

平成 21 年 6 月 12 日現在

研究種目：若手研究(B)
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18760311
 研究課題名（和文） 配電線の非破壊磁気劣化診断システムの開発
 研究課題名（英文） Development of Magnetic Nondestructive Detection System of Crack in Distribution Line
 研究代表者
 野中 崇 (NONAKA TAKASHI)
 八戸工業高等専門学校・電気情報工学科・助教
 研究者番号：00390386

研究成果の概要：配電線劣化は、電力産業において重要な課題となっている。被覆のため、目視点検は不可能であり、確実な非破壊劣化診断技術が急務である。配電線は膨大な設備であることから検査スピードが重要であり、停電させることなく活線状態で検査できること必要である。周囲磁界分布から診断を行う方法及び渦電流試験の 2 つの方法を併用した劣化診断システムを提案し、その実用化を目的とした開発を行い、試作機において、幅 0.2 mm、深さ 1 mm の傷の検出が可能であることを確認した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,300,000	0	1,300,000
2007年度	1,100,000	0	1,100,000
2008年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,900,000	150,000	3,050,000

研究分野：電気電子工学

科研費の分科・細目：計測工学

キーワード：非破壊検査, 配電線

1. 研究開始当初の背景

配電線の導体は、内部に侵入する水分により酸化し、強度が低下するため、配電線にかかる引張応力により、亀裂が生じ、最終的に断線に至る。このような断線を応力腐食断線といい、配電線劣化原因となっている。電力産業において、この劣化状況の把握は、電力品質やサービスの向上、コスト低減などから、最も重要な課題のひとつであり、配電線は絶縁・保護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ことから、より確実な非破壊劣化診断技術が急務と

なっている。また、積雪寒冷地である東北においては着雪や強風による影響により、劣化及び断線に至る場合も多い。配電線における検査は、配電線は膨大な設備であることから検査スピードが重要であること、サービス面から停電させることなく活線状態での検査であることが必要な条件である。また、絶縁保護被覆が施されていること、導体が撚り線構造であることなど非破壊検査対象として複雑な構成をしており、従来の非破壊検査技術だけでは対応できない。本研究は、それらの要件を満たす方法として、周囲磁界分布から

ら診断を行う方法及び渦電流試験の2つの方法を併用した劣化診断システムを提案し、その実用化を目的とした開発を行うものである。

2. 研究の目的

本研究の目的は、業務用の配電線で利用できる装置の実用化に向けた開発を行うことである。配電線検査に適した劣化診断システムの構築とセンサ部、自走ロボット及びデータ通信・表示部を含めた検査装置の製作を行う。検査に要求される検査精度として、断線前のクラック状の傷を検出することであり、傷の深さの判定までできる検査を目標とし、素線径3mmの7本多導線ケーブルにおいて、幅0.1mm、深さ1mmレベルの傷の検出を目標とし、設定している。

3. 研究の方法

(1) 図1に配電線の応力腐食断線検出システムを示す。検知スピードを重視し、周囲の磁界を測定するセンサを円周上に配置したリングを配電線に掛け、配電線に沿って滑らせて検査を行う方法を想定している。滑りやすくするため、センサを配置したリングと配電線は空間位置的に余裕をもたせ、厳密な位置決めを行わない。また、円形のリングを用いる理由は、センサと傷の位置による検出精度を一定にするためと配電線に掛けやすいためである。

