

電力制御用電子機器に対する雷害対策

森田 岳* 平井 信一**

Lightning Protection of Control Board Equipped with Electronic Equipment

Gaku MORITA Shinichi HIRAI

This paper describes a lightning protection of electronic devices, such as control boards and remote terminal units (RTU), used for railway power equipment. RTU is a data transmission equipment of a SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) for a substations control center. A measurement of surge current paths into RTUs was carried out at eight distribution stations of an actual railway line for two years. The measurement result shows that the majority of the surge current is the path from a low-voltage receiving point to the RTU. Accordingly, we proposed a lightning protection measure using a SPD (Surge Protective Device) and ferromagnetic cores at the receiving point, and validated the effect of the measure at the distribution stations for six months.

キーワード：雷害対策，電力設備，配電設備，遠方監視制御装置，通電履歴調査，保安器

1. はじめに

近年、変電所や配電所などの電力設備の制御装置として、ME（マイクロエレクトロニクス）化配電盤やTCP/IP制御による遠方監視制御装置など（以下、電子制御装置）の、従来の電気連動装置に比べて雷撃に脆弱な電子機器が導入されており、これらの耐雷性向上が課題となっている。電子制御装置は低圧で動作する電子機器であることから、家電製品や通信設備等と類似した低圧電路に対する対策が必要となる^{1) 2)}。

本研究では、鉄道設備の電子制御装置の雷害事例を調査すると共に、電子制御装置へのサージの侵入について経路の特定とメカニズムの推定を行った。これらの検討を元に、電子制御装置を対象とした雷対策手法の開発を行い、実設備での仮設試験により効果検証を行った。

2. 電子制御装置の雷害事例調査

2.1 家庭用電子機器の雷害事例

電力会社の低圧配電系での雷害について、電気設備学会の検討委員会¹⁾や電気学会の調査専門委員会²⁾で調査されている。これによると家庭用電子機器の雷害では、

- (1) 被害発生率は、1987～91年の統計では0.02%/(年・雷雨日数)程度であったが、2006年の統計では0.07%/(年・雷雨日数)程度に増加している。
- (2) 最も多く被害を受けた機器は1987～91年ではテレビであったが、2006年ではパソコン(PC)であっ

た。雷害事例では、通信線用ちよう架線を通して雷サージが侵入し、PC本体とモデムが破壊された例などが報告されている。

- (3) 被害を受けた機器の接続形態は、1987～91年では低圧電源とアンテナに接続されたもの(テレビなど)が約50%で大半を占め、2006年では電源と通信線に接続されたもの(PCなど)が40%を超えた。
- (4) 機器損傷には到らないものの、雷撃の影響で機能停止するというコンピュータ独特のフリーズ現象が報告されている。電源を再投入すると正常動作に復帰することが特徴である。

総括すれば、低圧電源で動作するコンピュータで通信機能を持つ機器での雷害が増加傾向にあると言える。鉄道の電力設備を考えると、遠方監視制御装置(以下、遠制装置)や連絡しゃ断装置がこれに該当する。

近年では特に遠制装置へのICT(Information and Communication Technology)技術の導入が一般化していることから³⁾、これに対する雷害対策について検討した。

2.2 鉄道の電子制御装置の雷害事例調査

一事業者の電子制御装置の雷害事例(疑いを含む)を、2011年4月から2015年3月の期間で調査した(表1)。遠制装置の被害が8件中6件と特に多く、何れも配電設備用のサイクリック形遠制装置(子局)であった。被害箇所は沿線設備に集中しており、変電所での被害はアーク検知器不要動作の一件のみであった。

電気学会等の報告している通り(前節)、殆どの事例で高圧・特別高圧の主回路設備には地絡や損傷が生じず、相対的に脆弱な電子制御装置のみが影響を受けた。

* 電力技術研究部 き電研究室

** 四国旅客鉄道株式会社 松山電気区 今治駐在

特集：電力技術

図1に遠制装置の内部構成を示す。外部への接続端子を有する構成要素に、低圧電源に接続される電源部、通信線に接続される伝送部（モデム）、監視制御対象である開閉器や機器に接続される監視制御部がある。情報処理部には、配電盤や情報計測装置が接続される場合があるが、サイクリック形遠制装置では本接続機能は無い。遠制装置内では、特に伝送部（モデム）と電源部に被害が集中していた。

