

M-15

電界結合型非接触スリップリングの安定化に向けた検討 A Study for Stabilization of Electric Field Coupling Type Non-Contact Slip Ring

○曾我勇斗¹, 高野忠², 高橋芳浩²

*Hayato Soga¹, Tadashi Takano², Yoshihiro Takahashi^{2r}

Abstract: The capacitance fluctuation of electric coupling non-contact slip ring with rotation was investigated. It was found that the fluctuation is caused by the change of gap between electrodes during rotation.

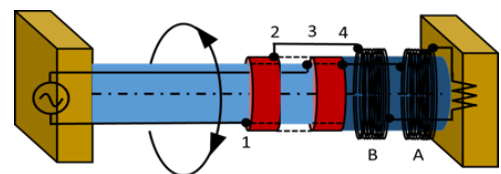
1. 背景

風力発電機やロボットアームなど、同軸回転運動を必要とする機器の静止体一回転体間の電力伝送には、一般にスリップリングが用いられる。スリップリングは、金属製のリングと摺動電極とを接触させた構造であるが、摩擦による接触不良や摩擦粉の発生が長期信頼性低下につながることから、非接触化が求められる。我々はこれまでに、回転部の内外導体間の空隙部分をコンデンサとして電界結合させることによる非接触電力伝送について検討してきた。Fig. 1 に非接触電力伝送システムのご概念図および等価回路を示す。大容量を有する同軸回転可能なコンデンサ（非接触スリップリング）として多層 Fin 型コンデンサを提案・試作することにより、伝送周波数 100 kHz において高効率の電力伝送を実証した[1]。しかし、回転による伝送電力の変動も確認された。これは、回転に伴う非接触スリップリングの容量変化が原因と考えられる。そこで本研究では、安定した電力伝送を目的に、回転による容量変動の低減について検討を行った。

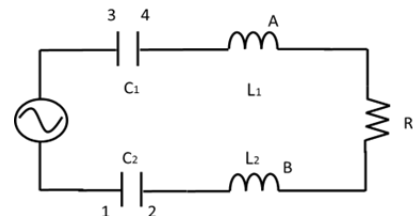
2. 非接触スリップリング

LCR 共振回路において、周波数帯域幅を広く（Q 値を低く）設計すれば、容量変動が共振周波数変化に及ぼす影響は小さくなる一方、大容量のコンデンサが必要となる。そこで、回転により平均値から±10%の容量変動が生じても、伝送電力の低下が 10%以下となる Q 値（Q = 3）を用いてシステム設計を行った。しかし、この場合でも比較的大きな容量が必要となることから、Fig. 2 に示す多層 Fin 形コンデンサにより非接触スリップリングを実現している。Cu 製の大形・小形の円形電極を交互に重ね合わせた構造であり、貫通ネジにより各電極の共通電極を形成し、ナットをスペーサとして電極間距離を固定化している。

本構造における容量変動は、回転に伴う極板間距離の変化が原因であると考えた。そこで、本研究では極板間隔が容量変動に及ぼす影響について評価した。



(a) Conceptual diagram



(b) Electrical circuit

Figure 1. Power transmission system using field coupling non-contact slip ring.



Figure 2. Photo of manufactured slip ring (Multi fin capacitor)

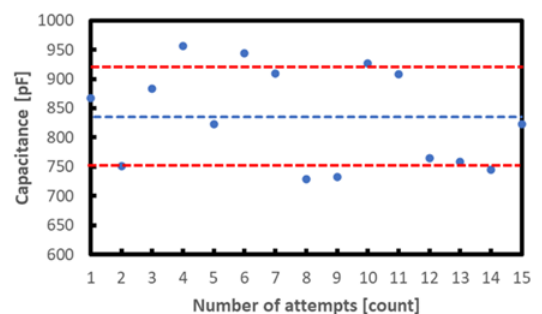


Figure 3. Capacitance fluctuation of slip ring due to rotation (8 electrodes, 1mm gap).

3. 結果及び考察

Fig. 3 に、極板間隔 1mm で 8 枚の電極を積層させた構造において、無作為に 15 回回転させた際の容量値を示す。図において、破線は容量平均値、および平均値±10%の容量値を示す。結果より、変動は±10%を上回っていることを確認した。これは、極板の歪みにより極板間隔が変動したことが原因であると考えられる。極板間隔の変動が同じ場合でも、極板間隔が広い場合、容量値の変動に及ぼす寄与は小さくなると考えられる。そこで極板間隔を 2mm として同様な評価を行った。結果を Fig. 4 に示す。なお、容量値を一致させるため積層電極数は 13 枚とした。結果より、回転に伴う容量変動は 5%程度以内に収まることがわかり、極板間隔の増大が容量変動の抑制に効果的であることを確認した。

