

	のなか たかし	
氏 名	野 中 崇	
授 与 学 位	博士 (工学)	
学位授与年月日	平成16年3月25日	
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項	
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電気・通信工学専攻	
学位論文題目	配電線劣化の非破壊探傷法に関する研究	
指 導 教 官	東北大学教授 松木 英敏	
論文審査委員	主査 東北大学教授 松木 英敏	東北大学教授 荒井 賢一
	東北大学教授 山口 正洋	

論文内容要旨

第1章 緒言

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。その電気は、発電所で作られ、送電線、変電所、配電線を通して需要家へと送られる。架空配電線は、膨大な設備を有しており、常に過酷な自然環境に曝されている。このため、経年的劣化により、導体表面に傷を発生させる場合がある。配電線内部に水分が浸入し、導体を酸化させ、ひび割れが生じ、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、配電線の主な劣化原因となっている。配電線に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。配電線の非破壊による劣化状況の把握は、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。従来からある非破壊検査法として、放射線、超音波および渦電流を用いた方法が挙げられる。しかしながら、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スピードが重要であるとともに、誰にでも容易に扱えるシステムにすることを重視した場合、これらの方法は適していない。そこで、配電線周囲に発生させる磁界の変化を測定することで傷を検知する方法を新たに提案し、具体的な傷の判別方法について検討を行った。配電線の検査では、サービス面から基本的に停電させて行うことはできないが、本システムは活線状態での検査方法のため、停電させる必要がなく、配電線の検査に適したシステムとなることが期待される。

第2章 探傷システムの原理

本論文では配電線の周囲磁界分布を利用した方法を提案する。配電線劣化の検査においては、活線状態における検査が前提となることから、通電電流によって生じる磁界を積極的に利用した本方法を提案し、検討を行った。傷があることにより、導線内での電流密度分布が傷のないときと異なることが予想される。そのため、配電線周囲に発生する磁界分布も異なっていると考えられ、傷の有無による磁界分布の変化を利用した探傷法が考えられる。利用する周囲磁界分布としては円周方向と架線方向における分布が挙げられる。磁界センサを架線方向に移動させ、または、一列に複数個のセンサを並べ、磁界分布を測定し解析する。円周方向磁界分布から配電線の位置を推定し、傷により複数の位置推定データが一致せず、ばらつくことを用いた探傷方法は磁界センサと配電線に強固な位置決めが不要であるという利点をもつ。さらに架線方向の磁界分布変化を得ることでより信頼性の高い検査システムになると考えられる。また、位置決めが必要となるが、検出感度の高い渦電流試験を位置同定が可能な本方式に併用し、より高精度の探傷システムの構成を考案した。

第3章 周囲磁界による検査

6.6 kV 用配電線を用いて実験を行った。周囲磁界は断面積 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 、巻数 200 turns のサーチコイルを

用い、誘起電圧を増幅回路により増幅したのち測定した。図 3.1 に架線方向の配電線の周囲磁界分布を反映した誘起電圧の変化を示す。深さ 1 mm、幅 1 mm の傷を 1 本の素線につけ、傷の位置を 0 mm とし、架線方向にサーチコイルを移動し、測定した。また、サーチコイルと導体との距離は 3 mm とした。右上がりの傾きを持っているのは、サーチコイルと導体との間隔が位置 40 mm の方が位置 0 mm より近いのである。また、位置 10 mm と 30 mm において出力が低下するのは配電線のより線構造のためである。傷のない場合、より線構造による山を形成し規則性をもつ。一方、傷のある位置 0 mm 付近では、山はなく、全体的に出力低下がみられ、傷による分布の変化がみられる。図 3.2 に、より線構造を考慮し、20 mm 先の出力との差をとったときの特性を示す。傷のないところでは、約 0.5 V であるが、傷のある位置 0 mm 付近では約 0.6 V になり、より線構造の影響を取り除き、傷による変化のみを見ることができる。以上から、配電線の非破壊劣化検出において、周囲の磁界分布から、より線構造に左右されない方法の可能性を確認し、十分な検出能力があることを明らかにした。

