

M-3

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

Consideration of electric field coupling type non-contact slip ring using multilayer cylindrical capacitor

○小野寺 巧<sup>1</sup>, 大島 綾太<sup>1</sup>, 塩野 光弘<sup>3</sup>, 高野 忠<sup>2</sup>, 高橋 芳浩<sup>2</sup>

\*Takumi Onodera<sup>1</sup>, Ryouta Oshima<sup>1</sup>, Mitsuhiro Shiono<sup>3</sup>, Tadashi Takano<sup>2</sup>, Yoshihiro Takahashi<sup>2</sup>

**Abstract** The design guidelines for power transmission using electric field coupling noncontact slip rings are investigated. A rotatable capacitor and coil are fabricated. Successful high-efficiency power transmission using multilayer cylindrical capacitor was confirmed.

背景

風力発電機や人工衛星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になる。一般に同軸回転体間の電力伝送には金属リングと摺動電極(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。特に宇宙空間で使用する場合には保守が困難である。そこで、電界結合型の非接触スリップリング[1]について検討を行った。

Fig. 1に我々が提案する非接触スリップリングの概念図および回路図を示す。回転体間の空隙を利用したキャパシタンス C とコイル L を用いて LC 直列回路を構成し、その共振周波数を用いることにより高効率な電力伝送を行うものである。本研究では、直径 100mm 以下の比較的小型の構造により 100W 程度の電力伝送を行うことを目的に、実現に最適な周波数や入力電圧、また各素子定数について検討を行った。なお、今回は簡単化のために、L, C が各 1 素子で構成された LCR 直列共振回路の検討を行った。

基本設計方針

各素子の小型化のためには高周波伝送が必要となる。インバータなど高周波電力源の周波数はパワー半導体デバイスの動作周波数で制限されるが、100W の電力送信を考えた場合、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 として設計することとした。

次に入力電圧について検討する。同じ電力での伝送の場合、低電圧(大電流)伝送では共振特性が急峻となり、素子特性の変動が伝送電力に与える影響が大きくなる。また、共振時の C, L における端子電圧  $V_{C0}$ ,  $V_{L0}$  は共振電流を  $I_0$  とすると、

$$|V_{C0}| = |V_{L0}| = I_0 \sqrt{L/C} \tag{1}$$

であり、共振電流増大(電源電圧低下)に伴い C, L に印加される電圧が大きくなる。これらの理由により、高電圧(低電流)伝送が有利であることがわかる。ただし、一般に入手できる数 100W 級の高周波電力電源の出力電圧を考慮し、入力電圧  $42V_{rms}$  ( $60V_{0-p}$ ) として設計した。このとき 100W 伝送における負荷抵抗は  $18\Omega$ 、共振電流は  $2.4A_{rms}$  となる。

次に C, L の素子定数について検討する。共振周波数、負荷抵抗が同一のとき、C の減少に伴い共振特性は急峻になる。また、式(1)より C の減少は共振時の各素子端子電圧を増大させる。これらの理由により、できるだけ容量値を大きく設計することが要求される。試作を考えた場合、電極間距離は 0.5mm 程度が最小限界と考える。半径 20~50mm の範囲に、長さ 140mm、電極間隔 0.5mm (誘電体

