

令和 3 年 8 月 18 日現在

機関番号：12614

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13936

研究課題名（和文）自律型無人潜水機に適した複数送受電コイルを有する非接触給電装置の開発

研究課題名（英文）A wireless power transfer system with multi coils for autonomous underwater vehicles

研究代表者

米田 昇平（Komeda, Shohei）

東京海洋大学・学術研究院・助教

研究者番号：50815678

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、自律型無人探査機に代表される水中探査機向けの非接触給電装置に対して、共振回路の周波数特性を活用した動作手法を検討した。これは、送電側の電力変換器で電力伝送動作と送受電コイルの位置ずれの検出が可能となる点に特長があり、受電電圧の安定化に貢献する。また、動作周波数と負荷電圧の制御が同時に実現可能な回路構成を適用した上で負荷電圧制御の検討を行い、送電側および受電側でそれぞれ負荷電圧の制御を実現する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題では、自律型無人探査機に代表される水中探査機向けの非接触給電装置における電力変換器の制御法を検討した。これは、水中用途であるため地上用設備とは異なった設計指針が適用可能な点に着目し、動作周波数を変化させることを前提としたものである。したがって、非接触給電の各種回路方式において動作周波数を変化させた際の特性を明らかにした点に学術的意義がある。また、本研究課題で明らかにした特性により、送受電コイルの位置ずれが生じた際でも安全な非接触給電装置の設計が可能となり、非接触給電技術の水中探査機への適用拡大を促す点に社会的意義がある。

研究成果の概要（英文）：This research have discussed an operation method of wireless power transfer systems utilizing the characteristics of the resonant circuit. This operation method realizes the power transmission and detecting the misalignment of coils at the same time. Then, the inverter and rectifier are applied, which can independently regulate the load voltage by controlling the operation frequency and phase shift angle of them.

研究分野：パワーエレクトロニクス，船舶海洋工学

キーワード：非接触給電 共振回路 高周波インバータ 共振周波数追従 位相シフト制御

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

エネルギー問題や環境保全の観点から海底資源の調査や開発行われており、自律型無人潜水機(Autonomous Underwater Vehicle, 以下 AUV と略す) が利用されている。しかしながら、AUV は主にバッテリーによる駆動が行われているため、バッテリーの容量が AUV の活動範囲を制約している。例えば AUV が海底で作業中であっても、バッテリー交換 (もしくは充電) のために一度海面まで浮上し、さらに船上への引き上げる必要がある。特に、浮上かつ潜航に多くの時間を必要とする上に、引き上げ時はダイバーによる補助が必須であるため、荒天時にはダイバーの安全確保に問題が生じる。したがって、AUV のバッテリーの交換作業は、その運用上のボトルネックとなっている。

AUV 向けの新しいバッテリー充電方法として、非接触給電技術の適用が検討され、複数送電コイルを用いた手法が提案されている。これは、海中に設けた給電ステーション内の送電コイルと AUV 内の受電コイルをそれぞれ複数個配置することで電力伝送の可能な範囲を広げ、位置の調整を不要とした構成に特長がある。この場合、効率よく電力伝送を行うためには、結合度の良いコイルの組み合わせを判別し、コイルの配線を切り替える必要がある。一般的な非接触給電システムでは、別途の通信用機器で最適なコイルの組み合わせや必要な伝送電力量の情報をやり取りし、その情報を基にフィードバック制御を適用することで送電側の電源(高周波インバータ)を制御する。しかし、この手法では別途の通信用機器が必要であり、電波の減衰を考慮すると海中での利用は信頼性が低下する。そこで、電力伝送を担う高周波インバータ自身がコイルの位置ずれを検出しつつ電力伝送を行うことができれば、電力伝送効率の向上や機器の信頼性の向上が期待できる。

2. 研究の目的

本研究課題の目的は、AUV 向けの非接触給電システムを開発し、AUV のバッテリー充電手法を改善させることにある。これは、海中給電ステーションに配置した複数個の送電用コイルと潜水機内の複数個の受電用コイルとの最適な組み合わせを見つけることが可能な電力変換器の制御法に特長があり、AUV のバッテリー充電時間の大幅な短縮、そして活動時間と範囲の拡大が期待できる。また、複数個のコイルを有する非接触給電システムは冗長性に富み、海中であっても自律型無人潜水機に安定した給電を可能にする。本研究課題では、コイルの位置ずれを検出しつつ電力伝送が可能な電力変換器の動作を実験により確認し、システムの設計指針を明らかにする。