第 4 章 渦電流試験による検査

図 4.1 に渦電流試験におけるコイルを示す。励磁コイルは直径 23 mm、巻数 150 turns、検出コイルは直径 21 mm、幅 3 mm、巻数 50 turns とし、2 つの検出コイルを逆極性になるように接続した。6.6 kV 用配電線を使用し、幅 1 mm、深さがそれぞれ 0.2 mm、0.3 mm の傷に対して測定を行った。また、励磁電流を 300 mA、100 kHz とし、検出コイルに誘起される電圧をロックインアンプで測定した。図 4.2 に渦電流試験による出力特性を示す。配電線に傷がない場合、配電線のより線による影響からピッチ間隔 60 mm の周期的な変化が得られる。傷がある場合、0 mm 付近において、ピッチ間隔とは異なる空間周波数の波形が得られ、傷の検出が行えることが確認できる。また、配電線において幅 1 mm、深さ 0.2 mm の傷を検出することが可能であることも確認した。すなわち、渦電流試験において配電線のより線構造によるよりピッチ間隔の空間周波数成分よりも高い空間周波数成分を得ることで、傷の検出が行えることが明らかになった。

第 5 章 試作機による検討

図 5.1 に試作機全体の構成を示す。架線には周囲磁界検出コイルと渦電流試験による励磁及び検出コイル、周囲磁界検出コイルの出力を増幅する回路部が設置され、ローラーポンプにより牽引され移動する構造とした。回路部からの出力は地上の測定器に有線にて接続し、PC でデータを取得する。渦電流試験用検出コイルは一對の円形コイルを逆接続にて差動式としているが、円形コイルでは配電線に装着することは困難である。円形コイル

