

無給電素子を用いた近傍界による無線電力伝送効率の改善

大尻 勇気[†] 丸山 駿[†] 陳 強[†] 袁 巧微^{††}

[†] 東北大学 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05
^{††} 仙台高等専門学校 〒989-3128 宮城県仙台市青葉区愛子中央 4-16-1
E-mail: †ojiri@ecei.tohoku.ac.jp

あらまし 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で最大伝送効率で電力伝送が可能となる．しかしながら，送受電アンテナの位置ずれによって不整合損失が生じ，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たシステムを提案する．各無給電素子の終端負荷は開放・短絡のいずれかとし，適切に切り替えて送電を行う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，電力伝送効率，インピーダンス整合

Efficiency Improvement of Wireless Power Transfer by Using Parasitic Elements

Yuki OJIRI[†], Shun MARUYAMA[†], Qiang CHEN[†], and Qiaowei YUAN^{††}

[†] Tohoku University 6-6-05 Aramaki Aza Aoba, Aoba-ku, Sendai, Miyagi, 980-8579, Japan
^{††} Sendai National College of Technology 4-16-1 Ayashichuuou, Aoba-ku, Sendai-shi, Miyagi, 989-3128 Japan
E-mail: †ojiri@ecei.tohoku.ac.jp

Abstract We proposed approach to improve power transfer efficiency (PTE) for near field wireless power transfer (WPT) when the PTE is degraded due to the location misalignment of antennas. The termination load of parasitic elements are varied to adjust the input impedance of antennas for re-match the impedance when the location misalignment occurs. It is demonstrated the PTE is increased by varying and selecting the termination status by numerical simulation.

Key words Wireless power transfer, Power transfer efficiency, Impedance matching

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],[2]，電磁誘導による電磁誘導方式 [3],[4]，そして近傍界を利用した電磁結合方式 [5],[6] 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あり，電磁放射方式よりも高効率な電力伝送が可能であるため，近年盛んに研究されている [7],[8]．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，送受電アンテナの整合による高効率化の研究が行われてきた [9]．その一方で，送受電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．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

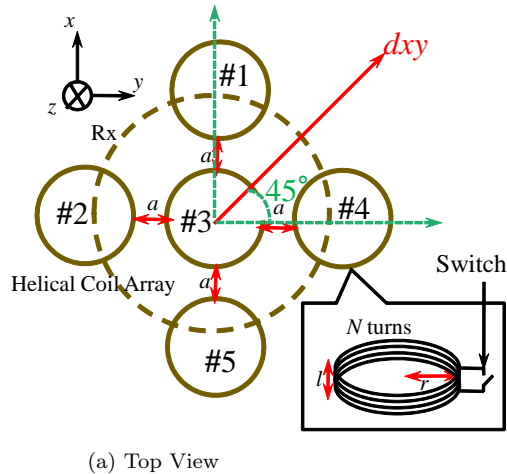
る電力伝送効率の低下を抑制する手法が必須である．

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，各アレー素子の終端負荷を開放・短絡のいずれかに適切に切り替えることで，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無線電力伝送システムを提案する．受電アンテナの位置ずれに対する電力伝送効率を数値的に明らかにし，無給電素子を用いた提案システムによる改善効果を評価する．

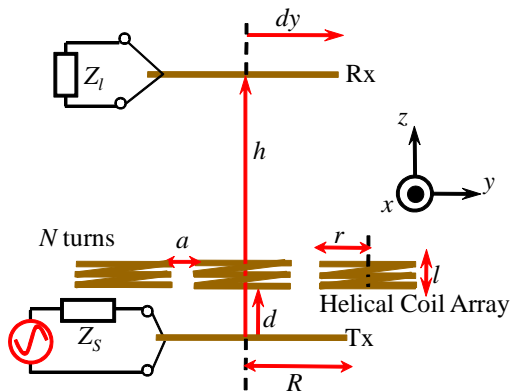
第 2 節では，提案手法について説明する．次に第 3 節にて，評価に用いた電力伝送効率の算出式について説明し，続く第 4 節にて数値解析結果を示し，評価を行う．

2. 提 案 手 法

図 1 に提案する無線電力伝送システムを示す．提案システム



(a) Top View



(b) Side View

図1 提案システムの構造

では、送受電アンテナ間に可変の終端負荷を持つ無給電素子を配置した構造である。送受電アンテナに半径 R のループアンテナを用い、無給電素子に半径 r の5素子のヘリカルコイルを用いた。各無給電素子の半径は $r < R$ とし、送電アンテナ近傍に対称性を持つように十字型に配置した。無給電素子の各終端負荷は開放と短絡のいずれかとする。位置ずれに伴う送受電アンテナのインピーダンスの変化によって不整合損失が生じるが、5つ配置した無給電素子の各終端負荷を適切に切り替えることで、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取ることができる。整合状態を良好とすることで電力伝送効率の改善が期待できる。

