

博士論文（要約）

真空遮断器中の 絶縁破壊現象とアーク放電現象

令和2年12月1日提出

指導教員 熊田 亜紀子 教授

東京大学大学院工学系研究科

電気系工学専攻

37-187058

江尻 開

論文の内容の要旨

論文題目 真空遮断器中の絶縁破壊現象とアーク放電現象

氏名 江尻 開

真空は絶縁耐力や消弧能力に優れた材料である。真空のもつ優れた特徴を活用した電力機器に真空遮断器がある。シンプルな構造で大量生産が可能であり、環境適合性が良くメンテナンスフリーであるなど種々の利点がある。そのため、中電圧階級においては70%以上のシェアを占めている。真空遮断器の高性能化や高信頼化を達成し、超高压階級や超々高压階級への導入、そして直流遮断への展開と、その適応範囲を拡大するためには、真空遮断器中で生じる絶縁破壊現象やアーク放電現象の物理を明らかにする必要がある。

本研究は、真空遮断器中で生じる絶縁破壊現象とアーク放電現象の物理を解明し、絶縁破壊の発生様相や予防方法、アーク放電の基礎特性や電流遮断後の絶縁回復特性を明らかにすることを通じて、真空遮断器の高性能化や高信頼化と適応範囲の拡大に資することを目的とする。そのために、実験及びシミュレーションの両面から、電極からの微小粒子の発生やギャップ間での挙動、微小粒子に起因する絶縁破壊の進展メカニズムの解明を試みるとともに、製造時に混入する可能性のある微小粒子を除去する手法を提案した。また、アーク放電中に発生するプラズマの励起温度を手がかりとして、電子密度や電子温度等の重要なプラズマパラメータを推定するとともに電極材料に関する依存性の解明を試みた。加えて、真空遮断器を利用した逆電流重畳型の直流遮断器が直流電力網に導入された場合を想定し、事故電流のゼロ点後に電極間に印加される過渡回復電圧の解析式を導いた。更に、直流遮断後に電圧を印加することで残留プラズマ密度や耐電圧回復の経時変化を測定し、直流遮断後に発生し得る絶縁破壊現象の解明を試みた。

絶縁破壊現象においては、真空遮断器の電極間に存在する微小粒子に起因する破壊の物理と対策に主眼を置いた。

まず、微小粒子起因の絶縁破壊現象の物理を明らかにするため、電極間に意図的に微小粒子を注入した。直流電圧を印加した場合の微小粒子の挙動や絶縁破壊特性を実験的に観測し、微小粒子起因の絶縁破壊現象の発生要因について検討を行った。その結果、電極間の微小粒子挙動は3つのパターンに分類できることが明らかになり、微小粒子起因の絶縁破壊現象は6つのパターンに分類することができた。微小粒子径の変化に伴う絶縁破壊の発生頻度分布を計測した結果、径の大きな微小粒子や電極に付着する微小粒子が特に絶縁を脅かす可能性があるため危険であると示唆された。

また、電流遮断時に生じるアーク放電による微小粒子の生成やその挙動を観測し、回復電圧の印加時に電極間を往復運動する微小粒子の有無や、遅れ絶縁破壊現象の発生について電極材料による依存性を解明した。特に銀タングステンカーバイド電極では、回復電圧が印加された際に微小粒子が電極から放出され複数回の遅れ絶縁破壊を誘引する恐れがあることを指摘し、事故電流の遮断により微小粒子が放出される機構を推定した。これらの実験結果では微小粒子が電極に接触したのと同期して絶縁破壊が発生し、微小粒子と電極の間で発光を伴うことが多かった。微小粒子は絶縁破壊前後で形状や大きさが変化せず、また飛行中の蒸発も観測されなかったことから、これまで広く知られていた微小粒子起因の絶縁破壊のモデルを修正する必要がある。

次に、微小粒子起因の絶縁破壊現象のうち、帯電した微小粒子がカソードに衝突する際に生じる絶縁破壊現象をシミュレートした。粒子の接近に伴い、電極と微小粒子の間の電界が強まり、電界電子放出が生じる。この際、ジュール加熱により電極に存在する微小突起が加熱されると考えられる。この様相を有限要素法によりシミュレートし、絶縁破壊の直接的な原因となる微小突起の温度上昇と微小粒子の速度や半径といった性状の関係を解明した。

