



中国—丹麦政府合作风能发展项目系列丛书

风能评价及风电 规划与并网

中国气象局风能太阳能资源评估中心
中国水电工程顾问集团公司
中国电力科学研究院

Wind Assessment, Planning and Integration

中国环境科学出版社

中国—丹麦政府合作风能发展项目系列丛书

风能评价及风电规划与并网

中国气象局风能太阳能资源评估中心

中国水电工程顾问集团公司

编著

中国电力科学研究院

中国环境科学出版社·北京

图书在版编目(CIP)数据

风能评价及风电规划与并网 / 中国—丹麦政府合作风能

发展项目办编. — 北京: 中国环境科学出版社, 2012.6

(中国—丹麦政府合作风能发展项目系列丛书)

ISBN 978 - 7 - 5111 - 0734 - 3

I. ①风… II. ①中… III. ①风力能源 — 综合评价

②风力发电 — 电力系统规划 IV. ①TK81 ②TM614

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 205015 号

责任编辑 高 峰

责任校对 扣志红

封面设计 兆远书装

出版发行 中国环境科学出版社

(100062 北京东城区广渠门内大街 16 号)

网 址: <http://www.cesp.com.cn>

联系电话: 010 - 67112765(编辑管理部)

010 - 67112739(第三图书出版中心)

发行热线: 010 - 67125803, 010 - 67130471(传真)

印装质量热线: 010 - 67113404

印 刷 北京市联华印刷厂

经 销 各地新华书店

版 次 2012 年 6 月第 1 版

印 次 2012 年 6 月第 1 次印刷

开 本 787 × 1092 1/16

印 张 10.5

字 数 175 千字

定 价 36.00 元

【版权所有。未经许可请勿翻印、转载, 侵权必究】

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题, 请寄回本社更换

《风能评价及风电规划与并网》

参加单位与专家名单

项 目 名 称： 特定场址风况评估指南

中方参加单位： 鉴衡认证中心,中国气象局

外方参加单位： 丹麦瑞索国家实验室

项 目 负 责 人： 秦海岩

中 方 专 家： 秦海岩 贺德馨 杨振斌 王 巍 张 宇 陈雷杰

外 方 专 家： Neils G. Mortensen Morten Neilsen

编 写 人 员： 秦海岩 杨振斌 王 巍 张 宇 陈雷杰 陈振华

项 目 名 称： 大型风电场尾流影响

中方参加单位： 中国水电工程顾问集团公司, 西北勘测设计研究院,北京木联能软件技术有限公司

外方参加单位： 丹麦 EMD 公司

项 目 负 责 人： 谢宏文

中 方 专 家： 易跃春 郭雁珩 施鹏飞 王霁雪

外 方 专 家： Per Nielsen Lasse Svenningsen

编 写 人 员： Lasse Svenningsen 刘 玮 柴 雯 娄慧英 吉超盈
杨喜峰

项 目 名 称： 风电场复杂地形影响

中方参加单位： 中国水电工程顾问集团公司,黑龙江电力勘测设计院

外方参加单位： 丹麦 COWI A/S 公司

项 目 负 责 人： 谢宏文

中 方 专 家： 易跃春 施鹏飞 王霁雪

外 方 专 家： Soren Gjerding Flemming Langhans Schafer Kai Michael
Linda Andersen Zheng Xiang

编 写 人 员： Linda Andersen 葛广林 徐 伟 杨喜峰

项 目 名 称：风机选型指南

中方参加单位：中国水电工程顾问集团公司,中国农业机械工业协会风能设备分会

外方参加单位：丹麦 Grontmij-CarlBro 咨询公司

项 目 负 责 人：谢宏文

中 方 专 家：易跃春 王霁雪 祁和生 施鹏飞 沈德昌

外 方 专 家：Jan Svenson

编 写 人 员：杜琳娜 孙咏梅 李德孚 Jan Svenson Peter Toft Madsen

项 目 名 称：并网模型 Balmorel 应用

中方参加单位：中国电力科学研究院
黑龙江省电力有限公司

外方参加单位：丹麦 Ea 咨询公司

项 目 负 责 人：迟永宁 王晓弘 Kaare Sandholt

中 方 专 家：迟永宁 王晓弘 王伟胜 李 琰 魏林君 刘 超
王 真 张 梅 石文辉 王跃峰 杜继成 王 斐
吕鸣镝 赵 琳 才洪全 边二曼 胡开元 戴慧珠
胡学浩

