

電力設備における雷サージ観測技術に関する研究

A Study of Lightning Surge Measurement Technique on Electric Power Facilities

電気電子情報通信工学専攻 白石 康寛
Yasuhiro Shiraiishi

1. 研究の目的

雷害対策を実施するためには、被害に起因する雷現象を観測し、雷被害の発生様相を明らかにすることが重要である。これまで、さまざまな電力設備における雷観測結果から、被害を与える雷パラメータの特性を把握し、被害に至った要因や様相を詳細に分析することにより、最も効果的な対策を構築し、耐雷設計手法として確立されてきた。しかし、一方で、高度情報化社会に伴う情報技術 (IT) の発達により、家電製品やパーソナルコンピュータなどに代表される電子化、ネットワーク化された機器が普及し、それらが雷により故障するといった事例や、地球規模の資源エネルギー消費問題と CO₂ 削減に見られる地球温暖化防止に向けた環境問題の社会情勢の中で注目されている風力発電設備における雷被害の事例が数多く報告され、新たな雷被害の問題として顕在化してきている。このように多様化する雷被害に対して、合理的な雷害対策を実施するためには、雷被害と雷性状の相関性を明らかにし、その被害の発生様相を解明することが重要である。そのためには、被害を受ける設備において観測を実施し、その実態を把握する必要がある。それらの観測技術は、雷害対策につながる重要な要素であると言える。雷観測は、これまでさまざまな電力設備において実施されてきた。その成果により、電力設備における雷害対策が確立され、需要家停電時間の大幅な短縮に見られる世界有数の電気品質を実現している。しかし、近年では、その傾向は漸減傾向にあり、未だに解明されない雷被害の存在が明らかになってきた。

このような背景の中で、未だ解明されない雷害問題や、近年顕在化してきた新たな雷害問題に対して、それらの実態を把握するため、雷観測手法や観測センサの設計など雷観測技術の高度化を確立することは重要であり、それらの発生様相の解明や雷害対策の向上に資するものと思われる。

2. 電力設備における雷サージ観測のための課題

第2章では、電力設備における雷サージ観測を実施する上での検討課題を抽出するために、電力設備における雷被害の発生様相や雷の性状から雷サージ観測のための雷パラメータの検討を実施し、また、雷サージ観測の現状から今後の雷サージ観測のための観測システムや観測機材などの課題の検討を実施した。

- (1) 電力設備における雷被害の状況やその発生様相を電力設備別に整理することにより、設備形態により雷被害の様相が異なることを確認した。また、これまでの知見から得られている電力設備における雷被害の発生様相と被害をもたらす雷電流の性状から、雷被害とその要因となる雷の性状を示す雷パラメータの関係をまとめ、電力設備における雷サージ観測のための雷パラメータを得た。
- (2) これまでに実施されてきた雷観測に関する観測目的や観測手法などを雷観測の現状として取りまとめ、現在の雷害問題に対して有用な観測手法を考案するための課題を検討した。
 - これまでの雷観測の現状や近年の電力会社の雷害対策の動向、今日的な雷害問題の状況に対して、今後の雷サージ観測では、実設備における雷被害の実態やその発生様相を解明するための雷観測手法を確立することが重要である。
 - 観測システムは、センサとデータ記録装置の配置 (現場測定, 遠隔測定) を考慮する必要がある。
 - 観測センサは、これまでの観測事例に見られるセンサの特性を考慮した上で、観測対象設備における雷サージの特性 (雷パラメータの特性) や観測対象設備の形態 (実験設備, 営業設備), 観測環境 (屋外, 屋内),

観測期間（短期，長期）などの観測条件を整理して検討する必要がある。

- ・ データ記録装置は，雷サージの特性を考慮した AD 変換性能（サンプリング周波数，垂直分解能）やメモリ容量の検討が必要である。

3. 配電線における雷過電圧観測手法の検討

第3章では，高圧配電線，低圧配電線における雷過電圧観測手法を検討し，その手法を実現するためのセンサの高度化設計，観測手法の妥当性や観測データの信頼性を実証するためのセンサの性能検証を実施した。

