

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 24 日現在

機関番号：51303

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26350687

研究課題名(和文)ワイヤレス充電時のインピーダンス変化に基づく充電情報計測システムの実践的検証

研究課題名(英文) Estimation of Wireless charge situations from Primary electric parameters in Wireless power transfer

研究代表者

佐藤 拓 (Sato, Taku)

仙台高等専門学校・電気システム工学科・准教授

研究者番号：30451545

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：我々はこれまで充電式心臓ペースメーカーの研究を進めてきた。体内に埋め込んだ心臓ペースメーカーの充電状況を体外から推定することは出来なかった。そこで我々は充電状況に応じて2次側インピーダンスが変化することに着目し、体内からの電気パラメータから充電状況を推定する方法を提案した。本研究では充電制御に必要な体内パラメータを体外側パラメータから推定する方法について検討したので報告する。更に、サイズやコストの面から矩形波によるワイヤレス給電を想定し、矩形波駆動におけるインピーダンス推定についても検討したので報告する。

研究成果の概要(英文)：We have been researching the rechargeable cardiac pacemaker. It is difficult to estimate the charge situation from outside the body. We focused on the secondary impedance value which changes according to the charge status. We proposed the method to check the charge situation by estimating the secondary electric parameters from primary ones of outside the body.

In this study, we verified the estimated method of several secondary electric parameters from primary ones of the outside the body. And we focused on rectangular waves drive that can be made easier than sine waves drive to reduce the size and cost. We verified the secondary impedance estimation in wireless power transfer using the square wave drive.

研究分野：エネルギー変換

キーワード：ワイヤレス給電 ワイヤレス充電 充電状況 WPT

1. 研究開始当初の背景

日本における心臓ペースメーカ市場は 465 億円 (2004) にのぼり医療機器で最大規模である。その心臓ペースメーカは電池が消耗するたびに本体ごと交換手術が必要であり、資源の無駄となっている。これを解決するために電磁誘導を用いた体内植え込み機器用ワイヤレス充電システムの開発を進めている。埋め込み機器であるのでその特性上、外部から充電ランプなどで視覚的に充電状況を確認することができない。それを解決するために、充電状況推定法を提案し、更に矩形波伝送による電力制御システムについても研究を進めている。

2. 研究の目的

ワイヤレス充電時の体内に埋め込まれた機器の充電状況を測定し充電制御するために、ここでは充電状況に応じて二次側インピーダンスが変化することに着目し、一次側 (体外側) からその変化を計測するシステムを提案する。本研究課題では若手研究 (b) (24700602) で提案した充電状況推定システムの改良を行い、更には矩形波を用いたワイヤレス給電においても充電状況の推定が可能かを検証することを目的とし、より実用化に向けた実践的検討を行うものである。

3. 研究の方法

(1) ワイヤレス充電式心臓ペースメーカの構想

図1にワイヤレス充電式心臓ペースメーカの構想を示す。電磁誘導を用いて体外側からチタンケースで密閉されたペースメーカ本体内の2次コイル (受電コイル) へワイヤレスに電力伝送しペースメーカ内の2次電池を充電する。

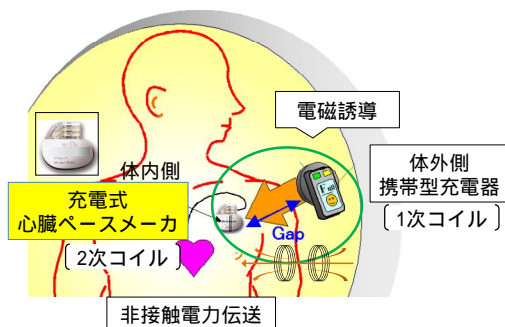


図1 ワイヤレス充電式心臓ペースメーカの構想図。

(2) ワイヤレス充電時の電気パラメータの時間変化

図2にリチウムイオン電池の充電を行った時のバッテリー端子電圧、充電電流および2次側インピーダンスの時間変化の一例を示す。充電制御は充電初期 (電池残量低) には定電流充電を行い、満充電に近づくにつれて定電圧充電へと切り替わる充電制御を行う。2次側インピーダンスは充電が進むにつれて増

