

変圧器と同じ入出力特性をもつワイヤレス電力伝送回路

学生員 奈良 健司* 正員 金子 裕良 (埼玉大学)

Wireless Power Transfer Circuit with Same Input / Output Characteristics as Transformer

Kenji Nara*, Student Member, Yasuyoshi Kaneko, Member (Saitama University)

キーワード: ワイヤレス電力伝送, 理想変圧特性, 補償コンデンサ

(Wireless Power Transfer, Ideal Transformer Characteristics, Compensation Capacitor)

1. はじめに

ワイヤレス電力伝送(WPT)技術は電氣的接点がない電力伝送方式である。電磁誘導方式による WPT[1]では、送受電コイルに直列及び並列にコンデンサを接続する方式[2]をとるのが一般的である。補償コンデンサによって最高効率や力率補償など、目的に応じた回路設計が可能となる。中でも、1次直列2次直列共振コンデンサ方式(SS方式)は、回路が容易であり広く研究されている。一方で、SS方式では特性上、所望の入出力比を得ることが困難である。

そこで本研究では、一般の変圧器のように巻数比に応じて入出力電圧・電流の比が変化する WPT 回路を提案する。送受電コイルに対して、1次直列2次直列・並列コンデンサを接続した S/SP 方式は、変圧器と同じ入出力関係にあり、所望の入出力比を容易に得ることが可能である。本論文ではこの S/SP 方式の回路解析と実験による検証結果を示す。

2. SS 方式の WPT 回路

簡易的な SS 方式の WPT 回路を Fig.1 に示す。ここで、 L_1, L_2, M は 1 次側及び 2 次側コイルの自己インダクタンス、相互インダクタンスをそれぞれ示しており、結合係数 k を用いて(1)式の関係にある。

$$M = k\sqrt{L_1 L_2} \quad (1)$$

(2)式で示すように、1 次側、2 次側のコンデンサ C_1, C_2 はそれぞれ、 L_1, L_2 と周波数 $\omega_0 = 2\pi f_0$ で共振するように値を決定する。

$$C_1 = \frac{1}{\omega_0^2 L_1}, C_2 = \frac{1}{\omega_0^2 L_2} \quad (2)$$

この時、回路の入出力特性は(3)式で表される。なお、 V_{IN}, I_{IN} は入力電圧・電流を、 V_d, I_d は出力電圧・電流を表している。

$$\begin{pmatrix} V_{IN} \\ I_{IN} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -j\omega_0 M \\ -j\frac{1}{\omega_0 M} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_d \\ I_d \end{pmatrix} \quad (3)$$

(3)式から、(2)式のようにコンデンサの値を決定した場合、入出力関係がイミタンス変換特性となる。一方、共振周波数 f_0 と異なる電源周波数で運転することで、特性が変化し、定電圧入力時に定電圧出力となることが知られている[3][4]。このときの電源周波数 f と入出力特性

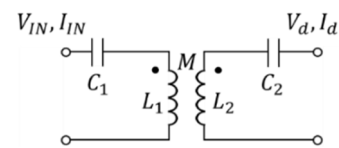


Fig.1 WPT Circuit via SS Method

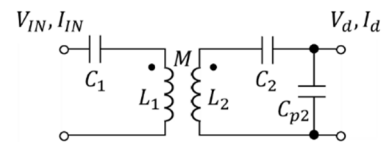


Fig.2 WPT Circuit via S/SP Method

は、(4)式および(5)式で示される。

$$f = \frac{1}{\sqrt{1 \pm k}} f_0 \quad (4)$$

$$\begin{pmatrix} V_{IN} \\ I_{IN} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} & 0 \\ -j\frac{1}{\omega M} & \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_d \\ I_d \end{pmatrix} \quad (5)$$

(5)式は定電圧入力時に定電圧出力となることを示している。ただし、非対角成分が全て 0 ではないため、入力力率が 1 ではないことがわかる。

3. 変圧器と同じ入出力特性を持つ WPT 回路

本章では、(5)式の入出力特性に対して、非対角成分を 0 とする補償を施した WPT 回路(Fig.2)を提案し解析する。Fig.2 は SS 方式の 2 次側に並列にコンデンサを挿入した方式(S/SP 方式)であり、F 行列を用いて(6)式のように表せる。

$$\begin{pmatrix} V_{IN} \\ I_{IN} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} & 0 \\ -j\frac{1}{\omega M} + j\omega C_{p2} \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} & \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_d \\ I_d \end{pmatrix} \quad (6)$$

C_{p2} は非対角成分が 0 となるように決定する。 $C_{p2} > 0$ であることを考慮すると、電源周波数 f は(7)式となる。

$$f = \frac{1}{\sqrt{1-k}} f_0 \quad (7)$$

この時各コンデンサの値を(8)式のように定めると、入出力特性は(9)式で表せる。

$$\begin{cases} C_1 = \frac{1}{\omega^2(1-k)L_1} \\ C_2 = \frac{1}{\omega^2(1-k)L_2} \\ C_{p2} = \frac{1}{\omega k L_2} \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{pmatrix} V_{IN} \\ I_{IN} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} & 0 \\ 0 & \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_d \\ I_d \end{pmatrix} \quad (9)$$

(9)式は変圧器と同じ入出力特性である。特に 1 次側コイルと 2 次側コイルとの形状及び外形寸法が同じソレノイド型コイルを使用した場合、(10)式で表されるように、巻き数比によってのみ入出力電圧比・電流比が決定する。

$$\begin{pmatrix} V_{IN} \\ I_{IN} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{N_1}{N_2} & 0 \\ 0 & \frac{N_2}{N_1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_d \\ I_d \end{pmatrix} \quad (10)$$

