

# 水中非接触給電システムの開発に向けた共振周波数追従制御法の検討

東京海洋大学 ◎池原 徹 木船 弘康 米田 昇平

## 1. はじめに

水中探査機向け非接触給電システムが検討されている<sup>[1]</sup>。非接触給電では、送受電コイルの相対位置が変動するため、共振周波数も変動し、必ずしも高周波インバータ出力は高力率で動作できない。これは電力伝送効率の悪化を招く。そこで、共振周波数追従制御の適用により、コイルの位置ずれや負荷変動が生じて高周波インバータの高力率動作を維持させる。本論文では、共振回路の周波数特性から共振周波数追従制御法を検討し、実験により動作を確認する。

## 2. 実験システムの構成

### 2.1 実験回路

図 1 に実験回路を、表 1 に回路定数を示す。ここでは、送電側直列共振—受電側直列共振方式非接触給電システムを対象とする。共振周波数追従制御の方法として、高周波インバータの出力電圧  $v_1$  と出力電流  $i_1$  の位相差を検出し、それを基に高周波インバータのスイッチング周波数  $f_{sw}$  を調整する<sup>[2]</sup>。

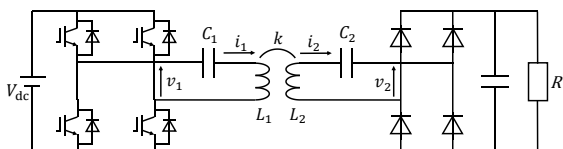


図 1 実験回路

表 1 回路定数

直流電源	$V_{dc}$	12V
自己インダクタンス(代表値)	$L_1, L_2$	135 $\mu$ H、137 $\mu$ H
共振コンデンサ	$C_1, C_2$	1.76 $\mu$ F
結合係数	$k$	0.11~0.74
負荷抵抗	$R$	4.4 $\Omega$ 、20 $\Omega$

### 2.2 送受電コイルのインダクタンス

図 2 に送受電コイルの相対的な位置ずれに対する結合係数と送受電コイルの自己インダクタンスの関係を示す。コイルの位置ずれが大きくなるにつれて結合係数と自己インダクタンスは低下している。この原因は位置ずれにより鎖交する磁束が減少することと、漏れ磁束低減のためにコイル下部に敷き詰めたフェライトコアの影響が小さくなるためである。

一般的な非接触給電システムは、共振周波数を

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} \quad (1)$$

と設定した上で、固定周波数で駆動する。しかし、図 2 のように自己インダクタンスの変動が大きい場合は、共振周波数が変動し、インバータ出力の力率が低下する。

## 3. 共振周波数追従制御の方法

図 3 にインバータ出力電圧に対する出力電流の位相特性を示す。図 3(a) は負荷抵抗値を 3.5  $\Omega$  に固定した状態で結合係数を 0.11、0.5、0.74 に変動させており、図 3(b) は結合係数を 0.74 に固定した状態で、負荷抵抗値を 3.5  $\Omega$ 、8  $\Omega$ 、16  $\Omega$  に変動させている。図 3(a) の結合係数 0.74 のときを例にみると、3 点で位相差が 0 度である。このときの周波

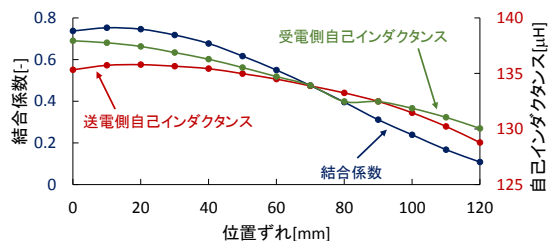
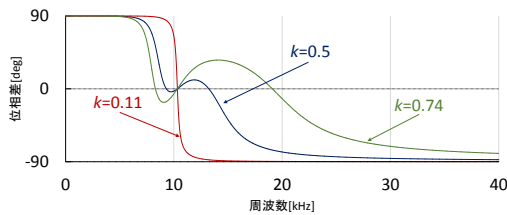
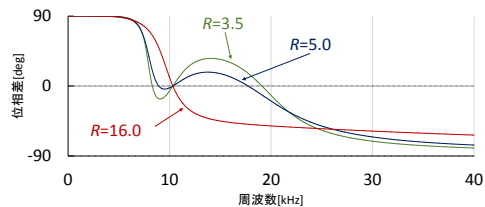


