



Doctoral Thesis

## Efficient Simulation of Wind and Wake Flows in Wind Farms Using a Preconditioned Multistage Solver

**Author(s):**

Jafari, Samira

**Publication Date:**

2014

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010265237> →

**Rights / License:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Doctoral Thesis ETH Zürich No. 21837

Efficient Simulation of Wind and Wake Flows in Wind Farms  
Using a Preconditioned Multistage Solver

A dissertation submitted to the  
ETH Zürich

for the degree of  
Doctor of Sciences

presented by

Samira Jafari

M.Sc. AE.-Eng., Sharif University of Technology, Iran  
born on 01.09.1984 in Zanzan  
citizen of Iran

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Reza S. Abhari, examiner  
Dr. Ndaona Chokani, co-examiner  
Prof. Dr. Jakob Mann, co-examiner

2014

---

## Abstract

The simultaneous simulation of microscale wind and wind turbine wake is attempted in this work using a preconditioned multistage solver and an immersed wind turbine model. This work demonstrates a low Mach number preconditioning formulation for high Reynolds number, low Mach number atmospheric flows. The preconditioning is implemented together with multi-grid approach into a multistage solver in order to provide an efficient scheme, which allows for the routine use of computational fluid dynamics in simulations of the atmospheric flow and wakes within wind farms.

Microscale wind simulations are performed using the preconditioned solver over several test cases including Askervein Hill, Kettles Hill and Bolund Hill to demonstrate the superior convergence, accuracy and robustness of the method. In addition, the performance of RANS solver is assessed in prediction of microscale wind variations over topography with varying complexity. Next, A novel immersed wind turbine model is developed and used to simulate the evolution of single and multiple wake interactions. The model is formulated in order to reduce the stringent grid requirements for resolving the blade boundary layer and near-wake region behind the wind turbines. The model is first evaluated by comparing the predicted evolution of the velocity and turbulence intensity in the far wake with measurements performed in a wind tunnel. Predictions are also compared with full-scale measurements of a single wake at the Sexbierum wind farm. The performance of the model is also assessed in predicting wake interaction in the same wind farm by comparing the power performance with measurements in an operating wind farm. The agreement between the model results and measurement for all cases is satisfactory for both single and double wake predictions. In next step, the simulations are performed over offshore wind farm Lillgrund and sensitivity of power loss to wind direction is investigated in two first rows of the farm. The results of simultaneous wind and wake flow are also presented over two wind farms located in complex terrain in Spain and Switzerland. The recovery rate of wake and turbulence characteristics in wind farm caused by the topography are assessed. Overall the results of array loss in wind farm located in complex terrain demonstrate the sensitivity of wind farm performance in complex terrain to small variations in wind direction. The model yield acceptable results for all test cases, however, to justify the additional computational cost of RANS simulations compared to simplified engineering models, the accuracy needs to be further improved and the computational cost must be reduced. Overall, the results over various test cases demonstrates the capability of the model to resolve the wake interaction in wind farms and to estimate the array loss for different arrangements of turbines and incoming wind directions. In addition to reducing the computational

---

time, the model employs Cartesian grids, which facilitate the grid generation process for wind farm simulations.

In the final part of the thesis, an immersed boundary method that is used in connection with the Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations with  $k - \omega$  turbulence model in order to efficiently simulate the wind flow over complex terrain is presented. With the immersed boundary method, only one Cartesian grid is required to simulate the wind flow for all wind directions, with only the rotation of the digital elevation map. Thus the lengthy procedure of generating multiple grids for conventional rectangular domain is avoided. Wall functions are employed with the immersed boundary method in order to relax the stringent near-wall grid resolution requirements, as well as to allow the effects of surface roughness to be accounted for. The immersed boundary method is applied to moderately complex terrain test case Askervein Hill and the highly complex terrain test case of Bolund Hill. The simulation results of wind speed and turbulent kinetic energy show good agreement with experiments for heights greater than 5m above ground level.

