

共振条件に左右されない非接触給電現象の捉え方

出野 聡史*, 森田 悠基, 石飛 学 (奈良工業高等専門学校)

Representation on Wireless Power Transfer Independent of Resonance Condition

Satoshi Deno, Yuki Morita, Manabu Ishitobi (National Institute of Technology, Nara College)

1. はじめに

磁場結合型非接触給電 (Inductive Power Transfer: IPT) は、共振現象に着目して研究が進められ、伝達関数⁽¹⁾や電力変換方程式⁽²⁾を用いて、高効率伝送を実現する最適条件⁽³⁾⁽⁴⁾等が求められてきた。これらの条件式は、連動して変化する複数のパラメータで構成されており、また、共振条件から外れるとエネルギーの伝送状態が大きく変わってしまう特性をもつ。このため、システム的设计やコイル構造を検討する際に、複数のパラメータを変化させて最適値や傾向を導出できる機械学習⁽⁵⁾が用いられている。言い換えると、技術者の思考や直感を入れることが難しいシステムであるといえる。

本研究では、非接触給電システム的设计や改善を行う際に、技術者の思考を反映しやすいシステムのモデリングを試みている。特に非接触伝送部とその前段、後段をブロックで分け、ブロック間をリンクするパラメータに着目することで、複数のパラメータに束縛されない、つまり共振条件に左右されない伝送部の解析法を提供したい。

2. 非接触伝送部と着目パラメータ

磁場結合型非接触給電システムのブロックダイアグラムを図1に示す。ここで、 L_1 、 L_2 は送受電コイルの自己インダクタンスを、 M は相互インダクタンスを表している。なお、負荷側回路の等価インピーダンスを $\dot{Z}_o = R_o + jX_o$ (LR 直列等価回路)としている。

非接触伝送部である $ab-cd$ ブロックの入出力特性は、式(1)で表される。

$$\begin{pmatrix} \dot{V}_2 \\ \dot{I}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{21} & F_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{I}_1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

式(1)より、 \dot{I}_1 、 \dot{I}_2 を与えることで \dot{V}_1 、 \dot{V}_2 が定まり、システムの動作解析が可能となる。ここで、電流 \dot{I}_1 、 \dot{I}_2 に着目するのは、非接触部における磁束と対応しているためである。また、式(2)、式(3)に示す \dot{I}_1 と \dot{I}_2 の位相差 θ 、振幅比 α によって、非接触伝送部の磁場分布を予測することが可能である。

$$\theta = \frac{180}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{R_o}{\omega L_2 + X_o} \right) \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{|\dot{I}_2|}{|\dot{I}_1|} = \frac{\omega M}{\sqrt{R_o^2 + (\omega L_2 + X_o)^2}} \quad (3)$$

