

SP 補償方式ワイヤレス電力伝送システムの位置ずれ時のパラメータに着目した定電圧特性の解析

井上 拳斗*, 日下 佳祐, 伊東 淳一 (長岡技術科学大学)

Analysis of Voltage-constant Characteristics of Inductive Power Transfer Systems with Series-parallel Compensation focused on Parameter caused by Misalignment

Kent Inoue, Keisuke Kusaka, Jun-ichi Itoh (Nagaoka University of Technology)

1. はじめに

近年、電磁誘導方式を用いたワイヤレス電力伝送システムの研究が盛んに行われている⁽¹⁾。一次直列-二次並列 (SP) 補償方式は、一次側を定電圧駆動した場合、二次側が定電圧特性を持つ⁽²⁾⁽³⁾。これまでに SP 補償方式の定電圧特性に関する報告は多数されているが、位置ずれに対する定電圧特性の考察は著者らの知る限り行われていない。

本論文では、SP 補償方式の位置ずれ時の定電圧特性について負荷及びコイルインダクタンス比に着目し、それぞれのパラメータが直流電圧比の変化量に与える影響について解析及び考察を行い、実験により妥当性を確認したので報告する。

2. SP 補償方式の定電圧特性

図 1 に SP 補償方式ワイヤレス電力伝送システムの回路を、図 2 に同システムの等価回路を示す。本等価回路において、コイルの巻線抵抗はコイルのリアクタンスに比べて十分小さいため省略する。図 2 に示す等価回路を I_1 , I_2 及び I_3 の 3 つの回路網とした場合の回路方程式は(1)式となる。

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j(x_1 + x_0 - x_s) & -jx_0 & 0 \\ -jx_0 & j(x_2 + x_0 - x_p) & jx_p \\ 0 & jx_p & R_{eq} - jx_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} \dots (1)$$

ここで、フルブリッジ整流器はインダクタ L_f が十分大きく出力電流を連続とし、さらにコンデンサ C_f の両端電圧、すなわち出力電圧に変動がないとすれば、等価負荷抵抗 R_{eq} として表せる⁽⁴⁾。(1)式を I_3 について解くと、図 2 に示す等価回路の交流電圧比 V_2/V_1 は(2)式で求まる。

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{R_{eq} \omega^2 L_M L_2}{\sqrt{A^2 + B^2}}$$

$$A = R_{eq} \left(\frac{L_2}{C_1} - \frac{1}{\omega^2 C_1 C_2} - \omega^2 L_1 L_2 + \frac{L_1}{C_2} + \omega^2 L_M^2 \right) \dots (2)$$

$$B = \frac{\omega L_1 L_2}{C_2} - \frac{L_2}{\omega C_1 C_2} - \frac{\omega L_M^2}{C_2}$$

また、直流電圧比 V_{dc2}/V_{dc1} は、(3)式で求まる。

$$\frac{V_{dc2}}{V_{dc1}} = \frac{8 R_{eq} \omega^2 L_M L_2}{\pi^2 \sqrt{A^2 + B^2}} \dots (3)$$

さらに、コイルインダクタンス L_1 , L_2 とコンデンサ C_1 , C_2 の共振条件が成立する時、(2)式は(4)式に簡略化することができる。

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{k} \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega L_2}{R_{eq}} \right)^2 \left\{ \left(\frac{k_0}{k} \right)^2 - 1 \right\}^2}} \dots (4)$$

ここで、 k_0 は結合係数のノミナル値を表す。また、直流電圧比 V_{dc2}/V_{dc1} は(5)式で求まる。

$$\frac{V_{dc2}}{V_{dc1}} = \frac{8}{\pi^2 k} \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega L_2}{R_{eq}} \right)^2 \left\{ \left(\frac{k_0}{k} \right)^2 - 1 \right\}^2}} \dots (5)$$

