

## 回線電流に基づく高抵抗地絡検出装置の開発

長谷 伸一\*      奥井 明伸\*\*      関島 志郎\*\*\*

菅井 俊一\*\*\*      赤木 雅陽\*\*\*      木村 高志#

### Development of High Resistance Grounding Fault Detector by Making Use of Load Currents

Shin-ichi HASE      Akinobu OKUI      Shiro SEKIJIMA

Shunichi SUGAI      Masataka AKAGI      Takashi KIMURA

It is difficult to detect a high resistance-grounding fault in DC electric railway system because it is impossible to distinguish the fault current from load current in that system. We therefore proposed a new detection method to distinguish the fault current from load current by using the total feeding current of two substations. In this detection method, it makes use of the fact that the average of load current is different from the average of fault current. First, this paper describes the new detection method of high resistance-grounding fault by using the total feeding current. Second, the time length required for detection is evaluated by simulation. Lastly, experimental results are shown.

キーワード：高抵抗地絡，直流電気鉄道，保護，回線電流

### 1. はじめに

直流電気鉄道のき電回路において，電車線支持柱等の構造物の接地抵抗が含まれる高抵抗での地絡が発生した場合には，故障電流が小さいため，従来の故障検出装置では検出が困難である。こうした高抵抗での地絡故障を検出する装置として，これまで，放電ギャップ等を用いた検出装置が検討されてきたが，保守，コスト面での課題があり，駅構内や長大橋梁等の限られた箇所への導入にとどまっている。

本研究では，隣接する変電所のき電電流を合成することで得られる回線電流を用いた故障検出法を提案し，シミュレーションを用いて，故障検出アルゴリズムの評価を行うとともに，同故障検出アルゴリズムを用いた故障検出装置を製作し，模擬短絡試験により検証を行ったので報告する。

### 2. 従来の高抵抗地絡検出方法

直流電気鉄道のき電回路に発生する短絡・地絡故障は，一般的に， $\Delta I$ 型故障選択継電器（50F）による検出また

は直流高速度遮断器（54F）の自動遮断によって保護されている。 $\Delta I$ 型故障選択継電器は，き電回路に流れる電流を常時監視し，短絡・地絡故障等による一定時間における急激な電流増加を検出することで，故障電流と負荷電流を判別し，直流高速度遮断器に開放指令を発生し，速やかに故障電流を遮断する。さらに，連絡遮断装置を組み合わせることにより，故障回線の対向する変電所に遮断指令を転送して故障発生区間を保護する。

一方，電車線支持柱等の構造物の接地抵抗（数 $\Omega$ ～数十 $\Omega$ 程度）が含まれる高抵抗での地絡（以下「高抵抗地絡」と呼ぶ）が発生した場合，故障電流が構造物の接地抵抗，レール漏れ抵抗を介して変電所に戻る回路構成となり，電流値が負荷電流と同程度，もしくはそれ以下となり，従来の故障検出方式では検出が困難である。高抵抗地絡の継続により，構造物等の破損や事故拡大の恐れがあり，信頼性，コストを含めた新たな高抵抗地絡検出技術の確立が望まれている。

直流き電回路における高抵抗地絡検出法については，これまで，表1に示す幾つかの方式が検討されるとともに，一部については実用化されてきているが，信頼性，保守，コスト面等の課題があり，ギャップを用いた検出方式が，長大橋梁や駅構内等の限られた箇所に導入されているのにとどまる<sup>1) 2)</sup>。筆者らは，き電回路に高調波を重畳することで高抵抗地絡を検出する方法も検討してきたが，実用化には至っていない<sup>3) 4) 5)</sup>。

\*      電力技術研究部  
\*\*     電力技術研究部（き電）  
\*\*\*   東日本旅客鉄道株式会社  
#      四国旅客鉄道株式会社

