

---

## 直流き電回路における保護線を用いた高抵抗地絡検出手法

森本大観, 重枝秀紀, 赤木雅陽, 森田岳, 柴田直樹, 吉井剣 (5)

著作権の関係でこの論文は印刷出来ません。

(注)この論文は、下記の出典とほぼ同じ内容を含んでおり、著作権の関係上、電気学会の許諾を得て電子版に掲載しているため、閲覧のみ可能となっております。

### <参 考>

- 論文名: 保護線を用いた直流き電回路高抵抗地絡検出システム
  - 著者名: 森本大観、柴田直樹、吉井剣、植松正次、林屋均
  - 文献名: 一般財団法人電気学会 「平成 26 年産業応用部門講演論文集」(H26. 8)
  - ページ: V-145～V-150
-

# 直流き電回路における 保護線を用いた高抵抗地絡検出手法

森本 大観\* 重枝 秀紀\* 赤木 雅陽\*  
森田 岳\* 柴田 直樹\* 吉井 剣\*

High-resistance Ground Fault Detection Method for DC Feeding System  
using Protective Wire

Hiroaki MORIMOTO Hidenori SHIGEEDA Masataka AKAGI  
Gaku MORITA Naoki SHIBATA Tsurugi YOSHII

Ground faults to fixed structures with relatively high ground resistance have been unresolved troubles in DC feeding systems. It is difficult to detect such faults because of the feebleness of the fault current, and they sometimes break overhead contact lines, feeder wires or masts in case the fault current continues during several seconds. We contrived a new detection system for ground fault using a protective wire and 'PW devices.' This paper shows the system outline and the results of several indoor and on-site experiments on the proposed system.

キーワード：地絡，接地抵抗，保護線，酸化亜鉛バリスタ，ダイオード

## 1. はじめに

直流電気鉄道において、き電回路の正極側充電部である電車線が何らかの理由で大地上の構造物に地絡し、その地絡電流値が電車・電気機関車の通常走行に必要な電流より小さい場合、これを高抵抗地絡と呼んでいる<sup>1)</sup>。その原因は、カラスの営巣による針金ハンガー投下や遊園地のアルミ風船等の導電性飛来物、踏切支障等での電車線切断垂下、鳥獣・樹木接触などが挙げられるが、最近では雷害に起因する高抵抗地絡事例<sup>2)</sup>も散見されている。

直流き電回路の故障計算で通常想定される金属短絡（車両故障や、断線垂下した電車線のレールへの直接接触）と比較して、地絡では構造物の接地抵抗とレール漏れ抵抗が電流経路に介在するため故障電流が小さくなり、直流き電用変電所の標準的な保護継電要素であるき電用故障選択装置（50F）や、き電用直流高速度遮断器（54F）の自動引き外し機構が動作しないことが多い。このため、故障状態を除去できないまま通電が長時間継続する場合が多く、その結果として設備の焼損、電車線の断線、支持物の損傷などの事故に波及することがある。

高抵抗地絡の保護手段として、放電装置を用いてレールへの金属短絡に移行させて変電所の50F・54Fを動作させるものがある<sup>3) 4)</sup>。しかし、大電流の短絡電流経路

を全線にわたって敷設することは費用的に難しく、実用化は現時点で本四連絡橋と車両基地構内等に留まっている。一方、本線への適用を指向して、地絡時の支持物電位上昇を細い保護線で伝達する形態（電圧検出式）も概念提案されている<sup>5)</sup>が、実用化開発には至っていなかった。

前記の雷害による地絡の対策として、鉄道総研では以前に、雷撃によるがいしせん絡を検出して変電所の遮断器を開放する雷撃保護線方式<sup>6)</sup>を検討していた。これは電圧検出式の一派生形態である。しかし、現地試験の結果、大気中放電間隙を用いる雷撃保護線方式は、支持物電位上昇の伝達経路たる放電間隙のアークが消弧し易く、故障検出の信頼度を確保できないことが判明した<sup>7)</sup>。

