

大電流のアークを伴う直流高抵抗地絡の検出手法

森本 大観* 樋口 靖展* 赤木 雅陽*

Detection Method of DC High-resistance Earth Fault with High Current Arc on DC Traction System

Hiroaki MORIMOTO Kiyonobu HIGUCHI Masataka AKAGI

Detection of high-resistance earth faults on DC 1.5 kV traction power supply systems have been one of the unresolved problems for years. There are several methods to detect such faults using some additional wires and/or devices along the track; however, due to their costs and maintenance problems, fault detection method using electrical measurements only inside traction substations is desired. We analyzed a recorded current waveform of an actual fault to find out the characteristics. On the basis of the result, we propose a novel method for detecting high-resistance earth faults with discharging arc of more than a thousand amperes DC current.

キーワード：高抵抗地絡，保護，アーク，大気中放電，電弧振動，不規則変動，故障選択

1. はじめに

直流き電回路における高抵抗地絡は、その電流が平常時の電気車電流（数千 A）よりも小さいことから、故障の検出・判別が極めて困難である。しかも、ひとたび地絡故障が生じると、設備の損傷や電気火災などが生じ、大きな輸送障害となる場合がある。このため、高抵抗地絡故障の検出・保護手法の構築は直流電気鉄道において永年の課題である^{1) 2)}。

代表的な既存の検出方式として放電ギャップ装置を用いる方式があり、国内では本四備讃線と関西空港線の鋼橋梁区間や、一部の車両基地・駅構内などに導入されている³⁾。類似のものとして欧州規格 EN 50122-1 では電圧制限装置（VLD, EN 50526-2）を電車線支持物や駅上屋等に付加することが示されており、海外で適用されている。このほか、保護線・保護素子等を用いる方式等も提案されている^{4) 5)}。しかし、これらの方式は国内では現行の設計・施工標準に規定されていない保護線等の部材を電車線路に新規追加敷設する必要があるため、導入費用や財産管理、施工・保全上の課題がある。

このため、電車線路設備を変更せずに、変電所内で得られる電圧・電流等の情報のみから故障判別する方式についても様々な研究開発が行われてきた^{6) 7)}。しかし、き電回線の直流電流値と継続時間の統計的傾向判断に基づく手法では検知時間が長いこと、き電回線に交流電流を重畳してインピーダンス計測を行う手法（交流き電の距離継電器と類似）では在線列車数や車両のフィルタリアクトル等のパラメータの影響を受けやすいこと、などの課題が大きく、実用化には至っていない。

そこで本研究では、変電所内での計測のみで直流高抵抗地絡を検出する手法について、実事故電流記録波形から得られた知見等をもとに、改めて検討した。その結果、過去の一時期に検討されていた電弧振動型^{8) 9) 10)}を参考として、現在の技術で再構成した新たな手法を提案した。この提案手法により、変電所に従来設置されているΔ I 形故障選択継電器（50F）では検出ができなかった直流高抵抗地絡のうち、地絡電流が 1000A 程度以上でアークを伴う地絡故障事例について、5 秒程度で地絡の検出が可能であることを確認した。

2. 故障模擬通電試験

直流高抵抗地絡が生じた場合に、どのような電気現象が発生するかを詳細に調べるため、鉄道総研実験棟で故障模擬通電試験を行った。試験は、大気中放電電極（間隔：約 40mm）と、電柱バンドを取り付けたコンクリート柱の、2 通りの供試体で実験を行い（1500V、抵抗 16Ω、約 100A）、アーク放電を伴う通電におけるアーク電圧と電流を 10kHz の高速サンプリングで測定した。

大気中放電電極を用いた場合、図 1(a) に示すように、アーク電圧は不規則かつ急激に変化しており、それに伴って電流にも不規則な変動が認められた。ただし、電流の変動幅は最大でも 10A 程度と小さいものであった。アーク電圧は 40V ～ 200V 程度で変動しているが、この電圧変動幅は抵抗 16Ω の電圧変動幅でもあるので、この実験での電流の変動幅は 3A ～ 10A 程度となることが説明できる。アーク放電現象は電流相似でないため近似的推論となるが、回路の抵抗を小さくすれば、電流の平均的な大きさだけでなく変動幅も大きくなると考えられる。

