

kW級ワイヤレス電力伝送システム

Kilowatt-Class Wireless Power Transfer/Transmission System for Contactless Charging

大高 章二 餅川 宏

■ OTAKA Shoji ■ MOCHIKAWA Hiroshi

電気自動車 (EV) への非接触充電を実現するにあたって、EV側の受電装置と地上の送電装置間の位置精度を緩和するために送電距離を延ばすことや受電装置の軽量化が望まれる。

東芝はこれらのニーズに応えるため、kW級ワイヤレス電力伝送システムのプロトタイプを開発した。このプロトタイプでは、電磁誘導方式に比べ送電距離の拡大に向く磁界共振方式を採用するとともに、受電コイルの軽量化と電力伝送の高効率化の観点からソレノイド型コイルを採用した。また、無線通信を介した充電制御手順を確立し、伝送周波数 120 kHz の定電流充電モードとした。プロトタイプを評価した結果、200 mm 以上の送電距離で、効率 83.2 % の 1 kW 電力伝送を達成した。

In order to apply wireless power transfer/transmission systems to battery chargers for electric vehicles (EVs), it is necessary to increase the power transfer distance of the system and to reduce the weight of the power receiver installed in the EVs so as to respectively ease the requirement for a precise parking position when charging the vehicle and enhance the driving distance per charge.

Toshiba has been developing a kilowatt-class wireless power transfer/transmission system for contactless EV charging using a magnetic resonance technology to realize long-distance power transfer and a solenoid coil to realize light weight and high power-transfer efficiency. Experiments on a prototype wireless power transfer/transmission system, which operates in constant-current mode, have confirmed that it achieves a power transfer of 1 kW with an efficiency of 83.2% at a transfer frequency of 120 kHz and a transfer distance of more than 200 mm.

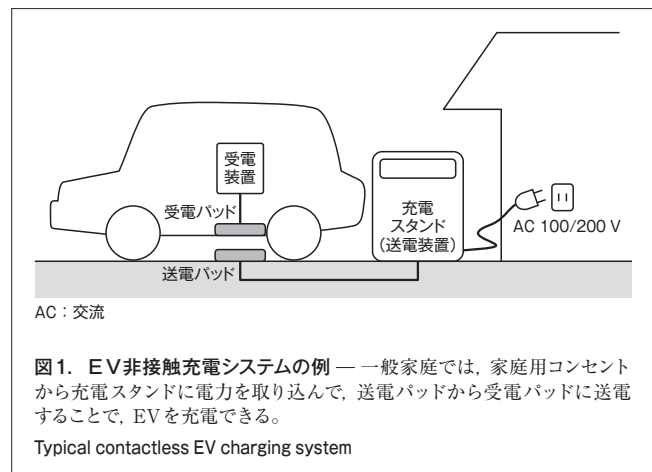
1 まえがき

非接触で電力供給を可能にする技術として、隣接する二つのコイルの一方に電流を流しエネルギーを磁界に変換してからもう一方のコイルに起電力を発生させる電磁誘導方式と、電流を電磁波に変換しアンテナを経由してエネルギーを送る電波方式がある。前者は大電力を扱う場合に適しているが、送電距離が一般に短い。後者は送電距離が長い、伝送方向の制御が難しく伝送効率も低い。

これに対し、2007年にマサチューセッツ工科大学 (MIT) が実用化の可能性を示した磁界共振方式がある。MITの実験ではコイル間距離 1 m でコイル間効率 90 %、2 m でコイル間効率 45 % を実現し、2 m 先の電球を点灯することに成功した。この実験により送電距離を確保しながら家電製品相当への非接触充電が実現できることが一般に認知されるようになった。

今やその応用先は、数 W から数百 W の家電製品だけでなく、図 1 に示すような EV や電気バスなどの kW を超す非接触充電にも向けられている。これは、EV を接触式充電器で充電する場合に充電ケーブルの装着脱に手間がかかるなど、利便性の問題を非接触充電により解消できることが理由に挙げられる。更に、磁界共振の特徴である送電距離が長いことにより、EV の停車位置ずれが許容できるという理由もある。

