

令和元年6月20日現在

機関番号：32692

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06243

研究課題名(和文)次世代高電圧直流送電を可能にする液中アークプラズマを用いた新しい遮断器の基礎研究

研究課題名(英文) Research and development of new main circuit breaker with liquid arc for multi terminal high voltage direct current transmission

研究代表者

新海 健 (SHINKAI, Takeshi)

東京工科大学・工学部・教授

研究者番号：00758295

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：液中アークチャンバーで直流電流を限流し主遮断器で遮断を行う新しい高電圧直流送電用の遮断器を構想した。液体中でチューブにより高圧力・高密度の液体層を生成しアークを安定化することで、アーク抵抗を向上することができるようになった。ハイドロフルオロエーテル中ではわずか50mmギャップでもアーク電圧3kV超を得ることができる。これらの知見に基づき限流コンポーネントのモデル器を試作し限流実験を行った。実際の適用系統電圧により、ギャップ長を延ばすか、コンポーネントを直列に並べることで実用的な限流効果を得られる。開極速度は速いほど限流効果は高くなり、電磁アクチュエータなど高速機構の併用も効果的である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究において、高電圧直流送電主回路用遮断器の新たな原理・コンセプトを提案した。液中アークの基本特性が明らかになり、アーク電圧を向上する手法を見出すことができた。これにより、新たな高電圧直流送電主回路用遮断器への適用可能性を確立することができた。

近年液体中プラズマは新しいプラズマとして注目されており、主にその反応場としての役割が注目されている。一方で、その物理的なメカニズムや放電形態、電流波形との相関、水以外のプラズマの特性など、まだ未知の部分も多い。本研究は、広く液体中プラズマの新しいアプリケーション開発に寄与する基盤作りの一助となることが期待される。

研究成果の概要(英文)：We have researched new concept for HVDC-CB with the hybrid structure of the current limiter and the mechanical switch. Higher arc voltage in liquid arc is used for direct current limiting in the current limiter. The mechanical switch plays a role for final current interruption and insulation after interruption. We studied arc voltage in liquid arc stabilized with resin tube in some liquid materials (water, silicon oil, hydro fluoroether...). The arcing voltage more than 3kV was obtained with only 50mm gap. Fault current interruption in 10kV HVDC transmission system was simulated in EMT/ATP with the new concept HVDC-CB using measured arc voltage. The HVDC-CB cannot interrupt the fault current due to lack of the limiting effect and arc voltage more than five times of the measured value is necessary for successful interruption. Further research will be performed for improvement of liquid arc voltages and necessary time for interruption.

研究分野：電力工学

キーワード：限流器 遮断器 直流送電 アーク 液中プラズマ

# 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

従来の長距離や海底の電力輸送を目的とした高電圧直流送電では二端子送電網が一般的であったが、次世代の高電圧直流送電は、洋上風力発電の普及などにより比較的短距離で複数ポイントを相互接続する多端子の直流送電網が必要になると考えられる。この場合、高い信頼性と低損失、小型、低コストの主回路用の新しい高電圧直流遮断器が不可欠である。しかし、従来の半導体と機械式併用遮断器は、電力損失、冷却系と高速機構の必要性の点に課題がある。代表者らは閉鎖系の中で交流アークを発生させると 10MPa を超える圧力上昇が発生し、通常の SF<sub>6</sub> ガス遮断器の 20 倍以上のアーク電界が得られることを見出した。直流電流遮断時に発生するアークが自分自身で優れた限流能力を発揮することを示唆するものである。高電圧化においては、水中アーク部は限流素子のみの役割とし、直列に接続した機械式遮断器に電流遮断能力および耐電圧能力を期待することで、全体として小型、低コストでなおかつ信頼性の高い遮断器を実現できるのではないかと考えた。

## 2. 研究の目的

本研究では、上記課題を解決する純機械式の限流コンポーネントと、環境低負荷の機械的スイッチを用いたハイブリッド型遮断器開発を目指す。特に、密閉容器の液体中アークプラズマで、高圧力・高密度雰囲気を得られプラズマ電界が急上昇することを活用した限流コンポーネント開発に注力する。開放系液体中アーク、続いて密閉容器中の液体中アークについて、発生メカニズムと熱流体的物理特性、電気的物理特性を明らかにし、新型遮断器の基本設計を行う。