図 2 位置ずれ—結合係数、自己インダクタンス



(a) 結合係数変動の場合



(b) 負荷抵抗変動の場合

図3 インバータ出力電流の位相特性

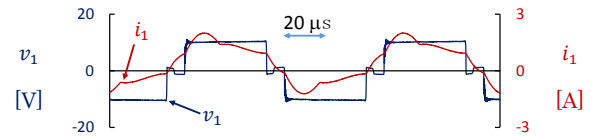
数を高い点から  $f_{\text{high}}$ 、 $f_r$ 、 $f_{\text{low}}$  と呼ぶ。結合係数と負荷抵抗値どちらの変動であっても、それらの値に応じて共振周波数の個数と周波数自体が変化する。

共振周波数追従の方法として、電流が電圧に比べて遅れ位相であれば周波数を低くし、進み位相であれば周波数を高くする方法を用いる。この場合、収束する周波数は結合係数と負荷抵抗値次第で  $f_{\text{high}}$  が  $f_r$  のどちらかになるが、必ず共振周波数にて安定して動作することができる。このとき、初期スイッチング周波数を  $f_r$  より高く設定し、周波数の下限を  $f_r$  の少し低い値にとる。一方で、フィードバックを逆極性とした場合は、結合係数と負荷抵抗値次第で  $f_r$  に収束もしくはどこにも収束せず発散となる。

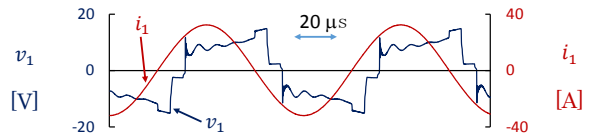
#### 4. 実験結果

図4、5にインバータ出力の電圧と電流の実験波形を示す。図4ではスイッチング周波数  $f_{\text{sw}}$  を  $f_r$  に固定しており、(a)は結合係数0.74で、(b)は0.11とした。図4(b)では自己インダクタンスの変化により共振周波数で動作できず、力率が低い。

図5では初期スイッチング周波数を31kHzとした上で共振周波数追従制御を適用し、定常状態となったときの波形である。制御法を適用することで、結合係数や負荷変動が生じて共振周波数で動作で

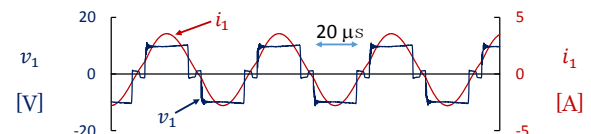


(a)  $k=0.74$ 、 $R=4.4$  の場合 ( $f_{\text{sw}}=10.3$  kHz)

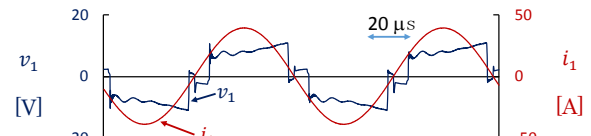


(b)  $k=0.11$ 、 $R=4.4$  の場合 ( $f_{\text{sw}}=10.3$  kHz)

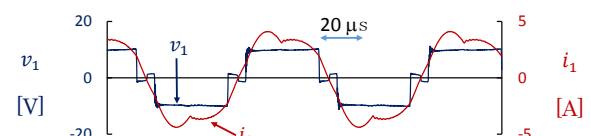
図4 固定周波数を用いた電圧、電流波形



(a)  $k=0.74$ 、 $R=4.4$  の場合 ( $f_{\text{sw}}=18.2$  kHz)



(b)  $k=0.11$ 、 $R=4.4$  の場合 ( $f_{\text{sw}}=10.5$  kHz)



(c)  $k=0.74$ 、 $R=20.0$  の場合 ( $f_{\text{sw}}=11.4$  kHz)

図5 共振周波数制御を用いた電圧、電流波形

きている。このとき、図5(a)では  $f_{\text{high}}$  に、(b)と(c)では  $f_r$  付近に収束している。

#### 5. まとめ

非接触給電システムの結合係数と負荷の変動に対し、共振周波数追従制御の検討を行った。検討した共振周波数追従制御法を用いることにより、常に共振周波数で高力率に動作できることを確認した。

#### 参考文献

- [1] 佐藤・木船, 第87回マリンエンジニアリング 学術講演論文集, pp.41-44(2017)
- [2] H. Kifune, Y. Hatanaka, IEEJ Trans. on Elec. and Electron. Engineering, 7(S1), pp. S167-S172(2012)