MHz帯を用いた電気自動車向け磁界共鳴型非接触給電 システムに関する研究

学生員 小柳 拓也(東京大学)* 正 員 居村 岳広(東京大学) 上級会員 堀 洋一(東京大学)

Wireless Power Transfer System for Electric Vehicle via magnetic Resonance in MHz Frequency Band Takuya Koyanagi^{*}, Studen Member, Takehiro Imura^{*}, Member, Yoichi Hori^{*}, Senior-member

This paper presents wireless power transfer system for electric vehicle via magnetic resonance in MHz frequency band. First, we design helical antennas for magnetic resonance in 13.56MHz. By using different size antennas, we can set up a pair of antennas which is robust over antenna displacement. Second, wireless power transfer system with matching circuit which compensate relative change of antennas is introduced from equivalent circuit.

キーワード:非接触給電,磁界共鳴,電気自動車

Keywords : wireless power transfer, magnetic resonance, electric vehicle

1. はじめに

磁界共鳴型非接触電力伝送は,2007 年 MIT により報告さ れたものである。本方式の特徴は,電磁誘導型に比べて伝送 距離が長くかつ位置ずれにも強いことであり,10MHzの電源 を用いて,1mの伝送距離をアンテナ間効率90%で送ること ができることが実験により示されている⁽¹⁾。このような利点 から,家電や電気自動車など幅広い応用が期待され,現在盛 んに研究開発が行われている⁽²⁾⁽³⁾。

その中でも、本研究では特に電気自動車(以下 EV)への 給電を目的としている。EV は総合エネルギーが小さく、CO₂ の排出も少ない。かつ、電気モータの高い制御性を生かした 様々なモーション制御が提案されており、優れた操作性・安 全性を有する⁽⁴⁾。EV に非接触給電が可能になると、充電の 際に電源プラグを挿す手間が無くなり、ほとんど意識せずに 充電が可能となる。インフラとして多くの充電ポイントを設 ければ、航続距離が短いというEVの欠点を克服できる。さ らに将来的には、走行中のEVへの給電も視野に入る。この ように、非接触給電技術はEV やそれに関わる我々の生活を 大きく変える可能性を持っている。

EV を対象とした非接触給電システムに関しては、電磁誘導型にて既に実用に近い範囲で実現されている。いくつかの試験的な実験により、EV への非接触給電の有用性が確かめられているが、電磁誘導型においてはコイル間の送電損失を少なくするために正確な位置合わせが必須である、などと言った問題点も指摘されている⁽⁵⁾。対して磁界共鳴型による非接触電力伝送では、位置ずれに強く伝送距離も長いことから、位置ずれやエアギャップの変化にロバストな非接触給電システムが実現できる可能性がある。

本稿では、まず MHz 帯で動作する磁界共鳴型・EV 向けの

送受信アンテナを設計する。磁界共鳴型電力伝送に用いるア ンテナは、送受信アンテナそれぞれの自己共振周波数をそろ えることが肝要であり、アンテナの半径や巻き数などのパラ メータに関しては自由度が高い。そのため、送受信アンテナ で物理的な大きさが異なる場合においても、電力伝送が可能 であり、これを用いることにより位置ずれを許容できるアン テナ構成を実現できる。次に、等価回路を用いた検討により、 マッチング回路を用いたシステム設計法について述べる。



図1 電気自動車への非接触給電

2. 大きさの異なるアンテナ間での電力伝送

〈2・1〉 動作周波数とアンテナ設計の指針 磁界共鳴型非接触電力伝送向けの近傍界型アンテナとして、ヘリカルアンテナが提案されている⁽⁶⁾。このヘリカルアンテナは、ダイポールアンテナを円筒状に巻きつけた構造をしており、アンテナの中心点において磁界が強めあうような構造になっている。図2にヘリカルアンテナの電磁界シミュレーションモデルと、実際に作成したアンテナを示す。この近傍界型ヘリカルアンテナは動作周波数の波長に対してアンテナ線長が十分に短いため、放射損はほとんど無い。





(a) Simulation model
(b) Picture, Helical Antenna
Fig. 2 Appearance of Helical Antenna
図 2 磁界共鳴型近傍界用ヘリカルアンテナの外観

ヘリカルアンテナは図3(b)のような RLC 直列共振回路に て等価回路として表される。このとき,静電容量Cはアンテ ナ線の線巻容量を表しており,抵抗Rは放射損・銅損を表し ている。等価回路から類推されるように,磁界共鳴型ヘリカ ルアンテナは MHz 帯のみならず、その他の周波数でも実現 可能である。しかしながら、周波数が低くなればなるほど、 アンテナの LC を大きくする必要があり、それに伴ってアン テナは大きくなる。従って,使用するアプリケーションによ って動作周波数を決定し、アンテナを設計する必要がある。 本稿では特に、13.56MHz で動作するアンテナを用いる。自 動車への応用を考えた時、アンテナの大きさから考えて 10MHz 付近で動作するアンテナが EV 向けとしては丁度良 い。また, ISM(Industry-Medical-Science)バンドにより, 通信 分野以外で使用できる周波数が 10MHz 付近では 13.56MHz ±7kHz しかないため、本研究では 13.56MHz を動作周波数に 設定した。

