

主論文の要約

論文題目 **Design study on motion characteristics and interrupter unit to improve interrupting performance for high-voltage SF₆ circuit breaker**
(高電圧 SF₆ 遮断器における遮断性能向上のための動作特性および消弧室の設計研究)

氏名 寺田 将直

論文内容の要約

電気は現代の社会経済に不可欠なエネルギー形態であり、最終エネルギー総消費量に占める電力の割合は今後ますます増加する見込みである。送電・配電（T&D）インフラは、電力システムの中軸であり、発電所から最終需要家へ電力を供給する。電力システムの主な目的は電力を供給することであるが、事故や故障が発生した際に素早く回路を切り替えるという重要な役割も担っている。この役割を担っているのが、T&D インフラの要である SF₆ 遮断器である。

SF₆ 遮断器に要求される最も厳しい 3 つの遮断責務は、端子短絡故障（BTF）遮断、短絡線故障（SLF）遮断、および充電電流遮断（CCS）である。BTF と SLF は電力システムの短絡に起因するものであり、接触子間に大電流アークが点弧される。大電流アークを遮断する際には、交流電流のゼロ点で完全にアークを消滅させ導電性ガスから絶縁性ガスへ転換させる熱的遮断と絶縁破壊を生じさせない誘電的遮断の 2 つのフェーズが必要である。電流ゼロ点後に接触子間に印加される電圧の立ち上がり速度の違いにより、SLF は熱的遮断性能がクリティカルとなり、BTF は誘電的遮断性能がクリティカルとなる。CCS は無負荷送電線などに流れる小さな充電電流を遮断するものであり、接触子開離直後に電流遮断され電圧が印加される。この電圧に耐える誘電的遮断性能が求められる。

SF₆ 遮断器はこれらの 3 つの責務をクリアするために適切に設計される必要がある。その

際、導入コスト低減や環境負荷の大きい SF₆ 削減のためのコンパクト化へのニーズに対応することが求められる。SF₆遮断器をコンパクト化するためには、操作エネルギーの低減と SF₆遮断器を収めるタンクの小型化が必要である。

本論文は、操作エネルギーの低減とタンクの小型化を目的とした SF₆ 遮断器開発に寄与するものである。操作エネルギーを低減するための双方向駆動機構と自力消弧式消弧室、及びタンクを小型化するためのクローズド排気構造の設計法開発を目的としている。

第 1 章では、研究の背景、目的、および研究方針を述べている。

第 2 章では、充電電流遮断性能と低操作エネルギーを両立させた動作特性と機構の最適化について述べている。対向する 2 つの接触子を互いに逆方向に駆動する双方向駆動機構適用により、駆動源である操作器に連結される可動部の最大変位量が短くなるため、操作エネルギーが低減できる。低操作エネルギーで CCS 性能を向上させるためには、操作器に連結される接触子とは反対側の接触子を CCS 遮断期間中に素早く動作させる必要がある。ここで、互いに交差する 2 つの溝付きカムで構成される新たな双方向駆動機構を提案した。両溝付きカムの交点に配置されたピンは、両接触子に連動したレバーを回転させながら、ピンの移動経路長を短くするようレバー比を変化させる。CCS 性能を高く保ちつつ、低操作エネルギー・低応力で最適な変位曲線を実現するために、溝付きカムとピンの接触位置に作用する局所的な接触力を最小化する直接探索法を用いた形状最適化手法を開発した。また、ピンの運動安定性を維持するために、溝付きカムとピンの隙間の大きさを考慮して位置保持部を設計した。動作検証用試験機にて測定した変位曲線は、設計変位曲線とよく一致した。また、実規模試作機にて、1 万回の動作試験に成功した。ここで開発した双方向駆動機構を適用することで CB の操作エネルギーを約 1/3 とできる見込みである。

第 3 章では、熱的遮断性能と流体物理量の相関関係の評価および最適な熱的遮断性能指標について述べている。圧縮性流体方程式の電流ゼロ点直前、電流ゼロ点、電流ゼロ点直後の近似式に基づいて、4 つの物理量を遮断性能候補として抽出した。物理量は、1 次元アーク解析と 2 次元流体力学を組み合わせた評価ツールを用いて計算した。1 次元アーク解析で算出した圧力を 2 次元流体解析で境界条件として設定することで、数値解析の計算時間を短縮できる。その結果、局所的な流体運動エネルギー密度をアーク接触子間空間で体積積分して得られる平均流体運動エネルギーが最適な遮断性能指標となることを明らかにした。この運動エネルギーを遮断性能指標として用いて自力消弧型消弧室のノズル形状を設計した。本ノズルを適用した実規模 SF₆ CB で、定格遮断電流の 90% 条件での SLF 遮断に成功した。

第 4 章では、ノズル内衝撃波に基づく誘電的遮断性能指標の評価について述べている。ノズル形状と淀み点圧力を考慮した超音速流の理論式を用いて、衝撃波と流速を評価する方法を開発した。予測された流速と衝撃波が発生する位置は、自己消弧型 SF₆ CB の BTF 遮断試験成否と強い相関関係があることがわかった。ここで提案している誘電的遮断性能と接触子間衝撃波のふるまいとの関連を把握するための簡易計算プロセスは、新たに開発

する遮断器の消弧室を概略設計するための有用な手法である。

第 5 章では、接点間の臨界電界を利用した誘電的遮断性能指標の提案について述べている。自己消弧型 SF₆ CB における BTF 遮断性能を評価するために、ガス空間内の局所的な臨界電界を利用した 2 つの誘電的遮断性能指標を提案した。第 1 の指標は、放電の発生を抑制する効果を定量化したもので、アーク放電接点間の空間における臨界電界を印加電界で除したものを積分して求めたものである。第 2 の指標は、絶縁破壊の開始のしやすさを表すもので、ノズルの表面近傍を含む空間の範囲で第 1 の指標の逆数を積分して求めたものである。定格遮断電流の 10~100%での実験条件で 2 次元ガス流解析をしてそれぞれの誘電的遮断性能指標を導出した。BTF 遮断成否との関連を調査し、遮断失敗を含まない指標値の範囲を高性能範囲とする基準指針を見出した。

第 3 章から第 5 章で提案した遮断性能指標を様々な定格の CB に適用することで、消弧室の開発および設計期間の大幅削減が期待できる。

第 6 章では、高温ガス下の耐電圧評価方法とガス排気構造の最適化について述べている。ガス排気孔付近の排気温度が、最大電界と臨界電界が一致する閾値温度以下になるようなコンパクト排気構造を設計する方法を提案した。閾値温度を決めたのち、構造の初期値を決定するための概略計算と、1 次元アーク解析と排気部のみの 2 次元ガス流解析を組み合わせた数値解析で最良解を見出す。この設計手法を用いて排気ガス温度が閾値温度以下となる排気構造を設計した。本排気構造を適用した実規模 CB で、定格遮断電流の 100%条件での BTF 遮断に成功し、何れのガス排気孔でも絶縁破壊が発生しないことを確認した。

第 7 章では、本研究の成果と今後の展望についてまとめる。