そこで東芝は、EV への非接触充電を目指して、磁界共振方



式を採用するとともに、EV 側受電装置の軽量化を図った kW 級ワイヤレス電力伝送システムのプロトタイプを開発した。ここでは、磁界共振方式の電力伝送技術、コイルを含む共振子の設計技術、及び電力伝送を実施するうえでの通信技術について述べるとともに、試作したプロトタイプについても述べる。

2 磁界共振方式による電力伝送

電磁誘導方式と磁界共振方式を対比させて伝送特性を説明する。図 1 に示したように、EV 非接触充電システムでは送

電パッド内のコイルから受電パッド内のコイルへ送電する。受電装置と充電を負荷抵抗 R とし、充電スタンド内のPFC (力率改善) 回路、昇圧器、及びインバータを含め送電側をAC (交流) 電源 V_{in} として簡略化した、電磁誘導方式の構成とその等価回路を図2に示す。ここで、 k は結合係数、 L はコイルのインダクタンスである。

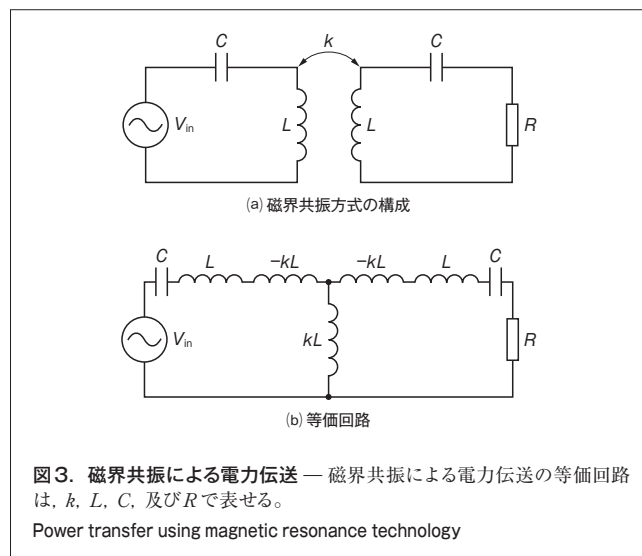
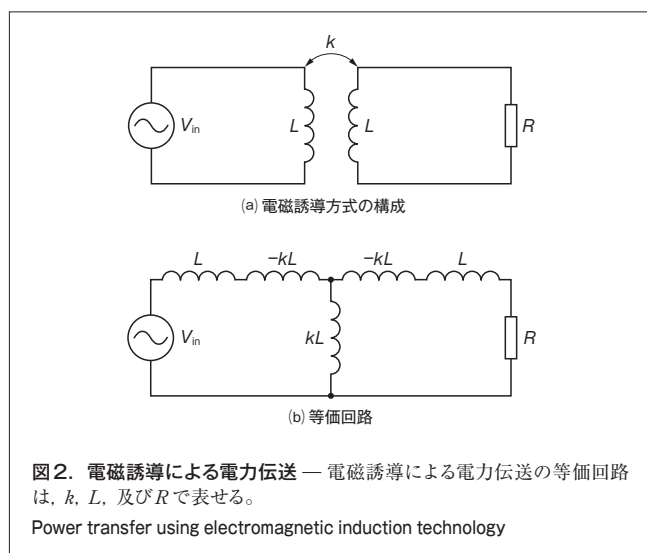
等価回路の $-kL$ と kL によるT型回路はインピーダンス逆数回路であり、それより右の LR 直列インピーダンスの逆数に $(k\omega L)^2$ を乗算したインピーダンスとなる。ここで ω は送電角周波数である。 V_{in} から負荷側をみたインピーダンス Z_{in1} は、式(1)で表される。

$$Z_{in1} = \frac{(k^2 - 1)\omega^2 L^2 + j\omega LR}{R + j\omega L} \quad (1)$$

密結合となる条件 $k=1$ の場合、 R と L の並列回路となり、 R を ωL に比べ小さくするとほぼ純抵抗になり、力率は1に近似できる。このため、受電電力に相当する送電装置を用意すればよい。しかし、例えば $k \ll 1$ とした場合、つまり送電距離を長くした場合、力率は0に近くなり無効電力が増大するため、送電装置の出力電圧及び電流を大幅に大きいものにする必要がある。視点を変えれば、受電電力相当の送電装置を用意すると送電距離が短くなる、と解釈できる。

