

中継アンテナを用いた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

学生員 加藤 昌樹^{*a)} 正員 居村 岳広^{*} 上級会員 堀 洋一^{*} (東京大学)

Study about Relation of Efficiency between Receiving Antenna Position and Efficiency for Wireless Power Transfer for Moving Vehicle with Relay Antenna

Masaki Kato^{*a)}, Student Member, Takehiro Imura^{*}, Member, Yoichi Hori^{*}, Senior member,

Recently, wireless power transfer technology has been gaining more attention. By using wireless power transfer system, charging process of electric vehicle becomes safer and more convenient. In case of wireless power transfer system for moving pick-ups, it is necessary to extend transmission distance. One simple method is by equipping "relay antenna" on the road side. In this paper, the characteristics of wireless power transfer for moving pick-ups using relay antenna is analyzed by electromagnetic field simulator. The simulation result, regarding change in transmission efficiency when receiving antenna position and number of relay antenna are varied, is presented.

キーワード : ワイヤレス給電, 磁界共振結合, 走行中給電, 中継アンテナ

Keywords : WirelessPower Transfer, Magnetic Resonance coupling, charging under moving, relay antenna

1. 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にはバッテリー性能に起因する一充電走行距離が短いという問題がある。充電方法がケーブル接続によるものからワイヤレスとなれば, 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, 車重やコストを犠牲にして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になる。さらに, 停車中だけでなく走行中の車両への給電が可能になれば, 高速道路など長距離を停車せず走行する場合においても充電が可能となり, 長時間の連続航行が可能になる。走行中のEVに給電するという試みは各研究機関で行われているが[1], 電磁誘導方式を用いたものは大きい伝送距離と高い効率との両立が難しい。これを満たす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[2][3], 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。この技術を走行中のEVへの給電に応用することにより高い効率で電力伝送が行えると考えられる。

走行中車両へのワイヤレス給電を考えた場合, 何らかの方法で給電区間を長くする必要があるが, 「中継アンテナ」と呼ばれるもの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(Fig. 1)。従来の研究では, この中継アンテナに関して等価回路を明らかにし, 使用用途に応じて中継アンテナの位置や向きを変化させて, 電磁界シミュレーション, 等価回路による解析, 実験とそれぞれ比較を行っている[4][5][6]。しかし中継アンテナを走行中給電用に配置し受電アンテナ位置が変化した場合の特性の変化に関する議論がなく, さらにSパラメータによって解析を行っており, 反射波によって定在波が発生し反射波が電源インピーダンスによって消費され損失となる前提での議論となっている。実際にはアンテナのワイヤ長が波長より十分短ければ, 集中定数として扱うことができる。

そこで本論文では, 中継コイルを用いた走行中ワイヤレス給電用アンテナの車両位置が変化した場合の伝送効率の変化を, 電磁界シミュレータで求めたパラメータを使用し, 等価回路から回路シミュレータにより解析を行い, 車両位置によって効率がどのような変化を見せるかを報告する。

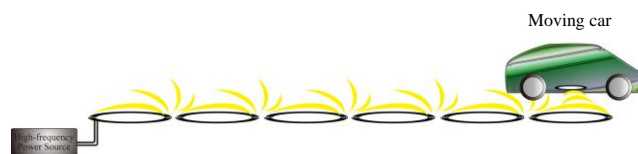


Fig. 1 Wireless power transfer for moving car

2. 磁界共振結合の中継アンテナの等価回路

磁界共振結合は、送信アンテナ側と受信アンテナ側双方に共振器を持たせ、その共振によって発生する磁界を利用し電力を効率よく伝送する。磁界共振結合の方式は LC 共振器の接続方法別に各種あるが、送受信アンテナ双方ともコイルとコンデンサを直列に接続する「SS 型」が従来から良く研究されており等価回路も明らかである。中継アンテナがない場合の等価回路は fig.2 で表され、 L_1, L_2 は送受信アンテナそれぞれのコイル部分のインダクタンス、 C_1, C_2 はそれぞれのコイルに直列に接続されているコンデンサ、 R_1, R_2 はそれぞれのアンテナの損失、 L_m は相互インダクタンスであり、エアギャップと深い関係がある値である。共振結合という性質上、送信アンテナと受信アンテナの共振周波数が同じ、つまり式(1)を満たしている必要がある。

