

多相交流 ECT の提案
POLYPHASE EDDY CURRENT TESTING

斎藤 兆古
法政大学工学部
Yoshifuru SAITO

College of Engineering, Hosei University

1. まえがき

本稿では従来型 ECT の集中定数モデルを導き、プローブのコイルと検査対象間の磁氣的結合を表す結合係数が大きい程感度が高く、欠損の有無による入力インピーダンスの変化について検討する。次に、従来型 ECT の欠点を補う多巻線型 ECT (プローブのコイルを微細加工技術で作成すればマイクロ ECT) に関する考察を行う。最後に多巻線型 ECT の欠点を補う多巻線・多相交流方式 ECT を提案しその動作原理を説明する。

2. 従来型 ECT

図 1 に示すように導体管の内側に円周方向にコイルを配置し、コイルに電圧 v を印加し電流 i_1 が流れたとする。このとき導体管にレンツの法則に従って i_1 の作る磁束を打ち消す方向に渦電流 i_2 が流れる。図 1 に示されているように、この渦電流 i_2 は一次コイル電流 i_1 と逆方向で平行した経路を流れるであろう。いま、一次コイルの抵抗と自己インダクタンスをそれぞれ R_1, L_1 とし、渦電流 i_2 の流れる二次回路の抵抗と自己インダクタンスを R_2, L_2 とする。さらに、一次と二次回路の相互インダクタンスを M とすれば、

$$\begin{bmatrix} R_1 + (d/dt)L_1 & (d/dt)M \\ (d/dt)M & R_2 + (d/dt)L_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v \\ 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (1)$$

が成り立つ。正弦波定常状態では

$$\begin{bmatrix} R_1 + j\omega L_1 & j\omega M \\ j\omega M & R_2 + j\omega L_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V \\ 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2)$$

と変形される。(2)式から図1は単相変圧器型相互誘導モデルで表されることとなる。入力インピーダンス

$$Z = V/I_1 \dots\dots\dots (3)$$

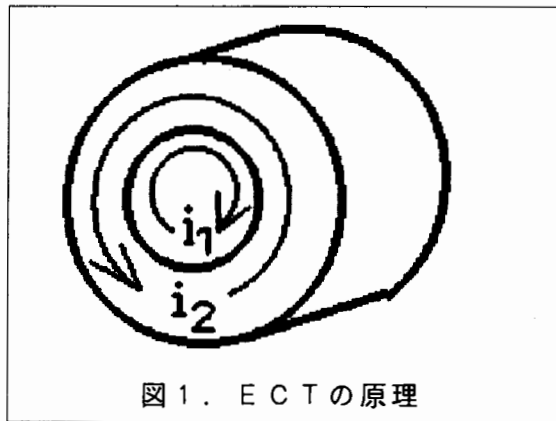


図 1. ECT の原理

を測定し、二次抵抗 R_2 の変化から導体管の欠損を探索する方法が ECT の基本原理である。欠損の有無による入力インピーダンス Z の変化を考察するために、(3)式で二次抵抗 R_2 の極値を考える。二次抵抗 R_2 が充分小さいとき(欠損が無いとき)

$$\lim_{R_2 \rightarrow 0} (Z) = R_1 + j\omega L_1 (1-k^2) \dots\dots\dots (4)$$

となり、二次抵抗 R_2 が非常に大きいとき(欠損があるとき)

$$\lim_{R_2 \rightarrow \infty} (Z) = R_1 + j\omega L_1 \dots\dots\dots (5)$$

となる。従って、次の結論が得られる。結合係数は $1 < k < 0$ であるから、(4)式の欠損が無い場合のインピーダンスは(5)式の欠損がある場合よりも小さく、その変化率は結合係数 k が大きいほど大きい。すなわち 探査感度は結合係数 k の自乗に比例する。入力インピーダンス Z の位相 ψ は(3)式より次式で与えられる。二次抵抗 R_2 が充分小さいとき(欠損が無いとき)

$$\lim_{R_2 \rightarrow 0} (\psi) = \tan^{-1} \{ \omega L_1 (1 - k^2) / R_1 \} \dots\dots\dots (6)$$

