九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

風洞実験用自作風車制御ソフトウェアの紹介

髙田, 青
九州大学応用力学研究所

https://doi.org/10.15017/7183614

出版情報：九州大学応用力学研究所技術室 技術室報告. 6, pp.33-37, 2024-07. Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University
バージョン：
権利関係：

九州大学応用力学研究所 技術室
技術室報告 Vol. 6, 33-37

風洞実験用自作風車制御ソフトウェアの紹介

高田　青

要　旨

洋上風力エネルギー高度利用分野では、大型境界層風洞で風車模型を用いた様々な実験を実施している。ここ数年、より実機風車に近いロータの回転状況を再現するために、状況に応じた自動制御ができるソフトウェアを自作しているため、新機能のトルク制御モードを含めて紹介する。

キーワード

風車模型　風洞実験　制御ソフトウェア　自動制御　トルク制御　AC サーボモータ　C#

1．はじめに

再生可能流体エネルギー研究センター洋上風力エネルギー高度利用分野では、大型境界層風洞（以降、風洞とする）において、風車模型を用いた風洞実験で発電量や風荷重、風車周りの風速分布の計測などを行っている。風洞実験を行うにあたり、実機風車の現象を再現することが理想ではあるが、風洞の大きさや風車模型における設計上の都合などの制約があり、完全再現は難しいのが現状である。

当該分野で使用している従来の風車模型は、発電機の代わりに AC サーボモータを用いて回転数を固定して運転していた。しかしここ数年、浮体式洋上風車のような風車自体が揺れて風車ロータへの流入風速が相対的に変動する実験が増えてきた。風車は流入風速により最適な回転数が変わるため、風速の変動がある実験条件で回転数を固定するのは望ましくない。実機風車ではトルク制御方式を採用しているものが多く、風速の変動により風車の回転数が変わると、その回転数に応じたトルク（ブレーキトルク）をかけるようになっている。

当該分野では 2 年ほど前から、流入風速に応じて風車模型の回転数を自動で変更するシステムを開発している[1]。昨年は試験的にではあるが、トルク制御モードを開発したため、自作しているソフトウェアに焦点を当てて、紹介する。

2．AC サーボモータとは

AC サーボモータとは、交流電源を使用するモータで、内蔵されたロータリエンコーダの値でフィードバック制御をかけることにより、非常に高精度な制御を実現している。主に生産工場などで、生産ラインを自動化するために使用されるものであり、Factory Automation（工場の自動化）から、FA 機器と呼ばれている製品である。今回は使用経験があり、通信規格を把握している三菱製を選択した。図 1 に使用した AC サーボモータとサーボアンプ（コントローラ）を示す。以降は、三菱製サーボアンプ MR-J5-A（汎用インタフェースモデル）について説明するものとする。モータは、サイズとトルク容量が違う 2 種類を風車模型に応じて使い分けている。また、当該サーボアンプは回転数やトルクに応じて電圧を出力するアナログモニタ機能があるため、後述の回転数を参照する制御に使用している。

図 1　AC サーボモータとサーボアンプ

3．サーボアンプの制御

サーボアンプは様々な状況に対応するためにいくつかの制御モードが用意されている。以下に主な制御モードを 3 つ挙げる。

- 位置制御モード
- 速度制御モード
- トルク制御モード

位置制御モードは、モータ軸の回転角度を指定することができるもので、アクチュエータにおける移動量の制御に適している。速度制御モードは、定速で連続回転するモードである。トルク制御モードは、モータの軸にかけるトルクを指定するモードである。従来の風車模型に使用しているのは、回転数を固定させることができる速度制御モードである。

3-1．回転数制御

速度制御モードにおいて、回転数の指令値を指定する方法は主に 2 通りある。任意の電圧を印加して、電圧に応じた回転数（係数は予め設定する）を指定する方法と、内部メモリに記憶させた回転数を指定する方法である。風洞実験では、モータの回転数を、定格回転速度の 3,000rpm 付近で運転する実験条件があり、1rpm 単位で指定する必要がある。これに対応する電圧の指令値を生成するためには、高精度な DA コンバータとノイズに強い回路が必要になるが、上手く自作する自信が無かったため、電圧で指令値を指定する方法は見送ることにした。対して、速度制御モードにおいて内部メモリを参照する方法は、サーボアンプが有する外部機器と通信する機能を用いて比較的容易（苦労はしたが）にメモリ内の指令値を書き換えることができるため、こちらを採用することにした。通信は RS422 規格によるデジタル信号であるため、ノイズ耐性が高いことも理由のひとつである。

