

特定の補償回路によらない一般的な磁界結合型 電力伝送システムの解析と設計法

窓岩 尚史*, 金子 裕良 (埼玉大学)

Analysis and Design of General Inductive Power Transfer System Non-dependent on Specific Compensation Circuit
Naofumi Madoiwa*, Yasuyoshi Kaneko (Saitama University)

1. はじめに

近年、電気自動車のワイヤレス給電を実現する技術として、磁界結合型電力伝送 (Inductive Power Transfer: IPT) システムへの期待が高まっている⁽¹⁾。IPT システムは、補償回路を用いることで効率や入力力率を改善し、高効率で無駄の少ない電力伝送を可能にしている。さらに、IPT システムの特性は補償回路に依存するため、SS 方式や SP 方式、Double-Sided LCC (DS-LCC) 方式⁽²⁾などの様々な補償回路とその設計法が提案されている。しかしながら、特定の補償回路によらない一般的な IPT システムの特性は明らかにされていない。本稿では、縦続行列を用いて補償回路を一般化することにより、一般的な IPT システムの特性を明らかにする。さらに、有用な特性が得られる補償回路の設計法を提案し、シミュレーションによる検証から妥当性を確認する。

2. 一般的な IPT システムの特性

〈2・1〉 IPT システムの縦続行列 Fig.1 に一般的な IPT システムのモデルを示す。一般的な IPT システムの特性は、 $[V_{IN}, I_{IN}]^T = \mathbf{F}[V_L, I_L]^T$ を満たす縦続行列 \mathbf{F} から求めることができる。IPT システムの補償回路にはインダクタおよびコンデンサで構成されたリアクタンス回路が用いられるため、その縦続行列は、実数 a_i, b_i, c_i, d_i ($i = 1, 2$) を用いて、

$$\mathbf{F}_i = \begin{bmatrix} a_i & jb_i \\ jc_i & d_i \end{bmatrix}, \quad (i = 1, 2) \quad (1)$$

で表すことができる。また、磁界結合回路の縦続行列は、

$$\mathbf{F}_T = \frac{1}{j\omega M} \begin{bmatrix} j\omega L_1 + r_1 & (j\omega L_1 + r_1)(j\omega L_2 + r_2) + \omega^2 M^2 \\ 1 & j\omega L_2 + r_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

で表される。ここで、結合係数 k およびコイルの Q 値を、

$$k = M/\sqrt{L_1 L_2}, \quad Q_1 = \omega L_1/r_1, \quad Q_2 = \omega L_2/r_2 \quad (3)$$

で定義し、式の簡単化のため、(4)–(7)式で表されるパラメータを定義すると、縦続行列 \mathbf{F} は(8)–(12)式で求められる。

$$X_{b1} = \omega L_1 a_1 + b_1 \quad (4)$$

$$X_{c1} = \omega L_1 c_1 - d_1 \quad (5)$$

$$X_{b2} = \omega L_2 d_2 + b_2 \quad (6)$$

$$X_{c2} = \omega L_2 c_2 - a_2 \quad (7)$$

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_1 \mathbf{F}_T \mathbf{F}_2 = \frac{1}{\omega M} \begin{bmatrix} A_x + jA_y & B_x + jB_y \\ C_x + jC_y & D_x + jD_y \end{bmatrix} \quad (8)$$

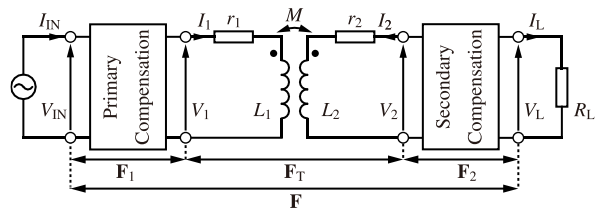


Fig. 1. General IPT system model.

$$A_x + jA_y = -X_{b1}X_{c2} + r_1 r_2 (1 + k^2 Q_1 Q_2) a_1 c_2 + j(r_1 a_1 X_{c2} + r_2 c_2 X_{b1}) \quad (9)$$

$$B_x + jB_y = r_1 a_1 X_{b2} + r_2 d_2 X_{b1} + j\{X_{b1}X_{b2} - r_1 r_2 (1 + k^2 Q_1 Q_2) a_1 d_2\} \quad (10)$$

$$C_x + jC_y = -r_1 c_1 X_{c2} - r_2 c_2 X_{c1} - j\{X_{c1}X_{c2} - r_1 r_2 (1 + k^2 Q_1 Q_2) c_1 c_2\} \quad (11)$$

$$D_x + jD_y = -X_{c1}X_{b2} + r_1 r_2 (1 + k^2 Q_1 Q_2) c_1 d_2 + j(r_1 c_1 X_{b2} + r_2 d_2 X_{c1}) \quad (12)$$

