

風力発電機の出力変動抑制に関する研究

小 玉 成 人

要 旨

風力エネルギーは再生可能で環境を汚染しないという観点から米国や欧州諸国をはじめ、我が国においても実用化が推進されている。また、NEDO のプロジェクトの一つとして 500 kW の大型風力発電機が開発され、竜飛ウィンドパークにおいて諸特性の試験が行われ、それらのデータをもとに様々な研究がなされている。一方、風力発電機の入力是不規則に変動する自然風であるため、風車出力が変動してしまう。この結果、大容量の系統に接続した場合にはそれほど問題にならないが、離島などの小容量の系統に接続した場合には、電圧変動や周波数変動などを引き起こしてしまう。特に、日本では欧米諸国と異なり、複雑でかつ起伏の大きい地形に風車が設置されることが多いため風の変動が大きくなり、その結果出力変動も大きく、電力系統への連系上重要な問題のひとつとなっている。そのため、このような出力変動を抑制する制御法の開発が必要である。これまで出力変動抑制のための制御法は古典的な制御にもとづくものが多かった。しかし、前述したように日本では出力の変動が大きく、フィードバック制御だけでは抑制することが困難である。そこで、本研究では出力変動を抑制するための新たな制御法を提案する。

つぎに、本研究の手法について述べる。まず始めに、制御系を開発するためには静的な特性だけでなく動特性を把握することが重要である。そこで、本研究では NEDO 500 kW 機より得られたデータをもとにモデリングを行った。これまでのモデリングでは、各要素の物理的な入出力特性を解析的手法により求め、全体のモデル構築を行ってきた。しかしながら、風力発電機の大型化、複雑化により解析的手法によるモデル構築は困難になってきた。このため、本研究ではシステム同定手法を適用することを提案する。まず風力発電機をいくつかの構成ブロックに分け、実運転状態で NEDO 機のデータを計測し、風力発電機の各ブロックの入出力データを求めた。つぎに、これらのデータをもとに各ブロックの伝達関数を同定した。またすべてのブロックの入出力伝達関数を求めることは困難であるため、一部ブロックに対しては解析的手法を適用した。つぎに、構築したモデルを用い新しい制御系の設計を行った。まず、風車システムを、不規則に変動する風速を入力とする確率制御系と考える。さらに、フィードバックとフィードフォワードを併用する確率制御系として風車システムを定式化し、評価関数を最小化する最適制御系を構成する。また、フィードフォワード制御を行うためには入力となる風速の検出が必要となるため、風力発電機そのものを風速計とした風速オブザーバを構築し、この制御系に組み込んだ。つぎに、構築した制御系をもとに、実測データを入力してシミュレーションを行ったところ、出力変動を大幅に抑制できることが確認できた。近時、離島などの弱小系統との連系における風力発電機の出力変動が問題となっているが、本研究の成果が問題解決に対する一つの提案となるものと思われる。

学位と学位記番号：博士（工学）、博第 8 号

授与年月日：平成 13 年 3 月 19 日

授与時の所属：八戸工業大学大学院工学研究科電気電子工学専攻博士後期課程

つぎに、本論文の概要を述べる。

第1章は序文であり、本研究の背景、目的およびその概説について述べた。

第2章では、風力発電機に用いられる構成要素と、風力発電機の制御方を検討する上で必要なモデリングの方法について述べた。始めに風車の種類およびその特徴について述べ、水平軸、アップウィンド型で3枚羽根のプロペラ型風車が現在の主流であることを述べた。つぎに、風力発電に用いられている主な発電機について簡単に述べ、現在は軽量・低コストなかご型誘導発電機が最も多く使われていることを説明した。また、代表的な発電方式として定速運転方式、2発電方式、可変速運転方式について概要を述べた。2.5節では、風力発電システムがロータ部、伝達系、電気系、運転・制御系および支持・構造系からなることを述べ、それぞれの構成要素について説明した。つぎに、本研究において対象とした NEDO 500kW 機の概要について述べた。2.7, 2.8 節では次章の風車および発電機の同定を行うために必要な風車トルクおよび発電機トルクの式を誘導した。つぎに、風力発電機の制御系を構築するために、出力、風速、ピッチ角、回転角速度の相互関係を明らかにした。最後に、制御系の構成とその制御方法について説明した。

