配電線の非破壊磁気探傷に関する基礎的検討

学生員 野中 崇* (東北大学), 正員 佐藤 文博 (東北大学), 正員 松木 英敏 (東北大学)

Non-destructive Detection of Cracks in a Distribution Line

Takashi Nonaka, Student member, Fumihiro Sato, Member, Hidetoshi Matsuki, Member
(Tohoku University)

In this paper, we propose a method for detecting cracks non-destructively by measuring the magnetic field around a distribution line. We report experimental and calculated results for the magnetic flux density around the distribution line, and consider the characteristics of the magnetic field distribution around the line. We introduce the parameter ΔL_m that varies with the existence of cracks. We present an algorithm with the parameter ΔL_m for detecting the cracks. We consider the characteristics of the parameter ΔL_m with respect to the way to pair the sensors, the number of the sensors, the current, the radius of the circle formed with the sensors, the depth of the crack and the error of the measurement on the sensors. We confirmed the probability of the non-destructive detection of cracks in a distribution line and discovered the optimum way to pair the sensors and the optimum number of the sensors.

キーワード：配電線，非破壊磁気探傷，探傷アルゴリズム

1. はじめに

今日のエネルギー形態として電気は必要不可欠なものである。その電気を需要家へ送る配電線は、膨大な設備を有し、過酷な自然環境に曝されている。このため、経年的な劣化により、導体表面に傷を発生させる場合がある。しかしながら、今日の配電線は絶縁被覆が施されており、目視にて導体の傷を発見することは不可能である。配電線の劣化状況の把握は、電力の品質の維持・向上およびコストの削減といったことから、重要な課題の一つになっている。

現在ある非破壊検査法として、放射線、超音波および渦電流などを用いた方法⁽¹⁾⁻⁽³⁾が挙げられるが、配電線の探傷を行うにあたり、膨大な設備を対象にすることから探傷のスピードが重要であるとともに、誰にでも扱えるシステムであることを重視した場合、これらの方法は適していないといえる。そこで我々は、配電線の周囲の磁界変化を測定することで探傷する方法を提案し、傷の判別方法について検討を行ったので報告する。

2. 探傷の原理

<2.1> 円周方向磁束密度分布

7本の導線からなる配電線を想定し、そのうち1本に傷がついた場合の磁束密度分布について考える。傷のついた箇所では、電流が残りの傷のない導体部分に流れ込み、近似的に見ると導線の中心軸がずれたようにみえると予想さ

れる。7本の導線の周囲磁束密度 B は、1本の導線について、電流を I 、中心軸からの距離を r としたとき

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi r} I \quad (1)$$

と表せることから、各導線に式(1)を適用し、計算することができる。図1に直径1.4 mmの導線7本において、周波数50Hzの交流電流を25Aとしたとき、傷なし、0°の位置の導体に深さ0.7 mmの傷がある場合および断線した場合における測定半径5.5 mmの円周方向磁束密度分布の計算値と実験値を示す。

図1 7本多導線の円周方向磁界分布

Fig.1 Distribution of the magnetic flux density around the 7 leading wires.

図2に各パラメータの位置を示す。実験では、図3に示すように直径 1.1 mm、巻数が 50 巻のサーチコイルにより誘起電圧として磁界を測定し、ロックインアンプにより 50Hz 成分の磁界のみを取り出している。

図1から傷があることにより、磁束密度は傷正面で小さくなり、傷背面で大きくなることわかる。その差は、50Hz、25A の通電電流の場合において、誘起電圧で約 1.5 μ V、磁束密度で約 0.1mT となり、測定可能な値であるといえる。この磁界変化は配電線の探傷に利用できると考えられる。また、実験値と計算値がほぼ一致することから、配電線の周囲磁界をこの計算方法により求めることができ、探傷アルゴリズムの検討に利用することができる。

<2.2> システム構成

配電線の探傷を行うにあたり、膨大な設備を対象にすることから探傷のスピードを、また、誰にも扱えるシステムであることを重視し、図4に示すようなシステムの構成を考えた。配電線の周囲磁界を測定するセンサは、円形に配

図2 各パラメータの位置
Fig.2 Schematic of parameters.

図3 実験回路図
Fig.3 Schematic of the experiment to measure magnetic flux density around 7 leading wires.

