

電界共振結合型ワイヤレス電力伝送システム

増田 満 楠 正弘 小原 大輝

中山 裕次郎 濱田 浩樹 根上 昭一

古河電気工業株式会社自動車電装技術研究所高周波センター

〒254-0016 神奈川県平塚市東八幡 5-1-9

E-mail: masuda@ie.inf.furukawa.co.jp,

あらまし 平面電極とコイルを用いて電界によってワイヤレスで電力を伝送する研究を行っている。電界を用いた無線電力伝送は 空気中の絶縁破壊電圧の制限を受けるために、極近傍領域での電力を給電するシステムの検討が行われてきた。本論文では送受電距離 200mmにおいて給電効率 90%以上の電力伝送が可能であることを実証した。また大きな電力レベルの伝送を行い 838 (W) の電力が給電できることを実験により確認した。更に送電と受電間の位置ズレが生じても方向によっては磁界方式より広い指向性を示すことを示した。

キーワード 電界共振結合 ワイヤレス電力伝送

Wireless Power Transfer via Electric Coupling

Mitsuru MASUDA Masahiro KUSUNOKI and Daiki OBARA

Yujiro NAKAYAMA Hiroki HAMADA Shoichi NEGAMI

Furukawa Electric.co.,Ltd 5-1-9 Higashiyawata, Hiratsuka-shi, Kanagawa, 254-0016 Japan

E-mail: masuda@ie.inf.furukawa.co.jp

Abstract This paper describes our research on wireless power transfer via electric coupling with planar electrodes and coils. Major researches of wireless power transfer using electric field are restricted to an area of almost no gap power transfer by the breakdown voltage of air. However, we have achieved long distance and high efficiency power transfer; the power transfer distance is 200 mm and the efficiency is over 90%. Moreover, we succeeded 838 W power transfer experiment. We discovered that the wireless power transfer using electric field has an advantage of that misalignment characteristic of one direction is better than using magnetic field and that it can make power transfer distance longer with repeaters.

Keyword Electric coupling, Wireless power Transfer

1. はじめに

無線で電力を給電する技術の研究が盛んである。磁界共鳴と命名された研究によって近距離のエネルギー伝送が可能であることが 2007 年に米国のマサチューセッツ工科大学で証明されたためである。この現象は電界でも成立する。しかし電界を用いた電力伝送は空気中の絶縁破壊強度の限界や人体が誘電体で構成されており、その電磁波での影響が懸念されるために、ご

く近傍領域で電力を供給する研究に留まっていた。

ISM 帯 (Industrial, Scientific and Medical Band) の周波数である 13.56MHz および 27.12MHz を用いて電界を主たるエネルギーとして Q 値の大きな共振回路で電力伝送すると、送受電間の距離を離れた状態でも電力伝送できると考えられる。このため送電と受電間の距離を離れた状態での電界を用いたワイヤレス電力伝送の実証行われていない。我々は LC 直列共振構造を用いて電界でも高効率な電力伝送が可能であることを電

磁界シミュレーションによって示し、大きな電力を給電できることを実証したので以下に報告する。

2. 電界を利用したワイヤレス電力伝送

2.1. 構成検討

電界によるワイヤレス給電は空気中の絶縁破壊電圧で制限される。一方磁界によるワイヤレス電力伝送は放電に相当する現象は無いため、非常に大きなエネルギーが電力伝送できると考えられている。電界と磁界のエネルギー給電量の許容値は9桁以上の差があるためである。更に送電と受電間の電極距離が離れると静電容量が減少するため電力給電に不利になる状況が生じると考えられている。そこで我々は磁界型と電界側の比較検討を行った。磁界共振結合方式のブロック図は図-1で示され、電界共振結合のブロック図は図-2で示すことができる。図-1においてL1は給電コイルのインダクタンス、L2は受電コイルのインダクタンスであり、C1、C2は送電および受電用の共振コンデンサである。Lmは磁界共振結合における結合インダクタンスである。図-2においてC1は送電側のキャパシタンスであり、C2は受電側のキャパシタンスでありCmは電界共振結合における結合容量である。角周波数を ω とすると、磁界共振結合においては、 $\omega(L1-Lm)$ と $\omega \times Lm$ の比が出力となり、電界共振結合においては $\omega \times L1$ と $1/\omega(C1-Cm)$ の比が出力となる。つまりC1とCmの差が小さければ電界でも高効率に電力伝送できると考えた。

