

空心型トランスフォーマを用いた
体内埋込型人工心臓駆動用経皮エネルギー伝送システム
—コイル間結合度向上と周辺回路の検討—

Transcutaneous Energy Transmission System

for a Totally-Implantable Artificial Heart Using Coreless Transformer

-Improving the Coupling Characteristics between Coils and Examination of Peripheral Circuit-

○ 若林春貴 (東京理大) 山本隆彦 (東京理大) 越地耕二 (東京理大)

大沼健太郎 (国循) 住倉博仁 (国循) 本間章彦 (電機大) 巽英介 (国循) 妙中義之 (国循)

Haruki WAKABAYASHI, Tokyo University of Science

Takahiko YAMAMOTO, Tokyo University of Science

Kohji KOSHIJI, Tokyo University of Science

Kentaro OHNUMA, National Cerebral and Cardiovascular Center Research Institute

Hirohito SUMIKURA, National Cerebral and Cardiovascular Center Research Institute

Akihiko HOMMA, Tokyo Denki University

Eisuke TATSUMI, National Cerebral and Cardiovascular Center Research Institute

Yoshiyuki TAENAKA, National Cerebral and Cardiovascular Center Research Institute

Abstract: In order to supply electric power for driving a total artificial heart (TAH), transcutaneous energy transmission (TET) is a useful way in viewpoint of QOL and infectious disease. We have been studying on the TET system with the transcutaneous transformer using coreless coils in cosmetic view. However, it is necessary to use the coreless coils with a large diameter in order to transmit the energy with a little temperature rise and high efficiency. This paper reports on miniaturizing the dimensions of internal and external coils and improving the coupling characteristics between those coils. Additionally, using a synchronous rectification circuit instead of conventional diode rectifier, we investigated improving the circuit efficiency inside the body. As a result, the voltage drop in the rectifier was reduced, and using the synchronous rectification circuit suggested improving the circuit efficiency inside the body.

Key Words: TAH, TETS, coreless coil, miniaturizing, QOL, synchronous rectification

1. はじめに

医療機器におけるワイヤレス電力伝送技術は、非接触や非侵襲といった言葉に代表されるように、体内埋込型の機器へのエネルギー供給方法として不可欠な技術である。体内埋込型人工心臓へのワイヤレス電力伝送は、経皮エネルギー伝送システム (Transcutaneous Energy Transmission System : TETS) ⁽¹⁾と称される。TETSは、皮膚を介して設置された二つのコイル間の電磁誘導により、体内にエネルギーを伝送するシステムである。TETSで使用される空心型経皮コイル⁽¹⁾は、患者の Quality of Life (QOL) の観点から体内コイルが小型であることが望ましい。しかしながら小型化することによって、結合度の低下が発生し、高い伝送効率を実現することが困難となる。

そこで本稿では、TETS に用いる体内側の空心型経皮コイルの寸法を、埋め込み可能である寸法 (外直径 50 mm) に固定し、この体内コイルに対して結合度の観点から体外コイルの寸法の検討を行った。また体内に埋込む周辺回路として、P型とN型の Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (MOSFET) を用いた同期整流回路について、シミュレーションを用いて検討を行ったので報告する。

2. TETSの概要

Fig.1 に代表的な TETS の概要を示す。体外側においては直流安定化電源または電池を電源とし、スイッチング回路により数百 kHz の交流電力に変換される。変換された交流電力は体表面および皮下に設置された二つの経皮コイルを介し、電磁誘導により体内へ伝送される。伝送