3. 研究の方法

本研究課題では、非接触給電装置において位置ずれが生じた際の共振周波数および負荷電圧の変化を理論的に検討し、探査機の着底位置に関わらず安定した負荷電圧が得られることを研究室の実験装置により確認する。この際、水中では高い共振周波数を使用する必要がないため、共振周波数が低く回路の先鋭度も低い際の特性を主に検討する。

(1) 実験装置

図 1 に送電コイルに対して共振用コンデンサを直列に接続した直列-直列(SS)補償方式を、図 2 に共振用コンデンサを並列に接続した並列-並列(PP)補償方式の回路構成を示す。図 1 では高周波インバータとコンデンサ入力形のダイオード整流器のみである。一方で、図 2 では送電側にインダクタとコンデンサの直列接続で構成される直列共振フィルタが、受電側の整流器出力にはインダクタがそれぞれ追加されている。これは、送電コイルに並列に接続された共振コンデンサと直流入出力の直流コンデンサ間での短絡を防止するためである。

図 3 に送電側の高周波インバータと受電側の整流器に位相シフト制御が適用可能な実験回路を示す。ここでは SS 補償方式を想定している。スイッチングデバイスに対し並列接続されたスナバコンデンサと直列接続されたスナバインダクタにより、位相シフト制御時に零電圧または零電流スイッチングを行う。これにより、ソフトスイッチング動作を維持しつつ、インバータもしくは整流器がそれぞれ負荷電圧を制御することが可能になる。加えて、図 3 の回路構成ではゲート信号の動作周波数と位相シフト角の自由度で変換器を動作させることが可能であり、状況に応じて制御法を使い分けることが

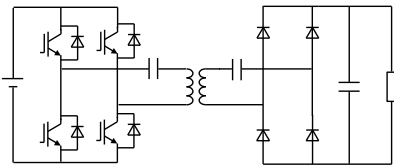


図 1 直列-直列補償方式の実験回路

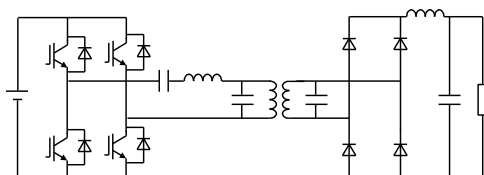


図 2 並列-並列補償方式の実験回路

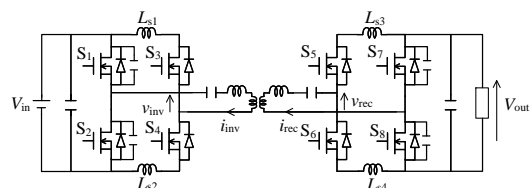


図 3 位相シフト制御の実験回路

可能である。

(2) 等価回路

図 4 に共振周波数および負荷電圧の解析に用いた等価回路を示す。ここでは送受電コイルを変圧器の T 型等価回路とみなしている。また、送受電コイルの巻き線抵抗やフェライトコアの鉄損に相当する抵抗などは無視している。このとき、それぞれの方式における代表的な共振周波数は、

$$f_{rSS} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

$$f_{rPP} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(1-k^2)LC}}$$

と表される。ただし、 L は送受電コイルのインダクタンス、 C は共振コンデンサの静電容量、 k は送受電コイルの位置ずれに伴った送受電コイル間の結合係数である。したがって、PP 補償方式の共振周波数は本質的に位置ずれの影響を受ける。また、これらの共振周波数では電圧源入力に対して出力側が定電流特性となることが知られている。

(3) 整流器の制御特性

図 5 に図 3 のインバータと整流器に用いる位相シフト制御のゲート信号とその際の実出力電圧・電流波形を示す。本研究課題では、インバータと整流器それぞれに位相シフト制御を適用することで、それぞれの位相シフト角 ϕ_1 と ϕ_2 により出力電圧 V_{out} を独自に降圧および昇圧させることができる。その結果、図 5 に示した回路構成は動作周波数 f_{sw} と位相シフト角 ϕ_1, ϕ_2 の自由度により共振周波数における高力率動作と負荷電圧の制御を実現できる。