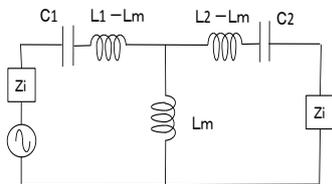


図1 磁界共振結合方式ブロック図

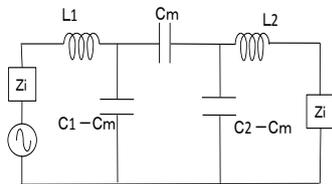


図2 電界共振結合方式ブロック図

平板電極にL1およびL2を外付けコイルとすれば直列共振型の電力伝送システムが構成される。L1およびL2を $5\mu H$ 、C1及びC2を $7pF$ 、Cmを $0.8pF$ としたときの伝送効率特性をSPICE系の回路シミュレータにより求めた。結果を図3に示す。この構成で伝送効率80%以上が達成できることが判明した。

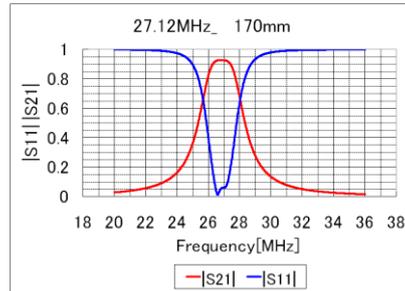


図4 伝送距離 170mmでの効率計算

2.2. 構造検討

ミアンダラインによる電界共振結合ワイヤレス電力伝送が報告されている。この方式では13.56MHzや27.12MHzという周波数では線路長が長くなり、この部分での損失が生じてしまう高効率な給電は困難であると考えた。この損失を改善するため、我々は平板電極と直列共振コイルを用いて図5に示すような構造を単純化したワイヤレス給電カプラを検討した。カプラ部の各パラメータは回路シミュレータで用いた値になるように設計を行なった。