3. 電力伝送効率の定義

3.1 電力伝送効率の導出

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電力伝送効率

$$\eta = \frac{P_{in}}{P_l} \quad (1)$$

を用いた。ここで、 P_{in} は入力電力、 P_l 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を図2に示す。 S パラメータの関係式より、入力電力基準の電力伝送効率の算出式は、

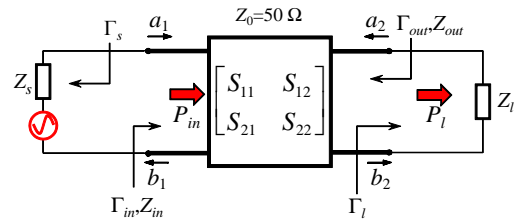


図2 二端子回路モデル。

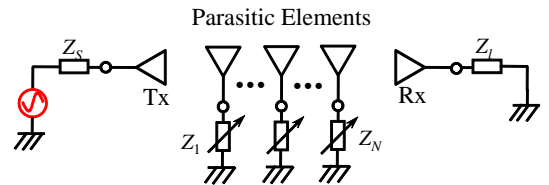


図3 無給電素子を用いた電力伝送システム等価回路図。

$$\eta = \frac{P_{in}}{P_l} = \frac{-a_2^* a_2 + b_2^* b_2}{a_1^* a_1 - b_1^* b_1} = \frac{|S_{21}|^2 (1 - |\Gamma_l|^2)}{|1 - S_{22} \Gamma_l|^2 (1 - |\Gamma_{in}|^2)} \quad (2)$$

と表すことができる [9]。ここで、 Γ_l は負荷における反射係数、 Γ_{in} は入力端における反射係数を示している。また、電力最大化の法則より、

$$\Gamma_{in} = \Gamma_l^* \quad (3)$$

を満たす Z_l が最大の電力伝送効率を実現できる最適負荷 Z_l^o 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を式 (2) に代入して電力伝送効率の算出を行っている。

3.2 各無給電素子の終端負荷変化時の S パラメータ計算方法

無給電素子の終端負荷を変化させた場合の S パラメータの計算方法について述べる。図3に無給電素子を用いた電力伝送システムの回路図を示す。

送受電アンテナ間に無給電素子を N 素子配置した構造で、このシステムの S パラメータを

$$S = \begin{bmatrix} S_{TT} & S_{TR} & S_{TP} \\ S_{RT} & S_{RR} & S_{RP} \\ S_{PT} & S_{PR} & S_{PP} \end{bmatrix} \quad (4)$$

と表すものとする。ここで、対角成分である S_{TT} , S_{RR} は送電、受電アンテナの反射係数であり S_{PP} は各無給電素子の S パラメータである。 S_{TR} , S_{RT} は送受電アンテナ間の相互結合 S_{TP} , S_{PT} は送電アンテナと無給電素子間の相互結合 S_{RP} , S_{PR} は受電アンテナと無給電素子間の相互結合を表す。

次に、各無給電素子ポートをインピーダンス $Z_i (i=1,2,\dots,N)$ で終端すると、各無給電素子ポートの反射係数 Γ_i は、

$$\Gamma_i = \frac{Z_i - Z_0}{Z_i + Z_0} \quad (5)$$

と表せる。ここで、 Z_0 は基準インピーダンス 50Ω とした。そ

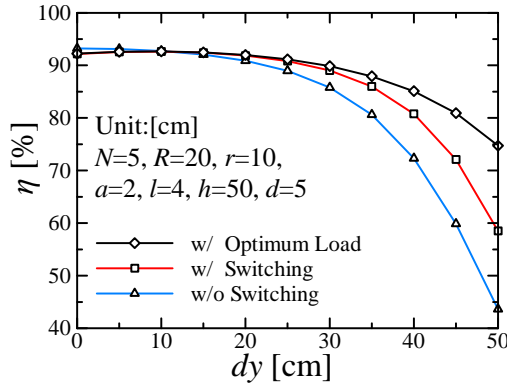


図 4 各システムの電力伝送効率.

