

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

東京海洋大学 ○荒井 凜 米田 昇平

1. はじめに

水中探査機に搭載されたバッテリーの充電方法として、海中に設置した給電ステーション側に送電コイルを、水中探査機側に受電コイルを搭載したワイヤレス給電システムが検討されている^{1,2)}。このとき、安定した電力伝送を実現するためには、送電コイルと受電コイルを一定の近さに保つ必要がある。しかしながら、海中ワイヤレス給電では、探査機が海流の影響を受けるため、送受電コイル間の位置が変動的であり、安定した給電が困難である。

文献(2)では、給電ステーションに複数枚の送電コイルを敷き詰めることで、探査機が位置ずれ状態となっても安定した給電を実現できることが検討されている。ただし、位置ずれに応じて、電力伝送を担う送電コイルを切り替える必要がある。したがって、位置ずれが生じた際に、次の(隣の)送電コイルへ駆動を素早く切り替えることが、充電時間の短縮および安定した電力伝送に対して重要になる。

文献(3)では、探査機の位置ずれに対するインバータの動作周波数の変化により、探査機の接近または乖離を推定する手法が示されている。しかしながら、この手法では探査機が離れた際の方角までは判断できず、依然としてどの送電コイルに切り替える必要があるかは判断できない。

本論文では、複数電源を用いたワイヤレス給電装置を提案する。これは単一の受電コイルに対して、2組の送電コイルで同時に給電し、各インバータ出力の電流位相および動作周波数を計測することで、探査機の位置ずれとその方向までも推定できるものである。以下では、まず、共振周波数の変化による位置ずれとその方向の計測原理を説明する。そして、実験により負荷電圧、電力、電力伝送効率の特性を明らかにする。

2. 実験システムの構成

2.1 実験回路構成

図 1 に本論文で提案するワイヤレス給電装置の実験回路を、表 1 に回路定数を示す。実験回路の送電側は直流電源に並列に接続された 2 台の高周波インバータ、2 組の送電コイルと共振コンデンサから構成されており、受電側は 1 組の受電コイルと共振コンデンサ、ダイオード整流器、負荷抵抗で構成されている。送電側が 2 並列である点を除けば、一般的なワイヤレス給電システムと同一である。本論文では簡単化のために送電コイル A および B、受電コイル C に同一のコイルを用い、その自己インダクタンスを L とする。同様に、送受電の共振コンデンサにも同一のものを使用し、そのキャパシタンスを C とする。このとき、ワイヤレス給電の共振周波数は、

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

で表され³⁾、本論文では、 $f_r = 23.3 \text{ kHz}$ である。

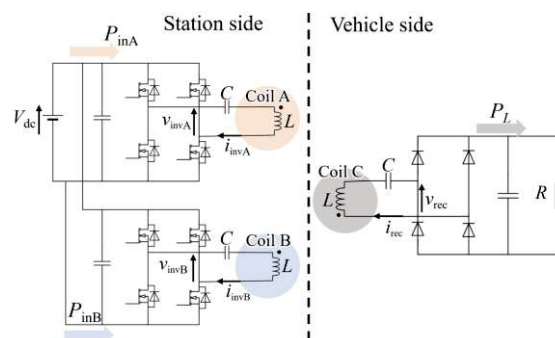
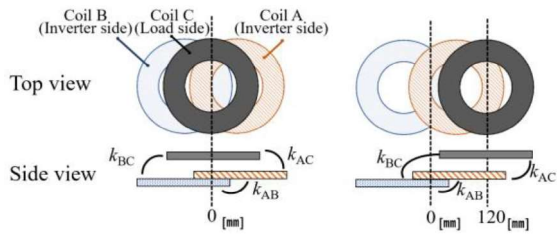


図 1 回路定数

表 1 実験回路の回路定数

直流電源	V_{dc}	36 V
定格電力	P	700 W
自己インダクタンス	L	53 μH
共振コンデンサ	C	0.88 μF
負荷抵抗	R	3 Ω



(a) 初期位置 (b) 位置ずれ 120 mm

図2 コイルの位置関係と位置ずれの定義

また、負荷には負荷抵抗 R を用いる。

2.2 送受電コイル配置と結合係数

図2に実験におけるコイル配置を示す。ワイヤレス給電では、コイル間の結合の強さを表す指標として、結合係数 k を用いることが一般的である。このとき、 k の取り得る値は 0 以上 1 以下であり、一方のコイルから発生した磁束が他方のコイルに鎖交した割合を示す。したがって、コイル間の距離が近い場合には結合係数は 1 に近く、反対に遠い場合は結合係数がほぼ 0 となる。