そこで今回、地絡検出の信頼度向上と、雷害のみならず導電性物体による一般的地絡の検出も可能とする汎用化を図った高抵抗地絡検出システムを考案し、基礎実験並びに現地試験によって良好な結果を得たので、報告する<sup>8)</sup>。

## 2. 高抵抗地絡時の電圧・電流分布

地絡時の支持物電位上昇に着目した高抵抗地絡検出システムの汎用化に先立ち、直流き電回路に地絡故障が生じたときの電圧・電流分布を求めるためシミュレーションを行った。計算モデルを図1に、設定条件を表1にそれぞれ示す。表1のうちレール漏れ抵抗については、対地絶縁が比較的良好な軌道構造の線区を想定している。故障点位置は区間中央とした。

\* 電力技術研究部 き電研究室

特集：電力技術

地絡点の支持物の接地抵抗  $R_{FM}$  は、電化柱がコンクリート柱の場合、柱の基礎根入れ部に自然に生じる接地抵抗であり十数  $\Omega$  以上となることが多いが、鉄柱・鋼管柱で鉄筋接地方式<sup>9)</sup> が用いられる場合は  $1\Omega$  未満にもなり得る。

$R_{FM}$  を  $0.1 \sim 10\Omega$  の間で変化させたときの各部の電位、電流をシミュレーションで求めた結果を図2に示す。変電所の回線電流  $I_A, I_B$  (図1の設定では  $I_A=I_B$ ) は  $2000A$  を下回っており、 $50F$  の整定値が  $2000A$  以上であると  $50F$  による地絡検出はできない。また、 $R_{FM}$  が

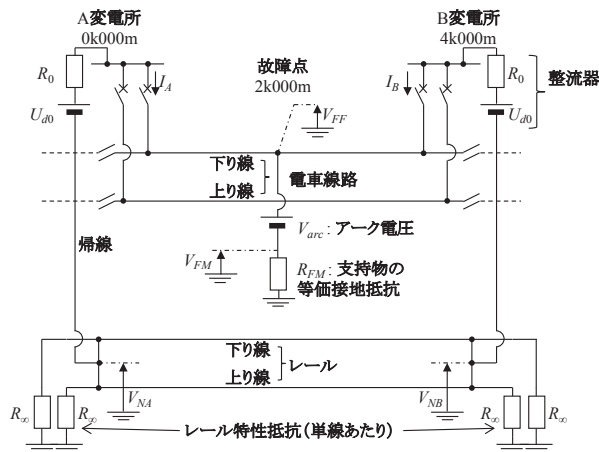


図1 直流地絡シミュレーション回路

表1 シミュレーションパラメータ

項目	記号	数値	備考
支持物の等価接地抵抗	$R_{FM}$	変数	
故障点アーク電圧	$V_{arc}$	300V	標準値(定数)
整流器	規約無負荷直流電圧	$U_{d0}$	1620V
	等価内部抵抗	$R_0$	$0.03\Omega$
導体抵抗	電車線	(N/A)	HAL 510mm <sup>2</sup> ×2, GT 110mm <sup>2</sup>
	レール(単線あたり)	$R_r$	$0.017\Omega/km$
レール漏れ抵抗	$\rho_r$	$50\Omega \cdot km$	(= $0.02S/km$ )
レール特性抵抗(単線あたり)	$R_e$	$0.922\Omega$	(= $\sqrt{R_r \rho_r}$ )

