

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

赤木 雅陽* 近藤 稔**
今村 謙汰** 河村 裕介*** 流王 智子***

Development of Prototype Current Monitoring System
for Detecting High-resistance Earth Faults in DC Traction Power Supply Systems

Masataka AKAGI Minoru KONDO
Kenta IMAMURA Yusuke KAWAMURA Satoko RYUO

In DC 1.5 kV traction power supply systems for electrified railway, it is difficult to detect high-resistance earth faults using only electrical measurements installed in traction substations. On the other hand, utilizing the current data of both substations and vehicles, methods for detecting fault based on Kirchhoff's law have been proposed for the past 30 years. The recent rapid progress in the fields of telecommunication technology leads to increasing the possibility of realizing this method. Therefore, we have developed a prototype of current monitoring system for traction power supply systems which can distinguish the fault current with about 100 amperes by combining this method with telecommunication technology.

キーワード：高抵抗地絡，キルヒホッフの電流則，高精度時間プロトコル，時刻同期，統合分析プラットフォーム

1. はじめに

直流き電回路は，主に電車線及びその支持物，レールを用いて列車へ電力供給する構成となっている。ここで電車線と支持物が接触した場合，その故障電流は支持物の接地抵抗（通常数 Ω ～数十 Ω 程度）やレール漏れ抵抗を介して変電所に戻ることから，その故障電流が平常時の電気車電流よりも小さくなる（以下，「高抵抗地絡」と呼ぶ¹⁾。この性質ゆえ，高抵抗地絡を変電所にある既存の故障検知リレー（例えば電流変化に基づく ΔI 型故障選択継電器）単独で判別するのは困難であり，その検知は長年の課題である。

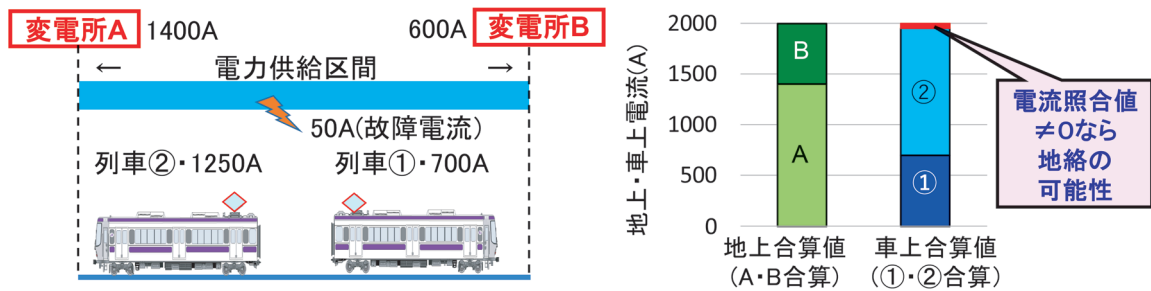
直流き電回路における高抵抗地絡を電力部門のみの枠内で検知するためにこれまで種々の手法が検討されてきた^{1) 2) 3)}。例えば電車線側に放電ギャップ装置や保護線などを新たに敷設することで故障検知する方式²⁾が提案されたが，国内では施工コストや保全上の課題で部分的な導入に止まっている。一方隣接変電所と通信しながら変電所からの供給電流（地上電流）のみを監視し，統計的な重み付けにて地絡検知する方式が提案され，ある程度の故障電流検知感度（100～500 アンペア程度）が得

られた¹⁾が，臨時列車などへの対応は困難だった。また故障点におけるアーク電圧の変化に伴い地上電流に生じる数十 Hz 帯の揺らぎ成分を楕形フィルタで抽出することにより，変電所保護リレーの小規模な改良のみで地絡検知する手法³⁾も提案されたが，小電流領域の検知感度などの課題により実用化には至っておらず，これらの課題を解決し得る新たな取り組みが求められてきた。

一方，列車の集電電流（車上電流）と地上電流とをキルヒホッフの電流則に基づいて照合し，その差分がある閾値を超過したことをもって故障検知とする概念が以前から存在している^{4) 5)}。この地絡検知手法は電気学会技術報告において「将来の保護システム」として提言⁴⁾されたが，本手法では電力需給の同時同量性を踏まえ移動体である列車から電流データを時刻情報付きで伝送することが必須となる一方で，その当時は具現化するための要素技術（例えば後述する車上地上間の情報伝送技術）が未熟であったことから具体的なシステム構成の提案までには至らなかった。しかし，近年の情報通信技術の進展に伴い本手法の実現可能性が高まってきた。

