

報告番号	甲 第 11457 号
------	-------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 真空中における複合絶縁系の放電特性に関する研究

氏 名 孔 飛

論 文 内 容 の 要 旨

今日の高度に発達した産業社会において電力の安定供給および電力輸送の大容量化が求められている。電力の輸送制御や電力システムの役割を担っているのが開閉器 (Switchgear) であり、送配電容量の増加とともに遮断容量が大きくなり、環境適合型である真空遮断器 (VCB) の高電圧化・大容量化・高信頼化が注目されている。電流遮断を行う真空インタラプタ (VI) の製品試験・運用時に内部絶縁不良により絶縁破壊故障が発生してしまうことがある。絶縁破壊の起点となりうる電気絶縁上の弱点の検出は、VI の電気絶縁設計上重要な要素である。VI 内部の絶縁状況を把握するためには、VI 内部の複合絶縁系における放電形態および放電経路の識別が重要である。しかしながら、固体絶縁物には主に不透明なセラミックが用いられているため、VI 内部における放電箇所および放電経路の光学的な直接観測は極めて困難である。

以上の観点から、本研究では、まず、真空中の各放電現象 (ギャップ放電、沿面放電、シールドを介する放電、複合経路放電) を分類し、単一放電経路および複合放電経路の放電特性を明らかにした。その上で、放電経路および放電形態によって異なる放電波形 (印加電圧波形・陽極電流波形、シールド電位波形) の特徴や放電の物理メカニズムとの関係に基づいて、VI 外部から VI 内部における放電経路および放電形態の同定を行う手法の提案を行った。

本論文は、全6章により構成されている。以下に本論文の各章の概要を示し、学術的および工学的意義について述べ、最後に今後の展望を示す。

第2章 真空ギャップにおける絶縁破壊特性

本章では、真空インタラプタ内部におけるギャップ間の絶縁破壊 (BD) に注目し、陰極-陽極 (c-a) および陰極-シールド-陽極 (c-s-a) 電極構成を用いて絶縁破壊進展時間と電圧、ギャップ長の依存性を検討した。

真空ギャップにおける BD 発生時において、BD 進展時間 T_{BD} は陰極に生じたカソードプラズマが陽極に到達する時間であると考えられ、 T_{BD} は陰極先端の最大電界に依存せず、ギャップ長のみに依存する。この結果は、真空ギャップ長を BD 進展時間から推定できることを示唆している。

ギャップ間の絶縁破壊時には、ギャップ間の放電から放出された電子がシールド (浮遊電極) に到達することで、シールドに負極性の電位が過渡的に現れる。この電子放出は等方的になされ、シールド電位の推移により、絶縁破壊の発生位置 (シールドからの距離) を推定できる可能性がある。

シールドを介するギャップ放電は、部分破壊 PB (c-s) と全路破壊 (c-s-a) 2つの放電パターンに分類される。c-s 間の PB に伴いシールド電位が陰極電位と同程度の値までステップ的に上昇し、印加電圧波形と陽極電流波形に高周波信号が現れる。全路破壊に至るまでに、c-s 間の PB は発生と消滅を繰り返し、s-a 間の破壊に伴い全路破壊に至る。

第3章 真空中絶縁物を介する沿面放電特性

本章では、真空インタラプタ内部における絶縁物を介する沿面放電に注目し、陰極-固定絶縁物-陽極 (c-i-a) 電極系を用いて、沿面放電進展時間 T_{FO} と電圧、沿面距離の依存性を検討した。沿面放電時における陽極電流の上昇は、2段階 (SEEA 機構による数 A 程度の電流上昇、放出されるガス中の電離による 100 A 程度の電流上昇) に類別された。沿面放電進展時間 T_{FO} は V_p^{-2} (V_p : EEE 発生後の陰極電圧ピーク) に比例した。 T_{FO} は EEE 発生から導電チャネル形成までの時間と考えられ、 $T_{FO} \propto V_p^{-2}$ の関係はガス放出モデルによって説明される。沿面距離が長いほど T_{FO} は単調に増加することから、 T_{FO} と V_p によって沿面距離を推定できる可能性を示した。

