

EV・PHEV 用非接触給電の技術動向

阿部 茂

(埼玉大学)

非接触給電, 電気自動車, 電磁誘導, 充電器

1. はじめに

非接触給電は 1993 年に Auckland 大学の J. T. Boys が発表した移動型非接触給電システム⁽¹⁾を、日本の (株)ダイフクとドイツの Wampfler 社がクリーンルームや自動車工場向け搬送システムとして製品化し、世界に普及した。

Wampfler 社はその後、電気バス用に円形コア方式の非接触給電装置を製品化した。この装置は、円形のフェライトコアの片面にパンケーキコイルを配した送電部（一次側）と、同じ構造の受電部（二次側）とからなり、磁界構造はドーナツ形となる。これを円形コア片側巻トランス構造と呼ぶことにする。

EV・PHEV 用非接触給電システムの構成を図 1 に示す⁽²⁾。非接触給電は現在の電気ケーブルとコネクタ接続による接触給電に比べ、接続が不要で利便性が高く、安全で保守も容易な特長がある。

しかし円形コア方式は、乗用車用に小型化するとギャップ長や駐車時の位置ずれの許容範囲が小さくなる欠点があった。筆者らは小型化とギャップ長、位置ずれの問題を解決するためには磁界構造を円形コア方式（ドーナツ形）から別の方式に変える必要があると考え、2009 年に磁界構造がアーチ形の角形コア両側巻トランス構造⁽³⁾（Solenoid とも呼ばれる）を、2011 年に H 型コア方式⁽⁴⁾を発表した。2010 年には円形コア方式を採用してきた Auckland 大学も Flux Pipe と呼ぶ両側巻トランス構造を⁽⁵⁾、2011 年には同じアーチ形磁界構造の DD 構造と DDQ 構造⁽⁶⁾を発表した。

上記の非接触給電装置はすべて電磁誘導方式と呼ばれて

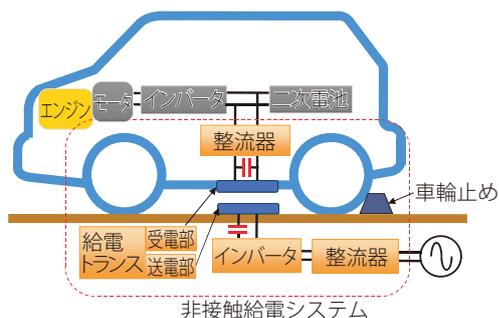


図 1 EV・PHEV 用非接触給電システムの構成

いる。これに対して 2007 年に MIT の A. Kurs らは磁気共鳴方式⁽⁷⁾を発表し、電磁誘導方式に比べ給電距離（ギャップ長）を飛躍的に拡大できることを示した。彼らが設立した WiTricity 社は 2010 年に Delphi 社とともに EV 用非接触給電装置を発表した。

2. 非接触給電の理論と効率

電磁誘導方式の非接触給電の基本はギャップ長の大きいトランスである。漏れ磁束が多く、結合係数 k が 0.1 ~ 0.5 と小さい。給電電力を大きくするには二次電圧を上げる必要があり、二次側に並列共振コンデンサを配置する。一次側には漏れリアクタンス補償用に直列あるいは並列コンデンサを配置する。電源周波数を 10 kHz 以上にすればコアとコイルとコンデンサを小型軽量にできる。コアにはフェライトを用い、コイルには表皮効果を防ぐためリッツ線（絶縁被覆された細線を束ねた線）を用いる。主な損失はリッツ線で発生する銅損とフェライトで発生する鉄損であり、これらを小さくすれば給電効率が上がる。

図 1 の非接触給電システムの主回路構成を図 2 に示す。トランスの一次側には直列コンデンサ C_s を、二次側には並列コンデンサ C_p を配した SP 方式である。磁気共鳴方式も等価回路で表すと一次側二次側共に直列コンデンサの SS 方式で表現できる⁽²⁾。