3-2．トルク制御（トルク制限）

一方、トルク制御モードは、印加電圧に応じたトルクの指定のみに対応しており、内部メモリを参照して指令値にする方法が採れなかった。そこで目を付けたのが、速度制御モードにおけるトルク制限の機能である。一般的に、サーボモータの速度制御モードは、外力による負荷が急激に増大した場合でも、モータの能力が許す限り回転数を維持しようとして軸にかけるトルクを上げる仕様である。トルク制限の機能は、モータの軸にかけるトルクの上限を定めることで、何らかの事故などで想定以上の負荷がかかった場合にモータが無理に回転しないようにするためにある。これは、例えば人間が巻き込み事故にあった場合に、自動でモータが止まるような保険として使うことができる。

ここで、一般的な風車の回転数とトルクの関係を図 2 に示す。風車への流入風速が一定の場合、モータ（発電機）の軸にかけるトルクを下げると回転数が上がる関係になる。トルク制御（トルク制限）でトルクを指定するということは、風が風車を回そうとする力と指定したモータトルク（ブレーキ）の値が釣り合った結果の回転数になるということである。風車におけるトルク制御とは、風速が上がって回転数も上がろうとした際に、軸にかけるトルク（ブレーキの度合い）を上げることで、回転数を抑える（維持する）制御である。

実機風車のトルク制御を、速度制御モードのトルク制限で再現するために、以下の手順を用いることにした。なお、トルク制限の指令値はモータの定格トルクに対する割合[%]で与える仕様である。

① 各風速における、最高効率（発電量）の回転数を定義して、回転数に対するトルクの係数を決定する（ax+b の一次式）
② 実験開始時はトルク制限が無い状態（100%などを指定）で、想定するより低い回転数を指定して回転させる
③ 現在の回転数を読み込んで、①の係数を適用したトルク制限をかける（指定した回転数を維持するブレーキトルクに満たないため、回転数の指令値より高速で回転する）
④ 風が軸を回そうとする力と指定したトルクが釣り合ったところで回転数が安定する
⑤ ③－④を自動で繰り返すことにより、風速が変動することによって回転数が変動しても、回転数に応じたトルク制限がかけられる

現在の回転数を読み込む方法については、次章にて説明する。その他に、モータ回転数の上限を

別途設定して、上限を上回ったときにトルク制限を強制的に 1,000%にする機能を実装した。これにより、想定外のことが起こり（風洞の設定風速を間違えた場合など）、モータの回転数が想定以上に上がることを防止できるはずである。

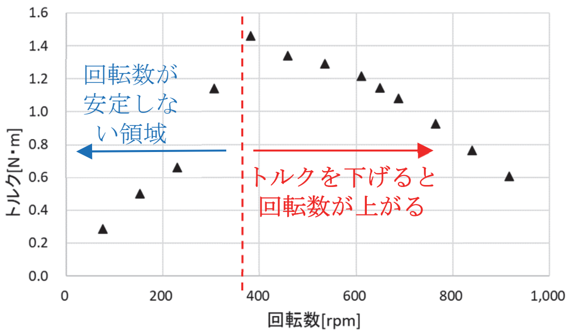


図 2　風車における回転数とトルクの関係例

4．自作風車制御ソフトウェア

先述のトルク制御（トルク制限）モードを追加した自作ソフトウェアを図 3 に示す。本ソフトウェアは、Windows 上で動作するアプリケーションで、C#を用いて作成した。今後の目標である風車模型を多数使用した実験を見越して、サーボモータ 6 台の一括制御を可能としている。図 3 に示した UI は試作中のもので、より操作しやすいように改良する予定のため、詳細な説明は省略する。

本ソフトウェアは別途用意した自作 AD 変換ボックスから電圧データを受信する機能を有しており、電圧データ（風速や回転数）に応じて回転数やトルク制限の指令値をサーボアンプに送信することができる。以下に、本ソフトウェアの主な機能を紹介する。

