

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 22 日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560334

研究課題名(和文)革新的高効率波力発電システムの開発

研究課題名(英文)Development of Innovative High Efficiency Wave Power Generation System

研究代表者

真田 雅之 (SANADA, Masayuki)

大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：90264803

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円、(間接経費) 1,170,000円

研究成果の概要(和文)：システムの想定設置海域に適した発電機を設計して有限要素法を用いて解析を行い各種特性の算出を行った結果、12極SPMSGおよび増速ギヤ比8のダイレクトリンク機構を用いる場合、設置海域の違いによらず平均エネルギー変換効率が最大約20%で、従来の波力発電システムと比較して数倍以上となることを示した。また、発電機のトルク指令パターンについては2段階にトルク指令を切り替える方式が発電出力が最も改善され、一定トルクパターンを用いる場合に対して発電出力が3～6%増加した。

研究成果の概要(英文)：A suitable structure of generator for the installation sea area of the system was designed. The generator was analyzed by using the finite element method, and various characteristics of the system were calculated. In the condition to use the direct link mechanism of a multiplying gear of 8 and the 12-pole SPMSG, the average energy conversion efficiency did not depend on the difference of the installation sea area and was the maximum 20%. It was shown that the conversion efficiency became several times or more compared with a conventional wave power generation system. Moreover, the generated electric power has been improved most in the method to switch the torque command to two stages for the torque command pattern of the generator. The generated electric power has increased by 3-6% compared with the case to use the constant torque command.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：波力発電 発電機構造 ダイレクトリンク 波の出現頻度 設置海域 トルク指令 効率 発電出力

1. 研究開始当初の背景

(1) 風力発電や太陽光発電に代表されるように、地球環境の悪化と資源枯渇の問題から、自然エネルギーを活用する研究が活発化して久しいが、四方を海に囲まれている我が国において海岸線 1m あたり平均 7kW もの大きなエネルギー源である波エネルギーによる、波力発電の研究開発・実用化状況は風力発電や太陽光発電のそれと比べて大きな隔たりが存在している。この事実は、これまでに検討されてきた種々の波力発電システム（主として空気室を用いた空気圧変換タービン発電方式）がどれも設置の困難さやコストの問題、荒天時の安全対策など不利な点が大きいからに他ならない。

(2) 海外においてはヨーロッパで 2002 年頃より波力発電用リニア発電機の検討が始まっており、米国においても 2005 年よりオレゴン州立大学がオレゴン州エネルギー局、国家科学財団、米国エネルギー省と連携を取って研究開発を開始している。最終目標は海岸線からおよそ 1~3km 沖合に設置した 200 基のリニア発電機構による約 50MW の発電プラントの建設である。一方、国内ではリニアモータの発電機としての検討はほとんど実施されておらず、一部の電機メーカーにおいて 100kW 程度のシステムの検討が始められている段階である。これらのシステムの発電機構は全てリニアアクチュエータを発電機として利用することを想定して検討が進められており、その場合には実際の波（水面）の大きな変位量から小さい可動子変位量に変換する機構をエネルギー損失を最小にしつつ開発しなければならないため、技術的ハードルが高い。

2. 研究の目的

(1) 本研究ではリニア発電機とダイレクトドライブ方式の組み合わせおよび低速用発電機とラック・ピニオン機構の組み合わせの検討より、発電コストを一般的な太陽光発電システムと同程度に低減することのできる高効率な波力発電システムの開発を目的とする。

(2) 従来の波力発電システムのように大規模でエネルギー変換効率が低い空気圧変換設備等を必要とせず、設置が簡便で耐久性が高く、高効率な中小規模の波力発電システムを実現するための発電機として、最も有効な動作原理・構造を有する、リニア発電機・低速用発電機の実証試験と船舶試験水槽での実際の波を使った発電効率の評価・確認と波一直線動作変換機構の問題点抽出を行う。

3. 研究の方法

申請から研究開始時点までに高効率波力発電システムの基礎検討により、リニア発電機および低速用回転発電機について解析した結果から、直線一回転運動変換機構での損失を考慮しても回転発電機とラック・ピニオン

機構の組み合わせによる発電システム（ダイレクトリンク式波力発電システム）のほうが発電出力・効率ともに高くなることが明らかとなっていた。また、システムの設置海域における波の出現頻度を考慮することが非常に重要な問題であることも他大学での研究により明らかとなっていた。このため、リニア発電機によるシステムの検討と船舶試験水槽での波一直線動作変換機構の検討を見送り、ダイレクトリンク式波力発電システムにおける設置海域を考慮した発電機最適設計および発電量を最大化するためのトルク制御パターンの検討を行った。