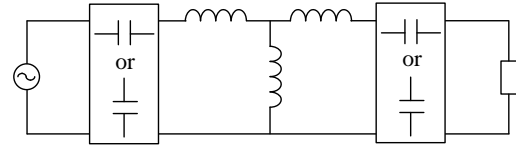


図 4 解析に用いる T 型等価回路

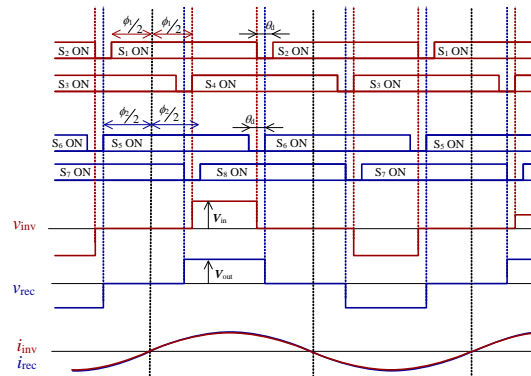


図 5 位相シフト制御の原理

4. 研究成果

(1) 理論解析

図 6 に SS 補償方式の、図 7 に PP 補償方式の共振周波数の計算結果を示す。ここでは、送受電間でコイルのインダクタンス L と共振コンデンサの静電容量 C はそれぞれ等しく $135 \mu\text{H}$ 、 $1.76 \mu\text{F}$ としている。また、SS 補償方式では負荷抵抗を 2.4Ω 、PP 補償方式では 24.7Ω としている。

それぞれの方式において f_{HSS} と f_{HPP} となる共振周波数がある。これは結合係数 k と負荷抵抗 R の影響も受ける周波数であり、SS 補償方式では出力側が定電圧特性となることが知られている。これに対し、本研究課題では PP 補償方式においても SS 補償方式と同様に定電圧特性が得られることを理論的に明らかにしている。これにより、従来から広く用いられている SS 補償方式と同様の特性を PP 補償方式も有していることが示され、非接触給電装置の回路設計において有益であると考えられる。特に AUV 向けの非接触給電装置のように位置ずれを許容しなければならない応用先の場合、PP 補償方式における結合係数の変化に伴った周波数の変動が扱いにくいとされていたが、一方で、PP 補償方式は受電コイルが消失した際に過電流が生じる心配がなく、AUV 向けに適した方式の一つであると考えられる。

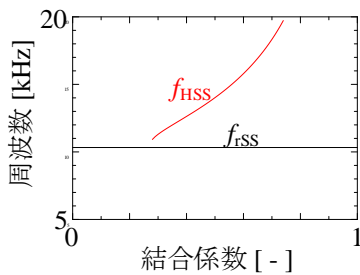


図 6 SS 補償方式の共振周波数

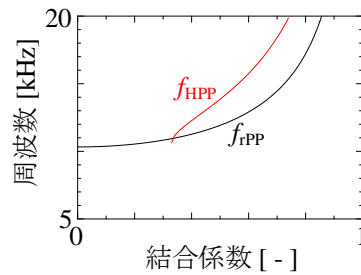


図 7 PP 補償方式の共振周波数

(2) 共振周波数と負荷電圧の実験結果

①SS 補償方式と PP 補償方式の比較

図 8 に SS 補償方式、図 9 に PP 補償方式におけるインバータと整流器の電圧・電流波形を示す。これらは共振周波数 f_{HSS} と f_{HPP} におけるものであり、インバータの電圧と電流がほぼ力率 1 の共振状態となっている。ただし、PP 補償方式の場合は追加の直列共振フィルタの影響により新たな共振周波数が現れ、それによって電流波形が歪んでいる。したがって、PP 補償方式は AUV 向けに適した特性を有しているものの、汎用的な電圧形インバータを基にしたシステムに組み込む際には設計上の注意を要する。

図 10 に SS 補償方式、図 11 に PP 補償方式における動作周波数ごとの受電端電圧の実験結果を示す。ここで、受電端電圧とは整流器の入力電圧を指している。それぞれの回路条件は図 6, 7 の解析条件と同じであるが、SS 補償方式では入力直流電圧を 30 V、PP 補償方式では 60 V としている。また、これらの実験結果は、結合係数ごとに存在し得る最も高い共振周波数に動作点を合わせた際の周波数と受電端電圧であり、●印が実測値、実線が理論値である。このとき、インバータには位相シフト制御を適用しておらず、電圧源入力となっている。

