

# 無給電素子を利用した近傍界による無線電力伝送効率の改善

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す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、送受信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, 電力伝送効率, インピーダンス整合

## 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 [9]。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。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。

位置ずれにおける電力伝送効率低下の抑制方法として、送電アンテナ追従型無線電力伝送システム [10] やリアルタイム整合回路の導入 [11] などが研究されている。送電アンテナ追従型無線電力伝送システムは、受信アンテナの位置がずれた場合に送電アンテナを常に最適な位置関係の場所まで動かすシステムであり、常に高い無線電力伝送効率を維持できる。しかしながら、センサーや磁力などを用いて受信アンテナの位置を正確に判断し、送電アンテナを機械的に動かす必要がある。よって、システム全体の面積が大きくなることやコストが大きいなどの問題がある。次にリアルタイム整合回路について述べる。受信アンテナの位置ずれにより送受信アンテナのインピーダンスが変化することで不整合損失が生じるが、リアルタイム整合回路の導入によって適宜最適な負荷条件を満たすことができる。従って、不整合損失を抑制できるため高い電力伝送効率を維持できる。しかしながら、整合回路の多段化による複雑さや整合範囲が回路素子の性能に依存するなどの問題がある。

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、各無給電素子の終端条件を開放・短絡のいずれかに適切に切り替えることで、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。提案システムでは、整合回路部のインピーダンスを固定化でき、送受信アンテナに装荷する回路素子を少なくできる利点がある。受信アンテナの位置ずれに対する電力伝送効率の改善効果を数値的に明らかにする。

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。提案システムでは、送受信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。送受信アンテナに半径  $R$  のループアンテナを用い、無給電素子に半径  $r$  の 9 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信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、9 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、送受信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

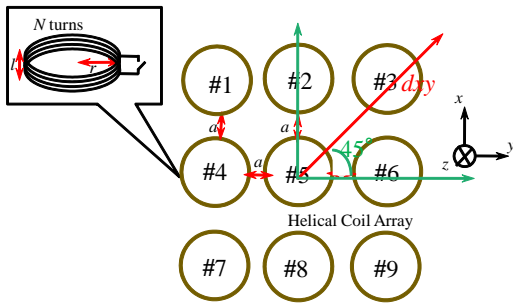
本報告で評価に用いた電力伝送効率  $\eta$  は、入射電力で基準化した電力伝送効率

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

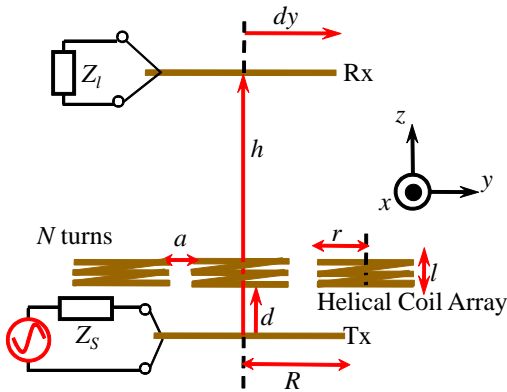
を用いた。ここで、 $P_{inc}$  は入射電力、 $P_l$  は受信電力を示している。次に、 $S$  パラメータによる電力伝送効率の算出について述べる。無線電力伝送システムを二端子回路網で表現したものを図 2 に示す。 $S$  パラメータの関係式より、入力電力基準の電力伝送効率の算出式は、

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

と表すことができる [9]。ここで、 $\Gamma_S, \Gamma_l$  はそれぞれ負荷  $Z_S, Z_l$  における反射係数、 $\Gamma_{in}$  は入力端における反射係



(a) Top View



(b) Side View

図 1: 提案システムの構造

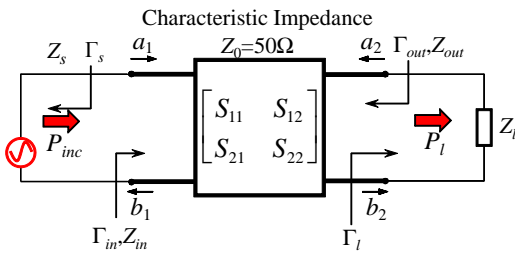


図 2: 二端子回路モデル.

数を示している．また，電力最大化の法則より，

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

を満たす  $Z_S, Z_l$  が最大の電力伝送効率を実現できる最適負荷  $Z_S^o, Z_l^o$  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．

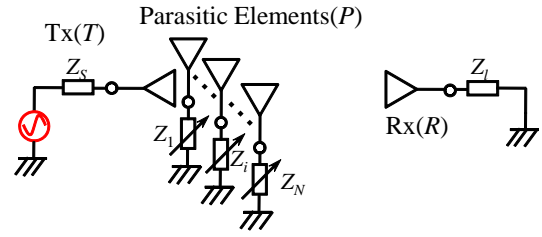


図 3: 無給電素子を用いた電力伝送システム等価回路図.

