

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 14 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26630110

研究課題名(和文) 直流真空電気機器における極性反転時の電界制御に関する研究

研究課題名(英文) Control of Electric Field at Polarity Reversal in DC Vacuum Electric Apparatus

研究代表者

小島 寛樹 (KOJIMA, Hiroki)

名古屋大学・工学研究科・准教授

研究者番号：00377772

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：真空遮断器などの真空絶縁機器の直流送電システムへの適用拡大に向けて、直流電圧の極性反転時における帯電分布変化などの機器絶縁への影響を考慮する必要がある。特に、固体絶縁物沿面上の帯電現象に着目し、極性反転時における固体絶縁物上の電荷挙動について検討した。帯電電位と発光強度の時間推移の双方から、直流電圧の極性反転時には、沿面放電に至らずとも帯電を中和するような電荷挙動が起こり、その時定数は数ms～十数ms程度と比較的遅いことが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：For extending of the range of the application of vacuum insulating electric apparatus, e.g. vacuum circuit breakers, we have to consider the effect of change of charging distribution at the polarity reversal of dc voltage. In this study, we focused on the charging phenomena on the dielectric surface in vacuum, and investigated the charge behavior on the dielectric surface at the polarity reversal. From the temporal evolutions of charging potential and light emission, at the polarity reversal of dc voltage, it was revealed that the charge neutralization without flashover occurred with the time constant of a few ms to a dozen ms, which is relatively slow.

研究分野：電気機器

キーワード：電気機器工学 真空電気絶縁 直流機器 極性反転 帯電 電荷挙動

1. 研究開始当初の背景

電力システムはこれまで交流主体で構成されてきたが、分散電源の大量導入や電力貯蔵技術の導入、系統連系強化に伴う安定度の問題などから直流送電に対する要請が高まってきている。一方で、直流絶縁技術においては、帯電・電荷蓄積、直性反転などの直流特有の現象・事象があるが未解明な部分が多い。特に真空絶縁においては、ガス絶縁のような気体中への電荷の移動が無い場合、電荷の緩和時間が非常に長く、帯電・電荷蓄積の電気絶縁への影響は極めて大きい。真空中直流電界下における帯電の研究は、これまで多くの研究がなされており、例えば O. Yamamoto らは、トリプルジャンクションからの電子放出に伴う沿面帯電を、電子軌道や二次電子放出まで考慮することで非常によく推測できている(引用文献)。さらに、T. Hosono らは図 1 に示すように、絶縁物表面粗さと電界入射角により帯電を制御できる可能性を示唆している。

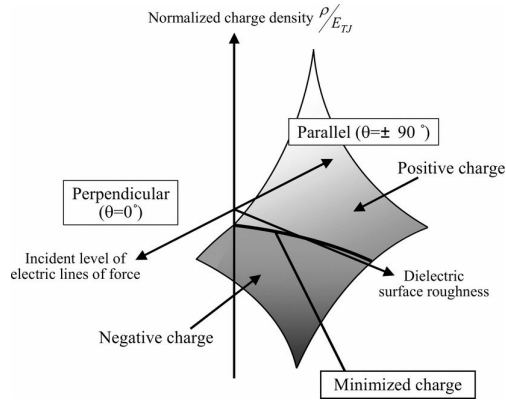


図 1 固体表面粗さと電界入射角による帯電制御(引用文献)

