

ホール素子による高圧配電用絶縁電線非破壊検査法の開発

Development of Non-Destructive Inspection System for Insulated Wire Using Hall Elements

技術本部 竹田英哲^{*1} 森下慶一^{*1}
 神戸造船所 武石雅之^{*2} 由井正弘^{*3}
 中部電力株式会社 出口喜英^{*4}

絶縁電線の張替え時期適正化及び断線事故未然防止のために素線断線の検出が不可欠である。そこで活線状態の絶縁電線周囲に発生する磁界をモニタすることにより、素線断線の検出手法を開発した。健全部では絶縁電線周囲に一様な磁界が発生するが、断線部ではその部位にて電流の一部が遮断されるため発生する磁界が乱れ、この乱れを磁気センサにて検出する。さらに本手法を適用して、地上器（制御部）と空中器（検出部）から成る装置を試作した。本装置を模擬フィールドにて試験し、障害物乗り越え性能、人工断線検出性能等を検証し、実フィールドへの適用が可能なことを確認した。

To prevent insulated electric wire breaks, we developed inspection method to detect wire breaks by monitoring the magnetic field from current from the insulated electric wire. The system consists of a controller on the ground and a sensor on the wire. The sensor is controlled by radio communication. Experiments with insulated electric wire in a training verified show that our inspection accurately detects wire breaks.

1. まえがき

架空配電用に採用されている絶縁電線は、導体部分が銅のより線構造となっている。その周囲は絶縁被覆を有しており、導体部分の検査が容易にできない。絶縁電線では、これまでに製造及び施工時の残留応力と水分侵入に起因したさびの発生を経て、素線断線に至る事象が確認されている⁽¹⁾。

このため、渦電流探傷法による導体部のさび検出を主体として、遠隔操作型の自走式台車による非破壊検査装置が実用化されているが⁽²⁾、素線断線を検出する手法は確立されておらず、装置の早急な開発が各電力における課題である。

そこで、絶縁電線の通電電流によって発生する磁界をモニタすることにより素線断線を検出する手法を考案し、本手法を適用した装置の試作を行った。本報では、さび及び素線断線を同時に検出する遠隔型の自走式非破壊検査装置のうち、素線断線検出にかかる要素試験及び模擬フィールドでの検証試験について報告する。

2. システム構成

2.1 検出原理

図1に、絶縁電線素線断線部における検出概念を示す。

絶縁電線の導体部は、中心に1本、内層に6本、外層に12本の計19本の素線のより線構造となっている。

活線状態では、絶縁電線の導体中に電流が流れるため、絶縁電線の周囲に商用周波数の磁界が発生する。絶縁電線の導体中に素線断線がない場合、すなわち健全な場合、絶縁電線周囲には電線の中心軸を中心とする一様で対称な磁界が発生する。一方、素線断線がある場合、その部位にて通電電流が遮断され、その部位で磁界の対称性が変化するため、絶縁電

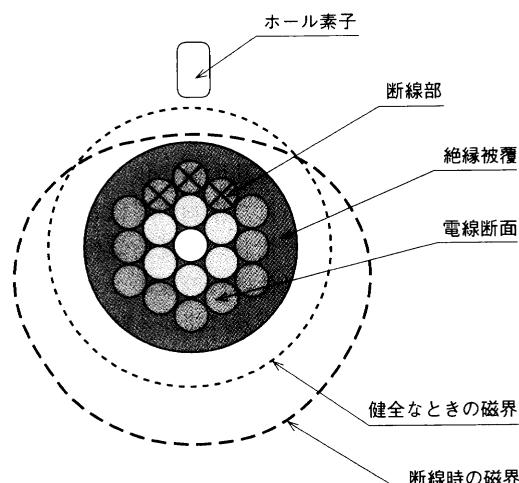


図1 素線断線部での検出原理 素線断線したときの絶縁電線周囲の磁界の変動を示す。
 Detection principle of wire breaks

線周囲に発生する磁界は健全な場合と比較して変動する。この磁界の変動をホール素子センサにより検出することによって絶縁電線導体中に発生した素線断線の有無を判断する。

2.2 検出装置構成

図2に試作検出装置の構成、表1に本装置の仕様を示す。

本装置は地上器（制御部）と空中器（検出部）から構成されている。地上器はコントローラ（ノート型パソコン）・無線モジュール及びアンテナで構成されている。地上器コントローラには空中器を操作する専用の“データ採取ソフトウェア”と、データ分析を行う専用の“データ再生ソフトウェア”が組込まれている。空中器にはCPU・増幅器・無線モジュール・アンテ

