

# 小容量向け商用周波数出力の電界型ワイヤレス給電システムにおける非線形負荷特性の解析

学生員 徳力 雅也 正員 日下 佳祐 (長岡技術科学大学)

フェロー 山本 俊二 (東京電力ホールディングス)

## Analysis of Non-Linear Load Characteristics in Utility-Frequency Output Capacitive Wireless Power Transfer System for Low-Power Devices

Masaya Tokuriki, Student member, Keisuke Kusaka, Member (Nagaoka University of Technology)

Shunji Yamamoto, Fellow (Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc.)

This paper proposes a capacitive wireless power transfer system for low-power devices, enabling utility-frequency output. Furthermore, the characteristics of the proposed system are evaluated when non-linear loads are connected. The proposed system transmits power by directly injecting high-frequency waves into full-wave rectified sine waves. Therefore, this is achieved by eliminating the capacitor in the DC link. On the secondary side, the waveform is regenerated to a full-wave rectified sine wave through a diode rectifier and a filter. The utility-frequency output is obtained with the unfolded on the secondary side without PWM. In addition, the proposed system aims to be able to operate with any load connected. Therefore, a capacitor-input diode rectifier circuit was connected as the load in the experiment. The results showed that the current THD is reduced by connecting them to the proposed system. In the high-crest factor range, input/output current THD could be reduced to 18.0%.

**キーワード** : 電界型ワイヤレス給電, 高周波重畳方式, 非線形負荷, クレストファクタ

**Keywords** : Capacitive Wireless Power Transfer, High-Frequency Injection Method, Non-Linear Load, Crest Factor.

### 1. はじめに

近年, スマートフォンやノート PC のようなバッテリーを搭載したモバイル端末の普及が拡大している。これらモバイル端末の充電には, コンセントにプラグを差し込む有線の充電器が多く用いられてきた。しかし, 有線充電器では電源プラグが露出しているため, 劣化や感電などの危険性がある。そこで, 端子を露出せずに電力供給が可能なワイヤレス給電システムが注目を集めている。

これらバッテリーへの充電アプリケーションとして利用されるワイヤレス給電システムは, 電力伝送時に高周波の交流を必要とする。一般的に, ワイヤレス給電システムは電力系統に接続され, 低周波の交流入力から変換するため, 一度直流平滑してから高周波の交流を与える。受電側では反対に, 高周波の交流を直流平滑してから商用周波数で出力する。この直流平滑部では, 大容量の電解コンデンサが用いられており, 回路全体の大型化や低寿命化の要因となりえる<sup>(1)</sup>。

これら問題を解決するために, これまでに様々な手法で対策が報告されてきた。しかし, 先行研究では提示されているシステムは, 特定のバッテリー電圧に合わせてワイヤレス給電システムが設計されており, 既存のアプリケーションへ適用することが困難である<sup>(2)</sup>。既存のアプリケーションへワイヤレス給電システムを適用するためには, 商用周波数出力が必須となる。そこで著者らは, 商用周波数出力を可能とする, 小容量向けのワイヤレス給電システムについて提案してきた<sup>(3)</sup>。

本論文では, 提案するワイヤレス給電システムに様々な非線形負荷が接続された場合における動作について, 実機検証を行った。小容量の製品では, PFC 回路を含まない, 非線形・低力率な負荷も多く存在する。提案システムでは, 上記アプリケーションにおいても動作可能であることを確認するために, 非線形負荷を接続した際の動作をシミュレーション及び実機検証により確認した。これにより, 提案システムに非線形負荷が接続された場合においても, 動作が可能であることを確認し, その特性を取得したため報告する。

### 2. 提案する WPT システム構成

#### (2-1) 高周波重畳方式

図 1 に提案する AC-AC 変換を有するワイヤレス給電システムの回路構成を示す。従来手法では, 整流器後段の平滑用コンデンサに大容量の電解コンデンサが採用されており, これによって交流を直流へと変換した後, 電力伝送が行われる。一方, 本提案システムでは, インバータ直流側電圧を平滑せずに全波整流波形とし, 高周波を重畳して電力伝送を行う。

