

車載検知器による自列車地絡検知手法の提案

○ [電] 三木 真幸 [電] 廿日出 悟 (鉄道総合技術研究所)

Proposal for On-board Detection Method of Vehicle Ground Fault

○Masaki Miki, Satoru Hatsukade (Railway Technical Research Institute)

When a vehicle ground fault occurs, which is a short-circuit between the high voltage circuit and the car body, the power feeding stops at the substation. If it takes time to identify the cause of the ground fault, the time the operation restarts is delayed. Although it is possible to roughly estimate the location of a ground fault from the substation, the train cannot detect the ground fault that occurred on its own, and it can take time to identify the location of the ground fault. In this paper, we outline the current distribution in the train when a vehicle ground fault occurs, and propose a method for detecting the ground fault of the own train using an on-board detector for AC power supply railway.

キーワード：車体地絡，特高回路，接地回路，交流き電，地絡検知

Key Words：Vehicle ground fault, High voltage, Ground circuit, AC electrification, Ground fault detection

1. はじめに

鉄道車両において何らかの理由で高電圧部と接地電位部に短絡（以下，車体地絡）が発生すると，短絡箇所を通じて地絡電流が流れる．車体地絡の典型的な例として，パンタグラフなど屋根上高圧機器と車体との間での短絡が挙げられる（図1参照）．このとき，大電流や車体電位上昇により車載機器に不具合が生じる場合があり，大規模な輸送障害に至った事例もある．地絡電流は編成内を流れ複数の接地軸を分流してレールへ至るが，地絡部位によっては車両主回路に備わる過電流保護等，既存の検知・保護機能が動作せず，自列車で地絡が発生したことを検知できない場合がある．

地上電力設備（変電所）にて地絡電流が検知されると，自動的にき電が停止される．その後，地絡原因の特定・地絡状態の解消の後架線加圧が再開されるが，その間影響範囲内の全列車の運転が中断される．すなわち，地絡地点の特定に時間を要すると運転再開までの時間が長引き，運転に大きな影響が出ることとなる．変電所は地絡地点を特定

する機能を持つ¹⁾が，車庫など多数の車両が在線する場所で車体地絡が発生した場合，地絡車両の特定に時間を要し，運転再開の遅れにつながる恐れがある．

そこで，車体地絡発生時の地絡地点を速やかに特定し運転再開までの時間短縮に資するために，交流き電線区・車両を対象とし，自列車の特高回路地絡を車上で検知する手法を開発した．

2. 車体地絡時の想定地絡電流値および電流経路

車体地絡が発生した場合，変電所～き電回路～地絡箇所（車両）の経路で地絡電流が流れる．交流ATき電の場合，帰線方向は編成から見て前後2方向となり，その電流比は編成前後の両ATとの距離比に応じて定まる（図2参照）．なお，BTき電においては，通常は編成前後のいずれか一方方向（吸上線側）に全ての帰線電流が流れるが，地絡電流がBT（吸上変圧器）の定格電流を超える場合，磁気飽和により励磁インピーダンスが急減し吸上げ能力が低下するため²⁾，ATき電の場合と同様に編成前後の2方向ともに帰

