

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 4 日現在

機関番号：12102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760225

研究課題名(和文) 環境負荷の低いガス遮断器の開発を目指した磁気ロータリー型代替ガス遮断器の研究

研究課題名(英文) Study on a Magnetically Rotating Arc Typed Circuit Breaker Using Alternative Gas for Developing Eco-friendly Gas Circuit Breakers

研究代表者

藤野 貴康 (FUJINO, TAKAYASU)

筑波大学・システム情報系・准教授

研究者番号：80375427

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,500,000円、(間接経費) 450,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、CO₂ガス遮断器の消弧性能向上に対する磁気ロータリー効果の有効性を電磁流体解析から調べた。この研究のために、CO₂ガスの熱力学的係数や輸送係数の温度依存性、電極移動を考慮した3次元非定常電磁流体解析プログラムを開発した。解析対象は永久磁石利用外部磁界印加型モデルガス遮断器とした。解析結果から、磁気ロータリー効果によりアーク冷却が促され、その結果、アークコンダクタンスは大きく減少し、熱パuffer室の圧力も増加することが示された。すなわち、磁気ロータリー効果がCO₂代替ガス遮断器の消弧性能の向上に有効に働くことが示された。

研究成果の概要(英文)：We explored the effectiveness of magnetically rotating arc effect for improving arc quenching performance of CO₂ gas circuit breakers by means of magnetohydrodynamic(MHD) numerical analysis. For this work, we developed a time-dependent, three-dimensional MHD computational program, in which movement of electrode and the dependency of thermochemical coefficients and transport properties of CO₂ gas on temperature and pressure were taken into account. A model gas circuit breaker with an externally applied magnetic field produced by a permanent magnet was adopted as the analysis object in this work. Numerical results showed that the cooling of arc can be promoted by magnetically rotating arc effect, and consequently an arc conductance decreases and a pressure in a thermal puffer room increases. From the numerical results, we concluded that the utilization of magnetically rotating arc effect leads to an improvement in quenching performance of CO₂ gas circuit breakers.

研究分野：プラズマ工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：ガス遮断器 電磁流体解析 アーク 代替ガス

1. 研究開始当初の背景

電力系統用遮断器の消弧媒体として用いられている SF₆ は、温室効果係数が極めて大きいことから、SF₆ の代わりに CO₂ を用いた低環境負荷ガス遮断器の研究開発が現在精力的に進められている。しかし、現段階では、SF₆ ガス遮断器の代替として十分機能する CO₂ ガス遮断器の開発には至っていない。その最大の理由は、SF₆ と CO₂ ではガスそのものの消弧性能に歴然とした差があることによる。また、現在の SF₆ ガス遮断器の遮断方式（パuffer方式）を、単に CO₂ ガス遮断器に流用する場合、CO₂ ガスの消弧性能の低さを補うために遮断器が大型化すること、またそれに伴う機械的駆動部のエネルギー増加が予想されている。これらは、CO₂ ガス遮断器を市場に導入する際の大きな障壁になると懸念されている。

そこで、本研究では、CO₂ ガス遮断器の消弧性能の向上を目指し、永久磁石等の外部磁界を用いて、周囲ガス中でアークを高速回転させることでアーク冷却を促進させる「磁気ロータリ効果」を付加的な消弧技術として CO₂ ガス遮断器に採用することを考え、その有効性を確かめるための3次元電磁流体解析を実施することとした。

2. 研究の目的

本研究では、複雑な流路形状や機械的可動部を持つ実際の CO₂ ガス遮断器環境下で磁気ロータリ効果を解析できる非定常3次元電磁流体解析プログラムを開発し、その解析プログラムを用いて、

- (1) CO₂ ガス遮断器の消弧性能の向上に磁気ロータリ効果が実質的に有効に働くか否かを電磁流体解析から見極める。
- (2) 磁気ロータリ効果の有効性と印加磁束密度の関係を明らかにする。

3. 研究の方法

本研究では、他研究者により過去に開発された永久磁石利用外部磁界印加型 SF₆ ガスモデル遮断器の流路形状（図1：同遮断器の概略図）及び運転条件を解析条件として採用した。但し、消弧ガスには CO₂ を用いた。また、ここでは、周波数 50 Hz・実効値 5 kA の交流電流の遮断を想定し、約1周期分（20.05 msec）の解析を実施した。この約1周期分の時間で、電流ゼロ点を2回迎えるとし、2回目の電流ゼロ点を電流遮断点（時刻 t=20.05 msec）として考えた。基準とする印加磁束密度は、アークランナー（Arc-runner）表面付近で最大値（約 0.14 T）を持つ。本研究の目的(2)のために行う解析では、印加磁束密度条件を変更する必要がある。ここでは、基準となる印加磁束密度を定数倍（ここでは、2倍及び3倍）することでその条件を変更した。