(4)式および(5)式の $k = k_0$ が成立する場合において、SP 補償方式の出力電圧は共振コンデンサや負荷に依存せず、一次側及び二次側の自己インダクタンスと結合係数だけで決まることがわかる。そのため、SP 補償方式では、負荷電力によらず定電圧特性を示す。

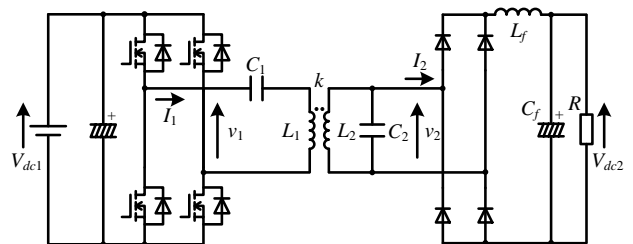


Fig. 1. IPT system with SP compensation.

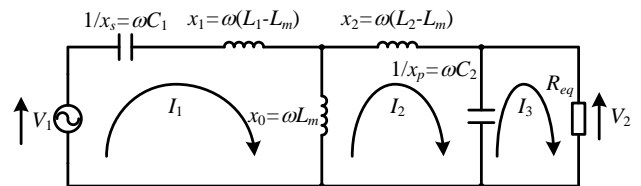


Fig. 2. Equivalent circuit of IPT system.

3. 位置ずれ時の定電圧特性結果

表 1 に実験条件を、図 3 に位置ずれ発生時の k/k_0 比に対する二次/一次の直流電圧比特性を示す。青の実線が(3)式の計算結果、赤の実線が(5)式の計算結果、緑のプロットが実験結果である。この結果から、二つの計算結果および実験結果が一致することを確認し、(3)式において共振条件が成立する場合の簡略式である(5)式が成立していることがわかる。また、位置ずれが発生して結合係数が低下することで直流電圧比が $k/k_0 = 0.6$ をピークに上昇する傾向になっていることがわかる。そこで、(5)式において位置ずれ時の電圧比の影響について考察する。(5)式を結合係数 k で微分すると(6)式を得る。

$$\frac{d\left(\frac{V_{dc2}}{V_{dc1}}\right)}{dk} = \frac{\frac{8}{\pi^2} \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \left[\left(\frac{\omega L_2}{R_{eq}} \right)^2 \left\{ \left(\frac{k_0}{k} \right)^4 - 1 \right\} - 1 \right]}{k^2 \left[\left(\frac{\omega L_2}{R_{eq}} \right)^2 \left\{ \left(\frac{k_0}{k} \right)^2 - 1 \right\}^2 + 1 \right]^{\frac{3}{2}}} \dots\dots\dots (6)$$

ここで、(6)式は各 k/k_0 における二次/一次の直流電圧比の変動のしやすさを示し、この値が小さいほど位置ずれが発生した場合に直流電圧比の変動が小さいことを示す。

図 4 に各位置ずれにおける負荷に対する直流電圧比の変化量を示す。グラフの右側が重負荷、左側が軽負荷となっている。この結果から、軽負荷ほど位置ずれによる直流電圧比の変化量が大きくなり、所望の定電圧特性から外れることがわかる。そのため、位置ずれが発生しても所望の定電圧特性に近づけるためには、負荷 $Q (= \omega L_2 / R_{eq})$ が高い領域で動作させることが望ましい。

図 5 に各インダクタンス比 L_2/L_1 における k/k_0 比に対する直流電圧比の変化量を示す。図 5 から、インダクタンス比 L_2/L_1 が大きいほど直流電圧比の変化量が大きくなり、所望の定電圧特性から外れやすいことがわかる。また、インダクタンス比 L_2/L_1 によらず $k/k_0 = 0.8 \sim 0.85$ 相当の位置ずれまでは直流電圧比の変化量が増加傾向となり、 $k/k_0 = 0.7$ では位置ずれなしに比べて直流電圧比の変化量は小さくなる傾向となることがわかる。このピーク値は図 5 からわかるように、負荷 Q に依存し、負荷 Q が高いほどグラフの右側へ移動し、電圧変動が小さくなる。以上の結果から、位置ずれが発生しても所望の定電圧特性に近づけるためには、一次側コイルを二次側コイルに対して十分大きくすることが望ましい。したがって、同じ負荷電力において直流出力が低電圧なシステムが望ましい。

以上から、位置ずれが発生しても所望の定電圧特性に近づけるためには、負荷 Q が高い領域でかつ入力に比べて出力が低電圧なシステムが望ましい。

Table 1. Specification of experiment.

