

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 14 日現在

機関番号：18001

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560837

研究課題名（和文） 強風域特化型風力発電システムに対するダブルピッチ失速制御機構の開発

研究課題名（英文） Development of double pitch stall control mechanism for micro-wind turbine specialized in strong wind region

研究代表者 玉城 史朗 (TAMAKI SHIRO)

琉球大学・工学部・教授

研究者番号：80163666

研究成果の概要（和文）：本研究では、強風域（風速 15m/s-25m/s）でも運転可能な強風域特化型風力発電システムの過回転防止制御機構の研究開発を行った。ここでは、水平軸風車の過回転を防止するためのエアブレーキシステム「風車のダブルピッチ制御機構」を開発し、その実証機（3kw）を製作し運転試験を行った。このような失速・回復現象を誘発する事により、風車の過回転が防止できることをフィールド試験で確認し、空気力学的・動力学的メカニズムを解析した。さらに、翼素理論および動的システム理論から、失速制御挙動を解析し、本制御機構の欠点を洗い出すと共に、新たな制御手法を設計し、数値シミュレーションで有効性を確認した。

研究成果の概要（英文）：In this study, we research and develop of overspeed prevention control mechanism operable strong wind region specialized type wind power generation system at any strong wind range (wind speed 15m/s-25m/s). Here, we developed a "double pitch control mechanism of the wind turbine" air brake system for preventing over-rotation of the horizontal axis wind turbine, and subjected to running test were made that demonstrated machine (3kw). It was confirmed by field tests that by inducing a stall and recovering such a phenomenon, excessive rotation of the wind turbine can be prevented, and analyzed aerodynamic-kinetic mechanism. Furthermore, dynamic systems theory and blade element theory, analyzes the stall control behavior, while washing out the disadvantages of the control mechanism, and designed a new control method, we show the effectiveness of the numerical simulation.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2011 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学

キーワード：小型風力発電システム，失速制御，ピッチ・フラップ失速制御，翼素理論，過回転制御

1. 研究開始当初の背景

小型風車は古来より揚水や粉ひきのための動力として活用されてきたにも関わらず、現在、小規模風力発電用としては導入が進んでない。その大きな問題点は、強風に対する失速制御方式が確立されておらず、その結果、過回転による破損事故が多発していることがあげられる。この課題が克服可能となれば、小型風力発電システムが、今後のグリーンエネルギー社会へ大きく貢献することが期待される。以上の観点から、小型風車のイノベーションとしての本風車の特性を実験的に評価することは非常に重要となる。本研究では、従来、15m/s で運転停止を行っていた小型風車に対し、遠心力による過回転防止機構を用いた失速制御システムの研究開発を行い、その有用性を確認することを目指す。

2. 研究の目的

本研究では、小型風車（出力 500W - 10 kW）の最大の欠点である過回転防止失速制御を実現するため、我々は、ばね力を利用して、強風時における羽根の過回転防止のための失速制御や、受風面に突風を受けたときの失速制御を独立に、または、同時に実現するダブルピッチパッシブ制御機構を開発した。しかし、その流体力学的、および、機構学的動特性の解明はなされていない。これらの特性が解明されることにより、最適な失速制御機構が明らかになると、その結果として、我々が開発した耐高風速型小型風車の最適設計が実現できる。われわれは実機のフィールド試験と風洞試験により現象を解明するとともに、このシステムの詳細な力学的モデルを構築する。そして、実験と理論を相互にフィードバックすることにより新たな知見を得て、強風域に特化した小型風力発電システムの実用化を目指す。

3. 研究の方法

我々は風車が受ける突風に対する緩衝や、過回転を防止するためのダブルピッチ制御機構を提案した。しかし、この機構は、未だ十分とは言えない。その一番大きな点は、ばね定数と失速風圧、及び、失速回転数の関係が明らかにされていないことである。すなわち、ばね定数（ばね弾性係数）が小さい場合には、微細な突風や、回転数が小さい場合でも失速制御が働き、ハンチング現象を起こす。それに対し、ばね弾性係数を大きくすると、突風や、過大な過回転に対しても失速が起きないので風車の安全性を損なう場合がある。すなわち、風車に取り付けられているばね弾性係数と、強風に伴う羽根の失速角度の関係

が明らかになっていないために、最適なばねの弾性係数を決定するのが困難であるという状況に陥っている。この点の解決策として、われわれは以下のアプローチからこの問題点を追及し、解明する。

4. 研究成果

本研究プロジェクトにおいて、我々は、強風域で自律的に過回転を抑制するダブルピッチ制御機構の有効性を確認するための実証試験を目的として以下の項目について研究を行った。

