

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 29 日現在

機関番号：18001

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25420924

研究課題名(和文) 自律的過回転抑制機構を用いた小型風力発電システムの出力安定化制御

研究課題名(英文) Output stabilized control for small-scaled wind-turbine by using autonomous over-rotation mechanism

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：小型風力発電システム(10kW未満)の用途は非常に幅広い。しかし、その普及は遅々として進んでいない。その理由は、強風で引き起こされるブレードの過回転による破損事故の多発に起因する。すなわち、強風域で小型風力発電システムを運転すると過回転を誘発し、ブレードが破壊されるという現象が起きる。本研究では、小型風車の過回転を防止するため、風車回転軸の回転を、発電機出力電流を用いた電磁力により非接触で制動する適応型失速機構の開発と、遠心力を利用した受動的ピッチ角失速制御方式の開発を行う。そして、両制御システムを評価して、風力発電システム出力変動を可能な限り抑制する出力安定化システムの開発を行った。

研究成果の概要(英文)：The application of the small-scaled wind power generation system is very wide. However, its diffusion has not progressed. The reason for this is caused by frequent breakage accidents caused by excessive rotation of blades caused by strong winds. In other words, driving a small-scaled wind power generation system in a strong wind induces over-speed and causes a phenomenon that the blade is destroyed. In this research, in order to prevent over-rotation of the small wind turbine, we developed an adaptive stall mechanism that brakes non-contactly the rotation of the wind turbine rotation shaft by electromagnetic force using the generator output current, and passive Pitch pitch angle stall control method. We evaluated both control systems and developed an output stabilization system that suppresses the output fluctuation of the wind power generation system as much as possible.

研究分野：再生エネルギーシステム

キーワード：小型風力発電システム 自律的失速制御 システム 適応制御 過回転抑制制御 ピッチ角失速制御 非接触型電磁ブレーキ 再生エネルギー

1. 研究開始当初の背景

風力発電システムは再生エネルギー活用型発電システムとして実用化が進んでいるが、それは100kW以上の大型機のみである。一方、小型風力発電システム(10kW未満)は、小規模電力供給システムとして、揚水、照明、遠隔地や山岳地における電力源としてその用途は非常に幅広い。さらには、今後、都市部において導入が進むことが予想されるスマートグリッドの小規模電力源としての活躍も期待されている。しかし、現状では、小型風力発電システムの普及は遅々として進んでいない。その理由は、強風で引き起こされるブレードの過回転による破損事故の多発に起因する。すなわち、15m/s以上の強風域で小型風力発電システムを運転すると過回転を誘発し、その結果、ブレードが遠心力により破壊されるという現象が起きる。大型風力発電システムの場合は、風速に応じてピッチ角をモーターで変化させることにより、能動的に羽根に失速制御を行わせて過回転を防止している。しかし、小型風力発電システムにこのような失速制御方式を採用すると、非常にコスト高になるばかりではなく、メンテナンス費用も膨大になり、その結果、実用化に程遠いシステムとなる。ところで、風力発電システムの出力は風速の3乗に比例するため、高い風速域においても運転が可能であれば、その分エネルギー回収率が向上するため、結果的には風力発電システムとしてのエネルギー高効率化が達成できる。従って、強風域においても、過回転を誘発することなく運転を可能とする風力発電の開発は、ある意味では新しい技術革新となる。このようなイノベーションの取り組みとして、我々は、先行研究によるダブルピッチ制御方式を開発しフィールド試験を実施してきた。(耐強風性を重視した高効率自律失速制御型小型風力発電システム：つなぐしくみ新技術説明会：2011年1月、シーズ特許：風車のブレードダブルピッチ

失速制御機構、特開2010-138768。2010-06-24)。これまでの研究結果においては、15m/s以上の強風域において、失速制御は十分実現可能であるが、その際、失速と回復を繰り返すハンチング現象を誘発することが判明した。

