

多電極並列接地インピーダンスの基礎的検討

大 矢 征・森 武 昭

Basic Study on the Ground Impedance using Multi-Parallel Grounding Rods

Susumu OHYA and Takeaki MORI

Abstract

This paper describes a exactly calculating method of "ground impedance" on the multi-parallel grounding rods considered with the impedance of connecting wires between rods. This method enables the calculation of the characteristics for difference of the feeding point and for the audio frequency band. The applicable range of simple approximate equation used up to now is confirmed from this calculating values, and the approximate method to calculate more exactly than the equation was proposed. Furthermore, this paper shows a guideline of the number of rods when the required ground resistance and the establishment place were decided.

1. ま え が き

電力系統の一線地絡事故などにより、近傍の通信線に生ずる電磁誘導障害は、両線路が接近する事例の増加や起誘導電流の増大のために、一段と厳しくなる傾向にある¹⁾。この対策方法としては、アルミしゃへい通信ケーブルの使用、通信ケーブルの管路内布設、電磁誘導対策用アレスタの使用（光ファイバケーブルの介在対などに実用化）などがある。これらのいずれの対策方法にも共通する課題は、そのしゃへい効果を良くするためには末端の接地抵抗を極力低くしなければならないという点である。接地抵抗を低減する方法としては、(1) 低減剤の使用、(2) ボーリング工法による深埋接地、(3) 多数の電極を並列に接続する接地があげられる。このうち、低減剤の使用は低減効果に自ずから限度がある。また、深埋接地は、深くボーリングすると大地導電率の悪い岩盤などに当り、ある程度以上深くしても低減効果がなくなってしまう事例が多い。そこで、最近見直されているのが多電極並列接地である。特に、電磁誘導対策では通信ケーブルの末端接地電極を道路に沿って一直線状に多数打ち込める可能性があるため、有効な方法であり、一部でかなり大規模な実用化実験も実施されている²⁾。多電極並列接地の接地抵抗の基本的検討は古くから行われている

が^{3),4)}、ここでは厳密な計算を行って、従来利用されている簡易計算法の適用できる範囲を明確にするとともに、実際の設計に供するための基礎的検討を行った。具体的には、接地電極を接続する連結線のインピーダンスの影響、電流の給電点の位置による影響、音声周波数帯域での特性等について検討している。また、所要の接地抵抗値と接地電極を設置する可能範囲が与えられたときの電極数（または電極間距離）の求め方などの基本的指針を与えている。

なお、上述のような検討を行うに際しては、単に"接地抵抗"を問題にするのではなく、内容的にも、"接地インピーダンス"として定義する必要がある。そこで、本稿では、この両者を区別して使用する。また、音声周波数帯域での特性は、異常時誘導の対象となっている通信線が誘導雑音でも問題となっている場合、従来は、商用周波数における抵抗値をそのまま使用している。しかし、面的に大きく広がりをもつ多電極並列接地では、音声周波数帯域での特性を把握し、商用周波数における特性との関係を明確にしておく必要がある。

本稿は、以上のような観点から、多電極並列接地インピーダンスの特性を理論的に検討したものであり、実際の接地設計に寄与することを目的としたものである。

2. 並列接地インピーダンスの理論計算式

Fig. 1 は打込棒電極を道路沿いに一直線上に、かつ等間隔に打ち込んだ場合の電極配置図である。この場合の接地抵抗は、各電極を接続する連結線のインピーダンスを無視するなどの仮定に基づいた簡易計算式により、並列接地抵抗として求めているのが現状である。しかし、多電極並列接地によって接地抵抗を低減させる場合には、電極数の増大とともに連結線の全長も長くなり、接地抵抗に対して連結線のインピーダンスが無視できなくなる可能性がある。ここでは、連結線のインピーダンスを考慮した場合を接地インピーダンスと呼び、この詳細については2.2節で述べる。なお、連結線は絶縁されており、連結線の大地漏れ電流はないものとする。また、2.1節では単電極接地抵抗と、2電極間の相互抵抗に関する基本式について述べ、2.3節では従来利用されている簡易計算式について述べる。

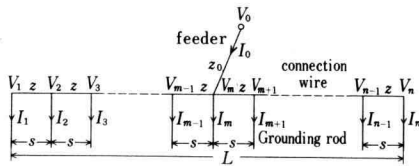


Fig. 1. Parallel arrangement of grounding rods.