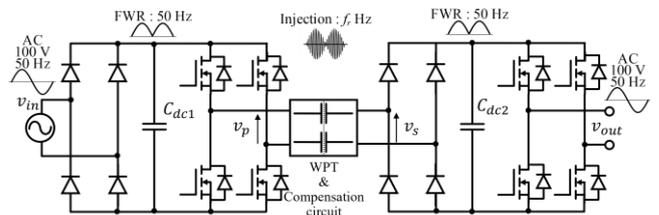


Fig. 1. Proposed system capable of utility-frequency.

受電側は整流器により共振周波数成分を除去し、極性切り替え回路(duty 比:0.5)によって商用周波数の正弦波を生成する。よって、理論上平滑用の大容量コンデンサを必要としないため、商用周波数出力を行いつつ、回路全体の小型化や長寿命化が見込める。しかし、実験ではスイッチングによるサージの吸収を目的とした小容量のスナバコンデンサを接続している。これに合わせて、シミュレーション上でも同様に DC リンク部にコンデンサを接続している。

## 〈2・2〉 電界型電力伝送方式

本提案システムでは、モバイル端末等の充電アプリケーションを想定している。そのため、システム出力は小容量であり、小型化が可能であることが望ましい。そこで、小電力用途で使用され、回路の小型化が実現可能な電界型のワイヤレス給電システムに注目した。

電界型のワイヤレス給電システムは、結合部に金属の平行平板が用いられ、電界結合することで電力伝送が行われる。このシステムの特徴として、磁気結合による電力伝送を行う磁界型に比べ、低コストで軽量化が可能なが挙げられる。そのため、近年ではモバイル端末のような小容量のアプリケーションへ適用する際は電界型のシステムを用いる研究が増加している<sup>(4)</sup>。

図 2 に提案システムにおける電力伝送及び共振補償回路を示す。本回路では、1 次側インバータの出力電圧  $v_p$  を  $C_{f1}$ ,  $L_{f1}$  の共振回路によって昇圧し、相受電間で生じる電位差を低減させる。また、共振方式には共振インダクタ  $L_1$ ,  $L_2$  を直列に接続する直列共振方式を採用した。

## 〈2・2〉 既存の小容量製品を想定した負荷の検証

本提案システムは、既存のアプリケーションへの接続を想定している。そのため、あらゆる状態の負荷が接続された場合でも動作が可能であることを確認する必要がある。

100 W よりも大容量の製品では、製品への入力部に PFC 回路が用いられる。これは、力率の改善あるいは交流から直流への変換時に生じる高調波成分を抑制する目的で用いられる。特に、コンデンサインプット型のダイオード整流平滑回路や位相制御回路を含む製品は、高調波を多く含む電源電流が流れるため、PFC 回路は必須となっている。

しかし、100W 以下の小容量機器においてはこの限りではない。実際に、高調波電流の限度について記された IEC61000-3-2 ではある条件に当てはまるいくつかの機器については規制対象から除外されている。例えば、「定格 5 W 未満の照明機器」や「有効入力電力 75 W 以下の照明機器以外の機器」については限度が定められていない。そのため、PFC 回路が

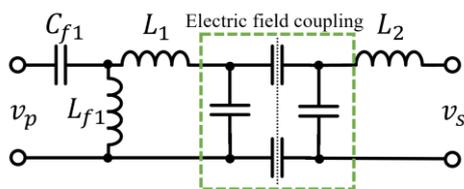


Fig. 2. Applied capacitive power transmission circuit.