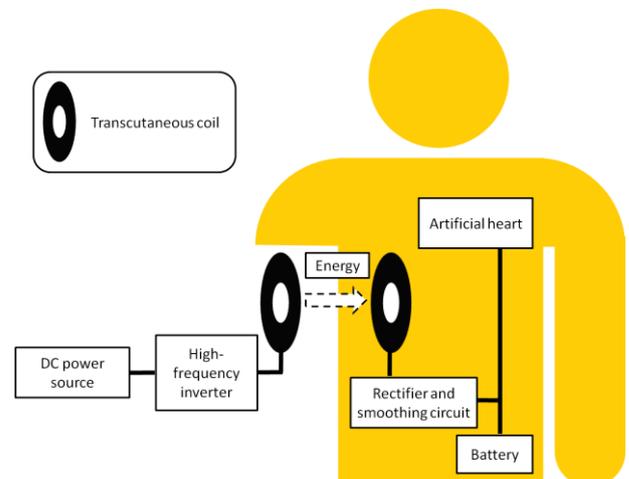


Fig.1 TETS for artificial heart

された交流電力は整流平滑回路により直流電力に変換され、人工心臓の駆動および体内の二次電池への充電に用いられる。

3. 空心型トランスフォーマ

TETS に用いられる経皮コイルとして、空心型や体外結合型などが開発されているが、本稿では Cosmetic な観点などから扁平な空心型を採用した。

Fig. 2 に空心型経皮コイルの外観を示す。Fig. 3 に空心型経皮トランスフォーマを中心とした TETS の交流部分の等価回路を示す。L₁, L₂ はそれぞれ一次側 (体外側)、二次側 (体内側) のコイルの自己インダクタンス、r₁, r₂ はこれらの巻線抵抗、C₁, C₂ は伝送効率を向上させるために一次側、二次側にそれぞれ挿入する直列共振用のキャパシタ、M はコイル間の相互インダクタンス、R_L は人工心臓、整流平滑回路、二次電池などを等価的に表した負荷抵抗である。

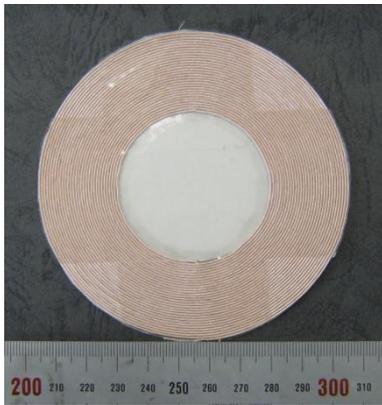


Fig. 2 Appearance of coreless coil

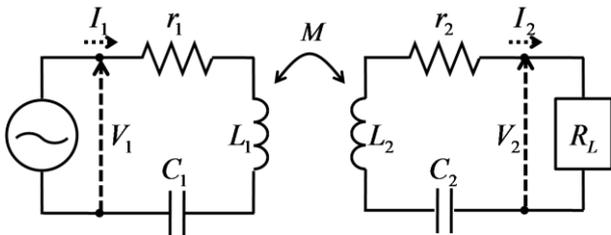


Fig. 3 Equivalent circuit to transcutaneous transformer

4. 一次コイル

二次コイルは QOL や外観などの観点から、小型にすることが望ましい。そこで体内に埋め込むことを考慮して、コイルの外直径を 50 mm、内直径を 25 mm とした。

一次コイルは体外に設置するため、二次側に比較して外直径を大きくできる。このため、外直径 50 mm の二次コイルに適した一次コイルの寸法を結合度の観点から検討した。

一次コイルの内直径を二次コイルと同様に 25 mm とし、外直径を 50~90 mm の範囲で変化させて試作した。使用した巻線は、表皮効果を考慮して 0.05 mmφ、120 本束のリッツ線である。試作したコイルのインダクタンス及び巻線抵抗を Fig. 4、結合係数を Fig. 5 に示す。なお、コイル間の距離は皮膚の厚さおよびコイルをコーティングするシリコンの厚さを考慮して 10 mm とした。