* 電力技術研究部 き電研究室

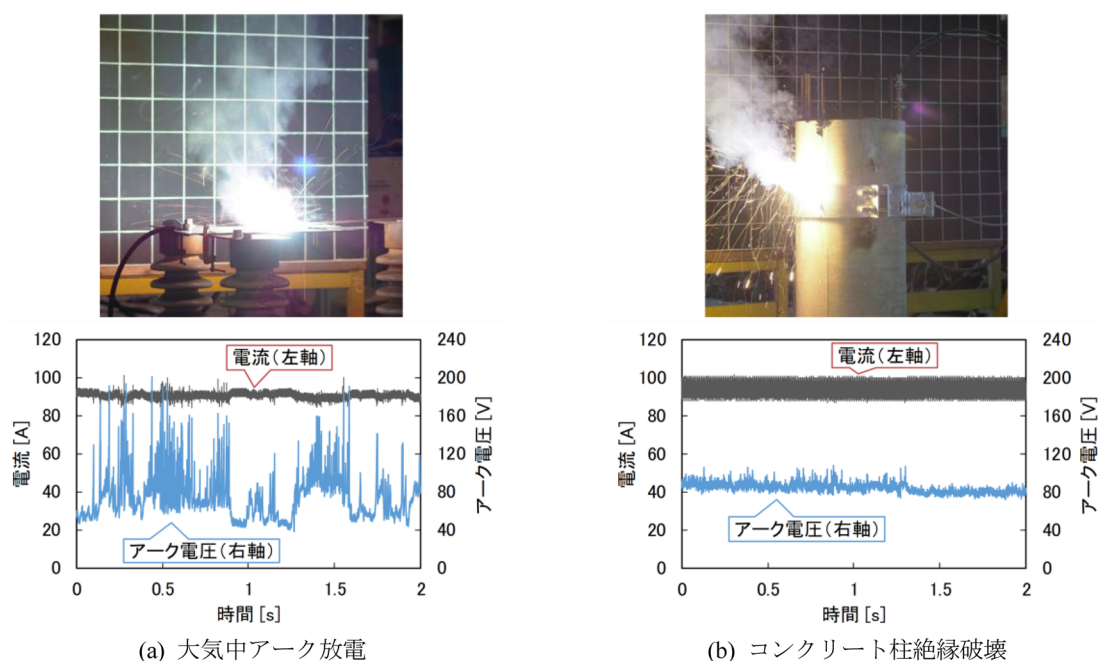


図1 故障模擬通電試験

一方、コンクリート柱では、図1(b)に示すように、アーク電圧の不規則な変動は見られるものの、その変動幅が小さいために実験設備の6パルス整流器の整流リップ成分(300Hz)の振幅が卓越し、電流の不規則変動を波形として捉えることは難しかった。コンクリート柱でのアーク電圧や電流の変動幅が小さい理由として、以下のような理由が推測される。

- (a) コンクリート柱の場合、柱内の鉄筋と電柱バンドとの間で絶縁破壊を生じて、電柱バンドの溶損が大きくなるまでの間は、電柱バンドおよび周囲のコンクリートの存在によってアークが半密閉空間に閉じ込められるため、自由空間での放電に比べてアークの変形(アーク長の変動)が小さい。
- (b) 通電試験では、コンクリート柱内の鉄筋と電柱バンドに各々、通電用電線をワイヤークリップやボルトで緊締して接続しており、それら緊締箇所ではアークが生じない。

き電線等の垂下や導電性飛来物によって生じる実際の地絡故障では、地絡した電線と地絡先支持物との間は単に表面が接触するだけであり、緊締状態ではないため、大気中放電電極の状況に若干近づくと推定される。

