

特集：電力技術

電力技術に関する最近の研究開発

池田 充*

Recent Topics on Power Supply Technology

Mitsuru IKEDA

The pandemic outbreak of COVID-19 has been greatly affecting railway business. Although it is still difficult to have a clear vision for the Post-Corona Society, higher reliability will be surely required for train operation for the time being in order to avoid the concentration of passengers due to delay or cancellation of trains. In the longer term, low carbonization and maintainability improvement are important issues for railways. RTRI has been tackling some research projects to improve reliability of power supply equipment, to achieve saving-energy of train operation and to improve maintainability of power supply system. This paper shows some fruits of RTRI's recent research activities for these goals.

キーワード：電力供給，電力設備，信頼性向上，省エネルギー，省メンテナンス

1. はじめに

2019年12月に中国湖北省武漢市で始まった新型コロナウイルス感染症（COVID-19）の集団感染は、約半年が経過した2020年6月末現在、日本国内で累計約19000名の陽性者を数えるに至っており、いまだ終息の見込が経たない状況である。鉄道もまた大きな影響を受けているが、いわゆるポストコロナにむけた展望を描くことはまだ難しい状況である。しかしながら、設備事故に伴う乗客の集中を避けるという意味でも、少なくとも当面は鉄道に対してこれまで以上の高い信頼性が要求されるものと思われる。一方、より長期的に見ると、地球温暖化対策としての低炭素化への要求はさらに高まりつつあり、本年5月にはJR東日本から、鉄道事業におけるCO₂排出量の削減目標を「2050年度に実質ゼロ」と上方修正することが発表された。さらに、少子高齢化により2019年度の日本の生産年齢人口は対前年度0.5%減（約40万人減）と、減少に歯止めがかからない状況である。

こうした状況下において、鉄道総研の電力技術に関わる研究グループは、電力供給設備の信頼性向上、省エネルギー化、省メンテナンス化の実現を研究の目標として定め、その実現に向けた研究活動を行っている。本稿では、こうした研究開発のなかから最近の研究成果について報告する。

2. 電力供給設備の信頼性向上

直流き電回路における高抵抗地絡は、地絡電流が平常運転中の電気車電流よりも小さいことから検出が困難である。しかも、ひとたび地絡故障が生じると、設備の大規模な損傷や電気火災などにより大きな輸送障害となる

* 電力技術研究部長（現 企画室長）

場合がある。このため、高抵抗地絡故障の検出・保護手法の構築は直流電気鉄道において永年の課題であった¹⁾。これまでに提案されている高抵抗地絡故障の検出手法として、放電ギャップ装置を用いる方式や保護線を用いる方式などがあるが、保護線等の部材を電車線路に追加する必要があり、省メンテナンス化の観点から課題があった。そのため、変電所において高抵抗地絡故障の発生を検知する手法の構築が望まれていた。

近年、変電所においても各種状態監視装置が普及しつつあるなか、営業線で高抵抗地絡事故が発生した際の変電所送出電流の詳細波形（1000Hz サンプリング、分解能10A、約30秒間）がはじめて記録された²⁾。この波形を詳細に分析した結果、本来平常時にはあまり存在しないはずの不規則な変動成分が事故時の送出電流波形には多く含まれていることがわかった。当該事故では地絡箇所付近の諸設備において激しいアークが発生していたことから、高抵抗地絡故障発生時の変電所送出電流は、こうした不規則な変動成分により特徴づけられると考え、変電所送出電流を監視することにより高抵抗地絡故障を検出する手法（図1）を提案した³⁾。

