

近傍界による無線電力伝送のインピーダンス整合に関する基礎的検討

大尻 勇氣, 吳 銘達, 陳 強, (東北大学大学院工学研究科)

概要: 無線電力伝送が近年注目を浴びている。実用化時に、送受信アンテナ間距離が大きくなると伝送効率が低下することが問題である。また、整合回路の Q 値によっても伝送効率が変わる。本研究では、整合回路の Q 値を考慮した最適負荷の算出式を示し、ダイポールアンテナとループアンテナを例にとり、アンテナ送受信間距離の変動によって最適負荷が変化することを確認した。また、送受信アンテナ間の距離に応じた最適負荷を接続することで伝送効率の改善ができることを明らかにした。

キーワード: 無線電力伝送, インピーダンス整合, 整合回路損失。

1. まえがき

無線電力伝送技術は、携帯型電気機器や、電気自動車などの充電技術として期待されている。無線電力伝送技術には遠方界放射を用いた電磁放射方式[1]-[6]、電磁誘導による電磁誘導方式[7]、[8]、そして近傍界を利用した電磁結合方式[9]、[10] があると言われている。特に電磁結合方式は、電磁誘導方式よりも遠距離伝送が可能で、かつ、電磁放射方式よりも高効率伝送が可能であるため、注目されている[11]-[17]。しかしながら、電磁結合方式では、アンテナ間の配置によって伝送効率が減少する問題がある。本研究では、電磁結合方式におけるアンテナ間の位置ずれの影響で変化する最適負荷について検討する。具体的には、電磁界数値シミュレーションにより、ダイポールアンテナとループアンテナの2種類のアンテナ例にとって最適負荷の距離特性について検討する。

2. 電力伝送効率の定義

2.1 伝送効率の算出式

本研究で評価に用いた電力伝送効率 η は入力電力で基準化した伝送効率

$$\eta = \frac{P_D}{P_S} \quad (1)$$

を用いた。ここで、 P_S は入力電力、 P_D は受信電力を示している。

次に、 S パラメータによる電力伝送効率の算出について述べる。電力伝送システムを二端子回路網で表現したものが図1で示されており、 S パラメータの関係式は

$$b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \quad (2)$$

$$b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \quad (3)$$

となる。入力電力、受信電力は

$$P_S = a_1^*a_1 - b_1^*b_1 \quad (4)$$

$$P_D = -a_2^*a_2 + b_2^*b_2 \quad (5)$$

と表すことができるため、入力電力基準の電力伝送効率の算出式は、以上の関係式を用いると

$$\eta = \frac{P_D}{P_S} = \frac{-a_2^*a_2 + b_2^*b_2}{a_1^*a_1 - b_1^*b_1} \quad (6)$$

$$= \frac{|S_{21}|^2 (1 - |\Gamma_l|^2)}{|1 - S_{22}\Gamma_l|^2 (1 - |\Gamma_{in}|^2)} \quad (7)$$

と表すことができる。ここで、 Γ_l は負荷における

反射係数、 Γ_{in} は入射端における反射係数を示しており、以下の通りである。

$$\Gamma_l = \frac{a_2}{b_2} = \frac{Z_l - Z_0}{Z_l + Z_0} \quad (8)$$

$$\Gamma_{in} = \frac{a_1}{b_1} = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \quad (9)$$

$$= S_{11} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_l}{1 - S_{22}\Gamma_l} \quad (10)$$

以上の式より、

$$\Gamma_{in} = \Gamma_l^* \quad (11)$$

を満たす Z_l が最適負荷 Z_l^o と示せる。

本研究ではモーメント法による無線電力伝送システムの解析を行って S パラメータを計算し、 S パラメータと負荷インピーダンス Z_l を、式(7)に代入して電力伝送効率の