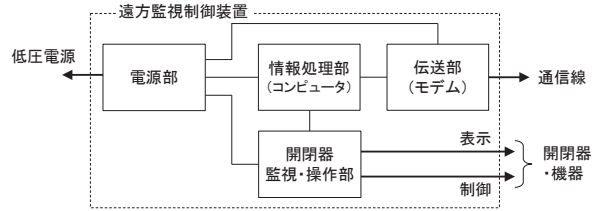


図1 遠制装置の内部ブロック

2013年7月と2014年7月の事例を詳細調査した。前者では、電源部の直流電源装置で破損が認められた。図2に当該装置（実物）の写真を示す。端子台付近のコンデンサ表面において、放電痕と被覆の剥離が認められる。後者では、電源部の電圧切替装置を構成する電磁接触器（MC: Magnetic Contactor）が破損した。何れの事例も電源部に損傷を受けていた。



(a) 直流電源部俯瞰

(b) 破損部拡大

図2 サイクリック形遠制装置の雷害調査結果

表1 電子制御装置の雷害事例

年月	被害設備	被害内容
2011.4	テレメータ	基板破損
2011.9	遠制装置	表示不能
2012.9	遠制装置	モデム損傷
2012.9	アーク検知器	誤動作（不要動作）
2012.9	遠制装置	モデム損傷
2012.9	遠制装置	リレー損傷
2013.7	遠制装置	電源部損傷（図2）
2014.7	遠制装置	電源部 MC 破損

3. サージ侵入経路の特定

3.1 検討対象設備の概要

サージ侵入経路の調査を、一定期間で継続的（2013年8月～2016年1月）に行った。年間を通して落雷がある地域の一線区を対象に、高圧配電線（以下、高配）用の柱上開閉器（PAS: Pole-mounted Air Switch）を指令所から監視制御する、サイクリック形遠制装置を対象設備とした。本遠制装置は、駅の信号機器室（以下、RH: Relay House）内に設置され、PASは駅構内柱上にある。高配の大半が架空線で構成される。

