



山东电力建设第二工程公司

Shandong Electric Power Construction No.2 Company

风力发电工程施工与验收

(第二版)

山东电力建设第二工程公司 组织编写
杨静东 主 编



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

风力发电工程施工与验收

(第二版)

山东电力建设第二工程公司 组织编写
杨静东 主 编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

近年来,中国风电呈现出爆发式增长趋势,逐步成为风电设备制造大国,风电装机容量已占世界第一位,为了总结在快速发展中的施工经验,促进中国由风电大国向风电强国转变而再版此书。本书从世界和中国风力发电发展的新形势和风电基础知识入手,介绍了风力发电场及其控制系统,并重点介绍了风力发电工程的施工准备、工程管理、施工安全与环境保护、风力发电机组的基础工程施工、风力发电机组安装、风电场电气工程安装、风电场的调试和试运行、风力发电场项目建设工程验收、风力发电工程文件管理与竣工移交资料编制等全部施工内容和管理环节,涉及风力发电工程施工的全过程;最后还通过两个典型工程实例,全面展示现代风电场的规范化施工过程。

本书可供从事风力发电工程投资建设开发、设计、施工单位的工程技术人员和管理人员查阅、借鉴使用,还可作为相关技术和管理人员的培训教材,并且可供大专院校能源及电力类相关专业师生学习、参考。

图书在版编目(CIP)数据

风力发电工程施工与验收 / 杨静东主编; 山东电力建设第二工程公司组织编写. -- 2版. -- 北京: 中国水利水电出版社, 2013.6
ISBN 978-7-5170-0959-7

I. ①风… II. ①杨… ②山… III. ①风力发电—工程施工②风力发电—工程验收 IV. ①TM614

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第125918号

审图号: GS (2013) 1170 号

书 名	风力发电工程施工与验收 (第二版)
作 者	山东电力建设第二工程公司 组织编写 杨静东 主编
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京嘉恒彩色印刷有限责任公司
规 格	184mm×260mm 16开本 30印张 712千字
版 次	2009年3月第1版 2009年3月第1次印刷 2013年6月第2版 2013年6月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	86.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

《风力发电工程施工与验收》第二版

编 委 会

主 任：张士涛 肖 英

副 主 任：赵秀华 岳增智 侯端美 刘云雷 杨静东 张维强

委 员：肖玉桥 张荣强 蔡国军 卢相军 郑长利 刘恩江
朱育才

主 编：杨静东

副 主 编：郑长利 张维强 刘恩江 朱育才

参 编：方 明 王凤安 杨新奇 李 玉 张少华 陈西义
周宏伟 吕玉善 赵成玉 季新元 张彩祥 曲 日
张守峰 李茂果 张 辉 刘作鹏 张建中 张新国
巩 磊 刘向晨 李 丽 李丰玉 李 斌

统 稿：朱育才

第二版前言

最近几年，中国风电产业出现了强劲的爆发式增长。到 2012 年末，我国并网风电装机容量已超过 7500 万 kW，预计 2015 年风电装机容量将超过 1.4 亿 kW。中国已经具备了大型风电设备制造能力，是风电设备制造大国和风电装机容量世界第一的国家，初步建立起包括风电整机、零部件在内的风电研发体系和产业配套体系，成为名符其实的风电大国。

这一伟大成就，包括了风电设备制造和风电场建设两个方面，足以使国人感到自豪。虽然中国风电事业发展迅速但还存在着一些问题。中国风电产业在精细化和成熟度上还远远没有达到世界先进水平，离风电强国还有一段不小的距离；中国的风电产业尚处于粗放式经营阶段，存在着管理水平不高、劳动生产率偏低、标准化不健全、工艺流程和产品质量粗糙、产能过剩等一系列问题；风电并网及消纳还受电力市场制约。

