# 対地抵抗監視による水中漏電の検出

本山建雄\* 山野英記\*

# Monitoring of Insulation of Power Supply Lines Underwater and Detection of Eeath-leakage Current

by Tatsuo MOTOYAMA\* and Eiki YAMAMOTO\*

*Abstract*; Working underwater such as in the sea or rivers and the use of electricity in such an environment are increasing in recent years. These situations may lead to the hazard of underwater electric shock to divers and other workers.

This paper reports on the underwater earth-leakage detection (i.e. a detecting method by monitoring the insulation level of lines and a detector on the basis of the method) for the prevention of underwater electric shock.

This detecting method have the following features :

- 1) Moitoring the insulation level of lines,
- 2) A certain degree of disturbance due to earth capacity of lines,
- 3) The possibility of detecting a leak between lines.

The results of the investigation are summarized as follows;

A leak can't be detected by line insulation, but by d.c. earth-leakage current. Therefore, this method has somecases, where the leakage can't be detected between lines. In these cases, the area having the possibility of eletric shock (i.e. an area more than 2.5 V/m) is not spacious. For example, in the condition where leaking points are two spheres, the potential of which are 50 V and -50 V respectively, the line insulation resistance (*R<sub>x</sub>*) is 20 kΩ and conductivity (σ) of water is 10<sup>-2</sup> (S/m), this area is included in two spheres which radii are 0.12 m (see 3.4).
 The detector is connected to the resistance grounded neutral system, the neutral resistance of which is 20 kΩ, earth capacity of which is less than 1 μF, and the line voltage is 100 V. Then, d.c. 10 volts are superposed on the lines.

(3) Where the threshold of line insulation resistance  $(R_x)$  is set to 20 k $\Omega$ , the time for detection of leak is less than 78 ms at  $R_x=10$  k $\Omega$  and 90 ms at  $R_x=20$  k $\Omega$  respectively.

(4) In a severe case of leak upper limit of  $R_x$  having possibility to detect the leak is greater than 50 k $\Omega$ .

Keyword; Detector, Current Leak, Electric shock, Underwater.

-148 -

# 1. まえがき

近年,海洋の調査・研究,資源の開発,港湾の整備 などにおいて,人間が潜水し,作業をする機会が増え ている。また,これに伴って電気をエネルギー源とし た電気機器の使用も増えており,最近では海洋牧場に 用いる電気栅や電気魚礁など新らしい電気の使用方法 も,開発されつつある。

水中は電気機器にとって劣悪な環境であり,漏電が 発生しやすい。漏電が発生すると,それによる電撃の 危険領域が漏電発生箇所の周辺にまで及ぶことになる。 また,溺死の危険性もあることから許容できる電撃の 影響は陸上のそれよりも小さいと考えられる。

水中での電撃(以下,水中電撃と記す)の防止対策<sup>1),2),3)</sup> としては電気機器を対象にしたもの,水中の電路を対 象にしたもの,水中の漏電場を対象にしたもの,潜水 作業者を対象にしたもの等がある。本研究は電路を対 象にしたものであり,その一つとして水中漏電の検出 方法を検討した。この方法は電路に重畳した直流によ り電路の対地抵抗を監視し,それが電撃の許容値以下 となったときに漏電として検出する方法である。

また,この方法は電路の絶縁劣化を監視できること, 漏電の検出に及ぼす電路の浮遊キャパシタンスの影響 が小さいこと,水を介する線間の漏電の検出が可能で あること等の特徴を持っており,水中漏電の検出にと って有効な方法であると考えられる。

本報では,この検出方法の基本的な問題である対地 抵抗と漏電電流との関係を検討し,この方法において 検出できない漏電の電撃危険範囲を推定した。

本報ではまた,試作した検出器が感電防止用装置の 漏電検出部として使用できることを,その検出特性か ら示した。

## 2. 検出器の概要

電路に重畳した直流により対地抵抗を監視する方式 の漏電の検出器(以下,単に検出器と記す)は,中性 点抵抗接地方式の低圧電路からの漏電を対象としたも のであり,中性点接地のための抵抗と接地極との間に 設置して使用される。

漏電の指標は電路の対地抵抗値である。このため, 線間で生じる漏電の一部は安全に検出できないことに なる<sup>4</sup>。

検出器の基本構成は Fig.1 に示すように,重畳用直 流電源回路,フィルター回路及び比較回路から構成さ



Fig.1 Fundamental elements of detector. 試作した検出器の基本構成

れる。

重畳用直流電源回路は直流電圧を電路に重畳する機 能を持ち,直流電源及び地絡電流に含まれる交流分(以 下,交流分と記す)をバイパスさせるためのコンデン サーCから構成される。

フィルター回路は地絡電流の検出及び地絡電流に含 まれる直流分(以下,直流分と記す)を抽出する機能 を持ち,地絡電流検出用抵抗 R<sub>d</sub> 及び低域通過型のア クティブフィルターから構成される。

比較回路は、フィルターの出力が電撃危険に対応す る基準値以上になったとき漏電と判定し、ステップ状 の信号を出力する機能を持つ。なお、この出力はリセ ットするまで続く。

### 後出器の設計

#### 3.1 設計目標

水中において漏電が発生すると付近にいる作業者は 電撃を受けることがある。また,心室細動を発生させ るほどの強い電撃でなくても溺れるなどの二次的な災 害により死に至る可能性もある。したがって,これら の一次および二次の電撃災害を防ぐための安全装置の 検出部を開発することを目標にした。

