

直流き電ケーブルの地絡検出手法

重枝 秀紀* 赤木 雅陽* 森本 大観*

Earth-fault Detection of Feeder Cables for D.C. Traction

Hidenori SHIGEEDA Masataka AKAGI Hiroaki MORIMOTO

Polyethylene-insulated feeder cables have been widely adopted in D.C. traction circuits in order to reduce clearances around live parts. In Japan, most of the D.C. feeder cables are not equipped with a metallic shield for some reasons; thereby it makes the detection of degradation and fault of the cable difficult. This paper suggests two methods of the earth-fault detection for D.C. feeder cables without metallic shields and also reports basic examination results of these methods.

キーワード：ケーブル，地絡，直流き電方式，故障検出，変電所

1. はじめに

架橋ポリエチレン電力ケーブル（以下、電力ケーブルと表す）は、その高い絶縁性能によって電線路と周囲との離隔縮小を可能とし、変電所など電力設備の省スペース化に大きく寄与することから、直流き電回路においても正極回路、負極回路にかかわらず変電所内外の電線路に数多く使用されている。本稿では、このような用途に用いられる電力ケーブルを直流き電ケーブルと称する。

直流き電ケーブルは、基本的に交流用途の電力ケーブルと同等の構造であるが、交流用ケーブルと異なり金属の遮へい層を有していない。このため、交流用途で実績がある遮へい層を利用した劣化診断手法が適用できない。また、同様の理由によって直流き電ケーブルに絶縁破壊などの故障が発生してもその検出が困難である場合が多く、時に設備焼損などの大きな損害をもたらす場合がある。こうした課題を踏まえ、設備の信頼性向上を図る目的で直流き電ケーブルの劣化・故障検出手法に関する研究開発を実施した。本稿は、そこで得られた成果について報告するものである。

2. ケーブルの劣化要因

2.1 ケーブルの構造

高圧以上の電圧で一般的に使用される電力ケーブルの代表的な構造を図1に示す。図1(a)に示すように、交流用ケーブルでは導体の周囲は絶縁体である架橋ポリエチレンで覆われており、その外側は静電誘導防止等を目的として銅テープ等で構成される遮へい層が覆い、最外

層をケーブルの保護を目的としてビニルのシースが覆っている。通常、遮へい層はケーブル端末部で接地されるため、導体を流れる電流の一部は導体～遮へい層間の静電容量を介して大地に流れる。また、ケーブル表面の電位は遮へい層が接地されるため大地と同電位になる。

一方、直流き電ケーブルも同様に、絶縁体には架橋ポリエチレンが、シースにはビニルが使用されているが、図1(b)に示すように絶縁体とシースの間に遮へい層が存在しない。遮へい層を設けない理由はいくつかあるが、直流用途であり使用電圧も低いため他設備への静電誘導を考慮する必要がないことが挙げられる。また、変圧器の中性点などで比較的容易に、かつ短時間で電線路の地絡故障を検出できる交流回路と異なり、直流き電回路の電源側において地絡故障を検出するためには、相当大きな故障電流が回路に流れる必要がある。一般的な交流用ケーブルの遮へい層は厚さが0.1mm程度であり、ここに直流の故障電流が流れると、結果として広範囲の

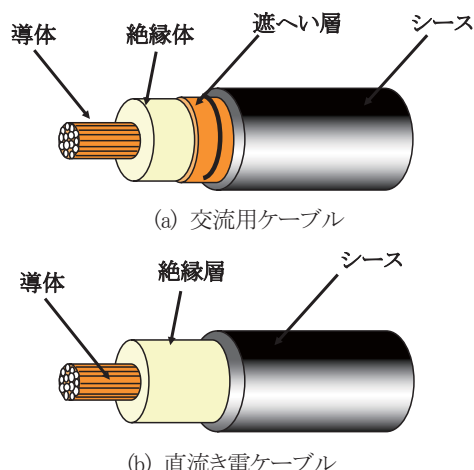


図1 電力ケーブルの構造例

* 電力技術研究部（き電）

特集：電力技術

ケーブルを焼損させる可能性がある。対策として遮へい層を厚くすることは、ケーブル布設時の施工性や経済性の点で合理的ではない。こうした事情も直流き電ケーブルに遮へい層を設けない理由と考えられる。

