

つるべ式波力発電装置の出力平滑化の力学的検討

山口大学大学院 学生会員 ○松岡克弥, Pallav Koirala

フェロー会員 羽田野袈裟義 正会員 種浦圭輔

1. はじめに

近年、開発途上国のエネルギー資源の使用が増大し、また地球温暖化が深刻な問題となっており、新エネルギーの開発が切望されている。当研究グループでは、フロート・カウンターウェイトを利用したつるべ式波力発電装置を開発中である。この問題点として、常時発電する場合には、水面フロート上昇時にワイヤーがたるむ危険な現象が過去の実験で確認された。これを解消する方法として、ワイヤー経路中にテンションプーリを設置し、ワイヤー張力と発生電力の変動を抑える方法を考えている。本研究では、著者らのこれまでの機械力学モデルに基づいて新たにテンションプーリの効果を取り入れた力学モデルを計算し、テンションプーリの効果について第一歩の検討を行っている。

2. つるべ式波力発電装置

2.1 つるべ式波力発電システムの概要

つるべ式波力発電システムの概要図を図-1に示す。この構成で、水面変動によりフロートが上下動し、駆動プーリが回転を繰り返す。これをラチェット機構で一方の回転に変換し、変速機で増速して発電機を回す。この方式は、「常時発電」と「水面下降時のみ発電」の切り替えが可能である。常時発電の場合、水面上昇時にはカウンターウェイト重量が、そして水面下降時にはフロート重量が駆動力となる。

2.2 つるべ式波力発電の力学モデル

つるべ式システムの力学モデルは、発電機関連の力学、無負荷・静止状態での釣合い式、発電機稼働状態におけるフロート・駆動プーリ間の動力学により構成される。これらの力学諸量や基礎式を組合せると、最終的なモデル計算式として次式を得る。

$$\left[\frac{I}{R_m} + (M_c + M_f)R_m + \left\{ \frac{\rho_w C_M \pi d_f^2}{4} (h + x_w - R_m \theta) \right\} R_m \right] \frac{d^2 \theta}{dt^2} + \frac{1}{R_m} \left(C + \frac{G^2}{r} k_r k_e \right) \frac{d\theta}{dt} + \frac{\rho_w g \pi}{4} d_f^2 R_m \theta = \frac{\rho_w g \pi}{4} d_f^2 x_w + \frac{1}{8} \rho_w \pi C_D d_f^2 \left| \frac{dx_w}{dt} \right| \frac{dx_w}{dt} - R_m \frac{d\theta}{dt} \left(\frac{dx_w}{dt} - R_m \frac{d\theta}{dt} \right) \quad (1)$$

ここで、 ρ_w は海水の密度、 M_c はカウンターウェイトの質量、 M_f はフロートの質量、 d_f はフロートの直径、 h は無負荷・静止時のフロート喫水深、 x_w は水面上昇量、 x_f はフロートの静止位置からの上昇量、 f_r はフロートを吊るしたワイヤー張力、 G はギア比、 k_r はトルク係数、 k_e は誘導発電係数、 r は発電機の内部抵抗、 C_D は抗力係数、 C_M は仮想質量係数である。

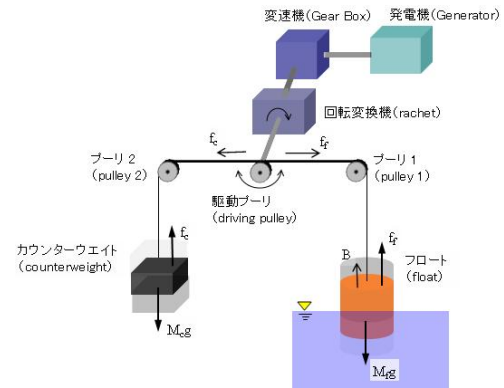


図-1 つるべ式動力変換システムの概要図

量、 M_f はフロートの質量、 d_f はフロートの直径、 h は無負荷・静止時のフロート喫水深、 x_w は水面上昇量、 x_f はフロートの静止位置からの上昇量、 f_r はフロートを吊るしたワイヤー張力、 G はギア比、 k_r はトルク係数、 k_e は誘導発電係数、 r は発電機の内部抵抗、 C_D は抗力係数、 C_M は仮想質量係数である。

