



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION



“十二五”“十三五”国家重点图书出版规划项目

风力发电工程技术丛书

风力发电与 并网技术

FENGLI FADIAN YU
BINGWANG JISHU

主 编 潘文霞
副主编 杨建军 孙 帆



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



“十二五”国家重点图书出版规划项目

风力发电工程技术丛书

风力发电与 并网技术

主 编 潘文霞
副主编 杨建军 孙 帆

常州大学图书馆
藏书章



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书是《风力发电工程技术丛书》之一，系统地介绍了风力发电与并网的相关知识，内容主要包括概述、风力发电机组与风电并网、风电并网技术规范与要求、风电并网对电力系统的影响、海上风力发电、风电并网设计实例。

本书可作为高等院校相关专业的教学参考用书，也可供从事相关专业的从业人员参考借鉴使用。

图书在版编目(CIP)数据

风力发电与并网技术 / 潘文霞主编. -- 北京: 中国水利水电出版社, 2017.3
(风力发电工程技术丛书)
ISBN 978-7-5170-5507-5

I. ①风… II. ①潘… III. ①风力发电 IV. ①TM614

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第126893号

书 名	风力发电工程技术丛书 风力发电与并网技术
作 者	FENGLI FADIAN YU BINGWANG JISHU 主编 潘文霞 副主编 杨建军 孙帆
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 (营销中心)
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	北京万水电子信息有限公司
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 9.75印张 231千字
版 次	2017年3月第1版 2017年3月第1次印刷
定 价	48.00元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

《风力发电工程技术丛书》

编 委 会

顾 问 陆佑楣 张基尧 李菊根 晏志勇 周厚贵 施鹏飞

主 任 徐 辉 毕亚雄

副 主 任 汤鑫华 陈星莺 李 靖 陆忠民 吴关叶 李富红

委 员 (按姓氏笔画排序)

马宏忠 王丰绪 王永虎 申宽育 冯树荣 刘 丰

刘 玮 刘志明 刘作辉 齐志诚 孙 强 孙志禹

李 炜 李 莉 李同春 李承志 李健英 李睿元

杨建设 吴敬凯 张云杰 张燎军 陈 刚 陈 澜

陈党慧 林毅峰 易跃春 周建平 郑 源 赵生校

赵显忠 胡立伟 胡昌支 俞华锋 施 蓓 洪树蒙

祝立群 袁 越 黄春芳 崔新维 彭丹霖 董德兰

游赞培 蔡 新 糜又晚

丛 书 主 编 郑 源 张燎军

丛书总策划 李 莉

主要参编单位 (排名不分先后)

河海大学
中国长江三峡集团公司
中国水利水电出版社
水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心
水电水利规划设计总院
水利部水利水电规划设计总院
中国能源建设集团有限公司
上海勘测设计研究院有限公司
中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司
中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司
中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司
中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司
中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司
中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司
长江勘测规划设计研究院
中水珠江规划勘测设计有限公司
内蒙古电力勘测设计院
新疆金风科技股份有限公司
华锐风电科技股份有限公司
中国水利水电第七工程局有限公司
中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司
中国能源建设集团安徽省电力设计院有限公司
华北电力大学
同济大学
华南理工大学
中国三峡新能源有限公司
华东海上风电省级高新技术企业研究开发中心
浙江运达风电股份有限公司



前 言

风能作为一种清洁的可再生能源，越来越受到世界各国的重视。我国风能储量大、分布面广、开发利用潜力巨大。21世纪以来我国的风力发电有了飞速发展。2010年全国总发电量4.1413万亿kW·h，其中风电占1.04%。到2011年，我国电力工业在新的起点上实现了又好又快的发展，发电量和电网规模已居世界第一位，风电并网运行规模超4500万kW，居世界第一。2014年我国火电发电量首次出现下降，全国总发电量5.5万亿kW·h，风电1563亿kW·h，占比达2.8%。

风力发电的迅速发展急需大批专业技术人才和相关的参考资料和教材。本书编写旨在较为全面地介绍风力发电和并网技术方面的知识和技术发展，希望能够借此为从事风力发电及关注风力发电的人士提供帮助。

