

## 图书在版编目(CIP)数据

风力发电机组的控制技术 / 岳志明, 杨天虎主编.  
—上海: 华东师范大学出版社, 2014. 10  
十二五创新机电一体化系列教材  
ISBN 978-7-5675-2702-7

I. ①风… II. ①岳… ②杨… III. ①风力发电机—  
机组—控制系统—高等教育—教材 IV. ①TM315

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 245497 号

## 风力发电机组的控制技术

总 主 编 吕景泉  
主 编 岳志明 杨天虎  
项目编辑 吴 余  
审读编辑 丁 倩 赵春锋  
装帧设计 创图文化

出版发行 华东师范大学出版社  
社 址 上海市中山北路 3663 号 邮编 200062  
网 址 [www.ecnupress.com.cn](http://www.ecnupress.com.cn)  
电 话 021-60821616 行政传真 021-62572105  
客服电话 021-62865537 门市(邮购)电话 021-62869887  
地 址 上海市中山北路 3663 号华东师范大学校内先锋路口  
网 店 <http://hdsdcbs.tmall.com>

印 刷 者 成都市海翔印务有限公司  
开 本 787×1092 16 开  
印 张 20.5  
字 数 437 千字  
版 次 2014 年 12 月第 1 版  
印 次 2014 年 12 月第 1 次  
书 号 ISBN 978-7-5675-2702-7/TB·090  
定 价 45.00 元

出 版 人 王 焰

(如发现本版图书有印订质量问题,请寄回本社客服中心调换或电话 021-62865537 联系)

# 目 录



|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 绪 论 风电发展介绍 .....         | 1   |
| 模块一 风特性及测量利用 .....       | 10  |
| 模块二 风能转化效率及调节 .....      | 48  |
| 模块三 并网风电系统配置及控制运行 .....  | 74  |
| 模块四 风电控制系统及其层次构架 .....   | 117 |
| 模块五 风电伺服系统及运行 .....      | 135 |
| 模块六 变速风电系统及其区域控制运行 ..... | 176 |
| 模块七 风电系统并网及电能质量提高 .....  | 215 |
| 模块八 风力发电机及其变速控制 .....    | 258 |
| 参考文献 .....               | 319 |

# 绪 论



随着煤炭、石油等资源的逐渐枯竭,人类越来越重视可再生能源的利用。

空气运动所蕴藏的动能称为风能。风能比人类迄今为止所能控制的能量要大得多。据理论计算,太阳辐射到地球的热能中约有 2% 被转变成风能,全球大气中总的风能约为  $10^{14}$  MW,其中蕴藏的可被开发利用的风能约有  $3.5 \times 10^9$  MW,这比世界上可利用的水能大 10 倍。中国风能储量大、分布面广,仅陆地上的可开发的风能储量就约  $2.53 \times 10^8$  MW。

风力发电不仅仅为人们提供电力,同时促进着经济的发展。风力发电整个过程都不产生任何污染,它既可以为人们提供电力,又可以减少燃料燃烧带来的环境污染,从而起到保护地球生态环境的作用,是真正的绿色能源。风电作为清洁的可再生能源,已成为当今世界电力生产发展的潮流和趋势。风能与其他能源相比,有明显的优点,但也有其突出的局限性。

## 1. 风能的优点

(1) 蕴藏量大:我们已知道风能是太阳能的一种转换形式,是取之不尽、用之不竭的可再生能源。根据计算,太阳至少还可以像现在一样照射地球 60 亿年左右。

(2) 无污染:在风能转化为电能的过程中,不产生任何有害气体和废料,不污染环境。

(3) 可再生:风能是靠空气的流动而产生的,这种能源依赖于太阳的存在。只要太阳存在,就可不断地、有规律地形成气流,周而复始地产生风能,可永续利用。

(4) 分布广泛、就地取材、无需运输:在边远地区如高原、山区、岛屿、草原等地区,由于缺乏煤、石油和天然气等资源,给生活在这一地区的人民群众带来诸多不便,而且由于地处偏远、交通不便,即使从外界运输燃料也十分困难。利用风能发电可就地取材、无需运输,具有很大的优越性。而且我国可利用的风力资源区域占全国国土面积的 76%。

(5) 适应性强、建设周期短、发展潜力大:一台大型风机的运输安装时间不超过三个月,万千瓦级风电场建设期不到一年,而且安装一台可投产一台;装机规模灵活,可根据资金多少来确定,为筹集资金带来便利;运行简单,可完全做到无人值守;实际占地少,机组与监控、变电等建筑仅占风电场约 1% 的土地,其余场地仍可供农、牧、渔使用;对土地要求低,在山丘、海边、河堤、荒漠等地形条件下均可建设,在发电方式上还有多样化的特点,既可联网运行,也可和柴油发电机等组成互补系统或独立运行,这对于解决边远无电地区的用电问题提供了现实可能性。

(6) 安全可靠的发电方式:随着大型风力发电机组的技术成熟和产品商品化的进程,相



对于太阳能等可再生能源技术要更加成熟,成本也更低,对环境破坏更小。

### 2. 风能的局限性

(1)能量密度低:由于风能来源于空气的流动,而空气的密度很小,因此风力的能量密度很小,只有水力的 1/816。

(2)不稳定性:由于气流瞬息万变,风时有时无,时大时小,日、月、季、年的变化都十分明显。

(3)地区差异大:由于地形变化,地理纬度不同,因此风力的地区差异很大。两个近邻区域,由于地形的不同,其风力可能相差几倍甚至几十倍。

## 一、世界风电现状

世界上第一台用于发电的风力机于 1891 年在丹麦建成。风电技术经过开发日臻成熟,使得商业化机组的单机容量扩大,风电成本降低,运行可靠性和发电成本接近常规火电,风力发电迅速发展成为新兴规模产业。目前风力机之最为美国 GE 公司的“超级风力机”,单机功率为 7.3 MW,风车直径为 112 m。

2014 年 2 月 5 日,全球风能理事会(GWEC)发布 2013 年全球风电统计快报数据。截至 2013 年底,全球风电累计装机容量达到  $3.18 \times 10^8$  kW,排名前五位依次为中国、美国、德国、西班牙、印度。2013 年,全球新增风电装机  $3.547 \times 10^7$  kW。新增装机容量排名前五位国家分别是中国、德国、英国、印度、加拿大。2013 年全球累计及新增规模前十国如下表所示。

表 0-1 2013 年全球累计及新增规模前十国情况

| 2013 年新增装机 |      |                       | 2013 年累计装机 |     |                       |
|------------|------|-----------------------|------------|-----|-----------------------|
| 排名         | 国家   | 容量( $\times 10^4$ kW) | 排名         | 国家  | 容量( $\times 10^4$ kW) |
| 1          | 中国   | 1610                  | 1          | 中国  | 9142                  |
| 2          | 德国   | 324                   | 2          | 美国  | 6109                  |
| 3          | 英国   | 188                   | 3          | 德国  | 3425                  |
| 4          | 印度   | 173                   | 4          | 西班牙 | 2296                  |
| 5          | 加拿大  | 160                   | 5          | 印度  | 2015                  |
| 6          | 美国   | 108                   | 6          | 英国  | 1053                  |
| 7          | 巴西   | 95                    | 7          | 意大利 | 855                   |
| 8          | 波兰   | 89                    | 8          | 法国  | 825                   |
| 9          | 瑞典   | 72                    | 9          | 加拿大 | 780                   |
| 10         | 罗马尼亚 | 70                    | 10         | 丹麦  | 477                   |

## 二、我国风电现状与发展

2013 年,中国(不包括台湾地区),新增装机容量  $1.610 \times 10^4$  MW,同比增长 24.1%;累计装机容量  $9.140 \times 10^4$  MW,同比增长 21.4%。新增装机和累计装机两项数据均居世界第一。