*1 高砂研究所電子技術研究室

*2 原子力プラント技術部兼製品業務部主席 工博

*3 原子力プラント技術部開発技術課

*4 松阪営業所配電課

三菱重工技報 Vol. 37 No. 5 (2000-9)

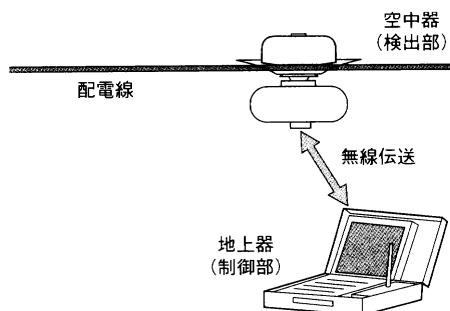


図2 試作検出装置の構成 地上器と空中器とから構成される試作検出装置概要を示す。
Composition of detection system

表1 試作装置の主な仕様
Main specification of detection system

項目	内容
形式	2輪同期駆動ゴンドラ懸架・ピン支承方式 自走台車
対象電線	60 mm ² , 125 mm ²
主要部寸法	約 H 300×L 270×W 337 mm
主要部材	軽量合金・強化樹脂等
重量	5.7 kg
走行速度	水平走行時 400 mm/s 以上 (5.7 kg 時)
傾斜走行	最大 10° (5.7 kg 時)
電源	DC 12 V
使用時間	約 4 h
環境条件	風速 10 m 以下, 降雨降雪時の使用不可 (簡易防滴機能付)
耐電圧	AC 15 kV × 1 分間
障害物通過	水抜き標示カバー, 直線スリーブ, 被覆補修カバー *障害物通過時の検出は行わない

ナ・バッテリ (2 個) 及びモータが搭載されている。

地上器から無線伝送にて制御される空中器は、絶縁電線上をデータ採取しながら走行し、採取されたデータは地上器へ無線伝送にて返送され、ほぼリアルタイムに地上器の表示画面にて走行状況及び断線の有無が確認できる。採取されたデータはコントローラ内のハードディスクに格納することが可能であり、格納されたデータは“データ再生ソフトウェア”にて読み出し、表示することができる。また、地上器コントローラにプリンタを接続することにより、表示画面を印刷することも可能である。空中器はバッテリ (DC 12 V) にて駆動し、水平走行時の速度は 400 mm/s 以上であり、約 10° の傾斜走行が可能である。高所での設置作業を容易とするため、装置を小型化 (約 H 300×L 270×W 337 mm) し、さらに強化樹脂等を使用することにより空中器の重量を約 5.7 kg と軽量化を図った。本装置は 15 kV (1 分間) の耐電圧性を有しており、活線状態 (6.6 kV) での取付及び使用が可能である。

3. 試験

3.1 要素試験

検出性要素試験では、長さ約 500 mm の絶縁電線に人工的

に素線断線を付与した断線サンプル (素線断線本数: 1 本, 2 本, 3 本, 5 本; 2 ~ 5 本の素線断線部位は、最外層で近接) 及び健全サンプルを製作し、30 App (60 Hz) の電流を通電して試験を実施した。断線サンプルの周方向 90° ピッチでのホール素子検出電圧を測定した結果を表2に示す。ホール素子検出電圧は、サンプルの断線部近傍 (0° 位置) で小さくなり、それ以外の位置では検出電圧が大きくなる傾向が認められた。

本結果から断線本数が多くなるほど、検出電圧の変動値 (最大値 - 最小値) が大きくなる傾向が認められるが、健全なサンプルと 5 本断線時との変動値の差は 0.15 V、検出電圧の 10 % 以下であり、それほど大きくない。