電線の周囲に配置し、配電線にそって移動させる。移動しやすく、扱いやすくするため、センサと配電線は空間的に余裕を持たせる必要がある。また、センサから得られたデータは、パソコンに取り込み解析され、配電線の劣化状況を診断する。

<2.3> 探傷アルゴリズム

本システムでは、センサと配電線の位置関係が不確定であることから、配電線の位置を求める必要がある。図5に示すように、磁界に垂直な直線上に配電線は位置することから、2点の磁束密度 $B_1 (B_{x1}, B_{y1})$ 、 $B_2 (B_{x2}, B_{y2})$ から式(2)より配電線の中心 $C_1 (C_{x1}, C_{y1})$ が求められる。

$$\left. \begin{aligned} C_x &= \frac{B_{y1} \times B_{y2} \times x_1 - B_{x1} \times B_{y2} \times x_2 - B_{y1} \times B_{y2} \times y_2 + B_{y1} \times B_{y2} \times y_1}{B_{x1} \times B_{y2} - B_{x2} \times B_{y1}} \\ C_y &= \frac{B_{y1} \times B_{x2} \times y_1 - B_{y2} \times B_{x1} \times y_2 - B_{y1} \times B_{x2} \times x_2 + B_{y1} \times B_{x2} \times x_1}{B_{x1} \times B_{y2} - B_{x2} \times B_{y1}} \end{aligned} \right\} (2)$$

式(2)を用いて、隣り合うセンサどうしを対にし、2つの磁界ベクトルから配電線の中心座標を求めると、 n 個所に円状に配置した x, y 方向合わせて $2n$ 個の磁界センサより n 個の配電線の中心座標が求まる。図6に以上の方法で求めたシミュレーションによる配電線の中心座標分布の一例を示す。直径 1.4 mm の導線 7 本において、電流 25A、センサ円半径 5.5 mm、センサ配置数 12 での傷なし、 0° の位置の導体に深さ 0.7 mm の傷がある場合について計算しており、原点はセンサ円の中心である。傷のないときは実際の配電線の中心座標と一致し、1 点に定まるが、傷があると 1 点に定まらない。このばらつきを傷の有無の判別に利用できると思われる。

ここで、ばらつきを表すパラメータとして $\angle Lm$ を導入する。図7に示すようにパラメータ $\angle Lm$ は以下のようにして求める。

- ① 各センサの測定データから、式(2)よりセンサ数だけ配電線の中心座標 $C_i (C_{xi}, C_{yi})$ を求める。
- ② 各中心座標から平均の座標 $C_0 (C_{x0}, C_{y0})$ を求める。
- ③ 各中心座標から平均の座標までの距離 $\angle Li$ を求める。
- ④ 距離 $\angle Li$ の中で最も大きいものを $\angle Lm$ とする。

以上よりパラメータ $\angle Lm$ は式(3)のように表される。

図4 システム構成
Fig.4 Schematic of the system for detecting cracks.

図5 センサと配電線の位置関係
Fig.5 Sensors and distribution line.

図6 配電線の中心座標の分布例
Fig.6 Distribution of the positions of the distribution line.

$$\Delta Lm = \max \left\{ \sqrt{(Cx_0 - Cxi)^2 + (Cy_0 - Cyi)^2} \right\}_{i=1 \sim n} \quad (3)$$

$$Cx_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Cxi, Cy_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Cyi$$

図8に直径1.4mmの導線7本において、電流25A、センサ円半径5mm、センサ配置数12での傷なし、0°の導体に深さ0.7mmの傷がある場合のサンプル数100万点に対するシミュレーションにおける ΔLm の分布を示す。シミュレーションでは式(1)をもとに磁界分布を計算し、センサで得られると推測される値から式(2)、式(3)より ΔLm を計算している。また、配電線はセンサ円内にランダムに配置させている。傷の有無により ΔLm の分布が異なり、傷の有無の判別が可能であることがわかる。図8の場合において、

図7 パラメータ ΔLm の定義
Fig.7 Definition of the parameter ΔLm .

図8 ΔLm の分布
Fig.8 Distribution of the parameter ΔLm .

