

令和 5 年 5 月 31 日現在

機関番号：32407

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04421

研究課題名（和文）直流高電圧のアーカ放電遮断に効果的な封入気体とアーカ放電抑制機構の解明

研究課題名（英文）A study of gas filling and arc discharge suppression mechanism effective for interrupting arc discharge at DC high voltage

研究代表者

吉田 清（Yoshida, Kiyoshi）

日本工業大学・基幹工学部・教授

研究者番号：60220638

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：電磁コンタクタの電気接点を大気中と水素ガス中で開閉を行い、発生するアーカ放電に与える負荷条件、周囲気体および気体圧力の影響を交流回路のもとで調べた。さらに、接触抵抗値に与える影響を検討した。その結果、アーカ放電の抑制効果は水素ガスが顕著で、ガス圧が高い方がアーカ放電を短縮できることを示した。その上、接触抵抗値は、水素ガス中では小さく安定した。また、誘導性負荷では、抵抗負荷に比べアーカ放電抑制効果が小さいことが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電気接点に生じるアーカ放電を短時間で消弧するためには、水素ガス中に電気接点を設置することが効果的である。水素ガスが封中された電磁コンタクタが太陽光発電や電気自動車（EV）などの直流回路では実用化されている。本研究では、交流回路のもとで負荷条件とガス圧力がアーカ放電の抑制に与える影響を調査した。水素ガスのアーカ抑制効果と負荷条件との関連、および接触抵抗を低く抑える効果を示した点において、既存の関連する機器の性能向上に寄与する成果である。

研究成果の概要（英文）：The electrical contact of the electromagnetic contactor was opened and closed in the air and hydrogen gas, and the effect of the load condition, ambient gas and gas pressure on the generated arc discharge was investigated under an AC circuit. Furthermore, the effect on the contact resistance value was examined. As a result, it was shown that the effect of suppressing arc discharge is remarkable with hydrogen gas, and that arc discharge can be shortened with higher gas pressure. Moreover, the contact resistance value was small and stable in hydrogen gas. In addition, it was found that the inductive load is less effective in suppressing arc discharge than the resistive load.

研究分野：電気接点

キーワード：電気接点 電磁コンタクタ 水素 アーカ放電 接触抵抗

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 電気接点を直流高電圧 (100 ~ 1,000V 程度) で使用する場合、アーク放電で電流が通電し、アーク放電を消弧 (遮断) するには接点間に大きなギャップ長 (間隔) が必要となる。交流電源では、アーク放電は電源の極性が反転するゼロクロス点で比較的容易に消滅する。しかし、直流電源では、電源の極性が変化しないためアーク放電が持続して、電流が流れ続け、回路が遮断不能に陥ることがある。最悪の場合には火災を引き起こす危険がある。アーク放電の遮断能力を確かめるため、「電磁コンタクタ」を各種気体中に設置してアーク放電継続時間を比較する実験を行ったところ、水素ガス中のアーク放電の継続時間はヘリウムの 1/7 倍と短く、アーク放電抑制の効果が極めて大きいことが明らかになっている。

(2) アーク放電を抑制する方法には、以下の 4 つの方法が考えられる。A. アーク電流と磁束との間で生じるローレンツ力で強制的にアーク放電を引き延ばし消弧させる。B. アーク放電に高速に空気を吹き付け遮断する。C. 電気接点到コンデンサ C やインダクタンス L と抵抗 R を直並列に挿入して、アーク電流を回路に分流してアーク放電の発生を抑える。D. アークを消弧する効果の高い封入気体中に電気接点を設置する。A. ~ C. は、国内外に研究報告があるが、D. の封入気体によるアーク放電消弧の研究報告はほとんどない。そこで、封入気体によるアーク抑制効果を確認する必要があると考えた。

