

令和 2 年 7 月 7 日現在

機関番号：24201

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K13746

研究課題名（和文）磁気スパイラルアーク方式による高速度直流遮断技術の新提案

研究課題名（英文）A new proposal of magnetic spiral arc method for high speed DC interruption

研究代表者

平山 智士（Hirayama, Satoshi）

滋賀県立大学・工学部・講師

研究者番号：70759274

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、外部印加磁場によりアーク放電の特性を制御できる点に注目し、新たな直流遮断技術として磁気スパイラルアーク方式を提案し、3次元非定常電磁流体解析により、提案手法の有効性を検討した。解析結果より、磁場を印加しない場合には電流零点が生じない条件においても、外部磁場の印加により速やかに電流零点が生じることを示し、直流遮断における外部磁場印加の有効性を示唆することができた。さらに、スパイラルアークの形成に必要な外部印加磁束密度とその分布に関する指針を示すことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、ネットワーク型直流送電システムの実現に向けた技術課題の一つである高速度直流遮断技術に対して、外部印加磁場を利用した新たな直流遮断方式として磁気スパイラルアーク方式を提案しており、申請者の独自のアイデアに基づくものである。さらに、提案方式の有効性を示せたことで、新たな機械アーク方式直流遮断器の開発に対して大きなインパクトを与えるものと考えている。また、強い外部磁場が印加された遮断器内部のアーク放電の3次元非定常挙動を解析した研究はほとんど報告されておらず、アーク放電の消弧現象の理解という学術的な観点からも大いに意義のある成果であると考えられる。

研究成果の概要（英文）：The present study proposed a magnetic spiral-arc method as a new DC interruption technique, and examined the effectiveness of the proposed method by using three-dimensional unsteady magnetohydrodynamic analysis. Numerical results demonstrated that the current zero point is quickly generated by applying an external magnetic field, and the effectiveness of the magnetic spiral-arc method was shown. In addition, the externally applied magnetic flux density and its distribution required for the formation of spiral-arc were clarified.

研究分野：電磁流体工学

キーワード：直流遮断 電磁流体解析 外部印加磁場 アーク放電

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

持続可能な社会の実現に向けて、既存の火力・原子力エネルギーから再生可能エネルギーへの転換が望まれる。風力エネルギーや太陽光エネルギーはその代表例であり、風速や日射量といった自然条件を十分に満たす地域において、大規模なウィンド・ソーラーファームの建設プロジェクトが国内外で進められている。時間的な変動成分を多量に含む、これらの再生可能電力を人口集中地区まで輸送するためには直流送電網の整備が不可欠である。大容量自己遮断素子の技術発展により、系統安定性に優れた電圧源コンバータを用いたネットワーク型直流送電システムが技術的に可能となったため、その実現に向けて、基幹技術の開発が行われている。

直流系統では電流零点が存在しないために交流に比べて電流を遮断することが技術的に難しく、事故の波及が速いネットワーク型直流送電システムの実現には、直流電力の高速度遮断技術の確立が課題となっている。従来の機械アーク方式遮断器は、アーク放電部で生じたわずかな電流・電圧変動を LC 共振回路により増幅し電流零点を生成する仕組みであるが、このプロセスに時間がかかり過ぎるために直流送電システムに要求される遮断時間を達成できていなかった。

2. 研究の目的

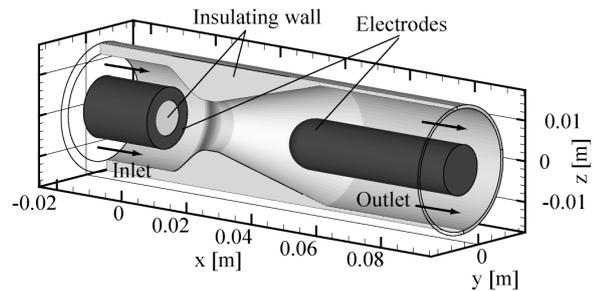
本研究では、外部印加磁場によりアーク放電の特性を制御できる点に注目し、新たな直流遮断技術として磁気スパイラルアーク方式を提案する。電磁流体解析により、遮断器内部のアークがスパイラル化する条件に関して検討し、さらに、提案方式の有効性を示すことを目的としている。