磁界共振方式は、図2のコイル L と ω で共振するキャパシタ C を直列に接続する。磁界共振方式には直列や並列などのバリエーションがあるが、ここでは直列接続を前提に述べる。磁界共振方式の構成及び等価回路を図3に示す。共振により C と L の直列回路は抵抗 0Ω となり、電源 V_{in} から負荷側をみたインピーダンス Z_{in2} は、式(2)で表される。

$$Z_{in2} = \frac{k^2 \omega^2 L^2}{R} \quad (2)$$



これは、 k の大きさによらず常に純抵抗となり、したがって、力率は共振条件が成り立てば常に1であり、受電出力相当の送電装置を用意すれば電力を伝送できる。

効率 η は負荷 $R=k\omega L$ の場合に最大となり、近似的に式(3)で表される。

$$\eta_{max} = 1 - 2/(kQ) \quad (3)$$

Q : 共振子のクオリティファクタ^(注1)

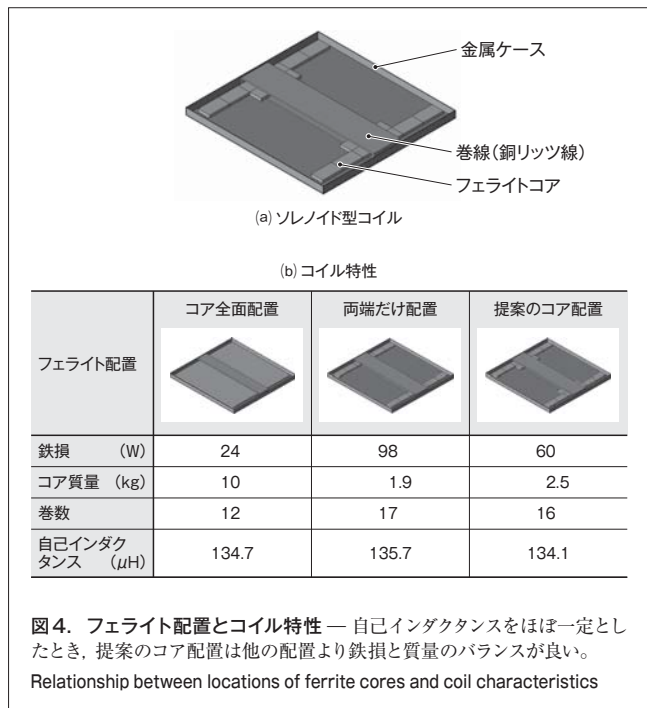
このとき、出力電力は $V_{in}^2/R (=V_{in}^2/k\omega L)$ となる。kW級の電力を伝送する場合、効率が下がると装置が高温になり装置故障を招くので伝送効率を高くする必要がある。式(3)から高効率伝送を実現するには、例えば寄生抵抗を下げて共振器の Q を高くすること、あるいは k を高くすることが必要である。一方で、効率が最大になるように負荷を調整して電力伝送を行うことが必要になる。

3 共振子の設計

コイルはスパイラル型とソレノイド型の2種類が主流であり、多くの研究機関で実用性が論じられている。ソレノイド型コイルは同じ面積のスパイラル型コイルに比べて k が高いので、ここではソレノイド型コイルについて議論する。EV向けkW級送電を想定したコイルを製造するにあたり、車載側受電コイルの軽量化、高効率を実現する高 Q 化、及び送電距離の拡大や高効率化に寄与する高 k 化の技術が重要になる。ここではソレノイド型コイルについてこれらの観点から述べる。

コイルの外観を図4(a)に示す。コイルの装着用金属ケースは、受電コイルの場合、車体側に配置する。この配置は、対面する送電コイルと反対側に生成される漏れ磁束を遮断するた

