磁性二重管路の特性とその応用

Characteristics and Application of Magnetic Coaxial Pipe

北條博行・早坂明夫*・堀崎一弘**・山口正洋**・松田 学・村上孝一**

日本鋼管(株)システム技術研究所, 川崎市川崎区南渡田 1-1 (〒210)

*福島大学教育学部, 福島市松川町浅川字直道 2 (〒960-12)

**東北大学工学部電気工学科, 仙台市荒巻字青葉 (〒980)

H. Hojo, A. Hayasaka*, K. Horizaki**, M. Yamaguti**, S. Matuda and K. Murakami**

Systems & Control Res. Center, Nippon Kokan K. K.

1-1, Minamiwatarida-cho, Kawasaki, Kanagawa, 210

*Dept. of Electrical Engng., Faculty of Education, Fukushima Univ.,
Matsukawado, Fukushima, 960-12

**Dept. of Electrical Engng., Tohoku Univ.,
Aoba, Aramaki, Sendai, 980

A new electric pipe heating system and a new circuit element composed of two magnetic pipes with coaxial structure are proposed.

Application of AC current to the magnetic coaxial pipe structure causes the latter to act as a useful pipe heater to transport highly viscous crude oil and to be useful element in detecting the amplitude or phase of the current. This is possible because the voltage of the outside surface of the magnetic coaxial pipe is extremely small due to its remarkable skin and proximity effect.

In this paper we present an analysis of the magnetic coaxial pipe and the experimental results of some applications.

Using the magnetic pipe as a heater by applying AC current the coaxial pipe structure, the heat generation occurs uniformly and the earth current is very small. This system is particularly useful in a long distance pipeline because of its small impedance.

The small coaxial pipe element fabricated with soft magnetic material can detect broadband frequency current accurately without any contact because the impedance of the outer pipe varies with the unbalanced reciprocal current.

1. 緒 言

鋼管などの強磁性体で構成した二重管回路に往復電流を通じると、強磁性体における電流と磁界の相互作用により、表皮効果と近接効果が顕著に起こる。その様子は、通電電流値と磁性体の磁気特性に依存しており、また通電電流の周波数が高いほど電流は偏倚する^{1),2)}。このため、外管外表面の電流が著しく小さくなること、内外管に流れる電流の振幅あるいは位相に差があると、外管端子電圧が変化することなど種々の興味ある現象を示すが、まだ十分な解析はなされていない。

そこで、筆者らは磁性二重管回路の理論解析を行うとともに、この二重管の特徴を生かした応用例として、高粘度流体輸送用パイプラインの加熱システム、電流の振幅、位相検知素子及び地絡電流検知器を提案し、それら

について実験及び検討を行った。

パイプラインの加熱システムは、磁性二重管回路の外管外表面電圧が著しく小さく、かつインピーダンスが小さいことに着目したものであり、電流の振幅、位相検知素子及び地絡電流検知器は往復電流の振幅、位相差に対する外管端子電圧の変化に着目したものである。実験の結果、加熱システムについては実用化の見通しが、振幅、位相検知素子及び地絡電流検知器については実用化の可能性をそれぞれ得ることができた。

本報告は、以上の検討結果について述べるものである。

2. 基礎特性

Fig. 1 に示すように、強磁性体パイプを二重管構造となし、一端を短絡、他端から交流電流を通じる。円筒座

Fig. 1 Principle of magnetic coaxial pipe.

