

令和元年6月19日現在

機関番号：13601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K14642

研究課題名（和文）超軽負荷領域を含む高効率な磁界共振型非接触給電システムの構築

研究課題名（英文）An Ultra-light Load Efficient Magnetic Resonance Wireless Power Transmission System

研究代表者

宮地 幸祐 (Miyaji, Kousuke)

信州大学・学術研究院工学系・准教授

研究者番号：80635467

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：体内埋め込み医療デバイスのような消費電力が少ない軽負荷デバイスへの非接触給電を想定し、出力5～100mWの範囲内で最高効率50%の電力伝送効率を目指した。送受電回路中の共振電力を最小限に維持するように送電共振器電流を一定値に留める制御、およびサブハーモニック周波数制御と Constant-Idle-Time制御を組み合わせた送電電力制御を提案した。180nm標準CMOSプロセスを用いた集積回路設計試作を行い、前者では2.4V、12mA出力時に実測にて28.2%、後者では2.4V、20mA出力時にシミュレーションにて42.0%の伝送効率を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義
回路の駆動を極力減らすため、軽負荷効率の大きな改善が実際に確認された。小電力インプラント型医療デバイスへの応用の場合、体外の送電デバイスに搭載するバッテリーの長時間駆動化や小型化に直結し、対象者のQoLの向上に大きく貢献すると考えられる。また、IoTセンサーノードへの給電を想定する場合、将来的には多数の小電力センサーや端末の同時給電の高効率化に大きく寄与すると考えられる。これは給電対象となるセンサーが多数あったとしても、その一部のみが給電を要求することが考えられるためである。これらより、将来のインフラ・医療を支える小型電子機器の基盤電源技術としての意義があると思われる。

研究成果の概要（英文）：Wireless power transfer systems for low power and light load applications such as medical implants have been developed in this research. The target end-to-end efficiency is 50% for 5 to 100mW output range. Two power transmit controls: (i) limiting resonant current of TX within constant range and (ii) combination of sub-harmonic frequency control and constant-idle-time control are proposed to suppress power consumption at the TX and RX resonant circuits. The proposed systems are implemented by standard 180nm CMOS process and system (i) achieved 28.2% efficiency at 2.4V, 12mA output by measurement while system (ii) achieved 42.0% efficiency at 2.4V, 20mA output by simulation.

研究分野：集積回路設計

キーワード：非接触給電 磁界共振 軽負荷 集積回路

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

磁界共振型非接触給電は、IoT 社会における小型センサーノードや、人工内耳、brain machine interface (BMI) 等に用いるインプラント型医療用機器など、将来のインフラ・医療を支える小型電子機器への給電に適した方法として知られるが、上記アプリケーションは時に 10mW 以下の超軽負荷領域で高効率動作を要求する。しかし、このような超軽負荷領域の非接触給電において、送電側から受電側負荷までの電力伝送効率は低いのが現状である。これは受電側の出力電圧を一定に保つ(レギュレーションする)ために送電側の LC 共振回路を常時駆動し続ける必要があることに起因している。送電電力制御により受電側出力電圧をレギュレーションするには、レギュレーション情報を送電側にフィードバックする通信が必要だが、これには受電側の LC 共振器負荷を短絡させるなどで送電側 LC 共振器の負荷インピーダンスを変化させて送電側共振振幅を変調する load shift keying (LSK) 方式が一般的に使用される[1]。LSK 方式は送受電コイルのみで電力伝送も通信も同時に行える優れた技術だが、受電側が軽負荷状態で送電をほとんど必要としない状況でも、通信のために送電側で共振状態を維持しなければならない。共振型非接触給電の損失の大半は送受電コイル間で生じるため、LSK 方式を使用する限り必然的に軽負荷時の効率が低いことがわかる。これより、既存 LSK とは異なり、軽負荷時に共振状態を維持せず出力電圧が維持可能で、共振器を必要な時のみ間欠的に駆動する新しい磁界共振型非接触給電制御の開発が必要と考えられる。