外 方 专 家：Kaare Sandholt Edward James Lars Bregnbak János
Hethey Niels Christian Bang

编 写 人 员：李 琰 魏林君 刘 超 王 真 张 梅 王跃峰
杜继成 Kaare Sandholt Lars Bregnbak

项 目 名 称：风电功率预测物理方法

中方参加单位：中国电力科学研究院

外方参加单位：丹麦瑞索国家实验室

项 目 负 责 人：王伟胜 刘 纯 Giebel Gregor

中 方 专 家：王伟胜 刘 纯 冯双磊 王 勃 卢 静

外 方 专 家：Gregor Giebel Jesper Nissen

编 写 人 员：王伟胜 刘 纯 冯双磊 王 勃 卢 静
Gregor Giebel Jesper Nissen

前 言

由于我国政府对开发利用可再生能源的高度重视及《可再生能源法》的颁布实施,风力发电作为技术最成熟、最具规模开发和商业化发展前景的可再生能源之一,发展速度居于各种可再生能源之首,我国风资源丰富地区的风电场建设也得到了快速的发展。

为了使中国的风能利用得到持续性的发展,中国和丹麦政府实施了中国—丹麦政府合作风能发展项目(简称中丹风能发展项目 WED),执行期为三年。旨在通过双边合作介绍丹麦风电的技术及发展经验,加强中国风电机构能力建设,提高风电开发和运行管理水平,推动中国风电技术进步,促进中国风电的健康发展。

中丹风能发展项目的领导机构为项目指导委员会,其由国家能源局、商务部和丹麦大使馆组成,国家发展和改革委员会能源研究所下设的项目管理办公室负责项目的协调、管理和监督。

项目主要由四部分组成:风资源评估、风电场规划和后评估、风电并网研究以及培训和宣传推广,分别由中国气象局、中国水电工程顾问集团公司、中国电力科学研究院和中丹项目管理办公室负责牵头执行。

本书内容是项目执行单位在完成中丹风能发展项目起初设计的项目工作内容的基础上,于 2009 年下半年开始,针对研究过程中发现的中国风电发展急需解决的新问题,经过风电领域专家的充分论证确定了 6 个新增技术研究项目。新增的 6 个技术项目为利用中国气象局风资源研究成果,由中国气象局牵头,鉴衡认证中心和丹麦瑞索国家实验室承担的《特定场址风况评估指南》;中国水电工程顾问集团公司牵头承担的《大型风电场尾流影响》和《风电场复杂地形影响》,以及与中国农业机械协会风力机分会和丹麦 Carlbro 咨询公司合作开展的《风机选型指南》;中国电力科学研究院牵头与丹麦 Ea 咨询公司和瑞索国家实验室开展的《并网发电模型 Balmorel 应用》和《风电功率预测物理方法》。

这些项目的实施得到了众多中外专家和项目参与单位的大力支持和配合,研究成果汇集了中国和丹麦在风电领域专家的经验及工作成果。在此,向对本项目作出贡献和提供支持的各界领导、专家和同仁表示诚挚的谢意。

由于时间仓促,本项目研究成果汇编报告难免有疏漏之处,欢迎读者不吝指正。

序 一

能源和环境是全球共同面临的重大问题,加快开发利用可再生能源是解决人类能源和环境问题的必由之路。风电是目前技术最成熟、最具市场竞争力、且极具发展潜力的新能源发电技术,中国高度重视风电产业发展,已把发展风电作为调整能源结构、转变发展方式、应对全球气候变化、实现可持续发展的重要措施,采取优惠电价、全额收购、成本分摊等方式,积极推动风电产业发展。

