

大電流遮断用ガス遮断器のCAE技術としての利用を目指した 電磁流体シミュレーション技術の構築

Development of Magnetohydrodynamic Simulation Technique for Computer Aided Engineering of Gas Circuit Breakers

藤野 貴康
Takayasu Fujino

筑波大学 システム情報系
Faculty of Engineering, Information and Systems, University of Tsukuba

ガス遮断器は電力システムで用いられる開閉機器の一つであり、高電圧系統での短絡・地絡事故時の大電流を迅速に遮断する責務を担う⁽¹⁾。図1にガス遮断器内アーク消弧室（直列パッファ方式）の概略図を示す。電流遮断動作が開始されると、消弧室と呼ばれる領域で可動電極と固定電極の接点が機械的に切り離され、同時にアークが発生する。このアークに消弧室に封入されているガス（消弧ガス）を吹き付け、アークを冷却・消弧し、電流を遮断する。消弧ガスには絶縁耐力および消弧能力に秀でた六フッ化硫黄(SF_6)ガスが一般に用いられている。ガス吹付けの駆動力には、接点の開動作に付随した機械的なピストン圧縮や後述するようにアークのエネルギーを利用して得られる自励的な圧縮力が用いられている。

最新鋭のガス遮断器は図1に示した直列パッファ方式の消弧室が採用されている。同方式の消弧室では、可動シリンダ内部の一部に相当する一定容積の熱パッファ室と、可動シリンダと固定ピストンで構成される機械パッファ室が逆止弁を介して直列に連結されている。電流遮断時には機械パッファ室はピストン機構により容積が減少する。また、固定ピストンには放圧弁が備わっており、機械パッファ室の圧力が高くなりすぎるのを防止している。この機械パッファ室の前方に位置する熱パッファ室では、アークの熱エネルギーを取込むことでガス吹付け圧力を自力で獲得する。大電流遮断時には、この自力圧縮のみで十分なガス吹付け圧力を得ることが可能なため、機械パッファ室と熱パッファ室を連結する逆止弁が閉状態になるように調整されている。一方、中小電流を遮断する場合、アークエネルギーの取込みだけではアークの消弧に十分なガス吹付け圧力を得ることが難しい。そこで、機械パッファ室に昇圧されたガスをアークに吹付け（逆止弁：開）、アーク

を冷却・消弧する。

上述の通り、直列パッファ方式ガス遮断器において機械パッファ室を設けるのは中小電流遮断時の消弧能力を確保するためのものであり、従来の機械パッファ室のみを持つ単一パッファ方式ガス遮断器に比べると機械操作エネルギーを格段に抑えられる。また、このことは接地面積の削減にも大きく貢献している。

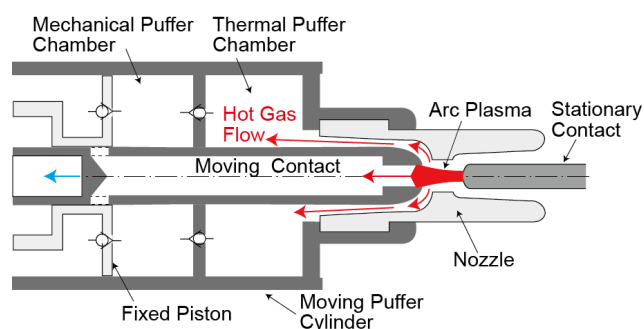


Fig. 1. Schematic diagram of tandem puffer type arc-extinguishing chamber.

直列パッファ方式の消弧室が開発されたことで、ガス遮断器の低操作エネルギー化・小型化に飛躍的な進展がもたらされた。しかし、ガス遮断器市場では、「より小型で機械操作エネルギーのより少ないガス遮断器」を求めるニーズが普遍的にあり、それに即した技術開発が継続して進められているのが、直列パッファ方式の消弧室にて機械パッファ室への依存度をさらに軽減すること、すなわち、中小遮断電流時の自力消弧能力を改善することである。

また、地球温暖化防止の観点から、温暖化係数の極めて高い SF_6 を用いない「代替ガス遮断器」の実用展開に資する技術開発も強く求められている。しかし、 SF_6 は類い稀な消弧性能を持つため、従来のガス遮断器の電流遮断機構を単に流用して SF_6 から他のガスに消弧ガスを置き