して、各無給電素子ポートに接続されているインピーダンスの反射係数をまとめると、

$$\Gamma = \begin{bmatrix} \gamma_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \gamma_2 & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \gamma_N \end{bmatrix} \quad (6)$$

で表すことができる。以上より、各無給電素子ポートが反射係数行列 Γ のインピーダンスで終端された場合の送受電アンテナ間の S パラメータは、

$$\begin{bmatrix} S'_{TT} & S'_{TR} \\ S'_{RT} & S'_{RR} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{TT} & S_{TR} \\ S_{RT} & S_{RR} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} S_{TP} \\ S_{RP} \end{bmatrix} (I - \Gamma S_{PP})^{-1} \Gamma \begin{bmatrix} S_{PT} & S_{PR} \end{bmatrix} \quad (7)$$

と表せる。式 (7) で得られた送受電アンテナ間の S パラメータを式 (2) に代入し、各無給電素子の終端負荷を変化させた場合の電力伝送効率を算出できる。

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から電力伝送効率 η の算出を行っている。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失は無給電素子の終端負荷を短絡・開放のいずれかに適切に切り替えることで改善する。

図 4 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、不整合損失により電力伝送効率が大きく低下することがわかる。一方、各無給電素子の終端負荷を適切に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。最適な無給電素子の終端負荷の組み合わせは、#3 と #4 を開放、その他を短絡状態とした時である。スイッチングを行わない場合と比較して、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。

次に、受電アンテナが斜め方向にずれた場合について解析を行った。電力伝送効率の計算結果を図 5 に示す。斜め方向にずれ

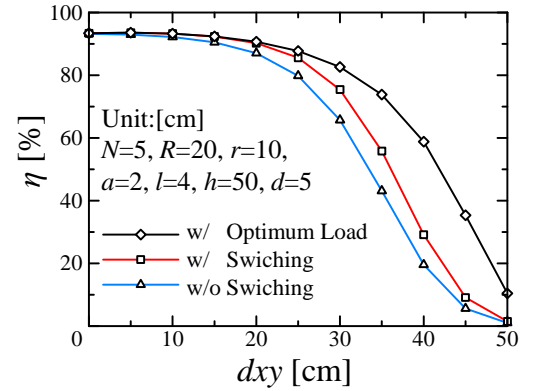


図 5 各システムの電力伝送効率.

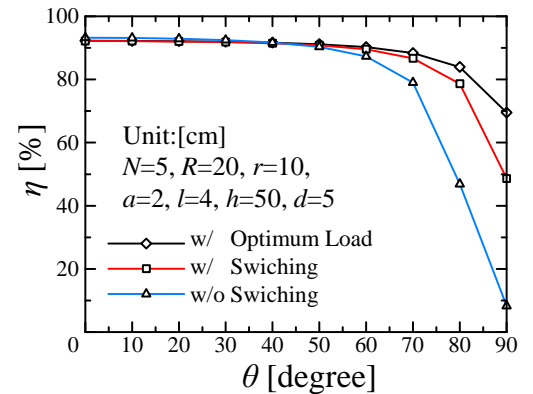


図 6 各システムの電力伝送効率.

た場合 #1, #3, #4 を開放、その他を短絡状態にした時、最適な終端負荷の組み合わせとなった。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。

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。電力伝送効率の計算結果を図 6 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、最適な終端負荷の組み合わせとなった。スイッチングしない場合、 θ が 90 度の時電力伝送効率が非常に低いことが確認できた。無給電素子の終端負荷を適切に組み合わせることで高い電力伝送効率となることが確認できた。

以上の数値解析結果から、受電アンテナの位置に合わせて各無給電素子の終端負荷を適切に組み合わせることで、電力伝送効率を改善できることが確認できた。

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。無給電素子の終端負荷を適切に切り替えることで、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ことがわかった。また、受電アンテナの位置によって各無給電素子に装荷している終端負荷の適切な組み合わせが変わることを確認した。受電アンテナが位置ずれした場合の数値シミュレーションを行い、提案システムによって電力伝送効率が改善することを数値

的に明らかにした。

6. 謝 辞

本研究は JSPS 科研費 25420353 の助成を受けたものです。

文 献

- [1] N. Tesla, "System of transmission of electrical energy," US0,645,576 (1900-03-20).
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] A. Karalis, J. D. Joannopoulos, and M.Soljacic, "Efficient wireless non-radiativemid-range energy transfer," Ann. Phys., vol. 323, pp. 34-48, 2008.
- [7] 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.
- [8] Qiaowei Yuan, Qiang Chen, Long Li, and Kunio Sawaya, "Numerical Analysis onTransmission Efficiency of Evanescent Resonant Coupling Wireless Power Transfer System," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol.58, no.5, pp.1751-1758, May 2010.
- [9] Qiang Chen, et al., IEEE Antennas Propag. Mag., vol. 54, no. 4, pp. 108-116, Aug. 2012.