

高油圧パイプ形 OF ケーブルの負荷しゃ断時の 絶縁体半径方向油圧降下

Radical Pressure Drop in the Insulation of High Pressure
Pipe-Type OF Cables with Load Interruption

安 藤 順 夫* 沼 尻 文 哉**
Nobuo Andô Fumiya Numajiri

要 旨

高油圧パイプ形 OF ケーブルでは負荷しゃ断時の温度変化によって導体中の油圧が一時的に低下する。そこで、ケーブル絶縁体の半径方向の油圧降下を実験、理論両面から検討した。その結果、ケーブルの防湿層を従来の 1 層から 2 層に増しても導体側の油圧は最悪負荷しゃ断条件で 9 kg/cm² 以上を保ち、ケーブルの電気的性能に悪影響を及ぼさぬこと、および油圧伝播(でんぱ)等価回路を導入することにより実験結果を数値的に解析できることが明らかとなった。

1. 緒 言

高油圧パイプ形 OF ケーブル (以下 POF と略称) は、その構造から明らかなように、絶縁体しゃへい上にケーブル輸送・布設時の吸湿と脱油を防止するための防湿層があるが、これを通して油が絶縁体内へ浸透することによりパイプ側の油圧が導体内部に伝えられている。しかも、油の粘度が高いため、負荷電流が変化して導体部分が熱膨張ないし熱収縮するとこれに即応した絶縁油の吸収・補給ができず、導体部分の油圧が一時的に上昇ないし下降する。とくに大きい負荷がしゃ断された場合には導体側油圧低下も著しく、その度合いによってはケーブルの電気的性能に悪影響を及ぼすことになる。導体側油圧低下を生ずる最も大きい要素は防湿層が油の浸透を妨げる点にあり、防湿層を設計するときには、吸湿と脱油を防止するという本来の性能だけでなく、負荷しゃ断時の油圧低下という逆の効果もじゅうぶん考慮しなければならない。

日立電線株式会社ではすでにロスアンジェルス電気水道局に 230 kV, 1,000 MCM (約 500mm²) POF ケーブルを納入し⁽¹⁾、引き続いて種々の研究を行なってきたが⁽²⁾⁽³⁾、ここに、その一部である防湿層の構造と負荷しゃ断時の導体油圧降下の関係について実験的および理論的に検討した結果を報告する。

2. 試作ケーブルによる実験

防湿層の異なった 2 種の試作ケーブルにより負荷しゃ断時の導体側油圧変化を実測し、変化状況・最低油圧値などを比較検討した。

2.1 試料ケーブル

防湿層の構造のみが異なる 2 種の 230 kV, 2,500 MCM POF ケーブルを試作した。その構造の大略と使用絶縁油の粘度は表 1 に示すとおりである。なお、これらのケーブルについて本実験と並行して 3~6 个月にわたる長期の輸送・保管実験を実施し、防湿層 2 層構造のほうが脱油と吸湿に対する特性がすぐれていることを確認している⁽⁴⁾。

2.2 試 験 装 置

試験装置を図 1 に示す。試料ケーブル A, B および導体温度測定用ケーブルを 6 インチパイプに引き入れ、さらに全体を水そう内に収めた。試料ケーブルの片端は油圧の伝達をしゃ断するようにした中間接続スリーブで導体温度測定用ケーブルに接続し、他端は導体引出しスリーブによりパイプ外に引き出した。この

引出しスリーブの中心に油通路があって導体油圧が測定できるようになっている。なお、ごくわずかな油量が導体油圧の測定誤差となるので、スリーブ部分は粘着性シリコンゴムテープで完全にシールし、さらに後述のように微量油量で作動する圧力ゲージを使用した。

2.3 試験方法ならびに条件

パイプ油圧および周囲温度を一定に保ちながら温度分布が定常状態となるまで導体に一定電流を通電する。その後、電流をしゃ断して各部の温度、油圧変化を測定する。

導体油圧低下の原因が短時間の温度降下幅とパイプ周囲温度に依存すると考えると、実線路で最も過酷な状態となるのはパイプが大気中に露出された部分であろう。この意味から試験条件として表 2

表 1 試料ケーブルの構造ならびに絶縁油の特性

ケーブル種類		試料ケーブル(A) 防湿層 1 層	試料ケーブル(B) 防湿層 2 層
項 目			
導 体 (2,500 MCM 4 分割)		45.7 mm φ	45.7 mm φ
絶 縁 体 (脱イオン水洗紙)		21.3 mm t	21.3 mm t
しゃへい層		0.3 mm	0.3 mm
防 湿 層 (金属化マイラ 2 枚/層)		0.13 mm	0.26 mm
補 強 層 (銅テープ・マイラ)		0.18 mm	0.18 mm
スキッドワイヤ		5.1×2.54 mm	5.1×2.54 mm
含浸油 (ポリブデン油) の 粘 度	100° F	1,020 C S	
	210° F	34.5 C S	
パイプ油 (鉱油) の 粘 度	100° F	168 C S	
	210° F	10.6 C S	

表 2 試 験 条 件

試 験 No.	通 電 電 流 (A)	パイプ冷却方法	目 標 温 度 (°C)	
			導 体	パ イ プ
1	1,600	水 道 水	50	20
2	1,600	水 道 水	30	0
3	2,000	水 道 水	70	20