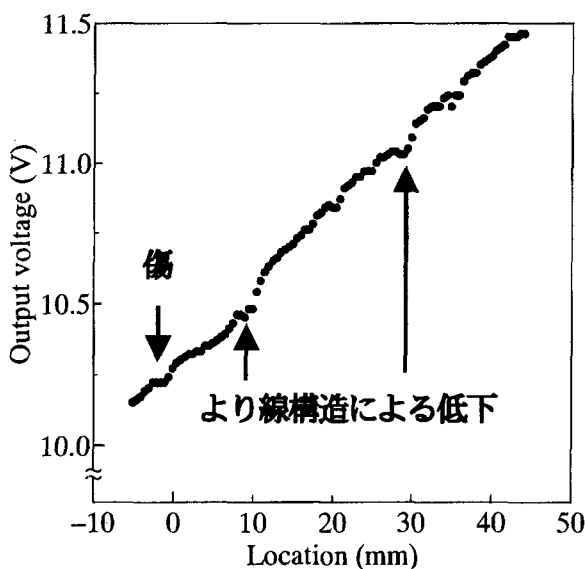


図 3.1 配電線周囲磁界分布

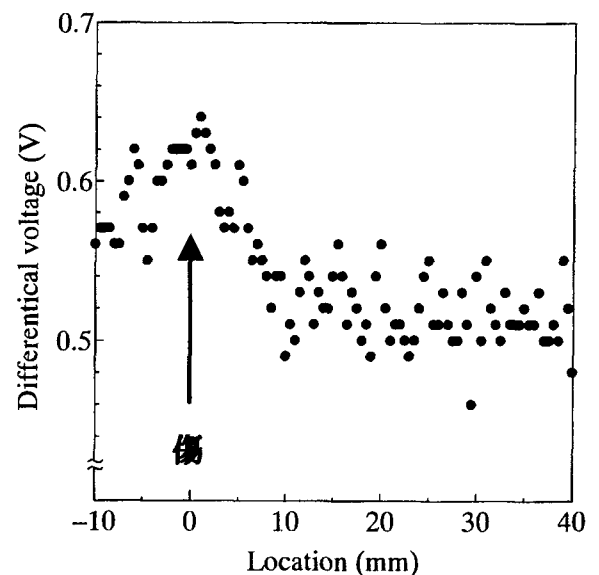


図 3.2 より線構造を考慮した差動電圧特性

の円周とコイル間隔を辺とする長方形のコイルを作製し、一対の円形コイルを逆接続したものと同様の動作をするコイルとなり、配電線に容易に装着することが可能である。作製したコイルは断面 $5\text{ mm} \times 66\text{ mm}$ 、 30 turns の長方形コイルを直径 21 mm の一対の円形コイルにした。ソレノイド形励磁コイルも配電線に装着できるようにコネクタを用いて接続できるようにし、作製したコイルは長さ 218 mm 、直径 60 mm 、巻数 80 turns で、通電電流 100 mA 、 100 kHz においてコイルの中心付近で約 0.08 mT の磁束密度を作り出すことができる。周囲磁界検出コイルは直径 2 mm 、巻数 50 turns の空心コイルを直径 21 mm の円周に沿って6チャンネル分等間隔に配置した。周囲磁界検出コイルの出力は配電線の通電電流が数十アンペアのときで、数十から数百マイクロボルト程度である。そのため、増幅し、整流回路により直流電圧にし、測定した。配電線はあらかじめ、幅 1 mm 、深さ 1 mm の傷を2箇所作製した。検出回路部の移動速度は 2.5 mm/s である。

図 5.2 に周囲磁界による検査による出力電圧特性を示す。配電線には 20 A の電流が通電してある。各チャンネルの出力が 100 mm 及び 350 mm 付近で約 0.05 V 程度変化し、傷による変化を確認した。図 5.3 に各チャネル