(注1) 振動の効率を表す指標で、1周期当たりの蓄積エネルギーを消失エネルギーで割ったもの。 Q が高いほど振動は安定する。



め、 k を高める。コイルの導線は、高 Q 化の観点から材料は銅とし、リッツ線を用いる。コイルのインダクタンスと k を大きくするには磁性体コアが使われ、100 kHz帯では抵抗率が比較的高いMn-Zn（マンガン-亜鉛）系フェライトを用いる。フェライトを用いると鉄損が発生するが、インダクタンスの増加が大きいので高 Q 化につながる。一方、フェライトの質量が増加するため、高 Q 化と軽量化はトレードオフの関係となる。フェライト配置とコイル特性の関係について、同じ形状の3種類のコイルを比較して図4(b)に示す。フェライトを全面配置にすると鉄損は小さいが質量は大きい。フェライトを巻線と直交する両端にだけ配置すると磁束が集中するため鉄損は大きくなるが軽量化になる。フェライトを巻線下に一部追加すると鉄損は小さくなり、質量の増加も削減できる。当社は軽量化と高 Q 化を実現する手法として、このフェライト配置方法を提案した⁽¹⁾。

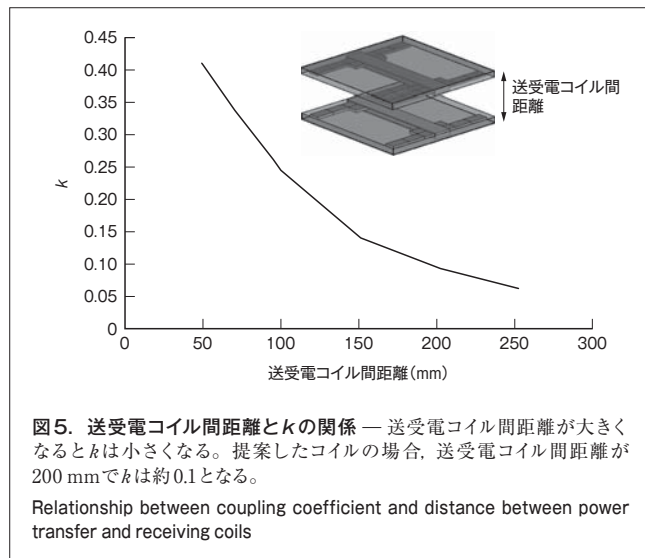
提案したコイルを送受電コイルに用いた場合の k と送受電コイル間距離の関係測定した結果を図5に示す。 k は式(4)で表される。

$$k = \sqrt{1 - L_{\text{short}} / L_{\text{open}}} \quad (4)$$

L_{short} : 2次側コイルを短絡したときの1次側からみたインダクタンス

L_{open} : 2次側コイルを開放したときの1次側からみたインダクタンス

ここではEVへの充電を目標にしているため、送受電コイル間距離は最大で約200 mmを想定している。この条件下では提案したコイルは k が約0.1以上となる。この k では目標効率