丹麦是全球风电技术最先进的国家之一,在风能资源分析评价、风电设备制造、风电项目建设和运行管理方面都有丰富的经验。为了学习借鉴丹麦风电发展经验,提高中国风电开发能力,2006年中和丹两国政府启动了中国—丹麦风能合作发展项目(简称中丹风能发展项目),由丹麦政府提供资金和技术支持中国开展风能资源评价技术、风电并网技术、风电建设和运行管理技术能力建设。

在中国与丹麦双方政府部门、研究机构、技术单位、教育机构和电力企业等单位的精诚合作和不懈努力下,项目已完成了预期目标,并取得了丰硕的成果。项目开发了东北三省高分辨率的风资源数字图谱,并将在项目合作中学到和掌握的风能资源评价方法应用于国家风能观测网400个测风站点的建设中。开发出了具有国际领先水平的风电场工程可行性研究报告的标准模板,该模板不仅注重风能资源的评估,而且加强了环境、节能和风险方面的评价,其对中国风电场的建设具有科学的参考价值。通过对已建风电场进行后评估,总结了风电场运行维护管理的经验和教训,提出了建设性的建议,可供风电开发商和运营商借鉴,以提高风电场建设和运行的效率。同时项目更新了风电并网导则,并将其升级为国家标准,对提高风机质量、规范风电市场、确保电网安全稳定运行、充分利用风电等方面起到了重要作用。开展了风电并网研究,建立了评价风电并网的方法,分析了大规模风电并网与电网之间的相互影响,为研究大规模远距离输送风电问题奠定了基础。项目还根据中

国风电发展的需要,举办了系列风电相关技术培训活动,为风电的技术人才培养和技术交流提供了平台。

为了推广应用中丹风能发展项目取得的成果,本书将项目取得的成果,编制了一套具有广泛性和实用性的研究成果汇编,使更多的风电同仁可以分享项目成果。该汇编汇集了项目所有研究成果的精华,包含了各个分项目的研究方法和结论,是一套具有重要参考价值的研究成果汇编,希望其为中国风电的发展起到借鉴作用,为应对全球气候变化作出贡献。

中丹风能发展项目的顺利实施及取得的丰硕成果,归功于丹麦政府的大力支持,归功于所有参与项目和给予项目帮助的单位 and 个人的精诚合作,我在此表示诚挚的感谢,谢谢所有参与这项工作同志的辛勤付出。

史立山
国家能源局

序 二

国际合作是应对气候变化的最有效的手段。目前风力发电凭借其技术的成熟性和易于建设等优势在全球范围的能源供应中体现了其重要地位。丹麦作为拥有领先全球的风力发电技术和产业的国家,和占有全球最重要的风力发电市场的中国,两国政府坚持积极推动风力发电技术和商业应用的发展,解决可持续发展问题。

中丹风能发展项目(WED)是中国和丹麦政府之间第一次在环境发展领域进行合作的项目。项目于2005年达成协议,立足于突出风能在两国环境保护和促进商业和工业可持续发展方面的重要性。

该项目的目标是为可再生能源在中国能源供应方面的发展作出贡献,在东北三省范围内选取实例为有效开发风能提供更多的具体方案,为国家级水平的机构提供能力建设,改善管理和规划。中丹风能发展项目聚集了中国和丹麦在风能领域的专家,在风能技术和相关专项技术的开发和转让方面做了大量的工作。

该项目突出了中丹风能发展项目的技术成果以及所有与风能发展有关的地方和国家部门全员参与的重要性。报告还讲述了大中小学学生参与中国未来风能发展活动的成功案例。

项目即将结束之际,因为项目管理团队的有效管理和所有工作人员的无私奉献,我很高兴地看到项目达到了如此高的预期效果。

十分感谢所有在本项目中为促进中国风能发展作出贡献的工作人员。希望中丹风能发展项目的成果和那些从丹麦传入中国的专业知识能够成为丰硕的、不朽的财富。

姚朔仁

临时代办、公使参赞

丹麦大使馆 北京

Foreword

Climate change calls for international cooperation. Globally, wind power is becoming more and more important in the energy supply. China and Denmark actively promote wind power to address sustainable development.