ただし、コイル間の距離が近い（コイルの重なりが多い）場合であっても、コイル間の中心間距離を適切に調整することで結合係数をほぼ 0 とすることも可能である⁴⁾。本論文では、図2のように送電コイル A および B の中心間距離を 130 mm ずらすことで送電コイル間の余分な磁気結合（クロスカップリング）の影響を除去する。このとき、送電コイル間の結合係数は $k_{AB}=0.02$ であり、他の結合係数に比べ十分に小さい。

この送電コイルの条件に対して、受電コイルは、図2(a)のように2つの送電コイルとの位置関係が対称になるように配置し、これを初期状態とする。このとき、送電コイル A と受電コイル間には 21 mm のギャップがあり、送電コイル B と受電コイル間には送電コイル A の厚みを加えて 27 mm のギャップがある。実験では、受電コイルを送電コイル A 側に、図2(a)の初期位置から図2(b)の 120 mm まで動かす。

図3に図2の条件における結合係数の測定結果を示す。送電コイル A と受電コイル間の結合係数を k_{AC} 、送電コイル B と受電コイル間を k_{BC} とする。初期位置では、送電コイル A および B が受電コイルに対し

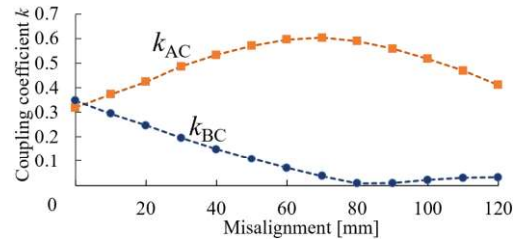


図3 結合係数の測定結果

てほぼ等距離であるため、それぞれの結合係数はほぼ等しい。そして、結合係数 k_{AC} は 70 mm でピーク値 0.6 をとり、減少していく。これは、70 mm にて受電コイルが送電コイル A の直上となるためである。一方で、受電コイルは送電コイル B に対して離れてゆくのみであるので、結合係数 k_{BC} は初期位置から減少し、80 mm 地点ではほぼ 0 となる。

3. 共振周波数の変化による位置ずれの測定

3.1 共振周波数

ワイヤレス給電システムでは、高力率および高効率での電力伝送を目的に、共振周波数による駆動が行われる。ワイヤレス給電システムには複数の共振周波数が存在する。一般的には、(1)式に示した共振周波数 f_r が利用される。これは、 f_r がインダクタンスとキャパシタンスのみで得られる周波数であり、いかなる結合係数であってもその値が変化しないことを利点として扱うためである。一方、 f_r より高い周波数となる f_{high} が存在する。このとき、 f_{high} は、

$$f_{high} = \frac{\sqrt{1 - \frac{CR^2}{2L} + \sqrt{(1 - \frac{CR^2}{2L})^2 - (1 - k_{AC}^2 - k_{BC}^2)}}}{2\pi \sqrt{(1 - k_{AC}^2 - k_{BC}^2)LC}} \quad (2)$$

となる⁴⁾。ここで(2)式は、1つの送電コイルに対して、それぞれの回路定数が等しくクロスカップリングも持たない2組の受電コイルを用いて構成された複数受電ワイヤレス給電システムの共振周波数 f_{high} である。したがって、(2)式を本論文の実験条件に適用するためには、2組の送電コイルの電圧と電流の比（電源のみかけの抵抗値）がそれぞれ等しい場合のみ適用可能である。また、(2)式に含まれる2つの

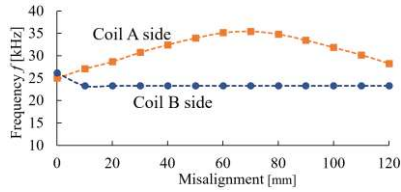


図4 位置ずれに対する共振周波数の理論値

結合係数のうち1つを零とすれば、送受電コイルが1組ずつの場合の共振周波数 f_{high} となる。

図4に送受電のコイルの位置ずれに対する共振周波数 f_{high} の変化を示す。本論文の送電コイルは、クロスカップリングがほぼ零であるため、お互いを独立な電源として検討する。すなわち、送電コイルAと受電コイル間の位置ずれを考える際は送電コイルBが存在せず、 $k_{\text{BC}}=0$ として(2)式を適用する。

