

高電磁誘導電圧の通信線に対する一対策法

森 武 昭・大 矢 征

One Reduction Method for High Voltage Induced to Communication line by Electro-Magnetic Coupling

Takeaki MORI and Susumu OHYA

Abstract

The electro-magnetic inductive interference from power line to communication line has become increasingly important problems. Because the induced voltage shows a tendency to be higher. By the way, as a matter of fact, the shielding conductors such as a rail of railways, a guard cable of trunk road and a water pipe are often laid nearby a power or a communication line. In this paper, it is confirmed that the shielded cable works very effectively also for high induced voltage by including the effects of the shielding conductors in the estimating computation, because of the non-linearity of the steel tape in the shielded cable. Furthermore, the authors propose the new calculating method for obtaining exactly and simply the required grounding resistance at the terminals of the shielded cable.

1. ま え が き

送電線の1線地絡事故時に近傍通信線へ生じる電磁誘導障害は、地絡故障電流の増大と両線路の接近事例の増加により、ますます深刻な問題となってきた。近年、通信線に光ファイバケーブルが導入されるようになったが、現行のものは、保守等のために数対の金属介在対が使用されており、この電磁誘導対策も重要な課題の一つとなっている。一方、既存の金属導体線路に対する電磁誘導も誘導電圧が一段と高くなる傾向にあり、その対策は困難の度を増しつつある。

電磁誘導対策は、主にアルミ被電磁誘導しゃへいケーブル（以下、単に「しゃへいケーブル」という）を用いる方法でおこなわれてきた。しかし、誘導電圧の増大により、しゃへいケーブルだけでは、制限値（電磁誘導が問題となる直接接地系の高安定送電線においては430[V]）以下にすることが非常に厳しくなっており、このままでは近い将来技術的に対策が困難になることが危惧される。このことは、電力・通信の両事業者にとって極めて由々しき問題である。本論文では、従来は予測計算に見込んでいない導体周囲の環

境しゃへい体（鉄道レール、幹線道路のガードケーブル、水道管等のような第三者の施設で、電磁しゃへいにも役立つしゃへい体）を見込むことにより、より高い誘導電圧まで対策可能となることを定量的に述べている。特に、しゃへいケーブルの非線形性を有効利用することによる相乗効果も期待できることを明らかにしている。また、実際に誘導対策の設計をおこなう際に役立つ近似値を得るための簡易計算法についても提案している。これらの内容は、しゃへいケーブルをより高い誘導電圧に対しても有効に利用できるようにしたものであり、新しい技術開発を必要としない点からも現実的な解決法であると思われる。以下に、その具体的内容を報告する。

2. しゃへいケーブルの一般的特性

しゃへいケーブルの外被構造は、図1のようになっている。このケーブルは、図2のように、電力線からの電磁誘導起電力を受けた場合、両端を接地しているアルミ被に電流が流れる。そうすると、磁性体層（鋼帯または電磁軟鉄）により磁束が増し、その内側の磁束分だけインダクタンスの増加を生じ、しゃへい効果をよくする。これを式で表わせば次の通りである¹⁾。

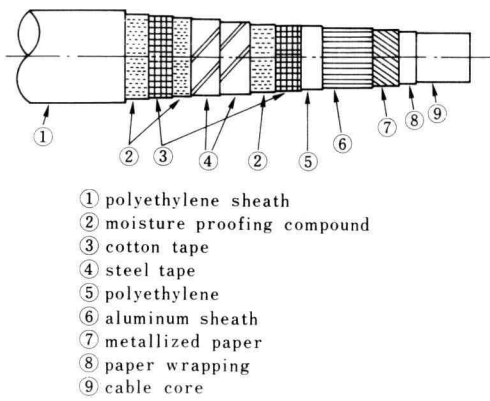


Fig. 1. Structure of shielded cable

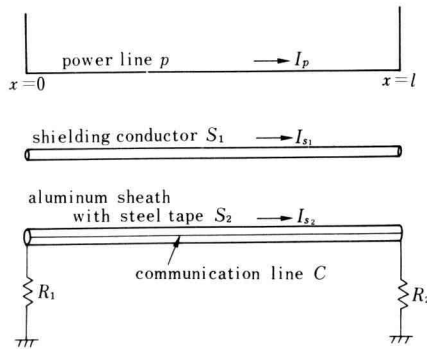


Fig. 2. Arrangement of conductors

$$K_{s_2} = \frac{R_0 + R_e}{R_0 + R_e + \Delta r + j\Delta x + jX_e} \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで、

