小電力電子機器用ワイヤレスエネルギー供給技術

山本 隆彦*, 越地 耕二*

Wireless Energy Transmission Technology for Low-Power Electronic Devices

Takahiko YAMAMOTO* and Kohji KOSHII*

*東京理科大学理工学部電気電子情報工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

*Department of Electrical Engineering, Faculty of Science and Technology, Tokyo University of Science (2641 Yamazaki, Noda-shi, Chiba 278-8510)

1. はじめに

現在、モバイル電子機器に対する充電方法は、金属端子接触充電が主流である。しかしながら、従来の充電方式は金属接触部での導通不良や耐久性の問題、感電などの危険性が危惧されている。また、各電子機器は充電接点の形状が異なるため汎用性が低い。これらを背景に、ワイヤレス充電方式が注目されている。これまでに過去のPHS (Personal Handy-phone System)に多くワイヤレス充電が用いられてきたほか、現在では海外メーカーのスマートフォンの一部機種においても対応器が発売されているなど、今後国内の携帯電話メーカーの端末にもワイヤレス充電が利用されるものと考えられる¹⁾。携帯電話以外においては、三洋電機が任天堂のゲーム機向けに2008年8月に発売した「Wiiリモコン専用無接点充電セット」は、単4形2本相当(放電容量約1,600 mAh)の二次電池を約220分で充電する。セイコーエプソンは、2.5 W (5 V, 500 mA)出力の無接点電力伝送モジュールのサンプル出荷を2008年9月に開始した。背景には、認証機能を担うマイコンの価格が廉価になったこと、充電コイルの薄型化や可撓性の向上などにより実装が容易になったことなどがあげられる。ワイヤレスエネルギー供給技術には防水の実現や多くの機器で充電器の共通化が可能になるなどの利点がある反面、機器の位置ずれによるエネルギー伝送効率の低下などが発生する欠点や、汎用の充電装置を目標とする場合、端末と充電器の間において情報伝送を行うことが必要不可欠となる。

そこで本稿では携帯電話などの小型小電力電子機器へのワイヤレスエネルギー供給を考え、その概要とトランスフォーマの位置ずれに対する結合度の改善、充電器と端末の間の情報伝送について述べる。

2. 電磁誘導を用いたワイヤレスエネルギー供給システムの概要

ワイヤレスエネルギー供給^{2)~8)}の概要を述べる。充電器側

においては高周波の交流を生成し、充電器側の送電コイル(一次コイル)と端末側の受電コイル(二次コイル)の間の電磁誘導作用により、非接触の状態において交流電力を伝送する。伝送された交流電力は整流平滑回路により直流に変換された後、電子機器の動作および内蔵バッテリーの充電に用いられる。

高効率なシステムを実現する上では、スイッチング回路および整流平滑回路⁹⁾における損失の低減、2つのコイル間の結合度の向上が必要不可欠となる。スイッチング回路には、正の電圧のみを一次コイルに加えるフォワード型、正負の電圧を加えるプッシュプル型およびフルブリッジ型がある。エネルギー伝送効率の改善のため直列共振回路を挿入する場合、フルブリッジ型が適している。また、トランスフォーマを構成する各コイル間の結合を高める工夫として、フェライトを用いる方法^{4),5),8)}やアモルファス磁性線を用いる方法⁷⁾などがこれまでに研究され報告されている。整流平滑回路には種々あるが、代表的なものとしてセンタータップ型全波整流回路やフルブリッジ型全波整流回路がある。前者は整流ダイオードを2つ必要とするのに対して後者は4つ必要とする。これに対して二次コイルの数は前者は1つであるのに対して後者は2つ必要となる。近年の電子デバイスの低電圧化を考慮すると、整流素子は少ない方が好ましく、さらに整流素子に電圧降下の低いFET (Field Effect Transistor)を用いた同期整流方式もある。

体内埋込型医療機器を対象としたワイヤレスエネルギー供給システムにおいては25 W伝送時にDC-to-DC伝送効率93%を達成するもの⁵⁾もあり、広く研究開発が行われている。

3. コイルのインダクタンスと形状

小型かつ高効率なワイヤレスエネルギー供給システムを実現する上では、トランスフォーマに用いるコイルの設計がきわめて重要となる。Fig. 1はワイヤレスエネルギー供給システムのブロック図のうち、トランスフォーマ部分を詳細

Fig. 1 Energy transmission efficiency measurement circuit

に示したものである。 C_1, C_2 は共振用キャパシタである。これら挿入することによりトランスフォーマコイルのリアクタンス分を相殺することができる。また r_1, r_2 はコイルの巻き線抵抗である。表皮効果の影響により、高周波数の電流は、表面から式(1)で表される厚さ δ の領域にその大部分が流れる。このため、実効的な抵抗値が増大する。