2. 研究の目的

強風域での過回転を防止するためには、従来のダブルピッチ失速制御方式(パッシブ制御方式)のみでは、『強風域でも過回転を励起することなく安全に運転できる風力発電システムの実現』は非常に困難ではないかとの懸念を持ち続けていた。そこで、我々は、強風域において過回転を防止するため、従来のダブルピッチ失速制御方式(パッシブ制御方式)と、可変動摩擦を考慮した回転軸制御方式(アクティブ制御方式)を併用するブレードの過回転防止制御系の設計を提案した。[1] 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 pp26-35, December 2011. この論文では、従来のダブルピッチ失速制御系の特長を生かしつつ、風力発電システム回転軸のトルクを抑制するために、軸の回転数を検出し回転軸動摩擦係数を適応的に変化させる新しい制御方式を提案している。この結果より、回転軸トルク制御系は過回転を抑制することが示唆された。しかし、式、すなわち、磁力(電磁石)による制動力で回転数を抑制するシステム開発を提案する。このシステムでは、磁力(電磁石)で軸の回転数を制動するため、制動アクチュエータと軸は非接触構造となって

おり、軸の機械的摩耗や劣化を防止することが可能となる。また、電磁力は電流で制御できるため、ハードウェアでの実現が可能である。

3. 研究の方法

本研究計画を遂行するに当たり開発目標を明確にする。

本研究における二つの研究課題は以下でまとめられる。

(1) 磁力（電磁石）による制動力で回転数を抑制するシステムの開発。すなわち、非接触軸摩擦トルクを生成するアクチュエータシステムの開発とトルクを制御するための回転軸制御系の開発。

(2) 風力発電機システムブレードの失速・回復運動において、ハブに取り付けられた三軸ブレードの同期的連成運動機構開発と、ピッチ角復元のための最適ダンピングシステムの開発。まず、電磁力を用いた非接触回転軸トルク制御系について述べる。この制御系は以下のように動作する。まず、ある定格以下の運転状態では、風車の回転数（角速度）に応じた発電機出力電力はバッテリーに貯蔵される。風力発電システムが過回転になると、回転数コントローラはその回転数を検出すると共に、発電機出力電流を分岐してアクチュエータへの入力電流とする。アクチュエータにおいては、入力電流の二乗に比例した磁束密度を形成し、その磁場の作用で回転軸角速度が減衰する。さらに、風速と回転数を検出して、ある風速以上の強風域ではアクチュエータ入力を保ったままとし、また、回転数が十分下がり、風速も弱まればアクチュエータ入力を解除する。この制御系は、解析的制御理論と論理制御を組み合わせるため、斬新な研究課題であると考えられる。

次に、遠心力を利用した受動的ピッチ角失速制御方式について説明する。中心軸には

復元機構としてバネダンパ系を取り付けた。この失速制御機構は以下のように動作する。風車が強風域において過回転になると、ブレードは遠心力の作用で、前傾姿勢(図4左)から受風面に並行に移動し失速角度となる。失速後はブレードの回転が弱まるため、遠心力が減少し、バネダンパの復元力でブレードは元の最適なピッチ角へ回復する。このように、強風域においては、遠心力による失速→それに伴うブレード回転数の減少→遠心力の消失→ピッチ角の回復→角速度の増速というサイクルを繰り返す。

4. 研究成果

我々が過回転防止のためのハイブリッド失速制御系の性能を検証するために検証するために、数値シミュレーションを行なった。このブロック線図を図1に示す。

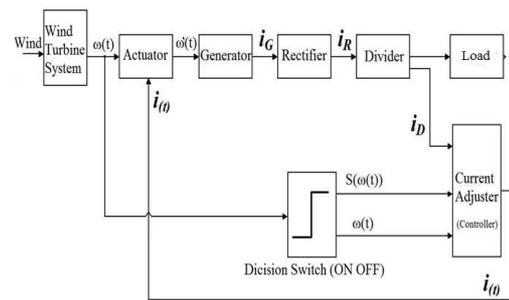


Fig.1 Block diagram of proposed control system.