電磁流体解析には、圧縮性及び電磁流体（MHD）相互作用を考慮した3次元非定常圧縮性 Navier-Stokes 方程式、定常近似された

Maxwell 方程式、及び電流連続式を基礎方程式に用いた。電流遮断過程時にはガスの温度・圧力は時間・空間的に大きく変化し、それに伴い、ガスの化学組成、熱力学的結量、また、種々の輸送係数も著しく変化する。本研究では、これらのガス物性の温度・圧力依存性を熱・統計力学及び Chapman-Enskog 理論に基づいて考慮した。流体場の基礎方程式の解法には、複雑な流路形状及び移動電極を考慮するための Cut-Cell 法が導入された有限体積法を採用し、その際に対流項の離散化には AUSM-DV スキームを、拡散項の離散化には中心差分を、時間積分には4次の Runge-Kutta 法を採用した。電磁場の基礎方程式から導かれる電位に関する2階の偏微分方程式は、ガラーキン有限要素法により離散化し、その結果導出される線形連立方程式の解法には反復法の一つである Bi-CGSTAB2 を用いた。得られた電位分布から電界分布を求め、それを一般化されたオームの式に代入することで電流密度分布を求めた。なお、莫大な計算負荷に対応するため、並列計算用の PC クラスタを自ら構築するとともに、解析プログラムもそれに併せて開発した（MPI による並列計算プログラム）。

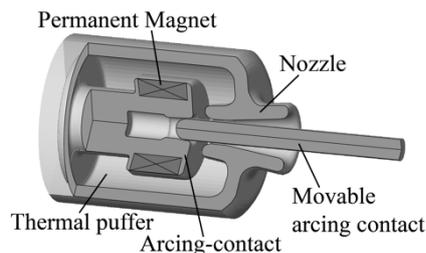


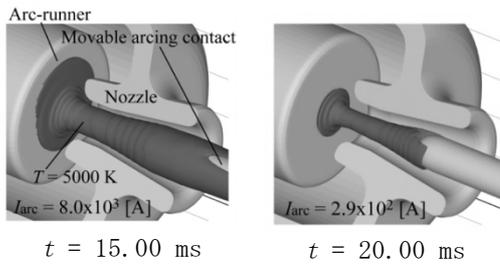
図1 外部磁界印加型ガス遮断器の概略

4. 研究成果

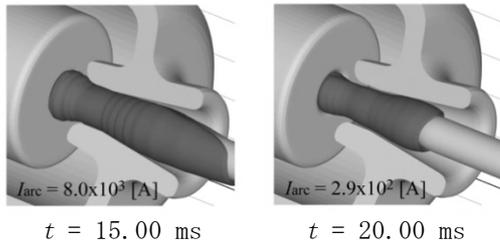
(1) 磁気ロータリ効果の有効性の検証

ここでは、基準とした印加磁束密度分布条件下での電磁流体解析から、磁気ロータリ効果の有効性を調べた結果について述べる。

図2に電流波高値付近（t=15.00 msec）及び電流ゼロ点直前付近（t=20.00 msec）のアーク形状を示す。また同図には比較のために磁界を印加しない場合のアーク形状も併せて示した。なお、ここでは電気伝導率と温度の関係から、温度 5000K の等温面をアークの外縁と見なし、アーク形状を可視化している。この図から、磁界を印加することでアークが絞られている様子が確認できる。このアーク形状に与える印加磁界の効果は、ローレンツ力による高速旋回流の発生に起因する（図3）。磁界を印加した際には、旋回方向のローレンツ力がアークに作用し、旋回速度成分を持ったアーク（磁気ロータリアーク）が生じる。電流波高値付近でそのローレンツ力は最も強くなり、アークランナー付近では最大 500m/s 程度の旋回速度成分が生じる。この高速旋回流に起因して周囲の低温ガスへの



(a) with magnetic field



(b) without magnetic field

図2 CO₂環境下でのアーク形状

((a) 印加磁界あり、(b) 印加磁界なし)

