

直流電気鉄道の架線の漏電による電気火災を検出する



森本 大観
Hiroaki Morimoto
電力技術研究部
き電研究室長



樋口 靖展
Yasunori Higuchi
前 電力技術研究部
き電研究室
研究員



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



吉井 剣
Tsurugi Yoshii
電力技術研究部
き電研究室
副主任研究員

はじめに

現在、日本の在来線の多くと地下鉄では、架線などの電車線に流れる**直流**の電気を車両がパンタグラフなどで取り入れて、走行のための電気エネルギーを得ています。このように列車へ直流の電気を供給する形態を、直流電化方式とよんでいます。

直流と交流

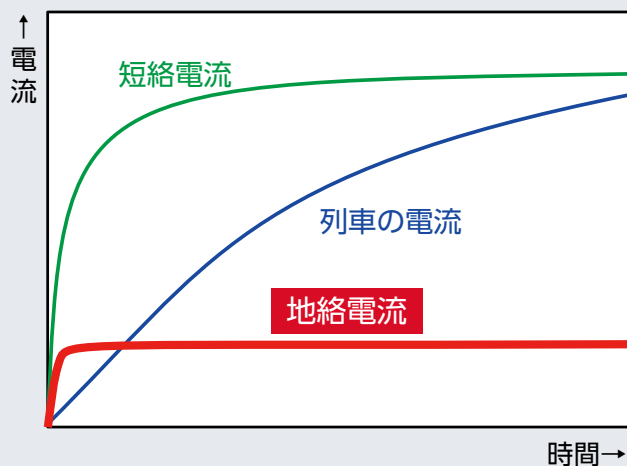
直流は、電池に+（プラス）極と-（マイナス）極があるように、電気を流そうとする向き（電圧）が一方に決まっているものを指します。交流は、家庭のコンセントの電気のように、時間の経過に沿って周期的に大きさや向きが変化するものを指します。

直流電化方式は長い歴史がありますが、いくつかの解決すべき課題があります。ここではその一つである「直流高抵抗地絡」の検出について、最近の研究を概観します。

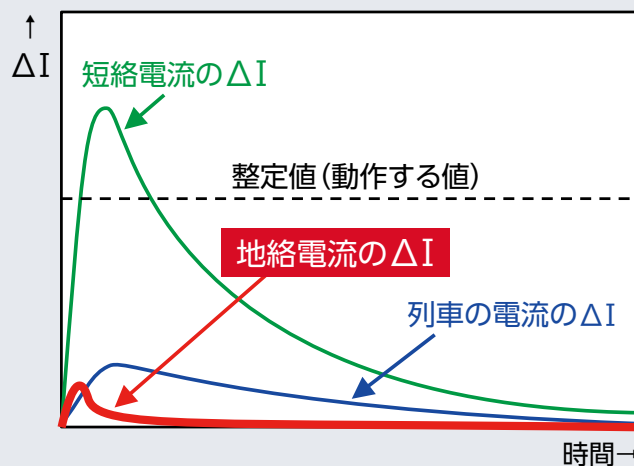
直流電化方式の概論

列車が走るための電力を送ることを「き電」といい、それを行うための変電所をき電用変電所といいます（以下では単に変電所と記載します）。変電所では、電力会社などから受け取った交流電力を、列車が必要とする直流電力に変換して送り出しています。電圧は、国内では1500V、750V、600Vがおもに使われています。