K_{s_2} : シャヘイケーブルのシャヘイ係数

R_0 : アルミ被の直流抵抗 $[\Omega/\text{km}]$

$R_e = (R_1 + R_2)/l$: 単位 km 当りの接地抵抗 $[\Omega/\text{km}]$

(図 2 参照)

$\Delta r + j\Delta x$: 付加インピーダンス $[\Omega/\text{km}]$ で、前述の磁束の増加分によるもの。

jX_e : 外部インピーダンス $[\Omega/\text{km}]$ で、Carson-Pollaczek の式より求める。

(1) 式から、シャヘイ係数を小さくするためには、 R_0 と R_e を小さくするか、 $\Delta r + j\Delta x$ を大きくする必要がある。ところが、接地抵抗 R_e を小さくするには技術的にも限度がある。また、 R_0 を小さくするか $\Delta r + j\Delta x$ を大きくするためには、図 1 のアルミ被または磁性体層

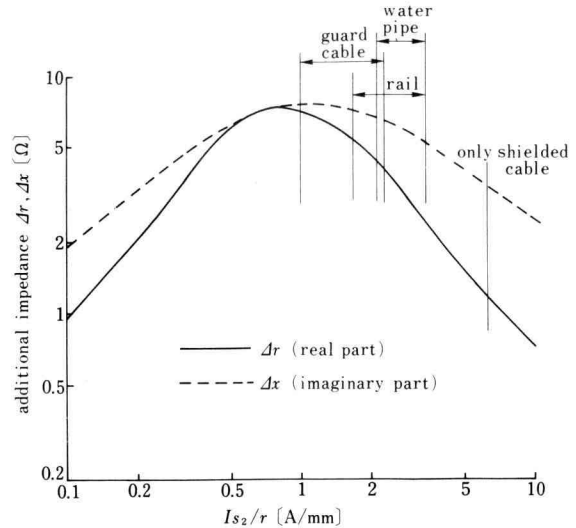


Fig. 3. Characteristic of additional impedance of shielded cable

を厚くする必要があるが、重量の増加や曲げなどの機械的特性から限度がある。

ところで、シャヘイケーブルのシャヘイ係数は (1) 式から求めるのであるが、実際には、付加インピーダンス $\Delta r + j\Delta x$ は、磁性体による非線形性のため、電流に依存して変化する。従って、アルミ被を流れる電流の大きさによって付加インピーダンス即ちシャヘイ係数は変化する。そこで、電磁軟鉄テープ 2 重巻きで半径 $r = 17.5 \text{ mm}$ のシャヘイケーブルの付加インピーダンス特性の一例を示したものが図 3 である。この特性をもとに、シャヘイケーブルのみで制限値 (430 [V]) 以下に対策できる誘導電圧の限界を求めると、 $R_e = 2 [\Omega/\text{km}]$ のとき、390 [V/km] である。従って、例えば、 $l = 4 \text{ km}$ で、両端の接地抵抗の和が $R_1 + R_2 = 8 [\Omega]$ のとき、1560 [V] を越える誘導電圧が生じると、このシャヘイケーブルで制限値以下に対策することが不可能であることを意味している。ところが、誘導電圧は高くなる傾向にあり、最近では、200 [V] を越える事例も報告されており²⁾、このままでは、対策が困難になってしまう。そこで、著者らは、シャヘイケーブルの非線形性に着目し、高誘導電圧にも適用できる方法を検討した。即ち、図 3 の特性で、シャヘイ層電流が 1.0 ~ 1.5 [A/mm] のとき付加インピーダンスが大きくなり、シャヘイ特性が良好となる。ところが、高誘導電圧では、シャヘイ層電流が 5 ~ 8 [A/mm] になってし

まい、しゃへい特性がかなり悪いところで使用することになる。そこで、高誘導電圧でもしゃへい層電流を小さくして付加インピーダンスが大きくなるところで利用できるように工夫する必要がある。