陸上において心室細動を発生しない限界として, Biegelmeier は 500 mA rms (持続時間  $T \leq 0.2$  s) を 与えている<sup>50</sup>。また,Koeppen らは 70 mA p-p/T ( $T \leq$ 1 s)を与えている<sup>50</sup>。しかし,水中における心室細動の 限界は明らかではない。

一方,電源に触れたとき,これからの離脱の限界は, 陸上では約5mAとされている。なお10mA以下であ れば電流が直接に有害な生理的影響を生じさせること



Fig.2 Equivalent leak circuit of underwater a.c. singlephase line. 水中電路の等価回路(単相電路の場合)

はないという報告もある<sup>6</sup>。また、水中では均一電界中 で許容できる電界として約2.5 V/mという報告がある<sup>7</sup>。

以上のように心室細動と離脱の許容限界が与えられ ているが,それらの値を水中での漏電電流により表わ した報告はない。そこで,漏電電流の全部が生体を通 過するとしたうえで,漏電電流によるこれらの許容値 を陸上での許容値と同じものと仮定して,電撃死が発 生しないように短時間で遮断するなどの処置をとるな らば,かなりの電撃災害を防止することができると考 えられる。

ここでは、一線地絡漏電においては電撃死が発生し ないこと及び漏電電流が離脱の限界を越えたときには 漏電として検出できることを目標にするとともに、併 せて、二線以上の漏電においては漏電部が接近してい る場合を除き、一線地絡漏電の場合と同様のことを目 標にして、検出器を設計することにした。

## 3.2 漏電の指標と漏電電流

一般に漏電電流の大きさは、人体への電撃の生理的 影響と一対一に対応するが本検出方法において、漏電 の指標(対地抵抗)は漏電電流と一対一に対応しない 場合がある。そこで両者の関係を明らかにした上で、 検出器を設計する必要があることから、両者の関係を 先ず詳しく検討する。

# 3.2.1 単相電路からの漏電

#### a) 水中電路の等価回路

電源の中性点が接地抵抗  $R_g$ で接地された単相の電 源から水中の負荷  $Z_L$  に電力を供給している電路(A線, B線)を想定する。この電路において、水中のA線上のa点、B線上のb点から漏電が発生したとし、 このときの等価回路を Fig. 2 のように表わす。なお、



Fig.3 Equivalent circuit of direct current superposed on a.c. lines.

電路に重畳した直流の等価回路

電路のインピーダンスは他のインピーダンスに比べ, 十分に小さいことから省略した。

Fig.2 において a, b は漏電の発生部分(以下,漏電 部と記す)を、Gは接地極(例えば,船体のように漏 電部より十分に大きな物体)を表わす。 $R_{ag}$ ,  $R_{bg}$ , 及 び $R_{ab}$ は、それぞれ a, b, G間の抵抗を $\Delta$ 結線で表 わした抵抗である。また、 $Z_{AC}$ ,  $Z_{BC}$  及び $Z_{AB}$ はA線、 B線、G間に分布するインピーダンスである。

b) 漏電電流

電撃に直接関係する電流は漏電部から漏れる交流の 電流であり、これを漏電電流と定義する。また、漏電 電流のうち接地抵抗を流れる電流を地絡電流と、残り を線間電流と定義する。

Fig.2 において,接地極Gの電位  $V_{c}$ を基準 ( $V_{c}$ = 0 V)としたときのA線の電位を  $V_{A}$ , B線の電位を  $V_{B}$ , そして線間の電位差を  $V_{s}$  (=  $V_{A} - V_{B}$ )とする。

漏電部 a, b からの漏電電流を  $I_a$ ,  $I_b$  とおくと,  $I_a$ ,  $I_b$  は次式のように表わされる。

$$I_a = V_A / R_{ag} + V_s / R_{ab} \tag{1}$$

$$I_b = V_B / R_{ag} - V_s / R_{ab} \tag{2}$$

なお,  $V_A$ ,  $V_B$  は  $R_{ag}$ ,  $R_{bg}$ ,  $R_{ab}$  の他に分布インピ ーダンスの影響を受け, $0 \leq V_A \leq V_s$ ,  $-V_s \leq V_B \leq 0$ の範 囲の値をとる。

c) 電路に重畳した直流の回路

検出器は Fig.2 の GG' 間に設置され,電路に直流電 圧が重畳される。このときの直流の,定常状態での回 路<sup>\*1</sup> は Fig.1, 2 から求まり, Fig.3 のように表わされ

- \*1 過度的な状態を扱う場合には電源のインピーダンス をはじめ, 各種のインピーダンス分は省略できない。
- \*2 100 V 電路においては, 0.1 MΩ 以上, 200 V 電路に おいては 0.2 M 以上 (電気設備技術基準での許容値 以上) あるものと考える。

-150-

(5)

る。なお、電路の分布インピーダンスに含まれる抵抗 分\*<sup>2</sup>は十分に大きいことから省略した。

d) 対地抵抗 *R<sub>x</sub>* 

電路と対地間の抵抗を対地抵抗  $R_x$  (以下,主に  $R_x$  と記す)とする。Fig.3より  $R_x$  は次式のように表わされる。

$$R_x = R_{ag} \cdot R_{bg} / (R_{ag} + R_{bg}) \tag{3}$$

e) 対地抵抗と漏電電流

ここでは  $R_{ag} \leq R_{bg}$  を前提として以下の検討を行なった。なお、 $R_{ag} > R_{bg}$  を前提としても同様の検討ができ、同様の結果を得ることができる。

