

独立伝送形ワイヤレス電力伝送システムの動作原理解析とその特性

Mechanism Analysis and Characteristics Survey of Independent Transmission Line Type WPT System

常川 光一 楊 程

Koichi TSUNEKAWA Cheng YANG

あらまし 電界結合型のワイヤレス電力伝送（独立伝送形）方式について、その等価回路解析により、動作原理特性の検討を行った。まず等価回路を作成し、シミュレーション、実験と比較してその各素子定数を決定した。次に伝送効率に対する各素子パラメータの影響について検討した。伝送効率については、LとCのQ値が与える影響は同等であること、周波数と負荷抵抗を適宜調整すれば伝送距離を伸ばせることを確認した。一方、同一アンテナにおいて金属板間のキャパシタンス（結合容量）を減らせば伝送効率を上げられる可能性がわかった。これは本方式特有の性質である。

キーワード ワイヤレス電力伝送, 電界結合

1. まえがき

近年、ワイヤレス電力伝送方式の実用化に向けシステム開発や標準化が進んでいる⁽¹⁾。我々も平衡伝送線路の概念から拡張して電界結合型の無線電力伝送方式（独立伝送形 WPT システム）を提案した⁽²⁾。無線電力伝送が注目された理由は結合共振による伝送効率の向上が確認された点であり⁽³⁾、両方式とも LC による共振現象の実現と負荷インピーダンスの適切な設定が重要である⁽⁴⁾。特に伝送効率は LC の Q 値に依存し、実用化には LC ともに非常に高い Q 値を実現することが必要である⁽⁵⁾。独立伝送形（電界結合型）ではアンテナ（電極）に金属平板型を用いるため、コンデンサとして動作していれば高い Q 値が得られる可能性がある。

そこで、本検討では電界結合型の無線電力伝送（独立伝送形）方式について、その等価回路解析により動作原理と特性の検討を行った。特に伝送効率に対する各回路素子パラメータの影響について検討した。

2. 独立伝送形電界結合方式の等価回路

本方式の着眼点は、図 1 (a) に示すように伝送路の途中にコンデンサを入れたものである。このシミュレーションモデルは図 1 (b) とした。

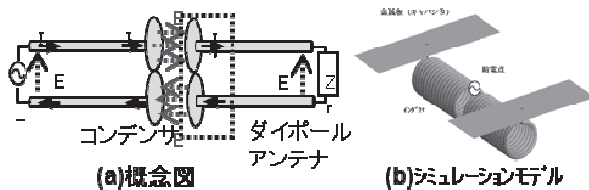


図1 独立伝送方式

動作原理解明のため、等価回路を作成した。図 2 に示すように電界共振結合型では各アンテナの自己キャパシタンス C と相互キャパシタンス C_m 、回路に挿入するインダクタ素子 L、全ての損失抵抗 R と負荷インピーダンス Z_L で構成される。ここで $\omega = 2\pi f$ 、 f は周波数、 $j = \sqrt{-1}$ である。

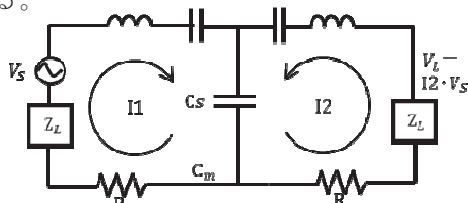


図2 等価回路

これらより以下が導出される。

$$\frac{V_L}{V_S} = \frac{-\frac{Z_L}{j\omega C_S}}{Z_T \left(Z_T + \frac{2}{j\omega C_S} \right)} \quad (1)$$

$$Z_{in} = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C_s} + \frac{\frac{Z_T}{j\omega C_S}}{Z_T + \frac{1}{j\omega C_S}} \quad (2)$$

ここで、 $Z_T = Z_L + R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C_s}$ である。図 1 (b) のシミュレーションモデルから各定数を導出した。なお $Z_L = 50 \Omega$ とした。

表 1 各素子パラメータ値

C_m [F]	C [F]	L [H]
5.4511E-14	8.0654E-13	1.94E-06

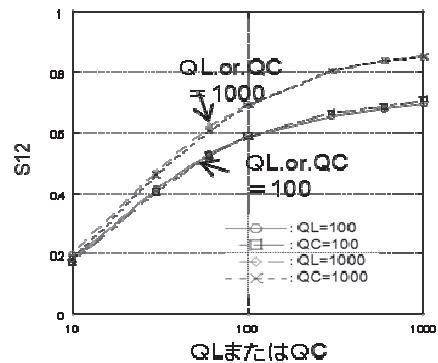


図3 Q値によるS12の周波数特性

図 3 に示すように等価回路において LC の Q 値 (QL、QC) をパラメータとして伝送効率 (S12) を計算した。この結果から、実験値とほぼ一致する Q 値は LC 共に約 100 程度 (約 $16 \Omega / 127 \text{MHz}$) であることがわかった。さらにこの図から等価回路において伝送効率 (S12) への影響は、LC の Q 値は完全に同等の効果であることがわかる。さらにこの図から等価回路において伝送効率 (S12) への影響は、LC の Q 値は完全に同等の効果であることがわかる。

3. 伝送特性の検討

等価回路の各パラメータが決定したので、その幾つかを変えて特性を検討する。

・相互キャパシタンス (Cm)

相互キャパシタンス (Cm) は、具体的には伝送距離 D に対応する。伝送距離が変化した場合の最大伝送効率とその時の周波数の関係を図 4 に示す。ここでは LC の損失は 0 としている。