結果として、直流き電ケーブルは絶縁電線と類似したものとなり、交流用ケーブルのように遮へい層を利用した劣化診断・故障検出手法が適用できないという課題がある。

2.2 ケーブルの劣化メカニズム

一般的な電力ケーブルの劣化進展メカニズムは図2のように表される¹⁾。電力ケーブルの劣化事象としては、代表的劣化事象である水トリーのほか、異物・ボイド・損傷などによる部分放電やトラッキング、過電流などによる絶縁体熱劣化、化学トリー、遮へい層の腐食・破断、シースのシュリンクバックなどがある。なお、直流き電ケーブルの場合、遮へい層に起因する劣化は考慮する必要がない。

水トリー劣化について、理想的な直流電圧のもとでは絶縁体中で水トリーの成長が進まないことが知られている。一方、整流器の出力電圧には高調波成分が含まれており、水トリーの成長に影響する可能性がある²⁾。文献2)は、5.6kVの直流電圧に実効値3kVの高調波電圧を重畳させて厚さ1mmのポリエチレンシートに168時間課電した際の水トリー進展を調査したものであり、周波数によって水トリーの長さには差はあるものの、水トリーの進展が確認されている。しかしながら、整流器の直流出力電圧に重畳する高調波電圧は、6パルス整流器の場合でも実効値でせいぜい90V程度である。また、ケーブル絶縁体の厚さは通常3mm以上あり、遮へい層がないためシースも絶縁体と同等に作用する。このような状況を考慮すると、直流き電ケーブルにおいて水トリーや部分放電による絶縁体の劣化は極めて希な現象と考えられる。

その他、熱劣化や化学トリーについては特殊な条件下にて考慮すべき事項といえる。

一方で、直流き電ケーブルは遮へい層がないため、シースに亀裂等があると絶縁体が日射や外気に直接曝され、その箇所が急速に劣化して絶縁耐力が低下する可能性があり、注意を要する。

2.3 ケーブルの劣化診断

ケーブルは耐用年数に至る前に劣化診断等の保守管理が必要であり、布設状態で行えるケーブルの劣化診断手法としては外観調査のほか、絶縁抵抗試験、漏れ電流試験、誘導正接試験等がある。直流き電ケーブルでは遮へい層を電気導体として利用する検査は適用できず、導体と大地の間、あるいは正極導体と負極導体の間で絶縁抵抗または漏れ電流を測定することが主な劣化診断手法となるが、明確な劣化の兆候を把握することは困難であるのが実情である。

3. 直流き電ケーブルの劣化調査

3.1 調査の目的と概要

直流き電ケーブルについて、実際に使用されたケーブルの劣化状況を把握するとともに、新たな劣化診断手法として有効な検査方法を探る目的で、使用後に撤去された表1に示す直流き電ケーブルの提供を得て、これらに対して表2に示す11項目の調査を行った。

