

非接触給電システム接続時における 入力インピーダンス整合形 AC-DC コンバータの整合特性

学生員 日下 佳祐 正員 折川 幸司 正員 伊東 淳一 (長岡技術科学大学)

Matching Characteristics of an Input Impedance Matched AC-DC Converter with High-frequency Wireless Power Transfer Systems

Keisuke Kusaka, Student Member, Koji Oriki, Member, Jun-ichi Itoh, Member (Nagaoka University of Technology)

This paper provides fundamental characteristics of an AC-DC converter, which is used in a receiving side of wireless power transfer (WPT) systems with an input impedance matching. In a high-frequency region, an input impedance of the AC-DC converter should be matched to a characteristic impedance of a transmission line in order to suppress reflected power. The proposed AC-DC converter enables a conversion from 13.56 MHz to DC with an input impedance matching. Moreover, it does not need a high-frequency switching except diodes. In this paper, the fundamental characteristics of the proposed circuit are demonstrated especially with the WPT system as a power supply. The experimental results show that the proposed converter obtains the intended input impedance with or without WPT system. Moreover, the input impedance can be matched to the characteristic impedance regardless of the battery voltage which is connected as a load. However the input voltage total harmonic distortion decays from 7.1% to 20% because the WPT play a role of an immittance converter.

キーワード：非接触給電，磁界共振結合，インピーダンス整合，AC-DC コンバータ，電気自動車

Keywords : wireless power transfer, magnetic resonant coupling, impedance matching, AC-DC converter, electrical vehicle.

1. はじめに

近年，磁界共振結合を用いた非接触給電システムが盛んに研究されている⁽¹⁾⁽²⁾。磁界共振結合方式は，高い Q 値をもつ伝送コイルを用いて電力伝送を行う点に特徴があり，数十 cm といった中距離伝送において高効率である。また，伝送コイル同士の位置ずれが発生した場合の効率低下が小さいという特徴をもつ。このような特徴から電気自動車への適用が期待されている⁽³⁾。しかしながら，磁界共振結合方式では伝送コイルの大きさと伝送周波数に密接な関係があり，数十 kHz といった低周波で駆動した場合には伝送コイルの大型化が問題となる。そこで，Industrial, Scientific and Medical (ISM)帯である 13.56 MHz にて伝送を行うことで伝送コイルの小型化を図ることが考えられるが，その場合受電側にて 13.56 MHz から直流への変換を行う AC-DC コンバータが必要となる。特に，高周波では反射電力の発生を抑制するため，AC-DC コンバータの入力インピーダンスを伝送線路の特性インピーダンスに対して整合を図る必要がある。これまでにこの問題を解決するため，著者らは簡単な回路構成で入力インピーダンスの整合が可能 AC-DC コンバータを提案している⁽⁴⁾。しかしながら，これらの検証は提案する AC-DC コンバータに高周波(RF)電源を直接接続し，その特性を評価するものであり，非接触給電システムを電

源として接続した場合の動作については実証されていない。そこで本論文では，非接触給電システムを電源として接続した場合の入力インピーダンス整合形 AC-DC コンバータの整合特性を明らかにする。実験の結果，非接触給電システムの接続の有無に関わらず入力インピーダンスの整合が可能であることを確認した。一方で，非接触給電システムがイミタンス変換器として動作するため，従来入力電流に生じていたひずみが，入力電圧側が生じるという特性を明らかにした。

2. 入力インピーダンス整合形 AC-DC コンバータ

図 1 に提案回路の入力インピーダンス整合形 AC-DC コンバータを示す。提案回路は文献(5)にて提案されている共振形整流器の後段に電圧制御系を有する双方向昇圧チョッパを接続した回路構成である。共振形整流器は共振インダクタ L_1 及び共振コンデンサ C_{1-4} ，負荷条件を適切に選定することで，高周波スイッチングすることなく入力電流の正弦波化と入力力率の改善が可能である。しかしながら，負荷が変動した場合には入力力率および入力電流，すなわち入力インピーダンスが変化することが報告されている⁽⁵⁾。入力インピーダンス整合を図る場合には，負荷条件によらず一定の入力インピーダンスであることが求められる。そこで，共振形整流器の後段に双方向昇圧チョッパを接続し，等価