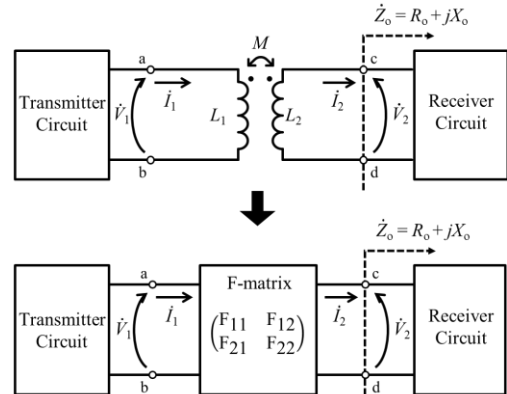


図1 IPTシステムのブロックダイアグラム

Fig.1. Block diagram of IPT system

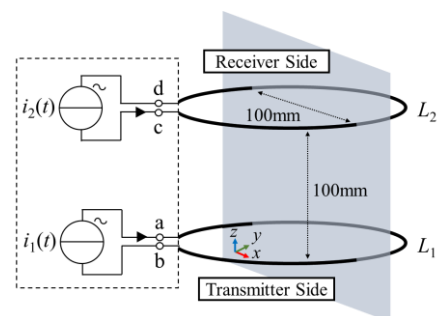
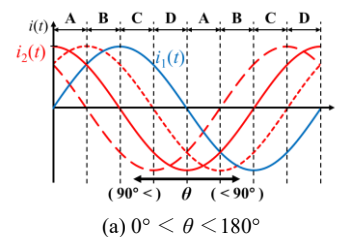
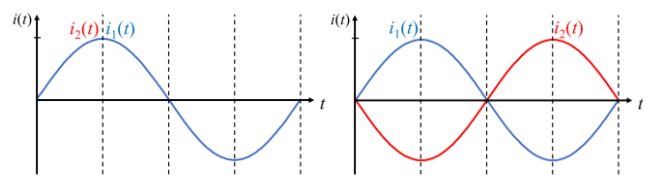


図2 解析モデル

Fig.2. Analysis model



(a) $0^\circ < \theta < 180^\circ$



(b) $\theta = 0^\circ$ (c) $\theta = 180^\circ$

図3 位相差 θ を変化させたときの電流波形
Fig.3. Current waveform as function of phase shift θ

3. 非接触伝送部の磁場分布

図1における非接触伝送部中の解析モデルを図2に、 $\alpha = 1$ で θ を変化させたときの電流波形を図3に、 $\theta = 90^\circ$ で α を変化させたときの電流波形を図4に、特徴的な磁場分布を図5に示す。ここで、 $i_1(t)$ 、 $i_2(t)$ はそれぞれ I_1 、 I_2 の実部成分における瞬時値で、磁場の有限要素解析にはCOMSOL Inc.製COMSOL Multiphysicsを用いている。また、図3、図4に示すA~Dは図5に示す特徴的な磁場分布が移り変わる領域を指す。

図3より、 $\theta = 90^\circ$ のときに、A~Dはすべて等間隔となり、 $\theta < 90^\circ$ のときに、AとBは拡大、CとDは縮小、 $\theta > 90^\circ$ のときに、CとDは拡大、AとBは縮小することがわかる。また、 $\theta = 0^\circ$ では電気壁を、 $\theta = 180^\circ$ では磁気壁を常に形成するモードになることがわかる。図4より、 $\alpha < 1$ のときに、BとCは拡大、AとDは縮小、 $\alpha > 1$ のときに、BとCは縮小、AとDは拡大することがわかる。つまり、非接触伝送部中の現象は位相差 θ や振幅比 α の変化によって、特徴的な磁場分布となるタイミングが変化するだけである。

4. 等価負荷インピーダンスによる回路状態

Z_0 を変化させたときの θ と α の関係を図6に示す。なお、図6(a)において、 X_0 による θ の変化を分かりやすくするために θ の定義域を $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ ($X_0 \geq -\omega L_2$)、 $90^\circ < \theta \leq 180^\circ$ ($X_0 < -\omega L_2$)とする。

図6(a)より、 $X_0 = -\omega L_2$ のときに $\theta = 90^\circ$ となり、 $X_0 > -\omega L_2$ のときに $\theta = 0^\circ$ 、 $X_0 < -\omega L_2$ のときに $\theta = 180^\circ$ へ近づいていくことがわかる。また、 R_0 が小さくなると、 X_0 に対する θ の変化量は $X_0 = -\omega L_2$ 付近で大きくなり、 $R_0 = 0$ になると、 $X_0 > -\omega L_2$ では $\theta = 0^\circ$ 、 $X_0 < -\omega L_2$ では $\theta = 180^\circ$ となる。図6(b)より、 $X_0 = -\omega L_2$ で α は最大となり、 R_0 が小さくなると、 α の最大値は大きくなる。つまり、 Z_0 によって、任意の θ と α にすることが可能であり、 $\alpha = 1$ で、 $\theta = 0^\circ$ 、 90° 、 180° となる動作点①、②、③が存在する。その条件を以下に示す。

- 動作点①: $Z_0 = -j\omega(L_2 + M)$
- 動作点②: $Z_0 = \omega M - j\omega L_2$
- 動作点③: $Z_0 = -j\omega(L_2 - M)$