2013 年全国风电累计装机最多的省区依次是内蒙古( $2.027 \times 10^4$  MW),河北( $8.5 \times 10^3$  MW),甘肃( $7.100 \times 10^3$  MW)和山东(约  $7.000 \times 10^3$  MW)。从长远来看,2012 年国家能源局发布了《风电发展“十二五”规划》,提出我国到 2015 年风电并网装机达到  $1 \times 10^5$  MW,年发电量达到  $1.900 \times 10^{11}$  kW·h,风电发电量在全部发电量中的占比超过 3%。预计 2020 年达到  $2 \times 10^5$  MW,其中海上风电装机容量达到  $3.0 \times 10^7$  kW,风电年发电量达到  $3.9 \times 10^8$  MW,力争风电发电量在全国发电量中的占比超过 5%。按地区来说,发展突出的为华北、西北、东北及华东地区。

大型基地建设成果显著。截至 2013 年底,全国统筹推进的各大型风电基地累计核准容量 19 GW(酒泉基地一期、二期工程 6.8 GW,张家口基地一期、二期工程 3 GW,承德基地一期 1 GW,通辽开鲁基地 1.5 GW,巴彦淖尔乌拉特中旗基地 2.1 GW,包头达茂旗基地 1.6 GW,哈密东南部百万基地 2 GW,甘肃民勤红沙岗基地 1 GW)。

其中,全部完成建设的风电基地有酒泉基地一期工程(3.8 GW)和张家口基地一期工程(1.35 GW);核准在建的基地有达茂旗基地(在建 1.4 GW)、酒泉基地二期工程(在建 3 GW)、张家口基地二期(在建 100 MW)、承德基地一期(在建 400 MW)、通辽开鲁基地(在建 600 MW)、巴彦淖尔乌拉特中旗风电基地(在建 1.8 GW)、哈密东南部百万基地(在建 1.4 GW)以及甘肃民勤红沙岗基地(在建 1 GW)。

### 三、中国风电产业发展新趋势

中国风力发电已经开展了多年,随着中国能源环境的变化和风力发电产业的成熟,“十二五”期间,中国风力发电产业将呈现新的发展趋势。

#### (1) 风力发电成本将大幅降低

根据美国国家可再生能源实验室 NREL 的统计,1980 年至 2005 年间,风力发电的成本下降超过 90%,下降速度快于其他几种可再生能源形式。根据丹麦 RIS 国家研究实验室对安装在丹麦的风力发电机组所进行的评估,1981~2002 年间,风力发电成本由 15.8 欧分/(kW·h)下降到 4.04 欧分/(kW·h),预计 2010 年度电成本下降至 3 欧分/(kW·h),2020 年降低至 2.34 欧分/(kW·h)。目前美国联邦政府规定,可再生能源每发 1(kW·h)电可减 1.5 美分的税。

从统计数据看,我国风电上网电价比常规水电和火电厂高出许多,风电利用小时数约在 2000 至 3000 小时左右,仅为火电的一半。新疆常规火电上网平均电价在 0.25 元/(kW·h)左右,而风电则平均达到 0.6 元/(kW·h)以上。

另外,虽然风电每千瓦平均造价已从 1 万元降到 8 千元左右,但仍远高于火电的 4 千元/kW 造价,建设一座装机 100 MW 的风电场,约需 8 亿元以上,而建设同样规模的火电厂约为 4 亿元至 5 亿元。

风力发电相对于太阳能、生物质等可再生能源技术更为成熟、成本更低、对环境破坏更小。在过去 20 多年里,风力发电技术不断取得突破、发展、进步,规模经济性日益明显,风力



发电机组也将越来越高效与便宜。风力发电机组的单机容量增大,基础设施的成本也就会相对地减少。随着开发商的经验越来越丰富,项目开发的成本也得到降低。风力发电机组可靠性的提高也减少了运行维护的平均成本。

### (2) 技术装备国产化比例提高

加大风力发电机组的国产化力度,一方面可为风力发电场建设采用国产设备提供优质廉价的选择;另一方面,也可使国外同类企业在参与我国市场竞争时大幅度降低产品价格。同时,可提高我国风力发电装备的制造能力和技术水平,降低风力发电成本,提高市场竞争能力,为推动我国风力发电技术大规模商业化发展奠定基础。

风力发电技术装备国产化的指导思想是以市场为导向,以工程为依托,在引进消化吸收国际先进技术的基础上,进行创新提高,开发具有自主知识产权的风力发电设备。

2013 年中国风电整机供应商(指当年在市场上出售/安装一台样机以上的风电整机制造企业)一共 29 家,与上年基本持平。从产能来看,可以满足国内市场每年 20 GW 以上的装机需求。

2013 年,中国风电新增装机容量排名前 15 位的企业占据了国内约 90% 的市场份额,其中最大的整机供应商是金风科技,2013 年装机 3750.25 MW,占全国新增装机容量的 23.31%。排名第二位的是联合动力,新增装机 1487.5 MW,市场份额 9.25%,第三名是明阳风电,新增装机 1286 MW,市场份额 7.99%。远景能源上升较快,装机容量由上年的 544 MW 增加到 1128.1 MW,市场排名由第七位上升到第四位。见表 0-2。

表 0-2 2013 年中国新增风电装机市场排名

| 序号 | 单位名称 | 装机容量(MW) | 市场份额   |
|----|------|----------|--------|
| 1  | 金风科技 | 3750.25  | 23.31% |
| 2  | 联合动力 | 1487.5   | 9.25%  |
| 3  | 明阳风电 | 1286     | 7.99%  |
| 4  | 远景能源 | 1128.1   | 7.01%  |
| 5  | 湘电风能 | 1052     | 6.54%  |
| 6  | 上海电气 | 1014     | 6.30%  |
| 7  | 华锐风电 | 896      | 5.57%  |
| 8  | 重庆海装 | 786.7    | 4.89%  |
| 9  | 东方电气 | 573.5    | 3.56%  |
| 10 | 浙江运达 | 538.75   | 3.35%  |
| 11 | 维斯塔斯 | 507.7    | 3.16%  |
| 12 | 沈阳华创 | 474      | 2.95%  |
| 13 | 株洲南车 | 343.45   | 2.13%  |
| 14 | 浙江华仪 | 314.1    | 1.95%  |
| 15 | 太原重工 | 293      | 1.82%  |
|    | 其他单位 | 1643.65  | 10.22% |
|    | 合计   | 16088.7  | 100%   |



从零部件生产来看,发电机、变速箱、叶片已国产化,技术水平和产品质量与国外进口部件的差距不断缩小。随着国内生产生产工艺的稳定与成熟、生产效率的提高,国外生产商的垄断地位被打破,主轴轴承以及齿轮箱、发电机的精密轴承大量依赖进口的局面逐步缓解。

风力发电机主要部件由叶片、齿轮箱、发电机、控制系统、变流器、塔架、偏航系统、轮毂、变桨系统和主轴等几部分组成,而风力发电机组中各部分零部件占总装机成本的比例如表 0-3 所示。

表 0-3 风力发电机组中各部分零部件占总装机成本的比例分布

| 部件名称 | 占总成本比例 | 部件名称  | 占总成本比例 | 部件名称 | 占总成本比例 |
|------|--------|-------|--------|------|--------|
| 叶片   | 23.3%  | 塔筒    | 18.9%  | 齿轮箱  | 16.2%  |
| 变流器  | 7.3%   | 控制系统  | 5.0%   | 变桨系统 | 3.9%   |
| 变压器  | 3.59%  | 发电机   | 3.4%   | 轮毂   | 3.0%   |
| 机架   | 2.8%   | 主轴    | 2.2%   | 偏航系统 | 2.0%   |
| 机舱罩  | 1.9%   | 热交换系统 | 1.3%   | 轴承   | 1.22%  |
| 螺栓   | 1.04%  | 电缆    | 0.96%  | 制动系统 | 0.6%   |

