共振による磁界結合を利用した非接触電力伝送 -3 次元的位置ずれに柔軟な近傍界用アンテナー

居村岳広 内田利之 堀洋一 東京大学

近年、電気自動車への非接触充電の技術確立が望まれている。従来の方式では、電力伝送距離(ギャップ) が短く、位置ずれに弱い電磁誘導の技術しかなかった。そこで、共振現象を利用した磁界結合による電力伝 送を提案する。これは、送受信アンテナのギャップが大きく、かつ位置ずれに強い非接触電力伝送を行なう 事が出来る。アンテナ直径より大きなギャップにおいても、また、アンテナが半分以上位置ずれしても 80% を超える高効率の電力伝送が行なえる。本論文では、上述した事を含め、提案するアンテナの3次元的な位 置ずれの特徴とその利用法について述べる。

Contactless Power Transfer using Magnetic Coupling of Resonance

- Antenna for Near Field with Flexibility for 3D Displacement -

Takehiro Imura Toshiyuki Uchida Yoichi Hori The University of Tokyo

Recently, establishment of technology of contactless power transfer for Electric vehicle (EV) is desired. Typical way of contactless power transfer is very short air gap and is very poor for position variations. In this paper, contactless power transfer by magnetic resonant coupling is proposed. This technique can be more robust to air gap and position variations. Efficiency is very high when length of air gap is more than the diameter of antenna. And efficiency is over 80% when antennas are out of alignment about half diameter. In additions, feature of parameters with position variations in 3D are mentioned.

Keyword: contactless power transfer resonance coupling

1. まえがき

近年、電気自動車の開発や研究が急加速しており、 まだ完全に十分とは言えないものの、電池のエネル ギー密度の向上によって、長年かかった電気自動車 の実用化、普及が目前まで迫っている。電気自動車 は排ガスを出さない為、地球環境にやさしく、ガソ リンに比べ電気のほうが Well to Wheel で考えた場合、燃費(電費)が安く済むことが知られており、 EV 普及に大きな追い風となる。

しかしながら、本格的な普及の為には、充電方法 の煩わしさの解決が必要である。ガソリン車はガソ リンを給油するが、電気自動車は電気で走っており 充電の必要性がある。充電の方法は家庭でのゆっく

りとした充電か充電スタンドでの急速充電の2通り が考えられる。非接触充電はどちらでも使えるが、 ここでは頻繁に使う通常の家庭での充電を考える。 通常の充電は一日一回自宅に戻っての長時間の充電 が必要である。これは、ピュアな電気自動車だけで なく、プラグインハイブリッド車でも同様である。 そこで、最低でも一日一回の充電を考えると、これ は非常に生活上負担となる作業である。具体的な動 作を省みると、毎回車を降りる度に、コードを伸ば し車のコンセントにプラグを挿す必要がある。必ず しも、プラグやコードが泥で汚れていないとはいえ ない。また、駐車場に屋根がない場合は雨の日は手 が泥だらけになるだけでなく感電の恐れもある。ま た、荷物で両手がふさがっている場合もある。更に、 充電を忘れた場合、次の日は車が電欠で使えないこ とも考えられる。デジカメでも電欠の恐怖は大きく 一度体験すると製品自体に対する信頼性も揺らいで しまい、普及の大きな歯止めとなってしまう。

そこで、それらを打開する為に、EV への非接触充 電を提案する。非接触で電力伝送が可能となれば、 家に帰っても駐車するだけで何もせずに自動で充電 してくれる事になり、煩わしさの問題も感電の問題 も充電忘れの心配も全て解決する。つまり、電気自 動車においては人間がわざわざ意識して充電をする 必要がなくなり、通常のガソリン車に比べて非常に 付加価値の高い乗り物になり、そして、新たな付加 価値は普及に大きな助けとなる。