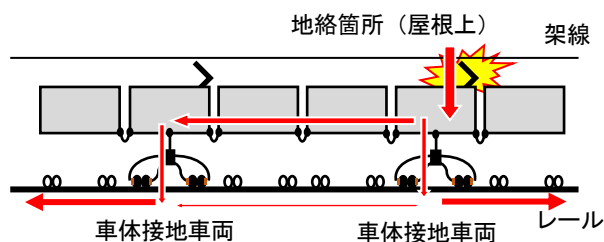


図1 車体地絡発生時の地絡電流経路の模式図（一例）

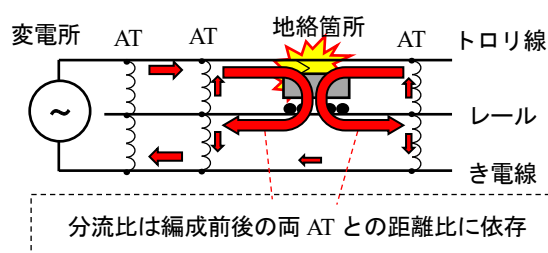


図2 き電方式と帰線方向の模式図（ATき電の例）

線電流が流れる可能性がある。

また、車体地絡時の地絡電流 I_s [A]の大きさは、き電回路（電車線、レール、変電所）および地絡箇所である車両のインピーダンスに依存し、式(1)で表される³⁾。

$$I_s = \frac{V}{Z_0 + Z_{Tr} + Z_L + R_g} \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 V [V]はき電電圧、 Z_0 [Ω]は変電所電源インピーダンス（単相換算）、 Z_{Tr} [Ω]は変電所変圧器インピーダンス、 Z_L [Ω]は変電所から地絡地点までの線路インピーダンス、 R_g [Ω]は地絡地点の抵抗である。一般に、 Z_0 および Z_{Tr} の値はいずれも数 Ω 、 Z_L は距離あたり数100 m Ω /km程度とされる⁴⁾。一方 R_g については、車体地絡の場合は車両各部の抵抗が数 m Ω オーダー⁵⁾であり、他の項と比較し十分小さいため無視できる。従って、地絡電流値は地上電力設備側のインピーダンスのみで定まり、地絡号車や車両の電気的特性に依存しないと見なせる。

以上を踏まえ、車体地絡現象の特徴をまとめると以下の通りとなる。

- ・ 高压側から編成への地絡電流の流入点（地絡箇所）は、一般に編成内の1点である。具体的には、避雷器等の機器の絶縁劣化や飛来物などによる屋根上特高压回路～車体間の短絡が挙げられる。
- ・ 編成からレールへの地絡電流の流出点は編成内の各接地軸である。
- ・ レール側の帰線電流方向は編成の前後両方向に流れる。編成前後の各方向のレール帰線電流比は地上電力設備との位置関係等から定まり、編成内地絡箇所や車両の電気的特性に依存しない。
- ・ 地絡電流の大きさはき電回路構成や地絡地点により定まり、編成内地絡箇所や車両の電気的特性に依存しない。

3. 地絡模擬試験による地絡電流分布の実測

車体地絡発生時の編成内の電流分布の実態を把握するために、定置状態で車体～レール間に最大約20 Aの電流を通電する地絡模擬試験を行い編成内の電流分布を実測した。ここでは、6両編成通勤形編成を対象とした試験について概要および測定で得られた結果を示す。

3.1 試験概要

試験編成は、在来線通勤形交流電車（6両編成 2M4T、ステンレス構体）を用いた。なお、より複雑な接地回路を持つ車両への適用の際の参考とするため、本来は接地線のない両先頭車に仮設の模擬接地線を接続した状態で試験を行った（室内運転台付近の車体金属部～先頭軸より外方のレール）。図3に車両の接地回路、通電経路および電流測定箇所（一部抜粋）の模式図を示す。

3.2 測定結果

図4に編成内の全接地線の接地電流比を示す。ここで、図4(a)～(d)は実際の測定結果である。また、図4(e)は、地絡号車が編成中間（4号車）かつレール帰線方向が編成前後に均等の条件について、編成車両が電氣的に前後対称との仮定の下、3号車地絡および4号車地絡の試験結果から、重ね合わせの原理を用いて推定した結果である。

図4より、編成内の地絡電流分布は地絡車両により大きく異なることが分かる。また、地絡号車が編成の中間付近かつ帰線電流が編成の前後に均等の場合（図4(e)）、接地線電流分布が最も均等となることが分かる。レール帰線方向が編成の片側の場合も両側の場合も、帰線方向に最も近い接地線に電流が集中する傾向が見られた。

