

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25289072

研究課題名(和文) 低炭素消費社会の構築に資するインバータ駆動機器の革新的絶縁設計手法創成

研究課題名(英文) Innovative insulation design method of converter-fed rotating machine for construction of sustainable society

研究代表者

熊田 亜紀子 (Kumada, Akiko)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：20313009

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：ポッケルス結晶を用いた広帯域表面電位系(帯域：商用周波数～100MHz)を作成し、高圧回転機用型巻バーコイル端部の電界緩和層(非線形抵抗を付加した部分)の電位分布の過渡変化を2mm程度の分解能で測定できるシステムを構築した。本システムを用いて、PWM、繰り返しインパルス、商用周波数電圧印加時の当該箇所電界分布を計測した。有限要素法による解析手法の確立、等価回路モデルを提案を行い、見通しよく、電界緩和層の絶縁設計を行う手法を提言した。

研究成果の概要(英文)：Surface potential measuring system (responsible frequency：commercial frequency～100 MHz) using Pockels crystal was assembled and was applied to the measurement of transient change of the electric field distribution of the stress grading system (the part to which the nonlinear resistance was added) at the end of the bar-coil for the high-voltage rotating machine. The spatial resolution of this system is about 2 mm. Using this system, the electric field distribution at the relevant part under the application of PWM, repetitive impulse, commercial frequency voltage was measured. We also established an analysis by the finite element method and proposed an equivalent circuit model. With these prospects, it became possible designing the stress grading system with good outlook.

研究分野：電気工学

キーワード：インバータサージ 電界緩和 繰り返しインパルス 回転機

1. 研究開始当初の背景

インバータによる PWM(パルス幅変調)電源を用いた産業用モータの可変速運転が、省エネルギーの観点から盛んにおこなわれている。再生可能エネルギー利用の有効な手段としてもインバータ駆動システムは欠くことのできない技術である。しかし、インバータ駆動では、回路のインダクタンスや静電容量等のため、パワーデバイスのオンオフ動作ごとにスパイク性の高周波過電圧(インバータサージ)が発生し電動機巻線に電圧ストレスとして印加されるという絶縁上の問題が近年クローズアップされている。大型プラントで用いられる高圧回転機にはその絶縁上最大の弱点部分であるコイル端部に、非線形抵抗特性を持つ材料より構成されるコロナ防止システムを有する(図1参照)。商用周波数からサージの周波数(~1MHz)に至る幅広い周波成分を有する PWM 電圧波形下においては、このコロナ防止システムにおいて、局所的な電界集中による放電と発熱が生じ、従来の商用周波数では想定外の絶縁破壊や絶縁材料の早期劣化が生じている。過度の尤度を持たせた絶縁設計にするなど、手探りでの対応を余儀なくされているのが現状である。このようにインバータ駆動システムにおいて、耐電圧特性の高い電動機の開発は、システムの性能および信頼性の向上に向けて喫緊に克服すべき最大の技術課題である

2. 研究の目的

商用周波数~100MHz の帯域を持つ高空間分解表面電位計を開発し、インバータサージ発生・侵入時における半導体パワーデバイス内部やインバータ駆動機器絶縁システムの電界分布、放電様相、発熱分布と絶縁劣化の関係を明らかにする。これらを基に、半導体パワーデバイスの高電圧化、インバータ駆動機器の耐電圧向上に向けた解決策を提示し、低炭素消費・資源リサイクル社会構築に貢献する電力機器の設計に資することを目的とする。また、本研究で開発する測定手法に関しては、インバータ機器絶縁に関する国際規格に日本発の技術として盛り込み、世界市場における日本の技術の優位性をゆるぎないものとする基盤としたい。

3. 研究の方法

圧電振動対策を施した電気光学結晶を用いてハンドリングのよい高帯域表面電位計(帯域:商用周波数~100MHz)を作成し、高圧回転機用型巻コイルバー端部の PWM 電圧印加時における電界分布(表面電位分布の勾配)の過渡変化を1mm以上の分解能で測定できるシステムを構築する。システムの概要を図1に示す。測定対象としては IEC の回転機絶縁の試験規格でも定められた、実機模擬コイルバーとし、コイルバーには、高周波高電圧やインバータサージ模擬波形を含む PWM 電圧を印加する。高帯域表面電位計はテーパ付き電気光学結晶、光学部