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}} \dots\dots\dots (1)$$

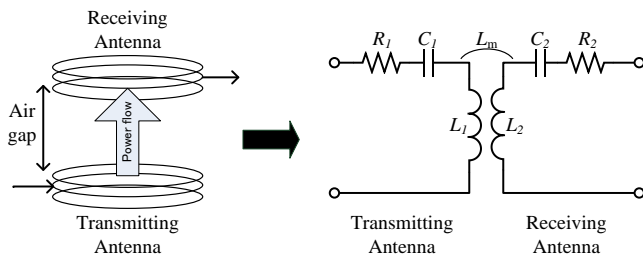


fig. 2 equivalent circuit for SS topology

中継アンテナを用いた走行中給電アンテナの等価回路は Fig. 3 で表される。 V_1 は電源、 L_1, C_1, R_1 は給電アンテナにかかわるパラメータであり、 L_R, C_R, R_R は受電アンテナにかかわるパラメータである。 R_L は負荷抵抗値である。 $L_2, L_3, \dots, L_n, C_2, C_3, \dots, C_n, R_2, R_3, \dots, R_n$ は中継アンテナにかかわるパラメータである。 $k_{12}, k_{23}, \dots, k_{(n-1)n}$ は中継コイル間の結合係数である。中継アンテナは隣の中継アンテナと結合すると考え、2つ隣との中継アンテナとは距離が離れているのが一般的なので結合していないと考える。 $k_{1R}, k_{2R}, \dots, k_{nR}$ は送電アンテナまたは中継アンテナと受電アンテナ間の結合係数であり、走行し車両位置が変化するに従い、それぞれ変化する値である。

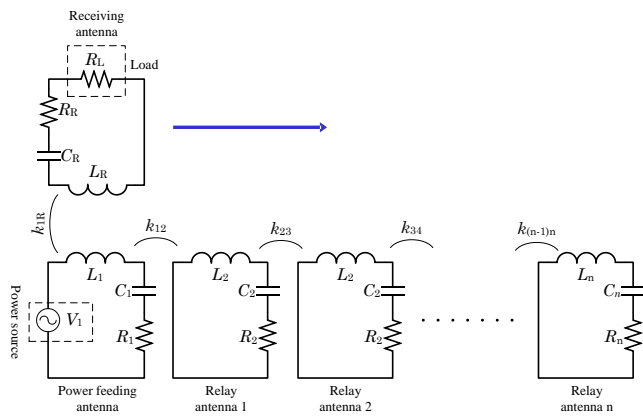


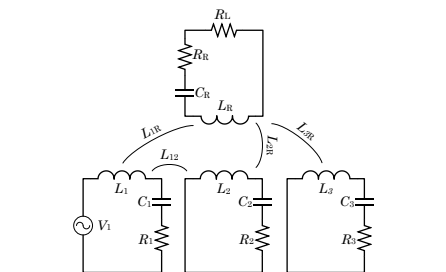
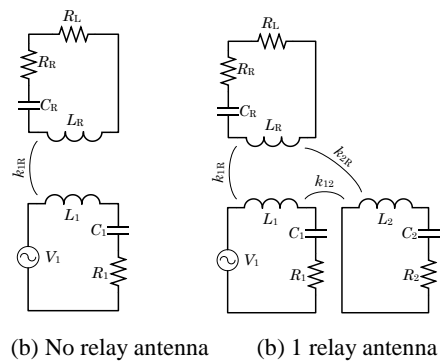
Fig. 3 Equivalent circuit of relay antenna

