

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 稲田 優 貴

電力システムの拡大や高電圧化に伴い、その信頼性確保の点から遮断器の性能向上が求められている。遮断の成否は電流ゼロ点付近の小電流アークの特性により決定されることから、遮断器の性能向上には、小電流アーク内の物理、特に電子密度の空間分布測定が必要不可欠となっている。しかし小電流アークにおいては電子密度や放電経路の再現性が低く、さらに時間的に急激な状態変化を伴うため、従来手法では電子密度分布を測定することは困難であった。本論文は、過渡変化する小電流アークの二次元電子密度分布を瞬時測定できる、高精度高感度タイプのシャックハルトマン型レーザ波面測定システムを開発し、これを用いて消弧過程にある大気中アーク放電SF₆ ガス中アーク放電、真空アーク放電に対し適用し、世界で初めて二次元電子密度分布の時間変化を明らかにしたもので、「シャックハルトマン法による小電流アーク内の二次元電子密度分布測定」と題し、全9章から構成されている。

第1章「序論」では、高信頼性を有する遮断器を開発すべく行われてきたこれまでの研究を示し、本研究の位置づけを行っている。そして遮断器の性能向上を行う上では小電流アーク内における二次元電子密度分布計測が必要であることを述べている。

第2章「放電プラズマ内の電子密度計測手法」では、これまでアーク内の電子密度計測に用いられてきた発光分光法、トムソン散乱法、干渉法、シャックハルトマン法を比較し、本研究への適用可能性について考察を行い、最終的にシャックハルトマン法を選定した理由について述べている。

第3章「シャックハルトマン型レーザ波面測定法による電子密度測定」では、測定原理の解説を行っている。放電空間内外における屈折率差は、入射されたレーザ波面の位相分布を変化させる。本測定法ではこの位相変化をマイクロレンズの集光点移動量として捉え、移動量の波長依存性から電子密度を求める。二波長同時計測を採用することで中性粒子密度やイオン密度の影響を分離し、電子密度が測定できることを述べている。

第4章「実験装置」では、使用した測定装置について述べている。実験装置はアーク放電の発生に関連した放電系と、電子密度測定を行うための光学系に分けられる。特に、光学系では、プロトタイプシステムに始まり、高精度型システム、高精度高感度型システム、高感度を有するフレーミング型システムへと改良を進めていった経緯を述べている。

第5章「電子密度測定システムの開発、改良、および諸特性」では、目的を達成するため不可欠な測定システムの測定精度の向上策について詳述している。プロトタイプシステムでの原理の検証に続いて、高精度型システムでは使用する適切なレーザを選定し、マイクロレンズアレイの焦点距離を20mmから38.4mmに変更することにより、電子密度の最小検出感度は 10^{23}m^{-3} に改善され、一度の測定で電子密度の二次元分布を取得することが可能となっている。高精度高感度型システムでは、467mmの長焦点距離マイクロレンズアレイを独自に開発することにより、最小検出感度を 10^{21}m^{-3} まで改善することに成功している。更に高速度フレーミングカメラと組み合わせた高感度を

有するフレーミング型システムによって、二次元電子密度分布の経時変化測定を可能としている。

第 6 章「大気中アーク内の二次元電子密度分布測定」では、大気中フリーアークの電流ゼロ点近傍における二次元電子密度分布の測定結果について述べている。電流ゼロ点近傍の電子密度は最終的に、電流が流れていると考えられるギャップ間よりもその周辺部で高く $10^{21}\sim 10^{22}\text{m}^{-3}$ であることを見出している。また、磁場印加時のアークでは、電子密度の低下が促進されることを実測により明らかにしている。

第 7 章「SF₆ ガス中アーク内の二次元電子密度分布測定」では、電流ゼロ点以降、SF₆ ガス中アークの電子密度はわずか $6\mu\text{s}$ という非常に短い時間で $10^{22}\sim 10^{23}\text{m}^{-3}$ から 10^{21}m^{-3} 未満へと急激な減衰を示すことを明らかにしている。SF₆ ガス中フリーアークと SF₆ ガス吹付けアークの比較を行い、フリーアークにおいては、電流ゼロ点における電子密度分布が軸的に非対称となっている場合に、高い遮断成功率が得られること、カソード側から SF₆ ガスを吹付けた場合には、カソード近傍の電子密度が $10^{17}\sim 10^{18}\text{m}^{-3}$ に低下しているとき、遮断成功率は 100%であることを見出している。

第 8 章「真空アーク内の二次元電子密度分布測定」では、電子密度に加え中性粒子密度を同時測定することができることを示した上で、絶縁破壊直後の電子密度は $3\sim 6\times 10^{22}\text{m}^{-3}$ 、中性粒子密度は $4\sim 6\times 10^{23}\text{m}^{-3}$ 、 $50\mu\text{s}$ 後には、電子密度は局所的に $7\times 10^{20}\text{m}^{-3}$ 、中性粒子密度もギャップ間のほぼ全域にわたって検出できない程度にまで減衰していることを明らかにしている。

第 9 章「結論」では、以上の成果をまとめ、内容を総括すると共に今後の展望を行っている。

以上これを要するに、本論文はシャックハルトマン型レーザ波面測定法に基づき、電力遮断器の性能向上において鍵となる電流ゼロ点付近のアーク放電を対象とし、その二次元電子密度分布の時間変化を高感度で測定できる方法を初めて開発し、これを用いて空气中、SF₆ ガス中、真空中におけるアーク消弧時の放電物理に関する有用な知見を得ている点で、電気工学、特に高電圧、放電工学に貢献するところが少なくない。

よって本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。