

高周波磁界共振方式ワイヤレス電力伝送回路

Wireless Power Transfer Circuit with High-Frequency Magnetic Resonance

石田 正明 兼清 靖弘 安部 文一郎

■ISHIDA Masaaki ■KANEKIYO Yasuhiro ■ABE Bunichiro

電力伝送距離が長いワイヤレス電力伝送システムを構築するには、ワイヤレス電力伝送回路の小型化及び高効率化や、他の無線システムへの電磁波非干渉、法的規制に適合した不要波の低減などが求められる。

東芝は、13.56 MHzを用いた高周波磁界共振方式のワイヤレス電力伝送回路を開発した。送電回路に高周波インバータ方式を採用し、受電回路に高速スイッチング素子を選定することで、電力伝送総合効率67%及び不要波抑圧60 dBcを達成した。

To realize a long-distance wireless power transfer/transmission system, circuit miniaturization, enhancement of efficiency, measures against interference with other wireless systems, and reduction of spurious emissions in accordance with legal restraints are required.

Toshiba has developed a wireless power transfer circuit with a 13.56 MHz magnetic resonance, by applying a high-frequency inverter system to the power transfer circuit and fast-switching devices to the power receiving circuit. The new wireless power transfer circuit achieves a total efficiency of electric power transfer of 67% and a 60 dBc reduction in spurious emissions.

1 まえがき

近年、スマートフォンなどの携帯端末機器では、非接触充電機能を搭載した機種が増えている。非接触充電の規格としては、ワイヤレスパワーコンソーシアムで標準化が進められているQi(チー)^(注1)規格が用いられる場合が多い。Qi規格は110~205 kHzの信号を用いて、送電コイルと受電コイル間に発生する電磁誘導現象を利用する。二つのコイルが同心軸上にあり距離が短い場合には電力伝送効率が高いが、位置がずれたり距離が長くなったりすると、急激に電力伝送効率が低くなる。

そこで東芝は、長い距離での電力伝送の効率向上を図るため、磁界共振現象を利用したワイヤレス電力伝送技術を開発している。

周波数には、工業加工装置や医療機器で用いることを前提にして割り当てられているISM(Industrial, Scientific and Medical)バンドの一つである、13.56 MHzを選択した。13.56 MHzは、非接触ICカード用RFID(Radio Frequency Identification)や、スマートフォンの財布機能用NFC(Near Field Communication)でも用いられている。このため、電力伝送コイルをNFC通信コイルと共用したり、送電機器と受電機器間の制御通信をNFCで行ったりすることができ、NFC搭載機器にワイヤレス電力伝送回路を搭載する際の回路規模増大やコスト上昇を抑えることが可能になる。しかし、Qi規格

の周波数に対して高周波化したことによる問題点も発生する。

ここでは、周波数に13.56 MHzを用いるワイヤレス電力伝送システムの、実用化に向けた課題と、今回開発したワイヤレス電力伝送回路を構成する送電回路及び受電回路において、課題を解決するために適用した技術について述べる。

2 高周波ワイヤレス電力伝送システムの実用化に向けた課題

2.1 電力伝送回路の効率向上

ワイヤレス電力伝送では高周波化するほど、単位時間当たりの電力量を大きくすることができ、使用部品の小型化により搭載機器を小型にできる。しかし、送電回路と受電回路の損失は、高周波になるほど大きくなる傾向があるため、13.56 MHzを用いるワイヤレス電力伝送システムで実用的な電力伝送総合効率を実現するには、回路損失を低減して高効率化することが課題である。

2.2 他の無線システムへの電磁波非干渉化

13.56 MHzを用いる場合、既存のRFIDやNFCに影響を与えないことが必要である。例えば、ワイヤレス電力伝送中の近傍領域にNFC搭載機器が置かれた場合、ワイヤレス電力伝送の周波数によってはNFCの通信動作ができなくなることが実験で確認されている。このように、他の無線システムに電磁波干渉を与えないように、ワイヤレス電力伝送システムの周波数を高精度に制御することが課題である。

