

# 直流電気鉄道の高抵抗地絡保護方式

奥井 明伸

電力技術研究部(き電) 研究室長



おくい あきのぶ

## はじめに

直流き電回路で発生する故障には、短絡故障と地絡故障があります。こうした、故障は、変電所に設置された故障選択装置や直流高速度遮断器によって検出、保護されますが、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（以下、高抵抗地絡）が発生した場合には、故障電流が小さく電気車電流との区別が難しいため、上述の方法では保護ができなくなります。高抵抗地絡の継続は、構造物等の破損に繋がるとともに、焼損等により事故を拡大する恐れがあるため、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ます。本記事では、これまで検討されてきた高抵抗地絡検出法について概説するとともに、鉄道総研で近年、新たに開発・検討した「高調波重畳による高抵抗地絡検出法」と「回線電流に基づく高抵抗地絡検出法」について述べます。

## 高抵抗地絡

直流電気鉄道のき電回路で発生する短絡故障や地絡故障は、通常、一定時間内の電流の増加量を検出することで故障電流と負荷電流を判別する「 $\Delta I$ 型故障選択継電器」や「直流高速度遮断器」の自動遮断によって保護されます。 $\Delta I$ 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・地絡故障等に伴う急激な電流増加を検出した場合には、直流高速度遮断器に開放指令を発し、速やかに故障

電流を遮断します。さらに、同時に隣接する変電所の直流高速度遮断器に開放指令を発することにより（連絡遮断装置）、保護区間を広げるとともに、信頼性を向上させています。

一方、図1に示すように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が発生した場合には、故障電流は構造物の接地抵抗とレール漏れ抵抗で制限されるため、電流値が負荷電流と同程度、もしくはそれ以下となり、上述した $\Delta I$ 型故障選択継電器や直流高速度遮断器では保護ができなくなります。そこで、故障電流の大きさや一定時間内の増加量といった検出要素だけによらない故障検出法が必要となります。

## 従来の高抵抗地絡検出法

直流き電回路の高抵抗地絡検出として、これまで色々な方法が検討されてきており、一部は実用化されています。これまで検討されてきた代表的な高抵抗地絡検出法の例を表1に示します<sup>1)</sup>。

検出要素として電流を用いる方法では、図2 (a) に示すように、保護区間の電車線支持物に連携線を布設するとともに支持物とレール間にギャップ等の放電装置を設けます。碍子が絶縁破壊するなどして電車線が地絡した場合には連携線の電位上昇により放電ギャップが放電し、金属短絡に移行するため、現状の $\Delta I$ 型故障選択継電器や直流高速度遮断器の自動遮断によって保護することができます。

一方、検出要素として電流変動を用いる方式は、電気車電流は変動し、故障電流は変動しないという特性に着目した検出方式で、図2 (b) に示すように、先ず、変電所で観測されるき電電流  $i(t)$  と  $\tau$  秒遅れたき電電流  $i(t - \tau)$  の差を検出します。検出された差電流は、 $\tau$  秒の間の差電流を示すため、電流