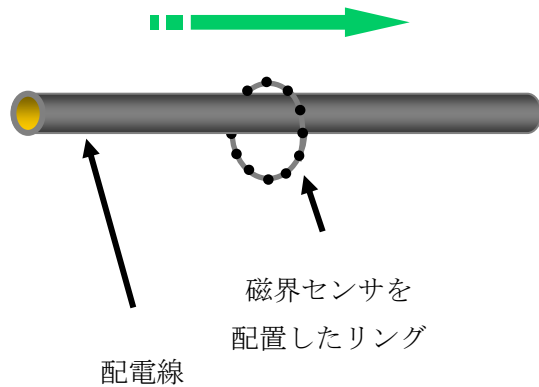


図1 配電線の応力腐食断線検出システム

(2) センサと配電線の厳密な位置決めを行わないことから、センサで得られる磁界データからセンサと配電線の位置関係を推定することが必要となる。傷がない場合、周囲に発生する磁界は同心円状の分布となることから、配電線の位置は、磁界の向きに垂直な直線上にあると考えることができ、2点の磁界の向きにそれぞれ垂直な2直線の交点として求めることができる。配電線の位置C(Cx, Cy)は、2点(x1, y1), (x2, y2)における磁界B1(Bx1, By1), B2(Bx2, By2)より、以下のように表すことができる。

$$C_x = \frac{B_{x1} \cdot B_{y2} \cdot x_1 - B_{x2} \cdot B_{y1} \cdot x_2 - B_{y1} \cdot B_{y2} \cdot y_2 + B_{y1} \cdot B_{y2} \cdot y_1}{B_{x1} \cdot B_{y2} - B_{x2} \cdot B_{y1}}$$

$$C_y = \frac{B_{y1} \cdot B_{x2} \cdot y_1 - B_{y2} \cdot B_{x1} \cdot y_2 - B_{x1} \cdot B_{x2} \cdot x_2 + B_{x1} \cdot B_{x2} \cdot x_1}{B_{x2} \cdot B_{y1} - B_{x1} \cdot B_{y2}}$$

以上から、傷がない場合、任意の2点の磁界より求めた配電線の位置は実際の配電線の位置と一致し、1点に定まる。しかしながら、傷がある場合、求めた配電線の位置は、磁界分布は傷がない場合と異なるため、実際の位置と一致しない。また、同心円状の磁界分布ではないため、異なる2組の2点の磁界から求めた配電線の位置は一致しない。つまり、求まる配電線の位置は、傷がない場合は、どの2点の磁界から求めても一致し、1点に定まるが、傷がある場合は、1点に定まらず、ばらつきを生じると推定される。この違いを傷の検出に用いることができる。

(3) 周囲の磁界から求まる配電線の位置のばらつき具合を表すパラメータを導入する。最も大きく外れた配電線の位置に着目し、複数の配電線の位置Ci(Cxi, Cyi)の平均C0(Cx0, Cy0)から最も離れた点までの距離Lmaxをパラメータとする方法である。Lmaxは以下のように表すことができる。

$$L_{\max} = \max \left| \sqrt{(C_{x0} - C_{xi})^2 + (C_{y0} - C_{yi})^2} \right|_{i=1 \sim n}$$

$$C_{x0} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_{xi}, C_{y0} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_{yi}$$

Lmaxは、傷がない場合0となり、傷がある場合ある大きさの値となり、傷の検出が可能となる。Lmaxを用いた検出システムは、以下のようなアルゴリズムとなる。

① 各センサの測定データから、式(2)より複数の配電線の中心座標Ci(Cxi, Cyi)を求める。② 各中心座標から平均の座標C0(Cx0, Cy0)を求める。③ 各中心座標から平均の座標までの距離Liを求める。④ 距離Liの中で最も大きいものをLmaxとする。⑤ Lmaxと判別値ΔLを比較し、Lmaxの方が大きい場合、傷ありと判定する。Lmaxを求める計算は、四則演算が中心であり、計算時間が短くでき、リアルタイムによる検査が可能になる。

(4) 現在複数の中心位置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Smaxを用いている。求まる複数の中心位置のうち、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Smaxとし、中心位置分布のばらつきを示すパラメータとする。Smaxは以下のように表すことができる。

$$l_{ij} = \sqrt{(C_{xi} - C_{xj})^2 + (C_{yi} - C_{yj})^2} \quad i \neq j$$

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

$$l_0 = l_{ij} + l_{jk} + l_{ki}$$

傷の位置では中心位置分布がばらつくことから、パラメータ S_{max} は大きくなると予想される。

(5) 渦電流試験は励磁コイルを用いて導体に渦電流を発生させ、傷の有無による渦電流変化から、渦電流から発生する磁束による誘導起電力の変化を検出することで傷の検出を行うことが出来る。この方式を配電線検査に応用する。出力電圧 V_0 を以下に示す。

