

# 直流電気鉄道を異物介在による送電トラブルから守る



**赤木 雅陽**  
Masataka Akagi  
電力技術研究部  
き電研究室  
主任研究員



**小西 武史**  
Takeshi Konishi  
電力技術研究部  
き電研究室  
主任研究員(上級)



**森本 大観**  
Hiroaki Morimoto  
電力技術研究部  
き電研究室長

## はじめに

直流電気鉄道では、列車が走行に必要とする電流(十両編成の場合は数百~数千アンペア程度)を、変電所から電車線(架線)を用いて送電します。この際、架線に異常があると列車に電流を送電できなくなる送電トラブルと呼ばれる事象が発生することがあります。送電トラブルのうち、架線同士あるいは架線とレールとが接触する**短絡故障**<sup>1)</sup>で流れる故障電流は、数千アンペア以上となることから比較的容易に検知できます。一方、架線がパンタグラフ以外のものに何らかの原因で意図外に接触する**地絡故障**<sup>2)</sup>

### 短絡故障

電気回路を構成する二つ以上の導体(例えば架線とレールのように通常は金属同士)が直接接触して導電経路が構成され、大電流が流れることを短絡故障といいます。一般に列車の集電電流より短絡故障時の電流のほうが大きな値となることを踏まえ、 $\Delta I$ 形故障選択装置に代表される多くの保護装置は、この大電流を数十~百数十ミリ秒レベルの短時間で検知して送電を停止することで電車線設備の保護を行います。

### 地絡故障

電気回路を構成する導体(例えば電車線)が、大地や、本来は電気回路ではない地上の構造物(例えば図1に示す電車線の支持物)に接触して電流が漏洩することを地絡故障といいます。なお、車両の場合は車体への漏電を指します。

では、“高抵抗地絡”と呼ばれる数百アンペア程度と小さな故障電流しか流れない現象に対処する必要があります。また故障電流が列車最大電流よりも小さいことから、既存の保護装置での検知が容易でなく、長年の課題となっています。ここでは地絡検知の歴史を振り返るとともに、最新のデジタル技術を活用して現在開発中の地絡検知手法の概要について紹介します。

## 桜木町事故から昭和末期まで

直流電気鉄道では主に、架空単線式電車線方式が用いられています(図1)<sup>1)</sup>。この方式では、トロリー線がレールから約5mの高さになるよう工夫した架線を線路沿線に張り、列車の屋根上にあるパンタグラフとトロリー線を接触させながら集電します。また、変電所には列車に供給する電流の確認とトラブルへの備えとして、電流計と保護装置が設けられています。故障電流が流れた際は、その電流を検知して遮断器を開放し、電車線への送電を停止させます。

ここで、架線と大地との間は絶縁のために一定の離隔距離を設けています。しかし図1に示すように飛来する鳥自身、あるいは鳥が営巢のために持ち込む針金などの異物や飛来物によって、大きな送電トラブルが発生することがまれにあります。