的に負荷抵抗を変化させることで入力インピーダンスが一定値をとるようにする。

図 2 に提案回路の制御ブロック図を示す。ここで、 T_{ic} は電流制御系の積分時間、 T_{iv} は電圧制御系の積分時間である。提案回路の入力インピーダンスは共振インダクタンス L_1 、及び共振キャパシタンス C_{1-4} と電圧比 α_v によってのみ決定される。なお、電圧比は入力電圧最大値 V_m に対する整流器出力電圧 v_{ch} の比であり、電圧比を一定とするようチョップパを制御することで負荷によらず入力インピーダンス整合を実現できる。これはバッテリーのインピーダンスを変換していることに等しい。

図 3 に提案回路の動作モードを示す。なお、平滑コンデンサ C_6 の容量が十分大きく、またチョップパにより常に電圧制御されていることから、ここでは簡単のためチョップパ回路以降を電圧源として記す。提案回路は 4 つの動作モードにより動作する。モード I では入力電圧の上昇と共に、入力電流が共振経路 (L_1, C_1, C_2 及び L_1, C_3, C_4) を介して流れ込む。この電流によりコンデンサ C_1, C_4 が徐々に放電される。一方、コンデンサ C_2, C_3 は徐々に充電される。コンデンサ C_2, C_3 の電圧が整流器出力電圧 v_{ch} に達した時点でダイオード D_1, D_4 がターンオンするため動作モード II へ移行する。モード II ではコンデンサに流れていた電流がダイオード D_1, D_4 に転流し、平滑コンデンサを充電する。このモードは入力電圧の極性が反転するまで継続する。なお、動作モード III と IV は電源の極性が負の場合の動作モード I, II と等しいため説明を省略する。本動作により、提案回路の入力電流は正弦波状となり、かつ基本波入力率 1 が達成される。

3. AC-DC コンバータ単体の評価

図 4 に提案する AC-DC コンバータを RF 電源に直接接続した場合の動作波形を示す。なお、ここでは共振コンデンサ C_{1-4} としてダイオードの寄生容量を用いている。また、バッテリーを直流電源と抵抗により模擬している。動作波形より、提案回路を用いることで 13.56 MHz から直流への変換が可能であることを確認した。また、入力電圧及び入力電流はそれぞれ正弦波状となっており、かつ入力率 0.99 を達成している。

提案回路の入力インピーダンスを導出するため、提案回路の入力電圧、電流に対して高調波解析を行なった。ただし、測定に用いた差動プローブ、電流プローブの帯域の制限により、7 次以降の成分については参考値である。基本波 (13.56 MHz) 成分より、提案回路の入力インピーダンスを導出した結果、 $Z_{in} = 52.7 - j0.02 \Omega$ となり、設計値 $50 + j0 \Omega$ に対して実部の誤差 5.4% と良好な結果を得た。これは、反射係数 $\Gamma = 2.6\%$ に相当し、進行波電力に対して生じる反射電力の割合が 0.1% 未満であることを示している。以上の結果より、提案回路を用いることで回路の入力で生じる反射電力を抑制可能であることを確認した。

図 5 に AC-DC コンバータの変換効率を示す。ここで横軸

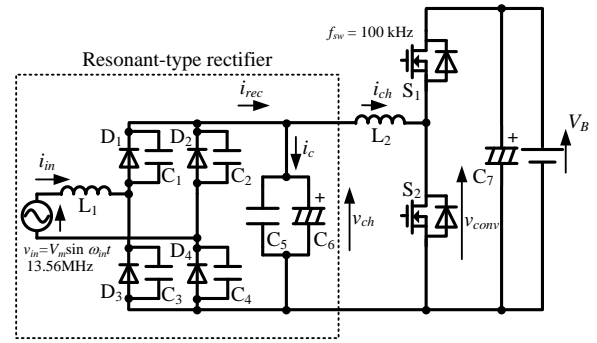


図 1 入力インピーダンス整合形 AC-DC コンバータ
Fig. 1. Input impedance matched AC-DC converter for high frequency wireless power transfer.