なお、今回は水トリーの発生状況調査は行っていない。これは2.2節の状況等を考慮した結果である。

3.2 調査結果

調査結果を表2にあわせて示す。外観、構造および電気的性能に関する各項目についてはいずれも初期の規定値等から大きな変化はなく、約11年の使用による劣化の

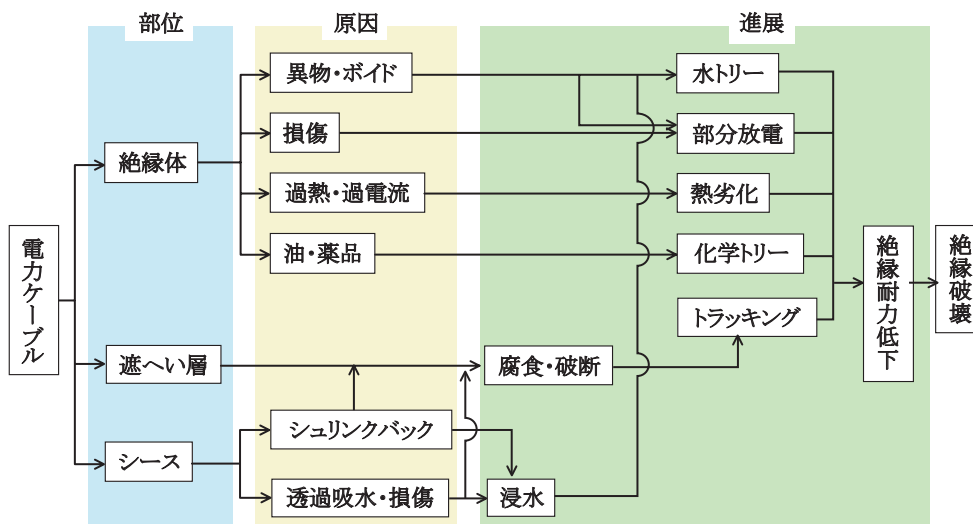


図2 ケーブルの劣化メカニズム¹⁾

表1 調査に供したケーブル

No.	ケーブル種類	使用年数	布設場所	電流履歴※
試料①	1500V Al-CV 500mm ² × 1条	約11年	屋外（き電引出鉄構）	約3000A
試料②	上に同じ	上に同じ	屋内（ケーブル洞道）	上に同じ
試料③	上に同じ	上に同じ	屋外（き電引出鉄構）	約7000A
試料④	上に同じ	上に同じ	屋内（ケーブル洞道）	上に同じ

※電流履歴：ケーブル撤去直前の1年間における回線電流の最大値（1回線につきケーブル4条を使用）

表2 調査項目および結果

調査項目	確認・判定事項	調査結果
解体調査	使用による異常の有無	異常なし
構造検査	寸法変化等の有無	異常なし
導体抵抗測定	規定の導電性能の有無	劣化認められず
絶縁抵抗測定	規定の絶縁性能の有無	劣化認められず
交流耐電圧測定	規定の絶縁性能の有無	劣化認められず
交流破壊試験	絶縁耐力の低下度合い	劣化認められず
絶縁体の物性試験	絶縁体物性の劣化度合い	劣化認められず
熱履歴調査	絶縁体が曝された熱履歴（最高温度）	60℃程度
可塑剤残存量調査	シース可塑剤量の減少度合い	経年により減少
熱老化試験	絶縁体の残存寿命	劣化認められず
酸化誘導時間測定	絶縁体の酸化防止剤残存量	劣化認められず

兆候は認められなかった。絶縁体の物性および推定残存寿命についても同様であった。また、絶縁体の熱履歴はいずれの試料も60℃程度であり、許容温度上限（90℃）に対して余裕がある結果であった。一般に、ケーブルの耐用年数の目安が許容される最大電流を連続で通電した場合を想定して定められるのに対し、直流電気鉄道では想定される最大の列車負荷に対してもケーブルの許容電流を超えないように設計されている。このため、直流き電ケーブルが受けるストレスは最大電流を11年間通電した場合より相当軽いといえ、これが明確な劣化が認められない主たる要因と考えられる。

調査において唯一経年による変化が認められたシース可塑剤残存量の調査結果を表3に示す。今回調査したケーブルと同等品のシースについて、製造時の可塑剤量は重量比（wt%）で約25wt%である。これを初期値とすると、調査したケーブルのシース可塑剤は全て2%程度減少している。可塑剤は経時とともに徐々に揮散するものであり、この減少量は11年の経年によるものと考えている。可塑剤の割合が減少すると、シースが硬化して亀裂などの異常が生じ、これが絶縁体劣化の引き金となる可能性がある。

結果として、適切な設計および使用環境の下であれば、

表3 シース可塑剤残存量の調査結果

No.	可塑剤残存量（wt%） （各試料から2個のサンプルを抽出）
試料①	22.7, 22.7
試料②	23.2, 23.3
試料③	22.7, 22.9
試料④	23.0, 23.0

直流き電ケーブルは絶縁体よりもシースの劣化によって使用可能年数が左右されるといえる。可塑剤残存量はシースの劣化度合いを定量的に表す指標となり得るが、調査サンプルとしてシースの一部を削り取る必要があり、使用中のケーブルに対する検査手法としては課題が多い。今後、さらに長期間にわたって使用されたケーブルを調査すれば新たな知見が得られる可能性はあるが、今回の調査結果から直流き電ケーブルに対する新たな劣化診断指標は見当たらなかった。