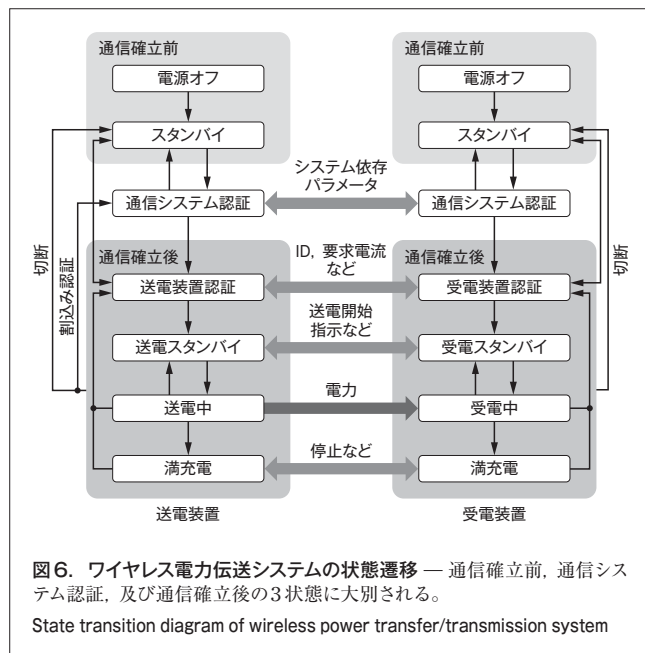


に達しない場合、式(3)からわかるように、更に k 又は Q を増加させる必要がある。

4 ワイヤレス電力伝送システムの伝送制御手順

EVへ非接触充電を行うには、車外に配置された送電装置と車載の受電装置間で無線通信を用いた情報のやり取りが必要になる。このため、送受電装置それぞれに制御装置及び無線装置を用意する。ワイヤレス電力伝送の開始から終了までの送受電装置の状態遷移を図6に示す。

状態遷移は通信確立前、通信システム認証、及び通信確立後に大きく分けられる。通信確立前は送受電制御装置及び無線装置の電源オフの状態と電源オンの状態があり、後者では



通信要求時の挙動や転送レートなど、通信に必要な初期設定が行われる。通信システム認証により通信が確立されると、送受電装置ID（識別情報）などの認証を行い、送受電スタンバイ状態に入る。送受電スタンバイでは送受電開始に必要な情報、例えば充電電池の充電状態や負荷電流値が収集される。後者は定電流（CC）充電を想定したシステムによるものである。ユーザーから送電開始指示があると送電中の状態に入る。充電電池の充電状態は監視されており、満充電の状態になると非接触充電を終了する。

5 1 kWワイヤレス電力伝送システムの試作と評価

5.1 プロトタイプ的目標仕様

EVの普通充電は3 kWであるが、今回の試作は動作検証を兼ねたプロトタイプであり、目標の伝送電力を1 kWとした。1 kWワイヤレス電力伝送システムのプロトタイプとしての目標仕様を表1に示す。既存のEVの地上高は160 mm程度であることから、送受電コイル間ギャップを70 ~ 210 mmとした。試作したコイルを想定すると k 換算では0.1 ~ 0.35である。送電側から受電側までの効率は85 %以上とした。充電方法はCC充電とし、満充電近くで定電圧（CV）充電は行わないものとする。また、標準化団体で議論されている周波数帯を考慮して、送電周波数を120 kHzとした。

5.2 プロトタイプのシステム構成

試作したプロトタイプの構成を図7に示す。送電側のDC

表1. 1 kWワイヤレス電力伝送システム的目標仕様

Target specifications of prototype 1 kW wireless power transfer/transmission system

項目	仕様
送受電コイル間距離	70 ~ 210 mm
伝送電力	1 kW
充電制御	CC充電
効率	85 % 以上
送電周波数	120 kHz

（直流）電源は、家庭用電源からインバータへ与える電圧に変換する、PFC回路と昇圧器を模擬したものである。制御回路により送電周波数120 kHzのゲート信号がインバータに与えられ、インバータから120 kHzのAC電力が共振子へ入力される。受電側共振子で受信した電力は整流器で整流される。整流器の後に、電子負荷装置を接続している。電子負荷装置は昇降圧器と充電電池に相当する。目標仕様で述べた効率は、図7においてDC電源から電子負荷装置までの効率と定義する。

プロトタイプのインバータと整流器の回路を図8に示す。インバータはフルブリッジ構成で、トランジスタ素子は耐圧1,200 V、電流容量30 AのSiC（炭化ケイ素）-JFET（接合型電界効果トランジスタ）を使用し、ダイオード素子は耐圧1,200 V、