第3章では、システム同定手法および解析的手法を用い風車システムのモデル構築を行い、構築したモデルをもとに周波数応答、過渡応答を求め風力発電機の動特性を明らかにした。始めに今回の研究で用いた ARMAX モデルについてその構造や特徴を概説し、システム同定で重要なモデル次数の決定方法やモデルの同定方法について述べた。つぎに、システム同定手法を用いて風力発電機の制御系のモデリングを行った。まず、出力制御系を同定し、そのモデルの動作点の変化にともなう特性変化に対して考察を行い、動作点の変化による影響は少ないことを示した。また、出力制御系と同様にピッチ駆動系をモデリングした。つぎに、風車・発電機系の同定を行った。風車の動特性の式、風車トルクの式、発電機トルクの式から微小変化に対する式を求め、この式より風速から角速度までの伝達関数とピッチ角から角速度までの伝達関数を求めた。最後に、構築したモデルをもとに風速から出力までの閉ループ伝達関数を求め、風力発電機の周波数応答および過渡応答を求めた。周波数応答よりこのシステムは 0.1~2 (Hz) 付近にピークがあり、この周波数帯において最も敏感に風速の変化に対して応答するシステムであることが分かった。

第4章では、始めに、風力発電機の出力変動を抑制する方法として制御理論による方法、パワーエレクトロニクスとの統合制御による方法および集合型発電による方法の3つの方法について説明した。つぎに、制御則にもとづく方法として内部モデル原理、外乱相殺制御、外乱包含制御の3つの制御方策について概略を述べた。その結果、外乱包含制御の一つである確率最適制御が最も適していることを示した。つぎに、風速が直接計測できる場合と計測できない場合の2つに分け、それぞれに対して確率最適制御を適用した制御系を構築した。まず、風速を直接計測できる場合について述べる。最初に、風速をフィードフォワードするフィードフォワード伝達関数を求めた。また、風力発電機の未知の状態を知るために、状態推定オブザーバを構築した。これらの結果から拡大系を構成し、各ゲインを計算し制御系を構築した。つぎに、風速が直接計測できない場合について述べる。最初に、実効風速を求める風速オブザーバを提案し、この風速をフィードフォワードさせるためのフィードフォワード伝達関数を導入した。つぎに、風速を測定できる場合と同様に状態推定オブザーバを構成した。最後に、拡大系を構築し各ゲインを求めた。

第5章では、提案する制御方策が有効であることを確認するために、第4章で構築した二つの制御系をもとに、実測値を用いてシミュレーションを行った。その結果、本制御系が風力発電機の出力変動抑制に有効であることが示された。始めに、風速が直接計測できる場合についてシミュレー

ションを行い、時間応答、周波数応答および定量的な面から比較を行った。その結果、分散を約 $1/4$ にまで減少できることを確かめた。つぎに、風速が直接計測できない場合についてシミュレーションを行った。風速が直接計測できる場合と同様に、本制御方策により、分散が $1/2$ に減少していることを確認した。さらに、ウィンドシェアによる影響を様々に変化させ、シミュレーションを行った。この結果、ウィンドシェアの影響の無い理想的な場合には、分散を $1/5$ にまで減少させることを確かめた。ここで、風速を直接計測してフィードフォワードする方法は風速オブザーバを介してフィードフォワードするよりも出力変動の抑制効果が大きい。しかし、風速を直接計測できる風力発電機システムの採用ケースは少ないので、風速オブザーバによる風速のフィードフォワードの方がより現実的な提案である。

第6章は結言であり、本研究の成果についてまとめている。本研究の得られた成果は以下の3点である。第一に、これまで明確な方法が示されていなかった風力発電のモデリング方法として、システム同定手法を用いることを提案した。第二に、風力発電機に作用する風速を直接計測することは非常に困難であったが、本研究では風力発電機そのものを風速計として考え、その風速を推定する風速オブザーバを提案した。第三に、フィードバックとフィードフォワードを併用した確率最適制御を適用することにより、風力発電機の出力変動を抑制する方法を提案した。

主指導教員 松坂知行

Control Strategy for Suppression of Power Variation of a Wind Turbine Generator

Naruhito KODAMA

Abstract

Wind energy is being increasingly used in the United States and Europe as a renewable and ecologically clean energy source. In Japan, the 500 kW wind generator was developed as one of projects of NEDO, and several tests on its performance have been made so far. Various researches have been performed based on the measurement data on the above machine. Wind generators are driven by stochastically fluctuating wind speeds, and hence the output power varies much. Particularly, the generated power varies too much because generators are built in a mountainous and rough complex terrain in Japan. Consequently, the power variations become serious problems in case of a small power system or an isolated island, although we can neglect the power variations in case of a large capacity power system. Hence, it is important to find control methods to reduce the power variations. So far, pitch control strategy was carried out with the conventional PID control. However, recently modern control schemes such as adaptive control, LQG optimal control and fuzzy control have been proposed. This paper presents a new control scheme based on probabilistic optimal control using the model of the NEDO's 500 kW wind generator.

