

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年6月10日現在

機関番号：32410

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23656268

研究課題名（和文） 非接触トルクセンサを使用した風力発電の安定化制御

研究課題名（英文） **Non-Contact Torque Sensor applied to Stabilization control of Wind Generator**

研究代表者 巨 東英 (JU DONGYING)

埼玉工業大学・工学部・教授

研究者番号：10255143

研究成果の概要（和文）：

本研究はランダムに変動する風力エネルギーを安定してとりだすために小型風車にも取り付けることができるように小型の風車に適した非接触トルクセンサを開発し、風車トルクに発電機トルクが追従するように発電機のベクトル制御や励磁電流、あるいは負荷電流などをトルクに応じて制御することによって風車の回転を安定させ、小型発電機の電圧や周波数などの発電機出力を安定させるための研究開発を行った。

研究成果の概要（英文）：

In order to solve the variable speed control as non-linear in wind energy application, it is important to obtain wind energy efficiently. And it is also effective in suppressing output fluctuation. Therefore, it will become a main torque system in the wind generation. The main object of this paper is to present a developed non-contact torque sensor for applying of non-linear control in the wind generator. In this paper, it examines whether efficient torque measurement of output shaft in the wind generation would be maintainable by non-linear control methods.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・知覚情報処理

キーワード：トルクセンサ、非接触センサ、風力発電、安定化制御

1. 研究開始当初の背景

本研究開発に用いるトルクセンサは強磁性体軸にトルクが加わったときの軸の透磁率の変化から非接触にトルクを求める磁歪式トルクセンサである。磁歪式にはスウェーデンのO. Dahle 氏のU字の磁気コアをクロスさせたヘッドを被測定軸の表面近傍に非接触に配置して軸のトルクを測るトルダクター(1954)など

が知られているが、多くの回転体の鋼軸は軸材の製造過程において磁区の組成や残留応力のためトルクによる透磁率にばらつきが多く、ヒステリシスが生じる問題もあって磁歪式で実用化されているものは、ヒステリシスの少ない高透磁率磁歪材を軸に埋め込むなどの加工を施した軸と、その外側に非接触におかれるコイル等によって軸磁歪材の透磁率変化よ

りトルクを求めるトルク変換器が実用化されているだけである。しかしこのようなトルク変換器ではカプリングによって被測定軸と結合してそのトルクが測られるので被測定系の慣性モーメント等に影響を与えることがないという意味では完全に非接触とはいえない。鋼軸一般のトルクを非接触に測るものもいくつか研究されているが、まだ実用化には至っていない。埼玉工業大学の巨・田畑らも磁気ヘッドに独自に開発した薄型磁束検出素子を使ってインパクトレンチなどのハンディーツールに組み込めるほど小型の非接触トルクセンサを開発した。なおこの非接触トルクセンサ(原理試作)は平成20-21年度に、(独)科学技術振興機構のシーズ発掘顕在化事業『非接触・高速(応答)トルクセンサの研究開発』によって試作開発したものである。

2. 研究の目的

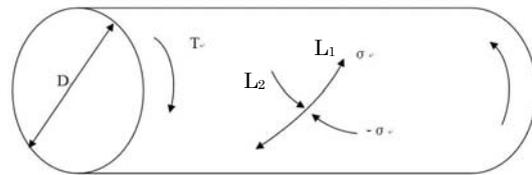
風力は無限の自然エネルギーであるが、自然エネルギーは変動がおおきく、小型風力発電機からえられる電力も安定していない。本研究はランダムに変動する風力エネルギーを安定してとりだすために埼玉工業大学(巨・田畑)が開発した非接触トルクセンサを使って、風車トルクに発電機トルクが追従するように発電機のベクトル制御や励磁電流などをトルク制御することによって、風車の回転を安定させ、小型発電機の電圧や周波数などの発電機出力を安定してとりだす研究開発であって、風力エネルギーの導入、普及に資するものである。