4. 直流き電ケーブルの地絡検出

4.1 地絡検出の目的

前章で述べたように、直流き電ケーブルは通常の使用条件であれば十分な耐久性があると考えられるが、実際には耐用年数を迎える前に絶縁破壊を起こして地絡故障に至る場合がある。この場合、地絡抵抗は高抵抗であることが多く故障電流が小さくなり、故障の検出・保護までに時間を要する。また、その結果として故障箇所および周辺施設の損傷が著しく、復旧や原因調査に支障を来すこともある。

地絡故障に至る前の劣化診断が困難な現状において、故障の早期段階でこれを検出・保護することは故障箇所の早期発見・復旧およびダウンタイム短縮の面で有効であると考えられる。本章では、上記の目的に基づき検討した直流き電ケーブルの地絡検出手法について述べる。

4.2 電圧検知による地絡検出

4.2.1 検出原理

変電所構内に布設される直流き電ケーブルは、一般に

特集：電力技術

図3に示すようにクリートと呼ばれる部材によって支持されている。クリート自体は通常、樹脂などの絶縁性を持つ材質で作られており、トラフやケーブルラックなどの構造物に固定される。したがって、ケーブルと構造物の間にはある程度の離隔があり、仮にケーブルで絶縁破壊が発生しても、1500V程度の電圧ではケーブルから構造物に向けて故障電流が直接流れることはないといえる。しかしながら、ケーブルやクリートの表面に塩分などの導電性汚損物質や水分が付着すると表面の漏れ抵抗が減少し、絶縁破壊箇所からケーブル表面、クリート表面を経て構造物へと漏れ電流が流れるようになる。これが、直流電ケーブルの地絡故障時における主な故障電流経路の一つと考えられる。

故障初期においては、ケーブルおよびクリート表面の漏れ抵抗は構造物の接地抵抗と比較して非常に大きいと想定され、したがってクリート部においてケーブル表面と構造物との間に大きな電圧が生じると考えられる。この電圧によって地絡故障を検出する手法を、本稿では電圧検知型手法と称する。

4.2.2 検出装置の構成

電圧検知型手法の原理を検証する目的で、同手法に基づく地絡検出装置を試作した。本装置は、導電性の電極をクリート部に設けて、その電極と構造物（またはアース）との間に生じる電圧を検知する電圧検知部と、電圧検知部からの検知信号を受信して接点出力を行う受信部で構成される。動作原理を図4に、電圧検知部の具体的な構造を図5に、試作した装置の外観を図6に示す。

本装置の電圧検知部は地絡故障によって流れる漏れ電流で動作し、外部電源や内蔵電池などを不要とすることが特徴である。電圧検知部の電流抑制抵抗は、電極と構造物との間に生じる可能性がある最大電圧（1500V）と発信部の動作に必要な電流とを勘案し、200kΩとした。したがって、本装置を介して大地に流れる電流はせいぜい数mA程度である。ただし、電極に1500Vの電圧が生じた場合、電流抑制抵抗は20秒程度で焼損する可能性があり、それまでに保護を行うことが前提となる。

受信部は5個の接点出力を有しており、受信した検知信号の周波数によって信号を発した電圧検出部を区別し、対応する接点を動作させる。したがって、電圧検出部の数だけ周波数を用意できれば、地絡検出と同時に故

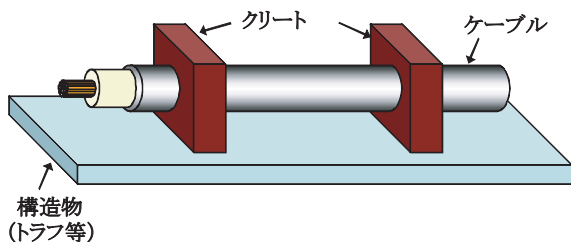


図3 直流電ケーブルの布設例

障箇所の特定が可能である。

4.2.3 検出装置の基礎検証

試作した地絡検出装置について、ケーブルを人工的に絶縁破壊させた模擬地絡試験による基礎検証を行った。ただし、試験においては直流電ケーブルを用意できなかったため、車両用1500V架橋ポリエチレン電線(WL2)で代用している。

