博士論文(要約)

傾斜振動水柱型波力発電に関する研究

飯野　光政

論文の要約

論文題目　　傾斜振動水柱型波力発電に関する研究

氏　　名　　飯野　光政

本論文は、傾斜振動水柱型波力発電の一次変換部のエネルギー変換特性を理論と実験で明らかにし、その出力に対する二次変換部のタービン発電機の制御設計および荷重評価手法を確立したものである。

振動水柱型波力発電は、水柱の運動を利用して波の振動を空気流に変換する一次変換部と、空気流によりタービンで発電を行う二次変換部からなる波力発電方式である。これまで垂直振動水柱を利用した装置の実証と基礎研究から最適設計手法が確立されているが、発電コストの高さから国内の商用プラントは存在せず、高効率化と低コスト化が必要である。振動水柱型の高効率化にはいくつかの手法が存在するが、傾斜振動水柱型波力発電は、振動水柱を傾斜させることで高効率化、共振周期の調整が可能とされている。しかしながら実証試験と水槽試験によりその実現性と定性的特性が示されている一方でその物理的特性は十分明らかにされておらず、実用化に向けたシステム設計には傾斜振動水柱の物理的特性の解明と定量的評価が不可欠である。

本論文では、傾斜振動水柱型波力発電システムの設計評価に資する手法として、傾斜振動水柱の振動特性の解明と定量的評価ならびにその際の一次変換出力に対する二次変換部の応答を含むシステム全体のエネルギー変換特性を定量的に評価できる手法を確立した。具体的には傾斜振動水柱型波力発電の一次変換部出力特性を理論と実験で明らかにし、その出力に対する二次変換部のタービン発電機の制御設計および荷重評価手法を確立した。特に、一次変換部の理論力学モデル化、シミュレーション技術の確立、二次変換部の制御応答性および不規則な海象における設計荷重評価の手法検討を理論的に行った。

第 1 章では、波力発電に関する背景を整理し、波力エネルギーの有用性を示すとともに、振動水柱型波力発電のこれまでの開発状況から振動水柱型が数ある波力発電方式の中でも卓越した信頼性を有し、実用化に近いことを示した。そして振動水柱型波力発電の実用化に向けた傾斜振動水柱型波力発電の特徴と課題を整理し、本研究の目的とそれを実現するための実施内容を示した。

第 2 章では、これまで定量的評価と定式化がなされていなかった傾斜振動水柱型一次変換部のエネルギー変換特性の定式化と検証を行った。はじめに定式化に必要な基礎的特性の考察と解明を行うため、直径 0.3m の傾斜円管振動水柱の水槽試験を行った。その結果、傾斜振動水柱は一自由度振動系としての特性が卓越していることを示し、垂直型と比較して共振周期が長周期化する定性的傾向を確認した。次に水槽試験の知見をもとに、傾斜による影響を運動方向変化として反映させた振動水柱運動方程式を提案した。これを既往の空気室応答モデルと組み合わせることにより傾斜振動水柱型一次変換部の水位変動、圧力変動特性を定量的に評価可能な一次変換部モデルを構築した。モデル化の妥当性検証として水槽試験結果との比較を行った結果、水槽試験において観測された水位・圧力振幅をよく再現する結果が得られた。さらに不規則波中の空気圧力応答の再現性も確認され、二次変換部に対する不規則な空気出力変動を再現することが可能となった。

第 3 章では、第 2 章で解明した一次変換部から生じる変動空気流を受けた際のシステムの出力特性と二次変換部の状態を評価するために、変動空気流に対する二次変換部の動的出力変動を再現する定式化を行った。まず二次変換部の定式化として制御特性、機械特性および空力特性に基づく入力空気パワーに対するトルクと回転数の変動特性を再現する解析モデルを確立した。制御応答モデルの検証として、6kW 規模の電力変換装置及びタービン機械系の模擬を行うフライホイール、ドライブシャフトと空力模擬シミュレーションを組み合わせたハードウェアインザループ（HILS）の応答模擬実験装置を構築した。制御応答モデルの検証として、水槽試験により得られた空気パワー変動を境界条件とした解析と実験を行い、解析モデルの制御応答が実機とよく一致することを示した。さらに空力モデルの妥当性検証として応答模擬装置と同一の制御装置を利用した 30kW 規模の実海域試験との比較により、空力モデルが誤差要因となっていることを明らかにした。実海域試験の計測値を利用した空力モデル修正に基づき解析と実海域試験結果を比較したところ、平均値 25%の精度で出力変動を再現できることを確認し、さらに回転数変動位相と振幅がよく一致することを示した。これにより、二次変換部の変動空気流に対する応答と出力特性を再現する定式化を実現できた。

第 4 章では、第 2 章と第 3 章を通して定量的な振動特性、動的応答の再現手法を確立した傾斜振動水柱型波力発電システムの設計評価手法について検討を行った。一次変換部の設計については運動方程式に基づく共振周期推定式を提案し、水槽試験および実海域試験において確認される傾向と一致することを示した。そして同一の水柱質量でも、傾斜型を利用することで垂直型と比較して共振周期を 2 倍以上長周期化することが可能であること

を示した。また、その際の二次変換部の最適差圧理論値を導出し、既往の振動水柱型と同様に水位変動の減衰特性と一致する差圧特性によって一次変換部の出力を最大にすることが可能であることを示した。この最適差圧特性は水槽試験とよく一致する傾向を示した。二次変換部の設計として、変動流中での時刻暦回転数変化と流速変化を考慮した最適設計手法を提案し、空力特性や慣性といったタービン特性の変化に対して適切な制御手法を検討するための設計評価手法を確立することができた。この手法を用いて制御手法を変化させた解析から、制御手法によってはタービン効率が失速により大幅に低下する一方、適切な制御パラメータを設定すれば従来波力発電に用いられていたウェルズタービンの失速を防止し、実海域試験において観測された変動流中でも理論最大効率の 9 割のタービン出力が期待できることを示した。そして一次変換部と二次変換部の連成解析により、波浪条件に基づき、システム全体の応答を加味した出力と荷重評価を可能とする解析手法を確立した。確立した手法を用いて直径 0.8m のタービンと幅 4.5m の傾斜振動水柱型波力発電システムを想定した設計荷重評価を行い、傾斜による一次変換特性の変化によって同一の円管型一次変換部においても傾斜角によって二次変換部出力が大幅に変化し、それに伴い変化する荷重を定量的に算出する手法を確立した。これにより、広範囲かつ不規則な海象変動および傾斜振動水柱の特性を考慮した二次変換部の荷重評価手法を提案することができた。そして、以上の知見をもとに傾斜振動水柱型波力発電システムの設計手法を提案した。

第 5 章では、以上の成果について、傾斜振動水柱型波力発電システムの設計評価への応用法について整理を行い、本研究の総括とした。

以上、本論文ではこれまで定量的な評価がなされていなかった傾斜振動水柱の振動特性を、運動方程式を中心としてモデル化し、実験との比較検証によりその妥当性を示した。そして一次変換部・二次変換部双方の定式化によって、傾斜振動水柱型波力発電システムのエネルギー変換特性の定量的評価を実現した。これにより傾斜振動水柱型波力発電の最適設計が可能となった。