判別基準値 ΔL を0.061mmにしたとき最適となり、サンプル数100万点に対する判別正解率は91.61%となる。

3. シミュレーションによる検討

<3.1> 配電線とセンサの位置関係による影響

図9に配電線とセンサの位置関係による ΔLm の分布を示す。直径1.4mmの導線7本において、電流25A、センサ円半径5mm、センサ配置数12での傷なし、0°の導体に深さ0.7mmの傷がある場合のサンプル数100万点に対する分布を求めている。図10に示すように、配電線が位置する領域を半径0~1, 1~2, 2~2.5, 2.5~2.9mmの4つに区切ってそれぞれの ΔLm の分布を求めている。図9から、それぞれのセンサと配電線の位置関係により ΔLm の分布が異なっていることから、配電線とセンサの位置関係によって、最適な判別基準値 ΔL に変えることが重要といえる。式(3)で求まる配電線の平均中心座標を用いて、配電線が位置する領域半径0~1, 1~2, 2~2.5, 2.5~2.9mmにおいて、判別

基準値 ΔL を 0.047, 0.051, 0.060, 0.080 mm とすることにより, 判別正解率は 94.02% と向上した.

<3.2> 最適なセンサ配置数とセンサ対のとり方

図 11 に配電線の中心座標を求めるときのセンサ対のとり方による ΔL_m の分布を示す. 直径 1.4 mm の導線 7 本に

(a) No crack

(b) Crack

図 9 配電線の位置による ΔL_m の分布
Fig.9 Distribution of the parameter ΔL_m with respect to the position of the distribution line.

図 10 配電線の位置による区分

Fig.10 Section about the position of the distribution line.

おいて, 電流 25A, センサ円半径 5 mm, センサ配置数 12 での傷なし, 0° の導体に深さ 0.7 mm の傷がある場合のサンプル数 100 万点に対する分布を求めており, 各センサに $1 \mu T$ 以下の誤差を含ませている. 対にするセンサの配置間隔が 30, 60, 90, 120, 150, 180° の 6 パターンについて求めた. 120° 以上では分布が広がり, 判別が難しくなっている. 表 1 に最適な判別基準値をとったときの正解率を示す. 対にするセンサの配置間隔が 60° のとき最適となった. ある最適な配置間隔が存在し, 誤差に対する耐性によるものと考えられる. 対にした場所での 2 つの磁界の向きが垂直に近いほど求める中心座標に誤差による影響が少なくなるためである. このため, 最適な配置間隔はセンサ円半径と配電線の位置可能な領域の半径の割合に依存する.

図 12 に対にするセンサの配置間隔が 60° 一定とし, センサ配置数に対する判別正解率を示す. センサ配置数 12 のときが最適となる. これは, 7 本多導体の配電線の構造

(a) No crack

(b) Crack

図 11 ペアにするセンサ配置間隔に対する ΔL_m の分布

Fig.11 Distribution of the parameter ΔL_m with respect to pair the sensors.

に起因していると考えられ、配電線の種類により最適なセンサ配置数が存在すると考えられる。以上から、センサ数をできるだけ少なくすることを考慮した場合、7本多導体の配電線において、センサ配置数 12、対にする配置間隔 60° が最適といえる。

<3.3> 種々のパラメータによる影響

図 13～図 16 にシミュレーションによる電流、センサ円半径、傷の深さおよび誤差に対する判別正解率を示す。電流 25A、導線直径 1.4 mm、センサ円半径 5 mm、センサ配置数 12、対にするセンサ配置間隔 60° 、傷の深さ 0.7 mm、最大誤差 $1 \mu\text{T}$ とし、そこから変化をみている。正解率は、10 万点のサンプルに対して最適な判別基準値をとったときの値である。

図 13 の電流に対する判別正解率から、10A 以下になると判別が困難になることがわかる。配電線の電流値は変電所付近の数百 A から末端の需要家付近の数 A まで幅広いことから、場所に合わせた磁界センサを用いる必要がある。

図 14 のセンサ円半径に対する判別正解率より、センサ円半径は 5 mm 程度が良いといえる。これは、配電線とセン

サとの距離が近い方が傷の有無による磁界変化は大きく、判別しやすいことを示している。しかしながら、あまり近づきすぎると、配電線の中心座標を求めるとき、1本の導体と近似して考えているのに対して、7本多導体である影響が出てくるため、正解率が落ちてくると考えられる。

図 15 の傷の深さに対する判別正解率から、0.5 mm 以上の傷に対しては、90%以上の判別が行えるが、それ以下の傷は検出困難となっている。傷のレベルとして断線前の段階を検出することを考慮すれば、配電線の探傷として十分の能力を持っていると考えられる。

