

令和 3 年 5 月 14 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04109

研究課題名(和文) 電界結合による非接触スリップリングの研究

研究課題名(英文) Study on a Contactless Slip Ring with Electric Coupling

研究代表者

高橋 芳浩 (TAKAHASHI, Yoshihiro)

日本大学・理工学部・教授

研究者番号：40216768

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)：同軸回転する導体間を容量とし、装荷したコイルとの共振周波数を用いて非接触電力伝送を行う電界結合型非接触スリップリングシステムについて検討した。その結果、小型システムにより安定した電力を伝送するためには、大容量の同軸回転可能なコンデンサを使用し、高周波、高電圧で伝送する必要があることを確認した。本研究では、円形電極を積層した多層Fin型コンデンサにより、大きな電気容量を有する非接触スリップリングを実現した。これらを用いて伝送システムを構築し、100kHzの出力源を用いて電力伝送実験を行った結果、95%以上の伝送効率で70W程度の非接触伝送が可能であることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

風力発電機やロボットアーム、人工衛星の本体と太陽電池パドル間などにおいては、同軸を中心に回転する物体間の電力伝送が必要となる。一般に回転物体間の電気的接触は摺動ブラシが用いられるが、劣化による接触不良などが問題となる。本研究で動作を確認した電力伝送システムは、物体間に物理的接触が不要であり、接触不良による故障を長期的に回避可能である。特に宇宙空間で使用されるシステムでは修理が困難であり、本研究で提案した電界結合型非接触スリップリングの適用は、長期信頼性の確保において非常に有益であると考えられる。

研究成果の概要(英文)：The electric power transmission system using contactless slip ring was investigated. In this system, a gap between rotating bodies acts as a capacitor and is compensated in resonance with an attached coil. High frequency source is required to minimize the system size, and contactless slip ring, the rotatable capacitor, with high electrical capacitance is required for stable power transmission. In order to obtain high capacitance, we proposed the multi-layer Fin type rotatable capacitor using circular electrodes. As the results of power transmission test using constructed contactless slip ring system with 100kHz of power source frequency, it was confirmed that the efficiency of contactless power transmission was more than 95%.

研究分野：半導体工学

キーワード：非接触電力伝送 スリップリング 共振特性 高効率電力伝送

1. 研究開始当初の背景

風力発電機、レーダアンテナ、ロボットアームなど回転運動を有する機器では、静止体-回転体間の電力伝送が不可欠である。一般にこのような同軸を中心とした回転体間の電力伝送はスリップリングが使用される(図1)。スリップリングとは一方に配置された金属製リングと他方に設置された摺動電極(ブラシ)との接触により電力を伝送する機構である。ただし、摩擦によるブラシの劣化や破損、摩擦により発生した摩耗粉による接触不良発生などのため、定期的な交換などの保守作業が必要になる。よって、非接触化(ブラシレス化)が求められている。

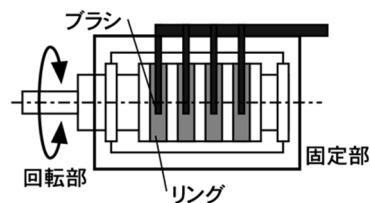


図1 スリップリング

スリップリングは地上のみでなく宇宙空間でも使用されている。ソーラーパネルを付設した人工衛星において、人工衛星本体は通信のために地球方向を向いている一方、発電量確保のためソーラーパネルは太陽方向に向き続ける必要がある。すなわち、本体とソーラーパネル間にもスリップリングが必要となる。ただし、地上と異なり保守作業は基本的に不可能であることから、非接触化は大変重要である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、結合部が回転可動な電界結合型(容量結合型)非接触電力伝送装置の設計手法の確立および電力伝送実験による実証である。同軸を中心とした2つの物体が互いに回転する物体間の電力伝送には、一般的に電極接触部(ブラシ)を有するスリップリングが使用される。しかし、ブラシの摩耗故障や摩耗粉による接触抵抗増大などの問題がある。そこで本研究では、回転導体間との間隙により形成される電気容量を介した、可動・非接触の電力伝送を実証する。本方式では、非接触伝送において現在主流の磁界結合型に比べ、小型軽量で高効率な電力伝送が期待される。また、容量と直列にインダクタンスを配置し、この共振周波数と伝送波周波数との同調により伝送効率の向上を図るが、共振時には各素子に大電圧が印加されることも予想され、容量、コイルの耐電力性の考慮も必要になる。本研究では、それらの点も考慮した最適なシステム設計を行うこと、更に設計結果をもとにシステムを構築し、電力伝送実験を行い本システムの有効性を確認することを目的とした。なお、実証実験の目標としては100W程度の非接触電力伝送を目指すこととした。