そこで鉄道総研では，キルヒホッフの電流則に基づく車上・地上間での電流値照合により地絡検知を実現すべく，車上電流・列車の位置・地上電流などを時刻情報付きデータとして取得し一元化する，電力ネットワークモニタリングシステムのプロトタイプを構築した。所内試験線にて列車の走行試験を行い，時刻情報付き電流

* 電力技術研究部 き電研究室
** 車両技術研究部 駆動システム研究室
*** 情報通信技術研究部 通信ネットワーク研究室



(a) ある電力供給区間における変電所と列車での電流分布 (b) 地絡発生時における電流合算値の特徴

図1 車上電流合算値と地上電流合算値との照合による地絡検知の模式図

データがデータサーバに自動的に格納され、地絡模擬故障発生時には故障電流に相当する電流値が車上・地上電流値の照合結果（差分）として正しく把握できることを確認した。また、電流照合と地絡判定を自動化するべく地絡検知アプリケーションを開発し、1列車・1変電所という基礎的な条件において所定の地絡判定動作を確認した。本稿では、開発したシステムの概要と要素技術について述べたのち、検証試験の結果を報告する。

2. 電力ネットワークモニタリングシステム

2.1 電流照合による地絡検知手法の原理

電気回路には、回路網上の任意点において電流の流入出の総和は0になるというキルヒホッフの電流則がある。この法則を、変電所から電力供給される区間を走行する全ての列車の車上電流と地上電流を常時監視・照合する前提にて直流き電回路に当てはめると、設備が正常であれば車上電流合算値と地上電流合算値との差分（電流照合値）は0になるはずである。一方、もし電流照合値が0でない状態が発生したならば、図1の模式図に示すように地絡に伴う故障電流分が勘定されていないことになる。そこで、電流照合値がある閾値以上になったことをもって当該電力供給区間で地絡が生じたと判断することができる。

この際、列車位置を元に車上電流の合算処理を逐次行う必要があるが、パンタグラフ離線時などにおける列車の ΔI 変化量⁶⁾を考慮すると、取得する電流データにはミリ秒レベルでの時刻同期が求められる。加えて、電車線エアセクション箇所の通過などを考慮しつつ電力供給区間に在線する列車本数を適切に管理するためには、少なくとも数秒単位の頻度で列車位置を常時把握する必要がある。

2.2 電流照合に関する要件

変電所に設備されている電流センサは負荷電流及び短絡故障に伴う数千アンペアの電流を計測することを想定

した設計となっている。直流高抵抗地絡に伴う故障電流は通常数百アンペア以下と小さいため、故障電流の検知感度を高めるためには、車上・地上とも高精度な電流センサの適用に関する検討も必要である。また、照合演算に用いる各電流値は同一時刻にてサンプリングするとともに、個々のサンプル値に同一時刻であることが担保されている高精度なタイムスタンプを付与する必要がある。

2.3 車上地上間の情報伝送技術に関する要件

電力ネットワークモニタリングシステムを実現するためには、列車に設置した電流センサで取得した電流測定データや列車の位置情報を、走行中の列車から地上に伝送する手段が必須となる。近年の情報通信技術の進展に伴い、移動体の情報伝送手段として無線LANや無線アクセスシステムなど自営で構築・運用できる無線通信システム、あるいはLTEや5Gなどの公衆網が、高速大容量の情報伝送手段として利用可能となっている。しかし、それぞれに伝送品質や構築・運用にかかるコストが異なることから、要求仕様に応じて通信技術を適切に選択する必要がある。

本報告で着目する直流き電回路における高抵抗地絡検知手法では、前述したように数秒単位の頻度で、列車で計測した電流測定データや列車位置の情報を伝送する必要がある。したがって、直流き電回路の高抵抗地絡検知において許容される車上地上間の情報伝送遅延は数秒以内となる。

2.4 電力ネットワークモニタリングシステムの構成

1章で示した「将来の保護システム」に最新の情報通信技術を適用することにより、新たに「電力ネットワークモニタリングシステム（以下、本システム）」を提案する。2.1節～2.3節で述べた内容に鑑みると、本システムには以下の要素技術が必要といえる。