3. しゃへいケーブルの高誘導電圧領域での有効利用

図2において、しゃへいケーブル S_2 の他に、しゃへい導体 S_1 が存在するものとする。そうすると、 S_1 を流れる電流 I_{s1} は、実際には図に示した向きとは逆になる。従って、 S_2 に流れる電流 I_{s2} は、 I_{s1} により、電力線 l だけによる電流よりも減少することになる。 I_{s2} が小さくなると、高誘導電圧領域では、図3の付加インピーダンス特性の優れたところで利用できるようになり、しゃへいケーブルのしゃへい効果が改善されることが期待される。

しゃへい導体 S_1 を後述するように両端接地の等価回路に置きかえ、そのときの等価インピーダンスを Z_e [Ω/km] とすると、 S_1 のみによるしゃへい係数 K_{s1} は次式で求めることができる。

$$K_{s1} = 1 - \frac{Z_{s1c} Z_{ps1}}{Z_e Z_{pc}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 Z_{s1c} 、 Z_{ps1} は図2の各導体間の大地帰路相互インピーダンス [Ω/km] を示している。

次に、 S_1 としゃへいケーブル S_2 の両方によるしゃへい係数を求める。 S_1 と S_2 を流れる電流 I_{s1} 、 I_{s2} を求めると次のような式を得る。

$$I_{s1} = - \frac{Z_{s2} Z_{ps1} - Z_{s1s2} Z_{ps2}}{Z_e Z_{s2} - Z_{s1s2}^2} I_p \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$I_{s2} = - \frac{Z_e Z_{ps2} - Z_{s1s2} Z_{ps1}}{Z_e Z_{s2} - Z_{s1s2}^2} I_p \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 Z_{s1s2} 、 Z_{ps2} は図2の各導体間の大地帰路相互インピーダンス [Ω/km] を示している。この両式より、 S_1 、 S_2 全体のしゃへい係数 K は、次式のようになる。

$$\begin{aligned} K &= 1 + \frac{Z_{s1c} I_{s1} + Z_{s2c} I_{s2}}{Z_{pc} I_p} \\ &= 1 - \frac{Z_{s1c}(Z_{s2c} Z_{ps1} - Z_{s1s2} Z_{ps2}) + Z_{s2c}(Z_e Z_{ps2} - Z_{s1s2} Z_{ps1})}{Z_{pc}(Z_e Z_{s2} - Z_{s1s2}^2)} \quad \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

この式で、 Z_{s2ps1} と Z_{s2c} は次式から求める。

$$Z_{s2} = R_0 + R_e + \Delta r + j\Delta x + jX_e \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$Z_{s2c} = \Delta r + j\Delta x + jX_e \quad \dots\dots\dots (7)$$

ところで、実際の計算は、 $\Delta r + j\Delta x$ が図3に示すように電流 I_{s2} に依存する非線形要素なので、 I_{s2} が許容誤差範囲内に収束するまで (3)、(4)、(6)、(7) 式を繰り返し計算し、その結果をもとに (5) 式よりしゃへい係数を算出する。

ところで、実際のしゃへい対策を検討する場合には、無対策時の誘導電圧が計算されるので、この値を制限値以下とするためのしゃへい係数が既知となり、(3)～(7) 式を繰り返し計算することにより、(6) 式中の $R_e = (R_1 + R_2)/l$ を算出し、所要接地抵抗値を求めることになる。

しかしながら、 R_e を求める上述の計算は、非線形性のために若干の面倒な計算を必要とするため、近似値を得るための簡易な計算法が与えられると実際上は好都合である。そこで、 R_e の近似値を求めるために次のような簡易計算法を提案する。

- ① まず最初に、しゃへい導体 S_1 のみが存在するものとして、これによるしゃへい係数 K_{s1} を (2) 式から算出して、 $E' = K_{s1} E$ を求める。ここで、 E は無対策時に通信線に生じる誘導起電力を表わしている。
- ② 残った誘導電圧 E' に対して、しゃへいケーブル S_2 で対策するものとして、 $E'' = K_{s2} E'$ において E'' が制限値以下となるような K_{s2} を定め、(1) 式よりしゃへいケーブルの所要接地抵抗値を求める（実際には後述する図7から極めて簡単に求めることができる）。