本书由河海大学潘文霞任主编，华东勘测设计研究院杨建军和西北勘测设计研究院孙帆任副主编。本书编写过程中，河海大学全锐、刘明洋、杨刚、柴守江等同学给予了大力支持和帮助。此外，新疆金风科技股份有限公司艾斯卡尔在百忙之中提出了宝贵的修改意见，在此表示特别感谢。

感谢河海大学、华东勘测设计研究院和西北勘测设计研究院的领导及专家对本书编写工作的关心和帮助，同时也感谢本书中引用文献资料及设计成果的作者。

由于作者水平有限，书中难免有错误和不足之处，恳请读者和专家批评指正。

作者

2017年2月



目 录

前言

第 1 章 概述	1
1.1 风力发电	1
1.1.1 风力发电机组的组成	1
1.1.2 风力发电机组的容量与发电量	2
1.1.3 离网与并网风力发电系统	2
1.1.4 陆上与海上风力发电系统	4
1.1.5 风力发电成本和电价	4
1.1.6 交流与直流并网风力发电系统	6
1.2 风电场出力特性及运行特点	9
1.2.1 风电场的风速特性	9
1.2.2 风力发电机组的功率特性及特点	12
1.2.3 风电场的功率输出	15
1.3 风能的消纳与输送	16
1.3.1 世界各国风能的消纳现状	16
1.3.2 我国风能的消纳与输送	19
1.4 风电功率预测	21
1.4.1 风电功率预测方法	22
1.4.2 风电功率预测系统与实践	23
第 2 章 风力发电机组与风电并网	25
2.1 风力发电机组分类、结构和特性	25
2.1.1 分类	25
2.1.2 结构和特性	27
2.2 风力发电机组的模型和并网控制	29
2.2.1 机械系统模型	29
2.2.2 电气系统模型	34

2.2.3	并网控制策略	50
2.3	风电场的建模和并网运行	52
2.3.1	风力发电机组排列方式	53
2.3.2	尾流效应	54
2.3.3	风电场参数等值方法	55
2.3.4	风电场等值模型	57
2.4	风电场输出功率控制	61
2.4.1	功率限制模式	62
2.4.2	平衡控制模式	62
2.4.3	功率增率控制模式	62
2.4.4	差值模式	63
2.4.5	有功控制模式组合运行	63
2.5	并网风电场有功调度	64
2.5.1	含风电场的区域电网有功调度	65
2.5.2	风电场的有功分层调度控制	66
2.5.3	含风电场的全网集中控制	67
第3章	风电并网技术规范与要求	69
3.1	概述	69
3.2	国外风电并网技术规范与要求	69
3.3	国内风电并网技术规范与要求	72
3.4	国内外风电并网技术规范比较	73
3.4.1	有功功率控制	73
3.4.2	频率控制	75
3.4.3	风电功率预测	77
3.4.4	无功配置和电压控制	77
3.4.5	电压穿越	78
3.4.6	风电场的模型要求	81
3.4.7	并网技术规范的讨论与发展	81
3.5	我国风电并网准入和安全评价	82
第4章	风电并网对电力系统的影响	83
4.1	风力发电机组的低电压穿越问题及控制	83
4.1.1	低电压穿越基本问题及要求	83
4.1.2	低电压穿越控制技术	85
4.2	风电场动态无功补偿	92
4.2.1	基本原理	92
4.2.2	补偿指标检测	95
4.3	风电并网对系统调度的影响	96

4.3.1	含风电并网的 AGC 有功调度	97
4.3.2	含风电并网的旋转备用容量优化调度	98
4.4	风电并网对系统稳定的影响	99
4.4.1	对电网静态稳定的影响	99
4.4.2	对电网暂态稳定的影响	102
4.4.3	对电网频率稳定的影响	104
4.5	风电并网对电能质量的影响	104
4.5.1	电压偏差	105
4.5.2	电压波动及闪变	105
4.5.3	谐波	106
4.5.4	三相电压不平衡	107
第 5 章	海上风力发电	108
5.1	世界海上风电的发展	108
5.2	中国海上风电的发展	111
5.3	海上风电场输电系统	112
5.3.1	电气系统组成	112
5.3.2	输电系统及其特点	113
5.4	海上风电场的电气系统设计	118
5.4.1	电气系统特点	118
5.4.2	内部集电系统	119
5.4.3	海上升压站	121
第 6 章	风电并网设计实例	122
6.1	设计主要流程	122
6.2	陆上风电并网实例	122
6.2.1	工程概况	122
6.2.2	电网概况及风电场电能消纳	123
6.2.3	接入系统原则	124
6.2.4	接入系统方案	124
6.2.5	电气计算结果	124
6.2.6	风电场电气设计	129
6.3	海上风电并网实例	132
6.3.1	工程概况	132
6.3.2	电网概况及风电场电能消纳	132
6.3.3	接入系统原则	133
6.3.4	接入系统方案	133
6.3.5	电气计算结果	133
6.3.6	风电场电气设计	141
	参考文献	143