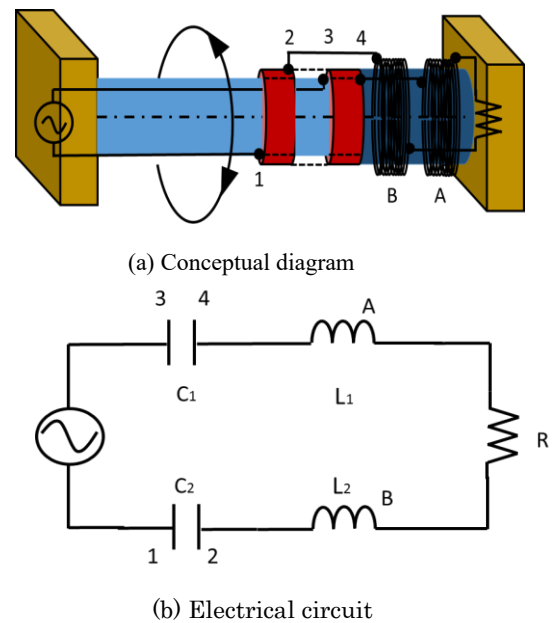


Fig.1 Electric field coupling noncontact slip ring

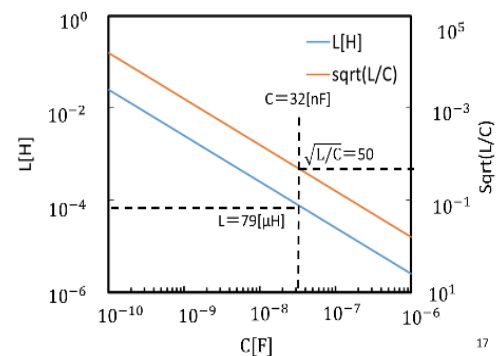


Fig.2 Change of L and  $\sqrt{L/C}$  with varying C at  $f_0=100kHz$

1: 日大理工・院(前)・電子, 2: 日大理工・教員・電子, 3: 日大理工・教員・電気

装荷) の同軸多層キャパシタを作製した場合、 $C=32\text{nF}$  が得られる。Fig.2 より、 $f_0=100\text{kHz}$ 、 $C=32\text{nF}$  のとき、 $L=79\mu\text{H}$ 、 $\sqrt{L/C} \approx 50$  であり、 $I_0=2.4\text{A}_{\text{rms}}$  における  $V_{C0}$ 、 $V_{L0}=120\text{V}_{\text{rms}}$  となることから、空隙間隔  $0.5\text{mm}$  の絶縁耐圧は  $1.5\text{kV}$  程度であることから、容量の絶縁破壊に関しては十分余裕が持てる。また、直径  $100\text{mm}$  のソレノイドコイルで  $L=79\mu\text{H}$  を得る場合、巻き数  $23$  回で構成できる。  $V_{L0}=120\text{V}_{\text{rms}}$  のとき、コイルの線間電圧は  $7\text{V}$  程度となり、これも絶縁破壊の点からは問題ない。

以上の検討より、 $C=32\text{nF}$ 、 $L=79\mu\text{H}$  の電界結合型非接触スリップリングにより、 $f_0=100\text{kHz}$ 、 $V_{\text{in}}=42\text{V}_{\text{rms}}$  の電源を用いて  $100\text{W}$  程度の電力伝送システムが構成可能であることを明らかにした。

### 多層円筒型コンデンサの試作

$C=32\text{nF}$  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、 $0.5\text{mm}$  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  $0.5\text{mm}$  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。Fig.3 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  $20\sim 50\text{mm}$  の領域に長さ  $140\text{mm}$  の多層コンデンサ (40 層) を作成することにより、 $24\text{nF}$  の容量値が得られることが試算された。Fig.4 に試作したコンデンサの測定容量値の周波数特性を示す。結果より全ての周波数領域で  $22.9\text{nF}$  の容量が得られることを確認した。一方コイルは、巻き数  $30$  回、半径  $57.5\text{mm}$ 、長さ  $37.5\text{mm}$  として作製した。Fig.5 にコイル(リアクタンス) 周波数特性のグラフを示す。すべての周波数領域において  $98.4\mu\text{H}$  程度のリアクタンス値を得られた。