4. 研究成果

(1) 発電機が波からの機械入力に対してオーバースペックになるのを防ぐため、図 1 に示す潮岬沖における波の出現頻度が 2%以上の波を対象として動作シミュレーションを行い、発電機の要求仕様を求めた。ある条件の波に対して十分に発電するためには、発電機の仕様が最高速度と最大機械入力を上回ることが必要である。潮岬において出現頻度 2%以上の波で、最も発電機の要求仕様が高くなるのは波高 1.5 m, 周期 6 s の場合で、最高速度 3300min^{-1} , 最大機械入力 6800W であり、所要トルクは約 20Nm となった。図 2 に要求仕様を基に設計した発電機の例（12 極表面磁石構造同期発電機；12 極 SPMSG）を示す。検討を行った発電機モデルは 4, 8, 12, 16 極の SPMSG であり、ロータ外径、磁石量、スロット面積を等しく設計している。有限要素法を用いた解析により、すべてのモデルで先に述べた要求仕様を満たしていることが確認できた。

(2) 面積 1.0m^2 の浮きを用いた場合の各発電機の電気出力の平均値を図 3 に示す。これより、12 極 SPMSG を用いた場合、平均電気出力が最大で 1004W となることが分かった。4 極では鉄損より銅損の割合が大きく、16 極では銅損より鉄損の割合が大きいため、銅損と鉄損の割合が適切な 12 極 SPMSG において最も平均電気出力が大きくなっている。また、シ

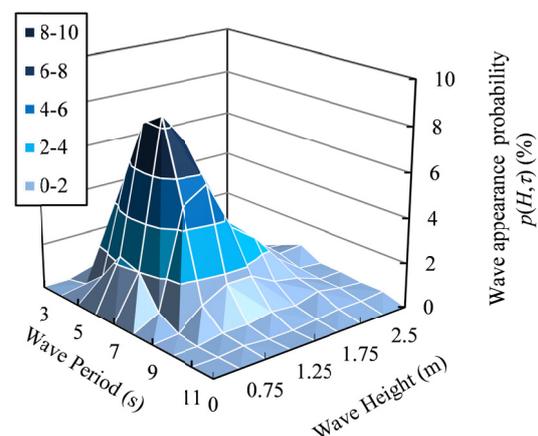


図 1 潮岬沖における波の出現頻度

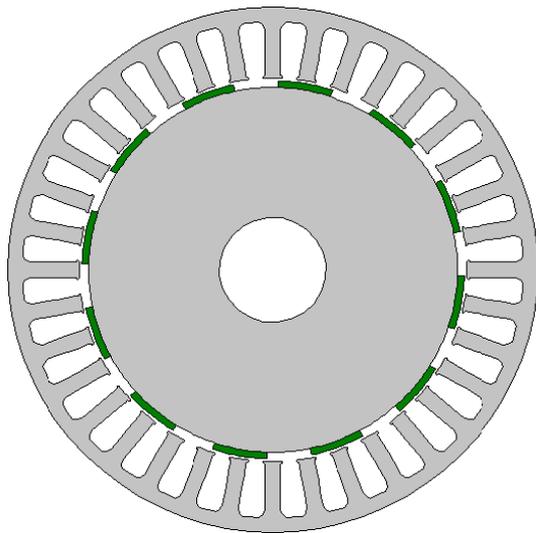


図2 12極36スロットSPMSG概形

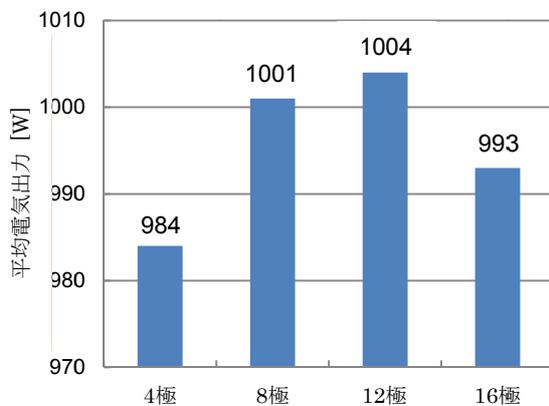


図3 各発電機の平均電気出力

システムの機械系の慣性モーメントの変化により発電出力が変化することも明らかとなり、最適な付加慣性モーメントを用いて最大の電気出力を求めると1104Wであった。潮岬沖の波エネルギーはおよそ4.9kW/mであるため、変換効率は約22.5%となり、従来の発電システムの変換効率(4~15%)と比べて高いことが分かる。