動作点①~③に対応する受電側の等価回路変換を図7に示す。図7より、一般的に理解されてきた f_m' (磁気壁を形成する周波数)、 f_0 (自己共振周波数)、 f_c' (電気壁を形成する周波数) という特徴的な周波数⁽¹⁾でシステムを動作させたときの回路状態と、動作点①~③の等価回路は対応していることがわかる。つまり、等価負荷インピーダンスが非接触伝送部の磁場分布を決めていることを意味する。

5. むすび

本研究では、送受電コイルに流れる電流に着目することで、複数のパラメータに束縛されない本質的なIPTの現象

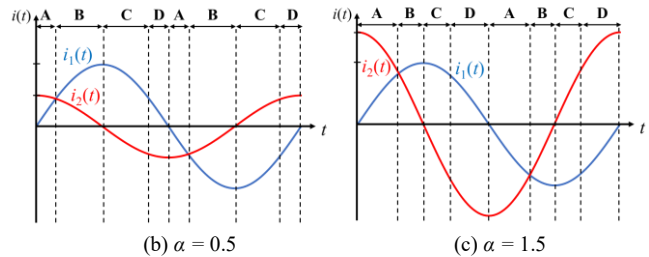


図4 振幅比 α を変化させたときの電流波形
Fig.4. Current waveform as function of amplitude ratio shift α

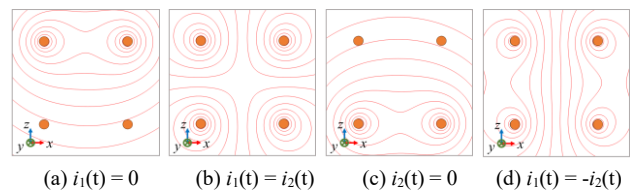


図5 特徴的な磁場分布
Fig.5. Special characteristic magnetic field distributions

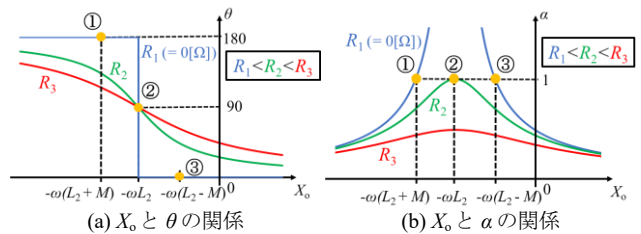


図6 等価リアクタンス X_0 と電流の関係
Fig.6. Equivalent reactance and electric current

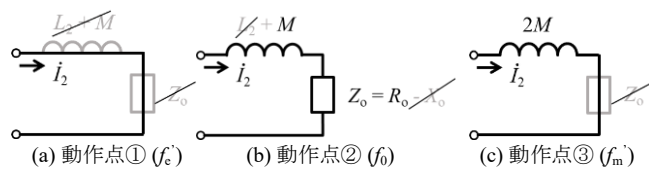


図7 特徴的なモードとなる受電側回路の回路変換
Fig.7. Circuit conversion of the receiver circuit, characteristic modes.

を明らかにできた。特に、送電側回路より後段の合成インピーダンスによって送電側コイルに流れる電流が決まり、等価負荷インピーダンスによって、非接触伝送部中の磁場分布が決まる。今後、本研究のような視点をきっかけに、IPTの研究開発がさらに活発となることを切に願う。

文献

- (1) Takehiro Imura et al: IEEJ Trans. IA, Vol.130, pp.84-92, 2010
- (2) 井上季樹・石飛学: マグネティクス研究会資料, MAG-15-124, pp.7-12, 2015
- (3) 居村岳広・堀洋一: 電学論 D, Vol.135, pp.697-710, 2014
- (4) Hirono Namiki et al: IEEJ Journal IA, Vol.13, pp.633-644, 2024
- (5) Shamsul Arefeen Al Mahmud et al: IEEE Access, Vol.10, pp.40496-40505, 2022