4. 環境しゃへい体としゃへいケーブルによる対策

電磁誘導の対象となる電力線や通信線の近傍に、鉄道レール、幹線道路のガードケーブル、水道管などのように、分布接地または多点接地になっていて電磁誘導に対しても（本来の目的ではないが）しゃへい効果を有する施設が存在することが多々ある。このような施設を環境しゃへい体と呼ぶことにする。環境しゃへい体によるしゃへい効果そのものはそれほどではないが、しゃへいケーブルと組みあわせると相乗効果により良好なしゃへい効果を得ることができる。そこで、しゃへい体 S_1 として、これらの環境しゃへい体を考慮して、しゃへい効果を検討する。

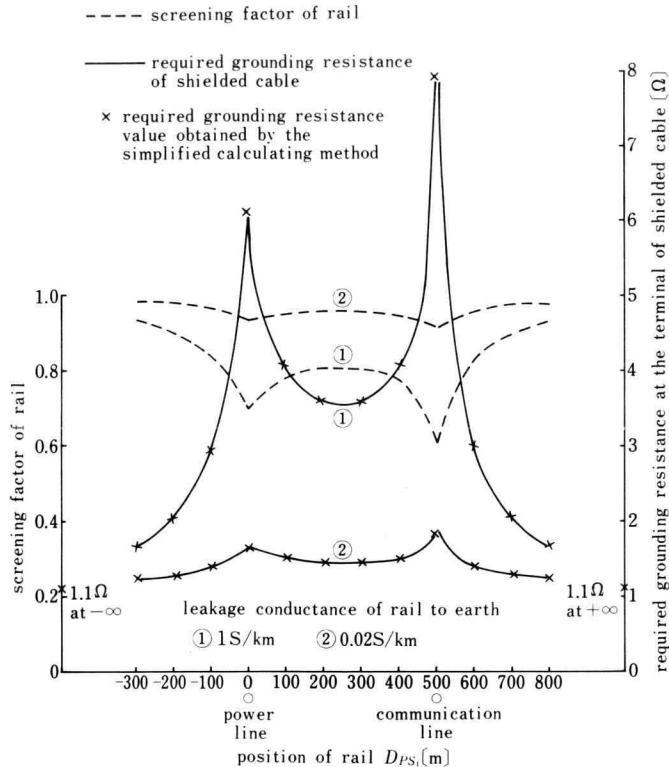


Fig. 4. Shielding effect of rail and shielded cable

4.1 鉄道レール

鉄道レールは、対地漏れコンダクタンスを介して大地に対して分布接地状態となっている。特に、鉄道レールは長距離となるため、一般に無限長線路として取り扱うことができる。図2の回路で、 S_1 を無限長の鉄道レールとすると、これを等価的に長さ l [km] の両端接地導体に置きかえると、その単位 km 当りのインピーダンス Z_e は、次式のようにになる。

$$Z_e = \frac{Z}{1 - \frac{1 - e^{-\gamma l}}{\gamma l}} \quad (8)$$

$$\text{ここで、} \gamma = \sqrt{ZY} \quad (9)$$

であり、 Z はレールの大地帰路自己インピーダンス [Ω/km]、 Y はレールの対地漏れコンダクタンス [S/km]を表わしている。(8)式より Z_e が定まると、前章で述べた方法により解析をおこなうことができる。

そこで、代表的モデルとして国鉄在来線を想定し、 l

$= 4$ [km]、 p - c 間 500 [m]一定とし、レール S_1 の位置を変えて計算をおこなった。レールのみのしゃへい係数を(2)式から求めたのが図4の破線である。 S_1 が p または C の近傍に存在するとかかなりのしゃへい係数が得られる。そして、レールの対地漏れコンダクタンスが影響するが、在来線の一般的数値 1 [S/km]では S_1 が p と C の間にあれば、0.8以下のしゃへい係数が得られている。次に、誘導電圧を $E = 2000$ [V]と想定すると、 S_1 としゃへいケーブル S_2 によるしゃへい効果で誘導電圧を制限値以下(しゃへい係数 $430/2000 = 0.215$ 以下)とするための所要接地抵抗の値を求めたものが図4の実線である。しゃへいケーブル S_2 のみで対策するためには、1.1 [Ω]以下の接地抵抗を必要とするが、鉄道レール S_1 が見込めると、 S_1 が p または C のごく近傍にあってレール漏れコンダクタンス 1 [S/km]のとき、6~8 [Ω]に緩和できている。この理由は、 S_2 を流れる電流が、図3のごとく、 S_2 が単独のときの 108 [A] ($I/r = 6.17$ [A/mm])に対して、 S_1 を見込むと 30~60 [A] ($I/r = 1.71 \sim 3.43$ [A/mm])近くまで減少