アーク放電に対して外部から磁場を印加すると、この外部磁場と放電部分を通る電流の相互作用によりアーク放電部に強いローレンツ力が作用し、アーク柱は回転するとともに 3 次元螺旋状構造へ変化する。さらに、アーク柱の一部がアーク柱の他の部分や電極に接触することで短絡し、一瞬でアーク柱は短くなる。これらのアーク放電部の構造の変化を利用して周期的かつ大きな電圧変動を生じさせることが磁気スパイラルアーク方式の原理である。

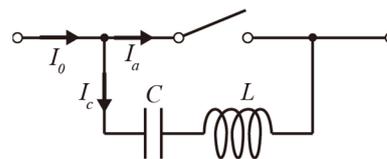
3. 研究の方法

磁気スパイラルアーク方式では、3次元非一様性と非定常性が強く表れるため、3次元非定常電磁流体解析により検討を行う。本研究ではアーク放電の生じる接点部分(図 1(a))を対象にした 3次元非定常電磁流体解析と LC 共振パスと接点部から構成される回路(図 1(b))の解析を連成させることで検討を行った。接点部分には超音速ラバルノズルの上流と下流に一对の電極を配置したパフファ型遮断方式を採用した。消弧ガスには電流遮断能力に優れた SF₆ ガスを用いた。また、共振パスのキャパシタ、コンダクタと系統直流電流値に関しては、紀伊水道直流送電で用いられた機械アーク方式直流遮断器を参考に決定した。

電磁流体解析には、電磁流体(MHD)相互作用を考慮した圧縮性流体に対する質量・運動量・全エネルギー保存方程式、準定常近似されたマクスウェル方程式、電流連続の式、ビオ・サバルの式を基礎方程式に用いた。なお、電磁流体解析の膨大な計算負荷を克服するため、分散



(a)機械接点部



(b)回路構成

図 1 機械アーク方式遮断器の概略

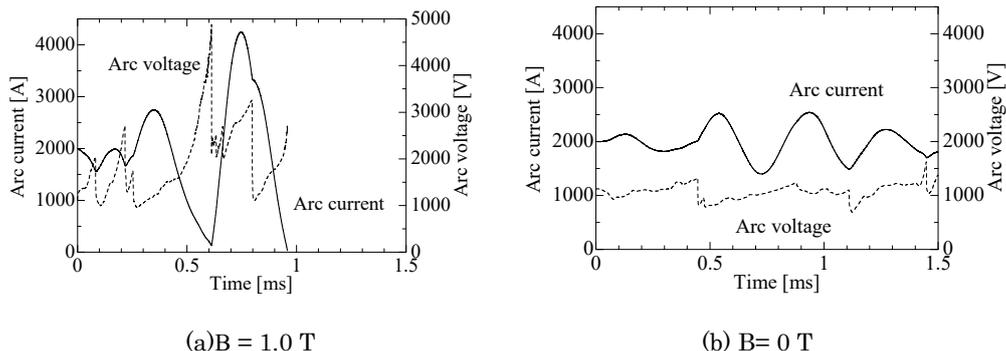


図 2 アーク電流とアーク電圧の時間変化

メモリ型計算機クラスターを構築し、解析プログラムを MPI 並列計算ライブラリにより並列化させることで計算時間を短縮させた。

4. 研究成果

(1) 磁気スパイラルアーク方式の有効性の検討

電磁流体解析と電気回路の連成解析を用いて、機械接点部に印加する外部印加磁場の有無を条件とした解析結果を比較することにより、磁気スパイラルアーク方式の有効性を検討した。解析の手順としては、外部磁場を印加せずに電極間にアーク放電を生成し、接点間の電圧（アーク電圧と呼ぶ）と電磁流体場の時間的な変動が小さくなった後に、図 1(a)に示した全領域に様に 1.0 T の外部磁界を x 軸の向きに印加しはじめた。