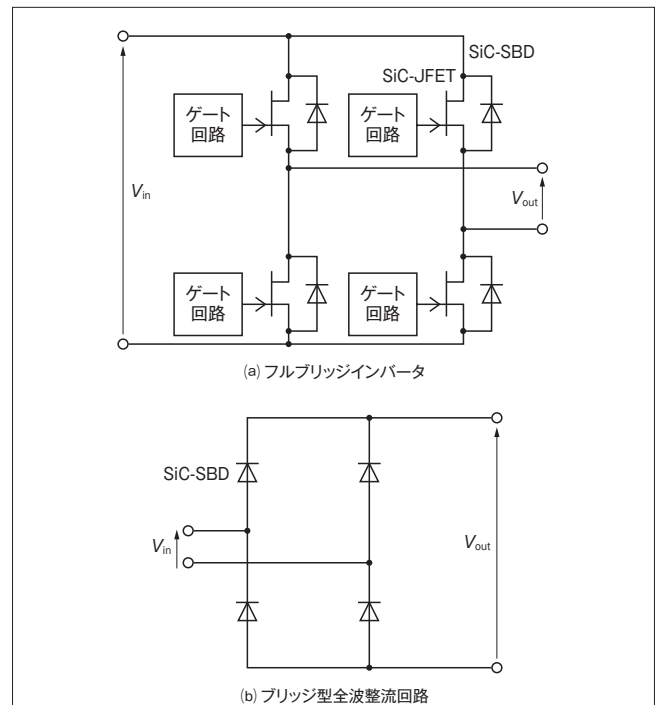


図8. インバータと整流器の回路 — インバータ及び整流回路のトランジスタとダイオードは低損失化に向くSiCを用いた。

Configurations of inverter and rectifier circuits

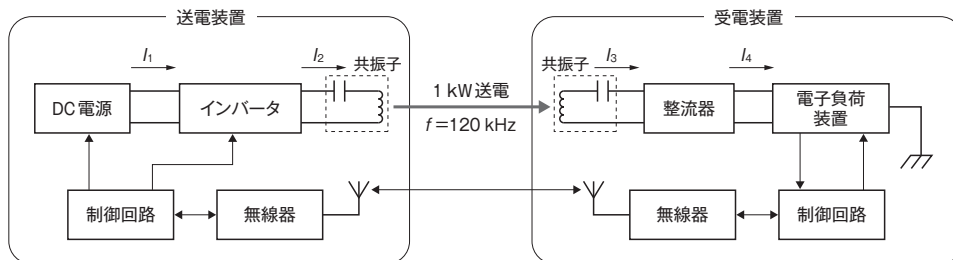


図7. プロトタイプのシステム構成 — 電力伝送の周波数は120 kHzとし、送受電装置の制御回路は無線器を用いて通信する。

Configuration of prototype 1 kW wireless power transfer/transmission system

電流容量15 AのSiC-SBD (ショットキーバリアダイオード) を使用した。整流器はブリッジ型全波整流構成で、ダイオード素子はインバータと同じ製品を使用した。

