

学位被授与者氏名	吉 古元 (JI GUYUAN)
学位の名称	博士 (工学)
学位番号	博 (一) 第 6 2 号
学位授与年月日	2021年3月20日
論文題目	スイッチトリラクタンス発電機とキャパシタレス AC-AC 変換器による可変速風力発電システムの理論検証
論文題目 (英訳または和訳)	Theoretical verification of a variable speed wind power generation system using switched reluctance generator and capacitorless AC-AC converter
論文審査委員	論文審査委員会 委員主査 : 福岡工業大学大学院物質生産システム工学専攻教授 大山 和宏 同審査委員 : 福岡工業大学大学院物質生産システム工学専攻教授 江口 啓 同審査委員 : 福岡工業大学大学院物質生産システム工学専攻准教 朱 世杰 同審査委員 : 福岡工業大学大学院知能情報システム工学専攻教授 前田 洋
論文審査機関	福岡工業大学大学院工学研究科
論文内容の要旨 (和文)	<p>近年, 地球温暖化や大気汚染への対策が喫緊の課題となり, 再生可能エネルギーの一つである風力エネルギーの利用が注目され, 可変速風力発電システム (VSWPGS) の研究開発が盛んに行われている。</p> <p>一般に VSWPGS には発電機として, 誘導発電機 (IG) や永久磁石同期発電機 (PMSG) が適用されている。IG は, 安価かつ堅牢という優れた特徴を有するが, PMSG と比較して低効率であり, VSWPGS への適用においては回転域のマッチングのため増速機を用いる必要があるためギヤ騒音が生じ, IG 始動のために大きな突入電流が生じるという欠点を有する。また PMSG は, 高効率かつ低騒音であるという優れた特徴を有するが, 永久磁石材料としてレアアースを大量に使用するため, 結果的に発電コストが高くなるという欠点を有する。一方, スwitchトリラクタンス発電機 (SRG) は, 主要部分がコアとコイルのみで構成されるため, 安価かつ堅牢という優れた構造的な特徴を有しており, IG のように二次電流を必要としないので高効率化が期待できる。また, 可変速運転に有利となる低慣性の回転子を設計できる可能性があり, 刻々と変化する日本の風況への適応力が期待できる。</p> <p>SRG を用いる VSWPGS では, 系統連系するために, 非対称ハーフブリッジインバータと PWM インバータの組み合わせる電力変換装置を用いることが一般的であり, そのため直流リンク部に大容量のキャパシタを有している。従って, カットイン時にキャパシタの充電が必要なため稼働率が下がり, またキャパシタの定期メンテナンスを必要とするため, 発電コストが増加する。このような問題に対する改善策として, キャパシタを用いないキャパシタレス AC-AC 変換器の開発が望まれている。</p> <p>そこで, 本論文では SRG による VSWPGS への適用を前提として, キャパシタレス AC-AC 変換器を提案する。また, キャパシタレス AC-AC 変換器による SRG の励磁方法を提案するとともに, 風速変化に対して適切に回転数を制御できる VSWPGS の速度制御器を提案する。更に SRG とキャパシタレス AC-AC 変換器を用いる VSWPGS の理論検証を実施するために, 構成要素の数学モデルを構築し, Matlab/Simulink において, 風速を変化させた場合のシミュレーションを行う。</p> <p>以下に本論文の構成ならびに概要を記す。</p> <p>第 1 章では, 本研究の背景として風力発電に関する基礎について述べる。</p> <p>第 2 章では, 使用する SRG の基本原理および制御方法を説明する。</p> <p>第 3 章では, 提案するキャパシタレス AC-AC 変換器の構造, 原理と励磁方法を説明する。</p> <p>第 4 章では, SRG とキャパシタレス AC-AC 変換器を用いる VSWPGS のシミュレーション方法について述べる。更に風速変化に対するシミュレーションを実施し, シミュレーション結果を考察することにより, 提案方式の理論検証を行う。</p> <p>第 5 章では, 本研究で得られた研究成果をまとめ, また今後の研究課題について記す。</p>

