

論文審査の結果の要旨

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

審査委員：(主査) 教授 塩野光弘

(副査) 教授 浜松芳夫

元教授 鈴木勝行

東北大学客員教授 七原俊也

日本の使用電力量は、1973年のオイルショック以降着実に増加し、1973年度から2007年度の間に約2.6倍に拡大した。それに伴い、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。2011年度以前の発電電力量は将来にわたり安定かつ経済的に電力を供給するために、原子力をベース、火力、水力など、それぞれの発電形態の特性を活かして組み合わせる形態（電源のベストミックス）を取っていた。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、2010年度と比較して2011年度の実発電形態に対する原子力の発電電力量の割合は10.7%に減少し、LNG火力および石油火力の割合はそれぞれ39.5%および14.4%に増加した。しかし、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。

日本における再生可能エネルギーの導入拡大は、前述のエネルギー源の多様化および地球温暖化防止に貢献するとともに、エネルギー輸入依存の低減を図ることが可能であり、エネルギー安全保障の強化を図る上で、非常に重要な位置付けにある。再生可能エネルギーの特徴として既存の発電形態に比べ高コストであることに加えて、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ことから、安定かつ経済的な電源として活用するためには、克服すべき課題もある。再生可能エネルギーの中でも潮汐、海流・潮流などの海洋エネルギーは他の再生可能エネルギーと比べてエネルギー密度が高い。潮流、潮汐エネルギーは月と地球の天体運動に基づく起潮力によって発生し、1日2回の干満に伴う周期的な変動する海水の流れであるが、他の再生可能エネルギーとは異なり、数年先まで予測可能である。したがって、計画的に使用でき、信頼性の高いエネルギーといえる。

本研究で検討する潮流発電は入力変動するという観点から、風力発電と同様の発電方式が考えられ、発電機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ある。本研究のように系統と連系する潮流発電システムの運転方式としては、かご形誘導発電機を用いる定速運転方式が最も簡便で経済的であり、これまでにこの方式の潮流発電システムに用いる増速比（ギア比）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を求め、それらを用いた潮流発電システムを明石海峡に設置した場合の年間設備利用率は約10%となることを明らかにしてきた。本研究では、年間設備利用率のさらなる向上を目的として、可変速運転方式である巻線形誘導発電機を用いた潮流発電システムについて検討する。

可変速運転を行う場合、風力発電ではタービンのピッチ角制御および電力変換器を接続した発電機の世界速度制御が用いられる手法が提案されているが、潮流発電においては、タービンにダリウス形水車を使用し、タービンを海中で動作させることから、海水は空気に比べ粘性および流体密度が大きい海水中に耐える強度とする必要があり、ピッチ角を可変とすると可動部が必要であることは強制的に不利である。また、潮流は起潮力に基づく変動のため、風力発電において発生する発電機出力の急激な変動は発生しない。したがって、本研究で検討する潮流発電システムでは、ピッチ角に相当する翼取付角が固定されたダリウス形水車を用いる。このため、発電機の世界速度制御のみで可変速運転を行う。発電機の世界速度制御を行うためには、速度制御システムを構築する必要がある。

本研究では制御モードとして、最大出力点追従（MPPT：Maximum Power Point Tracking）制御方式、発電機入力（水車出力）、一次有効電力および二次供給電圧の大きさを一定に制御する定格一定制御方式について検討を行う。また、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の低減可能な超同期セルビウス方式の巻線形誘導発電機（DFIG）を用い、さらにインバータ容量を低減するた

めに、励磁電流は一次側から供給する。よって、励磁電流となる一次電流の無効分は一定となるように制御し、流速変化に対し各制御モードにおいて決められた水車出力となる回転速度に制御を行う制御システムを構築する。次に、水車の規模および流速分布が与えられた場合、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決定する。また、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の速度制御システムの応答について MATLAB/Simulink を用いてシミュレーションにより検討を行う。

本論文は6章から構成されている。以下に各章で得られた主な成果を述べる。

第1章「序論」では、本研究の背景、これまでの研究と本研究の位置づけと目的、概要について述べている。

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手法として、はじめにダリウス形水車のパワー係数特性および平滑化スプライン関数によるパワー係数特性の近似について述べ、次に、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述べている。その結果、以下の結論が得られた。

- (1) 周速比とトルク係数の積からパワー係数特性を求めた。
- (2) 出現確率密度関数は流速が低い範囲では大きく、高い範囲では小さくなることを明らかにした。

第3章「速度制御システム」では、超同期セルビウス方式の巻線形誘導発電機 (DFIG) を用いた最大出力点追従 (MPPT) 制御方式では流速変化に対し最大水車出力、定格一定制御方式では発電機入力 (水車出力)、一次有効電力および二次供給電圧の大きさを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制御する速度制御システムを構築する。その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 MATLAB/Simulink を用いたシミュレーションにより確認し、制御システムの有効性を検証し、次の結論を得た。

- (1) MPPT 制御方式において必要な水車出力を得るため、回転速度と一次 d 軸電流を目標値とする速度制御システムが構築できることを明らかにした。
- (2) 流速のステップ応答では回転速度と一次 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 MPPT 制御方式で運転している場合、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を提案し、構築した速度制御システムを用いて、増速比および発電機の定格容量を求める。また、その増速比および発電機の定格容量を使用して流速の正弦波変化に対する応答について MATLAB/Simulink を用いた検討を行い、以下の結論を得た。

- (1) 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%減少した。
- (2) 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。
- (3) シミュレーションにより回転速度と一次 d 軸電流は目標値に対して良好に追従する。
- (4) 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可能で、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。

第5章「定格一定制御方式」では、MPPT 制御方式と比較し発電機の定格容量を低減し、年間設備利用率を増加する制御方式について検討し、発電機の定格を超える範囲の流速で運転することを考慮して、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方式の3つの定格一定制御方式を提案する。ただし、発電機の定格を超える範囲の流速において制御方式が変化するので、増速比および発電機の定格容量に対する解曲面の傾きが不連続となることから、この最大化問題を解く手法として遺伝的アルゴリズム (GA) を適用する。さらに、第3章で構築した速度制御システムを用いて、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、流速の正弦波変化に対する応答について MATLAB/Simulink を用いたシミュレーションにより検討し、以下の結論が得られた。

- (1) 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 6.5~17.6%減少した。
- (2) 年間設備利用率は 15~18%となり、MPPT 制御方式の約 14%を上回る。
- (3) シミュレーションにより、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。
- (4) 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可能で、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。

第6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、超同期セルビウス方式の巻線形誘導発電機（DFIG）を用いた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、これまでに検討されてきた定速運転方式の潮流発電システムよりも年間設備利用率をさらに高めることに対して新しい道を切り開いたこと意味している。

このことは、論文の提出者が自立して研究活動を行い、また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している。

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27年2月19日