## 3. 研究の方法

### (1) 平成 28 年度

観測の比較的容易な開放系の液体中アークプラズマの実験を中心に実施し、生成メカニズムと物理特性を把握する。液体は水、シリコンオイル、パーフルオロカーボンなどを想定している。電源は 20kV-300 μF 程度のコンデンサバンクを用いて直流状アークを発生する。

### (2) 平成 29 年度

閉鎖系(密閉容器中)の液体中アークプラズマの実験を中心に実施し、生成メカニズムと物理特性、特に圧力上昇の様相とアーク電界の挙動を把握する。

### (3) 平成 30 年度

29 年度までの物理特性の取得データ、シミュレーション結果を基に、限流ユニットの設計を行い、製作、限流実験を行う。また、直流系統において故障電流遮断シミュレーションを実施する。

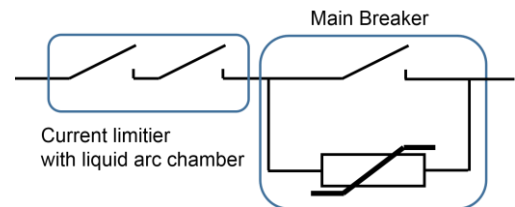


図1 HVDC-CBの新しいコンセプト

## 4. 研究成果

### (1) 新しい高電圧直流送電用遮断器の構想

本研究で構想した高電圧直流送電用の遮断器のコンセプトを考案した。液中アークチャンバーで直流電流を限流し、主遮断器で遮断を行うものである。

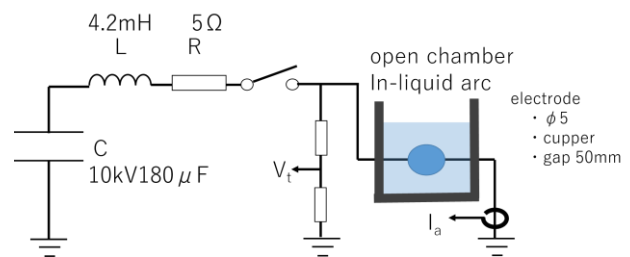


図2 実験装置概要

### (2) 液中アークの基礎特性取得

図2 実験装置の概要を示す。図2には開放系のチャンバーを示している。図3には電極周辺にチューブを設ける構造を示す。アークを安定化するとともに過渡的には密閉化と同様の効果がある。

図4に水中とハイドロフルオロエーテル中のアークの様子を撮影した高速カメラ(10000fps)画像を示す。水中では、水の高い比熱により熱ピンチ効果が強く、アークは時間とともに収縮し、アークの抵抗率は低下することが明らかになった。ハイドロフルオロエーテル中では、比熱と粘性が相対的に小さいことからアークが著しく膨張し、アークの抵抗率も大きく上昇する有望な結果が得られた。

次に、ハイドロフルオロエーテル中のアークを対象に、チューブで安定化し膨張を

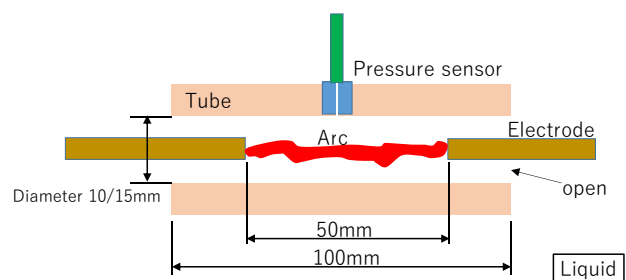


図3 チューブ形状

抑制することでさらにアーク抵抗をあげられないか実験で検証した。その結果、チューブ内径 15mm がもっともアーク抵抗の上昇効果が大きく、わずか 50mm のギャップで 3kV を超えるアーク電圧が得られ、チューブの無い場合の 20 倍近いアーク抵抗を示した。チューブ内径をこれより細くするとチューブ材料のアブレーションが引き起こされ、アーク抵抗上昇には逆効果であることがわかった。測定の結果、チューブ内の圧力は過渡的に実に 35MPa に達することがわかった。アーク抵抗上昇にはアブレーションガスよりアーク周辺に高密度・高圧力の液相が存在することが重要であることが明らかになった。図 5 に各種条件におけるアーク電流と電圧の関係を示す。