この変化率を大きくして検出する手法として、2 個のホール素子を対向して配置し、その差を抽出する差動方式を考案した。差動方式による検出試験結果について図3に示す。

健全サンプルでは、磁界が対称に発生するため差動電圧は小さく、いずれの角度においても差動電圧変動は小さい。1 本断線サンプルでは、磁界の対称性が変化するため、健全サンプルに比べ若干差動電圧が大きくなっている。2 本以上の断線サンプルでは、差動電圧の変動が顕著に現れ、健全サンプルと比較して断線を明りょうに判断できる。

表2 ホール素子検出電圧 (出力値)
Voltage of Hall element

センサの角度 (°)	ホール素子検出電圧 (出力値) (V)				
	健全 Vpp	1 本断線 Vpp	2 本断線 Vpp	3 本断線 Vpp	5 本断線 Vpp
-180	1.71	1.75	1.78	1.81	1.89
-90	1.78	1.75	1.76	1.80	1.86
0	1.70	1.69	1.61	1.58	1.66
90	1.70	1.74	1.73	1.75	1.75
180	1.71	1.75	1.78	1.81	1.89
最大値	1.78	1.75	1.78	1.81	1.89
最小値	1.70	1.69	1.61	1.58	1.66
変動値	0.08	0.06	0.17	0.23	0.23

通電電流: 30 App (60 Hz), 0° 位置: 断線位置, 増幅度: 50 dB

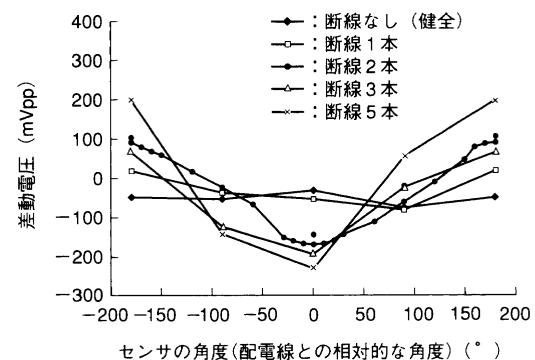


図3 周方向角度と差動電圧の関係 各断線サンプルごとに、絶縁電線周方向角度と差動電圧との特性を示す。

Relation between angle of circumference direction and different voltage of 2 opposite Hall elements

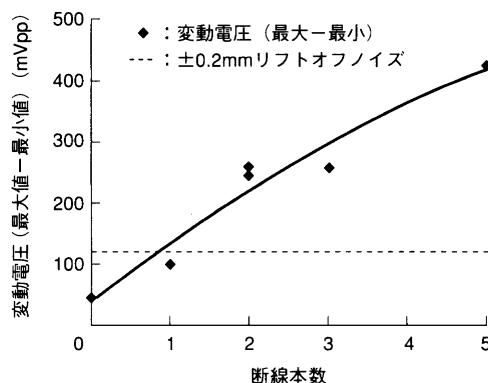


図 4 断線本数と差動電圧変動値
断線本数による差動電圧変動値（最大値－最小値）の関係を示す。2本以上の断線信号は、 ± 0.2 mm のリフトオフノイズに比して、十分検出可能な大きさである。
Relation between number of wire breaks and different voltage of 2 opposite Hall elements

差動電圧の変動値（最大値－最小値）と断線本数の関係について図 4 にまとめた。同図より断線本数が多くなるほど差動電圧の絶対値も大きくなっていることが分かる。

本手法を実用するに当り、ノイズ源となるのが、ホール素子と絶縁電線とのリフトオフ変動（距離変動）である。リフトオフが ± 0.5 mm 変動することにより、約 250 mVpp の差動電圧が発生することを実験で確認した。リフトオフ変動を ± 0.2 mm 以内に抑えることにより、それによる差動電圧は約 120 mVpp となり、2本以上の断線が検出可能と考えられる。