<p>論文内容の要旨 (英文)</p>	<p>In recent years, the countermeasures to deal with global warming and air pollution have become an urgent issue, much attention has been given to use of wind energy which is one of the renewable energy sources, and the research and development of a variable speed wind power generation system (VSWPGS) has been actively worked out.</p> <p>In general, an induction generator (IG) and a permanent magnet synchronous generator (PMSG) are applied to a VSWPGS as generators. The IG has the excellent features of being inexpensive and robust, but it is less efficient than a PMSG. It has the disadvantage that gear noise is generated because it is necessary to use a speed increaser to match the rotation range when applied to a VSWPGS, and a large inrush current is generated to start the IG. Conversely, the PMSG has the excellent features of high efficiency and low noise, but its main disadvantage is that the power generation cost increases because a large amount of rare earth is used as a permanent magnet material. Comparatively speaking, the switched reluctance generator (SRG) has excellent structural features of low cost and robustness because the main part is composed only of the core and coil since it does not require a secondary current as a IG, so high efficiency can be expected. Furthermore, it is possible to design a rotor with low inertia which is beneficial for variable speed operation and can be expected to adapt to the changing wind conditions of Japan. In the VSWPGS using a SRG, it is common to use a power converter that combines an asymmetrical half-bridge inverter and a PWM inverter for the grid connection, so it has a large-capacity capacitor in the DC link part. Therefore, the operating rate decreases because the capacitor needs to be charged at the time of cut-in, and the power generation cost increases because the capacitor needs to be regularly maintained. As a remedy for these problems, the development of a capacitorless AC-AC converter without a capacitor is desired.</p> <p>This paper proposes a capacitor-less AC-AC converter on the premise that a SRG is applied to a VSWPGS. Also, we propose an excitation method for the SRG using a capacitorless AC-AC converter, and a speed controller of the VSWPGS that can control the appropriate number of revolutions in response to changes in wind speed. Furthermore, in order to work out the theoretical verification of VSWPGS using a SRG and a capacitorless AC-AC converter, a mathematical model of the components is constructed, and a simulation is performed in Matlab / Simulink when the wind speed is changed.</p> <p>The structure and outline of this paper are described below.</p> <p>In the first chapter, the basic of wind power generation will be described as a background of this research.</p> <p>In the second chapter, the basic principle and control method of the used SRG will be explained.</p> <p>In the third chapter, the structure, principle, and excitation method of the proposed capacitorless AC-AC converter will be explained.</p> <p>In the fourth chapter, the simulation method of the VSWPGS using a SRG and capacitorless AC-AC converter is described. In addition, we will work out a simulation for changes of wind speed and verify the theory of the proposed method by considering the simulation results.</p> <p>In the fifth chapter, the results of this research are summarized, and the future works are described.</p>
<p>論文審査結果</p>	<p>吉古元氏の学位論文の審査及び最終試験の結果について報告する。</p> <p>可変速風力発電システム (VSWPGS) では、誘導発電機 (IG) や永久磁石同期発電機 (PMSG) が採用されている。IG は、安価かつ堅牢という優れた特徴を有するが、励磁電流が常時必要なため PMSG よりも発電効率が低く、また始動時に突入電流が生じるという欠点を有する。また VSWPGS への適用においては、風力タービンの回転域とのマッチングを図るために増速機を用いるのでギヤ騒音が問題となる。多極の PMSG は高効率かつ低騒音であるという優れた特徴を有するが、永久磁石材料としてレアアースを大量に使用するので、発電コストが高くなるという欠点を有する。スイッチトリラクタンス発電機 (SRG) は、主要部分がコア (鉄心) とコイルのみで構成されるため、安価かつ堅牢という優れた構造的特徴を有しており、IG の</p>