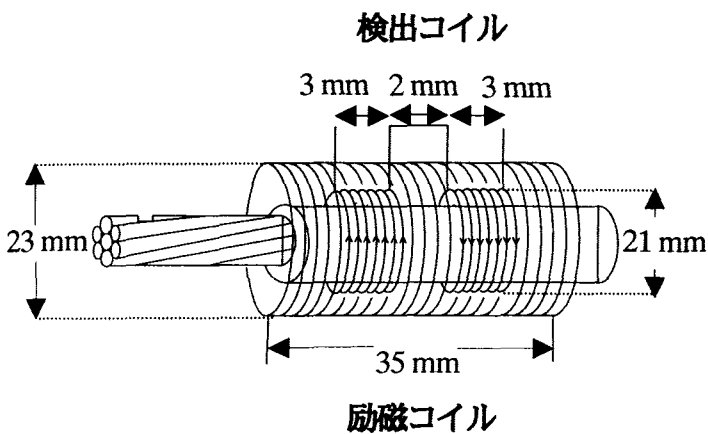


図 4.1 渦電流試験用コイルの構成

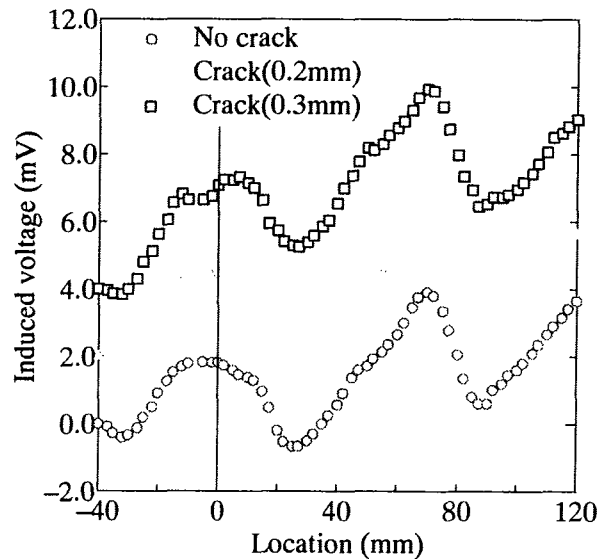


図 4.2 渦電流試験による誘起電圧特性

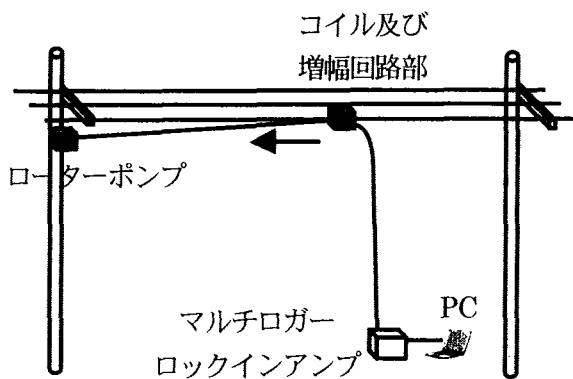


図 5.1 試作検査装置の全体図

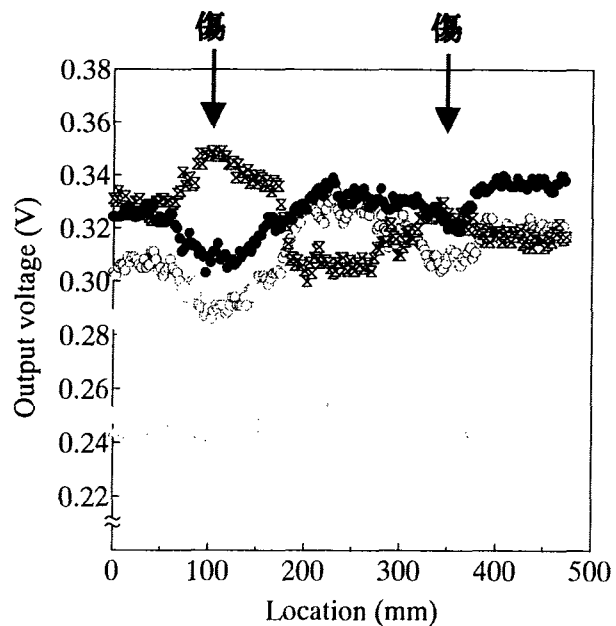


図 5.2 周囲磁界による検査における出力特性

ルの出力から配電線の中心位置推定の計算結果を示す。0 mm 及び 200 mm では中心位置はほぼ一致するが、100 mm 及び 350 mm では一致せず、ばらつきがみられる。以上の結果より 100 mm 及び 350 mm に傷があると判定することができる。図 5.4 に渦電流試験における出力特性を示す。120 mm のよりピッチ間隔の空間周波数をもつ波形に、100 mm 及び 350 mm 付近により高い空間周波数成分が得られた。このことから、渦電流試験においても 100 mm 及び 350 mm に傷があると判定することができる。以上の結果より、周囲磁界による検査及び渦電流試験から 100 mm 及び 350 mm に傷があると判定でき、本試作機において、目標としている配電線の深さ 1 mm 幅 1 mm の傷を検出することが可能であることを確認した。

第 6 章 結言

配電線劣化の非破壊探傷法について、周囲磁界を利用した検査と渦電流試験を併用した検査方法を提案し、より確実な検査方法について検討を行った。すなわち、配電線の非破壊探傷法において、配電線の周囲磁界分布のパターン変化に着目した新しい探傷法を提案し、活線状態における検査を実現し、その実用化の可能性が高いことを示した。また、従来からある方法のひとつである渦電流試験を併用することでより確実な検査がおこなえることを示した。本研究に関連して、今後の課題と展望として以下のことが挙げられる。より検査精度をあげるためには、周囲磁界による検査において磁界センサを多数配置するとともに、高精度の磁界センサの使用、センサの設置における精度向上があげられ、渦電流試験において励磁コイル及び検出コイルの製作精度の向上や配電線との強固な位置決めによる設置が挙げられる。また、検査スピードの向上については、リング状に配置した磁界センサ群を複数個配置することで実現できると予想される。

