

論文審査の結果の要旨

氏名：斐 辰 玟

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：波力発電用永久磁石型小型リニア発電機の特性解析に関する研究

審査委員：（主査） 教授 西 川 省 吾

（副査） 教授 居 駒 知 樹 特任教授 浜 松 芳 夫

同志社大学名誉教授 石 原 好 之

近年、地球温暖化対策として太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーの導入が世界的に進んでいる。それらは無尽蔵であり、運転中には主な温室効果ガスである二酸化炭素を排出しない利点がある。一方で、出力が非常に不安定であるという欠点を持つ。太陽光発電は夜間には全く発電しない。また、昼間であっても雨天時や曇天時は発電不能または出力が大幅に低下してしまう。風力発電は風さえあれば夜間や雨天でも発電は可能であるが、出力変動は太陽光発電以上に激しい。そのため、負荷への安定電力供給が困難である。また、それらを電力系統に大量連系した場合、系統の周波数や電圧が激しく変動し大規模な停電事故につながる可能性が懸念される。出力変動を緩和するためには蓄電池やフライホイールなど電力貯蔵装置との組み合わせが効果的であるが、現状は電力貯蔵装置が高価であるため普及には至っていない。

日本は四方を海に囲まれた島国であり、上記以外の有望な再生可能エネルギーとして海洋エネルギーがある。海洋エネルギーには複数の種類があり、波力、潮流、海流などが挙げられる。その中で、海岸近くで利用可能なものとして波力発電がある。波力エネルギーは風の影響を受け、場所により異なるが一般的には夏季よりも冬季が大きくなる。年平均値でみるとヨーロッパが40～90kW/mなのに対し、日本近海は10～20kW/mと小さいが、日本の海岸線の距離は約3万kmもあり世界6位である。

波力発電方式の先行研究としては、波力エネルギーを機械的エネルギー（タービンの回転など）に変換して発電するシステムが主流である。一方、リニア発電機を用いて波力エネルギーから直接、発電するシステムがある。リニア発電機による波力発電システムは、他の方式より構造が簡単で耐久性と変換効率が高いという利点がある。また、リニア発電機を用いた発電システムとしては、発電機のコイル部分を海底に固定する「固定式」と浮かせる「浮体式」に分類されるが、本研究では「浮体式」を対象としている。

本研究の目的は、定格出力が数百W程度の小型波力発電システムに用いる永久磁石型リニア発電機の実用化である。高性能なリニア発電機を構築するには、実際に海で使用する状況に即した条件での検討を行う必要があるが、先行研究では波の動きを等速運動で検討したり、磁場解析が二次元で行われたりなど必ずしも考慮されていない。

本研究では永久磁石型リニア発電機の、磁極ピッチ、スロット構造などの詳細設計手法を体系的に整備し、単振動に近似した波を発電機の入力源として有限要素法解析ソフト（Maxwell 3D）を用いて三次元モデルでの磁気特性、誘導起電力を解析する。また、発電機構造についても複数のモデルについて解析を行い、起電力特性の面から適切な構造を評価する。

本論文では7章から構成されている。以下に各章で得られた主な研究成果を述べる。

第1章「序論」では、本研究の背景、本研究の位置付けと目的、概要について述べている。

第2章「波力発電用リニア発電機の検討条件」では、波力発電システムに用いるリニア発電機の寸法と磁極のピッチの算定に必要な波の速度の適用方法を明らかにした。また、波の運動を単振動で近似して可動子の移動速度を算定するとともに、波の波高値からリニア発電機の可動部の移動距離の算定に必要な変位を推定した。

第3章「リニア発電機について」では、リニア発電機の概要から永久磁石の選定、スロットの構造、巻線係数、磁気回路の漏れインダクタンス、詳細な磁気抵抗の計算手順などを整理した。また、リニア発電機に関する負荷特性式を誘導した。本章での具体的な検討内容は以下の通りである。

(1) リニア発電機の磁極ピッチと固定子の寸法の推定

- (2) 固定子のスロットの詳細な寸法の推定
- (3) 永久磁石寸法の推定と空間磁束密度の計算方法の整備
- (4) 巻線係数と出力高調波成分の関係の算定
- (5) 固定子の漏れリアクタンス，パーミアンスおよび同期リアクタンスの計算方法の整備
- (6) 本研究でのリニア発電機の固定子の磁路形状を考慮した新たな計算方法の適用
- (7) 固定子スロットの磁気等価回路の整備，巻線銅線の巻線窓面積からスロットの寸法計算方法の整備
- (8) 等価回路と(1)から(7)で求めた各種の基礎計算データを用いての負荷特性計算式の整備