	<p>ように励磁電流を必要としないので高効率化が期待できる。また可変速運転に有利となる低慣性の回転子を設計できる可能性があり、刻々と変化する日本の風況への適応力が期待できる。そこで学位論文では、従来の発電機の特徴を整理し、VSWPGSとの親和性を検討し、最善策としてSRGの採用を提案している。</p> <p>SRGを用いるVSWPGSにおいて、非対称ハーフブリッジインバータとPWMインバータを組み合わせる電力変換装置の適用が容易な方法だが、直流リンク部への大容量キャパシタの装備が避けられなくなる。そのため、カットイン時にキャパシタの充電が必要となるため稼働率が下がり、またキャパシタの定期メンテナンスが必要となるため、発電コストが増加する。このような問題に対する改善策として、学位論文では、キャパシタを用いないキャパシタレスAC-AC変換器のSRGを用いるVSWPGSへの適用を提案している。</p> <p>学位論文では、キャパシタレスAC-AC変換器によるSRGの励磁方法を提案するとともに、風速変化に対して適切に回転数を制御できる速度制御器を提案した。更にSRGとキャパシタレスAC-AC変換器を用いるVSWPGSの理論検証を実施するために、Matlab/Simulinkにおいて全系を考慮した数学モデルを構築し、風速を変化させた場合のシミュレーションを行った。学位論文の第1章では、研究背景と風力発電システムの基礎を説明している。第2章では、SRGの基本原理および制御方法を説明している。第3章では、キャパシタレスAC-AC変換器の構造と原理について説明し、その励磁方法を提案している。第4章では、SRGとキャパシタレスAC-AC変換器を用いるVSWPGSを提案し、そのシミュレーション方法について述べている。更に風速変化に対するシミュレーションを実施し、シミュレーション結果を考察することにより、提案方式の理論検証を行っている。第5章では、本研究で得られた研究成果をまとめ、また今後の研究課題について述べている。</p> <p>学位論文で述べられた研究成果は、博士後期課程在学期間において、査読付き学術論文1編（第1著者1編）、査読付き国際会議プロシーディングス3編（第1著者3編）として公表されている。</p> <p>学位論文審査委員会は、以上の学位論文における研究成果が十分な新規性と有用性を有しているか慎重に審査し、学位論文として適合していると判定した。</p> <p>学位論文公聴会では、論文内容に関する種々の工学的及び技術的な質問があったが、吉古元氏は何れも適切に回答できた。最終試験における質疑応答においても、同氏が学位論文に関連する分野の学識を有し、十分な研究能力を備えていることが確認できた。</p> <p>以上の結果から、学位審査委員会は本学位論文が博士（工学）の学位に適格であると判定した。</p>
<p>主な研究業績</p>	<p><b>参考論文 6編1冊</b></p> <p><b>査読付き論文</b></p> <p>1 「スイッチトリラクタンس発電機とキャパシタレスAC-AC変換器による可変速風力発電システムのシミュレーション」 電気学会論文誌D, 141巻, 2号, pp. 185-192 (2021) 著者：吉古元, 大山和宏</p> <p><b>国際会議論文</b> (査読有り)</p> <p>2 “Simulation of Wind Power Generation System Using Switched Reluctance Generator and Capacitor-less AC-AC converter”, 2018 International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018-ECCE Asia), Niigata, Japan, pp. 2921-2926, May 2018. Authors : Guyuan Ji, Kazuhiro Ohyama</p> <p>(査読有り)</p> <p>3 “The application of an AC-AC converter to a wind power generation system</p>

with a switched reluctance generator”, International Conference on Sustainable Energy and Green Technology (SEGT 2018), No. 244, Kuala Lumpur, Malaysia, pp. 11-14, Dec. 2018.

Authors : Guyuan Ji, Kazuhiro Ohyama

(査読有り)

- 4 “MPPT control of Variable Speed Wind Power Generation System using Switched Reluctance Generator and AC-AC converter”, The 23<sup>rd</sup> International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS2020), pp.1012-1016, Hamamatsu, Japan, pp. 24-27, Nov. 2020.

Authors : Guyuan Ji, Kazuhiro Ohyama

#### 研究会

- 5 「スイッチトリラクタンس発電機とキャパシタレス AC-AC 直接変換器による可変速風力発電 システムのシミュレーション」, マグネティックス/モータドライブ/リニアドライブ合同研究会, MD-16-102, pp. 27-31 (2016)

著者 : 吉 古元、大山 和宏

- 6 「キャパシタレス AC-AC 直接変換器による SRM 可変速制御システムの 4 象限運転」, マグネティックス/モータドライブ/リニアドライブ合同研究会, MD-20-164, pp. 47-51 (2020)

著者 : 吉 古元、大山 和宏