特集：電力技術

表1 従来の高抵抗地絡検出法

| 検出要素  | 検出方式   | 記事   |
|-------|--|--|
| 電流    | <ul style="list-style-type: none"> <li>支持物・レール間にギャップを接続し、地絡時の支持物の電位上昇によりギャップを放電させ、金属短絡へ移行することで、現状の保護方式を用いて短絡電流を検出</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>従来の保護リレーで検出可能であるが、保護区間に連係線が必要となる</li> <li>長大橋梁等の鋼構造物を連係線として利用可能である</li> <li>※特定の場所で実用化されている</li> </ul>  |
| 電圧    | <ul style="list-style-type: none"> <li>支持物の電位上昇を検出し、連係線を用いて変電所の遮断器に遮断信号を伝送</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>支持物、レール間の電圧を検出する</li> <li>電圧検出器と遮断信号伝送用に、新たに連係線が必要となる</li> </ul>  |
| 電流    | <ul style="list-style-type: none"> <li>電車在線情報を活用し、事故電流と電車負荷電流の持続時間の相違に着目</li> <li>隣接変電所間の電流データを授受し、き電区間内の電流データを解析</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>き電区間内に電車が存在しない状態で、一定の電流が継続した場合に事故と判定する</li> <li>電車が存在しても、変電所の負荷分率が変化しない場合に事故と判定する</li> <li>隣接変電所と自変電所の電流データを演算することにより、変電所中間点での電流データの把握や変電所間の横流データを除去する</li> </ul> |
| 電圧・電流 | <ul style="list-style-type: none"> <li>き電回路に高調波を積極的に注入することで得られる回路定数の変化を利用</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>き電回路に周波数の異なる2種類の次数高調波を注入し、電気車と地絡回路のインピーダンスの違いにより故障を検出する</li> <li>2種類の高調波によりき電回路の表皮効果の影響を軽減</li> </ul>   |

3. 回線電流に基づく高抵抗地絡検出装置

3.1 回線電流

従来のき電回路の故障検出装置は、各々の変電所で観測されるき電電流を用いている。各々の変電所で観測されるき電電流は、電気車または故障点が近傍に存在すれば相対的に大きな値となり、遠方に存在すれば小さな値となる。このことは、故障電流でも電気車電流でも、零電流から大電流までの値をとりうることを示しており、こうしたことから、電流の大きさだけで故障検出を行うには限界があった。

提案する高抵抗地絡検出装置は、図1に示すように、隣り合う2個所の変電所のき電電流を加算した「回線電流」を検出に利用する。電気車と故障の判別は、後述する故障時と健全時の回線電流の統計的差異に基づいて行う<sup>6)</sup>。

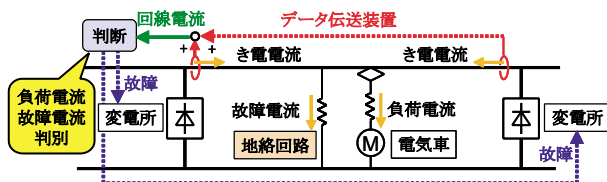


図1 回線電流方式高抵抗地絡検出法

3.2 回線電流の電流区分別発生頻度

回線電流を一定時間 $T_L$ 観測した後、一定の電流区分 $\Delta i_k$ ごとに発生頻度を算出し、グラフ化したものを図2に示す。図2に示す測定対象線区は、首都圏近郊の平坦な線区である。ここに示す電流区分 $\Delta i_k$ ごとの発生頻度 $a$

( $\Delta i_k$ )とは、(1)式に示すとおり、測定時間 $T_L$ の間に電流区分 $\Delta i_k$ の電流がどの程度の時間発生したかを示すもので、 $T_L$ と $T(\Delta i_k)$ の比を百分率で表したものである。