定性的には、この実測結果は、車両（車体および車間接地渡り線）とレールのインピーダンスを比較すると後者が相対的に大きいいため、地絡電流の大部分が編成内を経由し帰線側に最も近い接地線からレールに戻るためと説明できる。なお、新幹線編成の場合は車体～接地端子台間の接地抵抗器（一般に0.5 Ω ）の影響が支配的なため在来線の場合と比較し分流比のばらつきはより少ないものの、帰線方向に近い接地線の分流比が高い傾向は同様と考えられる。

4. 自列車地絡検知手法

4.1 提案手法の概説

車両運用線区で発生しうる車体地絡のうち地絡電流値が最小の場合でも検知可能な地絡検知手法を提案する。3章に示した地絡模擬試験結果より、地絡電流は帰線方向に最も近い接地線へより多く流れる傾向を確認した。具体的な分布は編成の接地回路構成や地絡号車に依存し、またレール帰線方向はき電方式（AT、BT）や在線地点と地上電力設

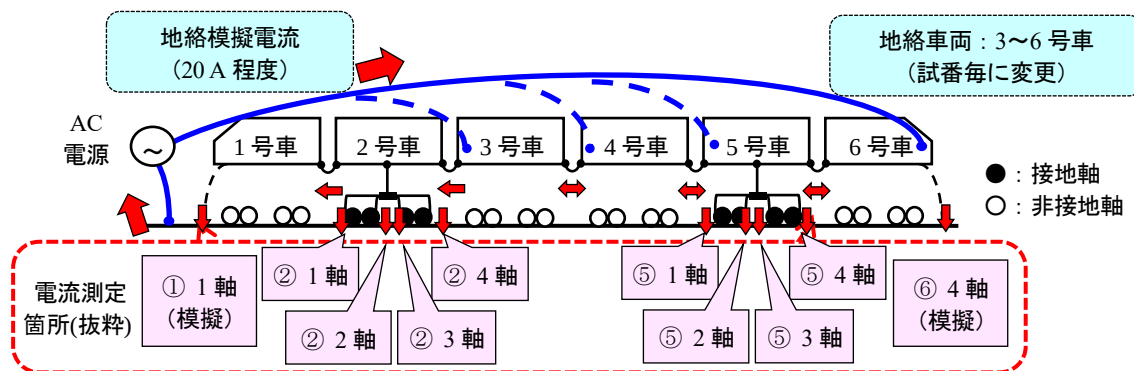


図3 地絡模擬試験測定模式図

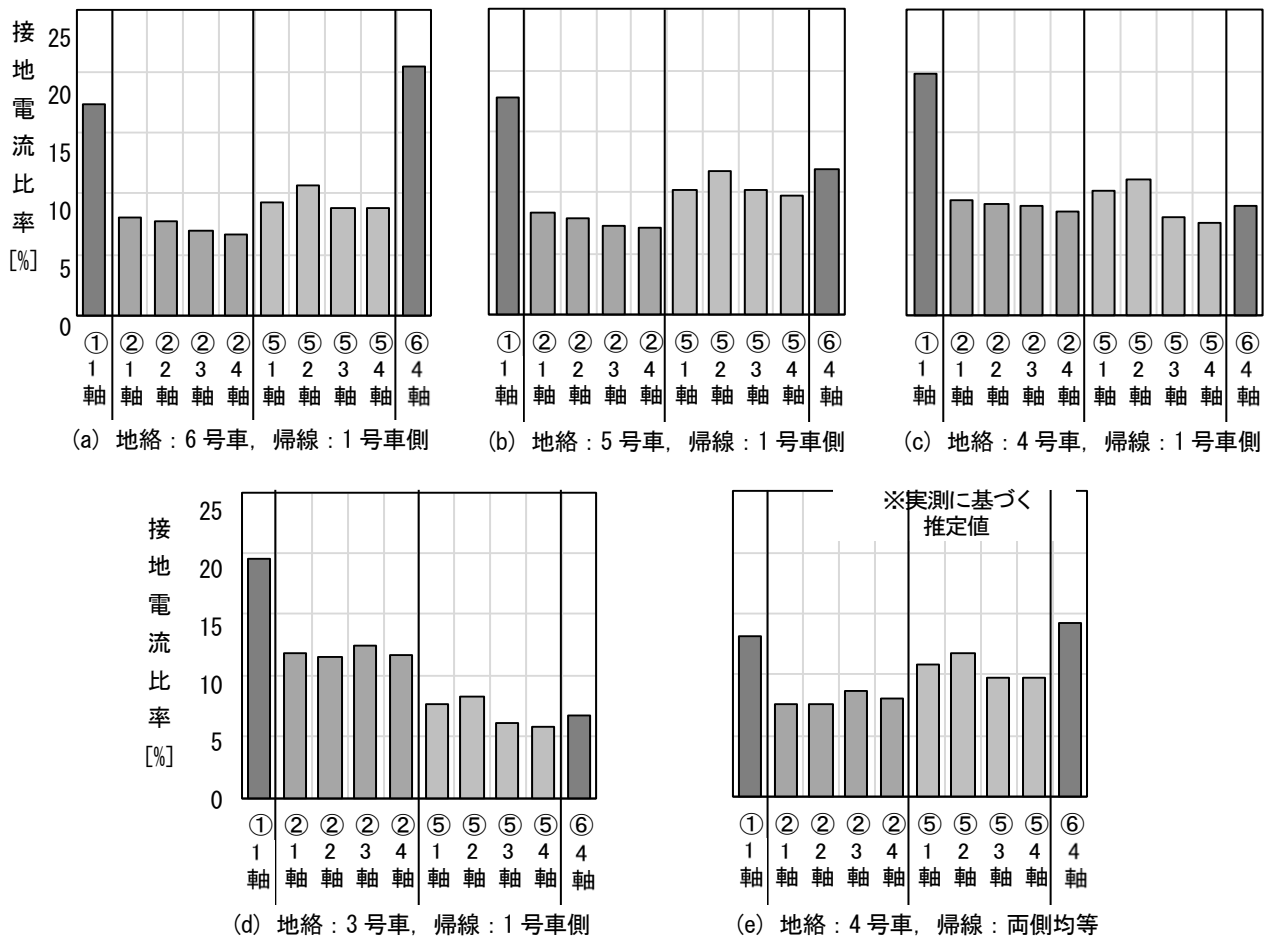


図4 地絡模擬試験における接地電流比率測定結果（通勤形電車）

備との位置関係に依存する。そのため、編成内両端の車体～接地装置間配線2箇所の電流を監視し、少なくとも一方で閾値を超えた場合に地絡と判定する手法を提案した（図5参照）。

4.2 地絡検知閾値

（1）検知閾値の決定指針

本節では車体地絡電流および列車負荷電流の概算値および編成内の帰線電流分布を踏まえ、検知器の閾値決定の指針を示す。地絡発生時に2箇所の検知器電流の最大値が最も小さくなる条件は、下記2条件を満たす場合である。

- ① 地絡電流値が当該線区で生じうる最小値 $I_{s,min}$ [A]
- ② 2箇所の検知器電流のうち大きい方の分流比（総地絡電流に対する比率）が想定される全分流パターンのうち最小 a [%]

従って、式(2)に示すように、検知器の閾値電流値 I_{th} をこのときの検知器電流より小さな値とすることで、想定される全ての地絡電流を検知可能となる（図6参照）。

$$I_{th} \leq I_{s,min} \times \frac{a}{100} \quad \dots\dots\dots (2)$$

条件①【地絡電流値が当該線区で生じうる最小値】となる場合は、地絡電流が最小となる条件として、簡単のため車体地絡発生地点が変電所から最も遠い場合と考えることができる。延長き電等の場合を除き、2変電所の中間に位置する区間所付近が変電所から最も遠方となる。この条件の下で前出の式(1)から $I_{s,min}$ が求まる。