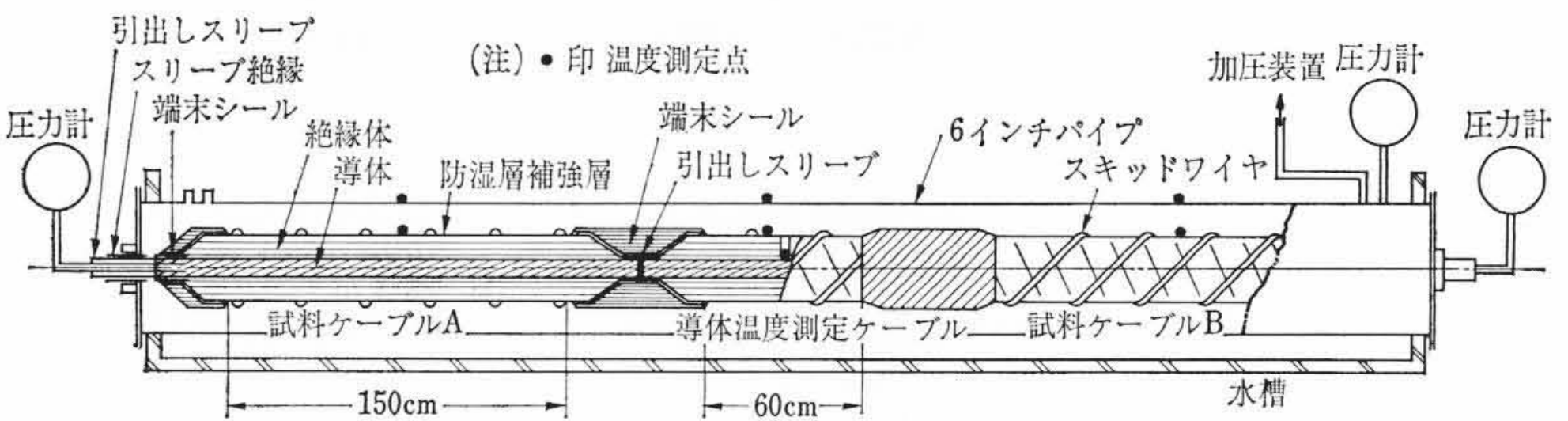


図 1 負荷しゃ断時の導体油圧変化測定用試験装置

* 日立電線株式会社 研究所
** 日立電線株式会社 研究所 工学博士

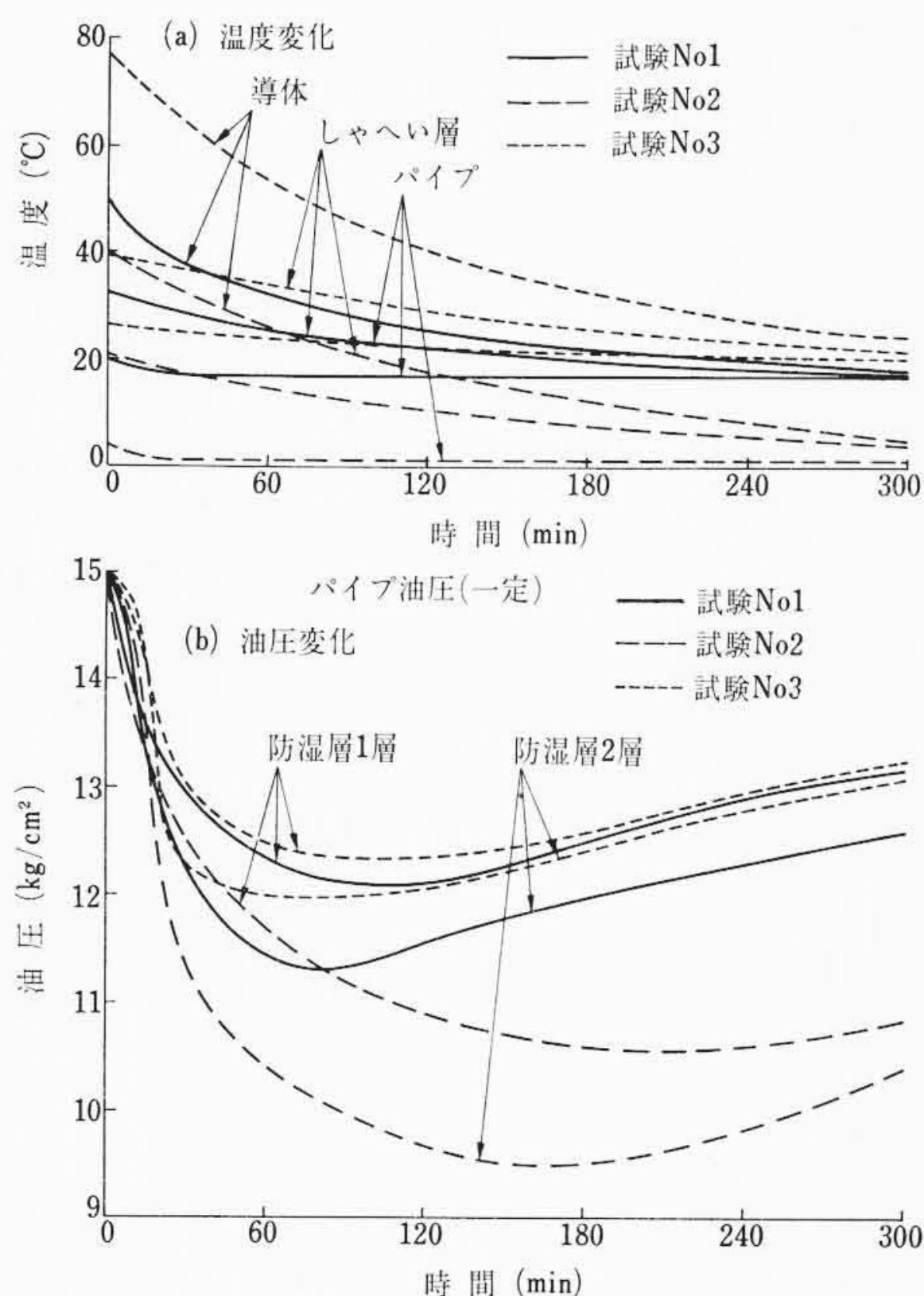


図2 負荷しゃ断時の温度ならびに油圧変化測定結果

に示すものを選んだ。すなわち、試験 No. 1 は通常の最大負荷しゃ断を、No. 2 は冬期の最大負荷しゃ断を、また No. 3 は通常の過負荷しゃ断を想定したものである。

2.4 試験結果ならびに考察

各条件における電流しゃ断後の温度・油圧の測定結果を図2に示す⁽⁶⁾。これより以下の点が明らかになった。

〈防湿層構造による差〉 予想されたように防湿層2層のBケーブルのほうが導体の到達最低油圧は低くなるが、Aケーブルとの差は1 kg/cm²程度である。また、最低値に到達する時間はBケーブルのほうが早く、Aケーブルの約80%である。

〈試験条件による差〉 導体油圧低下は温度変化幅(しゃ断負荷に關係する)よりはパイプ温度(周囲大気温度)に強く影響される。すなわち、冬期の負荷しゃ断が最も過酷な条件となる。

ただし、ここに想定した負荷電流は非常に大きく、実際には土中埋設部の温度上昇で制限を受けるので、実線路の条件では800~1,200 Aが妥当であると思われる。一方、油圧ゲージの体積変化は0.05 cm⁵/kgであり、熱収縮による導体部の体積変化よりはるかに小さいので導体油圧変化には影響しないであろう。なおこれらについてはあとで検討する。