2. 研究の目的

過去の研究成果として、直流電磁コンタクタの電気接点に発生するアーク放電を各種の周囲気体 (例えば、空気、窒素、酸素、ヘリウム、水素) のガス中で実験を行い、水素が最もアーク放電の抑制効果が高く、空気中の 1/7 程度になることを明らかにしている。これらの実験は直流電源回路のもとで行われた。一般に電磁コンタクタは交流回路で数多く使用され、用途も様々である。本研究では、実際の電磁コンタクタを大気と水素ガスの中で開閉させて、発生するアーク放電を観測する。回路条件は抵抗負荷と誘導性負荷とし、誘導性負荷では力率を 0.6 ~ 0.9 の範囲で設定した。研究では、負荷条件、気体と圧力、アーク電圧・電流波形、および接触抵抗など関連する各種特性への影響を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 電磁コンタクタの構造を図 1 に示す。電磁コンタクタは電磁力を利用して 2 対の接点を開閉させている。中には固定鉄心、可動鉄心、バックスプリング、励磁コイルから構成されている。励磁コイルに電圧を印加すると、内部で磁力が発生し可動鉄心がリターンズプリング (バネ) より大きな力を持ち固定鉄心に吸い付けられる。これに連動してコンタクト上部接点の可動接点が動作して固定接点と接触して接点が閉じる。そして、コイルへの電圧印加を止めると内部の磁力が無くなるため、リターンズプリング (バネ) の力で可動鉄心と可動接点は元の位置に戻り接点は開く構造である。

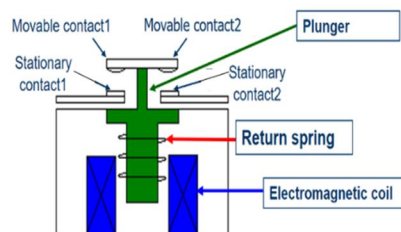


図 1 電磁コンタクタの構造

(2) 実験回路とオシロスコープとの接続図を図 2 に示す。実験回路は従来使用してきた回路に直列に自作の空芯コイル (インダクタンス) を接続した。また、4 チャンネルデジタルオシロスコープを使用することで、ch1 でアーク電圧 v_a 、ch2 でアーク電流 i 、ch3 で電源電圧 e 、ch4 で抵抗の電圧降下 v_R を観測した。この時 GND の位置を考慮し ch1 のアーク電圧波形は反転した。コイル両端の電圧 v_L は ch3 電源電圧 e から ch4 抵抗の電圧降下 v_R を引くことで求めた。

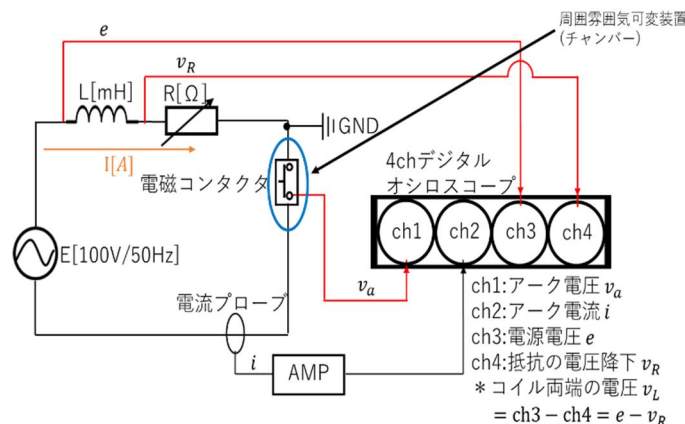


図 2 実験回路

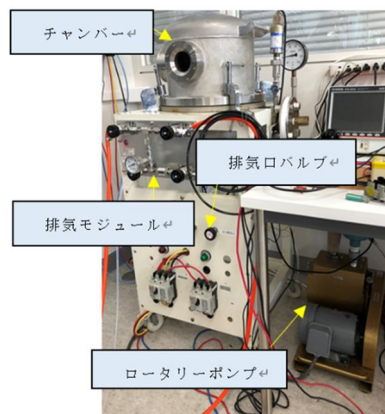


図 3 周囲雰囲気可変装置

電磁コンタクトは、図3に示す周囲雰囲気可変装置のチャンバー内に設置した。この装置では、ロータリーポンプを使用し周囲雰囲気可変装置内を真空にしたのちにガスボンベからチャンバー内に窒素2気圧を最低2時間以上封入する。(これは、チャンバー内の水分を除去するために行う。)排気後、ガスボンベから目的の気体を設定気圧まで封入した。

