

学 位 論 文 題 名

UHV を主体とした電力系統の雷サージ解析に関する研究

学位論文内容の要旨

我国の電力系統は、都市部の電力需要の急速な伸びと遠方化に伴い系統規模が拡大し、送電線・変電所の高電圧化がされてきた。現在の最高使用電圧である 500kV 送電線は、昭和 48 年に送電が開始されて以来、拡充され、電力の基幹系統として良好に運転されている。次期上位送電線である UHV (1000kV) 系統は、将来さらに遠隔化する電源とますます巨大化する系統に対応するために導入されることが計画されている。これらの高電圧化に伴い、単純に設備を大きくするとコストが増大するため、送変電設備の合理的な絶縁設計が要求される。また、送変電設備に絶縁上のトラブルが発生した場合、この原因を解明する必要がある。このような要求に応じることがサージ解析の目的であり、特に大きな過電圧が生ずる雷サージ過電圧を正確に把握することは重要である。

サージ過電圧の解析には、近年 EMT P (ElectroMagnetic Power Transients Program) をはじめとするデジタル解析が用いられている。これにより、送変電設備の合理的な絶縁設計や絶縁上のトラブルの解明ができるようになったが、さらに高精度な解析を行うためには、鉄塔、送電線、変電機器など、電力系統の各部を精度良く模擬することが必要である。そこで、本研究では、UHV 系統を対象とした EMT P 解析のためのモデル化の精緻化、実系統で発生している雷現象のサージ解析による解明および新しいサージ解析手法について検討した。

本論文は、全 6 章からなっている。

第 1 章では、本研究の背景、関連技術の動向および本論文の構成について述べている。

第 2 章では、モデル化の精緻化として UHV 系統の雷サージ解析で重要な鉄塔モデルを構築するために、UHV 実鉄塔の雷サージ特性を測定し、これに基づく EMT P 解析のための鉄塔モデルについて検討した結果を述べている。これにより、各相のホーン間電圧、アーム電圧および電力線電圧を精度良く解析できる鉄塔モデルを構築できた。このモデルの検討にあたっては、ラプラス変換を用いて、測定結果から雷サージ解析に用いる標準波形 ($1/70 \mu s$ ランプ波電流) に対する応答波形を算出する手法の検討および実測における測定補助線の影響を検討し、鉄塔モデルの検討に反映させた。なお、この鉄塔モデルの研究成果は、UHV 変電機器の雷インパルス試験電圧を決めるための雷サージ解析に用いられている。

第 3 章では、実系統で発生している雷現象のサージ解析による解明として、近年、設備トラブルの起因となった UHV 設計送電線への直撃雷の雷撃現象についての検討結果を述べている。UHV 設計送電線に接続している変電所に侵入する雷サージの測定を主体とし

た雷観測を実施し、雷撃の様相の把握を行うとともに、観測結果に基づき E M T P による雷サージ解析による現象の再現を行った。この解析にあたっては、雷サージが 100km オーダーの長距離伝搬するために起こる分波現象を再現するための送電線模擬方法が重要となる。分波現象は、サージの線間波と対地波の速度差に起因する現象であり、線間波の速度はほぼ光速で一定であるが、対地波の速度は大地抵抗率および送電線の高さにより大きく影響する。そこで、大地抵抗率および送電線の高さによってどのような影響を受けるか検討し、実測波形に合うようなパラメータを選定した。本検討結果を踏まえ、UHV 設計送電線への直撃雷の代表ケースについてサージ解析を行い、侵入雷サージ波形および閃絡したケースでの塔脚電流波形の観測結果がほぼ再現できることが確認できた。この成果を基に、直撃雷の頻度・大きさなどを分析し、送変電設備の耐雷設計に反映している。

第 4 章では、近年、発電所周辺の送電線の雷撃が起因となり発生した変圧器の内部故障について、新しいサージ解析手法による検討結果を述べている。このトラブルは、変圧器に侵入したサージの振動成分の周波数が変圧器巻線の固有振動数と一致し、巻線内部に過電圧が発生して絶縁破壊に至ったと推定されるものである。このような現象の解明には、E M T P による雷サージ解析が有用であるが、定性的にどのような系統条件の時に発生するかを検討するには、送電線、GIS およびケーブルの設備長など多くのパラメータがあり、膨大な過電圧解析が必要となる。そこで、雷サージ解析を定性的に取り扱う一手法として定常解析を用いた手法を適用し、変圧器の振動性過電圧現象を検討した。その結果、変圧器高圧端子に特定周波数 f_0 成分のサージ電圧が大きくなる系統条件は、各回路要素の長さに依存しており、それぞれの基本長 ($=v/2f_0$, v : 回路の伝搬速度) をもつ周期関数となり、その組合せは多数存在することを明らかにした。本手法により解析結果は、E M T P による解析結果とほぼ一致することが確認でき、このような試行錯誤的な多数回の計算が必要なサージ解析に対し本手法が有用であることを明らかにした。

第 5 章では、アンテナや電磁波の解析に使用されている数値電磁界解析法を雷サージ解析に適用することに関しての検討結果を述べている。雷サージ解析では、E M T P をはじめとする回路シュミレータを使用することが多い。この方法で信頼できる解析結果を得るためには各種機器や線路などを適切な等価回路で表現する必要がある。複雑な構造や空間的に回路パラメータが変化する場合や周波数で特性が変化する場合には、等価回路やパラメータの選択が問題となる。また、その等価回路の評価方法として実験や測定結果との比較で行うことが多いが、測定上の制約条件等により評価が困難な場合もあった。本章で提案した解析法では、等価回路を求める必要はないので回路モデルの構築が難しい問題にも適用可能で、導体の空間的配置を入力することによって、電流、電圧、電界の時間特性を求めることが可能である。本解析による計算精度を検証するために、UHV 鉄塔での実測結果と比較した結果、概ね一致することが確認できた。このことにより、今後、E M T P 解析に用いるモデルの妥当性の評価などとして、本解析法が有用であることが示された。