4. 給電実験結果

本理論の妥当性を確認するために、実機を用いた給電実験を行った。スパイラル状の円形コイルの場合、1 巻き当たりのインダクタンスが径の大小に左右されてしまう。本実験では、(10)式の特性を得るために、1 次側と 2 次側とで形状及び外形寸法が同じフェライトを用いたソレノイド型コイルを使用した。使用コイルとフェライト寸法を Fig.3 に、実験回路を Fig.4 に示す。コイルの定数と(8)式に基づいて作成したコンデンサの定数を Table.1 に示す。電源周波数 f は 85kHz とした。

実験結果を Fig.5 及び Table.2 に示す。矩形波の基本波成分の実効値は、波高値に 0.9 倍した値である。このことを考慮したうえで、本実験の巻き数比、インダクタンス比及び入出力電圧比を計算すると以下ようになる。

$$\begin{cases} N_1/N_2 = 42/12 = 3.5 \\ \sqrt{L_1/L_2} = 230/18.3 = 3.55 \\ V_{IN}/V_d = 180/49.5 = 3.64 \end{cases}$$

入出力電圧比と巻き数比はおおむね一致しており、提案方式の妥当性を確認できた。矩形波の高調波成分への対策や、コンデンサの値を微調整することで、誤差は少なくなると考えられる。

5. まとめ

本稿では WPT 製品の設計容易性を重視し、一般の変圧器のように巻数比に応じて入出力電圧・電流の比が変化する S/SP 方式の提案と解析を行った。実機を用いた実験により、理論の妥当性を示した。特に、1 次側と 2 次側とでコイルの形状及び外形寸法が同一のソレノイド型コイルを使用することで、入出力電圧比・電流比は巻き数比によってのみ決定する。S/SP 方式はトランス

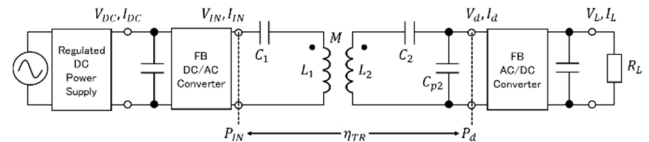
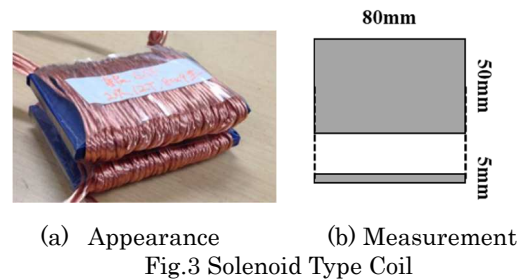
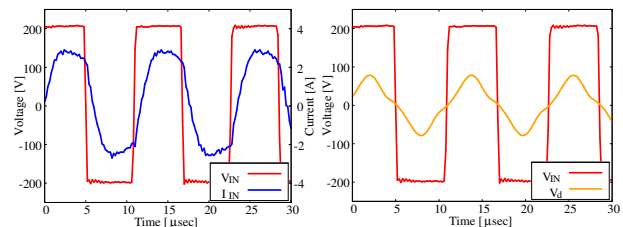


Fig.4 Experimental Circuit

Table I. Transformer Parameters

f [kHz]	85.0	k	0.486
L_1 [μ H]	230	L_2 [μ H]	18.3
r_1 [Ω]	0.240	r_2 [Ω]	0.0456
C_1 [μ F]	0.0297	C_2 [μ F]	0.373
C_{p2} [μ F]	0.398	R_L [Ω]	10.0



(a) V_{IN} and I_{IN} (b) V_d and I_d
Fig.5 Waveform of Voltage and Current

Table II. Experimental Results

V_{IN} [V]	200	I_{IN} [A]	2.18
V_d [V]	49.5	I_d [A]	8.86
P_{IN} [W]	350	P_d [W]	337
pf	0.801	η_{TR} [%]	96.3

間での降圧・昇圧が得意であり、所望の入出力での設計が容易に可能となる。

本実験では、巻き数比によってのみ入出力比が決定することを確認するため、1 次側と 2 次側とで形状及び外形寸法が同じフェライトを用いたソレノイド型コイルを使用した。一方で、小型の WPT 製品においては軽量化のために、フェライトコアを使用しない円形コイルを使用する機会が多い。スパイラル状の円形コイルにおいても、コイルの自己インダクタンスは巻き数の二乗に比例する関係にある。今後、本論文に示した特性が、円形コイルでも得られるかを検討したい。

参考文献

- [1] 居村他:「電磁誘導方式と磁界共振結合方式の統一理論」, 電気学会論文誌 D, Vol.135, No.6, pp.697-710, (2015).
- [2] 藤田他:「直列および並列共振コンデンサを用いた非接触給電システム」, IEEJ Trans. IA, Vol.127, No.2, (2007).
- [3] 今野他:「非接触給電の定電圧出力および定電流出力を電源周波数の変更だけで逆特性にする方法」, 平成 26 年電気学会全国大会, 4-089 (2014)
- [4] 米田他:「共振周波数追従制御を適用した水中探査機向け非接触給電システムの負荷電圧特性の検討」, 平成 30 年電気学会産業応用部門大会, 1-12 (2018)