2.1 打込棒電極の接地抵抗に関する基本式

n 本の棒電極が並列に打ち込まれた場合の接地抵抗は、単電極の接地抵抗の $1/n$ とはならない。すなわち、ある電極に流れる電流により大地電位は変動するので、近くにある電極の接地抵抗は、それが単独に存在しているときの接地抵抗と異なるためである。単電極の接地抵抗と2電極間の相互抵抗に関する基本式は以下のようにして求められる³⁾。

電極の半径 a [m]、長さ l [m] の丸棒接地電極を、大地抵抗率 ρ [Ω m] ($\rho = 1/\sigma$; σ は大地導電率) が一定の地中に垂直に打ち込んだ場合の単電極の接地抵抗を $R(a)$ とすると、

$$R(a) = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \left[\frac{2l}{a} \{1 + \sqrt{1 + (a/2l)^2}\} \right] + \frac{a}{2l} - \sqrt{1 + (a/2l)^2} \right) \quad (1)$$

として求められる。一般に $l \gg a$ なので、良く知られた(2)式を用いることが多い。

$$R(a) \approx \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{4l}{a} - 1 \right) \quad (2)$$

2本の接地電極を s [m] の間隔で打ち込んだ場合、相互抵抗は(1)式の a の代りに s を代入して

$$R(s) = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \left[\frac{2l}{s} \{1 + \sqrt{1 + (s/2l)^2}\} \right] + \frac{s}{2l} - \sqrt{1 + (s/2l)^2} \right) \quad (3)$$

として計算できる。

本稿では、並列接地抵抗を求める基本式として、(1)式と(3)式を用いる。

2.2 連結線のインピーダンスを考慮した接地インピーダンスの計算法

Fig. 1 に示すように、 n 本の電極を等間隔に打ち込んで、 m 番目の電極にフィーダ線を接続して I_0 [A] の電流を供給した場合を考える。 I_1, I_2, \dots, I_n および V_1, V_2, \dots, V_n はそれぞれ各棒電極の電流および電位を表わし、 V_0 は給電点の電圧を表わす。また、 z_0 は給電点と m 番目の電極までのフィーダ線のインピーダンスであり、 z は隣接した2電極間(1区間分)の連結線のインピーダンスで、これらは Carson-Pollaczek の式を用いて計算する。Fig. 1 において、 n 本の電極部分に関する電圧電流方程式は(4)式となる。ここで、単電極の接地抵抗 $R(a)$ と2電極 (i, j 番目の電極間距離を s_{ij} とする) 間の相互抵抗 $R(s_{ij})$ は(1), (3)式を用いて算出する。

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= R(a)I_1 + R(s_{12})I_2 + R(s_{13})I_3 \\ &\quad + \dots + R(s_{1n})I_n \\ V_2 &= R(s_{21})I_1 + R(a)I_2 + R(s_{23})I_3 \\ &\quad + \dots + R(s_{2n})I_n \\ &\vdots \\ V_n &= R(s_{n1})I_1 + R(s_{n2})I_2 + R(s_{n3})I_3 \\ &\quad + \dots + R(a)I_n \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