2. 研究の目的

超軽負荷領域を含む広い負荷電力範囲で高効率な磁界共振型非接触給電システムの構築を行う。具体的には、負荷電力 5mW から 100mW の範囲で送電側から受電側負荷までに 50%以上の電力伝送効率を達成する電力伝送制御の開発と集積回路による実証を行う。この目標を達成するために、以下の技術開発に取り組む。

(1) Constant-On-Time (COT) 制御を中心とした超軽負荷送電制御手法の検討と実証

背景で述べたように軽負荷時に送電を間欠的に行いながらも出力電圧を保持するために、受電側出力電圧が低下したら送電側共振器を一定時間駆動する COT 制御をベースとした新制御手法を考案し、その実現性を検討した上で集積回路設計試作にて実証する。COT 制御は高速動作 DC-DC コンバータにおいて、シンプルな動作かつ軽負荷から重負荷まで広い負荷範囲に対応することが可能なことから、近年注目されている技術であるが[2]、本研究領域では実現されていない。ここで重要なのは、送電側の共振を維持せずかつ送受電コイルでレギュレーション情報を送電側に極めて低電力で伝達する通信手段が確立できるかということである。これには、送電側の共振器駆動ドライバを止めた状態で受電側コイルを駆動し、その信号を送電側に伝達するなど考えられるが、共振器の駆動を止めた後の共振器のダイナミックな動作の解析が必須である。

(2) 送受電電力変換回路の適応的損失低減制御技術の総合開発

広い負荷範囲で損失を最小化する制御を検討・実証する。共振器の状態がダイナミックに変動する中で効率を悪化させない制御が可能かを検討する必要がある。また、適応的制御のために負荷状況を低電力で検知する機構も必要となる。

3. 研究の方法

2017 年度前半は、1 次試作に向けて研究目的のアーキテクチャの検討を理論、シミュレーションを用いながら行った。COT 制御が可能かどうかの検討、効率を向上させるための損失低減技術の検討はシミュレーションを用いて十分な時間をかけて実施した。これらの検討結果をもとに、提案制御回路の動作確認を目標とした 1 次試作集積回路設計を行い、11 月のシャトルサービスにて設計データを予定通り提出し、製造委託した。プロセスは実績と性能に十分定評のある TSMC 社 0.18 μ m CMOS プロセスを使用した。集積回路チップ納品(納期 6~8 週間)までに評価基板および共振器コイルの設計を行い、基板製造と基板への出来上がった集積回路を含めた表面実装部品の実装は外部委託した。これらの外部委託は研究開始前に既にルーチンが確立しているものである。また、集積回路、評価基板設計のための CAD は VDEC (大規模集積システム設計教育研究センター) や基板製造外注から提供されて導入が済みであり、使用に関しても習熟した状態であったため、効率的に研究が遂行された。コイル設計は非接触給電全般、コイル間磁界結合に関する知見を豊富に持つ研究協力者からの助言を受けながら進めた。

2018 年度では 2017 年度の 1 次試作の評価結果を 2 次試作へとフィードバックして 1 次試作の問題点の解決及び目標達成を目指した。2017 年度同様 11 月に同じプロセスで 2 次試作回路の設計データを提出し、評価というスケジュールで進めた。コイル設計は新たに 3 次元電磁界解析シミュレーションソフト Keysight EMPro を導入した。

4. 研究成果

2017 年度では非接触給電システムの低損失化に向けて COT 制御方式を中心に検討を予定通り行った。図 1 に 2017 年度の提案システムを示す。受電回路では、入力 V_{INP} と V_{INN} を短絡するスイッチ S で整流回路のオン・オフを実現しており、整流回路とレギュレータが一体となっている小型化に適した構成となっている。出力電圧 V_{OUT} が目標電圧 V_{TARGET} より高い時はスイッチ S をオンにし、入力端子を短絡させる事で整流動作が止まって V_{OUT} を低下させる。逆に V_{OUT} が V_{TARGET}