The Wind Energy Development (WED) Programme was the first environmental development programme between China and Denmark agreed in 2005 and underlines the importance of wind power to both countries in protecting the environment and promoting sustainable development in business and industry.

The programme aimed to contribute to the development of renewable energy in the energy supply in China and more specific the programme should contribute to the improvement of the regulatory framework, plans and capacities improved on effective exploitation of wind energy at national level and in the three North-eastern provinces of China.

This report highlights the technical achievements of the WED programme and the importance of including all stakeholders at local and national level in development of wind power. It also tells the successful story of including students in schools and universities in further development of wind power in China.

Now when the programme has come to an end I am happy to see that the programme has been able to live up to the high expectations from the start thanks to the efficient management of the programme and the engagement and dedication of all who worked with the programme. The programme managed to bring Chinese and Danish experts together to develop and transfer wind power technology and knowhow.

I offer my best wishes to all those working with promoting wind power in China. I hope that the results of the WED programme and the expertise Denmark brought to China will be fruitful and have a long lasting legacy.

Søren Jacobsen Charge d'Affairs Minister Counsellor
Embassy of Denmark Beijing

目 录

第 1 章 特定场址风电机组评估指南	1
1 目的和意义	1
2 主要引用文件	1
3 术语	2
4 工作内容	3
5 复杂地形评估	4
6 现场调研及分析	4
6.1 环境条件	5
6.2 风况条件	5
6.3 土壤条件	14
6.4 电网条件	14
6.5 地震条件	14
7 特定场址风电机组结构安全性校核	14
8 安全性校核资料需求	14
8.1 特定风况条件	15
8.2 其他环境条件	15
8.3 土壤条件	15
8.4 与结构安全性校核相关的电网条件	15
9 根据环境条件与基础刚度条件进行机组结构安全性校核	16
10 根据特定条件下的载荷计算进行机组结构安全性校核	17
10.1 与 IEC 61400—1—2005 相匹配的载荷计算方法及要求	18
10.2 与 IEC 61400—1—1999 或 GL Wind 2003 相匹配 的载荷计算方法及要求	20

11	地震条件	21
12	其他环境条件	22
12.1	结冰	22
12.2	温度	23
12.3	电网条件	26
	附录:特定场址单机位评估检查表	27
第 2 章	大型风电场尾流影响研究	38
1	概述	38
2	工作成果	38
3	案例:中国西部某风电场	39
3.1	介绍	39
3.2	风力发电机组	39
3.3	风电场布置	39
3.4	地形	39
3.5	发电量	41
4	结论和建议	47
5	经验介绍	48
6	风电机组扫掠面积的变化	49
7	结论	49
8	埃及 Zafarana 风电场	50
9	展望	51
第 3 章	复杂地形风电场风资源影响研究	52
1	概述	52
2	技术摘要	53
3	风能资源评估	54
3.1	风能资源测量	54
3.2	风能资源分析	55
3.3	风能资源补长订正(代表性分析)	57

4 风电场发电量估算	59
4.1 基本信息	59
4.2 结论	62
附件 1 草帽岭风电场坡度图	66
附件 2 RIX 计算	67
附件 3 发电量计算	69
第 4 章 风电机组选型指导与案例分析报告	71
1 风电机组选型指导	71
2 案例分析	71
2.1 风电机组有关参数	71
2.2 NORDEX77-1500、WD70-1500、GW77-1500 三种风电机组 的发电量计算结果	89
2.3 综合评价	102
3 综合评价结论	106
第 5 章 风电并网模型 Balmorel 应用	107
1 Balmorel 模型介绍	107
2 简单系统研究	107
3 大系统研究	110
3.1 黑龙江省风资源基本情况介绍	110
3.2 基础运行方式	113
3.3 不同运行方式下机组出力的比较	116
4 结论	119
附录 并网发电模型 Balmorel 的使用说明	121
第 6 章 风电功率预测物理方法	139
1 项目背景	139
2 物理方法的风电功率预测基本原理	139
3 风电功率预测模型的建立	140

