

博士学位論文審査要旨

2017年2月17日

論文題目：電気鉄道き電システムの雷対策に向けた実測およびシミュレーション技術に関する一研究

学位申請者：田中 弘毅

審査委員：

主査：同志社大学大学院理工学研究科 教授 長岡 直人

副査：同志社大学大学院理工学研究科 教授 馬場 吉弘

副査：(公財)鉄道総合技術研究所 電力技術研究部

部長 兎束 哲夫

要旨：

我が国のインフラを担う電気鉄道における安全・安定輸送を確保するに、雷害を防止することが求められている。本論文では、雷サージ特性の把握並びに数値解析技術の高度化に必須である電気鉄道設備における実測を各所で行い、これらの設備に雷電流が流入した場合の様相を明らかにしている。これに加え、耐雷対策に必須のレール、埋設地線などの回路解析モデルを開発すると共に、シミュレーションを実施し、数値解析の視点からも雷サージ特性の検討を行っている。

本論文では、まず鉄道における雷害事例を調査し、対策を講じるべき事項の整理を行った後、雷害対策の基本である接地について、接地抵抗を容易に測定し得る実用的な手法を提案すると共に、実設備における実験により提案法の有効性を確認している。さらに電気鉄道変電所接地網におけるサージ電圧分布、制御ケーブルへの誘導特性を実験的に明らかにしている。また、高周波領域での接地インピーダンス特性について、実変電所における測定結果を、周波数変換法を適用するなどして数値解析し、接地特性を雷サージの視点から深く検討している。

また、電力系統過渡現象シミュレーションツールを鉄道電気設備に適用し、受電電力系統を含め雷サージ解析により耐雷対策を検討すると共に、埋設地線や、鉄道設備特有のレール等の回路解析モデルを開発し、その精度を実測により確認している。埋設地線モデル開発では、電磁界解析法を利用し、これまで考慮することのできなかつた土中の3次元電圧電流分布を考慮した回路解析モデル開発するなど、新たな手法を提案している。本論文の成果は、電気鉄道電気設備の保守・設計に極めて有用であるばかりでなく、電力系統などその他分野への応用が可能である。

本論文で得られた実測結果は、電気鉄道設備の雷害対策に極めて有益であると共に、提案したモデルおよびモデリング手法は、高精度雷サージ解析を可能とすると共に、速やかに汎用回路解析プログラムに導入できることから、我が国のみならず世界各国の鉄道システムに適用できる。これらの成果は電気鉄道の安全運行に多大なる貢献をなすものであることより、本論文は、博士(工学)(同志社大学)の学位論文として十分な価値を有するものと認められる。

総合試験結果の要旨

2017年2月17日

論文題目：電気鉄道き電システムの雷対策に向けた実測およびシミュレーション技術に関する一研究

学位申請者：田中 弘毅

審査委員：

主査：同志社大学大学院理工学研究科 教授 長岡 直人

副査：同志社大学大学院理工学研究科 教授 馬場 吉弘

副査：（公財）鉄道総合技術研究所 電力技術研究部
部長 兎束 哲夫

要 旨：

本論文の提出者は本学工学研究科博士課程（前期課程）を2003年3月に修了、2014年4月に本学理工学研究科博士課程（後期課程）に入学し、現在在籍中である。

本論文の主たる内容は、電気学会 産業応用部門論文誌、136巻、12号、pp.971-977に掲載、およびWorld Congress on Railway Research 2016, OP_35で発表がなされ、また、電気学会 電力・エネルギー部門論文誌、137巻、2号に掲載が決定しており、十分な評価を得ている。

2017年1月7日午後2時30分より約2時間にわたり、提出論文に関する学術講演会が開かれ、種々の質疑・討論が行われ、提出者の説明により十分な理解が得られた。

さらに、講演会終了後、審査委員により学位論文に関連した諸問題につき口頭試問を実施した結果、論文提出者の十分な学力を確認できた。なお、提出者は、国際会議において英語による論文発表のほか、本学理工学研究科博士課程（後期課程）在籍中に語学試験に合格しており、十分な語学力を有しているものと認められる。

以上より、本論文提出者の専門分野に関する学力並びに語学力は十分であることが確認できた。よって、総合試験の結果は合格であると認める。

博士學位論文要旨

論文題目： 電気鉄道き電システムの雷対策に向けた実測およびシミュレーション技術に関する一研究

氏名： 田中 弘毅

要旨：

本論文は、鉄道の安全・安定輸送を確保するため電気設備の雷害を防止することを目的とし、実測およびシミュレーション技術を導入することにより検討した。

まず初めに第2章において、き電システムの概要を述べ、直流および交流き電回路について概説し、第3章では、実フィールドで発生している雷害事例について具体的事例を紹介した。