これらから、直流高抵抗地絡のうち、高抵抗地絡としては比較的大きい電流が流れるものであって、かつ、自由空間アーク放電が発生する形態のものであれば、アークの不規則性に起因する電流変動の特徴を何らかの手段で捉えることで、変電所での計測のみによる故障検出の可能性があるとみられる。一方、自由空間アークを伴わない高抵抗地絡故障の場合や地絡電流が小さい場合は、

電流の不規則性が乏しくなり、不規則性を利用した故障検出は容易ではないと考えられる。

3. 実事故電流記録波形の分析

西日本旅客鉄道(株)管内において、直流高抵抗地絡事故が実際に発生したが、その際に変電所既設の情報計測装置に事故電流波形(1000Hz サンプリング、分解能 10A、約 30 秒間)が記録された¹¹⁾。このような直流高抵抗地絡事故時の高速サンプリングかつ長時間の電流記録波形取得事例は国内で初めてであり、当該データの提供を受けて、地絡事故発生中の現象を分析した。

事故概況を図2に示す。地絡事故点は当該変電所から見て上り線の起点方面(12H 回線)であった。地絡発生中には近傍の諸設備から激しいアークが生じていたことが確認されている。その後、金属短絡に移行し、直流高速度遮断器が自動遮断したものと推定される。

記録された事故電流波形を図3に、この記録波形を周波数分析したものを図4および図5に、それぞれ示す。12H 回線電流には、商用周波数・整流リップ由来成分以外に、き電回線電流に本来あまり存在しないはずのランダム成分(不規則変動成分)が幅広い帯域に分布しており、全体としてノイズフロアが上昇したような状況を呈している。特に、比較的低い周波数帯域(概ね 200Hz 以下)のランダム成分が多く含まれている。これは、大気中アークが時々刻々と変形してアーク長が不規則に変化し、それに伴ってアーク電圧が変化することに起因しているものと考えられる。一方、同一直流母線からのき