となり、二次抵抗 R_2 が非常に大きいとき(欠損があるとき)

$$\lim_{R_2 \rightarrow \infty} (\psi) = \tan^{-1} \{ \omega L_1 / R_1 \} \dots\dots\dots (7)$$

であるから、次の結論が得られる。結合係数は $1 < k < 0$ であるから、(6)式の欠損が無い場合の位相は(7)式の欠損がある場合よりも遅れる。また、その変化率、すなわち 感度は結合係数 k が大きいほど大きい。 $\omega = 2\pi f$ であるから、欠損の有無によるプローブ入力インピーダンス Z の変化は横軸を実数部、縦軸を虚数部として表すと図2となる。角周波数 ω は 電源周波数 f に比例する。また、

欠損の有無によるインピーダンス Z の変化は明らかに角周波数 ω に比例するから、電源周波数 f の高周波化は変化量の幅を広げるため探査感度の向上が期待できる。しかし、これは集中定数モデルであるため導かれる結論であつて、現実の ECT では周波数の増加は表皮効果を顕著なものとするため探査対象である管の外側まで渦電流が浸透せず、周波数の増加による感度の向上は探査範囲の縮小につながる。周波数の増加は浸透深さ(Skin depth)、 $s_d = 2/\sqrt{\omega\kappa\mu}$ を考慮して行う必要がある。ここで

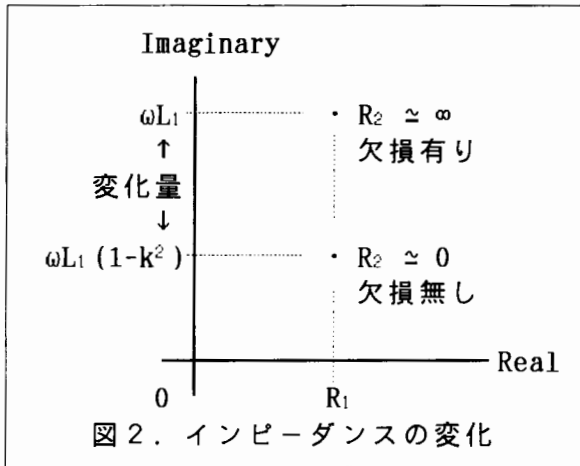


図2. インピーダンスの変化

κ と μ はそれぞれ探査対象の導電率と透磁率であり、 s_d は探査対象表面の磁界が $1/e=1/2.71828$ まで減衰する深さを意味する。従って、探査対象である管の肉厚を d とすれば、 $d \ll s_d$ 、となるためには、電源の周波数は $f \ll 2/(\pi d^2 \kappa \mu)$ でなければならない。従来型 ECT の問題点は大きく分けて二点ある。第一点はプローブの構造と構成が簡単になるが、コイルが管内壁の円周方向に平行して巻いて有るため渦電流も管内壁の円周方向にのみ流れる点にある。これは、渦電流の経路に直交する方向のクラックは渦電流の経路の抵抗 R_2 を増加させるため検出可能であるが、渦電流の経路に平行方向のクラックは渦電流の経路の抵抗 R_2 に殆ど影響しないため検出不可能であることを意味する。換言すれば、検出感度に指向性がある。第二の問題点は、入力インピーダンス Z の大きさと位相変化検出感度はプローブに巻かれた一次コイルと二次コイル(渦電流の流れる経路)間の結合係数 k が大きい程高いが、この結合係数の増加は一次コイルを管の内周に可能な限り接近させて巻く以外に方法が無い点にある。すなわち 検出感度向上のための結合係数増加に上限が決まっている。