- (1) 高精度な電流センサ（車上／地上用）
- (2) 電流データに高精度時刻情報（タイムスタンプ）を付与可能な電流計測システム

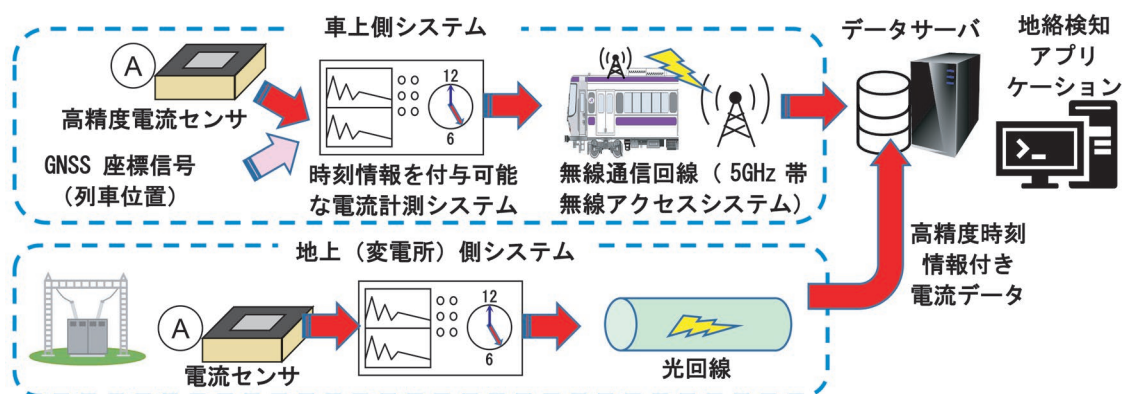


図2 電力ネットワークモニタリングシステムの構成

- (3) 列車が在線する電力供給区間を判別する機能
- (4) 車上及び地上の電流計測システムから後述のデータサーバまで、数秒以内に伝送可能な通信機能
- (5) 列車の集電電流（車上）と変電所の供給電流（地上）データを常時収集し監視・照合するデータサーバ、及び地絡検知結果を表示するアプリケーション

これらを具体的なシステム構成として総合的にまとめたものを図2に示す。各要素技術の詳細については3章以降にて述べる。

3. 電力ネットワークモニタリングシステムにおける要素技術の検討

3.1 電流計測システム用時刻同期技術

前述した電力ネットワークモニタリングシステムを具現化するにあたっては、通信回線における伝送遅延などを考慮しつつ、複数地点の電流値（全ての列車の集電電流と変電所の供給電流）を正確に取得するべく、各々の電流計測システムにて時刻を同期する技術が必須となる。

時刻同期に使用可能な技術としてPTP（Precision Time Protocol、高精度時刻プロトコル）があり、標準化が進んでいる⁷⁾ため、今回開発する電力ネットワークモニタリングシステムではPTPを用いて時刻同期を行う。以下にPTPと関連技術について概説する。

3.1.1 PTP

PTPはコンピュータネットワークにおける時刻同期用プロトコルの一つであり、2008年に米国電気電子学会（IEEE）にてIEEE 1588-Ver.2が策定された⁸⁾。本方式ではマスター機器とスレーブ機器とでタイムスタンプなどの情報を双方向に授受しながらスレーブ機器の時刻を合わせこむことから従属同期型と呼ばれており、マイクロ秒レベルの精度が期待できる⁷⁾。なおネットワーク上での時刻同期用プロトコルとしてはソフトウェアベースのNTP（Network Time Protocol）が広く用いられているが、NTPでは伝送遅延などからミリ秒レベルの精

度が必ずしも確保できない場合がある。集電電流の測定に当たっては高い時刻同期精度を確保しておくことが望ましいため、本報告ではPTPを採用する。

3.1.2 GNSSと基準時刻

時刻同期においては、何を基準時刻とするかを定める必要がある。一般的にPTPでは正確な原子時計を搭載したGNSS（例えば米国が運用中のGlobal Positioning System：GPSに代表される）から配信されるUTC（協定世界時）の時刻情報を時刻の基準とする。

3.1.3 GM

GM（GrandMaster Clock）はPTPによる時刻同期手法において、受信したGNSS信号を元にネットワーク上で高精度な時刻の配信を行う役割（マスター機能）を持つ。本報告で適用したGMはUTCに対して15ナノ秒以下の精度を有しているほか、上空衛星数の不足やトンネル通過などの影響で一時的に衛星との接続が失われた場合にも日差マイクロ秒オーダーで自立的に高精度なタイムスタンプを付与可能な機能（ホールドオーバ）を有している。