$$a(\Delta i_k) = \frac{T(\Delta i_k)}{T_L} \times 100 \quad (1)$$

ただし、

$$T(\Delta i_k) = \int_0^{T_L} t(\Delta i_k) dt$$

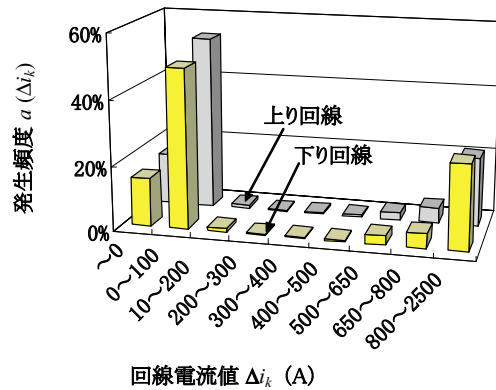


図2 回線電流の電流区分別発生頻度

図2に示す線区の場合、上り回線と下り回線の各々の回線電流の発生頻度 $a(\Delta i_k)$ は、ほぼ同じ値であり、両回線電流の発生頻度 $a(\Delta i_k)$ はともに100A~500Aの範囲で低くなっている。このことは、100A~500Aの範囲の回線電流が継続して観測されることは希であることを示すもので、逆に100A~500Aの範囲の回線電流が継続して発生すれば故障と判断することも可能である。こうした回線電流の発生頻度 $a(\Delta i_k)$ の違いを利用することで、負荷電流と故障電流の判別が行える可能性がある。なお、図2に示した発生頻度 $a(\Delta i_k)$ は、列車密度、線区の勾配条件、駅配置等によって異なる。

3.3 高抵抗地絡検出アルゴリズム

前節までに述べたように、回線電流の発生頻度 $a(\Delta i_k)$ を利用することで、負荷電流と故障電流の判別が行える可能性があることがわかった。本節では、発生頻度 $a(\Delta i_k)$ を用いた検出アルゴリズムについて述べる。

具体的に、回線電流により故障を検出するためには、(2)式に示すように、まず、予め観測した発生頻度 $a(\Delta i_k)$ からその逆数に相当する単位時間あたりの重み $s(\Delta i_k)$ を算定する。

$$s(\Delta i_k) = \left( \frac{a(\Delta i_k)}{100} \right)^{-1} \quad (2)$$

そして、図3に示すように、単位時間ごとに逐次観測される回線電流により、重み $s(\Delta i_k)$ を積算する。この重み $s(\Delta i_k)$ の積算値を電流評価値 $S$ (無次元量)と呼ぶ。なお、この電流評価値 $S$ は、回線電流が零電流となっ