第 6 章は結論である。本論文においては、UHV を主体とした電力系統の雷サージ解析として、E M T P 解析ためのモデルの精緻化および新しい雷サージ解析の手法についての検討結果を述べたが、これらの成果が、今後の電力系統のサージ解析の一助となることを期待する。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 長谷川 淳

副 査 教 授 酒 井 洋 輔

副 査 教 授 本 間 利 久

学 位 論 文 題 名

UHV を主体とした電力系統の雷サージ解析に関する研究

我国の電力系統は、都市部の電力需要の急速な伸びと遠方化に伴い系統規模が拡大し、送電線・変電所の高電圧化がなされてきた。現在の我が国の最高使用電圧は 500kV であるが、次期上位電圧として UHV (Ultra High Voltage、1000kV 級) の技術開発が進められるとともに、将来一段と遠隔化する電源と巨大化する系統に対応するためその導入が計画されている。高電圧化に伴い、単純に設備を大きくするとコストが増大するため、送変電設備の合理的な絶縁設計が要求される。また、送変電設備に絶縁上のトラブルが発生した場合、その原因を解明する必要がある。サージ解析はそのための基本的解析手法であり、特に大きな過電圧が生ずる雷サージ過電圧を正確に把握することは重要である。サージ過電圧の解析には、近年、EMTP (ElectroMagnetic Power Transients Program) をはじめとするデジタル解析が用いられている。これにより、送変電設備の合理的な絶縁設計や絶縁上のトラブルの解明ができるようになったが、さらに高精度な解析を行うためには、鉄塔、送電線、変電機器など、電力系統の各部を精度良く模擬することが必要である。

本論文は、このような UHV 系統を対象とした EMTP 解析のためのモデルの精緻化、実系統で発生した雷現象のサージ解析による解明および新しいサージ解析手法について、その研究をとりまとめたものであり、以下の特筆すべき新知見・成果を得ている。

第一に、モデル化の精緻化として UHV 系統の雷サージ解析で重要な鉄塔モデルを構築するため、UHV 実鉄塔の雷サージ特性を測定し、これに基づく EMTP 解析のための鉄塔モデルを構築している。この鉄塔モデルにより、各相のホーン間電圧、アーム電圧および電力線電圧を精度良く解析できることとなった。このモデルの構築に際しては、ラプラス変換を用いて測定結果から雷サージ解析に用いる標準波形 ($1/70 \mu s$ ランプ波電流) に対する応答波形を算出する手法および実測における測定補助線の影響を検討し、その結果をモデルに反映させている。この鉄塔モデルの研究成果は、UHV 変電機器の雷インパルス試験電圧を決めるための雷サージ解析に実際に用いられている。

第二に、UHV 設計送電線への直撃雷の雷撃現象という、複雑な要因の絡む物理現象に関して、その実観測結果の再現を EMTP によるサージ解析により試み、成功している。この解析にあたっては、雷サージが 100km オーダーの長距離を伝搬するために発生する分波現象を再現するための送電線模擬方法が重要となる。分波現象は、サージの線間波と

対地波の速度差に起因する現象であり、線間波の速度はほぼ光速で一定であるのに対し、対地波の速度は大地抵抗率および送電線の高さにより大きく影響される。そこで、大地抵抗率および送電線の高さによってどのような影響を受けるかを解明し、実測波形に合うようなパラメータの選定を行っている。この成果を基に、サージ解析によって、直撃雷の頻度や大きさなどを分析するとともに、これを送変電設備の耐雷設計に反映させている。

第三に、近年発電所周辺の送電線の雷撃が起因となり発生した変圧器の内部故障について、新しいサージ解析手法として定常解析を用いた手法を適用し、変圧器の振動性過電圧現象を解明している。このトラブルは、変圧器に侵入したサージの振動成分の周波数が、変圧器巻線の固有振動数と一致し、巻線内部に過電圧が発生して絶縁破壊に至ったと推定されるものである。この現象は、関連するパラメータが多く、膨大な過電圧解析を必要とする。新しいサージ解析手法は、この点を克服すべく開発されたものである。この解析の結果、変圧器高圧端子に特定周波数成分のサージ電圧が大きくなる系統条件が各回路要素の長さに依存していること、それぞれの基本長をもつ周期関数となること、またその組合せは多数存在することを明らかにしている。

第四に、アンテナや電磁波の解析に使用されている数値電磁界解析法を雷サージ解析に適用することの有効性を検討し、今後、EMTP 解析に用いるモデルの妥当性の評価などに対して有効に活用できることを明らかにしている。EMTP をはじめとする雷サージ解析では、信頼できる解析結果を得るために各種機器や線路などを適切な等価回路で表現する必要があるが、複雑な構造やパラメータが空間的ないしは周波数により変化する場合には、等価回路やパラメータの選択が問題となる。また、等価回路の評価として実験や測定結果との比較を用いることが多いが、測定上の制約条件等により評価が困難な場合もあった。一方、数値電磁界解析法は、計算負担は大きいものの、回路モデルの構築が難しい問題にも適用可能であり、導体の空間的配置を入力することによって、電流、電圧、電界の時間特性を求めることが可能である。本論文では、各々の特徴を活かした解析手法の適用分担の可能性が明らかにされている。

これを要するに、著者は、UHV を主体とした電力系統の雷サージ解析として、EMTP 解析ためのモデルの精緻化、それに基づくサージ過電圧現象の解明および新しい雷サージ解析の手法について多くの新知見を得たものであり、電力工学、高電圧工学に対して貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。