3. 研究の方法

本研究で提案する電界結合型非接触スリップリングの概略図を図2に示す。固定部、回転部に配置した電極間の空隙を容量として電界結合させるものであり、ベアリングを有する回転機構部(ロータリージョイント)との併用により回転可能となる。また、図3に本システムの等価回路を示す。供給電源は交流とし、電気容量(C_1, C_2)を介して電力伝送を行うものである。また、 L_1, L_2 はインダクタンスであり、供給電源の周波数を C, L の共振周波数と一致させることにより回路のリアクタンス成分が相殺され、高効率な電力伝送を可能とするものである。なお、共振時には C, L に大電流が通過することにより、各素子に印加される電圧は非共振時に比べ非常に大きくなり、特に容量の設計において耐電力性を考慮する必要がある。そこで本研究ではまず、本システムで電力伝送を行うにあたり最適な周波数、送信電圧、各素子の定数について検討を行うこととした。更に本検討結果をもとに、必要な容量を確保可能な非接触スリップリング(同軸回転可能なコンデンサ)の設計・試作を行い、電力伝送実験を通して本システムの実験実証を行うこととした。

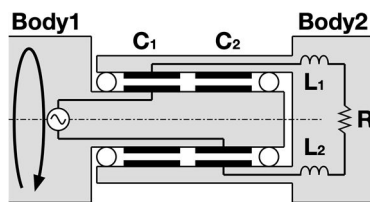


図2 電界結合非接触スリップリングの構造

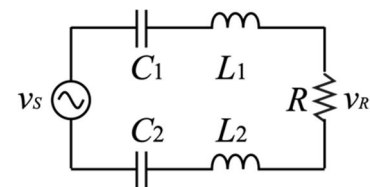


図3 本システムの等価回路

4. 研究成果

(1) システム設計

図3に示した等価回路を基にシステムの最適設計について検討した。以降簡単化のために、2つの容量およびインダクタンスは同一($C_1 = C_2 = C, L_1 = L_2 = L$)とし、直列合成容量およびインダクタンスを $C' = C/2, L' = 2L$ と定義して議論を進める。本回路の共振周波数 f_0 は $1/(2\pi\sqrt{L'C'})$ であることから、非接触スリップリングおよびコイルの小型化のためには高周波伝送が必要になる。また、低電圧・高電流での伝送を行うと共振特性が急峻となり、非接触スリップリングの

容量が回転と共に変動した場合、回転により伝送電力が大きく変動することになる。よって、高周波・高電圧の電力供給源が必要となる。現在市販されている出力 100W クラスの高周波パワーアンプ(松定プレジジョン POEF60-20)における最高遮断周波数は 200kHz, 最大実効電圧は 42V であることから, 本アンプを使用して高電圧電力供給が可能な 100kHz を用いて実証実験を行うことと設定し, システム設計を行った。また, 負荷には 20Ω のメタルクラッド抵抗(許容電力 300W, 無誘導巻き)を用いることとした。このとき, 共振時の回路電流 I_0 は約 2A, 最大伝送電力は約 80W となる。

