

博士論文（要約）

大電流真空アーク制御技術と  
真空遮断器の高機能化への展開

小山 健一

## 要約

真空遮断器は、3.6kV から 84kV までの電圧階級において小型で優れた遮断性能を有することから、受配電設備を中心として広く適用されている。本論文は、真空バルブの小型化・高遮断容量化に向けた真空中大電流アーク現象の解明研究ならびに真空バルブへの適用研究、さらにこの真空バルブの小型という特徴を活用するための真空遮断器用電磁操作機構の実用化研究、および、これを利用した状態監視機能の高度化に関する研究についてまとめたものである。

### (1) 真空中アーク現象の解明研究

#### ①真空アーク現象

真空バルブは真空遮断器の根幹であり、真空バルブの小型化・高遮断容量化には、真空アークの発生から消弧に至るまでに発現するアークモード(集中アークモードや拡散アークモード)への深い理解が必要である。

まず、電流の比較的小さい期間に発現する拡散アークモードについて、陰極表面に存在するカソードスポットから生じる金属蒸気が遮断性能に重要な影響を及ぼすことから、レーザー誘起蛍光法(LIF: laser induced fluorescence)を用いた金属蒸気の定量的な計測を実施した。真空中の銅電極間に発生させた40Aの真空アークにおけるカソードスポットから放出される銅の中性原子密度と放出速度を測定した。その結果、銅原子は電極間のほぼ全体に分布しており、陰極表面にわたって対称に分布すること、銅原子密度はカソードスポットの上部では中心よりも両側で密度が高くなっており、その密度の最大値は $5 \times 10^{19}/\text{m}^3$ であることがわかった。また、ドップラーシフトを利用して、カソードスポットから放出される銅原子の速度を測定したところ約10km/sであり、アーク消弧後の銅原子密度は約75 $\mu$ secの時定数で急激に減衰することがわかった。

次に、大電流期間で発現する集中アークモードについて、支配的とされる陽極スポットに着目し、電氣的プローブとして円筒コレクタを用いて陽極スポット現象を調べた。その結果、陽極スポットの形成に伴い、コレクタからアーク空間へ向かって電流が流れることを明らかにし、これはアーク空間から発生する負イオンによるものと考えられることを示した。また、負イオンの生成量は電極材料に依存し、電極に電子親和力が負の金属(亜鉛、カドミウム)を用いたときは少ないことを明らかにした。

#### ②高速駆動アークの研究と真空バルブへの展開

このような真空アークを効果的に消弧する技術として、印加磁場によるアークの高速駆動技術に着目し、磁気駆動アークの挙動観測、および、真空バルブの電極構造への展開に

ついて研究した。

まず、基礎的な実験系として、2本のレール電極間に発生したアークの磁気駆動現象を観測した。その結果、電流値が大きく側壁間距離が小さい条件では、複数のアークコラムが現れる分散アークモード(DAM)となり、1つのアークが初期アーク位置にとどまりながら、残りのアークが駆動、消弧、再発弧を繰り返すという挙動を明らかにした。

次に、真空バルブ内でアークを高速駆動させるためのスパイラル型の電極構造について、高速度ビデオカメラを用いて真空アークの挙動を観測し、電極形状や電流遮断性能との関係について調べた結果、スローアーク期間が短くなる電極条件だと高い遮断性能を示すことを明らかにした。このスローアーク期間は磁場強度と密接に関連しており、また、電極に注入されるエネルギーや電極材料にも依存することから、スローアーク期間中に電極表面に形成される溶融が電流零点における電極蒸気密度(=遮断性能)に影響を与えるものと推定した。

最後に、本研究成果を活用して開発したスパイラル型電極構造は、2000年4月より発売された24kV真空遮断器に適用されると共に、本技術に関わる発明の有用性が評価され、平成19年四国発明表彰を受賞した。

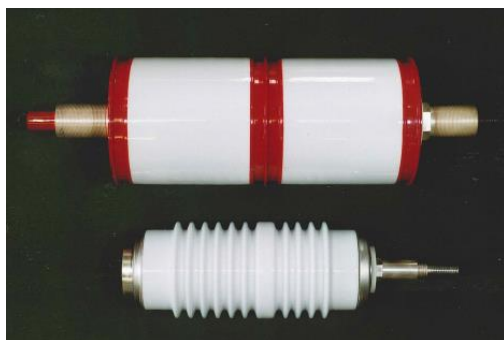


写真. 24kV真空バルブの外形比較  
(上：従来品、下：開発品)



