Examination of the Detection Parameter for a Nondestructive Crack Detection System for Distribution Lines

G. Owada, T. Nonaka*, F. Sato, H. Matsuki, and T. Sato**

Graduate School of Engineering, Tohoku Univ., 6-6-05 Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai 980-8579, Japan

*Electrical and Computer Engineering, Hachinohe National College of Technology.

16-1, Uwanotai, Tamonoki, Hachinohe, Aomori, 039-1192 Japan

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

Our study has proposed a method of nondestructive crack detection using the estimated centers of the cracks calculated from the magnetic field around a distribution line. A magnetic field is distributed in a concentric pattern around a distribution line without any cracks. Therefore, all lines that are perpendicular to the magnetic field direction around such distribution line should intersect at one point, namely, the center of the distribution line. Around a distribution line with cracks, however, these lines will not intersect at one point, because of distortion in the distribution of the magnetic field. This difference can be used detection of cracks in distribution lines. It enables real-time crack detection without imposing specific restrictions on the positions of sensors and the distribution line. In this paper, we examine the optimum pair of sensors for calculating the estimated centers of cracks in order to detect cracks in a distribution line that consists of seven conductive wires. We tested with different depths of crack and considered whether the system could detect cracks automatically.

Key words: distribution line, nondestructive crack detection

配電線非破壊探傷法における検出パラメータに関する検討

大和田 吾一・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電気・通信工学専攻, 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05 (〒980-8579)

*八戸工業高等専門学校電気情報工学科, 青森県八戸市大字田面木字上野平 16-1 (〒039-1192)

**NEC トーキン株式会社, 仙台市太白区郡山 6-7-1 (〒982-8510)

1. はじめに

電力を需要家に送る架空配電線は苛酷な自然環境に晒されている。そのため雨水等の水分が浸入し導体が酸化し、張力により強度が低下した酸化部分にひび割れが生じて（応力腐食断線）しまうことがある。これらの傷は絶縁・保護被覆が施されているため、目視による探傷が出来ないこと、膨大な配電線を対象とすることから新たな非破壊探傷システムの構築が必要となっている。現在我々は配電線の周囲磁界分布を用いて配電線内部にある傷を検出する方法を検討している^{1)~5)}。この方法は配電線周囲に生じる磁界分布から中心位置座標を複数求め、それらの分布のばらつき具合を調べることで傷の有無を判別する。そのため導線と周囲磁界検出器の位置ずれに依存しない方式である。検出器を配電線に沿って走査させることで探傷を行うことを考えたとき、配電線と検出器には空間的な余裕を持たせる必要がある。本システムは磁界のベクトルを用いて中心位置座標を求めているため、配電線と磁気センサとの位置ずれに強く、配電線を対象とした探傷に有効であると考えられている。

本論文では素線 7 本多導線から構成される配電線を対象とした傷検出について検討した。実際の検出を行うことを想定し、配電線とセンサの位置関係、センサの測定誤差を考慮したシミュレーションを用いて、中心位置を求める際に用いるセンサの組み合わせを変化させ、配電線とセンサ

リングの位置ずれやセンサの測定誤差に強いセンサの配置について検討した。また配電線の傷の深さを変化させたシミュレーションから、傷の有無が自動的に判別可能なシステムの可能性について検討を行った。

