

【助成 40-37】

双方向ワイヤレス電力伝送のオンライン磁気パラメータ同定による高効率制御に関する研究

研究者 立命館大学理工学部 助教 清水 悠生

〔研究の概要〕

近年、家電製品や電気自動車などでワイヤレス給電が注目されている。磁界共振結合を利用したワイヤレス給電では SP 方式が代表的であるが、2 次側インバータにコンデンサを並列接続するため、逆方向給電ができない。本研究では、逆方向電力伝送のための追加インダクタ回路トポロジーを提案し、パリティ時間対称理論に基づく回路設計法と周波数制御方式を明らかにする。回路設計法と制御理論を確立することで、磁気パラメータとシステム特性の関係性が明らかになり、磁気パラメータの同定により更なる高効率制御の可能性が見込めることが分かった。

〔研究経過および成果〕

近年、カーボンニュートラルの実現に向けて、自動車の電動化や再生可能エネルギーの普及が推進されている。再生可能エネルギーは発電量が時間や気候によって大きく変動するため、発電した電気を蓄える蓄電システムが必要不可欠となる。そこで、台数の増加が見込まれる電動車を系統に連携し、「動く蓄電池」として活用する技術が国を挙げて推進されている。

電動車は、蓄電池の性能限界による航続距離の短さや充電時間の長さが課題であり、解決策の一つにワイヤレス電力伝送 (WPT: Wireless Power Transfer) がある。WPT は電動車の走行/停止中に無線給電を行う技術であり、バッテリー容量の補填という点で注目されている。WPT は既に様々な機関において研究・実証が進められているが、多くが「系統→電動車」という一方の給電のみを想定している。しかし、上述した系統連系型電気自動車の実現には、「電動車→系統」という逆方向の電力の流れにも対応可能なシステムが不可欠である。以上の背景から、筆

者らは双方向の電力伝送が可能である WPT システムの実証と高性能化に取り組んできた。先行研究では、1 次側に直列コンデンサ、2 次側に並列コンデンサを設ける SP (Series Parallel) 補償方式の WPT システムを採用した。SP 方式の WPT システムでは、2 次側インバータに並列接続されたコンデンサにより逆方向の電力伝送が不可能であるため、逆方向電力伝送を目的として、外付けインダクタを接続した回路トポロジーを提案した。

先行研究も含めた磁界共振結合型 WPT の一つの重要な問題点は、システムの結合係数により電力伝達効率や出力電力が大きく影響する点である。結合係数は送受電コイルの空間的な位置関係により変化するため、WPT システムの伝送特性が結合係数にロバストであればあるほど、様々なアプリケーションへの利用が促進される。本論文では、筆者らが提案してきた双方向電力伝送が可能な外付けインダクタ付き SP 方式 WPT システムに関して、パリティ時間対称理論に基づいた周波数制御方式について提案する。

図 1 に本研究で提案する回路トポロジー、図 2 に試作した実機構成、図 3 にシミュレーション結果と実験結果の比較を示す。ただし、パリティ時間対象理論に基づき、動作周波数 ω は次式の通り計算した。

$$\omega = \begin{cases} \omega_0 & (k < k_c) \\ \omega_0 \sqrt{\frac{Q_{2eq}^2 - 2 \pm \sqrt{(Q_{2eq}^2 - 2)^2 + 4(k^2 - 1)}}{2(k^2 - 1)}} & (k_c \leq k < 1) \end{cases}$$

$$k_c = Q_{2eq}^{-1} \sqrt{1 - \frac{1}{4} Q_{2eq}^2}$$

ただし、 ω_0 は本システムの共振周波数、 Q_1 、 Q_{2eq} は品質係数、 k は結合係数である。図 3 を見ると、シミュレーション結果と実験結果はよく一致していることがわかり、導出した理論式の正しさを実験的に実証できた。

本理論により、磁気パラメータとシステム特性の関係性が明らかになり、磁気パラメータの同定により更なる高効率制御の可能性が見込めることが分かった。今後は電流電圧のセンシング情報と本理論を組み合わせ、磁気パラメータを同定し、磁気パラメータ情報を用いた周波数制御法の構築および実機実証を実施予定である。

[発表論文]

1. H. Sugihara, M. Ota, Y. Shimizu, Y. Kawabata, "Comparison of SS and SP Circuit Topologies for Wireless Power Transfer Systems Capable of Bi-directional Power Transmission," Proc. of the EPE 2023, DS2p (2023)
2. 清水悠生・杉原弘樹・荒谷 峻太・川畑良尚:「双方向電力伝送が可能な SP 型ワイヤレス電力伝送回路の共振設計」, パワーエレクトロニクス学会 第 250 回定例研究会, JIPE-49-18 (2023)

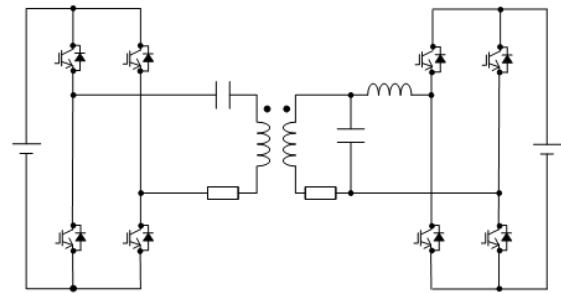


図 1 双方向電力伝送が可能な SP 型 WPT システム

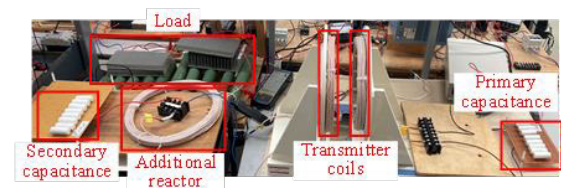


図 2 試作した実験システム

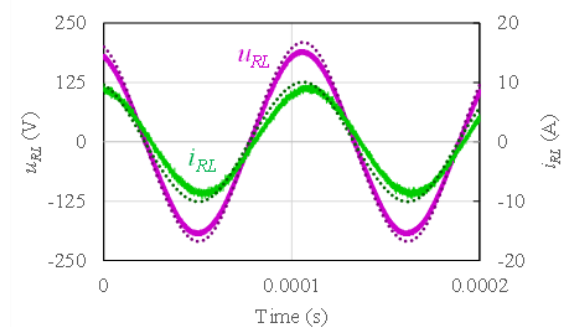
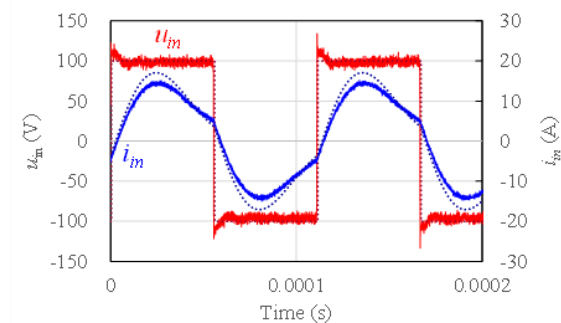


図 3 順方向電力伝送時の実験結果とシミュレーション結果の比較 (実線が実験結果、点線がシミュレーション)