一方、技術的に非接触充電を考えた場合、大きく 3 通りある。電磁誘導、マイクロ波送電、電磁界結 合である。電磁誘導はギャップが非常に短く 1cm 程 度で電力伝送が不可能になる[1][2][3]。近年、10cm 程度の電力伝送が可能である事が発表されたが、位 置ずれに弱く、地上に設置した送信コイルの真上に 自動車を正確に停車する必要がある[4]。その為、位 置ずれに強い非接触充電の方式が必要である。マイ クロ波送電は宇宙から地上に電力を送ることが可能 であるが、逆に近い場合はアンテナ特性的に不安定 となってしまう。また効率もまだ低い[5][6]。一方、 電磁界結合に関してはギャップが大きいことが知ら れており、位置ずれにも強いと思われる[7][8]。本稿 においては、位置ずれに強いと思われる電磁界結合 を利用した電力伝送を行なう。その為の近傍界用ア ンテナを作成しその特性を評価する。

2. 電磁界結合による電力伝送

電磁界結合はアンテナの共振状態における電力 伝送を利用している。本稿では共振状態における磁 界結合によって電力伝送を行なっているので、その 等価回路を Fig. 1 に示す。更に、この等価回路を T 形等価回路に変形した図を Fig. 2 に示す。電磁誘導 との違いは、共振現象を利用している事である。そ の為に、結合が弱くても電力伝送が可能であり、ギ ャップを大きくすることが出来る。



Fig.1 共振による磁界結合の等価回路



Fig. 2 T 形等価回路

3. 電力伝送の構成と実験構成

非接触充電のシステムを、Fig. 3 に示す。高周波 電源で発生した電力を送信アンテナから受信アンテ ナに電磁界結合を利用して電力伝送し、整流回路を 通して充電池に貯めるというシステムを想定する。 本稿においては、アンテナの特性を示す為に、アン テナ間の電力伝送効率のみを述べる。

まず、電力伝送における、ギャップと効率を検証 する。電力伝送におけるアンテナ素子間の現象を捉 える為、そしてアプリケーションとしては、なるベ くシンプルな形状である事が望ましいので、送信ア ンテナと受信アンテナの2素子構成とする(Fig.4)。 更に、車への搭載を考え半径150mmとした。パラメ ータは半径 r、巻数 n、ピッチ p、ギャップ g、軸ず れ d である。本稿においては、特に断らない限り、 基本パラメータを半径 150mm、巻数 5 巻、ピッチ 5mm、軸ずれ 0mm とし条件により適宜各パラメー タを変化させていく。

本研究においては、電磁界解析をモーメント法で 行い、実験は以下の構成で電力伝送を測定する。ベ クトルネットワークアナライザを用いて、周波数と 反射係数と透過係数を測定する。反射係数 S_{11} 、透過 係数 S_{21} に対し、反射電力の効率を η_{11} 、透過電力の 効率を η_{21} とすると、

$\eta_{11} = S_{11}^2 \times 100$	[%]	(1)
$\eta_{21} = S_{21}^2 \times 100$	[%]	(2)

となる。



Transmitting Antenna

Fig.3 非接触充電システム





Fig. 5 非接触充電実験構成



Fig.6 送信アンテナと受信アンテナ



Fig.7 位置ずれ時の送信アンテナと受信アンテナ

4. 各アンテナパラメータによる電力伝送特性

Fig. 2 の等価回路より、式(3)~(6) が求められる。 共振周波数が 2 点ある。結合係数は 2 点の共振周波 数で求められる。これにより、結合の強さと共振周 波数の関係がわかる。

$$\frac{1}{\omega L_m} + \frac{2}{\omega (L - L_m) - \frac{1}{\omega C}} = 0$$
⁽³⁾

$$\omega_m = \frac{\omega_0}{\sqrt{1+k}} = \frac{1}{\sqrt{(L+L_m)C}} \tag{4}$$

$$\omega_e = \frac{\omega_0}{\sqrt{1-k}} = \frac{1}{\sqrt{(L-L_m)C}} \tag{5}$$

$$k_m = \frac{L_m}{L} = \frac{\omega_e^2 - \omega_m^2}{\omega_e^2 + \omega_m^2} \tag{6}$$

当然のことながら、アンテナのパラメータを変え ると電力伝送特性は変化する。以下では、考察を交 えながらギャップを変えた場合と、位置をずらした 場合の効率と共振周波数の解析結果を示す。