到目前为止,外国风机制造商主要有 NEG、Vestas、Nordex、Gamesa、MADE、Nedwind、Zond、Bonus、Bazan-Bonus、AN Bonus、HSM-250T、Tacke、Dewind、Jacobs、Windmaster、AWT-275、US、Darrious、Newind、Aeroman、Wincon 等,而国内风力发电机组零部件制造主要企业如表 0-4 所示。

表 0-4 国内风力发电机组零部件制造主要企业

| 制造商              | 叶片 | 齿轮箱 | 发电机 | 电控设备 | 偏航系统 | 塔架 |
|------------------|----|-----|-----|------|------|----|
| 中航(保定)惠腾风电设备有限公司 | ◆  |     |     |      |      |    |
| 上海玻璃钢研究所         | ◆  |     |     |      |      |    |
| 重庆齿轮箱有限责任公司      |    | ◆   |     |      |      |    |
| 南京高速齿轮箱厂         |    | ◆   |     |      |      |    |
| 杭州前进齿轮箱集团有限公司    |    | ◆   |     |      |      |    |
| 上海电机厂有限公司        |    |     | ◆   |      |      |    |
| 杭州发电设备厂          |    |     | ◆   |      |      |    |
| 永济电机厂生产发电机       |    |     | ◆   |      |      |    |
| 湘潭电机集团有限公司       |    |     | ◆   |      |      |    |
| 中科院电工所           |    |     |     | ◆    |      |    |
| 新疆工学院            |    |     |     | ◆    |      |    |



(续表)

| 制造商              | 叶片 | 齿轮箱 | 发电机 | 电控设备 | 偏航系统 | 塔架 |
|------------------|----|-----|-----|------|------|----|
| 浙江运达风电公司         |    |     |     | ◆    |      |    |
| 金风科技股份公司         |    |     |     | ◆    |      |    |
| 徐州罗特艾德回转支撑公司     |    |     |     |      | ◆    |    |
| 浙江乐清机械厂          |    |     |     |      | ◆    |    |
| 洛阳轴承厂            |    |     |     |      | ◆    |    |
| 浙江瑞安泰胜电力工程机械有限公司 |    |     |     |      |      | ◆  |
| 青岛电站辅机厂          |    |     |     |      |      | ◆  |
| 沈阳重型机械厂          |    |     |     |      |      | ◆  |
| 中石油第七公司金属结构厂     |    |     |     |      |      | ◆  |

风电价格与成本方面:在 2009 年的内蒙古/河北百万 kW 风电基地机组设备招标中,国外企业的报价均在 6800~7600 元/kW 左右,国内企业的报价则为 5300~5500 元/kW。一个 200 MW 的风电项目,如果采用国外设备,投资额要高出 3 亿元以上。再加上维护检修及备品备件等成本,国外机组的综合成本要明显高于国内机组。

实现风力发电机组国产化率 70%,预计可降低风力发电机组成本 15%,在不改变其他条件的前提下,可使风力发电成本降至 0.375 元/(kW·h)。如全部实现风力发电机组国产化,预计可降低风力发电机组成本 30%,在不改变其他条件的前提下,可使风力发电成本降至 0.332 元/(kW·h)。为此,国家必须加大科研开发投资力度,在目前条件下以风力发电场建设投资 1.5%~3%的比例支持我国的风力发电技术科研开发和国产化是适宜的。其重要意义不仅仅在于降低风力发电成本,还将推动我国风力发电机组产业的形成,利用我们的优势走向国际市场。

## (3)海上风力发电悄然兴起并将成为重要能源形式

海上有丰富的风能资源和广阔平坦的区域,使得近海风力发电技术成为近来研究和应用的热点。

中国海上风能资源储量远大于陆地风能,估计 10 m 高度可利用的风能资源超过 7 亿 kW,而且距离电力负荷中心很近。随着风力发电的不断发展,陆地上的风力发电机的总和已经开始趋于饱和,海上风力发电场也就自然而然地成为了新的重要能源开发项目,同时也是风力发电的开发重点。不仅在中国是这样,海上发电也是近年来国际风力发电产业发展的一个新兴领域,可谓是“方向中的方向”。

截至 2013 年底,获得国家或省能源主管部门同意推进前期工作的项目共计 17 个,总规模 4098 MW,其中,江苏、河北、福建分别以 1450 MW、800 MW 以及 750 MW 列前三位。此外,全国约有 11 GW 的海上风电项目正开展预可行性研究报告编制工作,其中已有超过 7





GW 的海上风电项目预可行性研究报告编制完成。

截至 2013 年底,全国海上风电项目累计核准规模约 2220 MW,其中,已建成 390 MW (含试验机组),主要分布于江苏省和上海市,建成项目目前均已并网;核准在建项目总规模为 1830 MW,主要分布于江苏、上海和浙江。此外,山东潍坊、上海和福建福清也各有 5 MW 和 6 MW 的大容量风电机组试运行。

根据各省规划,“十二五”及 2020 年前重点规划建设上海的东海大桥、南汇、奉贤,江苏的南通、盐城南北部、连云港,山东的莱州湾、渤中、长岛、半岛北海和半岛南海,河北的唐山、沧州,广东的粤东、粤西、珠三角,浙江的杭州湾、舟山东部、象山、台州、温州,辽宁的瓦房店、花园口、庄河等海域的海上风电项目。

全国 2015 年规划建设 5 GW 海上风电,到 2020 年规划建设 30 GW 海上风电。

#### (4) 风力发电机组不断向大型化发展,成本大幅降低

随着现代风力发电技术发展的日趋成熟,风力发电机组正不断向大型化发展。大体上大型风力发电机组有两种发展模式。一种是陆地风力发电,其方向是低风速发电技术,主要机型是 2~5 MW 的大型风力发电机组,这种模式关键是向电网输电。另外一种近海风力发电,主要用于比较浅的近海海域,安装 5 MW 以上的大型风力发电机,这种模式的主要制约因素是风力发电场的规划和建设成本,但是近海风力发电的优势是明显的,即不占用土地,海上风力资源较好。2002 年前后,国际风力发电市场上主流机型已经达到 1.5 MW 以上。目前,欧洲已批量安装 3.6 MW 风力发电机组,美国已研制成功 7 MW 风力发电机组,而英国正在研制巨型风力发电机组。目前风力发电机组的规模一直在不断增大,国际上主流的风力发电机组已达到 2~3 MW。2004 年兆瓦级风机已经成为商业化机组的主流,1.0 MW 以上的兆瓦级风机占到新增装机容量的 74.9%。2012 年达坂城安装金风科技自行研制的 4 台 GW106/3 MW 及 15 台 GW103/2.5 MW 风力发电机组,其电力、电量在新疆主电网消纳。华仪电气公告称其拟将近期增发所募资金用于开发 6 MW 风机,华锐风电已开始 10 MW 风机的研发。此外,随着风力发电技术的改进,风力发电机组将越来越便宜和高效;项目开发成本也会随着融资成本的降低和开发商日渐丰富的经验而相应下降;而风力发电机组可靠性的改进也将减少运行维护所产生的平均成本。

工信部于 2010 年 3 月 26 日发布了《风电设备制造行业准入标准》(以下简称《标准》)征求意见稿,要求风电机组生产企业必须具备生产单机容量 2.5 MW 以上、年产量 1000 MW 以上的能力。目前达到此标准的风机制造企业仅有 10 家左右,上市公司中包括金风科技、湘电股份、上海电气、东方电气、长征电气和华仪电气,非上市公司有华锐风电、国电联合动力、中船重工和广东明阳。此次《标准》出台目的在于引导风电设备制造行业健康发展,防止产能盲目扩张,鼓励优势企业做大做强,优化产业结构,规范市场秩序,将我国风电装备制造业培育成具有国际竞争力的新兴产业。