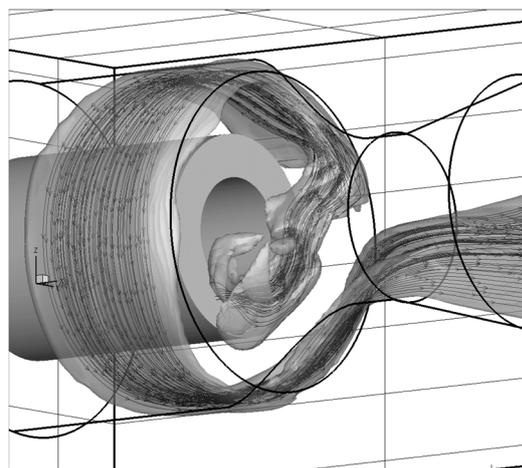
図 2(a)に外部磁場を印加した条件の電流電圧波形、(b)に外部磁界を印加しない条件の波形を示す。磁場を印加した条件が、本研究で提案する磁気スパイラルアーク方式である。図 2(a)の電流波形には、外部磁場印加直後から大きな変動が生じており、1ms 以内で電流零点が生じている。アーク電圧の変化に注目すると、電圧が上昇した後で急峻に低下する波形が繰り返し生じており、電圧降下が生じる時刻においてアーク電流の振幅も増大することが分かる。対して、磁場を印加しない条件、すなわち従来の機械アーク方式の結果では、アーク電流に振動は見られるものの振幅は増加せず、電流零点も生成されていない。

図 3 にアーク柱の短絡が起こる時刻前後でのスパイラルアークの構造変化を示す。この短絡の生じる時刻はアーク電圧の降下が起こる時刻と一致する。なお、消弧ガスである SF_6 は温度 5000K 程度で電離反応が活性化し、電気伝導率が上がるため、ここでは、この温度の等値面をアークの外縁と見なしてアークの構造を可視化している。図からわかる通り、外部磁場を印加した条件では、スパイラルアークが形成されており、このスパイラルアークはローレンツ力の向きに回転している。スパイラルアーク内の電気伝導率は高く、電流はスパイラルアークに沿って流れるため、アークの長さとともにアーク電圧も高くなる。そして、短絡が起きると一瞬で、最短経路を通るように電流の流れが変化し、アーク電圧の降下を生じる。ただし、このスパイラルアーク構造は、ノズルのくびれであるスロートより上流域にのみ見られ、スロート下流では直線状のアーク構造のみが見られた。スロート下流では、流れが音速より速い超音速流れになっており、超音速流れによりアークが流されるために直線状になったと考えられる。

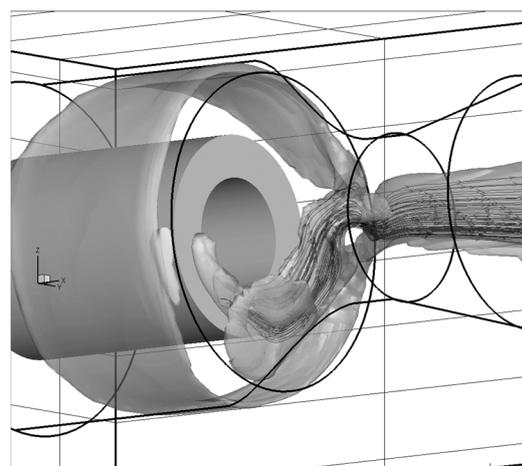
以上より、外部磁場の印加によりスパイラルアークを生成することで、速やかに電流零点を生じさせ、高速度直流遮断に繋がる可能性を示すことができた。

(2) スパイラルアークを形成させるために必要な外部印加磁場条件の検討

外部から印加する磁場が弱い場合にはアークは流されてしまいスパイラルアークが形成されないことが懸念されるため、スパイラルアークの形成に必要な外部印加磁束密度とその分布に関して検討を行った。上述の研究成果(1)において、スロート上流域でのみスパイラルアークが形成されたことから、スロート上流域で強い磁場が得られるように磁場分布を図 4 に示すように決定した。ここでは、ソレノイドコイルを仮定し、コイル中心位置での外部印加磁束密度が 0.5T, 1.0T となるように磁場分布を計算した。また、この検討においては磁束密度の影響に焦点を当てるため電流に関しては一定値として