4-1 ギャップにおける効率と周波数

ギャップを変化させた時の効率と周波数特性を Fig.8に示す。ここでの効率は共振周波数における効 率を指す。Fig.8より、ギャップが大きくなると2 つに分かれていた共振周波数が1つになる。逆に言 うと、アンテナを近づけると共振周波数が2つに分 かれていく。つまり、アンテナ間の結合が強くなる ほど共振周波数が2つに分かれていく。一方、効率 に関しては結合の強弱によって変わらない。結合係 数 k=0 になるとピークが一つの周波数になり電力 伝送が出来なくなる。この周波数はアンテナ1素子 における共振周波数 f_0 となる。

近傍での電磁界の分布を Fig. 9~Fig. 11 に示す。 それぞれ、2つの共振周波数 f_m , f_e ($f_m < f_e$) におけ る分布を示している。Fig.9より、fmにおいてはアン テナに流れる振幅が等しく同位相寄りで動作してい るので磁界が強め合っている。その為、対称面にお いて磁界が垂直に向く磁気壁が確認される。一方、 f。においてはアンテナに流れる振幅が等しく逆位相 寄りで動作しているので磁界が弱めあっている。そ の為、対称面において磁界が水平に向く電気壁が確 認される。以上のことは、Fig. 10 において確認でき る。更に、Fig. 10 では電界が弱いことも分かる。更 に、Fig. 11 においては、送受信アンテナの対称面(磁 気壁、電気壁に当る場所)における磁界と電界のエ ネルギーを示している。磁界成分のみであり、電界 成分がほぼ存在していない事がわかる。このことか らも、電界でなく磁界による結合である事がわかる。





(a) 電介, Im (b) 電介, Ie Fig. 10 共振における近傍界分布



4-2 位置ずれにおける効率と周波数

位置ずれにおいては、解析だけでなく実験も行う。 位置ずれは EV においては非常に重要となる。電磁 誘導においては、数 cm ずれただけで電力伝送が行 なえない事を考えると、位置ずれに冗長なシステム が必要となる。そこで、位置ずれにおける電力伝送 の特性を調べる。Fig. 12~Fig. 14 より、次の事が言 える。コイルの半径が 150mm である事を考えると、 コイルが半分以上ずれた場合においても電力伝送が 可能である。また、高さによってはコイルが半分以 上ずれた場合(d=150mm 以上)においても 80%以 上の効率が得られる。



Fig. 14 位置ずれと結合係数

5. 固定周波数での効率と最大効率の比較

前章までの結果より、ギャップが長く位置ずれに 強いアンテナが作れたが、実際のシステムに組み込 んだ場合を考えると、高周波における電力伝送は可 変周波数電源を用いる事は現実でない為、固定周波 数で動作させる事が考えられる。つまり、本構成で は最大効率で常に動作するわけではない。そこで、 本章では、固定周波数での効率と、理想状態と言う べき可変周波数が使えた場合の効率(最大効率)を 比較する。その際、空間のどの位置で効率が高くな るのかを3次元的に示す。

更に詳細を述べると以下となる。固定周波数は中 心周波数の f_0 を使用する。 f_0 は1素子の共振周波数 でもある。固定周波数 f_0 で電力伝送を行なった場合 Fig. 15(a) "結合が強い時"の固定周波数 f_0 での効率 は低く Fig. 15 (b) "結合が弱い時"の f_0 での効率は高 くなる。これらは、Fig. 15 の極小値にあたる部分で ある。そこで、固定周波数 f_0 場合において空間のど の位置で効率が高くなるのかを3次元的にFig. 16 に 示す。

一方、可変周波数電源が使えるとした場合を考え ると Fig. 15 (a), (b)共に、効率が最も高くなるのは 共振周波数である f_m (f_m ')の時であり、Fig. 15 の極 大値に当たり、その周波数は結合の強さによって変 化する。そこで、 f_m (f_m ')の場合において空間のど の位置で効率が高くなるのかを3次元的に Fig. 17 に 示す。