- (1) 配電線における雷過電圧の様相や雷パラメータの特性などの学術的な知見を整理し，実線路における観測への適用を目的とした雷過電圧観測センサに要求される課題をまとめ，それらを考慮したセンサの高度化設計仕様を定めた。
- (2) 配電線における雷過電圧観測に関する課題を踏まえ，実設備における雷過電圧測定方式として，従来の測定方式の課題を解決する二つの手法を新たに考案した。一つは，高圧配電線における分圧器として，従来の抵抗分圧器と光変換器による方式を止め，新たにコンデンサを用いた容量分圧器と電気光学効果を応用した光電界センサを組み合わせた方式であり，もう一つは，低圧配電線におけるセンサの入力電圧を駆動エネルギーとして光変換する LED（発光ダイオード）直接変換方式である。
- (3) 高圧配電線における雷過電圧観測を目的とした受動型光電圧センサシステムの原理的な測定方式の検討を詳細に実施した。
 - ・ 容量分圧器は，高圧配電線に直接接続されるため高耐電圧でなければならない。電力用セラミックコンデンサを内蔵したモールド型コンデンサを採用することで耐電圧性能を改善できた。また，静電容量が測定波形に与える変化率を，配電線路での観測を想定した EMTP 解析により明らかにし，変化率を 5%以下に抑制するよう静電容量の最適化を実現した。
 - ・ 従来の光電界センサでは，光学結晶の圧電効果による共振特性により所望の周波数特性を満たすことができないことが判明した。圧電共振の理論式から，圧電現象に起因するパラメータを把握し，それらの相関性を実験的に明らかにした結果，素子形状を 1/2 以下に小型化することで，共振周波数を倍以上に向上させ，規約波頭長 $1\mu\text{sec}$ の周波数応答性能まで特性を改善することができた。
 - ・ 周波数特性を改善した光電界センサに合わせて，光信号を電圧信号に変換する電子回路の周波数特性を約 100 倍に広帯域化した。電子回路は，簡易型波形観測装置などに組み込むことを想定し，小型化した。
 - ・ センサ構造は，実績のある配電自動化用高圧結合器を参考とすることで，配電線への施工性，絶縁性能，防水性などの環境性能を満足する構造を実現できた。
- (4) 低圧配電線における雷過電圧観測を目的とした能動型光電圧センサシステムの原理的な測定方式の検討を詳細に実施した。
 - ・ LED の順方向電流を高周波まで制御するために，直列抵抗は，周波数特性に優れた無誘導型抵抗器を採用した。抵抗器の耐電圧特性は，抵抗器単体の雷インパルス耐電圧特性を実験的に把握し，抵抗沿面の被覆構造を改善することで，最大入力電圧までフラッシュオーバーしないよう性能向上させた。また，LED の雷インパルス電圧に対する発光強度の特性を把握し，測定感度が数十 kV の高電圧まで概ね良好であることが確認できた。
 - ・ センサ側の LED で変換された光信号を電気信号に変換する電子回路の設計を実施した。LED の順方向電流の小電流領域に見られる非直線性の影響を補正する回路を考案し，その波形再現性を実現した。電子回路は，簡易型波形観測装置などに組み込むことを想定し，小型化を図った。
 - ・ センサ構造は，配電線への施工性，絶縁性能，防水性などの環境性能を満足する構造を実現できた。

4. 電力設備における雷サージ電流観測手法の検討

第4章では、電力設備における雷サージ電流観測手法を検討し、高度化センサの設計、観測手法の妥当性や観測データの信頼性を実証するためのセンサの性能検証を実施した。

- (1) 電力設備における雷サージ電流の様相や雷パラメータの特性などの学術的な知見を整理し、雷サージ電流観測センサに要求される課題を体系化し、それらを考慮したセンサの設計仕様を定めた。
- (2) 電力設備における雷サージ電流観測に関する課題を解決し、観測に適した雷サージ電流測定方式として、① ログウスキーコイルによる電流センサと、② 光ファイバ磁界センサを応用した光ファイバ電流センサを考案した。これらのセンサの特長により、稼働中の設備での雷サージ電流観測手法を考案できた。ログウスキーコイルは、その構造の簡易さから、測定する電流の大きさや感度を、センサの形状に合わせて設計することが可能であり、電線から構造物までフレキシブルな観測を実現できる。一方、光ファイバ電流センサは、光ファイバによる信号伝送路の耐ノイズ性や長距離信号伝送などの光絶縁計測の利点から大規模設備での観測に有効な遠隔観測が実現できる。
- (3) ログウスキーコイル方式による電流センサの原理的な検討を詳細に実施し、相互インダクタンスや自己インダクタンス、積分回路定数などの設計パラメータと周波数特性の関係を明らかにし、広帯域化するための改善方法を提案した。その結果、電線のような径の小さい電流路の観測に適した小径（内径 ϕ 70mm）、配電柱や低圧引込ポールなどの構造物の電流観測に適した大径（内径 ϕ 370mm）、さらに風車の搭脚のような巨大な構造物の電流観測に適した特大径（内径 ϕ 4040mm）の3種類の異なる形状のログウスキーコイルを具現化することができた。また、ログウスキーコイルの最大入力電流は、過去の観測による電流波高値頻度を考慮し、小径および大径では、2.5kAと20kA、風車用では、100kAとした。これらのログウスキーコイルの積分回路は、簡易型波形観測装置などに組み込むことを想定し、小型化を図った。
- (4) 計器用変成器の分野への適用が進められてきた光磁界センサを、雷サージ電流のような高周波・大電流測定に適用するために、これまで知られていなかった光磁界センサ（反射型鉛ガラスファイバ光磁界センサ）の高周波特性を実験的に把握した。実験結果から、商用周波数（50Hz）から規約波頭長 $1\mu\text{sec}$ の急峻なサージ周波数の帯域まで入出力特性の直線性は良好であること、入出力比誤差の周波数特性も平坦であることが確認され、光磁界センサの雷サージ電流観測への応用性・適用性が確認できた。実験結果により、鉛ガラスファイバ光磁界センサの周波数特性は、電子回路の周波数特性に依存することが確認されたことから、電子回路の各構成部の周波数特性を大幅に改善し、実用上現場測定器としては申し分のない10MHzのカットオフ周波数を持つ広帯域な電子回路を実現させた。
- (5) 提案した雷サージ電流観測センサを製作し、性能検証を実施した結果から、その性能が、実用上十分な整合性を示すことが確認できた。また、設計時に提案した周波数特性改善策の妥当性が確認できた。これらの性能検証により、検討した雷サージ電流観測センサを用いた雷観測手法の妥当性および観測データの信頼性を示すことができた。

