

架空送電線の相電流の不均衡を考慮したときの 架空地線電流と大地帰路電流に関する検討

森 武昭*・大作 成明**・大矢 征*

Calculating Currents in Over Head Ground Wires and Earth Return Circuit under Unbalanced Three-Phase Current Conditions

Takeaki MORI, Nariaki OHSAKU and Susumu OHYA

Abstract

The induced voltage to a communication line from power line under the normal operating conditions has recently become an important problem. For the consideration of the induced voltage, the currents in overhead ground wires and earth return circuit must be exactly calculated.

This paper describes the calculating methods and the calculated results of these currents under unbalanced three-phase current conditions, and the following points are confirmed.

(1) The influence of unbalanced three-phase current conditions is more remarkable for the three-phase double circuit line.

(2) In general, these currents under unbalanced phase current conditions are larger than those under balanced conditions.

1. ま え が き

直接接地系架空送電線では、非ねん架方式が採用されているため、送電線の各相導体と架空地線との離隔距離の不均衡により、架空地線に常時かなりの電流が流れている。このため、近接する通信線が常時の電磁誘導障害の影響を受ける可能性がある。従って、この常時誘導に関する対策法を検討するための前提となる正確で簡易な予測計算法の確立が重要な課題となっている。電磁環境問題が社会的にも重要な問題として指摘されるようになった今日において、このような常時誘導障害についてもいろいろな検討が始められようとしている。そこで、著者らは、前報で、その基礎的検討として、相電流が平衡しているときの架空地線電流の予測計算について報告した^{1),2)}。しかし、実際の送電線では、各相の電流に不均衡を生じることがよくあり、瞬間的には、50% 近くになることもあると言われてい

る。そこで、本報告では、相電流の不均衡をも考慮したときの架空地線電流と大地帰路電流の予測計算法(厳密式と近似式)について述べるとともに、計算結果についての考察を試みることにした。

2. 架空地線電流 \dot{I}_g と大地帰路電流 \dot{I}_e の計算式

実際の送電線では、各相電流に不均衡が生じることがよくある。そこで、 α, β を相電流の不均衡の程度を表す係数として用い、各相電流を、次のように表示するものとする。

$$\dot{I}_a = I, \dot{I}_b = \alpha \dot{a}^2 I, \dot{I}_c = \beta \dot{a} I \quad (1)$$

$$\text{ここで、} \dot{a} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (2)$$

実際の計算では、 α, β を 0.5~1.5 の範囲で変化させて計算を行なっている。なお、三相平衡のときは $\alpha = \beta = 1$ となる。

これらのことを考慮して、架空地線電流と大地帰路電流の計算法(厳密式と近似式)について、以下に述

平成2年9月28日受理

* 電気工学科

** 電気工学専攻大学院生

べる。

2.1 厳密式

〈1〉 3相1回線

図1のような3相1回線の導体配置において、導体記号を電流とインピーダンスの添字に用い、文献1) 2)と同様に、2条の各地線の電流の和を $\dot{I}_g (= \dot{I}_{g1} + \dot{I}_{g2})$ とすると、

$$\dot{I}_g = - \{ \dot{Z}_{g1a} \dot{I}_a + \dot{Z}_{g1b} \dot{I}_b + \dot{Z}_{g1c} \dot{I}_c \} / \{ (\dot{Z}_{g1} + \dot{Z}_{g1g2}) / 2 \} \quad (3)$$

となる。ここで、 \dot{Z}_{g1} は架空地線 g_1 の大地帰路自己インピーダンス、 \dot{Z}_{g1a} は g_1 と相導体 a の間の大地帰路相互インピーダンスを示している。以下、添字の使い方は同様に扱うものとする。また、大地帰路電流 \dot{I}_e は、1回線分の不平衡相電流の影響を受けるので、次式で求められる。

$$\dot{I}_e = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c + \dot{I}_g \quad (4)$$

なお、相電流が平衡しているときは、 $\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 0$ であるから、 $\dot{I}_e = \dot{I}_g$ となる。

〈2〉 3相2回線

図2のような3相2回線の導体配置において、前項と同様に扱うと、架空地線電流は、次式で表される。

$$\dot{I}_g = - \{ \dot{Z}_{g1a} \dot{I}_a + \dot{Z}_{g1b} \dot{I}_b + \dot{Z}_{g1c} \dot{I}_c + \dot{Z}_{g1a'} \dot{I}_{a'} + \dot{Z}_{g1b'} \dot{I}_{b'} + \dot{Z}_{g1c'} \dot{I}_{c'} \} / \{ (\dot{Z}_{g1} + \dot{Z}_{g1g2}) / 2 \} \quad (5)$$