第 1 章 概 述

1.1 风 力 发 电

太阳照射地球表面形成空气对流，产生了风。3000 多年前，人们已经学会将风所储存的风能转换成机械能，利用风力来提水、碾米等，但直到 100 多年前，人们才开始将风能转换为电能，实现风力发电。和其他发电形式相比，风力发电具有以下特点：

- (1) 风力发电清洁、可再生。
- (2) 风力发电技术成熟，发电成本已具备竞争力。
- (3) 风力发电具有明显的间歇性和波动性。

随着人们对环境和化石资源匮乏等问题日益剧增的担忧，世界各国已经将风力发电作为能源安全、环境保护和社会可持续发展的重要内容，经过多年的研究与应用，风力发电技术得到了快速发展。

1.1.1 风力发电机组的组成

风力发电机组主要部件如图 1-1 所示。

典型风力发电机组以三叶片、水平轴型为主，围绕轮毂安装了叶片。轮毂的轴连接着变速箱和发电机，这两个部件安置在机舱内。通常称轴连接的前端为风力机，后端为发电机。风力发电机组的主要部件与功能如下：

(1) 风轮（轮毂和叶片）。主要功能为捕获风能，将风能转变为机械能。叶片直径是风力机的重要参数，典型的叶片转速为 8~30r/min。

(2) 机舱。机舱位于塔架上部，舱内除安置有变速箱和发电机外，还有制动系统、风速和风向监视器、偏航装置等部件。机舱能够使这些重要的部件工作在更好的环境中。

(3) 变速箱。大部分风力发电机使用变速箱，其功能是加大风力发电机所需的转速。也有一些采用了直接驱动的风力发电机，此时可以不使用变速箱。

(4) 制动系统。制动系统是一个用于在紧急情况下停止叶片转动以及在极高风速或其

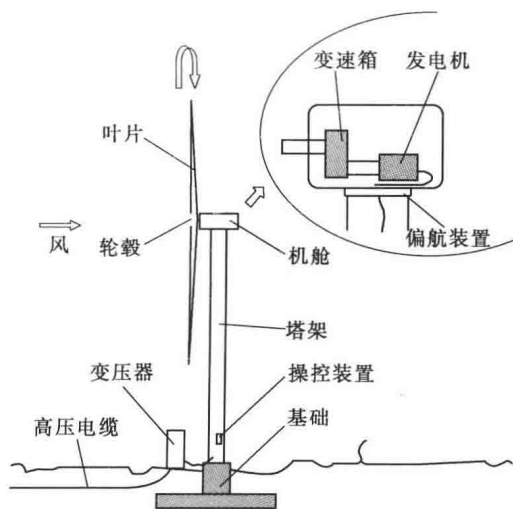


图 1-1 风力发电机组主要部件

他异常情况下确保风力机安全的圆盘。

(5) 控制器。用于控制风力机启停、风力机叶片转速和偏航，还有发电机控制的电气元件。

(6) 发电机。将机械能转换为电能，目前有多种形式的发电机应用于风力发电。

(7) 偏航装置。大部分风力机的偏航装置连接在监视风向的传感器（如风向标）上，转动塔头使叶片迎着主风向。

(8) 塔架。塔架的作用是支撑机舱和叶片。发电机发出的电力由塔架内部的电缆传送出来，并通过变压器升压送入电网。