それぞれの図は、送信側アンテナ中央の上端を原 点(x, z) = (0, 0) に設置した時における、受信 側アンテナ中央の下端の位置を示しており、ギャッ プと位置ずれを含めた効率を表している。また、本 章は全て電磁界解析で行なった。

Fig. 16より、固定周波数でも高さ150mm~200mm では、位置がずれた場合においても80%の効率、場 合によっては90%以上の電力伝送が可能である。車 の車高はほぼ決まっているので、ギャップはそれほ ど気にせず、位置ずれだけ考えれば良いので、車載 に搭載する際に最適なアンテナを選択すればよいこ とが分かる。重量が変化し高さが数 cm 程度変化し ても、ほぼ70%程度までの効率での非接触充電が可 能である事が読み取れる。本構成では、高さが 150mm~200mm において最適なアンテナとなって いるが、半径を大きくし、巻数を増やして結合を強 くすれば更に遠くまで電力伝送が可能である[9]。

以上の様に、固定周波数でも効率70%以上の電力 伝送として使用すれば大きな範囲をカバー可能であ る事がわかる。もちろん、固定周波数においても、 回路に可変容量等を追加して、特性を可変にする事 で最大効率追従制御を行い、効率の最適化が行なえ



Fig. 17 共振周波数 fm での位置ずれと効率

6. まとめ

電気自動車への非接触充電においては、ギャップ が大きく位置ずれに強いアンテナが望まれていた。 本稿において、共振における電磁界結合という現象 を利用し、電力伝送用近傍界型アンテナを作成し評 価した。その結果、本方式はギャップと位置ずれの 問題に対し非常に強力であり、電気自動車への非接 触充電にとって非常に有力な手段となることを示し た。

参考文献

- [1] Sato F., Murakami J., Matsuki H., Kikuchi S., Harakawa K., Satoh T., "Stable Energy Transmission to Moving Loads utilizing New CLPS", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.32, No.2, pp.5034-5036, 1996.
- [2] Zhang Bingyi, Liu Hongbin, Zhao Yisong, Ying Yong,

Feng Guihong, "Contactless Electrical Energy Transmission System Using Separable Transformer", Proceedings of the Eighth International Conference on Electrical Machines and Systems, Vol.3, pp.1721-1724, 2005.

- [3] A. Okuno, L. Gamage, M. Nakaoka, "Performance Evaluations of High-Frequency Inverter-Linked DC/DC Converter with Noncontact Pickup Coil," Trans. on Industrial Electronics, vol. 48, no. 2, pp. 475-477, Apr. 2001.
- [4] 紙屋雄史,中村幸司,中村達,大聖泰弘,高橋 俊輔,佐藤剛,松木英敏,成澤和幸,"電動車両 用非接触急速誘導充電装置の開発と性能評価(第 一報)",自動車技術会春期大会 学術講演会前 刷集 No.80-07, 2007.
- [5] Brown W.C., "Status of the Microwave Power Transmission Components for the Solar Power Satellite", IEEE TRANSACTUONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES, VOL.Mtt-29, NO.12, DECEMBER 1981.
- [6] 篠田健司, 兒島淳一郎, 篠原真毅, 三谷友彦, 橋 本隆志, 岸則政, 藤田晋, 三田村健, 外村博史, 西川省吾, "マイクロ波送電を用いた電気自動車 充電システムの評価研究Ⅱ", 信学技報 SPS2006-18(2007-02), 2007.
- [7] André Kurs, Aristeidis Karalis, Robert Moffatt, J. D. Joannopoulos, Peter Fisher, Marin Soljačić, "Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances," in Science Express on 7 June 2007, Vol. 317. no. 5834, pp. 83 – 86.
- [8] Aristeidis Karalis, J.D. Joannopoulos and Marin Soljačić, "Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer," Annals of Physics, Volume 323, Issue 1, January 2008, Pages 34-48, January Special Issue 2008.
- [9] 居村岳広,内田利之,堀洋一,"近傍界用磁界ア ンテナの共振を利用した高効率電力伝送の解析 と実験—基本特性と位置ずれ特性—",電気学会 総合応用部門大会,2008.