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \epsilon}} \quad (1)$$

実効的な抵抗値の増大を低減するため、コイル巻き線にはきわめて細い導線を多数本束ね、それぞれを絶縁して撚ったリッツ線^{10),11)}が用いられている。Fig. 1の回路より、電力伝送効率の理論式は式(2)で与えられる。

$$\eta = \frac{W_2}{W_1} = \left| \frac{(\omega k \sqrt{L_1 L_2})^2 R_L}{r_1(r_2 + R_L)^2 + (\omega k \sqrt{L_1 L_2})^2 (r_2 + R_L)} \right| \times 100 \quad [\%] \quad (2)$$

伝送効率を向上させるためには、周波数もしくはコイルの結合度を向上させればよいことがわかる。ここで、周波数を大きく増加させた場合、スイッチングおよび整流損失の増大や表皮効果による実効抵抗の増大による効率低下を招くことが考えられる。このため、コイルの結合度を向上させることが重要であるといえる。

4. 位置ずれ発生時における結合係数の変化とその改善

形状の異なる種々の端末に対するワイヤレスエネルギー供給においては、端末を充電器に固定することは一般には困難であり、トランスフォーマを設計する上では二次コイルに位置ずれが発生することを考慮する必要がある。コイル間に位置ずれが生じると結合度が低下するため、エネルギー伝送効率は低下する。これを避けるためには、コイル間の

Fig. 2 Flat type of laminated coil without (left) and with (right) ferrite

Fig. 3 Coupling coefficient vs. misalignment of coil axis (comparison of with and without ferrite)

結合度は可能な限り高いことが望ましい。この方法の1つとして、コイル中心部にフェライトを挿入する方法がある。また、コイル周辺にフェライトシートやタイルを貼り付けることにより、渦電流の抑制や磁気的なシールド効果が得られる。これにより、ワイヤレスエネルギー供給により生じた磁界の、端末内の他の電子デバイスなどへの影響を低減可能である。

一例として、携帯電話端末への内蔵などを考慮し小型化・薄型化した方形コイル（縦18mm、横50mm）(Fig. 2)にフェライトを挿入した際の結合度の変化を示す(Fig. 3)。本コイルは、フェライトを挿入しない状態において一次コイルは $L_1=18\mu\text{H}$, $r_1=0.26\Omega$ （6回3層巻き）、二次コイルは $L_2=6\mu\text{H}$, $r_2=0.15\Omega$ （6回2層巻）であった。これに対し、フェライト挿入後はそれぞれ $L_1=24\mu\text{H}$, $L_2=10\mu\text{H}$ に増大した。これらを用いた際のエネルギー伝送効率の特性をFig. 4に示す。フェライトを挿入することにより、結合係数が大幅に増加し、エネルギー伝送効率が向上することがわかる。

5. エネルギーと情報の同時伝送

モバイル電子機器への汎用的なワイヤレスエネルギー供給を考慮した場合、機器の型名認識を行い、充電状態などの監視や充電の制御を行う必要がある。また、公共の場においてモバイル電子機器へのワイヤレスエネルギー供給のサービスが提供された場合、これに対して課金を行うことも考えられる。このため、充電器側と端末側の間ではエネルギー

Fig. 4 Energy transmission efficiency vs. misalignment of coil axis

のみならず双方向に情報を同時に送受する必要がある。モバイル電子機器と充電器の間でエネルギーおよび情報を同時に伝送するうえで求められる特性としては、端末側における情報伝送のための電力消費を可能な限り低く抑えること、端末の小型化の観点から可能な限りシンプルな構成とすることがあげられる。

エネルギーと情報を同時に伝送する方法は種々あり、例えば PLC (Power Line Communication) の技術を応用し、電源線間にトランスフォーマを挿入する方法がある。OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) を用いた本方式は、高い通信速度を実現可能であるものの、モバイル電子機器に適用するには、消費電力やコストの低減、小型化が要求される。

一方、トランスフォーマに工夫を施すことによりシンプルにエネルギーと情報を同時伝送する研究も行われている。松木らの研究グループにおいては、空心型のエネルギー伝送用コイルに貼り付ける情報伝送用コイルの巻き線を 8 の字形に巻く工夫を施すことにより、情報伝送用コイルを鎖交するエネルギー伝送のための磁束を相殺している⁶⁾。著者らの研究グループにおいては、体外結合型のトランスフォーマに対して、エネルギー伝送のための磁束と情報伝送のための磁束が直交関係となるように情報伝送用コイルの巻き方に工夫を施し、エネルギーおよび情報の伝送において互いに影響を及ぼさない構造を実現した⁹⁾。これらはエネルギー伝送用コイルと情報伝送用コイルに工夫を加えることにより同時伝送を実現した例である。これに対し、モバイル電子機器に内蔵することを考慮すると、単一のコイルのみで同時伝送を行う技術も期待される。