截至 2010 年底,我国风电并网容量达到  $2.956 \times 10^4$  MW,“十一五”期间年均增速接近



100%。风电在持续快速发展中已逐步暴露出一些问题,主要表现在:

①风电开发缺乏统一规划,配套电网建设难度较大。一方面,各地方政府在编制风电开发规划时,主要依照当地风能资源情况确定风电的开发规模和建设时序,导致地方规划风电装机规模普遍大于国家规划。另一方面,风电投资者热情很高,风电开发存在无序现象,风电项目拆批现象比较普遍,建设布局和规模随意性较大,加上电网项目核准和建设周期远长于风电场的建设周期,难以实现风电与电网统筹规划和协调发展,风电项目的建设速度超前于电网建设项目的问题较为突出。

②随着风电的大规模快速发展,系统面临的调峰能力不足问题日益严重。我国电源结构以火电为主,至2009年底,煤电装机占全国发电总装机的74%,而在煤电装机中,供热机组又占了20%以上。在我国风能资源丰富的“三北”地区,供热机组占火电装机的比重更大(如2009年吉林达74%、蒙西达57%)。受电源结构的制约,长期以来我国电力系统调峰能力不足,夏季丰水期弃水、供热期采用机组启停调峰等现象一直存在。随着风电的大规模发展,尤其是风电的反调峰特性明显增加了电网调峰的难度。由于调峰容量不足,2009年吉林、蒙西、蒙东等电网都出现了负荷低谷时段弃风的情况。

③电网建设滞后于电源建设,尤其是跨大区电网的互联规模不足,不利于风电在更大范围内消纳。长期以来,我国电力发展以分省分区的区内平衡为主,省区间的电网互联规模有限,互相调节的能力不足。由于我国风能资源的分布特点,风电开发主要集中在“三北”偏远地区,受当地电力负荷水平和系统规模的约束,风电消纳能力不足。同时,受跨大区电网互联规模有限和交换能力不足的约束,当地无法消纳的风电难以送到更大范围内消纳,不利于风电的大规模开发利用。

④风电技术和运行水平较低,风电发展相关政策有待完善。我国目前已经并网的风电机组多数不具备功率调节、低电压穿越等功能,风电场没有建立支持调度运行的风电集中监控平台、风功率预测系统。另一方面,国家制定了可再生能源发电全额保障性收购政策,在实际运行过程中,调峰手段受限的电网在低谷时段必须采取特别措施(如火电机组深度压出力或部分火电机组停机),方能保证风电电量的收购,所付出的代价很大,并且存在一定的系统安全运行风险。此外,风电送出工程、调峰调频等辅助服务相关政策也有待完善。

2010年,全国发生80起风电机组脱网事故,其中,一次损失风电出力 $1 \times 10^5 \sim 5 \times 10^5$  kW的脱网事故14起,一次损失风电出力 $5 \times 10^5$  kW以上的脱网事故1起。2011年1~8月份,全国发生193起风电机组脱网事故,其中,一次损失风电出力 $1 \times 10^5 \sim 5 \times 10^5$  kW的脱网事故54起,一次损失风电出力 $5 \times 10^5$  kW以上的脱网事故12起。暴露了我国风电产业快速发展中隐藏的问题。另外,由于地方政府此前拥有 $5 \times 10^4$ 千瓦以下风电场的审批权,造成“ $4.95 \times 10^4$  kW现象”大量出现,扰乱了风电产业正常的发展秩序,这是造成风电“大跃进”很重要的一个原因。

根据国家最新规划目标,2020年我国风电装机可能达到 $1.5 \times 10^5$  MW以上的规模,未



来 10 年我国风电仍将持续较快发展。针对我国风电发展中存在的问题,参考国外风电大规模发展的经验,可得到以下措施:

①优化电源结构,合理配置调峰电源,解决风电大规模发展带来的系统调峰问题。从国外风电并网经验看,风电与其他电源协调发展的关键是系统调峰问题,应优化电源结构,增加电源装机中调峰电源和灵活调节电源的比重。应在具备抽水蓄能站址资源的负荷中心地区,加快抽水蓄能电站建设;在天然气供应有保障地区,建设一定规模的燃气电站;建设大容量高效率燃煤机组,参与系统调峰。

②建设坚强智能电网,解决风电大规模接入和输送问题。坚强电网是风电大规模发展的支撑和载体,我国风能资源分布集中,与负荷中心呈逆向分布,本地消纳能力有限,需加快构建坚强的互联电网,加强跨区输电线路的建设,扩大风电的开发规模和消纳范围。同时,应加强电网智能化建设,改善风电的功率输出特性,对风电场出力进行准确预测和优化调度,解决风电随机性、间歇性特点带来的系统安全问题。

③健全相关法律,制定发展规划,加强并网管理,完善政策支持体系。应适时调整风电收购政策,保障系统安全稳定和总体经济高效;将风电规划纳入能源电力统一规划,实现风电规划与电源规划、电网规划的协调,国家规划与地方规划的协调;制定出台强制性的风电并网技术导则等技术规定,建立风电机组测试与认证制度;完善风电配套输变电工程的定价和补偿机制,建立风电跨省区消纳价格机制,制定辅助服务补偿机制。通过管理和政策措施的逐步完善,促进风电健康发展。

目前风力发电的主要发展方向:陆地风力发电机组采用 1.5/2 兆瓦双馈异步发电机组;离岸风力发电机组采用 4/5 兆瓦永磁同步全馈发电机组;建设大型或者超大型的风力电场(有上百台风力机组组成);风力机组控制系统具有防电压穿越功能;风力发电机组在在线发电时可调节功率因数,在不发电时也可以调节功率因数,进行无功补偿,净化电网。

# 模块一 风特性及测量利用



## 一、风力资源分布与利用

### 1. 世界风力资源分布

根据世界能源理事会的有关资料,地球表面有 27% 的地区年平均风速高于 5 m/s(距地面 10 m 高)。如将这些地方用作风力发电场,则每平方千米的风力发电能力最大值可达 8 MW,总装机容量可达  $2.4 \times 10^{13}$  MW。据分析,实际上陆地面积中风力大于 5 m/s 的地区,其中仅 4% 有可能安装风力发电机组。

风能资源评估是规划风电项目的基础,直接影响风电场的选址和发电量测算,进而影响风电项目的投资决策和经济效益。有些风电项目因风能资源评估失误,会使业主浪费大量前期工作,最后得出不可行的结论;有些项目因风能资源评估失误,会使建成的风电场达不到预期的发电量,给项目业主造成很大的经济损失。

### 2. 中国风力资源

我国风能资源十分丰富,全国风能储量约  $4.83 \times 10^9$  MW,仅陆地上的可开发利用风能资源总量达  $2.53 \times 10^6$  MW。我国风能资源主要分布在新疆、内蒙古等北部地区和东部至南部沿海地带及岛屿。

(1) 风能最佳区:这一区域的有效风能功率密度在  $200 \text{ W/m}^2$  以上,风速不低于 3.5 m/s 的时间,全年为 7 千~8 千小时左右。分布区域为东南沿海、山东半岛、辽东半岛以及海上岛屿;内蒙古、甘肃北部;黑龙江南部、吉林东部。

内蒙古中西部,10 月以后每当冷空气过境,就产生 5~6 级以上大风;渤海沿岸,因受海洋的影响,风力较大;内蒙古通辽市和赤峰市,因受大兴安岭余脉的影响,风力较大;新疆的准噶尔盆地,因南面为天山,盆地成为冷空气南下的通道,特别是冬、春季,风力较大。还有东南沿海、东海、南海群岛,台湾和南海西部,这些地区的风能为全国最大;此外,黄河沿岸地区风能资源也较丰富。

(2) 风能较佳区:这一区域的有效风能功率密度为  $150 \text{ W/m}^2$  以上,风速不低于 3.5 m/s 的时间,全年为 4 千小时以上。分布区域为:西藏高原中北部;三北北部;东南沿海(离海岸线 20~50 km)。