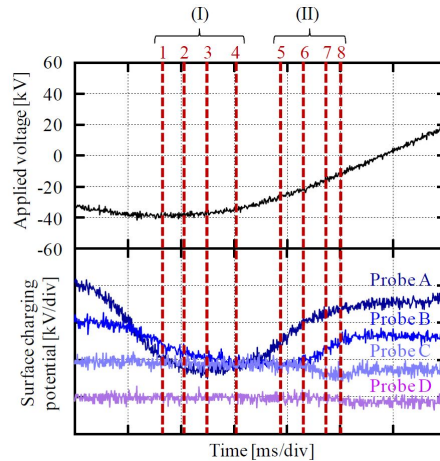
一方、本研究実施者らは、真空中交流電界下における帯電形成において、印加交流電圧の減少位相時に、形成された帯電自身の電界が過渡的な帯電分布形成に強く影響を与えることを見出した(引用文献)。この現象は、直流電圧の極性反転時において、より顕著に影響を与えられ、より高度な絶縁設計が求められる可能性がある一方で、図 1 の概念と同じく、絶縁特性として最も厳しい状態になる極性反転時の電界分布を制御できる可能性を示唆している。

2. 研究の目的

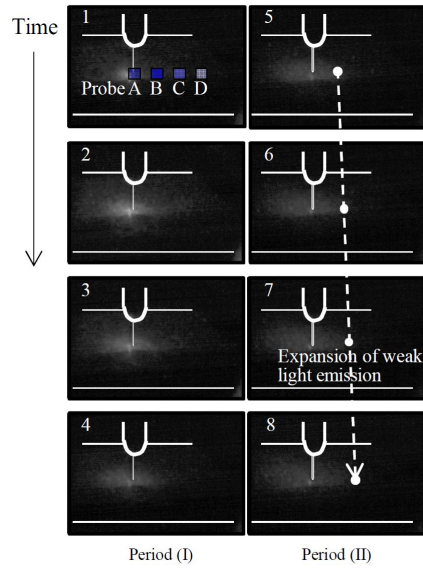
直流絶縁における帯電の制御については、これまでも多くの研究がされてきており、図 1 に示すような帯電を積極的に制御して電界を制御するコンセプトもある。しかしながら、これらの多くは定常時における帯電分布を対象としている。直流電圧印加下では定常時が最も帯電量が大きくなるのではあるが、重要なのは、直流電圧印加下で蓄積された帯電が、極性反転などの過渡的な電圧印加時にどのような挙動をし、絶縁破壊への危険性を

はらむかである。

本研究実施者らは、交流電圧印加下において、図 2 に示すように印加交流電圧の大きさが減少していく位相において、沿面帯電やそれに伴う発光が広がっていく様子をつま、これが交流電圧下における帯電分布形成に強く影響を与えていることを見出した。図 2 に示すような電荷挙動は、直流電圧の極性反転時にも現れると考えられ、このような電荷挙動が電界分布や電極系の構成によって、沿面放電を誘発する可能性、あるいはその逆に極性反転電界の緩和に寄与する可能性の両方が考えられる。



(a) Negative charge development of one PD pulse.



(b) Fast-framing light emission images

図 2 交流電圧減少位相における真空中沿面帯電の広がり(引用文献)

極性反転時の電界は、印加電界と帯電による電界の重畳となる。帯電による電界は、極性反転時の電界を強調する方向に働く場合が多いが、真空中の場合は、浮遊電極の存在や二次電子放出などの現象により、極めて複雑な分布を形成する。一方で、極性反転を考慮した直流絶縁機器は、一般に最も電界が強調される極性反転時を考慮して設計される。直流電圧下のみならず、それにより形成された複雑な帯電の極性反転時の影響を検討する

本研究課題は、大きなチャレンジ性を有しているとともに、極性反転を考慮する真空直流絶縁機器の絶縁設計を大きく改革する可能性を持っている。

3. 研究の方法

真空容器内(真空度 10^{-5} Pa)に図3のテーパ電極(先端曲率半径 $R=0.2$ mm)-アルミナ絶縁物-平板電極系を配置した。テーパ電極に印加電圧 $V_a=-30$ kV を一定時間印加してアルミナ絶縁物上に負極性帯電を形成した後、ステッピングモータ駆動によるスイッチにより、 $V_a=+30$ kV に極性反転させた。アルミナ絶縁物背後に静電プローブを設け、静電容量分圧回路およびボルテージフォロワ回路を介してアルミナ表面の帯電電位($V_x \sim V_z$)を取得した。また、高速ビデオカメラ(1000 fps)を用いて、極性反転時における固体絶縁物上の発光像の推移を取得した。