(9) 基础。塔架和其上的部件建立在坚实的基础之上。

1.1.2 风力发电机组的容量与发电量

随着风力发电技术的不断进步和风力发电应用范围的不断扩大，风力发电机组的单机容量逐渐增加，风力发电系统也形式多样。

不同容量的风力发电机组适合不同的应用场合。小到家庭、小区供电，大到商业发电基地，风力发电机组单机额定容量从 20 世纪 80 年代初期的 50kW 发展到现在的 10MW 及以上，叶片直径从 15m 发展到现在的 145m 及以上，大约为两架波音 747 飞机的长度。由于风力机捕获风能的大小与叶片的扫掠面积成正比，塔架越高风速越大，如图 1-2 所示，叶片的直径和塔架高度随风力发电机组的容量增加而增大。与此同时，随着风力发电机制造商的不断研究和改进，风力发电机组的发电量也有了显著提高，图 1-3 显示出叶片直径与年发电量的关系。

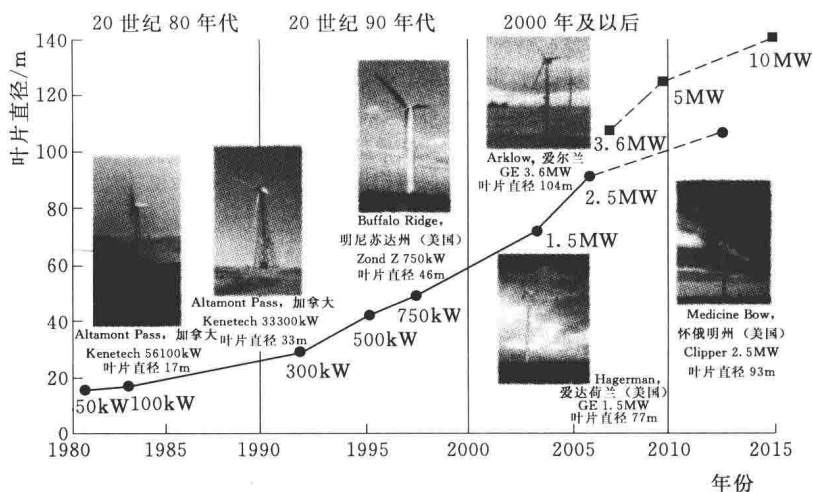
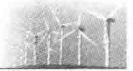


图 1-2 叶片直径随风力发电机组容量增长的变化趋势

1.1.3 离网与并网风力发电系统

离电网很远或入网成本很高的岛屿、农场和偏远山村，风力发电机组常常离网运行，提供当地用电。由于风电的间歇性和波动性，离网运行的风力发电机组需要其他能源发电



形式的补充以保证供电的持续性。离网运行的风力发电机组与柴油发电、太阳能光伏发电或储能系统一起，组成一个更加可靠的分布式发电系统。图 1-4 这种分布式的离网风力发电系统由于负荷总量有限，在我国所占风电总装机容量的比例很小。

在大多数场合，由几十台、上百台甚至更多并网型风力发电机组组成总容量更大的风力发电系统（风电场），并将产生的电能送入电网。由于风力发电机组的额定电压大多在几百伏（典型电压为 690V）左右，风力发电机组通常需要经过两次甚至三次升压接入电网。将风力发电机组机端几百伏电压提升至几十千伏（例如 35kV）的一次升压变压器（箱变）通常由电缆连接到不远处的风力发电机组。有时还需要根据各机组的位置分组，由集电系统进行汇集，再次升压或直接送到风电场的升压变电站，图 1-5 为并网风力发电系统示意图。