〈2・2〉 IPT システムの効率と入力力率 IPT システムの効率 η は、縦続行列 \mathbf{F} より、パラメータ σ_{b2} と σ_{c2} を用いて(15)式で表すことができる。

$$\sigma_{b2} = \frac{1}{r_2} X_{b2}^2 + r_2 (1 + k^2 Q_1 Q_2) d_2^2 \quad (13)$$

$$\sigma_{c2} = \frac{1}{r_2} X_{c2}^2 + r_2 (1 + k^2 Q_1 Q_2) c_2^2 \quad (14)$$

$$\eta = \frac{\text{Re}\{V_L \bar{I}_L\}}{\text{Re}\{V_{IN} \bar{I}_{IN}\}} = \frac{k^2 Q_1 Q_2}{2 + k^2 Q_1 Q_2 + \sigma_{c2} R_L + \sigma_{b2}/R_L} \quad (15)$$

また、最大効率 η_{\max} および最適負荷 $R_{L(\text{opt})}$ は $\partial\eta/\partial R_L = 0$ を満たすときに得られ、パラメータ ρ_2 を用いて(17), (18)式で表すことができる。

$$\rho_2 = \frac{1}{r_2} X_{b2} X_{c2} + r_2 (1 + k^2 Q_1 Q_2) c_2 d_2 \quad (16)$$

$$\eta_{\max} = \frac{k^2 Q_1 Q_2}{2 + k^2 Q_1 Q_2 + 2\sqrt{1 + k^2 Q_1 Q_2 + \rho_2^2}} \quad (17)$$

$$R_{L(\text{opt})} = \sqrt{\sigma_{b2}/\sigma_{c2}} \quad (18)$$

したがって、IPT システムが(19)式を満たすとき、(20)式に示す最大効率の上限値 η_{limit} が得られる。

$$\rho_2 = 0 \quad (19)$$

$$\eta_{\text{limit}} = \frac{k^2 Q_1 Q_2}{(1 + \sqrt{1 + k^2 Q_1 Q_2})^2} \quad (20)$$

IPT システムの入力率 PF は、縦続行列 \mathbf{F} より、パラメータ ρ_1 を用いて (22), (23) 式から計算できる。

$$\rho_1 = \frac{1}{r_1} X_{b1} X_{c1} + r_1 (1 + k^2 Q_1 Q_2) a_1 c_1 \quad (21)$$

$$PF = \cos \theta \quad (22)$$

$$\theta = -\tan^{-1} \frac{\eta (A_x C_y R_L - B_y D_x / R_L) / (r_1 r_2) + (1 + \eta) \rho_1}{1 + k^2 Q_1 Q_2} \quad (23)$$

したがって、IPT システムが (24) 式を満たすとき、入力率は負荷変動に関わらず 1 となる。

$$A_x C_y = 0, \quad B_y D_x = 0, \quad \rho_1 = 0 \quad (24)$$

3. 補償回路の設計法

前章の議論から、IPT システムが、

$$A_x C_y = 0, \quad B_y D_x = 0, \quad \rho_1 = 0, \quad \rho_2 = 0 \quad (25)$$

を満たすとき、最大効率が上限値 η_{limit} となり、入力率が負荷変動に関わらず 1 となるため、高効率で無駄の少ない電力伝送を実現することができる。したがって、補償回路の設計は (25) 式を満たすように行えばよい。さらに、出力電力などの特性についても縦続行列 \mathbf{F} から求めることができるため、これらを考慮した設計を行うことができる。

〈3・1〉 DS-LCC 方式への適用 提案手法の応用例として、DS-LCC 方式の設計を行う。DS-LCC 方式を用いた IPT システムの回路を Fig. 2 に示す。補償回路の縦続行列 \mathbf{F}_1 , \mathbf{F}_2 は (26), (27) 式で表される。IPT システムが (25) 式を満たすように補償回路のパラメータを求めると、(28), (29) 式となる。

$$\mathbf{F}_1 = \begin{bmatrix} 1 - \omega^2 L_{f1} C_{f1} & j \left\{ \omega L_{f1} - \frac{1}{\omega C_1} (1 - \omega^2 L_{f1} C_{f1}) \right\} \\ j \omega C_{f1} & 1 + C_{f1} / C_1 \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$\mathbf{F}_2 = \begin{bmatrix} 1 + C_{f2} / C_2 & j \left\{ \omega L_{f2} - \frac{1}{\omega C_2} (1 - \omega^2 L_{f2} C_{f2}) \right\} \\ j \omega C_{f2} & 1 - \omega^2 L_{f2} C_{f2} \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$C_{f1} = \frac{1}{\omega^2 L_{f1}}, \quad C_{f2} = \frac{1}{\omega^2 L_{f2}} \quad (28)$$

$$C_1 = \frac{1}{\omega^2 (L_1 - L_{f1})}, \quad C_2 = \frac{1}{\omega^2 (L_2 - L_{f2})} \quad (29)$$