2. 探傷の原理

2.1 周囲磁束密度ベクトルを用いた中心位置座標の推定

Fig. 1 に探傷原理の概要を表す。配電線に磁気センサを搭載させたリングを取り付け、配電線架線方向に沿って走査させることでそれぞれの位置における配電線周囲磁界分布を測定する。配電線に傷がない場合、周囲に生じる磁束密度は同心円状の分布を示すのに対し、傷がある場合は傷の位置における磁束密度の分布が崩れゆがみが生じてしまうと考えられる。そこで Fig. 2 に示すようにセンサから測定される磁束密度から配電線の中心座標を推定する。センサリングの中心を原点としたとき、センサの位置における磁束密度ベクトルに垂直な直線の交点の座標 (C_x , C_y) は、2 つのセンサの位置 (x_1 , y_1), (x_2 , y_2) とそれぞれの磁束密度ベクトル $B_1(B_{x1}, B_{y1})$, $B_2(B_{x2}, B_{y2})$ を用いて式(1)から求めることが出来る。3 つのセンサを用いた時、センサの組み合わせを変化させて 3 つの交点を求めることが出来る。配電線に傷がない場合は求まる交点は全て等しく配電線の中心位置と一致する。一方傷がある場合は交点にばらつきが生じる。これらの交点のばらつきから傷の有無を判別する。

$$\left. \begin{aligned} Cx &= \frac{Bx_1 \cdot By_2 \cdot x_1 - Bx_2 \cdot By_1 \cdot x_2 - By_1 \cdot Bx_2 \cdot y_2 + By_1 \cdot Bx_2 \cdot y_1}{Bx_1 \cdot By_2 - Bx_2 \cdot By_1} \\ Cy &= \frac{By_1 \cdot Bx_2 \cdot y_1 - By_2 \cdot Bx_1 \cdot y_2 - Bx_1 \cdot Bx_2 \cdot x_2 + Bx_1 \cdot Bx_2 \cdot x_1}{Bx_2 \cdot By_1 - Bx_1 \cdot By_2} \end{aligned} \right\} (1)$$

現在複数の交点のばらつきを表すパラメータとして面積を用いたパラメータ S_{max} が用いられている. Fig. 3 に示すように, 求まる複数の交点のうち 3 点を結ぶことで形成されるすべての三角形において, 最大の三角形の面積を S_{max} とし, 交点のばらつきをあらわすパラメータとする. S_{max} は複数の交点(C_{xi} , C_{yi})を用いて式(2)から計算することが出来る. なお三角形の面積を求める際に式(2)ではヘロンの公式を用いている. 傷の位置では交点がばらつくことから S_{max} は高くなると予想される.

$$S_{max} = \max \left| \sqrt{\frac{l_0(l_0 - 2l_{ij})(l_0 - 2l_{jk})(l_0 - 2l_{ki})}{4}} \right|_{i,j,k=1 \sim n}$$

$$l_{ij} = \sqrt{(Cx_i - Cx_j)^2 + (Cy_i - Cy_j)^2} \quad i \neq j$$

$$l_0 = l_{ij} + l_{jk} + l_{ki} \quad \dots(2)$$

2.2 単導線架線方向における S_{max} 分布

3次元電磁場解析ソフトウェアを用いて, センサリングの中心位置に単導線が位置している場合を例に, 配電線架線方向の各位置における S_{max} を計算したグラフが Fig. 4 となる. 単導線は直径 9.2 mm とし, 配電線架線方向を Location z とし, $z=0$ mm に深さ 3 mm, 幅 0.5 mm の傷を作成した. 電流は 50 A とし, 直径 10 mm のリングに 6 つの磁気センサを等間隔に配置した. 交点を求める際に用いるセンサの組は隣り合うセンサ, つまり 60° 間隔で配置されているセンサを組とした. そのため各位置において求まる交点の数は 6 点となる. グラフから傷の位置($z=0$ mm)でパラメータ S_{max} のピークが確認できる. 傷の位置では求まる 6 つの交点にばらつきが生じ, S_{max} の値が高くなっていることが分かる. センサリングの直径を変化させたときの傷の位置における S_{max} の値を示したグラフを Fig. 5 に示す. リング径が小さいと傷による周囲磁界の変化を大きく検出することが出来, パラメータ S_{max} の変化が大きくなることから, リング径は出来るだけ小さくするのが望ましい.