3. 補助実験

2. で得た実験結果を理論的に解析する前に、導体油圧変化の基礎実験を行なった。

3.1 一定温度下における過渡油圧変化

図1の試験装置を一定温度(20°C)、一定圧力(15 kg/cm²)に保持したのち、導体側から瞬間的に微量の油を流出させ、導体油圧を約9 kg/cm²に下げ、その後の導体油圧の回復特性を測定した。A、B両ケーブルの導体油圧の回復状況は図3に示すとおりである。

あとで述べるように、Bケーブルのほうが絶縁体半径方向の油流抵抗が高く、油が浸透しにくいにもかかわらず、導体油圧の回復は早くなっている。逆にいえば、導体油圧を回復させるのに必要な、外側から浸透すべき油量はBケーブルでは少なくすむということである。この原因として種々考えられるが、防湿層のテープ巻き張力が絶縁紙巻き張力よりも高いので、防湿層数の多いBケーブルのほ

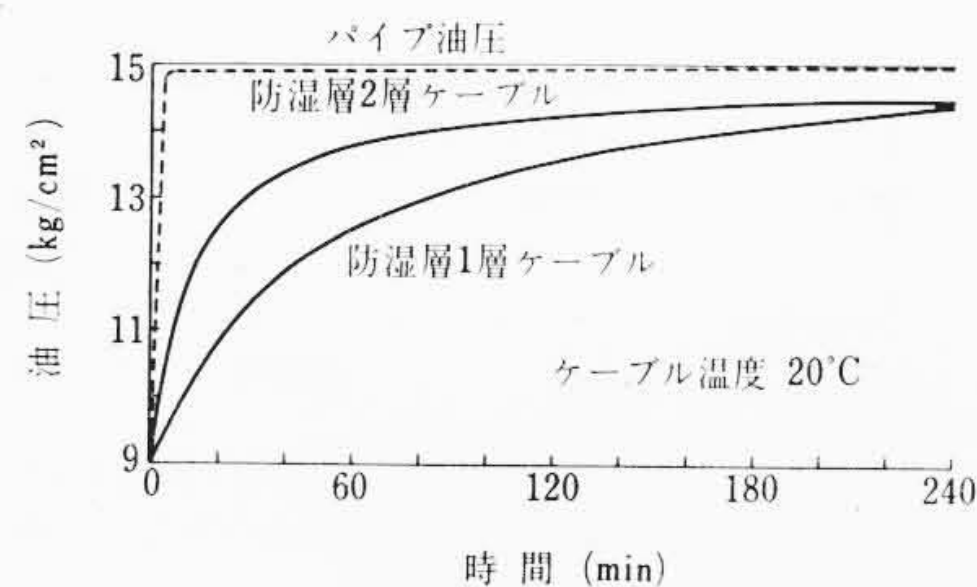


図3 一定温度下における導体油圧回復特性

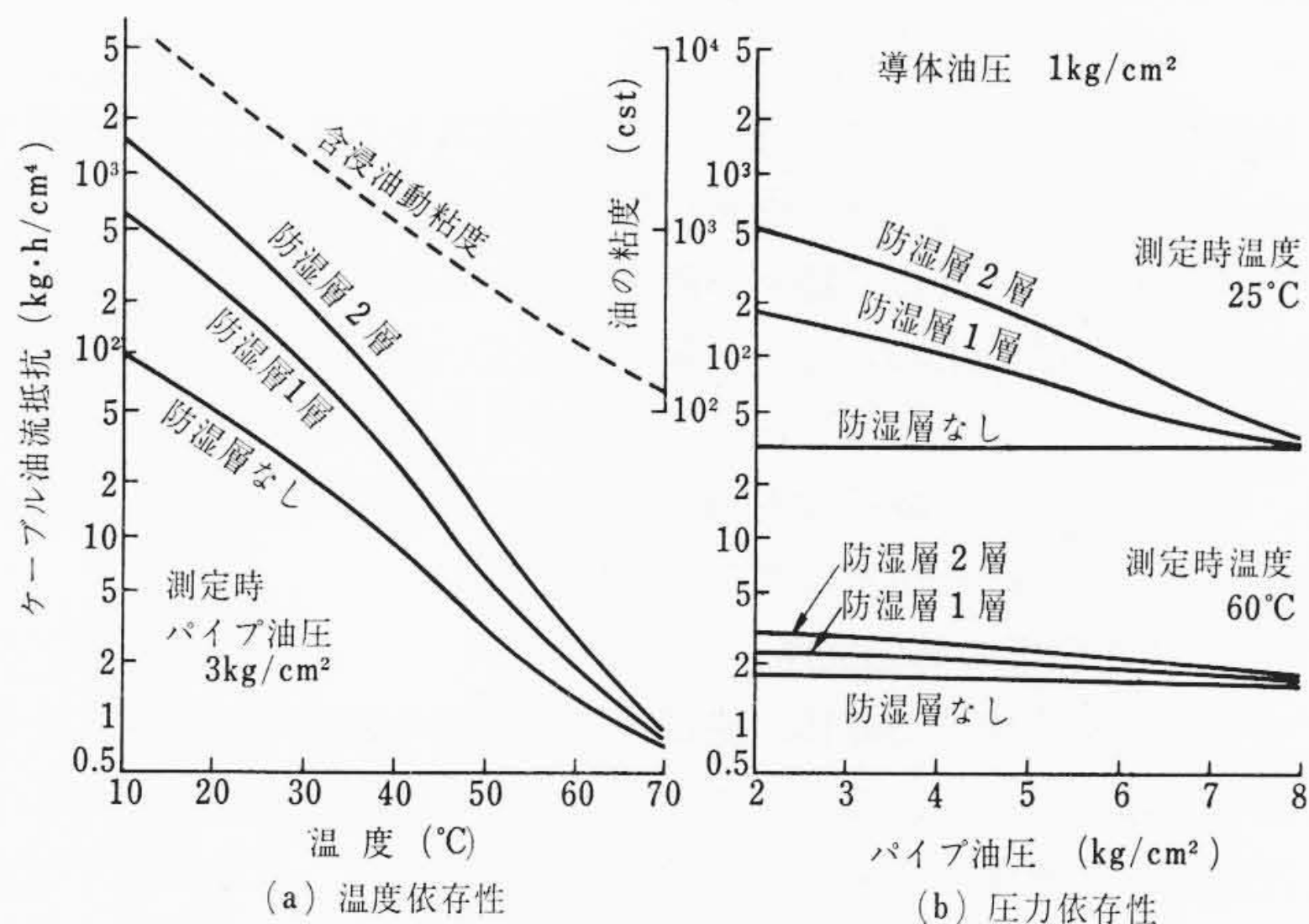


図4 ケーブル絶縁体半径方向の油流抵抗

うが、全体として締めつけられ、より線導体付近の油のスペースが小さくなったためであろうと推定される。

3.2 ケーブル絶縁体半径方向の油流抵抗

やはり図1の装置を用い、温度、パイプ側油圧を一定に保ちながら大気圧(1 kg/cm²)に開放された導体側に流出する油量を測定し、次式を用いて絶縁体半径方向の油流抵抗を求めた。

$$S = \frac{(P_p - P_c)l}{q} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 S : 絶縁体半径方向油流抵抗 (kg·h/cm⁴)

