

中継器による走行中ワイヤレス給電の 相互結合を考慮した等価回路解析

加藤 昌樹 居村 岳広 堀 洋一

東京大学新領域創成科学研究科 〒 277-8561 千葉県柏市柏の葉 5-1-5

E-mail: {kato@hori, imura@hori, hori}.k.u-tokyo.ac.jp

あらまし 現在の電気自動車はバッテリー性能に起因する航続距離の短さが問題となっているが、走行中の電気自動車へワイヤレスでの電力伝送が可能となれば小容量のバッテリーでも長距離・長時間の走行が可能となる。その実現のためには給電区間の長距離化が必要となるが、中継器を用いた走行中給電用アンテナは伝送効率、コスト面で有望である。本論文では磁界共振結合を用いた走行中の電気自動車へのワイヤレス給電において、地上側アンテナの数が変化した場合の負荷位置と効率の周波数特性、3つ以上のアンテナが相互結合したクロスカップリングの状態についての等価回路を用いた解析を行う。

キーワード 磁界共振結合, クロスカップリング, 中継アンテナ, 不感区間

Equivalent Circuit Analysis of Repeater Arrangement considering Cross Coupling for Wireless Power Transfer

Masaki KATO Takehiro IMURA and Yoichi HORI

Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa-shi, Chiba, 277-8561
Japan

E-mail: {kato@hori, imura@hori, hori}.k.u-tokyo.ac.jp

Abstract Present Electric Vehicle (EV) has short driving range due to small battery capacity. If EV can be charged wirelessly while moving, the driving range can be extended without increasing the battery capacity. In order to realize charging while moving system, the supplying zone should be long enough. Therefore, repeater antennas are used for a cost effective and high efficiency charging system. In this paper, wireless power transfer via magnetic resonant coupling for moving EV is analyzed using equivalent circuit. Changing impedance and changing efficiency viewing from ground side antennas, dead zones where high efficiency is not possible and cross coupling in between 3 or more antennas are discussed.

Keyword Magnetic Resonant Coupling, Cross Coupling, Repeater Antenna, Dead Zone

1. はじめに

現在、電気自動車(Electric Vehicle:EV)が普及の兆しを見せているが、EVには一充電走行距離が短いという問題がある。そこで充電方法がケーブル接続によるものからワイヤレスによるものとなれば、駐車場や赤信号停止中に無意識に頻繁に給電することが可能となり、さらに走行中のEVへのワイヤレス給電が可能になれば長時間の連続航行が可能となり、バッテリーを大容量・高性能化せずに疑似的に航続距離を伸ばすことが可能となる。長い伝送距離と高効率を両立させるワイヤレス給電方式として電磁界共振結合方式があげられる。この方式は2006年にMITより発表され[1]、電界または磁界の共振現象により電力をワイヤレスで負荷に送ることができる。磁界を使用する磁界共振結

合方式は人体への安全面等で有利である[2]。

磁界共振結合による電力伝送は磁界共振結合用アンテナによって行われるが、走行中車両へのワイヤレス給電を考えた場合、1組の通常の形状の送電アンテナでは給電可能区間が短くなってしまふ。そこで中継器(中継アンテナ)を車両進行方向に並べ、給電区間を長くする方法が考えられている。過去の研究では地上側アンテナの個数を決め、限定された条件下で解析を行っていた[4][5][6]。本論文では、磁界共振結合を用いた走行中の電気自動車へのワイヤレス給電において、まず中継アンテナを用いた走行中給電アンテナの負荷位置と効率の特性を解析し、地上側アンテナの個数が変化した場合の負荷位置と効率の周波数特性を解析する。次に、伝送周波数をアンテナの自己共振周波数と同一とした場合のクロスカップリング有無の場合

の効率と入力インピーダンスの変化を明らかにすることにより、クロスカップリングがある場合の回路的な状態について考察する。このことにより、走行中ワイヤレス給電における問題点について明らかにするものである。