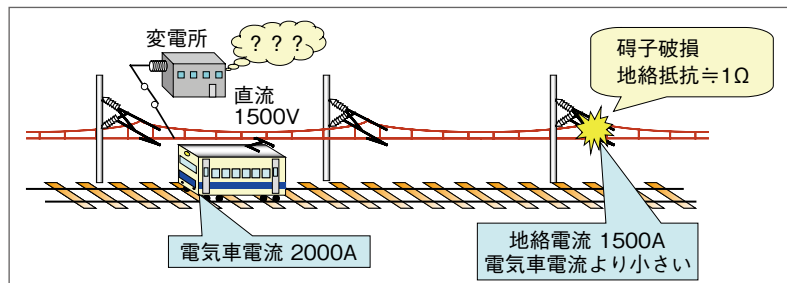


図1 高抵抗地絡

表1 従来の高抵抗地絡検出法の例

検出要素	検出方式	記事
電流	保護区間の支持物に連携線を布設するとともに支持物・レール間に放電ギャップを接続し、地絡時の支持物の電位上昇によりギャップを放電させ、金属短絡へ移行させることで現状の保護装置を用いて検出する。	従来の保護方式で保護可能であるが、保護区間に連携線が必要となる。長大橋梁や駅構内等の特定箇所でも実用化。
電流変動	故障電流は一定、電気車電流は変動すると仮定して、一定電流が継続した場合に故障と判別。	変電所間の横流電流、電気車の補機電流、上り勾配区間の電気車電流は一定電流であるため、検出が難しい場合がある。海底トンネルの1箇所でも実用化。
電圧	支持物の電位上昇を検出し、連携線を用いて変電所の遮断器に遮断信号を送信する。	電圧検出器と信号伝送用に、新たに連携線が必要となる。実用化されていない。

変化が無い場合には零となります。次に、差電流の絶対値が一定値以上でクリア信号を作成するとともに、き電電流が一定値以上になった場合にはカウンタをスタートさせます(カウンタアップ)。カウンタは、クリア信号がくるまで積算を続けます。カウンタアップ値は電流に変動がない一定電流で増加し続けることになり、設定時間以上になった段階で故障と判断します。

検出要素として電圧を用いる方法は、放電ギャップ方式と同様に保護区間の電車線支持物に連携線を布設し、地絡時の電位上昇を検出し、変電所の直流高速度遮断器に遮断信号を送ります。しかしながら、以上述べた方法は、連携線が必要になるなど信頼性、保守、コスト面等の課題があるため一部の方式が、駅構内や長大橋梁等、限られた箇所に導入されたにとどまります。

### 高調波重畳による高抵抗地絡検出法

連携線等の設備が不要で検出精度の向上が計れる高抵抗地絡検出法として、図3に示すように、変電所からき電回路に高調波電流を積極的に注入することで得られる回路定数から高抵抗地絡を検出する方法について検討を行いました<sup>2)</sup>。通常、交流電流を用いて回路定数の変化を観測する場合には、交流電圧・電流の振幅値と位相から得られるインピーダンスを用いことが多いのですが、高い周波数の高調波電流を使用する場合には、表皮効果によりき電回路の