同一共振周波数を有する LCR 共振回路において, 容量値の増大に伴い共振周波数帯域幅は広くなり, 回転に伴う伝送電力の変動を抑制できる。更に, 共振時において容量およびインダクタンスに印加される電圧 V は $I_0\sqrt{L/C}$ で示されることから, 容量値の増大は各素子における印加電圧の低下にもつながる。ただし, 非接触スリップリングの大型化を避けながら, その容量を増大するためには電極間隔を狭くする必要があり, 電極間空隙の絶縁耐圧を考慮した設計が必要となる。電極間距離を 0.4mm とした場合, 環境による空気の絶縁耐圧の変化や回転による極板間隔の変動を見込んで 10 倍程度の安全係数を考慮しても 100V 程度の電圧は十分印加可能であることが試算された。これより $f_0=100\text{kHz}$, $V<120\text{V}$ が決定され, 上記で示した関係式より $C'=32\text{nF}$, $L'=80\mu\text{H}$ と, 各素子の定数が独立に評価できることがわかった。以上の検討により, 伝送周波数および各素子に印加可能な最大電圧を決定することにより, 最適な設計パラメータが評価可能であることを明らかにした。

(2) 非接触スリップリングの設計・試作

システム設計の結果, $C=2C'=64\text{pF}$ 程度の容量値を有する非接触スリップリングを実現することが必要であることがわかった。図 2 に示したような同軸円筒電極構造で 64pF の容量を実現する場合, 極板間隔を 0.4mm としても, 直径 1m, 長さ 1m と非常に大きな構造が必要である。そこで, 2 種類の円形電極を交互に重ねた多層 Fin 形構造により大容量を実現することとした。外径 120mm / 内径 30mm の大型電極, および外径 100mm / 内径 10mm の小型電極を交互に積層させ, 各極板の間隔はワッシャをスペーサとして 0.35mm に固定させた場合, 各 100 枚の電極を積層させることにより 64pF が得られることが試算された。そこで, 大型電極の外周部および小型電極の内周部に貫通ネジを通して共通電極とし, 各電極の支持体間にベアリングを挿入して回転可能な構造を作製した。図 4 に作製された非接触スリップリングを示す。2 台の構造を作製し容量値を測定した結果, 100kHz において 63.0 および 60.1nF が得られ, 容量値は 1k~200kHz の範囲内ではほぼ一定であることを確認した。また, 同軸を中心に回転させた場合, 容量値が若干(5%以内)変化することがわかった。これは, 回転に伴う構造の歪みに起因していると考えられる。

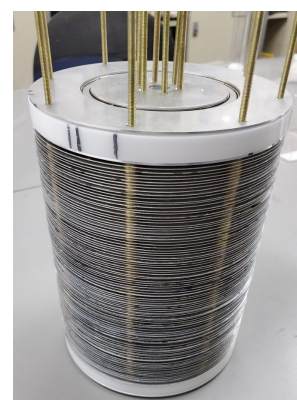


図 4 試作した非接触スリップリング

(3) 電力伝送実験結果

測定された容量値に対して共振周波数が 100kHz となるコイルのインダクタンスは 75μH である。そこで, 75μH のソレノイドコイル(直径 11.4cm, 25 回巻き)を作製し, 2 台の非接触スリップリング, および 20Ω の負荷抵抗を用いて電力伝送システムを構築した。なお, 表皮効果による配線抵抗の増大を防ぐために, 配線およびコイルにはリッツ線を使用した。電力供給源(松定プレジジョン POEF60-20 / 周波数帯域 200kHz)の出力特性を測定した結果, 100kHz における最大出力電圧は 37.4V であることを確認した。また, 10~100Ω の範囲で負荷抵抗を変化させても出力電圧の変化は確認されないことから, 出力抵抗は 1Ω 以下であることも確認した。

図 5 に試作した電界結合非接触スリップリングを用いた電力伝送実験結果(伝送周波数に対する負荷電力)を示す。また図には, 電力供給源出力の周波数特性を考慮した理論値も併せて示す。結果より, 100kHz で負荷電力は最大となり, 68.9W となることがわかった。電源を直接負荷抵抗に接続した際の負荷電力は 100kHz において 69.9W であり, これより伝送効率 98% 以上と非常に高効率で伝送可能であることを確認した。また, 非接触スリップリングを回転させても, 伝送効率は 95% 以上であることも確認した。なお, 回転による出力変動は, スリップリング作製時の電極固定方法の改良により低減可能であると考えている。