(3) 表1は実験条件を示す。また、表2には、実験で測定を行った項目とその測定方法をまとめている。接触抵抗 R_c はデジタルマルチメータを用いて接触電圧降下から求めた。オシロスコープでアーク放電時の電圧・電流波形を測定し、アークが点弧した瞬間と消滅した瞬間の電圧・電流値を、それぞれアーク開始電圧、アーク開始電流、アーク消滅電圧、アーク消滅電流と定義し、測定データを計算することでアーク継続時間 t_a 、アークエネルギー E_a 、を求めた。測定箇所を図4に示す。位相角は電流波形の半周期 10ms を基準としている。また、アークの点弧角は電流波形の0点からの角度である。

表1 実験条件

Item	Conditions
Contacts material	Ag-Ni alloy
Source voltage E	AC 100V (RMS value), 50Hz
Closed current I_0	10A (RMS value)
Ambient gas	Air, and H ₂ (Hydrogen)
Gaseous pressure	0.05, 0.1, 0.3 MPa (0.5, 1, 3atm)
Measurement Arc	Break arc discharge
Load condition	Resistive load
Break timing	Random (No phase control, asynchronous with power supply frequency)
Number of measurements	100 times

表2 測定項目と測定方法

Measurement item	Measuring method
Arc duration time t_a	Measured arc waveform by digital oscilloscope
Arc energy E_a	Calculated from arc power waveform
Contact voltage drop V_c	Measured 4 seconds after closing
Contact resistance R_c	Calculated from V_c / I_0
Arc ignition voltage and current	Voltage and current at arc starting
Arc extinction voltage and current	Voltage and current at arc extinction
Arc ignition angle	Phase angle at arc ignition (0 - 90°)
Arc extinction angle	Phase angle at arc extinction (0 - 90°)

4. 研究成果

(1) オシロスコープでアーク放電時の電圧・電流波形を測定し、アークが点弧した瞬間と消滅した瞬間の電圧・電流値を、それぞれアーク開始電圧、アーク開始電流、アーク消滅電圧、アーク消滅電流と定義した。図4の丸印は各測定点を示す。さらに測定データを計算することでアーク継続時間 t_a 、アークエネルギー E_a 、を求めた。位相は電流波形の半周期 10ms を基準としている。また、アークの点弧角度は電流波形の0点からの位相角とした。

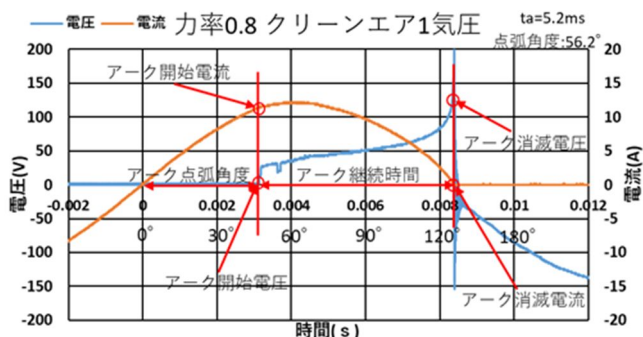
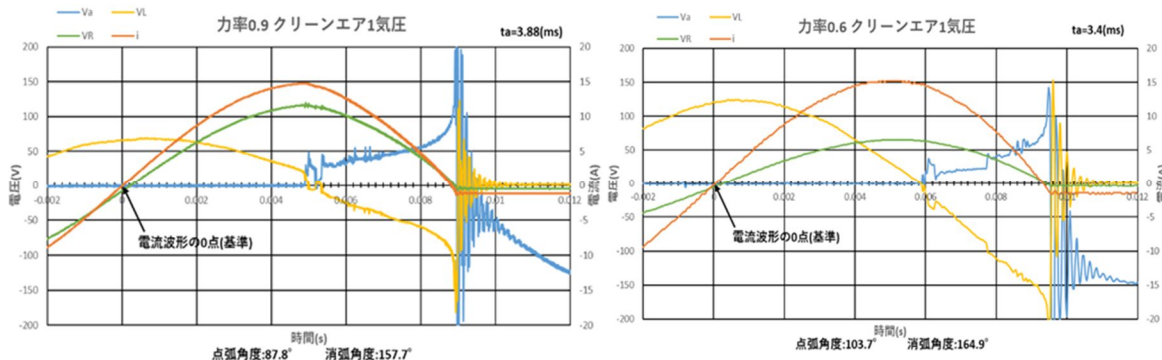


