

論文の内容の要旨

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

氏名 稲田 優貴

高品質な電力エネルギーを安定的に供給するためには、高い信頼性を有する電力用開閉装置が必要不可欠である。開閉装置の中でも電力用遮断器は、大規模停電のリスクを最小限に食い止め、高価な送変電設備を保護する重要な電力機器であるため、引き続き更なる信頼性の向上が望まれている。こうした電力系統網の高度化に加え、環境問題に対する関心の高まりを背景に、近年では低環境負荷型電力機器の開発が求められている。しかし、遮断器の絶縁・アーク消弧媒体として広く用いられる SF_6 ガスの温暖化指数は CO_2 ガスの 23900 倍と非常に高く、環境への悪影響が懸念されている。そのため SF_6 ガス遮断器には、高信頼化と同時に使用ガスの削減によるコンパクト化が求められている。

これらの社会的ニーズは、アーク放電の速やかな消弧を促す合理的な内部構造設計および SF_6 ガスの効率的な利用により充足可能である。そこで遮断器内に発生したアーク放電を速やかに消弧させる手法を開発すべく、消弧特性の解明が求められている。消弧過程においては電子がその中心的な役割をはたすため、電子密度の測定は特に重要である。

なかでも、消弧促進技術の開発に直結する測定データは、アーク放電内の全空間にわたる電子密度分布である。例えば仮に、遮断器内のある特定の箇所では電子密度が局所的に低下していることが測定できたとしても、遮断器内部の構造設計を工夫することによって SF_6 ガスをその箇所へ集中的に噴射し、少量のガスで速やかな消弧を実現することができる。現行の遮断技術の有効性や課題を適切に評価し、遮断器開発における今後の設計指針を明確化するためには、アーク放電内の全電子密度分布測定はまさに必須であるといえる。

しかし SF_6 ガス遮断器内部に発生する極度に複雑なアーク放電に限らず、実験室規模の大気中アーク放電においても、その全域にわたる電子密度分布を消弧過程に立ち入って詳細に測定したデータはこれまで得られていない。消弧過程においては電子密度が低く、放電経路の再現性に乏しいことが原因である。さらに、消弧現象は時間的に急激な状態変化を伴う場合があるため、高い時間分解能が要求される。したがって消弧特性解明にあたっては、電子密度の全空間分布が一度に取得でき、なおかつ高い時間分解能や

空間分解能、検出感度、測定精度を併せ持つ非接触型手法を開発し適用する必要がある。そこで本研究では、アーク放電内の二次元電子密度分布が単一測定で取得できるシャックハルトマン型レーザ波面計測器の開発を行った。

本研究では4種類の電子密度測定システムを構築した。1種類目は、本研究を立ち上げる際に試作したプロトタイプシステムである。そしてその後順次、高精度型システム、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。

まず始めに、プロトタイプシステムの開発について述べる。シャックハルトマン型波面計測器ではマイクロレンズアレイの焦点面に形成される輝点の位置を正確に捉えることが求められる。しかしレーザ波面の不安定性や、CCD (Charge Coupled Device) 部での熱ノイズ、さらにはマイクロレンズの輪郭で回折したレーザ光が偽輝点を形成する現象などが原因で、輝点の位置は擾乱を受ける。そこで、輝点位置の検出精度を向上させ、本測定システムの精度を高めるべく、実験手法、解析手法の両面から擾乱の抑制を図った。これにより、アーク軸上の異なる3箇所において径方向電子密度分布を同時測定することが可能となった。

次に、高精度型システムの開発について述べる。輝点位置に重畳する擾乱を更に低減させ、測定精度をいっそう向上させるべく、使用するレーザの選定を入念に行った。さらにレーザビームを完全な平行光にする手法や、複数使用するレーザビームの光路を驚異的な精度で一致させる手法などを開発した。これにより、システムの測定精度は著しく改善され、二次元電子密度の計測が可能となった。

しかしこの高精度型システムでは、 10^{23}m^{-3} 程度の比較的高い電子密度に適用が制限されていた。そのため、 10^{23}m^{-3} 程度未満にまで低下した電子密度の全空間分布を取得することは困難であった。そこで本研究では従来型のマイクロレンズアレイがすべて片面にのみ加工を施した片面凸形状であったことに着目し、レンズアレイの両面に加工を施したメニスカス形状のマイクロレンズアレイを開発した。これにより最小検出感度が 10^{23}m^{-3} 程度から100倍向上し、 10^{21}m^{-3} 程度までの低電子密度分布が全空間にわたって同時取得可能な高感度型システムを実現した。またメニスカスマイクロレンズアレイの開発により、測定感度の向上に加え、測定空間の相対位置ずれを大幅に改善し、更に高精度を有する測定装置を実現した。

消弧過程にある SF_6 ガス中アーク放電の場合、放電路や内部状態は不規則で急激な時間変化を示す。そのため消弧機構の解明にあたっては、経時変化する電子密度の全空間分布が単一測定で、しかも高時間分解能で取得できるフレーミング型センサを適用する必要がある。しかし、上記3つの測定システムでは、各放電に対して一度しか電子密度の測定を行うことができず、単一測定による電子密度の経時変化測定は不可能であった。そこで本研究では、高い撮影速度を有するフレーミングカメラと独自に製作した光学モジュールを実装することで、これまで得られた高い測定精度や測定感度を犠牲にすることなく、フレーミング型の電子密度測定システムを開発した。