図4を見ると、受電コイルの位置が70mmとなるまでは送電コイルA側の f_{high} は上昇し、その後、 f_{high} は減少する。これは受電コイルが送電コイルAの直上まで近づいてくると f_{high} が上昇し、通過して離れてゆく際は f_{high} が減少することを意味する。一方、送電コイルB側に着目すると、受電コイルは送電コイルBに対して離れてゆくのみであるため、コイルB側の f_{high} は減少し、すぐに一定値(共振周波数 f) に収束している。

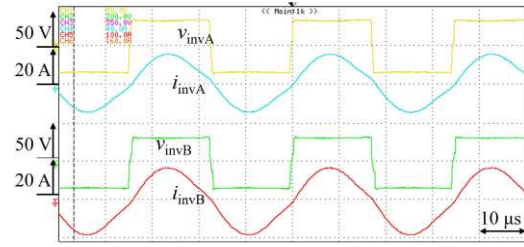
3.2 コイルの位置ずれと共振周波数の変化

文献(3)では、共振周波数 f_{high} の変化を受電コイルの位置ずれの検出に用いることが議論されている。これは、共振周波数 f_{high} でインバータを駆動させ、インバータに共振周波数追従制御を適用することで、インバータ自身が結合係数に応じた f_{high} を追従するものである。その結果、インバータの動作周波数の上昇、低下を観測することで、受電コイルの接近もしくは乖離が判断可能である。

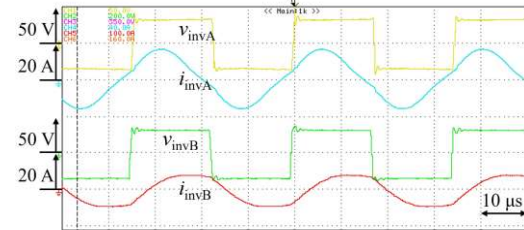
しかしながら、送受電コイルが1組のシステムに対して、図2に示すようなドーナツ型のコイルでは、位置ずれ時の結合係数の変化が原点对称となり、共振周波数 f_{high} の変化から受電コイルが離れる際の方向までは判断できない。

3.3 提案する位置ずれの方向の判定法

本論文では、図4に示したそれぞれの送電コイル



(a) 位置ずれ 0 mm における実験波形



(b) 位置ずれ 30 mm における実験波形

図5 動作周波数を固定した場合のインバータ出力

における共振周波数 f_{high} の変化を組み合わせることで、受電コイルのずれの方向とその度合いが高周波インバータのみで検出可能な制御法を提案する。図4を見ると、受電コイルが動いた際に送電コイルAには近づき、送電コイルBからは離れるため、それぞれの送電コイルにおける共振周波数 f_{high} の理論値は上昇または低下している。このとき、例えば受電コイルが初期値から送電コイルA側に10mm移動したにも関わらず、あえてインバータの動作周波数を初期位置の f_{high} を維持し続ければ、送電コイルAではインバータ電流が進み位相、送電コイルBでは遅れ位相になる。その結果、インバータの電流が進み位相となった送電コイルAでは、受電コイルが自身に接近していると判断でき、これにより探査機のずれの方向が観測できる。その後、送電コイルB側の動作周波数を送電コイルA側に同期させ、送電コイルA側の共振周波数 f_{high} の追従制御を行えば、コイルの接近および通過を動作周波数から判断できる。

4. 周波数追従での実験結果

4.1 動作周波数を固定した際の電流の位相差

図5に動作周波数を初期配置の共振周波数 f_{high} である28.9kHzに固定した際のインバータ出力端子電

圧と電流の波形を示す。図 5(a)は初期位置（位置ずれ 0 mm）、図 5 (b)は位置ずれ 30 mm における実験波形である。図 5(a)では $k_{AC} \approx k_{BC}$ であるため、それぞれのインバータの共振周波数 f_{high} もほぼ等しく、電圧と電流が同位相となる共振動作となっている。一方、図 5(b)では、図 5(a)における f_{high} のまま $k_{AC} > k_{BC}$ となるように受電コイルを送電コイル A 側に動かしたため、結合係数が高い送電コイル A 側では電流が電圧に対して進み位相となり、反対に送電コイル B では遅れ位相となる。この位相の変化から、受電コイルの動いた方向が判断可能である。

