

博士学位論文審査要旨

2010年1月12日

論文題目： UHV 系統における雷パラメータ評価と耐雷設計合理化に関する研究

学位申請者： 高見 潤

審査委員：

主 査： 工学研究科 教授 雨谷 昭弘

副 査： 生命医科学研究科 教授 長岡 直人

副 査： 湘南工科大学 教授 関岡 昇三

要 旨：

本論文は 500kV および 1100kV(UHV)系統における雷撃電流波形の実測を行い、その統計的処理および数値シミュレーションにより絶縁設計に必要な各種パラメータを明らかにし、絶縁設計合理化の可能性を示している。更に、従来、ほとんど検討されていなかった電力線への直撃雷による発生過電圧の特性も明らかにしている。

第1章では、研究の概略について述べている。

第2章では、雷撃電流波形の実測について述べている。1994年～2000年の間に電流値が100kA以上(最大値130.2kA)となる3波形を含め120波形を観測している。その統計的波高値分布は先人による実測結果とほぼ同様で、累積頻度50%値は電流波高値29.3kA、波頭長4.8 μ sであった。この実測結果から、波高値と波頭長の相関は小さいこと、および波高値と波頭長峻度には正の強い相関性があることを明らかにしている。この事実に基づき、最大峻度と等価となる波頭長を与えることで、波高値が大となるに伴い波頭長も大となる関係の定式化に成功している。

第3章では、前章の結果に基づき雷撃電流高波値と波頭長の相関を考慮して雷撃電流波形を規格化する手法を提案している。この手法は、従来世界各国で採用されているCIGRE(国際大電力技術会議)手法と比べ実際の雷撃電流特性をより適切に表現し得るものである。我が国の絶縁設計規格において雷電流波形の波頭長は電圧階級に無関係に1 μ sと規定されているが、この手法によれば、実際には500kV系統で1.3 μ s、1000kV級(UHV)系統で1.7 μ s程度となることを示している。

第4章では、前章の結果に従い、雷撃電流波頭長を1.0 μ s～1.7 μ sの範囲で変化させた場合のUHV発変電機器に発生する過電圧の特徴について汎用回路解析プログラムEMTPによるシミュレーション結果に基づき検討し、次の結果を得ている。(1)ガス絶縁機器(GIS)では波頭長に反比例して雷サージ過電圧は小となる傾向にある。(2)変圧器では波頭長の影響は小さい。(3)雷インパルス試験圧は現行の波頭長1 μ sに対するGIS2250kV、変圧器1950kVを、波頭長1.7 μ sとすると、GIS1800kV、変圧器1675kV迄低減できる可能性がある。

第5章では電力線への直撃雷の実測データ79件に基づき検討を行い、累積発生頻度50%雷撃電流値は17.4kAであることを見出ししている。また、逆フラッシュオーバ解析時の想定雷撃電流条件と発生確率が同程度となる直撃雷電流を試算し、500kV系統では28kA、UHV系統では36kAとなることを示している。

第6章では電力線直撃雷による発生過電圧について検討し、特に変圧器では逆フラッシュオーバによる過電圧より大きな過電圧が発生することを明らかにし、直撃雷過電圧についても耐雷設計に考慮する必要があることを述べている。

第7章では研究成果のまとめを行っている。

本研究成果は著者の IEEE Transactions 論文が 2007 年からのわずか 3 年間で 14 件に達していることから明らかなように世界各国から注目されている。更に、2009 年 5 月に承認された UHV 系統絶縁設計国際規格への日本側提案規格の背景となる研究でもある。

以上より、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る。

学力確認結果の要旨

2010年1月12日

論文題目： UHV 系統における雷パラメータ評価と耐雷設計合理化に関する研究

学位申請者： 高見 潤

審査委員：

主 査： 工学研究科 教授 雨谷 昭弘

副 査： 生命医科学研究科 教授 長岡 直人

副 査： 湘南工科大学 教授 関岡 昇三

要 旨：

本論文提出者は、1997年3月同志社大学大学院工学研究科博士前期課程を修了後、直ちに東京電力株式会社に入社、開発研究所電力技術研究所 雷・絶縁グループ副長の職にあつて、研究を続けている。