これを行列表示すると(5)式となる。

$$[V] = [R_{ij}][I] \quad (5)$$

この接地抵抗行列 $[R_{ij}]$ は前述のように電極配置により決定される。いま、 $[R_{ij}]$ の逆行列を $[G]$ とすると

$$[I] = [R_{ij}]^{-1}[V] = [G][V] \quad (6)$$

となる。一方、Fig. 1 の z_0 および z を考慮した方程式は(7)式で表わされる。

$$[V_0] - [V] = [Z][I] \quad (7)$$

ここで, $[V_0]$ は要素がすべて V_0 の列ベクトルである。また, $[Z]$ は (8) 式に示すように, 行列の要素がすべて z_0 の n 次の行列と給電点の位置に応じた n 次の連結線インピーダンス行列の和となる。(付録参照)

$$[Z] = [z_0] + z \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} m-1 & m-2 & \cdots & 2 & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ m-2 & m-2 & \cdots & 2 & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 2 & 2 & \cdots & 2 & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 1 & 1 & \cdots & 1 & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 1 & \cdots & 1 & 1 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 1 & \cdots & 2 & 2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 1 & 2 & \cdots & n-m-1 & n-m-1 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 1 & 2 & \cdots & n-m-1 & n-m \end{bmatrix}$$

(6), (7) の両式から

$$[I] = [G][V] = [G][V_0] - [G][Z][I] \quad (9)$$

となり, $[U]$ を n 次の単位行列とすると

$$\{[U] + [G][Z]\}[I] = [G][V_0] \quad (10)$$

となる。すなわち, 各電極の電流は

$$[I] = \{[U] + [G][Z]\}^{-1} [G][V_0] \quad (11)$$

で求まり, フィーダ線を流れる電流 I_0 は

$$I_0 = \sum_{i=1}^n I_i \quad (12)$$

として求まる。ゆえに, 接地インピーダンス Z_n は

$$Z_n = \frac{V_0}{I_0} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (\{[U] + [G][Z]\}^{-1} [G])_{ij}} \quad (13)$$

のように, 行列の要素の総和の逆数を計算することにより求まる。

2.3 並列接地抵抗の簡易計算法

接地インピーダンスは (13) 式を計算することにより厳密に求まるが, 電極数が多くなると行列の演算のため計算は容易でない。連結線のインピーダンスを無視すると各電極の電位は給電点の電位 V_0 に等しくなるので, 次の 2.3.1 に示すような接地抵抗の式が求まる。また, 2.3.2, 2.3.3 で示すように, その他の若干の仮

定を設けると, 非常に簡単な式となる。

2.3.1 等電位電極と仮定した場合

$$(V_1 = V_2 = \cdots = V_n = V_0)$$

(4) 式の左辺がすべて V_0 であるので, (6) 式より

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & & \\ & R_{22} & \\ & & \ddots \\ & & & R_{nn} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_0 \\ V_0 \\ \vdots \\ V_0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

となる。よって, 接地抵抗 R_n は (15) 式で求まるが, この場合は n 次行列の逆行列を計算する必要がある。

$$R_n = \frac{V_0}{\sum_{i=1}^n I_i} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n ([R_{ij}]^{-1})_{ij}} \quad (15)$$

2.3.2 等電位かつ等電流と仮定した場合

$$(V_1 = V_2 = \cdots = V_n = V_0; I_1 = I_2 = \cdots = I_n = I_0/n)$$

各電極の電位と電流が等しい場合は (4) 式より

$$\left. \begin{aligned} V_0 &= (R_{11} + R_{12} + \cdots + R_{1n}) \frac{I_0}{n} \\ &\cdots \cdots \cdots \\ V_0 &= (R_{n1} + R_{n2} + \cdots + R_{nn}) \frac{I_0}{n} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

ゆえに, 接地抵抗 R_n は

$$R_n = \frac{V_0}{I_0} = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n ([R_{ij}])_{ij} \quad (17)$$

となる。ここで, $[R_{ij}]$ は対称行列であり, 等間隔に打ち込んだ場合, (17) 式は

$$R_n = \frac{1}{n} \left[R(a) + \frac{2}{n} \{ (n-1)R(s_{12}) + (n-2)R(s_{13}) + \cdots + R(s_{1n}) \} \right] \quad (18)$$