次に、これらの測定システムを消弧過程にある大気中アーク放電および SF_6 ガス中アーク放電に適用した結果について述べる。

まずは大気中フリーアークについてである。消弧過程の初期段階にある大気中フリーアークは時間の経過に従って電極近傍からではなく、ギャップ中心付近から電子密度が低下してゆくことを明らかにした。また電流ゼロ点近傍においては、ギャップ間に電流が流れているにも関わらず電子密度はギャップ間ではなく、その周辺領域で高くなっていた。

現在では、磁場を印加することで消弧の促進を図るロータリアーク型ガス遮断器の実用化が検討されている。そこで本研究では、陰極部に設置したネオジウム磁石を用いて大気中アーク放電に磁場を印加し、消弧直前の電子密度分布に対する磁場印加の有用性を定量的に評価した。無磁場の場合、ギャップ中心付近の電子密度は 10^{23}m^{-3} 程度であったが、磁場を印加することで電子密度は 10^{22}m^{-3} 程度に低下していた。またフレーミングカメラを用いた発光撮影により、アーク放電がローレンツ力を受けて引き伸ばされ、発光がギャップ中心付近で弱くなっている様子も観測された。これにより、大気中アーク放電内の電子密度の減少は磁場印加に伴うローレンツ力によるものであることを明らかにした。

電力用ガス遮断器内においては封入ガスをアークへ吹き付けることで消弧速度を促進させている。そこで本研究では陰極の周囲からアーク軸方向への空気吹き付けを行い、電子密度分布に対する吹き付け効果を測定した。これにより、空気の吹き付け圧力が増加するにつれて、アーク径が収縮するといった吹き付け効果はより早い時刻で観測され、その吹き付け効果は軸方向への対流損だけではなく径方向の対流損が重畳することで引き起こされることが確認された。

続いて、大気に対する SF_6 ガスの優れた消弧能力を電子密度の観点から定量的に検証すべく、同一の回路条件において大気中および SF_6 ガス中フリーアークを発生させ、各放電に対して二次元電子密度分布の経時変化を測定、比較した。その結果、消弧過程においては常に、 SF_6 ガス中アーク放電内の電子密度は大気の場合よりも高くなっていた。この一因としては、 SF_6 ガスの定圧熱比熱が大気の場合よりも低いことが挙げられる。 SF_6 ガスおよび大気中アーク放電への注入エネルギー量は同等であるが、 SF_6 ガスの定圧熱比熱は大気よりも小さいため、温度は SF_6 ガス中アークの方が大気中アークよりも高くなる。さらに、縦軸に電子密度、横軸に温度をとった場合の熱平衡曲線では全ての温度領域にわたって SF_6 ガスの方が大気よりも大きくなっている。そのため、 SF_6 ガス中アーク放電内の電子密度は大気の場合よりも高くなっていたと考えられる。電流ゼロ点近傍においては、 SF_6 ガス中アーク放電は、電流ゼロ点近傍におけるわずか $10\mu\text{s}$ 程度の非常に短い間に電子密度が 10^{23}m^{-3} から 10^{21}m^{-3} 以下へ急激に減衰していた。一方、電流ゼロ点近傍における大気中アーク放電内の電子密度は、電流の有無にかかわらず、カソード付近で常に 10^{22}m^{-3} となっていた。電子密度が電流値に依存しないことから、今回

測定されたカソード付近の電子密度は、その大部分が電流値の形成に寄与しない残留電子密度であると考えられる。また電子密度計測に加え発光計測を行うことにより、電流ゼロ点近傍における大気中アーク放電は、電流値の形成に寄与しない残留電子密度がアークコラムを包囲した構造を有しており、アークコラム内の電子密度はそれを取り囲む残留電子密度よりも小さくなっていることを明らかにした。これにより、大気に対するSF₆ガスの優れた消弧能力は、電流ゼロ点近傍におけるコラム内電子密度の急速な減衰速度とそれを包囲する残留電子の速やかな消滅に由来することを実験的に示した。

実際のガス遮断器では、同一の回路条件で遮断試験を行った場合でも、遮断の成否が分かれる場合がある。そこで遮断の成否が分かれる交流電流波形を設計し、遮断の成否でSF₆ガス中アーク内の電子密度分布にどのような違いがあるのか、電流ゼロ点近傍において測定した。SF₆ガス中フリーアークの場合、遮断の成否はギャップ間の電子密度よりも電子密度の分布形状に強く依存しており、電流ゼロ点における電子密度分布が軸的に対称な場合には遮断は78%の高確率で失敗していたが、非対称な場合には遮断成功率は88%と非常に高くなっていた。

同様にして、アーク放電の軸方向へSF₆ガス吹き付けを行った場合についても遮断の成否が分かれる交流電流波形を設計し、遮断の成否における電子密度分布を電流ゼロ点で測定した。電流ゼロ点における電子密度が局所的に本システムの最小検出感度である10²¹m⁻³を下回っている場合、遮断は100%の確率で成功していた。一方、電子密度がギャップ間の全域にわたって10²¹m⁻³以上となっていた場合、遮断は88%という非常に高い確率で失敗していた。これにより、優れた遮断性能を得るためには、電子密度がギャップ間のほぼ全域で高くなっていたとしても、ギャップ間の一箇所電子密度を集中的に低下させることができれば、そちらの方が遮断には有利であるといえる。