図 16 の誤差に対する判別正解率から、数 μT 以下の誤差に対しては判別が可能であることがわかる。しかしながら、配電線からの距離 5 mm における磁束密度の約 100 分の 1 である $10 \mu\text{T}$ の誤差に対しては、判別が困難であることがわかった。測定機器の精度から $10 \mu\text{T}$ の誤差でも判別可能なシステムにする必要があり、1つのデータの誤差をそのまま反映する可能性の高い最大値を用いているパラメータ ΔL_m の改善が挙げられる。

4. まとめ

配電線の周囲磁界が傷の有無により変化することを確認し、その変化をパラメータ ΔL_m を用いることで判別がおこなえる可能性を確かめた。また、実際の配電線のより線構造について、傷の有無による磁界分布の対称性の変化を探傷手法としていることから原理的に探傷可能と推測されるが、考慮した検討も必要である。

今後の課題として、ハードウェアの磁界測定装置とソフトウェアの探傷アルゴリズムに分けて考えることができる。

検査装置としては、磁界センサ、フィルタおよび測定ロボットの要素機構の検討が挙げられる。磁界センサとしてサーチコイルとホール素子が挙げられるが、サーチコイルは、磁界以外のノイズが入りやすいが、コイルの巻き方に

表 1 対にするセンサ配置間隔に対する判別正解率
Table 1 Accuracy of judgment with respect to pair the sensors.

Angle [$^\circ$]	Judgment value [mm]	Accuracy [%]
30	0.061	91.61
60	0.046	92.69
90	0.038	86.53
120	0.051	72.82
150	0.268	68.90
180	0.158	67.68

図 12 センサ配置数に対する判別正解率

Fig.12 Accuracy of the judgment with respect to the number of the positions to arrange the sensors.

図 13 電流に対する判別正解率

Fig.13 Accuracy of the judgment with respect to the current.

図 14 センサ円半径に対する判別正解率

Fig.14 Accuracy of the judgment with respect to the radius of the circle formed with the sensors.

図 15 傷の深さに対する判別正解率

Fig.15 Accuracy of the judgment with respect to the depth of the crack.

より、同じ位置の2方向の磁界を測定でき、正確な磁界の向きを求められる。ホール素子は磁界のみを測定値とするのでノイズに強いと考えられるが、同じ位置の2方向の測定はできないので、今回用いたパラメータ $\angle Lm$ を用いたアルゴリズムでは、補正が必要となる。また、裂傷のような幅の狭い傷に対して、センサの大きさが重要であり、センサの小型化が要求される。フィルタについては、今回の実験ではロックインアンプにより50Hzの磁界のみ取り出したが、実用的には、バンドパスフィルタが必要になるといえる。測定ロボットについては、架線上での探傷であり、高圧配電線にも対応する上で重要であるといえる。

探傷アルゴリズムとしては、傷の深さや位置の判定も望まれる。傷の深さ、位置については新たなアルゴリズムの開発が求められる。また、近似や補間といったデータの補正により誤差に強いアルゴリズムを開発する必要がある。

(平成12年7月3日受付、平成12年11月17日再受付)

図 16 誤差に対する判別正解率

Fig.16 Accuracy of the judgment with respect to the error.

文 献

- (1) 石井 勇五郎：非破壊検査工学，p.139-141（産報出版，1973）
- (2) 魚本 健人，加藤 潔，広野 進：コンクリート構造物の非破壊検査，p.8，24（森北出版，1990）
- (3) 山崎 弘郎：異状の検出と予知，p.41-54（工業調査会，1988）

野中 崇

（学生員）1973年6月13日生。1999年3月東北大学工学部電気工学科卒。同年4月東北大学大学院工学研究科電気・通信工学専攻博士前期課程に入学，現在に至る。日本応用磁気学会会員。

佐藤 文博

（正員）1972年8月14日生。2000年3月東北大学大学院工学研究科電気工学専攻博士後期課程修了，工学博士。同年4月東北大学大学院工学研究科助手，現在に至る。主として生体電磁工学の研究に従事。日本応用磁気学会，日本ME学会，照明学会，IEEE会員

松木 英敏

（正員）1950年11月30日生。80年3月東北大学大学院工学研究科電気及通信工学専攻博士後期課程修了，工学博士。同年4月東北大学工学部助手，85年7月同助教授，98年2月同大学大学院工学研究科教授，現在に至る。主として生体電磁工学の研究に従事。日本応用磁気学会，電子情報通信学会，日本ME学会，日本人工臓器学会，日本生体磁気学会，日本ハイパーサーミア学会，日本放射線学会，計測自動制御学会，照明学会，IEEE会員。