P_p : パイプ側油圧 (kg/cm²)

P_c : 導体側油圧 (kg/cm²) (=1)

l : 試料有効長 (cm)

q : 導体側流出油量 (cm³/h)

図4はA、B両ケーブルおよび防湿層をはいだケーブルの油流抵抗を示したもので、(a)は温度特性、(b)は圧力特性である。

従来、油流抵抗は油の粘度に依存するので、その温度依存性は油の粘度—温度特性の傾向と一致し圧力にはよらないとされてきた。しかし、図4(a)中の粘度—温度特性と比較すれば明らかのように、防湿層のあるA、B両ケーブルでは油流抵抗は粘度以上に温度により変化しており、また(b)図から圧力の影響も受けることが判明した。以上、二つの補助実験により、導体油圧変化を理論的に取り扱うには

- (1) ケーブル中の油の容量が油圧変化に大きく影響すること。
- (2) 絶縁体半径方向の油流抵抗は温度、油圧により非線形の変化を示すこと。

の2点を考慮する必要のあることが判明した。

4. 理論的解析

ケーブル絶縁体内部の油圧伝播現象を熱伝達回路と類似の等価回路で表示し、油圧変化の解析を行なった。回路定数は前述の補助実

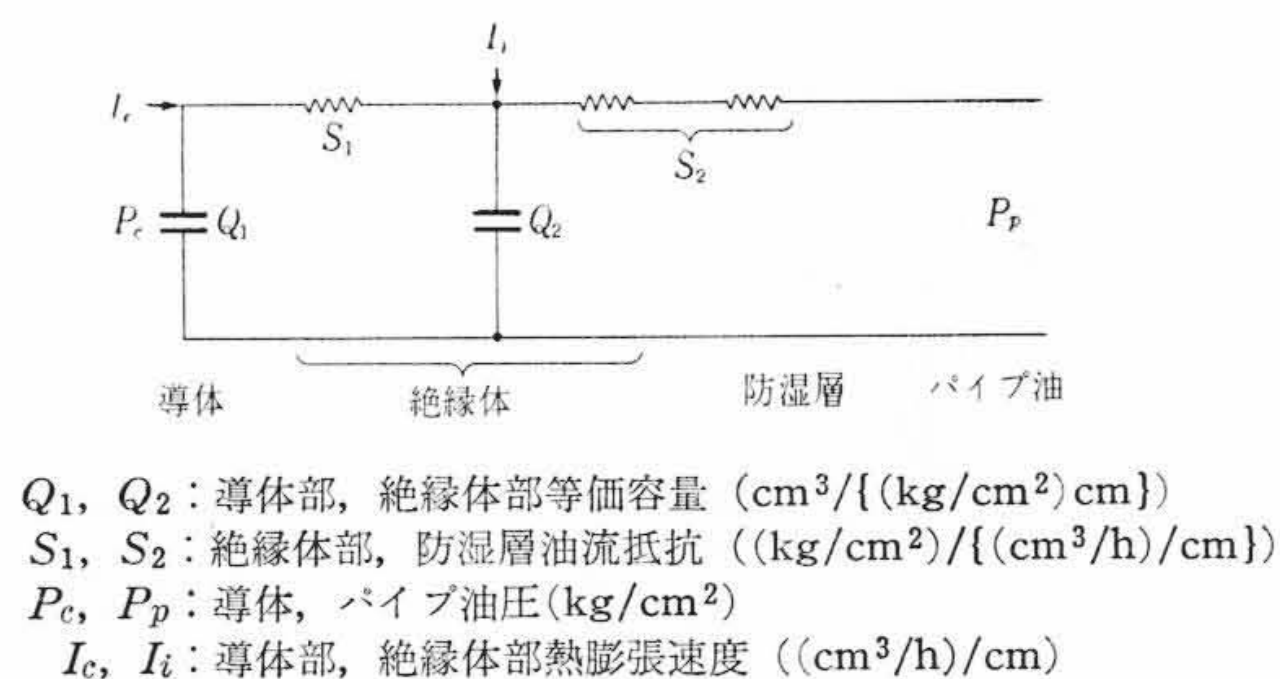


図5 POFケーブルの絶縁体半径方向の油圧伝播等価回路

験より決定される。

4.1 導体油圧変化の近似解

絶縁体内部の油圧変化に関する理論方程式をたてることは容易であるが、非線形連立微分方程式となり解析的な解を導くことはできない。このため、これまで種々の仮定をおいて最も問題となる最低油圧のみを近似的に求めることが試みられているが⁽⁶⁾⁽⁷⁾、負荷しゃ断時の導体油圧変化全体はじゅうぶん説明されていないように思われる。そこで筆者らは絶縁体内の油圧伝播の等価回路を導き、油圧の時間変化をも含めた解析を試みた。

4.2 油圧伝播の等価回路

ケーブルを構成する導体、絶縁体部の材料の圧縮率は非常に小さく無視できるほどであるが、これらを組み合わせたケーブルとしての圧縮率を無視すると図3の実験結果は点線のようになるはずであり、明らかに実測値と異なっている。この差はケーブルとしての圧縮率が無視できないものであることを示しており、導体より線構造と絶縁体積層構造のためケーブルがいくぶん変形し、これがみかけ上圧縮率となって現われると考えられる。