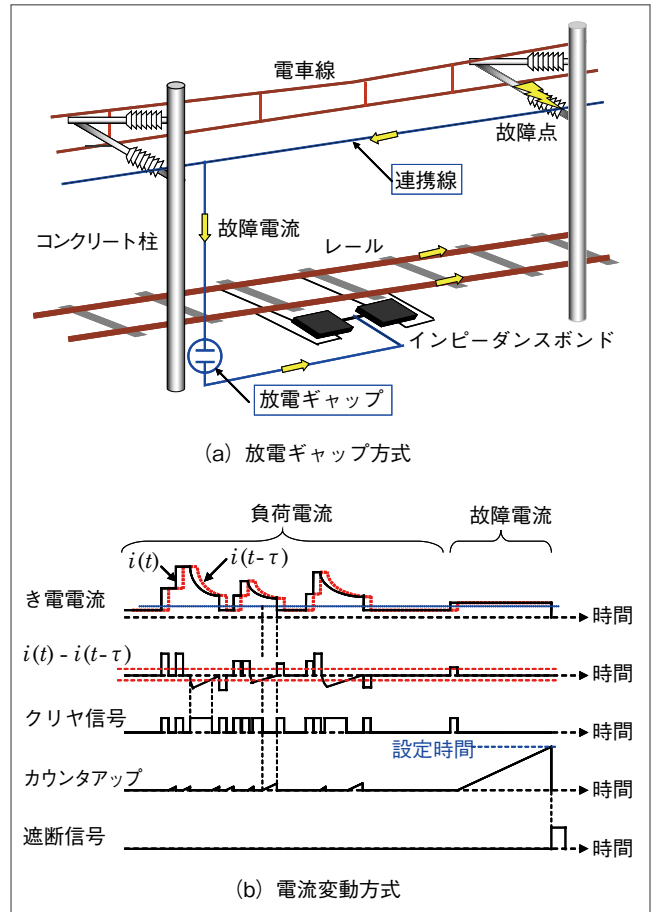


図2 従来の高抵抗地絡検出方式

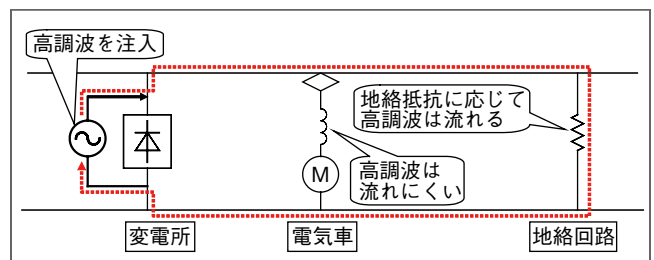


図3 高調波重畳による高抵抗地絡検出法の検出原理

抵抗値が著しく増加するため、インピーダンスだけでは電気車と高抵抗地絡の判別は困難です。そこで、本検出法では、比較的接近した2つの周波数の間においては、抵抗値は周波数に関して比例関係にあるとみなせることから、2つの異なる周波数の高調波電流を注入することで、表皮効果による影響を除去します。ここでは、以後、表皮効果の影響を除去して得られたインピーダンスを「インピーダンスR」と呼び、従来のインピーダンスと区別します。この指標が高抵抗地絡に対しては地絡抵抗と等価となり、電気車に対しては零となることを利用することで高抵抗地絡を

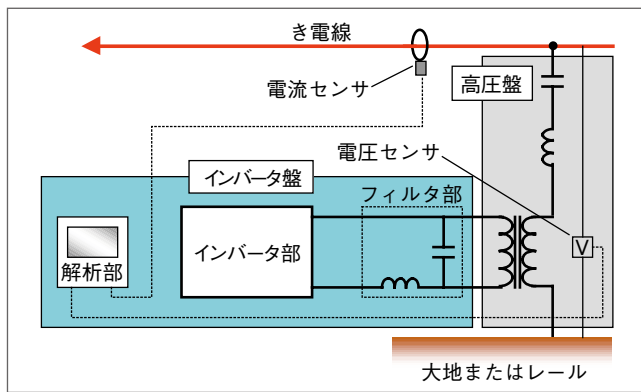


図4 高調波重畳による高抵抗地絡検出装置

検出することができます。図4に、以上の検出原理に基づく高抵抗地絡検出装置の構成を示します。同装置は、高調波を発生させるインバータ盤とき電回路に高調波を注入する高圧盤で構成されています。そして、電流センサと電圧センサにより注入した高調波電圧・電流を計測し、インピーダンス $R$ を求めます。なお、高調波発生源として変電所の整流器が発生する $6n$  ( $n=1,2,3,\dots$ または $2,4,6,\dots$ )倍の高調波を利用する方法もありますが、他の変電所の整流器の影響を受けるため、本検出装置ではインバータを用いて適切な周波数を選択しています。実際に注入する高調波の周波数は、信号軌道回路等に干渉しない周波数として整流器の発生する高調波の $\pm 10\text{Hz}$ 程度を設定します。