3. 研究の方法

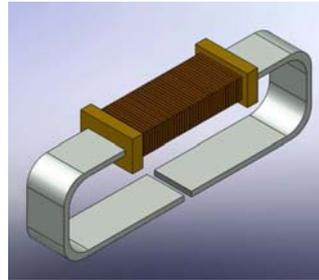
(1) センサヘッドの設計製作

非接触トルクセンサの検出の原理は強磁性体軸に捩じりトルク T を加えると表面の45度方向には張力 $+\sigma$ と-45度方向に圧縮力 $-\sigma$ がはたらく現象(【図1】)を利用する。そして、磁歪の逆効果によって透磁率は応力

に比例するので、プラスマイナス45度方向の透磁率の差はトルクに比例する。



【図1 車出力軸と薄型磁束検出素子】



【図2 磁気ヘッド】

軸表面の透磁率を非接触磁気ヘッド(【図2】)によって測定すると磁気ヘッドの方向の応力に比例する。本研究の検証により、この比例関係が確認された。また、トルクを測定する際、測定軸の透磁率にくらべヘッドの透磁率が大きく、ギャップが狭く一定のときはヘッドのインダクタンスは被測定軸表面の透磁率に比例し、 $L = k \mu(\sigma)$ と表される。 $+\sigma$ 方向に配置されたヘッドコイル L_1 と $-\sigma$ 方向のヘッドコイルのインダクタンス L_2 の差は軸に加えられたトルクに比例する。発振器とブリッジ接続された L_1 、 L_2 の中間電圧と r_1 、 r_2 の中間電圧の差を同期検波された出力はトルクに比例し、 $V = kT$ である。この開発より、この現象が明らかに検証された。これによって風力発電機用トルクセンサの設計製作を行う。試験装置の被測定軸の径に合わせたセンサヘッド機構と取り付け治具を設計・製作し軸材料にあわせたトルクセンサ出力の感度調整などを行う。設計製作項目①センサヘッド機構部の設計・製作②非接触トルクセンサと取り付け治具の設計・製作；③センサ回路と電源アンプ(プリント基板を含む)の設計・製作、ただし、基本回路は従来そのまま

し、基板形状を小型風力発電機に組み込める程度に小型化したプリント基板の設計も行う。

(2) 風力安定化試験

① 風車試験装置の製作

入力風力をエミュレートするモータと増速用ギアボックスを介してトルクセンサを結合し、出力軸には発電機として自動車用オルタネータを置き、オルタネータの励磁電流を外部より制御できるようにしてすし、トルクをパラメータとする関数によって励磁電流を発生できる。風のランダムな入力変動をモータを使って擬似的に発生させたり、トルクセンサや発電機回転数、負荷電圧・電流を計測でき、励磁電流を任意関数によって制御できる風力試験装置を設計製作する。これにより風車制御のための諸特性を明らかにし、申請者らが提案した非接触トルクセンサを用いた発電トルクに追従する制御プログラムを製作する。

② 風力安定化試験

制御試験装置を使って風車を模擬して電動モータを動かし、トルクセンサの出力に発電機トルクが追従するようにオルタネータ（交流発電機）の励磁電流を制御することによって風車トルクに発電機トルクが追従するように制御し、そのときの回転数とトルク及び出力電力等諸関係を調べて、入力（風力）に変動があっても発電機が安定して出力を取り出せるような風力発電機のトルク制御方式に関する試験研究を行う。

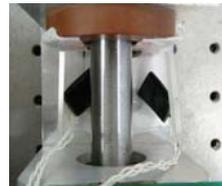
(3) 実際の風力データのモニタリング

1年間の風況状況を調査し実際の風力変動を風力安定化試験に反映させる。はじめは単に風況を測定するだけの計画であったが、実際に風車にトルクセンサを組み込み小型風車の発電の安定化制御をも試みた。