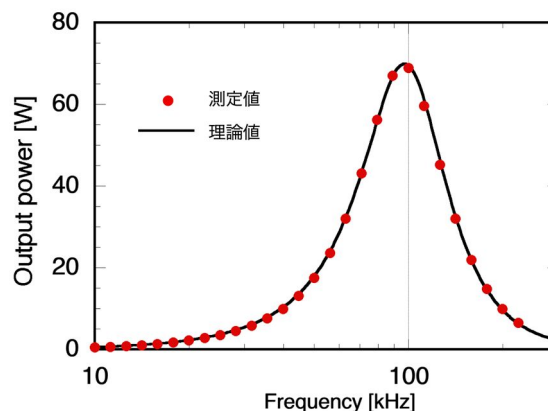


図 5 電界結合非接触スリップリングを用いた電力伝送実験結果

以上,電界結合型非接触スリップリングシステムに関し,最適な設計手法を確立した.また,大容量を有する非接触スリップリングは,多層 Fin 型構造を採用することにより比較的小型で実現可能であること,電力伝送実験の結果,電界結合型非接触電力伝送により非常に高効率での伝送が可能となることを実証した.本非接触電力伝送システムは同軸回転機構を有する多くのシステムに適用可能であると考えられる.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 大島綾太, 齋藤大珠, 彦坂忠利, 塩野光弘, 高野忠, 高橋芳浩
2. 発表標題 電界結合型非接触スリップリングの小型化に向けた検討
3. 学会等名 日本大学理工学部学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大島綾太, 齋藤大珠, 彦坂忠利, 塩野光弘, 高野忠, 高橋芳浩
2. 発表標題 電界結合型非接触スリップリングの検討
3. 学会等名 2021年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tadashi Takano, Yoshihiro Takahashi, Takumi Onodera, Ryota Ohshima, and Mitsuhiro Shiono
2. 発表標題 Basic Investigation on a Contactless Slip Ring with Electric Coupling
3. 学会等名 2019 International Symposium on Antennas and Propagation (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大島綾太, 小野寺巧, 小林泰輔, 齋藤大珠, 塩野光弘, 高野忠, 高橋芳浩
2. 発表標題 非接触スリップリングの実現に向けたコンデンサの検討
3. 学会等名 日本大学理工学部学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小野寺巧, 大島綾太, 塩野光弘, 高野忠, 高橋芳浩
2. 発表標題 多層円筒型コンデンサを用いた電界結合型非接触スリップリングの検討
3. 学会等名 日本大学理工学部学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tadashi Takano
2. 発表標題 BRUSHLESS SLIP RING WITH A LONG ROTATING AXIS TO TRANSFER A LARGE AMOUNT OF POWER
3. 学会等名 69TH international astronautical congress (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tadashi Takano
2. 発表標題 Evaluation of Constituent Technologies and R&D Strategy for Space Solar Power System
3. 学会等名 2018 Asia-Pacific Microwave Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高野忠, 小野寺巧, 大島綾太, 塩野光弘, 高橋芳浩
2. 発表標題 無線スリップリングの応用目的と基礎検討
3. 学会等名 第4回宇宙太陽発電シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小野寺巧, 大島綾汰, 塩野光弘, 高野忠, 高橋芳浩
2. 発表標題 電界結合型非接触スリップリングの基本設計
3. 学会等名 2019年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小野寺巧, 大島綾太, 呉研, 塩野光弘, 高野忠, 高橋芳浩
2. 発表標題 電界結合型非接触スリップリングの設計
3. 学会等名 日本大学理工学部学術講演会
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
研究分担者	塩野 光弘 (SHIONO Mitsuhiro) (30206057)	日本大学・理工学部・教授 (32665)	
研究分担者	高野 忠 (TAKANNO Tadashi) (80179465)	日本大学・理工学部・研究員 (32665)	

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
---------	---------