算出を行っている。最適負荷 Z_l^o を算出した後、 Z_l^o の

虚部に損失抵抗を付加し、 Z_x として回路に挿入する。

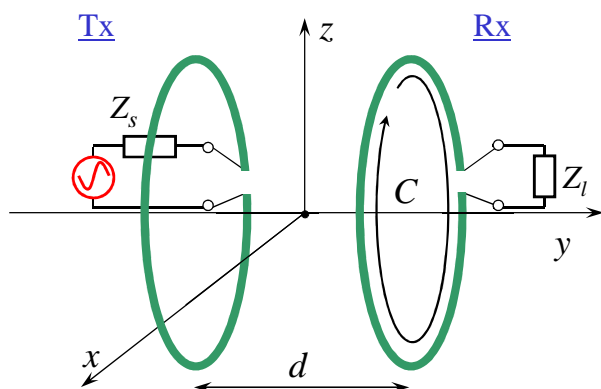
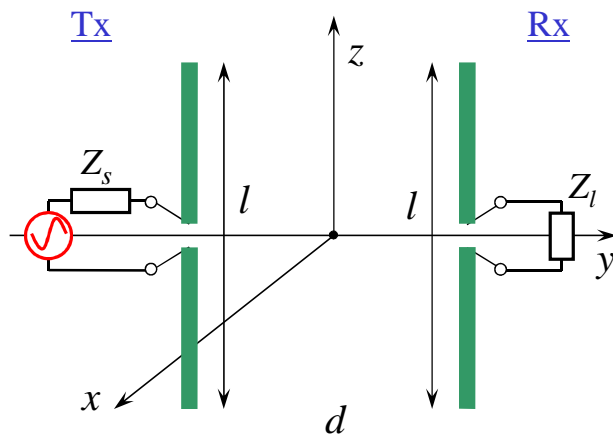
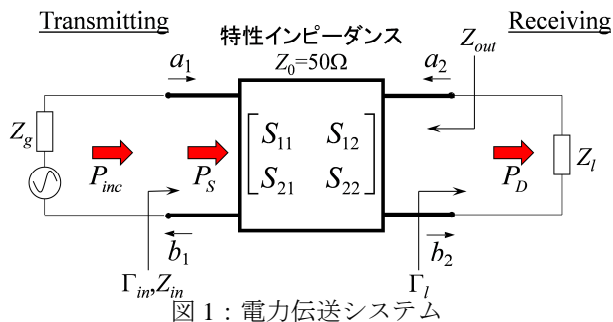
Z_x をアンテナの一部と見なし、再び最適負荷を求める

ことでQ値を考慮した最適負荷 Z_l^o を算出する。

損失効率は、Q値を用いて

$$Z_x = \frac{|X_l^o|}{Q} + jX_l^o \quad (12)$$

となる。



3.電力伝送効率の定義

3.1 解析モデル

ダイポールアンテナ用いた無線電力伝送システムを図2に示す。ダイポールアンテナは、長さ $l=1$ m、導線半径 1 mm、周波数 10 MHz で解析する。次に、ループアンテナ用いた無線電力伝送システムを図3に示す。ループアンテナは、周囲長 $C=1$ m、導線半径 1 mm、周波数 10 MHz で解析する。各システムの一部に整合回路部の損失を考慮し、損失抵抗を加える。

3.2 結果

解析モデルの数値解析結果から、Sパラメータを導出し、式(7)に代入することで最適負荷を計算した。ダイポールアンテナ用いた無線電力伝送システムの送受信間距離に対する最適負荷の実部・虚部をそれぞれ図4、図5に示す。

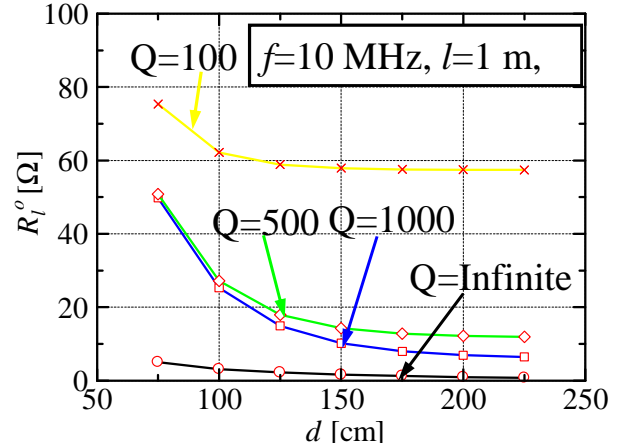


図4：ダイポールアンテナ最適負荷実部の距離特性

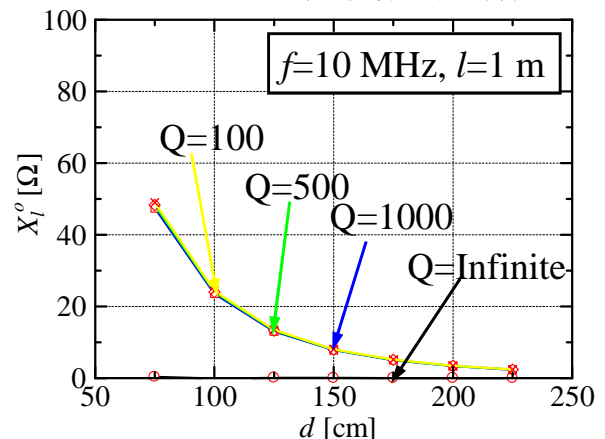


図5：ダイポールアンテナ最適負荷虚部の距離特性

図 4.5 から、送受信間距離 d によって最適負荷が変化していることが確認できた。 d によって最適負荷が変わるため、負荷を一定にしたままだと、伝送効率が低下すると考えられる。