と表わすことができる。

2.3.3 Sunde の計算式³⁾

Sunde はさらに簡単な近似計算式を示している。(18) 式において, 電極間隔は $s_{1k} = (k-1)s$ と表わせるから, $s \gg l$ の場合, (3) 式は $R((k-1)s) = \rho/2\pi(k-1)s$ となる。よって (18) 式は

$$R_n = \frac{1}{n} \cdot \left[R(a) + \frac{\rho}{\pi s} \left\{ \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \cdots + \frac{1}{n} \right\} \right] \quad (19)$$

となり, 級数和の部分は十分大きな n に対して $\ln(\gamma n/e)$ と表わせる。よって, $s \gg l \gg a$ の条件におけ

る並列抵抗は Sunde が示したように (20) 式で近似できる。

$$R_n = \frac{1}{n} \cdot \frac{\rho}{2\pi l} \left[\ln \frac{4l}{a} - 1 + \frac{2l}{s} \ln \frac{\gamma n}{e} \right] \quad (20)$$

ここで、 $\gamma = 1.78107 \dots$ である。

従来は、この (20) 式を一般的な形として使用している。

3. 数値計算例

標準の接地棒電極 ($a = 0.007$ m, $l = 1.5$ m) を大地抵抗率が一定 ($\rho = 100 \Omega\text{m}$) の場所に布設したものと計算した。この場合、単電極のみの接地抵抗は 61.07Ω となる。 ρ が異なる地域 (ρ') における接地インピーダンスは、 $\rho'/100$ を乗ずることにより求まる。また、接地インピーダンスの計算では、周波数は 50 Hz で、中央で給電した場合を代表値として扱っている。

3.1 商用周波数での接地インピーダンス

Fig. 1 の各電極間の連結線は 38 mm^2 の絶縁電線とし、地面の上に施設した状態と考へて Carson-Pollaczek の式により自己インピーダンス z を計算すると、 50 Hz のときは

$$z = (0.5133 + j0.7938) \times s / 1000 \quad [\Omega] \quad (21)$$

となる。給電点と接地電極を接続する導線のインピーダンス z_0 は、本稿では零と仮定した。これは直列インピーダンスであるので、接地インピーダンスに後から加えて、合成インピーダンスを求めることができる。

接地インピーダンス Z_n は複素数表示をすべきであるが、連結線インピーダンスを無視した (15) 式による値や、(18)、(20) 式による近似計算の値と比較するため、 $|Z_n|$ として大きさのみを求めた。

Fig. 2 は電極間隔 s をパラメータとしたときの電極本数 n に対する接地インピーダンスを表わす。 s が小さいときには電極間の干渉のため、 s が大きいときよりも接地インピーダンスの低減化は困難である。しかし、布設場所に制限がある場合が一般的であるので、Fig. 3 のように、布設距離 L (Fig. 1 参照) により実現可能な接地インピーダンスが決定されたり、本数を増してもさほど接地インピーダンスは低減できないことがある。

Fig. 4 は (15)、(18) および (20) 式を用いて計算した

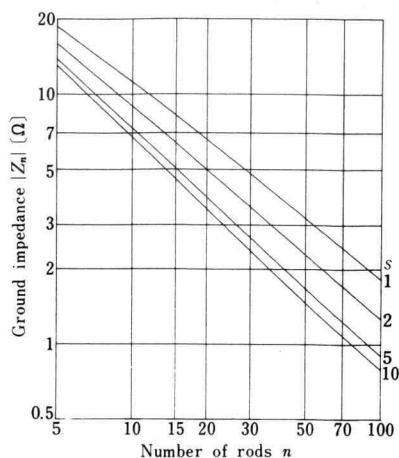


Fig. 2. Ground impedance of various separation versus number of rods; $f = 50\text{Hz}$, $\rho = 100 \Omega\text{m}$.