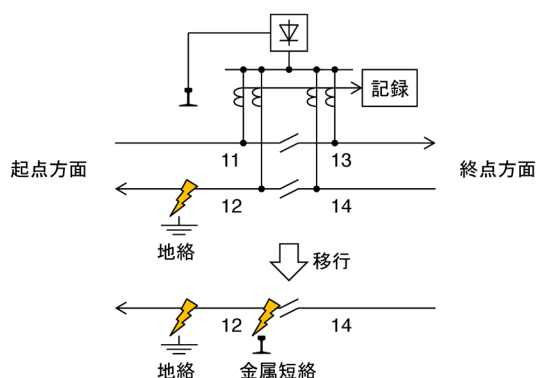


図2 事故概況

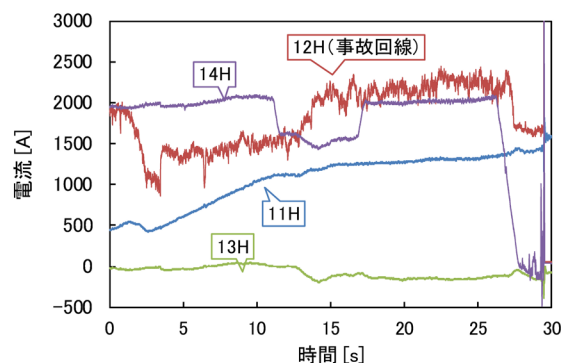


図3 記録電流波形

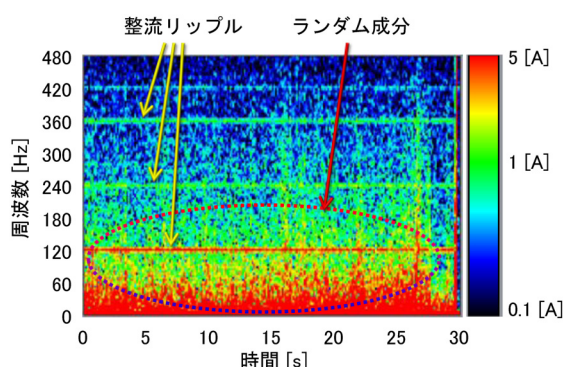


図4 周波数分析（記録波形全長，12H 回線電流）

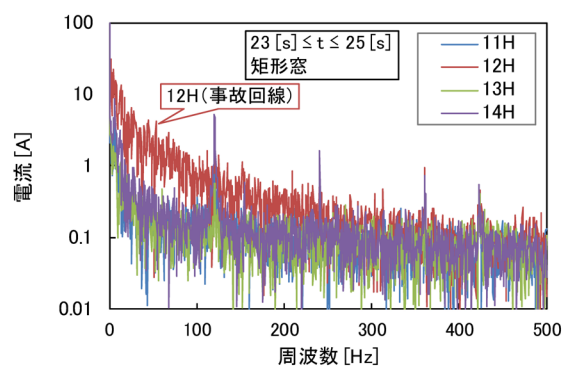


図5 周波数分析（23秒から25秒まで）

電である 11H, 13H, 14H の各回線電流にもそのようなランダム成分が若干含まれているものの、その成分の強度は 12H 回線に比べると小さい。

本事例は直流高抵抗地絡としては電流が 1000A ～ 2000A 程度と比較的大きい場合であるが、地絡電流が数十 A 程度の小電流の高抵抗地絡故障では、ランダム成分の大きさもまた小さく、検出が難しくなると考えられる。

4. 故障検出アルゴリズムの提案

4.1 故障検出手法の方針

2章および3章の検討で、1000A 程度の直流高抵抗地絡事故であれば、変電所での電流観測のみでも検出の可能性があることがわかった。

このため、駅構内など比較的大きな構造物への地絡やそれによる信号機器の焼損被害の軽減を想定し、従来検出できなかった直流高抵抗地絡のうち、概ね 1000A 程度以上の激しいアークを伴うような状況の高抵抗地絡故障を検出可能とする低コスト・小労力で早期実現可能な手法の提案を、以下の方針で目指すこととした¹²⁾。

- (a) 変電所での電流観測のみで完結可能な検出手法を基本とすること。

- (b) できるだけ計算負荷が小さい演算要素で構成でき、搭載するプロセッサの処理能力やメモリー量が潤沢ではない直流き電用保護継電器ハードウェアにも実装可能であること。
- (c) 可能であれば、既存の電流検出器（ホール CT など）の計測出力を故障検出用の入力電流波形としてそのまま使用できること。
- (d) 検出アルゴリズムが一意に定義され完全に説明可能であること。これは、高抵抗地絡に伴う火災発生などによって旅客公衆に傷害を与えた場合は国土交通省運輸安全委員会の調査対象となり、提案手法を用いてもなお故障の検出やき電停止ができなかった場合に、不検知理由の合理的説明や事実の立証が必要になるためである。

アークによる電流の不規則成分に着目するアプローチとして、電弧振動型と呼ばれるものが、昭和 20 年代後半に検討されていた^{8) 9) 10)}。これは、き電電流に含まれるキロヘルツ帯の交流成分を抽出し、その含有量がしきい値を超えた場合に故障と判別するものである。当時の諸試験で、アークが発生するような故障を検知できる可能性はある程度見出されていたが、き電回線電流に元々存在するキロヘルツ帯雑音（回転変流機の整流子火花、水銀整流器の特性、パンタグラフ離線など）による

