

风力发电技术与工程

FENGLI FADIAN JISHU YU GONGCHENG

宋海辉 吴光军 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

风力发电技术与工程

宋海辉 吴光军 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书全面系统地阐述了风力发电的发展现状,风及风能资源,风力发电机组及蓄能装置的基本结构原理,风电场电气系统,风电场的选址、机组布置、运行维护和管理等内容。

本书通俗简练,系统翔实,图文并茂,适合从事风力发电领域的工程技术人员、管理人员阅读参考,也适合作为高等院校相关专业的教学参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

风力发电技术与工程 / 宋海辉, 吴光军编著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2014. 7
ISBN 978-7-5170-2273-2

I. ①风… II. ①宋… ②吴… III. ①风力发电
IV. ①TM614

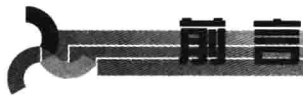
中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第156088号

审图号 GS (2013) 5132

书 名	风力发电技术与工程
作 者	宋海辉 吴光军 编著
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 25.5印张 605千字
版 次	2014年7月第1版 2014年7月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	58.00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



风能是一种可再生的自然能源，是太阳能的一种转化形式。太阳的辐射造成地球表面受热不均，引起大气层中压力分布不均，从而使空气沿水平方向运动，空气流动形成风能。据估计，地球上的风能理论蕴藏量约为 $2.74 \times 10^9 \text{ MW}$ ，可开发利用的风能为 $2 \times 10^7 \text{ MW}$ ，是地球水能的 10 倍，只要利用地球上 1% 的风能就能满足全球能源的需要。

风能是人类利用历史最悠久的能源和动力之一，在风力发电之前，风能主要用于风帆助航、风车提水、风力磨坊、风力锯木等。1887 年冬，美国人 Brush 安装了第一台自动运行的风力发电机组，开创了风力发电的新纪元，风力发电经历了创始期、徘徊发展期和迅猛发展期，如今，风力发电领域正随着航空、航天技术和空气动力学的发展以及计算机、复合材料的使用飞速发展，风力机结构日趋完善，可靠性不断提高，技术不断创新。

风力发电是目前世界上增长速度最快的能源，近年风电装机容量每年增长速度超过 20%；到 2011 年底，全球风力发电装机容量达 237.67GW，足以供应约 1.2 亿普通家庭或 3 亿居民的电力需求，中国、美国及德国是世界上风能利用发展最好的三个国家，中国风电装机已占全球总装机的 26.24%，美国占 19.74%，德国占 12.23%。目前，全球约有 75 个国家加入了风力发电的行列，估计整个行业就业的员工超过 30 万人。

我国风力发电在 20 世纪 80 年代开始发展，初期大多是独立运行户用百瓦级风电机组，安装在边远、孤立无电地区供农牧民使用。近年来，随着大型并网风力发电机组的引入开发，在风资源丰富地区开始出现由多台风电机组组成的大型风电场，并入电网供电，并以难以想象的速度发展，截止到 2011 年底，我国已在 31 个省（直辖市、自治区，除台湾省）累计安装风电机组 45894 台，装机容量 62.36GW。

根据国家发展和改革委员会制定的中国中长期能源战略规划预测，到 2020 年，力争使风电装机容量达到 200GW，使中国的风电设计、制造和管理技术达到国际先进水平。

为实现我国风力发电发展的宏伟目标，推进风力发电技术的发展创新和风电场建设，我们特编写了本书，希望对从事风力发电领域的广大工程技术

人员有所帮助。

本书内容包括风力发电的发展现状，风及风能资源，风力发电机组及蓄能装置的基本结构原理，风电场电气系统，风电场的选址、机组布置、运行维护和管理等内容。本书由上海第二工业大学宋海辉和长江新能源开发有限公司吴光军编著，宋海辉编写第1~9章及第11章内容，吴光军编写第10章、第12章内容，本书在编著过程中得到了华北电力大学可再生能源学院博士生导师田德教授和武汉大学动机学院博士生导师蔡维由教授的大力支持帮助，在此深表谢意！同时参阅了广东粤电能源有限公司部分资料 and 大量参考文献、网上资料，在此对其作者一并表示衷心感谢！