第4章では、変電所接地網等大規模接地に対する接地抵抗測定について、標準法ではあるが大規模な装置を要する電圧降下法を補完し、接地系の保守に有用な簡易接地抵抗計を使用した手法を提案した。簡易法であっても、接地極を移動させ数回測定することにより、信頼性の高い接地抵抗値を得られることを現地試験により確認した。また、変電所接地網のインピーダンスの周波数特性を測定し、低周波領域ではほぼ一定であるが、5kHz以上の高周波領域では概ね周波数に比例して上昇し雷サージに対しては従来の低周波に対する接地抵抗の管理では不十分であることを示した。

第5章では、在来線直流電鉄用変電所における模擬雷注入によるサージインピーダンス測定および電位分布測定から、変電所接地網の接地特性を明らかとした。サージインピーダンスは、き電側60Ω、受電側90Ω程度となり、接地線長の増加に伴いサージインピーダンスが上昇することを示している。従って雷害低減には接地極のインピーダンス低減もさることながら接地網への接続線長を極力短くするなど配線にも十分注意を払う必要がある。また、メッシュ接地と遠制接地は過渡及び定常的に波形様相が異なることをフィールド試験から明らかとし、雷電流の侵入がない信号制御系の接地は遠制接地とすることで雷害を低減し得ることを明らかとした。

第6章では、制御ケーブルに誘導電圧を発生させる雷サージに焦点をあて、電鉄用変電所の過渡応答でのフィールド試験結果から、制御ケーブルに発生する電圧は、電子回路を損傷させるに十分高いことを示している。この対策として、制御ケーブルの空き線を接地して制御ケーブルに発生する誘導電圧を効果的に低減し得ることを示した。なお、空き線の配電盤側または両端接地は有効であるが、機器側のみの片端接地は制御ケーブルに高電圧が発生する可能性があるため実施すべきではないことを明らかとした。

第7章では、電鉄用変電所の整流器用変圧器損傷に着目し、EMTPのシミュレーション解析結果を示した。解析結果から雷電流の大きさや雷撃位置を想定すれば発生する雷サージの推定が可能となり、電気鉄道の電力システム設計に数値解析が極めて有用であることが明らかとした。また変電所を構成する変電設備機器との共振現象により機器が損傷する可能性があり、想定雷電流の周波数成分すなわち波形については十分注意を払う必要がある。

第8章では、軌道回路に設置されたインピーダンスボンドの障害に着目し、その原因について検討を加えた。まず、インピーダンスボンドのサージ応答特性を表現し得るモデルを定常インピーダンス測定法により構築し、その精度を過渡応答試験とシミュレーション結果との比較により検証した。その結果、レールを流れた雷電流がインピーダンスボンドに流入する際の雷サージは、本章で開発したインピーダンスボンドモデルを適用したEMTP解析により推定することができ、閉そく区間内に存在する列車の在線検知の感度を共振により向上させる共振キャパシタの焼損の原因はキャパシタの耐電圧不足ではなく、これに流れる雷電流によるものであることを明らか

とした。さらに、EMTPは電力系統の過渡現象解析ツールとして開発されているが、系統解析と同様に軌道回路の雷サージ解析を行う効果的なツールであることも明らかとした。

第9章では、鉄道用レールを等価均質線路で表現し、まくらぎやバラストによるレール波形伝搬特性の変化を線路並列アドミタンスの増加分として表現することで均質線路理論を適用し、またこのアドミタンスを実験的に求める手法を提案した。次にレールの等価半径、等価高より線路直列インピーダンスを導出する近似式を導出している。次にラプラス演算子 s で表現された線路定数にPade近似を適用することで解析的にEMTP Semlyen線路モデルに必要な定数を導出し、本論文で示した回路モデルの精度はフィールド試験結果と良好に一致することを確認した。以上から、第8章と同様に、EMTPを提案レールモデルにより鉄道信号設備に生ずる高精度サージ解析に応用可能とした。