トランス部分の給電効率は図 2 の抵抗負荷 R_L の値により、すなわち給電電力によって変化する。トランスの銅損だけを考慮して鉄損を無視すると、給電効率の最大値は一次側コイルの Q_1 、二次側コイルの Q_2 、結合係数 k により、SP 方式、SS 方式ともに (1) 式で表される⁽⁸⁾。

$$\eta_{\max} = \frac{1}{1 + \frac{2}{k\sqrt{Q_1 Q_2}}} \dots \dots \dots (1)$$

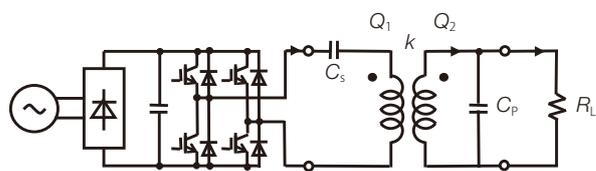


図 2 非接触給電システムの主回路構成 (SP 方式)

表 1 電磁誘導方式と磁気共鳴方式の比較

構成	電磁誘導方式		磁気共鳴方式											
Q	10~200 kHz	300	100~数 10 MHz	950										
周波数	10~200 kHz	30 kHz	100~数 10 MHz	9.9 MHz										
k	0.1~0.5	0.33	0.001~0.2	0.00197 ⁽⁹⁾										
η_{max}		98 %		48 %										
効率	<table border="1"> <thead> <tr> <th>η_{max} [%]</th> <th>kQ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>98</td> <td>120</td> </tr> <tr> <td>95</td> <td>38</td> </tr> <tr> <td>92</td> <td>24</td> </tr> <tr> <td>90</td> <td>18</td> </tr> </tbody> </table>				η_{max} [%]	kQ	98	120	95	38	92	24	90	18
η_{max} [%]	kQ													
98	120													
95	38													
92	24													
90	18													

つまり銅損だけの場合、電磁誘導方式も磁気共鳴方式も最大効率等は等しくなる。表 1 に電磁誘導方式と磁気共鳴方式の比較と代表的な装置の k 、 Q の値を示す。電磁誘導方式の 30 kHz・距離 70 mm のトランスでは (1) 式の効率が 98 % となり、実験効率 95 % (鉄損を含む) にほぼ一致する。磁気共鳴方式の 9.9 MHz・距離 2 000 mm のコイルでは (1) 式の効率が 48 % となり、実験値 40 % に近い。以上から、非接触給電では k と Q が重要で、これらの値を大きくすれば効率が上がることが分かる。

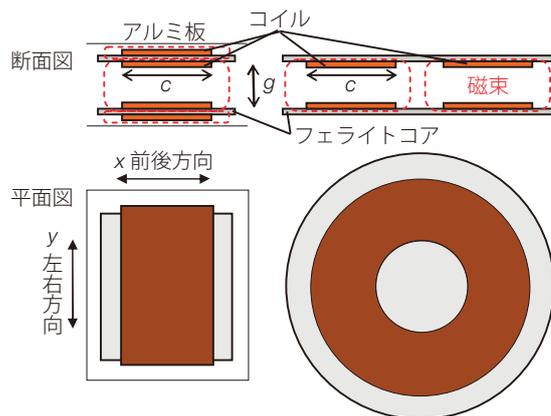
3. EV・PHEV 用の課題と解決策

EV 用非接触給電の課題を表 2 に示す。ギャップ長は、車の最低地上高が約 150 mm であるため、送電部を地表に置く場合は、70 ~ 150 mm でよいが、地中に埋設する場合は 200 mm 程度必要となる。図 1 のように車輪止めを用いれば前後方向の位置ずれは小さくできるが、左右方向は ± 150 mm 程度の位置ずれを許容する必要がある。

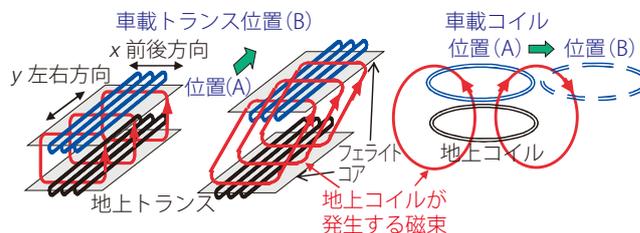
角形コア両側巻 (アーチ形磁界) が円形コア片側巻 (ドーナツ形磁界) に比べ、大幅にトランスを小型化できる理由を図 3 で、左右方向の位置ずれに強い理由を図 4 で説明する。図 3 の断面図で結合係数 k はコイル幅 c / ギャップ長 g で決まるため、角形は円形に比べ前後左右の長さは約半分でよく大幅に小型化できる。角形で問題となる背面磁束はアルミ板で遮蔽でき、渦電流による効率低下も 1 % 程度である。図 4 は位置ずれ時の磁束分布を示している。円形では地上一次コイルが発生する磁束は、車載二次コイルを位置 (A) では上方向に貫くが、位置 (B) では下方向に貫く。したがって位置 (A) と位置 (B) の間で車載コイルを貫く磁束の総和が 0 ($k = 0$) となる位置があり、