これにより、縦続行列 \mathbf{F} は (30) 式で求められる。

$$\mathbf{F} = \frac{j}{\omega M} \begin{bmatrix} r_2 L_{f1} / L_{f2} & \omega^2 L_{f1} L_{f2} \\ r_1 r_2 (1 + k^2 Q_1 Q_2) & r_1 L_{f2} / L_{f1} \\ \omega^2 L_{f1} L_{f2} & \end{bmatrix} \quad (30)$$

ここで、最大効率が得られる出力電力 $P_{L(\text{opt})}$ は、最適負荷 $R_{L(\text{opt})}$ が (31) 式となることから (32) 式で求められる。

$$R_{L(\text{opt})} = \frac{\omega^2 L_{f2}^2}{r_2 \sqrt{1 + k^2 Q_1 Q_2}} \quad (31)$$

$$P_{L(\text{opt})} = \frac{\sqrt{1 + k^2 Q_1 Q_2}}{r_2 (1 + \sqrt{1 + k^2 Q_1 Q_2})^2} \left(\frac{M}{L_{f1}} \right)^2 V_{\text{IN}}^2 \quad (32)$$

したがって、(29) 式に注意すると、 $L_{f1} < L_1$, $L_{f2} < L_2$ を満たす範囲内で出力電力 $P_{L(\text{opt})}$ を L_{f1} , 最適負荷 $R_{L(\text{opt})}$ を L_{f2} に

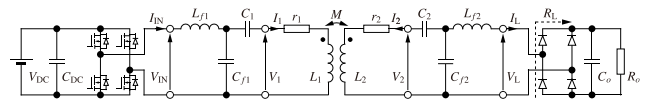


Fig. 2. Circuit diagram of the DS-LCC compensated IPT system.

より自由に設定することができる。以上のことから、提案手法を適用することにより、有用な特性が得られる補償回路を設計可能であることが確認できた。

〈3・2〉 シミュレーション 前節の議論の妥当性を検証するために、PSIM を用いてシミュレーションを行った。シミュレーションでは、実際の負荷 R_o を、 $R_L = 8R_o / \pi^2$ の換算式を用いて等価交流負荷 R_L に対応させた。また、補償回路の設計は、 $R_{o(\text{opt})} = \pi^2 R_{L(\text{opt})} / 8 = 2.00 \Omega$, $P_{L(\text{opt})} = 200 \text{ W}$ に設定して行った。シミュレーションに用いたパラメータを Table 1 に示し、シミュレーション結果を Fig. 3 に示す。効率 η および出力電力 P_L は、理論値とシミュレーション値が一致した。入力率 PF についても、入力電流の高調波成分と出力電流波形の歪みによる影響から理論値との誤差が比較的大きいものの、概ね一致しており、提案手法の妥当性を確認することができた。

Table 1. Parameters of the DS-LCC compensated IPT system.

V_{DC} [V]	f_{IN} [kHz]	L_1 [μH]	L_2 [μH]	r_1 [m Ω]	r_2 [m Ω]	M [μH]	k [-]
24.0	85.0	150	50.5	136	51.2	18.3	0.211
$R_{o(\text{opt})}$ [Ω]	$P_{L(\text{opt})}$ [W]	L_{f1} [μH]	L_{f2} [μH]	C_{f1} [μF]	C_{f2} [μF]	C_1 [nF]	C_2 [nF]
2.00	200	11.3	5.84	0.309	0.601	25.4	78.5

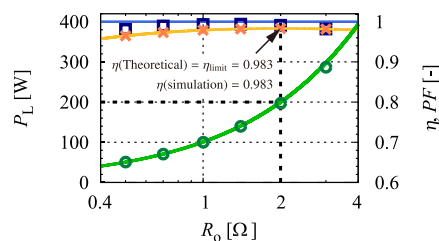


Fig. 3. Simulation and theoretical calculation results.

4. まとめ

本稿では、縦続行列を用いて、特定の補償回路によらない一般的な IPT システムの特性を明らかにし、有用な特性が得られる補償回路の設計法を提案した。DS-LCC 方式を例として提案手法の妥当性をシミュレーションにより確認した。

文 献

- (1) G.A. Covic, J.T. Boys: "Modern Trends in Inductive Power Transfer for Transportation Applications", IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, Vol.1, No. 1, pp.28-41 (2013).
- (2) Siqu Li, Weihang Li, Junjun Deng, Trong Duy Nguyen, and Chunting Chris Mi: "A Double-Sided LCC Compensation Network and Its Tuning Method for Wireless Power Transfer", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 64, No. 6, pp. 2261-2273 (2015).