標系を用い、強磁性体パイプを無限長と仮定すると電界及び磁界、電流について Maxwell の電磁方程式から次式が成り立つ。

$$\frac{\partial^2 \mathbf{j}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \mathbf{j}}{\partial r} = j\omega\sigma\mu\mathbf{j} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial r} = j\omega\mu\mathbf{H} \quad (2)$$

$$\mathbf{j} = \sigma\mathbf{E} \quad (3)$$

ただし $\mathbf{j}$: 電流密度, μ : 透磁率, σ : 導電率

ここで外管の内半径を c , 外半径を d として, (2) を外管内の半径 r_1 から d までの範囲で積分すると次式となる。

$$\int_{r_1}^d \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial r} dr = j\omega\mu \int_{r_1}^d \mathbf{H} dr \quad (4)$$

$$\therefore \mathbf{E}(d) = \mathbf{E}(r_1) - j\omega\mu \Phi(r_1) \quad (5)$$

ここで $\Phi(r_1)$ は半径 r_1 の円筒に鎖交する磁束である。

外管の端子電圧は外管外表面の電界強度で与えられるから, 単位長当たりの端子電圧 v_0 は (5) 式より次式で表せる³⁾。

$$v_0 = \mathbf{j}(d)/\sigma = \mathbf{j}(r_1)/\sigma - j\omega\mu \Phi(r_1) \quad (6)$$

(6) 式より端子電圧 v_0 は, 外管外表面の電流密度 $\mathbf{j}(d)$ に比例することが了解される。

ここで簡単のため (1) 式において透磁率を一定とすると, (1) 式は 0 次の Bessel 微分方程式となるから, その一般解は次式で求められる。

$$\mathbf{j}(r) = A J_0(kr) + B N_0(kr) \quad (7)$$

ただし J_0, N_0 は第一種, 第二種の Bessel 函数

$$k^2 = -j\omega\sigma\mu$$

したがって, 定数 A, B を境界条件より求め, (1)~(3) 式に代入すれば各々の値を知ることができる。ここで内管に電流 i_i が, 外管に電流 i_o が流れている場合を考える。このときの境界条件は次式となる。

$$\left. \begin{aligned} H(b) &= i_i / 2\pi b \\ H(c) &= i_i / 2\pi c \\ H(d) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

ただし b は内管外半径

これにより, (7) 式及び第一種 Bessel 関数の性質

$$\frac{\partial}{\partial r} J_0(r) = -J_1(r) \quad (9)$$

を使用すれば外管の電流密度 $\mathbf{j}_c(r)$ は次式で求まる。

$$\mathbf{j}_c(r) = A J_0(kr) + B_1 N_0(kr) \quad (10)$$

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= \frac{j\omega\sigma\mu}{2\pi k} \frac{i_i N_1(kd)/c - (i_i + i_o) N_1(kc)/d}{J_1(kc) N_1(kd) - J_1(kd) N_1(kc)} \\ B_1 &= \frac{j\omega\sigma\mu}{2\pi k} \frac{i_i J_1(kd)/c - (i_i + i_o) J_1(kc)/d}{J_1(kd) N_1(kc) - J_1(kc) N_1(kd)} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

一方, 内管にのみ電流 i_i が流れている場合は, 同様に境界条件から外管の電流密度 $\mathbf{j}_b(r)$ は次式で与えられる。

$$\mathbf{j}_b(r) = A_2 J_0(kr) + B_2 N_0(kr) \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} A_2 &= \frac{j\omega\sigma\mu}{2\pi k} \frac{i_i \{N_1(kd)/c - N_1(kc)/d\}}{J_1(kc) N_1(kd) - J_1(kd) N_1(kc)} \\ B_2 &= \frac{j\omega\sigma\mu}{2\pi k} \frac{i_i \{J_1(kd)/c - J_1(kc)/d\}}{J_1(kd) N_1(kc) - J_1(kc) N_1(kd)} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

他方, 外管にのみ電流 i_o が流れている場合は, 外管の電流密度 $\mathbf{j}_a(r)$ は次式となる。

$$\mathbf{j}_a(r) = A_3 J_0(kr) + B_3 N_0(kr) \quad (14)$$

$$\left. \begin{aligned} A_3 &= \frac{j\omega\sigma\mu}{2\pi k} \frac{i_o \{-N_1(kc)/d\}}{J_1(kc) N_1(kd) - J_1(kd) N_1(kc)} \\ B_3 &= \frac{j\omega\sigma\mu}{2\pi k} \frac{i_o \{-J_1(kc)/d\}}{J_1(kd) N_1(kc) - J_1(kc) N_1(kd)} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