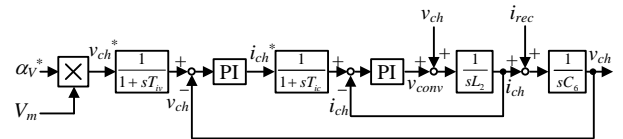


図 2 入力インピーダンス整合形 AC-DC コンバータの制御ブロック図
Fig. 2. Control block diagram for the proposed AC-DC converter.

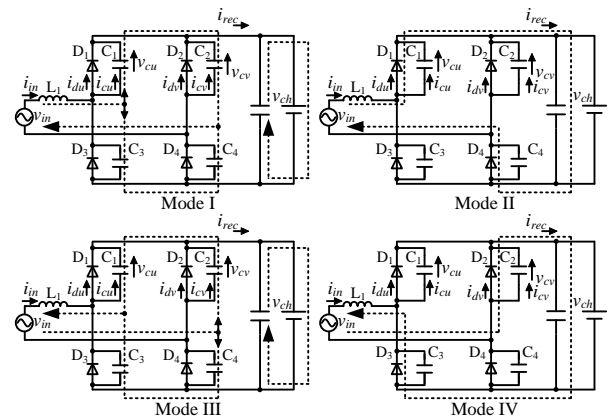


図 3 提案回路の動作モード

Fig. 3. Operation modes of the proposed converter.

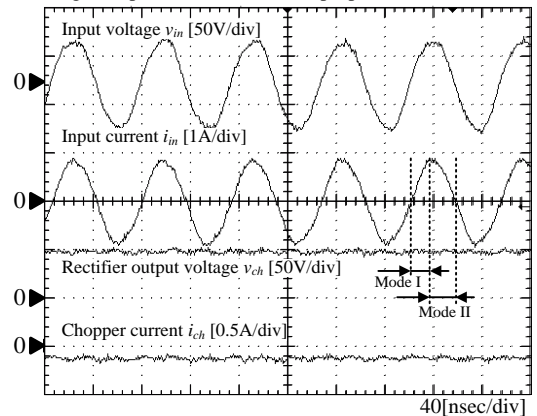


図 4 提案回路単体の動作波形

Fig. 4. Operation waveforms of the stand-alone proposed converter.

はバッテリーの電圧である。なお回路の定格電力は 500 W であるが、ノイズの影響及び測定機器の制限のため、入力電力は進行波電力 $P_F = 40 \text{ W}$ 一定とした。

実験結果より、変換効率は最大でも 62.1% に留まる。これ

は、定格電力の 10%にて実験しており、無負荷損失が支配的となっているためであり、負荷電力を増加させることで改善される見通しである。なお、バッテリー電圧の上昇と共に変換効率が低下するのは、双方向昇圧チョップの昇圧比が高くなるのが原因である。

4. 非接触給電システム接続時の特性評価

4.1. 非接触給電システムの構成

表 1 に伝送コイルの仕様を示す。伝送コイルは、円筒状のアクリルに導線を巻きつけたオープン型ヘリカルアンテナであり、伝送コイル片側の等価回路は RLC の直列等価で表される⁽²⁾。

図 6 に実験に用いた非接触給電システムの概略図を示す。伝送コイルの共振周波数は伝送距離に依存するため、ここでは共振数波数が ISM 帯である 13.56 MHz となるよう伝送距離を 55 mm として実験を行った。