3.2 電流計測システムの概要

3.2.1 電流計測システム本体の構成

2.4節で提案した内容及び前節で述べた時刻同期技術を踏まえると、本報告における電流計測システムには以下の機能を有する必要がある⁹⁾。

- (1) PTPのスレーブ機器として動作をし、マスター機器であるGMと時刻同期する機能
- (2) 電流センサのアナログ信号出力をA/D変換してデジタル信号にする機能
- (3) 電流データに高精度時刻情報（タイムスタンプ）を付与する機能
- (4) 列車位置を検知するためGNSS座標データを取得する機能（車上のみ）
- (5) 電流データの保存機能、イーサネット通信機能
- (6) 外部のサーバからの要求に応じて測定結果を送信する機能

本報告の電流計測システムは、PTPに対応した可搬形の汎用データ収集装置（DAQ: Data Acquisition）とGMなどを用いて上記機能を満たすような構成で試作した。（4）項で述べた列車位置を検知する機能以外に大きな差異の生じる機能が存在しないことを踏まえ、本報告での電流計測システムは車上用/地上用で共通の設計とした。図3に試作した電流計測システムのうちDAQ部分の外観を示す。

電流計測システムは連続で稼働する運用方法を基本とし、電源が入ると測定を自動で開始し、電流データの出力ファイルは指定の周期（例えば10秒毎）で子サーバ（NAS）や後述する統一形式データサーバへ自動収集される。また、測定データのフィルタ処理（5Hzのローパス設定）やサーバ側への送信データ量などを勘案し記録周期は0.2秒と設定した。

3.2.2 GPS座標データの取得機能

電力ネットワークモニタリングシステムでは、列車がどの電力供給区間に在線しているかを把握する必要がある。一部の振子制御システムを搭載した列車では在線位置を把握しているケースもあるが、一般にはそういっ



図3 電流計測システム（DAQ部分）

た手段が無い場合が多い。そこで、簡易に列車位置を把握する手段として、GPS座標データ（緯度・経度・高度）と速度を測定する小型GPS/航法センサを付与した。

なおここで得られるGPS座標データは、別途開発した変換アルゴリズムとの連携を通じ、鉄道総研所内試験線のキロ程情報（約650m分）に変換できる構成とした。

3.3 電流センサの選定

列車が数千アンペアの負荷電流を取得する中で故障電流の検知感度を高めるためには、車上・地上とも高精度な電流センサの導入が望ましい。特に、個々の電流センサでは測定精度を満足していても、当該電力供給区間全体として電流を合算し数十秒にわたって照合した際には個々の電流センサの特性の違いが積算されて数百アンペアの誤差になる可能性があり、測定精度向上のため電流センサ出力の特性把握が重要となる。

その一方で、地上用のセンサについてはき電回路での短絡故障を検知するべく短絡故障電流（通常数千～2万アンペア程度）への過電流耐量が必要であるほか、電流センサの出力特性は設置箇所の温度や隣接配線との離隔など周囲環境により左右される場合があるため、センサの選定や構成にあたって留意が必要である。

一般に直流用の電流センサには、電流に比例して電線周囲に生じる磁界についてホール素子（ホール式）やファラデー効果（光ファイバ式）を用いる手法、シャント抵抗を用いる手法が適用されている。そこで鉄道用として国内外で用いられている電流センサについて、線形性、温度特性などの観点から技術動向調査を行った結果を表1に示す。

表1 電流計測技術の動向と地絡検知への適用性の調査⁹⁾

電流センサ種別	用途	定格電流の例	地絡検知への適用性に関する調査項目							総合判定
			線形性	温度特性	センサ寸法	短絡故障電流への耐量	主回路との絶縁確保	隣接回路からの電磁的影響	設備コスト	
開ループホール式	地上用 (※現用)	供給電流及び 短絡故障電流：20 (kA)	△	△	○	○	○	△	○	○ (採用)
	車上用	集電電流：2000 (A)	△	△	○	×	○	△	○	×
閉ループホール式	地上用	供給電流：10 (kA) 短絡故障電流：非対応	○	○	×	×	○	△	×	×
	車上用	集電電流：1000～2000 (A) 短絡故障電流：対応不要	○	○	○	×	△	△	○	○ (採用)
シャント抵抗式	地上用	供給電流：60 (kA) 短絡故障電流：100 (kA)	○	△	△	○	×	○	△	△
	車上用	集電電流：2000 (A)	○	○	△	×	×	○	△	×
光ファイバ式	地上用	供給電流：4000 (A) 短絡故障電流：100 (kA)	○	△	○	○	○	○	×	△