高抵抗地絡故障に伴う地絡電流の検出アルゴリズムを図2に示す。まず、き電電流波形をバンドパスフィルタ

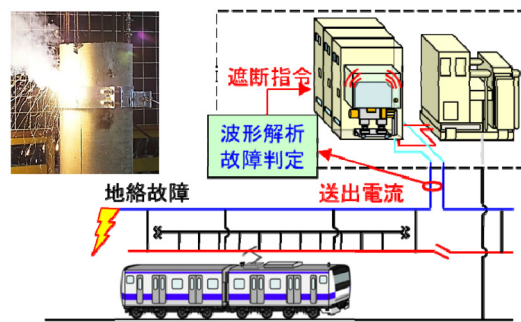


図1 変電所送出電流の監視による直流高抵抗地絡の検出

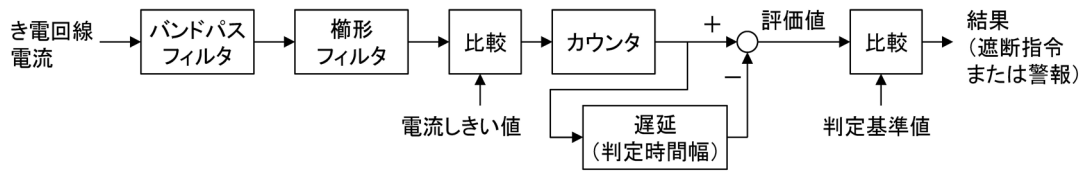


図2 変電所送出電流から直流高抵抗地絡故障の発生を検出するアルゴリズム

に入力し、低周波成分ならびに数百 Hz 以上の高周波成分を除去するとともに、整流リップ成分（商用電源周波数の整数倍）を選択的に大きく減衰させる。このようにして比較的低い周波数帯域の不規則変動成分を抽出し、その変動が一定時間継続して大きくなった場合に地絡故障が発生したと判断する。前述した高抵抗地絡故障発生時の変電所送出電流波形に対して本手法を適用したところ、事故回線に対しては地絡発生を確実に検知する一方で、健全な回線に対しては地絡発生と誤検知することのないことを確認した。

本手法は、激しいアークを伴う 1000A 以上の地絡故障の検出に有効であり、重大な被害を伴う高抵抗地絡事故の発生防止に大きく貢献するものである。ただし、地絡電流がこれより小さい故障の場合は、変電所送出電流に含まれる不規則変動成分もまた小さくなるため、本手法では検出感度を確保しつつ不要動作を回避することが難しい。このため、変電所と車両との間でエネルギー授受に関する情報を共有することにより地絡故障を検出する手法の開発に新たに着手したところである。

3. 電力供給設備の省エネルギー化

良く知られているように、鉄道は他の交通機関と比べてエネルギー効率がよく、旅客の単位輸送量あたりの CO₂ 排出量は自家用車の約 14%（2017 年度）である。こうした鉄道の高いエネルギー効率は電化の推進に負うところが大きいですが、すでに主要路線の多くが電化された現在、さらなる省エネルギー化を図るには従来手法の延長では限界があり、新しい発想が不可欠である。そこで鉄道総研では、回生絞り込みを抑制するため直流用変電所の送出電圧を能動的に制御することができる高機能整流器や、変電所間隔の延伸や電車線の電圧降下抑制に有効な超電導き電システムなどの新しい電力供給設備の開発や、地上蓄電装置の新しい充放電制御手法の提案などを進めてきた⁴⁾。このうち本稿では、き電損失の低減と

回生電力の効率的な融通とを可能とする高電圧直流き電システムの開発状況について概略を紹介する。

直流電気鉄道は低電圧・大電流のシステムであるため、電車線の抵抗によるジュール損や電車線電圧降下が大きい。その対策として電車線を昇圧することが有効ではあるが、変電所機器や車両主回路の改造、電車線の絶縁性能向上などが必要であり、現実的な方策とは言い難い。そこで、電車線電圧は変更せず、電車線電圧より高い電圧を印加する高電圧き電線を別途設ける高電圧直流き電システムが提案されている⁵⁾。このシステムは図3に示すように変電所および変電所中間の任意箇所に DC-DC 変換器を設備し、電車線と高電圧き電線との間で電力授受を行う。しかし、回生電力融通を効率的に行ううえで重要な DC-DC 変換器の具体的制御方法については、これまであまり検討されていなかった。

そこで、交流 AT き電方式で使用される AT（単巻変圧器）の動作を直流き電回路に拡張し、高電圧き電線と電車線との電圧比が常に一定となるように制御する DC-AT 制御⁶⁾を新たに提案した（図4）。本制御手法の特徴は、電車線の負荷状態（力行/回生による電車線電圧の降下/上昇）と高電圧き電線の電位分布が線形に連動するため、隣接する DC-DC 変換器の間で電車線と高電圧き電線の電位勾配が一致して循環電流が生じないことに加え、線形素子である変圧器（AT）の動作を DC-DC 変換器に模倣させているため、安定な回路制御が可能なことである。