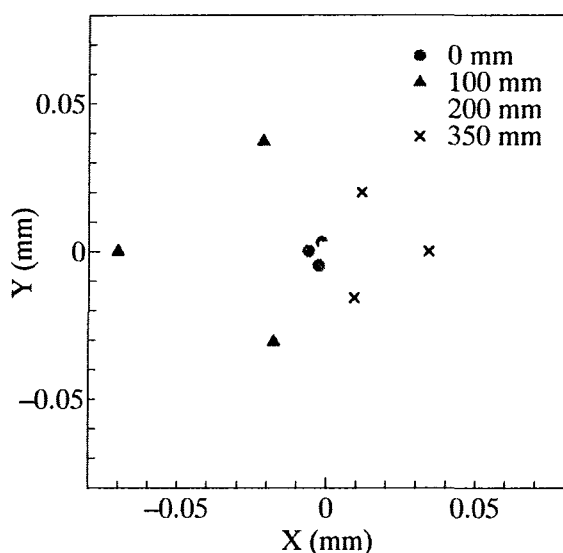


図 5.3 配電線の中心位置推定

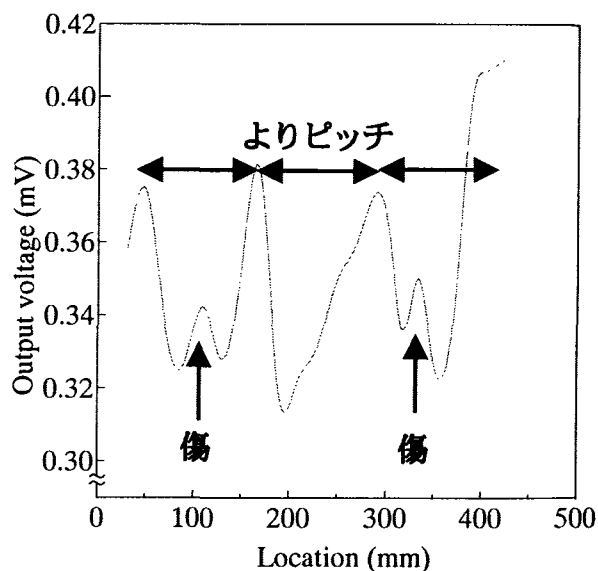


図 5.4 渦電流試験における出力特性

論文審査結果の要旨

我が国において、総延長 300 万 km を超える架空配電線は、常に過酷な自然環境に曝されており、経年的劣化により導体表面に傷を発生させ、ひいては応力腐食断線に至ることが知られている。しかしながら、絶縁保護被覆されている配電線の劣化を活線状態で確実に評価できるような探傷法がこれまで開発されていないため、電力の安定供給を維持するためには、配電線の定期的な交換に頼らざるを得ないのが現状である。著者は、配電線周囲に生じている磁界分布が、傷の有無により変化することに着目した非破壊探傷法を提案し、そのシステム開発に取り組んできた。本論文はその成果をまとめたもので、全 6 章よりなる。

第 1 章は序論であり、本研究の背景及び目的を述べている。

第 2 章では、配電線周囲に生じる磁界分布が、傷の有無により異なるパターンを示すことを解析的に示し、活線状態における新しい探傷法を提案している。さらに、提案方式の探傷精度は、配電線を通る電流値の変動や、磁界センサと配電線との距離の変動にほとんど左右されないなどの特徴を有することを明らかにしている。これは実用化を図る上で、極めて有用な成果である。

第 3 章では、第 2 章で提案した探傷法に基づく探傷システムについて述べている。その中で、配電線において幅 1mm、深さ 1mm の傷が検出可能であることを実験的に示している。これらの値は、実際の配電線の劣化診断における基準値として十分な値であり、極めて有用な成果である。

第 4 章では、提案方式のさらなる探傷精度向上を目的とした渦電流探傷法との併用について検討している。その結果、提案方式によって傷の位置が同定できれば、渦電流探傷法によってさらに高精度に傷の検出が可能であることを明らかにし、配電線において幅 1mm、深さ 0.2mm の傷まで検出できることを示している。これは、併用法により高精度で信頼性の高い探傷システムが実現できることを実証したもので評価できる。

第 5 章では、これまでの検討結果をふまえて試作した探傷システム、ならびに実際の架空配電線に適用した試験結果について述べ、実際に傷が検知できることを示している。これは、本提案方式の実用化の可能性を示したもので、高く評価できる。

第 6 章は結論である。

以上要するに本論文は、配電線の非接触探傷法において、配電線周囲の磁界分布のパターン変化に着目した新しい探傷方式を提案し、活線状態での探傷に道を開き、その実用化の可能性を示したもので、電力工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。