本論文の主たる内容は、IEEE Transactions に10編、掲載決定論文4編、電気学会論文誌に4編が掲載され、すでに十分な評価を得ている。

2009年12月26日午後、約2時間にわたり提出論文に関する学術講演会（博士論文公聴会）が開かれ、種々の質疑討論が行われたが、提出者の的確なる説明により十分な理解が得られた。さらに、講演会終了後、審査委員により論文に関連した諸問題、および電気工学の基礎並びに応用分野に関連した諸問題につき口頭諮問を行った。また、ドイツ語は本学在学中に既に単位を取得しており、英語に関しては提出者が英文論文や国際会議において発表、討論してきたことをもとにして口頭諮問を実施した結果、いずれにおいても十分な学力を有することが確認された。

以上より、本論文提出者は専門および語学ともに十分な学力を有すると認める。

博士學位論文要旨

論文題目： UHV 系統における雷パラメータ評価と耐雷設計合理化に関する研究
氏名： 高見 潤

要 旨：

最近の電力系統では、グローバル化および高度情報化の潮流の中で規制緩和や電力自由化、環境適応、高信頼度など質的な変革が求められ、電気絶縁面での信頼度維持とコスト低減を指向した絶縁設計の合理化がますます重視されている。特に、耐雷設計は機器の絶縁仕様を決定する支配的要因となっており更なる合理化のニーズが高い。

送変電設備の耐雷設計については、高性能避雷器の開発や EMTP を代表とする過電圧解析技術の向上によって合理化が進められたが、大きな課題として耐雷設計の基本的条件の一つである想定雷撃電流波形の再評価が挙げられる。雷撃電流波形は絶縁協調上で信頼度（事故率）と経済性の協調を図る上で最も重要なパラメータであり、特に波高値、波頭長、波頭峻度など雷撃電流波頭部のパラメータは雷過電圧に大きく影響する。耐雷設計では送電電圧の高圧化に伴って想定している雷撃電流波高値も大きくなっており、日本においては 500kV 系統では 150kA、東京電力で導入が計画されている UHV 系統では 200kA である。しかしながら、想定波形については大電流の雷撃データがほとんどないために現状では十分な検討が行えず、下位系統と同じ波頭長 1 μ s のランプ波(1/70 μ s)が採用されている。また、UHV 設計送電線は従来の送電線よりも鉄塔高が高く相間距離も大きいため電力線への直撃雷の様相把握も課題となるが、直撃雷様相についても実測データが希少で、その実態は未だ知られていない。

そこで本論文では、UHV 設計送電線を含む 500kV 送電線において鉄塔および電力線への雷撃電流波形を観測し、工学的な観点から送電鉄塔雷撃および電力線直撃雷の雷パラメータを評価することによってその特性を明らかにした。さらに、観測データを統計的に分析することによって UHV 機器の絶縁設計を主対象とした合理的な想定雷撃電流波形を提案している。鉄塔への想定雷撃電流波形には波高値と波頭長の相関を考慮した統計的雷撃電流波形を評価し、電力線への想定直撃雷電流には鉄塔への想定雷撃電流値と発生頻度が同等となる波高値を算出した。また、逆フラッシュオーバー時および電力線への直撃雷時に UHV 変電所に発生する雷過電圧の特性を検討し、耐雷設計合理化の可能性についても示した。

本論文は 7 章から成り、1 章が序論、2 章から 6 章が本論、7 章が結論である。

第 2 章では鉄塔への雷撃電流波形観測結果および波形パラメータの統計分析結果について述べている。1994 年から 2004 年間に、波高値が 100kA 以上となる雷撃電流波形を 3 件を含む 120 波形データを取得した。波高値分布は過去の観測結果とほぼ同様となり、累積頻度 50%値は 29.3kA であった。今回観測された中で最大電流値は 130.2kA であった。波頭長については累積頻度 50%値が 4.8 μ s で過去の結果と同程度であるが、今回の観測では分布のばらつきは小さかった。波形パラメータの相関では、波高値と波頭長の相関は弱く、波高値と波頭峻度には正の強い相関が見られた。波頭長には緩やかな立ち上がり部分の時間が大きく影響しており、波頭峻度や波高値とはほぼ独立関係にあると考えられる。そこで、最大峻度と等価となる波頭長を定義して、波高値が大きくなるに伴い波頭長が長くなる関係を定式化した。