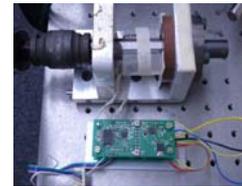
4. 研究成果

(1) 小型トルクセンサの設計・製作

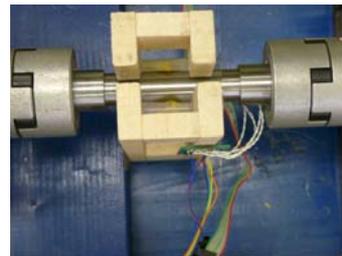
従来の中小型機の風力発電にはプロペラなどの設計のためにトルク計が使われているだけであり、トルク計が発電制御に使われることはなかった。本試験装置の構成図にも見えるように、トルク計は形状が非常に大きく、また風車シャフトとトルク計のシャフトとをカップラ等で結合する必要があるため、中・小型機に取り付けることは不可能であった。しかしながら、トルクセンサの出力に応じて発電機の発電量を制御することができ、風力エネルギーを効率的に発電でき、変動の多い風力発電の変動を安定化させることが可能であるので、風車制御のためには小型風車にも組み込み可能なトルクセンサとして非接触トルクセンサの小型化を行なった。当該非接触トルクセンサはプロペラ径 1.5m、発電量 600W の小型風力発電機に組み込むことができた。



A) ヘッド



B) 試作センサ



C) 試験装置への取り付け

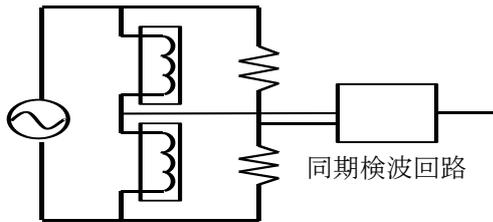


D) 小型風車への取り付け

【図3 非接触トルクセンサ】

発電機の出力軸径 20mm に対して、ヘッド部分は内径が 22mm, 外径が 30mm, 幅が 33mm ときわめて小型な非接触トルクセンサを開発した。研究方法に示した検出原理に基づくトルク計測定回路を組み込んだ非接触トルクセンサを設計・製作した。トルク検出回路を下に示す。

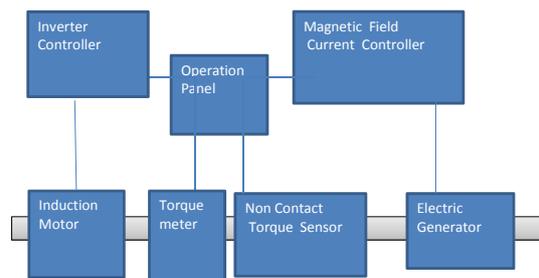
【図 3】 B は測定したトルクを無線でも伝送できるようにした。



【図 4 トルク検出回路】

(2) 風力安定化試験

① 風車試験装置の製作



A) 試験装置の構成図



B) 試験装置

【図 5 試験装置】

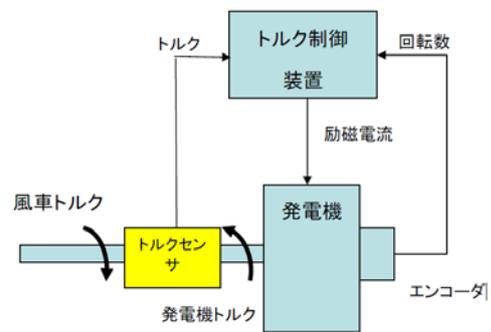
図 5 の A) はシステムの構成図である。装置は実際の風車に変わってモータで駆動して制御システムの諸特性が測定される。

風力発電の安定化制御を行うために必要な風

車トルクと発電量や負荷電流との関係などの風車の特性や制御方法について試験する風車試験装置を製作した。装置の構成図と写真を以下に示す。図 5 の B) の左から示されている部品は、1: インバータモータ; 2: 位相差式トルク計; 3: 非接触トルクセンサ; 4: 発電機; 5: スライダック; 6: 抵抗ボックスである。また、卓上には左から 7 番の励磁電流制御装置と 8 番の表示パネル及び 9 番のインバータを配置した。