接続されていない機器も多く存在する<sup>(5)(6)</sup>。

本論文では、提案システムにおいても小容量で非線形・低力率な負荷が接続された場合においても、同様に動作可能であることを確認する。また、この時の高調波が負荷単体時よりも悪化していないことを確認する。なお、本論文では負荷として、図 3 に示すようなコンデンサインプット型のダイオード整流器を使用した。

## 3. シミュレーション結果

### 〈3・1〉 非線形負荷接続時の動作波形

表 1 に実行したシミュレーション条件をまとめる。また、図 4(a)に入出力電圧、1 次側及び 2 次側のコンデンサ両端電圧、システムの入出力電流を示す。ただし、システムの入出力電流波形には、合わせて非線形負荷単体動作時の入力電流も示している。図 4(b)には、この時の 1 次及び 2 次側の伝送電圧を示す。シミュレーションでは、負荷に非線形負荷として、クレストファクタが 3.0 となるようにコンデンサを調整して接続した。

入出力の電圧を見ると、低力率な負荷を接続した場合、入力電圧は正常に正弦波出力がされていることが確認できる。一方で、出力電圧はゼロクロス周辺で急峻な変化が見られ、接続している負荷の影響が大きく表れていることがわかる。また、電流は非線形負荷単体で動作させた場合よりもピークが抑えられていることが確認できる。

この時の電流 THD は、ダイオード整流器単体動作時は 57.2%、提案システム接続時の入力電流が 42.7%、出力電流は 46.2%という結果になった。この結果より、提案システムを通すことで電流 THD を改善することがわかる。これは、提案システムの共振補償回路や DC リンクのスナバコンデンサ等の受動素子により、高調波成分が吸収された結果と考えられる。

以上より、提案システムを通して負荷を接続しても異常なく動作が可能であることを確認した。また、このシステムに

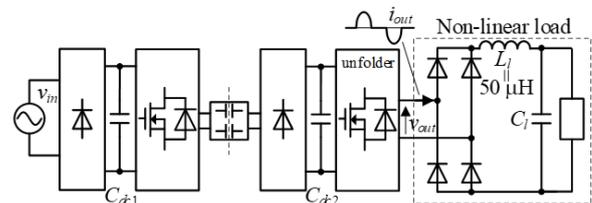
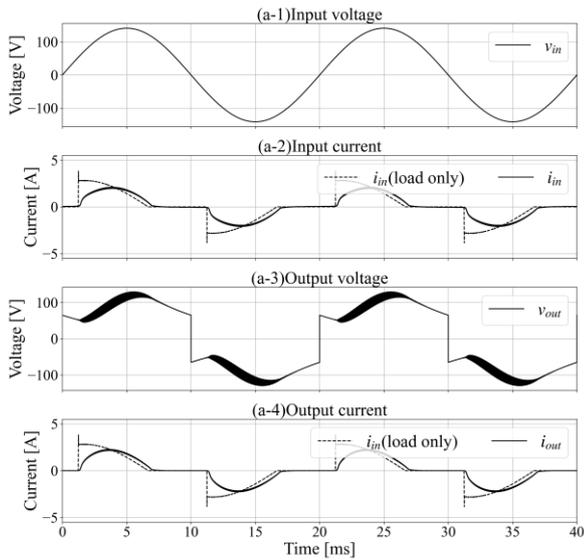
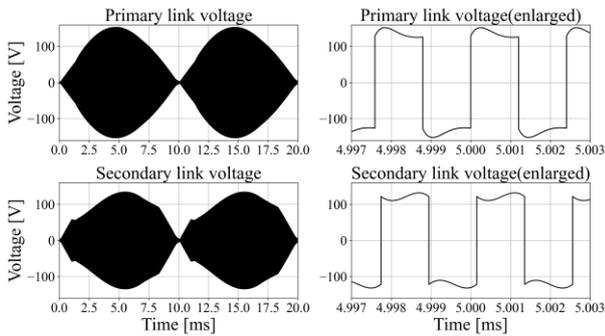