Table 1. Calculated values of screening factors

D_{P-S}	K_{S1}	K_{S2}	$K_{S1} \times K_{S2}$	K
-300	0.934	0.206	0.192	0.172
-200	0.900	"	0.185	0.157
-100	0.840	"	0.173	0.130
0	0.700	"	0.144	0.083
100	0.782	"	0.161	0.107
200	0.804	"	0.166	0.117
300	0.804	"	0.166	0.117
400	0.780	"	0.161	0.107
500	0.608	"	0.125	0.062
600	0.838	"	0.173	0.131
700	0.900	"	0.185	0.157
800	0.934	"	0.192	0.173

 K_{S1} : the screening factor of rail K_{S2} : the screening factor of shielded cable K : the synthetic screening factor of rail and shielded cable

しており、しゃへい性能のよいところで使用しているためである。即ち、表1から判るように、 S_1 と S_2 が各々単独で存在するときのしゃへい係数 K_{S1} 、 K_{S2} の積よりも全体のしゃへい係数はさらに小さい値となっている。このことは、しゃへいケーブルをしゃへい性能のよい14~21[A] ($I/r=0.8\sim1.2$ [A/mm]) 付近の電流値で使用する重要性を示している。

次に、簡易計算法により所要接地抵抗を求めた結果も図4の中に示している。いずれの結果も非常によい近似となっており、簡易計算法の有効性が明らかとなっている。

4.2 ガードケーブル

高速道路や主要幹線道路のガードケーブルによる電磁しゃへい効果については、すでに詳細な報告がおこなわれている^{4)~6)}。ガードケーブル S_1 としゃへいケーブル S_2 によるしゃへい効果を検討する。検討モデルとして、図2において、ガードケーブル S_1 は、誘導区間と同じ長さで $l=4$ [km]とし、左右の路側と中央分離帯の3本で構成されるものと想定した。ケーブルの支柱は6 [m]間隔で接地されているので、分布接地回路として取り扱うことができる。そこで、3本のガードケーブルを等価的に1導体の両端接地回路に置きかえる。その結果は、次の通りである。

$$Z_e = \frac{Z_s^2 + Z_s Z_b - 2Z_a^2}{3Z_s + Z_b - 4Z_a} [\Omega/\text{km}] \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 Z_a は中央分離帯と路側の間、 Z_b は両側路側間のそれぞれガードケーブル相互間の大地帰路インピーダンス [Ω/km]である。また、 Z_s はガードケーブル1本を等価的に両端接地回路に置きかえたときのインピーダンスで次式より求められる。

$$Z_s = \frac{Z}{1 - \frac{2}{\gamma l} \left(\coth \gamma l - \frac{1}{\sinh \gamma l} \right)} [\Omega/\text{km}] \dots\dots\dots (11)$$

ここで、 Z はガードケーブル1本当りの大地帰路自己インピーダンス [Ω/km]であり、 γ は(9)式と全く同じ内容である。

検討モデルに対する計算結果を図5に示す。ガードケーブル S_1 だけのしゃへい係数は、 S_1 が p と C の間に存在すると0.75以下となり、かなりのしゃへい効果を期待することができる。 S_1 と S_2 を考慮して、 $E=2000$ [V]の誘導電圧を制限値430 [V]以下とするためのしゃへいケーブルの所要接地抵抗値はかなり緩和されている。即ち、 S_2 だけの時は1.1 [Ω]以下とせねばならないのに対して、 S_1 が p または C の近傍に存在すると8~20 [Ω]となっている。これは、図3に示すように、 S_2 だけの時、 $I_{s2}=108$ [A] ($I_{s2}/r=6.17$ [A/mm])に対して、 S_1 を見込むと $I_{s2}=18\sim40$ [A] ($I_{s2}/r=1.03\sim2.29$ [A/mm])であり、明らかにしゃへい性能のよいところで利用しているためである。また、簡易計算法による所要接地抵抗値は、非常によい近似値を得ており、その有効性が明らかとなっている。

