

令和 6 年 6 月 20 日現在

機関番号：12614

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14359

研究課題名（和文）複数電源を有する水中探査機向け非接触給電システムの開発

研究課題名（英文）Development of a wireless power transfer system for underwater vehicles with multiple power sources

研究代表者

米田 昇平（KOMEDA, Shohei）

東京海洋大学・学術研究院・准教授

研究者番号：50815678

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、自律型無人探査機や遠隔操作型無人探査機などの水中探査機向けの非接触給電システムとして、複数電源を有する回路構成とその動作手法の検討を行った。これは、3組の送電コイルの電流の位相を比較することで、電力伝送を行いつつ、受電コイルの位置ずれ方向を検出できる点に特長がある。そして、位置ずれ方向検出後に、最も近い送電コイルが共振動作となるように動作周波数を制御することで、負荷電圧、伝送電力、電力伝送効率が改善できることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題では、水中探査機向けの非接触給電システムを検討し、特に複数電源を用いることによる利点を明らかにしている。そのため、複数送電コイルを利用する際の動作原理の理論解析に学術的意義があり、大容量向けの非接触給電システムにも応用可能であると考えられる。本研究課題で明らかにした特性により、位置ずれ方向の検出と共振周波数追従による電力伝送効率の改善が明らかとなった。そのため、水中探査機の運用効率の改善が期待でき、この点に社会的意義を有している。

研究成果の概要（英文）：This research project investigates a circuit configuration with multiple power sources and its operation method as a wireless power transfer system for underwater vehicles such as autonomous underwater vehicles and remotely operated vehicles. This system is characterized by its ability to detect the misalignment direction of the receiving coil while transmitting power by comparing the phases of the currents in three sets of transmitting coils. After detecting the misalignment direction, the operating frequency is controlled so that the nearest transmission coil operates in resonance, thereby improving the load voltage, transmitted power, and power transmission efficiency.

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 高周波インバータ 水中探査機 共振周波数 複数送電コイル

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

海底資源の調査や開発の場面において、自律型無人探査機 (Autonomous Underwater Vehicle: AUV) や遠隔操作型無人探査機 (Remotely Operated Vehicle: ROV) などの水中探査機が多く利用されている。しかしながら、これらの探査機は搭載されたバッテリーにより駆動されているものが多く、バッテリーの容量がその活動時間や範囲を限定している。例えば、AUV は予め指示されたプログラムにより運行されているが、バッテリーの交換 (もしくは充電) のために一度海面まで浮上し、さらに船上へ引き上げる必要がある。特に、浮上と潜行には多くの時間を必要とする上に、引き上げ時にはダイバーによる補助が必要であるため、荒天時にはダイバーの安全確保に問題が生じる。その結果、バッテリーの交換作業は AUV をはじめとする水中探査機の運用のボトルネックと言える。

これらの課題を踏まえ、水中探査機向けの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ている。非接触給電は、物理的に距離の離れた送受電コイル間で電力伝送を実現する技術である。そのため、送受電間を電氣的に絶縁でき、水中であっても安全に利用することが可能となる。したがって、水中の給電ステーションに送電コイルを、探査機内に受電コイルを設置すれば、水中にて探査機のバッテリーの充電を完結することが可能となる。しかしながら、非接触給電は電力伝送可能な送受電コイル間の距離が短く、また、コイル間の位置ずれに弱いという原理的な課題を有する。それゆえに、非接触給電技術は主に定置型システムに適用されている。代表例は電気自動車の充電器であり、駐車場に埋設された送電コイル上に電気自動車が増車することで給電を行う。この場合、電気自動車の操作や可動式コイルを用いることでコイル位置の調整が可能であり、安定した電力供給が可能である。一方で、粘性流体である水中では、探査機自身の操作による位置の微調整が困難であり、さらに、水中に設置する送電用コイルには、その故障率を下げるためにシンプルな構成が必要となるため可動式コイルの適用は困難である。その結果、非接触給電技術を水中探査機に適用するためには、シンプルな構成で位置ずれに強く、かつ、信頼性の高いシステムを検討する必要がある。

2. 研究の目的

本研究課題の目的は、水中探査機向けに送受電コイル間の情報通信無しで送受電コイルの位置ずれ方向が検出可能な非接触給電システムを開発することにある。これは、複数台の高周波インバータを用いることで、電力伝送を担う電力変換器自身がコイルの位置ずれの方向を検出し、電力伝送を行いつつ最適なコイルによる給電を実現する点に特長がある。検討する非接触給電システムでは、3組の高周波インバータと送電コイルを設け、3組の送電コイルから1組の受電コイルへ電力伝送を行いつつ、高周波インバータ間の情報から位置ずれ方向の検出と電力伝送特性の改善を図る。この際、送電コイル間に磁気干渉 (クロスカップリング) が生じないコイル配置とする。本研究課題では、動作原理を理論的に検討し、1 kW の実験装置により動作原理の妥当性を確認する。