図7に示すように、クリートから約30mm離れた場所に導体まで貫通する穴状の傷をつけたWL2の表面に5%塩水を噴霧し、表面の漏れ抵抗が低下した状態を模擬した。クリート部では表面に平編銅線を巻き付けて電極とし、電極とアースの間に電圧検出部を設置した。また、電圧検出部から約5m離れた場所に受信部を設置した。この状態で、直流電圧源を用いてWL2の導体とアースの間に電圧を徐々に加圧し、電極に現れる電圧および受信部の接点出力を測定した。

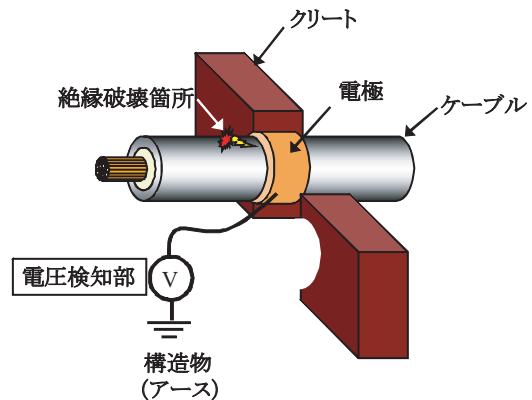


図4 地絡検出装置の動作原理

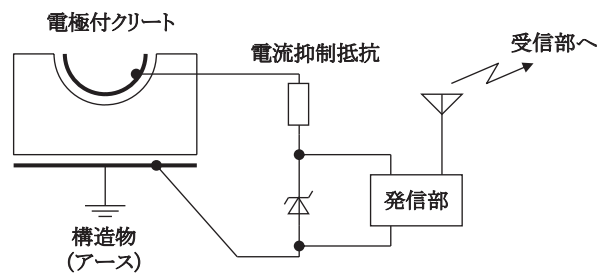


図5 電圧検知部の構造



図6 地絡検出装置の外観

測定結果の一例を図8に示す。本例では、電極電圧が約300V (293V) に達した時点で受信部が電圧検出部からの信号を検知して接点を動作させたことがわかる。接点動作に至る電極電圧は、電圧検出部と受信部との距離に応じて変動するものと考えられる。接点動作までに表面を流れる漏れ電流は微弱であり、絶縁破壊箇所を含めて加圧中に表面から発煙・発火するような兆候はなく、試験後の目視検査においても電流が流れた痕跡は認められなかった。

4.2.4 電圧検知型手法の特徴

電圧検知型手法は、クリートに検出部を設けるものであり、地絡電流が微弱な初期の故障段階でも検出できるものと期待される。また、クリートで支持される電線路であれば任意の場所に適用可能であり、故障検出箇所の特定も容易である。その反面、検出部の数量が多くなり施工性や経済性の面で課題がある。検出信号を無線で送信する場合、受信部との距離によって検出感度が変化すると考えられ、実用化に際しては信号の中継方法等を詳細に検討する必要がある。検出信号を有線で送信する場合は比較的安定した検出が期待されるが、伝送線の配線が問題となる。いずれにせよ、本手法の適用においては電圧検出回路や電極を内蔵または一体化したクリートの開発が必須である。