凡例 ○：良好，△：留意点有り，×：不適

調査の結果、それぞれの電流センサには一長一短があり、特に地上用については全ての調査項目で秀でた電流センサは見受けられなかった。車上用としては線形性（傾き）及び無負荷時の低オフセット出力などを始め多くの面で閉ループ型ホール式電流センサが優れた特性を有しているほか、地上用としては開ループ型ホール式電流センサが安価でかつ既に普及している面で優位性を有する¹⁰⁾。過渡的な変化に対する応答特性については各電流センサともミリ秒レベル以下の遅延であり良好な特性が得られている¹⁰⁾。

ここで、代表的なホール式電流センサにおける線形性・無負荷時のオフセット特性について具体的に調査した結果を表2、図4に示す。直流定電流源から供給される0～50アンペアまで線形に増加するような電流に対する出力特性を評価した結果、各電流センサとも線形性（傾き）はほぼ1であり、無負荷時のオフセット出力についても数アンペア以内と小さな値に収まっていた。これらの出力特性は数百アンペアでの通電試験（4章で述べる試験列車走行に対応する電流領域）においてもほぼ同等となっていた¹⁰⁾。一方、一般的な通勤線区で用いられる10両編成列車による負荷電流（例：3000アンペア）を想定した場合の誤差を導出した結果、地上用の開ループ型については約45アンペアとやや大きな値となり、大電流を供給する変電所に開ループ型を適用する場合は何らかの補正が望ましいことも分かった¹⁰⁾。

これらに鑑み本報告では、地上用の電流センサとしては短絡故障電流への対応や主回路との絶縁確保、設備コストの面に秀でており現用機種でもある開ループ型ホール式電流センサを、車上用の電流センサとしては短絡故障電流への耐性こそないものの線形性・温度特性及びセ

表2 ホール式電流センサの線形性特性および想定誤差

評価対象の型式	線形性（傾き）	オフセット	600A 通電時の想定誤差（2両編成相当）	3000A 通電時の想定誤差（10両編成相当）
開ループ	0.983	+6.1 (A)	-4.1 (A)	-44.9 (A)
閉ループ	1.005	-1.1 (A)	+1.9 (A)	+13.9 (A)

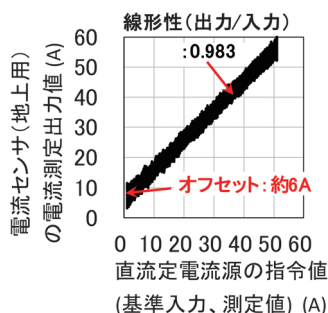


図4 開ループ型ホール式電流センサの線形性特性

ンサ寸法や設備コストに秀でた閉ループ型ホール式電流センサを選定することとした。

3.4 通信ネットワークおよびデータサーバの構成

3.4.1 通信ネットワークの構成

車上用電流計測システムで取得されたデータは車両部門で所有する子サーバへ、地上用電流計測システムで計測されたデータは電力部門で所有する子サーバへ蓄積される。なお、子サーバは両部門とも地上に設置されている。そのため、計測システムから子サーバまでの通信ネットワークが必要となる。

電流計測システムからサーバへは、毎秒数キロバイトで蓄積された計測データを数秒以内で送信する必要があることから、数十 kbps 程度の通信速度が要求される。また、前述したとおり、列車位置を数秒間隔で把握する必要がある。そのため、列車からデータサーバへの通信では、対象線区全線で遅延が数秒以内であることが要求される。

上記の要求を踏まえ、本システムの試験用プロトタイプでは、鉄道総研の所内試験線沿線に、図5に示す構成で通信ネットワークを構築した。変電所の子サーバから親サーバへの通信には、鉄道総研の所内試験線沿線に敷設されている光回線網を使用した。また、列車から地上の子サーバへの無線通信には、5GHz帯無線アクセスシステムを使用した。所内試験線全線で通信可能とするため、無線アクセスポイントを図5に示す3か所に設置した。なお、使用した製品には、瞬時に無線アクセスポイントを切り替える機能が備わっており、切替時における伝送遅延が発生しにくいという特徴がある。