(10)~(15) 式より次の関係が成り立つことが了解される。

$$\mathbf{j}_c(r) = \mathbf{j}_a(r) + \mathbf{j}_b(r) \quad (16)$$

すなわち, 磁性二重管に往復電流が流れている場合の電流分布の様子は, 内管では外管電流による鎖交磁束が存在しないことから, 内管電流による表皮効果のみが現れ, 外管では内管, 外管それぞれに電流を流した場合の電流分布の和となる⁴⁾。

Fig. 2 (a) は, 内管外半径 84.6 mm, 外管外半径 177.8 mm の磁性二重管に 50 Hz, 400 A の電流を流したときの電流分布を計算したものであるが, 鋼の強磁性により電流が著しく偏倚している。この様子は, 外管に鎖交する磁束に起因した Fig. 2 (c) に示すうず電流の分布が, 同図 (b) に示す表皮効果を表す通電電流の分布に足しまれ, 全電流の分布として同図 (d) のようになることで容易に説明できる。また, 同図 (d) から外管電流が変化した場合の外管端子電圧の挙動が分かる。すなわち外管電流が小さく, 内管電流による鎖交磁束が支配的であると端子電圧の絶対値は大であるが, 外管電流が増大するに従い端子電圧は減少する。内外管電流の値が等しく反対符号であるとき端子電圧は極小となり, さらに外管電

Fig. 2 Example of calculated current distribution.

Fig. 3 Schematic structure of submarine pipeline heated by coaxial pipe heating system.

流が増加すると外管電流による鎖交磁束が支配的となり端子電圧は上昇する。このような特性は(11)式から通電電流値、周波数、位相、透磁率、導電率及び管の形状に依存していることが明らかである。したがって、これらの値を適切に選定することにより、商用周波数から高周波数帯域まで、あるいは微小電流から大電流まで磁性二重管としての特徴を生かした回路及び素子を構成することが可能である。

3. 応 用

3.1 バイブ加熱システムへの応用

3.1.1 バイブ加熱システム

原油などの高粘度流体をパイプラインで輸送するには、流動性を維持するため何らかの加熱保温を行っており長距離のパイプラインでは電気加熱が有効な手段となっている。特に海底パイプラインでは従来から管体保護のため、二重管構造とすることが多い。そこで、この二重管構造をそのまま往復電流路とすることができれば、加熱保温のため特別な加熱ケーブルなどを必要とせ

ず保守も殆んど不要であるなど、経済的に有利である。

3.1.2 実験及び検討

Fig. 3 は、二重管回路による加熱システムの概略図である。内管と外管は絶縁スペーサにより互いに絶縁されており、50 Hz あるいは 60 Hz の商用周波数電流で加熱保温される。

Fig. 4 は、内管外半径 84.6 mm、外管外半径 177.8 mm の鋼管を使用した 30 m 長テストラインで求めた通電電流値に対するインピーダンスの絶対値 $\dot{Z}$ と力率である。¹⁾

Fig. 5 は、同ラインにおける外管外表面の電位勾配である。これを見ると $|\dot{Z}|$ は、1 km のパイプラインでも 1Ω 以下と非常に小さく、また電位勾配も 0.1 V 以下と微小であることが了解される。なお本解析では、(1) 式において透磁率 $\dot{\mu}$ を磁界の関数として扱い、数値解析によりインピーダンスを求めた。

Fig. 6 は、実際に土中に埋設された状態における加熱保温特性を求めるために建設した、150 m 長の実証ラインの概略図である。パイプ径は内管外半径 133.7 mm、外管外半径 228.6 mm であり、埋設深さを 1 m とした。Photo. 1 に建設中の実証ラインを示す。加熱流体を上水とした場合の加熱例を Fig. 7 に示す。本実験では周囲温度 $19^\circ C$ であるとき、53 V、630 A の入力で水温 $60^\circ C$ までの昇温を 28 時間で実現できた。この結果は内管の発熱のみが昇温に寄与するとして次式で求めた結果とよく一致している。

Fig. 4 Relation between current and impedance.