3. 研究の方法

本研究課題では、クロスカップリングが生じない3組の送電回路から1組の受電回路への給電を目的とし、等価回路を用いた理論解析を実施し、試作した実験装置により理論解析の妥当性を確認する。

(1) 実験回路

図1に実験回路図を、表1に回路定数を示す。送電側は電圧形 H ブリッジ高周波インバータ、直列共振コンデンサ、送電コイルで構成されている。一方で、受電側はコンデンサインプット形フルブリッジダイオード整流器、直列共振コンデンサ、受電コイルで構成されている。送電側が3組ある点を除いては、一般的な非接触給電装置と同様である。

図2に送電コイルと受電コイルの写真を示す。送受電には同一のドーナツ型コイルを使用しており、外径 225 mm、内径 110 mm、厚さ 6 mm、16 回巻きである。また、送電側では送電コイル間のクロスカップリングを除去するために、送電コイルの中心間距離を 130 mm 離して重ね合わせている。これにより、送電コイル同士の磁気干渉を除去でき、動作周波数を適切に選択すれば各送電コイルは独立な動作が可能となる。

(2) 等価回路と計測条件

図2に理論解析に使用する簡易等価回路を示す。高周波インバータは方形波電圧源とし、整流器負荷は交流等価抵抗としている。ただし、理論解析では、簡単化のために方形波電圧の基本波正弦波のみを考慮して行う。また、コイルの巻き線抵抗は負荷抵抗に対して十分に小さいため無視している。

図3に送受電コイルの配置と座標の定義を示す。3組の送電コイル A, B, C の中心を座標の原点とし、その直上に受電コイル D を配置し、これを初期状態と呼ぶ。このとき、受電コイル D は 20 mm のギャップを設けており、これを z 方向とする。この状態から、受電コイルを半径方向 r と回転方向 θ に移動させ、位置ずれを模擬する。ただし、回転方向はコイルの直径 R で規格化した値としている。また、各送電コイル間の結合係数の実測結果は 0.03 程度であり、その結合はほぼ無視できる。

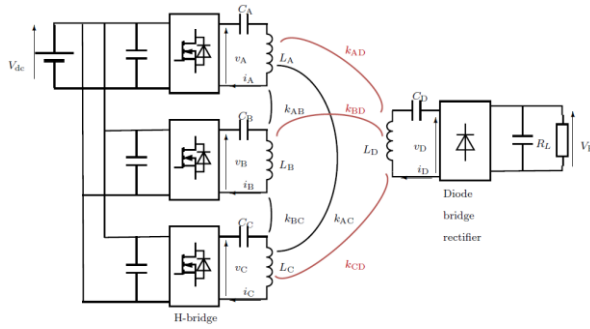


図1 実験回路

表1 回路定数

直流電源電圧	V_{dc}	30 V
送電電力	P_S	600 W
直流コンデンサ	C_{dc}	3600 μ F
共振コンデンサ	C_A, C_B, C_C, C_D	0.88 μ F
インダクタ	L_A, L_B, L_C, L_D	53 μ H
直流抵抗	R	3 Ω