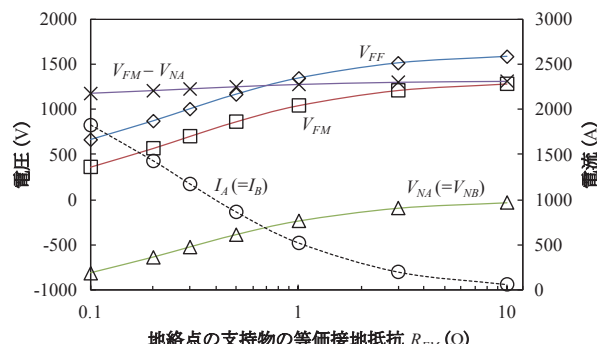


図2 シミュレーション結果

$0.33 \Omega$  以上であると変電所帰線電位  $V_{NA}$  (図1の設定では  $V_{NA}=V_{NB}$ ) が  $-500V$  に達しないため、直流高圧接地継電器 (64P) も動作せず、現状標準の直流き電用変電所保護継電システムにおける保護要素は皆無となるが、 $I_A, I_B$  は数百 A 程度であり、電線の断線は十分起こり得る。なお、これらの数値は設定条件によって変化し、特にレール漏れ抵抗  $\rho_r$  ないしレール特性抵抗  $R_e$  (軌道と大地を半無限長分布定数回路と考えたときの等価接地抵抗) に強く影響される。

ここで、図2において地絡点支持物の対地電位  $V_{FM}$  並びに地絡点き電線電位  $V_{FF}$  は、支持物の接地抵抗  $R_{FM}$  に強く影響されている。 $R_{FM}$  が  $1 \Omega$  程度以上あれば数百 V 以上の対地電位上昇が生じるが、 $R_{FM}$  が小さくなるに従って対地電位上昇は小さくなり、その分だけ  $V_{NA}, V_{NB}$  が負方向へ移動する。一方、支持物と変電所帰線(レールと整流器負極の節点)の間の電圧  $V_{FM} - V_{NA}$  は  $R_{FM}$  による変化が小さい。このため、支持物の電位上昇を保護線に変電所に伝えて高抵抗地絡を検出するシステムを構成するにあたり、鉄筋接地方式の支持物にも適合させるためには、保護線と変電所帰線間の電圧を監視するのが相応しいといえる。

### 3. 検討対象の直流高抵抗地絡検出システム

本稿で検討対象とする直流き電回路用の高抵抗地絡検出システムを図3に示す。変電所間の全長に保護線を新設し、支持物への地絡時に支持物の対地電位上昇を「保護線用素子」を用いて保護線へ伝達する。区間両端の変電所において、保護線の引き込み箇所に避雷器(直流変電所用)を設けて雷サージを制限し、 $1k\Omega$  程度の抵抗器(保護線用抵抗器)を経て帰線へ接続する。そして、保護線・帰線間の電圧を監視する「保護線電圧継電器」を設け、これが動作したときに、き電用直流高速度遮断器を開放するものである。なお、保護線電圧継電器は一般的な直流過電圧継電器と考えてよい。

図3の等価回路を図4に示す。地絡箇所の支持物(以下、地絡柱という)には、き電線の対地電位からアーク電圧  $300V$  (標準値) を減じた対地電位が生じる。また、地絡故障ではレール特性抵抗を経て地絡電流が整流器負極に戻るため、変電所の帰線の対地電位は一般に負となる。この電位差によって保護線用素子が導通し、保護線に電位を生じさせる。保護線用素子に関してこの電流方向および電圧印加方向を順方向と定義する。一方、隣接柱の保護線用素子には逆方向の電圧が印加されるが、素子に逆阻止特性を持たせ、保護線の電位を隣接柱には伝えないようにして、地絡柱以外の複数箇所の柱に通電することによる保護線電位の低下や地絡事故の波及を避ける。



