

出力電圧を考慮した非接触給電回路の考察

眞榮城 圭里*, 金子 裕良 (埼玉大学)

A Study on Wireless Power Transfer System Considering Output Voltage

Keiri Maeshiro*, Yasuyoshi Kaneko (Saitama University)

1. はじめに

近年, 利便性や安全性の向上といった観点から, 小電力小型デバイスへのバッテリー充電方式として, 非接触給電が運用されている。物理的容量に制約のある小型デバイスにおいて, 2次側コイルの線径を太くする必要のある SP 方式⁽¹⁾や, 2次側コイルのターン数を多くする必要のある PS 方式⁽²⁾などよりも, 線径を太くする必要も, ターン数を多くする必要もない SS 方式⁽³⁾を採用するのが望ましいといえる。

しかしながら, SS 方式を用いたバッテリー充電の課題として, 定電圧入力時に負荷変動によって, 2次側電圧が大きく変動する⁽⁴⁾ 問題がある。非接触給電システムの充電回路は, 整流器を通し DC/DC コンバータを介して充電制御回路へと接続されるが, 汎用的に使用される DC/DC コンバータへの入力電圧の許容幅が決まっている。そのため, 非接触給電回路における 2次側電圧の変動を抑える必要がある。

本稿では, SS 方式において, 1次側リアクタンス成分の設計により, 制御を用いない 2次側電圧の変動抑制法を提案する。提案手法により, 1次側電流と出力電力も要求を満たすことを理論解析と実験により示す。

2. 1次直列非共振・2次直列共振トポロジー

SS 方式と DC/DC コンバータを用いたバッテリー充電用の非接触給電回路を図 1 に示す。解析を容易にするために, 電源を正弦波とし, 整流器から後段を純抵抗と等価的に変換した回路で理論解析を行う。その回路を図 2 に示す。

<2・1>コンデンサ

従来の SS 方式では, 1次側と 2次側それぞれのコイルの自己インダクタンスと共振するようにコンデンサの値を決定する。この場合, 入出力がイミタンス変換器特性となり, 定電圧入力時に負荷抵抗が変化すると出力電圧も大きく変動する。本稿では, 2次側コンデンサのみコイルと共振させ, 1次側コンデンサは出力電圧が DC/DC コンバータの入力電圧範囲内に収まるように決定する。ここで, 1次側リアクタンス成分を(1)式と定義し, 2次側コンデンサの値を(2)式とする。

$$jX = j\omega_0 L_1 + \frac{1}{j\omega_0 C_1} = j\left(\omega_0 L_1 - \frac{1}{\omega_0 C_1}\right) \quad (1)$$

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

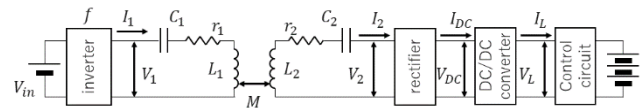


図 1 非接触給電回路(SS方式)
Fig.1. Wireless power transfer system for SS topology.

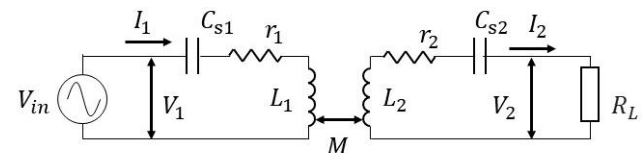


図 2 正弦波入力一純抵抗(SS方式)
Fig.2. Sine-wave input and Pure resistance for SS topology.

表 1 2次側電圧と 1次側電流と 2次側電力の理論式
Table 1. Theoretical formula for secondary voltage, primary current and secondary power

V_2	$\frac{j\omega_0 M V_{in}}{\left\{r_1 \left(1 + \frac{r_2}{R_L}\right) + \frac{(\omega_0 M)^2}{R_L}\right\} + j\left\{X \left(1 + \frac{r_2}{R_L}\right)\right\}}$
I_1	$\left(1 + \frac{r_2}{R_L}\right) \cdot \frac{V_2}{j\omega_0 M}$
P_2	$\frac{V_{in}^2}{\left\{\frac{r_1^2 + X^2}{(\omega_0 M)^2}\right\} R_L + \left[(\omega_0 M)^2 + r_2 \left\{2r_1 + r_2 \frac{r_1^2 + X^2}{(\omega_0 M)^2}\right\}\right] \frac{1}{R_L} + 2\left\{r_1 + r_2 \frac{r_1^2 + X^2}{(\omega_0 M)^2}\right\}}$

<2・2>2次側電圧 V_2 と 1次側電流 I_1 と 2次側電力 P_2

巻線抵抗を考慮した 2次側電圧 V_2 , 1次側電流 I_1 , 2次側電力 P_2 のそれぞれの理論式を表 1 に示す。

表 1 のそれぞれの式から, 2次側電圧 V_2 と 2次側電力 P_2 は, 1次側リアクタンス成分 jX の値に反比例して減少することが考えられる。また, 1次側電流 I_1 は 2次側電圧 V_2 と比例の関係がある。

<2・3>1次側リアクタンス成分 jX の条件

2次側電圧 V_2 の許容幅を $V_{min} \leq V_2 \leq V_{max}$ とし, 2次側電力 P_2 の必要最大電力を P_{2max} としたとき, 1次側リアクタンス成分 jX の条件は(3)式で表される範囲にあればよい。

$$\begin{cases} \omega_0 M \frac{V_{in}}{V_{max}} \leq X \leq \omega_0 M \frac{V_{in}}{V_{min}} \\ X \leq \frac{V_{in}^2}{2P_{2max}} \end{cases} \quad (3)$$