より低い時はSをオフにし、整流回路を一定時間動作（即ちCOT動作）させる事で V_{OUT} を上昇させる。この動作を繰り返す事により V_{OUT} をレギュレーションする。送電側も受電側の電力が足りなくなったときに必要な時間だけ送電動作させることを検討した。受電側から送電開始を送電側に通達する仕組みが必要となったが、送電パワーアンプ（PA）を止めても送電コイル L_1 および共振容量 C_1 の送電LC共振器の共振が減衰しきらず、受電側から送る信号が埋もれてしまうことがわかった。このため、送電アンプを動かすきっかけは受電側からの要請ではなく、送電共振器のエネルギーが一定値を下回ったときにすることとした。具体的には、送電共振器のコイル L_1 の交流電流を別のコイル L_{SEN} で電磁誘導結合させてモニタリングし、この交流電流が一定値未満となった時、送電アンプを起動する仕組みを考案した。送電時間は固定とし、送電もCOT制御となった。この他に、システムの効率を改善するために、受電側の整流動作のスイッチングのターンオフ時だけでなく、ターンオン時にもZero Voltage Switching (ZVS)同期を行うように制御を改良し、さらにZVS制御回路内のアナログ回路のバイアス電流に起因する静的消費電力が大きいことから、制御回路のデジタル化を進めた。2017年度では実際には2タイプの受電回路を設計している。これらの構成を $0.18\mu\text{m}$ 標準CMOSプロセスを用いた集積回路に実装し、試作した。チップ写真を図2に示す。実測評価ではCOT動作の確認を取ることができ、特に送電側COT制御がないときと比べて大幅な効率の改善が実現できた(図5参照)。2.4V出力12mA負荷時に送電側から受電側までの最大電力伝送効率率は28.2%であった。効率が伸び悩んだ要因としては、受電回路の電力が不要な時に共振器内で入力を短絡しているスイッチSで発生する導通損失が大きくなったことが考えられる。スイッチSがオンしている期間は負荷に電力が供給されないため、この期間に発生する損失は効率を大きく下げる要因となる。特に軽負荷時はスイッチSがオンしている時間が長くなるため、問題が顕著となった。また、受電回路の動作時間と送電回路の動作時間が同期していないことから、受電回路が電力を必要としない期間に送電が発生し、スイッチSでの損失がさらに悪化するなどの弊害も見られた。このことより、LSKを利用せずに送電制御を行うことは難しいと判断し、最低限の共振状態を維持するような方式を検討することとした。