3.1 案例介绍.....	140
3.2 物理方法建模	142
3.3 其他方法建模	145
4 预测结果性能分析	146
4.1 不应用模式输出统计的结果比较	146
4.2 应用模式输出统计的结果比较	147
4.3 数值天气预报讨论	147
4.4 统计模型与物理模型的比较	149
5 结论	150
参考文献	151

第1章 特定场址风电机组评估指南

1 目的和意义

根据国际标准 IEC 61400—1—2005 参考文献 1 的规定,进行风力发电机组设计应考虑各种外部条件,这些外部条件分为正常条件和极端条件,详细内容参见 IEC 61400—1—2005 第 6 部分的相关内容。

实际风电场场址的外部条件往往与标准中规定的外部条件有较大的差异,同时风电场中所安装的风力发电机组也会对该场址的湍流强度等产生一定影响。因此,当按照 IEC 标准中规定的外部条件设计的风力发电机组应用在某一特定风电场场址时,为了保证风电机组的安全性,应该对风电机组在特定场址的适用性进行评估。

IEC 61400—1—2005 第 11 部分给出了特定场址风电机组评估应考虑的相关内容,主要是影响风电机组载荷、使用寿命和运行的各种条件,包括环境条件、电气条件(包括附近的风电机组)、地震条件、地形条件和土壤条件等。特定场址评估主要是通过适当的计算和分析说明实际风电场的特定条件不会影响风电机组的结构完整性,标准中给出了如下两种评估方法:

(1) 证明特定场址的所有上述条件没有风电机组设计时假设的条件恶劣,详细流程请参见本章 9 的相关内容。

(2) 证明在所有等同或更为恶劣的风电场场址条件下风电机组的结构完整性,详细流程请参见本章 10 的相关内容。

如果实际风电场场址条件比风电机组设计时假定的条件更为恶劣,应考虑采用第二种方法证明风电机组结构的完整性和电气的兼容性。

本章内容主要是指导进行风电机组在特定风电场场址条件下的具体评估工作,为风电机组的认证等相关工作服务。

2 主要引用文件

IEC 61400—1—2005 *Wind turbines—Part 1—Design requirements.*

IEC 61400—1—1999 *Wind turbine generator systems—Part 1—Safety requirements.*

IEC 61400—12—1—2005 *Wind turbine—Part 12—1—Power performance measurements of electricity producing wind turbines.*

GL Wind 2003: *Guideline for the Certification of Wind Turbines*.

GL 2010: *Guideline for the Certification of Wind Turbines*.

MEASNET Procedure: *Evaluation of Site-Specific Wind Conditions*, Version 1, November 2009.

NREL: *Wind Resource Assessment Handbook*, April 1997.

Cook, N. J. *The designers guide to wind loading of building structures*, Butterworths, 1995.

Cook, N. J. *Towards better estimation of wind speeds*. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 1982.

Cook, N. J. *The Designer's Guide to Wind Loading of Building Structures*, 1985.

GB 18451.1—2001《风力发电机组安全要求》.

GB/T 18709—2002《风电场风能资源测量方法》.

GB/T 18710—2002《风电场风能资源评估方法》.

GB 50009—2001《建筑结构荷载规范》.

3 术语

特定场址风电机组评估: 评估风力发电机组的设计是否符合特定场址下的外部条件;

极大风速: t 秒内最高风速的平均值, 重现周期 N 年;

风速分布: 用于描述连续时限内风速概率分布的函数;

风剪切: 风速在垂直于风向平面内的变化;

湍流强度: 风速标准偏差与平均风速的比值, 需用同一组风速测量数据和规定的时间周期进行计算;

入流角: 轮毂高度来流与水平平面的夹角;

参考风速: 用于确定风力发电机组等级的风速基本参数;

V_{50} : 50 年一遇 10 min 平均极大风速;

V_{ref} : 参考风速;

θ : 入流角;

α : 风剪切指数;

I : 湍流强度;

$\hat{\sigma}_\sigma$: 估计的湍流标准偏差 $\hat{\sigma}$ 的标准偏差;

$\hat{\sigma}_1$: 轮毂高度处风速矢量纵向分量标准偏差;

$\hat{\sigma}_2$: 轮毂高度处风速矢量竖向分量标准偏差;