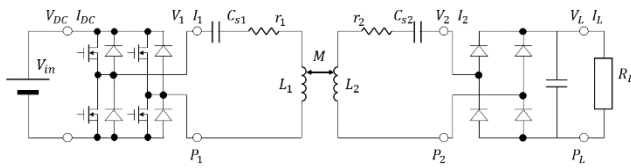


図 3 シミュレーション・実験回路
Fig.3. Simulation and experiment circuit

表 2 設計要求
Table 2. Required parameters

V_2	$24\text{ V} \leq V_2 \leq 42\text{ V}$
I_1	$I_1 \leq 3.5\text{ A}$
P_2	$P_{2max} = 30\text{ W}$

表 3 諸定数
Table 3. Various parameters

V_{in} [V]	24	f [kHz]	120
r_1 [m Ω]	80.9	r_2 [m Ω]	101
L_1 [μ H]	47.4	L_2 [μ H]	40.3
C_{s1} [μ F]	0.0460	C_{s2} [μ F]	0.0437
X [Ω]	6.91	M [μ H]	13.4

3. 給電シミュレーションおよび実験結果

<3・1>給電シミュレーションおよび実験条件

給電シミュレーションおよび実験に用いた回路を図 3 に示す。実際に使用する場合は DC/DC コンバータと制御回路となるが、図 3 の回路においては整流器から先を純抵抗として等価的に変換した。

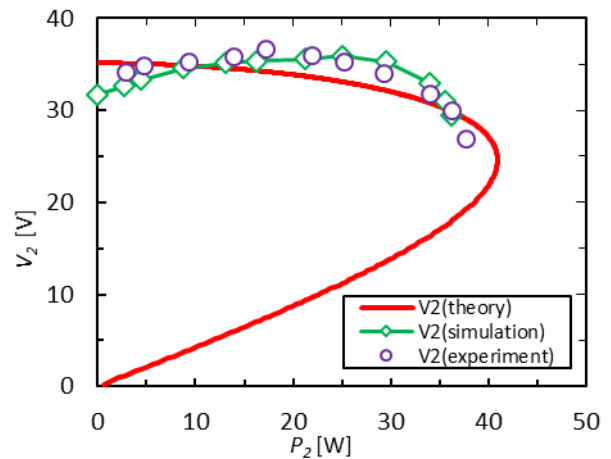
本稿では、表 2 に示す設計要求を満たすように、(3)式より 1 次側リアクタンス成分 jX を決定し、(1)式より C_{s1} の値を決定する。今回の設計要求を満たす 1 次側リアクタンス成分 jX の条件は、 $6.72\ \Omega \leq X \leq 9.60\ \Omega$ を満たせば良い。この設計要求を満たす諸定数と回路パラメータを表 3 に示す。

<3・2>給電シミュレーションおよび実験結果

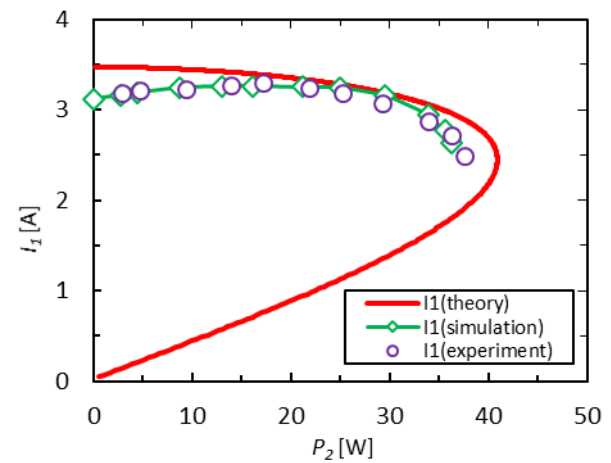
図 4 に理論値、シミュレーションおよび給電実験結果を示す。ここで、バッテリー充電を想定した場合、消費電力に応じて充電回路の等価抵抗値は変動する。しかし、これを求めることは解析的に困難なため、等価抵抗値ではなく出力電力に注目し、横軸は出力電力とする。

理論値では同じ電力の時に、 V_2 と I_1 は 2 値存在するのに見えるが、実際の V_2 と I_1 は電力の極大値を取るときの値よりも、大きい範囲で変動する。これは、DC/DC コンバータの性質によるものである。

図 4 の結果より、表 2 に示す設計要求を満たす出力電力、電圧および入力電流が得られていることがわかる。シミュレーションと実験結果は概ね一致しているが、理論値とは若干異なっている。実験では矩形波入力かつ整流器と



(a) 2 次側電圧-2 次側電力特性
(a) secondary voltage vs. secondary power



(b) 1 次側電流-2 次側電力特性
(b) primary current vs. secondary power

図 4 電圧-電力特性と電流-電力特性
Fig.4. voltage and current vs. power

直流負荷抵抗を組み合わせた等価交流抵抗を用いたことによる波形の差異が原因であると考えられる。

4. まとめ

本稿では、SS 方式において負荷変動による 2 次側電圧の変動が大きいという問題点に注目し、制御を用いずに回路素子のパラメータによって 2 次側電圧の設計要求を満たす手法を提案した。2 次側電圧を基準として、1 次側電流や出力電力の設計要求も満たすことができることも確認した。今後は位置ずれした際の 2 次側電圧や 1 次側電流の変動について、検討を行う予定である。

文献

- (1) 金井 他: SPC-10-021, (2010)
- (2) 藤田 他: 電学論 Vol127, No.2, pp174-180, (2007)
- (3) 長塚 他: 電気学会産応部門講演論文集, 2-27, (2009)
- (4) Kato 他: IEEE, INTELEC 2012, pp1-5 (2012)