(3) 风能可利用区:这一区域的有效风能功率密度为  $50 \text{ W/m}^2$  以上,风速不低于 3.5 m/s 的时间,全年为 2 千小时以上。分布区域为:两广沿海;大小兴安岭山区;东从辽河平原向



西,过华北大平原经西北到最西端,左侧绕西藏高原边缘部分,右侧从华北向南面淮河、长江到南岭。

(4)风能资源欠缺区:这一区域的有效风能功率密度  $50 \text{ W/m}^2$  以下,风速不低于  $3.5 \text{ m/s}$  的时间,全年为 2 千小时以下。

根据全国气象台站风能资料统计和计算,表 1-1 给出我国风能区占全国面积的百分比。

表 1-1 中国风能分区及其占全国面积的百分比

| 指标                                 | 丰富区     | 较丰富区           | 可利用区           | 贫乏区     |
|------------------------------------|---------|----------------|----------------|---------|
| 年有效风能密度( $\text{W/m}^2$ )          | $>200$  | $200\sim150$   | $150\sim50$    | $<50$   |
| 风速 $\geq 3 \text{ m/s}$ 的年累计小时数(h) | $>5000$ | $5000\sim4000$ | $4000\sim2000$ | $<2000$ |
| 风速 $\geq 6 \text{ m/s}$ 的年累计小时数(h) | $>2200$ | $2200\sim1500$ | $1500\sim350$  | $<350$  |
| 占全国面积的百分比(%)                       | 8       | 18             | 50             | 24      |

大风所具有的能量是很大的,其产生的推力也是不容忽视的。风速为  $9\sim10 \text{ m/s}$  的风,吹到物体表面上的力,每平方米约为  $10\times 9.8 \text{ N}$ ;而风速为  $20 \text{ m/s}$  的风,吹到物体表面上的力,每平方米约为  $50\times 9.8 \text{ N}$ 。风级的划分标准如表 1-2 所示,在没有风速计的时候,可以根据它来粗略估计风速。

表 1-2 风级的划分标准

| 级<br>别 | 名<br>称 | 风速         |                |            | 地面物特征               | 海面浪高(m) |     | 海面 and 渔船特征          |
|--------|--------|------------|----------------|------------|---------------------|---------|-----|----------------------|
|        |        | mile/h     | m/s            | km/h       |                     | 一般      | 最高  |                      |
| 0      | 静风     | $<1$       | $0\sim0.2$     | $<1$       | 静止,烟直上              | —       | —   | 平静                   |
| 1      | 软风     | $1\sim3$   | $0.3\sim1.5$   | $1\sim5$   | 烟能表示风向,但风标不转动       | 0.1     | 0.1 | 有微波                  |
| 2      | 轻风     | $4\sim6$   | $1.6\sim3.3$   | $6\sim11$  | 人面部感觉有风,树叶沙沙作响,风标转动 | 0.2     | 0.3 | 有小波纹,渔船摇动            |
| 3      | 微风     | $7\sim10$  | $3.4\sim5.4$   | $12\sim19$ | 权叶和墩枝动摇不息,轻薄的旗帜展开   | 0.6     | 1.0 | 有小浪,渔船渐觉摇动           |
| 4      | 和风     | $11\sim16$ | $5.5\sim7.9$   | $20\sim28$ | 能吹起灰尘和灰度值纸,小树枝摆动    | 1.0     | 1.5 | 浪顶有白色泡沫,渔船满帆时可使船身倾向侧 |
| 5      | 劲风     | $17\sim21$ | $8.0\sim10.7$  | $29\sim38$ | 多叶小树摇摆,内陆水面有小波      | 2.0     | 2.5 | 浪顶白色泡沫较多,渔船收去部分帆     |
| 6      | 强风     | $22\sim27$ | $10.8\sim13.8$ | $39\sim49$ | 大树枝摇动,电线有哨音,举伞困难    | 3.0     | 4.0 | 白色泡沫被风吹离浪顶,渔船收大部分帆   |
| 7      | 疾风     | $28\sim33$ | $13.9\sim17.1$ | $50\sim61$ | 全树摇动,迎风行走不便         | 4.0     | 5.5 | 白色泡沫离开浪顶,被风吹成条纹状     |



(续表)

| 级别 | 名称  | 风速     |           |         | 地面物特征                 | 海面浪高(m) |      | 海面和渔船特征                     |
|----|-----|--------|-----------|---------|-----------------------|---------|------|-----------------------------|
|    |     | mile/h | m/s       | km/h    |                       | 一般      | 最高   |                             |
| 8  | 大风  | 34~40  | 17.2~20.7 | 62~74   | 可折毁树枝,人向前行走感觉有阻力      | 5.5     | 7.5  | 白色泡沫被风吹成明显条纹状               |
| 9  | 烈风  | 41~47  | 20.8~24.4 | 75~88   | 轻型建筑物(烟筒和屋顶)发生损坏      | 7.0     | 10.0 | 被风吹起的浪花,使水平能见度减小,机帆船航行困难    |
| 10 | 风暴  | 48~55  | 24.5~28.4 | 89~102  | 陆地上少见,树木连根拔起,多数建筑物被损坏 | 9.0     | 12.5 | 被风吹起的浪花,使水平能见度明显减小,机帆船航行危险  |
| 11 | 强风暴 | 56~63  | 28.5~32.6 | 103~117 | 陆地上极少遇到,发生大范围的险情      | 11.5    | 16.0 | 被风吹起的浪花,使水平能见度显著减小,机帆船航行极危险 |
| 12 | 飓风  | ≥64    | ≥32.7     | ≥118    |                       | 14.0    |      | 海浪滔天                        |

### 3. 风能类别及其利用

按照不同的需要,风能可以被转化成其他不同形式的能量,如机械能、电能、热能等,以实现提水灌溉、发电、供热、风帆助航等功能。21 世纪风能利用的主要领域是风力发电。

目前,国内外一般选择年平均风速为 6 m/s 或以上的高风速区(即风能资源丰富区)安装并网型风力发电机组,即大型风力发电机组。在这些机组中,我国一般选用单机容量 600 kW 以上的机组建设风电场。这样才能保证机组多发电,经济效益才能显著。

功率不同的风力发电机,对风速的要求是不同的,因此判断某一地区的风能资源是否值得开发,还要考虑你准备采用的风力发电机的功率大小和机型。

(1)大型风力发电机(100 kW 以上)可能发展的地区:其年平均风速为 6 m/s 以上,在全国范围内,仅仅局限于几个地带,就陆地而言,大约占全国总面积的 1/100。

(2)中型风力发电机(10 kW 级及以上)可能发展的地区:其年平均风速为 4.5 m/s 以上,在全国范围内,可以发展中型风力发电机的地区,大约占全国陆地总面积的 1/10。

(3)小型风力发电机(10 kW 级及以下)可能发展的地区:其年平均风速大约为 3 m/s 以上。独立运行的小型风力发电机组启动风速较低,一般为 3 m/s 以上就能发电,这些地区分布区域广,大约占全国陆地总面积的 40%以上,我国有相当部分农耕区、山区和牧区属于这种地区。

## 二、风的产生、特性及其测量

风作为一种自然现象,有它本身的特性,通常采用风速、风向、风频等基本指标来表述。在目前技术情况下,风能既不可以储存又不能控制。而所谓风力发电,就是把风能转化成电能。风





力发电过程完全跟随天然的自然来风,它远远超过水力发电对河流水文状况的依赖关系。

风电场区域范围内的风能资源蕴藏状况,是开发风力发电项目最基础的组成因素。能否充分地掌握其完整而可靠的资料,将是工程能否顺利实施的保证,是项目成功和避免投资风险的关键所在。然而,预选风电场的风能资料,必须经历布点测风、数据(包含场外相关资料)收集、分析整理和汇总过程。如果某个环节出现缺陷和差错,资料的可靠性即将降低,项目的风险就大大增高,这是人们不愿意看到的结果。为此,从定义、要求、不利因素及技巧方面进行讨论,期望从根本上保障风力发电项目的可靠性和项目效益。