3. 多巻線型 ECT

従来型 ECT プローブの問題点の一つは渦電流の経路が円周方向に限定されるため渦電流の経路に平行なクラックの検出が困難な点にある。この問題点を解決

するためには管の円周方向だけでなく軸方向にも渦電流にも流すことを考えなければならぬ。この問題を解決する一方法として、矩形状の一次コイルを管の内壁に貼り付けて通電すれば、渦電流は探査対象物である管壁に一次コイルと逆方向に流れる。このため、管の円周方向と軸方向いずれにも渦電流が流れるから管の軸と円周方向のクラックを検出できる。しかしながら、一次コイルを管の内壁へ貼り付けただけでは探査対象物である管内壁の特定部分のみしか探査できない。このため、一次コイルを管内壁の円周方向へ沿って物理的に回転する必要がある。これは検査時間が長時間になることを意味するが、クラック円周方向の位置を特定化できる利点もある。多巻線型 ECT は管内周に沿って複数個の一次コイルを設けて欠損探査を行うことを意図した方式である。コイルをリソグラフ等を用いて微細加工技術で多数作成すれば欠損の位置および大きさの推定精度向上が期待できる。このように微細加工技術を駆使して作成した多巻線型 ECT がマイクロ ECT の原理である。多巻線型 ECT の最大の欠点は一次巻き線間に相互結合があるため同時に全ての一次コイルに通電できず、個々の一次コイルを独立に通電して測定しなければならない点にある。電子回路を用いて個々のコイルを独立に通電することで高速に測定可能であるように考えられるが、管内に流れる渦電流の緩和時間よりも早くコイル間の通電を行うと以前に通電したコイルによる渦電流が次に通電されるコイルに電圧を誘起する。このため一次コイル通電スキャンニング速度の上限があり、ある一定以上高速に検査することができない。また、欠損探査の精度向上のために一次コイル数を増加する程検査速度も遅くなる。

4. 多相交流 ECT

従来型の ECT は構造が単純であるが感度に指向性がある。これに対して、多巻線型の ECT は円周方向のみならず軸方向のクラックも感知できるが各コイル間で相互結合があるため個々に駆動する必要がある。さらに駆動する電子回路が複雑になり、且つ渦電流の緩和時間のため駆動速度に上限がある。ここでは、多相交流で多巻線を同時に駆動する多巻線・多相交流型 ECT を提案する。一般に多相交流では環状結線方式と星形結線方式があるが、電源と負荷共に平衡状態あるときは零相電圧（各相の瞬時電圧の和）は存在しない。しかし、電源が平衡した多相交流であつても負荷が不平衡（欠損がある場合）であれば零相電圧が発生する。環状結線であればこの零相電圧は循環電流を喚起するが、星形結線であれば中性点電圧となる。電源とコイル間それぞれの中性点を接続すれば零相電流が流れる。従って、星形に結線された多巻線に平衡多相交流電圧を印加し中性点電圧をモニターすれば欠損の有無が推定でき、各相を中性点間で個々に駆動すれば相数（巻線数）に応じた分解能で位置・大きさ等が推定できる。これが多相 ECT (Polyphase Eddy Current Testing, P-ECT)方式の動作原理である。平衡三相電圧は振幅と周波数が等しく位相が互いに $2\pi/3$ ずつ異なる電圧であるから、

$$\left. \begin{aligned} v_a &= \sqrt{2}V\cos(\omega t) &&= \sqrt{2}V\text{Re}(e^{j\omega t}) \\ v_b &= \sqrt{2}V\cos(\omega t - \langle 2\pi/3 \rangle) &&= \sqrt{2}V\text{Re}(e^{j\omega t - j\langle 2\pi/3 \rangle}) \\ v_c &= \sqrt{2}V\cos(\omega t - \langle 4\pi/3 \rangle) &&= \sqrt{2}V\text{Re}(e^{j\omega t - j\langle 4\pi/3 \rangle}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

