配電線非破壊磁気探傷のセンサ配置に関する基礎的検討

Sensor arrangement for nondestructive detection in distribution line

吉見 秀幸・野中 崇・佐藤 文博・松木 英敏・佐藤 忠邦*

東北大学大学院工学研究科, 仙台市青葉区荒巻字青葉 05 (〒980-8579)

*株式会社トーキン, 仙台市太白区郡山 6-7-1 (〒982-8510)

Hideyuki Yoshimi, Takashi Nonaka, Fumihiko Sato, Hidetoshi Matsuki, and Tadakuni Sato*

Graduate School of Engng., Tohoku Univ., Aoba 05, Aramaki, Aoba-ku, Sendai 980-8579

*Tokin Corp., Koriyama 6-7-1, Taihaku-ku, Sendai 982-8510

We already devised a method for detecting cracks nondestructively by using direction of the magnetic field measured by the ring arranged with the sensors. However, cracks cannot be detected when the ring arranged with the sensors leans to the distribution line. We devise detecting cracks, even if the ring arranged with the sensors leans to the distribution line. We introduce a parameter ΔLm and standard deviation that vary with the existence of cracks and confirmed the probability of the nondestructive detection with ΔLm and standard deviation.

Key words: distribution line, nondestructive detection, sensor, standard deviation, Euler angle

1. はじめに

我々の日常生活において、電気は必要不可欠なものとなっている。電気は発電所で作られ、送電線、変電所、配電線、電柱上の変圧器をたどって家庭へ届けられる。これらの電気設備のうち配電線は、風雨や経年的な劣化などにより導体内部に傷が生じることがある。しかし、配電線は絶縁被膜が施されており目視によって傷を発見することはできない。現在、活線状態で傷を検出する有効な方法がなく配電線を定期的に交換するしか方法がない。その場合、まだ十分使用可能な配電線の取替えを実施したり、取替えが遅れて事故を発生させてしまう等の問題があり、また、作業コストもかかってしまう。そこで、配電線の傷を非破壊で検出するために、配電線の周囲に分布している磁界から配電線の傷の有無を判別する方法について検討する。今回、磁界を測定するセンサを配置した円が配電線に対して傾いた場合について検討した。ここで取り上げるのは、比較的構造が簡単な7本の配電線について検討する。

2. 非破壊磁気探傷の原理

2.1 傷の判別方法

周囲の磁界を測定するセンサは円周上、等間隔に n ケ所設置する。センサによって得られる磁界の測定値から配電線の中心位置を推定し、傷の検出を行う原理については既に提案している¹⁾。

すなわち、傷が無い場合、Fig. 1 のように X, Y 方向の磁界 B_1 , B_2 の向きと、センサと配電線の中心位置 $C(Cx, Cy)$

$$\left. \begin{aligned} Cx &= \frac{B_{1x} \times B_{2y} \times x_1 - B_{2x} \times B_{1y} \times x_2 - B_{1y} \times B_{2x} \times y_2 + B_{2y} \times B_{1x} \times y_1}{B_{1x} \times B_{2y} - B_{2x} \times B_{1y}} \\ Cy &= \frac{B_{1y} \times B_{2x} \times y_1 - B_{2y} \times B_{1x} \times y_2 - B_{1x} \times B_{2x} \times x_2 + B_{2x} \times B_{1x} \times x_1}{B_{1y} \times B_{2x} - B_{2y} \times B_{1x}} \end{aligned} \right\} (1)$$

を通る直線は直角になり、配電線の中心位置 $C(Cx, Cy)$ は (1) 式で表すことができるのに対し、一方、配電線に傷がある場合はその中心位置がばらつくことを利用し傷の有無の判別を行おうとするものである。しかしながら、配電線には弛みがあり、しっかりとセンサ配置円と配電線を直交させることは困難である。そこで、センサ配置円が配電線に対して傾いた場合について検討した。

Fig. 2 にセンサ配置円が配電線に対して傾いた場合の傾きを表す。X'-Y' 平面は、配電線に垂直な平面であり、Z' 軸に配電線を平行になるように設置し、オイラー角 α , β , γ を用いてセンサ配置円の傾きを表す²⁾。 α は、座標面 0-XY と座標面 0-X'Y' の交線 g と座標軸 0-X とのなす角で、 β は、交線 g と座標軸 0-X' とのなす角で、 γ は、座標軸 0-Z と 0-Z' とのなす角である。傾いたセンサ配置円は X-Y 平面にあるとする。Fig. 3 に、Fig. 2 を X'-Y' 平面、つまり、配電線に垂直な平面から見た場合を示す。センサ配置円を X'-Y' 平面に投影するとセンサ配置円は楕円と考えることができる。配電線の中心位置 (x, y) 、センサとセンサ配置円中心との距離 r' 、配電線の中心位置とセンサとの距離 r'' 、 r'' と配電線の中心位置から交線 g に平行な直線とのなす角を ϕ とする。

Fig. 1 Position of the distribution line.