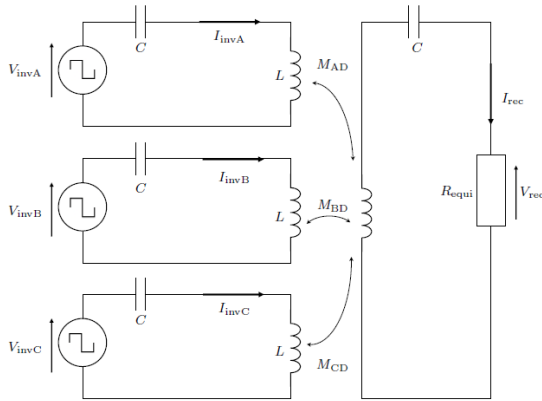


図2 理論解析用簡易等価回路

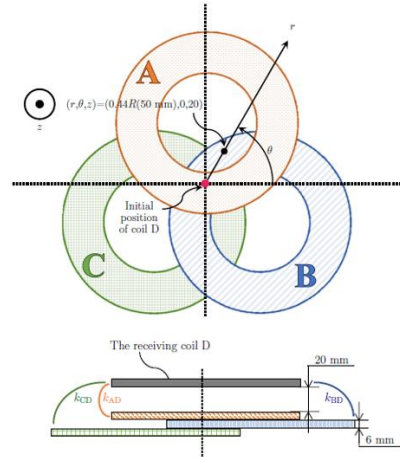


図3 送受電コイルの座標の定義

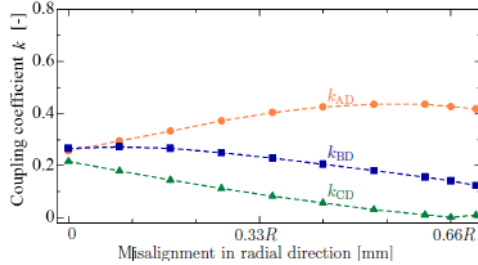


図4 結合係数の測定結果の例

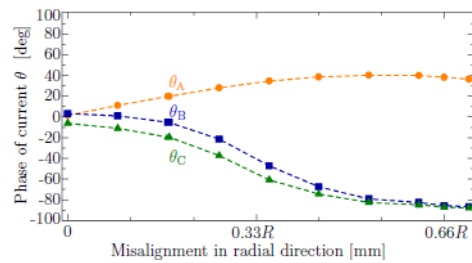


図5 電流位相の計算結果の例

4. 研究成果

(1) コイル電流の理論解析

図4に送受電コイル間の結合係数の実測結果を示す。これは、角度を $\theta=60^\circ$ に固定したまま半径方向に(図3の矢印に沿って)受電コイルDを10mmずつずらした場合のものである。この場合、受電コイルDは送電コイルAには近づき、送電コイルBおよびCからは離れる。そのため、送電コイルAと受電コイルD間の結合係数 k_{AD} は、受電コイルの位置ずれに伴い増加している。一方で、他の送電コイルとの結合係数 k_{BD} と k_{CD} は減少する。

図5に図2の簡易等価回路を基に得た各送電コイルの電流位相の変化の計算例を示す。これは、角度を $\theta=90^\circ$ に固定したまま、半径方向に受電コイルDを10mmずつずらした場合のものである。この際、まず、受電コイルDが初期状態の位置(3組の送電コイルの中心)にあるため、各コイルの電源電圧(インバータの出力電圧)の動作周波数は3組のコイル共に共振状態となる周波数で動作させる。これは、各送電コイルから見て受電コイルDがほぼ等距離に存在し、各結合係数がほぼ等しいため、理論的に求めることが可能な共振周波数 f_{high} である。そして、初期位置の動作周波数を維持したまま受電コイルDに位置がずれ、送電コイルAの直上に向かって受電コイルDを動かす。この場合でも結合係数 k_{AD} は増加しており、その結果、送電コイルAを流れる電流の位相角 θ_A は増加する。一方で、送電コイルBとCの電流の位相は受電コイルDの位置ずれに伴い遅れ位相となっている。これは、各コイル電流の位相変化が結合係数に依存していることを意味し、この位相の変化を用いることで、受電コイルDのずれ方向を検出することが可能となる。

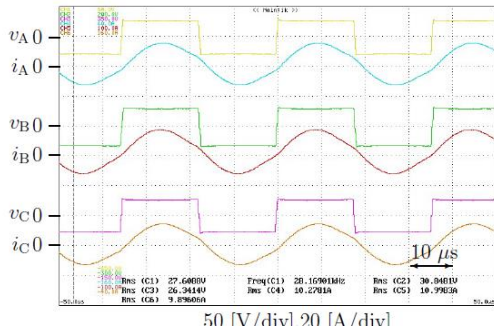


図 6 初期位置における実験波形

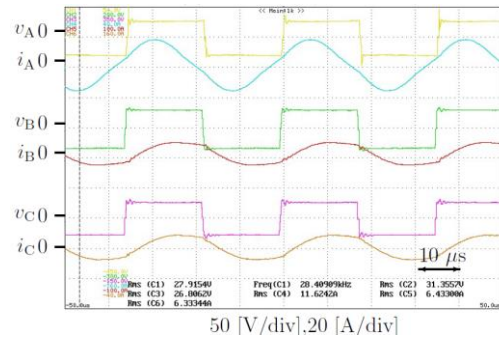


図 7 位置ずれがある場合の実験波形

(2) 位置ずれ方向検出の実験結果

図 6 に受電コイル D が初期位置にある場合の各インバータの出力電圧と電流の実験波形を示す。ここでは、3 組のインバータにおいて共振動作を担保できるように、28.2 kHz で動作させている。図 6 より、すべてのインバータは共振動作となっている。

