



中国—丹麦政府合作风能发展项目系列丛书

# 风电场建设 运行与管理

苏州龙源白鹭风电职业技术培训中心 编著

Training manual – Operation and  
management of wind power projects

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

# 风电场建设、运行与管理

——风电场中、高级工程技术人员及管理人员培训教材

苏州龙源白鹭风电职业技术培训中心 编著

杨校生 主 编

吴金城 副主编

中国环境科学出版社·北京

**图书在版编目(CIP)数据**

风电场建设、运行与管理 / 苏州龙源白鹭风电职业技术  
培训中心编著. — 北京: 中国环境科学出版社, 2010.7

(中国—丹麦政府合作风能发展项目系列丛书)

ISBN 978 - 7 - 5111 - 0323 - 9

I. ①风… II. ①苏… III. ①风力发电 — 发电厂 — 基本知识 — 中国  
IV. ①TM62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 133446 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 北京崇文区广渠门内大街 16 号)  
网 址: <http://www.cesp.com.cn>  
联系电话: 010 - 67112739(第三图书出版中心)  
发行热线: 010 - 67125803

印 刷 北京东海印刷有限公司  
经 销 各地新华书店  
版 次 2010 年 7 月第 1 版  
印 次 2010 年 7 月第 1 次印刷  
开 本 787 × 1092 1/16  
印 张 22  
字 数 350 千字  
定 价 76.00 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

## 编写组成员

主 编： 杨校生

副 主 编： 吴金城

参加编写人员： 张世惠 夏 晖 赵海翔 黎 波 孙炳智  
张国珍 孙海鸿 李晓雪 陈 刚 黄晓杰

## 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,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年中国和丹麦两国政府启动了中丹风能合作发展项目(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,本项目将项目取得的成果,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  
2010年7月

## 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



## 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,中国政府和丹麦政府实施了中国—丹麦风能合作发展项目(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。

中丹风能项目的领导机构为项目指导委员会,项目指导委员会由国家能源局、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、风电规划和风电场项目后评估、风电并网研究以及相关能力建设的培训,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执行。

由中丹项目管理办公室负责执行的相关内容为培训和项目的宣传推广活动。培训内容包括风电场运行维护和管理、融资和保险、风电并网、微观选址、海上风电技术和推广风电教育等方面。项目的宣传推广活动的内容包括大学教育的培训教材和职业技术培训教材的编写等活动。

《风电场建设、运行与管理》由苏州龙源白鹭风电职业技术培训中心组织国内风电界专家编写。本教材编写的目的是为了提提高国内风电场运行维护技术人员及管理人员的职业技能。本教材是在中丹风能合作培训项目的基础上根据有关中外专家讲课的内容加以充实完善编写完成的,本教材的出版对于学习总结国内外风电技术的先进经验,提高我国风电员工的运行维护和管理能力,推动中国风电事业的发展将起到一定的作用。

本书的编写工作由龙源电力集团杨校生总工程师完成整体结构安排和编写要求并审定全书。第一章由张国珍编写；第二章、第四章由黎波编写；第三章由吴金城编写；第五章由张世惠编写；第六章由夏晖编写；第七章由赵海翔编写；第八章由孙海鸿、李晓雪、陈刚、黄晓杰共同编写；第九章由孙炳智编写，全书由吴金城统稿。

本教材在编写过程中得到了中丹项目办公室董路影主任、胡涓、欧阳昕和风电界资深专家王斯永、宣安光、戴慧珠、薛桁、谢宏文等的大力支持和帮助，在此一并表示诚挚的感谢！

由于时间仓促，本书在编写过程中难免有疏漏之处，希望各位读者给予谅解并欢迎读者不吝指正。

更多相关技术参考资料可登录以下网站查询：

中国风力发电工程信息网：<http://www.windpower.org.cn>

中丹风能发展项目网址：[www.dwed.org.cn](http://www.dwed.org.cn)