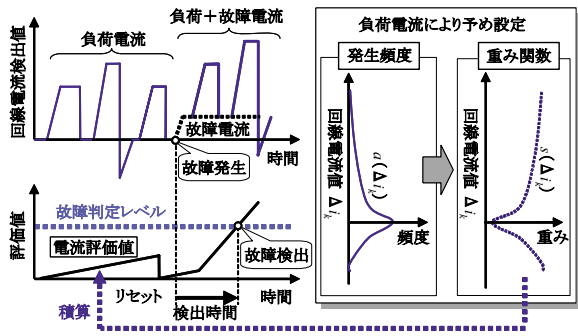


図3 高抵抗地絡検出アルゴリズム

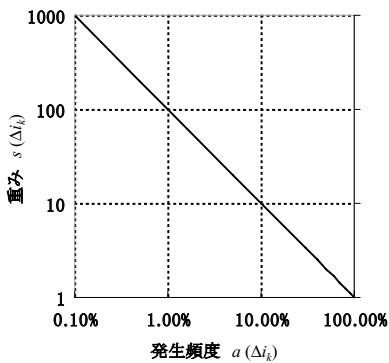


図4 発生頻度と重みの関係

た段階で零にリセットする。電流評価値が故障判定レベルに達した段階で、故障と判定する。本故障検出アルゴリズムによると、故障検出には一定の時間を必要とし、検出に要する時間は、重み $s(\Delta i_k)$ と故障判定レベルの設定値による。発生頻度 $a(\Delta i_k)$ と重み $s(\Delta i_k)$ は(2)式から反比例の関係にあり、具体的にその関係を図4に示す。図4からわかるように、発生頻度 $a(\Delta i_k)$ が10%以上の値の場合、重み $s(\Delta i_k)$ は10以下の小さな値となり、重み $s(\Delta i_k)$ を積算した電流評価値 $S$ の大幅な増加も見込めない。一方、発生頻度 $a(\Delta i_k)$ が1%以下であれば、重み $s(\Delta i_k)$ は100以上の値となり、電流評価値 $S$ の増加量は大きくなる。以上のことから、故障判別が可能な条件は、故障時と健全時で回線電流値の発生頻度 $a(\Delta i_k)$ の差が10倍以上の場合であり、逆に数倍程度の差であれば故障判別は困難となる。

### 3.4 データ伝送方式

隣接する変電所のき電電流値を合成することで得られる回線電流は、図5に示すように、一方の変電所にあるデータ伝送装置をマスター、他方の変電所のデータ伝送装置をスレーブとして、データをマスター側に集約することで得られる。データの伝送には、新たに通信ケーブル等を敷設する必要があり、光ケーブルを含め、通信手段が有線の場合には、伝送データの情報量、伝送速度は十分な性能が得られるが、コストが課題となる。一方、通信手段として無線を用いた場合には、伝送データの情報

量、伝送速度は低下するが、低廉な設備となる。通信手段が無線の場合には、マスター・スレーブ間のデータの時間的同期はGPSを用いて行う。

なお、保護装置として考えた場合には、伝送装置は、情報量、伝送速度の点で有線(光ケーブルを含む)を用いるのが望ましい。

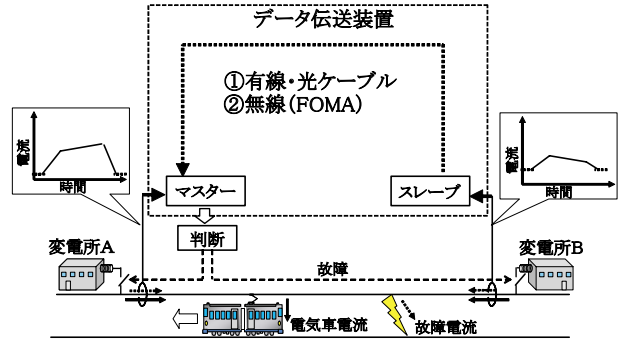
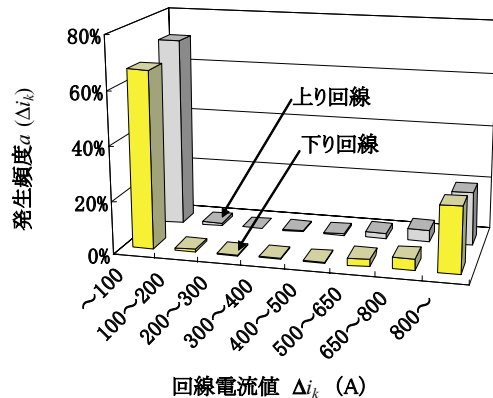