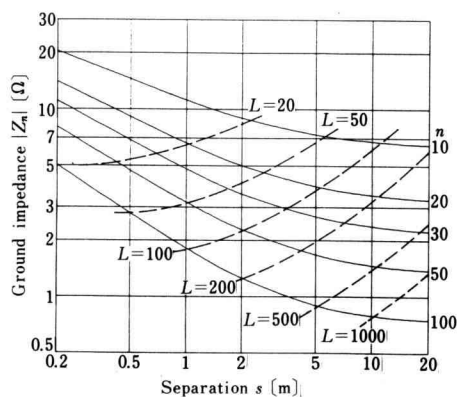


Fig. 3. Ground impedance versus uniform separation.

R_n の、接地インピーダンス $|Z_n|$ に対する誤差率を (22) 式によって求めたものである。

$$\varepsilon_1 = \frac{R_n - |Z_n|}{|Z_n|} \times 100 \quad [\%] \quad (22)$$

(15) 式による近似の場合、 $|Z_n|$ の基本が (15) 式の接地抵抗行列の逆行列であるため、誤差はほとんどなく、 s と n が両方とも大きい場合に連結線インピーダンスの影響で $|Z_n|$ が大きくなる。(18) 式では、 s が小さいときは R_n の方が若干大きくなり、 s が 5 m 以上になると (15) 式による計算とほとんど等しくなる。(20) 式の場合は、2.3.3 で述べたように $s \gg l$ の条件を用い

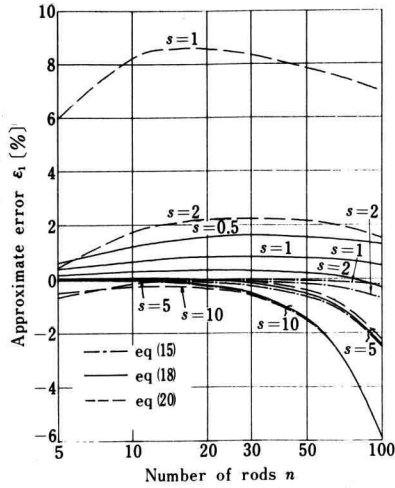


Fig. 4. Approximate error for exact calculation at eqns. (15), (18) and (20).

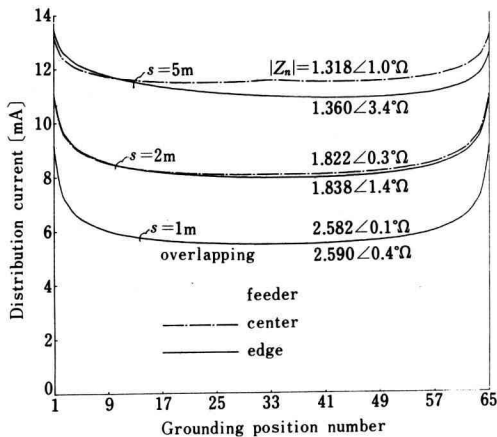


Fig. 5. Distribution current of the multiple parallel rods when arranged on a straight line at a uniform spacing, s . (at $n=65$)

ているので、 $s=2$ で約2%、 $s=1$ で約8% R_n の方が大きくなる。 $s>5$ では、 n が大きいたまは(15)、(18)式と同様の特性を示すが、 n が小さいときは若干 R_n の方が小さくなる。すなわち、近似式に関してまとめると次のようになる。

- (i) (20)式は $s<2$ では誤差が大きい。
- (ii) (15)式は計算が複雑であり、結果的には、(18)式と大差ない。

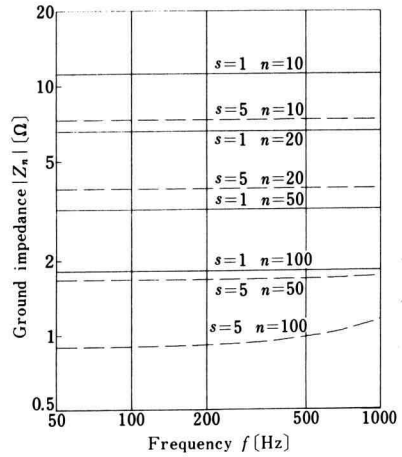


Fig. 6. Ground impedance for frequency at several spacing and number of rods.