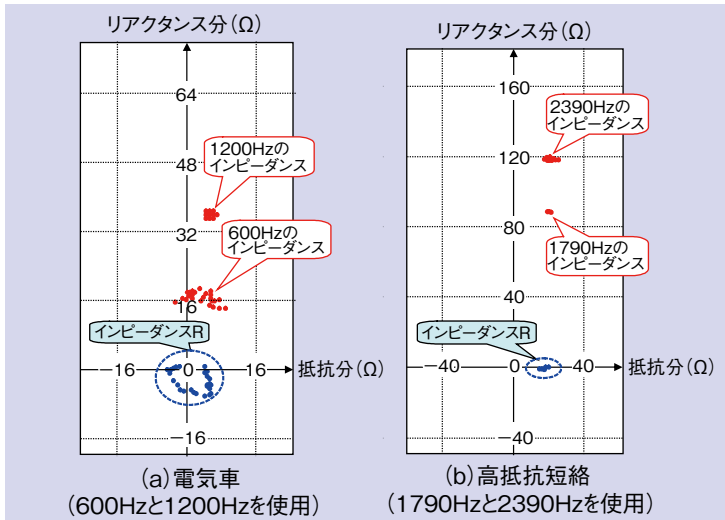


図5 インピーダンスとインピーダンス $R$

図5に、検出結果の1例を示します。図5は、横軸に抵抗分を、縦軸にリアクタンス分を取り、2つの周波数に対するインピーダンスと、2つのインピーダンスから算定されるインピーダンス $R$ を示しています。図5(a)は、営業線で測定した結果で、電気車に対する検出結果を表します。この結果によると、インピーダンスに含まれるリアクタンス成分や表皮効果等による抵抗分が除去され、インピーダンス $R$ は、ほぼ零となっていることがわかります。なお、健全時の検出に際しては、高調波発生源としてインバータは使用せず、便宜的に整流器の高調波を用いました(600Hzと1200Hz)。一方、図5(b)は、き電線とレールを $5\Omega$ の抵抗で短絡し、高抵抗地絡を模擬した検出結果を示しています。この結果によると、インピーダンス $R$ の検出結果としては、挿入した抵抗値である $5\Omega$ とは差があるものの、抵抗分として検出されており( $20\Omega$ )、抵抗分が零に近い、電気車との判別は可能であることがわかりました。

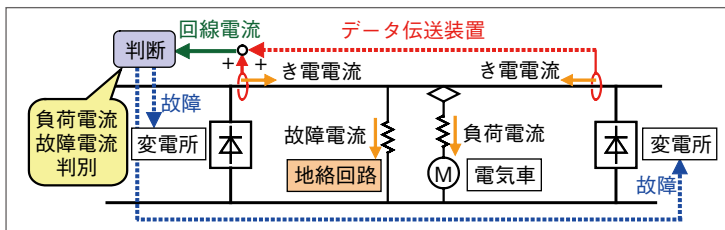


図6 回線電流に基づく高抵抗地絡検出法の検出原理

また、これらの検出結果から、電気車の運転条件によっては、インピーダンス $R$ の値が変動するため、时限要素を加える等の改良が必要となることわかりました。

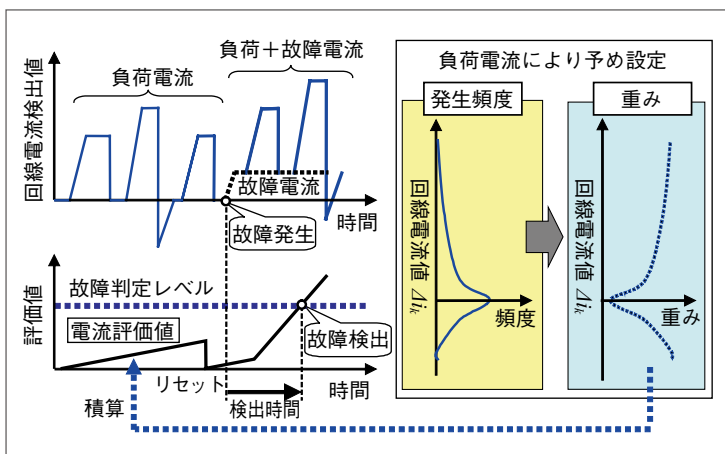


図7 検出アルゴリズム

### 回線電流に基づく高抵抗地絡検出法

前3節の図2(b)で示した電流変動方式は、故障電流に電気車電流が重畳した場合には、検出時間は延びる傾向にあります。したがって、保護区間内に常に電気車が存在するような高密度線区には、別の