品より構成される。

あらかじめ電界計算により求めておいた結晶端誘導電位分布と対象物表面電位分布の関係式より、対象物表面電位分布を求める。

また、電界分布測定と同期して、サーモグラフィにより表面温度分布、イメージインテンシファイア付き高速度ビデオカメラによる沿面放電発生様相の測定ができるシステムとする。

本システムを用いた測定の狙いは、非線形材料を用いた実機のコイル端絶縁システムにおいてインバータサージを含む PWM 波形が印加されたときに実際にどのような現象が生じているか把握することにある。

計測と平行して、バーコイルの簡易等価回路解析、有限要素法による電界解析技術の確立を図る。

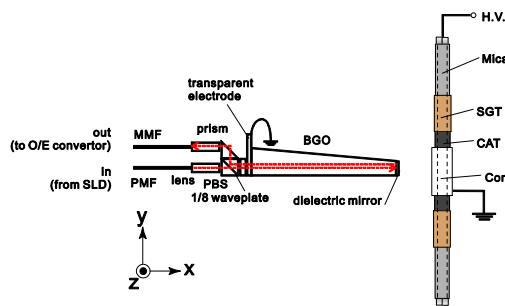


図1 バーコイル表面電位分布測定装置

4. 研究成果

バーコイルの 50Hz, 1kHz 方形波、繰り返しインパルス電圧を印加したときの電位分布測定結果を図2-4に示す。50Hz, 1kHz 方形波においては CAT 部分は接地電位を保っているが、繰り返しインパルス(立ち上がり 200ns 程度)印加時においては、CAT 部分の電位が一度上昇していることがわかる。

また、50Hz など低い周波数成分を印加したときに顕著だが、CAT/SGT 界面において、空間電荷が蓄積するため、瞬時電圧が 0kV の位相においても、空間蓄積電界による電位が確認された。

この傾向は、図5に示すような等価回路で簡単に説明できる。RC はしご型回路で表され、ローパス特性を示す。すなわち、周波数  $f$  [Hz]、電圧  $V_0$  を印加したとき、電圧は徐々に減衰し、固定子コアから長さ  $L_p$  [m] 離れた場所において、 $V_0/e$  にまで減衰する。この特長長さは、電界緩和層の断面積  $A_{SG}$  [m<sup>2</sup>] と、導電率  $\sigma_{SG}$  [S/m]、マイカ絶縁層の容量  $C_M$  [s/Ω] を用いて次式で与えられる。

$$L_p = \left( \pi \frac{A_{SG} \sigma_{SG}}{C_M f} \right) \cdot \dots \cdot (1)$$

つまり、周波数の高い成分は、特徴進入長が短いため、固定子コア近くで高い電界を形成する。その一方、低い周波数成分は、進入長が長く、CAT/SGT 界面にまで十分到達できる。

