

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 徐 碩 (Xu, Shuo)

電力系統において導入が進んでいる真空遮断器において、電流遮断後に非持続性破壊放電 (Non-Sustained Disruptive Discharge, 略称 NSDD を以降用いる) を観測する事例が報告されている。現在の所、NSDD 起因の大きな事故はないものの、NSDD 現象の詳細および発生機構が明確にされていないために、事故のつながる危険性の評価や対応策の検討が進んでいない。本論文は、NSDD 現象を電極の表面状態、アーク放電で発生する金属粒子の挙動、陰極からの電子放出や蒸気放出、真空の電氣的絶縁破壊などの観点から実験および理論の両面で詳細に検討して、その発生機構の解明を明らかにしたもので、“Non-Sustained Disruptive Discharge in Vacuum Circuit Breaker” (真空遮断器における非持続性破壊放電現象) と題し、英文で記述され、全6章から構成されている。

第1章「Introduction (序論)」では、電力系統で広く用いられている真空遮断器がもつ優れた電氣的遮断特性を述べた後に、電流遮断後にしばしば観測される NSDD の例とこれまでの研究を示し、本研究の位置づけを行っている。また、NSDD 発生 の鍵を握る要因は、電極上に存在する微小粒子と微小突起であることを述べている。

第2章「Observation of Particles after Arc (アーク放電後の粒子観測)」では、実用的なアーク遮断後の状況を再現できる実験回路を構成し、アーク遮断時に発生する微小金属粒子の挙動をリアルタイムで観測できるレーザ応用計測システムを適用した結果が述べられている。微小粒子の大きさは 30~40 $\mu\text{m}$ 、移動速度は 50m/s 以下、存在寿命は 5ms 程度であることを示すと共に、粒子の運動と NSDD の発生は必ずしも同期していないことを明らかにしている。

第3章「Protrusion on Electrode Surface (電極表面上の微小突起)」では、アーク遮断後の電極表面の観測結果および電極表面上の微小突起を模擬した針電極による実験結果が述べられている。電極表面の観測結果によると、kA オーダ以上のアーク放電により電極表面には幅、高さ共に 10~数 100 $\mu\text{m}$  程度の突起、エッジが生じていることが明らかとなった。微小突起を模擬した針電極による実験結果によると、針先端からの金属蒸気発生に同期してパルス放電が発生していること、蒸気発生初期においては電界強化係数が大きく鋭い突起から電界放出電流が流れ、蒸気発生が最盛期になるとジュール発熱による熱電子電流の増大が加わるが、蒸発や発熱が進みすぎると結果的に突起先端の損耗、熔融、鈍化が起こり、最終的には電界強化係数や電流の減少につながることを明らかにしている。熔融した金属は周辺から中心に向かって再凝固し、クレータ状の突起部を残すことも示唆されている。

第4章「Breakdown of Vacuum Gap with Arced Electrodes (アーク発生電極間の真空絶縁破壊)」では、NSDD が遅延して発生する機構と NSDD が部分放電ではなくギャップ間の絶縁破壊であることを述べている。NSDD は、電極上の微小突起からの電界放出電流、熱電子電流、空間電荷制限電流をトリガとし、熱過程と金属蒸気発生により進展することから、電流の流れははじめから絶縁破

壊までの遅れ時間は ms オーダに達することを明らかにしている。NSDD は電極間の浮遊静電容量に蓄積されたエネルギー程度で、ギャップ間の絶縁破壊を引き起こすこと、また、NSDD 発生後のギャップ間の絶縁回復は蒸発粒子の拡散に依存し、その時定数は数  $\mu\text{s}$  であることを見出している。従って、この絶縁回復までの時間内に電源からの電流注入が可能になると再びアーク放電に至る、すなわち再点弧(遮断失敗)に至る可能性を初めて定量的に示した。

第5章「Non-Sustained Disruptive Discharge(非持続性破壊放電)」では、NSDD が発生する条件について考察している。陰極上の電子および粒子の供給持続条件から、NSDD の発生持続を決定できる一般化された Paschen の式を導いている。また、3 相交流系統において、NSDD が発生した場合の過渡過電圧の解析を行い、非接地系統では最大で 1.7pu 程度の過電圧が現れることを示している。

第6章「Conclusions and Future Work(結論と今後の展望)」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、本論文は電力システムで利用される真空遮断器において、不明な点が多かった非持続性破壊放電(NSDD)を対象として実験および理論の両面から検討を行った結果、NSDD は陰極上の微小突起からの電子放出を起点とし、それに続く蒸気放出やスパッタリングにより生じた金属粒子中の電離増倍現象で、電極間の絶縁破壊に至る放電であることを初めて明らかにした点で、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。