特集：電力技術

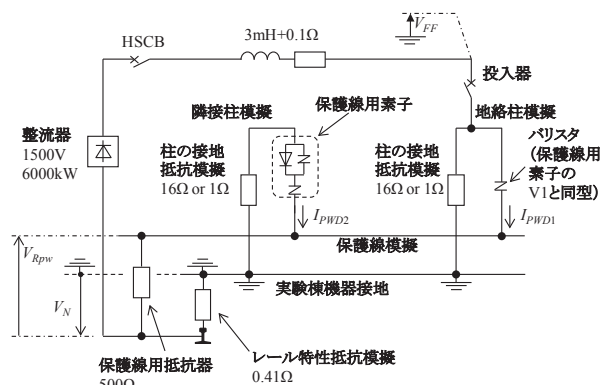


図6 直流動作試験（基礎実験）回路

電線からの静電誘導電圧による不要動作の懸念や、保護線を懸架するがいしの汚損絶縁低下に伴う検出性能低下を大幅に軽減できる。

組み立てた保護線用素子は耐環境性を付与するため、全体を樹脂でモールドすることを想定する。

4.2 直流動作に関する基礎実験

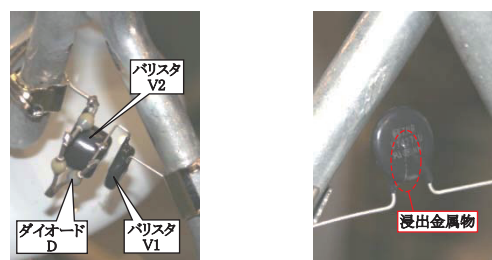
鉄道総研構内の実験棟において、提案するシステムを模擬した図6の回路を構成し、通電試験を行った。使用した保護線用素子の外観を図7に示す。バリスタV1とV2の $V_{1mA}$ はそれぞれ390Vと1800Vである。本実験で隣接柱相当箇所を用いた素子（図7(a)）のダイオードは直流動作実験のみを目的とした設定であり、雷インパルス電流への耐性は考慮していない。また、地絡柱相当箇所の保護線用素子はダイオードの導通によってバリスタV1が単体で存在するのと同様のため、図6および図7(b)に示すようにバリスタV2とダイオードを省略している。

電化柱（地絡柱、隣接柱）の接地抵抗に相当する抵抗器は、コンクリート柱を想定した16Ωと、鉄筋接地方式としては比較的接地抵抗が高い場合を想定した1Ωの2通りに設定した。保護線用抵抗器は、区間両端の変電所に各々1kΩを設けるのと同等になるように500Ωとした。

測定結果を図8に示す。電化柱の接地抵抗がどちらの想定でも、地絡柱のバリスタは通電により短絡モードで破壊した。バリスタからは少量の煙が生じ、図7(b)のように少量の金属物が滲み出ることもあったが、破裂等することはなかった。一方、隣接柱の素子には電流が流れず損傷もしないことを確認した。これにより、支持物への地絡故障を安定して検出できること、並びに使用部品の特性を適切に選定すれば、地絡柱以外での保護線用素子の逆導通を避けられることの見通しを得た。

5. 現地試験による検証

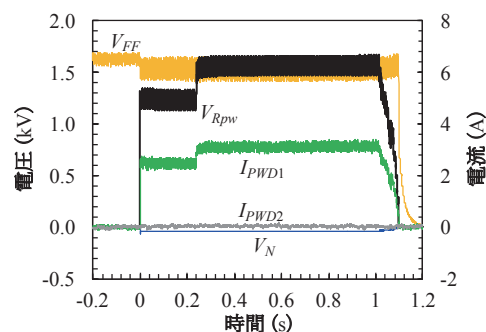
本システムの検証のため、保護線用素子と保護線電圧継電器を用いて、現地営業線において模擬地絡試験を



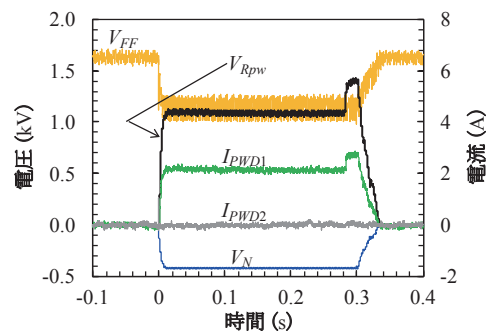
V1: ERZV14D391  
V2: ERZV14D182CS  
D: 800V 3A品を3直列

