共振電界結合によるワイヤレス電力伝送

増田 満*, 楠 正弘*, 梅上 大勝**, 服部 文哉**, 山本 真義**

Wireless Power Transfer via Electric Field Resonance Coupling

Mitsuru MASUDA*, Masahiro KUSUNOKI*, Hirokatsu UMEGAMI**, Fumiya HATTORI**, and Masayoshi YAMAMOTO**

* 古河電気工業株式会社コア技術融合研究所 (〒220-0073 神奈川県横浜市西区岡野 2-4-3)

** 島根大学 (〒690-8504 島根県松江市西川津町 1060)

*FURUKAWA ELECTRIC CO, LTD (2-4-3, Okano, Nishiku, Yokohama, Kanagawa 220-0073)

**Shimane University (1060, Nishikawatsucho, Matsueshi, Shimane 693-8504)

1. はじめに

2007年に米国MITより発表された「磁界共鳴[†]」と命名された技術は、多くの人々に衝撃を与え無線電力伝送の研究が脚光を浴びている¹⁾。従来からの磁界を用いた電磁誘導[†]の研究も盛んであり製品化が進められている。また電界結合[†]を用いたワイヤレス電力伝送の研究も精力的に行われている^{2),3)}。磁界で共鳴を起こして近傍界のエネルギー伝送ができるのであれば、電界でもエネルギー伝送は可能であると考えられる^{4),5)}。われわれは共振構造を工夫して、電界でも共鳴してワイヤレス電力伝送を高効率に行うことができることを実証した⁶⁾。このLC直列共振構造の電界共鳴型ワイヤレス電力伝送構造をわれわれは共振電界結合または電界共振結合と呼んでいる⁷⁾。

2. 共振結合型ワイヤレス電力伝送

ワイヤレス電力伝送では磁界や電界また電磁界を用いてエネルギー伝送を行っている。磁界を使ったエネルギー伝送は電磁誘導として広く知られておりQi(チー)規格として、すでにスマートフォンなどで活用されている。送受電間が近接された距離において高効率に電力伝送が行えることが特徴である。また電磁界型は電磁波として無線通信において多くの研究がなされている分野であり、長距離の電力伝送が行える特長がある。このため宇宙空間から地表に向けて電力伝送を行うなどの壮大な研究がおこなわれている。

磁界と電界は密接な関係があり、電界も共鳴させることができれば同様な効果が期待できる。しかし電界型は磁界型に比較して調整パラメータが多く共振回路を成立させることは困難である。このため研究例は磁界型に比較して研究例が少ない。

ここで注意しなければならないことは、コイルを用いても磁界型や電界型とは単純には決まらない。コイルの先端が解放された形状(コイルが途中で切れている状態)ではアンテナと等価の働きをするので、電界型となる⁸⁾。開放

Fig. 1

されたコイルに、ある周波数で電力を印加すると先端部での電流はゼロとなり、電圧は最大となる。これは1/2波長アンテナに高周波電流を印加した状態と等価になるためである。このような形状をプリント配線板などの平面回路によっても構成することができる。配線パターンをジグザグに折り曲げてリアクタンス成分を持たせた構造をミアンダラインという。この構造を用いて電界共振[†]型のワイヤレス給電方式が検討されている⁹⁾。しかしジグザグパターンであるため、線路長が長くなるため、導体の抵抗成分が増加し損失が増大する。このため高効率な電力伝送を行うためには大きな電極面積が必要となる。

Fig. 1にわれわれが開発した共振結合ワイヤレス給電の模式図を示す。またTable 1に各ワイヤレス電力伝送方式の特性比較を示す。

3. 高周波化することの利点・欠点

ワイヤレス電力伝送で特性の決定するパラメータにQ値とk値がある。このQ値とk値の積をKQ積といいワイヤレス電力伝送の伝送効率を示す。Q値とは、コイルやコンデンサが蓄えられるエネルギーの先鋭度を示し、この値が高いほど高効率なエネルギー伝送が可能となる。k値は送電と