写真. 24kV真空遮断器

## (2) 真空遮断器の高機能化研究

### ①電磁操作機構の実用化研究

従来の真空遮断器用操作機構であるバネ操作機構に代わる操作方式として、電磁操作機構の実用化研究を行った。真空遮断器に要求される開閉駆動特性を設計するため、電磁界運動連成解析手法を研究し、本手法を用いて設計・評価した。

電磁界運動連成解析手法では、鉄心表面に流れる渦電流による磁束量の遅れを、一次遅れで近似した。実測比較による時定数の合わせ込みは必要であるものの、複雑な解析手続きが不要であり、かつ実測波形とよく整合した高精度な計算が可能であるメリットがある。本手法を用いて 24kV 真空遮断器の電磁操作機構を設計した結果、従来のバネ操作エネルギーの約 1/5 のエネルギーでの駆動を実現し、部品点数を 65% に削減できた。

この操作機構とスパイラル電極を搭載した 24kV 真空バルブとを組み合わせて短絡遮断試験 ( $25\text{kA}_{\text{rms}}$ ) を実施した結果、ピーク電流  $30\sim 50\text{kA}_{\text{peak}}$  においてアーク時間が約 1.5ms から 8.5ms の全てのアーク時間条件において遮断成功を確認でき、優れた遮断性能を検証した。

小型化した真空バルブと高精度な設計を可能とした電磁操作機構によって、大幅な低駆動エネルギー化した真空遮断器を実現した

## ②CBM 機能の研究

真空遮断器やこれを搭載したスイッチギヤなどの受配電設備は、産業社会を支える重要なインフラ設備であり、安定した電力供給の維持には、計画的な設備保全による事故の未然防止が必要である。特に、近年、柔軟で効率のより保全方式として、状態基準保全 (CBM: Condition based Maintenance) が注目されている。本研究では、電磁操作機構のコイルを流れる電流波形の特徴点を分析することによって、遮断器各相の状態を精度よく監視・診断する CBM 機能の実用化研究を実施した。

まず、電磁界運動連成解析手法を用いた数値実験を行い、真空遮断器駆動部の摩擦力、真空遮断器接点の消耗量、駆動用電源のコンデンサ容量を推定する関数を導出した。次に、24kV 電磁操作式真空遮断器の単相試作器を用いて、遮断器の状態を複合的に変動させた動作実験を行い、推定関数の精度を確認したところ、十分な精度で推定可能であることを検証した。

この状態推定技術を実装した CBM 機能ユニットを開発し、C-GIS 製品に搭載した。本 CBM 装置は、2006 年 2 月に製品発表した HG-VA 型 72kV ドライエア絶縁スイッチギヤに世界で初めて標準搭載された。さらに 7.2kV、24kV スwitchギヤへも搭載され、交通向けなどへ多数出荷され、運用されている。



写真. CBM 機能ユニットの C-GIS 製品への適用

### (3)まとめ

本研究におけるアーク現象の観測技術や磁気駆動によるアーク制御技術によって、電極の直径を 50%に小型化し真空バルブを実現した。この真空バルブと高精度に操作機構を設計した電磁操作技術によって約 20%まで駆動エネルギーを省エネルギー化した真空遮断器を実用化した。さらにこの高精度な設計技術から発明した CBM 技術により、従来と比較して保守の省力化を可能としたスイッチギヤを実用化した。

これらの研究成果は、真空遮断器のさらなる高遮断容量化のみならず SF6 ガス中や気中のアーク遮断へも適用可能な技術であり、GCB (Gas Circuit Breaker)、MCCB (Molded case Circuit Breaker)、DS (Disconnecting Switch) および ES (Earthing Switch) など多種多様な開閉器への展開が期待できる技術である。また、電磁操作機構における設計技術は電磁接触器や真空コンタクタなどの一般の開閉器、およびエレベータ用電磁ブレーキなど様々なアクチュエータ機器にも流用可能であり、本研究の成果は遮断器のみならず多数の分野において電磁駆動技術の課題解決に繋がると結論づける。