

モデル予測制御による波力発電機の出力最大化

機械・エンジニアリング

SATテクノロジー・ショーケース2026

■はじめに

本研究ではリニア式波力発電機を扱う。リニア式とは波浪の鉛直方向の振動を電力に変換する装置のことであり、系の固有周波数と波浪の周波数が一致したときにのみ大きく揺れ、発電が可能となる特徴を有する。したがって、波浪の周波数が固有周波数から大きく外れると、発電性能が低下するという問題が生じる。このような共振周波数の依存性は他の分野でも問題となっており、例えば振動発電の分野では、非線形振動を利用することで、発電可能な周波数域が広域化されることが報告されている⁽¹⁾。本稿では、このような発電可能周波数域のさらなる広域化を目的として、非線形振動を利用する波力発電機に対し、モデル予測制御（Model Predictive Control : MPC）が出力特性に与える影響について検討し、その結果を報告する。

■研究内容

1. 数値モデル

図1に示す図のように界磁部に磁石を配置することで、電機子部は上下どちらかの磁石に引き付けられる状態が通常となり、ポテンシャルエネルギーは双安定構造となる。双安定構造を有する系は、非線形振動が発生し、発電可能な周波数域が広域されることが見込まれる。また、図1のように磁石の周りにコイルを巻き、界磁電流により非線形性を制御することを考える。このとき、波浪条件に応じて適切な界磁電流を入力する必要がある。

そこで本研究では、所望の制御問題を最適化問題として定式化し、それを隨時解くことで、制御入力を決定する MPC を適用する。最適化問題は以下のように設計する。

$$\text{minimize} \int_0^{2T} (v_1(t) - v_2(t))^2 dt \quad (1)$$

$$\text{subject to } 0 \leq i_{f,1}(t), i_{f,2}(t) \leq 2 \quad (2)$$

ここで、 T はサンプリング周期、 t は時刻、 $v_1(t)$ と $v_2(t)$ はそれぞれ電機子部と界磁部の速度、 $i_{f,1}(t)$ と $i_{f,2}(t)$ はそれぞれ上側と下側のコイルに入力する電流である。MPCのホライズンは制御周期の2倍に設定し、予測期間内で電機子部と界磁部の相対速度を最大にしつつ、制御入力を最小にるように評価関数を設計した。制約条件は式(2)のように設定し、過大な電流が入力されないように制御する。

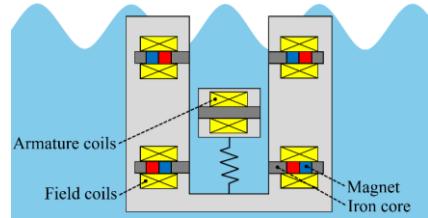


図1 波力発電モデル

2. 数値シミュレーション

前章で述べた評価関数に対して $T = 5s$ として最適化問題を設定した。入力波には任意の周波数をもつ規則波を与え、最適化アルゴリズムとして共分散行列適応進化戦略を採用した。これらの条件の下で、以下に示す2つの場合についてシミュレーションを実施した。

- ・ Case1：制御なし
- ・ Case2：制御あり（世代数 100、個体数 100）

図2に入力 1.0Hz における電機子部と界磁部の相対変位の時間特性を示す。(a)に示す Case1 では、電機子部が上側の界磁部に引き寄せられており、单安定振動が行われていることが確認できる。このときの出力電圧の実効値は 0.230V である。また、(b)に示す MPC による制御を適用した場合には、不定期にポテンシャル障壁を超える確率共振が生じていることが確認できる。このときの電圧の実効値は 1.94V である。この値は、0.230V に比べると十分に発電が行われているといえる。今後は入力電流と発電電流の効率の計算などを行う。

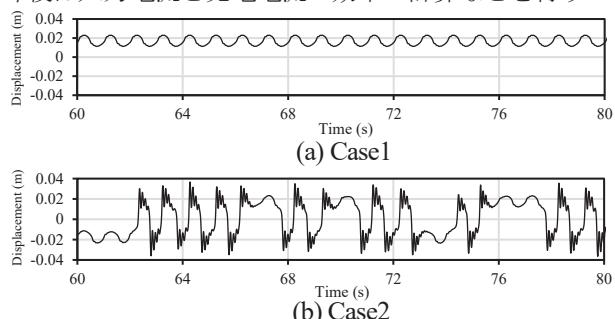


図2 入力1.0Hzの変位の時間特性

■参考文献

- [1] 佐藤孝洋, “2 質量カオス振動発電機の電磁界解析による性能評価”, 日本機械学会第36回計算力学講演会, OS-1708, Oct., 2023.

- キーワード: (1) エネルギーハーベスティング
(2) 波力発電
(3) モデル予測制御

- 共同研究者: 佐藤 孝洋(室蘭工業大学)