(注1) Qiは、ワイヤレスパワーコンソーシアムの登録商標。

2.3 法的規制に適合した不要波の低減

ワイヤレス電力伝送システムにおける各種規制や法的カテゴリは整備中である。今後の実用化にあたっては、電力伝送に用いる中心周波数の精度や、中心周波数以外の周波数で漏えい電磁波強度の上限が定められ、使用環境条件なども含めて遵守すべき項目が整備される可能性がある。例えば、13.56 MHzを用いるRFIDやNFCでは、13.56 MHz ± 900 kHz内の漏えい電磁波強度を規定するスペクトルマスクや、中心周波数が13.56 MHz ± 7 kHz内になければならないという周波数偏差や安定度、中心周波数の整数倍に当たる高調波の漏えい電磁波強度などが定められている。このような法的規制に適合し、周波数変動を抑え、高調波などの不要波を低減することが課題となる。

3 ワイヤレス電力伝送回路の開発

前述した課題を解決するため、今回開発した送電回路及び受電回路に適用した技術の概要と特長を以下に述べる。

3.1 送電回路

送信電力を生成する送電回路は、表1に示すように送電回路方式により、電力伝送効率や、高調波レベル、機器形状などの特性が異なる。今回、これらの回路方式の中で、高調波が小さく、効率が低い高周波インバータ方式を選択した。伝送電力を変化させるPWM (Pulse Width Modulation) 電力制御回路を含む送電回路のブロック構成を図1に示す。

送電回路の各ブロックの動作について、次に述べる。

- (1) 発振回路 基準周波数として、電力伝送に用いる周波数の2倍の27.12 MHzを発生する。水晶発振回路を用いることで、周波数偏差が小さく、周波数安定度が高い信号が得られる。
- (2) ゲートドライブ回路 27.12 MHzを2分周して、電力伝送に用いる13.56 MHzを生成するとともに、次段のプッシュプルインバータを駆動する差動信号を生成する。
- (3) PWM電力制御回路 27.12 MHzを128分周してPWM周波数212 kHzの方形波を生成する。方形波を積

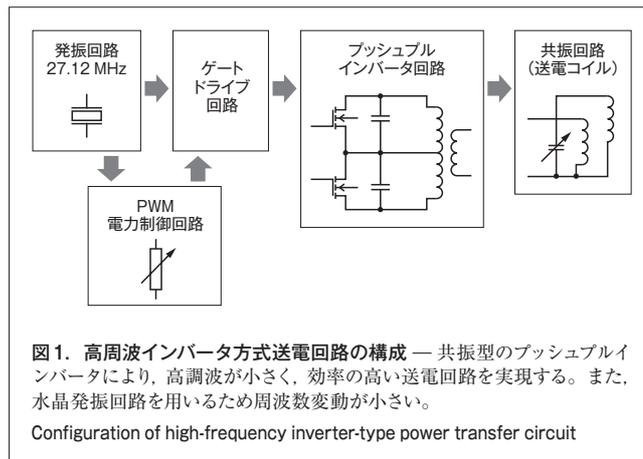


図1. 高周波インバータ方式送電回路の構成 — 共振型のプッシュプルインバータにより、高調波が小さく、効率の高い送電回路を実現する。また、水晶発振回路を用いるため周波数変動が小さい。
Configuration of high-frequency inverter-type power transfer circuit

分して三角波を生成し、電力制御電圧を三角波と比較することでパルス長に変換してPWM信号に変調する。このPWM信号でゲートドライブ回路を駆動し、電力送電時間の制御を行うことで送電電力量を制御する。電力伝送周波数と同期させることで、不要波の発生を低減する。インバータ回路の電源電圧を変える方式ではないため、送電電力変更時のパワー MOSFET (金属酸化膜半導体型電界効果トランジスタ) の動作効率は変動しない。

- (4) プッシュプルインバータ回路 ゲートドライブ回路からの信号により、13.56 MHzの送電電力を生成する。電圧共振形インバータとすることで、方形波の駆動信号を高調波の小さい正弦波の出力信号に電力変換する。これにより、損失の大きい高調波低減フィルタが不要になる。
- (5) 共振回路 (送電コイル) コイルとコンデンサによる共振回路と、共振回路に電力を注入するための給電コイルで構成する。共振回路の周波数を、電力伝送周波数13.56 MHzに一致させ共振させる。

