

M-1

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

Investigation of capacitor for realization of contactless slip ring

○大島綾太¹, 小野寺巧¹, 小林泰輔², 齋藤大珠², 塩野光弘³, 高野忠⁴, 高橋芳浩⁴
 *RyotaOshima¹, TakumiOnodera¹, TaisukeKobayashi², DaijuSaito²,
 MitsuhiroShiono⁴, TadashiTakano³, YoshihiroTakahashi³

Abstract: The capacitor for realizing an electric field coupling contactless slip ring is discussed. In order to obtain rotatable large capacitance with small size, the capacitor constructed with multiple disks of metal and insulator is proposed. We got predictable result to realize the transmitting power of 100W using proposed capacitor.

1. 背景

現在, 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-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. そのため, 非接触化 (ブラシレス化) が求められる. 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)に本研究で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気的に電界結合させ, 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. 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, これまで単純化のために回転を考慮しないコンデンサを用いて1対のLC直列回路において, 100W電力伝送で検討を行ってきたが, 今回, 回転に向けたコンデンサの構造についての検討を行い, 試作をしたため, 以下に報告する.

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とした.

2.2 入力電圧

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

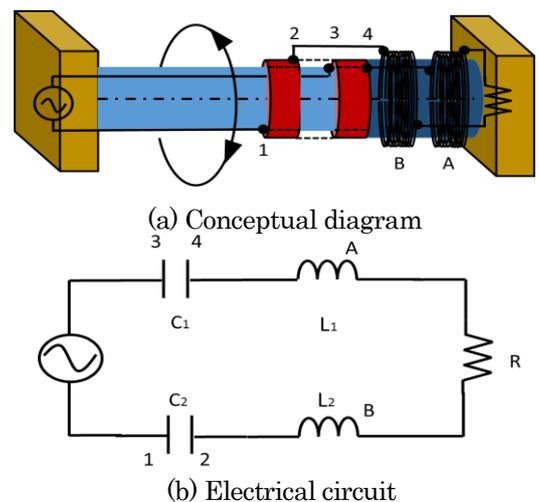


Figure.1 Electric field coupling noncontact slip ring

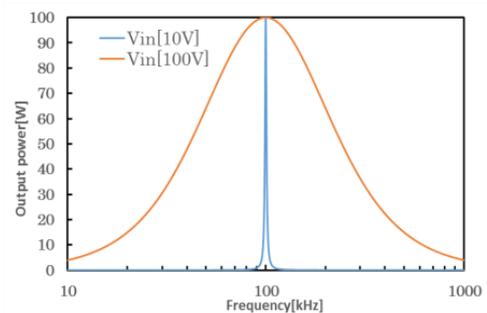


Figure.2 Frequency dependence of output

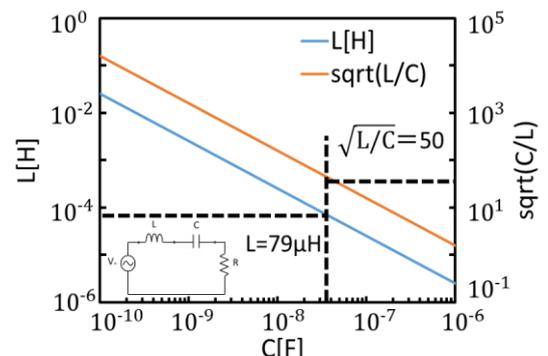


Figure.3 Change of L and $\sqrt{L/C}$ with varying C at $f_0=100\text{kHz}$

100W の電力伝送を行う場合の入力電圧が 10V で抵抗 1Ω で 100W 伝送した際と入力電圧 100V で抵抗 100Ω で 100W 伝送した際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がわかる。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 60V_{0-p}（42V_{rms}）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

今回計算の簡単化のため 1 対の LC 直列回路で計算を行った。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。今回、容量の試作を考えた場合、電極間距離 0.4mm 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、1.2kV 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、 $C=32nF$, $L=79\mu H$, $R=18\Omega$, $V_{in}=60V_{0-p}$, 容量極板間距離 0.4mm 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

今回提案するコンデンサの構造を Fig.4 に示す。大形・小形の円形電極を交互に重ね、電極間の空隙を容量としている。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た。本構造において大小各電極の支持を機械的に分離できれば、同軸回転が実現できる。なお、電極間の導通を防ぐために大形電極両面に絶縁テープを張ることとした。

これまで、簡単化のために 1 対の LC 共振回路により検討してきた。ただし、実際の非接触スリッピングは、Fig.1 に示すように 2 つのコンデンサにより構成され、この場合、必要となる容量は 64nF となる（32nF の 2 倍）。そこで、外径 170mm, 内径 30mm の大形電極、および外径 150mm, 内径 10mm の小形電極を用い、電極間距離 0.4mm, 絶縁テープの厚さ 0.12mm とした構造によりコンデンサを試作した。Fig.5 に各 9 枚の電極（18 層）で構成したコンデンサの測定容量値（周波数特性）を示す。結果より 100kHz で 16.8nF の容量が得られることが確認できた。これより、60 層程度の構造を作製することにより所望される 64nF の容量が得られることが予想される。

4. まとめ

回転に向けたコンデンサの検討を行った。その結果、電力伝送に必要な容量を得られる試算が確認できた。今後、試作を重ね伝送実験を行い実現に向けて検討を進める。

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。

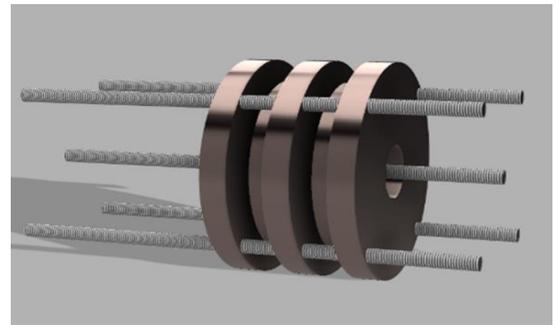


Figure.4 Schematic diagram of multilayer capacitor

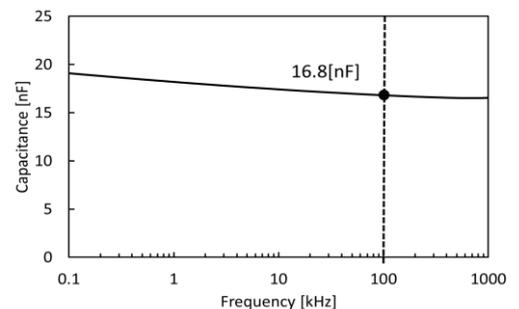


Figure.5 Frequency dependence of measured capacitance of multilayer capacitor with 18 layers