図 10 の SS 補償方式では、結合係数が高い場合のみ f_{HSS} が存在し、受電端電圧は定電圧特性を得ることができる。したがって、位置ずれが生じた場合であっても高周波インバータで共振周波数 f_{HSS} を追従し続ければ受電端電圧はほぼ一定値に保たれ、過電圧が生じず安全である。一方で、結合係数が低くなると受電端電圧が急激に上昇する。図 11 の PP 補償方式においても、結合係数が高い場合のみ f_{HPP} が存在し、受電端電圧は定電圧特性となっている。また、結合係数が低い場合は、定電圧特性ではないが受電端電圧が減少する。したがって、位置ずれが生じて探査機側が離れてしまっても探査機に過電圧は生じず安全である。このように本研究課題で検討した共振周波数と受電端電圧の理論値は実験結果と概ね一致しており、それぞれの回路方式を利用した非接触給電装置の設計において有益であると考えられる。紙面の都合上割愛しているが、直列一並列および並列一並列補償方式においても同様の成果を得ている。

また、SS 補償方式における f_{HSS} 、PP 補償方式における f_{HPP} で動作している際は、受電端電圧が定電圧特性でありつつ結合係数の変化に応じて動作周波数が変化している。つまり、これらの周波数で駆動することにより、安定した電力伝送と動作周波数の変化による送電コイルの位置ずれが検出可能であることが示唆されている。

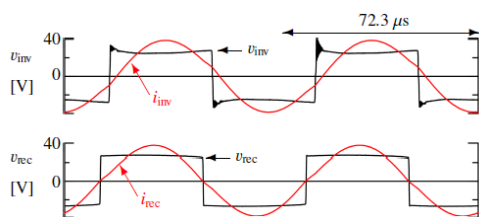


図 8 SS 補償方式の動作波形

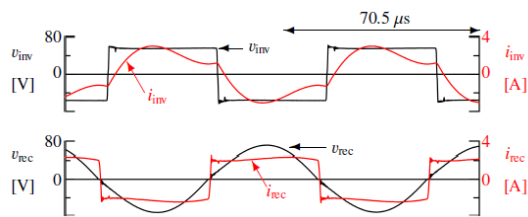


図 9 PP 補償方式の動作波形

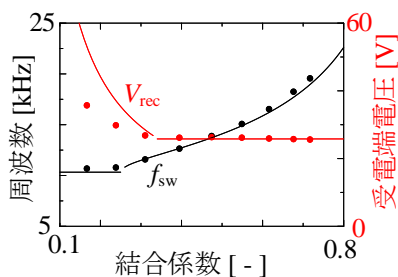


図 10 SS 補償方式における共振周波数と受電端電圧の実験結果

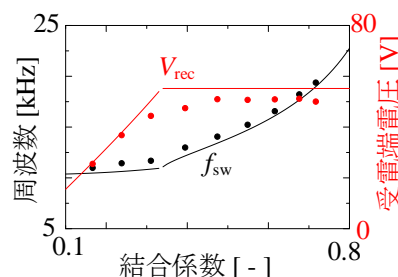


図 11 PP 補償方式における共振周波数と受電端電圧の実験結果

②SS 補償方式における高周波インバータでの負荷電圧制御

図 12 に SS 補償方式において共振コンデンサの静電容量を 224 nF とした際の受電端電圧の実験結果を示す。静電容量を小さくすることで、 f_{HSS} の存在範囲が広がるため、より変化幅の大きい結合係数および負荷抵抗の条件にて、受電端の定電圧特性を確認した。ここでは横軸を負荷抵抗の逆数であるコンダクタンスで示しており、凡例が結合係数を表している。その結果、結合係数や負荷抵抗ごとに若干の電圧変動はあるものの、 f_{HSS} で動作させた際は概ね一定の受電端電圧となった。図 13 に SS 補償方式において高周波インバータの位相シフト制御を適用した際の受電端電圧の実験結果を示す。電圧源入力時は位相シフト制御を適用せずに、直流電源電圧に応じた一定の方形波電圧が送電側に印加されている。一方で、電流源入力時は直流電源電圧が一定であっても、位相シフト制御を適用することで送電側に流れ込む電流が一定となるようにした。これは、本研究課題で行っている高周波インバータの回路構成なら