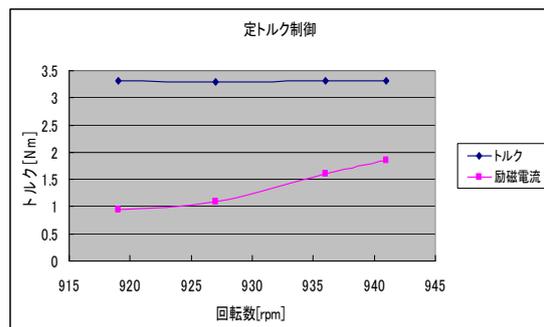
② 風車安定化試験

安定化制御のブロック図を示す。



【図 6 安定化制御ブロック図】

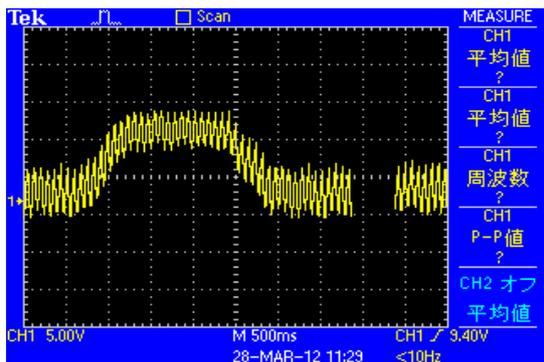
風車トルク (試験装置ではモータでエミュレートしている) や負荷の変動によってトルクは変動する。



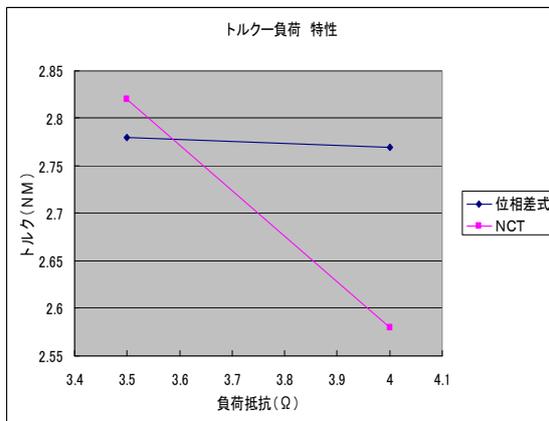
【図 7 定トルク制御】

回転数が変わっても励磁電流を変え、トルクを励磁電流にフィードバックさせ、トルクセンサの出力が一定となるように制御させたと

きの様子を示す。下の図はスライダックを手動で動かして負荷を変動させ、位相差式トルク計と当該センサの出力を比較したものである。位相差式トルク計には低周波フィルタの影響があり1秒以下の変動に対してはあまり変化がみられなかった。発電機の負荷のスライダックのつまみを手で動かして負荷を変動させたときのトルク出力比較を調べたものである。



A) 当該非接触トルクセンサ



B) トルク計の感度比較

【図8 負荷変動に対するトルク変化】

それに対し非接触トルクセンサはほとんどリアルタイムに追従していることがわかる。実際の風力発電におけるトルク制御には応答の速い非接触式トルクセンサが適していることが示される。