3. 数値解析による車両位置と効率の関係

3.1 シミュレーション目的と方法

次に前述の走行中給電の等価回路を用いて、負荷側アンテナの位置によって、特性にどのような変化が起こるかを等価回路をもとに、回路シミュレータを用いて求める。

今回は中継アンテナがない場合、中継アンテナが 1 個の場合と 2 個の場合において、それぞれ入出力電力比 A_p を求める。入出力電力比は入力される電力と出力される電力の比であるため、効率と同義である。中継アンテナがない場合、中継アンテナ 1 個の場合と 2 個の場合の等価回路はそれぞれ Fig. 4 (a), (b) で表される。シミュレーション条件として、 $V_1=1[V]$, $L_1=L_2=799[\mu H]$, $C_1=C_2=C_3=2000[pF]$, $R_1=R_2=R_3=1[\Omega]$, $R_L=50[\Omega]$ とする。道路側アンテナに関する相互インダクタンスは $k_{1R}=k_{2R}=0.032$ とする。また、アンテナ位置と各相互インダクタンスについて、代表値を Table 1 に示す。これらの値は、電磁界シミュレータ上でコイル直径 40cm, 巻き数 30 ターンを作成し、エアギャップ 30cm として電磁界シミュレーションを行うことにより求めた。電源電圧 V_1 は上記の値としたが、等価回路は線形であり今回求めるのは A_p であり V_1 によって変化しない値であるため任意の値で問題ない。位置 x に関しては、送信アンテナの直上に受電アンテナがある位置を $x=0$ とした。また、受電アンテナ位置 x と中継アンテナとの位置関係を fig. 5 に示す。



(c) 2 relay antenna
Fig. 4 equivalent circuit for simulation

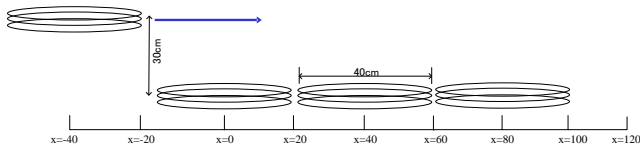


Fig. 5 relation of antenna phase and position

Table 1 for simulation

| Position | 1 relay antenna | | | 2 relay antennas | | |
|----------|------------------|----------|----------|------------------|----------|----------|
| | No relay antenna | k_{1R} | k_{2R} | k_{1R} | k_{2R} | k_{3R} |
| x [cm] | k_{JR} | k_{1R} | k_{2R} | k_{1R} | k_{2R} | k_{3R} |
| -40 | 0.0033 | 0.0033 | 0 | 0.0033 | 0 | 0 |
| -20 | 0.0273 | 0.0273 | 0 | 0.0273 | 0 | 0 |
| 0 | 0.0363 | 0.0363 | 0.0033 | 0.0363 | 0.0033 | 0 |
| 20 | 0.0273 | 0.0273 | 0.0273 | 0.0273 | 0.0273 | 0 |
| 40 | 0.0033 | 0.0033 | 0.0363 | 0.0033 | 0.0363 | 0.0033 |
| 60 | - | 0 | 0.0273 | 0 | 0.0273 | 0.0273 |
| 80 | - | 0 | 0.0033 | 0 | 0.0033 | 0.0363 |
| 100 | - | - | - | 0 | 0 | 0.0273 |
| 120 | - | - | - | 0 | 0 | 0.0033 |

3.2 シミュレーション結果

相互インダクタンスを変化させた場合の効率 AP の変化を Fig. 6 に示す。まず中継アンテナがない場合に関して、送電アンテナは $x=0$ の位置に設置しているため、ここが効率のピークとなる。次に中継アンテナが1つの場合をみると、 $x=40$ の位置に効率のピークがあるが、送電アンテナ上方の位置では高効率とはならない。これは、給電区間の伸ばすために中継アンテナを設置したにもかかわらず、給電区間が伸びていないことを表している。さらに、中継アンテナが2つの場合をみると、今度は送電アンテナと2つ目の中継アンテナの上方で効率のピークとなり、1個目の中継アンテナの上方では高効率とはならず、給電区間の位置によって効率が大きくなる点と小さくなる点があることがわかる。

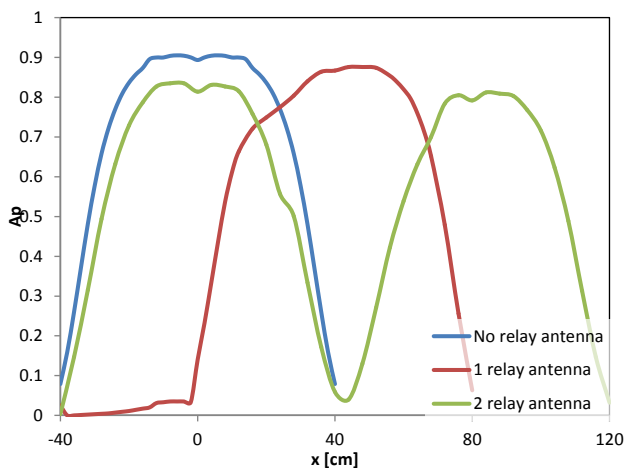
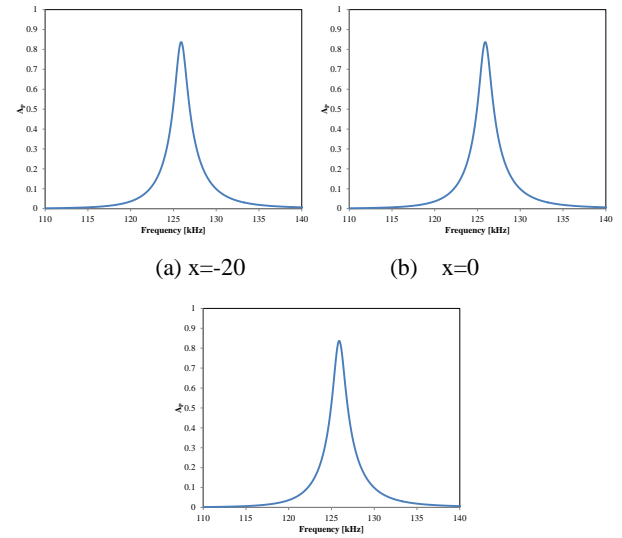