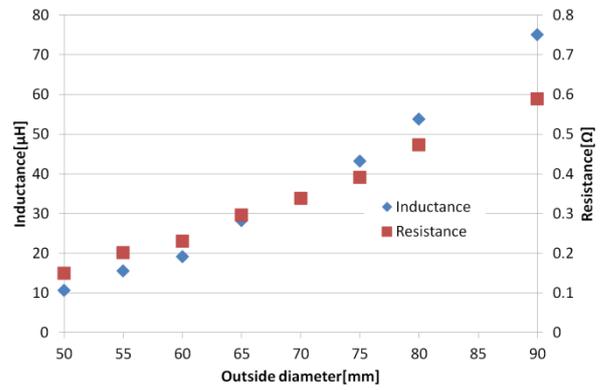


Fig. 4 Inductance and resistance of coils

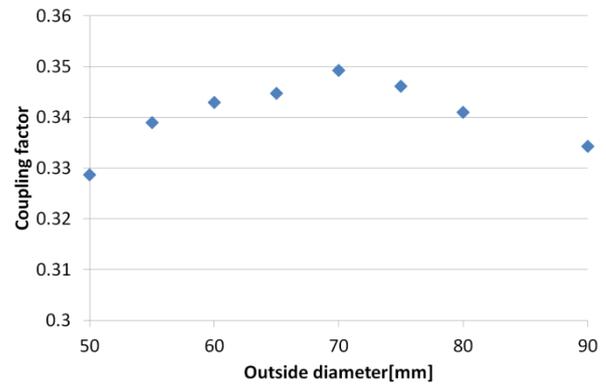


Fig. 5 Measurement result of coupling factor

Fig. 5 から、結合係数は外直径 70 mm のとき最大値 0.350 を示し、70 mm 以上では漏れ磁束が多くなったため、結合度が減少した。以上の結果から、結合度の観点から二次コイルの外直径 50 mm に対する適した一次コイルの寸法は、外直径 70 mm のコイルと決定できる。

5. 自己インダクタンス

コイルを小型にすると、相互インダクタンスが低下する。これは伝送効率の低下の原因となる。相互インダクタンスを M、結合係数を k とすると、(1)式のように表せる。

$$M = k\sqrt{L_1L_2} \tag{1}$$

相互インダクタンスを大きくするためには結合度および自己インダクタンスを増加させる必要がある。結合度はコイルの寸法やコイル間の距離に依存して決まる。そこで、コイルの寸法を固定した状態で自己インダクタンスを増加させる方法について検討を行った。本稿では内直径 25 mm、外直径 50 mm と寸法を固定した状態において、コイルの巻数を変化させた。

断面積の太いリッツ線 (0.05 mmφ、120 本束、0.075 mm²) を一層構造で作成したコイル A と断面積の細いリッツ線 (0.10 mmφ、15 本束、0.0375 mm²) を一層構造で作成したコイル B の自己インダクタンスおよび巻線抵抗を比較した。結果を Table1 に示す。

Table1 Result of comparison

Coil	A(single layered)	B(single layered)
Inductance[μH]	10.66	22.63
Resistance[Ω]	0.150	0.481
Coil turn	15	22

Table1 よりコイル B はコイル A より自己インダクタンスが 2.12 倍高い。しかしながら巻数の増加や巻数断面積が小さいため巻線抵抗が 0.33 Ω 高いことが分かる。巻線抵抗の増加は発熱の増加につながる。そこで巻線抵抗の増加を抑制しつつ自己インダクタンスを増加させるために、コイル A を二層構造にしたコイル C を作成し、比較した。結果を Table2 に示す。

Table2 Result of comparison

Coil	A(single layered)	C(double layered)
Inductance[μH]	10.66	39.17
Resistance[Ω]	0.150	0.342
Coil turn	15	30

Table2 よりコイル C はコイル A の 3.67 倍の自己インダクタンスを有することが分かる。また巻線抵抗の増加はコイル B に比べて 0.14 Ω 抑えられた。このことから、実際にコイルを設計する上で必要な自己インダクタンスを得る際に、断面積の太いリッツ線を多層化の方が有効であることが分かる。

6. 整流回路の検討

整流回路にはダイオードを用いた整流方式(ダイオード整流)と MOSFET を用いた整流方式(同期整流)がある。全波整流のダイオード整流は、ダイオード 4 個のみとシンプルに構成することができるが、順方向バイアスによる電圧降下が大きく生じる。このため低電圧負荷に対しては伝送効率が低下する欠点がある。同期整流は MOSFET を用いるためダイオードと比較して電圧降下を大幅に低減でき、伝送効率の改善が期待できる。しかしながら制御が複雑であるため、専用の IC を用いるなど部品点数が増加する。これは回路の大型化につながるため、患者の QOL の低下をまねく恐れがある。