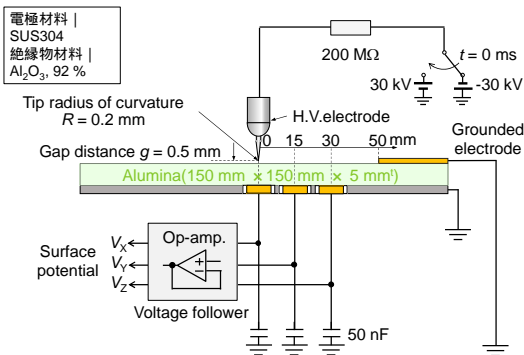


図3 電極系および真空中帯電形成及び極性反転時電荷挙動の測定システム

4. 研究成果

図4に極性反転時の帯電電位、図5にその際の発光像の時間推移を示す。図4において、印加電圧 V_a が極性反転する時間を $t=0$ ms とした。極性反転前 ($t<0$ ms) では、 $V_a=-30$ kV の負極性直流電圧印加により、電極直下(プローブ X) 付近をピークとした負極正帯電が形成されている。

一方、図4および図5より、 $t=0$ ms の印加電圧 V_a の極性反転 (-30 kV \rightarrow $+30$ kV) によってアルミナ表面の帯電電位 $V_x \sim V_z$ の大きさが減少し、その際に発光が生じたことがわかる。これは、印加電圧の極性反転により、帯電電子がアルミナ沿面上を拡がり、その際に電子がアルミナ沿面上に衝突することで発光が生じたためと考えられる。また、極性反転後の帯電電位は数 ms オーダーで推移しており、発光も十数 ms まで続いていることがわかる。図6に図5の高電圧テーパ電極-接地電極間(図5中の赤枠の領域)における発光強度の推移を図4で示した帯電電位の変化と併せて示す。図6より、発光強度は指数関数的に減衰し、その時定数は約 6 ms であることがわかる。発光が帯電電子の移動時のアルミナ絶縁物への衝突によるものであると考えれば、極性反転時におけるアルミナ沿面上の電