第10章では、電鉄用変電所の過渡接地インピーダンスの特性をフィールド試験結果および数値ラプラス変換により求めた。これより、過渡応答評価として広く使用されている最大電圧と最大電流の比で定義される時間領域の接地システムサージインピーダンスが波頭長の逆数で与えられる周波数における周波数領域インピーダンスとほぼ等しくなることを明らかとした。また、雷インパルスに対する有効な最大周波数は、概ね波頭長の逆数として与えられ、時間・周波数変換によって得られた接地インピーダンスを的確に評価できることを示している。また、測定時の量子化数を増大させることは、測定精度を高めるのみならず、より広範囲な周波数特性を知るために有用であるが、雷サージなどの高速な観測においては容易でない。よって、周波数帯域を広めるためには極力急峻な電流を注入して特性を測定することが望ましい。フィールド試験時に周波数領域インピーダンスを数値計算することは困難であるが、電圧・電流測定結果最大値の比で与えられるサージインピーダンスは、測定現場で過渡特性を把握するには有用であり、必ずしも周波数変換法を用いなくとも、インパルス電源に直列インダクタ、あるいは並列キャパシタ等を接続して波頭を緩慢にすることにより異なる波頭長を有する電源によりサージインピーダンスを求めれば、概ねその接地インピーダンス特性を知ることが可能となる。さらに、サージインピーダンスに電流最大値を乗じて雷サージ電圧を予測することがなされるが、異なる波頭長電流に対しては、必ずしも有益な手法ではない。前述の方法で誘導性接地インピーダンスであることが分かれば、波頭長に概ね反比例する電圧が発生することを推定できる。なお、標準雷インパルスなど一定の波形を用いても、サージインピーダンスの定義が複数存在するため、上記手法によってサージ電圧を予測する場合には注意を要する。例えば電圧の最大値とその時刻における電流の比で定義されたサージインピーダンスを用いると、誘導性インピーダンスの場合、電流が遅れることにより、最大電流で定義したサージインピーダンスと比して大なる値となる。これを混同して用いると過大なリスク評価となるので注意を要する。

第11章では、まず始めに電流源を用いて模擬雷電流を電鉄用変電所接地網に印加することによって接地系電位分布を測定した。これより、接地網の過渡電圧上昇は電流注入点から概ね5m以内で観測され、この範囲の変電所接地系を詳細に模擬する必要があることを明らかとした。次に、電鉄用変電所新設時など接地系の設計に必要な埋設地線の数値解析モデルを構築する手法を提案した。埋設地線の過渡特性を表現する理論モデリング法は十分に確立されておらず、実験によりその特性を把握する必要があったが、近年は3次元電圧電流分布特性を電磁界解析法により精度よくシミュレーション可能となっている。本章では、FDTD法を用いて埋設地線接地特性を求め、これより回路解析に用いる埋設地線モデルを構築した。提案法によれば、大地抵抗率などの条件が異なる際にも回路モデルを導出でき有用である。提案回路モデルは分布定数線路で表現され、その等価線路定数はFDTD法による計算結果から算出された埋設地線の電圧および注入電流波形を周波数領域に変換し、等価な特性アドミタンスと伝搬定数を周波数領域で得る。これから特性アドミタンスと進行波波形伝搬特性の単位関数応答を求め指数関数近似した結果をEMTPの有する再帰コンボリューション(Semlyen)線路モデルで表現する。このモデルは遠方

接地線など比較的長い埋設地線の特性を効率的に表現することができる。また、埋設地線上の多数点の電圧を求める必要がある場合には、先に求めた特性アドミタンスと伝搬定数から、線路直列インピーダンス、並列アドミタンスを求め、これより合成した π 型等価回路により埋設地線を表現すればよい。これにより、電鉄用変電所接地系の各点電圧、すなわち変電所各機器の接地電位上昇を求めることができる。いずれのモデルにおいても、ひとたびモデル定数を得た後は、計算時間を要する FDTD 解析は不要で、雷サージ電流波形など計算条件を変更する場合においては、高速な回路解析のみによって解を得ることができる。提案手法は、FDTD 解析を用いることによって、土中の 3 次元電流分布を考慮した EMTP 等による回路解析を可能にする。提案する等価回路導出と回路解析法は、電鉄用変電所における電力および信号設備の雷被害を含むサージ防護および設計において、有用な知見を与えると考えられる。

以上から、本研究成果を応用すれば、埋設地線を組み合わせた変電所接地網における過渡接地電圧上昇を推定し得る。さらに FDTD 法など電磁界解析のみでは解析が不可能であった大規模回路、あるいは変圧器など大型機器とケーブルなどの小型機器が混在する回路を回路解析法により計算を可能にした。この成果は電気鉄道電気設備の設計や過渡現象解析に極めて有用であり、電力系統などその他分野への応用可能である。