(a) $t = 0.75$ ms



(b) $t = 0.80$ ms

図 3 短絡前後でのスパイラルアークの構造変化（等値面：温度 5000K，流線：電流密度）

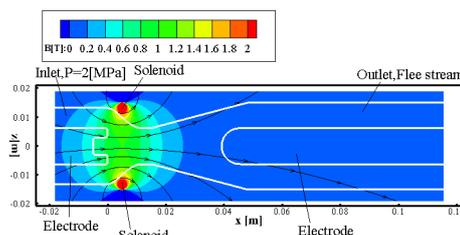


図 4 ソレノイドコイルによる外部印加磁束密度の分布

いる。

図5に異なる印加磁束密度条件でのアーク電圧の経時変化を示す。1.0T程度の外部磁場を与えた条件では、アーク電圧に大きな変動が生じており、これはスパイラルアークが形成されたことによる。この結果は、スロート上流域のみに強い磁場を与えるだけでもスパイラルアークを形成させ、大きな電圧変動を生じさせることができることを示唆している。一方で、0.5Tの磁場を与えた条件では、磁場を印加しないアーク電圧と同様に電圧の変化は小さく、この印加磁束密度では、スパイラルアークの形成には不十分であることがわかる。

以上の研究成果より、本研究の目的は概ね達成できている。実験的研究に移行し、高速度直流遮断に対する磁気スパイラルアーク方式の有効性を実証することが今後の研究課題であると考えている。

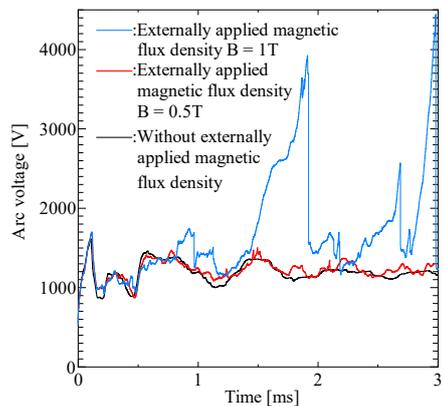


図5 異なる印加磁束密度条件でのアーク電圧の経時変化

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 金井 豊, 平山智士, 乾 義尚, 加藤裕明
2. 発表標題 電流遮断時における配線用遮断器のアーキ温度減少過程に関する数値解析
3. 学会等名 令和2年電気学会全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山岡智裕, 平山智士, 乾 義尚
2. 発表標題 ラバルノズル内のロータリアーキに与える外部印加磁束密度の影響
3. 学会等名 令和2年電気学会全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Hirayama, Y. Kanai, Y. Inui, H. Kato
2. 発表標題 Numerical Analysis of Unsteady Arc Plasma Behavior in Low Voltage Circuit Breaker
3. 学会等名 The International Council on Electrical Engineering Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山岡智裕, 平山智士, 乾 義尚
2. 発表標題 直交格子Cut-Cell法を用いたラバルノズル内におけるロータリアーキの数値解析
3. 学会等名 電気学会放電・プラズマ・パルスパワー・開閉保護・高電圧合同研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 金井 豊, 平山智士, 乾 義尚
2. 発表標題 配線用遮断器の電極開極にともなうアーク挙動の3次元非定常数値解析
3. 学会等名 電気学会放電・プラズマ・パルスパワー・静止器・開閉保護合同研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Satoshi Hirayama
2. 発表標題 Influence of externally applied magnetic field on arc plasmas in a passive resonance direct current circuit breaker
3. 学会等名 International Conference on Electrical Engineering (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 平山智士
2. 発表標題 LC共振回路に並列接続されたDCロータリアークの数値解析
3. 学会等名 電気学会新エネルギー・環境研究会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----