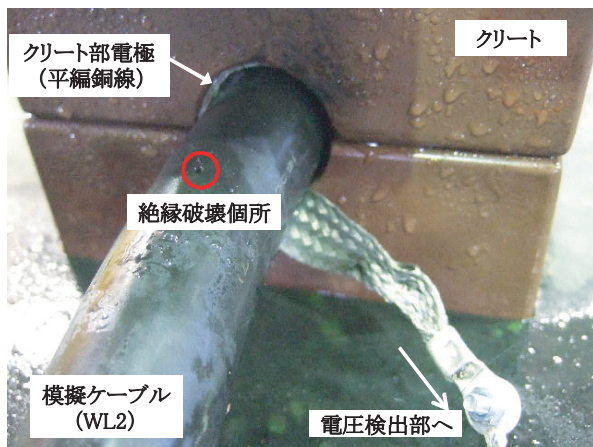


図7 模擬地絡試験の状況

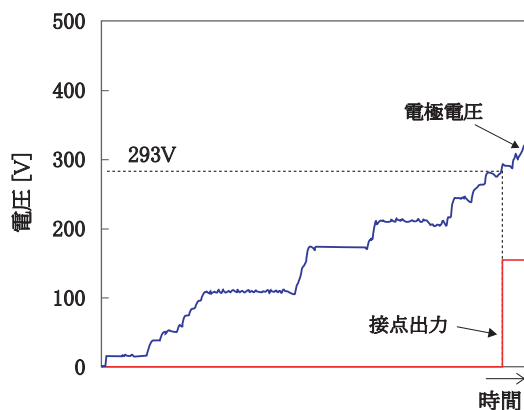


図8 地絡検出装置の検証結果

4.3 電流検知による地絡検出

4.3.1 検出原理

直流き電ケーブルを使用している変電所構内において、正極回路に地絡故障が発生した場合の故障電流経路例を図9に示す。変電所構内では正極回路、負極回路ともに大地と絶縁されており、健全時は正極回路からき電線等に送出される電流と、レールから負極回路に帰還する電流は等しくなる。一方、図9のように変電所構内のケーブルにおいて地絡故障が発生した場合、故障電流は変電所のアースから大地を経由してレールに流入し、負極回路へと戻る。したがって、変電所構内で地絡故障が発生している状況では送出電流と帰還電流との間に差分が生じる。この差分電流によって地絡故障を検出する手法を、本稿では電流検知型手法と称する。

一般に、直流電気鉄道の変電所ではホール素子などを用いた電流検出器を備えている。しかしながら、既設の検出器は数千アンペア程度の直流電流を測定することが主な目的であり、相対的に小電流となる地絡故障電流を個々の検出器の差分から求めることは、精度の面で困難であると想定される。正極回路と負極回路を単一の電流検出器で一括して包含すれば、比較的高精度で差分電流を検出することが可能であるが、正極と負極が短絡すると非常に大きな故障電流が流れるため、従来の変電所では正極回路と負極回路は離して布設されることが多い。このため、本研究では検出部の長さが10mの紐状のロゴスキーコイルを試作し、これを変電所構内と構外の境界付近において正極回路と負極回路に一括して巻き付けることによって、変電所構内の地絡故障電流を検出する方法を検討した。本手法適用時のイメージを図10に示す。ロゴスキーコイルでは直流電流は検出できないが、一般に整流器の出力には整流作用に伴うリップル電流(高調波電流)が含まれており、本手法では地絡故障時における高調波電流の差分を検出することが目標となる。