Fig. 5 Electric field at the outer surface of coaxial pipe.

Photo. 1 A view of the 150 m length test line.

$$m \frac{dT}{dt} = kQ - \frac{2\pi\lambda}{\ln(c/b)} (T - T_0) \quad (17)$$

ただし m : 内管及び流体の熱容量, k : 内外管発熱比
 Q : 内管発熱量, λ : 熱伝導率, T_0 : 周囲温度

Fig. 8 は、実証ラインの外管両端を接地した場合に接地線を通して大地に流入する電流を示したものである。通電電流値 630 A のとき、接地電流はたかだか 0.01 A であり、十分に小さく電氣的に安全である。この接地電流は大地がインピーダンスを持つことに由来している。

以上のように磁性二重管を加熱システムとすると、インピーダンスが小さいため比較的低電圧で大電流を流す

Fig. 6 Schematic diagram of the 150 m length test line.

Fig. 7 Heat-up characteristics of the 150 m length test line.

Fig. 8 Earth current at 630 A.

ことができるうえ、外管外表面の電圧が小さいこと、接地電流が小さいことなど電氣的に安全な設備とすることが可能である。また加熱保温効率を向上させるには、外管表面に断熱層を設けることが有効である。

3.2 電流の振幅、位相検知素子への応用

3.2.1 MCP 素子⁴⁾

2. 章で述べたように、磁性二重管の外管端子電圧は、外管に鎖交する磁束に影響を受ける。したがって、鎖交磁束の大きさ、位相の変化を端子電圧の変化として検知できること、通電電流を高周波数とすれば管長が短くともその特徴を示すことなどが予想される。そこで動作電流の周波数を数十 kHz とし、長さを数 cm と小形化した磁性二重管素子 (Magnetic Coaxial Pipe 素子、以下 MCP 素子と呼ぶ) について検討した。

3.2.2 実験及び検討

Fig. 9 は本実験に使用した MCP 素子の構造を示すもので、25 μm 厚さのアモルファス薄帯を筒状に数層巻いたものである。通電用端子は 1 mm 幅の銅箔をアモル

Table 1 Dimensions of the magnetic coaxial pipe used in experiments

SAMPLE	N	unit: mm				LENGTH
		INNER PIPE D _i	INNER PIPE D _o	OUTER PIPE D _i	OUTER PIPE D _o	
#1	1	5.05	5.15	5.50	5.60	20.8
#2	2	5.05	5.25	5.60	5.80	
#3	4	5.05	5.45	5.85	6.25	
#4	8	5.05	5.95	6.25	7.20	
#5	12	5.05	6.45	6.85	8.35	

MATERIAL: FeCoNiMoSiB system(as quenched)
D_i: inner diameter, D_o: outer diameter
N: number of convolution

Fig. 9 Structure of magnetic coaxial pipe fabricated by using amorphous tape.

Fig. 10 Circuit connection of coaxial pipe driven by two independent power sources.

ファス薄帯といっしょに巻き込んで端子とした。Table 1 に本実験で使った MCP 素子を、Fig. 10 に実験回路を示す。実験では内管および外管にそれぞれ $i_i = \sqrt{2}I_1 \sin \omega t$, $i_o = \sqrt{2}I_2 \sin(\omega t + \theta)$ なる正弦波電流を通電した。

Fig. 11 は、周波数を 100 kHz、内管電流波高値を 0.2 A としたときの外管端子電圧の層数に対する依存性を、振幅及び位相について求めたものである。図中で波高値は i_o の形で表現した。これを見ると、層数が少ないと内管電流に対する外管電流の対称性が崩れてくることが了解される。これは主として電流の浸透深さに依存していると考えられ、着目すべき現象である。なお以下においては、#4 の MCP 素子を用いて実験を行った。

Fig. 12 は、内管電流波高値を 0.2 A 一定としたときの外管電流振幅に対する外管端子電圧の波形及び周波数依存性を示したものである。これより MCP 素子では、内外管の電流の振幅に差があると外管端子電圧は十数 dB の変化を示すことが了解される。この傾向は周波数が高いほど著しい。これらの結果は $\mu = 2500 - j3000$

(a) v_o vs. i_o relation. (b) v_o vs. θ relation.
Fig. 11 Relation between v_o and i_o , θ for various samples.