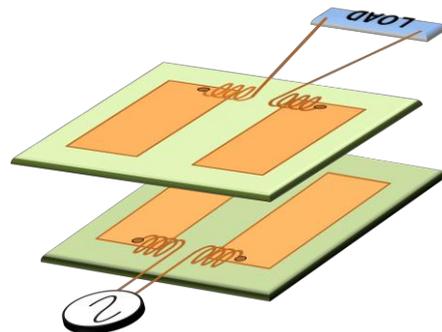


図5 電界共振結合型ワイヤレス電力伝送カプラ

次にFRAD社のモーメント法電磁界シミュレータFEKOを用いて送受電間距離400mmにおけるシミュレーションを行った。結果を図6～図7に示す。

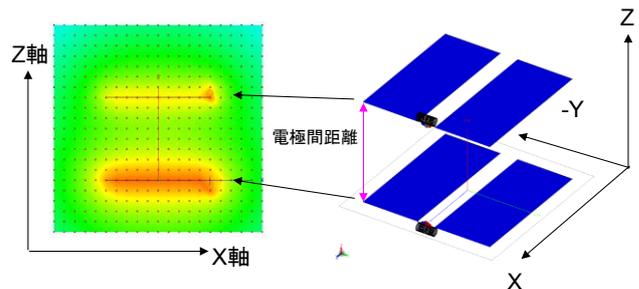


図6 シミュレーション結果

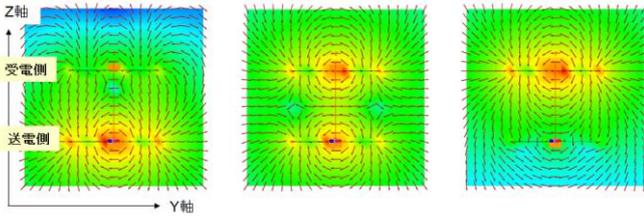


図7 送電側から受電側へのエネルギー伝送状態

図の下側が送電側であり、図の上側が受電側である。送電側のエネルギーが受電側に伝わる模様を示した。

このワイヤレス電力伝送カプラを設計する上で重要なパラメータがk値およびQ値である。

電界共振結合型ワイヤレス給電カプラのk値およびQ値は以下のように決定される。

$$Q \text{ 値 } Q = \omega \cdot L_i / R_i$$

L_i : 外付けコイルのインダクタンス

R_i : 外付けコイルのレジスタンス

$$k \text{ 値 } k = C_m / ((C_1 \times C_2)^{0.5})$$

C_i : 送電および受電各カプラのキャパシタンス

C_m : 送受電間の相互キャパシタンス

k値およびQ値の向上には以下の方法が有効である。

Q値の向上

負荷コイルの高周波でのレジスタンス成分を低減させる。

k値の向上

電気力線のカップリング量を増やす。具体的には同一平面電極間のギャップを小さくする。もしくは横幅(W)を C_m に比べて大きくすることが有効である。

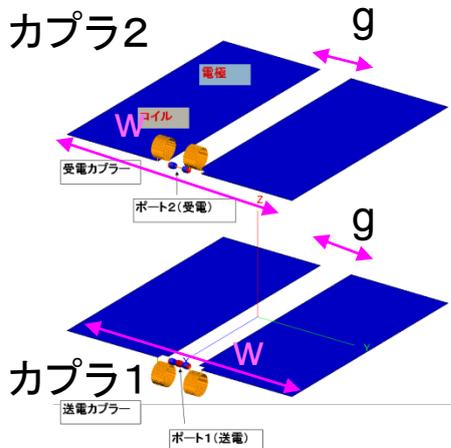


図8 k値およびQ値の向上検討

2.3. 位置ズレと電力伝送効率

送電と受電間のカプラが正対した状態からズレ場合の電力伝送効率変化を電磁界シミュレーションし、磁界共振型ワイヤレス電力伝送方式と比較した。比較に当たって磁界発生コイルの面積と電極面積を同一として比較した。シミュレーション結果を図9に示す。電界型は電界の向きによっては磁界型より広い特性を示す。