(iii) s, n とも大きいときは、3つの式とも $R_n < |Z_n|$ となり、 $s=10$ m, $n=100$ 本の場合は約6%の差が生じる。

以上のことから、(iii)項を別にすると(18)式を用いることが最良といえる。

3.2 給電点の位置による影響

Fig. 5は65本の接地電極を布設し、 $V_0=1$ Vを加えたときの各電極に流れる電流の分布を示す。 $s=1$ mの場合は布設距離が短いため、給電点を中央にした場合も、端末にした場合も、電流分布や接地インピーダンスの差はほとんどない。 $s=5$ mとすると、端末給電の場合は電流分布が対称形でなくなり、給電点から遠くなると電流値は小さくなる。また、接地インピーダンスはリアクタンス分を含むようになり、大きさは約3%中央給電の場合より大きくなる。

3.3 音声周波数帯での検討

布設距離が長くなると連結線インピーダンスの影響が表われ、このインピーダンスは周波数によって変化する。

Fig. 6は横軸に周波数を取り、縦軸に端末給電した場合の接地インピーダンスを図示したものである。 $s=1$ mでは、100本の電極を用いても周波数による影響はないといえる。 $s=5$ mでは、 $n=100$ ($L=495$ m)の場合、周波数とともに接地インピーダンスは増加する。Fig. 7は全長が約100 mの場合の給電点による相

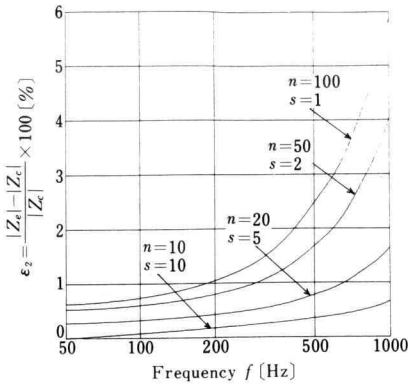


Fig. 7. Comparison of the ground impedances depend on the difference of the feeding point.

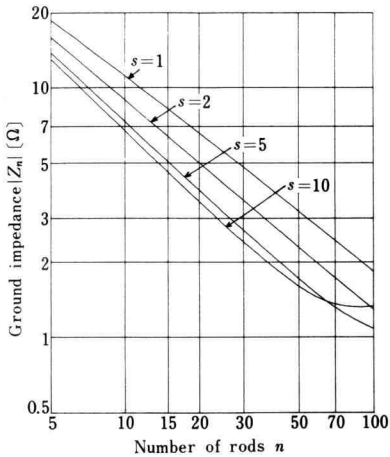


Fig. 8. Ground impedance of various separations versus number of rods; $f=800$ Hz, $\rho=100$ Ωm .

違を图示したものである。ここで、 Z_e は給電点が末端 ($m=1$) の場合であり、 Z_c は中央に給電した場合のインピーダンスで、

$$\epsilon_2 = \frac{|Z_e| - |Z_c|}{|Z_c|} \times 100 \quad [\%] \quad (23)$$

として表わした。給電点による差は、 s が小さいほど、また、周波数が高くなるほど影響が大きい。Fig. 8 は 800 Hz における中央部に給電した場合の電極本数と接地インピーダンスの関係であり、このとき、 z は、 $z = (1.254 + j11.31) \times s / 1000$ [Ω] である。Fig. 2 と比

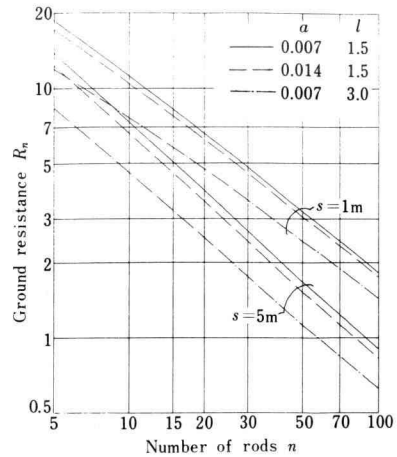


Fig. 9. Ground resistance of parallel ground rods depend on the rod shape (standard rod, twice radius and twice length rod).