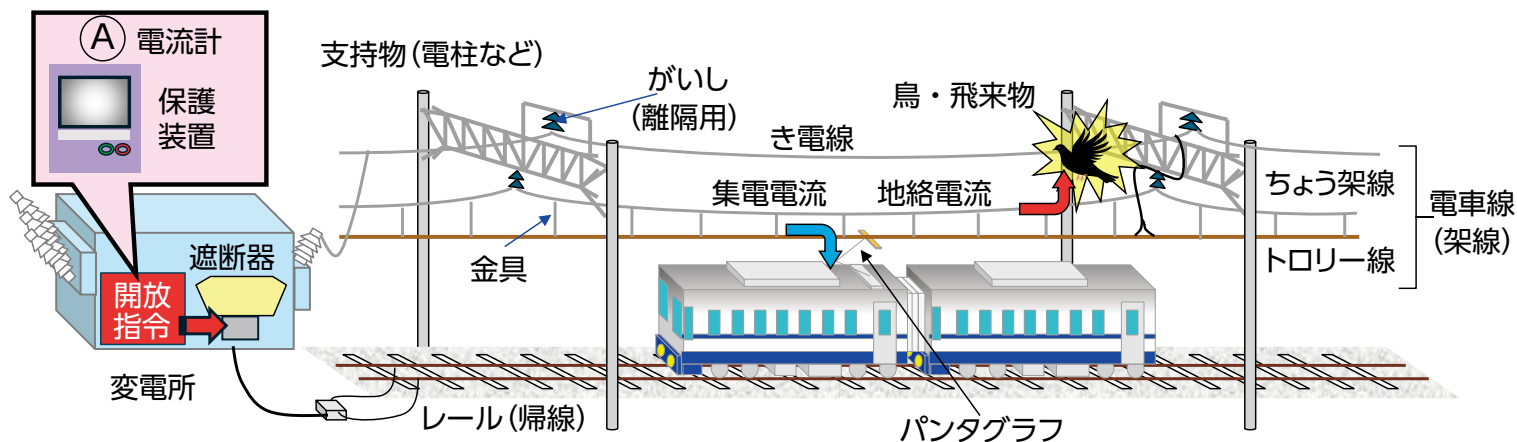


図1 架空単線式電車線と異物の介在

さて、架線は健全な状態を維持するため定期的に保守を行う必要がありますが、過去にあってはならない事故が発生しました。1951年に駅近傍で架線の保守を行っていた際に、作業誤りによりちょう架線と異物（工具）が電柱と接触して**アーク**が発生し、ちょう架線の溶断にともない架線が垂れ下がりました。溶断箇所近傍のちょう架線をいったん吊り上げて復電しましたが、溶断箇所から離れた箇所で垂れ下がっていた架線が進来した列車のパンタグラフと絡まってパンタグラフが破損、引き続き木製の屋根上で架線が接触してアークが発生しました。これを変電所で検知できなかったことから列車が焼損する大惨事に至ってしまいました<sup>2)</sup>。

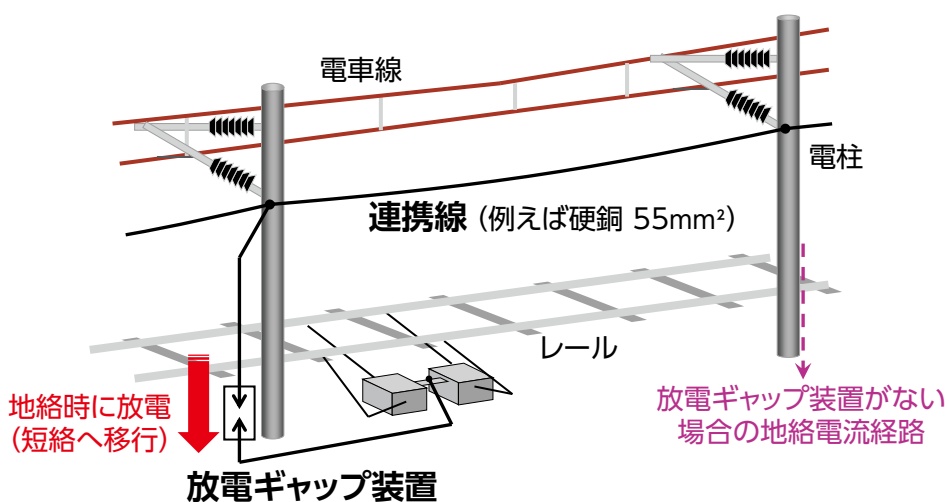
この大事故の教訓もあいまって、変電所で故障電流を速やかに検知するため、故障発生時の急峻な電流変化分（ $\Delta I$ ）を検出する新たな保護装置（ $\Delta I$ 形故障選択装置）が1959年に標準化されました<sup>3)</sup>。また車両では屋根の絶縁を強化するなどの対策が行われました。

