

高圧架空送電線の定常運転時における通信線への 電磁誘導電圧に関する検討

森 武昭*・大作 成明**・大矢 征*

Study on Electromagnetic Induction Voltage in a Communication
Line from a High Voltage Overhead Transmission
Line under Normal Operating Conditions

Takeaki MORI, Nariaki OHSAKU and Susumu OHYA

Abstract

The induced voltage in a communication line from a power line under normal operating conditions has recently become an important problem. In this paper, this induced voltage for a commercial frequency is considered in the aspect of the estimating calculation.

The authors propose three calculating methods for obtaining the current on the overhead ground wire. It's clarified that the phase arrangement and the unbalance phase current of transmission line have influence on the over head ground wire current and the induced voltage in a communication line.

1. ま え が き

電力需要の増加にともなう、送電線の大容量化が進む一方で、電子・通信系で取り扱う信号レベルはますます微弱でかつ高い精度が要求されている。従って、電力線を取り巻く電磁環境は、一段と厳しくなっている。架空送電線において、一線地絡事故が生じた場合の大地帰路電流による近傍通信線への電磁誘導障害は、古くから研究され、電力及び通信の技術革新とともに、それらに対応した多くの検討が行われてきている¹⁻³⁾。また、最近になって、送電線の定常運転時にも、架空地線と相導体間離隔距離の不平衡による架空地線電流や相電流不平衡等の影響により、通信線へ電磁誘導電圧が常時生じることが問題提起されている³⁾。そこで、著者らは、わが国では187 kV以上で採用されている直接接地系の高信頼度（地絡事故を0.1秒以内に遮断）の超高圧送電線による常時誘導の詳細を検討してきた⁴⁻⁶⁾。

しかしながら、抵抗またはリアクトルの接地方式が採用されている154 kV以下の一般の高圧送電線からの常時誘導の方が、次のような理由で、より厳しい環境にあることが指摘されるに至っている。

- ①超高圧送電線よりも、高圧送電線の方が通信線と接近する事例が圧倒的に多い。
- ②相電流の不平衡は高圧送電線の方が顕著である。
- ③雷対策の関係から、高圧送電線でも導電率のよい線種の架空地線が採用されるようになったので、常時誘導の面からは厳しくなっている。
- ④超高圧送電線の場合、一線地絡事故時に関する対策が通信側で十分施されており、常時誘導に関してもかなりの遮へい効果が期待できる。

そこで、本研究では、高圧架空送電線から近傍通信線への常時誘導障害の対策を検討するための前提となる誘導電圧の予測計算について検討する。即ち、超高圧送電線では逆相配列のみが採用されているが、長い歴史を持つ高圧送電線では、大部分が同相配列やねん架方式を用いており、これらの影響について定量的な検討を行う必要がある^{7,8)}。

1994年9月12日受理

* 電気工学科

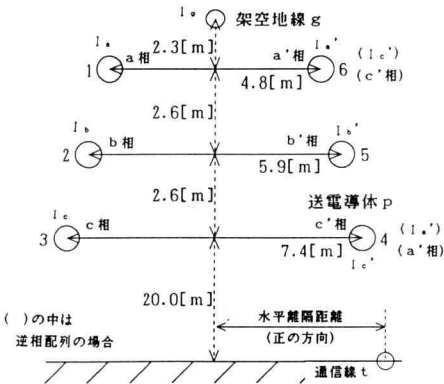
** 大学院電気工学専攻修了

2. 架空地線電流の計算方法

本稿で取り扱う計算モデルとして、わが国における代表的な3相2回線送電線を図1に示す。ここで、右側の相導體配置で、()のないのは同相配列、()内に示したのは逆相配列の場合をそれぞれ表している。架空地線は、各鉄塔と電気所で接地されている図2のような多点接地回路を構成する。ここで、 $E_1 \sim E_n$ は送電導體から架空地線に生じる各径間当たりの電磁誘導電圧、 $Z_{g1} \sim Z_{gn}$ は架空地線の各径間当たりの大地帰路自己インピーダンス、 $R_{t1} \sim R_{t(n+1)}$ は各鉄塔の接地抵抗、 R_a, R_b は両端電気所の接地抵抗を示している。そこで、通信線への電磁誘導電圧を求める上での前提となる架空地線電流の計算方法として、次の3つの方法を用いる。

(1) 厳密計算法

この方法は、鉄塔の径間長や接地抵抗のばらつきも



架空地線1条当たりの直流抵抗: $r_0=1.59[\Omega/\text{km}]$
 架空地線の半径: $a=5.25[\text{mm}]$ 大地導電率: $\sigma=0.01[\text{S/m}]$
 相電流: $I=100[\text{A}]$ 周波数: $f=60[\text{Hz}]$

Fig. 1. Conductors configuration of 3-phase double circuit transmission line.