また、結果の掲載は省略するが、有限要素

法による解析により、これら測定電位分布結果の再現に成功し、今後は有限要素法により、コイルエンドの効果的な絶縁設計手法が行える見通しを得た。

なお、本測定手法については、世界的な評価も得、最新の IEC60034-18-42 にも採用された。

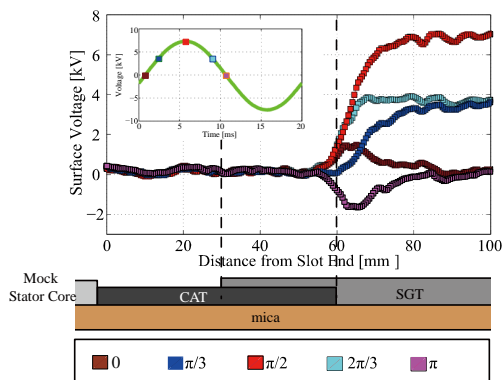


図 2 50Hz 印加時の電位分布

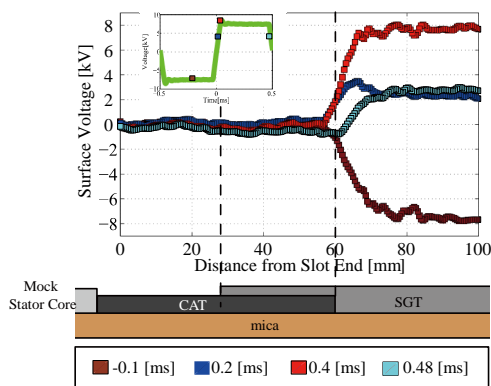


図 3 1kHz 方形波印加時の電位分布

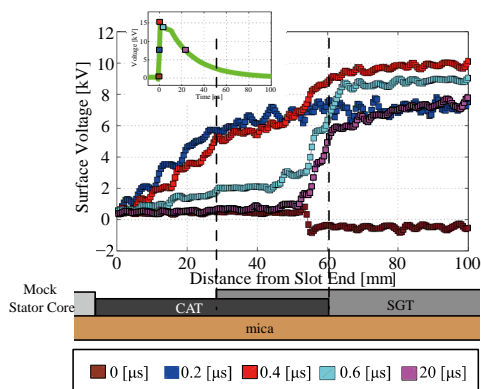


図 4 繰り返しインパルス印加時の電位分布

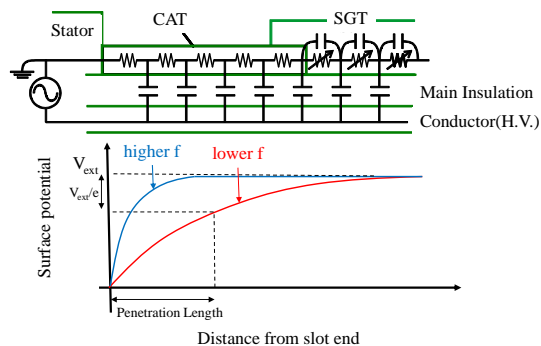


図 5 等価回路

## 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 22 件 )

(1) 江尻開, 佐藤正寛, 熊田亜紀子, 日高邦彦, 山城啓輔, 早瀬悠二, 高野哲美: パワーモジュール封止用絶縁ゲル中における部分放電発生位相特性とキャビティー挙動の関係, 電気学会論文誌 A [研究開発レター], 査読有, Vol.136 No.6, 2016, pp.384-385 DOI:10.1541/ieejfms.136.384

(2) T. Nakamura, A. Kumada, H. Ikeda, K. Hidaka, S.A. Boggs, Y. Tsuboi, T. Kusakibaru, T. Sakurai, and T. Yoshimitsu: Potential distribution on stress grading of inverter-fed rotating machines under DC biased voltage, Journal of International Council on Electrical Engineering, 査読有, Vol. 6, No. 1, 2016, pp.36-42 DOI:10.1080/22348972.2015.1115169

(3) 佐藤正寛, 熊田亜紀子, 日高邦彦: 量子化学計算を用いた絶縁材料中の電荷輸送特性の定量評価に向けた一検討, 電気学会論文誌 A, 査読有, Vol.135 No.10, 2015, pp.618-623 DOI:10.1541/ieejfms.135.618

(4) A. Kumada, T. Nakamura, K. Hidaka, Y. Tsuboi, T. Yoshimitsu: Potential Distribution on the Stress Grading System of High-Voltage Rotating Machines -I. Measuring System-, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 査読有, Vol. 22, Issue 6, 2015, pp.3163-3169 DOI:10.1109/TDEI.2015.005581

(5) S. A. Boggs, A. Kumada, T. Yoshimitsu: Analytical Approximations for the Rotating Machine End-Turn Field Distribution, Analytical Approximations for the Rotating Machine End-Turn Field Distribution, 査読有 Vol. 22, Issue 6, 2015, pp. 3146-3152 DOI:10.1109/TDEI.2015.005240