4.3 水道管

铸铁管を使用している水道管は、分布接地状態となっているため、電磁誘導に対してもしゃへい効果が期待できる。検討モデルとして、200 mm ϕ 铸铁管を取り上げ、その長さは誘導区間長と同一の4 [km]と無限長と見なせる場合の2種類について検討した。計算は水道管が無限長の場合は(8)式により、誘導区間長と同一の場合は(11)式の結果を Z_e と置きかえることにより算出できる。なお、地中埋設導体である水道管の大地帰路自己インピーダンスと対地アドミタンスの求め方は、文献(7)で示された計算式により数値解を得る。

計算結果を図6に示す。 S_1 が単独のときのしゃへい

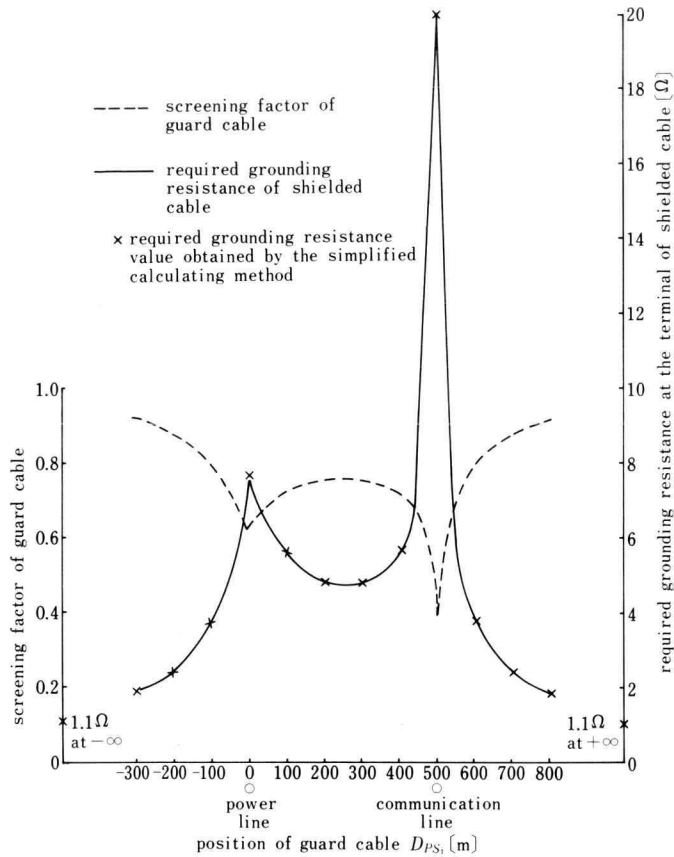


Fig. 5. Shielding effect of guard cable and shielded cable

係数は、 S_1 が p と C の間にあるとき 0.8 程度見込める。また、無限長のときの方が若干良好なしゃへい効果が得られている。次に、 S_1 と S_2 を考慮して、 $E = 2000$ [V] の誘導電圧を制限値 (430 [V]) 以下とするための所要接地抵抗値を求めると、 S_1 が p または C のごく近傍に存在する場合、かなり緩和されている。即ち、 S_2 単独で $1.1 [\Omega]$ 以下の接地抵抗を必要とするが、 S_1 が p または C のごく近傍に存在すると、無限長線路で約 $7.5 [\Omega]$ 、誘導区間長と同一長の場合で約 $6 [\Omega]$ となっており、水道管の影響が顕著であることを示している。図 3 に示すように、 S_2 単独のとき $I_{s2} = 108$ [A] ($I_{s2}/r = 6.17$ [A/mm]) であるのに対して、 S_1 が p と C の間に存在すると $I_{s2} = 40 \sim 60$ [A] ($I_{s2}/r = 2.28 \sim 3.43$ [A/mm]) まで減少し、付加インピーダンスが大きくなっているためである。また、簡易計算法の結果も非常によい近似結果が得られていることも図 6 か