考慮できる厳密な計算法である。即ち、図2について、回路方程式を求めると、次のような連立方程式を得ることができる。

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= (R_{ta} + Z_{g1} + R_{t2})I_{g1} - R_{t2}I_{g2} \\ E_2 &= (R_{t2} + Z_{g2} + R_{t3})I_{g2} - R_{t2}I_{g1} - R_{t3}I_{g3} \\ &\dots\dots\dots \\ E_n &= (R_{tn} + Z_{gn} + R_{t(n+1)})I_{gn} - R_{tn}I_{g(n-1)} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで、

同相配列の場合

$$E_i = (Z_{1g}I_a + Z_{2g}I_b + Z_{3g}I_c + Z_{6g}I_{a'} + Z_{5g}I_{b'} + Z_{4g}I_{c'})_i \quad (2)$$

逆相配列の場合

$$E_i = (Z_{1g}I_a + Z_{2g}I_b + Z_{3g}I_c + Z_{4g}I_{a'} + Z_{5g}I_{b'} + Z_{6g}I_{c'})_i \quad (3)$$

ただし、 $i=1 \sim n$ で径間の番号

$$R_{ta} = \frac{R_a R_{t1}}{R_a + R_{t1}}, \quad R_{tb} = \frac{R_b R_{t(n+1)}}{R_b + R_{t(n+1)}}$$

Z は、架空地線と各相導體間(添え字が対応)の各径間当たりの大地帰路の自己または相互のインピーダンス $[\Omega]$ を示す。

式(1)は、次数の大きい複素数の連立方程式で、かなり煩雑な計算となるが、ここではクラウト法を用いて解くこととした。

(2) 近似計算法1

鉄塔の径間長と接地抵抗が一定であるとみなせると、分布定数回路として比較的容易に取り扱うことができる。即ち、 $x=0$ をA電気所、 $x=l$ をB電気所とすると、架空地線の電位 V と電流 I_g は次式のようになる。

$$\left. \begin{aligned} V &= A\epsilon^{-\gamma x} + B\epsilon^{\gamma x} \\ I_g &= \frac{1}{Z_0}(A\epsilon^{-\gamma x} - B\epsilon^{\gamma x}) + \frac{E}{Z_g} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ここで、 E は1径間当たりの起電力を表している。ま

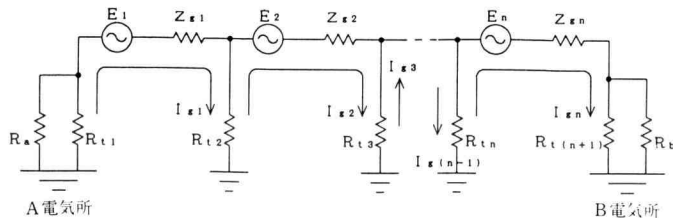


Fig. 2. Overhead ground wire circuit (un-transposition).

た、 A, B は積分定数であり、次のような電気所での回路条件より求める。

$$\left. \begin{aligned} x=0 \text{ で, } V_{(x=0)} &= -R_a I_G(x=0) \\ x=l \text{ で, } V_{(x=l)} &= R_b I_G(x=l) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

次に、特性インピーダンス Z_0 と伝搬定数 γ は、次式より求める。

$$\left. \begin{aligned} Z_0 &= \sqrt{\frac{Z_g}{D_L} \times R_t D_L} = \sqrt{Z_g R_t} \\ \gamma &= \sqrt{\frac{Z_g}{D_L} \times \frac{1}{R_t D_L}} = \frac{1}{D_L} \sqrt{\frac{Z_g}{R_t}} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

