

スイッチ装荷型無給電素子を用いた近傍界無線電力伝送システムの評価

大尻 勇気, 陳 強 (東北大学大学院工学研究科)
袁 巧微 (仙台高等専門学校)

概要: 近傍界無線電力伝送技術が注目されている。近傍界無線電力伝送では送受信アンテナのインピーダンス整合を取ることによって高効率な電力伝送が可能となる。しかしながら、送受信アンテナの位置ずれによって不整合損が生じ、電力伝送効率が低下することが問題となっている。本報告では、送電アンテナ付近に無給電素子のヘリカルコイルアレーを配置し、各アレー素子ポートを開放・短絡を切り替えて送電を行い、送受信アンテナの位置ずれによる電力伝送効率の低下を抑えられることを把握した。また、数種類の位置ずれに関して検討し、改善効果を示す。

キーワード: 無線電力伝送, インピーダンス整合, 位置ずれ

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。無線電力伝送技術は遠方界放射を用いた電磁放射方式[1]-[7]、電磁誘導による電磁誘導方式[8], [9], そして近傍界を利用した。電磁結合方式[10], [11]に分類される。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、近年盛んに研究されている[12]-[18]。これまで、電磁結合方式の無線電力伝送システムにおいて、送受信アンテナの整合による高効率化の研究が行われてきた[19]。その一方で、送受信アンテナの整合状態は、アンテナの位置ずれによって大きな影響を受けることが知られている[20]-[21]。従って、高効率でロバストな無線電力伝送システムの実現には、アンテナの位置ずれによる電力伝送効率の低下を抑制する手法が必須である。そこで本報告では、送電アンテナ付近に無給電素子のヘリカルコイルアレーを配置し、各アレー素子ポートを開放・短絡の切り替えダイバーシティ送電で送受信アンテナの位置ずれによる電力伝送効率の低下を抑えられる無線電力伝送システムを提案する。位置ずれに対する無線電力伝送効率を数値的に明らかにし、スイッチングによる改善効果を確認し、通常のループアンテナを用いた無線電力伝送システムと比較を行い、評価する。

第2章では、評価に用いた電力伝送効率の算出式について説明する。次に第3章にて、提案手法を説明し、続く第4章にて解析結果を示し、評価を行う。第5章で本報告をまとめる。

2. 電力伝送効率の定義

本報告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

$$\eta = \frac{P_m}{P_i} \quad (1)$$

を用いた。ここで、 P_m は入力電力、 P_i 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。無線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

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

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

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

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

$$= \frac{|S_{21}|^2 (1 - |\Gamma_i|^2)}{|1 - S_{22}\Gamma_i|^2 (1 - |\Gamma_m|^2)} \quad (7)$$

と表すことができる。ここで、 Γ_i は負荷における、反射係数、 Γ_m 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。

$$\Gamma_i = \frac{a_2}{b_2} = \frac{Z_i - Z_0}{Z_i + Z_0} \quad (8)$$

$$\Gamma_m = \frac{a_1}{b_1} = \frac{Z_m - Z_0}{Z_m + Z_0} = S_{11} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_i}{1 - S_{22}\Gamma_i} \quad (9)$$