---

## Zusammenfassung

Die Mikromassstab Simulation von Wind simultan mit der Nachlaufströmung einer Windturbine wird in dieser Arbeit mittels einem vor konditionierten mehrstufigen Solver und einem immersiertem Windturbinen Modell behandelt. Diese Arbeit zeigt die vor konditionierte Formulierung der niedrigen Mach Zahl für hohe Reynolds-Zahlen. Die vor konditionierte Formulierung wurde zusammen mit einem Mehrgitterverfahren in einem mehrstufigen Solver implementiert. Dies erlaubt die routinierte Verwendung der numerischen Strömungsmechanik für die Simulation der atmosphärischen Strömung und der Nachlaufströmung einer Windturbine. Mikromassstab Windsimulationen wurden durchgeführt mit dem vor konditionierten Solver über mehrerer Testfälle wie Askervein Hill, Kettles Hill and Bolund Hill. Damit wurde die Konvergenz, Genauigkeit und Robustheit dieser Methode zeigt. Zusätzlich wurde die Leistung der RANS Solver bewertet mit der vorhersage der wind veränderungen über untersichtliche Gelände.

Weiterhin wurde ein neuartiges immersiertes Windturbinen Modell entwickelt. Dieser wurde für Simulationen der Wechselwirkungen vom die Nachlaufströmung von einzelne und mehrere Windturbinen eingesetzt. Das Modell wurde so formuliert, dass die notwendige Gitter Auflösung erzielt wird, um die Rotorblätter Grenzschicht und die Nachlaufströmung in der Nähe der Windturbine auflösen zu können. Die Evolution des Modells erfolgte mit dem Vergleich der vorhergesagten Geschwindigkeit und Turbulenzintensität der fernen Nachlaufströmung mit Windkanal Messungen. Die Vorhersage wurde auch mit Messungen an einer Nachlaufströmung von einer Windturbine im Sexbierum Windpark verglichen. Die Leistungsfähigkeit des Modells ist auch bewertet in der Vorhersage von Nachlaufströmunginteraktion zwischen mehreren Windturbinen im gleichen Windpark, mittels Messungen von der Leistung der Windturbinen. Die übereinstimmung zwischen den Resultaten von Modell und Messergebnissen ist für alle Fälle gut. Diese stimmt fuer beide einzel und doppelt Nachlaufströmungvorhersage. Weiter wurden auch Simulationen über den off shore Windpark Lillgrund durchgeführt und die Sensitivität vom Leistungsverlust in Abhängigkeit von Windrichtung in zwei Reihen des Windparks untersucht. Simultan wurde der Wind und Nachlaufströmung für zwei Windparks in komplexen Terrains in der Schweiz und Spanien simuliert. Das Verhalten der Nachlaufströmung der Windturbine und die gegebenen Turbulenzeigenschaften in einen Windpark durch die Topografie wurden bewertet. Die Resultate zeigen, dass die Leistung vom Windparks die im komplexen terrains gelegen sind, abhängig von dem Terrain und kleinen Windrichtungwechseln ist. Das Modell zeigt akzeptable Ergebnisse für alle Testfälle, jedoch um die zusätzliche Rechenzeit der RANS Simulation im Vergleich zu einfachen Modellen zu rechtfertigen, bedarf die Genauigkeit

---

weiterer Verbesserungen und einer Reduktion der Rechenzeit. Insgesamt zeigen die Resultate der Testfälle die Fähigkeit des Modells die Interaktion der Nachlaufströmung in Windparks und der Verlust für verschiedene Turbinen Anordnungen sowie Windrichtungen, zu erfassen. Zusätzlich zur reduzierten Rechenzeit, beinhaltet das Modell ein kartesisches Gitter, welche den Gitter Erstellungsprozess für Windpark Simulationen ermöglicht.

Im Abschluss, eine Grenzschicht Methode mit die Reynolds-gemittelten Navier-Stokes Gleichungen und mit ein  $k - \omega$  Turbulenzmodell ist vorgestellt. Die Windströmung über komplexen Terrain kann, mit diese methode effizient simuliert werden. Weiterhin ist nur ein kartesisches Gitter erforderlich um die Windströmung in alle Richtungen zu simulieren. Das ist möglich mit die Umdrehung der digitale topografische Karte. Damit wurde das lange Verfahren der Erstellung von mehreren Gitter im konventionellen rechteckigen Bereich umgangen. Wandfunktionen wurden zusammen mit der immersierten Grenzschicht Methode verwendet. Damit wurde die zwingende Gitterauflösung in Wandnähe erfüllt und den Effekt der Oberflächenrauigkeit berücksichtigt. Die immersierte Grenzschicht Methode wurde verwendet, um Testfälle moderater komplexer Terrains wie Askervein Hill und sehr komplexen Terrains wie Bolund Hill zu simulieren. Die Resultate der Windgeschwindigkeit und der turbulenten kinetische Energie zeigen gute Übereinstimmungen mit den experimentalen Daten die bei  $> 5\text{m}$  Bodenhöhe gemessen werden.