時が進み、1988年の本四備讃線開業に際し、橋りょう区間でもし地絡が生じた場合に変電所構内にある別目的の保護装置が誤動作し、電気係員が変電所で解除操作を行うまでの間、列車が橋りょう上で待たされることが危惧されました。そこで、橋りょう区間では橋りょう自体とレールとの間に、高架橋区間では図2に示すように電柱同士を連携線で連携した上で連携線と

図2 放電ギャップ方式

### アーク

気体中の二つの電極間で絶縁破壊が生じた際に発生する導電経路をアークといい、電流密度が大きく高熱を伴います。ここで、短絡故障のように電流が大きい場合はアーク自身が生じる電磁力によりアークは移動・消失しやすい一方、地絡故障のように電流が小さい場合のアークは同じ場所で継続しやすい傾向にあります<sup>9)</sup>。

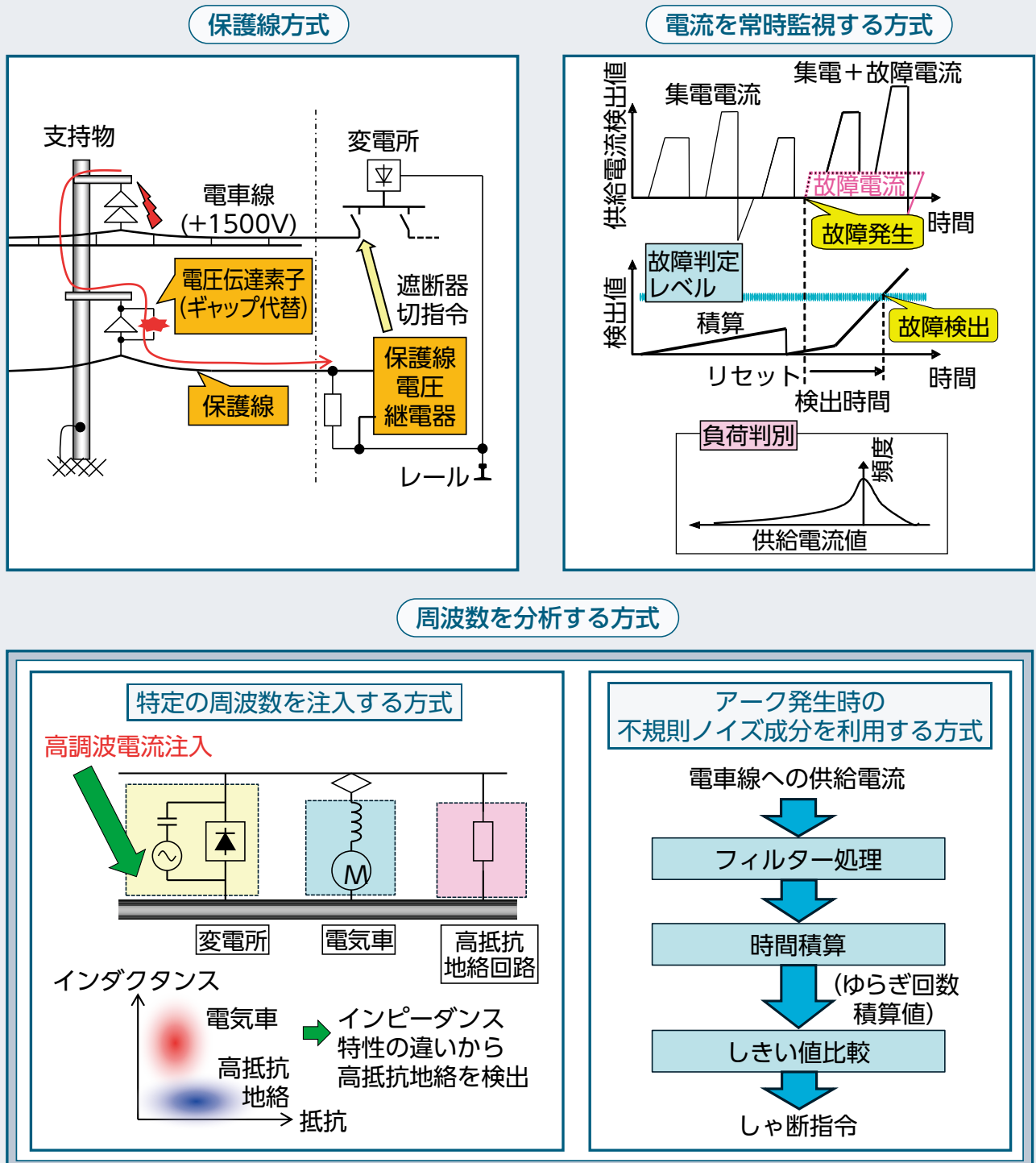


レールとの間に放電ギャップ装置を設け、地絡時には放電に伴う大電流でΔI形故障選択装置の保護動作を期待する新たな地絡検知手法（放電ギャップ方式）が開発されました<sup>4)</sup>。本方式は本四備讃線などで実用導入されましたが、敷設コストなどの兼ね合いから通常の地上区間では限定的な普及にとどまっています。