次に、ループアンテナを用いた無線電力伝送システムの送受信間距離に対する最適負荷の実部・虚部をそれぞれ図 6、図 7 に示す

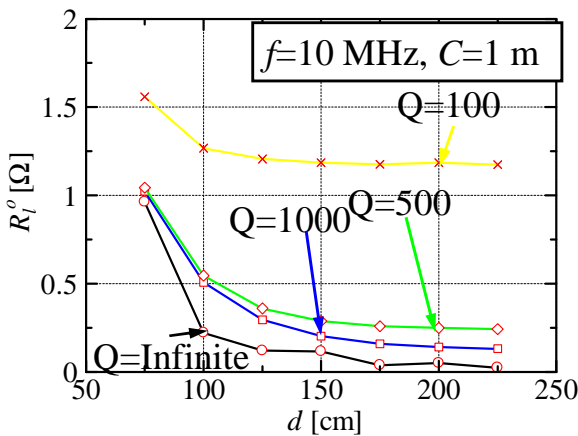


図 6 : ループアンテナ最適負荷実部の距離特性

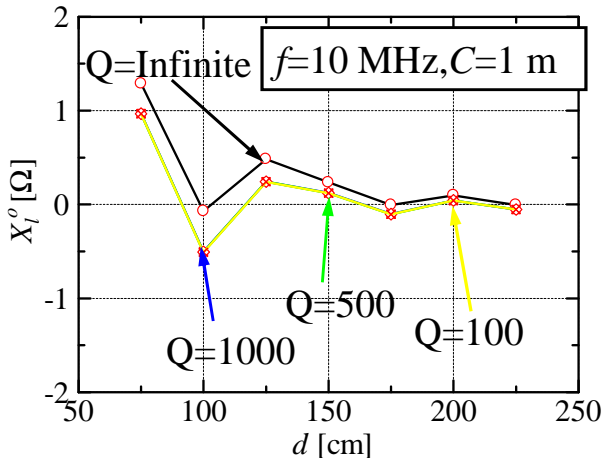


図 7 : ループアンテナ最適負荷虚部の距離特性

図 6,7 から、ループアンテナの送受信間距離 d が変化すると、最適負荷も変化することが確認できた。どちらのアンテナも Q 値が低くなると、損失抵抗が大きくなることがわかった。

また、送受信間距離 $d = 75$ cm の場合の最適負荷を装荷したダイポールアンテナとループアンテナの伝送効率の送受信間距離特性をそれぞれ図 8,9 に示す。図 8,9 に各アンテナの送受信間距離 d に対応した最適負荷を装荷した場合のグラフも載せた。

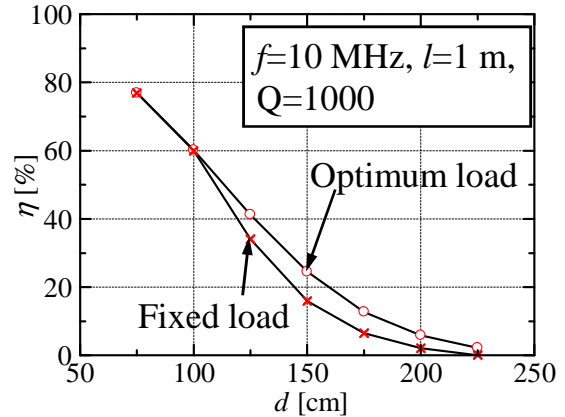


図 8 : ダイポールアンテナの伝送効率-距離特性

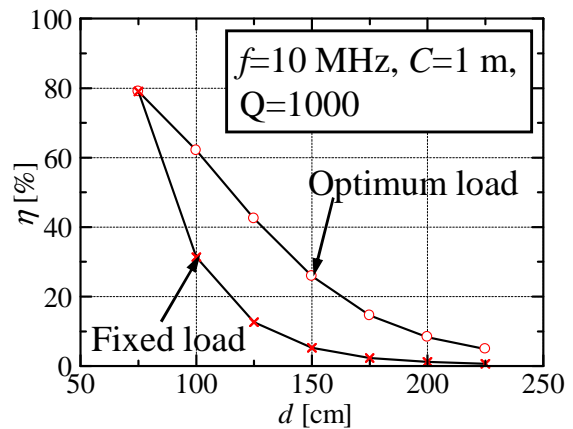


図 9 : ループアンテナの伝送効率-距離特性

図 8,9 から、常に最適な負荷を装荷した場合と固定した負荷では伝送効率が減少することが確認できた。アンテナ送受信間距離 d に対応して、整合をとることで伝送効率を改善できることを明らかにした。