$$V_0 = N \frac{d\Phi_1}{dt} - N \frac{d\Phi_2}{dt} [V].$$

ただし、 Φ_1, Φ_2 : 左右の検出コイルの鎖交総磁束量 (Wb), t : 時間 (s), N : 検出コイルの巻数 (turn)である。

4. 研究成果

(1) 配電線架線方向に沿って検出機を走らせることを考えたとき、センサと配電線の位置関係は常に変化すると予想される。そこでシミュレーションを用いて、配電線とセンサリングの位置関係が変化したときの傷の有無における S_{max} を計算した。素線直径 3.0 mm の素線 7 本で構成される配電線を対象とし、傷の深さは素線半径程度の 1.5 mm とした。磁界センサは半径 15.5 mm のセンサリング上に 30° 間隔に 12 点配置されていることを想定して各センサにおける磁束密度を求める。60° 間隔のセンサの組み合わせから中心位置座標を 12 点求め、得られた中心位置分布からパラメータ S_{max} を計算して出力データとした。配電線とセンサリングの位置関係は、配電線の中心がセンサリングの中心からランダムに 2 mm 以内で移動するとした。また各センサの磁束密度に対し、設定測定誤差として乱数を用いて 1% 以内の誤差を含ませた。これらの乱数を含んだ条件を用いて、サンプル数 10000 点におけるパラメータ S_{max} を計算した結果を図 2 に示す。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。傷の有

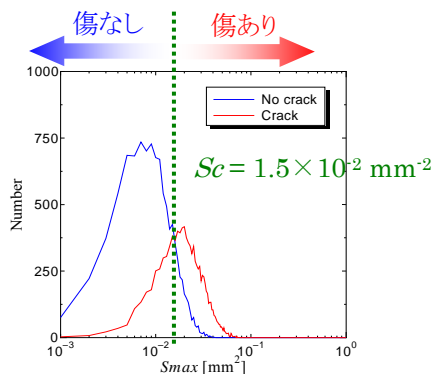


図 2 傷の有無におけるパラメータ S_{max} 分布 (サンプル数 10000 点)

無を自動的に判別することを目的とし、最適判別値 S_c について検討した。各測定位置において求まるパラメータ S_{max} を判別値 S_c と比較して傷の有無を判定する。今回のシミュレーション結果を用いたとき、2 つのグラフの交点における S_{max} を判別値 S_c とすることで最も高い正解率で傷を判定することが出来た。

(2) 渦電流試験による方法の実験を直径 3 mm の単銅線に傷をつけ配電線に見立てて行った。検出装置の基本構成を図 3 に示す。外側の励磁コイル (100 turn) によって試験導体に渦電流を発生させる。励磁電流は 100 kHz, 100 mA とした。内側の差動コイル (各 20 turn) を用いて、渦電流で発生する磁束による誘起電圧を出力として測定した。図 4 に深さ 1.0 mm, 幅 0.4 mm の傷を測定した場合の出力特性を示す。銅線方向にコイルを移動させると渦電流による検出コイルに鎖交する磁束量が変化し、出力が変化する。傷の位置を中心に 0.63 mV の出力が得られ、傷の有無を確認できる。