2. 磁界共振結合と走行中ワイヤレス給電

走行中ワイヤレス給電を考えた場合、車両は高速で移動するため通常の形状の送受電アンテナでは給電区間が短くなり短距離短時間の給電のみになってしまう。そのため、何らかの方法で給電区間を長くする必要はあるが、送電アンテナと受電アンテナ間の伝送距離を伸ばす方法として中継アンテナを給電アンテナと受電アンテナの間に挿入する方法がある[3]。この中継アンテナを道路に敷き詰めることで給電区間を長くできることが考えられる。この方法であれば、車両位置検出が不要であり、中継アンテナには配線が不要であるので埋設が容易となり施工コストが低く抑えられる。

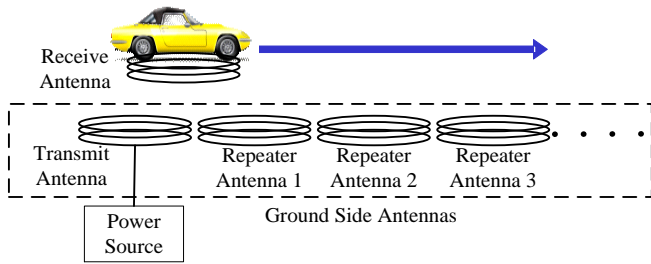


Fig. 1 中継アンテナによる走行中ワイヤレス給電

さらに中継アンテナを用いた走行中アンテナの等価回路について考える。道路側アンテナは Fig. 1 のように敷設され、その上を受電アンテナ搭載の EV が通過する形となる。この中継アンテナを用いた走行中給電の等価回路で表すと Fig. 2 のように表される。この図では、アンテナ総数は 5 個とする。Fig. 2 内の送電アンテナ内の V_s は電源電圧源の電圧、 I_s は電流、 L_s はアンテナコイルのインダクタンス、 C_s は共振用コンデンサの容量、 R_s は抵抗値であり損失を表す。また、中継アンテナ n 、受電アンテナ内の L_{Rn} 、 L_L 、 C_{Rn} 、 C_L 、 R_{Rn} 、 R_L 、 I_{Rn} 、 I_L も同様である。 R_{LOAD} は負荷抵抗値を表す。 M_{SR1} 、 M_{R12} 、 M_{R23} は地上側アンテナ同士の結合を表す。給電アンテナと中継アンテナで構成される地上側アンテナはそれぞれ隣り合うアンテナコイルと磁界によって結合している。2 つ隣のアンテナには遠方であることから結合しないものとする。これら地上側アンテナ同士の結合に関しては地上側アンテナ形状や位置関係で決まり、負荷の位置によって変化することはない。 M_{SL} 、 M_{R1L} 、 M_{R2L} 、 M_{R3L} は各地上側アンテナと受電アン

テナの相互インダクタンスを表す。これらは負荷位置 X によって変化する。

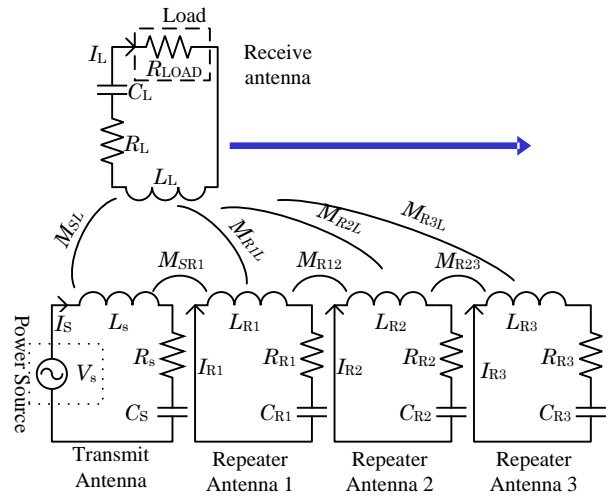


Fig. 2 走行中給電用アンテナの等価回路

これをもとに、アンテナ総数 5 個の場合の回路方程式を求める。この場合の回路方程式をインピーダンス行列で表すと式(1)で表される。ただし行列内の成分は式(2)~(13)で表される。