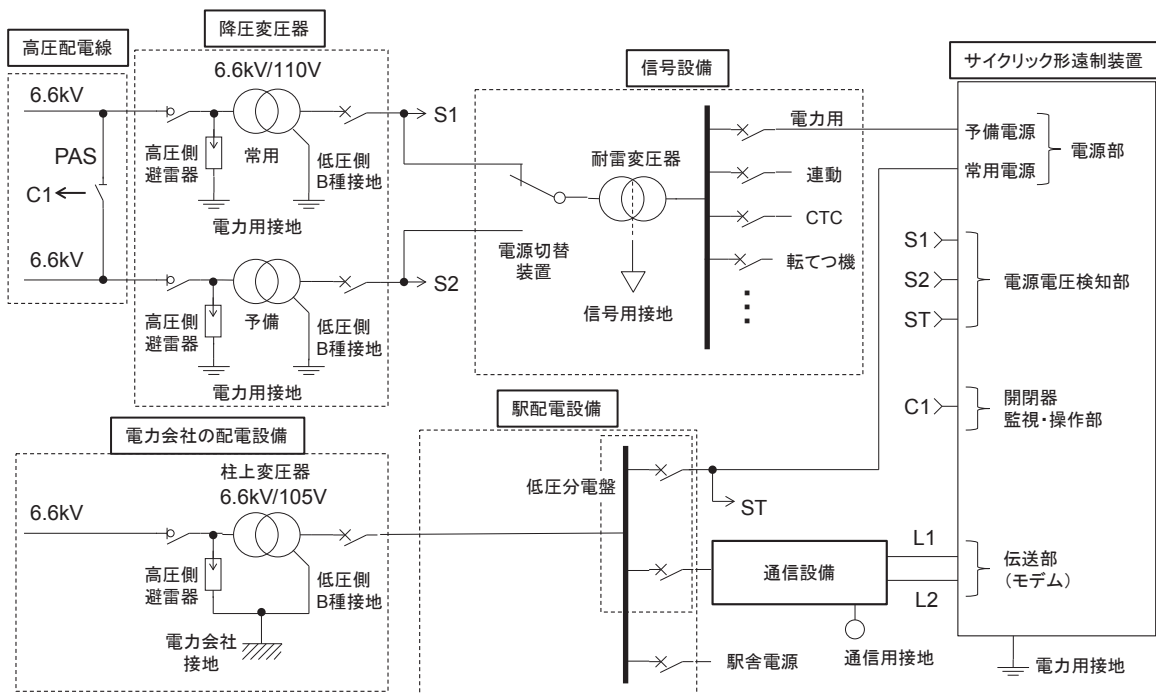


図3 検討対象設備（駅信号機器室に置かれる高圧配電用開閉器用の遠制装置）の電源系統

本遠制装置の電源および接地系統を図3に示す。遠制装置の電源は二重系であり、一方が電力会社電源（低圧受電）から供給される常用系、もう一方が信号設備の電源から供給される予備系（以下、信号電源）である。遠制装置の接地線は電力用接地に接続され、通信線用の遠方接地線は未接続（絶縁）にて運用されていた。

電力会社電源の系統では、柱上変圧器（電力会社配電設備）と電力会社接地が関係する。一方、信号電源の系統では、間に降圧変圧器（電力設備）と耐雷変圧器（信号設備）の二つの変圧器と、電力用接地と信号用接地の二つの接地系が関係する。

電力指令所に置かれる親局装置との伝送のため、遠制装置は通信線と接続される。通信設備へは電力会社電源が供給され、通信用の独立接地がまた設けられている（図3）。なお、図示した接地記号で異なる記号が用いられているものは、設備管理系統が異なることを表す。本設備では、電力用、信号用、通信用、電力会社用の4種の独立接地がある。

耐雷設備について見れば、高圧用避雷器（アレスタ）が高配2系統と、電力会社の配電線に設けられている。また、信号設備は受電部に耐雷変圧器を備えている。図では省略したが、低圧の保安器（SPD: Surge Protective Device）が信号設備内に複数備えられている。

3.2 調査手法

遠制装置へのサージ侵入経路の特定は、電流記録素子を用いて行った。本素子は無電源で動作し、対象回路の電流通電有無（概ね100A以上の通電記録のみ、時期・回数は不明）を記録するもので、再使用不能であるが小型・安価であり、目視で履歴確認できる特長がある。

本素子を遠制装置の外部への接続回路の全てに仮設した（図4）。図では外部接続線を有しない情報処理部は省略した。また、対象の遠制装置は図1に示す基本機能に加えて、低圧電源（信号高圧の2系統、電力会社電源）の加圧状態を監視する機能（電源電圧検知部）を有し、これらの接続線にも記録素子を仮設した。

本調査は8つの駅で実施した。通電履歴の確認は、月一回の定期巡回時における目視確認を基本とした。

3.3 主たる侵入経路

対象8駅における、2013年8月から2015年7月の通電履歴を接続線の種別で分類した結果を図5に示す。なお、電流履歴には雷サージ以外の開閉サージ、変圧器やコンデンサの突入電流等が含まれる可能性があるが、何れも遠制装置へ影響を与えうる大電流（100A程度以上）である。

同図から電源部（電源電圧検知部を含む）が、全体の87%と大きな比率を占めることが分かる。続いて多いのが、接地線で全体の10%を占めた。雷害事例調査からは通信線からのサージ侵入が懸念されたが、これは全体の2.5%に過ぎなかった。直撃雷が想定される高圧機器であるPASには、操作電源線・表示線・制御線が接続されるが、本箇所での通電履歴は皆無であった。