図1 故障電流と負荷電流の関係



(a) 電流波形



(b) ΔI (電流の変化量) の波形

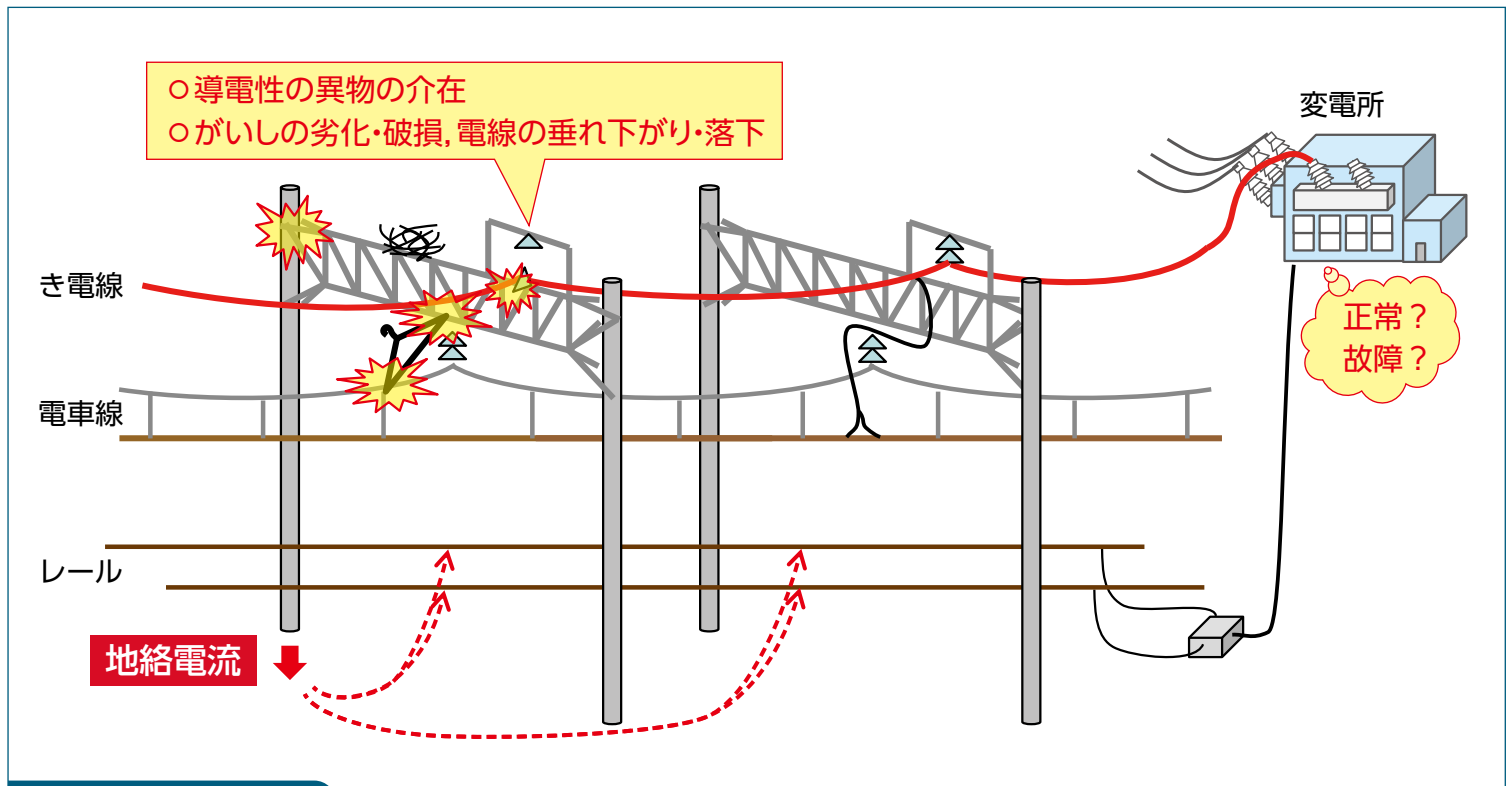


図2 直流高抵抗地絡

一例として直流1500Vの場合、10両編成の通勤型電車を走らせるためには、1編成あたり3000A～4500A程度の電流が必要です。大都市中心部の路線では、複数の列車が走行すると、それらの和で変電所から送り出す電流が10000A近くに達する例もあります。一方、何らかの理由で架線に異常が生じてレールと短絡[☞]し、その短絡発生位置が変電所から遠い場合、架線やレールの抵抗のため、電流が数千A程度までしか達しない場合があります。このため、電流の単純な大小関係だけでは正常・異常の判断ができません。しかし、列車の電流と比較すると短絡電流は短時間（例えば0.1秒）あたりの電流増加（これを ΔI という）が大きい