## 平成期の試行錯誤と限界

異物介在による電車線設備の高抵抗地絡は発生頻度こそ多くないものの、地絡箇所近傍にある信号保安装置の損傷など大きな支障を来す場合があることから、1993年～2019年（平成5年～平成31年）にかけて、新たな検知手法の研究が行われました（図3）<sup>5)6)</sup>。

図3 平成期に検討された地絡検知手法



保護線方式は、放電ギャップ方式のギャップ部をダイオード、避雷器などに置き換えることで、連携線を敷設コストの安い細径の電線にすることを狙った研究です。ただし、新たな設備を敷設する都合からコスト面での課題が残りました。

周波数分析方式は、電車線への供給電流に含まれる周波数成分などを変電所で分析することで地絡を検知する手法です。特定の周波数の電流を意図的に電車線への供給電流に注入する方式や、地絡故障にともなうアーク発生時に生じる不規則ノイズ成分を利用する方式が考えられました。しかし、前者は列車数が増えると検知が困難となること、後者は正常時に車両から生じるノイズで検知感度が左右されることが課題として残りました。

電流を常時監視する方式は、送電される電流の変化を変電所で常時監視してパターンを学習させ、平常時とは異なるパターンが継続した場合に地絡発生と判断する手法です。この手法では電車線設備や車両設備に手を加える必要はありませんが、臨時列車やダイヤ乱れなどともなう電流パターンの変化が不要動作のリスクとなります。