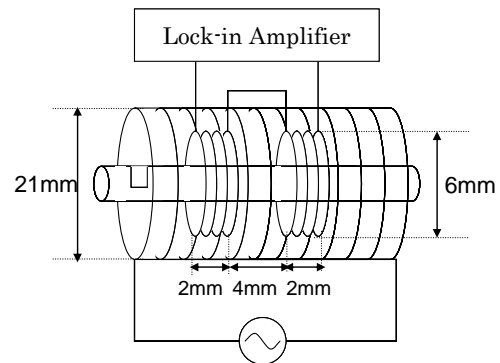


図 3 渦電流試験による検査方法

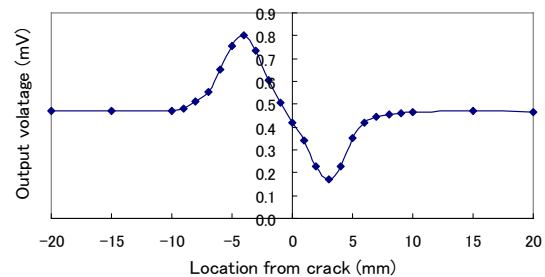


図 4 渦電流試験方法における出力特性

(3) 本システムの試作機は、センサ及び増幅回路、A/D変換回路を備えた駆動部を配電線に設置し、走行させ、配電線の周囲磁界を測定する。その測定データをパソコンに送り、検出パラメータ L_{max}, S_{max} を計算し、結果を表示するシステムとなっている。図 5 に駆動部の外観を示す。駆動部は、最大で約 240 cm / min で走行できる。磁界センサは、磁気抵抗を用いた 2 軸のセンサを使用し、半径 20

mmの円周上に6個・12ch配置した。センサの出力は、増幅したのち16ビットのA/D変換を行い、パソコンへデータを送り、検知パラメータがリアルタイムで計算され、グラフ波形として表示される。断面積 60 mm^2 の難着雪形ポリエチレン絶縁電線を使用した実験による検討を行った。クラックはディスクカッターにより作製し、素線に対して垂直にクラックを入れた。図6、図7に幅 0.2 mm / 深さ 1 mm のクラックにおける L_{max} の結果を示す。通電電流は 20 A とした。幅 0.2 mm / 深さ 1 mm のクラックのような断線前の小さな傷に対しても、クラックの位置 0.5 m 地点で L_{max} , S_{max} が大きく変化し、検出ができ、 S_{max} 感度が L_{max} よりも高いことが確認された。

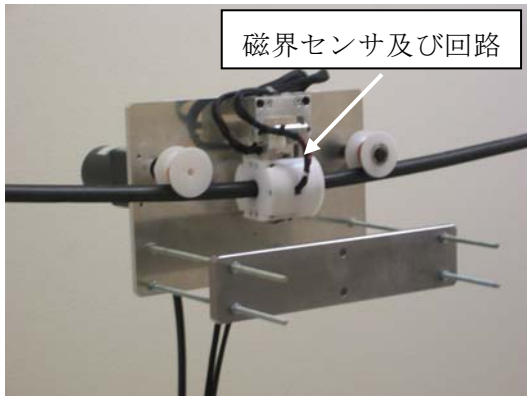


図5 測定装置の外観図

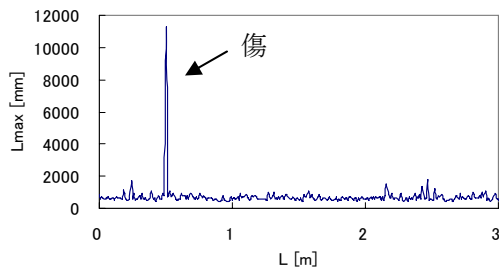


図6 幅 0.2 mm / 深さ 1 mm のクラックにおける L_{max} の特性

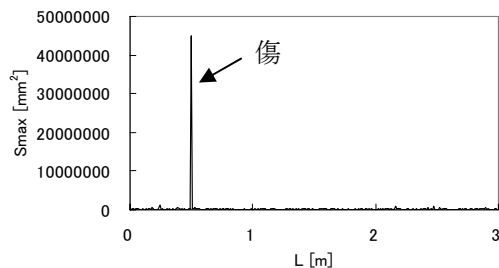


図7 幅 0.2 mm / 深さ 1 mm のクラックにおける S_{max} の特性

(4) 配電線の周囲磁界ベクトルを利用した

劣化検査システムを考案し、その実用機の製作を行い、実験により検討を行った。本検知システムは、断面積 60 mm^2 の難着雪形ポリエチレン絶縁電線、通電電流 20 A において、幅 0.2 mm / 深さ 1 mm のクラックの検出が可能であることが実験により確認された。本システムは、通電電流に応じた磁界センサの選択やアルゴリズムによるデータ処理方法、センサ部を複数枚にすることなどのいくつかの改良が見込まれ、さらなる検査精度と検査速度の向上が可能であり、実用において十分な機能を有することができると予想される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