また、大地帰路電流 \dot{I}_e は、2回線分の不平衡相電流の影響を受けるので、次式のようになる。

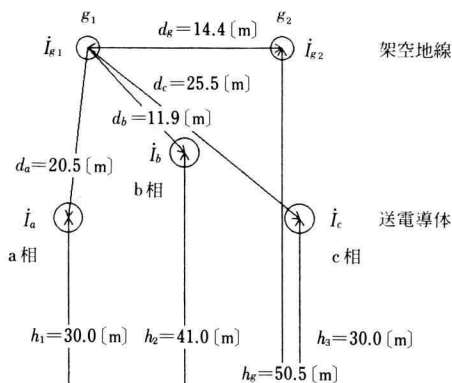


図1. 3相1回線送電線の導体配置

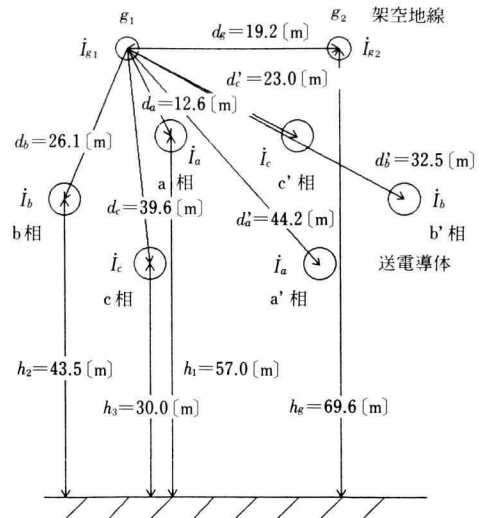


図2. 3相2回線送電線の導体配置

$$\dot{I}_e = 2(\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c) + \dot{I}_g \quad (6)$$

ここで、相電流が平衡しているときは、3相1回線と同様に $\dot{I}_e = \dot{I}_g$ となる。

2.2 近似式

〈1〉 3相1回線

導体間距離が小さいことを考慮して、無限級数となる大地帰路インピーダンスの式³⁾の第1項のみを用いると、(3)式の近似式は次のように表すことができる。

$$\begin{aligned} \dot{I}_g = & - \left\{ \frac{\pi}{2} (1 + \alpha \dot{a}^2 + \beta \dot{a}) + j(1 + \alpha \dot{a}^2 + \beta \dot{a}) \right. \\ & + j \ln \left[\left(\frac{2}{\gamma |k|} \right)^{2-(\alpha+\beta)} \left(\frac{d_b^a d_c^b}{d_a^2} \right) \right] \\ & + \sqrt{3} \ln \left[\left(\frac{2}{\gamma |k|} \right)^{(\alpha-\beta)} \frac{d_c^b}{d_b^a} \right] \left. \right\} \times I \div \star \\ & \star \left\{ \frac{R_0}{2\omega} \times 10^4 + \frac{\pi}{2} + j \left(\frac{\mu_s}{4} + 1 + \right. \right. \\ & \left. \left. 2 \ln \frac{2}{\gamma |k| \sqrt{r_g d_g}} \right) \right\} \end{aligned} \quad (7)$$

なお、 R_0 : 架空地線1条当りの直流抵抗 [Ω/km]、 r_g : 架空地線の半径 [m]、 ω : 角周波数 [rad/s]、 σ : 大地導電率 [S/m]、 $|k| = \sqrt{\omega \sigma \times 4\pi \times 10^{-7}}$ 、 $\gamma = 1.7811$ (ベッセルの定数)、 μ_s : 比透磁率である。

ここで、厳密式(3)の方が、近似式(7)より簡単に見えるが、厳密式は無限積分または無限級数で表され

る式を用いるため、実際の計算は、近似式の方がはるかに簡単になっている。

また、 \dot{I}_e の近似式は次のように表せる。

$$\dot{I}_e \doteq \{1 - (\alpha + \beta)/2 - j\sqrt{3}(\alpha - \beta)/2\}I + (7) \text{ 式} \quad (8)$$