苏州龙源白鹭风电职业技术培训中心

2010年8月

# 目 录

<b>第 1 章 风电发展概述</b> .....	1
<b>1 风力发电的意义</b> .....	1
1.1 提供国民经济发展所需的能源 .....	1
1.2 减少温室气体排放 .....	2
1.3 减少二氧化硫排放 .....	2
1.4 提高能源利用效率,减轻社会负担 .....	2
1.5 增加就业机会 .....	3
<b>2 风能开发利用的历史与现状</b> .....	3
2.1 早期的风能利用历史 .....	3
2.2 风力机的种类和发展过程 .....	4
2.3 世界风电的发展状况 .....	13
2.4 中国风电的发展状况 .....	15
2.5 风力发电机组的发展状况 .....	17
2.6 海上风电场的兴起 .....	22
<b>第 2 章 风能资源和风电场</b> .....	24
<b>1 风的形成</b> .....	24
1.1 大气环流 .....	24
1.2 季风环流 .....	26
1.3 局地环流 .....	26
1.4 风能分布实例 .....	28
1.5 我国的风能资源分布 .....	29

2	风的描述	35
2.1	风速	35
2.2	风向	37
2.3	风能和风功率密度	38
2.4	空气密度	39
2.5	粗糙度和风切变指数	40
2.6	湍流强度	42
3	风的测量	43
3.1	测风系统的组成	43
3.2	测风设备	43
3.3	测风需要注意的问题	44
4	风能资源评估和风电场	45
4.1	风能资源评估	45
4.2	机组选型	45
4.3	发电量计算	47
4.4	微观选址	49
<b>第3章 风力发电机组技术</b>		<b>53</b>
1	风力发电机组的结构与分类	53
1.1	风力发电机组的分类	53
1.2	风中的能量	53
1.3	阻力型风电机	55
1.4	升力型风电机	56
1.5	变桨变速带齿轮箱风电机的结构	62
1.6	变桨变速直驱型风电机	63
2	叶片	65
2.1	叶片的基本概念	65
2.2	叶片的设计与制造	66
2.3	叶片结构	66

## 目 录

3	齿轮箱	68
4	发电机	69
4.1	发电机原理	69
4.2	双速异步发电机	71
4.3	双馈式异步发电机	72
4.4	电励磁同步发电机	74
4.5	永磁同步发电机	74
4.6	风力发电机组对发电机的总体要求	75
5	液压系统	76
5.1	液压系统原理	76
5.2	定桨距风力发电机组的刹车机构	78
5.3	变桨距风力发电机组的液压系统	80
6	偏航系统	88
6.1	偏航的构成及原理	89
6.2	偏航系统的技术特点	91
6.3	偏航位置传感器	91
7	风电机的控制系统	93
7.1	控制系统框图	93
7.2	控制组成	93
7.3	变速恒频控制系统	94
7.4	控制系统中的传感器	99
7.5	控制系统中的现场总线	101
7.6	安全链	104
<b>第 4 章 风电场建设</b>		<b>108</b>
1	风电场前期工作	108
1.1	风能资源评价	108
1.2	风电场工程规划	108
1.3	风电场工程预可行性研究	108
1.4	风电场工程可行性研究	108

2	招标	109
3	风电场施工	110
4	风电场后评估	110
4.1	定义	110
4.2	风电场风资源部分后评估	111
<b>第 5 章</b>	<b>风电场运行</b>	<b>114</b>
1	概述	114
2	风电场运行方式	114
2.1	正常运行方式	114
2.2	调度运行方式	117
2.3	运行方式的优化	118
3	风电场运行管理	118
3.1	风电设备运行技术要求	118
3.2	风电场运行管理要求	120
3.3	风电场日常故障和缺陷处理	124
3.4	风电场运行数据统计分析	132
3.5	运行成本费用分析	133
3.6	风电场运行定值管理	134
3.7	风电场变电系统	137
3.8	风电场二次系统	148
3.9	预防性试验	148
3.10	风电场可靠性管理	152
<b>第 6 章</b>	<b>风电机组检修与维护</b>	<b>162</b>
1	风电机组的维护	163
2	风电机组维护、检修的内容	164
2.1	风力发电机组的组成	164
2.2	风力发电机组维护检修的主要内容	164