ら明らかとなっている。

なお、水道管以外でも铸铁管を使用している埋設施設については、定数が異なるだけで本項の検討内容をそのまま適用することができる。

5. 考 察

しゃへいケーブルと環境しゃへい体の組みあわせにより、高誘導電圧領域でもしゃへいケーブルを有効利用することができることが明らかとなった。しかも、表 1 に示す鉄道レールの例からも判るように、しゃへいケーブルの非線形性のために、各々のしゃへい体が単独で存在するときのしゃへい係数の積 $K_{s1} \times K_{s2}$ よりもさらに良好なしゃへい係数が得られることも明らかとなっている。また、その場合の簡易計算方法として、環境しゃへい体のしゃへい係数 K_{s1} を考慮し、残った

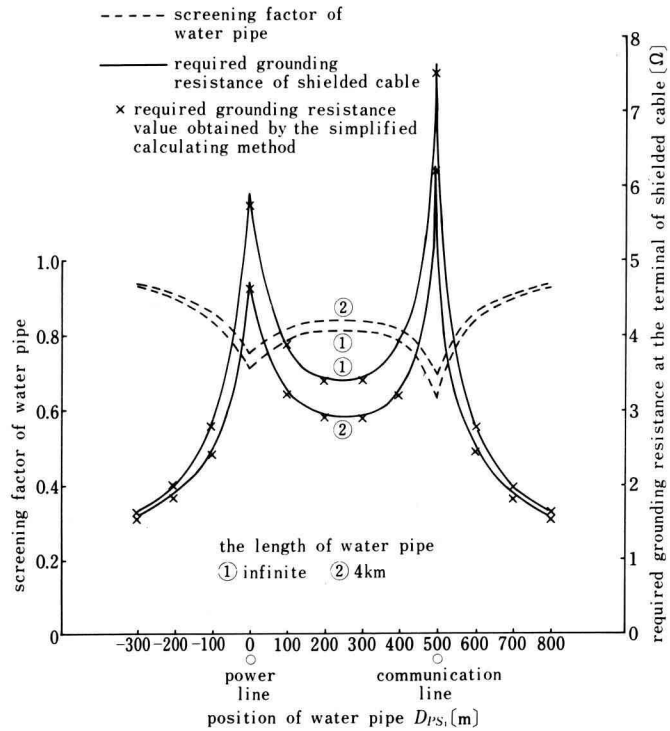


Fig. 6. Shielding effect of water pipe and shielded cable

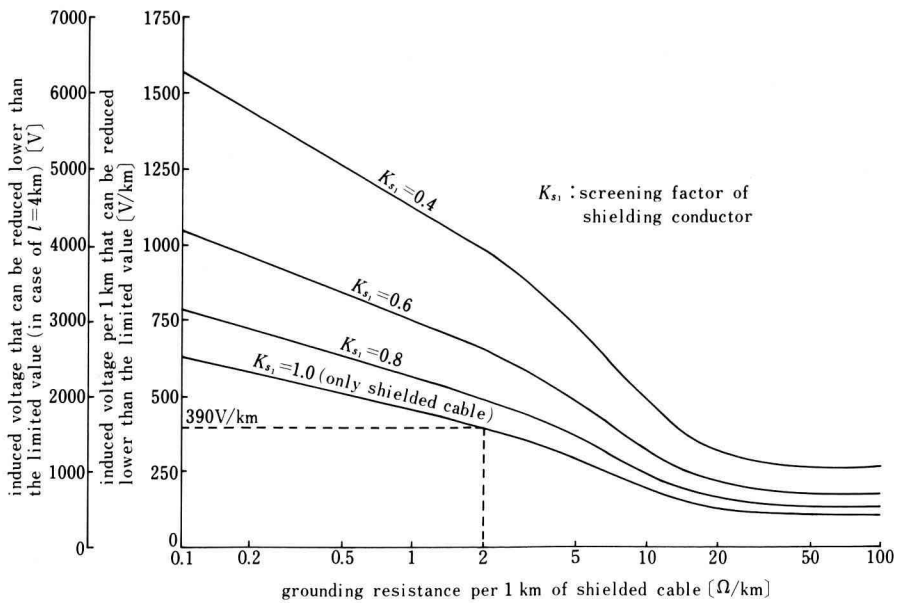


Fig. 7. Limit of the induced voltage that can be reduced lower than the limited value by shielded cable and shielding conductor