という特徴があり（図1）、これを利用した「 ΔI 形故障選択装置」を変電所に設けて短絡などの異常を検出することが標準的に行われています。 ΔI 形故障選択装置が動作する値（整定値）は、都市圏の通勤路線ではおおむね2000A～3000A程度に選ばれています。

直流高抵抗地絡とは

直流高抵抗地絡とは、「き電回路の充電部（架線など）が何らかの理由で大地上の構造物に接触したとき（地絡[☞]）に、当該構造物の接地抵抗[☞]の存在のため、地絡電流の大きさが電車・電気機関車の通常走行に必要な電流より小さい場合の故障現象」を指します¹⁾。例えば

☞ 短絡と地絡

短絡（ショート）とは、主たる電気回路を構成する二つの導体（例えばトロリー線とレール）が直接接触して導電経路を作ること。一方、地絡とは、電気回路を構成する導体のうち一つが、予期しない事由によって、大地や、本来は電気回路ではない大地上の構造物（電化柱やビーム、橋りょう、駅舎など）に接触して電流が漏洩すること。ただし、鉄道車両の場合には車体を基準として物事を考える慣例があり、車載電機品や配線から車体への漏電のことを地絡と表記する場合があります。また、個々の機器単体においては、その機器の基準とする電位の箇所（金属製外箱、内部電源の負極など）への短絡のことを地絡と表記する場合があります。

☞ 接地抵抗

電気装置などを大地と接続したときに、電気の通りにくさを示す値。

1500Vの場合で、大地上の構造物の接地抵抗が仮に1Ωあったとすると、そこに流れる電流は最大でも1500A、実際にはもっと少ない値になります。したがって、前述のΔI形故障選択装置ではこれを検出できません。

直流高抵抗地絡の原因の多くは強風や鳥によって運ばれてきた針金などの導電性物体の接触・介在であり、ほかに、がいしの劣化、電線・金具類の破損、設計・施工上の不備、雷などが原因の場合もあります(図2)。電化柱、木立、建築物などといった、本来なら電気を流し

てはいけない部位に電気が流れたり、導電性物体の介在で空間絶縁が保てなくなると、状況によっては非常に激しい火花放電・**アーク**をともなって電気火災になったり(図3)、電流が信号設備などに流入して焼損してしまい、大規模な輸送障害になってしまいます。

直流高抵抗地絡を早期に検出するための実用化済みの対策として放電ギャップ装置を用いる手法²⁾がありますが、全線をカバーするためには相応の設備投資が必要であることやその保守が課題であり、変電所での計測だけで検出が可能な方法が望まれていました。

アーク(電弧)