ただし、 Z_g : 1 径間当たりの大地帰路自己インピーダンス、 R_t : 鉄塔の接地抵抗、 D_L : 鉄塔の径間長

(3) 近似計算法 2

鉄塔の径間長と接地抵抗が一定とみなせる上に、送電線路が無限長とみなせると仮定すると、図 2 において、鉄塔と電気所の接地抵抗の影響を無視することができ、架空地線電流は、次に示す極めて簡単な式で求められる。

同相配列の場合

$$I_g = \frac{z_{1g} I_a + z_{2g} I_b + z_{3g} I_c + z_{6g} I_{a'} + z_{5g} I_{b'} + z_{4g} I_{c'}}{Z_g} \quad (7)$$

逆相配列の場合

$$I_g = \frac{z_{1g} I_a + z_{2g} I_b + z_{3g} I_c + z_{4g} I_{a'} + z_{5g} I_{b'} + z_{6g} I_{c'}}{Z_g} \quad (8)$$

ただし、 z は、架空地線と各相導体間 (添え字が対応)

の単位 km 当たりの大地帰路の自己または相互のインピーダンス $[\Omega/\text{km}]$ を示している。

次に、図 3 のように送電線の全長を 3 区間に等分割して導体配置を順次入れ換えていくねん架方式における架空地線回路は図 4 のようになる。ここで、各区間の起電力は、次のような式で求めることができる。

$$\left. \begin{aligned} E_{Ai} &= (Z_{1g} I_a + Z_{2g} I_b + Z_{3g} I_c + Z_{6g} I_{a'} + Z_{5g} I_{b'} + Z_{4g} I_{c'})_{Ai} \\ E_{Bi} &= (Z_{3g} I_a + Z_{1g} I_b + Z_{2g} I_c + Z_{4g} I_{a'} + Z_{6g} I_{b'} + Z_{5g} I_{c'})_{Bi} \\ E_{Ci} &= (Z_{2g} I_a + Z_{3g} I_b + Z_{1g} I_c + Z_{5g} I_{a'} + Z_{4g} I_{b'} + Z_{6g} I_{c'})_{Ci} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

ここで、 $i=1 \sim n$ で、各区間の径間の番号を示している。そこで、ねん架方式については、この点を考慮して、上述の厳密計算法と分布定数回路で扱う近似計算法 1 を用いて計算することとした。

次に、相電流の不均衡を検討するに当たっては、図 1 の a 相電流を基準として、次のように表す。

$$\left. \begin{aligned} I_a &= I, I_b = \alpha_b a^2 I, I_c = \alpha_c a I, \\ I_{a'} &= \beta_a I, I_{b'} = \beta_b a^2 I, I_{c'} = \beta_c a I \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

ここで、 $a = 1e^{j2\pi/3} = -1/2 + j\sqrt{3}/2$

この式で、 $\alpha_b, \alpha_c, \beta_a, \beta_b, \beta_c$ が不平衡を表す係数であり、実際の高压送電線において最も厳しい条件として 10% を想定し、0.9~1.1 の範囲で計算することとした。

3. 架空地線電流の計算結果及び考察

3.1 計算方法の妥当性

図 5 は、図 1 の計算条件における架空地線電流の実測値⁹⁾と各種計算法による計算結果を示している。この結果から、次のような点が明らかとなっている。

- (1) 鉄塔の径間長と接地抵抗のばらつきを考慮できる厳密計算の結果と実測値とを比較した場

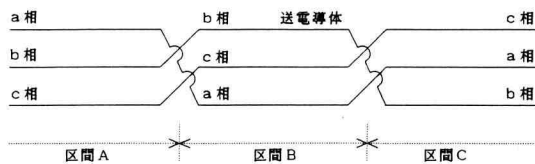


Fig. 3. Transposed transmission line.

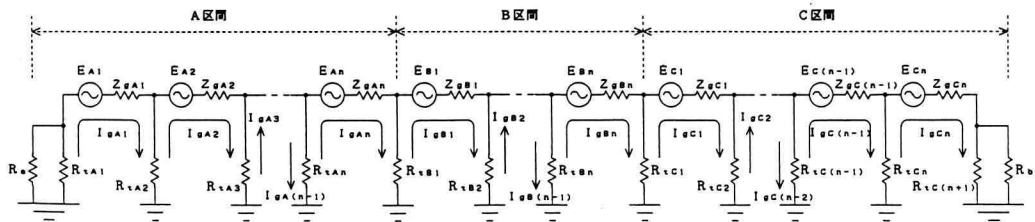


Fig. 4. Overhead ground wire circuit (transposition).