すなわち、ケーブル導体部、絶縁体部には被圧縮性の要素(静電容量、熱容量に相当して油容量といえるもの)を含んでいるとみなされる。

一方、半径方向の油の流れに対しては防湿層と絶縁紙の油流抵抗が存在する。

これら油容量と油流抵抗を組み合わせるケーブル半径方向の油圧伝播等価回路として図5に示すものを仮定した。流入する油量は各部の温度変化と膨張係数によって与えられる。

4.3 等価回路による解析

図5の等価回路と定数を用いれば、パイプ側油圧を一定に保ちながら負荷をしゃ断した場合の導体側油圧は次のようにして求めることができる。

すなわち導体側油圧 P_c が一定のパイプ側油圧 P_p と絶縁体部分による変化分 P の重畳であるとする P はいわゆるCR回路の過渡電圧と同様にして次の微分方程式を解くことにより求められる。

$$P_c = P_p + P \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$Q_1 Q_2 S_1 S_2 \frac{d^2 P}{dt^2} + \left\{ Q_1 Q_2 S_2 \frac{dS_1}{dt} + Q_1 S_1 + Q_1 S_2 + Q_2 S_2 \right\} \frac{dP}{dt} + P - Q_2 S_2 \frac{dS_1}{dt} I_c - Q_2 S_1 S_2 \frac{dI_c}{dt} - (S_1 I_c + S_2 I_c + S_2 I_i) = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{ここに, } I_c = \alpha_c \frac{dT_c}{dt}, \quad I_i = \alpha_i \frac{dT_i}{dt} \quad \dots\dots\dots (4)$$

α_c : 導体部熱膨張係数 ($(\text{cm}^3/\text{C})/\text{cm}$)

α_i : 絶縁体部熱膨張係数 ($(\text{cm}^3/\text{C})/\text{cm}$)

T_c, T_i および T_p : 導体, 絶縁体およびパイプ温度 ($^{\circ}\text{C}$)

ただし、油流抵抗が温度と圧力に依存し、これらが時間とともに変化するので、(3)式には dS_1/dt の項が含まれてくる。上記以外の記号は図5に示されている。

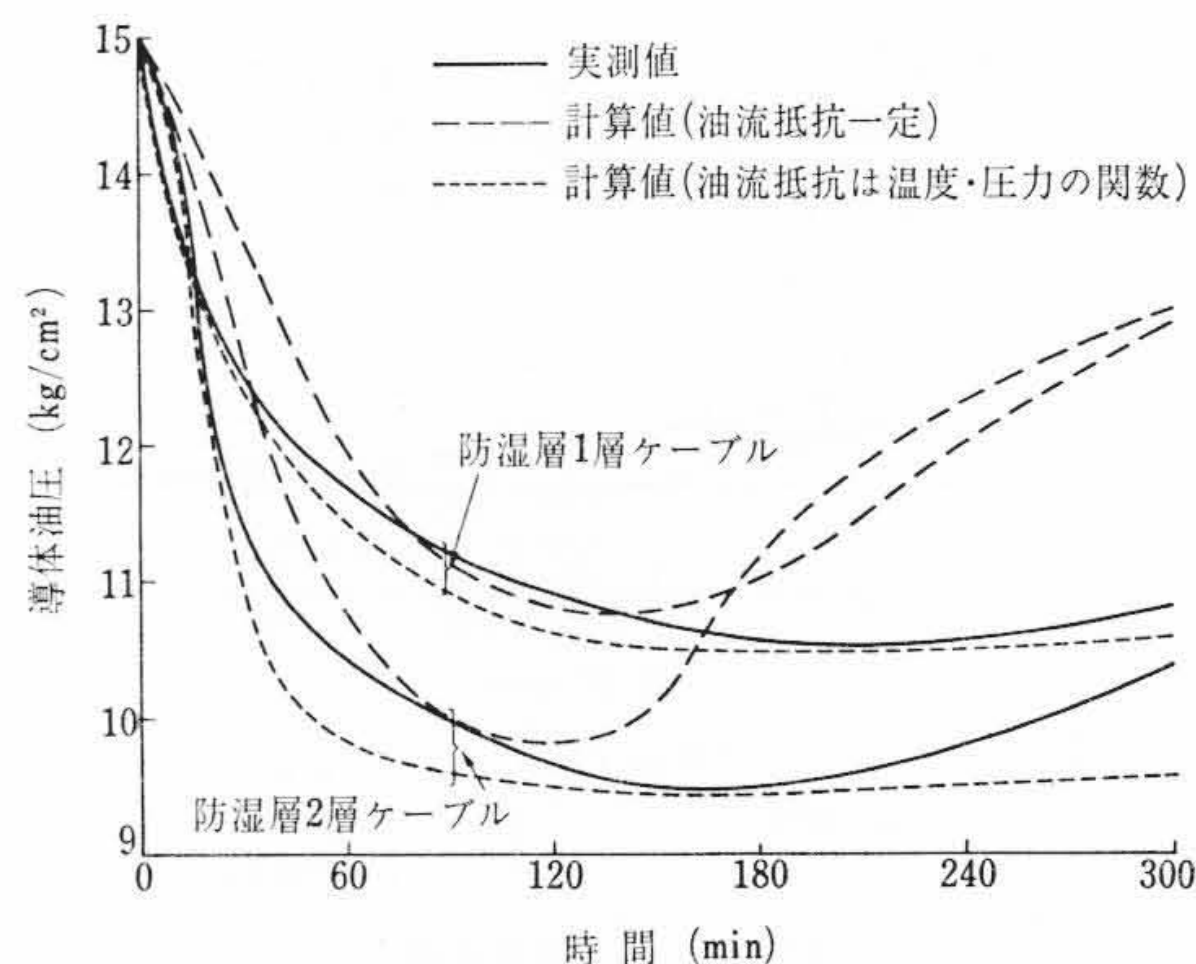


図6 導体油圧低下の実測値と計算値の比較

油流抵抗 S_1, S_2 は先の補助実験から次式で近似することができる。

Aケーブル:

$$\left. \begin{aligned} S_1 &= 111 \times 10^{-0.033 T_c} \\ S_2 &= 111 \times 10^{-0.033 T_c} (1 + 101.706 - 0.285(P_p - P_c) - 0.012 T_s) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Bケーブル:

$$\left. \begin{aligned} S_1 &= 111 \times 10^{-0.033 T_c} \\ S_2 &= 111 \times 10^{-0.033 T_c} (1 + 102.115 - 0.286(P_p - P_c) - 0.016 T_s) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