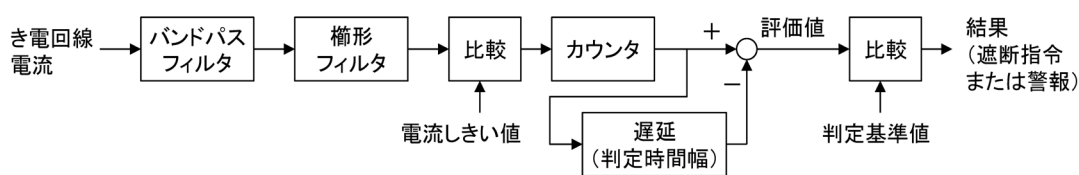


図6 き電回線電流から直流高抵抗地絡を検出するアルゴリズム

不要動作や、車両主電動機整流子フラッシュオーバーなどの短絡故障に対する不検出が多かったことから、昭和30年代には検討が打ち切られた¹⁰⁾。本研究では、この電弧振動型を参考に、現在の技術で全面的に再構成して弱点を解決するとともに、実事故記録と長期測定で定量的検証を行い、現在のΔI形故障選択継電器(50F)でカバーできない1000A～2000A程度の電流領域の地絡故障検知を補完する手法として提案することとした。

4.2 故障検出アルゴリズムの提案

考案した地絡故障検出手法¹²⁾を図6に示す。

まず、き電回線電流波形をバンドパスフィルタに入力して、直流分(列車運行のための電流)および極低周波数成分(車両の空転再粘着制御による集電電流変動など)ならびに数百Hz以上のノイズ成分を除去する。次いで、信号遅延時間を商用電源周期((1/50)sまたは(1/60)s)とした楕形フィルタを用いて、整流リップ成分(商用電源周波数の整数倍)を選択的に大きく減衰させ、図4・図5に見られるような比較的低い周波数帯域のランダム成分を主体とする電流波形を抽出する。

この得られたランダム成分波形が、あらかじめ定めた電流しきい値(正、負各々)を絶対値増加方向に正負交互に横切るときに、カウンタを加算する。この比較工程は、アークによる不規則な電流変化の振幅が電流しきい値より大きくかつ継続的に生じている状態では、変化の振幅がそれ以上大きいかなにかによらず大きく評価する一方、直流き電回路で通常発生する大振幅かつ一過性の過渡現象(たとえば変電所整流器の始動、パンタグラフのセクション通過、抵抗制御車のカム軸進段や電動機直並列切り替え、VVVFインバータ車の再力行など)の影響を抑えることを意図している。

このカウンタの現在の値から、あらかじめ定めた判定時間幅だけ前の時刻のカウンタの値を減じたもの(すなわち、判定時間幅の間にランダム成分波形が電流しきい値を正負交互に横切った回数)を評価値とし、この評価値が判定基準値を超えた場合に、地絡故障と判定する。

このアルゴリズムを確認するため、前出の図3の事故記録電流波形にサンプリングレート変換(1000Hz→15360Hz, 4.3節参照)を施したものを入力データとして、提案する検出アルゴリズムによる評価値を計算した。

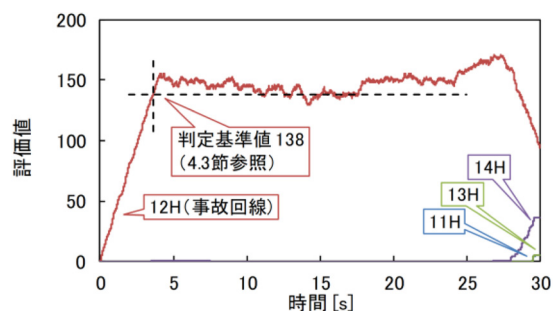


図7 記録電流波形における評価値

バンドパスフィルタ通過帯域を15Hz～100Hz(2次対パワーソース特性)、電流しきい値を正負とも25A、判定時間幅を4sに設定した場合の計算結果を図7に示す。事故が生じている12H回線では、判定時間幅である4sから遮断の直前まで130～150程度の評価値が継続的に得られている。一方、正常な11H・13H・14Hの各回線では、14H回線の遮断直前を除き、評価値はゼロまたは判定基準値(ここでは4.3節の長期測定における評価値最大値の2倍として138に設定したが、個々の路線やき電区間の状況に依存する)に対して十分に小さな値である。このように両者には有意な差が得られており、提案する検出アルゴリズムを用いて、大電流アークを伴う直流高抵抗地絡故障を、変電所でのき電回線電流計測のみで検出することが可能と考えられる。