$$\begin{bmatrix} V_s \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & 0 & 0 & Z_{15} \\ Z_{12} & Z_{22} & Z_{23} & 0 & Z_{25} \\ 0 & Z_{23} & Z_{33} & Z_{34} & Z_{35} \\ 0 & 0 & Z_{34} & Z_{44} & Z_{45} \\ Z_{15} & Z_{25} & Z_{35} & Z_{45} & Z_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \\ I_{R1} \\ I_{R2} \\ I_{R3} \\ I_L \end{bmatrix} \dots\dots\dots (1)$$

$$Z_{11} = R_s + j \left(\omega L_s - \frac{1}{\omega C_s} \right) \dots\dots\dots (2)$$

$$Z_{22} = R_{R1} + j \left(\omega L_{R1} - \frac{1}{\omega C_{R1}} \right) \dots\dots\dots (3)$$

$$Z_{33} = R_{R2} + j \left(\omega L_{R2} - \frac{1}{\omega C_{R2}} \right) \dots\dots\dots (4)$$

$$Z_{44} = R_{R3} + j \left(\omega L_{R3} - \frac{1}{\omega C_{R3}} \right) \dots\dots\dots (5)$$

$$Z_{55} = R_L + R_{LOAD} + j \left(\omega L_L - \frac{1}{\omega C_L} \right) \dots\dots\dots (6)$$

$$Z_{12} = j\omega M_{SR1} \dots\dots\dots (7)$$

$$Z_{23} = j\omega M_{R12} \dots\dots\dots (8)$$

$$Z_{34} = j\omega M_{R23} \dots\dots\dots (9)$$

$$Z_{15} = j\omega M_{SL} \dots\dots\dots (10)$$

$$Z_{25} = j\omega M_{R1L} \dots\dots\dots (11)$$

$$Z_{35} = j\omega M_{R2L} \dots\dots\dots (12)$$

$$Z_{45} = j\omega M_{R3L} \dots\dots\dots (13)$$

次に式(1)を用いて、磁界共振結合の解析に必要な特性式を定義する．解析に使用する特性式は入出力の電力比 A_p (効率と同義) と電源からみた入力インピーダンス Z_{in1} である． A_p , Z_{in1} はそれぞれ式 (14) (15) で表される．

$$A_p = \frac{V_L \cdot \overline{I_L}}{V_S \cdot I_S} \dots\dots\dots (14)$$

$$Z_{in1} = \frac{V_S}{I_S} \dots\dots\dots (15)$$

3. 等価回路による解析

3.1. 解析の目的, 方法

次に前章で述べた走行中給電における等価回路を用いて受電アンテナの位置、つまり車両位置が変化した場合に効率等の特性がどのような特性の変化があるかを解析する．解析に用いる各定数は実験に使用しているアンテナ(Fig. 3) に近い数値を使用する．送電アンテナ、各中継アンテナ、受電アンテナそれぞれ同一形状であるとする．すなわち $L_S, L_{R1}, L_{R2}, L_{R3}, L_L$ は 800 uH, $C_S, C_{R1}, C_{R2}, C_{R3}, C_L$ は 2000pF, $R_S, R_{R1}, R_{R2}, R_{R3}, R_L$ は 1.2Ω とする．この場合の共振周波数(自己共振周波数) 125.82kHz である．負荷抵抗値 R_{LOAD} は 50Ω とする．



Fig. 3 解析のモデルとなる実験用アンテナ

次に相互インダクタンスについて述べる．まず、道路側アンテナの位置関係について、道路側アンテナは 40cm 間隔で等間隔に敷き詰められているものとする．また受電アンテナは道路側アンテナの上空 30cm の距離を Fig. 4 のように移動するものとする．受電アンテナ位置 X [cm] は送電アンテナ中心の上空を 0cm とする．