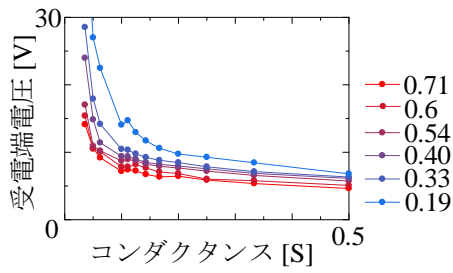


図 12 SS 補償方式における
受電端電圧の実験結果

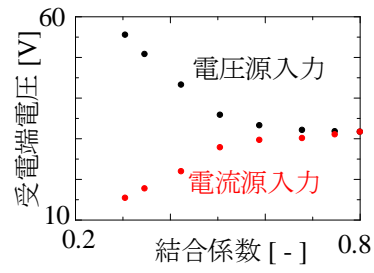


図 13 SS 補償方式における電圧源
および電流源入力の実験結果

ではの動作手法である。

電圧源入力時は結合係数が低い際に図 10 のように受電端電圧が急上昇する。これは、動作周波数が f_{ss} となっているためである。一方で、位相シフト制御により電流源入力とすることで、結合係数が低く動作周波数が f_{ss} となった際であっても受電端電圧の上昇を抑制できている。換言する結合係数に応じて位相シフト角を制御することで、高周波インバータ側で受電端電圧を一定に保つことが可能と言える。

③整流器の位相シフト制御による負荷電圧制御

図 14 と 15 に高周波インバータと整流器に位相シフト制御を適用した際のインバータと整流器の電圧・電流波形を示す。ここでは、位相シフト制御とスナバインダクタおよびスナバコンデンサによるソフトスイッチング動作に主眼を置いているため、図 3 の回路を使用し、送受電コイルではなく高周波変圧器でインバータと整流器を結合させている。理論解析の結果、負荷電圧 V_{out} は、

$$V_{out} = \frac{\cos \frac{\varphi_1 + \theta_d}{2}}{\cos \frac{\varphi_2 - \theta_d}{2}} V_{in}$$

と表され、デッドタイム θ_d の影響を受ける。つまり、このデッドタイム分だけ予め位相差角を補正すれば所望の出力電圧となる。

図 14 は高周波インバータの位相シフト制御の実験波形であり、整流器電圧の波高値が入力電圧の 100 V より低く、降圧動作となっている。図 15 は整流器の位相シフト制御の実験波形であり、整流器電圧の波高値が入力電圧の 100 V より高く、昇圧動作となっている。その結果、インバータと整流器それぞれの位相シフト制御により負荷電圧が調整可能であり、非接触給電装置のように送受電コイル間の結合係数が低く、送電コイルと受電コイルの電流に位相差が生じている場合であってもインバータと整流器それぞれの動作により負荷電圧の制御を実現する。また、電圧と電流の位相関係を見ると共振周波数における動作となっており、零電圧および零電流スイッチングとなっている。

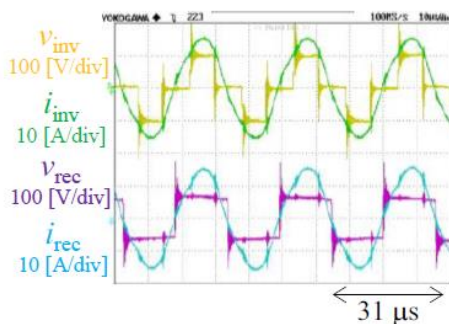


図 14 降圧動作

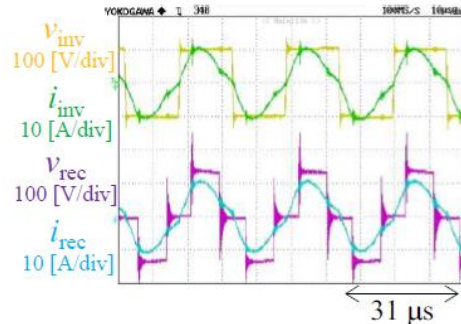


図 15 昇圧動作

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 米田昇平, 木船弘康	4. 巻 140
2. 論文標題 共振コンデンサを直列または並列に接続した電圧源駆動非接触給電回路の共振周波数と負荷電圧	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 電気学会論文誌D (産業応用部門誌)	6. 最初と最後の頁 642 ~ 650
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejias.140.642	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Shohei Komeda
2. 発表標題 Characteristics of Primary-Parallel-Compensation Methods for Wireless Power Transfer Systems
3. 学会等名 ECCE Asia 2021 Singapore (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 米田昇平, 水野隆志, 木船弘康
2. 発表標題 水中探査機向け非接触給電システムの駆動方式の検討
3. 学会等名 第90回マリンエンジニアリング学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shohei Komeda, Hiroyasu Kifune
2. 発表標題 Constant Load Voltage Characteristics in a Parallel-Parallel-Compensated Wireless Power Transfer System
3. 学会等名 2019 10th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE 2019 - ECCE Asia) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 水野隆志, 木船弘康, 米田昇平
2. 発表標題 コイルの位置ずれを検出可能な水中非接触給電システムの検討
3. 学会等名 第89回日本マリンエンジニアリング学会学術講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関