加する特性が得られ、充電完了付近の変化率は大きくなる。つまり2次側インピーダンスの時間変化はバッテリーの充電量に対応していると言え、このインピーダンス変化を捉えることで充電量 (電池残量) を判断する。

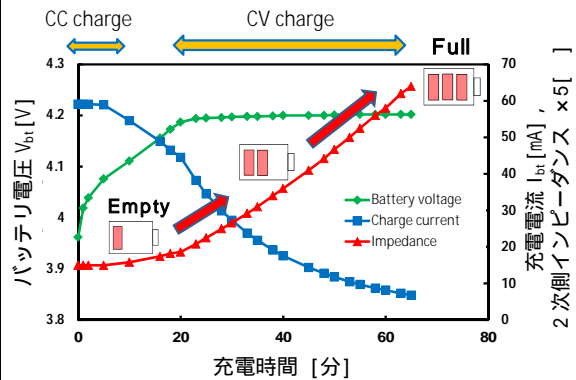


図2 充電時におけるバッテリー電圧, バッテリー電流, 2次側インピーダンスの時間変化。

(3) 実験内容

心臓ペースメーカは体内に埋め込まれる装置のために、バッテリーの充電状況を視認することができない。そこでワイヤレス充電時に体外側からペースメーカの充電状況 (電池残量, 位置ずれ, 2次側電流, 2次側電圧など) を推定する方法を提案し、以下の評価実験を行う。

結合係数  $k$  を捉えることによってワイヤレス給電時の位置ずれ警告や最適位置の検出が可能となる。

従来提案では、ワイヤレス充電時の2次側インピーダンス変化を捉えていたが、ここでは2次側電流および2次側電圧の時間変化も捉えることで、より正確な充電状態を把握できるシステムを目指す。

2次側パラメータの推定

・結合係数  $k$  の推定

ワイヤレス充電時に位置ずれが起きた場合、伝送効率の低下を招く。そこで最適位置を検出する方法としてワイヤレス給電時に体外側から測定可能な電気パラメータからコイル間の結合度 (結合係数  $k$ ) を推定する方法を提案し、その有用性を評価する。なお、伝送には正弦波を用いる。

・2次側電流および2次側電圧の推定

同様に、2次側電流、2次側電圧についても推定方法 (推定式) を提案し、実際のワイヤレス給電においてこれらの推定を行い、その有用性を評価する。なお、伝送には正弦波を用いる。

矩形波ワイヤレス給電の検討

・矩形波ワイヤレス給電時の2次側インピーダンス推定

実用化の点から矩形波駆動 (インバータ駆動を想定) におけるワイヤレス給電において充電状況を推定するための方法を検討する。

・矩形波ワイヤレス充電の電力制御時における2次側パラメータ推定

Duty 比を変えることによるワイヤレス給電の送電電力制御下においても、2次側パラメータが推定可能かを検証、評価する。

#### 4. 研究成果

(1) 2次側パラメータの推定の評価

結合係数  $k$  の推定の評価

最適位置を検出するためのコイル間の結合係数  $k$  を推定する式 ((1)式) を図3の等価回路より導出した。

$$k = \sqrt{\frac{(Z_1 \cos \theta - (R_1 + R_0)(R_2 + R_L))}{\omega^2 L_1 L_2}} \quad (1)$$

正弦波を用いたワイヤレス充電時に1次側(体外側充電器)で計測可能な  $Z_1 \cos$  の値を(1)式に代入することで結合係数を推定できる。ただし、 $R_L$  は二次側インピーダンスであり、充電の進行状況によって変化するが図2のように充電後半で急激に増加するまではほぼ一定であるためここでは  $R_L=100$  固定値を代入して用いる。

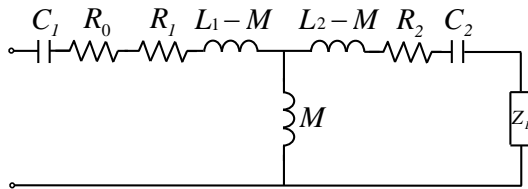


図3 ワイヤレス給電の等価回路。

コイル間 gap 10 mm で横ずれを左右 0 ~ 30 mm に変化させたときの結合係数の推定結果を図4に示す。どの位置ずれの状態でも良好な推定が可能であることが確認できた。また、図5のように  $R_L=100$  以外を代入した場合には正確な結合係数を推定することはできなかったが  $R_L$  の値によらず結合係数最大となる位置ずれ位置は同じであり、ワイヤレス充電の最適位置の検出には  $R_L$  を定数として扱っても実用上問題無いと言える。