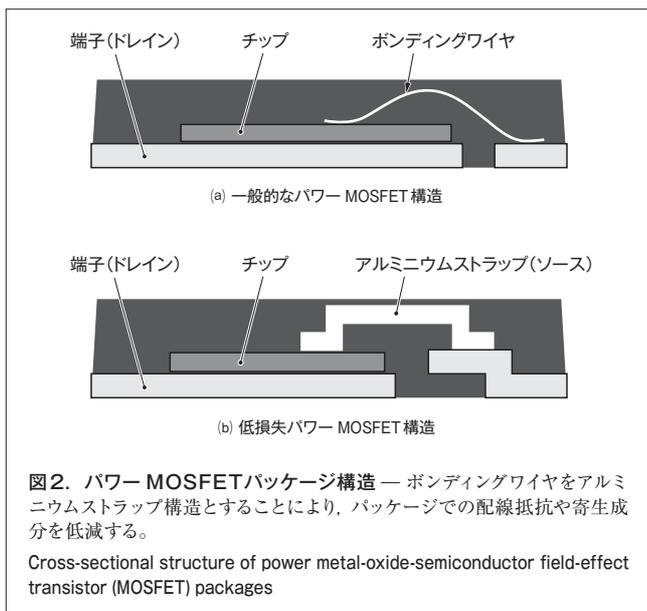
送電回路を高効率化するため、プッシュプルインバータのスイッチング素子であるパワー MOSFETがターンオンする前に、ドレイン-ソース間電圧を0 VにするZVS (Zero Voltage Switching) を採用した。更にMOSFETの出力容量を含む寄生容量を回路に取り込み、出力トランスと組み合わせて共振させることで損失の低減を図った。また、MOSFETのドレイン-ソース間電圧は共振現象によって印加電圧以上に上昇してしまうため、高耐圧デバイスを選定している。

共振型プッシュプルインバータのMOSFETには、13.56 MHzの高速スイッチングに対応するため、ゲート入力容量や寄生成分が小さい高耐圧・大電流パワー MOSFETを用いる。寄生成分が大きいと、スイッチング速度が制約され、インバータの効率が低下する。一般的なパワー MOSFETは、図2(a)のようにパッケージ内部でボンディングワイヤを用いてチップと電極を接続しているため、ボンディングワイヤによる寄生成分が発生する。今回の開発で用いたパワー MOSFETでは、図2

表1. 送電回路方式の比較

Comparison of advantages and disadvantages of power transfer circuits

回路方式	利点	欠点
高周波増幅回路方式	<ul style="list-style-type: none"> • 高調波が小さい • 電力量の線形性が良い 	<ul style="list-style-type: none"> • 効率が悪い • 部品コストが高い • 小型化が難しい
スイッチング電源方式	<ul style="list-style-type: none"> • 効率が低い • 直流からの電力生成が可能 • 部品点数が少ない 	<ul style="list-style-type: none"> • 電力量制御が難しい • 高調波が大きい
高周波インバータ方式	<ul style="list-style-type: none"> • 効率が低い • 電力量制御が可能 • 高調波が小さい 	<ul style="list-style-type: none"> • 部品コストが高い • 負荷で効率が変化