改革开放 30 多年来，中国人民创造了无数个奇迹，使得国家变成经济总量居世界第二位的世界强国。难道风电产业发展中存在的问题就能阻挡风电前进的步伐？就能阻挡风电强国目标的实现？我们惊喜地看到，在国家调整经济结构、转变发展方式的指引下，在党的走“建创新型国家”和风电路线图发展规划愿景鼓舞下，中国风电设备制造业已经发生了可喜的变化。产品质量不断提高，经营不断改善，向着创新的目标迈开了大步，中国在风电设备制造业中已有 4 家跻身于世界十大制造商行列。

中国的风电场建设也与时俱进地在发展着，有了好设备，施工安装的速度和质量就会大大提高，风电场一年建一个“风电三峡”的奇迹就会不断延伸。

风电场工程施工是一门专业科学，是与风电设备制造业并蒂产生的“双胞胎”，中国有了世界著名的风电设备制造业，相应地，风电施工企业的施工要求也越来越标准化、规范化。

为了进一步促进中国风电向大而强的方向发展，特将本书编委会 2009 年出版的《风力发电工程施工与验收》一书修订再版，第二版借鉴了最新的风电工程规范化施工的经验，基本内容绝大部分进行了更新。本书在介绍当前风力发电技术与工程基础知识基础上，重点介绍了现代风力发电的规范化施

工与验收，同时，还通过描述山东半岛蓝色经济区潮间带和山地两个典型风电场的施工工艺流程以加深读者对各知识点的理解与掌握。

在编写过程中，得到了山东电力建设第二工程公司及新能源分公司、大唐、华能、国电、华电国际、华润等集团公司风电公司（新能源）、山东电力工程咨询院、河北电力设计院等单位的大力支持，在此一并向他们表示感谢！

由于作者水平有限，加之时间仓促，书中疏漏或不妥之处在所难免，请读者予以指正。

作者

2013年3月10日

第一版前言

能源是经济社会发展的重要物质基础，要实现2020年我国GDP翻两番的宏伟目标和国民经济的持续增长，仅靠常规能源难以解决能源和电力短缺的瓶颈问题。占电力供应70%的煤电燃料——煤炭，探明的剩余开采储量为1390亿t，按2003年开采速度16.67亿t/a，仅能维持83年，还将带来严重的环境污染。我国的石油资源不足，天然气资源也不够丰富，天然铀资源短缺。我国水能资源可开发量为4.02亿kW，年发电量为1.7万亿kW·h，再经过20~30年的开发，基本被开发完，仅靠水能也解决不了我国的电力短缺问题。

风能是取之不尽、用之不竭、不污染环境、不破坏生态的可再生能源之一，风力发电是目前可再生能源中各种技术发展最快、技术最为成熟、具有大规模开发和商业化前景的能源。发展风力发电可促进优化能源结构，保障能源安全，缓解能源利用造成的环境污染；促进节能减排；促进能源与经济、能源与环境保护的协调发展；是建设资源节约型、环境优良型社会和实现可持续发展的重要途径；是一项推动国家能源经济变革的重要选择；将为电力工业技术创新和电力工业技术调整发挥重要作用。

我国风能资源丰富，储量32亿kW，可开发的容量2.53亿kW，居世界首位。国家十分重视风力发电事业，大力扶持发展风力发电。近年来风电规划、设计、施工能力逐步加强，风电设备制造国产化的步伐逐步加快，推动了我国风电事业的大发展。2007年累计风电装机容量已达6050MW，较2006年增长1.33MW，增速居世界之冠，成为世界第五大风力发电国。

在国家风力发电迅速发展，一支支风电建设的施工队伍也异军突起，成为电力建设的生力军。其中有的队伍有丰富的火电、核电施工经验，近年来，他们又抓住中国能源电力转型，进入风电时代的机遇，组织力量进入了风力发电的施工领域，创出了新的业绩。

为了促进风力发电建设更好更快的发展，培养施工队伍，提高风力发电机组安装质量，规范施工工艺，推进技术创新，本书编委会根据国内有关风力发电场工程的施工实际、有关设计及设备资料，结合传统的电力建设、施工、监理、验收等通用经验，并参考了出版的有关文献、报告，编写了此书。