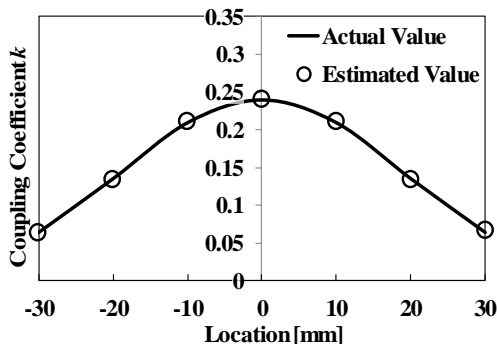


図4 結合係数  $k$  の推定 ( $R_L=100$  固定時)

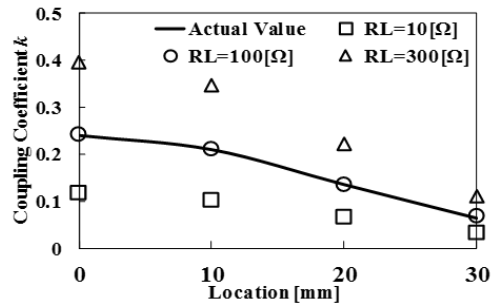


図5  $R_L$  の値による結合係数  $k$  の推定

2次側電流および2次側電圧の推定評価

コイル間 gap=10 mm において負荷として純抵抗  $R_L$  を 50 ~ 300 に変化させたときの2次側電流の推定結果を図6に、2次側電圧の推定結果を図7に示す。図6の2次側電流推定結果より推定値が2次側電流の変化の傾向を良好に捉えていることが分かる。図7の2次側電圧推定の結果では各点において推定値が実測値を僅かに上回ったが実測値に追従して良好な推定結果が得られた。

続いて、実際のワイヤレス給電によるバッテリー充電時の2次側電流推定の結果を図8に示す。充電 IC の充電特性から前半は定電流充電であり、充電後半は電流が減少を示しているのが分かる。推定結果は実測値を若干下回っているが、その特徴的な減少傾向に追従できていることが分かる。推定値が実測値を下回った原因としては整流回路の非線形素子が含まれるために2次側の力率が1にならず、推定式上で考慮していない状況が発生したためと考えられる。しかしながら、力率は充電状況によらずほぼ一定値(0.8程度)であるので、推定式内で係数の重みづけなどで補正することが可能である。

以上より、これまのでインピーダンス推定のほか、新たに提案した推定式による結合係数、2次側電流および2次側電圧の推定が十分に可能であることが今回明らかになり、より信頼性の高い実用的な充電システムの実現に繋がる研究成果を得ることができた。

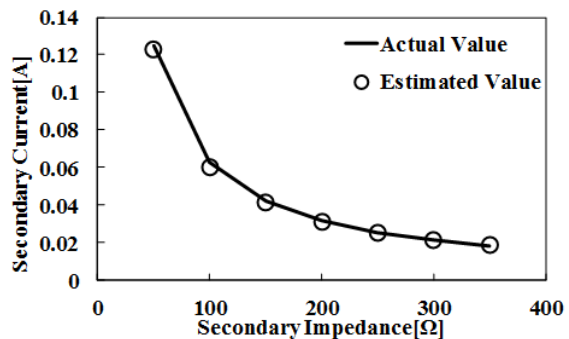


図6 2次側電流の推定(正弦波駆動)