〈2〉 3 相 2 回線

前項と同様に扱うと、(5) 式の近似式は次式で表される。

$$\begin{aligned} \dot{I}_g = & -\{\pi(1 + \alpha\dot{a}^2 + \beta\dot{a}) + j2(1 + \alpha\dot{a}^2 + \beta\dot{a}) \\ & + j2 \ln \left[\left(\frac{2}{\gamma|k|} \right)^{2-(\alpha+\beta)} \left(\frac{1}{d_a d_{a'}} \right) \right. \\ & \left. \cdot (\sqrt{d_b^a d_b^a d_c^{\beta} d_c^{\beta}}) \right] \\ & + \sqrt{3} \ln \left[\left(\frac{2}{\gamma|k|} \right)^{2(\alpha-\beta)} \frac{d_c^{\beta} d_c^{\beta}}{d_b^a d_b^a} \right] \} \times I \div \star \\ & \star \left\{ \frac{R_0}{2\omega} \times 10^4 + \frac{\pi}{2} \right. \\ & \left. + j \left(\frac{\mu_s}{4} + 1 + 2 \ln \frac{2}{\gamma|k|\sqrt{r_g d_g}} \right) \right\} \quad (9) \end{aligned}$$

また、 \dot{I}_e の近似式は次のように表せる。

$$\dot{I}_e \doteq \{2 - (\alpha + \beta) - j\sqrt{3}(\alpha - \beta)\}I + (9) \text{ 式} \quad (10)$$

3. 計算結果及び考察

図 1 の計算条件(表 1 の条件 1 に相当)について、 \dot{I}_g と \dot{I}_e を厳密式 (3)(4) で求めた結果が図 3 と図 4 であり、図 2 の計算条件(表 1 の条件 3 に相当)について、 \dot{I}_g と \dot{I}_e を厳密式 (5)(6) で求めた結果が図 5 と図 6 である。なお、他の計算条件(表 1 の条件 2, 4)についても検討を行なったところ、同様の結果が得られることが確認されている。

これらの結果より、相電流の不均衡時には、不平衡電流の影響を強く受けることが明らかとなっている。即ち、 α と β が 1.0 より少し変化しただけで \dot{I}_g と \dot{I}_e は大きく変化している。また、図 3, 4 と図 5, 6 を比べても明らかのように 3 相 2 回線の方が \dot{I}_g , \dot{I}_e ともに不平衡の影響が顕著である。

ところで、3 相 1 回線も 3 相 2 回線も、位相の影響で、相電流の平衡時よりも \dot{I}_g や \dot{I}_e が小さくなるケース(図 7 参照)がごくわずかの範囲ではあるが生じる。 \dot{I}_g と \dot{I}_e がそれぞれ最小となる条件は表 2 の通りである。この結果より、このような条件下における \dot{I}_g と \dot{I}_e は、 $\alpha = \beta = 1$ の平衡時における値よりも非常に小さくなる事が分かる。

表 1. 計算条件^{1),2)}

計算条件 \ ケース	3 相 1 回線		3 相 2 回線	
	条件 1	条件 2	条件 3	条件 4
送電電圧 [kV]	500	500	500	275
地線種類	AS160 mm ² 2 条	AS160 mm ² 2 条	IACSR120 mm ² 2 条	AS100 mm ² 2 条
a [m]	14.4	22.0	19.2	8.0
b [m]	8.0	14.0	19.2	8.0
c [m]	8.0	14.0	19.6	8.0
d [m]	—	—	20.0	8.0
e [m]	9.5	10.0	12.6	8.0
f [m]	—	—	13.5	8.0
g [m]	11.0	0.0	13.5	8.0
h [m]	30.0	30.0	30.0	15.0
地線半径: r_g [m]	0.0105	0.0105	0.00875	0.0080
地線の直流抵抗: R_0 [Ω /km]	0.166	0.166	0.293	0.268
相電流の平衡時 I_g [A]	83.7	103.2	54.0	36.4

$I = 1000$ [A], $\omega = 2\pi f = 100\pi$ [rad/s], 大地導電率: $\sigma = 0.01$ [S/m]

(注) 導体間距離 a, b, c, \dots, h は、文献 1), 2) を参照

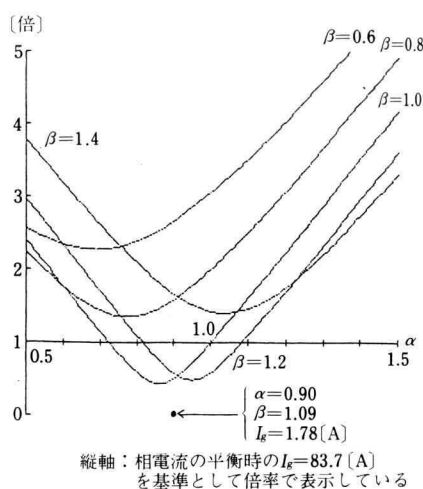


図 3. 3 相 1 回線における架空地線電流 I_g の特性
(計算条件 1)