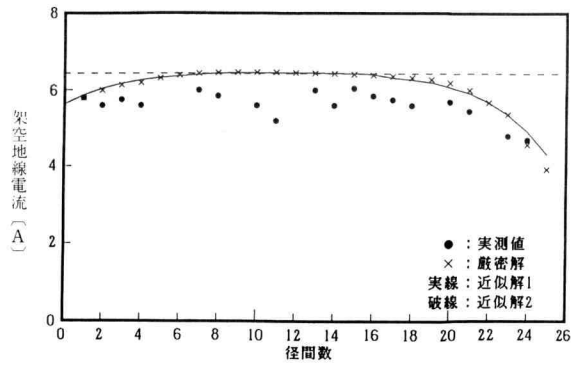
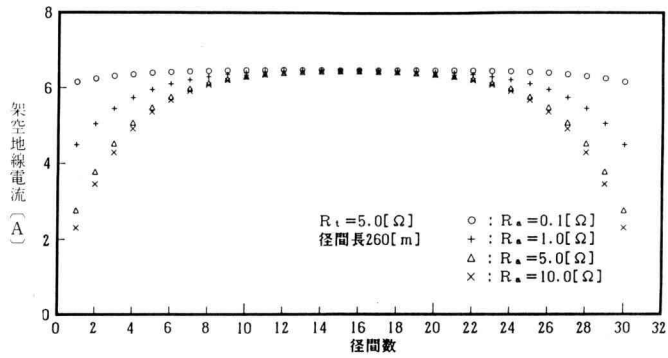
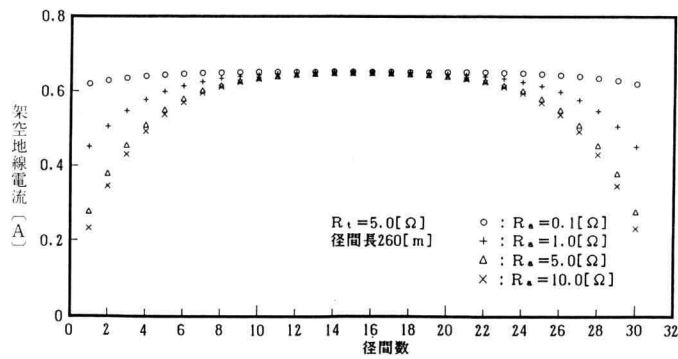


Fig. 5. Comparison between measured and calculated values of overhead ground wire current.



(a) 同相配列



(b) 逆相配列

Fig. 6. Distribution of overhead ground wire current (un-transposition).

合, 誤差は最大で7%程度である。この結果は, 実際送電線が敷設されている場所の大地導電率等のばらつきを考慮すれば, 厳密計算法が妥当であることを示しているものと言える。

- (2) 径間長と接地抵抗を各実測値の平均値をもってして一定とみなして計算した分布定数回路による近似計算法1と厳密計算法による計算結果とはよく一致しており, 鉄塔の径間長や接地抵抗のばらつきの影響はほとんどないことが明らかとなった。
- (3) ある程度径間数が多くなって電気所から離れると (図5の例では, 径間数8程度), 架空地線電流の値は一定となることが明らかとなっている。この一定となった値は, 近似計算法2の結果と非常によく一致している。従って, 電気所からある程度離れて電流が一定と見なせる場合には, 最も簡単に解を求めることができる近似計算法2を用いることができる。

以上より, 近似計算法1は架空地線の電流分布を求めるのに使用することができることが明らかとなった。また, 極めて簡単に計算できる近似計算法2も電気所からある程度離れたところでの電流値を算出するのに用いることができることが明らかとなった。

3.2 相配列などの影響

図6(a)は同相配列, 同(b)は逆相配列における架空地線電流 I_g の分布を示している。電流分布の傾向は全く同じであるが, 同相配列における I_g は逆相配列に比して約10倍大きいことが明らかとなっている。これは, 図1からも分かるように, 逆相配列の場合には, 上相 (a 相または c 相) と下相 (c' 相または a' 相) で電流の位相が打ち消しあうのに対して, 同相配列ではこのような効果がないためである。次に, 図6から, 両配列とも電気所の接地抵抗 R_a が大きくなると電気所付近では I_g が小さくなり, その割合は R_a に依存している。