DC-AT 制御を適用した DC-DC 変換器は、変圧器と同様にインピーダンス変換器とみなすことができる。電車線電圧と高電圧き電線の電圧との比を 4 とした場合の高電圧き電線の抵抗を電車線の抵抗に換算すると、電圧比が 1 の場合に比べて 1/16 と極めて小さな値となる。これは、DC-DC 変換器間の電車線抵抗が見かけ上小さくなったことと等価であり、送電損失低減と回生電力融通量増加の効果を得ることができる。ただし、DC-DC 変換器に用いられる自己消弧形半導体素子は過負荷に弱いため、定格容量を瞬時最大負荷とほぼ同等にせざるを得ない。

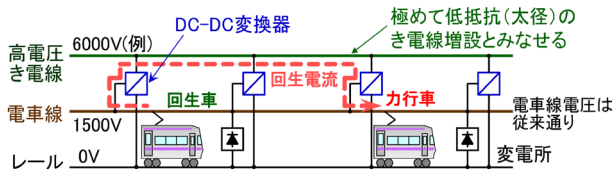


図3 高電圧直流き電システムのき電回路

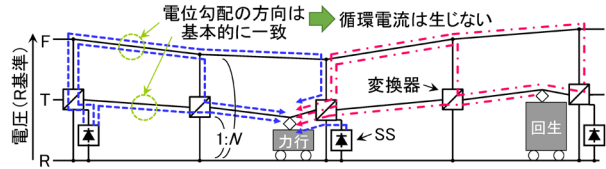


図4 高電圧直流き電システムの電位勾配 (DC-AT 制御)

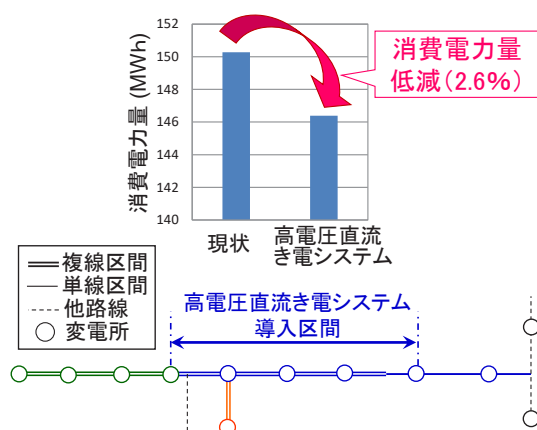


図5 高電圧直流き電システム導入による省エネルギー効果の試算結果

そこで、ATの漏れインピーダンスに相当する等価抵抗をDC-AT制御に導入することにより、DC-DC変換器の電力授受量、いいかえればDC-DC変換器の瞬時最大負荷を抑制する手法を開発した。これによりDC-DC変換器の定格容量を低減でき、コストやサイズを抑制することができる。

図5は、高電圧直流き電システムの導入効果をシミュレーションにより試算した例である。平日1日分のダイヤに対して高電圧直流き電システム導入前後の各変電所の消費電力を計算したものであり、本例では約2.6%の省エネルギー効果が得られることが確認できた。

こうした省エネルギー化技術は、鉄道運行におけるCO₂排出量削減にそのまま寄与するものであるが、今後は国内総発電量に対する再生可能エネルギーの比率がますます高くなるものと想定されており、鉄道の低炭素化のためには再生可能エネルギーの積極的利活用もまた重要となる。そこで鉄道総研では、2020年度から、鉄道の省エネルギー化だけでなく再生可能エネルギーの積極的活用のための技術開発にも着手したところである。

4. 電力供給設備の省メンテナンス化

設備メンテナンスは、故障後の修繕作業を業務の中心とする事後保全から、定期的な検査・保全作業を中心とする予防保全へと移行してきた。しかし、今後は検査・保全作業に必要な高度なスキルを有する要員を十分確保することが難しくなると予測されている。このため、設