3.2 模擬フィールド試験

3.2.1 試作器の製作

(1) センサ部

本成果を基に、センサ部構造の検討を行った。検出精度を向上させるため、絶縁電線の周囲に 30°ピッチで 12 個のホール素子を配置し、多チャンネル化し、対向するホール素子の信号の差を抽出する差動方式を採用した。また、リフトオフ変動を抑えるため、個々のホール素子を可動式とし、絶えず電線表面上に沿って走行するようなセンサ構造とした。さらに、実フィールドの絶縁電線上に敷設されている 3種類の障害物（水抜き標示カバー、被覆補修カバー、直線スリープ）を乗越え可能にするため、及び絶縁電線への取付を容易とするため、センサを 2つ割れの開閉式構造とした。2つ割れセンサは、絶縁電線走行中は開かないようにはね機構により抑え付けられている。障害物通過時には、障害物の径変化に応じ機械的にセンサが開くとともに、走行トルクによってそのままの開いた状態で障害物を乗越え、障害物通過後にはね機構により自動的にセンサが閉じる構造となっている。また、絶縁電線上に取付ける際には、ハンドリングを持つことによりセンサが開き、ハンドリングを離すと自動的にセンサが閉じる仕組みとなっている。

(2) 信号処理部

通常通電電流によって発生する磁界は微小であるため、

ホール素子の出力電圧値も非常に微小となる。そのため、ホール素子の出力電圧は増幅する必要がある。

通常絶縁電線に流れる電流は様々であり、その電流値の幅は 1 A～数百 A 程度と広範囲に及ぶため、ホール素子の出力電圧を増幅する際には、1つの増幅係数では対応できない。

そこで、ホール素子出力電圧の増幅後の値をモニタすることにより、自動的に増幅度をコントロールするオートゲインコントロール機能を設けた。これは、ホール素子の出力電圧増幅後の値がある値以下になると、増幅度不足とみなし自動的に増幅度を高くし、逆にある値以上になると増幅度過剰とみなし自動的に増幅度を低くする機能である。このオートゲインコントロール機能により、1 A から、対象とする絶縁電線の許容電流まで検出可能となるよう設計した。

3.2.2 走行・検出試験

三菱重工高砂研究所において、中部電力（株）架設による径間約 20 m の模擬フィールドを用いて走行性及び検出性の試験を実施した。本模擬フィールドでは、人工断線を付与した断線サンプル（断線部位は最外層）も架設するとともに、実フィールド上に敷設されている 3種類の障害物も取付けた。

空中器の外観と模擬フィールドの検出結果表示例（データ再生ソフトウェア）について図 5 及び図 6 に示す。

図 6 の検出結果表示例において、横軸は時間軸（距離）情報を示しており、縦軸は上段が検出信号、下段が素線断線判定の表示である。

前半部分に信号振幅の振れが確認できるが、この信号の振れが人工素線断線による信号であり、素線断線判定が表示されている。素線断線部分では、発生する磁界の対称性が変化するため、対向するホール素子出力電圧の差に変化が現れ、これが信号振幅となる。あらかじめ、素線断線による信号振幅の大きさを求めておき、その信号振幅より大きいものを素線断線とみなし、それより小さいものはノイズと判断する。



図 5 試作器（空中器）外観
試作した空中器が絶縁電線上に設置されている状況を示す。
Appearance of equipment

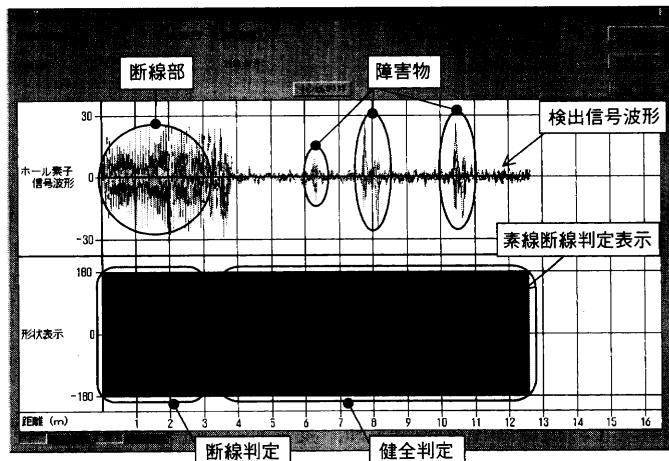


図6 検出結果表示画面例 地上器ソフトウェアの検出結果の画面表示例を示す。健全部の信号と断線部の信号が確認できる。
Example of display result of examination