そこで、極板間隔 2mm の多層 Fin 形コンデンサを用いて電力伝送実験を行った。電力供給源には GaN 製 FET を用いて試作した高周波インバータ ($f_{max} = 2\text{MHz}$ 程度) を使用した。また、インダクタンスは共振周波数が 1MHz となるように試作し、負荷抵抗には 50Ω の無誘導巻メタルクラッド巻線抵抗を用いた。本共振回路における Q 値は 3.6 となった。図 5(a)には、インバータの出力に抵抗のみを接続した場合の出力電圧波形を、図 5(b)には LCR 回路における共振時の抵抗両端の電圧波形を各々示す。図より、LCR 回路により 1MHz 成分のみが通過していることが確認できる。更に高周波電流プローブを用いて回路電流を測定することにより電力を求めた。Fig. 6 に出力電力の伝送周波数特性を示す。結果より、スリップリングおよびインダクタによる電力伝送損失は 18%程度であることがわかった。Fig. 7 には、非接触スリップリングの回転に伴う出力電力 ($f = 1\text{MHz}$) の変化を示す。結果より、電力変動は 1%程度と安定した伝送が可能であることを確認した。これは、より高い Q 値を有するシステムでも安定した電力伝送が可能であることを示す。

4. まとめ

非接触スリップリングの回転に伴う容量変動について検討した結果、変動の原因は回転による電極間隔の変化であり、電極間隔の増大により変動は抑制できることを確認した。ただし、システムの小型化のためには狭い電極間隔が要求される。今後、回転による間隔変動が小さな形状、材料などについて検討を行い、小型でかつ安定した非接触電力伝送が可能なシステムの構築を目指す。

参考文献 [1] 高橋芳浩 他, 電子情報通信学会論文誌 B, Vol. J105-B, No.3, pp.375-378, 2022.

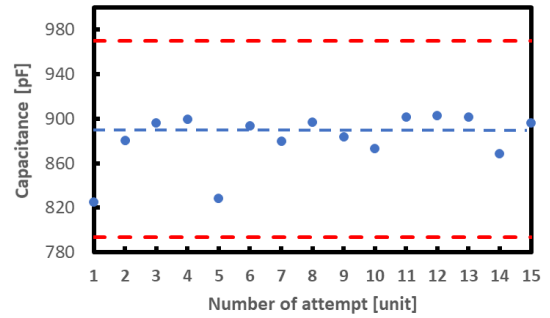
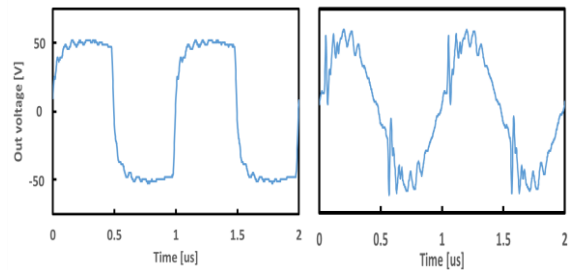


Figure 4. Capacitance fluctuation of slip ring due to rotation (13 electrodes, 2mm gap).



(a) Without slip ring (b) With slip ring and inductor.

Figure 5. Output voltage waveform of inverter ($f = 1\text{MHz}$) on load resistance.

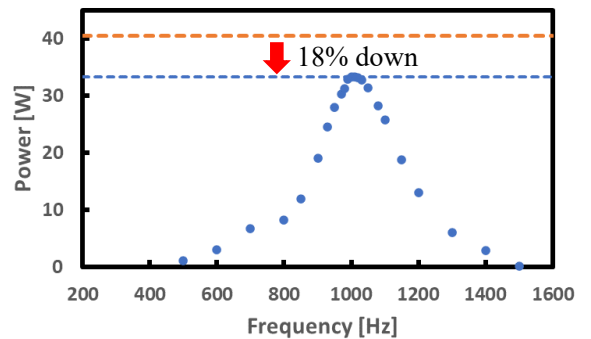


Figure 6. Frequency characteristic of output power using non-contact slip ring.

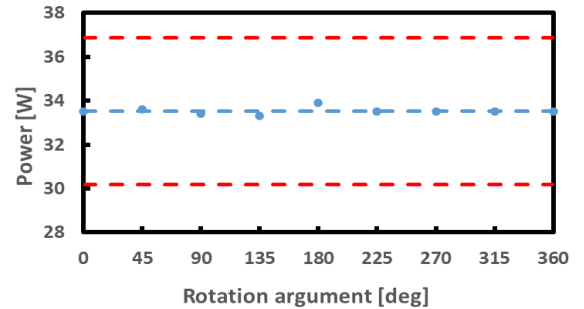


Figure 7. Change of transmitted power by rotation of non-contact slip ring.