Table 1. Simulation condition.

|                  | Parameters                | Symbol        | Value             |
|------------------|---------------------------|---------------|-------------------|
|                  | Input voltage             | $v_{in}$      | 100 [V]           |
|                  | Output voltage            | $V_{out}$     | 100 [V]           |
| Proposed system  | Output power              | $P_{out}$     | 100 [W]           |
|                  | Utility frequency         | $f_s$         | 50 [Hz]           |
|                  | Resonant frequency        | $f_r$         | 400 [kHz]         |
|                  | DC link capacitor         | $C_{dc1,2}$   | 22 [nF]           |
|                  | Unit capacitance constant | $H_{dc}$      | 4.4 [ $\mu$ J/VA] |
|                  | Non-linear load           | Load inductor | $L_l$             |
| Load capacitance |                           | $C_l$         | 54.8 [ $\mu$ F]   |
| Crest factor     |                           | CF            | 3.00 [-]          |



(a) Voltage and current waveform with non-linear load.



(b) Primary and secondary transmit and receive voltages.

Fig. 4. Operating waveform of the proposed system with non-linear load.

より電源系統へ流入する高調波成分が抑制できていることを確認した。

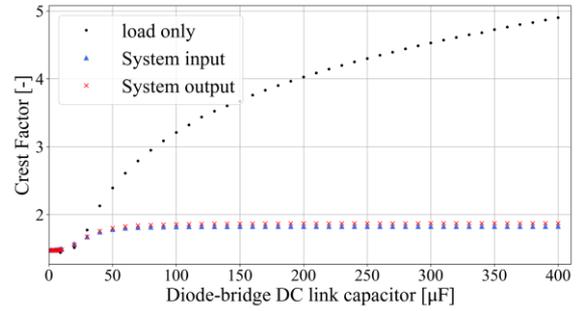
### 〈3・2〉 提案システムの有無による THD の変化

〈3・1〉の結果より、提案システムを通すことで電流 THD が改善されることを確認した。この特性がほかの Crest Factor で与えられる負荷においても同様の特性となるかを検証する。

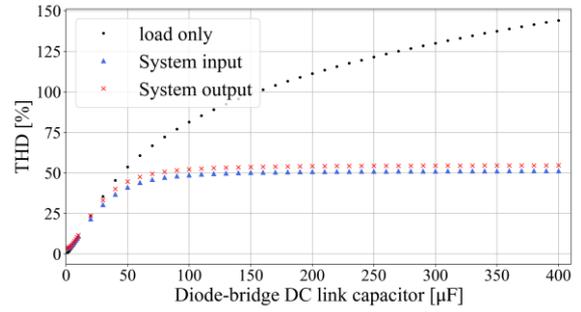
ダイオード整流器の DC コンデンサ容量を変動させることで Crest Factor を変動させ、この時の THD を比較する。

このシミュレーション結果を図 5 に示す。図 5(a)では、負荷のキャパシタを変更した際の Crest Factor を、(b)では THD をダイオード整流器単体で動作させた時、提案システムを接続した際の入出力で描画している。

この結果より、ダイオード整流器単体で動作させた場合、負荷のキャパシタを変動させることで Crest Factor が上昇し、それに伴って THD も高くなるのがわかる。一方、提案システムを間に接続すると、低 Crest Factor の領域では Crest Factor の上昇に合わせてシステム入出力電流 THD も同様に上昇するが、ある点から飽和して THD が概ね変わらなくなることがわかる。この時のコンデンサ容量は



(a) Comparison of Crest Factor at different capacitance.



(b) Comparison of THD at different capacitance.

Fig. 5. Non-linear load and the proposed system characteristics for varying load capacitance.

