

学位論文要旨

(Summary of the Doctoral Dissertation)

学位論文題目 (Dissertation Title)	Dual Active Bridge コンバータを用いた独立型風力発電システムの高効率化 (Improvement in Conversion Efficiency of Standalone Wind Power Generation System Using a Dual Active Bridge Converter)
氏名(Name)	高山 雄利

近年の地球温暖化の影響を受け、日本は 2050 年までに温室効果ガスの排出を全体としてゼロにすることを目指している。そのため、発電に化石燃料を使用しない再生可能エネルギーの導入が注目されている。中でも、独立型風力発電システムは、商用電源が敷設されていない場所などの独立電源として街路灯などに使用され、年々設置台数が増加している。独立型風力発電システムは、ビル間などの平均風速が低い都市エリアでの設置が多いため発電電力が小さく、得られた電力の有効利用が必要である。よって、街路灯などの負荷の駆動可能な時間を長くするためには独立型風力発電システムの電力変換効率向上が重要である。

本学位論文では、高効率化が可能な Dual Active Bridge (DAB) コンバータを用いた独立型風力発電システムを提案し、その有効性を明らかにしている。第1章では、地球温暖化について述べ、再生可能エネルギーの重要性を詳細に述べている。また、風力発電の種類や原理を説明し、特に独立型風力発電システムの特徴と課題を説明している。第2章では、独立型風力発電システムおよび DAB コンバータの研究動向について論じている。先に提案されているシステムでは、商用トランスによる昇圧が必要であることなどから高効率化に課題がある。また、DAB コンバータは、電圧変動および負荷変動により効率が低下する問題がある。先に提案されている DAB コンバータの効率改善法では、制御の複雑化や回路の大型化を招く。これらの検討すべき課題を国内外における文献を引用しながら詳細に論じ、本学位論文の位置づけと目的を明らかにしている。

第3章では、DAB コンバータを用いた独立型風力発電システムを提案している。提案するシステムは、商用トランスによる昇圧などが不要なことから小型化でき、また、電力変換器の直列段数が3段と少ないこと、インバータに流れる電流が小さいことから高効率化が可能な点に特長がある。はじめに、DAB コンバータを用いた独立型風力発電システムの構成を示し、各制御について詳細に述べている。次に、PLECS を用いた計算機シミュレーションにより、風速に依存せずに交流負荷の消費電力を一定に制御可能であることを明らかにしている。最後に、先に提案されている風力発電システムと提案する DAB コンバータを用いたシステムを比較し、DAB コンバータを用いたシステムが高効率であることを明らかにしている。

第4章では、第3章のシステムにおけるバッテリー充放電用 DAB コンバータの直流リンク電圧可変制御を提案している。提案する直流リンク電圧可変制御は、バッテリー放電モード(BDM)においてバッテリー電圧の低下に応じて直流リンク電圧を下げることで、軽負荷時の効率を改善可能な点に特長がある。はじめに、第3章で使用していた DAB コンバータの BDM 時の制御の課題として、バッテリー電圧低下時に DAB コンバータの電力変換効率が低下し、かつ伝送電力が軽負荷の場合はさらに電力変換効率を低下することを説明している。次に、直流リンク電圧可変制御によって軽負荷時の効率改善が可能であることを明らかにし、最適な直流リンク電圧指令値の理論式を導出している。次に、PLECS を用いた計算機シミュレーションにより、直流リンク電圧可変制御の軽負荷時の効率改善効果を明らかにしている。最後に、直流リンク電圧可変制御を適用した DAB コンバータを用いたシステムのバッテリー放電動作を実機検証し、システムの正常動作を確認している。しかしながら、直流リンク電圧可変制御では軽負荷時の効率を改善できるが、反対に重負荷時の効率は低下する。そこで、第5章では、バッテリー充放電用 DAB コンバータの全負荷範囲高

効率駆動法を提案している。はじめに，直流リンク電圧指令値切替制御を提案している。提案する切替制御は，DABコンバータの伝送電力に応じて直流リンク電圧指令値を切り替えることで全負荷範囲で高効率駆動が可能となる点に特長がある。次に，PLECSを用いた計算機シミュレーションにより，負荷変動に応じて指令値の切替が正常に行えることから全負荷範囲で高効率駆動が可能であることを明らかにしている。その後，DABコンバータの直流リンク電圧指令値切替制御による効率改善効果による影響を電気代に換算し，制御の有効性を明らかにしている。最後に，今後の検討課題である，大容量化したシステムのさらなる高効率駆動に向けた並列接続DABコンバータの制御法について概要を説明している。並列接続DABコンバータは，一次側電流の脈動低減や高効率化などが可能な点に特長がある。システム構成，およびDABコンバータの動作モードを示し，さらなる高効率駆動がさらなる高効率駆動が期待できることを述べている。

第6章では，本論文で得られた研究成果および今後の研究課題について述べている。

(様式 9 号)