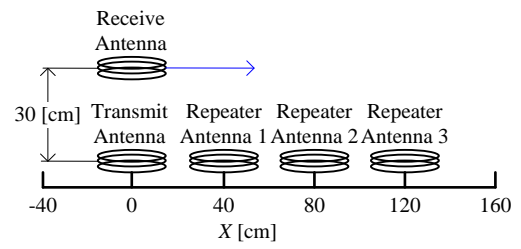


Fig. 4 解析における各アンテナの位置関係

道路側アンテナ間の相互インダクタンス $M_{SR1}, M_{R12}, M_{R23}$ に関してはそれぞれ 25uH とする．道路側アンテナと受電側アンテナの相互インダクタンスの値 ($M_{SL}, M_{R1L}, M_{R2L}, M_{R3L}$) について、これらは受電側アンテナの位置 X によって変化する値であり、位置と相互インダクタンスの関係を知る必要がある．そこで電磁界シミュレータを用い、先に述べたコイルと同等のモデルを作成し、位置が X 方向にずれた場合の相互インダクタンスの値を求め、その結果をもとに多項式による近似を行った．その結果を表すと、受電アンテナ位置 X と $M_{SL}, M_{R1L}, M_{R2L}, M_{R3L}$ の関係は Fig. 5 のグラフとなる．このグラフでは、 X によって複数の地上側アンテナを結合するクロスカップリングが生じる．クロスカップリングが生じてない状況についても解析を行うために、結合が最も強い地上側アンテナのみと結合する状況を模擬したグラフを Fig. 6 に示す．この状態においても解析を行い、クロスカップリングがある場合とない場合で比較を行う．

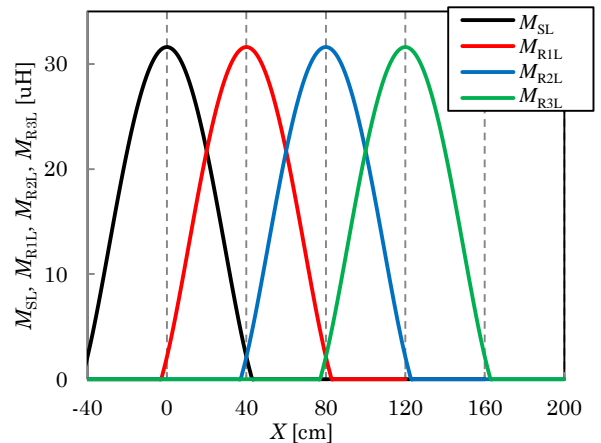


Fig. 5 地上側アンテナと受電アンテナ間の相互インダクタンス (クロスカップリングあり)

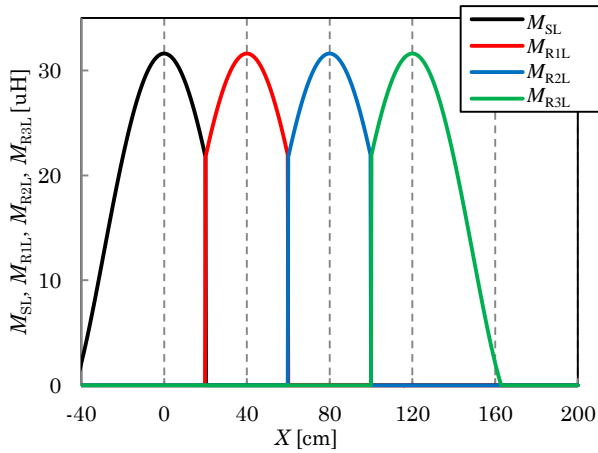
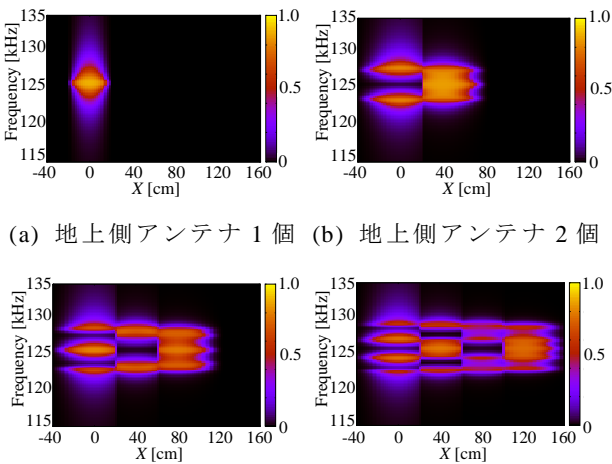