60  $\mu\text{F}$  であり、これ以上の容量では提案システムの入出力電流は共に大きくは変わらない。これは、負荷の整流器に対して提案システムの出カインピーダンスが高いからだと考えられる。したがって、電源から見て負荷のインピーダンスを無視することができる。以上の理由から、ダイオード整流器を単体で動作させる場合と比較して、Crest Factor が高い負荷を接続した時ほど提案システムにより THD の改善割合が大きくなる。

## 4. 実機検証

### 〈4・1〉 非線形負荷接続時のシステム動作

図 6 に、ダイオード整流器の DC コンデンサ 53.3  $\mu\text{F}$  のコンデンサを用いた負荷を単体動作させた時の電源電圧及び電流波形を示す。この時の Crest Factor は 1.87、電流 THD は 52.9% となった。この負荷を提案システムの入出力に接続し動作させる。

図 7 に上記負荷を提案システムに接続した際の入出力の電圧及び電流波形を示す。この結果より、システムの入出力の

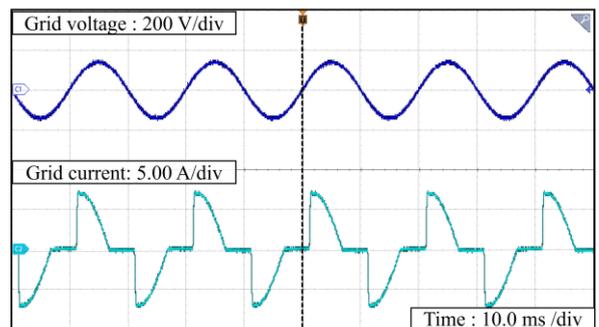


Fig. 6. Diode Rectifier Operation (CF = 1.87).

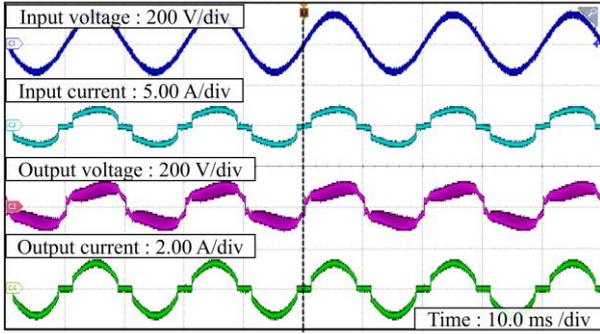
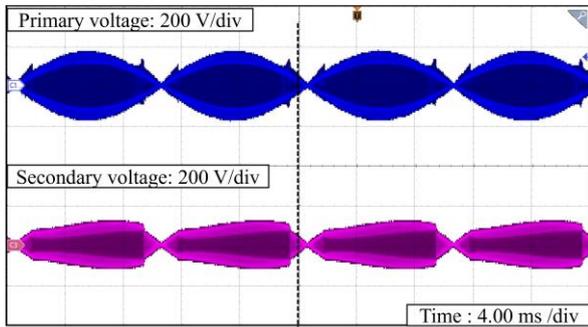
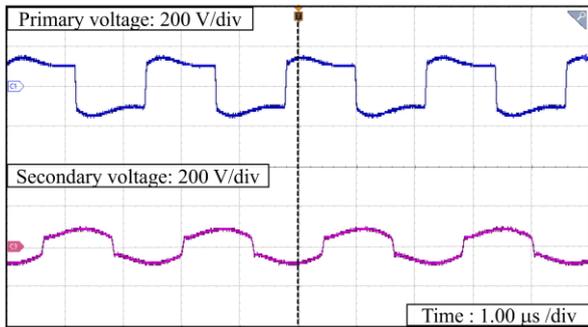


Fig. 7. Operating waveform of the system when a nonlinear load is connected.



(a) Comparison of Crest Factor at different capacitance.



(b) Comparison of THD at different capacitance.

Fig. 8. Non-linear load and the proposed system characteristics for varying load capacitance.