3.4.2 データサーバ

現状、鉄道分野では部門毎に独自のシステムが構築されているため、自部門のデータのみを用いて解析することが多い。したがって、データ形式や位置表現などはシステム毎に定義がされている。一方、本システムでは車両や運輸など他部門のデータも用いた系統横断的な解析

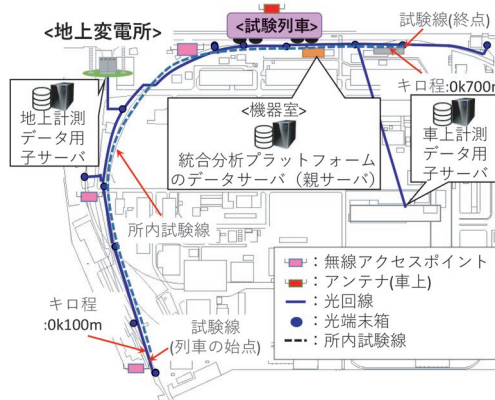


図5 通信ネットワークの構成

が求められる。しかし、前述した通り、部門ごとにデータ形式などが異なるため、現状では子サーバに蓄積されたデータを横断的に扱うことが困難である。そこでデータサーバには、鉄道総研で別途開発中の、複数部門のデータを一元管理できる統合分析プラットフォーム¹¹⁾にある統一形式データサーバ（以下、親サーバ）を活用した。なお、子サーバと親サーバ間は光回線により接続されている。

具体的には、まず車上・地上それぞれで取得したデータは、一旦子サーバに蓄積される。次に、子サーバに蓄積されたデータは、統合分析プラットフォームに伝送され、統合分析プラットフォーム内で共通のデータ形式・位置表現に変換後、統一形式データサーバ（以下、親サーバ）に集約される。

4. 電力ネットワークモニタリングシステムの動作検証試験

4.1 電流計測システムのデータ伝送機能実証試験

電流計測システムと通信システムを組み合わせた際における電流データ伝送機能などを実証するため、1列車・1変電所という基礎的な条件において鉄道総研所内試験線で試験列車を走行させ、車上用・地上用の2台の電流計測システムにそれぞれ無線及び光回線の通信機能を付加して、親サーバに蓄積されたデータをオフラインで検証した。

試験列車走行時の電流値データ（2両編成・5ノッチ力行で最高速度40km/h条件）を評価したところ、図6に示す通り車上・地上それぞれの電流計測システムで測定した正確なタイムスタンプ付き電流データが所定の周期で親サーバに格納され、同時刻のデータとして両者を照合可能であることを確認した。また、車上・地上それぞれの電流値が数アンペア以内の精度で一致することを確認した。次に、通信ネットワークの安定性を確認するため、車上からデータサーバ機器室へ向けてパケットサイズ1024Byteのデータを、試験列車走行時を含めて約5時間送信し、車上からデータサーバ機器室までの通信状況について評価試験を実施した。この評価試験において、伝送遅延時間の最頻値は0.6ミリ秒、90%値は2.3ミリ秒であり、2.3節で述べた最大許容遅延時間（数秒）内に収まることが分かった。また、このときの伝送速度の最頻値は1.1Mbpsであり、3.4.1項に示した数十kbpsを満たすことが分かった。なお、本試験では、5GHz帯無線アクセスシステムの最大スループットを1Mbpsに設定していたが、全線にわたってその性能が十分得られていたことが分かった¹²⁾。