鉴于风力发电场工程施工建设是一门专业科学，有它自己的完整体系。在编写中力求从世界和我国风力发电建设的新形势入手，介绍了风力发电机组和风电场的基本结构、特点，并重点介绍了风力发电工程施工管理、技术管理、风力发电机组吊装、各项建构筑物、升压站、架空及电缆集电线路施工、质量管理、工程质量验收、工程监理及施工技术档案编制等全部施工内容和管理环节，体现了风力发电工程施工的全过程。

本书在编写过程中，山东电力集团公司、山东电力建设第二工程公司、山东电力工程咨询院、山东诚信监理公司等单位的领导、专家给予了大力支持，山东电力建设第二工程公司风电分公司的施工技术人员提供了宝贵的资料，并参加了编写工作，在此一并谨表谢意！

由于作者水平有限，加之时间仓促，书中内容的疏漏或不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

作者

2009年1月

目 录

第二版前言

第一版前言

第一篇 风力发电技术与工程基础知识

第一章 风力发电发展的新形势	3
第一节 风及风能	3
第二节 世界风电的发展	4
第三节 中国风电的发展	12
第四节 海上风力发电发展概况	19
第二章 风力发电机组与风力发电场	38
第一节 风力发电机组的结构原理	38
第二节 大型风力发电机组的典型结构	42
第三节 风力发电机组的运行方式及调节	44
第四节 风力发电场的组成及设备	59
第五节 风电场与电网的并网	84
第六节 风电场的防雷与接地	113
第三章 风力发电机组控制系统	144
第一节 控制系统概述	144
第二节 控制功能和参数	151
第三节 安全保护系统	160
第四节 监控和安全处理	165
第五节 远程监控系统	172

第二篇 现代风力发电规范化施工与验收

第四章 风力发电工程的施工准备	181
第一节 施工技术准备	181
第二节 施工组织机构设置和人力资源计划	182
第三节 工程进度计划的编制	184
第四节 施工总平面布置和力能供应	197
第五章 工程管理	201

第一节	施工技术管理	201
第二节	工程质量管理	212
第三节	现场文明施工管理	225
第四节	工程材料设备与施工机械的管理	227
第六章	施工安全与环境保护	233
第一节	职业安全健康管理体系	233
第二节	环境管理体系	249
第三节	施工消防管理	255
第七章	风力发电机组的基础工程施工	257
第一节	基础工程施工概述	257
第二节	围堰和道路工程施工	258
第三节	灌注桩（桩基）施工	265
第四节	风机基础工程施工	270
第五节	集电线路基础施工	282
第六节	冬季施工措施	292
第八章	风力发电机组安装	298
第一节	施工准备	298
第二节	风机机务安装	309
第九章	风电场电气工程安装	323
第一节	单台风机电气安装	323
第二节	35kV 架空线路及 35kV 配电装置安装	325
第三节	升压站电缆敷设	329
第四节	主变压器和 220kV 配电装置安装	331
第五节	风电场防雷接地施工	336
第六节	电气工程冬季施工	339
第十章	风电场的调试和试运行	342
第一节	风力发电机组调试程序和措施	342
第二节	风力发电机组试运行	348
第十一章	风力发电场项目建设工程验收	358
第一节	风力发电工程的质量监督检查	358
第二节	风力发电场工程 4 个阶段验收、验收组织与依据	366
第三节	单位工程完工验收	368
第四节	工程启动试运验收	376
第五节	工程移交生产验收	380
第六节	工程竣工验收	381