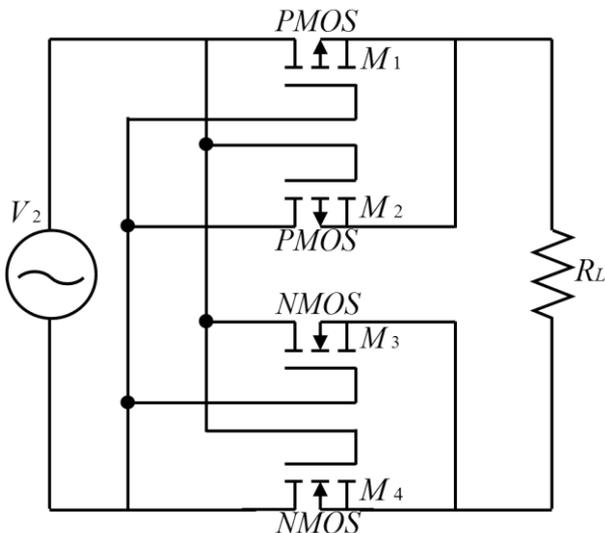


Fig. 6 Synchronous rectification circuit

そこで、ここでは P 型と N 型の MOSFET の特性を利用し、自己制御をする同期整流回路を提案し、TETS への適用を検討した。

提案した同期整流回路を Fig. 6 に示す。ハイサイド側は P 型の MOSFET (PMOS)、ローサイド側は N 型の MOSFET (NMOS) を用いている。V₂ は経皮トランスを介して伝送された出力電圧、R_L は人工心臓を模擬した負荷抵抗である。

V_{GS} をゲートソース間電圧、V_{th} をしきい値電圧とすると PMOS は V_{GS}-V_{th}<0 でゲートがオンになり、NMOS は V_{GS}-V_{th}>0 でゲートがオンになる。V₂ による正弦波の正の半周期においては、M₁ において V_{GS}-V_{th}<0、M₄ において V_{GS}-V_{th}>0 となるため、電流は M₁→R_L→M₄ と流れる。負の半周期においても同様に M₂→R_L→M₃ と流れる。

同期整流とダイオード整流の比較を電子回路シミュレータ (LTspice, Linear Technology) を用いて比較した。一例として入力電圧 V₂ は振幅 20 V、300 kHz の正弦波とした。R_L には人工心臓を駆動するため電圧 20 V において電流 1 A 流れることを想定して 20 Ω とした。またダイオードにはシリコンダイオードを使用した。結果を Fig. 7 に示す。

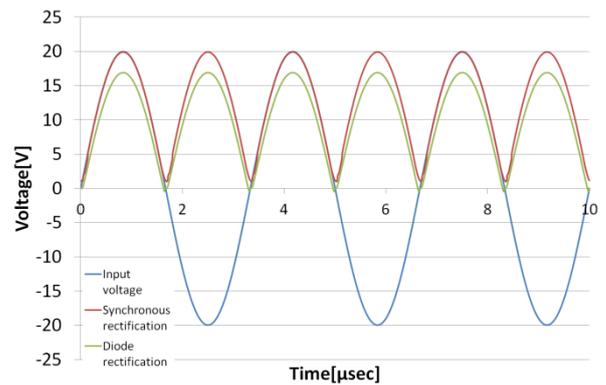


Fig. 7 Result of simulation

ダイオード整流では 3 V 電圧降下が生じているが、同期整流では 1 V 未満と電圧降下が低減され、今回提案した同期整流回路が TETS エネルギー伝送効率改善に有効であることが示唆された。

7. まとめ

本稿では、二次コイルの小型化し、これに適した一次コイルを、コイル間の結合度の観点から検討した。その結果二次コイルの外直径 50 mm に対し、一次コイルは内直径を二次側と同じ寸法とし、外直径を 70 mm にしたときに、コイル間距離 10 mm において結合係数 0.350 を実現した。また P 型と N 型の MOSFET を用いて自己制御型同期整流回路を提案し、ダイオード整流にくらべて電圧降下が低減され、提案した回路がエネルギー伝送効率改善に有効であることを示した。

参考文献

- (1) 柴建次, 糠谷優之, 辻敏夫, 越地耕二, 人工心臓用空房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—, 生体医工学, vol. 43, no. 4, pp. 670-676, 2005.