

学位被授与者氏名	シリチャイ タツマルクワッタナ (SIRICHAJ TAMMARUCK WATTANA)
学位の名称	博士 (工学)
学位番号	博 (一) 第 4 3 号
学位授与年月日	平成 2 7 年 3 月 2 0 日
論文題目	Experimental Assessment with Wind Turbine Emulator of Variable-Speed Wind Power Generation System using Boost Chopper Circuit of Permanent Magnet Synchronous Generator
論文題目 (英訳または和訳)	昇圧チョップ回路を用いた永久磁石同期発電機可変速風力発電システムの風車エミュレータによる実機検証
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 村山 理一 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 朱 世杰 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 木野 仁 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 盧 存偉
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><b>主論文の要旨</b></p> <p>本論文は、永久磁石同期発電機 (PMSG) を前提とする昇圧チョップ回路 (BCC) を用いる可変速風力発電システム (VSWPGS) の実機検証を行う。実機検証は、風車エミュレータ (WTE) を使用するテストベンチによって行う。WTE は、サーボモータドライブにより任意の風速に対する風車タービン (WT) の軸トルクを再現する。サーボモータドライブに与える軸トルク指令は、翼素運動量理論に基づいて、風車翼プロファイル、風速データ、そして風車回転速度からリアルタイムに演算され、同時にサーボモータと WT のイナーシャの違いも補償される。WTE は実機検証のために新規に提案するものである。実機検証する BCC を用いる VSWPGS は、風速に応じた 3 つの制御モードを有する。3 つの制御モードを組み合わせることにより、BCC を用いる VSWPGS は、従来の制御方式よりも可変速範囲を広げることができる。実機検証により、BCC を用いた VSWPGS が、システム全体の信頼性を向上させつつコスト削減を達成し、ベンチマークである PWM コンバータを用いる VSWPGS と同等の性能を有することを示す。</p> <p><b>第 1 章 まえがき</b></p> <p>再生可能エネルギーを利用する必要性について論じた後、風力発電システムの歴史を振り返る。これまでに提案され実用化されている風力発電システムの特徴を整理する。本研究で取り扱う VSWPGS については、構造や動作原理にまで言及し、本研究の研究目的を裏付ける研究背景を述べる。</p> <p><b>第 2 章 可変速風力発電システムの動作原理</b></p> <p>系統連系を目的とした永久磁石同期発電機 VSWPGS の構造と動作原理を説明する。本論文で取り扱う PWM コンバータまたは BCC を用いる VSWPGS の各制御原理を説明し、シミュレーションにおけるモデリングに必要な系を記述する各微分方程式の説明を行う。</p> <p><b>第 3 章 可変速風力発電システムのシミュレーションによる検証</b></p> <p>各系を記述する連立微分方程式に基づいて構築する MATLAB/Simulink によるモデリング方法を説明する。また WT のモデリング方法を説明する。PWM コンバータまたは BCC を用いる VSWPGS における制御パラメータの設計法を説明し、シミュレーションに必要な各パラメータを示す。低中高を含む風速を条件としてシミュレーションを行い、各 VSWPGS のシミュレーション結果を示し、各制御原理が正しいことを証明する。</p> <p><b>第 4 章 風車タービンエミュレータ</b></p> <p>翼素運動量理論に基づく WTE の構造と動作原理を説明する。また WTE によるテストベンチと WT によるテストベンチの構造を説明する。低中高を含む風速の同じ条件に対して、PWM コンバータを用いる VSWPG のシミュレーション結果が、WTE によるテストベンチで得られる実験結果と比較される。更に自然風速を条件として、WTE または WT によるテストベンチにおいて得られた PWM コンバータを用いる VSWPGS の実験結果を示す。得られる実験結果を検証し、提案する WTE が実機検証に用いるのに十分な性能を有していることを示す。</p>