ここまででは、波高に対して適切な発電機トルクの指令値を与えること(Control-A)ができるものとして検討していたが、この方法では、波高の情報をフィードバックする必要があるため、実用時に問題となることが予想される。そこで、トルク指令値を変化させずにすべての波に対して一定とするシンプルな制御方法(Control-B)について検討を行った。その結果、潮岬においてはトルク指令値を11.6 Nmにすると12極SPMSGにおいて最大電気出力975Wが得られたが、発電量が減少していることが分かる。これは、波高の異なる波に対して適切なトルク指令が与えられていないためである。

(3) ダイレクトリンク式波力発電システムの設置海域として新たに波浮沖(波のエネルギー: 11.2kW/m)を想定して検討を行った。

図4に波浮沖における波の出現頻度を示す。潮岬沖の場合と同様に波の出現頻度が2%以上の波を対象として動作シミュレーションを行い、発電機の要求仕様を決定した結果、波高2.0m、周期6sの場合で、最高回転速度4500min⁻¹、最大機械入力12500Wとなり、所要トルクは約28Nmとなった。この要求仕様をもとに12極SPMSGを設計して平均電気出力および変換効率を算出した結果、1855W、16.6%となった。

(4) 波高に応じて発電機トルク指令を適切な値に制御することにより最大発電機入力を得られるが、(2)項で述べたように連続的に波高を観測することは難しい。そこで、どのような波高の波に対しても発電機トルク指令の値を一定とするControl-Bを検討したが出力が低下していた。潮岬沖での出力低下はおよそ12%であったが、波浮沖においても1411W(24%)の出力低下となることが分かり、発電電力量の改善が必要である。そこで、常時検出または推定が可能な発電機の回転速度を用いて発電機トルクを変化させる方法について検討した。図5に示すような発電機トルク指令の形状について曲線の曲率、切り替え速度(N_1)やトルク指令値(T_{e1} , T_{e2})などのパラメータを変化させて最適パターンを調査した。その結果、発電機の回転速度に比例するパターンや曲線状のパターンではなく、特定の回転速度で2段階にトルク指令