図5 データ伝送方式

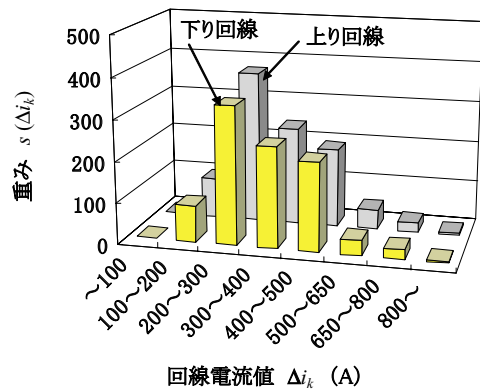
## 4. 高抵抗地絡検出アルゴリズムの検出特性

### 4.1 高抵抗地絡検出アルゴリズムの評価

前章で述べた回線電流に基づく高抵抗地絡検出アルゴリズムの検出時間の評価を行う目的で、健全時の営業線



(a)発生頻度



(b)重み

図6 発生頻度と重みの算定結果

特集：電力技術

の測定データをもとにシミュレーションを行った。シミュレーションの対象にした線区は、図2に示す線区と同一であり、首都圏近郊の平坦な線区である。

平常運転されていることを前提に、昼間の3時間(12:00~15:00)の電流データから回線電流を求め、発生頻度  $a(\Delta i_k)$  と重み  $s(\Delta i_k)$  を算出した。図6(a)に発生頻度  $a(\Delta i_k)$  を、図6(b)に重み  $s(\Delta i_k)$  を示す。図6(a)から、回線電流が100A~500Aの範囲では、発生頻度  $a(\Delta i_k)$  は1%以下であり、100A以下および500A以上と比較して1/10以下になることがわかる。また、図6(b)からも、重み  $s(\Delta i_k)$  は回線電流が100A~500Aの範囲で大きくなり、90~370の値をとる。

故障判定レベルの設定については、値を低くすると、故障検出時間は短くなるが、健全であるにもかかわらず

故障と判定する不要動作が増える。逆に、故障判定レベルを高くすると、不要動作は低減するが、故障検出時間が長くなる、あるいは故障検出ができなくなるといったことが生じる。

図7に、故障判定レベルを5000, 10000, 15000, 20000とした場合の、下り回線の回線電流区分  $\Delta i_k$  ごとの最短の検出時間を示す。図7の結果によると、回線電流の電流区分が100A~500Aの範囲では、故障判定レベルを5000とすると検出時間は15~60秒程度となり、20000とすると検出時間は60~230秒程度となる。

一方、不要動作を防止するには、健全時の電流評価値  $S$  が故障判定レベルを上回らない必要がある。図8に下り回線の12:00~15:00の間の電流評価値  $S$  の時系列データを示す。図8によると、電流評価値  $S$  は通常1000以下で、最大で3200を上回ることがない。この測定結果によると故障判定レベルを3200程度とすることで、故障検出が可能となるが、実際には、列車運行ダイヤの乱れや臨時列車等を考慮する必要がある。不要動作を防止するという目的では、故障判定レベルを通常観測される最大電流評価値の2~3倍程度の値とするのが現実的と考えられる。これについては、今後、他事例等をさらに検討する必要がある。

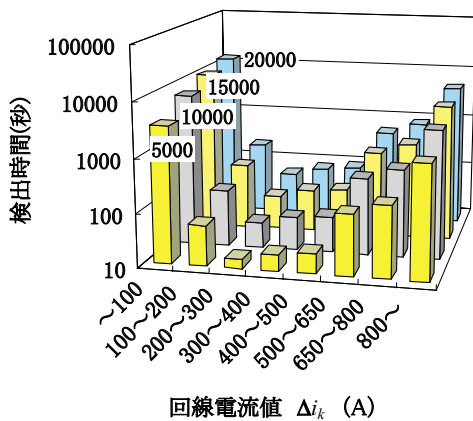


図7 故障判定レベルごとの最短の検出時間

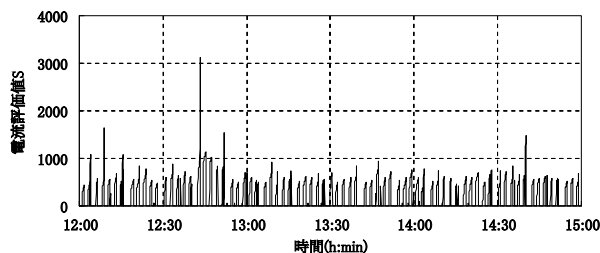


図8 電流評価値の実測値(下り回線)

4.2 故障検出時間

ここで、健全時の下り回線の電流測定結果に300Aの故障電流を重畳させた場合について、シミュレーションにより検出時間を確認する。なお、故障判定レベルについては、図8で示した故障判定レベルの最大値の3倍に相当する10000とした。結果を図9に示す。図9は12:00~12:06までの健全時の下り回線の回線電流と、同回線電流に12:03から故障電流を300A程度重畳させた電流を示している。なお、故障電流のみであれば、図7に示したように最短で44秒程度で検出が可能である。シミュレーション結果によると、12:03の故障直後には、電流評価値  $S$  はほとんど増加せず、約30秒後から増加する。