3. 7本多導線における S_{max} 分布

3.1 配電線周囲磁束密度の計算方法

7本多導線で構成される配電線を対象とし, 傷の位置において配電線とセンサリングの位置関係が変化したときの S_{max} 分布を求めるために, Fig. 6 に示すような傷の深さを考慮した簡易的なモデルを考える. 配電線に傷がある場合, 傷を持つ素線の断面積は小さくなり, その重心位置は配電線内側へシフトする. そこで傷の位置では傷がある素

Fig. 1 Scheme of a system for detecting cracks.

Fig. 2 Magnetic field distributions around the line.

Fig. 3 Definition of parameter S_{max} .

Fig. 4 Distribution of S_{max} at each location z .

Fig. 5 S_{max} at the location of a crack with respect to the ring diameter.

線の重心位置と同じ面積を持つ傷のない素線があるとみなして周囲磁界を計算する。その際各素線内の電流は電流密度分布がすべて等しくなるように分配する。このモデルを用いて傷の有無における S_{max} の値を計算した。Fig. 7 にシミュレーションの概要を示す。素線直径 1.4 mm の 7 本多導線に深さ 0.7 mm, 幅 0.5 mm の傷を 1 点作成し、配電線電流を 25 A としたときの各センサ位置における磁束密度を計算する。センサリングは半径 5.5 mm, センサ数を 6 とし、各センサ位置における磁束密度は 7 本の素線が作る磁束密度の和とし、アンペールの法則を用いて計算した。さらに配電線がセンサリングの中心にある時、センサ位置における磁束密度は約 0.1mT であることから、測定誤差として乱数を用いて $1 \mu\text{T}$ 以下の誤差を各センサに含ませている。交点を求める際に用いるセンサの組み合わせは隣り合うセンサ同士、つまり 60° 間隔で位置しているセンサを組とした。そのため 1 回の計算で求まる交点の数は 6 点となる。乱数を用いて配電線の中心がセンサリング内を 1 mm 以内でランダムに位置したときの S_{max} をサンプル数 10 万点で計算を行った。得られた S_{max} を値の大ききで分類し傷の有無における S_{max} の分布を求めた結果が Fig. 8 となる。グラフから傷がある場合は傷がない場合に比べて高い値で S_{max} が分布していることが分かる。

3.2 判別値 S_c の導入

傷の有無を自動的に判別することを考え、判別値 S_c を導入する。 S_{max} が S_c よりも低い値のとき傷がないと判定し、 S_{max} が S_c よりも高い値のときは傷があると判定する。

Fig. 6 Simple model of a distribution line with a crack.

Fig. 7 Scheme of the distribution line consists of seven conductive wires and the sensor ring.

Fig. 8 Distributions of S_{max} at 100,000 times measurement (crack depth' 0.7 mm, crack width' 0.5 mm)

Fig. 9 Error rate of judgment using the judgment value S_c .

(a) No crack

(b) Crack

Fig. 10 Error rate with respect to the pair of sensors.

先ほどの各 10 万回の計算結果から得られた傷の有無における S_{max} を、ある判別値 Sc を用いて判定し、その中から傷の有無を誤って判定したときの確率をエラー率と定義し、判別値 Sc を変化させてエラー率を求めた結果が Fig. 9 となる。傷がない場合、傷がある場合それぞれの分布の交点における S_{max} の値を判別値 Sc としたとき、エラー率が最も低くなり、最適な判別値であることが分かる。この最適判別値 Sc によるエラー率は 13.5% であった。

3.3 センサの組み合わせを変化させたときの検討

前回の計算では交点を求める際に用いるセンサの組み合わせを 60° 間隔に配置されたセンサとしたが、組み合わせを変化させて傷の有無による S_{max} の分布を計算した。用いる配電線は前回同様とし、センサは半径 5.5 mm のリングに 12 個を等間隔に配置することを想定した。このとき交点を求める際に用いるセンサの組み合わせは組にするセンサ間隔が 30° , 60° , 90° , 120° , 150° , 180° の 6 パターンがあり、すべての組み合わせにおいて、1 回の測定で求まる交点の数は 12 となる。結果を Fig. 10 に示す。前回と同様、各組み合わせにおける傷がある場合と傷がない場合の分布の交点を最適判別値 Sc として傷の有無を判定したとき、センサの組み合わせが 60° 間隔のとき最も低いエラー率 5.2% で傷を判定することが出来た。