一方、熱膨張係数は各部を構成する材料の膨張率と体積比率から求められる。

$$\alpha_c = 2.20 \times 10^{-3} \quad (\text{cm}^3/\text{C} \cdot \text{cm})$$

$$\alpha_i = 1.995 \times 10^{-2} \quad (\text{cm}^3/\text{C} \cdot \text{cm})$$

さらに、導体、絶縁体の温度変化は、図5と類似の熱等価回路を用いて計算する方法がすでに明らかにされており、これをそのまま用いた。

$$\left. \begin{aligned} T_c &= (70.0 - 0.7e^{-2.94t} - 69.3e^{-0.551t}) W + T_p \\ T_i &= (40.4 - 0.9e^{-2.94t} - 41.3e^{-0.551t}) W + T_p \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (7)$$

等価油容量 Q_1, Q_2 は先の補助実験の結果(図3)と等価回路を用いて次のようにして求められた。すなわち、最初油流抵抗が油圧に依存しない一定値であるとして等価回路から Q_1, Q_2 の略値を求め、次にこの値を用いて油流抵抗の油圧依存性を考慮して(3)式と類似の方程式を計算機により数値的に解き、導体油圧の回復特性を求めた。この計算結果が図3の実測値に一致するまで Q_1, Q_2 を変化させて計算を繰り返し、最終的な Q_1, Q_2 を決定した。

$$\left. \begin{aligned} \text{Aケーブル: } Q_1 &= 0.0611; Q_2 = 0.0467 \quad (\text{cm}^4/\text{kg}) \\ \text{Bケーブル: } Q_1 &= 0.0134; Q_2 = 0.0296 \quad (\text{cm}^4/\text{kg}) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (8)$$

これを材料の圧縮率から求めた圧縮量と比較すると、 Q_1 で約2けた、 Q_2 で3~4倍大きく、導体部の油容量(圧縮量)が非常に大きくなる。油圧ゲージの体積変化を150cmのケーブル長で換算すると $0.0003 \text{ cm}^4/\text{kg}$ となり、 Q_1, Q_2 に比べて無視できることがわかる。

4.4 導体油圧変化の計算結果

前節で導いた微分方程式と定数を用いて負荷しゃ断時の導体油圧変化を計算するに当たって、まず簡単化のため油流抵抗が油圧と温度によらないものとみなしてみる。このとき(3)式は線形微分方程式となるので解析的に解け、次式の解を得る。

$$P = Ae^{-at} + Be^{-\beta t} + Ce^{-\gamma t} + De^{-\delta t} + E \quad \dots\dots\dots (9)$$

導体油圧が最も低下した試験No.2の場合の計算値と実測値を示したのが図6である。この場合、一定の油流抵抗としては、負荷しゃ断時の絶縁体温度および最低値到達時の導体・パイプ間油圧差により決まる値を(5)、(6)式から求めて使用した。

次に、油流抵抗が温度、油圧によって変化する場合の計算を行なった。この場合、(3)式は非線形微分方程式となり解を解析的に求

めることができないので、数値解法の一つである Lunge-Kutha-Gill 法により電子計算機を使用して導体油圧変化を求めた。時間分割は 0.1 分とした。試験条件 No. 2 の場合の計算結果もやはり図 6 に併記した。

4.5 計算結果の考察

前節の計算結果は試験 No. 2 の場合のみを示したが、ほかの試験 No. 1 および No. 3 の場合も同様の傾向にある。この傾向をまとめると次のようである。

(1) 油流抵抗の温度、圧力依存性を無視した場合

- (a) 最低油圧は実測値のほうが低くなる。
- (b) 最低油圧到達時間は計算値のほうがやや遅くなる。
- (c) 最低油圧到達後の油圧回復は計算値のほうが速い。

この原因は、実際には負荷しゃ断後しだいにケーブル温度が降下するので油流抵抗はしだいに大きくなるのにこれを無視したためであらう。

(2) 油流抵抗の温度、圧力依存性を考慮した場合

- (a) 最低油圧は実測値と計算値がほぼ一致する。
- (b) 最低油圧到達時間は計算値のほうがやや早くなる。

油圧変化全体としては実測値と計算値がよく一致している。

5. 実験ならびに理論解析結果の検討

先の実験結果から、実線路で遭遇するよりも温度、しゃ断負荷ともはるかに過酷な条件下においても、防湿層 2 層のケーブルの導体最低油圧は 9 kg/cm^2 以上で電気的な性能の面から全く問題ないことがわかった。しかも防湿層 1 層ケーブルとの差は 1 kg/cm^2 程度である。したがって、脱油、吸湿に対するすぐれた特性を考慮すると、防湿層として 2 層構造を有するケーブルのほうが適していると考えられる。なお、実測上の問題としてあげた油圧測定ゲージの体積変化は、あとの補助実験結果の解析からも明らかなように、ケーブルの体積変化(等価油容量)に比べて無視できることがわかったのとくに補正しなかった。

理論解析結果と実測結果を比較すると次のことが言える。予測計算する場合には油流抵抗を仮定しなければならないことなどから計算法自体は複雑になるけれども、油流抵抗の温度、油圧依存性を考慮した計算法のほうが油圧変化の全体がよく一致し、すぐれていると言えよう。しかし、油流抵抗を一定とした計算法は、解を解析的に求めることができるので、ある程度の裕度をもって計算すれば油圧

降下を推定するうえに設計上実用的な方法と言えよう。いずれにしても、負荷しゃ断時の導体油圧変化の解析に当たっては純理論式に種々の仮定をおいて解くよりも図 5 のような等価回路を用いて解いたほうが油圧変化全体がよく説明されるとともに計算が簡単になる。ただし、そのためには油流抵抗、油容量などの等価回路定数をあらかじめ定めておく必要がある。

6. 結 言

230 kV, 2,500 MCM POF ケーブルを対象に負荷しゃ断時の導体油圧変化について実験・理論両面から検討した。その結果明らかになった点をまとめると次のとおりである。

- (1) POF ケーブルの防湿層を従来の 1 層から 2 層に増すと絶縁体半径方向の油流抵抗は大きくなるが、最悪条件下でも導体油圧は 9 kg/cm^2 以上を保ち電気的特性の面からは問題はない。したがって、脱油、吸湿に対する特性を勘案すると防湿層を 2 層としたほうが良いと言える。
- (2) 導体油圧変化は油圧伝播等価回路を用い、その回路定数を求めておけば数値計算により求めることができる。