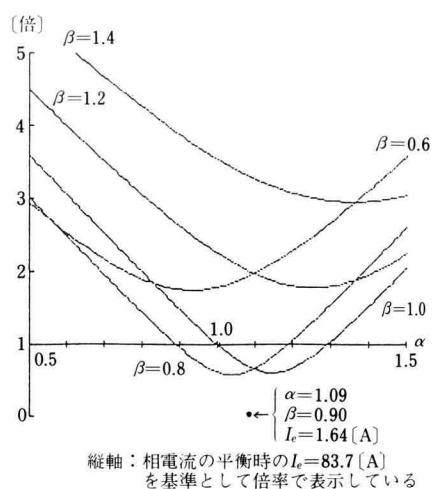


図 4. 3 相 1 回線における大地帰路電流 I_e の特性
(計算条件 1)

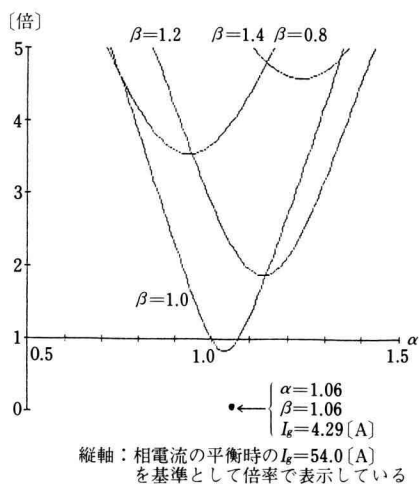


図 5. 3 相 2 回線における架空地線電流 I_g の特性
(計算条件 3)

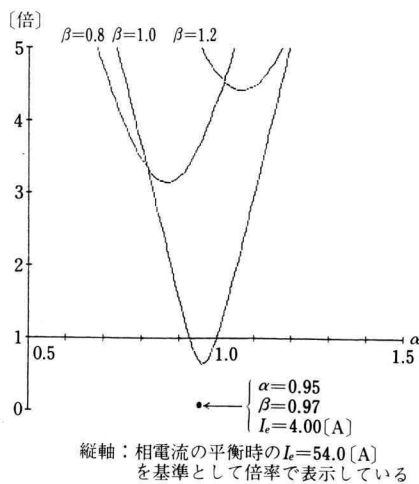


図 6. 3 相 2 回線における大地帰路電流 I_e の特性
(計算条件 3)

以上のように、ごく特殊なケースを除いて、相電流のわずかな不平衡により、 I_g と I_e は一般に非常に大きくなるので、近傍通信線への電磁誘導障害等を検討する場合には十分注意する必要がある。

次に、3 相 1 回線に関する近似式 (7), (8) と 3 相 2 回線に関する近似式 (9), (10) の妥当性を表 1 の条件について検討したところ以下のような結果が得られた。

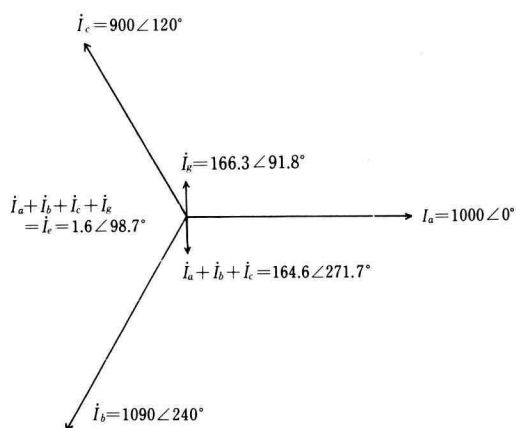
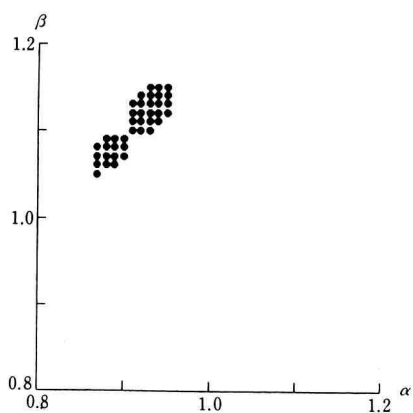
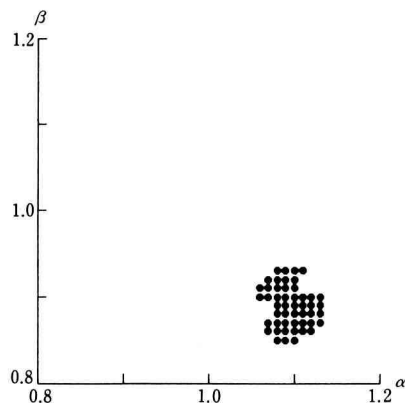
〈1〉 3 相 1 回線