由于编著者的水平有限，书中不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

作者

2014年5月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 风能利用与风力发电	1
1.1.1 风能利用史	1
1.1.2 风力发电的意义	3
1.2 世界风力发电发展概况	4
1.2.1 世界风力发电的发展	4
1.2.2 世界风力发电的现状	10
1.3 中国风力发电发展概况	12
1.3.1 中国的风能资源	12
1.3.2 中国风力发电的发展	12
1.3.3 中国风力发电的现状	13
1.3.4 中国风力发电的发展展望	18
1.4 风力发电技术发展趋势	18
1.4.1 风力发电迅猛发展的驱动力	18
1.4.2 风力发电技术未来发展趋势	20
第 2 章 风能资源	23
2.1 风能资源的形成	23
2.1.1 大气环流	23
2.1.2 季风环流	24
2.1.3 局地环流	26
2.2 测风	27
2.2.1 测风系统	27
2.2.2 风向测量	28
2.2.3 风速测量	29
2.2.4 风力等级	32
2.2.5 风能资源的计算	33
2.2.6 风功率密度等级及风能可利用区的划分	38
2.3 中国的风能资源	39
2.3.1 我国风能资源储量	39
2.3.2 我国风能资源的形成及分布	40

第3章 风力机及其附属设备	45
3.1 风力机的类型	45
3.1.1 风力发电的工作过程	45
3.1.2 风力机的类型	45
3.2 风力机的结构	48
3.2.1 风轮	49
3.2.2 传动系统	52
3.2.3 偏航系统（对风装置）	53
3.2.4 叶尖扰流器和变桨距机构	56
3.2.5 控制与安全系统	58
3.2.6 机舱	60
3.2.7 塔架和基础	60
3.3 风力机的基本理论	61
3.3.1 风力机空气动力学的基本概念	61
3.3.2 风力机基本理论	66
3.3.3 风力机性能参数	69
第4章 风力发电机与蓄能装置	73
4.1 风力发电原理	73
4.1.1 风力发电原理概述	73
4.1.2 定桨距风力发电机组	74
4.1.3 变桨距风力发电机组	75
4.2 风力发电机与风力发电系统	76
4.2.1 对风力发电机及发电系统的一般要求	76
4.2.2 恒速恒频发电系统	77
4.2.3 变速恒频风力发电系统	83
4.2.4 小型直流发电系统	92
4.3 风力发电的电储能	95
4.3.1 电能储能的必要性及蓄能方式	95
4.3.2 蓄电池蓄能	95
4.3.3 飞轮蓄能	98
4.3.4 抽水蓄能	100
4.3.5 压缩空气蓄能	100
第5章 风电场电气系统	102
5.1 风电场电气主接线	102
5.1.1 风电场电气部分的构成	102
5.1.2 风电场电气主接线	102
5.2 风电场主要一次设备	107

5.2.1	变压器	107
5.2.2	开关设备	108
5.2.3	互感器	114
5.3	风电场电气二次系统	117
5.3.1	电气二次系统	117
5.3.2	风电场的电气二次部分	119
5.3.3	风电场升压变电站的二次部分	119
5.4	风电机组控制系统	122
5.4.1	风电机组控制系统概述	122
5.4.2	定桨距风电机组控制系统	124
5.4.3	变桨距风电机组控制系统	127
第6章	风力发电中的电力电子技术	133
6.1	电力电子技术基础	133
6.1.1	电力电子技术简介	133
6.1.2	PWM 控制技术	134
6.1.3	电力电子技术在风电场的应用	135
6.2	AC—DC 整流器	137
6.2.1	单相桥式全控整流电路	137
6.2.2	三相桥式全控整流电路	138
6.3	DC—AC 逆变电路	140
6.3.1	DC—AC 逆变电路	140
6.3.2	电压型单相全桥逆变电路	140
6.3.3	电压型三相桥式逆变电路	141
6.4	交流电力控制电路	142
6.4.1	软启动器	142
6.4.2	晶闸管投切电容器电路	143
6.5	电网接入控制	144
6.5.1	电压控制	144
6.5.2	频率控制	145
6.6	变速机组中的变流器	145
6.6.1	采用二极管桥的变流器	146
6.6.2	背靠背双向变流器	146
6.6.3	双馈风电机组转子双向变流器	147
6.6.4	全功率变流器	147
第7章	风力发电机组的运行	148
7.1	风力发电机组的并网运行	148
7.1.1	恒速恒频风力发电机组的并网运行	148