5.3 プロトタイプの評価

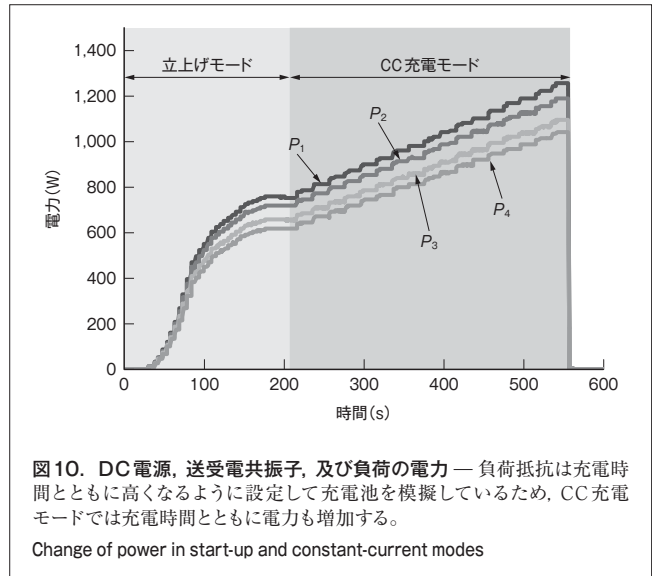
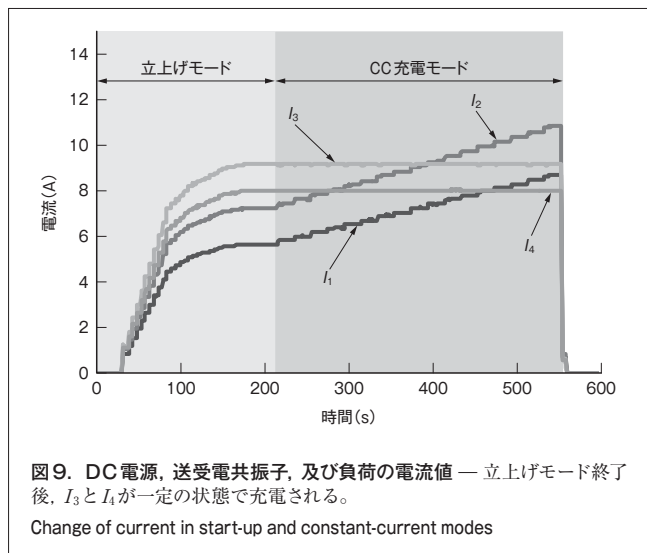
プロトタイプの送受電装置間の通信にBluetooth[®](注2)を使用してワイヤレス電力伝送システムを評価した。送受電装置の電源を投入後、送受電装置及びBluetooth[®]の初期設定を行い、通信を確立して、認証をとった後、充電を開始する。送受電コイル間距離は210 mmとした。充電対象の充電電池を模擬するため、負荷抵抗を10 Ωから17 Ωまで時間とともに変化させた。この負荷抵抗は、効率を最大にする負荷の近傍の値である。

充電は立上げモード、CC充電モードの手順で行う。立上げモードでは、負荷に流れる電流が8 Aに達するまで送電側の電源電圧を上げる。この際、電流をモニタして、8 Aとの差分を検出し、差分が0.05 A以下になるまで送電電圧を調整する。立上げモード終了後CC充電モードに移行する。

CC充電モードでは、負荷抵抗が時間により変化する状態で負荷電流8 Aが注入されるよう送電電圧を制御する。負荷抵抗が17 Ωになると受電側には1 kWの電力が入力されることになる。実験では受電側へ1 kW伝送した後、送電電圧を0 Vにして送電を終了する。

図7に示したDC電源電流 I_1 、送電共振子電流 I_2 、受電共振子電流 I_3 、及び負荷電流 I_4 を図9に示す。

DC電源の電力 P_1 、送電共振子での有効電力 P_2 、受電共振子での有効電力 P_3 、及び負荷の電力 P_4 を図10に示す。図から最大1 kW以上の電力を伝送したことがわかる。このときの効率は83.2%であり、ほぼ目標の効率が得られた。



6 あとがき

EVへの非接触充電を目指して、1 kWワイヤレス電力伝送システムのプロトタイプを開発した。磁界共振方式によりソレノイド型コイル間距離210 mmの電力伝送実験を行い、受電電力1 kWを確認するとともに伝送効率83.2%を達成した。

今後、更に研究開発を進め、EVの非接触充電の実用化に貢献していく。

文献

- (1) Yamada, A. et al. "Development of resonant coil for kW-class wireless power transfer system". 2012 IEEE Microwave Theory and Techniques Society (MTT-S) International Microwave Workshop Series on Innovative Wireless Power Transmission (IMWS-IWPT2012). Kyoto, 2012-05, IEEE MTT-S. p.187 - 189.



大高 章二 OTAKA Shoji, D.Eng.

研究開発センター ワイヤレスシステムラボラトリー研究主幹、博士(工学)。非接触電力伝送の開発に従事。電子情報通信学会、IEEE会員。

Wireless System Lab.



餅川 宏 MOCHIKAWA Hiroshi

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 電機電池応用・パワーエレクトロニクス開発部主幹。パワーエレクトロニクス機器の研究・開発に従事。電気学会会員。

Power and Industrial Systems Research and Development Center

(注2) Bluetooth[®]ワードマーク及びロゴは、Bluetooth SIG, Inc.の登録商標。