第4章「有限要素解析のための解析条件設定と解析」では，有限要素法解析ソフトを用いる往復型機器（リニア発電機）の動磁場解析に対する応用解析方法および本解析ソフトの制限事項を回避する方法を説明した。特に，本解析ソフトの動磁場解析での往復運動設定を速度のみ設定すると，単純な等速直線運動であるが，応用した新しい速度入力関数を適用することにより，正弦波運動解析が可能になった。本章での主な結果は以下の通りである。

- (1) 動磁場解析でのリニア発電機の往復運動解析に対する新しい速度入力関数の適用
- (2) 解析に用いる磁性体の材質の説明
- (3) 本解析ソフトでのコイル結線の制限を回避するため，外部インターフェース (Maxwell circuit editor) でコイルをモデル化する方法の説明
- (4) アダプティブメッシュ法に用いる初期メッシュ設定規則の説明
- (5) アダプティブメッシュ法を用いた要素分割結果に対する妥当性の確認方法の説明
- (6) FFT 解析の説明

第5章「リニア発電機の磁場解析」では，3章で述べたリニア発電機的设计手法に基づき，設計された永久磁石型リニア発電機の三次元解析モデルについて，有限要素法解析で初期特性を確認した。リニア発電機に対する有限要素法解析で得られた結果は以下の通りである。なお，この解析モデルは，可動部に鉄心の代わりにアルミ板を採用したことが大きな変更点である。

- (1) 静磁場解析での Probe Line を用いて永久磁石の磁界と磁束密度の測定を可能にした。
- (2) 静磁場解析でのインダクタンスのマトリックス機能を用いて，自己インダクタンスを明らかにした。
- (3) 静磁場解析での磁束ベクトルの結果で永久磁石同士間の漏れ磁束を確認した。
- (4) 動磁場解析で Field Calculator を用いて移動位置による鎖交磁束および磁束密度を明らかにした。
- (5) 動磁場解析では，近似した波の速度とおりに可動子の往復運動が可能になり，誘導起電力の大きさを確認した。
- (6) FFT 解析を行い高調波次数成分の比率を確認した。

第6章「リニア発電機の性能改善解析」では，5章のリニア発電機の磁場解析結果に基づき，波力発電機としての実用化に向けた性能改善に関する解析を行った。主な結果は以下の通りである。

- (1) Model12 では磁束密度分布を平均化させるため，固定子のスロットの面取り加工を実施した。その結果，面取り加工は高調波成分を低減することが確認できた。
- (2) Model13 では磁束経路の補強として永久磁石間の両端間の下にマグネットバーを挿入した。その結果，誘導起電力のピーク値が Model11 より約 1.8 倍増加し，磁束伝達を強化させることが確認できた。
- (3) Model14 では固定子スロットの磁束分布を平均化させるための固定子の面取り加工と，磁束経路の補強のために可動子の永久磁石の端部の下にマグネットバーを挿入した。その結果，誘導起電力のピーク値は Model11 と Model12 より約 1.8 倍増加し，Model13 とほぼ同じであった。また，基本波に対する第3次高調波の比率は，全ての解析モデルの中で最も低い約 6.9%であった。
- (4) 固定子スロットの歯先端部の面取り加工により鎖交磁束を増加させることが確認できた。

以上のことから，今後のリニア発電機の実用化のための研究方針は以下の通りになる。

- (1) 可動部はアルミ材質を採用して永久磁石の取り付けを簡単にする。
- (2) 誘導起電力を増加させるため，可動子に挿入するマグネットバーの形状，寸法や挿入位置の最

適化する。

(3) スロットと歯先端部の面取り加工を最適化する。

第7章「結論」では、本研究で得られた成果をまとめ、今後の課題について述べている。

以上、本論文の成果を通観すると、波力発電に適用する永久磁石を用いた小型リニア発電機について、これまで纏っていなかったリニア発電機の詳細設計の方法を整備するとともに、シミュレーションにより詳細な磁場解析を行い、高出力化に適した構造などを明らかにした。まだ基礎研究であり、解決すべき課題はあるが、高性能な波力発電システムの構築への道を切り開いたことを意味している。

このことは、本論文の提出者が自立して研究活動を行い、又はその他の高度な専門的業務に従事するに必要な能力及びその基礎となる豊かな学識を有していることを示すものである。

よって本論文は、博士（工学）の学位を授与されるに値するものと認められる。

以 上

平成28年 9月 3日