7.1.2	变速恒频风力发电机组的并网运行	153
7.2	风力发电与柴油发电联合运行	163
7.2.1	风力-柴油发电联合运行的目的、目标、影响因素	163
7.2.2	风力-柴油联合发电系统的结构组成	164
7.2.3	柴油联合发电系统的实用性评价	168
7.3	风力发电与太阳光发电联合运行	169
7.3.1	太阳能资源	169
7.3.2	太阳光电池	171
7.3.3	风力与太阳光发电联合运行系统	179
7.4	风力发电机组的独立运行	183
7.4.1	独立运行的直流风力发电系统	184
7.4.2	独立运行的交流风力发电系统	185
7.4.3	独立运行风力发电系统的优点和缺点	188
第8章	风电场选址和风力发电机组的布置	189
8.1	风电场选址概述	189
8.1.1	丹麦大型风力发电场场址选择方法介绍	189
8.1.2	我国大型风力发电场选址方法	190
8.2	风能资源的评估	191
8.2.1	评估指标及因素	191
8.2.2	风能资源资料的获得	191
8.2.3	风能资源评估	193
8.3	风电场宏观选址	195
8.3.1	风电场宏观选址的原则	195
8.3.2	风电场宏观选址的技术标准	195
8.4	风电场风况观测	199
8.4.1	测风仪器的选择	199
8.4.2	测风仪器的布置	200
8.4.3	测风数据的分析	201
8.5	风电场微观选址	202
8.5.1	地面粗糙度对风速的影响	202
8.5.2	障碍物的影响	203
8.5.3	地形的影响	203
8.6	风力发电机组的容量选择与排列布置	205
8.6.1	风力发电机组的容量选择	205
8.6.2	风力发电机组的排列布置	206
8.6.3	风电机组尾流效应	208
8.7	风力发电实用软件介绍	209
8.7.1	Riso WAsP 软件介绍	209

8.7.2	ReSoft WindFarm	213
8.8	风电场年发电量估算	216
8.8.1	风电场理论年发电量估算方法	216
8.8.2	年上网发电量估算	216
8.8.3	单机发电量的计算	218
第9章	风电场设备选型	220
9.1	风电场设备选型概述	220
9.1.1	风力发电设备认证体系	220
9.1.2	对机组功率曲线的要求	221
9.1.3	对机组制造厂家业绩考查	222
9.1.4	对特定条件的要求	222
9.1.5	对技术服务与技术保障的要求	224
9.2	风力发电机组机械部分的选型	224
9.2.1	风力发电机组结构型式选择	224
9.2.2	功率控制方式的选择	226
9.2.3	机组定速与变速运行方式的选择	227
9.2.4	风力发电机组部件的选择	228
9.2.5	风力发电机组机型的选择	230
9.3	风电场的电力系统选型设计	230
9.3.1	风电场接入电力系统方案	230
9.3.2	风电场主接线	231
9.3.3	风电场配电线路	231
9.3.4	风电场变电所设备	233
9.4	风电场与电力系统的匹配	233
9.4.1	风电场对电力系统运行的影响	233
9.4.2	风电场的能量可信度和容量可信度	235
9.4.3	促进风电场与电力系统匹配的技术措施	236
9.4.4	风电场对电力系统电能质量影响的计算	237
9.4.5	电力系统中风电占总装机容量的比例	238
9.4.6	风电场接入电力系统的技术规定	238
第10章	风电场运行维护管理	240
10.1	风电场的运行	240
10.1.1	风力发电机组工作参数的安全运行范围	240
10.1.2	风力发电机组的启动、并网与停机	241
10.1.3	风电机组的启动和停机示例	242
10.1.4	风电机组的运行	246
10.1.5	风电场运行监视、记录	249

