 5) 文献 1) の p. 102

付 録

3 相 2 回線の超高压送電線で短距離大容量の例として、次のような諸定数で構成される送電線路を想定した。なお、これらの数値は、現に我国で実用化されているものの定数である。



app Fig. 1 Fault current vs. ground-fault point



— condition (1) ---- condition (2) -.- condition (3) condition (4)

app Fig. 2 ε_F vs. phase angle difference (ground-fault point: 0 km from A station)

亘長; $l_{AB}=18$ (km), 周波数; $f=50$ (Hz)

送電端相電圧; $E_A=275/\sqrt{3}$ (kV)

導体配置; 図 3 において,

$$a=8.0 \text{ (m)}, b=8.0 \text{ (m)}$$

$$c=8.0 \text{ (m)}, d=8.0 \text{ (m)}$$

$$e=8.0 \text{ (m)}, f=8.0 \text{ (m)}$$

$$g=8.0 \text{ (m)}, h=20.0 \text{ (m)}$$

送電導体; ACSR (鋼心アルミより線)

610 mm² × 4 導体 直径 34.2 mm

素導体直流抵抗 0.0481 Ω/km

素導体間隔 40 cm

架空地線; AS (アルミ被鋼より線) 160 mm²

直径 21.0 mm 直流抵抗 0.166 Ω/km

電気所インピーダンス;

$$\dot{Z}_{0A}=j3.0 \text{ (}\Omega\text{)} \quad \dot{Z}_{1A}=j5.0 \text{ (}\Omega\text{)}$$

$$\dot{Z}_{0B}=j3.0 \text{ (}\Omega\text{)} \quad \dot{Z}_{1B}=j5.0 \text{ (}\Omega\text{)}$$

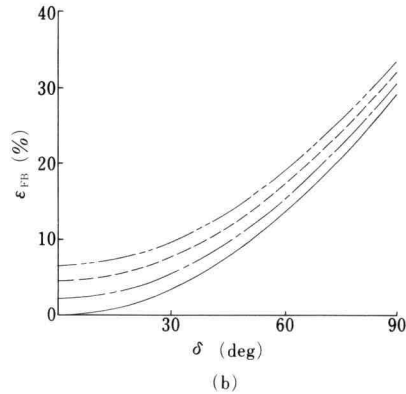
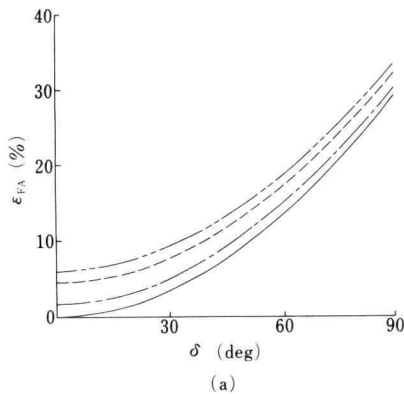
検討した計算条件としては, 実際の状況を考慮して,

条件 (1); $E_A=E_B=275/\sqrt{3}$ (kV)

$$\sigma=0.01 \text{ (S/m)}$$

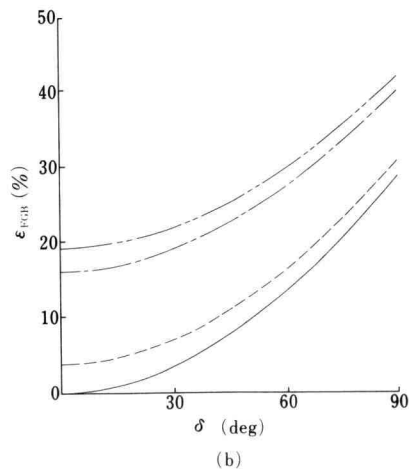
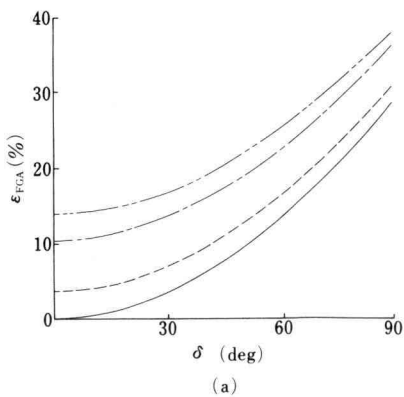
条件 (2); $E_A=275/\sqrt{3}$ (kV), $E_B=250/\sqrt{3}$ (kV)

$$\sigma=0.01 \text{ (S/m)}$$



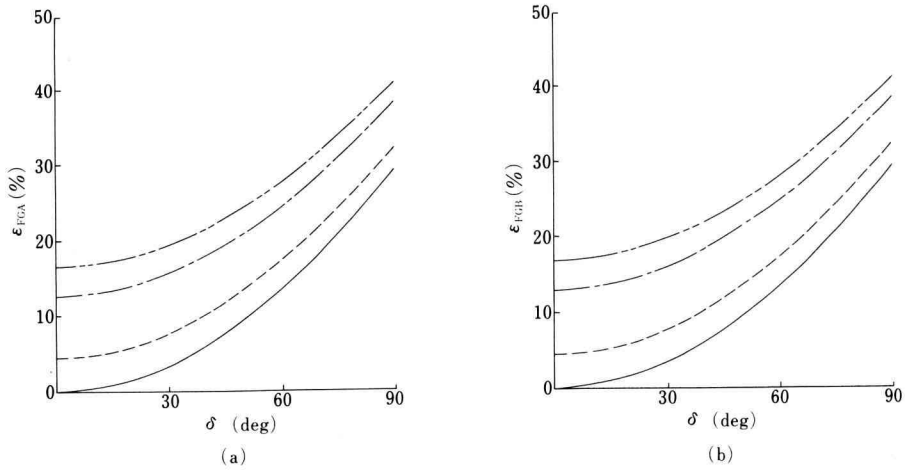
— condition (1) ---- condition (2) - · - condition (3) - - - condition (4)

app Fig. 3 ε_F vs. phase angle difference (ground-fault point: 8km from A station)



— condition (1) ---- condition (2) - · - condition (3) - - - condition (4)

app Fig. 4 ε_{FG} vs. phase angle difference (ground-fault point: 0 km from A station)



app Fig. 5 ε_{FG} vs. phase angle difference (ground-fault point: 8 km from A station)

条件 (3); $E_A = E_B = 275/\sqrt{3}$ (kV)

$\sigma = 0.001$ (S/m)

条件 (4); $E_A = 275/\sqrt{3}$ (kV), $E_B = 250/\sqrt{3}$ (kV)

$\sigma = 0.001$ (S/m)

の 4 種類であり、いずれの場合も $\delta = 0^\circ \sim 90^\circ$ について求めた。条件 (1) の標準的な場合の故障電流曲線を付図

1 に示す。この場合、想定した計算条件が両電気所で等しいため、故障電流曲線は、送電線の中点 (9 km) を中心に対称な形になっている。そこで、地絡点 0 km と 8 km について、故障電流に対して求めた (16) 式の ε_F と起誘導電流に対して求めた ε_{FG} について図示すると、付図 2~付図 5 の通りである。