ヘリカルアンテナは、巻き数、線巻ピッチ、アンテナ半径 などをパラメータとし、比較的自由な設計が可能である。設 計方法としては、電磁界シミュレータ IE3D を用いてアンテ ナのモデルを作製し、その入力インピーダンスを調べること で自己共振周波数が 13.56MHz となるように各パラメータを 調整した。図4は自己共振周波数を 13.56MHz とした時の、 円形ヘリカルアンテナの巻き数とアンテナ半径との関係を 示したものである。このときアンテナの線巻ピッチは 5mm としている。



Total number of coils: *t*[turn]

(a) Antenna Parameters

Fig. 3 Parameters and Equivalent circuit of Helical Antenna図3ヘリカルアンテナのパラメータと等価回路

(b) Equivalent Circuit

また,一方向のみに位置ずれを許容できるアンテナとして,図に示すような楕円形のアンテナを設計した。アンテナの各種パラメータは,rx = 300[mm],ry=150[mm],p=5 で巻き数は2巻きである。



Fig. 4 13.56MHz Antenna Parameters(coil turns, antenna radius) 図4 13.56MHz で自己共振するヘリカルアンテナ



Fig. 5 ellipsoidal Antenna 図5 楕円形アンテナ

〈2・2〉 大きさの異なるアンテナ間での電力伝送 先の節で設計したアンテナを作製し、電力伝送の実験を行った。作成したアンテナは、送信用として 2turn, r=482mmの円形アンテナと、前節で示した楕円形アンテナ、受信側として 5turn, r=189mmの円形アンテナである。アンテナ線には直径 2mmの単芯皮膜銅線を使用し、アンテナのボビンとして空気と誘電率が近い発泡スチロールを用いた。

実験では、図6に示す構成の下、ベクトルネットワークア ナライザ(以下 VNA)を用いてSパラメータを測定し、式(1) から電力伝送効率を算出した。

 $\eta_{11} = (S_{21})^2 \times 100[\%]$(1) 実験に用いたアンテナのパラメータを TABLE 1 に示す。



図6 実験装置の構成

| TABLE 1 Antenna Parameters | |
|----------------------------|--|
|----------------------------|--|

| | Shape | Size [mm] | Coil Turns [turn] | $R[\Omega]$ | L[nH] | C[pF] |
|------------------------|-----------|--------------------|-------------------|-------------|---------|-------|
| Transmitting Antenna 1 | Circle | r = 482 | 2 | 1.61 | 11120.8 | 12.4 |
| Transmitting Antenna 2 | Ellipsoid | rx = 300, ry = 150 | 2 | 0.96 | 4320.4 | 32.1 |
| Receiving Antenna | Circle | r = 189 | 5 | 1.12 | 4131.9 | 33.5 |



Fig. 7 Experimental Result (Transmitting antenna 1 to Receiving antenna) 図 7 送信アンテナ1 (大きな円形)を用いた場合の伝送効率(上段:ギャップの変化,下段:位置ずれによる変化)



図8 送信アンテナ2(楕円形)を用いた場合の伝送効率(上段:ギャップの変化,下段:位置ずれによる変化)

図7に送信アンテナ1(大きな円形)から受信アンテナ, 図8に送信アンテナ2(楕円形)から受信アンテナへの電 力伝送の様子を示した。それぞれ,上段がエアギャップを変 化させた場合,下段が位置ずれを起こした場合のグラフを示 している。

図7,図8より大きさが異なるアンテナ間においても、電力伝送が可能である様子が確認できる。どちらの送信アンテナを用いた場合でも、ギャップ長150[mm]で伝送効率は70%程度である。一方、位置ずれに関しては非常にロバストであ

る。送信アンテナ1 (大きな円形)を用いた場合では約 300[mm],送信アンテナ2 (楕円形アンテナ)を用いた場合 では約450[mm]の位置ずれを許容できる。これは停止してい る EV への給電を考えると、十分な許容範囲を持つ。

このように、磁界共鳴型ヘリカルアンテナではアンテナの 物理的パラメータに関して自由度が高く、送信アンテナの大 きさを異なるものにすることにより、位置ずれに強いアンテ ナ構成を実現することができる。

3. 電気自動車向け非接触給電システムの設計法

〈3・1〉高効率化制御の必要性 前節では 13.56MHz で動作する電気自動車向け磁界共鳴型非接触電力伝送アン テナを設計した。しかしながら、ギャップや位置ずれの変化 によるアンテナの相対位置の変化により、アンテナ間の結合 係数が変化するため電力伝送効率が悪化する。従って、アン テナの相対位置の変化に左右されず常に高効率で電力を伝 送するためには、何らかの制御を行う必要がある。本章では、 等価回路を用いた検討から、アンテナ間の特性を補償し、高 効率の電力伝送を保つ方法としてマッチング回路を用いる ことを提案する。