4.2. 入力インピーダンス特性

図 7 に非接触給電システムに提案回路を接続した場合の動作波形を示す。入力インピーダンスは $Z_{in} = 49.3 + j3.9 \Omega$ となり、非接触給電システムを接続した場合にも回路の入力インピーダンス整合が可能であることを確認した。しかしながら、AC-DC コンバータを単体で動作させた場合の動作波形である図 4 と比較すると、入力電圧に大きなひずみが生じていることが分かる。

図 8 に提案回路を単体で動作させた場合と、非接触給電システムに接続した場合の入力電圧・電流の高調波解析結果をそれぞれ示す。ただし、ここで測定機器の帯域制限に

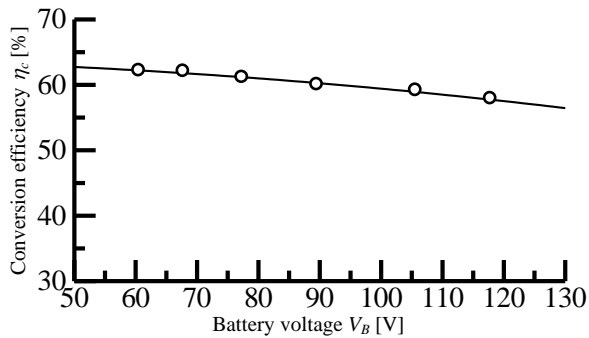


図 5 提案回路の変換効率

Fig. 5 Efficiency characteristics of the proposed converter.

表 1 伝送コイルの仕様

Table 1. The specification of the transmission coils.

Number of turn	6 [turn]
Material	Magnet wire $\phi 2.3$ [mm]
Radius	20 [cm]
Length	9.9 [cm]
Ohmic resistance R_{ohm}	151 [m Ω]
Inductance L	66.0 [μ H]
Capacitance C	3.0 [pF]
Transmission distance	55.0 [mm]

より 7 次以降の成分は参考値である。実験は、それぞれ回路の入力インピーダンスが設計値である $50 + j0 \Omega$ となるよう整流器出力電圧を制御しているため、整合条件下で行われている。

提案回路を単体で動作させた場合には、入力電圧の THD(20 次まで)は 7.1%である。しかしながら、非接触給電システムを接続した場合には入力電圧の THD が 20.7%まで増加する。一方、入力電流に着目すると THD は 8.1%から

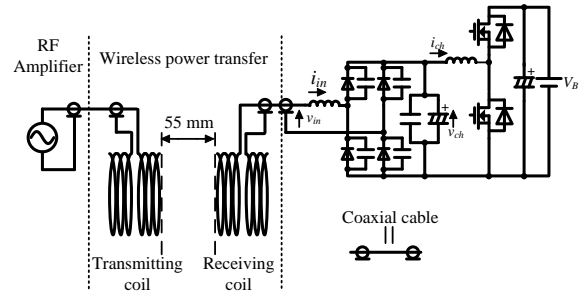


図 6 実験用非接触給電システムの構成

Fig. 6. The configuration of the wireless power transfer system for experiments.

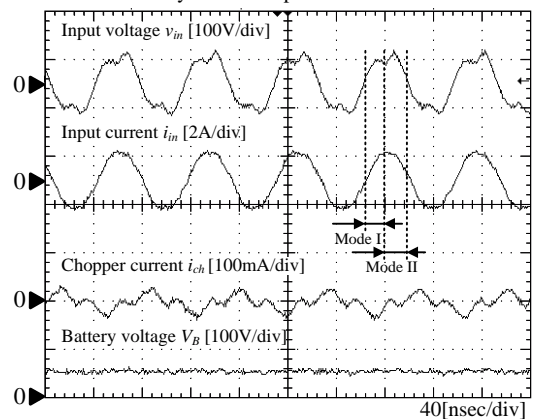


図 7 非接触給電システム接続時の提案回路の動作波形

Fig. 7. Operation waveforms of the proposed converter with wireless power transfer system.