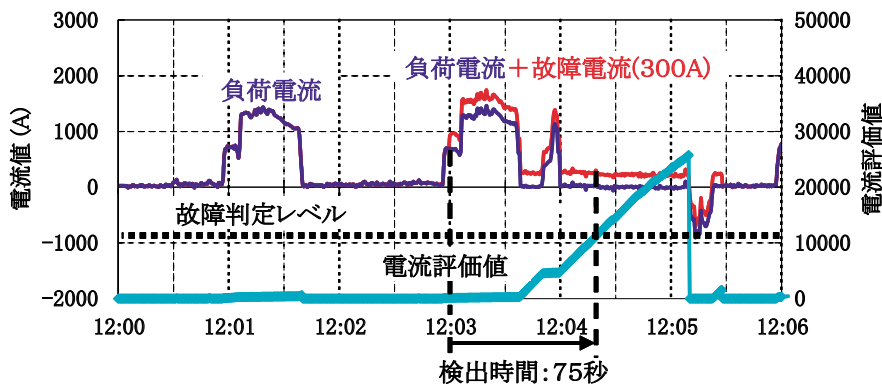


図9 シミュレーション結果

これは、負荷電流に故障電流が重畳し、故障検出可能な回線電流の上限である500Aを上回ったため、負荷電流が零になり、回線電流が故障電流のみになった段階で増加している。最終的に、電流評価値 $S$ が故障判定レベルに達するのは、故障直後から75秒後であり、最短の検出時間である44秒と比較すると、31秒程度遅延しているが、故障検出アルゴリズムの評価としては、実用的には問題ない範囲と考える。

以上、検出可能な故障電流に制限はあるものの、提案する高抵抗地絡検出アルゴリズムが原理的には、高抵抗地絡を検出できることがわかった。

### 5. 試験結果

提案する高抵抗地絡検出アルゴリズムを用いた高抵抗地絡検出装置を製作し、「回線電流」、「発生頻度」、「重み」の検出ならびに地絡を模擬した高抵抗短絡試験により「検出時間」について検証を行った。以下に、試験条件と試験結果の概要について述べる。

#### 5.1 試験回路と試験条件

高抵抗地絡を模擬する場合の試験回路を図10に示す。本来は、隣接する変電所間に抵抗器を設置し、故障を模擬すべきであるが、試験の都合上、き電区分所に抵抗器を設置し、変電所の上り回線と下り回線をそれぞれ対抗する変電所のき電回路とした。き電区分所の抵抗器(5Ω)は、き電線とレールの間に挿入している。なお、き電区分所で抵抗器を挿入し、高抵抗地絡を模擬した試験を行う場合には、試験区間に列車は在線させていない。

試験区間は勾配区間であり、上り回線は下り勾配、下り回線は上り勾配である。

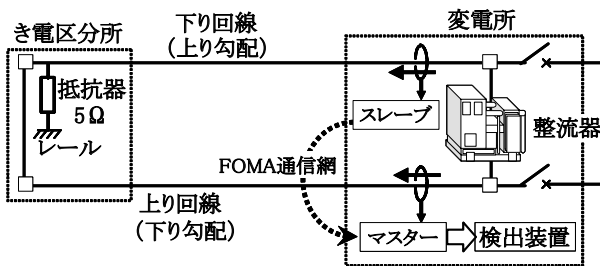


図10 試験回路

一方、製作した高抵抗地絡故障検出装置には、故障判定を行う主装置として汎用のPCを利用し、データ伝送装置として、FOMA通信網と同通信端末(Packet WalkerII)を用いた。また、マスター・スレーブ間の時刻同期にGPSレシーバを用いた。ホールCTで検出したき電電流値は、等価なアナログの電圧信号としてA/D変換した上で、上り回線は直接マスターに送信し、下り