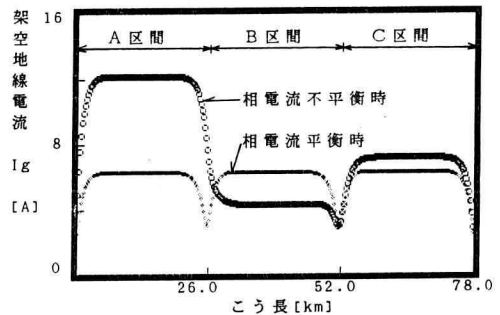
以上のような点は, 鉄塔の接地抵抗 R_t の値にはほとんど影響を受けないことが確認されている。従って, 電気所から数鉄塔離れると R_a, R_t の影響はなくなり近似式2が有効となり, I_g は一定となって, その値は相配列に依存することが明らかとなった。

3.3 相電流不平衡による影響

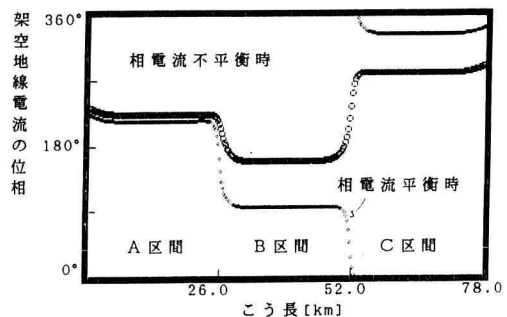
式(10)で示したような3相電流不平衡時(最大10%

を考慮)における架空地線電流 I_g の計算を行った。そこで, I_g が一定となる値について, 式(10)の $\alpha=0.9 \sim 1.1$ の範囲で最も大きくなる場合の結果を検討する。

同相配列において, 相電流不平衡における I_g の最大の値 ($\alpha_b=\alpha_c=\beta_b=\beta_c=0.9, \beta_a=1.1$ の場合) は, 9.82 [A] であり, 相電流平衡時 ($\alpha_b=\alpha_c=\beta_a=\beta_b=\beta_c=1.0$ の場合) の6.40 [A] に対して約1.5倍となっている。一方, 逆相配列において, 相電流不平衡における I_g の最大の値 ($\alpha_c=\beta_a=\beta_c=1.1, \alpha_b=\beta_b=0.9$ の場合) は, 7.81 [A] であり, 相電流平衡時の0.63 [A] に対して約12.4倍となっている。このことから, 逆相配列の方が相電流不平衡の影響を顕著に受けることが明らかとなっている。しかし, 前節でも述べたように, 架空地線電流 I_g の値は逆相配列の方が小さく, I_g の大きさそのもので比較するなら, 同相配列の約80%となっている。従って, 電磁誘導障害の面からみるなら, 相電流不平衡を考慮しても逆相配列の方が望ましいという結果が得られている。



(a) 大きさ



(b) 位相

Fig. 7. Overhead ground wire current (transposition).

3.4 ねん架による影響

ねん架方式の計算では、分布定数線路として取り扱った近似式1の方法は、厳密計算の結果と比較して、架空地線電流の大きさ及び位相ともいずれも誤差3%以内であり、妥当であることが確認された。そこで、ねん架区間における架空地線電流 I_g の分布を求めると、図7のようである。相電流平衡時の場合には、電気所とねん架を設けている鉄塔付近で I_g が小さくなり、これからある程度離れると一定となり、この値は非ねん架方式の同相配列における I_g の値と一致している。従って、ねん架を設けている鉄塔のごく近傍を除いてはねん架の影響は考慮しなくてもよいといえる。

一方、相電流不平衡時では、各区間の架空地線電流の大きさは非常に異なっている。この理由は、図7(b)で示したように I_g の位相が不平衡の影響を大きく受けるためと考えられる。例えば、図7(a)の結果で、A区間の I_g はB区間の約3倍である上に、相電流平衡時の約2倍となっている。この点は、通信線への電磁誘導電圧を検討する際に十分留意する必要がある。