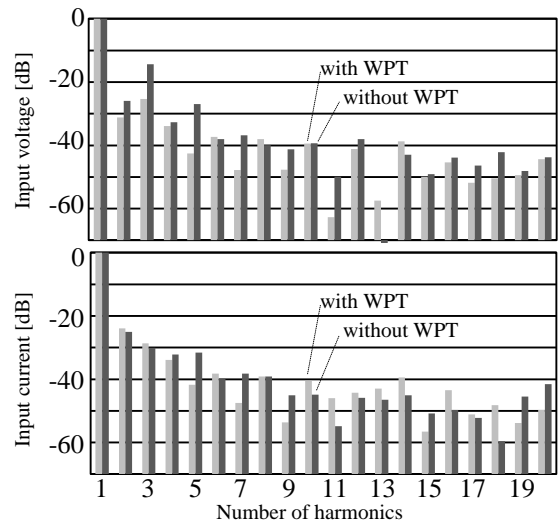


図 8 入力電圧及び入力電流の高調波解析結果

Fig. 8. Harmonics components of the input voltage and input current.

7.8%まで低減され、良好な正弦波が得られていることが分かる。このように、RF電源を直接接続して実験を行った場合には、動作モードの違いにより生じるひずみが電流に現れるが、非接触給電システムを接続した場合には同様のひずみが電圧に生じていることとなる。これは、非接触給電システムがイミタンス変換器となることで、非接触給電システムの出力が共振周波数成分のみを出力する電流源と同様の働きをするためである⁽⁶⁾。

4.3. 非接触給電システムの効率特性

図9に提案する入力インピーダンス整合形AC-DCコンバータを接続した場合の伝送・変換効率を示す。ここで伝送・変換効率とは、RF電源が出力する進行波電力 P_F から受電側の直流部までの効率を示す。なお、横軸は整流器に接続したバッテリーの電圧である。図8と同様に、バッテリー電圧を高くした場合にはAC-DCコンバータの効率が低下するため、伝送・変換効率が低下する。なお、回路の入力インピーダンスは一定として動作しているため、共振形整流器の効率は一定である。伝送・変換効率は負荷電力を増加させることで改善可能である。

4.4. バッテリー電圧変動時の入力インピーダンス特性

図10にバッテリー電圧を90Vから $\pm 40\%$ 変化させた場合の回路の入力インピーダンスを示す。(a)が入力インピーダンスの実部、(b)が入力力率である。ここで、入力インピーダンスを一定とするため、整流器出力電圧 v_{ch} はチョップパにより45V一定に制御している。実験結果より、インピーダンス実部の変動はバッテリー電圧の変動40%に対して最大でも2.3%に抑制されており、バッテリー電圧によらずほぼ一定である。加えて、回路の入力力率は全測定点において0.99を達成していることから、回路の入力インピーダンスはバッテリー電圧に依存せず、常に入力インピーダンス整合が可能であることを確認した。

5. まとめ

本論文では、非接触給電システムの受電側に接続するAC-DCコンバータの基礎検証を行った。本論文では特に、非接触給電システムを電源として接続した場合の整合特性を明らかにした。実験結果より、入力インピーダンスは設計値 $50 + j0 \Omega$ に対して $Z_{in} = 49.3 + j3.93 \Omega$ となり、非接触給電システムを接続した場合にも所望の入力インピーダンスを取得可能であることを確認した。また、バッテリー電圧を基準電圧から $\pm 40\%$ 変化させた場合にもインピーダンスの変動は2.3%以内であり、バッテリー電圧に依存せず常に入力インピーダンス整合が可能であることを確認した。しかしながら、非接触給電システムを適用した場合には非接触給電システムがイミタンス変換器として動作するため、AC-DCコンバータの入力電圧にひずみが生じることが明らかとした。今後は、提案回路の損失低減を目指した設計法を明らかにする予定である。