In order to develop a new control scheme for reduction of the power variations, we need to obtain the dynamic characteristics under fluctuating wind conditions. For this purpose, the author develops a modeling method based on the NEDO 500 kW wind generator. The modeling of a wind generator using an analytical method has been made previously. However, the analytical modeling has difficulty due to complexity with increase in number of elements consisting of the generator. Therefore, this paper presents the modeling of the NEDO 500 kW wind generator using system identification technique. To begin with, the author presents the way to divide the wind generator into several subsystems, and obtains input-output relationship of each block using the data on the NEDO's machine under operation, and performs the modeling of transfer functions of each block. However it is difficult to obtain the transfer functions of whole blocks. Therefore, the author applies an analytical method to a part of some blocks of the system besides system identification technique. Then, the author proposes a new control system using the designed model. The assumption that the windmill system is the probabilistic control system in which the input wind speed changes randomly is made in this study. Based on this idea, the windmill system is formulated as a probabilistic control system that consists of a feed forward control and feed back control scheme, and then the controller

by optimizing the specified performance index is constructed. In order to perform feed forward control, it is necessary to detect the wind speed. Hence, a wind speed observer that estimates the wind speed using the wind generator itself is developed. Several simulations are made to verify the performance of the proposed controller using the actually measured data. The results show that the proposed controller can reduce the power variations to approximately one third. Recently, the power variations of a wind generator become problems in case of connection to a small power system such as an isolated island. In such a case the proposed control strategy will be a useful solution.

This thesis consists of the following chapters.

The background, the objective and the outline of this research are described in Chapter 1.

The subsystems constituting a wind generator, and a basic idea of the modeling that is necessary to develop the control strategy of the wind generator are described in Chapter 2. Several kinds of windmills and the characteristics are mentioned, and at this present horizontal axis, up-wind and propeller type wind generators with squirrel-cage induction machines are stated to be mainstreams. A typical wind generator system consists of a rotor, a shaft system, an electrical system, a control system and a tower. The author states the outline of these subsystems, and then the structure of the NEDO 500 kW wind turbine generator of this study, and derives the equations of windmill torque and generator torque. In order to design the control system, the author clarifies the mutual relationship between power, wind speed, pitch angle and angular speed, and illustrates the structure of the control system and the control method.

A system identification technique and an analytical method are described the model of the windmill system in Chapter 3. In this chapter, the transient characteristics and the frequency characteristics of the machine are clarified using the above model. The structure and the characteristic of the ARMAX-model are introduced, and a method to determine the order of the model and the modeling method, which are important in system identification technique, are described. Then, the modeling of the power control system and the pitch drive system are made using system identification technique. Then, the author performs the over all modeling of the windmill and the generator. For this purpose, the perturbation relationship equation of the angular speed, the wind speed and the pitch angle of the wind generator are formulated using equations of dynamic behavior, windmill torque and generator torque, and thus the modeling of the windmill and the generator are derived. As the result, the overall closed loop transfer function from the wind speed to the power based on the designed model are formulated. The frequency response of the model shows a peak in a domain from 0.1 (Hz) to 2 (Hz), and that the whole system is sensitive to the wind speed change around this frequency region, is shown.

Control schemes to reduce the power variations are described in Chapter 4. The probabilistic optimal control, which is one of disturbance accommodation control, is most useful among control schemes. The author proposes a control strategy to combine a feed forward and feed back system. In order to perform a feed forward control, it is necessary to

detect the wind speed, as aforementioned. The author studies two cases : control system with wind speed sensor and without wind speed sensor. In case with wind speed sensor, a feed forward transfer function is calculated by the actual measurements, and then the minimal order observer to estimate the state variables of the wind generator is designed. As the results, the augmented system is formulated, and the proposed control system is constructed. In case without wind speed sensor, a wind speed observer which estimates the effective wind speed is proposed. Then, a feed forward transfer function is introduced, and a minimal order observer is obtained in the same way as the former case. From these transfer functions, an augmented system is formulated, and the feed forward and feed back gain are calculated.

In order to confirm performance of the proposed controller, several simulations are made using measured data in Chapter 5. As the results, the proposed controller can reduce the power variations successfully, and the variance of power decreases to one fourth with wind speed sensor, and a half without wind speed sensor. In the ideal case where there is no windshear, the proposed controller can reduce to approximately one fifth of variance of power variations.

The overall results of the study are summarized as conclusions in chapter 6.

Professor (Chairperson)

Tomoyuki Matsuzaka