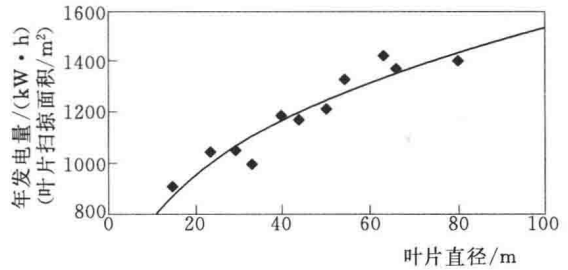


图 1-3 叶片直径与年发电量关系

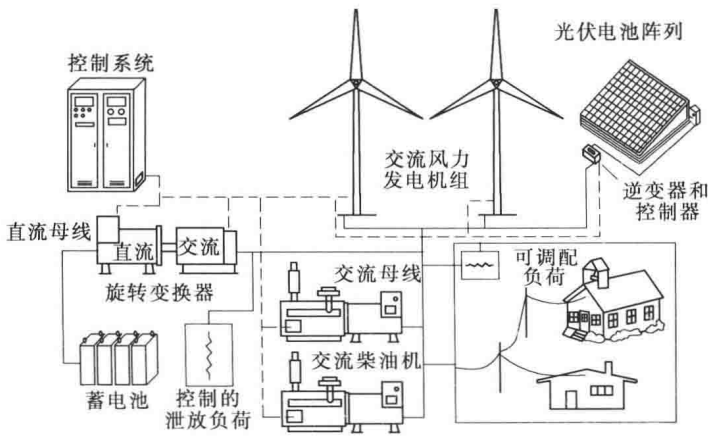


图 1-4 离网风力发电系统示意图

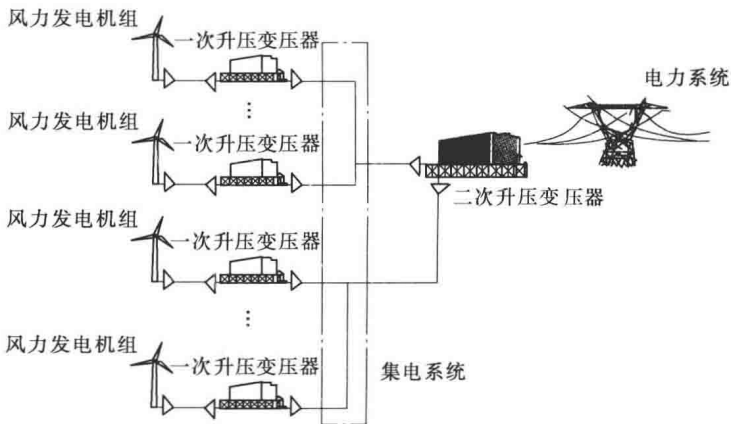


图 1-5 并网风力发电系统示意图



1.1.4 陆上与海上风力发电系统

早期大容量风电场的建设通常在陆上，主要因为陆上施工方便、维护成本低、靠近输电线路等，表 1-1 给出了部分陆上风电场的实例。然而，陆上风资源有限，海上风资源丰富；海上风速高于陆上，且风速稳定性更好；海上建设风电场对环境的影响更小……海上风电这些显著的优势引起了各大风电投资商的密切关注。

表 1-1 部分陆上风电场实例

参 数	Roscoe	Whitelee	Bowbeat
地点	Texas, 美国	Glasgow, 苏格兰	Moorfoot Hills, 苏格兰
风力发电机组数量/台	627	140	24
容量/MW	781.5	322	31.2
面积/km ²	404.7	72.52	—
风力发电机组型号	Mitsubishi 1000A	Siemens 2.3MW	Nordex N60
生产年份	2009	2009	2002

海上风电最早的倡导者是丹麦、德国等欧洲国家。因为欧洲的海上风能资源量储量是目前整个欧洲全部用电量的几倍之多，而且中欧国家，特别是德国、丹麦，其陆地风电的开发大部分已经完成，所以 20 世纪 80—90 年代丹麦就有了第一台近海风力发电示范机组，并在此后陆续建设了多座海上风电场。表 1-2 给出了部分海上风电场的实例。

表 1-2 部分海上风电场实例

参 数	London Array	Horns Rev	Nysted/Rodsand I
地点	London, 英国	Jutland, 丹麦	Lolland, 丹麦
离岸距离/km	20	14~24	10.8
风力发电机组数量/台	341	80	72
容量/MW	1000	160	166
面积/km ²	245	20	26
内部母线电压/kV	33	34	33
风力发电机组型号	Siemens SWT-3.6	Vestas V80 2MW	Siemens SWT-2.3
传输线	150kV 海底电缆	150kV 海底电缆	132kV 海底电缆
海上变电站数量	2	1	1
完工年份	2012	2002	2003