以上から、遠制装置へのサージ進入経路は、低圧電源由来が主体であると結論できる。

3.4 サージ侵入メカニズムの推定

低圧電源からの侵入メカニズムを推定した。前述の通り遠制装置の電源は、電力会社からの低圧受電系統と、信号電源からの分岐の2系統がある。

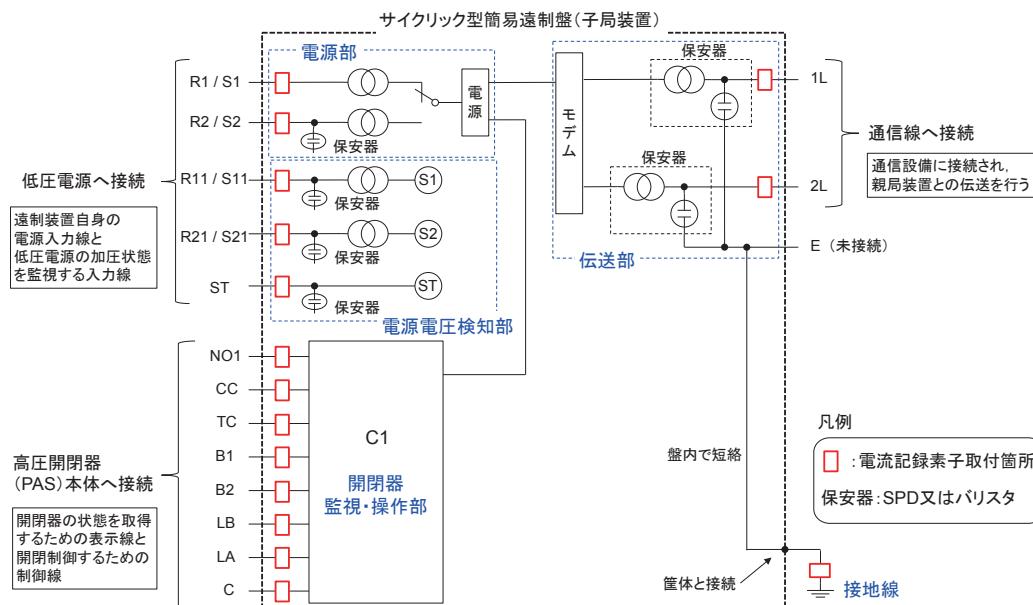


図4 遠制装置への電流記録素子の取付箇所

特集：電力技術

電力会社電源からのサージ侵入メカニズム（推定）を図6に示す。まず、電力会社の配電線（6.6kV）に雷サージ（直撃雷もしくは誘導雷）が侵入する。この過電圧により、柱上変圧器の高圧一次側の避雷器が動作し、サージ電流が電力会社のA種接地（低圧二次側のB種接地と同一接地の場合を想定）に流れる。接地抵抗は有限（10Ω以下）であるため、低圧側のB種接地の電位が上昇する。この過電圧が低圧電源線を通して、サージ電流となって遠征装置に侵入する一連の経路が考えられる。

信号電源からのサージ侵入メカニズム（推定）を図7に示す。まず、高圧配電線（鉄道設備）に雷サージが侵入する。前述同様の流れにより、信号電源側に過電圧が流出する。信号設備の低圧受電部に設けられた耐雷変圧器により過電圧は遮断されるが、一部は二次側に伝搬し、遠征装置まで伝搬する。

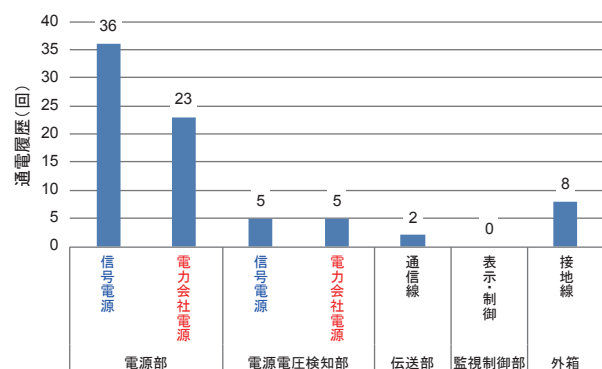


図5 遠征装置へのサージ通電履歴の内訳 (2013年8月～2015年7月)