備の状態監視に基づき、必要な箇所に対して適切なタイミングでメンテナンスを行う予知保全に移行する取り組みが、各鉄道事業者において進められている。鉄道総研はこうした動きを先導すべく、特にデジタル技術の活用を念頭において省メンテナンスを実現するための研究開発に取り組んでいる。

一般に、メンテナンス作業は「認知」「予測」「保全」からなるループを繰り返す。電力供給設備の場合、このループのなかで最も多くの人的リソースを要しているのは「認知」のための作業であり、これを自動化・高度化することができれば、省メンテナンス化に大きく貢献できる。そこで、電車線設備のメンテナンスに対する「認知」すなわち検査・計測を自動化するため、鉄道総研では電気検測車や営業車の屋根上に搭載し、電車線設備の各線条（トロリ線、ちょう架線など）および各金具（ハンガ、コネクタなど）の状態を非接触で検測・診断する電車線非接触測定装置と、小型の装置で高精度なトロリ線摩耗測定が可能で、光切断法によるトロリ線摩耗測定手法を開発した。

電車線非接触測定装置^{7)~10)}は、画像処理によるステレオ計測とレーザー計測（レーザー測域センサ）を併用することにより、電車線の各線条の3次元位置を計測するとともに、自動張力調整装置などの電車線設備の架設状態を画像処理により把握する装置である（図6(a)）。さらに、本装置で取得した画像に対して機械学習による画像解析を実行することにより、ハンガやコネクタなどの架線金具を自動抽出して電車線3次元位置の測定結果に反映させるとともに、その異常の有無を診断し、異常がある場合には異常種別の分類まで行う手法を開発中である。金具位置まで正確に反映した電車線の3次元構造を取得できれば、シミュレーションにより任意のパンタグラフ条件に対する電車線の挙動予測が可能となり、「認知」から「予測」「保全」へとつながる高度な電車線設備メンテナンスが可能となる。

本装置を在来線営業車の屋根上に搭載し、時速130kmまでの速度で計測を行った結果、図6(b)に示すように電車線の3次元位置を連続的に計測可能であること、重錘式自動張力調整装置の滑車の姿勢（回転角）を測定可能であること、などを確認した。なお、トロリ線の静高さならびに左右偏位の繰り返し測定精度は±

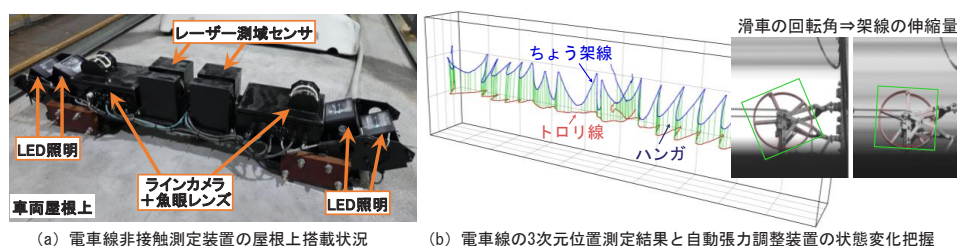


図6 電車線非接触測定装置

表1 機械学習によるハンガの異常分類結果の例

	ハンガの異常分類結果					真値数	再現率	F値
	正常	変形	下部断	上部断	カバー無			
真値	正常	258	0	42	0	23	0.80	0.81
	変形	0	856	0	6	0	0.99	0.99
	下部断	47	4	113	0	4	0.67	0.69
	上部断	6	0	2	113	0	0.93	0.94
	カバー無	1	0	2	0	169	0.98	0.92
分類結果数	312	860	159	119	196			
適合率	0.83	1.00	0.71	0.95	0.86			

10mm 以内であり、90% 以上のハンガを自動抽出することができた。

架線金具の異常診断については、こうした現車試験による評価が難しいため、多数の健全なハンガの画像と、異常のある種々のハンガの画像を約 1700 枚用意し、機械学習による画像解析を実行して評価精度を検証した。その結果を表 1 に示すが、現状ではおおむね 80% 前後の正解率で診断が可能である。ただし、異常があるハンガを「正常」であると評価する、いいかえれば異常を見逃したケースもまだ多いため、さらなる精度向上を図る予定である。なお、機械学習による架線金具の検出、診断については、(株)明電舎との共同研究の成果である。