### (一)风的产生

#### 1. 风的产生

从宇宙空间看到的地球,包围在地球外部的是一层美丽而又千变万化的气体,总称为大气或大气层。大气层以地球的水陆表面为其下界,称为大气层的下垫面。

太阳对地球的辐射,透过厚厚的大气层,到达地球表面,地球表面各处(海洋和陆地;高山岩石和平原土壤;沙漠、荒原和植被、森林地区)吸收热量不同;由于地球自转、公转、季节、气候的变化和昼夜温差的影响,使地表各处散热情况也各不相同。散热多的地区,靠近地表的空气受热膨胀,压力减少,形成低气压区,这时空气从高压区向低气压区流动,这就产生了风。地球表面风的形成和方向如图 1-1 所示。

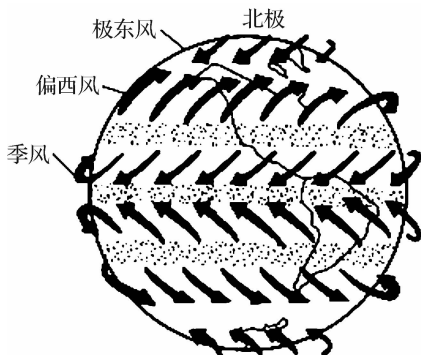


图 1-1 地球表面风的形成和方向

由于存在热交换,大气产生上下流动;又由于地球自转产生科里奥利力;地形、地貌的差异,地球自转、公转的影响,更加剧了空气流动的力量和流动方向的多变性,使风速和风向的变化更加复杂。因此,在不同的时间,风的强弱、方向、阵风频率、密度等都不相同,可分为各方向的低速风、高速风、快速变化的高频风等。高速风蕴藏着巨大能量,但又具有巨大破坏性。高频风变化频繁,其能量不易获得。

总的来说,风是地球外表大气层由于太阳的热辐射而引起的空气流动;大气压差是风产生的根本原因。风的特性有周期性、多样性、复杂性等特点。

#### (1)信风与季风



地球表面不同纬度的地区接受阳光照射的量不同,从而影响大气的流动,在地球表面延纬度方向形成了一系列气压带,如所谓“极地高气压带”、“副极地低气压带”、“副热带高气压带”等。在这些气压带压力差的驱动下,空气会沿着经度方向发生移动,而这种沿经度方向的移动可以看作质点在旋转体系中的直线运动,会受到科里奥利力的影响发生偏转,使得季风的方向发生一定偏移,产生东西向的移动因素,在北半球大气流动会向右偏转,南半球大气流动会向左偏转,在科里奥利力、大气压差和地表摩擦力的共同作用下,原本正南北向的大气流动变成东北—西南或东南—西北向的大气流动。

随着季节的变化,地球表面沿纬度方向的气压带会发生南北漂移,于是在一些地方的风向就会发生季节性的变化,即所谓季风。当然,这也必须牵涉到海陆比热差异所导致气压的不同。

### (2) 贸易风

赤道附近的固定风。在地球赤道上,热空气向空间上升,分为流向地球南北两极的两股强力气流,在纬度  $30^\circ$  附近,这股气流下降,并分别流向赤道与两极。在接近赤道地区,由于大气层中大量空气的环流,形成了固定方向的风,历史上人类依靠风力推动的航海,很大程度上集中于延纬度方向,季风的的存在为人类的航海定向、开展海上远程贸易创造了极大的便利,因而也被称为贸易风。由于地球自西向东旋转的结果,贸易风向西倾斜,此时北半球产生了东北风,而南半球则产生了东南风,如图 1-2 所示。



图 1-2 贸易风风向

### (3) 旋风和反旋风

由两极流向赤道的冷空气气流与由赤道流向两极的热空气气流相遇处(约在纬度  $50^\circ \sim 60^\circ$  附近)构成了涡流运动,为旋风和反旋风,而不是定向的、常见的环流。地形的差异(如陆地、海洋、山岳、森林、沙漠)使在同一纬度上受到程度不同的加热,因而产生了地区性风。

### (4) 轻风

由于昼夜之间的温度变化而产生的沿海岸风称为轻风。轻风的形成如图 1-3 所示。当日间有太阳照射时,陆地接受热量后的温升较海洋强烈,因而陆地上空的空气密度小,于是陆地上空的空气向上升,冷空气力图沿海洋流向沿岸陆地,于是产生了海风。而在夜间,陆地上的空气比海洋上的空气冷却较快,因此,陆地上的下层空气流向海洋,而上层空气则由海洋流向陆地,形成了与白昼相反的风向,称为陆地风。轻风方向的更换决定于地形条件。海风通常自上午  $9 \sim 10$  时开始,陆地风则在日落以后开始。轻风仅在沿海岸才遇到,流动可





及的距离约为在海洋和陆地两方各 40 km 之间。

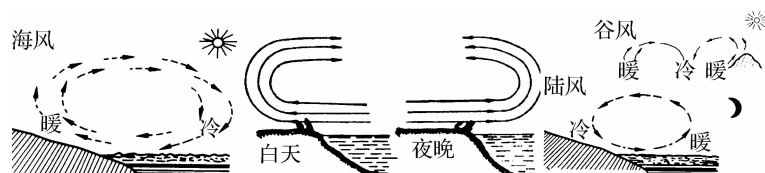


图 1-3 轻风的形成

### (5) 平原和山岳风

山岳地区在一昼夜间有周期性的风向变换,与轻风相似,平原风每日上午自 9~10 时至日落沿山岳的坡度向高处流动,在夜间则与此相反,气流自山岳流向平原,形成了山岳风。如果平原处于海岸处,则会引起特别强劲的风,因在夜间,山岳风被陆地风增强了;而在日间,平原风被海风增强。夜间的山岳风是由于山顶的冷空气具有较大密度,流向平原,形成夜间山岳风。平原风的产生则是由于日间山岳斜面上的空气较平原上的空气热,因此地势低处的空气膨胀,引起空气流动。

## 2. 大气分层

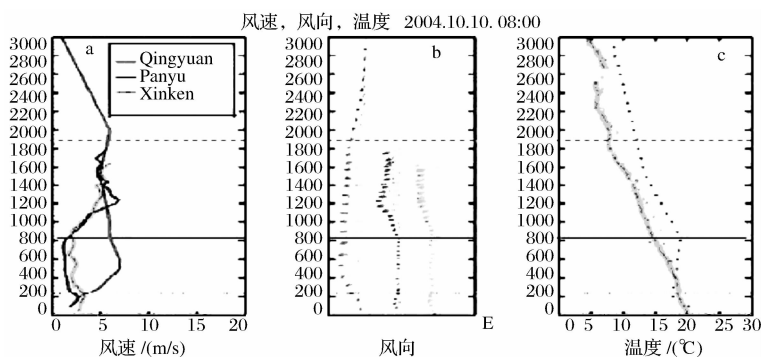
根据大气的特性,大气层分为:对流层、平流层、中间层、电离层、散逸层。

中间层:平流层之上,到高于海平面 85 km 高空的一层为中间层。这一层大气中,含有大量的臭氧,气温随高度的增加而下降得很快,到顶部气温已下降到 $-83^{\circ}\text{C}$ 以下。由于下层气温比上层高,有利于空气的垂直对流运动,故又称之为高空对流层或上对流层。中间层顶部尚有水汽存在,可出现很薄且发光的“夜光云”,在夏季的夜晚,高纬度地区偶尔能见到这种银白色的夜光云。