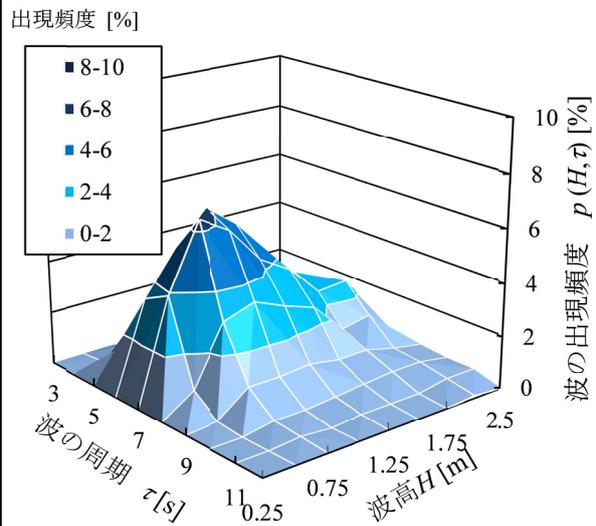


図4 波浮沖における波の出現頻度

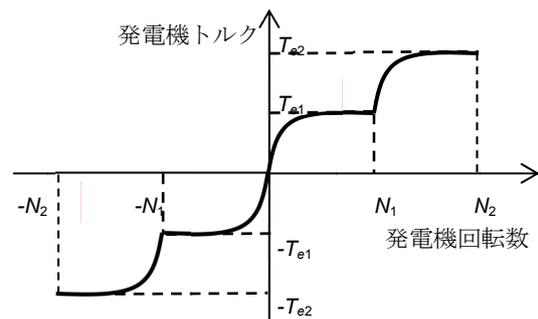


図5 発電機トルク指令

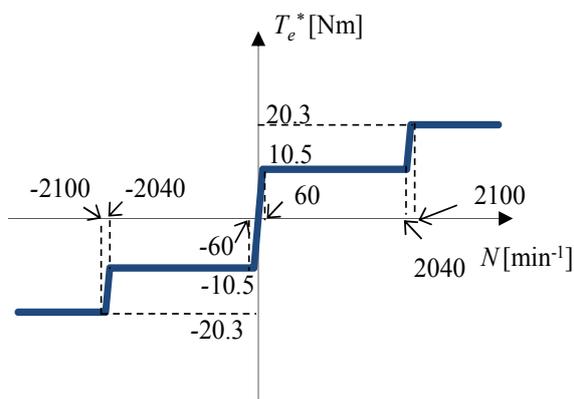


図6 潮岬沖における最適な発電機トルク指令の形状

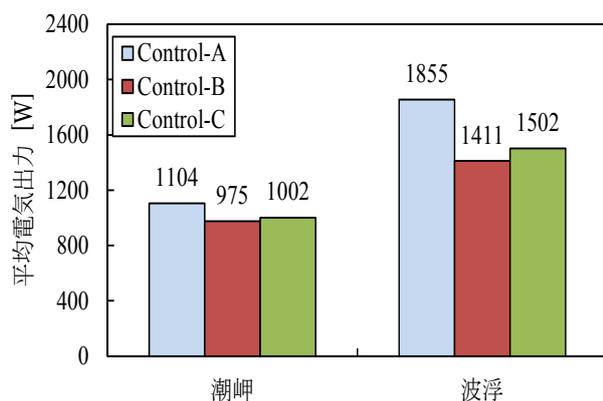


図7 平均電気出力

値を切り替えるパターンが最も電気出力が高くなることが分かった。図6に潮岬沖における最適な発電機トルク指令パターン(Control-C)を示す。このような形状のトルク指令パターンを用いることにより、図7に示すように潮岬沖では1002W、波浮沖では1502Wの平均電気出力が得られ、3~6%の出力改善効果があることが分かった。

実用状態を考慮した発電機トルク指令パターンを用いた場合の変換効率は13~20%となり、従来主流であった振動水柱方式の波力発電システム(4~15%)と比較してかなり高いことが明らかとなった。

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計9件)

- ① 岡野 謙太、真田 雅之、森本 茂雄、井上 征則、ダイレクトリンク式波力発電システムにおける発電機回転速度に応じた指令トルクパターンの検討、電気関係学会関西連合大会、2013年11月16日、大阪電気通信大学
- ② 岡野 謙太、真田 雅之、森本 茂雄、井上 征則、ダイレクトリンク式波力発電システムにおける発電量改善のためのトルクパターンの検討、電気学会産業応用部門大会、2013年8月30日、山口大学
- ③ K. Okano, M. Sanada, S. Morimoto, Y. Inoue, Output Characteristics in Direct-Link Wave Power Generating System Considering Place

of Installation, IEEE PEDS 2013、2013年4月23日、Kitakyushu International Conference Center

- ④ 岡野 謙太、真田 雅之、森本 茂雄、井上 征則、ダイレクトリンク式波力発電システムにおける設置海域を考慮した発電機設計および出力特性、電気学会全国大会、2013年3月20日、名古屋大学
- ⑤ 岡野 謙太、真田 雅之、森本 茂雄、井上 征則、ダイレクトリンク式波力発電システムにおける波の条件に応じた発電機設計および出力特性、パワーエレクトロニクス学会第196回定例研究会、2012年12月15日、奈良工業高等専門学校
- ⑥ 岡野 謙太、真田 雅之、森本 茂雄、井上 征則、ダイレクトリンク式波力発電システムにおける発電機のトルク制御が出力に及ぼす影響、電気関係学会関西連合大会、2012年12月9日、関西大学
- ⑦ M. Sanada, Y. Inoue, S. Morimoto, Generator Design and Characteristics in Direct-Link Wave Power Generating System Considering Appearance Probability of Waves, ICRERA 2012 - International Conference on Renewable Energy Research and Applications, 2012年11月13日、Best Western Premier Hotel Nagasaki
- ⑧ 埴岡 翔太、真田 雅之、森本 茂雄、ダイレクトリンク式波力発電システムにおける高出力化のための発電機設計の検討、電気関係学会関西連合大会、2011年10月30日、兵庫県立大学
- ⑨ 埴岡 翔太、真田 雅之、森本 茂雄、ダイレクトリンク式波力発電システムにおける波の出現頻度を考慮した発電機設計とその特性、電気学会産業応用部門大会、2011年9月8日、琉球大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

真田 雅之 (SANADA, Masayuki)
大阪府立大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：90264803

(2) 研究分担者

森本 茂雄 (MORIMOTO, Shigeo)
大阪府立大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：00210188

井上 征則 (INOUE, Yukinori)
大阪府立大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：50580148