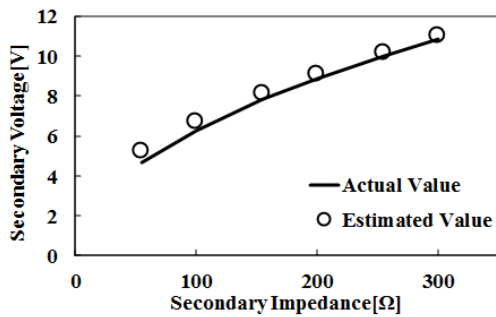


図7 2次側電圧の推定（正弦波駆動）

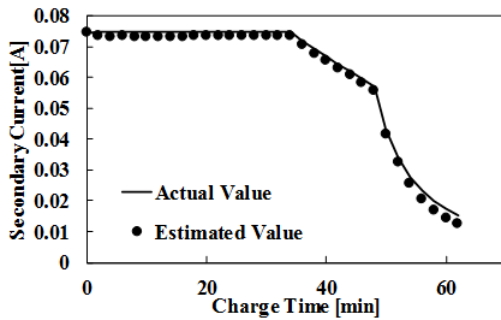


図8 ワイヤレス給電によるバッテリー充電時の2次側電流の推定（正弦波駆動）

(2) 矩形波ワイヤレス給電時の検討  
矩形波ワイヤレス給電時の2次側インピーダンス推定

図9に矩形波を用いたワイヤレス給電時の二次側インピーダンス推定の結果の一例を示す。2次コイルはチタンケースに収めた実装状態での推定結果である。実線は真値(実測値)を表しており、推定値がこの直線に近いほどより正確に推定できていると言える。図9ではDuty比によって推定値が実測値から離れる傾向ではあるが線形性が確認された。そこで図10から各duty比における $R_0$ を線形近似より求めて推定式に代入し、再推定した結果が図11である。各duty比における推定値が実測値に近づき矩形波交流を用いた場合でも、正弦波同様に良好な推定が可能であることが分かった。

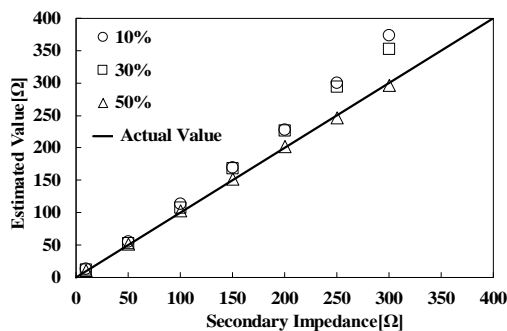


図9 矩形波ワイヤレス給電でのインピーダンス推定（Duty50%での $R_0$ を用いた場合）

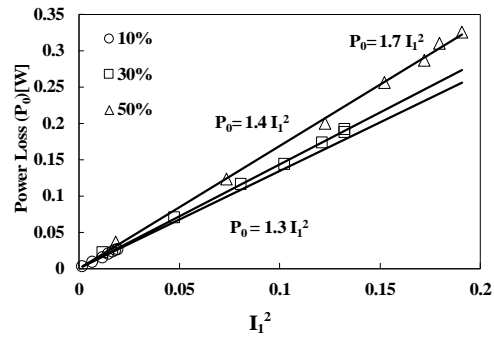


図10 矩形波ワイヤレス給電時の各dutyにおける $R_0$ の算出

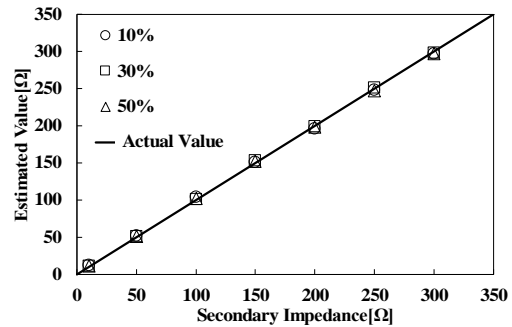


図11 矩形波ワイヤレス給電でのインピーダンス推定（各Dutyでの $R_0$ を用いた場合）

電力制御した場合の矩形波ワイヤレス給電時の各パラメータ推定の評価

一般的な充電ICの制御方法として充電開始時は定電流充電を行い、充電後半は定電圧充電に切り替わる。それに伴い、充電に必要な電力は少なくなる。ワイヤレス給電では一定の電力を供給するため、充電後半は過送電・可電圧状態となり、充電ICの発熱や破損をもたらす。そのため、投入電圧を手動で調整する必要があった。

