

電界結合型非接触スリップリングの設計

A design for electric field coupling noncontact slip ring

○小野寺巧<sup>1</sup>, 大島綾太<sup>2</sup>, 呉研<sup>3</sup>, 塩野光弘<sup>4</sup>, 高野忠<sup>3</sup>, 高橋芳浩<sup>3</sup>

\*TakumiOnodera<sup>1</sup>, RyotaOshima<sup>2</sup>, YanWu<sup>3</sup>, MitsuhiroShiono<sup>3</sup>, TadashiTakano<sup>3</sup>, YoshihiroTakahashi<sup>3</sup>

**Abstract:** The design guidelines for power transmission using electric field coupling noncontact slip rings are investigated. It was confirmed that higher frequency and higher input voltage were suitable to realize the system. We evaluated the system parameters for power transmission of 100W.

1.背景

本研究の最終目標は電界結合型スリップリングの作製である。風力発電機、レーダアンテナ、ロボットアームなどの回転運動を有する機器では、静止体一回転体間の電力伝送が不可欠になる。一般にこのような回転体間の電力伝送は、金属製リングと摺動電極（ブラシ）との接触を用いたスリップリングが使用される。しかし、摩擦による劣化や破損、摩擦により発生した摩耗粉による接触不良などのため、定期的な保守が必要になる。また人工衛星などに搭載し宇宙空間でも使用されているが、保守作業が困難であることから非接触化が特に望まれる。そこで本研究では非接触型の電界結合型スリップリングについて検討を行った。

Fig.1(a), (b)に我々が提案する電界結合型スリップリングの概念図および回路図を示す。内外導体間の空隙をコンデンサとして利用することにより電氣的に電界結合させ、非接触電力伝送を実現するものである。また、LC直列回路の共振周波数を用いることにより、負荷に高効率で電力を伝送することを考えている。実際には、電力送信側にはインバーターを、負荷側にはコンバーターを構成することにより DC-DC 電力伝送が可能になるが、本研究では交流電源と抵抗負荷を用いることとして、電界結合型スリップリングの実現に最適な周波数、送信電圧、各素子定数について検討を行った。また、本設計に基づき回路素子の試作を開始したので、現状について以下に報告する。なお今回の検討では簡単化のために、1対のC,Lを有する共振回路において、100Wの電力伝送を行うことを目標とした。

2. 設計方針

2.1 周波数

電界結合型スリップリング実現においてシステムの小型・軽量化が望まれる。LC直列回路における共振周波数は  $f_0 = 1/2\pi\sqrt{LC}$  であることから、L,Cの小型化のためには伝送周波数の高周波化が必要となる。高電力送信源の周波数はパワーMOSFETの動作周波数で支配されるが、100Wの電力伝送を考えた場合、既存技術で安定した出力を得られる最高周波数は100kHz程度である。そこで、本システムにおける伝送周波数は100kHzとした。

2.2 入力電圧

Fig.2に  $C=30nF$ ,  $L=80\mu H$  ( $f_0=100kHz$ ) の直列回路を用いて、100Wの

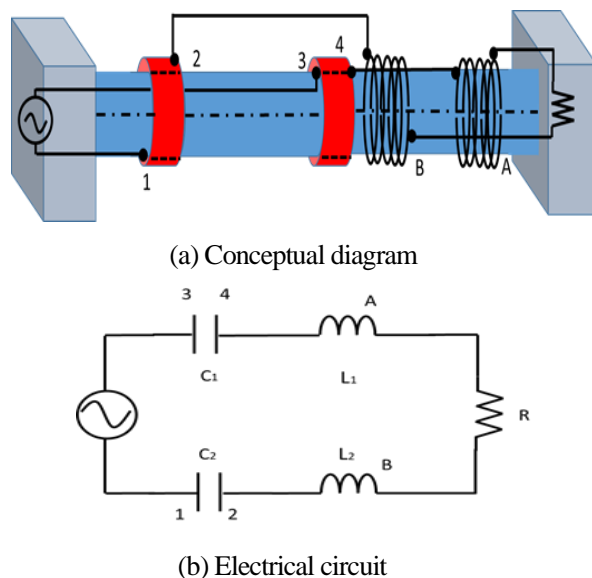


Fig.1 Electric field coupling noncontact slip ring

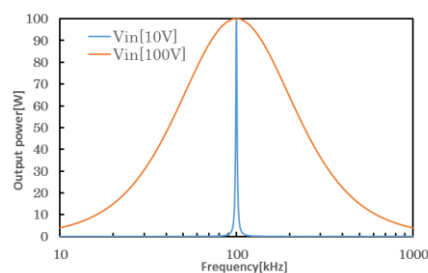


Fig.2 Frequency dependence of output power

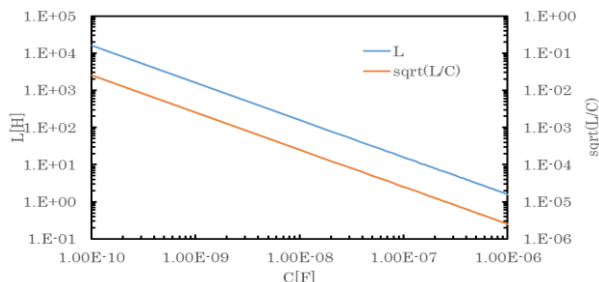


Fig.3 Change of L and  $\sqrt{L/C}$  with varying C at  $f_0=100kHz$

電力伝送を行う場合の出力電力の周波数特性における、電源電圧依存性を示す。結果より低電圧伝送では特性が急峻となり素子特性の変動が出力電力に与える影響が大きくなることわかる。次に、共振時に C,L に印加される端子電圧  $V_{C0}$ ,  $V_{L0}$  について考える。共振電流を  $I_0$  とすると、