センサ配置円が配電線に対して傾いた場合の傷の有無の判別方法は、Fig. 3 に示すように交線 g 、その直角方向 h の磁界 B_g 、 B_h を求めることによって、センサから得られる磁界の向きとセンサと配電線の中心位置 $C(C_x, C_y)$ を通る直線は直角になるので(1)式で表すことができ、配電線の中心位置 $C(C_x, C_y)$ が求められることがわかる。したがって、配電線に傷がない場合は配電線の中心位置が1点に定まり、配電線に傷がある場合は配電線の中心位置がばらつくので傷の有無の判別に利用できる。

2.2 配電線の周囲磁界の計算

センサで測定できる磁界 B_x 、 B_y 、 B_z と g 、 h 方向の磁界 B_g 、 B_h を求める。

センサで測定できる磁界 B_x 、 B_y 、 B_z は、

$$\left. \begin{aligned} B_x &= B (\sin \phi \cos \alpha + \cos \phi \cos \alpha \sin \gamma) \\ B_y &= B (-\sin \phi \sin \alpha + \cos \phi \cos \alpha \cos \gamma) \\ B_z &= B \cos \phi \sin \gamma \end{aligned} \right\} (2)$$

となり、 g 、 h 方向の磁界 B_g 、 B_h は、

$$\left. \begin{aligned} B_g &= B \sin \phi \\ B_h &= B \cos \phi \end{aligned} \right\} (3) \quad B = \frac{\mu_0}{2\pi r} I \quad (4)$$

となるので、(2)式と(3)式を比較して、

$$\left. \begin{aligned} B_g &= B_x \cos \alpha - B_y \sin \alpha \\ B_h &= \frac{B_x \sin \alpha + B_y \cos \alpha}{\cos \gamma} \end{aligned} \right\} (5)$$

となる。

次に、 α を求める。(2)式で $B_z = 0$ のとき

$$\left. \begin{aligned} B_x &= B \cos \alpha \\ B_y &= -B \sin \alpha \end{aligned} \right\} (6)$$

Fig. 2 Inclination of a ring arranged with sensors.

Fig. 3 X'-Y' plane.

となるので、傾き α は、

$$\alpha = -\tan^{-1} \left(\frac{B_y}{B_x} \right) \quad (7)$$

となる。

次に、配電線とセンサ配置円との傾き γ を求める。(2)式で $B_y = 0$ のとき

$$\frac{B_x}{B_z} = \frac{1}{\tan \gamma} \left(\sin \alpha + \frac{\cos^2 \alpha}{\sin \alpha} \right) \quad (8)$$

となるので、傾き γ は

$$\gamma = \tan^{-1} \left\{ \frac{B_z}{B_x} \left(\sin \alpha + \frac{\cos^2 \alpha}{\sin \alpha} \right) \right\} \quad (9)$$

となる。このようにしてセンサで測定できる磁界 B_x 、 B_y 、 B_z から g 、 h 方向の磁界 B_g 、 B_h を求め配電線の中心位置が求まり、配電線に傷が無い場合は配電線の中心位置が1点に定まり、配電線に傷がある場合は配電線の中心位置がばらつくので傷の有無の判別に利用できる。

3. $\angle Lm$ と標準偏差の導入

配電線の中心位置のばらつきをパラメータ $\angle Lm$ と標準偏差を用いて表し、傷の有無を判別する方法について検討した。

パラメータ $\angle Lm$ を使って配電線の傷の有無を判別する方法は、Fig. 4 に示すように、各センサで得られた配電線の中心位置 $C_i(Cx_i, Cy_i)$ 、その各センサで得られた配電線の中心位置の平均 $C_0(Cx_0, Cy_0)$ より、

$$Cx_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Cx_i, \quad Cy_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Cy_i \quad (10)$$

$$\angle Lm = \max \left| \sqrt{(Cx_0 - Cx_i)^2 + (Cy_0 - Cy_i)^2} \right| \quad (11)$$

で表される。

標準偏差を使って配電線の傷の有無の判別を行う方法は、分散 σ_x^2 、 σ_y^2 が、

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Cx_i - Cx_0)^2, \quad \sigma_y^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Cy_i - Cy_0)^2 \quad (12)$$

となるので標準偏差 σ を

$$\sigma = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \quad (13)$$

と定義する。

Fig. 4 Schematic of $\angle Lm$.