- (1) 風車のダブルピッチ制御機構の製作（強風域において自律的に失速制御が働くダブルピッチエアブレーキシステムの開発）。
- (2) 回転失速とバネ定数の関係の解析（風速25m/s 以上において一定回転となるような最適バネ定数の決定）。
- (3) 突風に対する失速制御機構の改良（突風と失速制御の関係を実験的に明らかにする）。
- (4) フェルセーフ機構による安全性の向上。

以上の項目について順を追って成果を述べる。

まず、課題（1）については、風速 10 m/s 付近において失速制御が動作していることが確認できた。また、その下限は 25rad/s 付近である。そして、失速後、すみやかに、失速制御機構が比較的スムーズに解除されることが実験で明らかになった。また、回転数がスパイク状に増加している部分が見られるが、これは失速制御機構が働くタイミングが遅れるなど、過回転が起こっていることを示している。さらに、失速制御域の風速が 10 m/s 付近であるため、最新型風力発電システムは、従来型、改良型に比べて、発電特性を飛躍的に改善することが可能となった。これまでに、達成されなかった目標を克服するため、風車のピッチ制御機構に改良を加え、さらには、羽根の再設計を行い、強度を保ったまま軽量化を行った。また、本風力発電システムの動特性解析を基に、ピッチ失速制御の新たな知見を得ることができた。

次に、課題（2）については、本プロジェクトの目的を達成するためのキーとなる数値実験であった。すなわち、風速 25m/s 程度の強風域において失速制御が機能し、それ以上の風速では一定の回

転数を維持するための現象を実現することを目指していた。ここでは、本風力発電システムの動的モデルの構成を行うことができたが、実験値とモデルとの乖離を克服することができなかった。この原因は、実際の実験データの物理パラメータの値がモデルに正確に反映できていなかったことに起因する。特に、実験とシミュレーションを比較すると、シミュレーションの場合の角速度振幅が大きい。それは、実機に比べて、摩擦係数が小さく見積もられていることが考えられる。しかし、本モデルは、定性的には実機の挙動を反映していると考えられる。さらに、モデルを用いた強風域での数値シミュレーションでは、ダンパの効果が十分発揮できている。従って、正確なモデルが構成可能となれば、ダンパ係数に対する設計指針が確立される。

また、課題(3)に対しては、風速が急激に変化したときの角速度の挙動を解析することが可能となった。この結果より、突風に対する失速制御機構は非常によく動作することが確認できた。

さらに、課題(4)のフェルセーフ機構による安全性の向上に関しては、長距離無線LANを用いた自前のネットワークインフラを構築し、それを活用することにより、遠隔から電磁ブレーキのオン・オフを可能にすることができた。さらには、データの自動計測、システムの遠隔監視技術の構築も行った。

今回、強風域に特化したダブルピッチ制御機構を開発し、フィールド実験によりその有効性の検証を行ったが、われわれが目標としている、高風域(風速 25m/s)でのピッチ制御システムの実現までには至らなかった。しかし、ここでは、風速 15 m/s の強風域(商用風力発電装置の限界風速域)における失速制御の機能は確認された。この目標を克服するための課題を以下に列挙する。

- 1) 失速制御機構を実現するための要素としては、ばね、および、ダンパが不可欠となる。まず、本失速制御機構にダンパを装着することを目指さねばならない。そのためには、数値シミュレーション、そして、実験を繰り返し、互いにフィードバックを行うことで、新たな知見を得、そして、その結果を設計に反映させることが必要となる。
- 2) 現在のシステムに対する縮小モデルを作成して、風洞実験による失速制御機構の解明が必要となる。この場合は、設計についてはある程度の試行錯誤が必要となるが、ぜひ、実現しなければならない事項である。そして、実際にフィールド試験を行

い、風洞実験、数値シミュレーションの結果を統合して、新たな設計指針を見出し、実機による実現を目指したい。

- 3) 今後、小型風力発電システムを、社会的に普及させるためには、高性能、かつ、安心・安全であり、さらには、耐久性に優れ、メンテナンスが簡便なシステムを構築しなければならない。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 13 件)