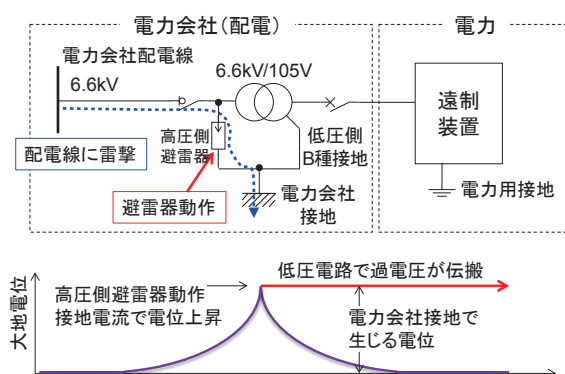


図6 電力会社電源からのサージ侵入現象推定

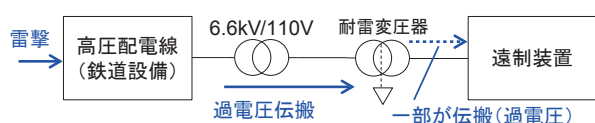


図7 信号電源からのサージ侵入現象推定

4. 雷害対策手法

4.1 接地系統のあり方

変電所などの大規模電力設備では、大きな接地電流を伴う直撃雷や地絡故障に対応する必要があり、メッシュ接地のように大規模な接地システムが設けられる。前述の通り、雷害の原因は接地極での電位上昇に加え、接地極間で電位差が生じることによる^{1) 2), 4) ~6)}。すなわち、変電所の雷対策の基本は、高周波における接地インピーダンスの低減と、接地極間（機器間）の等電位化である。

一方、今回対象はRH内の配電設備であり、大規模接地の敷設はコストや用地の点で困難である。そのため、接地極や接地線の構成が課題となる。配電設備では、高配の地絡電流が最大でも数A程度と小さいことから、雷対策において接地抵抗の低減よりも、等電位化が相対的に重要である。

遠征装置の雷対策のみを考えれば、電力と信号の接地を接続した共用接地の形態として、RH内全体を等電位化すれば良い（図8）。

一方、信号用接地は電力用接地とは異なり、直撃雷や地絡電流の通電を想定していない^{7) 8)}。加えて、信号設備にも軌道回路、運転保安設備、転てつ機、運行管理システムなど、外部への接続線が多数存在するため、太径の接続線で鉄道設備全体を等電位化する接地形態が望ましい。これは欧州の接地形態と同一である。

共用接地導入は、鉄道システム全体の絶縁協調の再構築であり、十分な検討と準備期間が必要となる。仮に、電力用と信号用の機器室内接地を単純接続すれば、電力側での雷サージ侵入や地絡故障により、信号設備側に伝搬した過電圧による波及故障が懸念される⁷⁾。

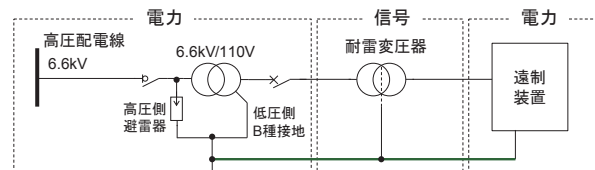


図8 システム間の接地共用化（等電位化）

4.2 電子機器の雷害対策手法（一般論）

一般的な電子機器の雷対策として、機器単独で可能な3つの方法が知られる^{1) 2)}（図9）。

図9(a)は耐雷変圧器と二極保安器を用いる方法で、耐雷変圧器の遮へい板と保護対象設備を等電位化する。最も効果が高いがコストも最大である。同図(b)は、使用する保安器（SPD）は(a)と同一であるが、保護対象設備の電路と筐体を大地から完全に絶縁する方法で、在来線の信号設備はこれに近い^{7) 8)}。同図(c)は耐雷

変圧器を省略し、三極保安器を用いる方法である。耐雷変圧器の耐雷機能を保安器が兼用するため、コストは最小であるが、接続端子と電子制御装置は非絶縁となる。

図9 (a) と (c) の方法では、接続接地線は雷周波数において十分低インピーダンスとする必要がある。

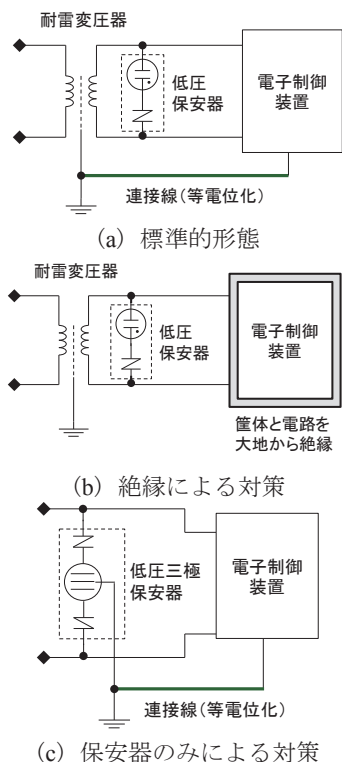


図9 電子機器に対する一般的雷害対策

4.3 提案する低圧電源部での雷害対策手法

配電設備の遠制装置に対する安価で早急な雷対策としては、接地システムの再構築は現実的でないため、電源部に実施する図9の対策が有力候補となる。既に一部のサイクリック形遠制装置には、部分的にこれら対策が講じられているが(図4参照)、低圧電源に接続される端子の一部は未対策となっている。