3 维护检修的方式.....	165
3.1 紧固力矩检查 .....	165
3.2 仪表检查 .....	166
4 质量控制与工艺流程 .....	168
4.1 质量控制 .....	168
4.2 维护检修管理的内容 .....	169
5 故障实例分析(Gamesa G52/58 机组) .....	170
5.1 Gamesa G52/58 机组传动装置简介 .....	170
5.2 传动系统(Gamesa G52/58)常见故障 .....	171
5.3 故障分析实例 .....	173
5.4 总结 .....	182
5.5 建议 .....	183
<b>第 7 章 风电场接入系统 .....</b>	<b>184</b>
1 电力系统概述 .....	184
1.1 电力系统的组成 .....	184
1.2 电力系统的基本概念 .....	185
1.3 电力系统的运行 .....	185
2 风电场的并网方式 .....	187
2.1 风电场电气设备 .....	188
2.2 风电场接入电力系统 .....	189
3 风电并网若干技术问题及解决措施 .....	189
3.1 风电对系统无功电压的影响及相应的解决措施 .....	190
3.2 风电带来的电能质量问题 .....	197
3.3 风电机组暂态特性及对系统暂态稳定性的影响 .....	201
3.4 风电接入对系统备用的影响 .....	205
4 接入系统的技术要求 .....	207
4.1 风电场有功功率 .....	208

4.2	风电场功率预测	208
4.3	风电场无功配置	208
4.4	风电场电压	209
4.5	风电场运行频率	210
4.6	风电场低电压穿越	210
4.7	风电场电能质量	211
<b>第 8 章</b>	<b>风电场安全技术及要求</b>	<b>212</b>
1	安全生产的重要性	212
1.1	安全生产的定义	212
1.2	安全生产实质	212
1.3	安全生产的重要性的体现	213
1.4	现代安全生产的趋势和要求	214
2	风电场安全生产目标	214
3	风电场安全生产责任制	215
3.1	风电场运行正值的主要安全职责	215
3.2	风电场运行副值的主要安全职责	216
4	风电场安全生产体系建设及运作	216
4.1	风电场安全生产保障体系的建设	216
4.2	安全生产保障体系的运作	219
4.3	风电场监督体系的建设	220
4.4	风电场监督体系的运作	220
5	风电场现场的主要工作内容	221
5.1	设备的检修、维护及年度预试	221
5.2	倒闸操作及“两票三制”落实	221
5.3	外来施工人员的安全教育和监督	222
5.4	安全工器具管理	222
5.5	落实春、秋季安全大检查自查整改工作	222
5.6	交通安全管理	222



## 目 录

5.7	消防安全管理	223
5.8	事故预想和反事故演习	223
5.9	“两措”计划的落实	223
5.10	电气“五防”管理的落实	223
5.11	防火、防潮、防冰冻、防台、防雷、防尘、防小动物等 措施落实	223
5.12	备品配件管理	223
5.13	档案管理	223
5.14	技术监督	224
5.15	劳动互保	224
5.16	设备管理	224
5.17	主要生产运行记录和报表	224
5.18	安全教育和培训	224
6	“两票三制”工作要求和方法	224
6.1	操作票	225
6.2	工作票	229
6.3	交接班制度	235
6.4	定期切换试验制度	237
6.5	巡回检查制度	237
7	应急预案体系建设	239
8	风电场安全性评价工作	239
9	高空作业防坠落保护装置与使用方法	240
9.1	防坠落个人保护装置	240
9.2	防坠落个人保护系统	241
9.3	救援	247
9.4	个人防护装备的用户指南,运行寿命,维修和储存	250
<b>第 9 章 风电场经济分析</b>		<b>252</b>
1	概述	252
1.1	建设项目经济评价	252