10.1.6	风电机组工作状态之间转变	254
10.2	风电场的维护	256
10.2.1	机组的日常维护	256
10.2.2	机组的年度例行维护	258
10.3	风电场的异常运行和事故处理	263
10.3.1	风电场异常运行与事故处理基本要求	263
10.3.2	风电场故障分类	264
10.3.3	风电场故障处理	264
10.3.4	风电场事故处理	271
10.4	风力发电机组的磨损与润滑	272
10.4.1	风力发电机组的磨损	272
10.4.2	风力发电机组的润滑	272
10.5	风电场的管理	274
10.5.1	风电场运行管理制度	275
10.5.2	风电场安全管理	275
10.5.3	风电场人员培训管理	278
10.5.4	生产运行管理	279
10.5.5	备品配件及工具的管理	282
10.5.6	风电场经营管理	283
10.5.7	提高风电场综合经济效益的技术措施	284
10.6	风电场机组评价标准	285
10.6.1	功率曲线	285
10.6.2	可利用率	286
10.6.3	可靠性	286
10.6.4	维护成本	287
10.6.5	寿命期度电成本	287
10.6.6	现场风况条件的适宜性	287
10.6.7	电网兼容性	287
10.6.8	风电场运行维护能力	289
10.6.9	风电场质保期后运行数据的比较	289
10.6.10	风电场工程技术政策与规范	289
	附表	291
第 11 章	风电项目开发及风电场工程建设	294
11.1	风电项目开发及风电场工程建设流程	294
11.1.1	项目开发与建设过程中相关部门的职责	294
11.1.2	项目开发建设部门职责图	296
11.1.3	风电项目开发建设程序图	296
11.2	风电投资项目的立项	297

11.2.1	风电项目预可行性研究报告撰写及相关协议签订	297
11.2.2	风电场项目建议书	297
11.3	风电投资项目的可行性研究	297
11.3.1	主要内容	298
11.3.2	风力资源	298
11.3.3	工程地质	298
11.3.4	项目任务与规模	298
11.3.5	风电场场址选择	298
11.3.6	风力发电机组选型和布置	298
11.3.7	电气	298
11.3.8	土建工程	298
11.3.9	施工组织设计	298
11.3.10	环境影响评价	298
11.3.11	项目投资概算	298
11.3.12	财务评价	298
11.3.13	结论及今后工作意见	299
11.3.14	附件、附图、附表	299
11.4	风电项目公司	299
11.4.1	风电项目公司的发起	299
11.4.2	风电项目公司章程和投资协议	299
11.4.3	风电项目公司经营管理机构	300
11.4.4	风电项目的资本金和公司注册资金	301
11.4.5	风电项目公司注册程序	301
11.4.6	风电项目公司注册期间的主要工作	303
11.5	风电场工程建设前期工作	303
11.5.1	风电场工程项目的报建	303
11.5.2	编制风电场建设计划	303
11.5.3	委托项目建设监理	303
11.5.4	风电场工程项目招标	304
11.5.5	施工合同的签订	306
11.5.6	风电场建设用地的征地	307
11.5.7	施工现场的“四通一平”	308
11.6	风电场工程基础建设施工	308
11.6.1	风电场工程基础建设施工项目	308
11.6.2	工程施工许可证	309
11.6.3	风电工程施工管理	310
11.6.4	风电工程施工监理	311
11.6.5	风电工程施工质量管理	311

11.6.6	风电工程施工安全管理	312
11.7	风力发电机组的安装	313
11.7.1	机组安装概述	313
11.7.2	机组安装项目	314
11.7.3	机组安装计划	314
11.7.4	机组安装前的准备工作	315
11.7.5	机组典型安装程序	315
11.7.6	风电机安装安全措施	319
11.8	风力发电机组的调整试验	320
11.8.1	调整试验的目的	320
11.8.2	试验条件	320
11.8.3	试验准备	320
11.8.4	功能试验和部分性能试验	321
11.8.5	试验数据记录整理与分析处理	322
11.9	风力发电机组的试运行	322
11.9.1	风力发电机组试运行的条件	322
11.9.2	试运行时间	323
11.9.3	试运行的检查项目	323
11.9.4	试运行管理	323
第 12 章	海上风电场	324
12.1	海上风机基础及施工技术	324
12.1.1	概述	324
12.1.2	风机基础	325
12.1.3	风机 (3.6MW) 基础施工	330
12.2	海上风机技术	335
12.2.1	3.6MW 海上风机技术特点	336
12.2.2	叶轮	337
12.2.3	机械传动系统	338
12.2.4	通风冷却系统	339
12.2.5	偏航系统	339
12.2.6	液压系统	340
12.2.7	润滑系统	340
12.2.8	制动系统	340
12.2.9	塔架	341
12.2.10	发电机及其电气设备	341
12.2.11	防雷保护系统	342
12.2.12	控制系统	343
12.2.13	数据采集及监控系统 (SCADA 系统)	344

