水弁集約式波力発電システムの発電出力に関する検討

Electric Power of a Pneumatic Wave Power Conversion System with a Water Valve Rectifier

植木圭一・石澤清史・吉目木明*・菊地新喜*

東北電力(株)研究開発センター, 仙台市青葉区中山7丁目2番1号

*東北学院大学, 宮城県多賀城市中央1丁目13番1号

K. Ueki, K. Ishizawa, A. Yoshimeki*, and S. Kikuchi*

Research and Development Center, Tohoku Electric Power Co., Inc., 7-2-1, Nakayama, Aoba-ku, Sendai

*Tohoku Gakuin University, 1-13-1, Chuo, Tagazyou City, Miyagi

(2000年10月2日受理, 2001年1月24日採録)

We developed a new type of wave power generation system. In this system, water valves without mechanical operation are combined with air chambers. The main advantage of this system is that there are few failures in the rectifying water valves, since there are no moving parts. A test plant was installed on the south breakwater at Haramachi thermal power station, and testing for practical use has been carried out at the Haramachi site since 1996. In the testing, we measure the wave height, the pressure in the air chambers, the pressure in the water valve chambers, the pressure in the turbine room, the electric output, and so on. We have obtained over 200 series of data between 1996 and 2000. This paper presents a summary of the characteristics of the power generation system in view of the results obtained thus far.

Key words: wave power generation system, water valve, air chamber, test, water valve chamber

1. はじめに

現在, 地球環境問題や化石燃料枯渇問題が社会的にも重要視されており, 太陽光発電・風力発電等の自然エネルギーの有効利用が脚光を浴びている。こうした中で, 東北地域が波エネルギー賦存量に恵まれている事などから「水弁」という独自開発技術を採用した新しいタイプの波力発電実証実験設備(水弁集約式波力発電システム)を東北電力原町火力発電所の南防波堤に建設し, 様々な実海域での実証実験を実施してきた。我々は先に水弁集約式波力発電システムの基礎的な検討や実証実験設備の概要について報告した。¹⁾ 今回, 本論文では実海域での計測データから水弁の深さ(以下没水深と呼ぶ)を変化させた時の波エネルギーと発電出力等の関係や水弁室の圧力波形等から水弁の動作状況を踏まえ, 本波力発電システムについて検討した結果について報告する。

2. 実証実験システム設置位置および概要

実証実験を行っている波力発電システム設置位置を Fig. 1 に示す。本波力発電システムは, 沿岸固定式振動水柱型に属するシステムで, 防波堤としての機能を有する波力発電ケーソン(ケーソンは水面下で使われる気密されたコンクリート製箱等を言う)に波エネルギーを空気エネルギーに変換する空気室, 空気室に取り込んだ往復空気を一方方向整流する水弁(水弁室), 水弁により整流された空気流を集約する集合ダクト, 集合ダクトからの空気流により発電する空気タービン・発電機とこれらを運転制御する配電盤類等が組み込まれ, 原町火力発電所の南防波堤先端に設置されている。入射波の波エネルギーは, 波力発電ケーソン前 220 m の地点にブイ式波高計を設置し, 実験海域の波高・周期の計測結果からスペクトル解析により求めている。

Fig. 2 に寄せ波時動作原理を表すシステムの概略構成図を示す。寄せ波時は空気室内空気が波の水面上昇により圧縮され大気側へ矢印のように流れ, 空気タービンを回転させ発電する。これに対して引き波時は, 空気室内空気圧が波の水面低下により大気圧より低圧になり, 空気流は大気側から空気タービン→負圧集合ダクト→負圧水弁→空気室へ流れ発電するため, 寄せ波・引き波の双方向で発電可能なシステムとなっている。なお, 寄せ波時の負圧水弁, 引き波時の正圧水弁は逆止弁として機能している。

Fig. 1 Location of the wave power generation system.

Fig. 2 Outline composition of the wave power generation system.

3. 実験海域の海象条件

実験海域の海象条件は、システムの評価に重要な要素となる。Fig. 3に1983～1992年までの10年間に計測された港湾設計用データで本システムの設計諸元でもある沖合データと1998～1999年の1年間に計測した波力発電ケーソン前データを有義波高・周期別にその出現頻度を示す。この図から、有義波高においては沖合データが1 m付近の波が多く3 mを超えるものまで出現しているのに対して、波力発電ケーソン前データでは0.5 m付近の波が多く2 mを超えるものはほとんど出現していない。有義波周期を見ると、沖合データと波力発電ケーソン前データともに7.5 sec付近が最も出現頻度が多く類似しているが、沖合データの方が14 sec程度の長い周期のものまで出現している。有義波高の波力発電ケーソン前データが低い状況は、外洋側に位置する北防波堤により北防波堤側から南防波堤へ向かってくる波向きの波が遮蔽されているためであると考えられるが、有義波周期には大きな影響は与えないことが解る。北防波堤の沖合には、石炭船の航路用波高計が設置しており、この波高計が波方向も計測可能なことから1998年11月～1999年10月までに計測された同日同時刻の沖合波高計データと波力発電ケーソン前波高計データから、その平均有義波高を波方向別に表したものをFig. 4に示す。Fig. 4からNE～ENE方向の波は、沖合側の有義波高に対して波力発電ケーソン前の有義波高が極めて低いS E～E S E方向になるとその差が少なく、波力発電ケーソン前で

も比較的高い波高を示している。波エネルギーが波高の2乗と周期に比例し、周期が北防波堤の遮蔽効果を余り受けないことから、波高が高いほど波エネルギーが大きいと言える。したがって、現在のシステムの設置位置ではS E～E S E方向の波が発電に適した波向きであることが解る。

Fig. 3 Frequency of the occurrence of the significant wave height $H_{1/3}$ and significant wave period $T_{1/3}$.