電極間にある空気などの気体に持続的に発生する絶縁破壊(放電)によって気体分子が電離してイオン化したプラズマの一種。非常に高温になります。

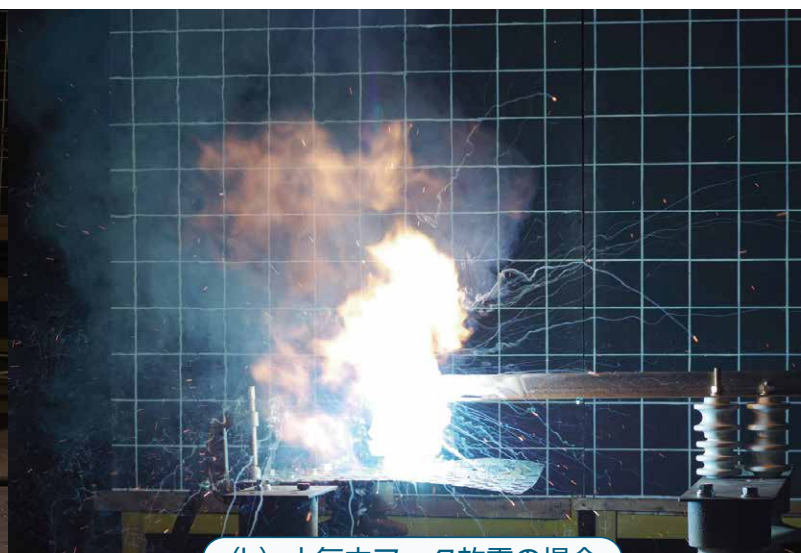
初の実事故記録データと新しい検出手法

先にあげた原因の多くが突発的なものである