一方、光切断法によるトロリ線摩耗測定手法¹¹⁾は、トロリ線に下方からスリット状レーザー光を照射し、トロリ線表面に形成された輝線を 2 次元カメラで撮影することにより、トロリ線下半分の断面形状を取得する。取得した断面形状を新品トロリ線の断面形状（円形）に対してフィッティングすることにより、摩耗断面積を計算する（図 7）。原理上、しゅう動面が一般的な平面でなくても高精度の摩耗量測定が可能である。また、トロリ線を把持している金具類（ハンガイヤ、ダブルイヤなど）の位置やトロリ線との相対位置も計測可能である。試作した測定装置を新幹線車両に搭載して原理検証試験を実施したところ、残存直径に換算して±0.1mm 以内の精度でトロリ線摩耗を測定できることを確認した。

従来の検出装置ではトロリ線摩耗の評価精度が低い偏摩耗箇所などでは、手測定等の追加実施が必要な場合があるが、本手法ではこうした箇所でも精度のよい測定が可能であり、手測定省略による省メンテナンス化が期待できる。

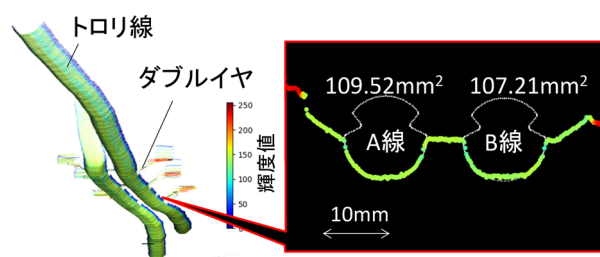


図7 光切断法により取得したダブルイヤ箇所のトロリ線形状データと摩耗断面積評価結果

5. おわりに

本稿では、鉄道の電力供給設備の信頼性向上、省エネルギー化、省メンテナンス化の実現を目指した最近の研究開発について紹介した。鉄道総研では、今回紹介したもの以外にもこれら課題を解決するための様々な研究開発を行っている。今後も、電気鉄道の革新を実現するため、独創的かつ具体的な技術提案を行う所存であり、引き続き鉄道事業者をはじめとする関係各位のご指導・ご協力をお願いする次第である。

文献

- 1) 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.41637-41640, 2017
- 2) 森本大観，樋口靖展，伊東和彦，相原徹，田中弘毅：直流高抵抗地絡事故の実記録データおよび考察，平成 31 年電気学会全国大会，5-222, 2019
- 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方法，鉄道総研報告，Vol.34, No.9, pp.41-46, 2020
- 4) 池田充：環境と調和した鉄道の実現に向けた最近の研究開発，JREA, Vol.62, No.9, pp.43403-43406, 2019
- 5) Philippe Ladoux, Jean Marc Blaquiere, Herve Caron, Diego Iannuzzi, Marino Coppola :New three-wire supply systems for DC electric railways, IET Electrical Systems in Transportation, Vol.5, Issue 3, 2015.
- 6) 吉井剣，高電圧き電システムにおける DC-DC 変換器の DC-AT 制御法：2019 年電気学会産業応用部門大会，pp.5-9, 2019
- 7) 根津一嘉，松村周，網干光雄，庭川誠，川畑匠朗，田林精二：ステレオ画像計測とレーザー測距を併用した架線の非接触位置測定手法，鉄道総研報告，Vol.28, No.10, pp.29-34, 2014
- 8) 松村周，根津一嘉，薄広歩，川畑匠朗，渡部勇介：電車線非接触測定装置の在来線車載試験による性能検証，鉄道総研報告，Vol.34, No.9, pp.11-16, 2020
- 9) 北澤源基，渡部勇介，松村周：深層物体検出モデルの架線金具検査への応用，平成 31 年電気学会全国大会，第 5 分冊 p.410, 2019
- 10) 松村周，根津一嘉，川畑匠朗，渡部勇介：機械学習による電車線金具検出手法の検討，電気学会 自動車／交通・電気鉄道合同研究会資料，VT-19-021/TER-19-035, 2019
- 11) 薄広歩，根津一嘉，松村周：光切断法を適用したトロリ線断面形状測定的基础研究，鉄道総研報告，Vol.33, No.6, pp.29-34, 2019