Fig. 6 地上側アンテナと受電アンテナの相互インダクタンス (クロスカップリングなし)

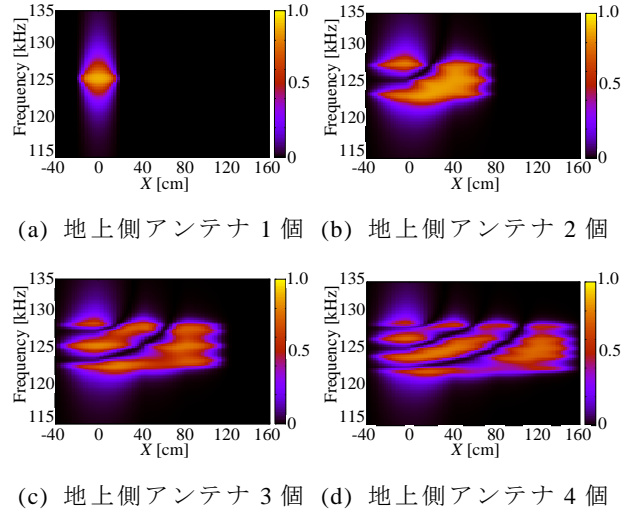
3.2. 解析結果

まずクロスカップリングがない場合の効率の周波数特性を Fig. 7 に示す. 地上側アンテナが 1 個の場合は, 受電アンテナ位置 X が 0cm となる位置が自己共振周波数 (125.82kHz) で最も高効率となっていることがわかる. 地上側アンテナが 2 個の場合は自己共振周波数において X が 0cm の点で効率が低く, 地上側アンテナ 2 個目上空となる X が 40cm の点で効率が高くなる. さらに地上側アンテナ 3 個の場合は 1 番目上空 ($X = 0$) と 3 番目上空 ($X = 80$) において高効率となり, 地上側アンテナ 4 個の場合は, 2 個目上空 ($X = 40$) と 4 個目上空 ($X = 120$) で高効率となる. 自己共振周波数以外にも高効率となる周波数があるが, X の変化とともにその高効率となる周波数が変化している. このように全給電区間にわたって高効率伝送な単一の周波数は存在しておらず, 伝送効率が悪化する不感区間が存在することがわかる. そしてその不感区間の位置はアンテナの数によって変化する.



(a) 地上側アンテナ 1 個 (b) 地上側アンテナ 2 個
(c) 地上側アンテナ 3 個 (d) 地上側アンテナ 4 個
Fig. 7 効率の周波数特性 (クロスカップリングなし)

次に, クロスカップリングがある場合効率の周波数特性を Fig. 8 に示す. これを見ると Fig.7 のクロスカップリングがない場合と比較し不感区間がはっきりしていない. これは隣り合う地上側アンテナの結合の影響を受けていることによる.



(a) 地上側アンテナ 1 個 (b) 地上側アンテナ 2 個
(c) 地上側アンテナ 3 個 (d) 地上側アンテナ 4 個
Fig. 8 効率の周波数特性 (クロスカップリングあり)

次にクロスカップリング有無の場合の特性の変化を比較する. クロスカップリングがある場合とない場合の自己共振周波数における効率と入力インピーダンスの位置特性をそれぞれ Fig. 9, 10 に示す. これらの図は地上側アンテナが 3 個の場合である. Fig. 9 をみると Fig.7 と同様にクロスカップリングがない場合は不感区間がはっきりしているのに対し, クロスカップリングがある場合は不感区間が少なく見え, 効率の面で優位のように見えるが, Fig. 10 の入力インピーダンスをみると, クロスカップリングが無い場合に発生していないリアクタンス成分が発生しており, 力率が低下していることがわかる.