### 電力伝送結果

先の素子を用いて、電力伝送を行った。Fig.6 に示すような回路図を用いて電力伝送実験を行った。なお計算値の算出、実験では素子数  $C=22.9\text{nF}$ 、 $L=98.4\mu\text{H}$ 、負荷抵抗  $R=50\Omega$  を用い、電圧  $60\text{V}_{\text{op}}$  の正弦波をカットオフ周波数  $230\text{kHz}$  とするパワーアンプを通して入力した。Fig.6 に電力伝送結果と計算値との比較の結果を示す。共振時の負荷電力において計算値に比べ  $99.2\%$  での電力伝送を確認した。ここから、回転運動を見据えた構造のコンデンサでの電力伝送は、高効率で電力伝送可能であることを確認した。

### まとめ

電界結合型非接触スリップリングの基本設計方針を組み立てそこから算出された条件下での回転運動を見据えた構造のコンデンサを作製した。またその素子を用いて電力伝送実験を行った。システムにおいて高効率電力伝送に成功した為、回転運動可能なコンデンサの作成を行い、回転下での電力伝送実験の検討を行う。

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。

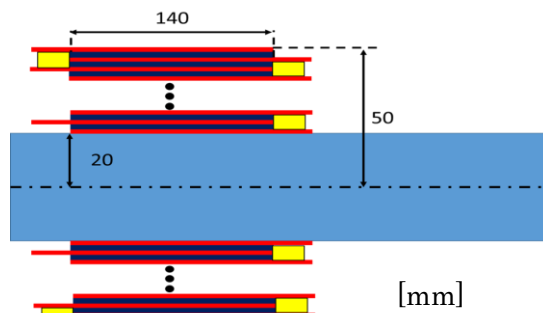


Fig.3 Cross sectional view of multilayer cylindrical capacitor

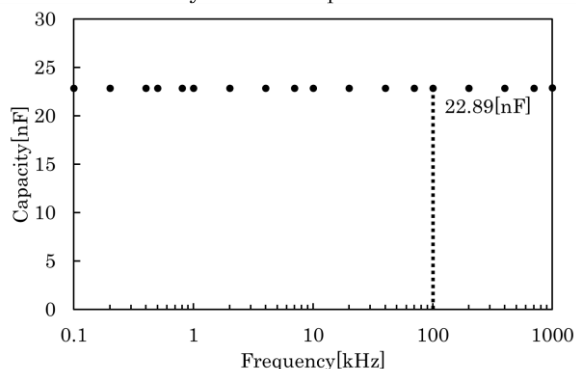


Fig.4 Frequency dependence of measured capacitance

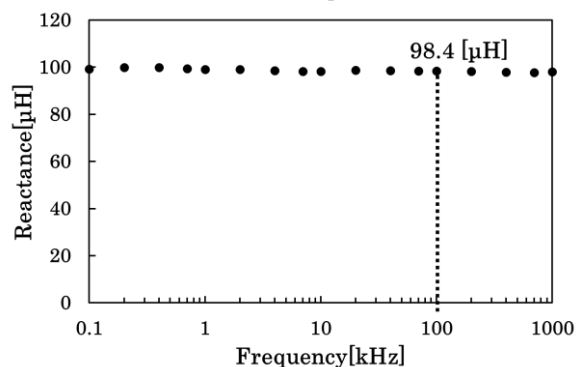


Fig.5 Frequency dependence of measured reactance

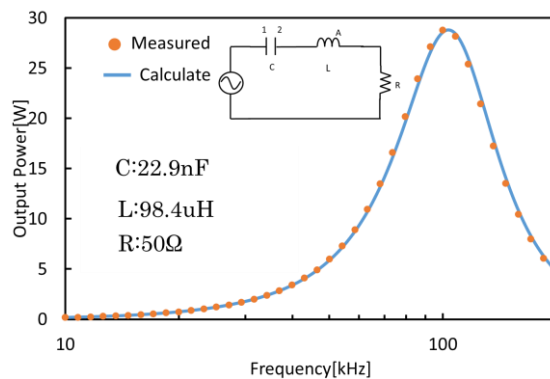


Fig.6 Frequency dependence of load power