Table 1

Study Target					
	Magnetic field		Electric field		Electromagnetic field
	Induction	Resonance	Coupling	Resonance	Radiation
	Electromagnetic induction	Magnetic resonance	Capacitive coupling	Electric resonance	Radiation antenna
Features	<ul style="list-style-type: none"> Short distance Low frequency 	<ul style="list-style-type: none"> Middle distance Low frequency~ High frequency 	<ul style="list-style-type: none"> Short distance Low frequency~ High frequency 	<ul style="list-style-type: none"> Middle distance High frequency Thin & Light 	<ul style="list-style-type: none"> Long distance Ultra high frequency
Component	Inductor		Capacitor		Radiation antenna
Energy Source	Current		Voltage		Power
Power Transmission	$P_M = \frac{1}{2} L_m I^2 f$		$P_E = \frac{1}{2} C_m V^2 f$		$P_R = \left(\frac{\lambda}{4\pi D} \right)^2 G_T G_R P_T$
Field	Induction field (rotation field)		Electrostatic field (divergent field)		Radiation field
Propagation equation	$\text{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$ Faraday's Law	$\text{div} \mathbf{B} = 0$ Gauss's Law for magnetism	$\text{div} \mathbf{D} = \rho$ Gauss's Law for electric field		$\text{rot} \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$
Attenuation of Hertz dipole	$\frac{1}{r^3}$		$\frac{1}{r^3}$		$\frac{1}{r}$

受電間の結合度を示す。送受電間の距離が離れると k 値は低下する。一方 Q 値はワイヤレス給電に用いる電力の周波数を上昇させると上昇する。共鳴型の電力伝送で用いられる周波数が 6.78 MHz, 13.56 MHz, 27.12 MHz 帯の ISM 帯（工業，科学，医学用周波数帯）では，kHz 帯に比較してコイルの Q 値を高めることができるので，距離が離れることで k 値は低下するがその低下分を Q 値の上昇で補う事と考えることができる。しかし電線に高周波を印加すると表皮効果によって電線の表面付近しか電流が流れず，さらに電線同士が近接していると近接効果によって電流が流れる面積は減少する。これは電線の抵抗成分が上昇したことに等しく損失が増加する。つまり今回報告する技術は磁界共鳴の高周波を用いることで Q 値を向上させていることと同様であるが，平板電極を用いて高周波電力の導通損失を低減したことが特徴である。磁界でワイヤレス電力伝送を行なうには，コイルに電流を印加して電力伝送する。つまり大きな電力を送電するには大きな電流が必要となる。このためコイルに抵抗があると大きな損失源となる。一方電界による電力伝送では高い電圧を電極間に印加して電力伝送を行うので，導体損による影響が小さい。高圧送電線のように高い電圧で給電することによる損失が少ないことと同様の考え方である¹⁰⁾。しかし電界型は高電圧を電極間に印加するので，絶縁破壊による送電電力の限界も存在する。一方磁界型はそのような制約はない。大電力の電力伝送において，磁性体の飽和や超伝導体のクエンチなどの現象を考慮しなければ磁界型は電界型に比較して有利である。

方式	回路イメージ	共振機構
電界結合型		力率補償のしくみが共振機構とみなされる場合もあるが、伝送距離の変動に対して積極的に追従せず
自己共振を用いた結合共振型（電界主結合）		結合機構単独で共振
電界結合を用いた結合共振型（並列）		結合機構にリアクタンス素子を接続することにより共振
電界結合を用いた結合共振型（直列）		結合機構にリアクタンス素子を接続することにより共振

Fig. 2

4. 直列共振と並列共振の比較

インダクタンスとキャパシタンスによる LC 共振構造では直列共振と並列共振の 2 種類が考えられる。Fig. 2 に並列共振回路と直列共振回路を含む電界型ワイヤレス電力伝送方式の等価回路を示す。並列共振法では電源と送電コプラ間に昇圧トランスを用いて電圧を上昇させ，電力伝送を行う方法である。直列共振法では送電電力を LC 直列共振によって高電圧を発生させ，電力伝送をおこなうため簡単な回路構成となる。