また、条件②【2箇所の検知器電流のうち大きい方の分流比が全分流パターンのうち最小】に該当する分流パターンは、第3章の試験結果から「帰線方向が編成の前後均等」

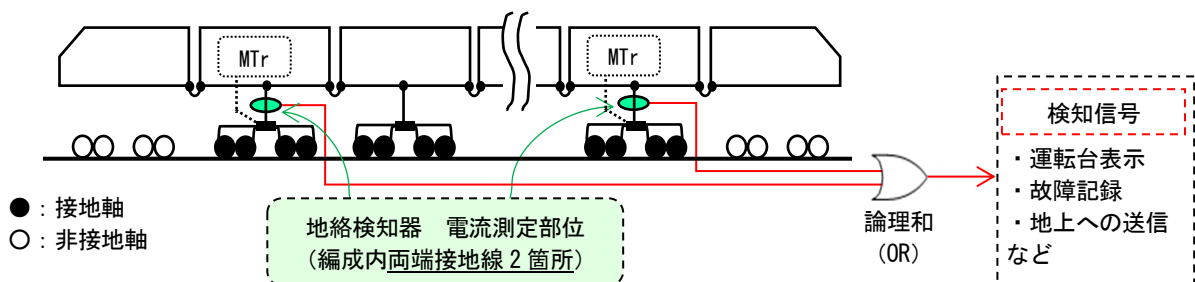


図5 地絡検知手法の模式図（一例）

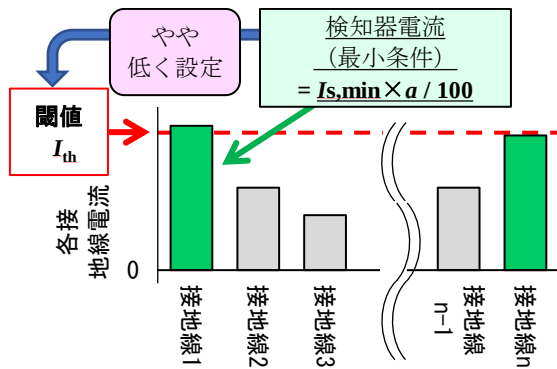


図6 検知器閾値電流の設定

かつ「地絡車両が編成内の中間」となる場合である。

(2) 検知閾値の試算例

車体地絡電流の最小値 $I_{s,min}$ を在来線 BT き電 50 Hz の場合について文献値を基に概算した結果を表 1 に示す。なお、今回開発した地絡検知は『き電範囲内に複数列車（編成）が存在する場合に地絡列車（編成）を特定すること』を主眼としており、想定される用途としては比較的高密度線区や車庫等での地絡検知となる。この場合、き電距離は表 1 の想定より短くなるため、想定地絡電流の最小値はより大きくなる。

両端接地線の分流比 a [%]については編成全体の接地線本数や接地回路構成によって変わらうが、図 4(e)の測定結果を採用すると約 14%となる。これらより、検知器の閾値電流値は式(2)に従い下記の通りとなる。

$$I_{th} \leq 698 \times 0.14 = 98 \text{ A} \quad \dots\dots\dots(3)$$

なお、検知器取付箇所は図 5 に示す通り主変圧器 (MTr) 帰線の「上流側」となる車体—接地装置間の接地線であり、接地装置に異常が生じた場合などを除き、列車負荷電流が検知器取付箇所に分流し(3)式の閾値を超えることはない。そのため、通常の列車負荷電流による誤検知は起こらない。