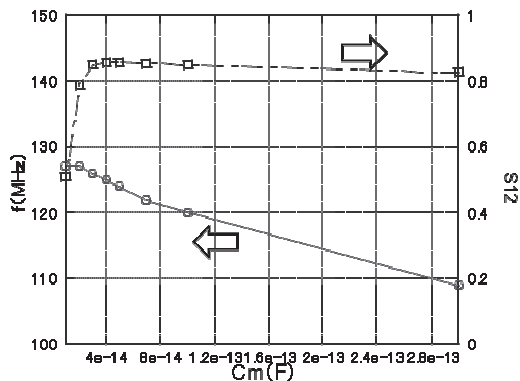


図4 Cmと最大効率S12, その周波数の関係

この図から言えることは、相互キャパシタンス (Cm) が小さくても、最大点を追って周波数を調整すれば高い伝送効率を保持し続けることである。相互キャパシタンス (Cm) が小さくなるということは、アンテナ間の距離が遠ざかることである。これは周波数を調整すれば伝送距離を伸ばせることを示している。

・自己キャパシタンス (C0)

自己キャパシタンス (C0) は、具体的には主にアンテナの金属板間隔などアンテナ構造に対応する。C0 による伝送効率の周波数特性変化を図 5 に示す。

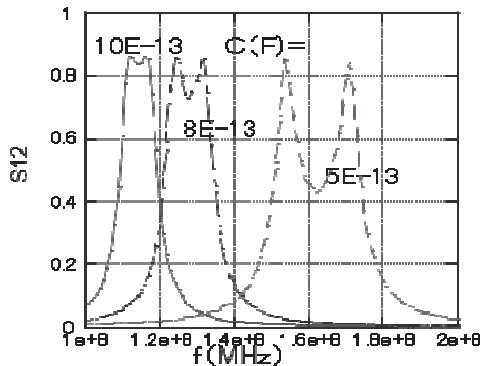


図5 C0によるS12の周波数特性

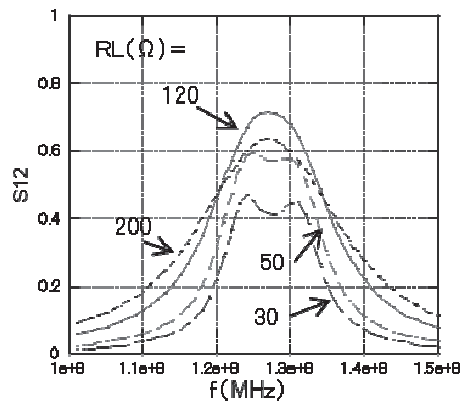
この図より最大効率の値はほぼ変わらないが、自己キャパシタンス (C0) が小さくなると最大効率が得られる周波数が上がり、双峰的な形状となることがわかる。これはアンテナ構造として金属板間隔を離すなどして自己キャパシタンスを小さくすると最大効率周波数が上がることを示しており、通常のダイポールアンテナ間の結合とは傾向が逆になっている。さらに周波数特性が双峰的な形状になる場合は負荷インピーダンスを調整することで伝送効率の向上が期待できる。

・負荷抵抗 (ZL)

そこで、負荷抵抗 (ZL) と伝送効率の関係を検討した。QL=QC=100 として計算した結果を図 11 に示す。ZL=50Ω では S12=0.59 であったが、ZL=120Ω とすることで、S12=0.72 まで向上することがわかった。図 6 (a) に示すように、周波数特性が双峰的な形状の場合、適切な負荷を選択することで単峰的となり最大効率を得られる。また

その時は (b) に示すようにインピーダンス整合も取れていることがわかる。

これらから、本構造のアンテナはダイポールアンテナとしての結合と伝送路の中に挿入したコンデンサとしての結合の両方の要素を持つことがわかる。すなわち共振点で最大効率を得ると共に、伝送路の独立性が高いほど伝送効率が良いという可能性がある。



(a)RLによるS12の周波数特性

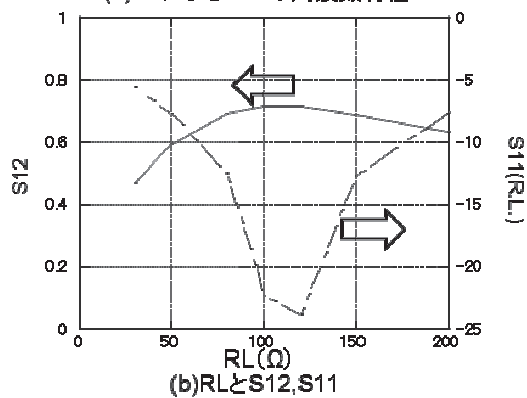


図6 RLと伝送効率(S12) 特性の関係

4. まとめ

電界結合型の無線電力伝送 (独立伝送形) 方式について等価回路を作成し、シミュレーション、実験と比較してその各素子定数を決定した。また伝送効率については、L と C の Q 値が与える影響は同等であること、周波数と負荷抵抗を適宜調整すれば伝送距離を伸ばせることを確認した。一方、同一アンテナにおいて金属板間のキャパシタンス (結合容量) を減らせば伝送効率を上げられる可能性がわかった。これは本方式特有の性質であり、今後検討する予定である。

文 献

- [1] ワイヤレス電力伝送技術の利用に関するガイドライン <http://bwf-yrp.net/update/2013/05/20.html>
- [2] 常川 “電界結合による 2 つの独立な空間伝送路を用いたワイヤレス電力伝送” “信学技報, AP2010-109, 2010
- [3] A. Kurs, etc. “Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic...” Science Exp, Vol. 317, No. 5834, 2007
- [4] 稲垣直樹他, “近傍界結合アンテナを用いる無線接続の基礎” 信学論, Vol. J94-B, No. 3, 2011
- [5] 平山他 “電磁界の観点から見た結合共振型無線電力伝送” 信学技報, WPT2013-17, 2013