Fig. 6 Relation between receiving antenna and efficiency

さらに、主要な位置での効率の周波数特性を Fig. 7 に表す。まず、中継アンテナがない場合の周波数特性は、自己共振周波数である 125.9kHz を中心に一つのピークがあり、

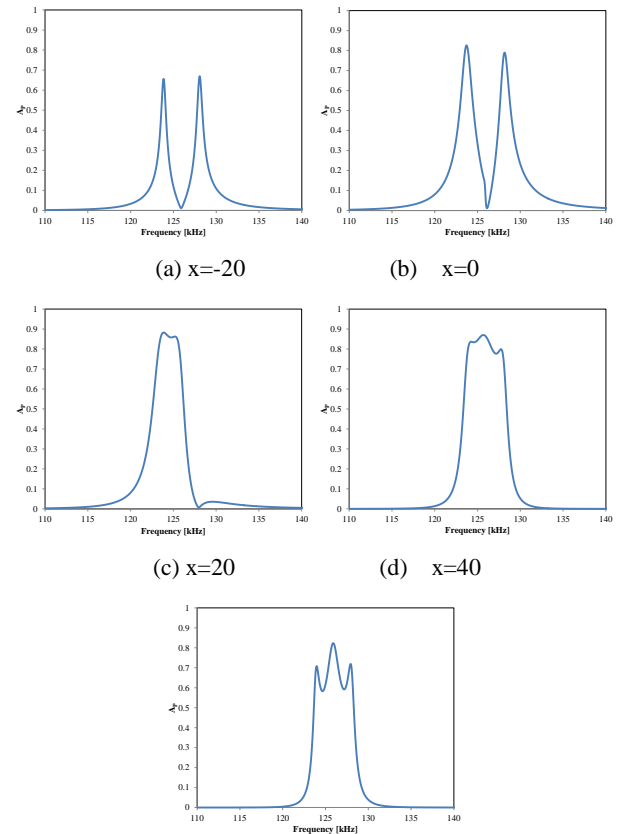
そのピークは送電アンテナと受電アンテナが正面に向き合っている $x=0$ の点でピークが高く、 x 方向にずれた場合ではピークが低くなる。



(c) $x=20$

Fig. 7 Frequency characteristics of without relay antenna

次に、中継アンテナが1つの場合の各位置での周波数特性について考える。Fig.8(a),(b)では、ピークが2つあるが、自己共振周波数ではピーク間の谷間になっている。Fig. 8(c), (d), (e)ではピークが1つないし3つあり、いずれも自己共振周波数では高い効率を示している。



(e) $x=60$

Fig. 8 Frequency characteristics of 1 relay antenna

さらに、中継アンテナが2つの場合の周波数特性をみると、Fig. 9(a), (b), (f), (g)ではピークが3つあり、自己共振周波数での効率が低い、(c), (d), (e)では自己共振周波数での効率が低くなる。このように、中継アンテナが存在する場合には周波数特性に変化が生じ、中継アンテナを利用した走行中ワイヤレス給電では、給電区間すべてで高効率となるとは限らない。