5. 結合特性（結合効率）

Fig. 3 に送電受電間のコプラ[†]の電力伝送効率を示す。総受電間距離 200 mm において伝送効率 90% 以上を達成している。なお伝送効率は電極面積に依存し，伝送距離は 2 枚の電極間距離に依存する。同一の電極面積であれば，同一

Fig. 3

Fig. 4

Fig. 5

平面の2枚の電極間距離を離すことによって伝送距離を伸ばすことができるが、伝送効率は低下する。

6. 位置ずれに対する比較

同一サイズの磁界共鳴型カプラと電界共鳴型カプラが送受電間のカプラの位置がずれた場合の特性を電磁界シミュレータによって求めた。結果を Fig. 4 に示す。電界共鳴カプラは方向性を有し、方向によっては広い指向性を持つ事が判る。

7. 電力伝送実験

Fig. 5 に示す系で電力伝送実験を行った。送受電間距離 200 mm で 830 W の電力が伝送できている。

8. 電界型電力伝送方式の課題

電界共鳴による電力伝送の研究は磁界共鳴を用いた電力伝送に比較して、研究例が少なく無線電力伝送の規格化を含め出遅れている感がある。安価な材料で構成される共振電界結合型ワイヤレス電力伝送であるが課題も山積されて

いる。強電界を発生させて、電力伝送を行っているので電極の絶縁が重要である。またカプラ周辺に留まっている非放射の静電界や誘導界などのエネルギーを活用しているため、周辺の回路への影響が懸念される。今後は強電界を低減し、周囲への影響を低減する構造を検討する予定である。
(2015.7.2- 受理)

文 献

- 1) A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljacic: "Wireless power transfer via stringly coupled magnertic resonators," Science Magazine, 317, pp. 83–86, July 2007
- 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, 2012
- 3) 原川健一: "電界結合・共振型ワイヤレス電力伝送技術ー並列共振型電力伝送回路," 信学技報, WPT2011-24, 2011
- 4) 小丸 亮: "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, 2013
- 5) 常川光一: "独立型 WPT システムの動作解析とその特性," 信学技報, AP2013-85, 2013
- 6) 増田 満: "電界共振結合ワイヤレス電力伝送," 古河電工時報第 132 号, pp. 43–47, 2013
- 7) 増田 満: "電界共振結合型ワイヤレス電力伝送システム," 信学技報, WPT2013-20, 2013
- 8) 篠原真毅: "電界磁界結合型ワイヤレス給電技術ー電磁誘導・共鳴送電の理論と応用ー," 科学情報出版, 2014

- 9) 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ー共振時の電磁界結合を利用したワイヤレス電力伝送ー," 電気学会論文誌 D, Vol. 130, No. 1, pp. 84–92, 2010
- 10) 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, 2013

† 用語解説

磁界共鳴: MIT が 2007 年に発表した LC 共振を用いて、磁界を主結合とする電力伝送方式。電子スピンなど磁気モーメントを持つ粒子が共鳴吸収など、異なる物理現象を表すことがある。

電磁誘導: コイルに交流電流を印加して電磁誘導によって電力伝送をおこなう方式。

電界結合: 電極間に電圧を印加して電力伝送を行なう方式。

電界共振: 電界共振結合, 共振電界結合などとも表現される, LC 共振を用いて電界を主結合させることによって電力伝送する方式。

カプラ: 無線電力伝送におけるアンテナを示す。エネルギーを結合状態で送受電しているのでカプラという。

著者紹介

増田 満 (ますだ みつる)
楠 正弘 (くすのき まさひろ)
梅上大勝 (うめがみ ひろかつ)
服部文哉 (はっとり ふみや)
山本真義 (やまもと まさよし)