1) 一線地絡漏電

これは Fig.2,3 において、 $R_{bg} = \infty$ 、 $R_{ab} = \infty$ と置いた場合に相当し、漏電電流は次式のように表わされる。

$$I_a = V_A / R_{ag} = V_A / R_x < V_s / R_x \qquad (4)$$

 $I_b = 0$ 

ところで、一般の電路では、分布インピーダンス(抵抗分:0.1 MΩ以上、キャパシタンス分<sup>2)</sup>:0.2 nF/m) は大きくかつ、各相と対地間において平衡していると 考えられる(以下、この条件を満たす電路のことを一 般の電路と記す)。このことから、 $V_A \leq V_s/2$ となり、  $I_a$ ,  $I_b$ は次式のように表わされる。

$$I_a \leq V_s / (2 \cdot R_x)$$

$$I_b = 0$$

$$(6)$$

2) 二線漏電

この場合は, *Rab* が漏電部間の距離を変数にもつことから,漏電電流は以下のようにこの距離を変数として表わされることになる。

まず,漏電部間の距離が十分に大きく, $R_{ab}$ を通る電流が $I_a$ , $I_b$ に対して省略できるほど小さい条件では, $I_a$ , $I_b$ は次式のように表わされる。

$$I_a \coloneqq V_A / R_{ag} < V_s / R_x \tag{7}$$

 $|I_b| = |V_B|/R_{bg} < V_s/R_x \tag{8}$ 

ただし、一般の電路では次式のように表わされる。

$$|I_b| \le I_a \le V_s / (2 \cdot R_x) \tag{9}$$

次に,漏電部間の距離が十分に大きくなく, $R_{ag}$ を通る電流が $I_{a}$ , $I_{b}$ に対して省略できない条件では,次のような二つの場合が考えられる。

i) 
$$I_a \leq V_A/R_x$$
,  $|I_b| \leq |V_B|/R_x$  (10)

ii)の場合は、漏電電流の最大が対地抵抗によって 表わせない場合であり、このような場合の漏電は対地 抵抗を指標とする検出方法によって安全に検出できな い\*3。

#### 3.2.2 三相電路からの漏電

三相電路からの漏電については 3.2.1 と同様に検討 することができ、漏電電流の最大も同程度になると推 測される。また、線間を流れる電流が漏電電流に対し て省略できない条件のときには(11)式のような場合が 考えられ、単相電路の場合と同様に安全に検出できな い。

# 3.3 主な設計仕様

1) 対象とする電路の電圧 (V<sub>s</sub>)

水中で使用される電気器具としては,陸上での応用 品が最も多いと予想される。このことから対象とする 電路の電圧 V<sub>8</sub>を100 V とする。

2) 対象とする電路の設置抵抗 (R<sub>g</sub>)

電源を接地したことによって電撃死の危険性が大き くならないように接地抵抗を選定する必要がある。こ こではその値を 20 k $\Omega$ とする。電源の中性点を 20 k $\Omega$ の抵抗で接地した場合,地絡電流は 5 mA 以下に,一般 の電路では 2.5 mA 以下になる。

3) 電路に重畳する直流電源の電圧 (V<sub>dc</sub>)

直流電源の電圧  $V_{ac}$  が大きいほど検出器の検出特性 は向上する。しかし、それが電撃の原因とならないよ うに、 $V_{ac}$ を定める必要がある。ここでは電源電圧  $V_s$ の 10%、すなわち 10 V とする。なお  $V_{ac}$  による漏電電 流は最大 0.5 mA (=10 V/20 kΩ) となる。

4) 漏電判定のしきい値 (Rx0)

不検出時の地絡電流の最大が陸上での可随限界の 1/2 となるように、漏電と判定する対地抵抗のしきい値  $R_{x0}$ を定めることにする。すなわち、 $V_s \approx 100$  V、可随限 界を与える電流  $I_t \approx 5$  mA,  $R_g \approx 20$  k $\Omega$  とすると、漏 電判定のしきい値  $R_{x0}$  は次式のように求められる。

$$R_{x0} = V_s / (I_t/2) - R_g = 20 \text{ k}\Omega \tag{12}$$

<sup>\*3</sup> 一般に実用化されている漏電の検出方法では、本稿 の方法以上に難しいと考えられる。なお、ii)の場合 の電撃危険性は3.4において検討する。

#### 対地抵抗監視による水中漏電の検出

### Table 1 Design specifications of detector 検出器の主な仕様

Item	Specification		
Application	Line votage (Vs) $:100V$ Neutral resistance (Rg): $20k \Omega$		
D.C. voltage (Vdc) being superposed on lines	10V		
Range of line insulation resistance (Rx) to detect the leak	$0 \leq R_{\rm X} \leq 20 k \Omega$		
Time (Td) to detect the leak	$ \begin{array}{l} Td \leq 80ms \ (Rx \leq 10k\Omega) \\ Td \leq 100ms \ (10k\Omega < Rx \leq 20k\Omega) \end{array} $		
Upper limit of the resistance (Rx) having the possibility of detection of the leak	$Rx < 60k\Omega$		



Fig.4 Field model for analysis of current leak  $(r_a \ge r_b)$ . 解析に用いた漏電用モデル  $(r_a \ge r_b)$ 

 $R_{x0}$ を20 k $\Omega$ とすると、 $R_x=20$  k $\Omega$ における漏電電流は(11)式のような場合を除いて5 mA以下になる。

5) 検出時間 (Ta)