(3) 実際の風力データのモニタリング

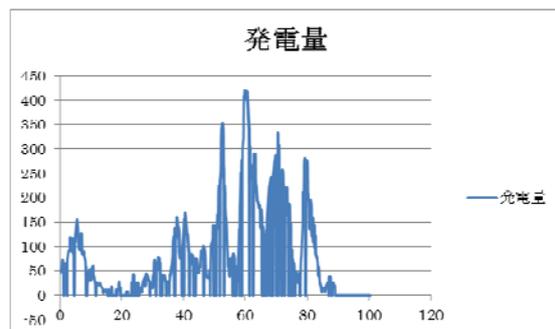


【図9 設置した小型風車と風速計】



【図10 風力発電モニターパネル】

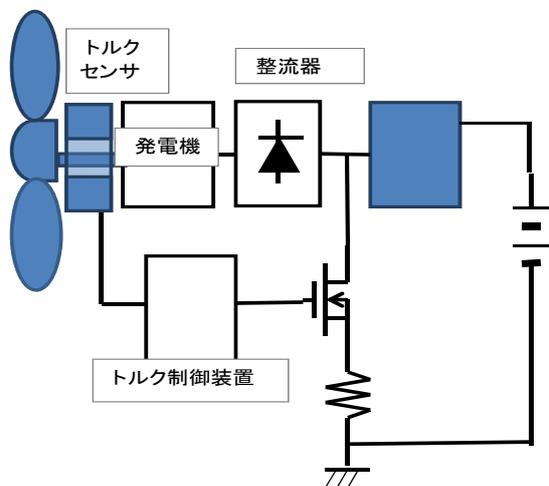
観測した風速や発電機の発電量などを記録・表示している。



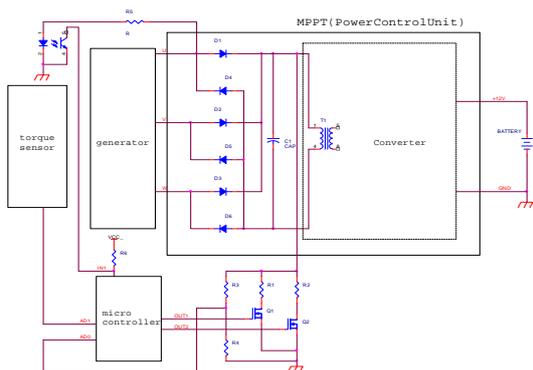
【図11 実際の小型風車による発電の例】

市販されている小型風車の発電機はオルタネータ式ではなく、永久磁石式のものでほとんどであるので、そのような発電機ではトルクによる制御手段としては負荷を増減させることしかできない。しかしながらこの場合も

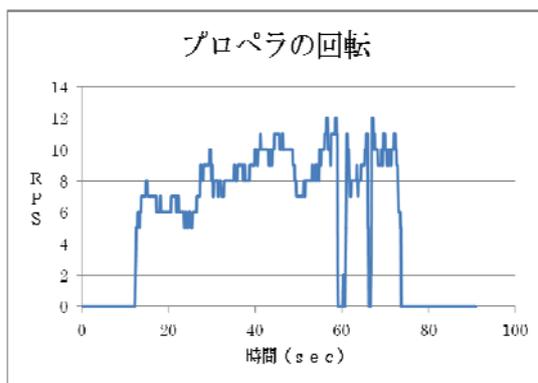
トルクに応じて発電機の負荷を調整することにより、風力の変動に対し回転の変動を抑えて風力エネルギーをより効率的に使うことができる。



【図 12 小型風車のトルク制御方式】



【図 13 制御回路】



【図 14 トルク制御時のプロペラの回転数】

さらに、トルクに応じ、5NM 以上では負荷抵抗を 2Ω 、それ以下では 50Ω になるように FET をオンオフさせて負荷を切り替えた。トルクが落ちると 50Ω と切りかえて失速を防ぎ、風が強くトルクが大きいときには負荷抵抗を 5.2Ω と小さくして使用電力を増やすような制御をおこなった。この間プロペラの回転数は 8 R P S 程度で安定している。このようにトルク制御を行うことによって制御しない場合の 15% 程度の電力増加となることがわかった。風車用に小型の非接触トルクセンサを開発し、それを用いた風力発電の安定制御を行うことができた。

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 1 件)

D.Y. Ju and K. Tabata, Development of Non Contact Torque Sensor applied to Wind Generator, Advanced Materials Research, Vol. 651, pp. 976-980 (2013)

DOI

10.4028/www.scientific.net/AMR.651.976

6. 研究組織

(1) 研究代表者

巨 東英 (JU DONGYING)

埼玉工業大学・工学部・教授

研究者番号：10255143