図3 直流高抵抗地絡の模擬実験



(a) コンクリート柱の場合



(b) 大気中アーク放電の場合



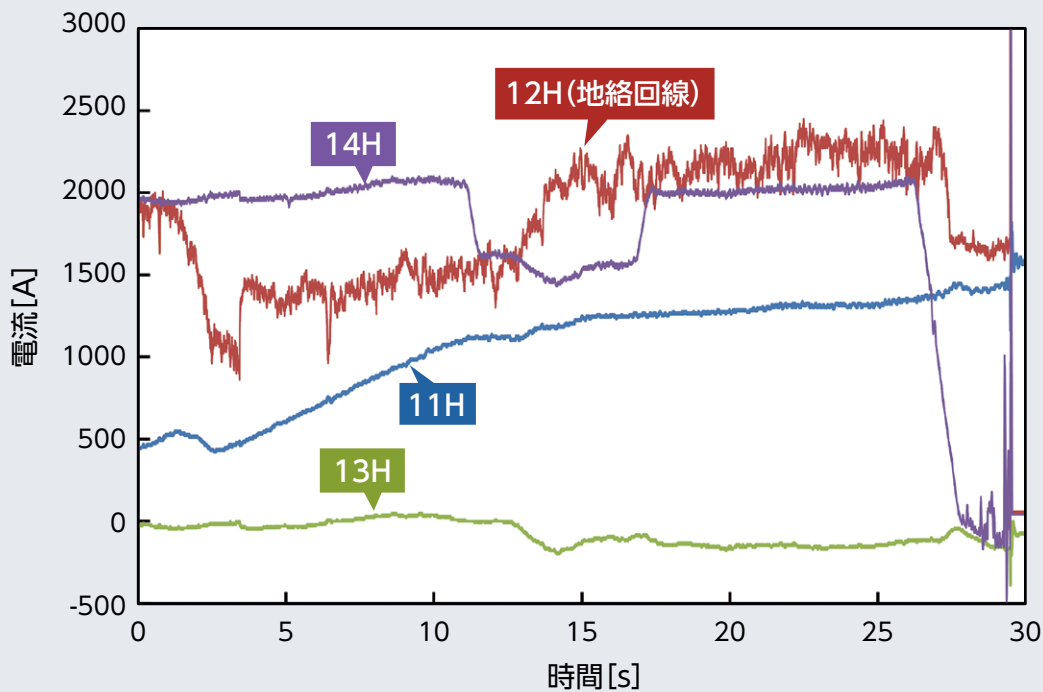
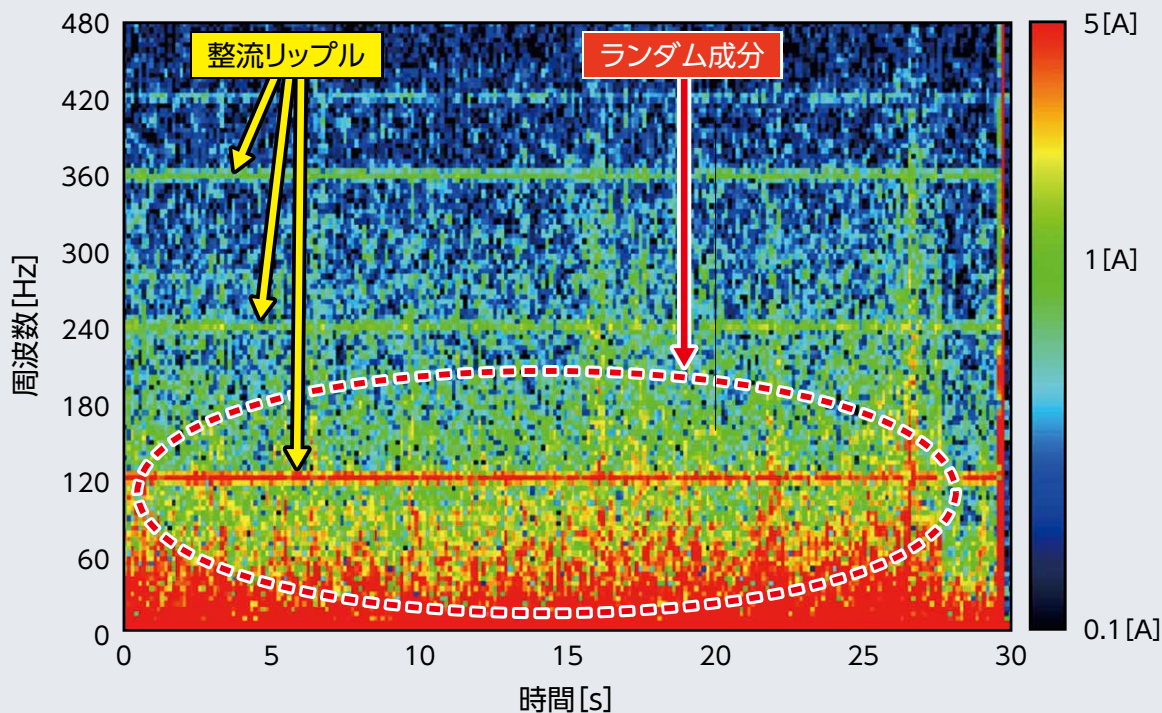