漏電の検出時間  $T_a \in R_x \leq 10 \text{ k}\Omega, 20 \text{ k}\Omega$  の二段階に おいて定める。

 $R_x \leq 10 \text{ k}\Omega$  における漏電電流は 10 mA (100 V 電路) を越えることもあることから,陸上の感電防止用漏電 遮断器と同じ動作時間内 (100 ms 以内) に何らかの処 置をする必要があると考えられる。ここでは安全装置 の処置時間を考慮して, $R_x \leq 10 \text{ k}\Omega$  における  $T_d$ を 80 ms 以内とする。

10 k $\Omega < R_x \leq 20$  k $\Omega$  における漏電電流は 10 mA (100 V 電路) 以下と考えられる。しかし、水中という特殊 な環境ではより早い処置が必要であり、10 k $\Omega < R_x \leq 20$  k $\Omega$  における  $T_d$  を 100 ms 以内とする。

b) 安全側に誤検出される *R<sub>x</sub>* の上限 (*R<sub>xm</sub>*)

時間的変化の大きな漏電において、漏電判定のしきい値  $R_{x0}$  以上の  $R_x$  でも漏電として検出される場合,すなわち安全側に誤検出される場合がある<sup>8)\*4</sup>。この場合の上限  $R_{xm}$  を  $R_{x0}$  の3倍以内(60 kΩ以下)とする。

\*4 4.2及び5.参照。

\*5 Fig.2の等価回路に対応する。分布インピーダンスの 影響は小さいと考えられることから,省略した。



Fig.5 Maximum radii (*r<sub>a</sub>、r<sub>b</sub>*) of leaking conductors (*a, b*) which fail to detect the leakage (*R<sub>x</sub>*=20 kΩ). 不検出となる漏電部の最大半径 *r<sub>a</sub>、r<sub>b</sub>*(*R<sub>x</sub>*=20 kΩ)

以上の検討から,検出器の主な設計仕様は Table 1 の ようになる。

#### 3.4 不検出時の電撃危険性

漏電の条件によっては、 $R_x > R_{x0}$  (不検出時) である のに漏電電流が 5 mA を越えることがある。この場合の 電撃危険領域を漏電場モデルを用いて検討する。なお、 ここで電撃危険領域とは電界が 2.5 V/m 以上の領域を いう。

漏電場モデル

漏電場モデル<sup>\*5</sup>は Fig.4 に示すように、十分に広い 水中 (導電率  $\sigma$ )に球状の漏電部 a (半径  $r_a$ ,電位  $V_s/$ 2)及び b (半径  $r_b \leq r_a$ ,電位  $- V_s/2$ )が中心間距離  $r_a$ で配置されたモデルであり、接地極は十分に離れた位 置にある。

2) 不検出時における漏電部の最大半径\*6

Fig.4 において、不検出時における漏電部の半径は、  $r_a = r_a + r_b, R_x = R_{x0}$ となる $r_a, r_b$ を越えない。この

\*6 電撃危険領域を漏電部の中心からの距離で表わすと, 漏電部の半径が大きいほどその領域は広くなる<sup>9</sup>。

2

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ 0 \end{bmatrix} \underbrace{ \begin{array}{c} \hline \\ x_1 \\ x_2 \\ \hline \\ x_3 \\ x_4 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\$$

(a)Field strength(E)from 0 to rd on x-axis



Fig.6 Configuration of the area having the possibility of electric shock.





Fig.7 Maximum distance  $x_{1m}$  from the center of a leaking conductor having the possibility of electric shock  $(R_x > R_{x0})$ . 電撃危険 ( $E \ge 2.5$  V/m) の恐れのある漏電部からの

最大距離  $X_{1m}$  ( $R_x > R_{x0}$ )

ことから、この条件での半径、 $r_a$ 、 $r_b$ は最大半径を表 わすことになり、これを数値計算により求めた。

数値計算は影像法<sup>10)</sup>により行なった。計算上の漏電部 の境界は, Fig.4のモデルでの境界に対して(±10<sup>-6</sup>× 漏電部の半径)の誤差範囲に含まれる。

数値解析の結果を Fig.5 に示す。任意の  $\sigma$  における  $r_a$ ,  $r_b$  は Fig.5 の  $r_a$ ,  $r_b$  を $(10^{-2}/\sigma)$ 倍した値になる。

Fig.5 において,曲線より上側が漏電として検出できる  $r_a$ ,  $r_b$ を,曲線の下側は漏電として検出されないこともある  $r_a$ ,  $r_b^{*7}$ を表わしている。また, $r_b=0$ ,  $R_x=R_{x0}$ となる  $r_a$ は次式で与えられる<sup>9)</sup>。

\*7  $r_d = r_a + r_b$ のとき曲線の下側は検出できない。しかし、 $r_d > r_a + r_b$ のとき検出されることもある。

$$r_a = 1/(4 \cdot \pi \cdot \sigma \cdot R_{x0}) \tag{12}$$

3) 不検出時における危険領域

数値解析による検討の結果, Fig.4 の漏電場における 危険領域は次の形状の領域に含まれると考えられる。

i) r<sub>b</sub>=0のとき漏電部 aの周辺にできる危険領域
 (電界の強さが E<sub>T</sub> 以上となる領域)は半径 r<sub>a</sub>の球の内側である。ここで,

$$r_{a0} = \{ (r_a/E_T) \cdot (V_s/2) \}^{1/2}$$
(13)

