

論文の内容の要旨

論文題目：送電用避雷装置を考慮した雷事故率および瞬時
電圧低下発生回数の推定に関する研究

氏 名：川村 裕直

1980年代後半に、送電線への避雷器の適用技術が開発され、フィールド試験および軽責務化への取り組みを経て、現在では、送電線耐雷設計の不可欠な要素として、送電用避雷装置が標準的に用いられている。さらに、当初、ルート遮断事故の防止対策として適用されていた送電用避雷装置は、一部では、瞬低影響を軽減させる電力設備側の対策の1つとして活用され始めている。

本論文では、冬季雷に関する最新の知見を取り込みながら、送電線雷事故率の予測精度の向上および瞬低発生回数の推定精度の評価を行った。提案した送電線雷事故率の予測計算手法は、従来手法の課題であった雷撃頻度の推定精度を向上させた実用的な手法であり、実際の送電線耐雷設計に十分活用できる内容である。また、避雷装置による瞬低影響の軽減対策は、次世代を見据えた電力設備の構築において、重要となる内容である。

第2章では、送電線が事故に至る最小雷撃電流波高値とその電流波高値以上の雷撃電流の発生確率（事故に至る雷撃電流の発生確率）を避雷装置の設置形態別に示し、事故実績を利用する実用的な送電線雷事故率の推定手法を提案した。提案した手法を用いて、推定した雷事故率を平均値で評価すると、66・77kV送電線では、夏期は実績より40%程度小さく、冬期は実績とほぼ同等で、通年で

は、20%程度小さく計算された。一方、275kV送電線では、夏期は実績とほぼ同等で、冬期は35%程度小さく、通年では30%程度小さく計算された。提案する雷事故率の推定手法は、通年で評価すれば、約30%の差であることから、雷害対策による雷事故率の低減効果を概ね事前に把握できると評価している。

避雷装置の適用効果をシミュレーションで計算した結果、66・77kV送電線では、冬期の推定値は実績値と概ね同等な値を示しており、夏期は3線設置および5線設置ともに避雷装置による雷事故率の低減効果が、推定値で15%程度大きく計算された。一方、275kV送電線では、不平衡絶縁方式の夏期を除いて、避雷装置による雷事故率の低減効果が、推定値では10～20%程度大きく計算された。

また、送電線雷事故率の推定手法を利用して、66・77kV送電線の雷撃頻度を推定した。その結果、沿岸部の送電線は、冬期の雷活動が活発な日本海沿岸部に建設されていることから、内陸部に位置する送電線よりも、冬期の雷撃頻度が高い特徴が見られた。また、夏期の推定雷撃頻度は、冬期ほどばらついておらず、比較的地域差が小さい傾向がある。さらに、送電線雷撃率を推定雷撃頻度と送電線周囲のLLS標定数を用いて計算した結果、夏期は平均で約7.2%と推定されたが、冬期は約11.8%で夏期の約1.6倍であった。冬期と比べて、夏期の送電線雷撃頻度は低く見積もられるが、雷活動は活発であり、送電線雷撃時には急峻な波頭峻度の影響により、高い確率で事故を引き起こしている可能性がある。

第3章では、超高圧送電線の事故様相について調査した。夏期は雷活動が活発で雷撃頻度は高いが小電流雷が多く、送電線雷撃であっても事故に至らないケースが多く、事故実績が少なくなる傾向がある。一方、冬期は夏期と比べて雷撃頻度は低い、大電流雷の発生頻度ならびに送電線への雷撃率が高く、事故が多くなる傾向がある。超高圧送電線の事故様相を決定する主要な要素は、商用電圧の位相であり、また、冬期に275kV送電線の雷事故が増加する原因の1つとして、冬期の雷撃の大半が鉄塔塔頂であり、架空地線雷撃であっても雷撃点の約80%は径間長に対して鉄塔寄り15%以下の位置と鉄塔付近であることが挙げられる。

シミュレーションにより、不平衡絶縁方式および平衡高絶縁方式の超高圧送電線の冬期における事故様相の再現性を評価した結果、フラッシュオーバー電圧のバラツキを考慮することでほとんどの事故様相の再現が可能であった。超高圧送電線の事故箇所のシミュレーションにおいては、緩波頭長を採用することで、中線および下線の地絡件数の比率が相対的に増加し、塔頂雷撃であっても中線事故の多い実績値に近づくことを確認した。これは、実際の雷撃電流の波頭長が、送電線耐雷設計の過酷条件として一般的に用いられている波頭長 $2\mu\text{s}$ よりも緩やかな雷撃が多いことを示唆している。

次に、シミュレーションを用いて、送電用避雷装置の破損事故を解析した。雷撃電流波高値が大きくなるにつれて、避雷装置の処理エネルギーの増加率が高くなる。これは、避雷装置の電圧・電流特性の非線形性によって、避雷装置の等価的な抵抗が小さくなり、多くの雷撃電流が流れて、一段と避雷装置が破損しやすくなる傾向を示している。77kV 2回線送電線の解析において、送電用避雷装置が破損に至る最小雷撃電流波高値は、3線設置と比べて、5線設置では約75%減、6線設置では約50%減となり、その最小雷撃電流波高値は、標準型と比べて、軽責務型は約70%減となることを確認した。また、冬期の雷撃による軽責務型避雷装置の破損率については、5線設置は3線設置と比べて約2.2倍、6線設置は3線設置に比べて約6.0倍であり、標準型避雷装置の破損率については、5線設

