機械的制約を考慮した波浪ブイ式波力発電機の時間領域シミュレーション

Time domain simulation of the floating buoy type wave energy converter
with the limitation of mechanical capacity○正 神尾 武史 (東大院) 正 飯田 誠 (東京大)
正 荒川 忠一 (東大院)

Takeshi KAMIO, The University of Tokyo, Hongo 7-3-1, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656

Wave energy is one of the most hopeful renewable energies. A floating point-absorber with an oscillating body type conversion system will be lower cost and suitable for the offshore powerful wave energy. Although a resonant control strategy is suitable for the oscillating body type converter, it is practically difficult to use because of the mechanical and electrical system limitations. It is important to design an optimal control strategy in the limitations. In this study, a new concept with detuned parameters for a resonant control system is discussed by using a time-domain numerical simulation of the converter. It is presented that the maximum displacement of the converter is reduced by the detuned parameters for the resonant control.

Key Words: Wave energy, Oscillating body, Numerical simulation, Control system, Irregular wave

1. 諸言

周囲を海に囲まれた日本では、再生可能エネルギー利用として海洋エネルギーへの期待も大きい。波力発電の研究の歴史は長い、未だ実用化までには発電効率やコストにおける課題⁽¹⁾⁽²⁾がある。NEDO事業「海洋エネルギー発電システム実証研究(機械式波力発電)」⁽³⁾では、実証研究により波浪ブイ式波力発電装置の実用化を目指すとともに、シミュレーションツールの開発により、運動解析や発電量予測、制御方法の検討などを行っている。本研究で対象とする波浪ブイ式波力発電装置は、スパーとフロートの2浮体から成り、スパーは係留で海底に固定され、フロートが波を受けて生じた運動をラック・アンド・ピニオンにより回転運動に変換し、スパー内部に設置された発電機を駆動して発電する仕組みであり、原理としては可動物体式に分類される。

著者はこれまでにスパーとフロートの2浮体の運動を時間領域解析するシミュレーション、同調制御を採用した場合の運動解析及び発電量予測、フロートの可動範囲や発電機の容量の制限を考慮したシミュレーションを行ってきた⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾。同調制御ではフロートの変位を波高に対して何倍にも増幅することで大きな発電エネルギーを得ることを目指すが、実際の装置における可動範囲や発電機容量を考慮すると、その実現は難しく、またシミュレーションでは発電量が大きく減少してしまうことが分かっている⁽⁶⁾。このため、波高が大きい場合には抵抗制御に切り替えるなど、制限を考慮した上での最適制御の検討が必要である。

本稿では、同調制御における制御パラメータについて、フロートの可動範囲の装置仕様から、最適制御パラメータを選択する手法の検討を行った。抵抗制御では浮体の変位が波高とほぼ同じになるという点では採用しやすいが、効率の点では同調制御とは大きな開きがあり、すぐに抵抗制御に切り替えてしまうのはためらわれる。抵抗制御と同調制御との間に位置する制御を検討したい。本稿中の解析で用いた浮体モデルは既報のものと同じである⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

2. 制御負荷及び制御パラメータの探索

本研究では、同調制御(Resonant control)での制御負荷 F_e を式(1)で記述し、抵抗制御(Resistive control)は式(2)、式(2)中の係数 R_{PTO} は式(3)とする⁽⁷⁾。

$$F_e(t) = -K_{PTO} \cdot \dot{z}(t) + C_{PTO} \cdot z(t) \quad (1)$$

$$F_e(t) = -R_{PTO} \cdot \dot{z}(t) \quad (2)$$

$$R_{PTO} = \sqrt{\{\omega(M+m) - \frac{C}{\omega}\}^2 + K^2} \quad (3)$$

式中で、 z はフロートの変位(本研究中では2浮体モデルを考慮しており、実際にはスパーとの相対変位で記述されるが、ここでは省略した)、 M はフロートの質量、 m は付加質量、 K は造波減衰力係数、 C は復原力係数である。式(1)中で係数 K_{PTO} 、 C_{PTO} は同調制御の制御パラメータであり、それぞれ、 $K_{PTO} = aK$ 、 $C_{PTO} = bC$ と表せるとし、係数 a 、 b を最適に選ぶことで最大同調制御が得られる。

ここで、波周期 $T=7s$ 、波高 $H=1m$ の規則波(正弦波)に対して、同調制御の最適化パラメータ探索を行った結果を示す。最適化係数 a 、 b をそれぞれ0から0.8の範囲で0.1毎に変化させシミュレーションを行った。1000sのシミュレーション結果から平均出力 P_{ave} [W]、及びフロートの変位幅 Z [m]を計算した。図1には、フロートの変位幅 Z を波高 H で正規化した Z/H を横軸、平均出力 P_{ave} を縦軸としたプロットを示した。図1中には抵抗制御での値も示した。抵抗制御では Z/H 値がほぼ1となっているのに対し、同調制御では Z/H 値が何倍にもなり、およそ6のときに最大出力が得られている^(補足)。この時 $a=0.6$ 、 $b=0.6$ であった。調査した同調制御パラメータから代表値を選択したものを図1中及び表1に示した。また表中で出力の大きいものからA-Iとした。