条件 1: I_g に関しては、図 8 に示されるように、 $0.87 \leq \alpha \leq 0.95$ で $1.05 \leq \beta \leq 1.15$ の範囲において、 I_e に関しては、図 9 に示されるように、 $1.06 \leq \alpha \leq 1.13$ で $0.85 \leq \beta \leq 0.93$ の範囲において誤差が 5% を超える結果となった。

条件 2: I_g に関しては、 $1.03 \leq \alpha \leq 1.25$ で $1.18 \leq \beta \leq 1.39$ の範囲において、 I_e に関しては、 $0.84 \leq \alpha \leq 0.86$ で

表 2. 架空地線電流及び大地帰路電流の最小値

最小条件 ケース	3 相 1 回線		3 相 2 回線	
	条件 1	条件 2	条件 3	条件 4
平衡時の $I_g = I_e$ [A]	83.7	103.2	54.0	36.4
α	0.90	1.12	1.06	1.04
β	1.09	1.26	1.06	1.03
不平衡時の I_g [A]	1.78	2.10	4.29	4.02
α	1.09	0.84	0.95	0.96
β	0.90	0.79	0.97	0.98
不平衡時の I_e [A]	1.64	2.20	4.00	2.83


 図 7. 計算条件 1 のフェーザ図 (I_e が最小となるケース)

 図 8. 架空地線電流に関する厳密解に対する近似解の誤差が 5% を超える α と β の領域 (計算条件 1)

 図 9. 大地帰路電流に関する厳密解に対する近似解の誤差が 5% を超える α と β の領域 (計算条件 1)

0.79 $\leq \beta \leq 0.80$ の範囲において誤差が 5% を超える結果となった。

〈2〉 3 相 2 回線

条件 3: I_g に関しては, 1.03 $\leq \alpha \leq 1.13$ で 1.03 $\leq \beta \leq 1.10$ の範囲において, 誤差が 5% を超える結果となった。また, I_e に関しては, 全ての計算条件に対して 5% 未満の誤差であるという結果を得た。

条件 4: I_g に関しては, 1.04 $\leq \alpha \leq 1.06$ で 1.03 $\leq \beta \leq 1.04$ の範囲において, 誤差が 5% を超える結果となった。また, I_e に関しては, 全ての計算条件に対して 5% 未満の誤差であるという結果を得た。

3 相 2 回線での計算では, I_e に関しては, 全ての計算条件に対して 5% 未満の誤差であるという結果を得た。これは, (10) 式の第 2 項は I_g の近似式による結果であるのに対して, 第 1 項は相電流の不均衡の影響によるもので, 厳密解と全く一致している上に, この項の方が影響が大きいためである。

ところで, 図 8, 図 9 に示されたように, 近似解の誤差が 5% を超える範囲は, 図 3, 図 4 から明らかなように, I_g や I_e が平衡時 ($\alpha = \beta = 1$) に比べて非常に小さな値となる領域である。従って, これらの点を考慮すると, 実際上は, 近似式 (7)~(10) を用いても差しつかえないものと判断できる。

4. あ と が き

相電流の不均衡時における架空地線電流 I_g と大地帰路電流 I_e について検討した結果, 次の点が明らかと

なった。

(1) I_g , I_e ともに相電流の不均衡の影響を強く受ける。

(2) 3相1回線と3相2回線では、後者の方が不均衡の影響が大きい。

(3) 相電流の不均衡により、一般に架空地線電流と大地帰路電流は平衡時のそれらよりも大きくなる。

(4) 非常に限られた範囲ではあるが、相電流の不均衡の割合によっては、位相が打ち消し合って、平衡時の I_g や I_e よりも小さくなる特殊なケースが存在する。

(5) I_g と I_e を求めるための近似式は、 I_g や I_e が非常に小さくなるごく一部の条件を除いては5%未満の

誤差であり、実用に供し得るものと判断できる。

文 献

- 1) 森・大矢:「架空送電線から通信線へ生じる常時誘導電圧の予測計算法に関する基礎的検討」, 電気学会論文誌, B-109 巻, 7 号, p. 291~298 (1989-7)
- 2) 森・大矢:「架空送電線から通信線へ生じる常時誘導電圧に関する基礎的検討」, 神奈川工科大学研究報告, B 理工学編, 13 号, p. 121~128 (1989-3)
- 3) 酒井・森・大矢:「ノイズによる誤動作と対策」, 日刊工業新聞社, p. 189~222 (1990-6)