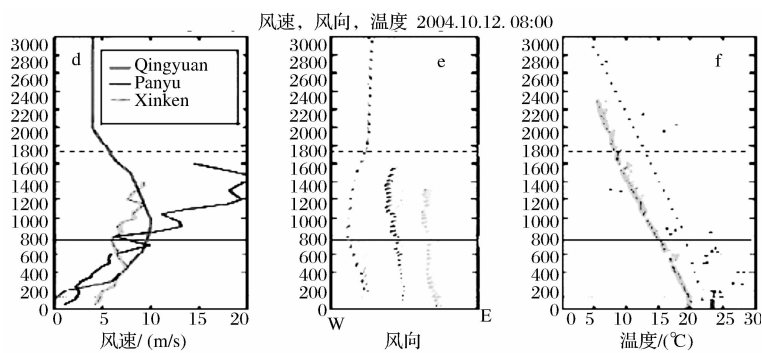
平流层:在对流层的上部,直到高于海平面 50~55 km 的这一层,气流运动相当平稳,而且主要以水平运动为主,故称为平流层。

对流层是紧贴地面的一层,它受地面的影响最大。因为地面附近的空气受热上升,而位于上面的冷空气下沉,这样就发生了对流运动,所以把这层叫做对流层。它的下界是地面,上界因纬度和季节而不同。据观测,在低纬度地区其上界为 17~18 km;在中纬度地区为 10~12 km;在高纬度地区仅为 8~9 km。夏季的对流层厚度大于冬季。以南京为例,夏季的对流层厚度达 17 km,而冬季只有 11 km,冬夏厚度之差达 6 km 之多。对流层的特点:对流层包含了大气层质量  $3/4$  的大气,气体密度最大,大气压力也最高;气温随高度的增加而下降;存在各种气象变化:风、雨、云、雾、雪等;大气不仅存在水平流动,也存在垂直流动。

例如,在《珠江三角洲大气边界层概念模型的建立及其应用》一文中,对珠江三角洲地理环境、气候背景和边界层气象观测,有如图 1-4 所示的珠江三角洲南北向风场及界面层风的高度曲线:夏季实时特征高度—风速曲线、高度—风向曲线、高度—温度曲线。



(a) 高度—风速曲线, (b) 高度—风向曲线, (c) 高度—温度曲线 (2004 年 10 月 10 日早晨 8 点实时测量)



(d) 高度—风速曲线 (e) 高度—风向曲线 (f) 高度—温度曲线 (2004 年 10 月 12 日早晨 8 点实时测量)

图 1-4 珠江三角洲风场高度曲线

对风力发电机组的设计有重要影响的是紧贴地面 100 m 范围内的界面层风 (boundary-layer) 如图 1-5 所示。该层内的风速随高度而变化, 这一规律已被归纳为幂指数型风以及对数型风, 比如在雪地上的地表粗糙度指数  $\alpha$  可取为 0.1。

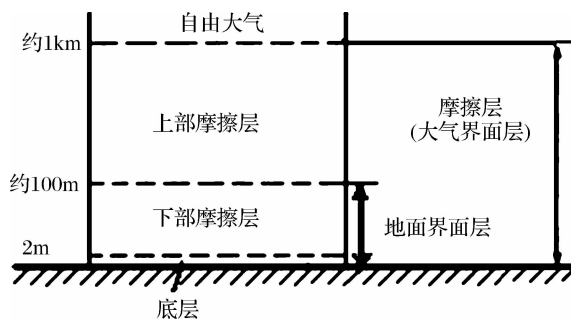


图 1-5 界面层风高度示意图

## (二) 风的测量

风能的一些主要特性参数: 如风能、风能密度、风速与风级、风向与风频等。京士柏气象站实际对 10 min 内平均风速、风向随时间的变化过程的 24 小时时间测量序列如图 1-6 所示 (京士柏气象站的高度: 高于平均海平面 65 m、风速表的高度: 高于平均海平面 90 m)。

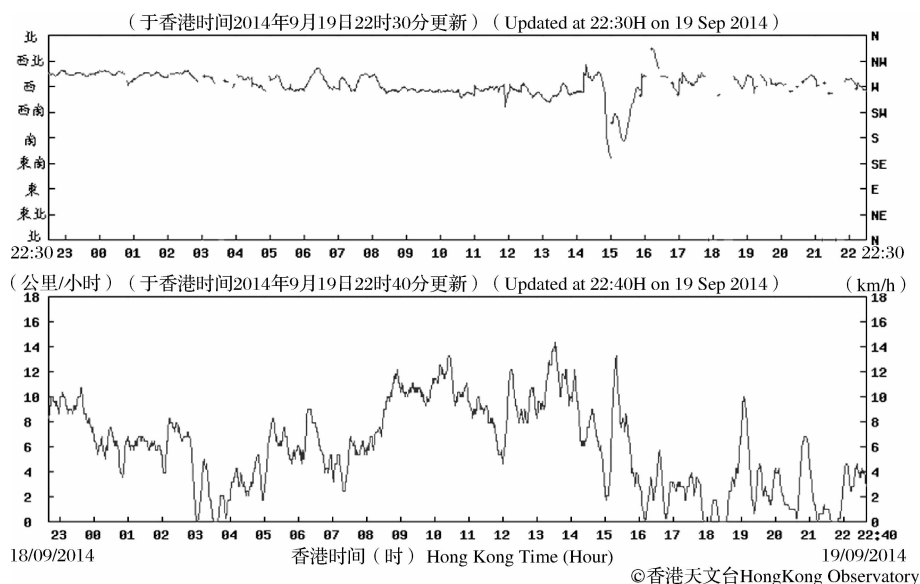


图 1-6 10 min 平均风速、风向的 24 小时时间序列

事实上,对风的测量中,风速传感仪器的存在即增加了对风的干扰,结果就有了误差。尤其是在风力发电机机舱顶上的测量,其结果往往因其不确定性而作为参考数据来使用。那么,如何来“正确”地测量风速呢?一种显然的考虑是把风轮作为传感器,测出风轮转速即得到相应的“实际”风速。

对于风的速度、速度场的测量与测量不确定性考虑:由于风速在不同的时间、高度、位置,风的强弱、方向、阵风频率都不相同,所以风的速度的测量,应该以速度场的概念进行测量,即在不同高度、方向,进行全天候、全年的等间隔的测量。经常的做法是在风机前方 4 H 距离远处设立测风塔,并且在 20 m、30 m、40 m 高度同时进行测量。

所以,风电场风能资源测量和评估技术规定,在安装测风设备之前,应收集周围已有测站或气象站的测风资料,分析当地风况特征,了解当地盛行风向,为安装测风设备做准备。

测风塔结构可选桁架型或远光型等不同形式,高度应接近拟安装风力发电机组的轮毂高度。测风塔应该具备设计安全、结构轻便、易于运输及安装、在现场环境下结果稳定、风振动小等特点;并具备防腐、防雷电要求及配备“请勿攀登”等明显的安全标志。

风速仪、风向标如图 1-7 所示,安装时建议至少安装三层,其中应有一套风速、风向传感器安装在 10 m 高度处,另一套风速、风向传感器固定在拟安装的风力发电机组的轮毂中心的高度处,其余的风速、风向传感器可固定安装在测风塔 10 m 的整数倍高度接近拟安装风力发电机组的叶片最低位置处。如果条件允许,每隔 10 m 高度安装一套风速、风向传感器效果更好。风杯风速计、风向标、三分量风速仪、超声风速仪的结构如图 1-7 所示。风向标应根据当地磁偏角修正,按实际“北”定向安装。