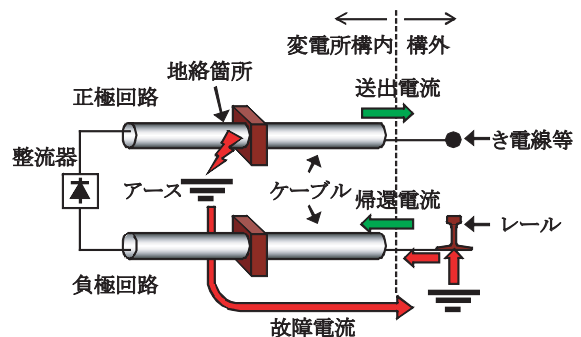


図9 地絡故障時の故障電流経路

4.3.2 電流検知型手法の基礎検証

試作したロゴスキーコイルについて、電流検出性能の基礎検証を行った。試験回路を図11に示す。正極回路と負極回路は3m程度の離隔で各1条布設し、両者を包含

特集：電力技術

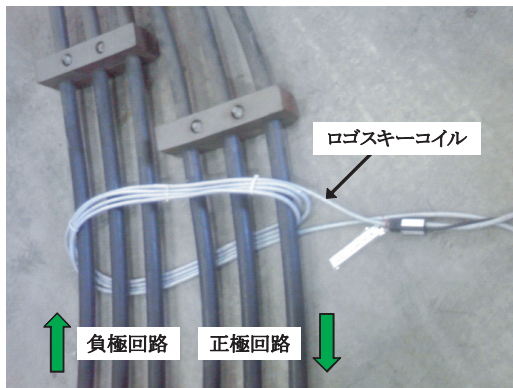


図 10 電流検知型手法適用のイメージ

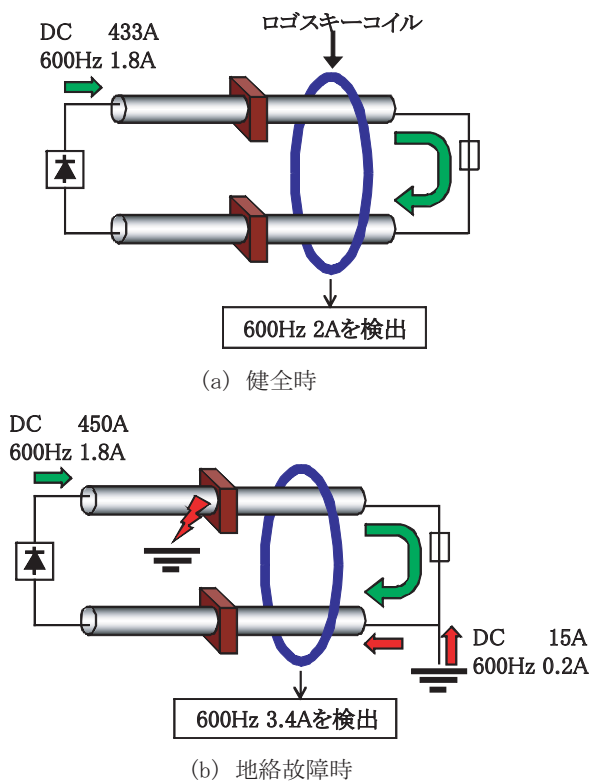


図 11 電流検知型手法の検証条件および結果

する形でログスキーコイルを1ターン巻き付けた。電源として用いた低圧の試験用整流器は12パルスであり、交流側の周波数が50Hzであることから、主たる高調波は600Hzとなる。

試験条件およびその結果を図11にあわせて示す。健全時を模擬した回路構成(図11(a))において、試験回路に600Hz、1.8Aの高調波電流を含む433Aの直流電流を通電した。この条件では正極回路と負極回路の電流が等しいので、理想的にはログスキーコイルの出力は0となるが、実際には600Hzで2A相当の出力があった。この要因としては、正極回路と負極回路のログスキーコイルとの相対位置関係による影響と、測定上のノイズによる影

響が考えられる。

次に、正極回路の地絡故障を模擬した回路構成(図11(b))において、試験回路に600Hz、1.8Aの高調波電流を含む450Aの直流電流を通電した。この内、600Hz、0.2Aの高調波電流を含む15Aの直流電流が地絡回路を經由して負極回路に帰還した。この条件では、正極回路における減少分と負極回路における増加分をあわせて、計算上は600Hzで0.4Aの差分電流を検出することになるが、ログスキーコイルで検出した電流は3.4A相当であった。結果として、試作したログスキーコイルは地絡故障による高調波電流の差分を検出できるが、健全時を含めその出力には誤差があり、故障電流がある程度の大きさにならないと故障判定ができない可能性がある。

4.3.3 電流検知型手法の特徴

本手法は機器構成が簡素であり、き電引出鉄構等において正極回路と負極回路が近接して布設されるような箇所では比較的 low コストで適用できると考えられる。一方、本手法では故障箇所の特定は困難であり、故障の早期復旧を支援するためには故障点の探索手法を別途検討する必要がある。また、電力ろ波器を備える変電所では高調波電流が抑制されるため、本手法の適用には差分電流検出のさらなる高精度化が必須である。

5. まとめ

以上、直流電ケーブルの劣化診断および故障検出手法について報告した。要約を次に示す。

- (1) 経年約11年のケーブルについて劣化調査を行った結果、明確な劣化の兆候は認められなかった。
- (2) ケーブルの地絡故障検出手法として電圧検知型と電流検知型の2方式を提案し、基礎検証を行った。

本稿で提案した検出手法については可能性を示したものであり、実用化に向けては検出精度やコストについて更なる検討が必要と考える。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、劣化調査に供するケーブル等を提供していただきました東日本旅客鉄道株式会社の関係各位に対し、ここに深謝の意を表します。

文 献

- 1) 配電設備保全技術の高度化専門委員会編：配電設備保全技術の高度化，電気協同研究，Vol.64，No.2，2009
- 2) 小西ほか：リップル電圧がポリエチレンの水トリー成長に及ぼす影響，平成20年電気学会全国大会，No.2-065，2008