(6) 中村隆央, 熊田亜紀子, 池田久利, 日高邦彦, S.A. Boggs, 木崎原智仁, 櫻井孝幸,

坪井雄一, 吉満哲夫: 繰り返しインパルス印加時のモータコイルの電界緩和層の電位分布および温度分布, 電気学会論文誌 A, 査読有, Vol.135, No.2, 2015, pp.100-106  
DOI:10.1541/ieejfms.135.100  
(7)A. Kumada, T. Kamiya, S. Matsuoka, K. Hidaka: High Voltage Measuring Apparatus Based on Kerr Effect in Gas, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 査読有, Vol. 22, Issue 2, 2015, pp.760-765  
DOI:10.1109/TDEI.2014.004710  
(8)岩淵大行, 渡邊惇, 松岡成居, 熊田亜紀子, 日高邦彦: アルミニウム電極を用いたマイクロ沿面ギャップにおける絶縁破壊特性, 電気学会論文誌 A, 査読有, Vol.134, No.8, 2014, pp.485-486  
DOI:10.1541/ieefms.134.485  
(9)Y. Kikuchi, K. Yamashita, A. Kumada, K. Hidaka, K. Tatamidani and T. Masuda: Partial discharge characteristics in composite insulation systems with PPLP for HTS cable, Journal of Physics:Conference Series, 査読有, 507(2014)032024, 2014, pp.1025-1030  
DOI:10.1088/1742-6596/507/3/032024  
(10)Y. Inada, S. Matsuoka, A. Kumada, H. Ikeda and K. Hidaka: Highly sensitive Shack-Hartmann sensor for two-dimensional electron density imaging over extinguishing arc discharges, Meas. Sci. Technol, 査読有, Vol.25, 055201, 2014, pp.1-8  
DOI:10.1088/0957-0233/25/5/055201  
(11)Y. Inada, S. Matsuoka, A. Kumada, H. Ikeda and K. Hidaka: Multi-time electron density imaging over arc discharges around the current zero point, J. Phys. D: Appl. Phys., 査読有, Vol.47, 175201, 2014, pp.1-7  
DOI:10.1088/0022-3727/47/17/175201  
(12)Y. Inada, S. Yamagami, S. Matsuoka, A. Kumada, H. Ikeda and K. Hidaka: Simultaneous imaging of two-dimensional electron density and air-flow distribution over air-blast decaying arc, J. Phys. D: Appl. Phys. 査読有, Vol.47, 2014, 325204  
DOI: 10.1088/0022-3727/47/32/325204  
(13)佐藤正寛, 熊田亜紀子, 日高邦彦, 山城啓輔, 早瀬悠二, 高野哲美: パワー半導体デバイス封止用ゲル中におけるボイド残留の一検討, 電気学会論文誌 A 研究開発レター, 査読有, Vol. 134, No. 6, 2014, pp. 432-433  
DOI: 10.1541/ieejfms.134.432  
(14)佐藤正寛, 熊田亜紀子, 日高邦彦, 山城啓輔, 早瀬悠二, 高野哲美: 半導体封止用ゲル中の沿面放電によるキャビテーションの進展現象, 電気学会論文誌 A 研究開発レ