4. 通信線への電磁誘導電圧

4.1 計算方法

送電線から近接する通信線に生じる電磁誘導電圧を検討する際には、電磁環境が最も厳しい条件（電気所

の接地抵抗の影響がなく、架空地線電流が一定となる部分）を考慮するので、架空地線電流は近似式2の結果を用いた。

図1において、送電線と平行して存在する通信線 t へ生じる単位 km 当たりの電磁誘導電圧 V_t は、各相電流による電磁誘導電圧 V_p と架空地線電流による電磁誘導電圧 V_g とのフェーザ和として求められる。即ち、次のような関係式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} V_t &= V_p + V_g \\ V_g &= z_{gt} I_g \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

同相配列の場合

$$V_p = z_{1t} I_a + z_{2t} I_b + z_{3t} I_c + z_{6t} I_{a'} + z_{5t} I_{b'} + z_{4t} I_{c'} \quad (12)$$

逆相配列の場合

$$V_p = z_{1t} I_a + z_{2t} I_b + z_{3t} I_c + z_{4t} I_{a'} + z_{5t} I_{b'} + z_{6t} I_{c'} \quad (13)$$

ただし、 z は、通信線 t と各相導体または架空地線との間（添字が対応）の単位 km 当たりの大地帰路相互インピーダンスを示している。

ところで、送電線から通信線への電磁誘導が実際に問題となるのは、水平離隔距離が数百 m 程度なので、 $-500 \sim +500$ [m] の範囲について計算することにした。

4.2 相配列による影響

図8は、図1の条件における高压送電線から通信線に生じる電磁誘導電圧の計算結果を示している。この

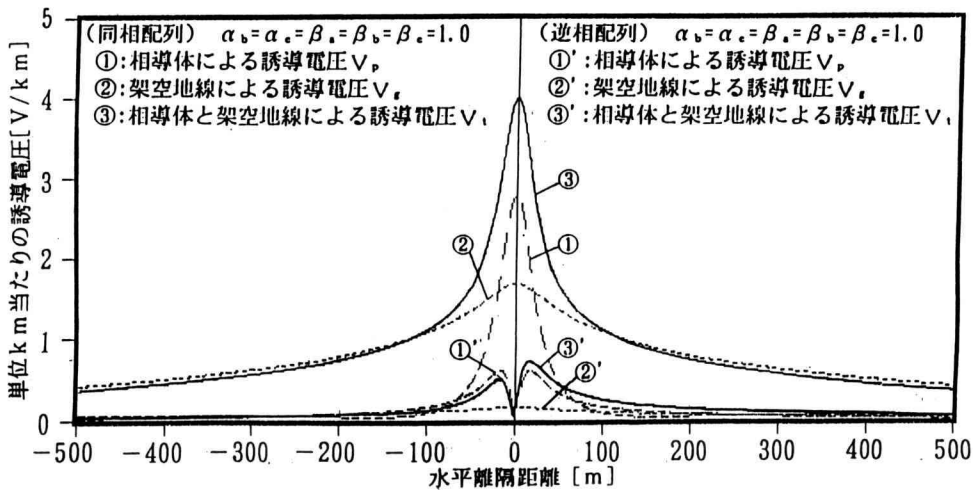


Fig. 8. Induced voltage in a communication line from a high voltage transmission line (balanced phase current).

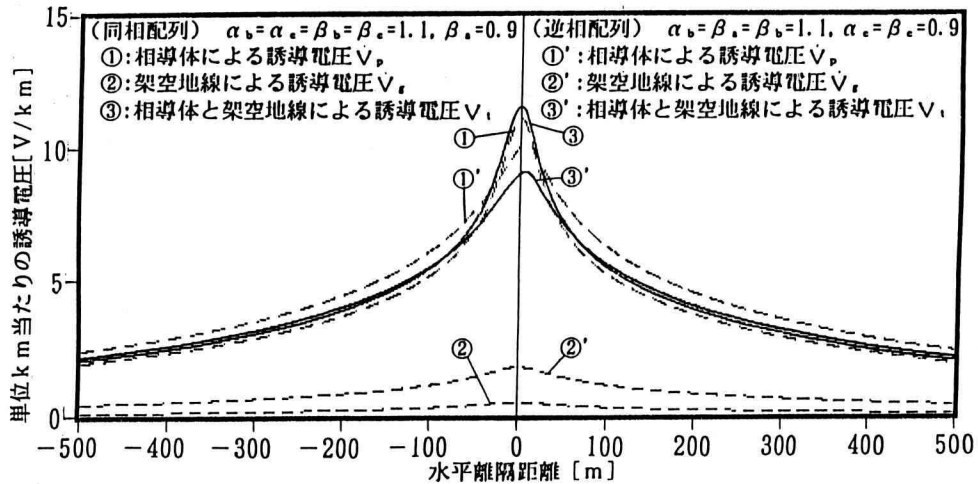


Fig. 9. Induced voltage in a communication line from a high voltage transmission line (unbalanced phase current).