図 3　自作制御ソフトウェア

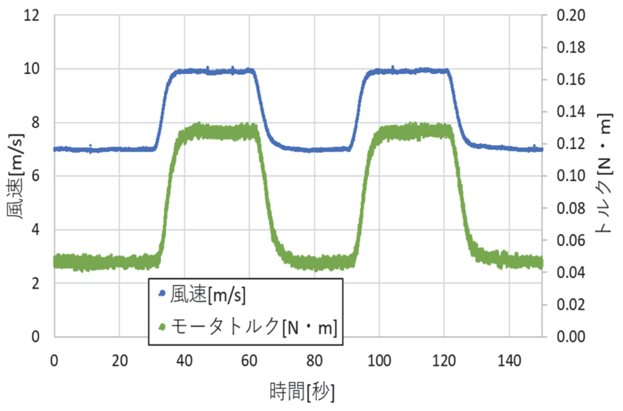
- 指定したサーボアンプに任意の回転数指令値を送信する
- 指定したサーボアンプに任意のトルク制限指令値を送信する
- 別途用意した AD 変換ボックスから電圧を読み込む
- 読み込んだ電圧に係数を適用した回転数指令値を指定したサーボアンプに送信する
- 読み込んだ電圧に係数を適用したトルク制限指令値を指定したサーボアンプに送信する
- 指定したサーボアンプから、現在の回転数とトルクを読み込む
- サーボアンプから読み込んだ回転数に係数を適用したトルク制限指令値を送信する

使用しているサーボアンプには250を超えるパラメータがあるため、パラメータを指定して書き換える必要がある。パラメータは 7 つのグループに分類されており、意図したパラメータを書き換えるには、まずグループを指定した後にパラメータを指定しなければならない。回転数とトルク制限のパラメータはそれぞれ別グループに属しているため、サーボアンプを起動した後と制御モードを切り替えるときには、グループを指定し直す必要がある。

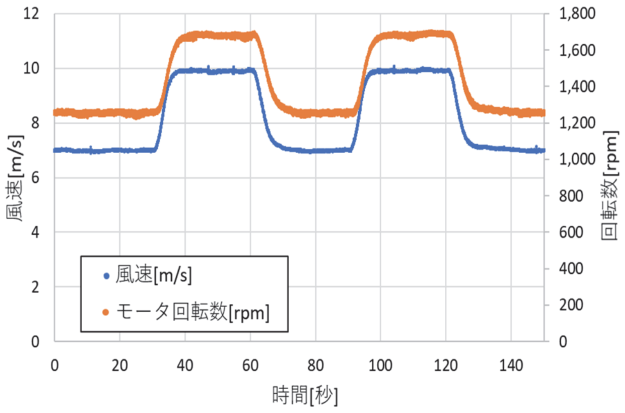
実験中は風車ブレードが高速回転をするため非常に危険である。何か異常があったときは、すぐさま回転を停止させる必要があるため、サーボアンプを収納している制御盤のデザインを含めて、安全対策を講じる必要がある。また、ソフトウェアを作成するにあたり、誤操作の対策も必須である。例えば、数値以外の文字を入力した場合や想定以上の回転数指令値を入力した場合はエラー判定をして指令値を送信しない処理を導入している。

5．トルク制御（トルク制限）モードの動作確認

トルク制御（トルク制限）モードの動作確認として、風速 7m/s と 10 m/s の風を交互に風車模型に与えた。風速を変動させた場合の回転数とトルクの推移を図 4 に示す。回転数のデータは、サーボアンプのアナログモニタ機能の電圧を使用した。風速の変動により、回転数とトルクが変わっていることが分かる。



(a)　風速に対するトルク



(b)　風速に対する回転数

図 4　風速に対するトルクと回転数の推移

6．おわりに

本ソフトウェアにより、風車模型におけるトルク制御ができるようになった。ただし、システム上ではトルクを指定できているが、実際に数値どおりのトルク制限がかけられているかは未検証であるため、今後検証を進める必要がある。また、現在は 0.1 秒毎に指令値を送るように設定しているが、実験条件によっては動作周期が不十分なため、動作周期を上げる検討をしなくてはならない。本ソフトウェアは未だ試作の段階であり、今後も改良を続けていく予定である。

参考文献

[1] 髙田青：風洞実験用風車自動制御システムの作製，九州大学応用力学研究所技術室 技術室報告, 5, 39-43, 2023.

謝辞

本システムを作製する機会を与えて頂いた内田孝紀教授をはじめ、日頃よりサポート頂いている研究室スタッフに厚く御礼申し上げます。また、トルク制限の機能を使うアイデアを頂いた技術室の濵﨑真洋氏に感謝の意を表します。