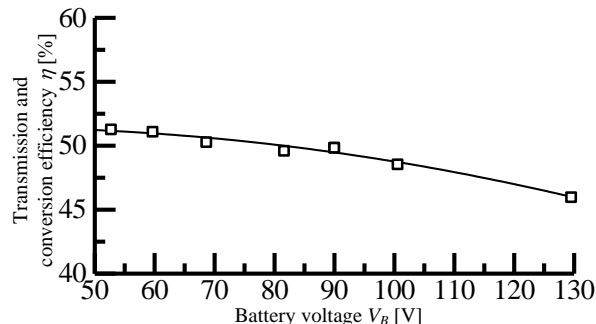
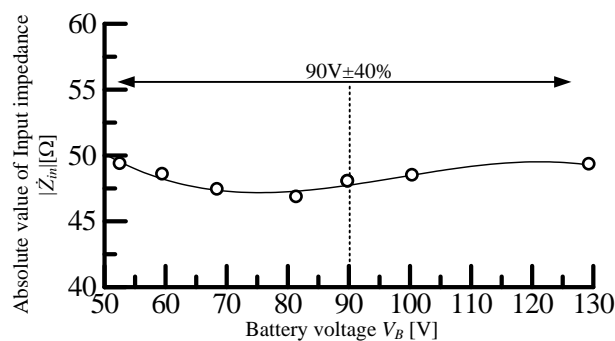
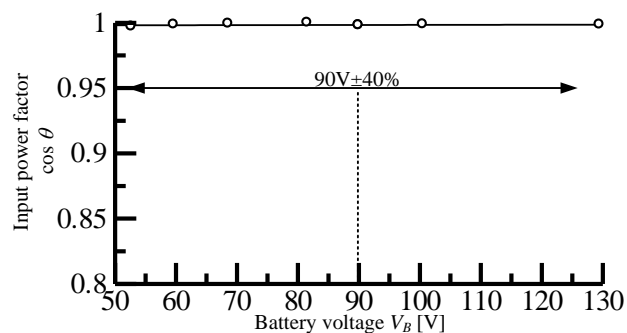


図9 提案回路適用時の電力伝送・変換効率
Fig. 9. Transmission and conversion efficiency of the wireless power transfer system with the proposed converter.



(a) Absolute value of an input impedance Z_{in}



(b) Input power factor $\cos \theta$

図10 バッテリー電圧変動時の入力インピーダンス特性
Fig. 10. Relationship between the battery voltage and input impedances of the proposed converter.

文 献

- (1) A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, M. Soljačić: "Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances", Science, Vol.317, pp.83-86 (2007)
- (2) 居村岳広, 岡部浩之, 内田利之, 堀洋一: 「等価回路から見た非接触電力伝送の磁界結合と電界結合に関する研究-共振時の電磁界結合を利用したワイヤレス電力伝送-」, 電学論 D, Vol. 130, No. 1, pp. 84-92 (2010)
- (3) Y. Hori: "Future Vehicle Society based on Electric Motor, Capacitor and Wireless Power Supply", IPEC, pp. 2930-2934 (2010)
- (4) K. Kusaka, J. Itoh, "Input Impedance Matched AC-DC Converter in Wireless Power Transfer for EV Charger", The 15th International Conference on Electrical Machines and Systems 2012, LS2A-2 (2012)
- (5) 松井景樹, 山本勇, 関爾東, 長谷川勝, 安藤健志, 上田玄, 森秀樹: 「商用周波の共振で直流高電圧を発生する単相整流回路」, 電学論 D, Vol. 127, No. 4, pp. 368-374 (2007)
- (6) 入江寿一, 山名晴久: 「パワーエレクトロニクスに適するイミタンス変換器」, 電学論 D, Vol. 117, No. 8, pp. 962-969 (1997)