4.2 共振周波数追従の模擬実験

図 6 に周波数追従を模擬した実験による動作波形を示す。ここでは、オシロスコープの波形を観測しつつ、受電コイルの位置ずれ 20 mm において送電コイル A 側の共振周波数 f_{high} となるように、インバータの動作周波数を設定した。その結果、送電コイ

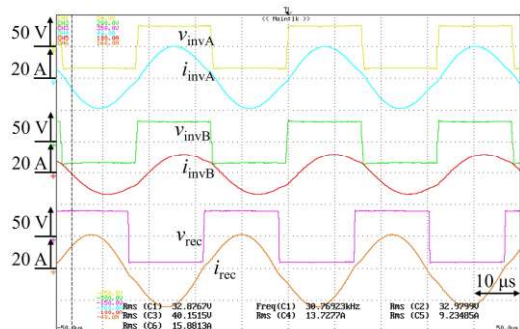
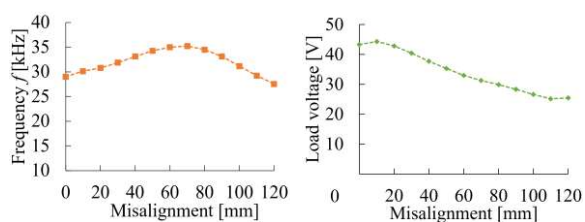
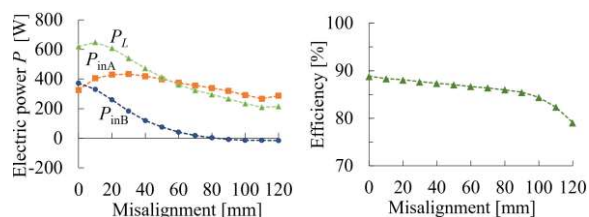


図 6 位置ずれ 20mm における実験波形



(a) 動作周波数 (b) 負荷電圧の変化



(c) 各部電力 (d) 電力伝送効率

図 7 共振周波数追従を模擬した実験の計測結果

ル A では共振周波数による電力伝送であるが、送電コイル B では遅れ位相による動作となっている。

図 7 に共振周波追従の模擬実験を初期位置から 120 mm の位置ずれまでに適用した測定結果を示す。図 7(a)は動作周波数、(b)は負荷抵抗の電圧、(c)はそれぞれのインバータの入力電力 P_{inA} , P_{inB} と負荷抵抗の受電電力 P_L , (d)は電力伝送効率である。(a)を見ると、動作周波数は 70 mm で最高値を取り、その後低下している。これは、受電コイルが送電コイル A 直上を通過したためである。次に(b)を見ると、負荷電圧の値は初期位置付近では 43.3 V を取るが、120 mm では 25.5 V まで低下している。また、(c)を見ると、初期位置では各インバータは同等の電力を伝送しているが、位置ずれが生じてコイル A に沿った共振周波数を追従することで、受電コイル B 側のインバータが供給する電力は減少する。そして、(d)を見ると電力伝送効率は初期位置で 89% である。ただし、両方の送電コイルが離れる 100 mm 以降では、効率が急激に低下する。

5. まとめ

本論文では複数電源を適用した水中探査機向けワイヤレス給電の検討を行った。これは、2 台の送電側高周波インバータにより水中探査機側の受電コイルの位置ずれとその方向の測定を実現する。その結果、2 台の高周波インバータの端子電圧と電流の位相の差から、受電コイルの位置ずれの方向を推定し、さらに共振周波数追従制御により位置ずれの度合いも推定可能であることを確認した。また、その際の負荷電圧、送電・受電電力、電力伝送効率を実測し、高効率な電力伝送が可能であることを明らかにした。

参考文献

- 1) C. R. Teeneti, et al, IEEE Journal of Oceanic Eng., 46-1(2021), 68-87.
- 2) N. Sato, et al, IEEE Trans.-D, 139-1(2019), 13-21.
- 3) 米田・木船, 第 88 回学術講演論文集(2018),89-92.
- 4) S. Komeda and R. Arai, IECON 2021 (2021), 1-6.