	<p><b>第5章 可変速風力発電システムの実機検証</b></p> <p>WTE を用いるテストベンチを用いて、PWM コンバータまたは BCC を用いる VSWPGS に対して、低中高を含む風速を条件とする実機検証を行う。両 VSWPGS の実験結果を比較検証することで、BCC を用いる VSWPGS が、従来の制御方式よりも可変速範囲を広げることができることを示す。また実機検証に用いているシステムの各要素を考察し、BCC を用いた VSWPGS が、システム全体の信頼性を向上させつつコスト削減を達成し、ベンチマークである PWM コンバータを用いる VSWPGS と同等の性能を有することを示す。</p> <p><b>第6章 まとめ</b></p> <p>本論文で得られる結果に基づき総合的な討論を行い、得られた研究成果を明確にする。</p>
<p>論文内容の要旨 (英文)</p>	<p><b>Doctor Thesis Title:</b> "Experimental Assessment with Wind Turbine Emulator of Variable-Speed Wind Power Generation System using Boost Chopper Circuit of Permanent Magnet Synchronous Generator "</p> <p><b>Abstract:</b> This thesis verifies the performance of a Variable-Speed Wind Power Generation System (VSWPGS) using Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) and Boost Chopper Circuit (BCC) experimentally. The assessments are conducted with a test bench using a Wind Turbine Emulator (WTE). The WTE reproduces the shaft torque of a wind turbine (WT) for an arbitrary wind velocity by the servo motor drives. The shaft-torque reference of servo motor drive is estimated in real time based on the blade element momentum theory (BEMT) by using windmill wing profiles, wind velocity data, and windmill rotational speed. Also the difference of inertia between the WT and the servo motor is compensated simultaneously. The WTE is newly-proposed for the experimental assessment. The tested VSWPGS using BCC has three speed control modes to the wind velocity. By combining the three control modes, the VSWPGS using BCC can extend the variable speed range more than conventional control methods. The experimental assessments shows that the VSWPGS using the BCC can reduce the costs while improving the reliability of the whole system, and has the same performance as the VSWPGS using a PWM converter of benchmark.</p> <p><b>Chapter 1 Introduction</b></p> <p>After discussing the necessity of harnessing the renewable energy. This chapter looks back into history of the wind power generation systems. The features of wind power generation systems, which have been put into practical use, are organized. For the VSWPGS handled in this thesis, the structure and the operating principles are referred, and the research background supporting the research objective of this thesis is described.</p> <p><b>Chapter 2 Operating principle of the variable-speed wind power generation system</b></p> <p>The structure and the operation principles of the VSWPGS using PMSG used for system interconnection are described. Each control principles of VSWPGS using BCC or PWM converter handled in this thesis is explained. The differential equations describing the systems, which are necessary for modeling in simulation, are explained.</p> <p><b>Chapter 3 Assessment with simulation of the variable-speed wind power generation system</b></p> <p>The modeling method using MATLAB/Simulink is explained. The modelling is conducted based on the simultaneous differential equations describing each system. Also, this chapter explains the modeling method of the WT. The design method for control parameters of the VSWPGS using BCC or PWM converter are explained, and the parameters necessary for the simulation are shown. The simulation is conducted for the conditions of the low, medium and high wind velocity. The simulation results</p>

for each VSWPGS are shown, and the validity of the control principle for each VSWPGS is proved.

**Chapter 4 Wind turbine emulator**  
 This chapter explains the operating principle and the structure of WTE based on the BEMT. Also the structures of the test benches using the WT or WTE are explained. The simulation results of the VSWPGS using PWM converter are compared with the experiment results obtained with the test bench using WTE under the same conditions of low, medium and high wind velocities. Furthermore, under the conditions of natural winds, the experiment results obtained with the bench using WTE or WT for the VSWPGS using PWM converter are shown. The obtained experimental results are validated, and they show that the proposed WTE for the experimental assessment has a sufficient performance.

**Chapter 5 Experimental assessment of variable speed wind power generation system**  
 The experimental assessment for the VSWPGS using PWM converter or BCC are conducted with the test bench using WTE under the conditions of low, medium, and high wind velocities. By comparing the experimental results of both VSWPGS, it is shown that the VSWPGS using BCC can extend the variable speed ranges compared to conventional control methods. Also the each element of the system, which are used for experimental assessments, is discussed. Then it is shown that the VSWPGS using BCC can reduce the costs and improve the reliability of the whole system, and it has the same performance with the VSWPGS using PWM converter of a benchmark.

**Chapter 6 Conclusion**  
 The comprehensive discussions based on the obtained results are conducted, and the obtained research outcomes are clarified.