図 7 に受電コイル D が $\theta=90^\circ$ に方向に $0.27R$ だけ変化した場合の実験波形を示す。ここでは、動作周波数を受電コイル D が初期位置にある場合の共振周波数である 28.2 kHz のままとしており、送電コイル A の電流は進み位相に、送電コイル B と C の電流は遅れ位相となっている。

その結果、各インバータの電流位相を比較することで、受電コイル D のずれ方向の検出が可能となる。また、遅れ位相となるコイルにおいても、より遅れ位相になっているほど受電コイルは離れていると判断できるため、3 組のコイル電流の位相を比較することで、受電コイル D のずれ方向が推定可能である。

図 8 に 3 組のインバータお動作周波数を送電コイル A の動作周波数に追従させた場合の実験波形を示す。このとき、受電コイルの位置ずれ状態は図 7 と同様である。したがって、送電コイル A では共振状態となり、他の送電コイルでは遅れ位相状態のままとなっている。つまり、受電コイルの位置ずれ方向検出後は、もっとも距離の近い送電コイルを主とした電力伝送を実現できる。

(3) 共振周波数追従による電力伝送特性の改善

図 9 に受電コイルに位置ずれが生じた際の共振周波数追従の有無の実験結果を示す。このとき、図 7 および図 8 と同様に、受電コイル D が $\theta=90^\circ$ に（つまり送電コイル A 側に）ずれた場合を示す。ここで、共振周波数追従が無い場合とは、受電コイル D が送電コイル A 上にずれたにも拘わらず、各インバータが受電コイル D の初期位置の動作周波数で動作を続けた場合を指し、図 7 の状態である。一方で、共振周波数追従がある場合とは、電コイル D が送電コイル A 上にずれ、3 組のインバータお動作周波数を送電コイル A と受電コイル D 間の共振周波数に追従させた場合を指し、図 8 の状態である。

図 9(a) は負荷電圧である。共振周波数追従が無い場合は、位置ずれ大きくなるに連れて負荷電圧が低下するが、追従有りとするすることで、負荷電圧の低下を抑制できている。図 9(b) は各インバータからの伝送電力であるが、共振周波数追従が無い場合であっても送電コイル A からの電力伝送が最も多い。そして、追従有りとするすることで、送電コイル A からの伝送電力は約 2 倍に増加している。図 9(c) は受電電力である。これにおいても追従有りとするすることで、受電電力が増加している。ただし、受電コイル D が初期位置にあるときは 3 組の送電コイルから均等に電力伝送ができていたため、初期位置において最大受電電力として約 650 W を得ている。そして位置ずれが生じると、送電コイル A からのみの電力伝送が主となるため、共振周波数追従をしている場合であっても受電電力は初期位置より低下する。図 9(d) は電力伝送効率である。このとき、3 組のインバータの合計電力を送電電力とし、それと受電電力の比を伝送効率として定義している。共振周波数追従が無い場合は、位置ずれに伴って電力伝送効率は低下する。これは、結合が低下することと、インバータの力率が低下することに起因している。一方で、共振周波数追従が有る場合は、インバータを高力率で動作できているため、効率を改善できている。

(4) 電力伝送効率のマップ

図 10 に電力伝送効率のマップを示す。これは、図 9 と同様のデータを $\theta = -30^\circ \sim 90^\circ$ の範

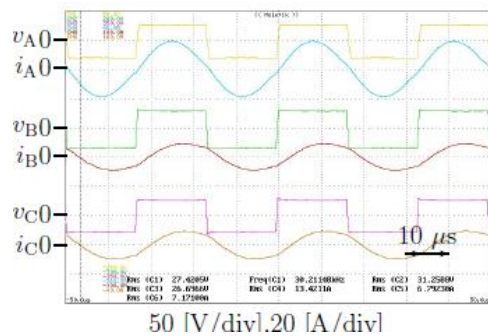
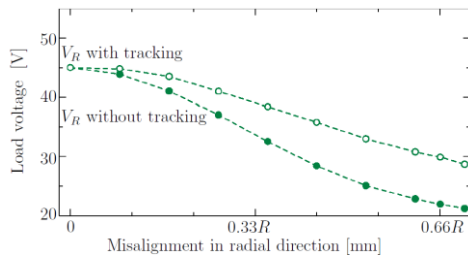
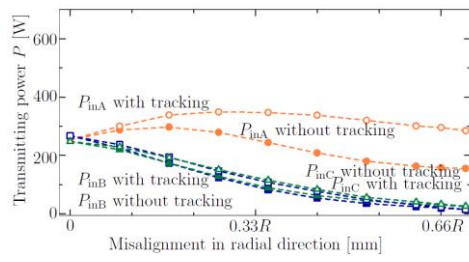