第十二章 风力发电场工程文件管理与竣工移交资料编制..... 384

第一节 风电工程文件资料管理 384

第二节 风电工程竣工移交资料的编制 386

第三节 风电工程单位工程划分和单位工程竣工资料编制示例 392

第三篇 风力发电工程施工与验收典型实例

第十三章 潮间带风电场..... 429

第一节 工程概述 429

第二节 工程施工情况 435

第三节 安全文明施工的样板工程 436

第四节 全过程工程创优控制 437

第五节 各专业简介 438

第十四章 山地风电场..... 440

第一节 工程概述 440

第二节 施工方案 442

第三节 土石方工程 443

第四节 基础施工 449

第五节 风机吊装 453

参考文献 465

第一篇

风力发电技术与工程基础知识



第一章 风力发电发展的新形势

第一节 风 及 风 能

一、风

(一) 风的形成

风是人类最熟悉的一种自然现象，风无处不在。地球被一个数公里厚的空气层包围着，地球上的气候变化是由大气对流引起的。大气对流层的厚度约可达 12km，由于地球上各纬度接受的太阳辐射强度不同，造成地球表面大气层受热不均，引起大气密度不同，压力分布不均。赤道和低纬度地区，太阳辐射强度大，地面和大气接受的热量多，温度较高；高纬度地区，日照时间短，地面和大气接受的热量少，温度低。这种高纬度与低纬度之间的温度差异，形成南北之间的气压梯度，使空气做水平运动，风沿着垂直于等压线方向从高压向低压吹，地球自转使空气水平运动产生地转偏向力，也影响空气的运动。在不均压力作用下，造成空气对流运动，空气沿水平方向运动就是风。风的形成是空气流动的结果。风除了受上述两种力的支配外，还受海洋、地形的影响，使风速增大或减小。

(二) 风向与风速

风向和风速是描述风特性的两个重要参数，风向是指风吹来的方向，如果风从北方吹来，就称为北风，从东方吹来，就称为东风。风速是表示风移动的速度，即单位时间空气流动所经过的距离，用 m/s 表示，即每秒钟多少米。

地球上风的方向和速度的时空分布随时都在变，非常复杂。

二、风能

(一) 21 世纪最主要的能源

地球上可供人类使用的化石燃料资源是极有限和不可再生的。根据江泽民同志 2008 年 4 月 3 日发表的《对中国能源问题的思考》重要文章指出：“截至 2006 年底，世界煤炭探明剩余可采储量 9091 亿 t，按目前生产水平可供开采 147 年。与煤炭相比，世界常规石油和天然气资源相对较少，采储比 20 年来始终保持 40 年和 60 年的水平”。科学家预计，21 世纪的最主要能源将是核能、太阳能、风能、地热能、海洋能、氢能和可燃冰。

(二) 风能是最具活力的可再生能源

空气流动形成的动能称为风能，风能是太阳能的一种转化形式。

风能是一种无污染的可再生能源，它取之不尽，用之不竭，分布广泛。随着人类对生态环境的要求和能源的需要，风能的开发日益受到重视，风力发电将成为 21 世纪大规模开发的一种可再生清洁能源。风能的利用将可能改变人类长期依赖化石燃料和核燃料的



局面。

世界风能总量为 200 亿 kW，大约是世界总能耗的 3 倍。如果风能的 1% 被利用，则可以减少世界 3% 的能源消耗。风能用于发电，可产生世界总电量的 8%~9%。

(三) 风能密度

风的动能与风速的平方成正比。当一个物体使流动的空气速度变慢时，流动的空气动能部分转变成物体向上的压力能，这个物体上的压力就是作用在这个物体上的力。功率是力和速度的乘积，这也可以用于风能的功率计算，风能可用“风能密度”来描述。空气在 1s 时间里以速度 v 流过单位面积产生的动能称为风能密度，单位为 W/m^2 。因为风力与速度的平方成正比，所以风能密度与风速的 3 次方成正比。风轮从风中吸收的功率可以用下列公式来表示：