4.3 簡易検知器による原理確認

3 章に示した模擬地絡試験において汎用品 CT センサおよび電流リレー（閾値以上で接点出力）から成る簡易検知器を 1 号車 1 軸模擬接地線に仮設し、提案検知手法の原理確認を行った。図 7 に 5 号車地絡（図 4(b)試番）における実測電流波形および検知信号の例を示す。各試番で地絡発生から検知器動作までの検知時間は 24 ms～45 ms であった。交流き電において地絡発生からき電停止までに要する時間は一般に約 50 ms～100 ms 程度なので、実車両に適用する際の検知器の時定数が同程度であれば、き電停止により地絡電流が遮断される前に検知可能である。

5. おわりに

車体地絡発生時の地絡地点を速やかに特定し運転再開までの時間短縮に資するために、交流き電において自列車の特高回路地絡を車上で検知する手法を提案した。

(1) 編成内の地絡電流分布の実態把握のため、定置状態で車体～レール間に最大 20 A の電流を通電する地絡模擬試

表 1 車体地絡電流最小値の概算例

き電方式	BT き電
基準電圧 [kV]	22
電源インピーダンス[Ω]（き電側換算）	$j1.26$
変圧器インピーダンス [Ω]	$j9.68$
距離あたり線路インピーダンス [Ω/km] ※1	$0.275+j0.793$
変電所～地絡地点間距離[km]（最長の場合）※2	25
電車線路インピーダンス [Ω]	$6.875+j19.825$
総インピーダンス（絶対値） [Ω]	31.5
↓ 試算結果 ↓	
最小地絡電流 [A] ※ $I_{s,min} = V/Z_{max}$	698

※1 線路インピーダンスは在来線 50 Hz の例⁴⁾
※2 在来線 BT き電における最長の変電所間隔（約 50km）に対し、中間地点を地絡地点と仮定した

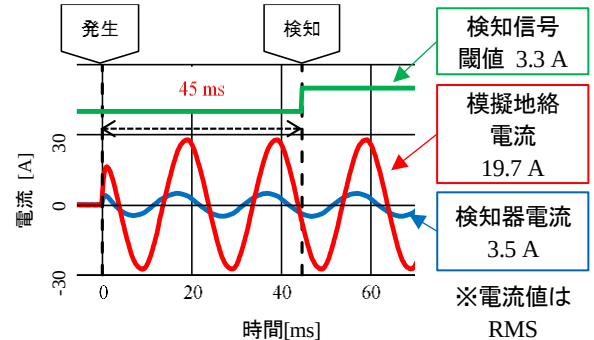


図7 簡易検知器による検知動作

験を行い、地絡号車ごとの接地電流分布を得た。接地電流分布は地絡号車および帰線方向により大きく異なるが、いずれの場合もレール帰線方向に近い接地線に電流がより多く流れる傾向が確認された。

(2) 地絡模擬試験で得た地絡時の編成内電流分布の特徴に基づき、編成内両端の接地線 2 箇所の電流を監視し、少なくとも一方で閾値を超えた場合に地絡と判定する手法を提案し、簡易検知器による原理確認を行った。

(3) 車両の運用線区で発生しうる車体地絡を検知範囲とし、地絡地点や地絡号車によらず検知可能、かつ自列車負荷電流や他車帰線電流による誤検知を避ける検知閾値の設定指針を示した。なお、実際に本検知手法を導入する場合は、導入線区における想定地絡電流の最小値や導入編成における地絡電流の編成内分布を計算または実測で求め、閾値を検討する必要がある。

参 考 文 献

1) 電気学会 電気鉄道における教育調査専門委員会：最新電気鉄道工学，コロナ社，pp.180-184，2000
2) 日本鉄道電気技術協会：鉄道電気技術者のための電力概論 変圧器，pp.93-95，2017
3) 持永芳文：電気鉄道工学，エース出版，p.113，1999
4) 電気学会 電気鉄道における教育調査専門委員会：最新電気鉄道工学，コロナ社，p.172，2000
5) 三木真幸，廿日出悟：鉄道車両の接地抵抗および車体・車間抵抗の実測結果，電気学会全国大会，p.426，2019