一例として直並列共振型 E 級増幅器¹²⁾を用いて一組の空心型トランスフォーマのみを用いてエネルギーと情報の同時伝送を行う方法がある。単一のトランスフォーマのみを用いて同時伝送を行うため、異なる周波数、例えばエネルギー伝送を数百 kHz、情報伝送を数十 MHz により行う。Fig. 5 に直並列型 E 級電力増幅回路を示す。従来の E 級電力増幅

Fig. 5 Class-E power amplifier with tuned series-parallel resonance network

Fig. 6 Equivalent circuit of information transmission

回路に枝 $L_m - C_m$ がシャントキャパシタ C_p に対して並列になるよう接続した構造である。これにより、2つの共振周波数による伝送が可能となる。端末側において、エネルギー伝送のための波形に重畳した情報伝送のための波形を取り出すためには BPF (Band Pass Filter) を用いる。

二次回路 (端末側) から一次回路 (充電器側) への情報伝送をシンプルな構成により行う方法として、一次側から見込んだインピーダンスを変化させることによる一次電流の脈動を利用する方法がある。この方法は二次側における消費電力がきわめて低いことが特長である。Fig. 6 に回路の概要を示す。整流回路や平滑回路・二次電池の抵抗分の合計を R_L としたとき、 R_L に対して並列にスイッチ素子を挿入する。このスイッチ素子を動作させることにより、一次側から見込んだインピーダンスが変化し、これにより情報を伝送することが可能となる。

6. まとめ

携帯電話をはじめとする小型小電力機器へのワイヤレスエネルギー伝送を考え、その概要とトランスフォーマの位置ずれに対する結合度の改善、充電器と端末間の情報伝送について述べた。エネルギー供給時の EMC (Electromagnetic Compatibility) 問題などについても考慮した製品開発が必要であるものの、ユーザの利便性向上のみならず汎用充電器としてのコスト低減などメリットが多く、今後普及が進むものと期待できる。

(2010.7.9:受理)

文 献

- 1) “ワイヤレス給電2010 非接触充電と無線電力伝送のすべて,” 日経エレクトロニクス, pp. 183–192, 2010
- 2) 助川直史, 青木広宙, 越地耕二: “携帯機器用非接触電力伝送コイルの形状と二次側電圧制御方法の検討,” 第23回エレクトロニクス実装学会講演大会講演予稿集, pp. 73–74, 2009
- 3) 八木 慧, 青木広宙, 越地耕二: “同一コイルを用いたモバイル電子機器用非接触電力・情報伝送システムの検討,” 第18回電磁現象及び電磁力に関するコンファレンス, pp. 233–236, 2009
- 4) T. Yamamoto, K. Koshiji, A. Homma, E. Tatsumi, and Y. Tainaka: “Development of Unified Transcutaneous Transformer for Energy and Information Transmission for a Totally-Implantable Artificial Heart,” World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering 2009, pp. 264–265, 2009
- 5) 越地耕二: “完全体内埋込型人工心臓用体外結合型経皮エネルギー伝送システム,” 平成16年度電気学会産業応用部門大会, 3-S14-4, 2004
- 6) 高橋 護, 松木英敏: “経皮コイルによる体内埋込機器動作監視に関する実験的検討,” 電気学会論文誌 A, Vol. **121**, No. 11, pp. 1025–1031, 2001
- 7) 松木英敏, 椎木元晴, 村上孝一, 撫原浩嗣, 山本孝幸: “アモルファス磁性線を用いた経皮的エネルギー伝送薄型コイルの特性,” 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. **89**, No. 86, pp. 9–16, 1989
- 8) 田村 望, 山本隆彦, 青木広宙, 越地耕二, 本間章彦, 巽英介, 妙中義之: “体内埋込型人工心臓用経皮エネルギー情報伝送システム——一体型トランスを用いた情報伝送特性の評価・検討一,” 電気学会論文誌 C, Vol. **129**, No. 6, pp. 1176–1177, 2008
- 9) 電気学会半導体電力変換方式調査専門委員会: “半導体電力変換回路,” 電気学会, pp. 91–235, 77–79, 237–256
- 10) J. Acero, P. J. Hernández, J. M. Burdío, R. Alonso, and L. A. Barragán: “Simple Resistance Calculation in Litz-Wire Planar Windings for Induction Cooking Appliances,” IEEE Transaction on Magnetics, Vol. **41**, No. 4, pp. 1280–1288, 2005
- 11) 柴 建次, 糠谷優之, 辻 敏夫, 越地耕二: “人工心臓用空心型経皮エネルギー伝送システム——体外情報による出力電圧の安定化制御一,” 生体医工学, Vol. **43**, No. 4, pp. 670–676, 2005.
- 12) F. You, S. He, X. Tang, and T. Cao: “Performance Study of a Class-E Power Amplifier with Tuned Series-Parallel Resonance Network,” IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques, Vol. **56**, No. 10, pp. 2190–2200, 2008