熱輸送が促進され、アークは細くなる。また、アークと周囲ガスの圧力差に加え、この旋回速度成分により生じる遠心力で熱パuffer室（図1の“Thermal puffer”）に向かう流れも磁界を印加することで促進される。そのため、図4に示すように磁界を印加しない場合に比べて熱パuffer室の圧力上昇量も増える。結果として、熱パuffer室とノズル出口の圧力差も磁界を印加した場合の方が大きくなる。そのため、熱パuffer室からのガス吹きつけによるアークの冷却効果も磁界印加時の方が強くなり、このことからアークは細くなる。

図5にアーク電流とアークコンダクタンスの関係を示す。磁界を印加すると磁気ロータリ効果によりアークの冷却が促される。そのため、アーク温度（電気伝導率）は低下し、アーク形状は細くなる。それ故、磁界を印加することでアークコンダクタンスは低下する。取り分け、ガス遮断器の消弧性能に大きな影響を与える電流ゼロ点付近（小電流領域）で、その低下は顕著である。

以上より、CO₂ガス遮断器の消弧性能向上に磁気ロータリ効果が有効に働く可能性があることを示すことができた。

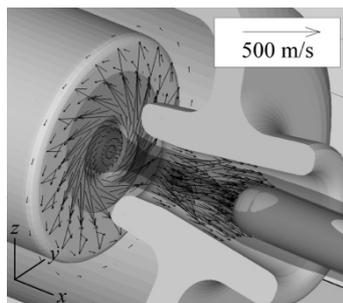


図3 電流波高値付近 ($t = 15.00$ ms) での流速ベクトル分布

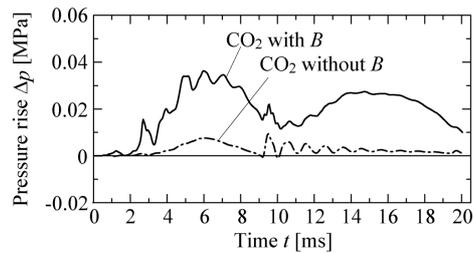


図4 熱パuffer室内の初期圧力 (0.5MPa) からの圧力上昇量

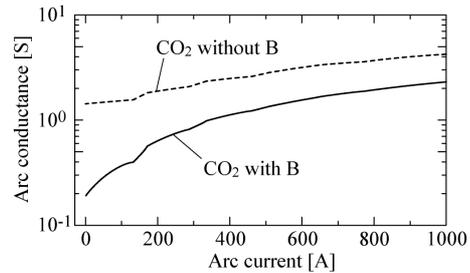


図5 アークコンダクタンス

(2) 磁気ロータリ効果の有効性と印加磁束密度の関係

ここでは、磁気ロータリ効果の有効性と印加磁束密度の関係について解析した結果を簡単に述べる。なお、計算負荷削減のため、周波数50 Hz・実効値5 kAの交流電流に対し、半周期分相当（約10msec）程度の解析を実施した。また、電極の移動は考慮せず、電極間距離は一定とした。

図6に3つの磁束密度条件（但し磁界の方向はいずれも同じ）に対する電流波高値付近のアーク形状を示す。なお、図中のB=1とは、基準での印加磁束密度条件（最大磁束密度0.14 T）を意味し、B=2、B=3とは、それぞれ、基準の磁束密度を2倍、3倍した条件を意味する。同図から印加磁束密度を強めると、アーク半径が細くなるのがわかる。

図7にアークコンダクタンスと印加磁束密度の関係を示す。この図から、印加磁束密度を強めることは、アークコンダクタンスの低下をもたらし、ガス遮断器の消弧性能の向上に繋がることが示唆された。但し、磁場を印加しない場合と基準(B=1)の磁界を印加した場合のアークコンダクタンスの差に比べると、B=2、B=3の磁束密度を印加した場合のアークコンダクタンスの低下量の伸びは小さい。すなわち、アークコンダクタンスの低下量は磁束密度の値に対して単調に増加するのではなく、ある一定以上の磁束密度になると飽和傾向を示すことが示唆された。

以上述べた研究成果より、本研究の目的は概ね達成しており、この成果を踏まえて、実験的研究に移行するための準備を今後進める予定である。最後に、この研究を通して、興味深い物理現象も確認されたので、以下に簡単に述べる。