電流がひずんでしまっていることがわかる。しかし、図6の負荷単体で動作させた場合と比較すると、電流ピーク値は抑えられており、ひずみも少ないことがわかる。また、図8にこの時の伝送電圧波形の商用周波数の商用周波数成分と共振周波数成分を示す。この結果より、2次側受電電圧は出力電圧の影響が表れていることがわかる。一方で1次側送電電圧は入力電圧の商用周波数を包絡線にとり、高周波が重畳されていることがわかる。以上より、本提案システムに非線形・低力率な負荷が接続された場合にも動作が可能であることを確認した。

#### 〈4・2〉 クレストファクタ変動に伴う THD の抑制効果

先述したように、提案システムは高クレストファクタの領域において、THD が変動しないことをシミュレーションによ

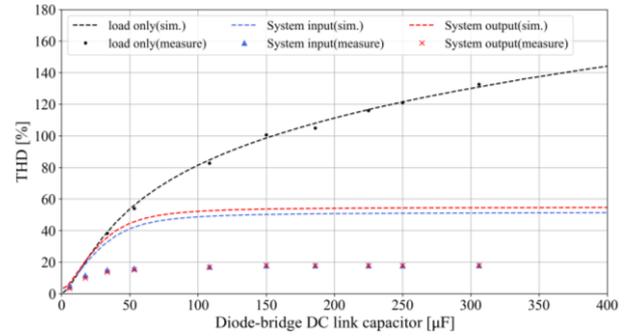


Fig. 9. Connection of the proposed system and non-linear load.

り確認した。これが実機においても同様の特性が得られることを確認するために、計10点のクレストファクタにおける電流 THD を測定した。本結果を図9に示す。結果より、システム接続時の入出力電流 THD の絶対値はシミュレーションと乖離しているものの、シミュレーションと同様の特性が得られていることが確認できる。この時の THD は 18.0%程度で飽和しており、飽和開始がみられる点( $C_l=150 \mu\text{F}$ )での THD の差は 82.6%である。また、低クレストファクタの領域においても、提案システムの入出力電流が負荷単体での動作時のほうが低い THD で得られている。したがって、本提案システムの適用により、入力電流 THD をそもそもの THD と比較して悪化させることがないことを実証した。

## 5. まとめ

本論文では商用周波数出力が可能な小容量向け電界型ワイヤレス給電システムを提案し、非線形・低力率負荷が接続された際の特性について、シミュレーションと実機試験により評価した。この結果より、提案システムが非線形・低力率負荷を接続した場合でも動作が可能であることを確認した。また、高クレストファクタの機器に接続された場合でも、THD は 18.0%よりも悪化しないことがわかった。以上より、本提案システムは既存の小容量製品を接続した場合でも、問題なく動作できるといえる。

## 謝辞

本研究は東京電力ホールディングス株式会社との共同研究により実施したものである。

## 文 献

- (1). S. Zhang, C. Wang and D. Chen : "A Single-Stage Wireless Power Transfer Converter With Hybrid Compensation Topology in AC Input," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 71, no. 8, pp. 8266-8279, 2022.
- (2). J. Liu, F. Xu, C. Sun and K. H. Loo : "A Compact Single-Phase AC-DC Wireless Power Transfer Converter With Active Power Factor Correction," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 70, no. 4, pp. 3685-3696, 2023.
- (3). 徳力雅也, 和田翔生, 日下佳祐, 黒田敏行, No. 4-084, pp. 140-141, 電気学会全国大会, 2024.
- (4). M. Z. Erel, K. C. Bayindir, M. T. Aydemir, S. K. Chaudhary and J. M. Guerrero, IEEE Access, vol. 10, pp. 3116-3143, 2022.
- (5). IEC 61000-3-2:2018, Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-2: Limits – Limits for harmonic current emissions (equipment input current  $\leq 16 \text{ A}$  per phase)
- (6). JIS C 61000-3-2:2019, 電磁両立性 – 第 3-2 部:限度値 – 高調波電流発生限度値