置は3線設置に比べて約2.7倍、6線設置は3線設置に比べて約8.8倍であることを確認した。冬期の軽責務型避雷装置の破損率は、標準型のおよそ1.7倍から2.5倍であった。

77kV 1回線送電線の避雷装置の破損において、軽責務型避雷装置が破損に至る雷撃の発生確率は、標準型と比べて、夏期は約4倍、冬期は約2倍に高くなることを確認した。2回線送電線の片回線3線設置と比べると、冬期の雷撃における1回線送電線の全3線設置の破損率は、軽責務型で約9倍、標準型で約11倍に高くなる。全3線設置の破損率は、2線設置と比べて、夏期は約4倍、冬期は約3倍に高くなる。

さらに、66・77kV送電線で発生した避雷装置破損事故2例について、記録された雷放電の電磁界波形を利用して、シミュレーションによる事故様相の再現性を評価した。その結果、記録された雷放電の電磁界波形に利用することで、概ね事故様相の再現が可能であることを確認した。

第4章では、送電用避雷装置による瞬低影響の軽減対策として、単一鉄塔における送電用避雷装置の最適な設置形態について、シミュレーションを用いて検討した。

66・77kV送電線における避雷装置の両回線5線設置では、下線を省略した場合の事故に至る最小雷撃電流値および避雷装置が破損に至る最小雷撃電流値が最も大きくなり、事故率の低減および避雷装置の破損事故を低減する効果的な方法と評価できる。処理エネルギーは、下方に位置する避雷装置の方が大きくなる傾向があり、6線設置では、各回線下線の避雷装置の処理エネルギーが大きく、両回線の避雷装置が同時に破損に至る可能性がある。これは、66・77kV送電線がルート遮断事故に至る事故様相を示しており、避雷装置の6線設置は5線設置より供給信頼度の低い設備形態と評価できる。6線設置と比べると、5線設置された送電線は多相事故に至る最小雷撃電流波高値が大きく、電力系統に瞬低を引き起こす事故様相に至りにくい。解析結果に基づくと、66kV送電線へ避雷装置を適用した場合には、避雷装置が設置されていない送電線を避雷装置の3線設置とすることで、多相事故に至る雷撃電流の発生確率は、夏期では約 $3/5(4.43\%/7.10\%)$ 、冬期では約 $3/4(13.38\%/17.86\%)$ に低下すると評価できる。また、5線設置とすることで、多相事故に至る雷撃電流の発生確率は、夏期では約 $1/200(0.04\%/7.10\%)$ 、冬期では約 $1/10(1.61\%/17.86\%)$ となり、当該送電線の多相事故によって引き起こされる電力系統の瞬低発生回数の大幅な低減が期待できる。

275kV送電線では、避雷装置の設置数を増加させても、地絡事故を引き起こす大電流雷の発生頻度が低いため、地絡事故の低減効果は小さく、限界効用が低減する。また、6線設置における避雷装置が破損に至る最小雷撃電流値は、500kA以上と大きな値であり、鉄塔頂雷撃によって275kV送電用避雷装置の破損は、ほぼ起こらない事象と評価できる。電気幾何学モデルおよび冬季雷放電路のカメラ観測に基づくと、電力線への直撃雷による275kV送電用避雷装置の破損事故は、ほとんど起こり得ない事象と評価できる。

次に、電力系統の瞬低発生回数の推定手法を提案し、同一バンク下の66・77kV送電線で構成される電力系統の瞬低発生回数を推定し、実績値との比較を行った。提案する手法により、275kV以上の送電線事故においては、瞬低の影響を受ける需要家件数は低電圧階級に比べて遥かに多くなり、瞬低影響度も大きくなるが、避雷装置が高価であることから、瞬低影響の軽減対策としてのコストパフォーマンスは66・77kV送電線と比べて低くなることを確認した。同一バンク下の8つの66・77kV電力系統の瞬低発生回数の推定結果では、瞬低発生回数の推定値と換算後の実績値を通年で比較すると、避雷装置が設置されていない形態の瞬低発生回数は、電力系統全体で約20%の差であった。一

方、一部の送電線に避雷装置が設置されている形態の瞬低発生回数は、電力系統全体で約7%の差であった。今回提案した瞬低発生回数の推定手法を電力系統別・季節別に評価した結果、多少の差が見られるが、2007年度末の設備形態における予測精度を、季節を問わず、全般的に評価すると、10%以内の差であることから実用性があると評価している。電力系統によって異なるが、避雷装置設置によって瞬低発生回数が通年で50~90%程度減少している。また、推定値においても同程度の瞬低発生回数の低減効果が確認できる。

以上のように、本論文では冬季雷に関する最新の知見を取り込みながら、送電線雷事故率の予測精度の向上および瞬低発生回数の推定精度の評価に取り組んだ。提案した送電線雷事故率の予測計算手法は、理論を組み合わせた従来手法の課題であった雷撃頻度の推定精度を向上させた実用的な手法であり、実際の送電線耐雷設計に十分活用できる内容である。また、送電用避雷装置による瞬低影響の軽減対策は、今後、ますます重要度が増すと予想される内容である。本研究の成果が、送電線耐雷設計に広く活用され、次世代の電力設備の構築に役立てられることを期待する。