最大出力の同調制御Aと抵抗制御の間では出力に大きな開きがあり、フロートの運動振幅の制御を目的として同調制御と抵抗制御を切り替える場合に、同調制御Aと抵抗制御で切り替えるだけでは大きな損失になる。そこで同調制御Aと抵抗制御の間に位置する制御B-Iを用いた制御を用いる方法が考えられる。この制御は、同調点をずらした状態(もしくは同調状態とは言えない状態)と考えられるが、フロートの変位の振幅を抑えつつ、大きな出力を得られると期待される。

3. 制御パラメータの選択方法

前節では、規則波に対する調査から、同調制御パラメータを導いた。実際には不規則波が入射することから、不規則波における挙動を確認することが重要である。ここではJONSWAP波浪スペクトルを用いた不規則波($T_p=7s$ 、 $H_s=1m$)を入射波としたケースについて、フロートの可動範囲 L を $3m$ ($-1.5m < z < +1.5m$)と想定し、制御による比較を行った。図2、図3に浮体の運動及び出力の時刻歴を示す。

Fig. 1 P_{ave} by the resistive control and resonant control with various parameters for a sine wave ($T=7s$, $H=1m$)

Table 1 Selected resonant control parameters for a sine wave ($T=7s$, $H=1m$)

Type	a	b	Z/H	P_{ave} [kW]
A	0.6	0.6	6.06	185
B	0.7	0.6	5.59	184
C	0.8	0.6	5.18	180
D	0.9	0.6	4.82	176
E	0.9	0.7	4.28	150
F	0.9	0.5	3.48	84.7
G	0.9	0.8	2.76	68.2
H	0.9	0.4	2.49	40.0
I	0.9	0.3	1.92	22.1

パラメータ A を用いた場合には、可動範囲を超える頻度が多い。このためなるべく可動範囲を超えず、尚且つ出力が最大となるような最適な制御を検討したい。波高 H とフロートの可動範囲幅 L の比 L/H により、表 1 から最適な制御パラメータを選択する。ここではフロートの可動範囲に収まるよう、 $Z/H=2.76$ ($L/H_s=3$) の値をもつパラメータ H を使用した。このパラメータを用いたシミュレーションでは、フロート変位が可動範囲を超える頻度は大きく減少した。

平均出力では同調制御 A、抵抗制御、同調制御 H の順に 258kW, 82kW, 108kW であり、制御 H は制御 A よりも小さな値ではあるが、抵抗制御よりも大きな値を示した。

4. 結言

可動物体式の波力発電装置において同調制御は高出力が期待できる一方、フロート変位が大きくなることから、実際の利用には限界があり、波高の小さい場合にのみ利用可能となる。本研究では、同調制御において、制御パラメータをフロート変位の観点で整理し、フロートの変位の大きさを抑え、且つ抵抗制御よりも大きな出力を得られる制御を検討し、不規則波を対象としたシミュレーションを実施した。本稿中ではフロート変位に着目し議論を行ったが、同様に発電機の入出力などに着目することも重要であり、複数の観点から最適制御を導く。

謝辞

本研究は NEDO プロジェクト「海洋エネルギー発電システム実証研究(機械式波力発電)」の助成を受けたものであり、関係各位に感謝申し上げます。

Fig. 2 Time history of float's movement for the irregular wave (JONSWAP, $T_p=7s$, $H_s=1m$) with MAX, LOW, MID control

Fig. 3 Time history of power for the irregular wave (JONSWAP, $T_s=7s$, $H_s=1m$) with MAX, LOW, MID control

引用文献

- (1) 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 平成 21 年度成果報告書 新エネルギー等の未利用技術・未利用エネルギー等の現状と課題に関する調査, 2010.
- (2) A. Falcao, "Wave energy utilization: A review of the technologies", Renewable and Sustainable Energy Review, Vol. 14, pp899-918, 2010.
- (3) S. Watanabe, T. Maemura, A demonstration project of wave-power generation system, Grand Renewable Energy 2014, P-Oc-2-4, 2014.
- (4) 神尾武史, 飯田誠, 荒川忠一, 入射波特性に基づく波浪ブイ式波力発電機の最適制御, 日本機械学会 第91期 流体工学部門講演会論文集, 2013.
- (5) T. Kamio, M. Iida, C. Arakawa, Numerical simulation and optimization of a wave energy converter for the Izu island sea in Japan, 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE2014), 2014.
- (6) D. Matsuda, T. Kamio, M. Iida, C. Arakawa, Optimal control of the oscillating body type wave energy converter under limited mechanical and conversion capacity, Grand Renewable Energy 2014, O-Oc-10-1, 2014.
- (7) J. Hals, J. Falnes, T. Moan, A Comparison of Selected Strategies for Adaptive Control of Wave Energy Converters, Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol. 133, 031101, 2011.

補足) 同調制御時のフロートの変位が非常に大きいですが、これは本研究内でのシミュレーションが線形になっているためである。