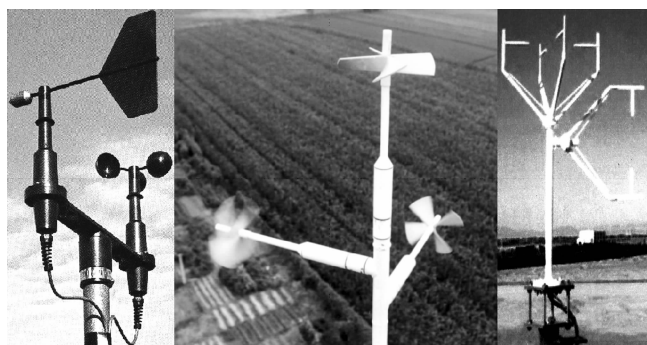


图 1-7 风杯风向标、风速计及三分量风速仪、超声风速仪

超声风速仪的资料采集:记录数据有三维平均风速、平均风向、温度、三维均方差、平均动量通量、热量通量等。其中三维湍流脉动风速由超声风速计测量、温度脉动由温度脉动铂金属温度脉动仪测量、湿度脉动由紫外湿度计或红外湿度计测量。

为减小风塔的“塔影效应”(Wind Shade、风速相对降低的%)对传感器的影响,风速、风向传感器应固定在离开塔身的牢固横梁处,与塔身距离为桁架式结构测风塔直径的3倍以上、圆管型结构测风塔直径的6倍以上,迎主风向安装并进行水平校正。“塔影效应”如图1-8所示。

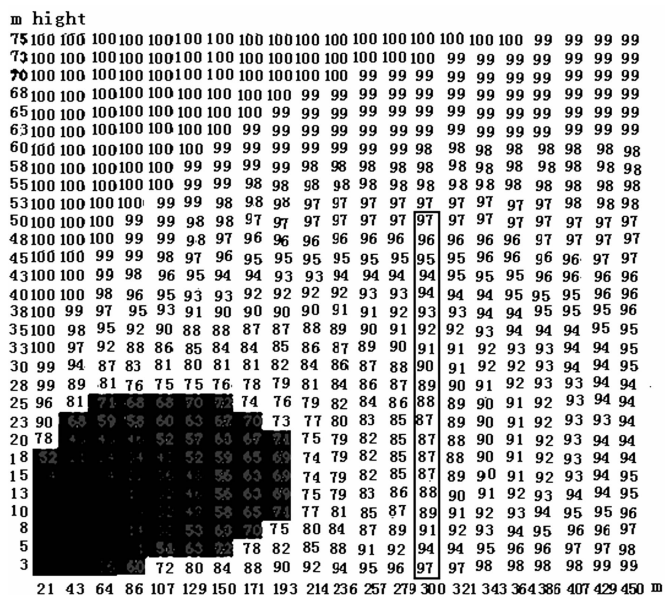


图 1-8 20m 高障碍物对 300m 远 50m 高风机的风影影响

安装数据采集器时,数据采集安装盒应固定在测风塔上适当位置处,或者安装在现场的临时建筑物内;安装盒应防水、防冻、防腐蚀和防沙尘;数据传输应保证准确。温度计及大气压力计可随测风塔安装,也可安装在附近的百叶箱内。气象观测塔观测系统硬件部分各主要单元结构组成如表1-3所示。



表 1-3 气象观测塔观测系统硬件部分各主要单元组成

|                                |                       |               |        |
|--------------------------------|-----------------------|---------------|--------|
| 传<br>感<br>器                    | 平均场<br>温度传感器          | 铂电阻<br>测温感应器  | 测温电桥   |
|                                |                       |               | 运算放大器  |
|                                | 平均场<br>湿度传感器          | 湿敏电容<br>湿度传感器 | 湿敏元件   |
|                                |                       |               | 信号变换器  |
|                                |                       |               | 电路工作电源 |
|                                |                       |               | 信号放大电路 |
|                                | 平均场风向、<br>风速传感器       | 感应器           | 风向感应器  |
|                                |                       |               | 风速感应器  |
|                                |                       | 变换器           | 风向变换器  |
|                                |                       |               | 风速变换器  |
|                                | 脉动场温、<br>风传感器         | 感应器           | 超声波感应器 |
|                                |                       |               | 信号变换器  |
| 变换器                            |                       | 电路工作电源        |        |
|                                |                       | 信号放大电路        |        |
| 主<br><br><br><br><br><br><br>机 | 数<br>据<br>采<br>集<br>器 | 测变送电路         |        |
|                                |                       | A/D 转换电路      |        |
|                                |                       | 计数电路          |        |
|                                |                       | 数字信号输入电路      |        |
|                                |                       | CPU           |        |
|                                |                       | 存储器           |        |
|                                |                       | 显示器           |        |
|                                | 数据处理机组                |               |        |
| 接口                             | 数据采集器与数据处理机接口         |               |        |
|                                | 数据处理主机接口              |               |        |

### (三)测量数据的处理

应对风电场场址的风能资料和气象台资料相比较并进行相关分析,整理出风速频率曲线、风向玫瑰图、风能玫瑰图、年日风速变化曲线、风能密度和有效风速小时等主要参数。

#### 1. 测风过程中数据整理和统计

一台简单的测风仪,可以记录每个 10 min 风速平均值及其风向,一个月就有 4320 组数据。预选风电场测风周期最短为一年,一台测风仪记录下 52560 组数据。一个有规模的预选风电场,要设立数基测风塔,每基塔又设数层测风仪。所以,测风数据的整理是一项有规模的数据库的分析整理工作。此外,风的能量是根据相应风速风向进行演算的,要在整理过程中进行统计。

自编数据整理案例分析时,需要使用电脑、程序。借助计算机的 Excel 功能,自编计算





模块。具体操作如下:

- ①将测风“记事本”数据转换为“Excel”数据。
- ②利用 Excel 表的换位、计算、筛选、求和等统计功能,按规程规范所规定的要求,统计出风能资源参数的结果。
- ③根据参数结果绘制风频、风向玫瑰图、风能玫瑰图及其他计算结果。
- ④资料订正。资料提供使用之前,参照相关条件或资料进行订正非常必要。所谓相关,比如当地气象台的长期和同期测风资料、相似地形、附近范围别的实测记录等,尤其是参照已经投产风电场的运行实际。

### 2. 潜在误差

资料形成的过程中,每一个环节都可能产生误差,结果都影响到风能资源资料的可靠性和准确性。

#### (1)测风选点方案

要收集预选风电场的数据,首先是选点立塔,注意立塔地点是否具有足够代表性。测风仪器安装位置:开阔、平坦、距地面 10 m 高度。注意塔的数量是否含盖整个风电场,测风高度是否达到预期安装风机轮毂的高度等。

#### (2)测风仪器及安装质量

尤其是测风仪的方向标其基准方向是否正确,如果有偏差,风机的布置就不能对准风能资源的主方向,发电效益大受影响。

仪器磨损:定期检定。

#### (3)数据收集

若收集不及时发现问题未能及时改正,将造成数据完整率低,给资料整理带来困难,使真实性降低。

#### (4)整理误差

资料必须认真整理,分析比较,鉴别真假,并避免误差积累。资料符合实际,达到应有的精度,能反映风电场的真实情况,才能提供给工程人员使用,才能提供给投资者以对项目有正确判断。所以就必须在每一个环节尽量减少误差。

### (四)风特性及其描述

下面对描述风能资源状况的主要特性参数及内容进行简要说明。

#### 1. 风速

指空气在单位时间内运动的距离,用 m/s 或 km/h 作为计量单位。由于风是不断变化的,通常所说的风速是指一段时间内各瞬时风速的算术平均值,即平均风速。平均风速为风速在规定时距  $T$  内的时间平均值,即

$$\bar{v} = \frac{1}{T} \int_0^T v(x, y, z, t) dt \quad (1-1)$$

其中  $v(x, y, z, t)$  为空间测量点  $(x, y, z)$  处时刻  $t$  的速度向量,  $T$  为速度积分时间段。

边界层内,由于地面摩擦粘滞力的影响,风向由下至上向右偏转,直至自由大气与地转风平行。在以  $u, v$  为坐标轴的图上,不同高度上风速矢量端点的连线呈螺旋状,如图 1-9