学位論文審査の結果及び最終試験の結果報告書

山口大学大学院創成科学研究科

氏 名	高山 雄利
審査委員	主 査：山田 洋明
	副 査：田中 俊彦
	副 査：田村 慶信
	副 査：山口 真悟
	副 査：若佐 裕治
	副 査：長谷川 一徳
論文題目	Dual Active Bridge コンバータを用いた独立型風力発電システムの高効率化 (Improvement in Conversion Efficiency of Standalone Wind Power Generation System Using a Dual Active Bridge Converter)
<p>【論文審査の結果及び最終試験の結果】</p> <p>電力系統に接続しない独立型風力発電システムは、街路灯などに利用されているが、風によるエネルギーが得られない期間は蓄電池から電力供給を行う必要がある。このため、独立型風力発電システムの効率向上が求められている。ダイオード整流器を用いた風車の周速比制御を行う従来のシステムでは発電機と交流負荷間の電力変換器の段数が多いなど、高効率駆動に課題がある。本学位論文では、発電機と交流負荷間の電力変換器の直列段数を減らした Dual Active Bridge コンバータを用いた独立型風力発電システムを提案し、有効性を明らかにしている。</p> <p>第 1 章では、再生可能エネルギー導入拡大の必要性や独立型風力発電システムの導入動向についての研究背景と研究目的を論じている。第 2 章では、独立型風力発電システムの技術動向について述べ、克服すべき課題について明らかにしている。</p> <p>第 3 章では、Dual Active Bridge コンバータを用いた独立型風力発電システムを提案している。提案したシステムは、Dual Active Bridge コンバータを蓄電池の充放電コントローラとして用いており、直流リンク電圧の変動に応じて充放電を切り替える方式としている。この直流リンクに電圧形 PWM インバータを接続することで、従来のシステムと比較して発電機と交流負荷間の電力変換器の直列段数を減らすことができ高効率に運転することが可能となる特長を持つ。パワーエレクトロニクスシステムシミュレータ PLECS を用いた計算機シミュレーションにより、従来のシステムおよび提案するシステムの電力変換効率を比較し、提案するシステムの有効性を明らかにしている。</p> <p>第 3 章で提案したシステムにおいて、放電動作においてバッテリー電圧によって変圧器電流が非台形波状となり効率が低下する課題があった。第 4 章では、軽負荷時に変圧器電流</p>	

(様式 9 号)

が非台形波状となる原因を追究し、可変直流リンク電圧制御を提案している。これは、変圧器のインピーダンスを考慮した補正値を直流リンク電圧指令値に加算する方式であり、従来の可変電圧指令値とする方式で課題であった点を克服し変圧器電流を完全に台形波状にでき、軽負荷時においても Zero Voltage Switching を成立させ、システムの電力変換効率を改善できる特長がある。実機を構築し、実験によりバッテリーの放電終止電圧から公称電圧の範囲において、変圧器電流を常に台形波状に維持できることを明らかにし、提案手法の有効性を確認した。

第 5 章では、重負荷時を含めた全負荷領域でシステムを運転するための直流リンク電圧切替制御を提案している。第 4 章で提案した可変直流リンク電圧制御法では、重負荷時において効率が低下する領域が存在することを PLECS による計算機シミュレーションにより明らかにしている。これらの結果から、バッテリーの放電電力に応じて直流リンク電圧の指令値を可変と一定の切り替えを行う直流リンク電圧切替制御を提案し、その有効性を明らかにしている。

第 6 章では、本学位論文の結論と今後の課題を述べている。

【本審査および公聴会における主な質問内容】

本審査および公聴会において、①Dual Active Bridge コンバータを用いなければならない理由は何か、②独立型風力発電システムの要求事項が分かりにくい、③変圧器の励磁インピーダンスの影響によりゲイン調整を行っているが、温度変化などの影響を受けないのか、④バッテリー電圧の変動範囲をどのように想定して検討されているのか、⑤バッテリー容量を増大させる場合にコストも増加するが、コストの増加を踏まえた考察を行うべきではないか、などの質問があった。いずれの質問に対しても発表者からの的確な回答がなされた。また、本学位論文の英文題目について修正すべきとの指摘があり、” Improvement in Conversion Efficiency of Standalone Wind Power Generation System Using a Dual Active Bridge Converter”と修正することとなった。

以上より、本研究は独創性、信頼性、有効性、実用性ともに優れ、博士（工学）の論文に十分値するものと判断した。

論文内容および審査会、公聴会での質問に対する回答などから、最終試験は合格とした。

なお、主要な関連論文の発表状況は下記のとおりである。（関連論文 計 4 編）

- 1) Yuto Takayama, Hiroaki Yamada, “Experimental Verification of Dual Active Bridge Converter Based Battery Charger in a Stand-Alone Wind Power Generation System”, in Proc. of the 23rd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS2020), pp.1022-1026, 2020
- 2) Yuto Takayama, Hiroaki Yamada, “Variable DC-Link Voltage Control of Dual Active Bridge Converter in a Standalone Wind Power Generation System for High-Efficiency Battery-Discharging Operation”, Energies, Vol.14, No.20, 17pages, 2021.