後半部分にも数箇所、同様の信号の振れが認められるが、これは障害物通過時にセンサが開いたときの信号である。センサが開くことにより、絶縁電線周囲に配置されている個々のホール素子の位置が変化するので絶縁電線周囲の磁界が正常に検出できなくなり、対向するホール素子信号に差が生じてしまうため、このように信号に振れが生じる。この信号の振れは障害物通過時の信号であるので、素線断線判定は表示されていない。

この断線信号と障害物通過信号の判別として、センサに同時に搭載してある、さび検出用の渦電流探傷センサの信号を参照して行っている。障害物通過時では、センサが開くため、渦電流探傷センサにも障害物通過信号（センサが開いた信号）が現れる。一方、断線部分ではセンサは閉じたままであるため、渦電流探傷センサには信号が現れない。このようにしてセンサの開きの信号と断線信号とを区別している。

また、絶縁電線上に敷設されている3種類の障害物の乗越え性能についても試験を実施した。センサの開閉力となるばね強度を強くしすぎると、障害物通過時にセンサの開きが悪くなり乗越えができず、逆に強度を低くしすぎると走行中にセンサが開いてしまう。本試験では、走行中にはセンサが開くことなく、さらに障害物通過時にセンサが容易に開くようばね強度の最適化を図った。模擬フィールド試験の結果、良好に断線を検出し、絶縁電線上に敷設されている3種類の障害物も良好に通過することを確認した。本試験結果より、本試作器が実フィールド試験に適用可能であると判断した。

3.3 実フィールド試験

本成果を基に、中部電力(株)の5つの営業所内にて実フィールド試験を実施した。実フィールドでの試験状況を図7に示す。本実フィールド試験では、自動車のシガライタ用ソケットから地上器（パソコン及び無線モジュール）の電源を供給した。約1箇月間に合計240条（240本の絶縁電線）について、予定どおりの工程で試験を実施することができた。また、絶縁電線上に敷設されている3種類の障害物についても、ほぼ乗越えが可能なことを確認した。



図7 実フィールド試験状況 実フィールド（愛知県内）における試作装置の試験状況を示す。
Real field examination

4. 今後の展開

今後実サンプルを撤去・解体し、実フィールド試験結果と照合し、実フィールドでの検出性の確認を行う予定である。

また、現在対象としている絶縁電線径は 60 mm^2 と 125 mm^2 の2種類であるが、現状試作装置では絶縁電線径に応じてセンサ部を取替える必要がある。そこで、センサ部の取替えを不要とした、共用型センサを開発する予定である。さらに現場での作業性を考慮して、更なる装置の軽量化・簡素化を図る予定である。

5. むすび

- (1) 絶縁電線周囲の磁界をモニタすることにより導体部の最外層素線の近接する2本以上の素線断線を検出する手法を開発した。
- (2) 本手法を基に遠隔操作型・自走式検出器を試作した。本検出器の走行性・検出性について模擬フィールドにて検証試験を行った結果、走行性・検出性共実フィールドで適用可能な結果を得た。
- (3) 実フィールドにて予定どおりのサンプル数（240条：240本の絶縁電線）について予定どおりの工程で試験を実施することができた。また、障害物等の乗越えも良好であった。今後、実サンプルについて解体調査を行い、検出性を確認するとともに、共用型センサの開発・軽量化等、実用化に則した改良を実施する予定である。

参考文献

- (1) 半田勝衛ほか、プラスチック被覆架空配電線導体の応力腐食割れ、防食技術 Vol.25 No.7 (1976) p.431~437
- (2) 内田進午ほか、自走式錆検出器の開発、昭和電線電纜レビュー Vol.37 No.2 (1987) p.183~188