以上より、今回構築した通信ネットワークにより、走行中の列車を含めた複数地点の電流値を取得・伝送可能

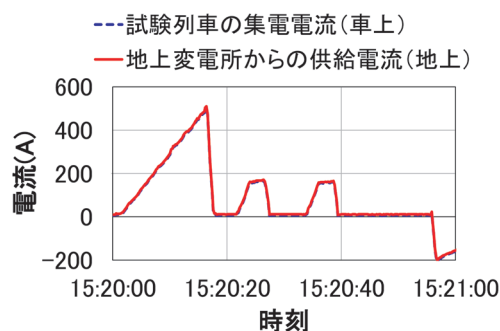
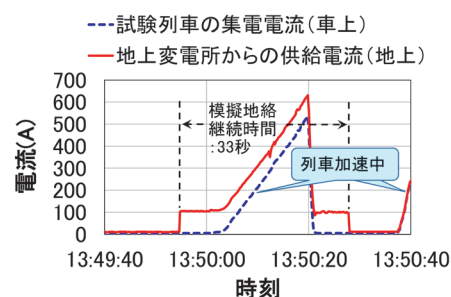
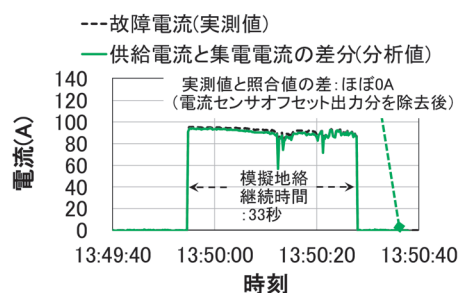


図6 車上・地上の負荷電流測定結果



(a) 車上・地上の電流データ



(b) 電流照合値と故障電流実測値との比較

図7 地絡模擬試験による電流照合機能の評価結果

であることが実証できたといえ、電力ネットワークモニタリングシステムに必須となるデータ伝送機能を実現できる見通しが得られた。

4.2 地絡模擬故障試験による電流照合機能の検証

地絡発生により電流照合値が0でない状態においては、モニタリングシステム側の電流照合値と実際の故障電流値とが一致する必要がある。そこで、変電所に地絡模擬回路（電車線支持物アークを想定）と地絡時の故障電流を実測する電流センサを仮設し、4.1節と同様の列車走行試験中に約100アンペアの地絡模擬故障を発生させて電流データを収集した。

図7に分析結果を示す。変電所の電流センサで取得した地上電流データから無負荷時オフセット出力分を除去すると、電流照合値と故障電流の実測値はよく一致していた。また、地絡時の不安定なアークで故障電流が変動した状態においても電流照合値は電流変動傾向に追従し

ており、電流照合値を詳細に算出することができた。

5. 地絡検知アプリケーションの開発

5.1 地絡検知アプリケーションの設計

4章までは、親サーバに格納された電流データをオフラインでグラフ化・分析処理を行ってきた。しかし、営業線での地絡検知に際しては列車の在線区間判定も含めリアルタイムなデータ処理が求められる。そこで統合分析プラットフォーム上に専用の地絡検知アプリケーションを構築した。

4.2節で示したように、アークを伴う故障電流は過渡的に数十アンペア変化する場合がある。また電車線設備におけるアークでは設備の溶融量でその損傷が評価される¹³⁾ことから、一時的な電流急変で地絡判定が停止しないよう、電流照合値を時間積分した結果である電荷量により評価の安定化を図ることが望ましい。そこで指定の電流閾値と指定期間の積を地絡判定の閾値とし、電流照合値の積算結果（差分積算値）と比較照合することで地絡判定する設計とした。なお、差分積算値は0.2秒毎に指定期間分のカウント・更新を繰り返す仕様とした。

地絡検知アプリケーションには、これまで述べてきた要素技術を踏まえ下記の内容を実装した。

- (1) 指定された電力供給区間における各電流計測システム（車上・地上）の電流データを逐次統合する機能
- (2) 加減乗除処理機能などを呼び出して地絡判定用の電流照合値（車上と地上の差分）を演算する機能及び関連する波形グラフを表示する機能
- (3) 指定した期間における電流照合値の積算結果（差分積算値）をもって地絡判定演算する機能

なお各電力供給区間に在線している列車の列車番号などを逐次確認し反映する機能は別途開発する予定である。

5.2 地絡検知アプリケーションの動作検証

開発した地絡検知アプリケーションにおける地絡検知演算機能などの確認を目的として、4.2節で示した模擬地絡試験時の電流データを用いて動作検証を行った。

本検討では列車走行中に発生した約100アンペアの地絡模擬故障を早期に検出するべく、地絡判定閾値の設定を2400クーロン（⇒電流閾値80アンペアと指定期間30秒の積、グラフ表示上は5サンプル/秒を加味し12000とする）とし、同閾値を超過する場合に地絡検知判定とした。図8に地絡判定閾値と差分積算値の推移をグラフ表示した例を示す。