(a) 隣接柱用 (b) 地絡柱用（通電後）

図7 直流動作試験に用いた保護線用素子



(a) 支持物接地抵抗16Ω模擬時



(b) 支持物接地抵抗1Ω模擬時

図8 直流動作試験（基礎実験）結果

行った。

図9に試験回路の概略を示す。試験システムはKき電区分所・M変電所間の複線10.3kmの区間である。下りき電線を保護線として使用することで保護線方式の模擬回路を構成した。電源にはM変電所の直流1500V整流器を使用し、故障発生後のき電用遮断器開放は変電所直接運転による手動操作によった。地絡故障の模擬は、予めS状ホーン（間隙長4.5mm）に家庭用アルミ箔の薄片を介在させておき、投入器（6.6kV汎用真空遮断器を使用）の投入で通電を開始してアルミ箔を焼損させることとした。

保護線用抵抗器はKき電区分所・M変電所とも1200Ωとした。L駅構内故障点において柱の接地抵抗を模擬する抵抗器は、試験で用いる既設接地電極（電車線路避雷器用）に流す電流を制限して試験を安全に遂行することを重視して300Ωとした。

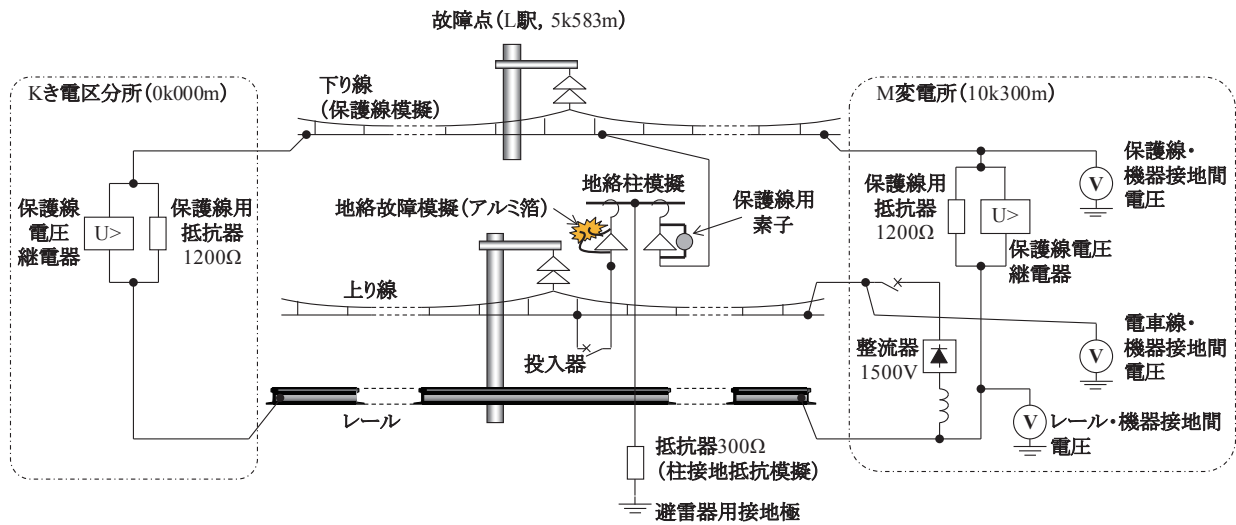


図9 現地模擬地絡試験回路概要

使用した保護線用素子（雷インパルス電流に対する耐性は未考慮）の外観と内部構成を図10に示す。保護線電圧継電器は、直流高圧接地継電器（64P）の既存製品を基本として動作電圧300V・動作遅延時間25msに変更した試作器を使用した。