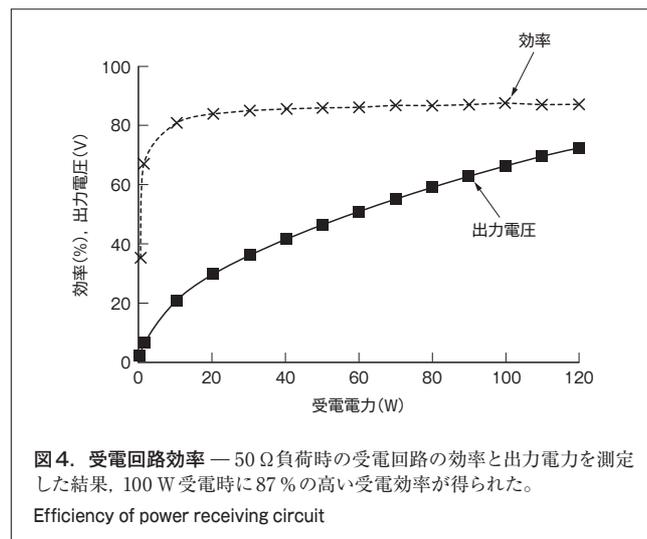
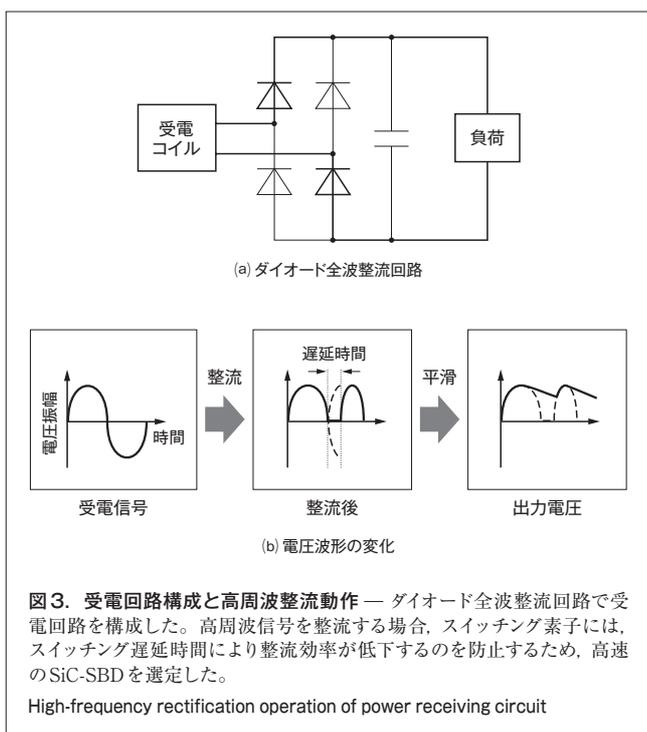


(b)のようにパワー MOSFETの内部配線にアルミニウムストラップを用いた構造を採用し、配線抵抗や寄生成分を低減している。

3.2 受電回路

受電回路は、回路構成が単純なダイオード全波整流回路を選択した。回路構成と電圧波形を図3に示す。

高周波信号を整流する場合、ダイオードがオフするまでの遅延時間に過電流による損失が発生し、効率が低下したり、整流動作しなかったりする。高周波整流回路に用いる整流素子



としては、以下を指標として選定する必要がある。

- (1) 低電圧でオンするように順方向電圧 (V_F) が小さく、かつ飽和電流 (I_F) が大きいもの
- (2) オン時の抵抗 (R_{on}) が小さく、かつ寄生容量 (C_j) が小さい自己損失の小さいもの
- (3) 逆方向電圧印加時のリーク電流が小さく、かつ回復時間が短いもの

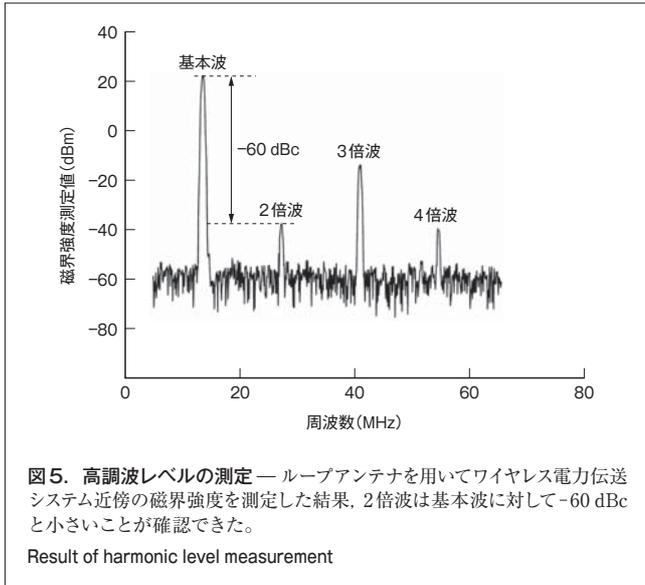
更に整流効率の低下を防ぐため、受電回路に接続される負荷に合わせて整流素子を選定する必要がある。LED (発光ダイオード) などインピーダンスが小さい大電流負荷では、 V_F が小さいSi (シリコン)-SBD (ショットキーバリアダイオード) を選定するが、消費電流が小さい負荷や電流が変動する負荷ではリーク電流が小さいSiC (炭化ケイ素)-SBDを選定する。