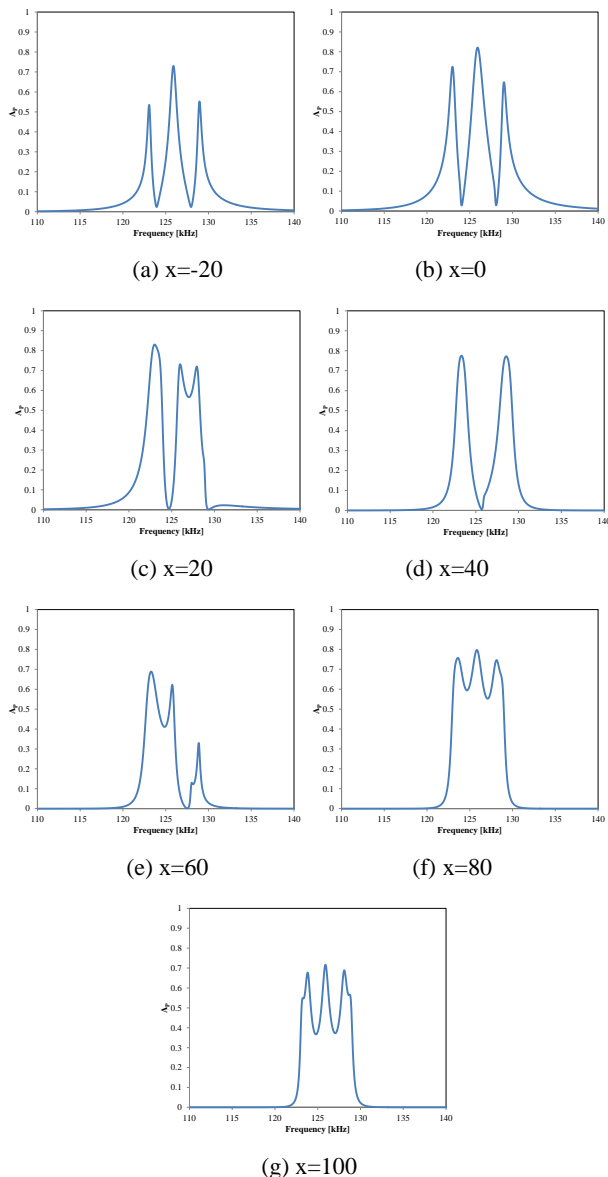


Fig. 9 Frequency characteristics of 2 relay antenna

4. まとめと今後

中継アンテナを用いた走行中ワイヤレス給電について、等価回路と電磁界シミュレータで得られたパラメータから、中継アンテナがない場合、中継アンテナが1つないし2つある場合に関して、効率に関する回路シミュレーションで解析を行った。従来の中継アンテナがない場合は、いかなる受電アンテナ位置においても自己共振周波数が効率のピークとなっていたが、中継アンテナがある場合は、受

電アンテナ位置によっては自己共振周波数で効率がピークにならないことがあることを発見した。また、中継コイル1個の場合と2個の場合について比較を行い、それぞれ効率が低下する位置の違いがあることが分かった。そのため、中継アンテナによる走行中ワイヤレス給電を行う場合、電力伝送周波数として従来考えられていた自己共振周波数による方法では高効率電力伝送は不可能で、車両位置によって電力伝送周波数を変化させたり、アンテナ形状や配置方法を変化させる等の何らかの工夫が必要であることがわかった。

今後、本現象の原因を解明するために、電磁界シミュレーションでの解析や実験を行う。また伝送距離や中継アンテナの間隔を変化させる等を行い、がある。また伝送距離が変化した場合や負荷抵抗値が変化した場合の特性の変化の解析を行い、いかなる車両位置や負荷の条件においても給電区間で効率が最大となるような方法を考案する必要がある。

文 献

- [1] Jin Huh, Chun-Teak Rim: "KAIST Wireless Electric Vehicles - OLEV", EVTEC'11, 2009
- [2] Andre Kurs, Aristeidis Karalis, Robert Moffatt, J. D. Joannopoulos, Peter Fisher, Marin Soljacic, "Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances", Science, Express, Vol. 317, No. 5834, pp. 83-86, 7 June 2007
- [3] Aristeidis Karalis, J.D. Joannopoulos and Marin Soljacic, "Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer," Annals of Physics, Volume 323, Issue 1, January 2008, Pages 34-48, January Special Issue 2008.
- [4] 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).
- [5] 橋口他: "磁界共鳴型ワイヤレス給電用中継デバイスの開発", ISICE 総合大会, B-1-25, 2010.03
- [6] 三輪他: "磁界共振結合共振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", ISICE 総合大会, B-1-4, 2012.03