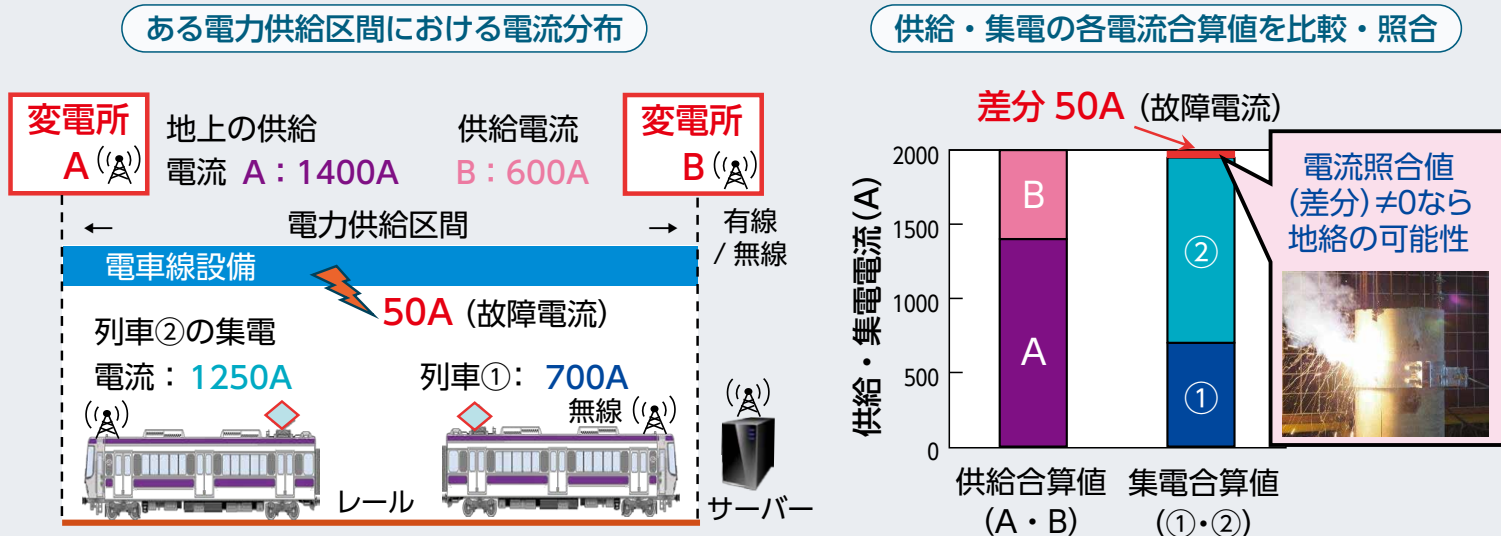
上記の3手法から言えるのは、変電所単独での測定による地絡検知には限界があり、電車線設備か車両設備のいずれかと入念な協調が求められます。

## 令和時代の地絡検知 車上情報を併用した抜本的改善

車両設備を工夫して車上の電流も常時監視できるようにすれば、変電所の電流と組み合わせることで、高抵抗地絡の検知を実現することができます。例えば、変電所から供給する電流の総和と列車が集電する電流の総和を照合し、その差分が0でない（例えば図4では50Aの差分）のであれば地絡と判断できます。この手法は、1995年に電気学会技術報告<sup>7)</sup>で提案されましたが、昨今の高度なセンシング技術・通信技術の発展により実現の可能性が十分高まったことから、以下に示す三つの技術開発により具現化することとしました<sup>8)</sup>。

まず、変電所と車両という複数部門間のデータを一元管理し、電流値の差分演算をできるように、デジタル技術を活用し部門間を横断してデータを収集・分析する、統合分析プラットフォームと称するシステムを構築しました。