ここでは矩形波交流のduty比50%から増減させることで効率一定のまま送電電力を調整する手法をはじめて提案し、その有用性を評価する。

図12にduty比制御によるワイヤレス給電時の2次側インピーダンス推定の結果を示す。矩形波交流のduty比は50%を最大電圧とし、そこからduty比を変えることで、1次側電圧の実効値を下げることで、過剰送電にならないように送電電力を制御する。

図12の実験結果に示すように、duty比を制御することで、過送電を防止することに成功している。さらに、インピーダンス推定においては充電完了の目安となる充電後半の急激な時間変化もduty比制御の影響を受けずに良好にインピーダンスを推定できることが確認できた。

以上より、duty比制御による送電電力の制御とインピーダンス推定が可能であることが本研究によって明らかになり、充電システ

△の実用化に向けて大きな研究成果を得ることができた。

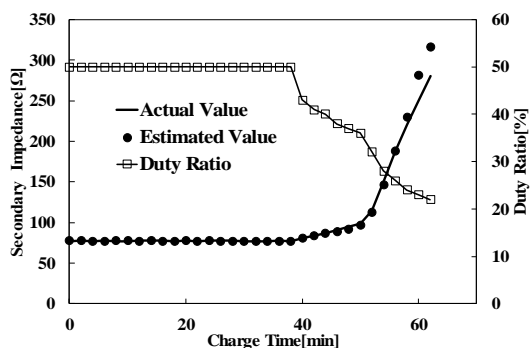


図 12 duty 比制御によるワイヤレス給電時の 2 次側インピーダンス推定

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 19 件)

佐藤拓, 伊藤敦弥, 轡田拓也, 加藤立太, 「充電式心臓ペースメーカーを想定した矩形波ワイヤレス電力伝送の検討」, 第 41 回日本応用磁気学会学術講演会, 2016 年 9 月 8 日, 金沢大学工学部 (石川県・金沢市)

轡田拓也, 伊藤敦弥, 加藤立太, 佐藤拓, 「矩形波交流を用いた充電式心臓ペースメーカー用ワイヤレス給電の検討」, 平成 28 年度電気学会東北支部連合大会, 2016 年 8 月 30 日, 東北工業大学 (宮城県・仙台市)

加藤立太, 伊藤敦弥, 轡田拓也, 佐藤拓, 「矩形波を用いたワイヤレス電力伝送の考察」, 平成 28 年度電気学会東北支部連合大会, 2016 年 8 月 30 日, 東北工業大学 (宮城県・仙台市)

伊藤敦弥, 轡田拓也, 佐藤拓, 山田洋, 松木英敏, 「心臓ペースメーカー用矩形波伝送ワイヤレス給電における充電状況推定」, 2016 年 3 月 18 日, 平成 28 年電気学会全国大会, 東北大学工学部 (宮城県・仙台市)

轡田拓也, 伊藤敦弥, 佐藤拓, 山田洋, 松木英敏, 「心臓ペースメーカー用ワイヤレス給電における金属の充電状況推定へ及ぼす影響」, 2016 年 3 月 18 日, 平成 28 年電気学会全国大会, 東北大学工学部 (宮城県・仙台市)

佐藤拓, 酒井紀元, 松木英敏, 「充電式心臓ペースメーカーを想定した充電状況推定方法の評価」, 第 40 回日本応用磁気学会学術講演会, 2015 年 9 月 8 日, 名古屋大学工学部 (愛知県・名古屋市)

伊藤敦弥, 轡田拓也, 佐藤拓, 松木英敏, 「矩形波電圧による充電式心臓ペースメーカー用非接触電力伝送における充電状況推定」, 平成 27 年電気関係学会東北支部連合大会, 2015 年 8 月 27 日, 岩手県立大学 (岩手県・滝沢市)

轡田拓也, 伊藤敦弥, 佐藤拓, 松木英敏, 「充電式心臓ペースメーカー用非接触電力伝送における金属板の充電状況推定に及ぼす影響」, 平成 27 年電気関係学会東北支部連合大会, 2015 年 8 月 27 日, 岩手県立大学 (岩手県・滝沢市)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

佐藤 拓 (SATO, Taku)

仙台高等専門学校・電気システム工学科・准教授

研究者番号: 30451545