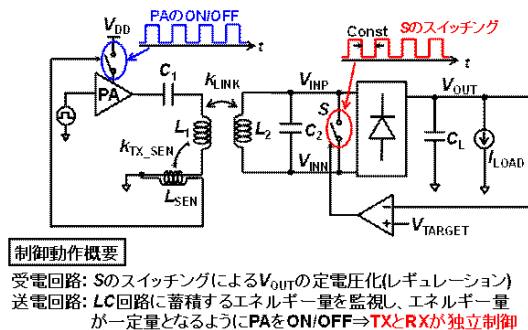


図1 2017年度COT送受電システム概要

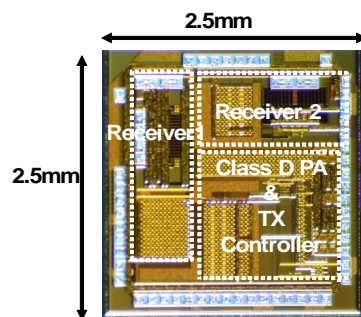


図2 2017年度COT送受電チップ写真

これらの問題点を検討した結果、2018年度では(1)電力が不要の際に受電共振器で発生する損失の低減、(2)送電と受電のタイミングが独立で連動していないことによる効率悪化の解消、(3)受電回路のバイアス電流のさらなる低減、(4)給電コイルの小型化と高効率化について注力することにした。課題(1)と(2)については、図3に示すように受電側の制御を、COT制御から、受電出力電圧が目標値を超えたら一定時間受電を止め、その後復帰するようなConstant-Idle-Time (CIT)制御（またはConstant-Off-Time制御とも呼ぶ）[1]に変更した。こうすることで最小限の共振状態を維持しながら必ず送電側から見て受電回路が電力を必要とする状況を把握可能になり、それに応じて送電電力を減らすことができるようになった。また、これにより受電共振器内で電流が再生して損失する時間も減る。送電電力を加減する方法としては制御が簡単な周波数制御を用いることにした。必要な送電電力が大きい時は送電共振器の共振周波数である13.56MHzで送電し、送電電力を中程度に抑えたい時は共振周波数の1/3の周波数である4.52MHzを用いる。これは1/3周波数の方形波に含まれる基本波は共振器の共振周波数を外れるが、3次の高調波が13.56MHzの共振周波数となっているため、実質送電電力が下がることを利用している。本研究ではさらに送電電力を下げたい場合に向けて、6.78MHzの送電周波数も利用する新サブハーモニック方式を提案する。この周波数の方形波は高調波も13.56MHzに含まれないため、実際にはほとんど電力を送らない状態を作れる。これらの周波数を組み合わせることで送電を完全に止めずとも送電電力が調整可能になり、送電と受電のタイミングも連携できるようになった。課題(3)については受電回路のZVS同期やレギュレーションに必要な制御回路のバイアス電流をさらに削減するように比較器やアンプのバイアスを不要とする構成に変更した。課題(4)については適切なコイル径と配線幅を、電磁界シミュレーションを用いて設計し、面積あたりのQ値を2~3倍向上させた。これらの改善を施した集積回路設計試作を実施した。2018年度の試作チップ写真を図4に示す。しかし、実測において評価基板の寄生容量や寄生インダクタンスの影響と思われる予期しない共振が発生したために、

受電交流回路の波形が大幅に歪み、正しいZVS整流ができなかった。シミュレーションにおいては2.4V出力20mA負荷時に送電側から受電側までの最大電力伝送効率42.0%であった(図5参照)。