- ii) x ≤ 0, x ≥ r<sub>a</sub> における危険領域は漏電部を中心
   とした半径 r<sub>a0</sub> の球に含まれる。
- iii)  $0 < x < r_a$  における危険領域は、x 軸を中心とし た半径  $r_{a0}$  の円筒に含まれる。しかし、x 軸上の電 界Eが Fig.6(a)のように  $E < E_T$  となる場合、 $x_1 < x < x_2$  の範囲は危険領域から除かれる。なお、 $x_1 \ge (r_a - x_2)$  である。

以上のことから、Fig.4の漏電場モデルにおける危険 領域は、Fig.6 (b)の斜線の領域をx軸を中心に回転 させた回転体の中に含まれることになる。

ところで、 $R_x = R_{xo}$ 、 $r_d = r_a + r_b$ なる漏電部の大き さにより  $r_a > r_a + r_b$  での危険領域を推定すること、及 び危険領域を Fig.6 の  $r_{ao}$ 、 $x_1$  の最大\*<sup>8</sup> により表わすこ とは安全側の評価になる。ここでは、安全側の評価を 行なう。

Fig.5のデータから得られた  $r_{a0}$ ,  $x_1$ の最大  $x_{1m}$  を Fig. 7 に示す。任意の導電率  $\sigma$  における  $r_{a0}$ ,  $x_{1m}$  は Fig.7 の  $r_{a0}$ ,  $x_{1m}$  を  $(10^{-2}/\sigma)^{1/2}$  倍した値に, また, 任意の 漏電部の電圧 V における  $r_{a0}$ ,  $x_{1m}$  は Fig.7 の  $r_{a0}$ ,  $x_1$ m を  $(V/50)^{1/2}$  倍した値になる。

Fig.7 によると,導電率が小さくなるほど  $r_{a0}$ ,  $x_{1m}$  は 大きくなり、水道水に相当する導電率 ( $\sigma = 10^{-2}$ S/m) では 0.12 m 以下である。

また、Fig.7のO印は  $x_1 = r_{a0}$ 、すなわち  $r_b = 0$ における  $x_{1m}$  を表わしており、このときの  $r_a$ 以上の半径をもつ漏電部の場合には漏電として検出される。一方、 ●印は  $r_a = r_b$  にとのける  $x_{1m}$  を表わしており、このとき  $r_a$ 以下での  $x_{1m}$  は単調に減少する。

以上のことから,漏電判定のしきい値  $R_{x0} \ge 20 \text{ k}\Omega$  に 設定するならば,不検出時における電撃危険領域は小 さいと考えられる。

\*8 漏電部の半径を r<sub>a</sub>, r<sub>b</sub> とし, r<sub>a</sub> (>r<sub>a</sub>+r<sub>b</sub>)を変化 させたときに生じる x<sub>1</sub>の最大。

-152 -

 Table 2
 Specifications of the detector

 試作した検出器の仕様

Item	Specificasion	
d.c. source	10V, 500mA	
capacitor (C)	500 µF (100V)	
resistance (Rd) to detect earth-leakage current	300Ω	
Characteristics of filter • damping chracteristic • cut-off frequency • step response time • gain	-35dB/oct 12Hz 40ms 10V/300mV	
reference voltage of circuit of comparater (in case of Vdc=10V, Rx correspond with the reference voltage)	0.5V~10V (100kΩ~0kΩ)	



Fig.8 General view of a prototype detector. 試作した検出器の概観



Fig.9 The prototype filter circuit. 試作したフィルターの回路

\*9 試作した検出器は試験用であるため、検出器として 必要でない回路も備えている。



Fig.10 The frequency response characteristics of the filter. フィルターの周波数特性



Fig.11 Step response wave of filter (∠V₀: overshoot, ΔT d₀: time to reach the saturated valve). フィルターのステップ応答波形 (∠V₀: 行きすぎ量、 ∠T<sub>d₀</sub>: 定常値に達するまでの時間)

# 4. 試作した検出器

### 4.1 概 要

試作した検出器は Fig.1 に示すような回路構成から なり\*<sup>9</sup>,その概観及び検出器の心臓部であるフィルター の回路を Fig.8 及び 9 に示す。また,各構成要素の主 な仕様を Table 2 に示す。

# 4.2 フィルターの特性

# 4.2.1 定常的な特性

定常的な特性は周波数特性によって評価できること から、これを Fig. 10 に示す。Fig. 10 によると、直流 に対する利得が 30 dB であるの対し、50 Hz の交流に対 する利得は約-35 dB である。したがって、一般の電路 からの定常的な漏電では、フィルター出力に含まれる 交流分は直流分の約 0.4%以下となる\*<sup>10</sup>。

- \*10 フィルターの入力比 (= V<sub>aci</sub>/V<sub>dci</sub>) カ<sup>≤</sup>50√2/10の とき出力比 (= V<sub>ac0</sub>/V<sub>dc0</sub>) は (50・√2・10<sup>(-35/20)</sup>/(10 ・10<sup>(30/20)</sup>)≒4×10<sup>-3</sup>となる。



Fig.12 Three typical examples of response wave of filter to earth-leakage current (△V<sub>x0</sub>: overshoot, △T<sub>d0</sub>: time to reach the saturated value) 地絡電流に対するフルィターの応答波形の代表的な例 (△V<sub>x0</sub>:行きすぎ量、△T<sub>d0</sub>: 定常値に達するまでの時 間)

する応答波形により評価できることから、これらの代表的な波形を Fig.11 及び 12 に示す。これらの図において、 $T_{d0}$ は定常値に達するまでの時間を、 $\Delta_{x0}$ は行きすぎ量を表わす。