4.むすび

Q 値を考慮した最適負荷の算出式を示し、ダイポールアンテナとループアンテナを例にとって検討した。アンテナ送受信間距離の変動によって最適負荷が変化することを確認した。また、送受信間距離を変えたとき、対応する最適負荷を装荷することで伝送効率の改善ができることを明らかにした。

参考文献

- [1] N. Tesla, "System of transmission of electrical energy," US0,645,576 (1900-03-20).
- [2] N. Tesla, "Apparatus for transmission of electrical energy," US0,649,621 (1900-05-15).
- [3] N. Tesla, "Art of transmitting electrical energy through the natural mediums," US0,787,412 (1905-04-18).
- [4] W. C. Brown, "The history of power transmission by radio waves," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 32, no. 9, pp. 1230-1242, Sep. 1984.

- [5] H. Matsumoto, "Research on solar power satellites and microwave power transmission in Japan," *IEEE Microw. Mag.*, vol. 3, no. 4, pp. 36-45, Dec. 2002.
- [6] C. T. Rodenbeck and K. Chang, "A limitation on the small-scale demonstration of retrodirective microwave power transmission from the solar power satellite," *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 47, no. 4, pp. 67-72, Aug. 2005.
- [7] J. Murakami, F. Sato, T. Watanabe, H. Matsuki, S. Kikuchi, K. Harakaiwa, and T. Satoh, "Consideration on cordless power station- Contactless power transmission system," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 32, pp. 5017-5019, Sep. 1996.
- [8] K. Hatanaka, F. Sato, H. Matsuki, S. Kikuchi, J. Murakami, M. Kawase, and T. Satoh, "Power transmission of a desk with a cord-free power supply," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 38, no. 5, pp. 3329-3331, Sep. 2002.
- [9] Andre Kurs, Arsteidis Karalis, Robert Moffatt, John Joannopoulos, Peter Fisher, Marin Soljacic, "Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances," *Science Magazine*, Vol.317, No.5834, pp.83-86, 2007.
- [10] A. Karalis, J. D. Joannopoulos, and M. Soljacic, "Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer," *Ann. Phys.*, vol. 323, pp. 34-48, 2008.
- [11] 袁巧微, 陳強, 澤谷邦男, "人体の影響を考慮したエバネセント電磁界共振により無線電力伝送システムの伝送効率," *信学技報*, AP2008-91, pp.95-99, 2008年9月.
- [12] 丸地智博, 稲垣直樹, 藤井勝之, "誘導電界を用いた新しい無線接続方式," *信学技報*, AP2009-84, pp.29-34, 2009年9月.
- [13] 平山裕, 小澤俊之, 平岩洋介, 菊間信良, 榊原久二男, "無線電力伝送の共鳴モードと等価回路表現," *信学技報*, AP2009-85, pp.45-40, 2009年9月.
- [14] 袁巧微, 陳強, 澤谷邦男, "Efficiency Improvement of Wireless Power Transfer System Using Resonant Near-Field Coupling," *信学技報*, A・P2009-87, pp.47-52, 2009年9月.
- [15] 常川光一, "屋内ユビキタス無線アクセスシステムにおいて相互インピーダンス補償による効率改善に関する検討" *信学技報*, AP2009-88, pp.53-56, 2009.
- [16] Qiaowei Yuan, Qiang Chen, Long Li, and Kunio Sawaya, "Numerical Analysis on Transmission Efficiency of Evanescent Resonant Coupling Wireless Power Transfer System," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol.58, no.5, pp.1751-1758, May 2010.
- [17] Y. Tak, J. Park, and S. Nam, "Mode-Based Analysis of Resonant Characteristics for Near-Field Coupled Small Antennas," *IEEE Antennas and Wireless Propag. Lett.*, vol. 8, pp. 1238-1241, Nov. 2009.