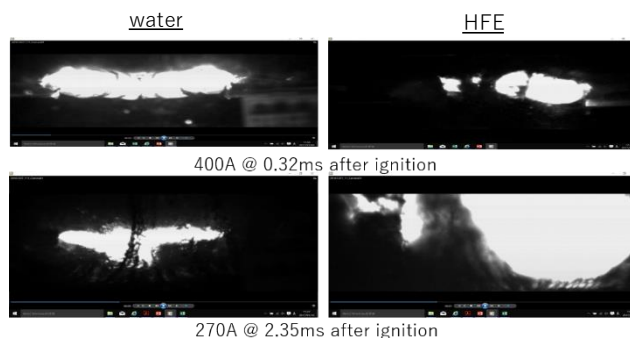


図4 液中アークの高速カメラ画像

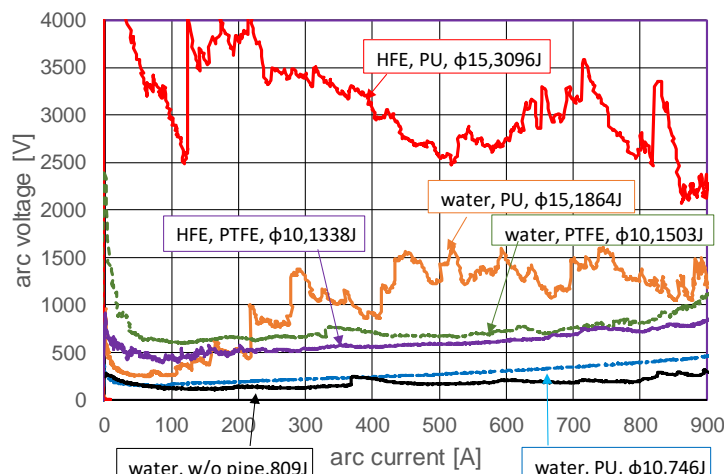


図5 各種条件の液中アークの電流-電圧特性

### (3) 限流実験

基礎実験においてハイドロフルオロエーテル中でチューブによりアークを安定化すると高いアーク抵抗が得られたため、この知見を基に限流チャンバーを製作した。35MPa の圧力上昇に耐えられるよう小径化を図った。密閉化でトリガワイヤによるアーク点弧が難しいため、空気シリンダを用いた電極駆動装置を製作した。

限流遮断実験の結果、アーク抵抗は瞬間的には 5Ω 程度まで上昇し、限流して遮断することができた。ただし遮断点において電源のコンデンサバンク電圧は 4kV 程度まで減衰しており、電源容量が十分でないために容易に遮断できた可能性もあった。このため、遮断シミュレーションを実施することとした。



図6 試作した液中アーク限流チャンバー

### (4) 遮断シミュレーション

実験によって得られたアーク特性をモデル化し、10kV の 2 端子直流送電システムを想定し、故障電流遮断の数値シミュレーションを EMTP-ATP を用いて実施した。図 8 にシミュレーション結果を示す。時刻 0.01s で地絡が発生し、0.03s で限流チャンバーにアークを点弧すると地絡電流は限流されている。しかし、遮断には至っていない。このため、アーク抵抗を実験値よりも上げてシミュレーションを行った。図 9 にシミュレーション結果を示す。10kV 送電システムで限流遮断成功するためには、実験で得られたアーク抵抗のさらに 2 倍程度が必要であることがわかった。これは、ギャップ長 2 倍もしくは、限流チャンバーを 2 ユニット直列に接続することで実現可能である。また、開極速度の高速化も必要であることが明らかになった。

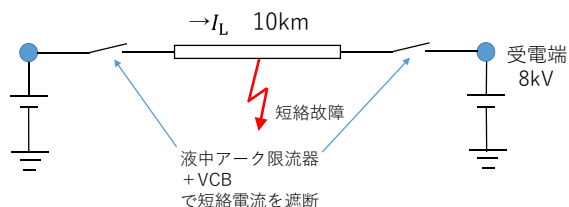


図7 遮断シミュレーションの系統図)

### (5) 開極高速化の検討

限流チャンバーの開極高速化のために、電磁反発力を用いた高速アクチュエータ適用を検討し机上設計を行った。構成の概要を図10に示す。検討の結果、3.6kV3300 $\mu$ Fのコンデンサのパルス電流で初期速度2m/s、変位量50mm程度が得られる見込みとなった。