このシステムダイナミクスを以下に示す。

$$(J_{\omega} + I_G) \frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{1}{2} C_T \rho A R v_{in}^2(t) \theta(\theta(t)) - d f_r \omega(t) - 0.375 R N_T(t) \dots \dots \dots (1)$$

$$J_b \frac{d^2 \theta(t)}{dt^2} = M R^2 \omega^2(t) \sin(\theta(t)) - 0.375 R L c \frac{d\theta(t)}{dt} - 0.375 R L k \theta(t) + 0.375 R N_T(t) \dots \dots \dots (2)$$

$$M_1 \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + c_1 \frac{dx(t)}{dt} + k_1 x(t) = N_T(t) + M R^2 \omega^2(t) \theta(t) \dots \dots \dots (3)$$

$$N_T(t) = \frac{3 g r \rho v_{in}^2(t)}{2} (C_L \cos(\alpha_{in}) + C_D \sin(\alpha_{in})) \dots (4)$$

$$v_{in} = \sqrt{(0.375 R \omega(t))^2 + V^2(t)}$$

$$\alpha(t) = \tan^{-1} \left(\frac{0.375 R \omega(t)}{V(t)} \right)$$

$$\alpha_{in} = \alpha(t) - \theta(t)$$

$$\tilde{\theta} = \theta_{max} - \theta(t)$$

$$\Theta(\theta(t)) = \frac{\tilde{\theta}}{\theta_{max}}$$

$$z = \frac{\alpha(t)-10}{14}$$

$$C_D \approx 0.064z^8 - 0.049z^7 - 0.25z^6 + 0.18z^5 + 0.24z^4 - 0.17z^3 + 0.2z^2 + 0.24z$$

$$C_L \approx -0.25z^6 + 0.16z^5 + z^4 - 0.48z^3 - 1.5z^2 + 0.74z + 1.6$$

$$\lambda = \frac{R\omega(t)}{V(t)}$$

$$C_T \approx -0.00042\lambda^4 + 0.075\lambda^3 - 0.055\lambda^2 + 0.16\lambda - 0.00024$$

また、シミュレーションに用いた風速は実際の風速を用いた。ここで平均風速は 25m/s である。

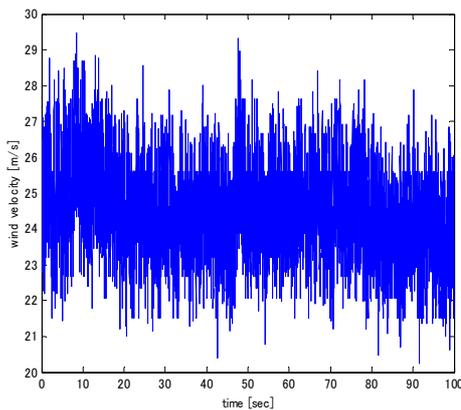


Fig.2 Actual wind velocity

この風速を用いたときは、羽根の回転数が徐々に増加し発散した。個々では、上記の実測の風速を用いて、平均風速を 10m/s, 15m/s, 20 m²/s, 25m/s に変化させたときの数値シミュレーションを行った。その結果を図 3 に示す。

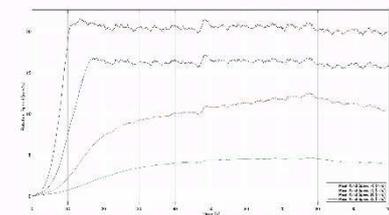


Fig. 3 Rotation speed of wind turbine vs variable mean wind speed.