第4章 真空中複合絶縁系における放電特性

本章では、陰極-シールド-絶縁物-陽極 (c-s-i-a) および陰極-絶縁物-シールド-陽極 (c-i-s-a) の2種類の電極系において、複合経路の放電発生・進展過程を検討した。c-s-i-a と c-i-s-a における複合放電経路はいずれもギャップ間の BD と絶縁物を介する沿面放電の組み合わせであり、それぞれを波形から分離・識別でき、各過程の放電特性は単一経路の放電特性と一致した。

c-s-i-a における c-s 間の部分破壊 PB では、放電開始が c-s 間の電位差に依存し、PB 進展時間 T_{PB} は c-s 間の電位差に依存しない。c-s-i-a と c-i-s-a における全路破壊時のギャップ間絶縁破壊進展過程では、絶縁破壊進展時間 (T_{PB} , T_{BD}) は電極間の電圧に依存せず、ギャ

ップ長の増加とともに大きくなる. c-s-i-a と c-i-s-a における全路破壊時の沿面放電進展過程では, 沿面放電進展時間 T_{FO} は V_p^{-2} (V_p : EEE 発生後の陰極電圧ピーク) に比例し, 沿面距離の増加とともに大きくなる. 以上より, 真空インタラプタ内部の複合放電経路においても, 単一経路の放電進展特性に基づいて放電箇所および放電経路を推定できると期待される.

第5章 真空中放電経路の識別手法と実験的検証

本章では, 前章に検討した真空中複合絶縁系における放電特徴量を抽出し, 放電進展特性に基づく放電経路の識別手法を確立し, VI モデルにおける検証実験を行った. 真空中の各放電経路において取得された波形 (印加電圧波形, 陽極電流波形, シールド電位波形) の特徴を抽出した. 各放電経路で互いに特徴が一致するものはないことから, 各放電経路を識別できた. 各放電経路を識別し, さらに放電進展時間の経路長依存性に基づいて各放電経路の経路長を推定できた.

第6章 総括

本章では, 本研究の総括を行った.

本研究の学術的および工学的意義

本研究では, 真空インタラプタ内部の絶縁状態診断に向けて, 放電開始・進展メカニズムに基づいて, 外部から放電経路を識別する手法を提案することを目的とした.

本研究では, 真空中複合絶縁系における放電パターンを分類し, 各放電過程の開始・進展メカニズムに着目し, インパルス電圧印加時のギャップ間放電や沿面放電の進展特性を明らかにした. また, この過程で, 真空中各放電の進展特性解明のため, 放電波形と放電過程の関係を明らかにし, ギャップ間の放電過程におけるカソードプラズマの拡大による放電進展メカニズムと, 沿面放電過程におけるガス放出による放電進展メカニズムを明らかにした. これは, 真空中の放電現象の理解を深める学術的な意義がある.

本研究で得られた成果は, 真空中複合絶縁系における各放電の特性とメカニズムの学術的解明と放電経路識別手法への応用的提案およびその実験的検証である. これらの研究成果は, 真空インタラプタの絶縁診断に向けた絶縁設計に資する有効な指針を与えるとともに, 真空環境下で用いる各種機器の高性能化, 高信頼度化に貢献するものと考えられる.

今後の展望

実器の真空インタラプタの製品試験時においては, 絶縁上の弱点による部分放電・絶縁破壊の発生に伴う放電箇所・放電経路の検出が重要である. 本研究では, 真空中複合絶縁系における放電特性に基づく放電経路の識別手法を提案したが, その中で浮遊電極であるシールド電位の推移が重要である. しかしながら, 実器への適用時にシールドが外部に露出せずにシールド電位を直接に測定できない場合がある. そこで, 高圧プローブでの直接

測定ではなく、新たな非接触測定技術の開発が必要である。例えば、絶縁円筒の外部に電位測定プローブを設置し、容量分圧によりシールド電位の推移を取得することが考えられる。

また、工業応用の観点から、提案した放電経路の識別フローを実器内部の絶縁状態および放電箇所・経路の推定に適用・検証するとともに、自動的に検出する実用的なレベルへ発展させることが期待される。