換えるとなると、代替ガスそのものの消弧性能の低さを補うために吹き付けガスの高圧化・大流量化が要求される。結果として、機械操作エネルギーの増大とガス遮断器の大型化を招く。そのため、代替ガス種に適したアーク消弧方式・消弧室構造を見出すことが大きな課題として挙げられている。

このようなガス遮断器の技術開発動向の中で、近年、電磁流体 (MHD) シミュレーションが、ガス遮断器の技術開発・設計のための Computer Aided Engineering (CAE) 技術として有効に活用されつつある。また、ガス遮断器に関連する国際会議等では、MHDシミュレーション技術のより一層の高度化 (高精度・高速化等) を目的とした研究報告が基礎実験・遮断試験の研究報告と同程度またはそれ以上の数、なされている状況にある。

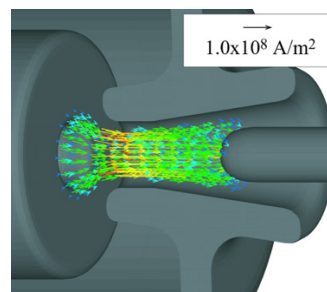
ガス遮断器内のアーク冷却・消弧過程に関わる主要な物理現象として、

- ・ 3次元・非定常アーク挙動
- ・ 広範囲に渡る温度・圧力変化に伴う消弧ガス中 (単一ガス種、混合ガス種) の化学組成変化、それに伴う熱力学的特性・輸送特性に関わる各種物性係数の変化
- ・ 圧縮性流れ (消弧室ノズルで亜音速から超音速への遷移、衝撃波の発生、など)
- ・ 乱流 (取分け、乱流場を介した熱輸送)
- ・ ノズル壁 (PTFE等の高分子材) のアブレーション、それに伴う消弧ガスの化学組成・温度・圧力変化
- ・ アーク・周囲ガス・ノズル壁間の輻射熱輸送
- ・ 電流ゼロ点前後の化学的・熱的非平衡性
- ・ 電極現象 (電極溶発、シース、など)

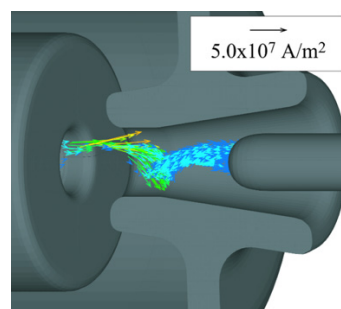
などが挙げられる。現段階では、これらの現象すべてを同時に考慮してガス遮断器のMHDシミュレーションが実施されとの報告は著者の調べた限り存在しない。しかし、その方向に向かって、ガス遮断器のMHDシミュレーションに適した各現象のモデル化 (経験・半経験モデル含む) や他のプラズマ・電磁流体応用分野で確立されているモデルの活用等、国内外の関連研究者によって現在精力的に進められており、著者もその中の一人である。

本講演では、著者らがこれまでに実施してきた「外部磁場印加型完全自力消弧方式モデルガス遮断機内の3次元非定常アーク挙動⁽²⁾ (図2:

解析例)」や「各種代替候補ガス環境下でのアーク消弧特性⁽³⁾」などのMHDシミュレーションの成果を実験結果との比較を交えて簡単に紹介するとともに、ガス遮断器用CAE技術としてのMHDシミュレーションの課題についても言及する。



(a) 3D arc structure at peak current point.



(b) 3D arc structure just before current zero.

Fig. 2. Examples of temporal variations of three-dimensional arc structure in a gas circuit breaker model with a permanent magnet.

文 献

- (1) Garzon, R. D., "High Voltage Circuit Breakers –Design and Applications," Marcel Dekker, Inc., New York (2002).
- (2) S. Hirayama, T. Fujino, M. Ishikawa, T. Mori, H. Kawano, "Numerical Study of Arc in SF₆ Gas Circuit Breaker with Externally Applied Magnetic Field," IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, Vol. 11, No. 4, pp. 410-416 (2016).
- (3) T. Fujino, Y. Yatabe, S. Taruishi, Y. Tanaka, K. Tomita, and K. Suzuki, "Numerical Study on Decaying Gas-Blast Arcs in Various Quenching Gases," Proceedings of 21st International Conference on Gas Discharges and Their Applications, No. Invited Lecture 6, pp. 715-719 (2016).