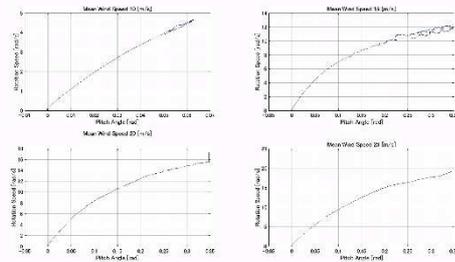


Fig. 4 Phase plane graph of Pitch angle and Rotation speed

また、図 5 はピッチ角とブレード変位に対する位相平面図である。

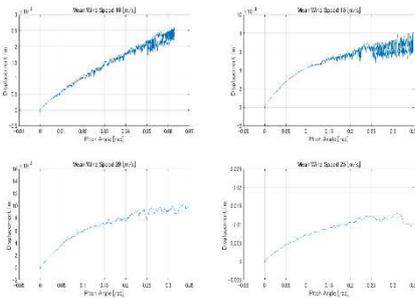


Fig. 5 Phase plane graph of Pitch angle and Displacement of wind.

平均風速 10 m/s では約 4 rad/s と回転数の大きな上昇は見られなかったが、25 m/s では目標の 20 rad/s が得られた。前述の通り、ピッチ角の可動域を拡張したため、ここまでの回転数上昇が見られたと考えられる。

両位相平面図について、収束範囲が縮小し、より強い安定性が得られた。また、双方ともにピッチ角が先に上限に達しており、回転数、変位が振動が抑制されている。以上のことから、より安定で望ましい回転数を持つ失速制御機構が開発できたと考えられる。

結論として、強風域でも稼働可能な小型風力発電システムにおける自律型失速制御機構の開発を行ってきた。先行研究にて問題の挙がったブレードの破壊や新たな問題として生じた回転数不足をダイナミクスの改良、パラメータ調整を行い求める結果が得られた。

この機構を実際稼働させるためには、ダンパの非線型の実現や風車中心部を再設計という問題に直面する。この問題を解決すると、小型風力発電システムの普及に大きく繋がると考えられる。

今後の課題。

年度までの研究では、非接触型過回転抑制制動

装置は完成に至らなかった。その大きな理由として、市販の制動装置に使用不可能であったこと、また、我々が設計し、数値シミュレーションに基づいた設計仕様書で外注すると膨大な開発費がかかるとの事実が存在したからである。しかし、我々は、新たな外部資金を得て本研究課題を遂行する予定である。最後に、我々が目指す過回転抑制型自律的出力安定機構を有する風力発電システムの概略図を図6に示す。

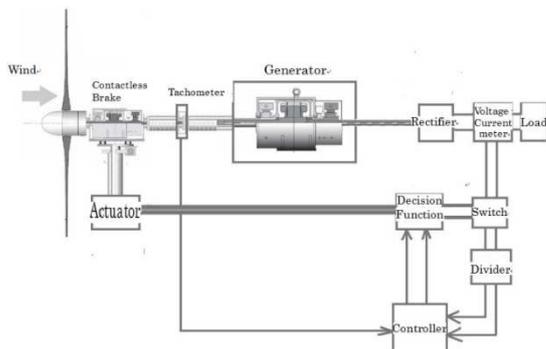


Fig.6. Illustration of stall-control system.

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 7 件)

- (1) 姉崎隆、タンスリヤボンスリヨン、山田親稔、金城篤史、城間康、桑江健、玉城史朗、安里健太郎、” 沖縄型ロボット組込み/サステナブルシステムに向けて、電気学会論文誌 (D) (解説論文)、第136巻10号, pp. 666-671, 2016.
- (2) 安里健太郎、照屋孔明、長堂勤、玉城史朗、” 科学技術教育のための磁気浮上システムの開発“, 電気学会論文誌 (D), 136 巻 10 号, pp. 744-752, 2016.
- (3) 姉崎隆、タンスリヤボンスリヨン、山田親稔、平田哲兵、玉城史朗、加藤浩、” 沖縄型ロボット組込み/サステナブルシステムに向けて、電気学会論文誌 (D) (解説論文)、第 135 巻 2 号, pp. 74-80, 2015.
- (4) Faramarz Asharif, Shiro Tamaki , Heung Gyoon Ryu, Katsumi Yamashita, Tsutomu Nagado, Tomokazu Nagata, Mohammad Reza Alsharif and Mahdi Khosravy ” Design and Implementation of Feedback and Feedforward

Controller in Wireless Tele-Control System Considering Equalization ” International Journal on Innovative Computing, Information and Control, Volume 8, Number 4, pp 1213- 1220, April 2014.