図10 現地模擬地絡試験で使用した試作保護線用素子



図11 現地試験状況

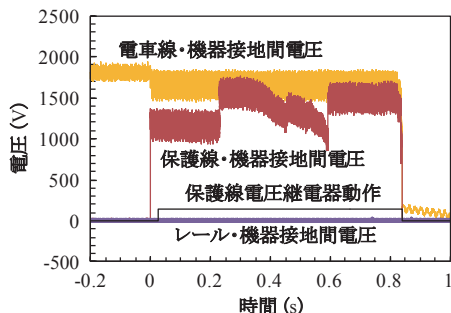


図12 現地試験結果（変電所測定）

投入器の投入直後、故障点ではアルミ箔が焼損してS状ホーンの極間がアークで導通状態となり（図11）、保護線用素子が導通した。アークがS状ホーン上を動き回るためアーク電圧が変化し、その結果保護線電圧も変動するが、変電所・き電区分所に仮設した保護線電圧継電器はすべての試番で遅滞なく動作した（図12）。これにより、保護線方式によって高抵抗地絡が検出できることを確認した。なお、通電後の保護線用素子はバリスタが短絡モードで破壊していたが、外観は若干の変色がある程度で破裂等はなかった。

次に、故障点の回路を図13のように変更して隣接柱の模擬を行い、同様に模擬故障を発生させた。その結果、隣接柱に設けた保護線用素子は導通しないことを確認した。さらに、一度通電して短絡モード破壊になった地絡柱の保護線用素子を交換せず再使用して模擬故障を発生させる試験も実施したが、保護線用素子の電圧降下が通電開始直後から僅少になっていることを除いてシステムの動作に大きな変化は見られず、素子の破裂等もなかった。

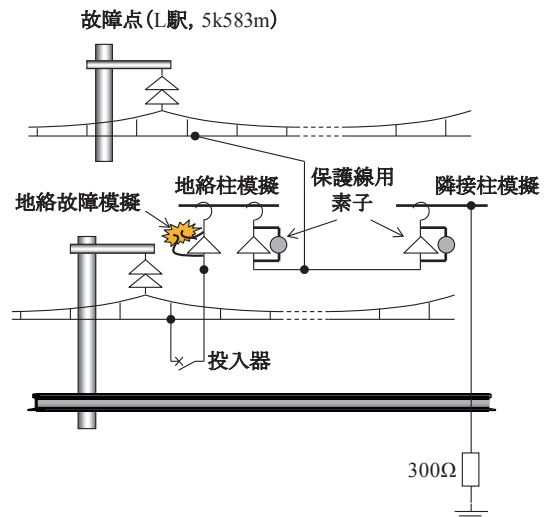


図13 故障点回路（隣接柱模擬追加）

特集：電力技術

6. 保護線用素子の雷インパルス電流への対応

初期の保護線用素子試作品に標準雷インパルス電流(8/20 $\mu$ s)を通電する試験を行った結果、3～5kAでバリスタが破裂・ダイオードが短絡モード破壊となった。

このため、保護線用素子の雷インパルス電流耐量の向上を検討した。バリスタを破壊耐量の大きいものに変更するとともに、ダイオードを順方向に流れる雷インパルス電流への対応は、図14に示すようにダイオードと直列に抵抗器を挿入し、順方向電圧降下を大きくして過大な順方向雷インパルス電流をバリスタV2に分流させる方法を考案した。V2の10kA制限電圧が4500V程度であることから、抵抗値を10 $\Omega$ とすると、ダイオードを流れる電流の最大値は450A程度に抑制される。一方、10 $\Omega$ の抵抗器の挿入に伴う直流2～3A通電時の電圧降下増加分は20～30Vのため、システム全体の直流動作は抵抗器を挿入しない場合とほとんど変わらない。