〈3・2〉磁界共鳴型の等価回路 磁界共鳴型非接触電力伝送は、磁界の結合を表す相互インダクタンス Lm を用いて、図9のような等価回路で表される。



Fig。 9 Equivalent Circuit of magnetic resonance 図 9 磁界共鳴等価回路

R, *L*, *C* はそれぞれアンテナー素子の抵抗, インダクタン ス, キャパシタンスを表し, *Z*_Lは負荷のインピーダンス, *Z*₀ は電源の出力インピーダンスを表している。このとき, 電源 から見たアンテナの入力インピーダンスは次のように表さ れる。

| $R_{e}(7) = R_{\perp}$ | $(\omega L_m)^2 (R_L + R)$ | (2) |
|---|-------------------------------|-----|
| $\operatorname{Re}(\mathbb{Z}_{\mathbb{N}}) = \mathbb{N} +$ | $(R_L + R)^2 + (Z_R + X_L)^2$ | |
| | | |

$$\operatorname{Im}\{Z_{IN}\} = \frac{\left\{(R_L + R)^2 + (Z_R + X_L)^2 - (\omega L_m)^2\right\} Z_R - (\omega L_m)^2 X_L}{(R_L + R)^2 + (Z_L + X_L)^2} \dots \dots (3)$$

ただし,

としている。アンテナの自己共振周波数においては $Z_{\rm R}=0$ として、 $Z_{\rm IN}$ は次のようになる。

$$Z_{IN},_{\omega=\omega_r} = \frac{(\omega L_m)^2}{R_L^2 + X_L^2} (R_L - jX_L) \cdots (5)$$

相互インダクタンス Lm はアンテナ間の結合の強さを表 し、アンテナ間の相対位置により決まる。従って、ギャップ や位置ずれの変化は電源から見れば、アンテナの入力インピ ーダンスの変化として現れることになる。また同様に負荷の 変動も、Z_{IN}の変化として現れることが分かる。

〈3·3〉マッチング回路を用いたシステム設計法 負荷で消費される電力は電源の内部インピーダンスとの関係により 決まる。負荷で消費される電力が最大となるのは、

$$Z_{\rm IN} = \overline{Z_0}$$
(6)

が満たされる時である。従って、常に高効率の伝送効率を実 現するシステム作成のためには、式(6)の状況を満たせばよ い。これには、インバータ電源を用いて電圧を調整すること により式(6)を仮想的に実現する方法が考えられるが、 13.56MHz ではインバータを直接制御することはスイッチン グ周波数の面からみて難しい。従って、外部 LC 回路を用い たマッチング回路を挿入することにより、式(6)を実現するこ とが適当である。



Fig. 10 Wireless Power Transfer System for EV with Matching Circuit

図10 マッチング回路を用いた給電システム

4. まとめ

本稿は,磁界共鳴を用いた電気自動車向け非接触給電シス テムに関するものである。

まず,アンテナ設計に関してヘリカルアンテナを用いて MHz帯で動作するアンテナを設計・製作した。磁界共鳴型へ リカルアンテナでは,アンテナの大きさが異なる場合におい ても自己共振周波数が同じであれば電力伝送が可能である。 この特徴を生かし,送信側に大きなアンテナを用いること で,位置ずれを許容できるアンテナ構成を実現することがで きる。

次に,等価回路を用いた検討から,MHzのシステムの設計 法について述べた。磁界共鳴型非接触電力伝送では,アンテ ナな相対位置の変化により相互インダクタンスが変化し,伝 送効率が悪化する。これを補償するため,外部マッチング回 路を挿入したシステムを考案した。

今後はインバータ電源を用いて,実際に自動車へ給電可能 なシステムを製作する予定である。

献

文

- A. Kurs et al: "Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances", Science Magazine, Vol. 317, No. 5834, pp. 83-86, 2007.
- (2) 橋口宜明他:「磁界共鳴型ワイヤレス給電用中継デバイスの開発」,通 信講演論文集1, pp.25,電子情報通信学会総合大会,2010
- (3) 柏木一平他:「第3のコイルを用いた磁界共鳴型無線電力伝送の効率 改善」,通信講演論文集1,pp.31,電子情報通信学会総合大会,2010
- (4) Y. Hori, Y. Toyoda, Y. Tsuruoka: "Traction Control of electric Vehicle: Basic Experimental Results Using the Test EV –UOT Electric March-", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 34, No. 5, pp. 1131-1138, 1998.
- (5) 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.
- (6) 居村岳広,内田利之,堀洋一:「共振による磁界結合を利用した非接触電力伝送 3 次元的な位置ずれに柔軟な近傍界用アンテナ-」,ITS シンポジウム,2008,12