図4 電流照合による地絡検知手法



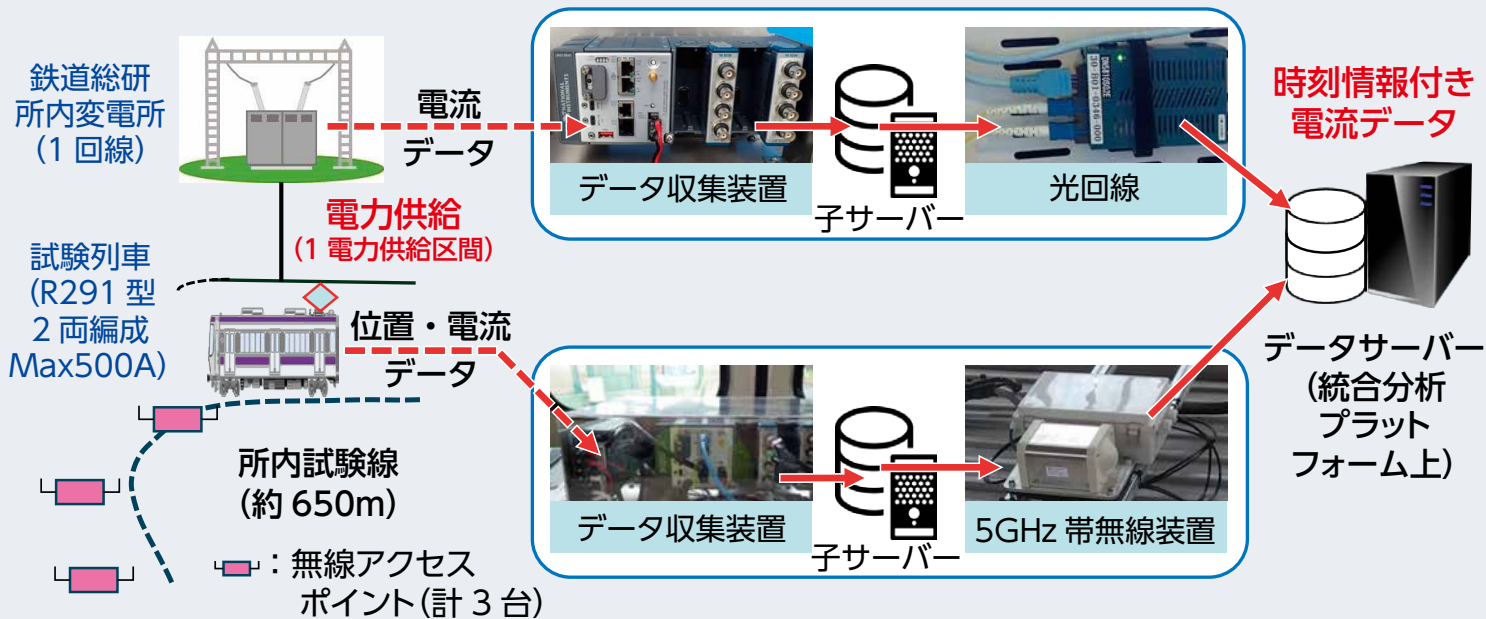


図5 地絡検知システム検証試験の概要

次に、電流の照合には各電流計測箇所での時刻を整合する手段として、高精度時刻同期手法を適用し、GNSS<sup>®</sup>由来の高精度なタイムスタンプ情報を各箇所の電流データに付与しました。

#### GNSS

GNSSはGlobal Navigation Satellite System (全球測位衛星システム)の略で、人工衛星に搭載された時計から正確な時刻情報を得ることができるほか、複数の衛星から送信される信号を、到達時間を演算することで現在位置を知ることができます。

車上情報を地上のサーバー室へデータ伝送する無線通信手段として伝送遅延の少ない5GHz帯無線アクセスシステムを利用することとしました。

1編成・1変電所・1電力供給区間という基本的な条件での機能を確認するため、鉄道総研の所内試験線に試験システムを構築し、まず正常状態での走行試験を行いました(図5)。データサーバーに格納された電流データを照合したところ、集電・供給電流値データが良く一致することを確認しました(図6)。