また、電力最大化の法則より

$$\Gamma_m = \Gamma_i^* \quad (10)$$

を満たす Z_i が最大の電力伝送効率を実現できる最適負

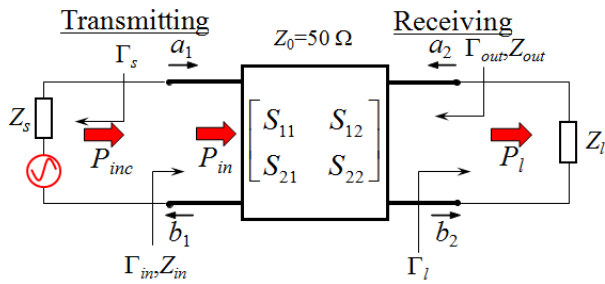


図 1：無線電力伝送システム等価回路

荷 Z_l と示せる。

本報告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。

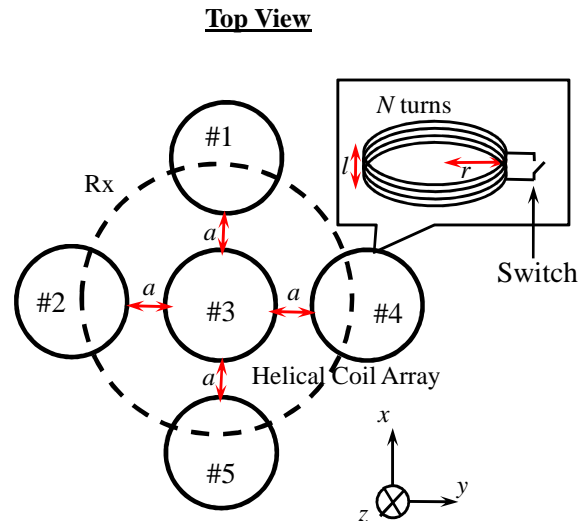
3. 提案手法

図 2 に提案する無線電力伝送システムを示す。送受電アンテナにループアンテナを用い、送電アンテナ近傍に無給電ヘリカルコイルアレー素子を配置した構造である。無給電ヘリカルアレーアンテナ素子の各ポートの負荷は開放と短絡のいずれかであり、スイッチングによって無給電素子の負荷を切り替えることで、送受電アンテナの位置ずれ時にもインピーダンス整合を簡単に行うことができる。

4. 数値解析結果

以上の提案手法の数値シミュレーションを行った。モーメント法(Method of Moments; MoM)によるシステムの解析から 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 から電力伝送効率 η の算出を行っている[19]。また、位置ずれが無い時の最適負荷 Z_l^o を受電アンテナに装荷し、受電アンテナの位置ずれによる不整合損はアレー素子ポートの短絡・開放のスイッチングで改善する。

図 3 に数値解析結果を示す。スイッチングを行わない場合、位置ずれが大きくなるにつれ、不整合により伝送効率が大きく低下することがわかる。一方、ヘリカルアレー各ポートの開放・短絡を切り替えて送電する場合、電力伝送効率の低下が抑えられることが確認できた。最適なスイッチングは、#3 と #4 を開放、その他を開放状態の時である。スイッチングを行わない場合と比較して、そのときの電力伝送効率は 16%改善されており、大きな電力伝送効率改善効果があることが確認できた。



Side View

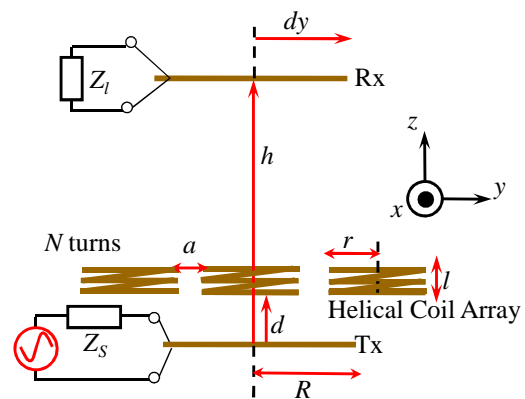


図 2：提案システムの構造

次に、受電アンテナが y 軸に対し斜め方向にずれた場合について解析を行った。解析モデルを図 4 に示し、電力伝送効率の計算結果を図 5 に示す。斜め方向にずれた場合#1, #3, #4 を開放、その他を短絡状態にした時、最適なスイッチングとなる。スイッチングしない場合と比べて電力伝送効率が 8%改善されており、電力伝送効率改善効果があることが確認できた。斜めずれ方向に受電アンテナが移動した場合、改善効果が低くなることを確認できた。

最後に、受電アンテナを回転させた場合について解析を行った。解析モデルを図 6 に示し、電力伝送効率の計算結果を図 7 に示す。回転させた場合#2, #3, #4 を開放、その他を短絡にした時、最適なスイッチングとなる。スイッチングしない場合、 θ が 90 度の時ほぼ無線電力伝送ができなことがわかる。スイッチングを行うことで、高い電力伝送効率で無線電力伝送を行うことが確認できた。

