

## 論文の内容の要旨

氏名：辻 健太郎

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：巻線形誘導発電機を用いた潮流発電システムにおける増速比および発電機容量に関する研究

本論文では、巻線形誘導発電機を用いた潮流発電システムにおいて、発電機が過負荷とならず発電電力量を最大とする増速比および発電機の定格容量を明らかにし、求めた増速比および発電機の定格容量を用いた場合における速度制御システムの応答について MATLAB/Simulink を用いたシミュレーションにより検討した。

初めに、研究背景について示す。

日本における発電設備は 1963 年度に初めて火力発電設備容量が水力発電設備容量を上回り、いわゆる「火主水従」に移行した。しかし、1973 年度の第一次オイルショックを契機として、原子力発電、石炭火力発電、LNG 火力発電等の石油代替電源の開発が積極的に進められ、電源の多様化が図られた。しかし、2011 年 3 月に発生した東日本大震災による東京電力(株)福島第一原子力発電所事故のため原子力発電の発電電力量は減少し、火力発電の発電電力量が増加した。その結果、2011 年度の全発電形態に対する原子力発電の発電電力量の割合は 2010 年度の 30.8%から 10.7%に減少し、LNG 火力発電および石油火力発電の発電電力量の割合はそれぞれ 27.2%、8.3%から 39.5%および 14.4%に増加した。

しかし、これら化石燃料の大量消費により発生する地球温暖化問題は、地球レベルでの問題となっている。このため、現在主流である発電方式の代替として、再生可能エネルギーによる発電方式が注目されている。ここで述べる再生可能エネルギーとは、太陽光・風力・水力・地熱など人類の時間スケールで考えたとき、枯渇するおそれのないエネルギー源のことである。しかし、太陽光発電や風力発電は発電電力が気象条件や時間帯、季節によって大きく左右される。そこで、本研究では再生可能エネルギーの中でも、エネルギー密度が高く、発電電力が予測可能な潮流発電に着目する。

本研究で検討する潮流発電は入力となる潮流が変動するという観点から、風力発電と同様の発電機の運転方式が考えられる。風力発電では、発電機の運転方式として、発電機の回転速度がほぼ一定の定速運転方式および可変の可変速運転方式が考えられる。

定速運転方式とは、かご形誘導発電機が増速機を介して風車で駆動される方式である。本方式の利点として、発電機の構造が単純かつ堅牢であり、系統と直結することができるため経済的であることなどが挙げられる。しかし、発電機の回転速度については制御ができないため、突風等の急激な風速変動により発生する発電機出力の変動が大きいという短所も有している。

可変速運転方式には巻線形誘導発電機および同期発電機を用いる方式がある。巻線形誘導発電機を用いる場合はさらに二種類の方式に分けられる。一つ目は、発電機一次側を系統に接続し、発電機二次側に接続される外部抵抗の大きさを制御し回転速度を制御する方式である。二つ目は、発電機二次側に双方向の電力変換器を接続し、回転速度を可変とする方式、いわゆる超同期セルビウス方式である。前者の方式では回転速度の変化範囲は定格回転速度の 10%増程度に限られる。後者の方式では電力変換器の定格容量を発電機の定格容量の 3 割程度とすることが多いため、回転速度の可変範囲もそれに応じたものとなる。同期発電機を用いる場合、その交流発電電力を電力変換器により直流電力に変換した後、再び電力変換器により商用周波の交流電力とし、系統に連系する方式である。しかし、電力変換器の定格容量は発電機と同じ容量が必要となるため、コスト面からはやや不利となる。これまで、定速運転方式の潮流発電システムにおいて、増速比を変化させると、発電電力量が変化する事に着目し、発電機が過負荷とならず発電電力量を最大とする増速比および発電機の定格容量が明らかにされている。しかし、可変速運転方式の潮流発電システムにおいて、発電機が過負荷とならず発電電力量を最大とする増速比および発電機の定格容量に関する検討はほとんど行われていない。

以上の研究背景から、本論文では、初めに、潮流発電システムの発電電力量を求めるために、ダリウス形水車のパワー係数特性および流速の出現確率密度関数を用いた発電電力量の計算法について示す。次に、発電機の可変速運転を行うために必要となる速度制御システムを示す。最後に、可変速運転方式の潮流発電システムにおいて発電機が過負荷とならず発電電力量を最大とする増速比および発

電機の定格容量を求める手法を提案し、増速比および発電機の定格容量を示す。また、発電機が過負荷とならず発電電力量を最大とする増速比および発電機の定格容量を用いた場合における速度制御システムの応答について示す。

本論文の構成は以下に示す全6章から成る。

第1章「序論」では、本研究の背景を明らかにした上で、本研究の目的を示した。また、関連する研究の動向を示し、本研究の位置付けを明らかにした。さらに、本論文の構成について示した。