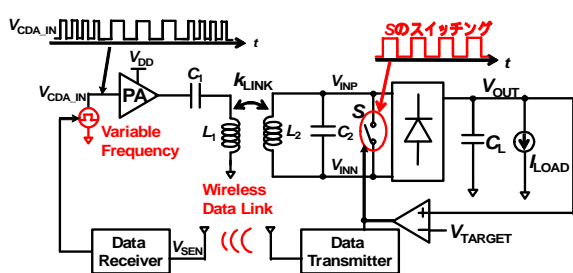


図3 2018年度CIT制御とサブハーモニック周波数制御を用いたシステム概要

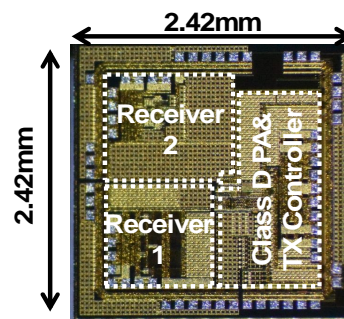


図4 2018年度CIT送受電チップ写真

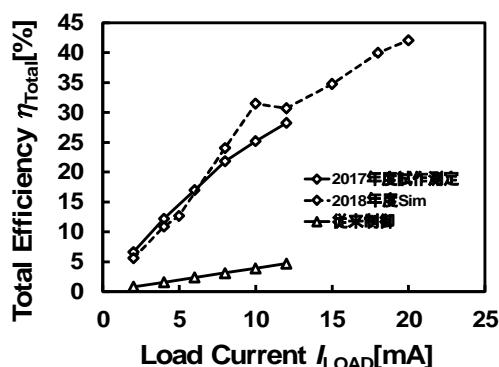


図5 試作システムの効率-負荷電流特性

体内埋め込み医療デバイスのような発熱が厳しく制限され、消費電力が少ない軽負荷デバイスへの非接触給電において入出力50%の電力伝送効率を目指した。共振状態を最小限維持するように送電電力量を動的に減らして調整する制御を提案した、実測で従来制御の6倍近い効率の改善が得られたものの、現状はレギュレーションのために受電回路において不連続的に整流と回生が切り替わるため、ZVS同期のためのフィードバックが不連続になり、ZVSがうまくできていないことが課題として判明している。今回の研究期間内に目標効率の実証はできなかったが、改善の効果は認められたため、目標到達の道筋は見えたと考える。

<引用文献>

- [1] C. Huang, T. Kawajiri, and H. Ishikuro, "A 13.56-MHz Wireless Power Transfer System With Enhanced Load-Transient Response and Efficiency by Fully Integrated Wireless Constant-Idle-Time Control for Biomedical Implants," IEEE J. Solid-State Circ., vol. 53, pp. 538-551, 2018.
- [2] B. Sahu, and G. A. Rincon-Mora, "An Accurate, Low-Voltage, CMOS Switching Power Supply With Adaptive On-Time Pulse-Frequency Modulation (PFM) Control," IEEE Trans. on Circuits and Systems I, vol. 54, pp. 312-321, 2007.

5. 主な発表論文等

[学会発表](計 7件)

土屋 智紀, 浅野 孝紘, 宮地 幸祐, 体内埋め込み型医療デバイス向け非接触給電システムにおける電力伝送用コイルの低損失化及び小型化の検討, 電気学会, マグネティックス/リニアドライブ合同研究会, 2019, 発表予定.

鈴木 大, 浅野 孝紘, 土屋 智紀, 石田 涼, 宮地 幸祐, 体内埋め込み型医療用デバイス向け非接触給電回路の送電電力制御と受電整流制御による高効率化, 電子情報通信学会集積回路研究会 LSI とシステムのワークショップ, ポスター発表 13, 2019.

浅野 孝紘, 與五沢 啓太, 西田 純也, 宮地 幸祐, 体内埋め込み型医療デバイス向け非接触給電回路における整流器のスイッチング比に応じた送電電圧可変回路の設計, 電磁力関連のダイナミクスシンポジウム, 5-2-05, 19-24, 2018.

浅野 孝紘, 與五沢 啓太, 西田 純也, 鈴木 大, 土屋 智紀, 宮地 幸祐, 体内埋め込み型医療デバイス向け非接触給電回路における Constant On Time 制御を用いた送電電力制御回路の設計, 電磁力関連のダイナミクスシンポジウム, 5-2-06, 25-30, 2018.

鈴木 大, 浅野 孝紘, 宮地 幸祐, 軽負荷動作に対応する CMOS 全波整流器の ZVS 制御を用いた非接触給電受電回路の設計とその評価, 電磁力関連のダイナミクスシンポジウム, 5-2-07, 31-36, 2018.

西田 純也, 浅野 孝紘, 鈴木 大, 宮地 幸祐, Delay-Locked Loop 制御を用いた立ち上がりおよび立ち下りエッジゼロ電圧スイッチング非接触給電回路の設計とその評価, 電磁力関連のダイナミクスシンポジウム, 5-2-12, 53-58, 2018.

土屋 智紀, 浅野 孝紘, 宮地 幸祐, 低消費電力非接触給電システムにおける電力伝送用コイル設計手法の検証, 電磁力関連のダイナミクスシンポジウム, 3-8-10, 470-475, 2018.

〔その他〕

ホームページ等

<http://soar-rd.shinshu-u.ac.jp/profile/ja.yenpWFLa.html>

https://researchmap.jp/kousuke_miyaji/

<http://www.shinshu-u.ac.jp/faculty/engineering/chair/elec024/>

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8桁）：

(2)研究協力者

研究協力者氏名：水野 勉

ローマ字氏名：(MIZUNO, Tsutomu)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。