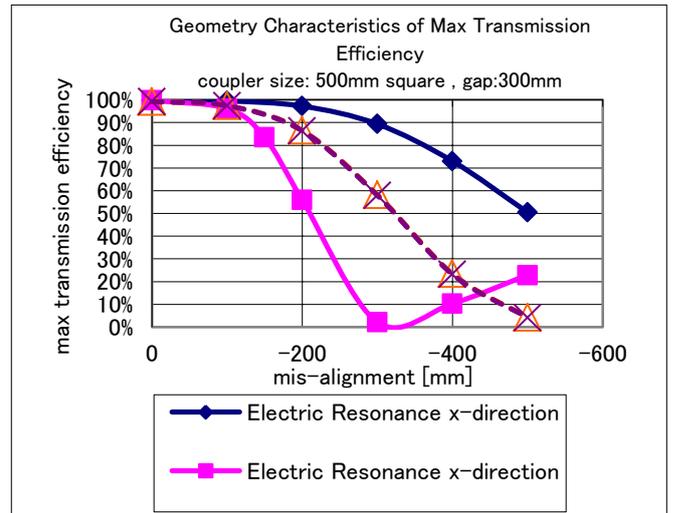


図9 位置ズレ特性と電力伝送効率

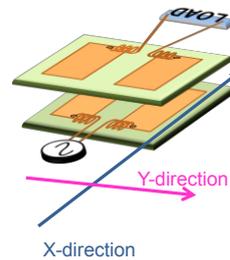


図10 カプラの位置ズレ方向

2.4. 電界共振結合方式カプラ特性

電磁界シミュレーションで得られた結果を基にワイヤレス給電カプラを試作した。カプラの電極サイズは 110mm×480mm の2枚の電極を間隔 35mm 離してFR4基板上に配置した。そして 13.56MHzにて共振するようにコイルのインダクタンスを調整し直列に2個のコイルを接続した。受電側及び送電側は同一の構造である。カプラの概観図を図11に示す。



図 11 カプラ概観図

またカプラの入カインピーダンスは 50Ω で整合が取れる設計した。このカプラの送電と受電間の距離を変化させて給電効率を測定した。測定にはネットワークアナライザを用い S21 から給電効率を算出した。さらに同じ ISM 帯である 27.12MHz で共振するコイルを付加し W および g を調整した。カプラの緒言を以下に示す。

カプラ外形サイズ $550 \times 380 \times 8$ (mm)

Q 値 : 275

$C_m : 0.625 \text{ pF}$ (at $d = 200 \text{ mm}$)

C : 12 pF

L : $6 \mu\text{H}$

なお上記のパラメータはネットワークアナライザの S パラメータより算出した値である。

3. 特性結果

図 11 に示すカプラの特性を測定した。結果を以下に示す。

3.1. 給電効率

送電と受電間の距離を変化させて、ネットワークアナライザにて電力伝送特性を測定した。距離を変化させるとカプラ間インピーダンスが変化するので、特性が双峰特性から単峰特性へと変化し、さらに距離を広げると単峰特性のまま電力伝送効率が低減していく。このため帯域内のレベルのピーク値をプロットしている。上記カプラでは送受電間距離 180 mm 程度で単峰特性となる。

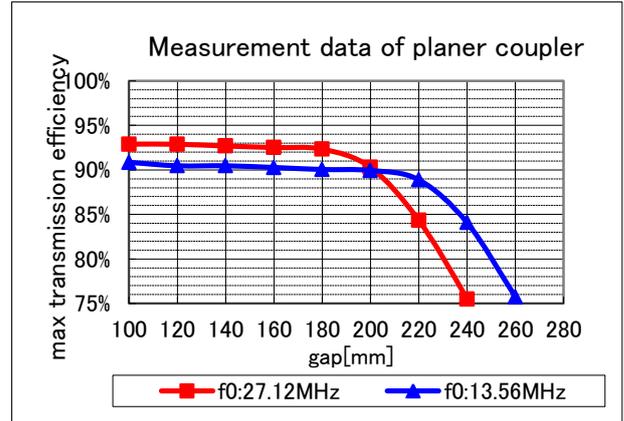


図 12 送受電間距離と給電効率

3.2. 電界強度測定

カプラ間距離 200 mm で固定し、小電力を給電した状態でカプラからの放射電界をバイコンカルアンテナ BBA9106 とバラン VHA9103 を用いて電界強度を測定した。RF 電源、カプラ、終端抵抗を地上高 1 m に設置し、アンテナ高 1 m でカプラとバイコンカルアンテナ間の距離を変化させた。結果を図 13 に示す。