図6 設備健全時における変電所・列車での電流の照合結果



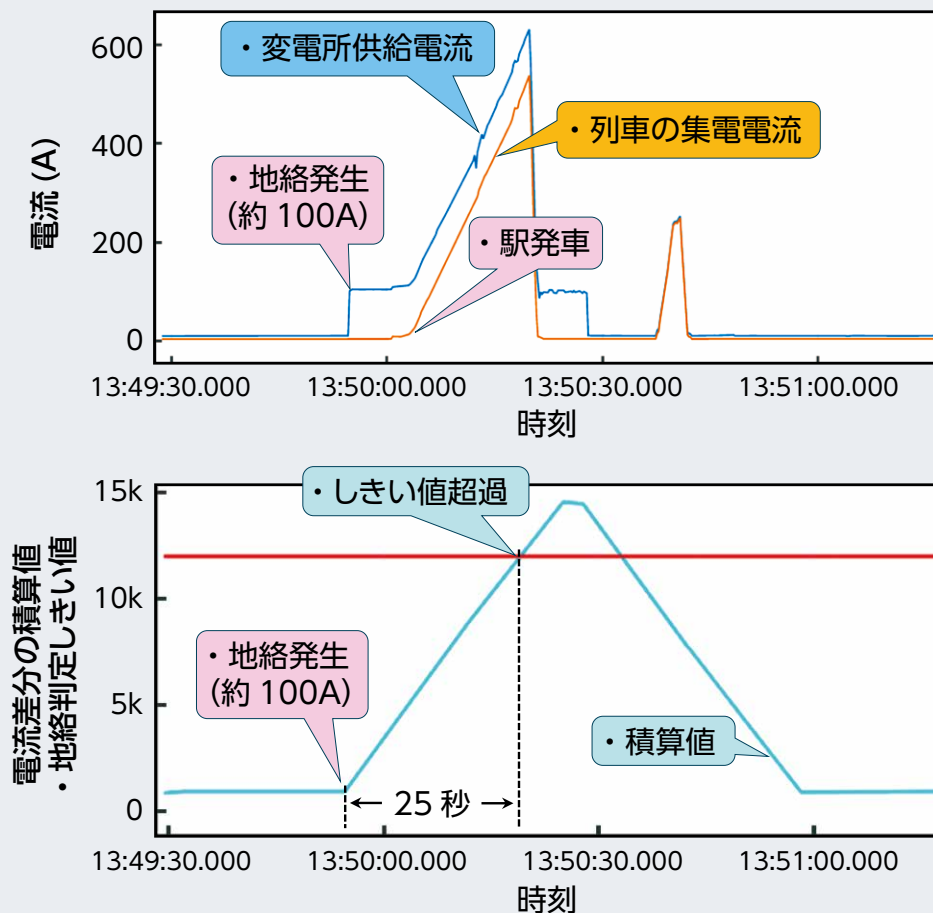


図7 模擬地絡発生時における地絡検知システムのグラフ表示例

次に、列車走行中における地絡発生を模擬した試験を行いました。この試験では、地絡検知の判定に「30秒間における電流差分の積算値がしきい値以上になった場合に地絡と判定する」というアルゴリズムを使用しました。図7の上側は開発したシステムで表示される変電所供給電流と集電電流の推移を示すグラフ、下側は電流差分の積算値に関する推移です。約100Aの地絡電流により変電所供給電流と列車の集電電流との間に生じた差分が積算された結果、差分

積算値が増加し、約25秒後にしきい値を超過して地絡と判定することができました。

## おわりに

長年にわたり合理的な検知方法が課題であった直流高抵抗地絡に関して、車上情報を併用した新たな地絡検知システムを開発しました。営業線に展開するには複数変電所・複数列車条件の対応など課題はありますが、実用化に向けて引き続き研究を進めていきます。RRR

## 文献

- 1) 根津一嘉：走行する車両に絶やさず電気を流す, RRR, Vol.66, No.10, pp.18-21, 2009
- 2) 関秋生：鉄道電化の物語(32)一桜木町事故一, 鉄道と電気技術, Vol.30, No.06, pp.60-70, 2019
- 3) 鉄道電化協会：電車線路事故選択遮断装置講習録, pp.研一-研三, 1955
- 4) 田中裕, 伊東利勝, 出野市郎, 筋野健吾：放電ギャップを用いた直流き電回路保護方式, 鉄道総研報告, Vol.02, No.08, pp.47-52, 1988
- 5) 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
- 6) 森本大観, 樋口靖展, 赤木雅陽, 吉井剣：直流電気鉄道の架線の漏電による電気火災を検出する, RRR, Vol.79, No.06, pp.22-27, 2022
- 7) 電気学会直流電気鉄道における保護技術調査専門委員会：直流電気鉄道における保護および保護協調に関する調査, 電気学会技術報告, No.II-542, 1995
- 8) 赤木雅陽, 近藤稔, 今村謙汰, 河村裕介, 流王智子：地絡検知用電力ネットワークモニタリングシステムの基礎検証, 鉄道総研報告, Vol.38, No.10, pp.7-14, 2024
- 9) 砂辺欣也, 稲葉次紀：大気における直流kA級アークの電気特性と移動特性, 電気学会論文誌A, Vol.109, No.3, pp.95-102, 1989