図4 アーク電圧・電流波形例と測定点

(2) インダクタンス(コイル)を入れたことでどのような変化が起こっているか確認するためアーク発生時の電圧・電流波形を4ch オシロスコープで波形を観測した。図5にクリーンエア1気圧でアーク点弧角度が90°付近の波形例を示す。図5(a)は力率0.9、(b)は力率0.6の波形である。アークが発生すると抵抗の電圧降下 v_R はアーク電流 i と同様な変化をしている。しかし、コイル両端の電圧はアーク電圧 v_a の変化を反転したような波形となった。これはアークが発生した際にコイルに逆起電圧が発生したためだと考えられる。しかし、力率が小さくなるにつれて、この変化は滑らかになっていった。



(a) 力率 0.9 (L=14mH)

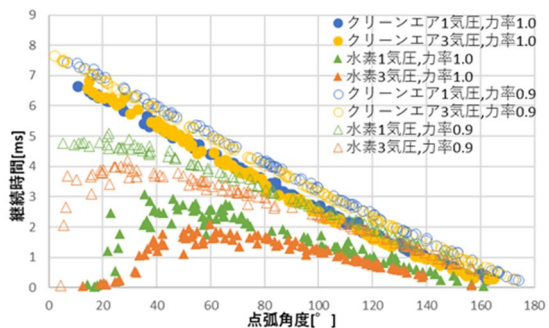
(b) 力率 0.6 (L=25mH)

図5 オシロスコープでの観測波形例

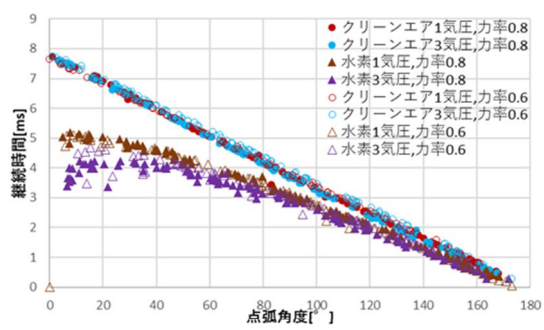
(3) 図6は各力率の条件別に気体によるアーク点弧角度とアーク継続時間の関係を表した図である。図6(a)から、クリーンエアでは1気圧と3気圧を比較して見ると変化がほぼ無い。力率1.0では点弧角度10°付近から変化しているが、力率0.9では3°付近からアーク放電が発生している。アーク継続時間が力率1.0(抵抗負荷)より力率0.9(誘導性負荷)は全体的に約1ms程度アーク継続時間が長くなっている。水素では、力率1.0(抵抗負荷)は点弧角度40~60°付近で1気圧の方が3気圧より約1ms程度アーク継続時間が長くなっている。力率0.9(誘導性負荷)は点弧角度40度付近までは気圧による差が生まれ1気圧の方が3気圧よりアーク継続時間が長くなっている。図6(b)から、力率0.8と0.6はクリーンエアではほぼ変化は無く、水素は40°付近までで見られたが、40°以降ではほとんど変化はなかった。これらより、力率0.9, 0.8, 0.6(誘導性負荷)では気体、気圧を変えてもアーク継続時間にほぼ変化はないと考えられる。

(4) 図7は各力率の条件別に気体による比較を行った測定回数と接触抵抗の関係を表した図である。図7から、クリーンエアでは10mを超える抵抗値もあり、バラつきがある、水素では1.5~2mで安定した抵抗値になり、バラつきが小さかった。