回線はスレーブを介して上り回線のマスターに送信する。マスターで集約したき電電流データは、主装置で回線電流に合成し、主装置の演算部で負荷電流と故障電流の判別を行う。

#### 5.2 発生頻度と重み

高抵抗地絡を模擬した短絡試験を行う前段として、高抵抗地絡検出装置により6:00~24:00の間の回線電流を測定し、上り回線と下り回線のそれぞれの発生頻度 $a(\Delta i_k)$ と重み $s(\Delta i_k)$ を算出した。図11(a)に発生頻度 $a(\Delta i_k)$ を、図11(b)に重み $s(\Delta i_k)$ を示す。図11(a)から、上り回線ならびに下り回線ともに回線電流が100A以上では、発生頻度が低いことがわかる。一方、図11(b)から、重み $s(\Delta i_k)$ は上り回線と下り回線で傾向が異なり、上り回線では回線電流が100A~800Aの範囲で大きな値となるが、下り回線では100A~200Aの範囲でのみ大きな値をとる。下り回線で、重みが大きな値にならない理由については、試験区間が上り勾配であるため、電車が定電流で継続した電力を必要とするためと考えられる。以上、重み $s(\Delta i_k)$ の結果から、上り回線で故障検出可能な回線電流の範囲は100A~800A程度であり、下り回線では、100A~200Aの範囲であることがわかった。

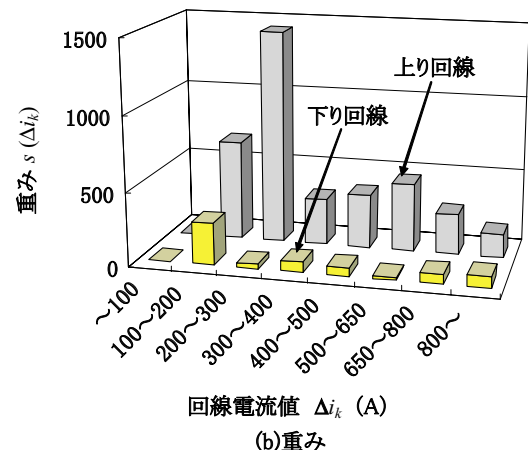
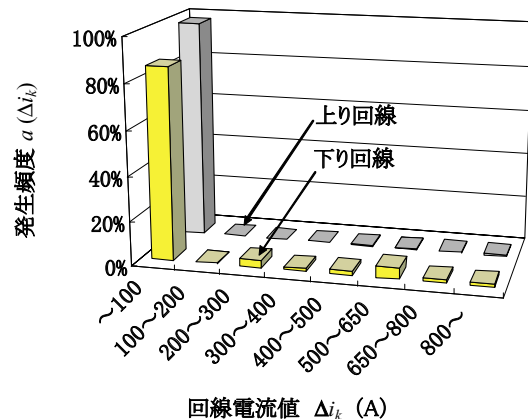


図11 発生頻度と重みの検出結果

特集：電力技術

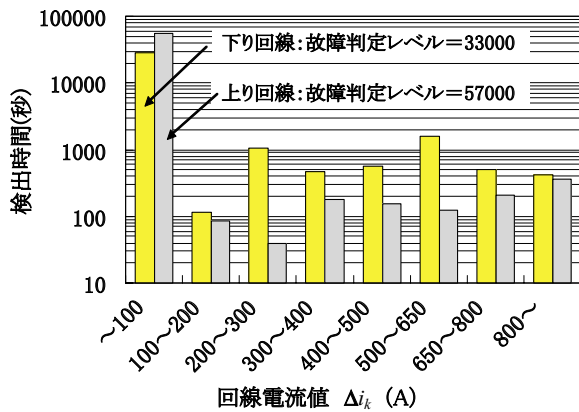


図 12 最短検出時間

一方、図 11(b)の重みに基づいて算出した電流評価値  $S$  の時系列データによると、電流評価値  $S$  は、上り回線で最大 28400 程度に、下り回線で 16600 程度になることがわかった。この結果から、不要動作を防止し、かつ最短時間で故障検出を行うには、故障判定レベルを最大電流評価値の 2 倍程度とするのが実用的であり、その場合、最短の検出時間は、図 12 に示すように、上り回線では 100A ~ 800A の範囲で 40 ~ 200 秒程度、下り回線では、100A ~ 200A の範囲で 120 秒程度を要する。