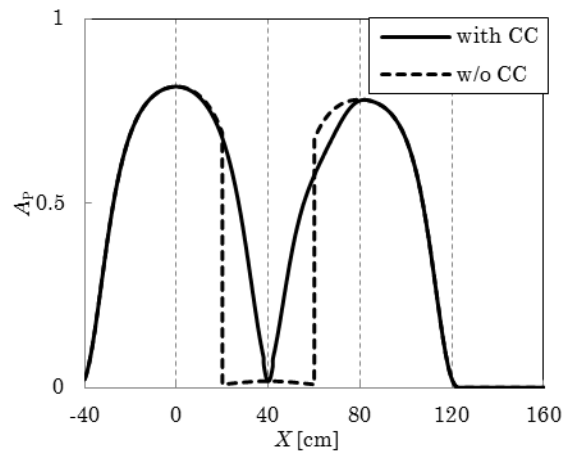


Fig. 9 自己共振周波数における効率の位置特性

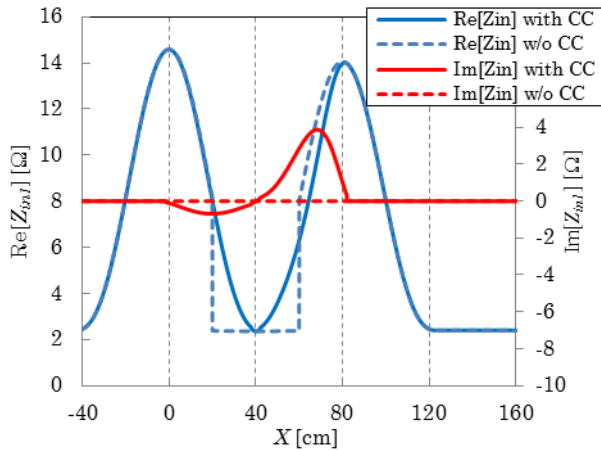


Fig. 10 自己共振周波数における入力インピーダンスの位置特性

4. まとめ

磁界共振結合における中継アンテナを用いた走行中ワイヤレス給電において地上側アンテナの数が増えた場合の負荷位置と効率の関係を、クロスカップリングがある場合とない場合で等価回路を用いて解析を行った。その結果、一定の負荷抵抗値において高効率給電ができない不感区間の位置は地上側アンテナの数によって変化し、いかなる負荷位置においても効率が最大となる単一の周波数は存在しないことがわかった。また入力インピーダンスについても比較し、クロスカップリングにより入力インピーダンスにリアクタンス成分が発生することがわかり、力率改善のために何らかの対策が必要であることがわかった。今後、走行中給電の実現の為、不感区間の低減とクロスカップリングの影響による力率低下の改善を行う。

文 献

- [1] Andre Kurs, Aristeidis Karalis, Robert Moffatt, J. D. Joannopoulos, Peter Fisher, Marin Soljačić: "Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances", Science, Express, Vol.317, No.5834, pp.83-86, 7 June 2007
- [2] 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.
- [3] 居村岳広: "磁界共振結合のワイヤレス電力伝送における中継アンテナの等価回路化", 電学論D, Vol. 131, No. 12, pp.1373-1382 (2011)
- [4] 加藤昌樹, 居村岳広, 堀洋一: "走行中ワイヤレス給電用アンテナに関する受電位置と効率に関する検討", 電気学会産業応用部門大会, 2012.8
- [5] Jin Wook Kim, Hyeon-Chang Son, Do-Hyeon Kim, Jong-Ryul Yang, Kwan-Ho Kim, Ki-Min Lee, Young-Jin Park: "Wireless power transfer for free positioning using compact planar multiple

self-resonators", Microwave Workshop Series on Innovative Wireless Power Transmission: Technologies, Systems, and Applications (IMWS), 2012.3

- [6] 三輪圭史, 金田純弥, 菊間信良, 平山裕, 榊原久二男: "磁界共振結合を利用した無線電力伝送における送信コイルのアレー化に関する一検討", 信学技報 WPT2012-09, 2012.7