$$E = 1/2 C_p A \rho v^3$$

其中

$$A = \pi R^2$$

式中 E ——风轮输出的功率（即风能密度）， W/m^2 ；

C_p ——风轮的功率系数；

A ——风轮扫掠面积；

R ——风轮半径；

ρ ——空气密度；

v ——风速。

根据计算，平均风速为 10m/s 时，风能密度为 $600 W/m^2$ ，平均风速为 15m/s 时，风能密度为 $2025 W/m^2$ 。

第二节 世界风电的发展

一、风力发电的兴起和发展

(一) 人类利用风能历史悠久

早在公元前数世纪，我国人民就开始利用风力提水、灌溉、汲取海水晒盐和驱动帆船。公元前 200 年，波斯人也开始利用垂直轴风车碾米；10 世纪，伊斯兰人利用风车提水；到了 11 世纪风车广泛应用在中东地区；13 世纪风车传到欧洲；14 世纪风车成为欧洲不可缺少的原动机。风力磨坊是当时利用风能最具代表性的风力机械。德国人发明了可以随风向转动的磨房，1745 年荷兰人发明了旋转机头，应用于荷兰风力磨房。19 世纪的欧洲有数十万台风力提水机，风轮直径 3~5m，功率 500~1000W，可以驱动恒定转矩的水泵。历史上这些风力机械的广泛应用，使人们对风的特性有了进一步的认识，从而为利用风能发电奠定了一定的理论基础。

(二) 风力发电的起步和发展

1891 年丹麦人设计制造了世界上第一座风力发电实验站，采用蓄电池放电方式供电，获得成功，并得到推广应用。到 1910 年丹麦已建成 100 座 5~25kW 风力发电站，风力发电量占全国总发电量的 1/4。从 1891~1930 年小容量的风力发电机组技术基本成熟。



20 世纪 30 年代初开始,美国、丹麦、英国、德国等开始对技术复杂的大中型风力发电机组进行研制,渴望探索到廉价的能源。至 1973 年石油危机之前,虽然美国、丹麦、法国、英国等国试验性的研制成功 200kW 甚至 1MW 的风力发电机组,由于风轮的制造材料、刹车系统、发电价格太高等问题,始终处于科学研究阶段,主要在高校、科研单位开发研究,政府从技术储备的角度提供少量科研费。1973 年以后,风力发电作为能源多样化措施之一,列入能源规划,一些国家对风力发电以工业化试点给予政策扶持,以减税、抵税和价格补贴等经济手段给予激励,推进了风力发电工业的发展。进入 20 世纪 90 年代,一方面风力发电技术日趋成熟,风电场规模建设;另一方面全球环境严重恶化,发达国家开始征收能源税和炭税,环保对常规发电提出新的、更严格的要求。情况的变化缩短了风力发电与常规发电价格竞争的差距,风力发电开始进入商业化发展的阶段。

二、2006 年全球风电市场的发展状况

全球气候变化的严峻形势,让许多国家政府开始认识到清洁、无污染的能源的重要性。最近几年,包括中国政府在内的许多国家政府制定政策、颁布法律,以政府支持、税收减免、费用补贴等形式鼓励可再生能源的发展。风能作为一种取之不尽、节能环保的可再生能源得到很大的扶持。金融业和传统能源部门的投资者也认识到风能广阔的发展前景,积极地投入到其中。

2006 年,全球风电市场的发展已经超过其他任何种类的可再生能源。世界风电市场迅速发展,总装机容量从 1995 年 4800MW 飞速提高到 2006 年底的 74223MW,预计将在未来继续保持良好的发展势头。2006 年,欧洲市场迎来了有史以来第二个发展高峰年,美国风能市场的成长首次超过欧盟国家,成为全球发展最快的国家。中国由于新能源法的颁布也迎来了一个高速发展的年份。可以说,单纯从成长率而言,风电已经成为能源部门仅次于燃气发电的第二大热门领域。

近 10 多年来,全球风电产业一直处于持续增长态势,1995~2006 年,全球累计装机容量平均增长 28.3%,2006 年新增装机容量 1519.7 万 kW。其中,美国、德国、印度、西班牙和中国是新增装机容量前五位的国家,分别达到 245.4 万 kW、219.4 万 kW、184.0 万 kW、158.7 万 kW 和 133.7 万 kW。在全球风电产业持续快速发展过程中,欧洲风电一直处于领跑地位。按照欧洲几年前制定的发展规划,风电装机容量在前 5 年实现了 2010 年装机目标。根据欧洲风能协会预测,世界风电装机容量 2010 年为 2 亿 kW,2020 年为 12 亿 kW,2030 年为 27 亿 kW。届时风电将分别占世界电力总量的 2.26%、12% 和 21%,风电将逐渐成为主要的替代能源。