Fig.11 はステップ応答波形の一例であり、これは Fig. 13 において SW 1・SW 3 を OFF に、 $V_{ac}=0$  V、 $R_{x}=20$  kΩ とし、その後 SW 2 を ON にしたときのフィルタ 一の出力波形である。Fig.11 によると、 $\Delta_{x0}$ の行きす ぎ量(Fig.11 の条件において約 5 kΩ の  $R_{x}$  に対応する 量)がある。

Fig.12 は地絡電流に対する応答波形である。これは Fig.13 において SW 1 を ON, SW 3 を OFF,  $R_x$ =20 k $\Omega$ ,  $V_{ac}$ =50 V,  $V_{dc}$ =10 V とし, SW 2 を ON にした ときの出力波形である。この場合の出力波形は地絡電 流に含まれる交流分の位相の影響を受けること\*11 から,

\*11 最も簡単な低減通過型フィルター (CR 直列回路) に おいて確認できる。





その代表的な例をフィルターの入力波形(直流分を含む正弦波)とあわせて,示した。

Fig.12 によると、(a)、(b)、(c)における  $T_{d0}$ 、 $\Delta V_{x0}$ はそれぞれ大きく異なることがわかる。

試作したフィルターは以上のような過度的な特性を 持つことから,漏電の条件が同じでも漏電の検出時間 は一定とならないこと及び安全側に誤検出される範囲 は広くなることが予想される。

#### 4.3 検出器の特性

検出器にとって重要な特性は,  $R_x \leq R_{x0}$ における検 出時間と  $R_x > R_{x0}$ において安全側に誤検出される範囲 であり、これらを検出特性とする。試作した検出器の 検出特性は一般の電路を対象にして、実験により求め た。なお、検出時間とは漏電が発生してから比較回路 の出力が生じるまでの時間  $T_a$ (以下、主に  $T_a$  と記す) とする。

#### 4.3.1 実験回路

地絡電流に含まれる交流分が大きいほど  $T_a$  は変動し, 安全側に誤検出される範囲は広がる。このことから, 地絡電流に含まれる交流分が大きくなる条件のもとで, 実験を行うことにした。これは,検出器を安全側に評 価したことになる。

実験回路は Fig.13 に示すように、中性点接地方式の 電路において一線地絡漏電を模擬した回路である。電 路の対地電圧  $V_{ac} \in V_s/2(=50 \text{ V})$ , 重畳する直流の電 圧  $V_{dc} \in 10 \text{ V}$  とした。この回路の条件は、一般の電路 において交流分が最も多い条件である。また、一般の 電路では、分布インピーダンスの検出特性に対する影 響<sup>\*12</sup> は十分に小さいと考えられることから、分布イン

-154 -



Fig.14 Relation between line insulation resistance (*R<sub>x</sub>*) and time (*T<sub>a</sub>*) for detection of leak (*V<sub>ac</sub>*=50 V). 対地抵抗 *R<sub>x</sub>* と検出時間 (*V<sub>ac</sub>*=50 V)

ピーダンスを省略した。

Fig.13 において, SW1 は負荷に電力を供給する交流の電源スイッチである。SW2 は模擬漏電スイッチであり, SW2 が ON になった時, 漏電が発生したことになる。また SW3 は5. において分布インピーダンスに含まれるキャパシタンス分の影響を検討するためのスイッチであり, この実験においては常に OFF とした。

 $R_g$ は接地抵抗 (20 k $\Omega$ ) である。 $R_x$  は電路の対地抵抗を模擬した抵抗であり、その大きさは可変(0 k $\Omega$ ~100 k $\Omega$ ) である。

#### 4.3.2 実験方法

i)比較回路の基準電圧の設定。

漏電の条件にかかわらず  $R_x \leq 20 \text{ k}\Omega$  において確実に 漏電として検出できるように、比較回路の基準電圧を 設定した。設定方法は、Fig.13 において SW 1 を OFF ( $V_{ac}=0$  V)、SW 2 を ON とした状態 ( $\Delta V_{x0} \Rightarrow 0$ )のま まで  $R_x$  を変化させるという方法である。この状態での 安全側に誤検出される範囲は 1 kΩ 以下となる。

ii) 測定方法

Fig.13 において、SW1をONにし、SW2をOFF にした状態で $R_x$ を設定し、SW2をONにしたときに 漏電として検出されるか否かを、及び漏電として検出 された場合には検出されるまでの時間をストレージオ シロスコープにより測定した。

 $R_x$ は0kΩから,原則として5kΩおきに設定した。 SW2をONにする試行回数(10回)の全てが漏電と して検出される限界及び全てが検出されない限界を求 めるときには, $R_x$ を1kΩおきに設定した。 Table 3 Relation between line voltage (Vac) and maximum time (Tdm) for detection of leak and upper limit (Rxm) of line insulation

電路の対地電位 Vac と検出時間 Td の最大
Tdm 及び安全側に誤検出する対地抵抗 Rx
の最大 Rxm

Vee	Tdm		Pym
vac	$Rx \leq 10k\Omega$	$Rx \leq 20k\Omega$	KXIII
0 V	< 60ms	< 71ms	25 kΩ
50 V	< 71ms	< 81.5ms	34 kΩ
107 V	< 76ms	< 86mr	56 kΩ