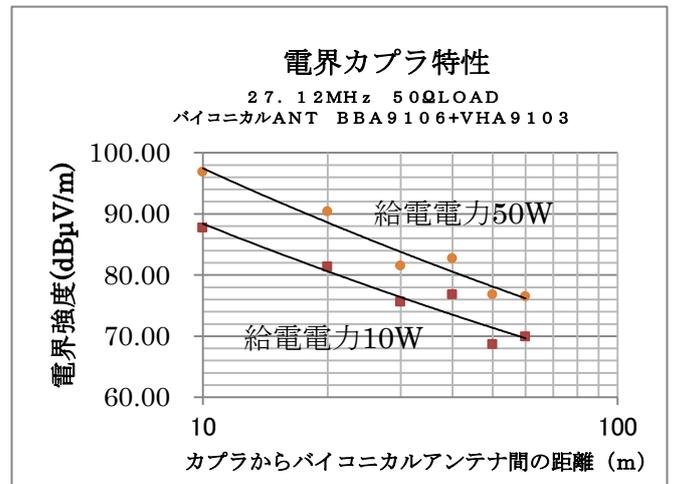


図 13 カプラからの電界強度

図 13 より現状の構造では非常に大きな電界が漏れていることが判る。使用している周波数が 27.12 MHz であるので、カプラからの距離が 1.76 m 以上では遠方界となる。電界強度が距離に反比例しているため、放射界の成分が大きいと考えられる。今後はこの放射電力低減に向けて構造の検討を進める予定である。

電力伝送

図 14 に示す測定系で給電電力を測定した。カプラ間を 200 mm としている。カプラは 50 Ω で整合している状態である。

給電電力 1000 W において終端抵抗前で 838 W の電力を検出している。ネットワークアナライザで測定した効率は 90 % であるので、発熱等に伴うコイルの膨張等で最適周波数のズレが生じている可能性がある。放熱構造を含め今後検討する予定である。

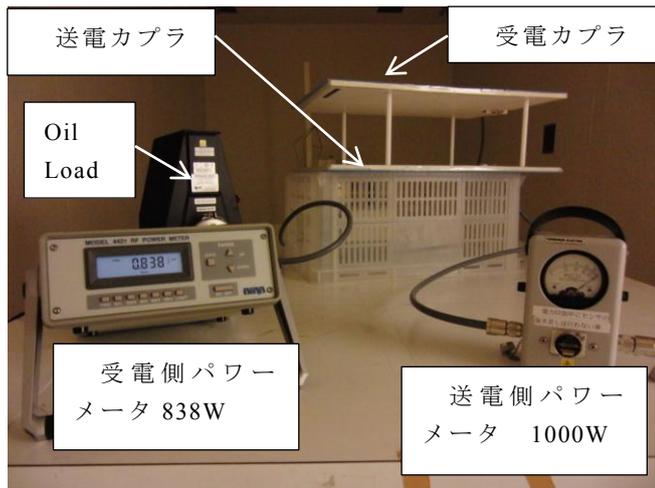


図 14 電力伝送実験系

4. まとめ

平面電極と平面コイルを用いて電界で高効率に電力伝送できることを実証した。小電力であれば距離 200 mm で効率は 90 % 以上が達成でき、1000 W の電力でも 80 % 以上の効率で電力を給電できることを実証した。今後は放射電界の低減に向けてカプラ構造を検討していく予定である。

文 献

- [1] 居村岳広, "等価回路から見た非接触電力伝送の磁界結合と電界結合に関する研究—共振時の電磁界結合を利用したワイヤレス電力伝送—"電気学会論文誌 D, Vol130, No1(2010), pp.84-92
- [2] 大平孝, "自動車タイヤを介するゼロギャップ走行中給電"信学技報, WPT2012-17
- [3] 原川健一, "電界結合・共振型ワイヤレス電力伝送技術-並列共振型電力伝送回路"信学技報, WPT2011-24
- [4] 小丸堯, "電界結合を用いた無線電力伝送における結合係数の位置特性評価"信学技報, WPT2013-15
- [5] 平山裕, "電磁界の観点から見た結合共振型無線電力伝送"信学技報, WPT2013-17
- [6] 常川光一, "独立型 WPT システムの動作原理解析とその特性"信学技報, AP2013-85 (2013-9)
- [7] 松木秀俊, 高橋俊英, ワイヤレス給電技術がわかる本, pp24, 榊オーム社, 2011.
- [8] 増田満, "電界共振結合電力伝送"2013 年信学ソサエティ大会 B-1-31