- ① 大和田吾一, 野中崇, 佐藤文博, 松木英敏, 佐藤忠邦, 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, 日本磁気学会誌, Vol. 33, pp. 279 - 282, 発表年 (2009), 査読有
- ② G. Owada, F. Sato, H. Matuski, T. Nonaka, T. Sato, Examination of the optimum arrangement of magnetic sensors for nondestructive crack system in distribution line, J. Appl. Physics, Vol. 103, pp. 07E934-07E934-3, (2008), 査読有
- ③ G. Owada, T. Nonaka, F. Sato, H. Matuski, T. Sato, Examination to Improve Detection Accuracy of the Algorithm for Detecting Cracks on a Distribution Line, IEEE Trans. on Magn., Vol. 43, pp. 2761 - 2763, (2007), 査読有

[学会発表] (計9件)

- ① 渡邊晃朗, 佐藤文博, 佐藤忠邦, 松木英敏, 野中崇, 配電線非破壊磁気探傷法における傷判定精度向上に関する数値的検討, 平成21年電気学会全国大会, 2009年3月19日, 札幌
- ② G. Owada, T. Nonaka, F. Sato, H. Matuski, T. Sato, Examination to Improve Detection Accuracy of the Algorithm for Detecting Cracks on a Distribution Line, 52nd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, 2007年11月6日, タンパ・フロリダ州・アメリカ
- ③ 田中大甫, 野中崇, 佐藤文博, 松木英敏, 佐藤忠邦, 渦電流試験を用いた配電線の非破壊探傷システムの検討, 第31回日本応用磁気学会学術講演会, 2007年9月13日, 東京

- ④ 大和田吾一, 野中崇, 佐藤文博, 松木英敏, 佐藤忠邦, 配電線非破壊探傷システムにおける検出パラメータに関する検討, 第 31 回日本応用磁気学会学術講演会, 2007 年 9 月 11 日, 東京
- ⑤ 大和田吾一, 野中崇, 佐藤文博, 松木英敏, 佐藤忠邦, 検出パラメータを用いた配電線非破壊磁気探傷法における傷判定精度向上に関する検討, 平成 19 年度電気関係学会東北支部連合大会, 2007 年 8 月 24 日, 弘前
- ⑥ 大和田吾一, 野中崇, 佐藤文博, 松木英敏, 佐藤忠邦, 配電線非破壊探傷システムの試作機に関する検討, 平成 19 年電気学会全国大会, 2007 年 3 月 17 日, 富山
- ⑦ G. Owada, T. Nonaka, F. Sato, H. Matuski, T. Sato, S. Kanno, Examination to improve detection accuracy of the algorithm for detecting cracks on distribution line, 10th JOINT MMM/INTERMAG CONFERENCE, 2007 年 1 月 9 日, ボルチモア・メリーランド州・アメリカ
- ⑧ 大和田吾一, 野中崇, 佐藤文博, 松木英敏, 佐藤忠邦, 菅野直, 配電線非破壊磁気探傷システムにおける検出感度向上アルゴリズムに関する検討, 平成 18 年度電気関係学会東北支部連合大会, 2006 年 9 月 1 日, 秋田
- ⑨ 田中大甫, 野中崇, 佐藤文博, 松木英敏, 佐藤忠邦, 渦電流試験を用いた配電線の非破壊探傷システムに関する検討, 平成 18 年度電気関係学会東北支部連合大会, 2006 年 9 月 1 日, 秋田

6. 研究組織

(1) 研究代表者

野中 崇 (NONAKA TAKASHI)

八戸工業高等専門学校・電気情報工学科・助教

研究者番号：00390386

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし