

Full-scale Assessment of Impact of Unfavourable Upstream Conditions on the Performance and Loads of Wind Turbines

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by
Mohsen Zendehbad
M.Sc. Mech. Eng., Sharif Univ. of Tech.
Born 01.05.1987 in Shiraz
Citizen of Iran

Accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Reza S. Abhari, examiner
Dr. Ndaona Chokani, co-examiner
Prof. Dr. Thomas Rösgen, co-examiner

2017

Abstract

Current fast growth of electricity production from wind, accelerated by the environmental effects of fossil fuels and recent nuclear incidences, results in three major consequences for wind industry: wind energy is produced in the scale of wind farms, rather than single wind turbines; due to scarcity of eligible land, environments of less friendly conditions, such as forested areas are considered for installing wind turbines; and wind turbines of larger size are designed for efficient cost-effective exploitation of available resources. Studies show that unfavorable upstream conditions such as wake from upstream turbines, complex terrain topology and forested fetch can cause detrimental effects on the power generation of a wind turbine. In addition to power generation, unfavorable upstream conditions can result in higher structural loads, which are of higher significance for large-sized wind turbines.

In this study a full-scale experimental database is developed to quantify the impact of upstream conditions on the wake extent, power generation and structural loads of a wind turbine. In this regard, windRoverII, a mobile laboratory equipped with a 3D scanning LiDAR system is developed. WindRoverII also features a portable stand-alone opto-mechanical platform to measure structural deflections of full-scale wind turbines with no necessary modifications on the structure of the turbine.

Using the mobile-based LiDAR successive measurements of the line-of-sight wind speed from multiple positions are made; from these measurements, the time-averaged three-dimensional and two-dimensional wind velocity vectors are reconstructed. The approach of this novel measurement technique is first validated by comparisons to a meteorological mast and SODAR at a meteorological observatory. Subsequently, volumetric measurements of three-dimensional wind velocity in the wake of a single wind turbine and planar measurements of two-dimensional wind velocity in the scale of wind farms are used to characterize the wake flows in two wind farms with $26MW$ and $28MW$ capacities. Measurements show different velocity recovery rates in the near-wake (range of $1D - 3D$ downstream positions) and far-wake (range of $3D - 7D$ downstream positions) of a turbine. As compared to far-wake, the near-wake region is associated with a faster recovery rate

where up to 70% of velocity recovery occurs. When the wake region is laterally exposed to the wake from upstream turbines, the velocity recovery occurs with up to 40% slower rate and the fast recovery in the near-wake is not any more observed.

In a wind farm whose turbines have either a forested or unforested fetch, measurements of the wind speed, wind direction and turbulence intensity are made with the LiDAR, and measurements of the tower head aeroelastic deflections are simultaneously made with the opto-mechanical measurement system. Measurements show that turbulence intensity in the forested fetch is up to 15% higher compared to unforested fetch. Aeroelastic deflections of the tower during normal operation are up to 2.8 times larger for a turbine in forested fetch compared to a turbine in an unforested fetch. It is observed that the turbine with forested fetch has 17% lower annual energy yield compared to a turbine in an unforested fetch. Furthermore, an analysis of the maintenance logs of the turbines shows that a turbine in forested fetch has up to 2.2 times more fault durations per year compared to the similar turbine in unforested fetch.

Simultaneous measurements of the tower deflection and the yaw misalignment of rotor show that tower deflections during normal operation are sensitive to the yaw misalignment of the rotor, and the tower deflections with negative yaw misalignment are seen to be larger than with positive yaw misalignment. The tower deflections during power cut-off and normal operation are, respectively, modeled with free and forced vibration single-degree-of-freedom models to calculate the damping ratio. The damping ratio during power cut-off, 6.8%, is in the lower range of damping ratios that are measured during normal operation, 5.5%-13.2%. During transition to power cut-off, oscillational deflection of tower head is observed. The amplitude of the oscillational deflections decreases to one third in the first oscillation. Power generation and the attendant torque on the tower head accounts for this rapid decrease during the first oscillation.

The findings of this thesis suggest that although installation of wind turbines in packed wind farms and in unfavourable environments is inevitable, the attendant impact on the power generation and structural loads of each turbine needs to be considered in the initial design and output estimation of planned wind farms.

Zusammenfassung

Das derzeitige rapide Wachstum der Stromerzeugung aus Wind, das durch die negativen Umweltauswirkungen fossiler Energieträger und durch die jüngsten nuklearen Unfälle noch beschleunigt wird, hat drei wesentliche Konsequenzen für die Windindustrie: Windenergie wird durch Windparks und nicht durch einzelne Windkraftanlagen erzeugt; Wegen Knappheit an förderfähigen Flächen werden Gebiete von weniger förderlichen Bedingungen, wie beispielsweise bewaldete Gebiete, für die Installation von Windenergieanlagen berücksichtigt; Sowie sind große Windturbinen größerem Umfangs für eine effiziente und kostengünstige Nutzung der verfügbaren Ressourcen ausgelegt. Untersuchungen zeigen, dass ungünstige Anströmbedingungen, wie die sich ergebenden Wirbelströmungen, komplexe Geländetopologie und bewaldeter Windweg, nachteilige Auswirkungen auf die Stromerzeugung einer Windenergieanlage haben können. Neben der Stromerzeugung können solche ungünstig Anströmbedingungen zu höheren statischen Belastungen führen, die vor allem für große Windkraftanlagen von größerer Bedeutung sind.

In dieser Studie wird eine umfangreiche experimentelle Datenbank entwickelt, um die Auswirkungen verschiedener stromaufwärtigen Bedingungen auf die Wirbelströmungen, die Stromerzeugung und auf die statische Belastung einer Windkraftanlage zu quantifizieren. In dieser Hinsicht wird WindRoverII, ein mobiles Labor, welches mit einem 3D-Scanning-LiDAR-System ausgestattet ist, entwickelt. WindRoverII verfügt zudem über eine tragbare Stand-Alone-Opto-Mechanik zur Messung struktureller Verbiegung von Windkraftanlagen ohne notwendige Änderungen an der Turbine.

Mit dem mobilen LiDAR werden sukzessive Messungen der LOS Windgeschwindigkeit aus mehreren Positionen vorgenommen; Aus diesen Messungen werden die zeitlich gemittelten dreidimensionalen und zweidimensionalen Windgeschwindigkeitsvektoren rekonstruiert. Der Ansatz dieser neuartigen Messtechnik wird zunächst durch Vergleiche mit einem meteorologischen Mast und SODAR an einem meteorologischen Observatorium validiert. Anschließend werden volumetrische Messungen der dreidimensionalen Windgeschwindigkeit in der Wirbelzone einer einzigen Windturbine und planare Messungen der zweidimen-

sionalen Windgeschwindigkeit in der Größenordnung von Windparks verwendet, um die Strömungen in der Wirbelzone in zwei Windparks mit 26MW und 28MW zu charakterisieren MW –Kapazitäten. Die Messungen zeigen verschiedene Geschwindigkeitsrückgewinnungsraten im Nahbereich (Bereich von $1D - 3D$ Downstream-Positionen) und in der weiter entfernten Wirbelzone (Bereich von $3D - 7D$ Downstream-Positionen) einer Turbine. Im Vergleich zur distanzierten Wirbelzone ist im Nahbereich eine schnellere Geschwindigkeitserholung mit bis zu 70% messbar. Wenn die Wirbelzone einer Turbine seitwärts einer Wirbelschleppen von stromaufwärtigen Turbinen ausgesetzt ist, ist die Geschwindigkeitserholung mit bis zu 40% langsamer und eine schnelle Erholung im Nahbereich kann nicht mehr beobachtet werden.

In einem Windpark, dessen Turbinen sich entweder durch einen bewaldeten oder unbewaldeten Windweg auszeichnen, werden mit dem LiDAR Messungen der Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Turbulenzintensität vorgenommen und gleichzeitig Messungen der aeroelastischen Auslenkungen des Turmes mit dem optomechanischen Messsystem vorgenommen. Messungen zeigen, dass die Turbulenzintensität im bewaldeten Windweg bis zu 15% höher ist als bei dem unbewaldeten Windweg. Aeroelastische Auslenkungen des Turms im Normalbetrieb sind bis zu 2,8 mal größer für eine Turbine bei bewaldetem Windweg im Vergleich zu einer Turbine im unbewaldeten Windweg. Es wird beobachtet, dass die Turbine mit bewaldetem Windweg 17% niedrigeren jährlichen Energieertrag im Vergleich zu einer Turbine mit unbewaldetem Windweg hat. Darüber hinaus zeigt eine Analyse der Instandhaltungsprotokolle der Turbinen, dass eine Turbine mit bewaldetem Windweg bis zu 2,2 mal mehr Fehlerdauern pro Jahr im Vergleich zu der ähnlichen Turbine mit unbewaldetem Windweg hat.

Gleichzeitige Messungen der Turmauslenkung und der Gierwinkelfehlausrichtung des Rotors zeigen, dass Turmauslenkungen während des Normalbetriebes gegenüber der Gierwinkelfehlausrichtung des Rotors empfindlich sind und dass die Turmauslenkungen mit negativer Gierwinkelfehlausrichtung größer sind als mit positiver Gierwinkelfehlausrichtung. Um das Dämpfungsverhältnis zu berechnen, werden die Turmauslenkungen bei Leistungsabschaltung und Normalbetrieb mit SDOF Vibrationsmodellen mit einem Freiheitsgrad simuliert. Das Dämpfungsverhältnis bei Leistungsabschaltung von 6,8% liegt im unteren Bereich der im Normalbetrieb gemessenen Dämpfungsverhältnisse von 5,5% – 13,2%. Während des Übergangs zur Leistungsabschaltung wird eine oszillierende Auslenkung des Turmkopfes beobachtet. Die Amplitude der Schwingungsablenkungen nimmt bei der ersten Schwingungsperiode auf ein Drittel ab. Die Stromerzeugung und das damit verbundene Drehmoment am Turm sind dabei für die schnelle Abnahme während der ersten Oszillation verantwortlich.

Die Ergebnisse dieser Arbeit deuten darauf hin, dass wenn auch eine Installation von Windkraftanlagen in dicht bebauten Windparks und ungünstigen Gebieten unvermeitlich ist, bereits beim Design und bei der Einschätzung der Produktionsleistung die negativen

resultierenden Einflüsse auf die Stromerzeugung sowie auf die Strukturbelastung jeder Turbine berücksichtigt werden sollten.