荷挙動の時定数も発光強度と同程度の約 6 ms であると考えられる。

以上より、帯電電位と発光強度の時間推移の双方から、直流電圧の極性反転時に約 6 ms の時定数の電荷挙動がある可能性が示唆された。

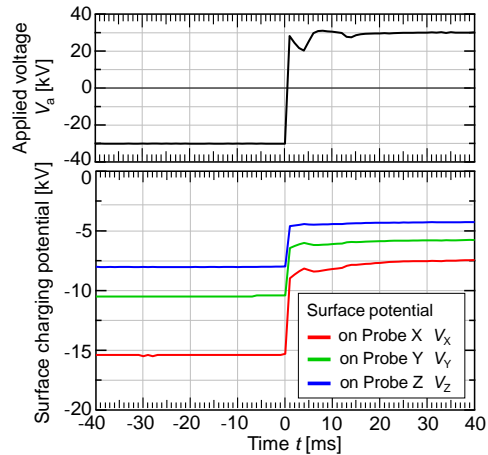


図4 印加電圧極性反転前後の帯電電位変化

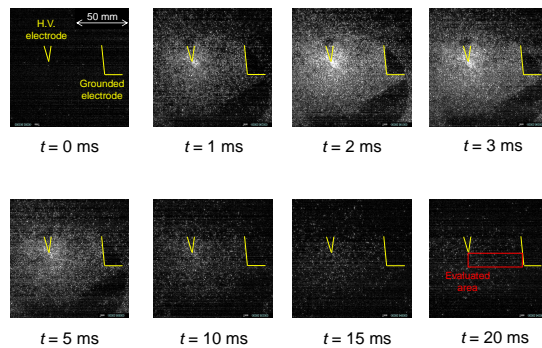


図5 印加電圧極性反転時のアルミナ絶縁物上の高速フレーミング発光像

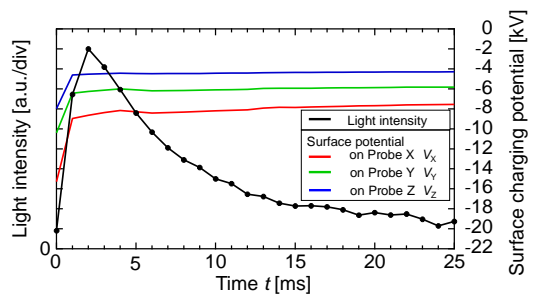


図6 印加電圧極性判定時におけるアルミナ絶縁物上の発行強度の推移

図4および図5に示すように、極性反転時には電荷挙動とそれに伴う発光が観測されたが、電極間を橋絡する沿面放電には至っていない。この点を、極性反転直後の帯電を考慮した電界解析を行い、本研究実施者が引用文献で確立したアルミナ絶縁物上の実効的二次電子放出係数の推定手法を用いて、二次電子なだれの発生可能性の観点から検討した。二次電子なだれは >1 で発生し、

沿面放電の起点となり得る。解析の結果、極性反転前の負極性帯電の端部付近で、極性反転後に >1 となる領域が現れることがわかった。しかしながら、この二次電子なだれを維持する電子供給源がアルミナ沿面上の帯電のみであるため、電極間を橋絡する沿面放電にまでは至らないと推測された。

以上の結果から、直流電圧の極性反転時には、沿面放電に至らずとも帯電を中和するような電荷挙動が起こり、その時定数は数 ms ~ 十数 ms 程度と比較的遅いことが明らかとなった。これは、直流真空機器における極性反転時の電界分布が過渡的には非常に複雑になることを示唆している。

<引用文献>

O. Yamamoto, S. Markon, H. Morii, Depression of insulator charging in vacuum by partial mechanical processing, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 14, No. 3, 2007, pp. 606-612

T. Hosono, K. Kato, A. Morita, H. Okubo, Surface charges on alumina in vacuum with varying surface roughness and electric field distribution, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 14, No. 3, 2007, pp. 627-633

H. Kojima, M. Ishida, N. Hayakawa, M. Hanai, J. Ikeda, T. Shioiri, H. Okubo, Partial discharge characteristics and mechanisms in consideration of charge behavior on alumina dielectrics under AC voltage in vacuum, 2nd International Conference on Electric Power Equipment – Switching Technology, Oct. 20-23, 2013, Matsue, Japan, 2-p1-Q-6

H. Kojima, M. Ishida, N. Hayakawa, M. Hanai, M. Homma, T. Shioiri, H. Okubo, Charge behavior and partial discharge characteristics on alumina dielectrics under AC voltage application in vacuum, 25th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Sep. 2-7, 2012, Tomsk, Russia, pp. 98-71

中野 裕介、小島 寛樹、土屋 賢治、早川 直樹、真空中沿面フラッシュオーバ進展過程における絶縁物上過渡帯電存在時の実効的 2 次電子放出係数、電気学会論文誌 A、136 巻、3 号、2016、pp. 128-134

[学会発表](計 1 件)

生田 和也、小島 寛樹、早川 直樹、直流極性反転時における真空中固体絶縁物上の電荷挙動、平成 28 年度電気・電子・情報関係東海支部連合大会、2016 年 9 月 12~13 日、豊田工業高等専門学校(愛知県・豊田市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小島 寛樹 (KOJIMA, Hiroki)
名古屋大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：00377772

(2) 研究分担者

早川 直樹 (HAYAKAWA, Naoki)
名古屋大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：20228555