(5) 上述のように、本研究の目的とするアーク放電に与える負荷条件、周囲気体および気体圧力の影響を交流回路のもとで調べた。その結果、アーク放電の抑制効果は水素ガスが顕著で、ガス圧が高い方がアーク放電を短縮できることが図6から明らかになった。また、誘導性負荷では、抵抗負荷に比べアーク放電抑制効果が小さいことが分かった。さらに、接触抵抗値は、図7に示すように水素ガス中では小さく安定した。これは、電気接点表面に酸化物が生成されなかったためと推測された。



(a)継続時間 (力率 1.0、0.9 比較)



(b)継続時間 (力率 0.8、0.6 比較)

図6 点弧角度と継続時間の関係

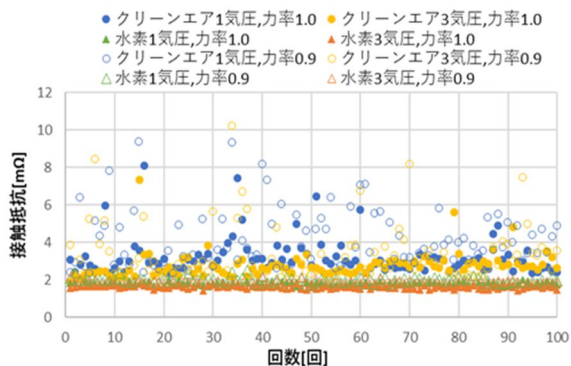


図7 測定回数と接触抵抗の関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Kiyoshi Yoshida, Koichiro Sawa, Kenji Suzuki
2. 発表標題 Influence of ambient gas on various characteristics of electromagnetic contactor in AC power supply
3. 学会等名 31st International Conference on Electrical Contacts (ICEC2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Koichiro Sawa, Kiyoshi Yoshida, Kenji Suzuki
2. 発表標題 Effect of inductive load on critical load current at switching device with magnetic blow-out
3. 学会等名 31st International Conference on Electrical Contacts (ICEC2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田村 翼 , 澤 孝一郎, 吉田 清
2. 発表標題 交流電源遮断時のアーク放電に対する負荷インダクタンスと周囲気体の影響
3. 学会等名 電子情報通信学会, 機構デバイス研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 原田 将也, 金本 裕斗, 澤 孝一郎, 吉田 清
2. 発表標題 直流トグルスイッチに発生するアーク放電の各種特性について
3. 学会等名 電子情報通信学会, 機構デバイス研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Koichiro Sawa, Kiyoshi Yoshida, Kenji Suzuki
2. 発表標題 Influence of current and magnetic flux density on arc discharge at breaking of electrical contacts
3. 学会等名 ICEC 2020, 30th International Conference on Electrical Contacts (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藁谷 優人, 吉田 清, 澤 孝一郎
2. 発表標題 接点開離時 直流アーク放電のインダクタンスと 磁気吹き消し効果の影響
3. 学会等名 電子情報通信学会 機構デバイス研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉田 清、澤 孝一郎
2. 発表標題 交流遮断時のアーク放電への周囲気体の圧力と電流の影響
3. 学会等名 電子情報通信学会 ソサイエティ大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高野裕斗、中島瑚太郎、澤 孝一郎、吉田 清
2. 発表標題 交流電源の開離時アークに対する周囲気体の影響
3. 学会等名 電子情報通信学会 機構デバイス研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 千葉 康平、須藤義宏、澤 孝一郎、吉田 清
2. 発表標題 電磁コンタクトの接触抵抗の連続開閉試験
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉田 清、澤 孝一郎
2. 発表標題 交流遮断時のアーク放電への周囲気体の圧力と電流の影響
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 接点開離時直流アーク放電の磁気吹き消し効果への回路条件の影響
2. 発表標題 澤孝一郎、吉田 清、上野貴博
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2023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
研究協力者	澤 孝一郎 (Sawa Koichiro)	慶應義塾大学・理工学部・名誉教授 (32612)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------