較するとわかるように、周波数が高い場合は、 s と n を大きくして接地インピーダンスの低減をはかることは困難である。また、Fig. 7 を考慮すると、中央部に給電できない場合には、ますます低減化はむずかしい。

3.4 その他の低減方法

3.4.1 棒電極の形状による方法

棒電極の径を 2 倍にした場合 ($a=0.014$ m)、単電極の接地抵抗は 53.74 Ω となり、約 12% 低くなる。また、棒電極 2 本を直列に連結して打ち込んだ場合 ($l=3$ m)、大地抵抗率が深さによって変わらないとすれば、単電極で 34.21 Ω となり約 44% 低減できる。Fig. 9 はこのような電極を並列接地とした場合の接地インピーダンスで、実線は標準 ($a=0.007$ m, $l=1.5$ m) の場合の特性 (Fig. 2 と同じ) である。2 本直列の場合には非常に効果的であるが、深い所の大地抵抗率は一定と見なしにくいので注意する必要がある。

3.4.2 2 列配置による方法

接地棒の布設場所として広い面積が確保できない場合でも、道路に沿って 2 列に棒電極を打ち込めることもあり得る。Fig. 10 は列間隔が s' [m] の場合の並列接地抵抗値である。Fig. 9 と比較してみると、 s' が 2 m の場合は s が 1 m でも 5 m でも電極長 l を 2 倍にして、一直線上の本数を半減させたときの接地抵抗とほとんど等しい。さらに s' を大きくすれば本数の減少あるいは接地抵抗値の低減化ができる。このように 2 列

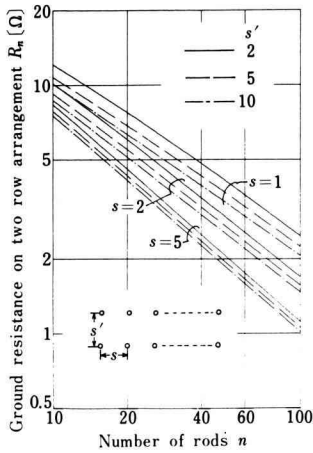


Fig. 10. Ground resistance on two row arrangement.

配置とする方法は、直線距離を短かくできるので高い周波数における連結線インピーダンスの影響を減らすことが可能となる。

4. 多電極並列接地の基本的指針

最も標準的な接地棒電極(半径 0.007 m, 長さ 1.5 m)を用いて並列接地とする際の、所要接地抵抗値を達成するために必要な電極の布設方法についての基本的指針について述べる。3章の数値計算例では、連結線のインピーダンスを考慮して厳密解を求めたが、商用周波数で、全長があまり長くない、かつ、中央部に給電した場合は、連結線のインピーダンスの影響がほとんど無視できることがわかった。そこで、(15)式あるいは(18)式を用いて、電極の布設方法を決定するための計算を行った。

基本的な入力条件としては

- (1) 大地抵抗率: $\rho[\Omega \cdot m]$
- (2) 所要接地抵抗値: $R_0[\Omega]$
- (3) 布設場所の制限

全長: $L[m]$ および

2列配置の場合の間隔: $s'[m]$

であり、1本, 2本直列および2列配置のそれぞれにおいて、できるだけ少ない電極数で所要接地抵抗値が達成される条件を求めた。

Fig. 11は大地抵抗率と所要抵抗値および全長が決った場合の電極数で、 $R_0 \times (100/\rho)$ の値が1, 2, 5, 10 Ω の場合について、(a) 標準接地棒電極(実線), (b) 棒

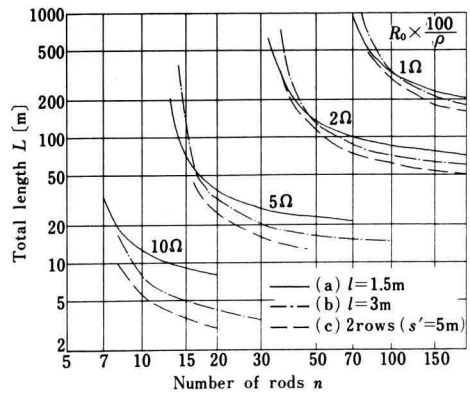


Fig. 11. Number of rods to reach in the required earth resistance at restricted length.