これらの改良により、順方向・逆方向それぞれ標準雷インパルス電流(8/20 $\mu$ s)10kAに耐える保護線用素子を得た。通電波形を図15に示す。

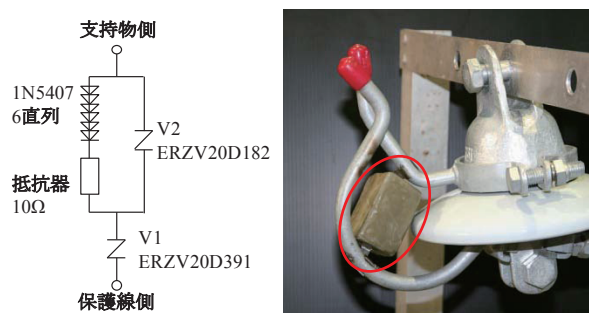


図14 破壊耐量を向上した試作保護線用素子の構成と外観

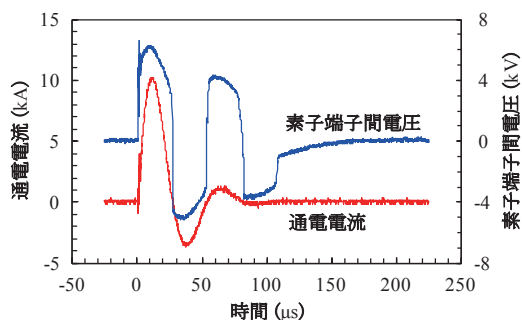


図15 8/20 $\mu$ s標準雷インパルス電流通電結果 (順方向電流尖頭値約10kA)

7. まとめ

直流き電回路の高抵抗地絡故障を確実に検出する方法として、保護線を新設し、保護線用素子を用いて支持物

の電位上昇を保護線に伝えることにより地絡を検出するシステムを開発した。現地試験によってシステム構成を検証するとともに、保護線に生じ得る雷サージに現実的な範囲で対処した保護線用素子を作成した。

本システムは主に明かり区間本線への適用を意図しており、様々な原因の高抵抗地絡故障を検出可能である。実用化に際しては、保護線の敷設に関する施工基準や、保護線用素子の取り付け構造、保全方法などを具体化していくことが必要と考えている。

謝辞

現地試験に御協力頂いた東日本旅客鉄道株式会社 JR 東日本研究開発センターテクニカルセンターおよび高崎支社の各位、保護線用素子の試作に御協力頂いた株式会社サンコーシヤの各位、保護線電圧継電器の試作に御協力頂いた永楽電気株式会社の各位に謝意を表す。

文献

- 1) 電気鉄道ハンドブック編集委員会：電気鉄道ハンドブック，p.528，2007
- 2) 松本晃，植松正次，吉住浩史，山本浩志，根岸英雄，三苦好久：続流によるき電線断線現象の検証試験，平成25年電気学会全国大会，No.5-097，Vol.5，pp.167-168，2013
- 3) 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
- 4) 井上訓一，上野勲：放電ギャップを応用した直流き電回路用高抵抗地絡自動保護方式，電気学会論文誌B，Vol.119，No.2，pp.185-194，1999
- 5) 阿部智，伊東利勝，伊藤二朗，伊藤健：電圧検出式接地故障検出装置の開発，平成6年電気学会産業応用部門大会，1994
- 6) 安喰浩司，森田岳，吉井剣，牧本次郎，内沼夏織：保護線による直撃雷断線防止システム，平成22年電気学会産業応用部門大会，No.3-19，pp.III-203-204，2010
- 7) H. Morimoto, T. Yoshii, J. Makimoto, H. Yoshizumi, A. Nishiwaki, and H. Hayashiya : "A Study on a Preventive System of Wire Break triggered by Direct Lightning Strokes on to DC Railway Feeding Systems" , presented at ICLP 2012, Wien, Austria, Sept. 2-7, 2012, Paper No. 161.
- 8) 森本大観，柴田直樹，吉井剣，植松正次，林屋均：保護線を用いた直流き電回路高抵抗地絡検出システム，平成26年電気学会産業応用部門大会，No.5-3，2014
- 9) 電気鉄道ハンドブック編集委員会：電気鉄道ハンドブック，p.575，2007