- [1] Faramarz Asharif, Shiro Tamaki, Mohammad Reza Alsharif, Heung Gyoon Ryu " Performance Improvement of Constant Modulus Algorithm Blind Equalizer for 16 QAM Modulation " International Journal on Innovative Computing, Information and Control, Volume 7, Number 4, pp. 1377- 1384, April 2013.(査読有)
- [2] 鈴木正己, 天久和正, 二見昌寛“数値流体計算によるサボニウス風車まわりの流れ”ターボ機械第41巻2号, 116-121, (2013). (査読有)
- [3] Faramarz Asharif, Shiro Tamaki, Tsutomu Nagado, Tomokazu Nagata and Mohammad Reza Asharif, " Design of Adaptive Friction Control of Small-Scaled Wind Turbine System Considering the Distant Observation " International Conference of Control and Automation, LNCS Springer pp.213-221, November 2012.(査読有)
- [4] Faramarz Asharif, Shiro Tamaki, Tsutomu Nagado, Mohammad Reza Alsharif, " Comparison and Evaluation of Restrain Control in Wind Turbine with Various Shock Absorber Considering the Time-Delay " International Journal of Control and Automation, Vol. 5, No. 3, pp. 111-131, September 2012.(査読有)
- [5] Faramarz Asharif, Shiro Tamaki, Tsutomu Nagado, Tomokazu Nagata and Mohammad Reza Asharif, " Analysis of Non-Linear Adaptive Friction and Pitch Angle Control of Small-Scaled Wind Turbine System, " Future

- Generation Information Technology FGIT 2011, Control and Automation CA, Springer-Verlag, Lecture Note: Communication in Computer and Information Science 256, pp. 26-35, December 2011.(査読有)
- [6] Faramarz Asharif, Shiro Tamaki, Tsutomu Nagado, Mohammad Reza Alsharif, "Evaluation of Internal Model Controller in Time and Frequency Domain on Application to Wind Turbine" International Conference of Computer, Communication and Control (3CA2011), Springer-Verlag, Lecture Note on Electrical Engineering, Advances in Intelligent and Soft Computing, 2012, Volume 133, Frontiers in Computer Education, pp. 413-422, November 2011.(査読有)
- [7] Faramarz Asharif, Shiro Tamaki, Tsutomu Nagado, Mohammad Reza Alsharif, "Design of Loop-Shaping and Internal Model Controller for Unstable and Communication Delay System" International Journal of Control and Automation, Vol. 4 No. 1 pp. 59-70, March 2011.(査読有)
- [8] Faramarz Asharif, Shiro Tamaki, Tsutomu Nagado, Mohammad Reza Alsharif, "Design of Low Frequency and Decoupling Compensator for MIMO System Including Time-delay Elements and Interferences" International Journal of Control and Automation, Vol. 4 No. 1 pp.33-48, March 2011.(査読有)
- [9] Faramarz Asharif, Shiro Tamaki, Tsutomu Nagado, Tomokazu Nagata and Mohammad Reza Asharif, "Analysis of MIMO System with Internal Model Controller Including Uncertainty of Time-Delay Element, External Disturbance and Feedback Noise", International Journal of Information, Vol.14, No.1, pp5-15, January 2011. (査読有)
- [10] 鈴木正己, 天久和正, "数値流体計算による風車の斜め風特性" ターボ機械 第 39 卷 2 号, 116 - 121, (2011) (査読有)
- [11] Faramarz Asharif, Shiro Tamaki, Tsutomu Nagado, Mohammad Reza Asharif, "Low Frequency Compensator of Multi-Variable Tele-Control system, " Future Generation Information Technology FGIT 2010, Control and Automation CA, Springer-Verlag, Lecture Note: Communication in Computer and Information Science, GDC/CA 2010, CCIS 121, International Convention Center Jeju, Jeju Island, Korea, pp.196-205, December 13 ~ 15, 2010. (査読有)
- [12] 玉城磨, 玉城史朗, 伊藤芳樹, 當眞毅, 長田智和, 堤純一郎: 断崖近傍に設置された段違い 2 列型防風ネット効果に関する研究, 日本風工学会論文集, 35(4), pp.107-115, (2010). (査読有)
- [13] 玉城磨, 内山信司, 伊藤芳樹, 玉城史朗: 超音波 風速計を用いた多点型ワイヤレス風観測システムに関する研究, 日本太陽エネルギー学会誌, 36(6), pp.65-74, (2010). (査読有)
- [学会発表] (計 13 件)
- [1] Faramarz Asharif, Shiro Tamaki, Mohammad Reza Alsharif and Heung Gyoonyu, "Blind Adaptive Channel Equalizer of Multi-Path Feedback Channel for OFDM-Based Wireless Repeater System " IEICE Vol. 112 No 440, pp. 83-86, SAT2013 Okinawa, Feb. 21-22, 2013.
- [2] Faramarz Asharif, Shiro Tamaki, Mohammad Reza Alsharif and Heung Gyoonyu, "Adaptive Channel Equalizer of Multi-Path Feedback Channel for OFDM-Based Wireless Repeater System " 27th SIP Symposium, pp. 573-576 Ishigaki Japan, November 28-30, 2012.
- [3] Faramarz Asharif, Shiro Tamaki, Mohammad Reza Alsharif, Heung Gyoonyu, "Improvement and Comparison of Modulus Algorithm Blind Equalizer Learning Curve in Time and Frequency Domain, " International Conference on ITC Convergence, ICTC 2012, Proceeding of IEEE Conference, Ramada Plaza Jeju Hotel, Jeju, Korea, pp. 323-328, Oct. 15-17, 2012.
- [4] Faramarz Asharif, Teppei Hirata, Kentaro Asato, Tsutomu Nagado and Shiro Tamaki, "Design of Nonlinear Adaptive Controller for Small-Scale Wind Turbine" FAN2012 Okinawa Japan, August, 30-31, 2012[4] Faramarz Asharif, Shiro Tamaki, Tsutomu Nagado, Tomokazu Nagata, Mohammad Reza Asharif, "Evaluation of Restrained-Control of Small-Scale Wind