4. シミュレーションによる検討

4.1 傷の有無による配電線の位置の分布

7本のうち1本に傷がある場合を考える。1本の導線の周囲磁束密度 B は、(4)式で表され、7本の場合は各導線に式(4)を適用し、それぞれの磁束密度の和として表現できる。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とみなせることからFig. 5に示すように傷のついた導線の位置が移動したとして計算できる。

Fig. 6は、半径1 mmの導線7本の配電線において、配電線とセンサ配置円との傾き $\gamma = 10^\circ$ 、 $\alpha = 10^\circ$ 、電流25 A、センサ配置円半径10 mm、センサ数12での傷無しと傷のある場合での配電線の中心位置の分布を示す。傷のある場合は、Fig. 5のように傷のある導線の中心が左に0.5 mmずれたと仮定した。傷の無い場合は、実際の配電線の中心位置(1,1)と一致し1点に定まるが、傷があると1点に定まらずばらつくのでこのばらつきを傷の有無の判別に利用できる。

4.2 傾きによる判別正解率

配電線とセンサ配置円が直交した場合に用いられる方法がどれだけセンサ配置円が配電線に対して傾いた場合に適用できるか検討した。Fig. 7は、配電線とセンサ配置円との傾き γ を変えた場合の判別正解率を示した。判別正解率とは、傷がある場合と無い場合の配電線の中心位置1万点をランダムに決め、(2)式を使って磁界 B_x, B_y, B_z を求め、その B_x, B_y を(1)式に代入し、(11)式により $\angle Lm$ を求め、あらかじめ決めておいた判別値から傷の有無の判定をし正解した確率である。配電線とセンサ配置円の傾き $\gamma = 4^\circ$ まではセンサで測定した磁界 B_x, B_y から配電線の傷の判別が行えることがわかる。

Fig. 5 Schematic of the way to calculate the magnetic flux density around the distribution line with cracks.

Fig. 6 Distribution of the positions of the distribution line.

Fig. 7 Accuracy of the judgement with respect to γ .

5. 実験による検討

5.1 センサで測定できる磁界の検討

実験では、Fig. 8のように断面積 5.5 mm^2 のケーブルを7本束ねたものを配電線とみなし、センサ配置円半径16 mm、配電線の中心位置をセンサ配置円の中心とし、配電線とセンサ配置円の傾き $\gamma = 30^\circ$ 、電流25 A、 $\alpha = 0^\circ$ と $\alpha = 45^\circ$ とした場合のセンサで測定できる磁界をホール素子を用いたガウスメータ（電子磁気工業(株)製、GM-4001）で測定した。また、Fig. 9に示すようにセンサと交線 g のなす角をAngleとした。Fig. 10にガウスメータで測定した場合と(2)式から計算した場合を示す。計算値と実測値がほぼ一致していることがわかる。このことから配電線がセンサ配置円に対して傾いている場合の磁界 B_x, B_y, B_z を計算によって求めることができる。

Fig. 8 Schematic of the experiment to measure the magnetic flux density around the distribution line.

Fig. 9 Schematic of the Angle.

Fig. 10 Experimental and calculated results for the magnetic flux density around the distribution line.

5.2 $\angle Lm$ と標準偏差の比較

配電線に傷が無い場合と素線 1 本が断線した場合の $\angle Lm$ と標準偏差を求めたのが Fig. 11 である。測定点を覚えて 5 回測定し、横軸 Data number を測定番号とした。断面積 5.5 mm^2 のケーブルを 7 本束ねたものを配電線とみなし、センサ配置円半径 16 mm 、配電線の中心位置をセンサ配置円の中心とし、配電線とセンサ配置円の傾き $\gamma = 30^\circ$ 、電流 25 A 、 $\alpha = 0^\circ$ とした場合で、磁界を測定するセンサとしてガウスメータよりも精度のよいサーチコイルを用いてロックインアンプで測定した。Fig. 11 から、 $\angle Lm$ の値が 3.5 mm 以上で、標準偏差が 2.0 mm 以上で配電線が断線していると判断できる。

6. まとめ

シミュレーションによって、センサで測定した磁界 Bx , By の向きを利用して配電線の中心位置を求め、 $\angle Lm$ を使う方法、つまり、配電線とセンサ配置円が直交する場合に用いられる方法は、センサ配置円が 4° 傾いた場合には適用できないので今回検討した Bx , By , Bz の 3 方向の磁界を使った方法を用いる必要があることが分かった。

また、配電線の周囲磁界を実験で測定した場合と計算値

Fig. 11 Distribution of $\angle Lm$ and σ .

を比較してほぼ一致することが確認できた。

また、磁界を測定するセンサを配置した円が配電線に対して傾いている場合でも $\angle Lm$ あるいは標準偏差を用いて配電線の断線の検出を行えることがわかり、配電線非破壊磁気探傷システムの構築の可能性を示すことができた。しかしながら、実際の配電線では、測定値に対して補正を行う必要がある。

今後の課題は、磁界を測定するためにサーチコイルを用いたが、裂傷のような幅の狭い傷に対して、また、検出精度を良くするためには、測定誤差が少なく小型の磁界センサの検討が必要である。また、 $\angle Lm$ あるいは標準偏差という方法では測定誤差が大きくなると傷の有無の判別が困難なのでどの程度まで適用できるか、また、配電線を取り替えなければならない程度の傷の大きさを検討する必要がある。

文 献

- 1) T. Nonaka, F. Sato, H. Matsuki, Trans. IEE Japan, 121-A, 282-287 (2001).
- 2) T. Niwa : Theory of a differential equation and a dynamics system, p.11 (Yuseisha, Tokyo, 1998).

2001 年 10 月 5 日受理, 2002 年 1 月 17 日採録