今回整流素子として、耐圧 600 V、スイッチング時間 (t_c) < 10 ns、トータル容量性電荷 (Q_C) = 3.2 C、 $I_F = 3$ A のSiC-SBDを選定した。50 Ω 負荷時の受電回路の整流特性評価結果を図4に示す。整流回路入力部のインピーダンス変換回路と整合回路を調整することで、100 W 受電時に 87 % の高い受電効率を得ることができた。

4 ワイヤレス電力伝送システムの不要波と効率の評価

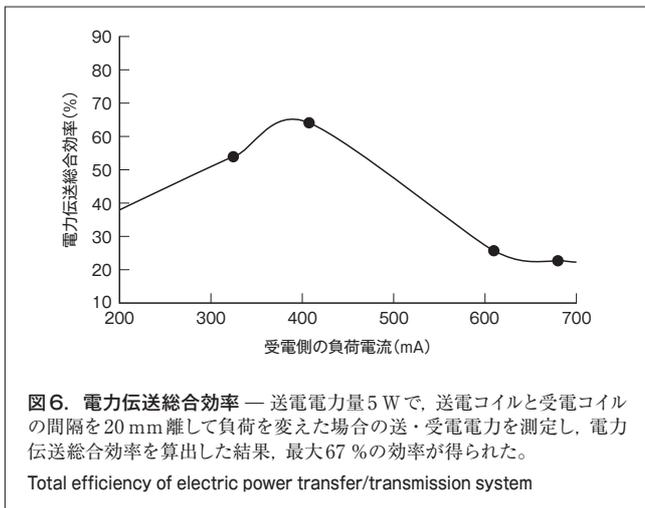
直径 10 cm の平面コイルを用いた前述のワイヤレス電力伝送回路を試作し、送電電力量 5 W のワイヤレス電力伝送実験を行った。

ループアンテナを用いて測定した高調波レベルを図5に示す。共振型プッシュプルインバータを用いた効果として、2倍波が小さいことを確認できた。3倍波が大きいが、電力伝送で用いる基本波から周波数が離れているため、低域通過フィルタの基本波周波数での低損失化は可能であり、電力伝送効率



の低下を抑えることができる。

また、送電コイルと受電コイルを20 mm離し、受電側の負荷電流を変化させて測定した電力伝送総合効率を図6に示す。電力伝送総合効率は送電回路投入電力に対する負荷消費電力の比で定義した。負荷電流400 mAのときに電力伝送総合効率の最大値として67%が得られた。負荷電流により電力伝送効率が変化する共振型プッシュプルインバータの特徴が示されており、負荷によらず高効率を実現するために例えば送電電圧を可変にするなど、システム的な工夫が必要になる。



5 あとがき

13.56 MHz磁界共振方式ワイヤレス電力伝送システム用の電力伝送回路を開発した。今回採用した高周波インバータ方式の送電回路は、水晶発振回路を用いることで周波数変動を小さくでき、また高調波発生が小さいという特長から、法的規制の遵守や他の無線システムへの与干渉低減という観点から有効な回路方式であると言える。

電力伝送の総合効率を向上させるために、送電回路ではプッシュプルインバータ回路の動作を工夫し、受電回路では低損失整流素子を選定した。更なる効率向上には、整流回路のインバータ化や、負荷の状態に合わせて構成機器の状態を最適化するチューニング機能の採用を検討する必要がある。

今後、高速制御ICや、GaN (窒化ガリウム) などの高耐圧で低損失の高速スイッチング素子が開発されることで、高周波ワイヤレス電力伝送回路の効率向上が図られる可能性もあり、引き続き実用化に向けた開発に取り組んでいく。



石田 正明 ISHIDA Masaaki

生産技術センター 実装技術研究センター研究主幹。
高周波回路の開発・設計に従事。電子情報通信学会会員。
Electronic Packaging & Assembly Technology Research Center



兼清 靖弘 KANEKIYO Yasuhiro

生産技術センター 実装技術研究センター研究主務。
高周波回路の開発・設計に従事。
Electronic Packaging & Assembly Technology Research Center



安部 文一郎 ABE Bunichiro

生産技術センター 実装技術研究センター。
高周波回路の開発・設計に従事。
Electronic Packaging & Assembly Technology Research Center