Fig. 4 Mean significant wave height by direction (1998.11-1999.10).

4. 発電特性

実験海域でデータ収集・解析した結果を抜粋示す。Fig. 5は水弁没水深を5 cmに設定し、500 r/minで運転した1999年4月12日18時の時系列データを抜粋したものである。この波形から発電出力が集合ダクト差圧（|正圧集合ダクト圧力| - |負圧集合ダクト圧力|）と比例して変化していることが解る。Fig. 6は、同時系列データを集合ダクト差圧と発電出力の関係を表したもので、集合ダクト差圧と発電出力に相関関係が認められる。

Fig. 5 Time series of $|PP| - |PN|$ pressure and generated output on April 12, 1999, from 17:52:58 until 17:53:58. $H_{1/3}=1.15$ m, $T_{1/3}=7.5$ sec, mean generated output = 31.0 kW, PP = pressure of positive pressure air receiver, PN = pressure of negative pressure air receiver.

Fig. 6 Relation between $|PP| - |PN|$ pressure and generated output on April 12, 1999, from 17:52:58 until 17:53:58.

Fig. 7はFig. 5と同日に水弁没水深を5 cmに設定して500 r/min運転をしたが、波高が高い場合に見られる水弁室の水が吹き抜ける現象を引き起こして、負圧水弁室の設定水位が低下した1999年4月12日14時の時系列データを抜粋したものである。Fig. 7はFig. 5では見られなかった発電出力波形と集合ダクト差圧波形が全く異なる部分が見られる。このことは、同時系列データを集合ダクト差圧と発電出力の関係で表したFig. 8により明確に伺える。

また、Fig. 9はこの14時データの正圧集合ダクトおよび負圧集合ダクト圧力の時系列データを示したものである。

Fig. 7 Time series of $|PP| - |PN|$ pressure and generated output on April 12, 1999, from 14:00:28 until 14:01:28. $H_{1/3}=1.26$ m, $T_{1/3}=7.0$ sec, mean generated output = 30.3 kW, PP = pressure of positive pressure air receiver, PN = pressure of negative pressure air receiver.

Fig. 8 Relation between $|PP| - |PN|$ pressure and generated output on April 12, 1999, from 14:00:28 until 14:01:28.

Fig. 9 Time series of pressures of the positive pressure air receiver and negative pressure air receiver on April 12, 1999, from 13:50 until 14:10.

Fig. 9で正圧集合ダクトの圧力は水弁没水深の5 cmを維持しているため、水弁が正常に機能している他のデータと同様にほとんどが正圧（大気圧に対して高圧）側で変化しているのに対し、負圧集合ダクトの圧力は負圧（大気より低圧）側で変化すべきものが正圧側へも大きく変化している。これから、負圧側の水弁が整流弁としての機能を失っていることが解る。

次に本実験機の設計・開発段階にて模型実験等に行われた基礎検討の結果から、水弁の没水深が発電出力に影響を与えることが示されていることから、これらを検証する意味を含め、1999年4～9月の間に実海域で行った水弁没水深を変更して運転した結果から水弁没水深 d と平均発電出力の関係をFig.10に示す。Fig.10より、同じ入射波エネルギーに対して水弁没水深が浅いほど平均発電出力は高い値を示している。図中の近似直線は、最小2乗法により求めたものであり、近似式の切片-13 kWが誘導発電機を系統連系しているために生じる発電機・軸受・タービンの損失分に相当し、傾きは発電システムの平均効率に相当している。これにより、水弁没水深の違いで発電システムの平均効率に変化し、最大で約13%となることが解る。

Fig. 10 Relation between the water valve depth d and the mean generated output We .

5. 考察およびまとめ

本実験海域の海象条件下で本波力発電システムを運転したデータより、水弁没水深を浅くした方がシステムの平均効率が高くなっており、発電電力量を増加させるには水弁没水深を浅めに運転するのが望ましいと言える。また、水弁の整流弁としての機能が失われた場合でも軸流タービンで発電出力が得られていて、その発電電力に余り差を生じていないことから、水弁機能が失われても発電出力に大きな悪影響は与えないことが解る。現在の波力発電システムにおいては、波の往復運動を一方に整流しないと本システムで採用したような70%前後の高効率な軸流タービンが採用できないと考えられ、タービン効率が45%前後と低いウエルズタービンを主流に採用されてきたが、本実験結果から水弁等の整流弁を適用しなくとも軸流タービンが採用されることが示唆された。これにより、水弁を採用しない波力発電システムに軸流タービンを採用すれば、さらにシステムの平均効率が向上し年間発電量の増加が期待できるが更に検討する必要がある。

なお、現在のような装置構成による水弁は水位調整の応動性他の課題等から、整流弁より機械式弁故障時の安全装置として適用した方が好ましいと思われる。

文 献

- 1) 菊地, 石澤, 植木: 日本応用磁気学会, Vol.24, 815-818 (2000).
- 2) K.Ueki, K.Isizawa, H.Nakagawa: Proceedings of the Tenth (2000) International Society of Offshore and Polar Engineers Conference, ed. Jin S. Chung, Robert MW Frederking, Hiroshi Saeki and Wataru Koteraayama, Seattle, USA, 2000, Vol.1, P399-404 (ISOPE, California, 2000).