## 4.3.3 実験結果

Fig.14 から,  $R_x \leq 10 \text{ k}\Omega$  において  $T_d \leq 73 \text{ ms}$ ,  $R_x \leq 20 \text{ k}\Omega$  において  $T_d \leq 82 \text{ ms}$  となること,及び安全側に 誤検出される範囲の上限は約 36 k $\Omega$  であることがわかる。

これらの結果は Table 1 の設計目標を満たすもので あり,感電防止用の水中漏電の検出器として使用でき ることを示している。

## 5. 試作器の検討

## 5.1 検出特性の検討

検出特性は地絡電流に含まれる交流分の大きさ及び 電路と対地間の分布キャパシタンス(以下,対地キャ パシタンスと記す)の影響を受けると予想される。以 下,これらについて4.3と同様の実験方法により検討 した。

### 5.1.1 交流分の影響

地絡電流に含まれる交流分を変化させる要因として, 漏電が発生した電路の対地電位及び対地キャパシタン スが考えられる。対地キャパシタンスについては5.1.2

\*12 5.1.2 において検討する。



Fig. 15 Relation between earth capacity ( $C_{d}$ ) and maximum detection time ( $T_{dm}$ ) at  $R_{x_1}$  and upper limit ( $R_{xm}$ ) of line insulation resistance having the possibility to detect the leak ( $V_c = 0$  V).

対地キャパシタンス  $C_c$  と検出時間の最大  $T_{dm}$ 、検出されることもある対地抵抗の最大  $R_{xm}$  ( $V_{ac}$ =0 V)



Fig.16 Relation between earth capacity ( $C_G$ ) and maximum detection time ( $T_{dm}$ ) at  $R_x$ , and upper limit ( $R_{xm}$ ) of line insulation resistance having the possibility to detect the leak ( $V_{ac}$ =50 V). 対地キャパシタンス  $C_G$  と検出時間の最大  $T_{dm}$ 、検出されることもある対地抵抗の最大  $R_{xm}$  ( $V_{ac}$ =50 V)

において検討することにし、ここでは対地電位につい て検討する。

交流分は対地電圧に比例することから、Fig.13 にお いて  $V_{ac}$  を 0 V, 50 V および 107 V の三段階に変え、 対地電圧と検出特性との関係を実験により求めた。

ここで、 $V_{ac}=0$  (V) は地絡電流に交流分が含まれない場合の漏電に<sup>\*13</sup>、 $V_{ac}=50$  (V) は一般的な電路での漏電においてとり得る最大の対地電圧に、また $V_{ac}=107$  (V) は 100 (V) 電路において許容される上限の電圧<sup>\*14</sup>



Fig. 17 Relation between earth capacity ( $C_{d}$ ) and maximum detection time ( $T_{dm}$ )at  $R_{x}$ , and upper limit ( $R_{xm}$ ) of line insulation resistance having the possibility to detect the leak ( $V_{ac} = 107$  V). 対地キャパシタンス  $C_{c}$  と検出時間の最大  $T_{dm}$ 、検出されることもある対地抵抗の最大  $R_{xm}$  ( $V_{ac} = 107$  V)

に相当する。

 $V_{ac}$ と検出特性との関係を Table 3 にしめす。Table 3 によると、 $V_{ac}$  が大きくなるほど安全側に誤検出する 範囲の上限  $R_{xm}$  は大きくなり、また検時時間の最大  $T_{am}$ は長くなることがわかる。しかし、 $V_{ac}=107$  (V) にお ける  $T_{dm}$  と  $V_{ac}=0$  (V) におけるそれとの差は小さく、 検出時間  $T_{d}$  に対する対地電圧の影響は少ないと考えら れる。

5.1.2 電路の対地キャパシタスンの影響

対地キャパシタンスは地絡電流に含まれる直流分の 過度現象及び地絡電流に含まれる交流分の大きさに影 響を与える。以下,これらの影響がどの程度であるか について,検出器の検出特性により示した。

1) 直流分の過度現象に及ぼす影響

Fig.13の実験回路において  $V_{ac}=0$  V, すなわち SW 1を OFF, SW 3を ON にし、その後 SW 2を ON としたときの直流分の過度特性を 4.2 と同様の実験から求めた。コンデンサー  $C_{c}$  は全電路の対地キャパシタンスを模擬したものである。例えば、単相の電路において一線当りの対地キャパシタンスは  $C_{c}/2$ となる。

実験結果として  $R_x=20$  k $\Omega$  における  $T_{dm}$ ,  $R_{xm}$  を Fig.15 に示す。また、参考までに一部の  $C_G$  について は  $R_x=10$  k $\Omega$  における  $T_{dm}$  も付け加えた。

- \*13 実験回路では模擬できないが、漏電電流の全てが線 間の電流となる条件においても Vac=0 と等価になる。
- \*14 電気事業法

=20 kΩ のように安全に検出

Fig. 15 によると,  $C_c$  が大きくなるほど,  $R_x=20$  k $\Omega$  での  $T_{dm}$  は大きくなるのに対して,  $R_{xm}$  は小さくなる ことがわかる。これは,  $C_c$  が直流分の立ち上がりを緩 やかにし, 行きすぎ量を減らすように作用するためと 考えられる。また,  $C_c \leq 0.9951 \ \mu$ F における  $T_{dm}$ ,  $R_{xm}$  は Table 1 の仕様を満たす。

2) 交流分に対する影響

電路の各相において対地キャパシタンスが異なる値 をとる場合,交流分は対地キャパシタンスがない場合 と比べ,変わると考えられる。これについて,Fig.13 の実験回路により検討した。