図より、以下の点が明らかとなっている。

- ①同相配列では、相電流による誘導電圧 V_p と架空地線電流による電磁誘導電圧 V_g はともに送電線直下を中心に左右対称となっている。一方、逆相配列では、 V_p の大きさは左右で等しいが、位相が異なるため、 V_t は左右で非対称となっている。
- ②同相配列の結果は、逆相配列と比して V_t は非常に大きく、約5~10倍となっている。また、送電線中心からの水平離隔距離が大きくなると、逆相配列の場合には非常に小さくなるが、同相配列の場合には V_t の値はかなり大きい。従って、同相配列の場合には、通信線へ与える電磁誘導の影響が大きいため十分に注意する必要がある。
- ③問題となる同相配列において、水平離隔距離がある程度大きくなると、 V_p は急激に減衰し、通信線への電磁誘導電圧は V_g のみを考慮すればよいことが明らかとなっている。

4.3 相電流不平衡による影響

図9は、相電流の不平衡を最大10%考慮した場合の電磁誘導電圧の計算結果を示している。相電流平衡時の図8と比較して分かるように、相電流不平衡の影響は、同相配列では2~3倍程度であるのに対して、逆相配列では12~13倍となっており、影響が極めて顕著であることが明らかとなっている。そして、送電線中心から数十メートルの範囲では同相配列の方が若干大き

いが、その他の部分では両者の結果はほとんど一致している。また、相電流平衡時と異なって、誘導電圧に占める割合は、 V_p が大部分で V_g の影響は非常に小さくなっている。

5. 結 論

本研究で得られた成果を要約すると次の通りである。

架空地線電流は、電気所とねん架方式におけるねん架鉄塔のごく近傍を除いては、一定となり、その値は(7)、(8)式で示した近似式2により得られた結果と一致することが明らかとなった。

架空地線電流に関しては、同相配列における値は、逆相配列の約10倍となっている。また、10%の相電流不平衡を考慮すると、逆相配列の方が影響が大きいが、それでも同相配列における値の約60~80%である。

通信線への電磁誘導電圧に関しては、相電流平衡時においては、同相配列の方が逆相配列の5~10倍となっている。一方、10%の相電流不平衡時においては、逆相配列の方が影響が大きく、その結果は同相配列とほとんど同じ値になっている。その値は、相電流不平衡時の同相配列の約3倍であり、その内訳は架空地線よりも相電流による影響が非常に顕著となっている。そして、電磁誘導の影響する範囲も送電線中心からの離隔距離の大きいところまで及ぶことも明らかとなっ

ている。

文 献

- 1) 電気学会・電子通信学会 誘導調査特別委員会編：「電磁誘導に関する最新の動向と課題」電気学会出版（昭54-4）。
- 2) 電気学会・電子通信学会 誘導調査特別委員会編：「情報化社会と省エネルギー時代の電磁誘導対策問題」電気学会出版（昭58-7）。
- 3) 電気学会・電子情報通信学会 誘導調査特別委員会編：「電磁誘導対策の考え方とその最新技術」電気学会出版（昭62-9）。
- 4) 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 109-B 巻 7 号 291-198 頁（平元-7）。
- 5) 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-14 巻 121-128 頁（平元-3）。
- 6) 森, 大作, 大矢：「架空送電線の相電流の不平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」神奈川工科大学研究報告 B-15 巻 187-192 頁（平2-3）。
- 7) 森, 大作, 大矢, 板子：「定常運転時の高圧送電線から通信線に生じる電磁誘導電圧に関する検討」平成4年電気学会全国大会 No. 1248。
- 8) 森, 大作, 大矢, 板子：「ねん架方式の高圧送電線における架空地線電流と近傍通信線への電磁誘導電圧」平成4年電気学会電力・エネルギー部門大会 No. 471。
- 9) 孤田, 佐々木：「架空地線の電力損失低減方法」電気学会論文誌 110-B 巻 3 号 200-208 頁（平2-3）。