電極2本を直列(一点鎖線)および(c)列間隔5mの2列配置(破線)の特性を示している。ただし、(b)の場合の電極数は打ち込み箇所2倍の値にプロットしているため、区間長 s は(c)と同様に $s=L/(n/2-1)$ となる。一例として、 $L=30$ mで $R_0 \times (100/\rho)$ を 5Ω とする場合を考えると、(a)では26本を1.2 m間隔で、(b)では3 mおきに11箇所(2本直列で合計22本)打ち込み、(c)では1列に9本ずつ18本を3.75 mの間隔で打ち込むことにより達成できる。(a), (b)の特性を比較すると、 L が大きい(s が3.2 m以上とれる)ときは、(a)の方が電極数が少なく済み、 L が小さいときは(b)の方法が有効であることがわかる。

5. むすび

多電極並列接地における“接地インピーダンス”と“接地抵抗”について検討し、次のような成果が得られた。

(1) 多電極並列接地において、連結線のインピーダンスを考慮して、厳密に接地インピーダンスを求める式を明らかにした。この式より、給電点の位置による影響や音声周波数帯域での特性を求めることが可能となった。

(2) 近似式によって接地抵抗値を推定する場合、(18)式を使用する方法は、従来利用している(20)を用いるよりも誤差が少なく、また、計算もあまり煩雑とはならないので、有効な方法となり得る。

(3) 大地抵抗率、所要抵抗値および布設場所の全長の3つの要因が決ったとき、接地棒電極の経済的な布

設方法についての基本的指針を明らかにした。

終りに、本研究を進めるに当って貴重な御助言をいただいた東京電力(株)送变电建設本部 長野眞康氏に感謝の意を表します。

参 考 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「情報化社会と省エネルギー時代の電磁誘導対策問題」(昭58, 7).
- 2) 電気学会・電子通信学会：誘導調査特別委員会, 技術小委員会資料, No. 31 (昭60, 2).
- 3) E.D. Sunde: 「Earth Conduction Effects in Transmission Systems」, New York, Dover Publication, Inc. (1968).
- 4) G.F. Tagg: 「Earth Resistance」, London, George Newnes Limited (1964).

付 録

(8)式の行列について

(8)式の右辺第2項は n 本の電極が等間隔である場合の連結線のインピーダンス行列である。

いま, 給電点の位置を片端とした場合の行列部分は,

$m=1$ とおくと次式のようにになる。

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 2 & 2 & \cdots & 2 & 2 \\ 0 & 1 & 2 & 3 & \cdots & 3 & 3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & & \vdots & \vdots \\ 0 & 1 & 2 & 3 & \cdots & n-2 & n-2 \\ 0 & 1 & 2 & 3 & \cdots & n-2 & n-1 \end{bmatrix}_{n \times n} \quad (\text{付1})$$

n を奇数として, 給電点を中央とした場合は, $n=2m-1$ であるから行列部分は次のようになる。

$$\begin{bmatrix} m-1 & m-2 & \cdots & 2 & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ m-2 & m-2 & \cdots & 2 & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 2 & 2 & \cdots & 2 & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 1 & 1 & \cdots & 1 & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & \cdots & 1 & 1 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 1 & 2 & \cdots & 2 & 2 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 1 & 2 & \cdots & m-2 & m-2 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 1 & 2 & \cdots & m-2 & m-1 \end{bmatrix}_{n \times n} \quad (\text{付2})$$