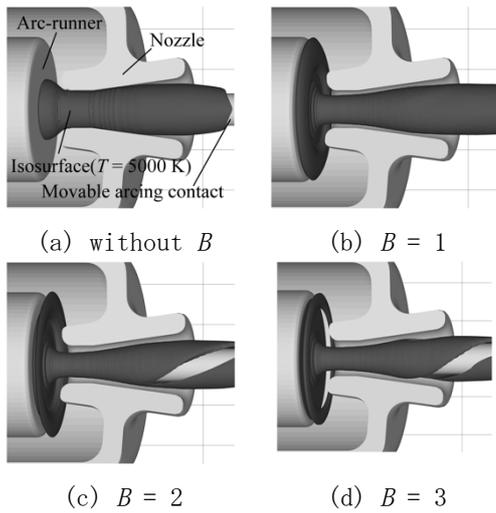


図6 各磁束密度条件での電流波高値付近のアーク形状

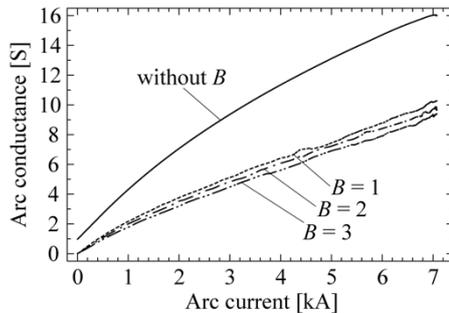


図7 アークコンダクタンスと印加磁束密度の関係

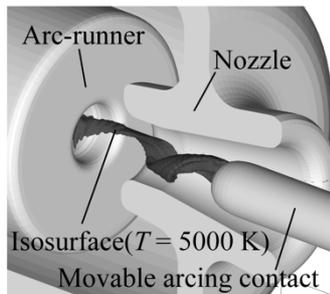


図8 SF₆環境下での電流ゼロ点直前のアーク形状

過去に、SF₆ガス環境下で磁気ロータリ効果に関する解析を、本研究と同一のモデルガス遮断器を対象に実施しており、その際に得られたロータリアークは、図8のようにスパイラル形状を示した。一方、本研究で対象としたCO₂環境下でのロータリアークは、図2のように磁界を印加しない場合と同じく円筒形を保ったまま高速で回転している。現段階では、アーク形状のガス種依存性の原因は明らかになっておらず、この解明も今後の研究課題の一つとして考えている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① 平山智士、木内健人、藤野貴康、石川本雄、森正、岩本勝治、河野広道、「印加磁界環境下でのCO₂アークとSF₆アークの比較」、電気学会論文誌 B、査読有、Vol. 133、No. 11、2013、pp. 843-850、DOI: 10.1541/ieejpes.133.843

[学会発表] (計6件)

- ① T. Takematsu, S. Hirayama, T. Fujino, M. Ishikawa, S. Ogawa, and T. Mori, "CO₂ Arc Behavior During Current Interruption Process in a Gas Circuit Breaker with Externally Applied Magnetic Field," 20th International Conference on Gas Discharges and Their Applications, July 6 to 11, 2014, Orléans (France) (発表予定)
- ② 竹松俊彦、藤野貴康、「外部磁界印加型CO₂モデルガス遮断器の消弧過程に与える印加磁束密度および封入圧力の影響」、電気学会放電・静止器・開閉保護合同研究会、ED-14-062 SA-14-049 SP-14-018、2014年6月9日、金沢(発表予定)
- ③ 竹松俊彦、平山智士、藤野貴康、吉野智之、小川慧、森正、「異なる印加磁界環境下におけるモデルガス遮断器内のCO₂アークプラズマ挙動」、平成26年電気学会全国大会、6-288、2014年3月20日、松山
- ④ 竹松俊彦、平山智士、藤野貴康、石川本雄、小川慧、森正、「外部磁界印加型ガス遮断機におけるCO₂ガスとSF₆ガスの熱輸送特性の比較」、電気学会新エネルギー・環境研究会、FTE-13-34、2013年9月26日、長岡
- ⑤ 竹松俊彦、平山智士、藤野貴康、石川本雄、小川慧、森正、「外部磁界印加型ガス遮断器におけるCO₂アークの熱輸送特性」、電気学会放電・静止器・開閉保護合同研究会、ED-13-065 SA-13-038 SP-13-010、2013年6月24日、那覇

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤野 貴康 (FUJINO TAKAYASU)

筑波大学・システム情報系・准教授

研究者番号：80375427