#4 $f=100\text{kHz}$, $i_i=0.2\text{A}$ $i_i, i_o: 0.2\text{A/div.}$
 $\theta=0^\circ$ $v_o: 10\text{mV/div.}$

(a) Voltage and current waveforms.

(b) v_o vs. i_o relation.

Fig. 12 Dependence of v_o on i_o

としたときの計算結果とよく一致している。

Fig. 13 は内外管電流波高値を 0.2 A 一定として外管電流の位相を変えた場合の外管端子電圧の波形及び周波数依存性を示したものである。これを見ると、電流に位相差があると外管端子電圧は数十 dB 変化し、周波数が高いほど著しいことが分かる。

以上のように、MCP 素子は内外管の電流の振幅あるいは位相に差があると、外管端子電圧が急激に変化し電

(a) Voltage and current waveforms.

(b) v_0 vs. θ relation.

Fig. 13 Dependence of v_0 on θ .

流の振幅、位相検知素子として使用できる。また、周波数に対する依存性が大であることから、層厚、管長、材質を適切に選定すれば良好な帯域通過フィルタとして構成できる可能性が大きい。

3.3 地絡電流検知器への応用

3.3.1 低周波数用 MCP 回路

3.2 節で述べた MCP 素子では大電流を通電することが困難であり、また商用周波数においては振幅、位相特性が顕著に現れない。そこでミューメタルを用い、内管外半径 17.9 mm、外管外半径 19.5 mm、厚さ 1 mm、長さ 199.5 mm の MCP 回路を構成した。

Fig. 14 は外管電流の波高値 4 A、周波数 50 Hz のときの外管端子電圧の内管電流に対する振幅依存性である。これを見ると振幅差に応じて、外管端子電圧が変化することが了解される。したがって、低周波数における振幅、位相検知回路として使用できることが分かる。

3.3.2 地絡電流検知回路

Fig. 15 に製作した地絡電流検知回路を示す。同図において MCPD は MCP 回路による検出器であり、外管端子は増幅器 A に接続されている。地絡事故が発生す

Fig. 14 Outer pipe terminal voltage vs. inner pipe current.

Fig. 15 Diagram of ground fault detection system using MCP.

ると内外管の電流振幅に差を生じるため、外管端子電圧が上昇する。コンパレータ C ではあらかじめ設定された値以上に増幅器 A からの入力が大きくなると、トリップ回路を動作させ系統を遮断する。動作実験では、良好な結果を得た。

4. 結 言

強磁性体を電流路と同時に磁路となるように構成した磁性二重管回路の動作特性を明らかにするとともに、その特性を生かしたパイプライン加熱システム、高周波数用 MCP 素子、低周波数用 MCP 回路について応用例を述べた。前者は実規模実験を終了し実用化の段階に入っている。後者については、その基礎実験を終え応用面での検討を進めている。今後、さらに検討を加え電磁素子として広範な実用に供していく所存である。

文 献

- 1) 北條, 長棟, 山田, 小柳: 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-82-167 (1982).
- 2) 沼沢, 村上, 北條: 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-84-93 (1984).
- 3) 沼沢, 村上, 北條: 日本応用磁気学会誌, 9 (2), 263-266 (1985).
- 4) 堀崎, 山口, 村上, 北條: 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-86-108 (1986).

1986 年 12 月 19 日受理, 1987 年 2 月 23 日採録