なお、提案手法を用いて小電流(100A程度)の地絡故障を検出するためには、4.4節に後述するように電流しきい値を下げなければならない。しかし、計測系のノイズやA/Dコンバーターの最小分解能などの影響が顕在化するとともに、後述のように正常な車両の集電電流に含まれる揺らぎ成分により不要動作しやすくなる。また、短時間での検出を追求しすぎると、パンタグラフのセクション通過などの一過性正常現象をアーク地絡故障と誤認しやすくなる。したがって、提案手法において小電流・短時間の故障検出と不要動作の回避の両立には限界があり、定時安定輸送確保の観点から、現在のΔI形故障選択継電器(50F)と同様に、平常運行時の不要動作を起こさないことを優先して検出限界を決める必要がある。

4.3 平常運行時の不要動作可能性の評価

提案する検出アルゴリズムが不要動作する可能性を検

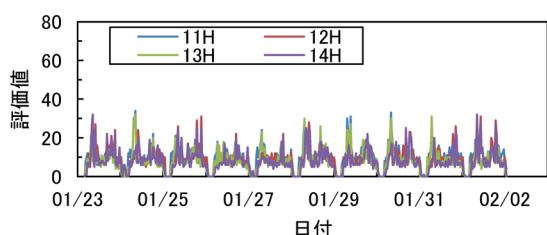


図8 平常時の評価値計算結果（Y線A変電所）

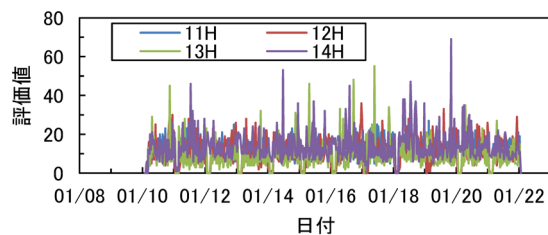


図10 平常時の評価値計算結果（Z線C変電所）

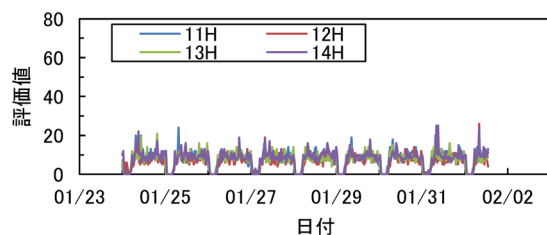


図9 平常時の評価値計算結果（Y線B変電所）

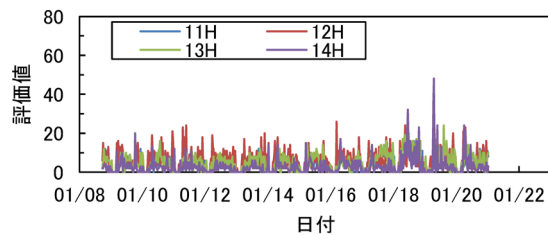


図11 平常時の評価値計算結果（Z線D変電所）

討するため、Y線（60Hz地区）のA変電所・B変電所、Z線（50Hz地区）のC変電所・D変電所（いずれも隣接）で、平常運行時のき電回線電流を既設計測用ホールCT出力から得たものを商用周波数の256倍のサンプリング周波数（60Hz地区：15360Hz、50Hz地区：12800Hz）で10日間程度記録し、そのデータを前節で提案した方法で処理して評価値を求めた。なお、Y線は抵抗制御車、界磁添加励磁制御車、チョッパ車の運用が大多数でVVVFインバータ車の運用は少数であり、Z線は全営業列車がVVVFインバータ車である。A・B変電所には電力ろ波器と直列リアクトルが設備されているが、C・D変電所は直列リアクトルだけが設備されている。