12.2.14	风机状态监测系统 (TCM)	346
12.2.15	高性能的风电场控制系统	348
12.3	海上风电场运行安全预警与应急	349
12.3.1	概述	349
12.3.2	风电场运行安全预警与应急	349
12.3.3	设备的安装、运行及日常巡检与维护	352
12.4	风机变桨系统故障分析	353
12.4.1	风机变桨系统概述	353
12.4.2	电动伺服变桨系统	354
12.4.3	电液伺服变桨系统	367
12.5	风电场工程案例	372
12.5.1	工程简介	372
12.5.2	某 201MW 风电场工程	378
12.5.3	某近海 2MW 试验风机	385
参考文献		391

第 1 章 绪 论

1.1 风能利用与风力发电

1.1.1 风能利用史

风能是一种可再生的自然能源，是太阳能的一种转化形式。太阳的辐射造成地球表面受热不均，引起大气层中压力分布不均，从而使空气沿水平方向运动，空气流动所形成的动能称为风能。

据估计，地球上的风能理论蕴藏量约 $2.74 \times 10^9 \text{ MW}$ ，可开发利用的风能约 $2 \times 10^7 \text{ MW}$ ，是地球水能的十倍，只要利用地球上 1% 的风能就能满足全球能源的需要。

风能是人类利用历史最悠久的能源和动力之一，风能利用主要包括：风力发电、风帆助航、风车提水、风力磨坊、风力锯木等。

风能利用，已有数千年的历史，风能最早的利用方式是“风帆助航”。我国是最早使用帆船和风车的国家之一，至少在 3000 年前的商代就出现了帆船，明代航海家郑和七下西洋，开创了中国辉煌的风帆时代。同时，风车也得到了广泛的使用，人们利用风帆驱动水车灌溉农田。沿海沿江地区的风帆船和用风力提水灌溉或制盐的做法，一直延续到 20 世纪 50 年代，仅在江苏沿海利用风力提水的设备曾达 20 万台，图 1-1 所示为风力提水装置。



图 1-1 风力提水装置

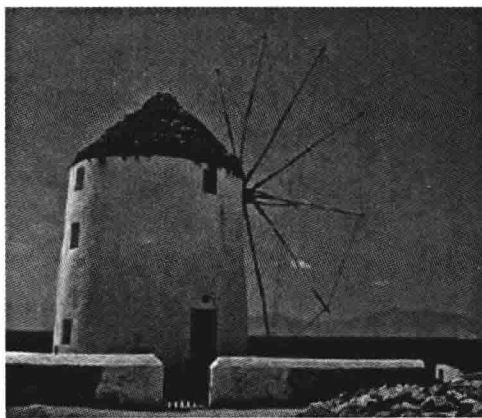


图 1-2 风力磨坊

埃及也被认为是最先实际利用风能的国家之一，早在公元前几千年，古埃及人就开始用风帆来协助奴隶们划桨，后来，使用风帆来协助役畜磨谷和提水等，图 1-2 所示为风力磨坊。

在公元前几个世纪，波斯人也开始利用风能，到公元 700 年时，他们已建造了竖直转



轴的风车——即“方格形风车”(Panemon)来带动石磨磨谷。其他民族也建造了他们自己的方格形风车。

12世纪,风车从中东传入欧洲。据认为,是班师的十字军将风车的概念和设计带到了欧洲,风力和水力很快就在中世纪的英格兰成了机械能的主要来源。荷兰人发明了水平转轴、螺旋桨式的风车,这种风车在荷兰和英国的乡村广泛应用。

16世纪,荷兰人利用风车排水、与海争地,在低洼的海滩地上建国立业,逐渐发展成为一个经济发达的国家,图1-3所示为典型荷兰风车。



图1-3 古老的荷兰风车

在整个中世纪,在诸如叶片空气动力学、齿轮设计和风车的整体设计这些领域中,新的技术改进不断产生。最老式的欧洲风车是“柱式风车”,它的螺旋桨安装在竖立在地上的柱子的顶端,磨坊工人通过转动柱子来将风车对准盛行的风向。后来进化为“帽式风车”,在这种风车中,对准风向的转轴是支撑叶片的“帽子”的一个组成部分。1750年,发明了扇形尾自动调向机构,风车可以自动对准风向了。