論文審査結果

審査の結果

本学位論文は、永久磁石同期発電機（PMSG）を前提とする昇圧チョップ回路（BCC）を用いた可変速風力発電システム（VSWPGS）の実機検証による評価を行っている。実機検証では、風車エミュレータ（WTE）によるテストベンチを試作し、その精度を実際の風車タービン（WT）との比較実験により確認した上で、そのテストベンチを用いて評価を行っている。WTEは、サーボモータドライブにより任意の風速に対するWTの軸トルクを再現している。サーボモータドライブに与える軸トルク指令は、翼素運動量理論に基づいて、風車翼プロファイル、風速データ、そして風車回転速度からリアルタイムに演算され、同時にサーボモータとWTのイナーシャの違いも補償されている。WTEは実機検証のために、本学位論文において新規に提案されたものである。

低中高を含む風速の同じ条件に対して、WTEによるテストベンチで得られた実験結果は、PWMコンバータを用いたVSWPGのシミュレーション結果と比較された。更に実測した自然風速を条件として、WTEまたはWTによるテストベンチにおいて得られたPWMコンバータを用いたVSWPGSの実験結果を検証し、提案したWTEが実機検証に用いるのに十分な性能を有していることを示した。

BCCを用いるVSWPGSは、風速に応じた3つの制御モードを有している。シミュレーションにおいて、3つの制御モードを組み合わせることにより、BCCを用いるVSWPGSは、従来のBCCを用いた制御方式よりも可変速範囲を広げることができることが証明されていた。そこで、本学位論文は、実機検証により、BCCを用いたVSWPGSが、システム全体の信頼性を向上させつつコスト削減を達成し、ベンチマークであるPWMコンバータを用いるVSWPGSと同等の性能を有することを示している。

以上より、本学位論文で実現したWTEを用いたテストベンチは、風車翼形状、発電機、そして系統連系システム的设计を同時に検討できるため、将来において風力発電システムを開発する場合に有用なツールとなることが明らかになった。またBCC

	<p>による VSWPGS の実機検証において、その性能が実証されたことにより、実用化に向けた展望が開けた。</p> <p>学位論文公聴会においては、論文内容に関連する種々の工学的及び技術的な質問があったが、いずれも適切な回答を行うことができた。また公聴会後の最終試験においては、学位論文に関連する分野の学識を有し、今後研究を進めていくための研究能力を備えていることが判明した。</p> <p>以上の結果から、学位審査委員会はこの論文が博士（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>参考論文 5 編 1 冊  査読付き論文</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>“Experimental Assessment with Wind Turbine Emulator of Variable-Speed Wind Power Generation System using Boost Chopper Circuit of Permanent Magnet Synchronous Generator” ,  JPE Journal of Power Electronics, to be published.  Authors: Sirichai Tammaruckwattana, Kazuhiro Ohyama, and Chenxin Yue</li> </ol> <p>国際会議論文（※発表者に○のこと。）  (口頭発表, 査読有り)</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>“Experimental Verification of Variable Speed Wind Power Generation System Using Permanent Magnet Synchronous Generator by Wind Turbine Emulator” ,  IECON2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, CD-ROM, pp.5827-5832 (2012)  Authors: ○Sirichai Tammaruckwattana and Kazuhiro Ohyama</li> </ol> <p>(ポスター発表, 査読有り)</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>“Modeling and Simulation of Permanent Magnet Synchronous Generator Wind Power Generator System Using Boost Converter Circuit” ,  EPE2013 ECCE Europe 15th European Conference on Power Electronics and Applications, CD-ROM, pp.01-10 (2013)  Authors: ○Sirichai Tammaruckwattana and Kazuhiro Ohyama</li> </ol> <p>(口頭発表, 査読有り)</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>“Experimental Verification of Variable Speed Wind Power Generation System Using Permanent Magnet Synchronous Generator by Boost Converter Circuit” ,  IECON2013 - 39th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, CD-ROM, pp.7157-7162 (2013)  Authors: ○Sirichai Tammaruckwattana and Kazuhiro Ohyama</li> </ol> <p>(ポスター発表, 査読有り)</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>“Comparison of Switching Losses of Matrix Converters for Commutation Methods” ,  EPE2014 ECCE Europe 16th European Conference on Power Electronics and Applications, CD-ROM, pp.01-10 (2014)  Authors: ○Sirichai Tammaruckwattana, Chenxin Yue, Yumi Ikeda, and Kazuhiro Ohyama</li> </ol>