Y線、Z線とも、4.2節と同じ検出パラメータ設定（バンドパスフィルタ通過帯域15Hz～100Hz、電流しきい値25A、判定時間幅4s）を適用した場合の評価値計算結果を図8～図11に示す。評価値の最大値はZ線C変電所の14H回線で発生した69であり、図7の4s～28sにおける12H回線（事故発生回線）評価値の最小値130に対して十分な余裕があり、不要動作の可能性は低いと考えられる。逆に、判定基準値は平常運行時に発生し得る評価値の最大値に対して2倍程度の安全率を見込むことが、実験したパラメータの範囲において、提案方式の整定基準になると考えられる。

平常運行時の評価値最大値発生付近の詳細状況を図12に示す。列車が惰行中と推定される状態で回線電流に振動性の電流が発生し、楕円フィルタ出力（電流揺らぎ成分）の振幅が大きくなり、電流しきい値（25A）を超えている。また、このとき他の回線には力行列車が存在していた。Y線ではこの現象は見られなかったため、Z線を走行する車種固有の特性か、力行列車との間で何らかの相互干渉が生じたと考えられる。

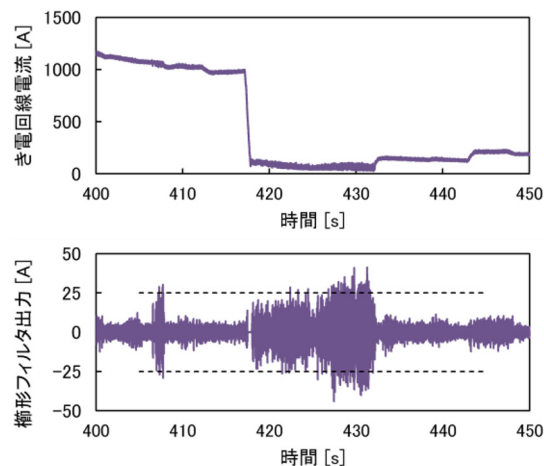


図12 評価値最大値発生状況
（Z線C変電所14H回線）

このように、提案する検出アルゴリズムを実用化するには、故障検出感度の確保と不要動作の回避の両立のために、車両のさまざまな状態において、集電電流にこれ以上大きな振動成分が含まれないことが重要である。

4.4 人工模擬故障試験による検証

前節の測定期間中にY線A変電所・B変電所間き電回路で人工模擬故障試験を行った¹³⁾。模擬故障回路は正極側をA変電所敷地内14H回線直下に接続し、負極側は試験実施上の安全確保のため、地絡回路（変電所機器接地極など接地物への通電）ではなく、変電所帰線（直列リアクトルのレール側端子）へ至る金属回路として構成した。模擬回路に16Ωの抵抗器を挿入して短絡電流を約100Aに設定し、鉄帯と鉄板を約40mmの間隔で固定した放電間隙を用意して、発弧導線を用いて大気中