誘導電圧 $E' = K_{s1} E$ をしゃへいケーブルで制限値以下とするのに必要な所要接地抵抗値を求めるのが实际的であり、有効であることが明らかとなった。この理由としては、いずれの場合においても、しゃへいケーブル S_2 を流れる電流に比して、環境しゃへい体 S_1 を流れる電流は非常に大きく(約 10 倍程度)、 S_2 の電流が S_1 の電流分布に及ぼす影響をほとんど無視することができるためである。そこで、このような考え方に立った場合、どの程度の誘導電圧まで対策可能であるのかを検討したものが図 7 である。対策可能誘導電圧の概要を知るために、しゃへいケーブル以外によるしゃへい係数 K_{s1} をパラメータとして図示しているが、実際には前述の E' を求めた上で、図中の $K_{s1}=1$ の曲線から所要接地抵抗値を求めればよい。この結果より、次のような点が明らかとなっている。

- ① シャへいケーブル単独では、単位 km 当りに換算したしゃへいケーブルの接地抵抗 $R_0 = (R_1 + R_2)/l$ が $2.0 [\Omega/\text{km}]$ のとき、 $390 [\text{V/km}]$ ($l=4 [\text{km}]$ のとき $1560 [\text{V}]$) の誘導電圧まで対策可能である。
- ② 環境しゃへい体としゃへいケーブルによる対策では、環境しゃへい係数 0.8 のとき、しゃへいケーブルの接地抵抗を $2.0 [\Omega/\text{km}]$ とすると、約 $480 [\text{V/km}]$ ($l=4 [\text{km}]$ のとき $1920 [\text{V}]$) の誘導電圧まで対策可能である。

以上のごとく、環境しゃへい体を予測計算に見込むことの有効性が明らかとなったが、もし周囲に環境しゃへい体が存在しない場合には、しゃへいケーブルのメッセンジャワイヤに架空送電線の架空地線に使用している IACSR (鋼心イ号アルミ合金より線) や AS (アルミ覆鋼より線) のような張力が強く導電性のよいものを使用することにより、本稿で述べたのと同じ原理により、しゃへいケーブルを高誘導電圧領域まで有効利用することも可能である³⁾。

6. ま と め

電力線の一線地絡事故時の近傍通信線への誘導障害は、誘導電圧が一段と高くなる傾向にあり、厳しさを増しているのが現状である。本稿で述べた内容は、従来、予測計算に見込んでいない鉄道レール、ガードケー

ブル、水道管等の環境しゃへい体のしゃへい効果を定量化して評価することにより、しゃへいケーブルを高電圧領域にも有効利用できることを明確にしたものである。しかも、相乗効果により、各々のしゃへい体単独のしゃへい係数の積よりもさらに良好なしゃへい係数が得られることも明らかとなっている。さらに、そのときの近似値を求めるための簡易計算法の有効性も明らかとなっており、実務者が具体的設計をおこなう際に大いに役立つものと思われる。本稿は、高誘導電圧に対するしゃへい対策の一つの指針を与えるものと思われるが、今後さらに高い誘導電圧に対処できるしゃへい対策方法の早急な検討が必要であり、この点に関しては次の機会に報告したいと考えている。

本研究を進めるに当り、貴重な御意見をいただきました電気学会・電子通信学会 誘導調査特別委員会第 1 WG 主査 関根泰次東京大学教授、同幹事 井上幸雄電力中央研究所主査研究員はじめ委員各位に深甚なる謝意を表します。

文 献

- 1) 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. 171～p. 216 (昭 54-3)
- 2) 同上委員会報告書：“情報化社会と省エネルギー時代の電磁誘導対策問題” p. 3～p. 43 (昭 58-7)
- 3) 森：“メッセンジャワイヤとしゃへいケーブルによる誘導対策” 同上委員会資料 (昭 60-5)
- 4) 文献 (2) の p. 45～p. 133
- 5) 紀村・雪平・横田：“高速道路のガードケーブルによる埋設通信線への電磁誘導遮へい効果” 電気学会誌 vol. 101-B, p. 161～p. 168 (昭 56-3)
- 6) 雪平・宮崎・井上・辻本：“幹線道路ガードケーブルの電磁しゃへい効果” 電気学会誌 vol. 104-B, p. 711～p. 718 (昭 59-11)
- 7) E.D. Sunde: “Earth Conduction Effects in Transmission systems” p. 140～p. 176, Dover (1967)