図4 記録されたデータ

ことからわかるように、直流高抵抗地絡は、いつどこで起きるか予測することができません。発生頻度も全国で年に数回もない程度であるうえに、変電所ではΔI形故障選択装置が動作しなければ電流波形の詳細記録がされないため、地絡発生中にどんな電気現象が起きているのかは、長年にわたり未解明でした。

そのような中、ある路線で直流高抵抗地絡が発生しましたが、偶然にもその直近の変電所では最新型の自動記録装置が稼働しており、かつ、最終的に短絡へ移行してΔI形故障選択装置が動作したことで、おそらく国内ではじめて、詳細な数値解析に使用しうる直流高抵抗地絡時の電流波形が克明に記録されました。なお、近

図5 地絡回線電流の周波数分析



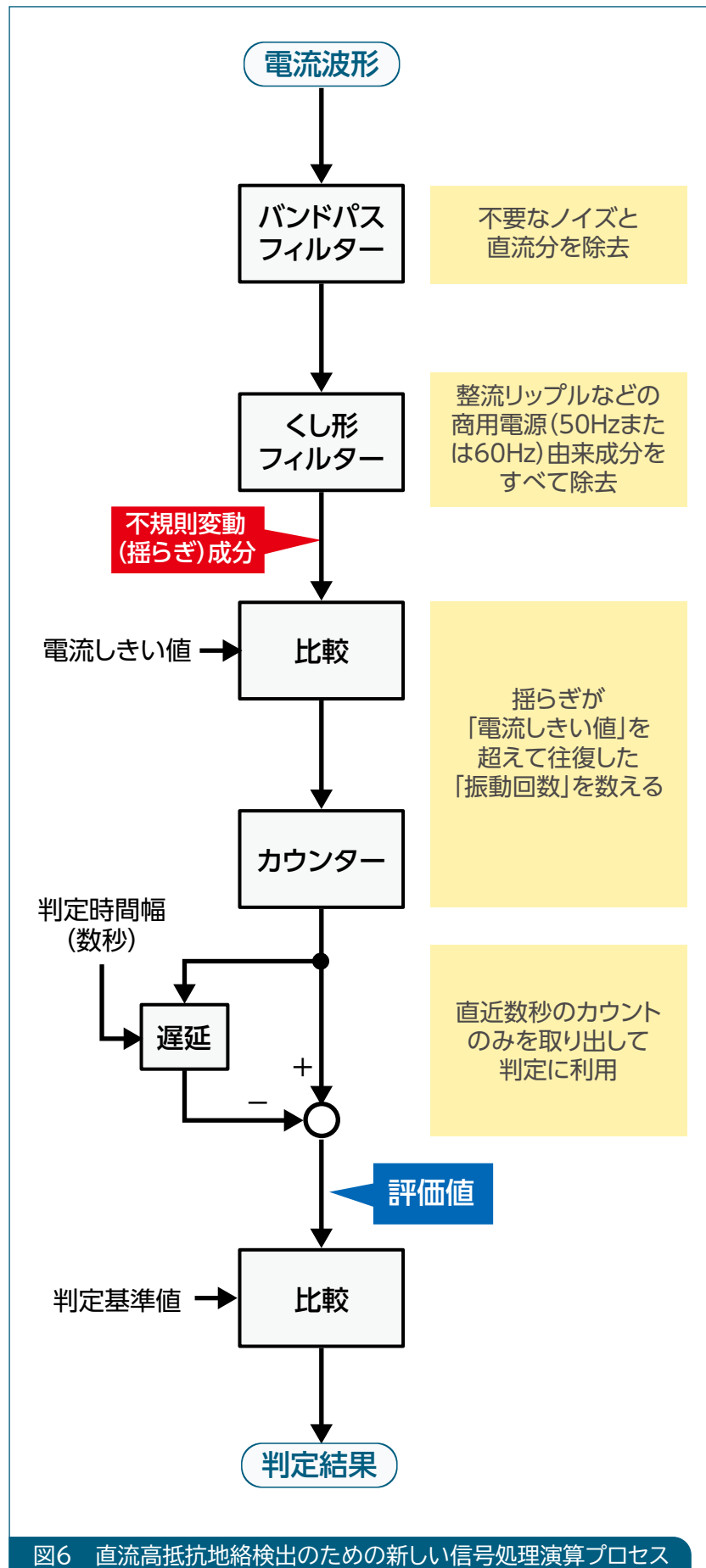
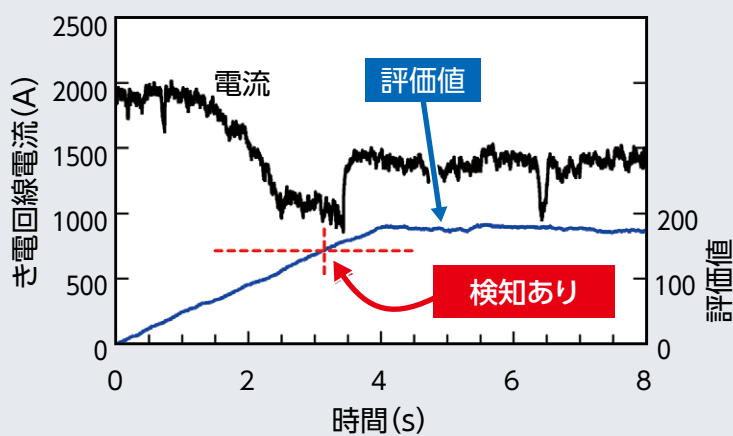