今天,荷兰人将风车视为国宝,北欧国家保留的大量荷兰式的大风车,已成为人类文明史的见证。

1850年,丹尼尔·哈利戴开始发展了后来演变成鼎鼎有名的“美国农场风车”。这种风车主要用来抽水,是一种在许多乡村地区仍可见到的为人们所熟悉的多叶片风车。即使在今天,假如没有这种风车,那么在美国、阿根廷和澳大利亚的许多地区,牲畜的牧场饲养也将会是不可能的。

19世纪末,丹麦人首先研制了风力发电机。1891年,丹麦建成了世界第一座风力发电站。20世纪20年代,人们开始研究利用风车作大规模发电。风力发电在解决无电农牧区居民的用电方面起到了重要的作用,1931年,在苏联的 Crimean Balaclava 地方建造了一座100kW容量的风力发电机,此乃最早的商业化风力发电机。到20世纪30年代,约有十多个美国公司生产和出售风力发电机,大部分是卖给在多风的密西西比河流域以西的大平原上的农场主。在刮风时,这些机器一般可以输送达1000W的直流电功率。

20世纪40年代在拉特兰、弗蒙特附近建造了史密斯—普特南风力发电机组,巨大的



叶片长 175 英尺 (1 英尺 = 0.3048m), 可以提供 1250kW 的电力, 用来为弗蒙特电网供电。但是由于战时材料的缺乏和经费的不足, 使得这项工程在强风折断了它的两个 8t 重的叶片中的一个之后终止了。

一些欧洲国家建造了大量的风力发电机。在 20 世纪 50 年代和 60 年代, 法国人建立了设计先进的 100kW 到 300kW 的发电机。德国人建造了一些 100kW 的风力发电机来为他们的公用电网提供额外的电力。但是, 由于便宜的矿物燃料发电机的激烈竞争, 这些实验性机器后来停止了使用。

1973 年发生石油危机以后, 美、欧等西方发达国家为寻求替代化石燃料的能源, 投入大量经费, 动员高科技产业, 利用计算机、空气动力学、结构力学和材料科学等领域的新技术研制现代风力发电机组, 开创了风能利用的新时期。风力发电进入了一个蓬勃发展的阶段, 在世界不同地区建立了许多大中型的风电场。

气候变化也推动了风电技术发展的进一步升温。2005 年 2 月, 《京都议定书》正式生效, 成为推动风电发展的新动力, 欧洲将风电的发展作为实现减排二氧化碳等温室气体承诺的措施, 减轻环境的压力正在驱动风力发电的高速发展。

预计到 21 世纪中叶, 风能将会成为世界能源供应的支柱之一, 成为人类社会可持续发展的主要动力源。

1.1.2 风力发电的意义

随着现代工业的飞速发展, 人类对能源的需求明显增加, 而地球上可利用的常规能源日趋匮乏。据专家预测: 煤炭还可开采 221 年, 石油 39 年, 天然气只能用 60 年, 如何实现能源的持续发展? 唯一的出路就是有计划地利用常规能源、节约能源、开发新能源和可再生能源, 目前电能产生主要靠火力发电, 但火力发电产生大量的污染物。为减少对大气的污染, 实现能源的持续发展, 世界各国都在积极发展风力发电, 可以预见, 在今后十年, 风力发电必将成为世界各国更加重视和重点开发的能源之一。

风力发电是利用风能来发电的, 与其他常规能源发电相比, 风力发电有下述几个特点。

1. 风力发电是可再生的洁净能源

风力发电是一种可再生的洁净能源, 不消耗资源, 不污染环境, 这是其他常规能源 (如煤电、油电) 与核电所无法比拟的优点。

2. 建设周期短

风力发电场建设工期短, 单台机组安装仅需几周, 从土建、安装到投产, 50MW 级的风电场建设期只需半年至一年时间, 是煤电、核电无可比拟的。

3. 装机规模灵活

投资规模灵活, 可根据资金情况, 决定一次装机规模, 有了一台资金就可加装一台、投产一台。

4. 可靠性高

把现代高科技应用于风力发电机组, 使风力发电可靠性大大提高, 大中型风力发电机组可靠性已达 98%, 机组寿命可达 20 年。

5. 造价低, 和常规能源发电相比具有竞争力

单位千瓦的造价和单位千瓦时的电价已接近火力发电, 低于油电与核电, 若计及煤电