ター, 査読有, Vol.134, No.5, 2014, pp.358-359  
DOI: 10.1541/ieejfms.134.358  
(15)N. Inoue, S. Sato, T. Yoshida, Y. Oida, A. Kumada, and K. Hidaka: Insulation properties of highly pressurized dry air-effects of anodic oxide coating and surface roughness of electrodes on breakdown voltage, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation - 3836, 査読有, Vol.21, No.5, 2014, pp.2081-2087  
DOI: 10.1109/TDEL.2014.003836  
(16)J.Deng, Y. Li, Y. Xu, Z. Lin, A.Kumada, and K. Hidaka: Surface Streamer-to-Leader Transition Under Positive Impulse Voltage, IEEE Transactions on Plasma Science, 査読有, Issue, 99, 2014, pp.2394-2395  
DOI: 10.1109/TPS.2014.2331138  
(17)佐藤正寛, 熊田亜紀子, 日高邦彦, 山城啓輔, 早瀬悠二, 高野哲美: シリコンゲルを用いたパワーモジュールのボイド残留要因と簡易的封止手法の提案, 電気学会論文誌 A, 査読有, Vol.134 No.11, 2014, pp.572-577  
DOI: 10.1541/ieefms.134.572  
(18)熊田亜紀子, 今井克樹, 松岡成居, 日高邦彦: CF<sub>3</sub>I ガス及びその混合ガスの放電特性とその絶縁媒体としての適性, 電気学会論文誌 A, 査読有, Vol.134 No.12, 2014, pp.635-641  
DOI: 10.1541/ieefirms.134.635  
(19)Y. Inada, K. Abe, A. Kumada, K. Hidaka, K. Amano, K. Itoh and T. Ohno: Temperature of hydrogen radio frequency plasma under dechlorination process of polychlorinated biphenyls, Applied Physics Letters, 査読有, 105, 2014, 174102-1~4  
DOI: 10.1063/1.4900844  
(20)Shuo Xu, K. Hidaka, E. Kaneko, A. Kumada and H. Ikeda: Particle Detection in Vacuum Interrupter: Preliminary, IEEE Transactions on Plasma Science, 査読有, Vol. 42, No.10, 2014, pp.3077-3082  
DOI: 10.1109/TPS.2014.2362810  
(21)神谷朋輝, 松岡成居, 熊田亜紀子, 日高邦彦, 呉一憲, 栃谷元: 多重反射式高感度ポッケルスセンサの開発, 電気学会論文誌 A, 査読有, Vol. 134, No. 3, 2014, pp. 164-165  
DOI: 10.1541/ieejfms.134.164  
(22)A. Kumada, and K. Hidaka: Directly high-voltage measuring system based on Pockels effect, IEEE Transactions on Power Delivery, 査読有, Vol 28, No. 3, 2013, pp. 1306-1313  
DOI: 10.1109/TPWRD.2013.2250315

〔学会発表〕(計 15 件)

(1)大西大, 熊田亜紀子, 日高邦彦, 梅本貴弘, 大竹泰智, 釣本崇夫: ポッケルス電界セ

ンサによる回転機固定子コイル表面電界の非接触計測, 平成 29 年度電気学会全国大会, 富山大学 五福キャンパス(富山県富山市) 2017.3.15

(2)S. A. Boggs, A. Kumada and T. Yoshimitsu: Rotating Machine End Turn Grading During PWM Transitions, 2016 IEEE International Conference on Dielectrics (ICD 2016), Montpellier (France) 2016.7.5

(3)森田祐介, 中村隆央, 熊田亜紀子, 日高邦彦, Steven A. Boggs, 坪井雄一, 木崎原智仁, 櫻井孝幸, 吉満哲夫: インバータ駆動モータの電界緩和システムにおける抵抗値の最適化に関する一検討, 平成 28 年電気学会基礎・材料・共通部門大会, 九州工業大学 戸畑キャンパス(福岡県北九州市) 2016.9.6

(4)H. Ejiri, M. Sato, A. Kumada, K. Hidaka, K. Yamashiro, Y. Hayase, and T. Takano: The influence of frequency and rise time of applied voltage upon cavity propagation in silicone gel, 21st International Conference on Gas Discharges and Their Applications (GD 2016), 名古屋大学(愛知県名古屋市) 2016.9.11

(5)T. Nakamura, Y. Morita, A. Kumada, K. Hidaka, Y. Tsuboi, T. Kisakibaru, and K. Karasawa: Optimal Resistance of Stress Grading System in Converter-fed Rotating Machines, The Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP 2016), Toronto (Canada) 2016.10.17