- (5) Faramarz Asharif, Shiro Tamaki, Hirata Teppei, Tsutomu Nagado and Tomokazu Nagata, "Feasibility Confirmation of Angular Velocity Stall Control for Small-Scaled Wind Turbine System by Phase Plane Method, " IIEEK Transactions on Smart Processing and Computing, Vol. 2, No.4 pp 240-247, August 2013.
- (6) 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, 2013.
- (7) Faramarz Asharif, Shiro Tamaki, Hirata Teppei, Tsutomu Nagado and Tomokazu Nagata, "Feasibility Confirmation of Angular Velocity Stall Control for Small-Scaled Wind Turbine System by Phase Plane Method, " IIEEK Transactions on Smart Processing and Computing, Vol. 2, No.4 pp 240-247, August 2013.

[学会発表] (計 6 件)

- (1) Faramarz Alsharif, Shiro Tamaki, Katsumi Yamashita, Mohammad Reza Alsharif, Bruno Senzio-Savino Barzellato, Mahdi Khosravy and Heung Gyoon Ryu, " Disturbance Response and Stability analysis of Wireless Tele-Control System for MIMO Plant " The 31st International Conference on Circuit/Systems, Computers and Communication 2016, pp. 999-1002, Okinawa Japan, July 2016.
- (2) Faramarz. Asharif, Masahiro Futami, Shiro Tamaki, Tsutomu. Nagado, Kentaro asato, "Stability and Performances Analysis of Electromagnetic Stall Control System by Phase Plane Method", 47th ISCIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications, pp.345-350, Hawaii USA December 4-8 2015.

(3) Faramarz. Asharif, Masahiro Futami , Shiro Tamaki, Tustomu. Nagado, Kentaro asato, “Stability and Performacne Analysis of Passive and active Stall Control of Small-Scaled Wind Turbine System by Phase Plane Method ” in the Proceedings of IEEE, International Conference on Intelligent Information and BioMedical Sciences (ICIIBMS 2015), pp.27-33, OIST, Okinawa, Japan, Nov. 28-30, 2015.

(4) Faramarz Alsharif, Shiro Tamaki, Katsumi Yamashita, Tsutomu Nagado, Tomokazu Nagata, Mohammad Reza Alsharif, Bruno Senzio-Savino and Heung Gyoon Ryu, “Stability and Performance Evaluation of Wireless Tele-Control System for MIMO Plant ”, WorldComp ICWN2015, pp.78 -84, Las Vegas USA, July 27-30, 2015.

(5) Shiro Tamaki, Faramarz Asharif, Masahiro Futami, Shoichi Matsuda, Kazumasa Ameku, Masami Suzuki, Fumiaki Takemura, " Design of Passive and Active Pitch-Control for Small-Scaled Wind-Turbine ", GRE2014, Tokyou, Japan, July 27th - August 1st, 2014.

(6) Faramarz Alsharif, Shiro Tamaki, Katsumi Yamashita, Tsutomu Nagado, Mohammad Reza Alsharif and Heung Gyoon Ryu, “ Joint of Feedback and Feedforward Controller on Application to Wireless Tele-Control System Considering Uncertainty”, WorldComp ICWN2014, pp. -, Las Vegas USA, July 21-24, 2014.

国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等 なし

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 鈴木正己
(SUZUKI, Masami)
琉球大学・工学部・教授
究者番号：30171250
- (3) 研究分担者 天久和正
(AMEKU, Kazumasa)
琉球大学・工学部・准教授
研究者番号：40284955
- (4) 研究分担者 長田康敬
(NAGATA, Yasunori)
研究者番号：50208021
琉球大学・工学部・教授
- (3) 連携研究者 なし
()
研究者番号：
- (4) 研究協力者 なし
()

〔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 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：