今回の検証データでは地上電流と車上電流との間に約100アンペアの差分が生じているが、この閾値条件では25秒後に地絡判定されることを確認した。また本手法

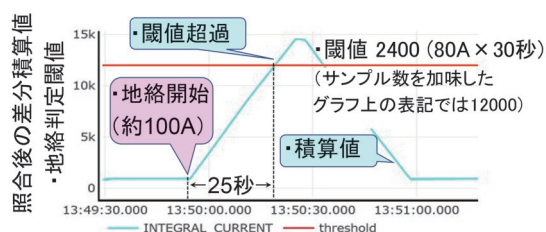


図8 地絡判定閾値と差分積算値のグラフ表示例

では故障電流が大きいほど早期の検知が期待できる。なお検知感度のさらなる向上については、後述する複数変電所・複数列車対応に伴う電流センサ増加時の誤差の蓄積傾向把握も含め検討の深度化を進めて行く予定である。

6. まとめ

本研究では、既存手法では困難であった100アンペア程度の小さな故障電流の地絡を検知するべく、変電所の供給電流・列車の集電電流・列車の位置（GPS座標）を高精度時刻情報付きデータとして取得する電流計測システムを試作した。また、統合分析プラットフォーム上にこれらデータを一元的に分析する手法を開発し、基礎的な電力ネットワークモニタリングシステムを所内試験線に構築して検証試験を行い、以下の成果を得た。

- (1) PTP（高精度時刻プロトコル）及び時刻同期に対応した電流計測システムを試作した。
- (2) 無線・光回線及びモニタリングシステムの電流データ伝送機能を介して電流データなどが統一形式データサーバに自動的に格納されることを確認した。
- (3) 列車走行中に地絡模擬故障を発生させ、データサーバに格納された電流データ及び故障電流の実測値を分析したところ、電流照合値（車上と地上の電流差分）と故障電流実測値とがよく一致することを確認した。また、電流照合と地絡判定を自動化するべく地絡検知アプリケーションを開発し、1列車・1変電所という基礎的な条件において所定の地絡判定動作を確認した。

今後の取り組みとして、電力ネットワークモニタリングシステムを複数変電所・複数列車へ対応させるべく、各列車の電流計測システムで得られたGPS座標を電力供給区間IDと紐づけし、各電力供給区間における列車在線情報をリアルタイムに更新可能とする。また、列車が電車線エアセクション箇所を通過する際には電力供給区間IDを遷移させ、故障電流の誤った演算を抑止する処理を新たに導入するべく、引き続き開発を進めていく。

文 献

- 1) 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
- 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) 森本大観, 樋口靖展, 赤木雅陽: 大電流のアークを伴う直流高抵抗地絡の検出手法, 鉄道総研報告, Vol.34, No.9, pp.41-46, 2020
- 4) 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.542, 1995
- 5) 堀紘彰, 宇佐美進, 島田喜明: 電流差分検出による高抵抗地絡検出装置の検証, 令和2年電気学会全国大会, 5-175, 2020
- 6) 小西武史, 伊東和彦, 今村英樹: VVVF 制御車に適した直流変電所保護手法の基礎検討, 鉄道総研報告, Vol.32, No.4, pp.5-11, 2018
- 7) 岩間司: ICT 社会を支える時刻同期技術, 情報処理, Vol.57, No.1, pp.52-57, 2016
- 8) "IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems," IEEE Std 1588™-2008, 2008.
- 9) 赤木雅陽, 横内俊秀, 近藤稔: 高精度時間プロトコルに対応した直流電流計測システムの基礎検討, 令和4年電気学会全国大会, 5-137, 2022
- 10) 赤木雅陽, 生出珠之助, 吉井剣, 森本大観: 直流回路用電流センサの線形性特性・オフセット特性評価, 令和3年電気学会産業応用部門大会, 5-24, 2021
- 11) 流王智子, 河村裕介, 赤木雅陽, 近藤稔, 太田佑貴: 鉄道向け統合分析プラットフォーム, 第60回サイバネ・シンポジウム論文集, No.404, 2023
- 12) 赤木雅陽, 緒方隆充, 横内俊秀, 今村謙汰, 河村裕介, 流王智子, 近藤稔: 高精度時間プロトコルに対応した直流電流計測システムの実証試験, 令和5年電気学会全国大会, 5-187, 2023
- 13) 木村高志, 菅井俊一, 奥井明伸, 長谷伸一: 直流き電用コンクリート柱地絡模擬試験, 平成17年電気学会全国大会, 5-210, 2005