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  $\Gamma_i$  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  $50\Omega$  とした．そして，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  $\Gamma$  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  $\eta$  の算出を行っている．ま

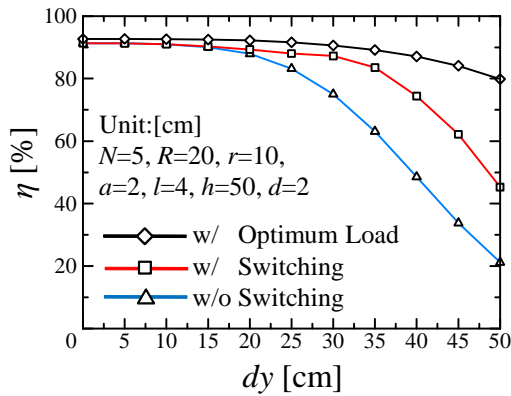


図 4: 各システムの電力伝送効率.

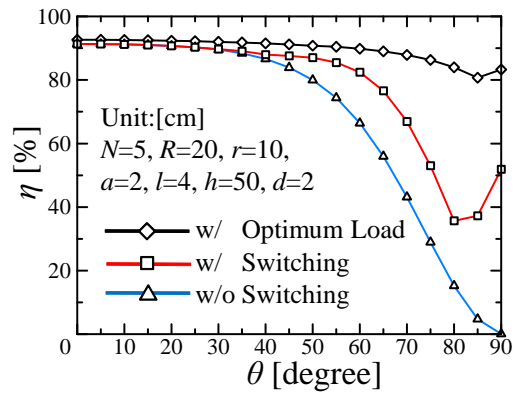


図 6: 各システムの電力伝送効率.

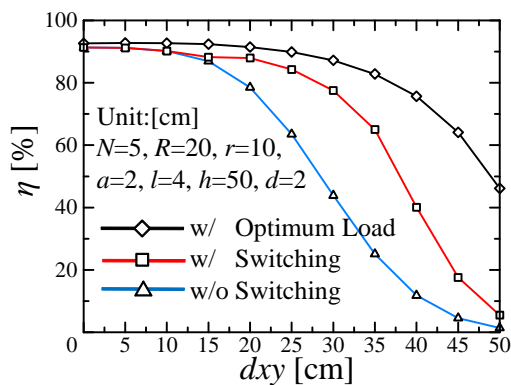


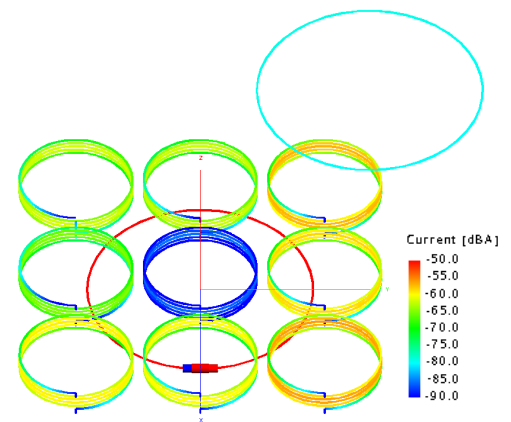
図 5: 各システムの電力伝送効率.

た、位置ずれが無い時の最適負荷  $Z_s^0$ ,  $Z_l^0$  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。

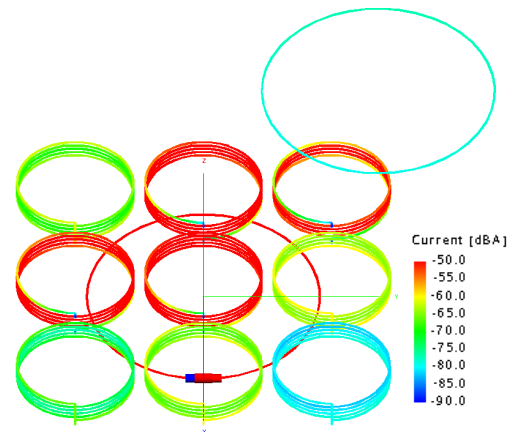
図 4 に数値解析結果を示す。スイッチングを行わない場合、位置ずれが大きくなるにつれ、不整合損失により電力伝送効率が大きく低下することがわかる。一方、各無給電素子の終端負荷を適切に切り替えて送電する場合、電力伝送効率の低下が抑えられることが確認できた。スイッチングを行わない場合と比較して、電力伝送効率は 28% 改善されており、大きな電力伝送効率改善効果があることが確認できた。

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。斜め方向にずれた場合、スイッチングしない場合と比べて電力伝送効率が 39% 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。スイッチングしない場合、 $\theta$  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。



(a) 各終端条件開放



(b) 各終端条件最適

図 7: 位置ずれ時における各システム電流分布

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。

最後に、位置ずれ時におけるアンテナの電流分布を図 7 に示す。図 7 より、各無給電素子の終端条件によってア

ンテナの電流分布が変化していることが確認できた。そのことから送受電アンテナのインピーダンスが変化していると推測できる。よって、無給電素子による電力伝送効率改善効果は、各無給電素子の終端条件の変化によってインピーダンス整合を良好としているためと考えられる。

## 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。

## 参考文献

- [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-radiative mid-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工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 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.
- [9] Qiang Chen, et al., IEEE Antennas Propag. Mag., vol. 54, no. 4, pp. 108-116, Aug. 2012.
- [10] Wireless power consortium, "System description wireless power transfer Volume I: Low Power," May 2012.
- [11] Minoru Mizutani, Mondo Aoyama, and Takashi Ohira, "Real-Time Load Tracking Circuit for Wireless Transfer System," Interdisciplinary Research and Global Outlook Conference 2013, p.83, Aichi, Japan, Oct 2013.