図6 直流高抵抗地絡検出のための新しい信号処理演算プロセス

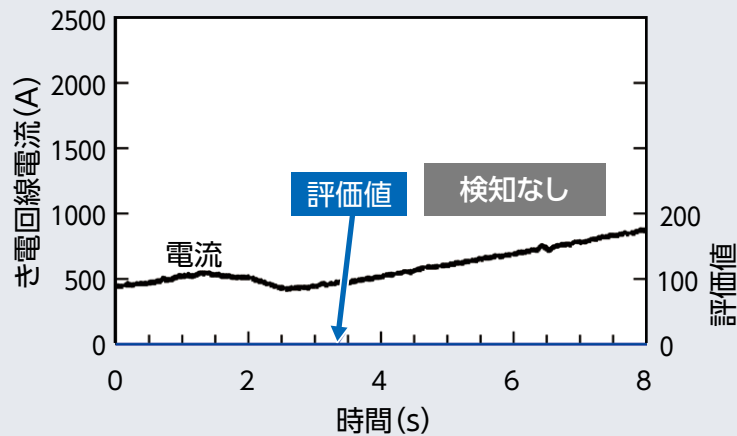
隣の電化柱などの設備から激しいアーク放電火花が上がっていたことがわかっています。

鉄道総研は当該データの提供を受けて分析し、電流波形に正常状態では見られない不規則な変動成分が、とくに200Hz以下に多く含まれていることを見いだしました(図4, 図5)³⁾。この不規則変動成分は、大気中のアーク放電が炎のように揺らぐことに起因していると考えられます。ただし、この波形には不規則変動成分だけでなく、列車が必要とする直流電流と、電力会社の交流を変電所の整流器で直流に変換するとき生じる「整流リップル」という成分(商用電源周波数の偶数倍に出現)も、一緒に含まれています。そこからどうやって問題の不規則変動成分を確実に見分けるかが課題でした。

そこで今回、新しい信号処理演算プロセスを考案しました(図6)³⁾。「くし(櫛)形フィルター」という、現在のデジタル信号処理技術ではありふれた要素を電流波形に適用することで、整流リップルをほぼ完全に除去し、大気中アーク放電の不規則変動成分を効率よく抽出することを可能としています。このほかにも工夫を加え、上記の実故障データなどで検出可能性を検証し(図7)、1000A程度以上で大気中アーク放電をともしなう直流高抵抗地絡故障であれば、数秒程度でほぼ検出可能な手法を確立することができました³⁾。



(a) 地絡発生中のき電回線



(b) 正常なき電回線

図7 提案手法による検出

既存のΔ形故障選択装置では検出不能であり、時には地絡状態が数十分間も続いて設備の焼損などに至っていたことと比べれば、大きな進歩といえましょう。そして、図6に示した信号処理演算プロセスは、市販の小さなマイコンにも搭載可能であることも別途実証しており、低コスト性も期待できます。

まとめ

直流高抵抗地絡は、検出が困難、発生予測ができない、ほかの事故などと比べて発生頻度がきわめて低いといった性質、そしてそれらがゆえに対策の費用対効果が非常に悪いことから、直流電化方式では長年にわたり頭の痛い問題でした。しかし、今回の研究によって、直流高抵抗地絡のうち大規模なものは「発生すれば検出

可能なもの」に変わりました。地震と同様、発生 の直接予測はできなくても、発生後の被害拡大を防ぐ手段を、ひとつ得たのです。

現在、鉄道を取り巻く環境は、設備メンテナンスのあり方や、無人自動運転の検討など、急激に変化しつつあります。今回紹介した直流高抵抗地絡の早期検出手法は、今後の直流電気鉄道の安全性向上、地絡電流による設備焼損被害の軽減と早期復旧に、大きく寄与できるものと期待されます。

最後に、データの提供や現地試験にご協力いただいた関係各位に謝意を示します。RRR

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.15-19，2017
- 2) 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.2，No.8，pp.47-52，1988
- 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故障の検出手法，鉄道総研報告，Vol.34，No.9，pp.41-46，2020