表 2 EV 用非接触給電の課題

- (1) 大きなギャップ長 50 ~ 200 mm
- (2) 大きな位置ずれ許容量 (左右方向 ± 150 mm 以上)
- (3) 車載トランスは小型軽量 5 kg 以下 (平面寸法 400 x 400 mm 以下)
- (4) 高いトランス効率 90 ~ 95 %
- (5) 漏洩磁界の安全性 27 μ T 以下



(a) 角形コア両側巻 (b) 円形コア片側巻
図 3 角形コア両側巻方式と円形コア片側巻方式



(a) 角形コア両側巻 (b) 円形コア片側巻
図 4 車載コイルの位置による鎖交磁束の変化

給電できなくなる。このため円形では位置ずれ許容範囲の約 4 倍の直径が必要となる。一方、角形では車載コイルが y 方向に位置 (A) から位置 (B) に変化しても、車載コイルを貫く磁束量の変化は小さく、結合係数 k の低下が小さいため、位置ずれに強い。

4. 最新の非接触給電装置

最近発表された EV・PHEV 用非接触給電トランスを紹介する。外形が角形のトランスの仕様はいずれも、給電電力は 3 ~ 3.3 kW、ギャップ長は 160 ~ 200 mm、左右方向の位置ずれ許容量が ± 200 mm、トランス効率は 90 % 以上で、周波数は 30 ~ 150 kHz を採用している。

埼玉大学のグループは図 5 の角形両側巻の長ギャップ

用H型トランス⁽¹⁰⁾を発表した。トランスの寸法 (320 × 300 × 40 mm) と重量 5.5 kg は世界最小クラスである。漏洩磁界もトランス中心から 700 mm 離れれば ICNIRP の人体への安全基準である 27 μT 以下に減衰する。

Auckland 大学は、図 6 (a) (b) の角形両側巻方式の Flux Pipe 構造、磁界構造は同じで、コイルを片側巻に変更した図 6 (c) の DD 構造、その DD 構造に Q コイルを追加した円形コアと互換性を持つ図 6 (d) の DDQ 構造を発表している。そして 2011 年秋に Qualcomm 社が Auckland 大学の haloIPT 社を買収すると、2012 年の EV の国際シンポジウム EVS26 では Qualcomm halo 社として図 7 (a) のモックアップを展示した。

EVS26 で Delphi 社は車載トランスの寸法を小さくした図 7 (b) の最新型を展示した。

円形コア方式に関しては、Siemens 社が論文⁽¹¹⁾を発表し、その中で 3.6 kW、長円形 (440 × 380 × 25 mm) で重量 6.5 kg の第二世代システムを開発中と述べている。

一般的に、角形コア方式は小型化とギャップ長、左右の位置ずれ性能の点で優れ、円形コア方式は漏洩磁界レベルの低い点で優れていると言われている。

5. おわりに

以上、EV・PHEV 用非接触給電の技術動向を紹介した。現在、アメリカの SAE International とヨーロッパの IEC で 2015 年を目標に世界標準化の作業が進められており、日本も JARI (日本自動車研究所) が参加している。標準化の課題は、磁界構造の異なる角形と円形の 2 方式の扱いと各国の電波規制の整備と思われる。

ここでは紹介できなかったが、双方向非接触給電⁽¹²⁾や将来の走行中非接触給電⁽²⁾の研究も盛んである。

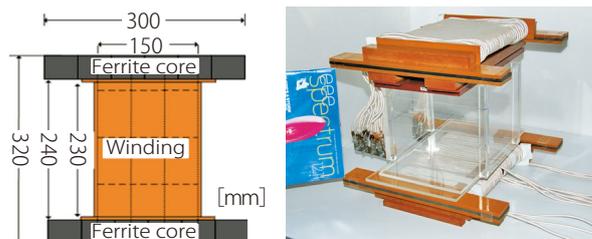
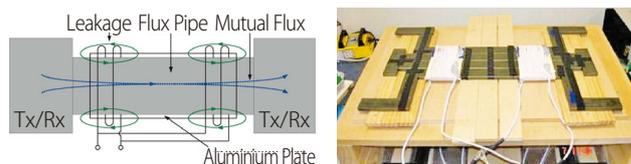
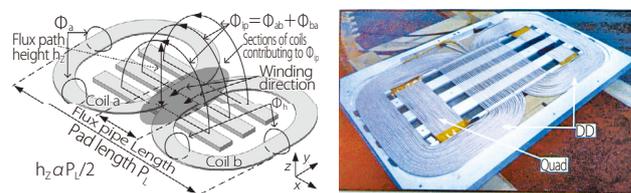