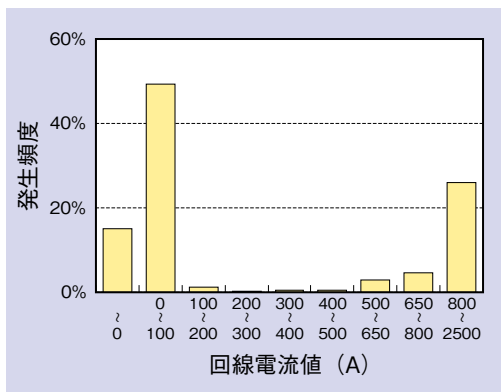


図8 回線電流の発生頻度

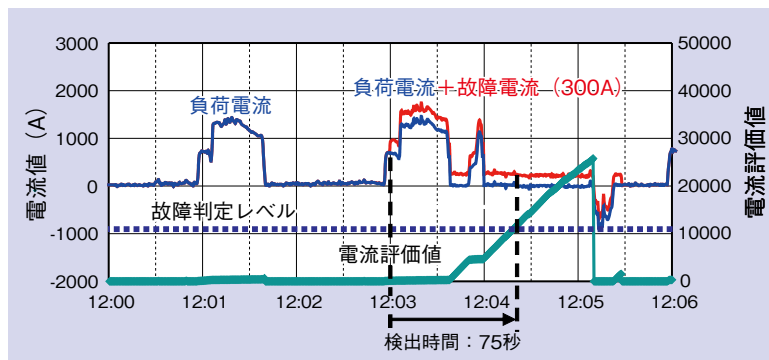


図9 シミュレーション結果

検出法が必要となります。そこで、隣り合う2つの変電所のみ電流データから合成される回線電流に基づき高抵抗地絡故障を検出する検出法について検討しました<sup>3)</sup>。

この検出法は、図6に示すように、隣り合う2個所の変電所のみ電流を加算した「回線電流」を検出に利用します。そして、健全時と故障時の回線電流の統計的な差異により故障を検出します。この方法では、隣接変電所の電流データを伝送するために、新たに通信回線を布設する、あるいは連絡遮断装置の通信回線をデータ伝送と併用する、さらに、FOMA等の無線を設置する等、データ伝送装置が必要となります。しかしながら、各変電所で観測される電流と異なり、回線電流は、変電所間の横流電流を含まず、変電所間に供給される全電流を表すため、電気車の移動に伴う電流の増減といった影響を受けなくなります。

図7に検出アルゴリズムを示します。この検出アルゴリズムでは、最初にチューニングが必要になります。まず、一定時間観測した回線電流から電流区分ごとに発生頻度を求めておきます。さらに、発生頻度の逆数に対応した「重み」を算定します。実際に故障検出に使用する場合には、逐次観測される回線電流に基づき、この重みを積算して行きます。この積算値をここでは「電流評価値」と呼び、電流評価値が予め設定した故障判定レベルに達した段階で、故障と判定します。なお、電流評価値は、回線電流が零電流になった段階でリセットします。ここで、検出アルゴリズムを評価する目的で、営業線で観測された回線電流の測定結果をもとに、模擬的に300Aの故障電流を重畳させた検出結果の1例を示します。評価した電区間の回線電流の頻度分布を図8に示します。図8によると、回線電流が100A～500Aの範囲では、発生頻度は1%以下であり、100A以下および500A以上の発生頻度と比較して1/10以下の発生頻度であることがわかりました。このことから、この電区間において短時間に故障検出可能な故障電流の範囲は、100A～500Aということになります。一方、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

出時間は短くなりますが、健全にもかかわらず故障と判定する不要動作が増えます。一定時間内の観測結果によると、この電区間では、電流評価値は3200を超過することがないことから故障判定レベルを3200程度とすることで短時間に故障検出が可能となることがわかりました。しかしながら、実際には列車ダイヤの乱れや臨時列車等による不要動作の防止を考慮する必要があることから、今回、故障判定レベルは、観測値の3倍の10000としています。図9に検出結果を示します。故障電流を300A、故障判定レベルを10000とした場合、理論的には最短44秒で検出可能ですが、負荷電流（電気車電流）による変動により31秒遅延し、75秒で故障を検出しました。

以上、故障電流の範囲に制限はあるものの、本検出法は原理的に高抵抗地絡故障を検出できることがわかりました。

## まとめ

高抵抗地絡故障は非常に多様で、原理的にも検出が難しいとされています。また、近年の列車密度の増加は、電気車電流と故障電流の判別をより難しくしています。その一方で、高抵抗地絡故障の発生頻度の低さが、低廉な検出装置の要求につながっており、高抵抗地絡故障の検出技術の向上には、技術的なブレークスルーに加え、「低廉」、「高信頼性」といった高いハードルを超える必要があります。

**RRR**

## 文献

- 1) (社)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，1987.3
- 2) 長谷，他：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
- 3) 長谷，他：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, 2007