第2章「潮流発電システムの発電電力量」では、潮流発電システムの発電電力量を求めるための計算法について述べた。潮流発電システムの発電電力量を求めるには水車の効率に相当する水車のパワー係数、つまり水車のパワー係数特性が必要となる。パワー係数特性は翼周辺の流れが複雑であり理論的には十分に解明されていないため、本研究では水路実験により得られたパワー係数特性を用いる。しかし、水路実験により得られたパワー係数特性は実験値であるため離散値である。このため、本研究では水路実験により得られたトルク係数特性を3次の平滑化スプライン関数で近似を行い、周速比とトルク係数の積からパワー係数特性を求めた。

次に、潮流発電システムの発電電力量を求める際に必要となる出現確率密度関数を求めた。流速の出現確率密度関数を求めるための流速データの一例として、海上保安庁海洋情報部より公表されている明石海峡中央付近における1年間の流速の推定値を用いた。その結果、出現確率密度関数は流速が低い範囲では大きくなり、高い範囲では小さくなることを示した。また、発電電力量は対象となる期間における発電電力を時間で積分することにより求められるが、本研究では流速の出現確率密度関数を用いた発電電力量の計算法について示した。

第3章「速度制御システム」では、発電機の可変速運転を行うために必要となる、発電機の速度制御システムについて示した。本研究では、流速の変化に対し最大出力点追従(MPPT:Maximum Power Point Tracking)制御方式は最大水車出力、定格一定制御方式は発電機入力(水車出力)一定、一次有効電力一定および二次供給電圧の大きさ一定にする水車出力を得るために、これらに対応する回転速度を目標値として、二次供給電圧を制御することにより回転速度を制御する速度制御システムを示した。本研究で検討する潮流発電システムでは、二次側に接続するインバータ容量を低減するために、発電機の励磁電流(一次d軸電流)を一次側から供給し、これを一定とするように制御する。

MATLAB/Simulink上で構築した速度制御システムを用いて、流速のステップ変化に対する応答についてシミュレーションを行った結果、回転速度と一次d軸電流は目標値に対して良好に追従することを示した。

第4章「最大出力点追従制御方式」では、潮流発電システムが年間最大流速までMPPT制御方式で運転する場合、発電機が過負荷とならず発電電力量を最大とする増速比および発電機の定格容量を求める手法として乗数法を用いる手法を提案し、増速比および発電機の定格容量を示した。MPPT制御は太陽光発電や風力発電で用いられている制御方式であり、本研究で検討する潮流発電システムのMPPT制御は風力発電と同様に、流速の変化に対し最大水車出力を得るために発電機の回転速度を制御し、潮流エネルギーを高効率で電気エネルギーに変換する制御方式である。その結果、かご形誘導発電機を用いた定速運転方式と比較し、増速比はほとんど変わらず、発電機の定格容量は約13.2%減少することを示した。また、年間設備利用率は約14%となり、定速運転方式の約10%を上回ることを示した。次に、求めた増速比および発電機の定格容量を用いて、流速の正弦波変化に対する速度制御システムの応答についてシミュレーションにより検討した。その結果、回転速度と一次d軸電流は目標値に対して良好に追従することを示した。また、発電機出力は一次側からだけでなく、インバータを介して二次側からも取り出すことができ、システムの発電電力は発電機の定格容量以上の出力を取り出せることを示した。

第5章「定格一定制御方式」では、発電機が定格となる流速まではMPPT制御で運転を行い、それ以上の流速において、発電機入力(水車出力)一定、一次有効電力一定および二次供給電圧の大きさ一定として制御を行う定格一定制御方式を提案した。潮流発電システムが定格一定制御方式で運転する場合、発電機が過負荷とならず発電電力量を最大とする増速比および発電機の定格容量を求める手法として本研究では遺伝的アルゴリズムを適用した。その結果、MPPT制御方式と比較し増速比は増加し、発電機の定格容量は約6.5~17.6%減少することを示した。また、年間設備利用率は約15~18%となり、MPPT制御方式の約14%を上回ることを示した。次に、求めた増速比および発電機の定格容量を用いて、流速の正弦波変化に対する速度制御システムの応答についてシミュレーションにより検討した。その

結果、回転速度と一次 d 軸電流は目標値に対して良好に追従することを示した。また、発電機出力は一次側からだけでなく、インバータを介して二次側からも取り出すことができ、システムの発電電力は MPPT 制御方式と同様に、発電機の定格容量以上の出力を取り出せることを示した。

第 6 章「結論」では、本研究を通して得られた成果についてまとめた。また、今後の課題として、発電開始時における突入電流の抑制法などが挙げられる。