そこで、図9(c)の方法を応用し低圧分電盤(図3参照)に導入することで、二次側の電子制御装置全体を保護できる雷対策手法を提案した(図10)。この方法は、保安器の接地線と保護対象設備の等電位化が原則であるが、低圧分電盤に保安器を設置すると長尺となる接地線のインピーダンスが無視できない。そこで、主回路側に減結合素子を追加することで、主回路側で接地線側よりも大きな電圧降下を発生させ、等価的に接地側を等電位化する構成とした(図11の等価回路を参照)。

本対策は、保安器と減結合素子の追加のみで可能であり、接地システムの改良など他の対策に比べ安価となる。

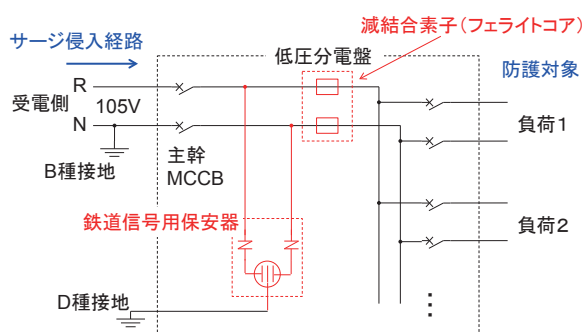


図10 提案する低圧電源部での雷害対策手法

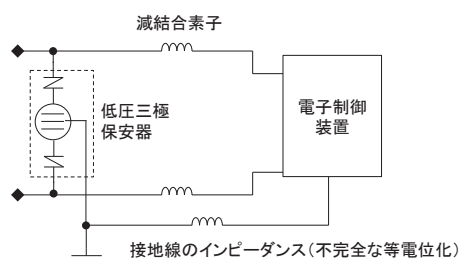


図11 雷害対策手法の等価回路

4.3.1 三極保安器

三極保安器は、一般負荷設備の低圧分電盤用 SPD が多数市販されている。しかし、鉄道設備は以下の点で一般負荷設備と異なっている。

- (1) 電源電圧(特に高配)が安定しておらず、10%以上の電圧変動も珍しくない。
- (2) 電源電圧(特に高配)は多くの高調波が含まれる歪み波形である。
- (3) 電源切替に伴う瞬時停電(瞬停)が日常的にあり、電源装置へのストレスが大きい。
- (4) 建屋(特にRH等では)の室内気候が住居やオフィスビル等に比べ過酷で、耐候性(特に温度、湿度の面)が求められる。
- (5) 求められる安全率が家電製品よりも桁違いに大きい。

そのため、既に信号通信設備で運用実績のある、鉄道信号用保安器を用いることを推奨する。

4.3.2 減結合素子

減結合素子は、雷サージに対しては高インピーダンスであるが、直流や商用周波数などの低周波では短絡特性に近いことが求められ、雷サージで典型的な10kHzから1MHzの周波数帯でのみ有効なリアクトルが望ましい。今回は、低周波用フェライトコア(10kHzから10MHz程度で特性保証)を用いた。今回用いた同コアは、100kHzにおけるインピーダンスが10Ω程度であり、およそ10mの接地線に相当する。

さらに、接地線に高周波電線を適用すれば、耐雷性をより高めることができる。

特集：電力技術

5. 雷害対策の効果検証

5.1 検証試験手法の概要

提案した雷対策手法の効果を、実設備で確認試験した。通電履歴調査対象の8駅の内、3駅に対策を行い対照群の5駅と比較検証した。実設備への試験電流（雷インパルス）印加は、設備（特に信号通信設備）に障害を与えるリスクがあるため、効果検証は自然雷にて行った。仮設は2015年7月末に行い、2016年1月末まで経過調査した。

低圧分電盤への仮設状況を図12に示す。鉄道信号用保安器（200V電源用のカタログ品）と保守用の開閉器を内蔵した仮設保安器盤を、分電盤の主回路に接続を行った。減結合素子（フェライトコア）は、既設の主回路電線（IV線）の上からクランプした。保安器への主回路と接地線の接続線は、高周波電線（被覆付き平編線）を使用し、高周波での等電位化を図った。