3.4 センサ数を変化させたときの S_{max} 分布

交点を求める際のセンサの組み合わせを 60° 間隔に固定し、リングに搭載するセンサ数を変化させて各最適判別 Sc における傷判定を行ったときのエラー率を計算した結果を Fig. 11 に示す。用いる配電線、センサの位置ずれ、測定誤差、測定回数は前回同様とし、センサ数は半径 5.5 mm のリングにそれぞれ 6, 12, 18, 24, 30 とした。グラフからセンサ数を増やすことでエラー率を小さくすることが出来るが、センサ数が 6 から 12 になったときエラー率が約 7% 低くなったのに対し、センサ数を 12 個以上増やしてもエラー率があまり変化しないことが分かる。

3.5 傷の深さにおける S_{max} 分布

センサの個数を 12 とし、組にするセンサを 60° としたとき、傷の深さを変化させたときの S_{max} 分布を Fig. 12 に示す。傷の深さは直径 1.4 mm の素線に対して 0.35 mm, 0.7 mm, 1.05 mm, 1.4 mm とした。グラフから傷が深くなると、 S_{max} もより高い位置で分布することが分かる。そのため傷がないときの S_{max} の交点である最適判別値 Sc の値も大きくなることから、各最適判別値 Sc を用いることで傷の深さに応じた傷検出の可能性が考えられる。

4. まとめ

今回の検討から、配電線周囲に生じる磁束密度を用いて中心位置を求め、中心位置のばらつきの違いから傷を検出する方法が、配電線とセンサの位置ずれに強く、配電線の

傷探傷に有効であることが確認できた。7 本多導線からなる配電線の傷の検出を行うことを想定した場合、用いるセンサの配置構造を簡略化されたモデルを用いたシミュレーションから検討し、センサ数が 12 のときは交点を求める際のセンサの最適な組み合わせ角度は 60° であることが分かった。また判別値 Sc を用いることで自動的に判別可能な探傷アルゴリズムの可能性を示した。センサ数を増やすことでより高い正解率で傷の有無の判定が可能となるが、センサリングは出来るだけ小さくすることが望ましい。そこでリングを複数枚配置することでリングの直径を変えることなく実質的にセンサ数を増やし、各センサリングから得られるデータを用いて、より正確に傷の検出が出来るシステムの構築が今後の検討課題として考えられる。

Fig. 11 Error rate of judgment using the optimum judgment value, Sc for various numbers of sensors

Fig. 12 Distributions of S_{max} with respect to the depth of crack.

References

- 1) T. Nonaka, F. Sato, H. Matsuki and T. Sato: *IEEE Trans. on Magn.*, 37, pp. 2746-2748(2001).
- 2) T. Nonaka, F. Sato and H. Matsuki: *Trans. IEEJ*, 121-A, pp. 282-287(2001).
- 3) T. Nonaka, H. Yoshimi, F. Sato, H. Matsuki, and T. Sato: *IEEE Trans. on Magn.*, 38, pp. 3321-3323(2002).
- 4) T. Nonaka, H. Yoshimi, F. Sato, H. Matsuki, and T. Sato: *IEEE Trans. Magn.*, 39, pp. 3346-3348(2003).
- 5) G. Owada, T. Nonaka, F. Sato, H. Matsuki, and T. Sato: *IEEE Trans. on Magn.*, 43, pp. 2761-2763(2007).

2007年10月4日受理, 2009年3月4日採録