第 3 章では雷撃電流波形の観測データを基に雷電流波高値と波頭長の相関を考慮して雷撃電流波形を規格化する手法を提案した。波高値が大きくなるほど波頭長が長くなる特性が反映されて

いる。統計的雷撃電流波形について各種統計手法を用いて検定した結果、波高値のみで規格化した CIGRE 手法に比べて提案手法は雷撃電流の特性を適切に評価した手法であることを確認した。日本の耐雷設計条件で使用される雷撃電流波形を例にとり、合理的な波形について検討した。現行の雷撃波形波頭長は CIGRE 5% 波形の最大峻度に等価であり、全ての電圧階級で波頭長 1.0 μs に設定されている。これに対し、提案手法による 5% 統計的雷撃電流波形によって評価すると、UHV 系統では波頭長 1.7 μs 程度、500kV 系統では 1.3 μs 程度まで大きくできることを示した。

第 4 章では想定雷撃電流波頭長を変化させた場合に UHV 変電機器に発生する過電圧の特徴を詳細に検討した。雷撃電流波頭長を変化させて GIS、外鉄形変圧器および内鉄形変圧器に発生する過電圧を求めた結果、GIS では最大電圧は立ち上がり部スパイク状波形に現れ、総じて波頭長が長いほど雷サージ過電圧は小さくなった。一方、変圧器は GIS に比べて発生過電圧の雷撃電流波頭長依存性は小さいことが明らかとなった。また、変圧器における最大電圧発生メカニズムを検討し、変圧器キャパシタンスが 0~1000pF 程度の範囲ではキャパシタンスが等価的に避雷器との距離を増加する方向に作用して変圧器過電圧が上昇する現象を具体的に説明した。さらに、想定雷撃電流波頭長を従来の 1.0 μs から 1.7 μs に見直すことによる、試験電圧低減の可能性について試算した。GIS については絶対評価では雷インパルス試験電圧を現行の 2250kV から 1800kV までの範囲で低減できる可能性が示された。比較的、回路構成の影響が小さいと思われる相対評価においても、1950kV までの範囲で低減できる可能性が明らかになった。変圧器の絶対評価では LIWV を 1675kV までの範囲で低減できる可能性がある。相対評価では LIWV 低減の可能性は小さい。

第 5 章では大型送電線電力線への直撃雷観測データ 79 件を分析し、直撃雷様相を明らかにした。直撃雷電流波高値は鉄塔雷撃電流に比べて小さく、累積発生頻度 50% 値を比較すると鉄塔雷撃電流が 29.3kA であるのに対し直撃雷電流は 14.7kA であった。遮蔽失敗は小電流雷撃に対して多く発生しており、従来の遮へい理論と定性的に一致している。直撃雷と雷撃時の電力線交流電圧位相は、互いに逆極性となる関係が約 3/4 を占めている。また、直撃雷が発生した電力相は上相が最も多く、次いで中相・下相の順になっており、従来の遮蔽モデルとは異なる様相が明らかとなった。また、逆フラッシュオーバ過電圧解析での想定雷撃電流と発生確率が同程度となる想定直撃雷電流を試算した結果、UHV 系統に関しては 36kA、500kV 系統では 28kA となった。

第 6 章では電力線への直撃雷によって GIS および変圧器一次端子に発生する過電圧の特徴を検討した。継続時間が長い直撃雷の場合、GIS では引込み線の両端に設置された避雷器によって引込み線の両端の過電圧が抑制され、引込み線中間点に最大過電圧が発生することが明らかとなった。一方で、継続時間が短く波頭部が急峻となる逆フラッシュオーバの場合には、避雷器の急峻波特性により遮断器端に最大過電圧が発生する。変圧器では、避雷器の急峻波特性と変圧器の有するキャパシタンスの作用により最大過電圧が発生する。内鉄型変圧器と外鉄型変圧器ではそれぞれの要因が影響する程度が異なり、外鉄型変圧器に発生する過電圧に対してはキャパシタンスの影響が大きい。

耐雷設計に関しては、GIS では従来どおり逆フラッシュオーバ過電圧をベースとすることが適当と考えられるが、変圧器では直撃雷時に最大電圧が発生するため直撃雷過電圧の詳細な検討が必要であることを示した。

本研究成果が UHV 系統のみならず今後の電力系統の耐雷設計にとって有益な知見となり、さらなる合理化に資することが期待される。