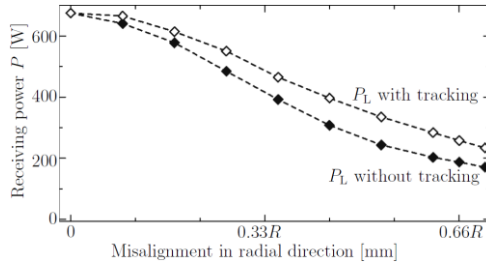
図 8 位置ずれ時に共振周波数追従を適用した場合の実験波形



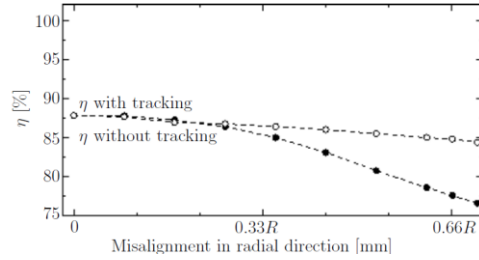
(a) 負荷電圧



(b) 送電電力

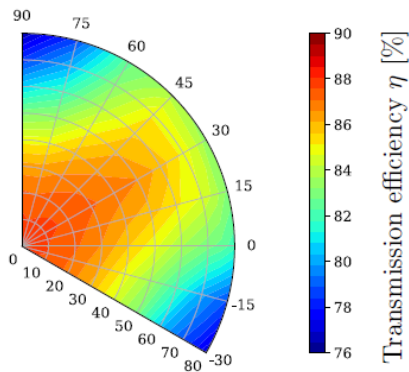


(c) 受電電力

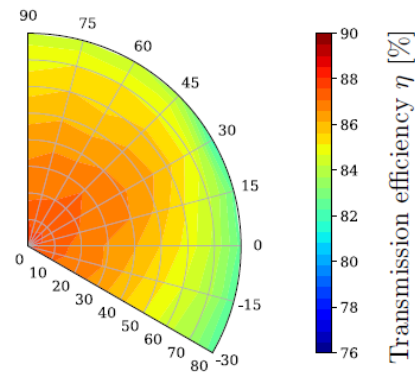


(d) 電力伝送効率

図9 共振周波数追従の有無による電力伝送特性の実験結果



(a) 共振周波数追従が無い場合



(b) 共振周波数追従が有る場合

図10 電力伝送効率のマップ

囲で計測し、カラーマップで示したものである。検討システムでは、送電コイルの厚みを無視した場合に120度ごとに対称性があるため、 $\theta = -30^\circ \sim 90^\circ$ までのデータを得ることでシステム全体の特性が予測できる。

図10(a)を見ると、初期位置近傍では高効率を維持できているが、位置ずれが大きくなると効率の低下が顕著である。一方で、図10(b)を見ると、共振周波数追従が有ることに起因し、広い範囲で効率の改善ができています。したがって、検討システムは、受電コイルの位置ずれ方向を検出しつつ、高い電力伝送効率を実現できている。

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 荒井凜, 米田昇平	4. 巻 58
2. 論文標題 複数受電コイルを有するワイヤレス給電装置の位置ずれ時における電力伝送特性の基礎検討	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 マリンエンジニアリング	6. 最初と最後の頁 114-121
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 荒井凜, 米田昇平
2. 発表標題 複数電源を用いた水中探査機向けワイヤレス給電の提案
3. 学会等名 第92回（令和4年）マリンエンジニアリング学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 荒井凜, 米田昇平
2. 発表標題 3組の送電回路を適用した非接触給電システムによる位置ずれ方向検出の基礎検討
3. 学会等名 令和5年電気学会全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shohei Komeda, Rin Arai
2. 発表標題 Resonant Frequency Characteristics of a Wireless Power Transfer System based on Dual-Receiver Configuration without Cross Coupling
3. 学会等名 IECON 2021 47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Rin Arai, Shohei Komeda
2. 発表標題 A Detection Method of Misalignment for a WPT System using Three-Power Transfer Circuits
3. 学会等名 2023 IEEE 32nd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 荒井凜, 米田昇平
2. 発表標題 3組の送電回路を適用した水中探査機向けワイヤレス給電の電力伝送特性
3. 学会等名 第92回(令和5年)マリンエンジニアリング学術講演会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 無線電力伝送システム、給電ステーションおよび無線給電プログラム	発明者 米田昇平, 荒井凜	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022-154117	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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
---------	---------