3. テンションプーリの導入

3.1 導入背景・効果

基本形態のつるべ式波力装置は、水面上昇時にワイヤーが緩んだ後、水面下降に転じた時にワイヤー張力が急激に過大となる事態が生じ、大変危険で装置の稼働に支障をきたす。この問題を解決するため、駆動プーリとフロート間のワイヤー経路中に「テンションプーリ」を設置し、バネの利用で水面上昇時に緩んだワイヤーを張り、水面下降時の過大なワイヤー張力を抑える。また、発生電力の大きい時間帯にエネルギーの一部を貯蓄し、発生電力が小さい時間帯に貯蓄されたエネルギーを開放する。これにより、発生電力の平滑化と装置の安全性、小容量化・経費削減を目指す。

3.2 テンションプーリを導入した装置の力学モデル

(1) 蓄力エネルギーを開放する力 T_s

図-2にテンションプーリを導入した構成を示す。拡大図より鉛直方向の力の釣合いは次式で与えられる。

$$F_v: T_s = f_1 \sin \alpha_1 + f_2 \sin \alpha_2 \quad (2)$$

ここで、 α_1, α_2 はワイヤーの傾き、 f_1, f_2 はテンションプーリ

リの左右のワイヤー張力 f_f である。ワイヤー水平距離 l_1, l_2 とワイヤー減少量 $\Delta l_1, \Delta l_2$ としてワイヤー長 $l_1 + \Delta l_1, l_2 + \Delta l_2$ の関係は次の式となる。

$$l_1 + \Delta l_1 = l_1 + \frac{1}{2} \frac{y^2}{l_1} \quad (3) \quad l_2 + \Delta l_2 = l_2 + \frac{1}{2} \frac{y^2}{l_2} \quad (4)$$

式(2)に式(3), (4)を代入し整理すると、蓄力エネルギーを開放する力 T_s は次式となる。

$$T_s = f_1 \frac{y}{l_1 \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{y}{l_1} \right)^2 \right\}} + f_2 \frac{y}{l_2 \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{y}{l_2} \right)^2 \right\}} \quad (5)$$

(2) 平衡点 y の誘導

バネ定数を k , バネ自然長を y_0 , 平衡点を y とすると、

$$T_s = k(y_0 - y) \quad (6)$$

式(5)と(6)より平衡点 y は次式で与えられる。

$$y = \frac{k}{\frac{f_1}{1 + \frac{1}{2} \left(\frac{y}{l_1} \right)^2} + \frac{f_2}{1 + \frac{1}{2} \left(\frac{y}{l_2} \right)^2} + k} y_0 \quad (7)$$

3.3 機械力学モデルから算出される力学量

(1) 装置稼動時における平衡点の変動比較

図-3 は水面・フロート変位・平衡点の時系列を示す。水面の下降と共にフロートが下降し、その後フロートの下降が抑えられておりバネの圧縮が確認される。その後の水面上昇時にはバネが伸びている。図-4 は種々のバネ定数 k での平衡点振幅とワイヤー長の変化を示す。 $k > 20 \text{ kN/m}$ では変化が小さく、バネの効果は期待できない。この場合、 k が $1 \sim 10 \text{ kN/m}$ のバネを用いると効果が出る。

(2) テンションプーリー導入後の発生電力

図-5 はテンションプーリー導入前と導入後の発生電力を示す。テンションプーリー導入前では発生電力がゼロになる時間帯が存在するのに対し、テンションプーリー導入後は、バネに貯蓄されたエネルギー開放により、その時間帯に高い電力を獲得することができる。