按照总装机容量排序,2006 年排在前列的国家依次是:德国(20621MW)、西班牙(11615MW)、美国(11603MW)、印度(6270MW)和丹麦(3136MW)。世界上有 13 个国家风能发电能力超过 1000MW,其中法国和加拿大在 2006 年超过这一标杆值。

三、世界风电发展态势

(一) 发展可再生能源已经是大势所趋

主要发达国家、发展中国家,都已经将发展水能、风能、太阳能等可再生能源作为应



对新世纪能源和气候变化双重挑战的重要手段。然而,除水能之外的所有可再生能源中,风能无疑是世界上公认的最接近商业化的可再生能源技术之一,与太阳能、生物质能相比,风能的产业化基础最好,经济性优势最明显,而且不存在生物质能所面临的资源约束,另外也没有任何大的环境影响,在可预见的时间内(2030~2050年),都将是有可能大规模发展的能源资源之一。

在不考虑常规电力的环境成本情况下,根据目前的风电技术水平,风电成本仍高于常规电力成本,因此许多国家采取了诸如价格、市场配额、税收等各种激励政策,从不同的方面引导和支持风电的发展。例如,德国和西班牙等欧洲国家采用的长期保护性电价政策,为风电和其他可再生能源开发商提供担保的上网电价,并要求电力公司与风力发电开发商签署长期购电合同;英美等国主要采取可再生能源配额制政策,规定在总电力供应量中可再生能源应达到一个目标数量,从而为风电建立稳定的需求市场等,同时规定达标责任人;风电价格由市场决定,该政策与政府的发展规划结合,形成一个持续性的政策机制;另外,建立公共效益基金,支持风力发电的发展,该基金是风能和其他可再生能源发展的一种融资机制,通常采用电费加价的方式来筹集,此政策被许多国家采用;此外,美国有些州还减免生产税,减少风电开发的成本;荷兰采取绿电交易的方式,从不同的角度引导和支持风电的发展。总之,鼓励风电的发展政策有很多种,这些政策的力度和范围也有所差别,但这些政策都明确表明风电的非常规待遇。而且,在气候变化压力不断加大的情况下,发展以风电为代表的可再生能源,已成为各国应对未来能源和气候变化压力的策略。

(二) 2007 世界风电发展状况

在政策的鼓励下,2007年全球风电新装机容量约为2000万kW,累计装机容量9400万kW。2008年是风电发展具有标志性的一年:这一年风电成为非水电可再生能源中第一个全球装机容量超过1亿kW的电力资源。风电作为能源领域增长最快的行业,共为全球提供了近20万个就业机会,仅2006年风电场建设投资就接近170亿欧元。欧洲和美国在风电市场中占统治地位,其中德国是2007年风电装机最大的国家,装机容量超过2000万kW,美国 and 西班牙也都超过了1000万kW。

经过30年的努力,随着市场不断扩展,风电的成本也大幅度下降,风电成本由20世纪80年代初的每千瓦时20美分下降到2007年的4~6美分。在风能资源较好的地方,风电完全可以和燃煤电厂竞争,在某些地区甚至可以与燃气电力匹敌。值得注意的是,在经济性不断改善以及多重政策激励作用下,欧洲2007年新增电源中风电首次超过天然气发电,成为第一大电源(图1-1);美国2007年新增的风电装机也仅次于气电,位居第二。尽管发展风电仍然存在着各种障碍,如电网适应能力、风能资源预报水平、海上风电发展等,但在市场稳步扩张、技术和产业成熟度不断提升、与常规能源相比的经济性优势逐步凸显,特别是政策环境前景非常明朗的情况下,世界各国都对风电发展充满了信心。例如,欧美都公布了2030年风电发展目标,提出了2030年风电满足20%甚至更多电力需求的宏大目标,届时都将发展约3亿kW的规模,这也为全球风电的长期发展定下了基调。国际能源署(IEA)2008年颁布的《2050年能源技术情景》判断,2010~2050年,全球风电平均每年增加7000万kW,风电将成为一个庞大的新兴电力市场。