	Symbol	Value
Rated output power	P_{out}	15 kW
Switching frequency	f_{sw}	20 kHz
Coupling coefficient	k	0.40

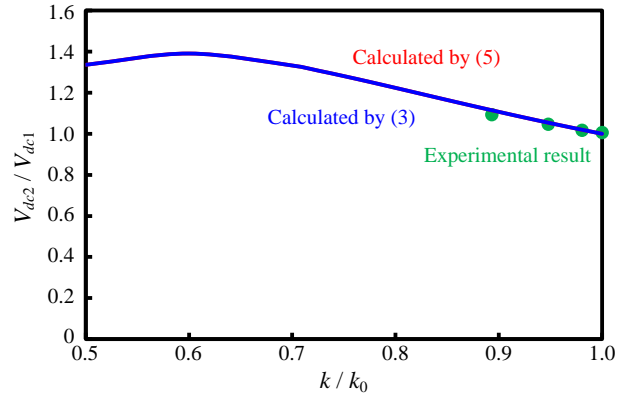


Fig. 3. Secondary/primary DC voltage ratio characteristic caused misalignment.

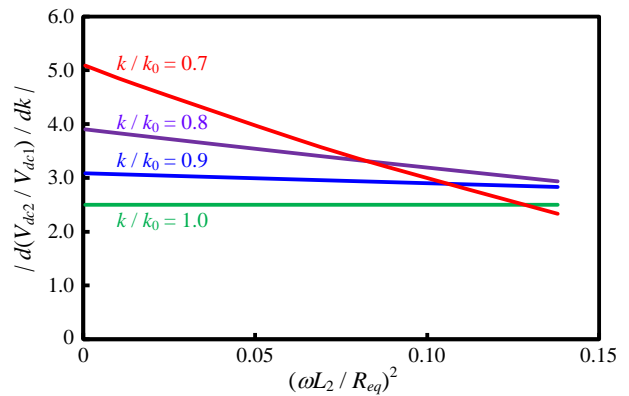


Fig. 4. DC voltage ratio variation characteristic against quality factor of load.

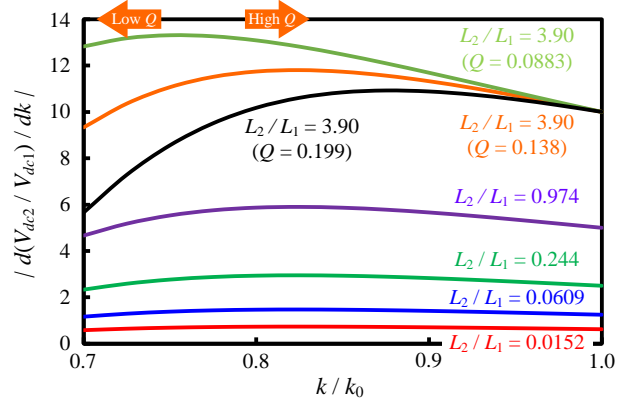


Fig. 5. DC voltage ratio variation characteristic against coupling coefficient ratio.

文献

- (1) 日下他: 電学論 D, Vol.137, No.5, pp.445-457 (2017)
- (2) 藤田他: 電学論 D, Vol.127, No.2, pp.174-180 (2007)
- (3) 太田他: 電学論 D, Vol.136, No. 6, pp.377-384 (2016)
- (4) R. L. Steigerwald: IEEE TPWL, Vol.3, No. 2, pp.174-182 (1988)