(3) テンションプーリー導入後の平均発生電力

図-6 はテンションプーリー導入前と導入後の平均発生電力の比較を示す。波高 H が低い場合は両者の差は小さいが、波高 H が高いとテンションプーリー導入後の平均発生電力が大きく、波高 3 m ではその差が約 13 kW である。

4. まとめ

以上、つるべ式波力発電装置にテンションプーリーを導入することの効果を力学的に検討した。その結果、バネに貯蓄されたエネルギー開放により、発生電力が増加することを予測した。

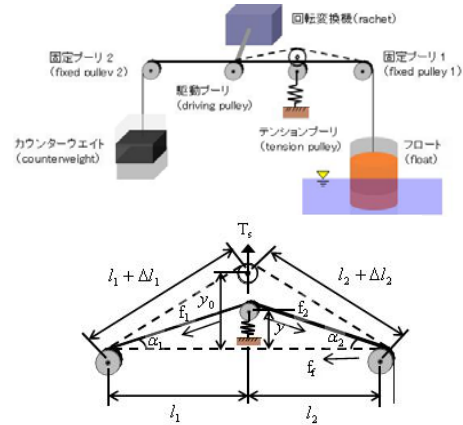


図-2 テンションプーリーの実施形態と力学図

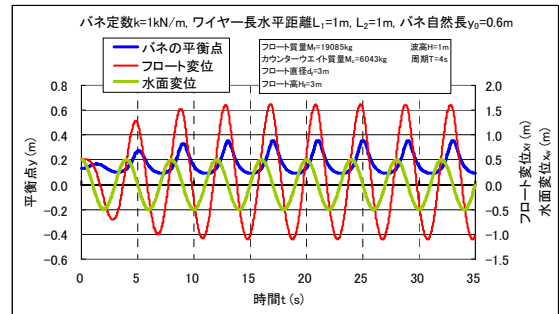


図-3 水面・フロート変位・平衡点の時系列

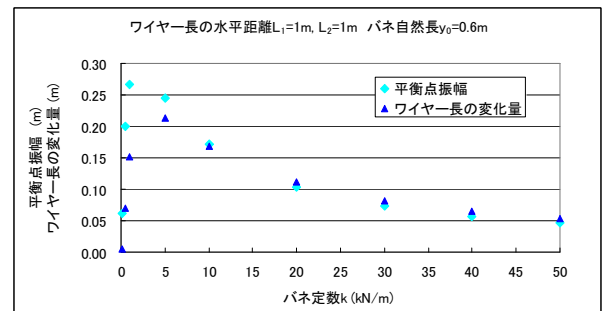


図-4 平衡点振幅とワイヤー長の変化量

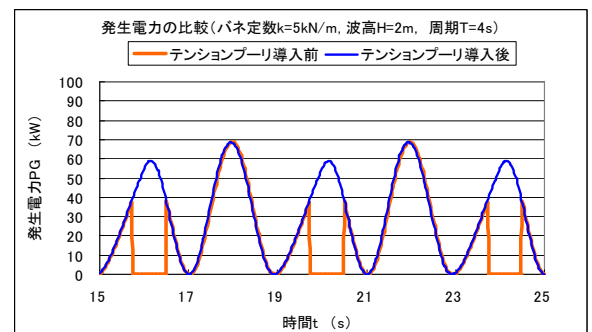


図-5 テンションプーリー導入後の発生電力

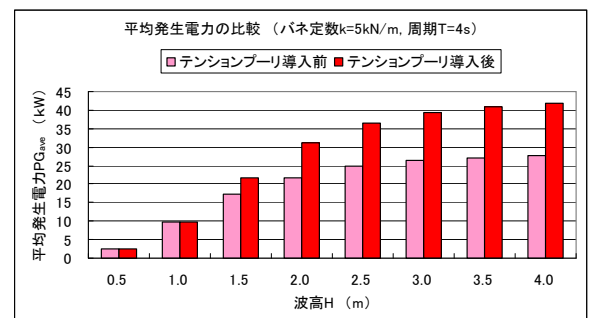


図-6 テンションプーリー導入後の平均発生電力