等価回路の定数(油流抵抗および油容量)は今回の実験結果からも明らかなように、ケーブル構造の微少な相違によって大きく変化する。このため現段階でケーブル設計時に厳密な油圧低下を予測することは困難であるが、今後 500 kV 級 POF ケーブルでは絶縁層が厚くなり導体油圧低下の問題が大きくなるので、引き続いて検討を進めたいと考える。

なお、本実験結果をもとにロスアンジェルス市電気水道局向けに防湿層 2 層構造の 230 kV, 2,500 MCM POF ケーブルを製造し、既に納入を完了している⁽⁴⁾。

終わりにのぞみ、この問題を提起し種々ご指導を賜わった日立電線株式会社日高工場水上工場長、網野課長ならびに関係各位に心から感謝する。

参 考 文 献

- (1) 水上ほか 4 名：日立評論 48, 1330 (昭 41-11)
- (2) 遠藤ほか 2 名：日立評論 50, 725 (昭 43-8)
- (3) 依田ほか 3 名：日立評論 51, 747 (昭 44-8)
- (4) 千葉ほか 2 名：電学会東京支大, No. 284 (昭 43-10)
- (5) 網野ほか 2 名：電学会東京支大, No. 340 (昭 43-10)
- (6) 寺田ほか 3 名：電学会連大, No. 1127 (昭 42-4)
- (7) 小島ほか 2 名：電学会連大, No. 985 (昭 44-3)



特 許 の 紹 介



特 許 第 517285 号 (特 公 昭 42-20887 号)

小 沢 重 樹

テ レ メ ー タ 装 置

直流信号電流を遠距離に伝達する場合、伝送線路の抵抗値の変化および電源電圧の変動などにより信号電流値が変動しないように電流負帰還方式が用いられているが、この方式は機械的可動部を有する電圧平衡式であるため経年的にその信頼度が劣るといふ欠点がある。

この発明は上記欠点を除くもので、図中 1、2 は均等なホール発電器、3 は磁束を発生する鉄心、4 は交番磁束を発生するため一定の交流電源に接続されるコイルであり、ホール発電器 1、2 は鉄心の空けきに配置されている。

いまホール発電器 1 に電流 I_x を流すとこれと直角方向に $E_x = KI_x \phi \sin \omega t$ なる電圧を発生する。ただし $\phi \sin \omega t$ は鉄心中の交番磁束、 K は定数である。またホール発電器 2 に伝送すべき信号電流 I を流すと、同じく $E = KI \phi \sin \omega t$ なる電圧が発生する。この二つの電圧の差 ΔE をとり、これを増幅器 5 で増幅し、整流器 6 で整流し、その出力を伝送線 7 を経て受量器 8 に伝送するとともに、ホール発電器 2 の制御電流として、フィードバックすれば I_x に対応した電流 I を得ることができる。すなわちこの発明によれば伝送線路のインピーダンス変動や電源電圧の変動による影響を受けないことはもちろん、 E_x 、 E はそれぞれ交番電圧であるのでそのまま交流増幅ができる利点を有し、機械的接触部をもたないので経年的変化に対し信頼度が高くなり、同種のホール発電器が差動的に接続され、

ホール発電器自体の特性変化を相互に補償するので、ホール発電器の特性変化を補償する手段を別に設けなくとも、高精度の変換が可能となるなどの効果がある。
(西宮)

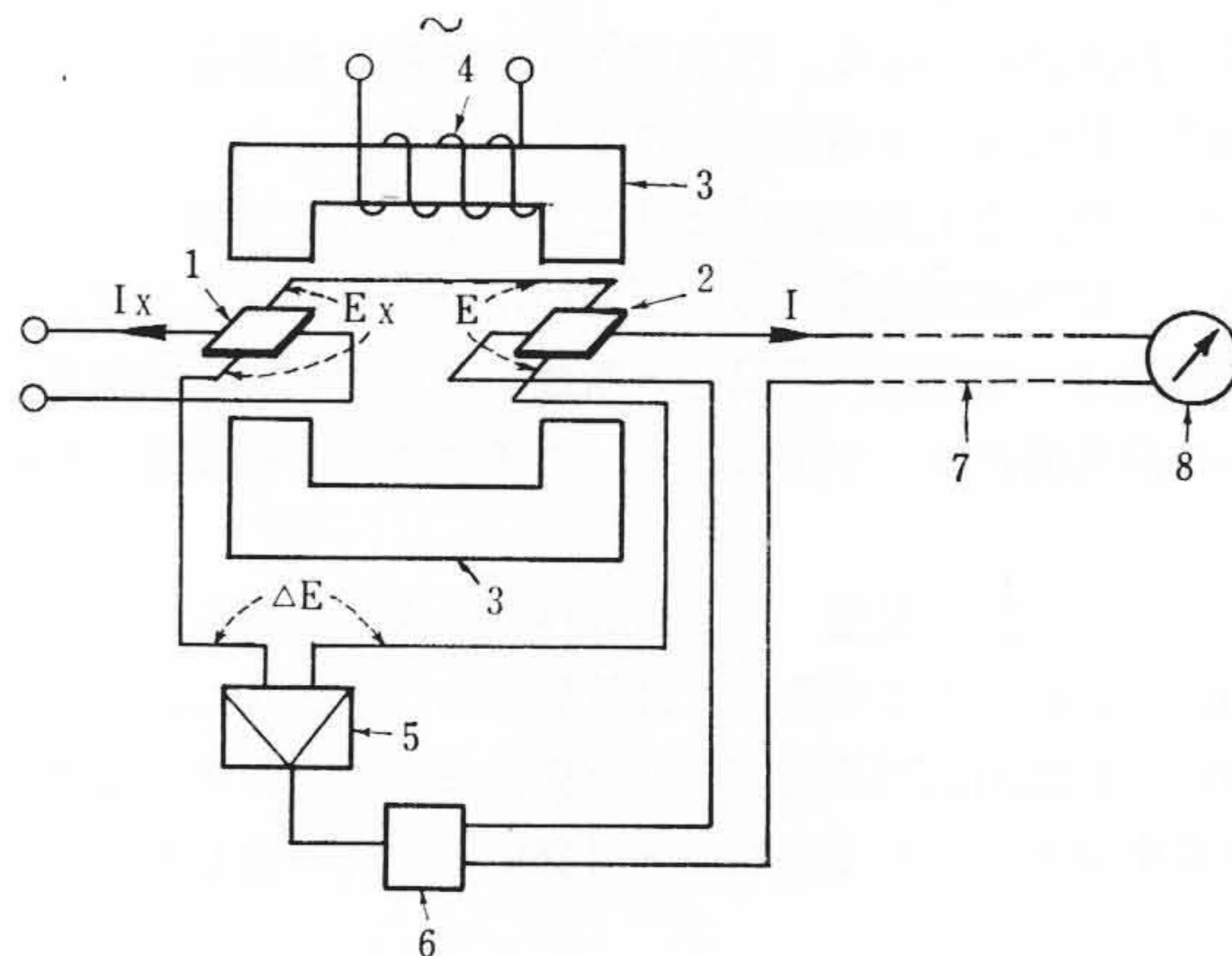
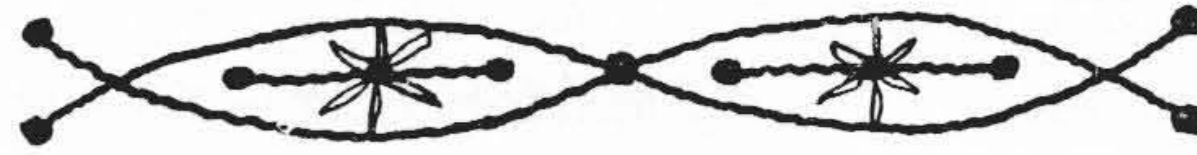