(6)大西大, 中村隆央, 熊田亜紀子, 日高邦彦, 坪井雄一, 木崎原智仁, 柄沢一成: インバータ駆動モータの電界緩和システムにおける部分放電現象の計測, 平成 28 年度放電学会年次大会, 東京都市大学 横浜キャンパス(神奈川県横浜市) 2016.11.26

(7)T. Nakamura, A. Kumada, H. Ikeda, K. Hidaka, S.A. Boggs, Y. Tsuboi and T. Yoshimitsu: Transient Potential Measurement on Stress Grading under Multi-level PWM, 2015 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC 2015), Seattle (USA) 2015.6.7-10

(8)M. Sato, A. Kumada, K. Hidaka, T. Hirano and F. Sato: Determination of Hole Mobility in Polyethylene: First Principle Calculation Based on Marcus Theory, 2015 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP 2015), Ann Arbor (USA) 2015.10.18-21

(9)M. Sato, A. Kumada, K. Hidaka, K. Yamashiro, Y. Hayase, T. Takano: Motion analysis of partial discharge in silicone-gel, IEEJ P&ES Symposium on Advanced Technology in Power Systems 2014, 自動車会館(東京都千代田区) 2014.3.7

(10)S.A. Boggs, A. Kumada and T. Yoshimitsu: Measurement of stress grading conductivity to 1.6 MV/m and 155 Computation of grading power density and temperature rise for PWM waveforms, 2014 International Conference on Electrical Insulating Materials (ISEM), 朱鷺メッセ(新潟県新潟市) 2014.6.1-5

(11)A. Kumada, T. Nakamura, H. Ikeda, K. Hidaka, Y. Tsuboi, T. Kisakibaru, and T. Yoshimitsu: Transient potential distribution on stress grading system of rotating machines under repetitive impulse voltages, 2014 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC 2014), Philadelphia (USA) 2014.6.10

(12)M. Sato, A. Kumada, and K. Hidaka: Degradation process of silicone-gel by internal surface discharges, 2014 IEEE 18th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL 2014), Bled (Slovenia) 2014.7.1

(13)H. Iwabuchi, S. Matsuoka, A. Kumada, and K. Hidaka: Polarity effect on breakdown phenomenon across micrometer-scale surface gap in atmospheric air, 20th International Conference on Gas Discharges and their Applications (GD 2014), Orlean (France) 2014.7.10

(14)Y. Inada, T. Kamiya, S. Matsuoka, A. Kumada, H. Ikeda, and K. Hidaka: Two-dimensional electron density imaging for SF6 arc interruption phenomenon using Shack-Hartmann type laser wavefront sensor, 20th International Conference on Gas Discharges and their Applications (GD 2014), Orlean (France) 2014.7.10

(15)中村隆央, 熊田亜紀子, 池田久利, 日高邦彦, 坪井雄一, 櫻井孝幸, 木崎原智仁, 吉満哲夫: インバータ駆動モータコイルにおける有限要素法を用いた発熱分布と電位分布解析, 平成 26 年電気学会基礎・材料・共通部門大会, 信州大学(長野県長野市) 2014.8.22

〔産業財産権〕

出願状況(計 1 件)

名称: 3次元表面電位分布測定装置

発明者: 日高邦彦, 熊田亜紀子, 池田久利,  
古川真陽, 牛渡広大

権利者: 同上

種類: 特許

番号: 特願 PCT/JP2014/003053

出願年月日: 2014年6月6日

国内外の別: 外国

(1)研究代表者

熊田 亜紀子 (KUMADA, Akiko)  
東京大学・大学院工学系研究科  
(工学部)・准教授  
研究者番号：20313009

(2)研究分担者

日高 邦彦 (HIDAKA, Kunihiko)  
東京大学・大学院工学系研究科  
(工学部)・教授  
研究者番号：90181099

研究分担者

松岡 成居 (MATSUOKA, Shigeyasu)  
東京大学・大学院工学系研究科  
(工学部)・助教  
研究者番号：10114646

研究分担者

岩淵 大行 (IWABUCHI, Hiroyuki)  
横浜国立大学・工学(系)研究科  
(研究院)・助教  
研究者番号：50757341