Fig.13の実験回路はFig.2の等価回路において  $C_{AC} = C_{C}, C_{BC} = 0(\mu F)$ とした状態と等価であり、こ の状態での交流分は $|C_{AC} - C_{BC}| \leq C_{C}$ とした状態での交 流分より大きい<sup>\*15</sup>。

実験は  $V_{ac}$ =50 (V), 100 (V) とし, 1) と同様の方 法により行なった。また,実験結果を1)と同様に表わ し,それを Fig.16 及び 17 に示す。なお,漏電を検出 するという実験の性質上,この結果には直流分に対す る影響も含まれることになる。

Fig.16 及び 17 は対地キャパシタンスに対して 1)と 同じ傾向を示しており、 $C_{c} \leq 0.9951 \mu$ F での  $T_{dm}$ は Table 1 の仕様を満たす。

1), 2)の検討からわかるように,対地キャパシタン スが0.99 µF以下において試作した検出器の検出特性 はTable1の設計仕様を満たす。このことから,この 範囲の対地キャパシタンスの影響は許容できるものと 考えられる。なお,一般の電路の対地キャパシタンス はこの範囲に含まれる。

## 5.2 試作した検出器の適用

4.及び 5. での検討から, 試作した検出器の適用でき る電路は Table 4 のようになる。なお, (11)式の場合

Item	Specification	
Power system	Resistance grounded neutral system	
Grounding resistance	20kΩ	
Line voltage	100V	
Earth capacity of line	<1µF	

Table 4 Applied lines of detector 試作した検出器の適用電路

\*15 交流分が大きいほど検出特性に悪影響を及ぼすことから、この状態での評価は安全側の評価となる。

のように安全に検出できない場合もあることから,水 中での作業者は水からみた人体の抵抗が 500 Ω 以上と なるように絶縁性のスーツなどを着用する必要がある と考えられる。

#### 6. あとがき

水中での漏電は発生状況,電撃の影響等において, 陸上での漏電とは異なる。このため,漏電の検出には 水中に適した方法の開発が必要である。

ここでは電路に重畳した直流の電圧により電路の対 地抵抗を監視し,漏電を検出する方法を検討した。こ の方法は,電路の絶縁劣化を監視できること,漏電の 検出に及ぼす電路の浮遊容量の影響が小さいこと,線 間の漏電の検出が可能であることなどの特徴を持って おり,水中漏電の検出にとって有効な方法である。

ここでは,またこの検出方式に基づいた検出器を試 作し,その検出特性について模擬漏電回路を用いた実 験により検討した。

検討結果の主なものは次のようになる。

- i)漏電の指標は対地抵抗であるため、線間において 生じる漏電の一部は安全に検出できない。
- ii)安全に検出できない場合の電撃危険領域(2.5 V/ m以上の領域)は小さく、一例として、漏電部を球 とし、球一球の漏電場モデル(Fig.4)における解析 結果(球の電位:50 V及び-50 V、対地抵抗:20 kΩ、導電率:10<sup>-2</sup>S/m)を示すと、危険領域は漏電 部を中心とした半径 0.12 mの球に含まれる。
- iii) 試作した検出器の適用電路は中性点を 20 k $\Omega$  で接 地した 100 V の電路であり、電路の対地キャパシタ ンスは約 1  $\mu$ F 以下とする。
- iv) 試作した検出器の, 電路に重畳する直流電圧は 10 V である。
- v)漏電として検出する対地抵抗のしきい値を20kΩに 設定すると、漏電の検出時間は対地抵抗が10kΩに おいて78ms以下、20kΩにおいて90ms以下であ る。
- vi) 安全側に誤検出される対地抵抗の上限は対地抵抗 の変化が急な場合,50 kΩを越えることがある。

以上のように安全側に誤検出する対地抵抗の上限に ついては今後の検討課題となるが,試作した検出器は 感電防止用の安全装置の漏電検出部として使用できる ものと考えられる。

最後に,本研究は科学技術庁海洋開発調査研究促進 費によって実施されたものであり,関係各位に深く感 -158 -

謝の意を表する。 (昭和 62 年 2 月 23 日受理)

# 参考文献

- Underwater electrical safety some guidance on protection against shock, Report UR 14, CIRIA Underwater Engineering Group (UK), May 1979
- Code of practice for the Safe Use of Electricity Underwater, Department of Energy (UK), Sep. 1982
- 本山・山野: "潜水作業に用いる電気機器の安全化 に関する研究(III)",(昭和58年度海洋開発調査 研究促進費報告書),労働省産業安全研究所,1984
- 4)本山・山野: "潜水作業に用いる電気機器の安全化 に関する研究 (IV)", (昭和 59 年度海洋開発調査

研究促進費報告書),労働省産業安全研究所,1985

- 山野英記:"電撃危険とその影響の発生限界",静 電気学会誌,9,6,376-383,1985
- 6) IEC Publication 479-1, 1984
- 7) 山野・本山・田畠: "水中において下肢強直を起す 電撃の強さと許容限界"(産業安全研究所報告, RR -30-1) 労働省産業安全研究所, 1981
- 本山・山野: "潜水作業に用いる電気機器の安全化 に関する研究(V)",(昭和60年度海洋開発調査 研究促進費報告書),労働省産業安全研究所,1986
- 9)本山・山野・田畠:"水中漏電場の電界強度に関する検討――漏電電極と電界強度の関係――"(産業安全研究所報告, RR-30-2)労働省産業安全研究所, 1982
- 10) "電気磁気学(改訂版)", 電気学会偏, 1968 他