$$|V_{C0}| = |V_{L0}| = I_0 \sqrt{L/C} \quad (1)$$

と求められる。これは共振電流の増大（電源電圧の低下）に伴い C,L の印加電圧が大きくなることを示している。

以上の検討より、システム構成において電源電圧の高電圧化が有利であることがわかった。一方、現在市販されている高周波（100kHz）電力増幅器の出力電圧は 60Vp-p（42Vrms）が最大であることから、この電源を用いて電力伝送を行うこととした。このとき、100W 伝送における  $R=18\Omega$ ,  $I_0=2.4A$  となる。

### 2.3 C,L について

容量値 C を減少させた場合、Fig.2 に示した周波数特性はより急峻になり、また、式(1)より共振時における C,L の端子電圧も大きくなる。これは、大きな C を用いる事により、素子特性変動の影響および L,C に印加される電圧を共に低減可能であることを示す。容量の試作を考えた場合、電極間距離 0.5mm 程度であれば実現可能と考えられる。このとき、空気の絶縁耐圧が 3kV/mm であるとする、1.5kV まで印加可能である。ただし、温度や湿度による絶縁耐圧の低下を考慮して、共振時の容量端子電圧が 150V 以下となるように設計を進めた。

Fig.3 に、共振周波数を 100kHz とした時の容量値 C に対するインダクタンス L および  $\sqrt{L/C}$  の値のグラフを示す。図より、 $C=32nF$  における  $L=79\mu H$ ,  $\sqrt{L/C}$  は約 50 であることがわかる。これは、共振電流 2.4A における  $V_{C0}$ ,  $V_{L0}$  が 120V になることを示している。以上の結果より、 $C=32nF$ ,  $L=79\mu H$ ,  $R=18\Omega$ ,  $V_{in}=60Vp-p$ , 容量極板間距離 0.5mm の条件で  $f_0=100kHz$ , 100W の伝送システムが構成可能であることがわかった。

### 3. コンデンサ試作

$C=32nF$  の容量の試作について検討した。なお容量の自作を考慮すると、0.5mm の空隙を安定して大面積で確保することは困難である。そこで今回では先ず回転機構をあきらめ、電極間に厚さ 0.5mm のナフロンシート（比誘電率 1.6）を挿入した構造で検討した。なおナフロンシートの絶縁耐圧は 18kV/mm 程度である。半径 50mm、長さ 150mm 程度の円筒形状での実現を目指し、内半径 50mm、外半径 50.5mm、長さ 150mm の円筒形コンデンサの容量値を試算したところ、 $C=1.3nF$  程度となり、1層のコンデンサでは  $C=32nF$  の実現は困難であることがわかった。そこで、Fig.4 のように多層円筒構造のコンデンサにすることでの実現を試みた。その結果、半径 20~50mm の領域に長さ 140mm の多層コンデンサ（40層）を作成することにより、32nF の容量値が得られることが試算された。

Fig.5 に試作したコンデンサ（容量）周波数特性を示す。結果より 200kHz 以下の領域で 30.2nF の容量が得られることを確認した。なお、高周波数領域での容量減少は直列抵抗成分によるものと考えている。また Fig.6 には端子に直流電圧を印加した際のリーク電流を示す。1kV に至るまで絶縁破壊は観測されず、200V におけるリーク電流は 0.2μA 以下であることを確認した。

### 4. まとめ

電界結合型非接触スリップリングの実現に向けた基本設計について検討した。その結果、100W 程度の電力伝送が可能となる指針を得た。今後、試作機による実験および更なる設計最適化を進め、高電力伝送が可能なシステム実現について検討を進める。

謝辞：本研究の一部は、JSPS 科研費 JP18K04109 の助成を受けたものです。

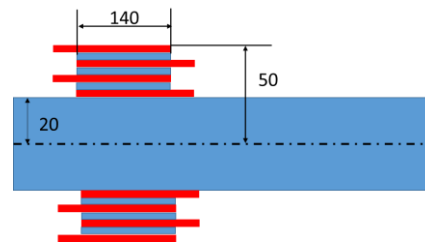


Fig.4 Cross sectional view of multilayer cylindrical capacitor

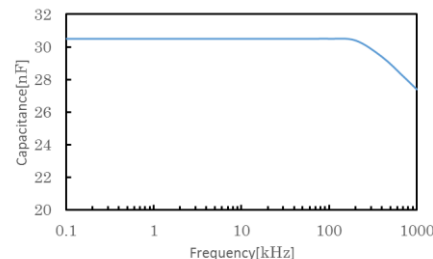


Fig.5 Frequency dependence of measured capacitance

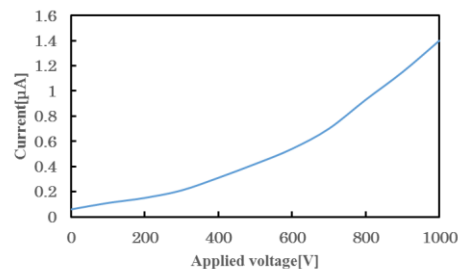


Fig.6 Leakage current of capacitor