図 1



新 案 の 紹 介



登 録 実 用 新 案 第 844378 号

黒 瀬 忠

周 波 数 通 倍 装 置

発電所の発生電力、ダム水位および変電所の潮流監視などに使用されるテレメータは送量側において 100 Hz 以下の周波数に変換し、これを搬送装置により搬送し、受量側において電流または電圧に変換し指示または記録させるものであるが、前記受量側において前記低周波数をカウンタにより測定する場合に、測定精度を上げるためにはゲート時間を長く取る必要が生ずるとともに、入力周波数に変動の多い場合は測定不可能となり、テレメータ自体の精度にも影響してくる。

この考案はこの点を改良するために、入力低周波数を任意に通倍し短いゲート時間で高精度の計数を行なわせしめるようにしたものである。

図において、低周波入力源 1 には低周波数 (入力周波数) F_i が被測定周波数として入れば周波計回路 2 に導かれ、周波数 F_i は直流電圧 V_1 に変換される。この電圧 V_1 は A_1 倍に増幅され電圧制御発振器 4 に導かれ出力高周波数 F_0 に変換される。この周波数 F_0 を周波数通減器 5 により通減し周波計回路 6 により直流電圧 V_2 に変換、この電圧 V_2 を直流増幅器 3 へ負帰還する。ここで周波計回路 2 の伝達関数を f_1 、その出力を V_1 、直流増幅器 3 の伝達関数を A_1 、電圧制御発振器 4 の伝達関数を A_2 、周波数通減器 5 の伝達関数を D 、周波計回路 6 の伝達関数を f_2 、その出力を V_2 とすれば出力周波数 F_0 は

$$F_0 = (V_1 - V_2) A_1, A_2 \dots \dots \dots (1)$$

となる。ただし電圧 V_1 、 V_2 は $V_1 = f_1 \cdot F_i$ 、 $V_2 = f_2 \cdot D \cdot F_0$ であるの

でこれを前式に代入すれば

$$F_0 = \frac{f_1 \cdot A_1 \cdot A_2 \cdot F_i}{1 + f_2 \cdot D \cdot A_1 \cdot A_2} \dots \dots \dots (2)$$

となる。いま $f_1 = f_2 \cdot \frac{1}{A_1 \cdot A_2 \cdot f_1} \ll D$ とすれば上記 F_0 は

$$F_0 \doteq \frac{1}{D} \cdot F_i \dots \dots \dots (3)$$

となる。すなわち $\frac{1}{A_1 \cdot A_2 \cdot f_1} \ll D$ の成立する程度に応じて (3) 式は近似される。

したがって周波数通減器 5 の伝達関数 D を可変にすれば、入力周波数 F_i を任意に通倍することができ、ゲート時間の短い高精度の計数を行なうことができる。
(西宮)

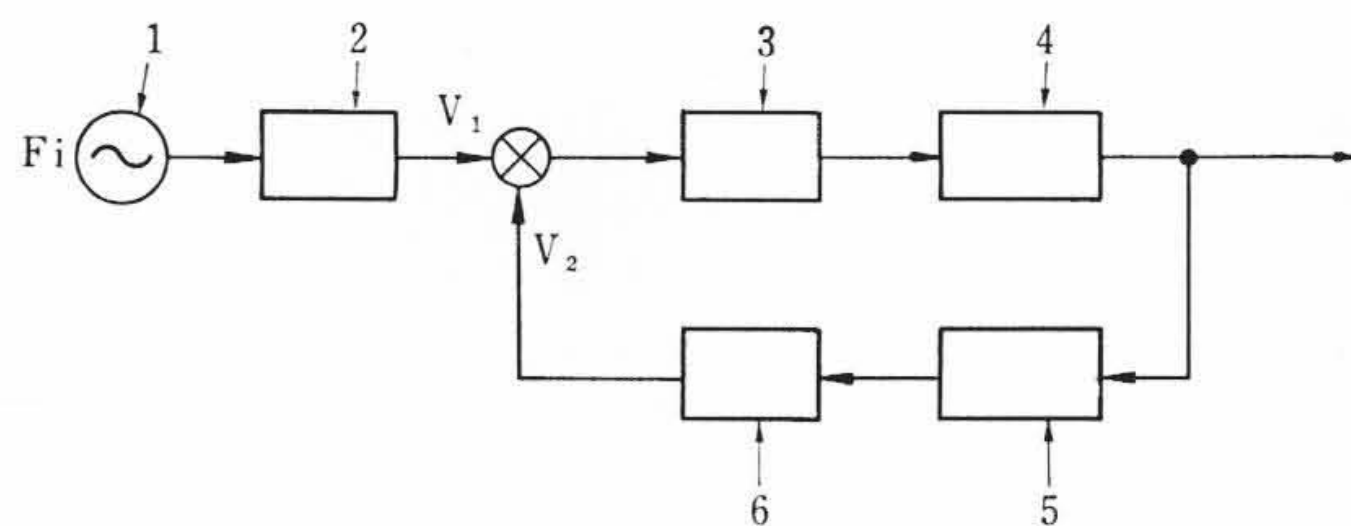


図 1