Turbine System Considering Round Trip Delay, "The 27th International Conference on Circuit-Systems, Computers and Communication, ITC-CSCC'12, Sapporo, Japan, July, 15-18, 2011. <http://www.knt.co.jp/ec/2012/itc-cscc>

[5] Faramarz Asharif, Shiro Tamaki, Tsutomu Nagado, Tomokazu Nagata and Mohammad Reza Asharif, "Application of Internal Model Controller for Wind Turbine System Considering Time-Delay Element" 8th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, Noordwijkerhout, pp. 199-202 Netherlands, July 28-31, 2011 <http://www.icinco.org/>

[6] Faramarz Asharif, Shiro Tamaki, Tsutomu Nagado, Tomokazu Nagata, Mohammad Reza Asharif, "Analysis of Tele-Operation System on Application to Wind Turbine Control," The 26 th International Conference on Circuit-Systems, Computers and Communication, ITC-CSCC'11, pp. 862-865, Geoyongju, Korea, June, 7-11, 2011. <http://www.itc-cscc2011.org/>

[7] 玉城史朗: 自律型農業用ハイブリッド発電システムの開発, pp.4 -5, OHM6 月号, 2011 年

[8] 二見昌寛, 仲村政克, 金城篤史, 天久和正, "耐強風性を考慮した小型風力発電システムのピッチ・フラップ制御機構" 計測自動制御学会第 11 回制御部門大会, 162-2-3 (CD-ROM), 2011 年 3 月 16 日

[9] 早乙女理恵, 渡慶次憲人, 宮里智樹, 玉城史朗, "Ka 帯通信における時系列解析を用いた降雨減衰特性のモデリングに関する研究, 計測自動制御学会第 11 回制御部門大会, 164-3-2 (CD-ROM), 2011 年 3 月 16 日-18 日.

[10] 安里健太郎, 長堂勉, 玉城史朗, "構造化並行打ち切り法による低次元化制御システムの閉ループ特性改善" 計測自動制御学会第 11 回制御部門大会, 188-2-1 (CD-ROM), 2011 年 3 月 16 日-18 日.

[11] 玉城史朗: FWA を基盤とした島嶼型自然エネルギーシステムの遠隔監視・制御システム. 第 11 回計測自動制御学会制御部門大会, 制御部門ワークショップ平成 23 年 3 月 15 日 (招待講演)

[12] Faramarz Asharif, Shiro Tamaki, Tsutomu Nagado, Tomokazu Nagata, "Analysis of Hybrid Robust Controller Considering Disturbance, Noise and Time-Delay", 18th Iranian Conference on Electrical Engineering Isfahan, Iran, Proceeding of IEEE Conference 978-1-4244-6760-0/10, May, 11-13, 2010.

[13] 玉城史朗: フィールドから自然エネルギーを学ぶ。琉大 21 世紀フォーラム、平成 22 年 10 月 29 日

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

○取得状況 (計 1 件)

名称: 風車のブレードピッチダブル制御機構
発明者: 清水幸丸、玉城史朗
権利者: 国立大学法人琉球大学
種類: 特許
番号: 特許第 4649570 号
取得年月日: 平成 22 年 12 月 24 日
国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

<http://www.shiro.neoeie.u-ryukyu.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

玉城 史朗 (TAMAKI SHIRO)
琉球大学・工学部・教授
研究者番号: 80163666

(2) 研究分担者

長田 康敬 (NAGATA YASUNORI)
琉球大学・工学部・教授
研究者番号: 50208021

天久 和正 (AMEKU KAZUMASA)
琉球大学・工学部・准教授
研究者番号: 40284955