と書ける。いま、位相を $2\pi/3$ ずつ遅らす演算子、 $a = e^{-j2\pi/3}$ 、を考えて、次の演算を行う。

$$\left. \begin{aligned} V_0 &= (1/3)(v_a + v_b + v_c) \\ V_P &= (1/3)(v_a + a^2 v_b + a v_c) \\ V_N &= (1/3)(v_a + a v_b + a^2 v_c) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

(9)式で、 V_0, V_P, V_N をそれぞれ零相、正相さらに逆相成分の電圧と呼び、(9)式で与えられる平衡三相電圧では $V_0=0, V_P=\sqrt{2}V\text{Re}(e^{j\omega t}), V_N=0$ となり、 v_a に等し

い正相分電圧 V_p のみとなる。各相の瞬時電圧の単純平均で与えられる零相分は回転しないベクトルを表し、正相分は正回転ベクトルを与える成分である。さらに、逆相分は逆回転ベクトルを与える成分を意味する。平衡三相電圧は正回転ベクトル成分のみとなるが、位相や振幅等が平衡三相電圧の条件を満たさないとき、零相分電圧 V_0 や逆相分電圧 V_N も零ではなくなる。このため零相や逆相の電圧をモニターすることで三相電圧の不均衡度が求められる。この関係は三相交流電流においても成り立ち、印加する電圧が平衡三相交流電圧であって負荷も各相で同じ平衡負荷であれば零相と逆相分電流は零となり、正相分電流のみ流れることとなる。しかし、印加する電圧が平衡三相電圧であつても負荷が各相で異なる不平衡負荷では零相電流や逆相電流が存在する。

以上のことから以下の結論が得られる。星型結線した多巻線 ECT に多相交流電圧を印加した場合、負荷が平衡した状態、すなわち 欠損のない場合の全巻線の瞬時電流の総和（零相電流）は零となる。しかし、負荷が不平衡の状態、すなわち 欠損のある場合の全巻線の瞬時電流の総和は零とならない。従って、零相電圧の有無が欠損の有無を表し、それらの大きさが欠損の大きさを表すことを意味する。

空間的に $2\pi/n$ ずつ異なる位置に設けられた同一仕様の n 個のコイルを星型結線し、 n 相平衡交流電圧を印加すると、1) 管の内周に沿って電源角速度で回転する回転磁界が発生する。2) 欠損が無いとき、すなわち 二次の負荷が平衡しているとき、電源とコイルの中性点間に零相電圧は発生しない。3) 管のいずれかにクラック等の欠損がある場合、すなわち 二次の負荷が不平衡であるとき電源とコイルの中性点間に零相電圧が発生する。となり、欠損探査が可能である。

初期実験として、三相巻線型 ECT と従来方式の ECT を試作し、1KHz で入力インピーダンスを測定した。尚、三相形 ECT は零相電圧の代わりに零相インピーダンスを測定した。その結果、従来方式に比較して、約 15% 程度の感度向上が出来た。

5. まとめ

本稿では以下の点について

- 1) 従来型 ECT の集中定数モデル
- 2) 探査感度と結合係数の関係
- 3) 探査範囲と電源周波数の関係
- 4) 多巻線型 ECT の問題点
- 5) 多相 ECT の動作原理

吟味した。その結果、従来型 ECT の動作は集中定数モデルで定性的に説明できること、探査感度の向上はコイルと探査対象を可能な限り密着させ結合係数の増加を図ること、電源周波数の増加は探査深度の低下につながるため Skin Depth を考慮して周波数を決定しなければならない、多巻線 ECT は単純な従来方式の駆動ではコイル間の相互作用と渦電流の緩和時間のため複雑なスイッチング回路を必要とし、さらに探査精度向上のためのコイル数の増加は探査時間の増加となること等を明らかにした。最後に多巻線 ECT の欠点を克服する多相交流で駆動する形式の ECT を提案し、その動作原理と可能性を明らかにした。