なお、効果検証は電力会社電源側のみで行い、信号電源側は現状通りとした。図12に示す写真の低圧分電盤はRH内にあり、電力遠制装置の他に通信設備、照明、コンセントなどの負荷が分岐する（図3参照）。

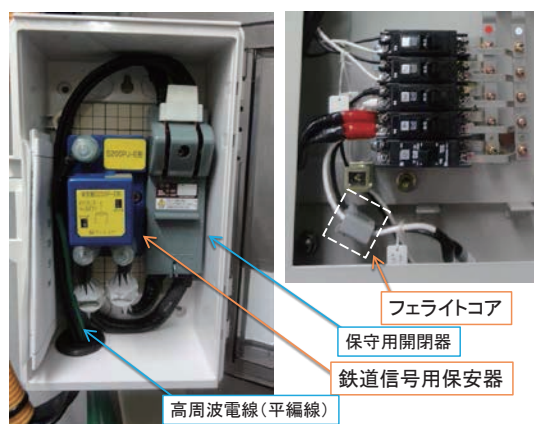


図12 実設備への雷害対策の仮設状況

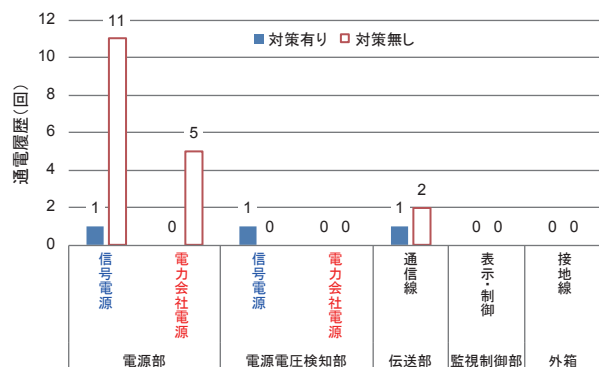


図13 雷害対策後のサージ通電履歴の内訳 (2015年8月～2016年1月)

5.2 効果検証結果

通電履歴を接続線種別で、対策3設備・無対策5設備において、比較集計した結果を図13に示す。無対策5設備では、電力会社電源からの通電履歴が5回認められたのに対し、対策3設備ではサージ侵入は皆無であった。本結果から、提案の対策手法の有効性が確認できた。

なお、無対策の信号電源からのサージ侵入も減少しているが、これは信号電源の履歴の大半が、電力会社電源側からの逆流サージ（図3で低圧分電盤→遠制装置の電源部→信号設備の経路）であったためと推定される。

6. まとめ

電力設備に用いられる電子制御装置の雷害対策について検討した。その結果を以下に要約する。

- (1) 家庭用電子機器では、近年ではパソコン等の雷害が全体の40%を占める。鉄道設備の電子制御装置についても、通信線を有する遠制装置の雷害が多い。
- (2) 実設備の遠制装置8設備を対象に、サージ侵入経路を2年以上継続調査した結果、低圧電源部からの侵入が全体の87%と大半であった。
- (3) 低圧電源部に鉄道信号用保安器とフェライトコアを導入する安価な雷害対策手法を提案し、実設備での検証により有効性を確認した。

謝辞

本研究にあたって御指導頂いた、静岡大学道下教授にお礼申し上げます。

文献

- 1) 電気・電子機器の雷保護, 電気設備学会, オーム社, 2011
- 2) 低圧配電システムにおける雷害対策, 電気学会技術報告, 第1354号, 2015
- 3) 電力管理システム, 鉄道電気技術者のための電力概論, 日本鉄道電気技術協会, 2010
- 4) 高橋: 接地・等電位ボンディング設計の実務知識, オーム社, 2003
- 5) JIS C 60364-5-54, 2006
- 6) JIS Z 9290-3, 2014
- 7) Fujita H., Arai H., Morita G., Nakahara S., Yokota R., "Experimental Study on Electrical Characteristics of Grounding Method for Shinkansen Lines", IEEE, Proceedings of ICLP 2016.
- 8) 新井, 土師, 藤田: 落雷時の大地/レール電位上昇による信号設備への影響と対策, 鉄道総研報告, Vol.23, No.1, 2009