図 13 人工模擬故障試験状況（Y線 A 変電所）

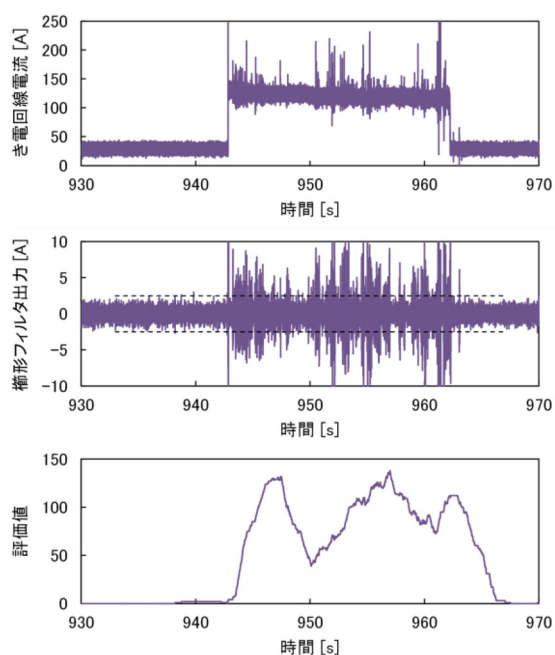


図 14 直流 1500V 100A 人工模擬故障試験結果
（Y線 A 変電所 14H 回線，電流しきい値 2.5A）

アーク放電を発生させた（図 13）。

4.2 節と同じ検出パラメータ設定においては，評価値は 2～3 程度となり，模擬故障は検出されなかった。そこで，電流しきい値を 1/10 の 2.5A に変更した場合の結果を図 14 に示す。これは電流しきい値を元のままで，入力電流を 10 倍する（1000A 程度）ことと等価である。A 変電所 14H 回線投入から数秒～十数秒で評価値が 100 程度の値に達した。アーク放電現象は電流相似でないため近似的推論となるが，提案する検出アルゴリズムは，1000A 程度の大气中アーク放電を伴う故障を検知することが可能と推定される。

5. まとめ

直流高抵抗地絡を変電所内での計測のみで検出する手法について，実事故電流記録波形から得られた知見等をもとに，改めて検討した。その結果，地絡電流が 1000A

程度でアークを伴う直流高抵抗地絡事例について，5 秒程度で地絡の検出が可能であること，不要動作の可能性は低いと考えられることを確認した。

謝 辞

本研究を進めるにあたり，実事故電流記録波形データの提供や現地試験の実施等に多大なご協力をいただいた，西日本旅客鉄道株式会社，東日本旅客鉄道株式会社の関係各位に深く感謝し，この場を借りて厚く御礼申し上げます。

文 献

- 1) 電気鉄道ハンドブック，p.528，コロナ社，2007
- 2) 森本大観：直流き電回路の高抵抗地絡保護への取り組みと課題，JREA，Vol.60，No.10，pp.15-19，2017
- 3) 由井清，井上一：放電ギャップを応用した高抵抗地絡保護装置の開発実用化，鉄道と電気，Vol.43，No.8，pp.2-7，1989.8
- 4) 安喰浩司，森田岳，吉井剣，牧本次郎，内沼夏織：保護線による直撃雷断線防止システム，平成 22 年電気学会産業応用部門大会，No.3-19，2010
- 5) 森本大観，柴田直樹，吉井剣，植松正次，林屋均：保護線を用いた直流き電回路高抵抗地絡検出システム，平成 26 年電気学会産業応用部門大会，No.5-3，2014
- 6) 長谷伸一，奥井明伸，森本大観，赤木雅陽：高調波重畳による高抵抗地絡検出法，鉄道総研報告，Vol.19，No.7，pp.47-52，2005
- 7) 長谷伸一，奥井明伸，関島志郎，菅井俊一，赤木雅陽，木村高志：回線電流に基づく高抵抗地絡検出装置の開発，鉄道総研報告，Vol.21，No.10，pp.11-16，2007
- 8) 広瀬健吾：選択遮断試験報告，JREA ニュース No.62，6 面，1952
- 9) 電車線路事故電流の選択遮断方式研究報告，（社）鉄道電化協会 電鉄直流回路遮断研究委員会，1953
- 10) 電鉄直流き電回路現象と故障選択装置に関する研究報告-I，（社）鉄道電化協会 電鉄直流回路研究委員会，pp.173-176，1957
- 11) 森本大観，樋口靖展，伊東和彦，相原徹，田中弘毅：直流高抵抗地絡事故の実記録データおよび考察，平成 31 年電気学会全国大会，5-222，2019
- 12) 森本大観，樋口靖展，赤木雅陽，伊東和彦，田中弘毅：大電流アークを伴う直流高抵抗地絡故障の検出手法の検討，令和 2 年電気学会全国大会，5-176，2020
- 13) 樋口靖展，森本大観，伊東和彦，相原徹，田中弘毅：直流高抵抗地絡保護方式検討のための測定および考察，2019 年電気学会産業応用部門大会，5-47，2019