5. 開発した雷観測センサを用いた雷観測

第5章では、雷サージ観測センサを実際の電力設備に適用した雷観測について述べた。電力設備における雷観測を実現することにより、提案した雷観測手法が、これまで未解明であった実設備の雷の様相解明につながる雷観測技術として有効な手段であることが確認できた。

- (1) ログウスキーコイルによる電流センサを用いた雷サージ電流観測手法により、UHV（1000kV）送電線における鉄塔頂部への直撃雷電流観測を実現した。これまでの観測は、鉄塔脚部での観測であり、本システムのように、鉄塔頂部に突針を設けた送電鉄塔に直撃する雷電流の観測は、雷の主放電の特性を知る上で、

極めて有効な直接的観測を実現できた。また、ロゴウスキーコイルを鉄塔頂部の架空地線に流れる電流観測に適用することにより、架空地線の雷遮への効果などの電力線への雷撃様相観測を実現できた。

- (2) 雷過電圧観測センサを用いた雷過電圧観測手法と、小径ロゴウスキーコイル、大径ロゴウスキーコイルを用いた雷サージ電流観測手法の併用により、配電線における雷現象の多地点同時観測を実現した。このような高低圧配電線における同時的な雷過電圧、雷サージ電流の観測は、これまでに例のない観測である。仕様の異なるロゴウスキーコイルは、ネットワーク化された配電線路の電柱接地線、配電柱、架空共同地線、低圧引込線など各種線路に取り付けることにより、配電系統全体のサージ電流の分流様相を定量的に把握することが可能となった。また、低圧配電線の雷過電圧観測に、能動型光電圧センサを適用することにより、低圧配電系統における雷過電圧様相の定量的な把握が可能となった。さらに、低圧系統における雷サージ観測手法は、需要家設備における雷サージ観測への応用性のある観測手法として、活用が期待できる。このような配電線における雷観測を実現した成果により、これまであまり知られていなかった雷エネルギー被害の一例である配電柱の破損に見られるスパークオーバ様相の部分的な解明につながる観測結果を得ることができた。
- (3) 近年顕在化しつつある風力発電設備の雷被害様相を解明するために、大口径ロゴウスキーコイルを用いた雷サージ電流観測手法により、これまで例のなかった風力発電設備に直撃する雷電流の観測を実現できた。数十例の風力発電設備における観測と風車塔体・塔内接地線の同時電流観測により、風力発電設備に被害をもたらす雷撃電流の分流性状を知る上での重要なデータを観測することができた。これらの観測結果は、他の観測結果との照合によるデータ信頼性評価や、雷撃電流波形比較による分流様相の分析、過去の知見との比較による性状分析を実施することにより、風力発電設備における雷撃電流様相を部分的ながら解明することができた。これらのことから、風車塔脚にロゴウスキーコイルを周回させ、雷撃電流を測定する手法が風力発電設備の雷被害様相の解明に有効な手段であることが確認できた。
- (4) ログウスキーコイルを用いた雷サージ電流観測手法は、送電鉄塔や配電線、風力発電設備などのフィールド観測だけでなく、雷インパルス電流実験などの測定試験などへの応用性も確認できた。
 - ・ 実際のマイクロ波無線局の設備を使用した雷サージ電流試験に、マイクロ波鉄塔脚部や導波管などに流れる電流を測定するセンサとして、ロゴウスキーコイルによる雷サージ電流測定手法を適用した。
 - ・ 実配電線における雷観測波形と EMTP による解析波形の整合性およびサージ挙動を知るために、実際の配電線を模擬した実規模配電系統における雷サージ試験に、大径ロゴウスキーコイルによる雷サージ電流測定手法を適用し、両者の整合性を比較できた。
- (5) 広帯域な周波数特性を持つ光ファイバ電流センサを、地中送電線路における地絡発生時の地絡事故点を標定するサージ電流受信型事故点標定装置のサージ電流検出センサとして地中送電設備に適用した。これまでのセンサはロゴウスキーコイルであったが、新たに光ファイバ電流センサを適用することで、従来の長距離信号伝送による誘導ノイズや信号減衰の問題を解決し、サージ電流センサとしての有効性を確認できた。また、センサの大幅な性能向上により、事故点標定精度の向上および事故発生時の地絡電流様相の観測などのシステム全体の性能向上に大いに期待できる。

以上の成果は、従来の雷サージ観測システムを高度化する技術として極めて有用であり、更なる実用化に向けて、多大な成果が期待できるものと確信できた。