製造過程で簡便に実現可能な対策も提案した。電圧印加中の真空ギャップ中の微小粒子挙動をシミュレーションにより解析し、合わせて電極間の微小粒子数が減少する過程を実験により観測することで計算の妥当性を担保した。これにより、製造時に残された除去可能な微小粒子を効果的かつ確実に除去する印加電圧波形、電圧印加時間、ギャップ長などの条件を明らかにした。

真空中で発生する絶縁破壊の進展は極めて短時間に進展することから観測が困難であり、微小粒子に起因する絶縁破壊も微小粒子に起因しない絶縁破壊も進展の物理には未解明な部分が多い。そこで、Particle-In-Cell法とDirect-Simulation-Monte-Carlo法に基づき、荷電粒子と中性粒子の挙動や、衝突による電離と電界の変動を統合的にシミュレートした。これにより、絶縁破壊の進展様相だけでなく破壊の発生の有無を決定する重要なパラメータについても明らかにした。更に、ギャップ間に存在する中性粒子の線積分密度から絶縁破壊電圧のギャップ長依存性を導くことができた。

真空アーク放電の特性解明においては、高い拡散能力を持つ真空遮断器の適応が期待され

る直流遮断環境下で生じる現象の解明に主眼を置いた。

まず、直流遮断を模擬した電流波形下で点弧する真空アークを四分岐の多結像光学系と高速度ビデオカメラを用いて高時間分解能かつ高空間分解能で測定し、中性粒子の励起温度の経時変化と電極材料依存性を求めた。真空遮断器の電極材料としてよく使用される銅電極や銅クロム電極では、クロムの配合比率により逆電流重畳型直流遮断の速い立ち下がり電流下での励起温度変化の傾向が異なることを明らかにし、その原因がプラズマ中の中性粒子やイオンの密度の差異にあると推定した。

合わせて衝突輻射モデルに基づくプラズマ中の励起準位間の遷移シミュレーションを行い、分光測定に基づくスペクトルの実測値と計算により得られるスペクトルの比較から、プラズマの電子温度と電子密度を推定した。この電子密度と電子温度にも励起温度と同様に電極材料依存性が存在した。励起温度や電子密度、電子温度の測定および推定の結果からは電極間プラズマの導電率や電子の移動度など他のプラズマパラメータの電極材料依存性も推定できる。蒸着物質の EDX 解析や高速度ビデオカメラによるカソードスポット数の観測など種々の方法から多角的に比較し、プラズマパラメータの電極材料依存性が一つのカソードスポットが流し得る電流値に由来していることを見出した。

直流遮断においては、電流ゼロ点から数 μs から百 μs 程度の短時間で負極性と正極性の過渡回復電圧がピークに至ると考えられているが、その解析式は明らかにされていない。そこで、直流遮断器を単純化した回路方程式に落とし込むことで解析式を導くとともに、電流ゼロ点後に電極間に残留するプラズマによる抵抗成分を計算に導入することで文献に示された過渡回復電圧の実測波形と良く一致することを明らかにした。逆電流重畳方式に基づく直流遮断器では、交流遮断器よりも遥かに大きな電流変化率で電流ピークから電流ゼロまで遷移するため残留するプラズマの密度も大きくなる。従って、電流のゼロ点後に残留するプラズマの特性を把握することが直流遮断器開発には極めて重要であることが示唆された。

さらに、直流遮断を模擬した立ち下がりの速い電流波形の電流ゼロ点後に負極性および正極性の電圧を印加し、耐電圧回復特性の極性やギャップ長による依存性を測定した。実験を行った条件の範囲では正極性の電圧に対する耐電圧の回復は負極性よりも長い時間を要し、観測される電流波形にも明確な極性差があった。有限要素法シミュレーションから正極性の耐電圧回復を妨げる物理を見出し、直流遮断器の遮断部周囲の回路設計の指針を与えた。加えて、過渡回復電圧の解析式で残留プラズマ密度が重要であることが示唆されたため、電圧の印加に伴い流れるポストアークカレントの数値計算を実施した。観測された波形と数値計算から算出される波形は良く一致し、この結果から残留プラズマの密度とその経時変化を推定した。

以上のように、本研究では真空遮断器の適応範囲の拡大に向けて、微小粒子に起因する絶縁破壊の発生様相や逆電流重畳法に基づく直流遮断波形下でのアーク放電の基礎特性、電流ゼロ点前後の消弧過程を、実験やシミュレーション、回路解析など多角的な観点から迫った。