以上の解析結果から、受電アンテナの状態に合わせたスイッチングを行うことで、電力伝送効率を改善できることが確認できた。

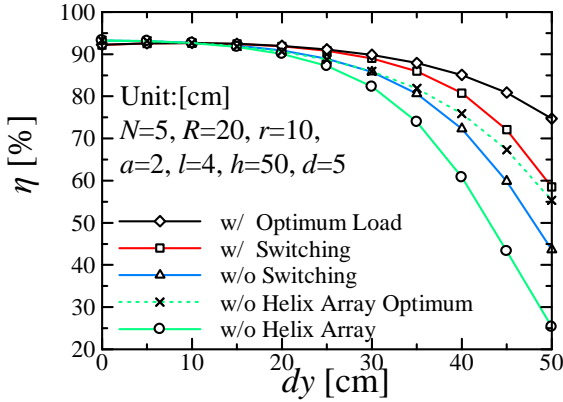


図3：各システムによる電力伝送効率

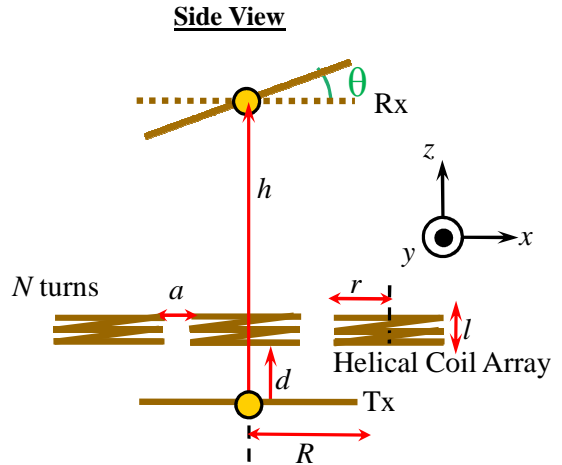


図6：解析モデル

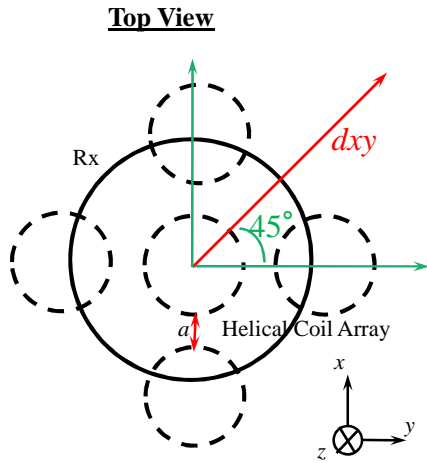


図4：斜め方向ずれ解析モデル

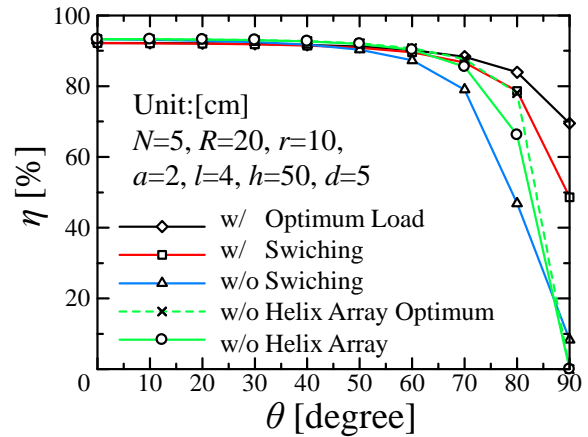


図7：各システムによる電力伝送効率

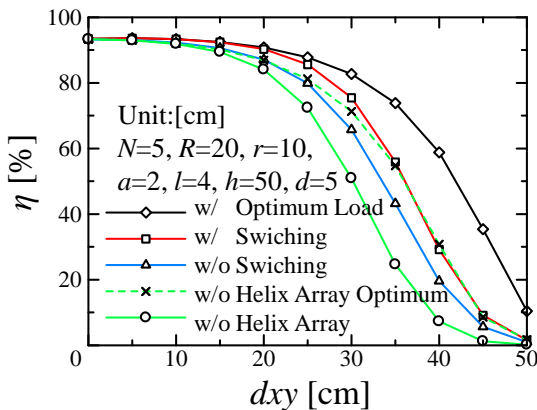


図5：各システムによる電力伝送効率

5. むすび

本報告では、送電アンテナ付近に無給電素子のヘリカルコイルアレーを配置した無線電力伝送システムを提案した。各アレー素子ポートの負荷をスイッチングにより切り替えることで送受電アンテナの位置ずれによる電力伝送効率の低下を抑えられるという特性を持つ。送受電アンテナの位置をさまざまにずらしたときの電力伝送効率の数値シミュレーションを行い、提案システムの電力伝送効率が従来システムよりも高いことを数値的に明らかにした。

参考文献

[1] N. Tesla, "System of transmission of electrical energy," US0,645,576 (1900-03-20).
 [2] Qiang Chen, et al., *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 54, no. 4, pp. 108-116, Aug. 2012.
 [3] N. Tesla, "Apparatus for transmission of electrical energy," US0,649,621 (1900-05-15).

- [4] N. Tesla, "Art of transmitting electrical energy through the natural mediums," US0,787,412 (1905-04-18).
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] A. Karalis, J. D. Joannopoulos, and M. Soljacic, "Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer," *Ann. Phys.*, vol. 323, pp. 34-48, 2008.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 平山裕, 小澤俊之, 平岩洋介, 菊間信良, 榎原久二男, "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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] Qiang Chen, et al., *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 54, no. 4, pp. 108-116, Aug. 2012.
- [20] QJ. Oasa, et al., "Fractal antenna for wireless power transmission," *Antennas and Propagation (ISAP), 2012 International Symposium on*, 2012-Nov.2 2012.
- [21] Wireless power consortium, "System description wireless power transfer Volume I: Low Power," May 2012.