5.3 高抵抗地絡を模擬した短絡試験結果

図 11 に示した下り回線の重み  $s$  ( $\Delta i_k$ ) を用いて、模擬短絡試験時の高抵抗地絡検出装置の検出時間について検証を行った。なお、下り回線を対象とした本試験では、回路条件から故障電流が故障判定困難な 200A ~ 300A 程度となるため、故障判定レベルを 2000 に下げて故障検出時間を検証した。回線電流が 200A ~ 300A の場合、重み  $s$  ( $\Delta i_k$ ) は 32 となることから、故障判定レベルを 2000 とした本試験では、理論的には 63 秒で故障を検出できる。

図 13 に試験結果を示す。図 13 の結果によると、300A

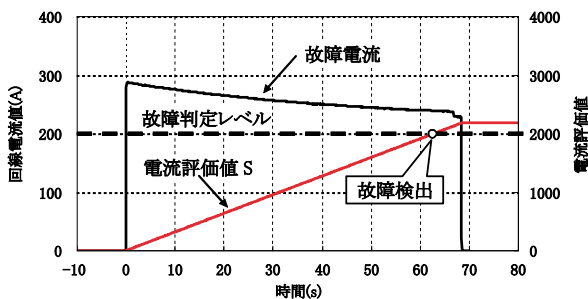


図 13 高抵抗地絡を模擬した短絡試験結果

程度の故障電流が流れた直後に、電流評価値  $S$  が増加し、約 63 秒後に故障判定レベルに達して故障を検出したことが確認できる。なお、図 13 では、故障電流は、時間の経過とともに若干減少しているが、これは、抵抗器の温度上昇に伴う抵抗値の増加によるものである。

6. まとめ

以上、回線電流に基づく高抵抗地絡検出アルゴリズムを提案し、故障検出時間等に関してシミュレーションにより評価を行うとともに、高抵抗地絡検出装置を製作し、模擬短絡試験により検証を行った。以下、本文で述べた事柄を要約する。

- (1) 隣接する変電所のき電電流値を合成することで得られる回線電流の発生頻度の違いを利用した高抵抗地絡検出アルゴリズムを提案した。
- (2) 故障検出時間に関してシミュレーションによる評価を行った結果、検出可能な回線電流の範囲に制限はあるものの、実用的な時間で故障電流と電気車電流の区別が行えることがわかった。
- (3) 高抵抗地絡検出装置を製作し、高抵抗地絡を模擬した短絡試験を行った結果、所定の時間で故障検出が行えることがわかった。

文献

- 1) 社団法人鉄道電化協会：本四備讃線直流き電回路における保護方式の研究報告書，1987
- 2) 佐藤：本四備讃線海峡部における直流き電回路地絡事故に対する保護方式，鉄道と電気 Vol.42, No.7, 1988
- 3) 長谷伸一，森本大観，赤木雅陽，奥井明伸，西村荘治，夏田育千：直流電気鉄道における高抵抗地絡検出装置の開発，電気学会交通電気鉄道・半導体電力変換合同研究会，TER-03-63，SPC-03-129，2003
- 4) 日野政巳，長谷伸一，奥井明伸，小西武史，西村荘治，夏田育千：高調波重畳による高抵抗地絡検出装置を用いたインピーダンス測定，平成 16 年電気学会全国大会，5-139，2004
- 5) 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, 2005
- 6) 木村高志，菅井俊一，奥井明伸，長谷伸一：直流き電における高抵抗地絡検出方式の開発，平成 17 年電気学会産業応用部門大会，3-40，2005