### (6) まとめ

液体中アークの基本特性を把握し、チューブにより高圧力・高密度の液体層を生成しアークを安定化することで、アーク抵抗を向上することができるようになった。ハイドロフルオロエーテル中ではわずか50mmギャップでもアーク電圧3kV超を得ることができる。液中アークの基本特性に基づき限流コンポーネントのモデル器を試作し限流実験を行った。実際の適用電力系統電圧により、ギャップ長を延ばすか、コンポーネントを複数並べることで実用的な限流効果を得られると考えられる。限流コンポーネントの開極速度は速いほど限流効果は高くなり、電磁アクチュエータなど高速機構の併用も効果的である。本研究により、高電圧直流送電主回路用の限流型遮断器への適用可能性を確立することができた。

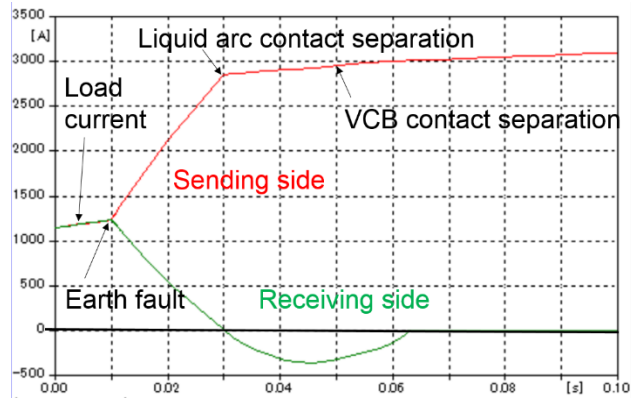


図8 遮断シミュレーションの結果(ケース1)

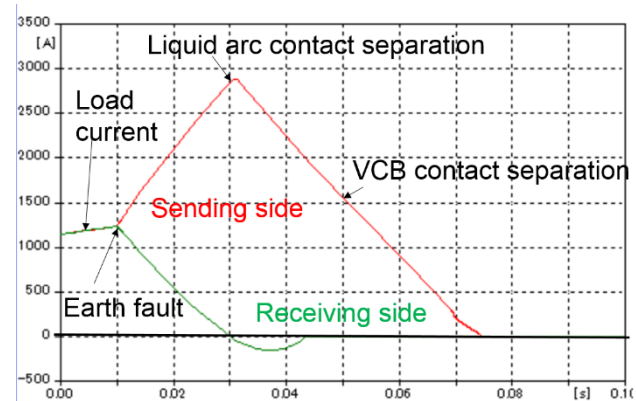


図9 遮断シミュレーションの結果(ケース2)

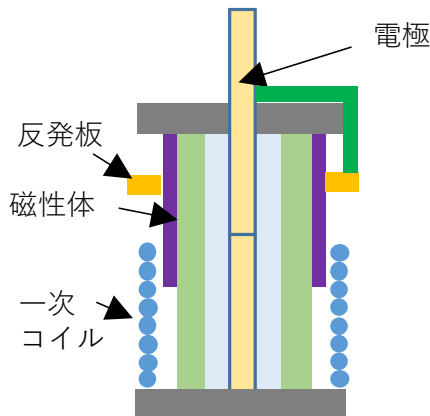


図10 電磁アクチュエータの構成案

## 5. 主な発表論文等

[学会発表] (計5件)

- (1) 横山拓海、新海健、”短絡電流による電磁反発を用いた高速駆動機構の基礎研究”、電気学会 全国大会、2019
- (2) Takeshi Shinkai, Tomoya Fujita, Taisei Muto, Takumi Yokoyama, Minoru Hara, ”Current Limiting with Liquid arc for HVDC-CB”, 10th International Conference on Power, Energy and Electrical Engineering (CPEEE)、2019
- (3) 武藤泰瀬、武藤涼、中島慎二、新海健、原実、高木茂行、腰塚正、”直流液中アークの限流特性”、電気学会 電力・エネルギー部門大会、2018
- (4) 上野晟也、堀越信平、小出真平、谷口淳、高畔竜太、新海健、高木茂行、腰塚正、”チューブ内の液体中直流アークの基礎特性”、電気学会 全国大会、2018
- (5) 新海健、野呂拓己、榎本淳、高橋宣之、高木茂行、腰塚正、”液体中直流アークの基礎特性”、電気学会 全国大会、2017

## 6. 研究組織

- (1)研究分担者 なし。