図 5 H型トランス⁽¹⁰⁾



(a) Flux Pipe 構造

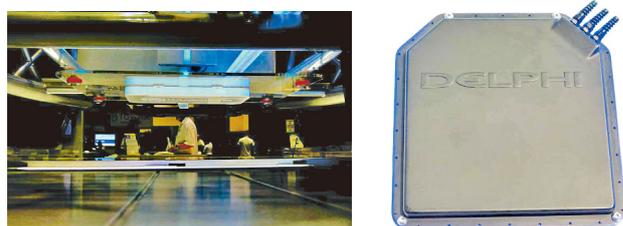
(b) Flux Pipe トランス



(c) DD 構造

(d) DDQ トランス

図 6 Flux Pipe⁽⁵⁾, DD & DDQ 構造⁽⁶⁾



(a) Qualcomm halo 社のトランス

(b) Delphi 社の車載トランス

図 7 Qualcomm halo 社と Delphi 社のトランス

文 献

- (1) A. W. Green and J.T.Boys: "An inductively coupled high-frequency power system for material handling applications", IPEC 1993, pp.821-826 (1993)
- (2) 電気学会・移動体用エネルギーストレージシステム技術調査専門委員会編:「電池システム技術」, オーム社, pp.236-264 (2012)
- (3) 岩田卓也・江原夏樹・金子裕良・阿部茂・保田富夫・井田和彦:「電気自動車用非接触給電装置のトランス巻線方式による特性比較」, 電学研資, SPC-09-39, pp.109-114 (2009)
- (4) 千明将人・長塚裕一・金子裕良・阿部茂・保田富夫・鈴木明:「新コア構造による電気自動車用非接触給電装置トランスの小型軽量化」, 電学研資, SPC-11-48, pp.139-144 (2011)
- (5) M. Budhia, G. A. Covic, and J. T. Boys: "A New Magnetic Coupler for Inductive Power Transfer Electric Vehicle Charging Systems", IEEE IECON 2010, pp.2481-2486 (2010)
- (6) M. Budhia, G. A. Covic, J. T. Boys, and C. Y. Huang: "Development and evaluation of single sided flux couplers for contactless electric vehicle charging", IEEE ECCE 2011, pp.614-621 (2011)
- (7) A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljacic: "Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances", Science Express on 7 June 2007, Vol.317, No.5834, pp.83-

- 86 (2007)
- (8) 遠井敬大・金子裕良・阿部茂:「非接触給電の最大効率の結合係数 k とコイルの Q による表現」, 電学論 D, Vol.132, No.1, pp.123-124 (2012)
- (9) 萩原史史:「電磁結合による非接触電力伝送の原理について」, 電学論 D, Vol.131, No.5, pp.708-713 (2011)
- (10) 佐藤亨耶・高梨浩也・金子裕良・阿部茂・保田富夫・鈴木明:「電気自動車用非接触給電トランスの長ギャップ化」, 平成 24 年電学全大, 4-205 (2012)
- (11) R. Kluth and J. Ziegner: "Inductive charging - simplifying the charge to enable mass adoption", EVS26 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium, Los Angeles (2012)
- (12) 渡辺宏・望月大樹・金子裕良・阿部茂:「一方向非接触給電から拡張可能な双方向非接触給電システム」, 平成 24 年電学全大, 4-203 (2012)



阿部 茂

あべ・しげる (正員)

1971 年東京大学工学部電子工学科卒業。1976 年同大学院博士課程修了。同年三菱電機 (株) 入社。中央研究所等で研究開発に従事。1997 年同社稲沢製作所開発部長。2001 年ビルシステム事業本部技術師長。2004 年埼玉大学工学部教授、1985 年電気学会論文賞受賞。工学博士。