1.1.5 风力发电成本和电价

风力发电是可再生能源技术中成本降低最快的发电技术之一。随着市场的发展和技术的

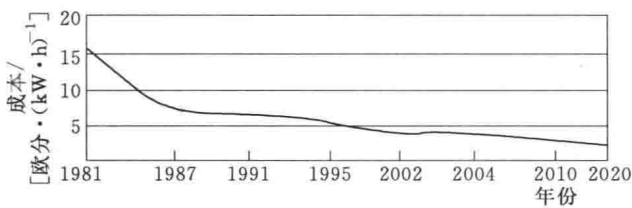


图 1-6 风力发电成本

进步，风力发电成本和电价显著下降。根据欧洲风电协会的分析，1990—2000 年风力发电成本下降了 50%，达到了 5~6 欧分/(kW·h)。在未来的市场中，预计风力发电的成本还将继续下降，如图 1-6 所示。



风力发电成本取决于风力发电机组的成本，也和风力发电机组高度（轮毂）的平均风速和场址的风能资源密切相关。表 1-3 给出了一个典型 2MW 风力发电机组主要部件的成本比例。总成本的约 75% 是与风力发电机组直接相关，包括风轮、变速箱、发电机、变流器、机舱和塔架等。其他费用包括电网连接、基建、土地租金、电气安装和道路建设等。图 1-7 是欧洲风能协会年度报告对于不同平均风速和风电场投资下的发电成本。

表 1-3 一个典型 2MW 风力发电机组主要部件的成本比例

部 件	成本比例/%	部 件	成本比例/%
风力机	75.6	咨询费	1.2
电网连接	8.9	财务费用	1.2
基建	6.5	道路建设	0.9
土地租金	3.9	控制系统	0.3
电气安装	1.5		

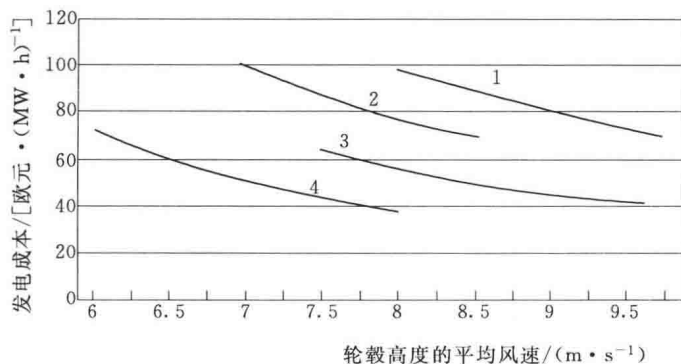


图 1-7 平均风速和场址对风力发电成本的影响

1—近海 1800 欧元/kW；2—近海 1450 欧元/kW；

3—陆地 1150 欧元/kW；4—陆地 800 欧元/kW

根据美国风能协会分析，随着风电产业的发展，风电电价有了明显的下降。从 20 世纪 80 年代第一台风机并网时风电电价高达 30 美分/(kW·h)，到 2010 年前后的风电电价降到 4 美分/(kW·h)。据相关预测，海上风电成本将从 2015 年 18 美分/(kW·h) 降至 2025 年的 12 美分/(kW·h)，有 35% 的下降空间。可以肯定地说风电是目前可再生能源发电中最具竞争力的发电形式。表 1-4、表 1-5 为我国不同风能资源条件和风电场投资下的风电成本和上网电价。表 1-6 为 2005 年前后安装的 10kW、50kW 和 1.7MW 风力发电机组的典型成本。图 1-8 比较了不同能源的发电成本范围。

表 1-4 不同风能资源条件下的风电成本

单位：元/(kW·h)

投资/元	等效满负荷小时数/h								
	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000
8000	0.533	0.466	0.414	0.373	0.339	0.311	0.287	0.266	0.249
9000	0.596	0.521	0.464	0.417	0.379	0.348	0.321	0.298	0.278
10000	0.659	0.577	0.513	0.461	0.419	0.385	0.355	0.330	0.303



表 1-5 不同风电场投资下的上网电价

单位: 元/(kW·h)

投资/元	等效满负荷小时数/h								
	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000
8000	0.810	0.708	0.630	0.566	0.515	0.472	0.436	0.405	0.378
9000	0.907	0.794	0.705	0.635	0.577	0.529	0.488	0.454	0.428
10000	1.005	0.879	0.781	0.703	0.639	0.586	0.541	0.502	0.469

表 1-6 2005 年前后不同容量风力发电机组主要成本比较

项 目	小型风力发电机组		大型风力发电机组
	10	50	1700
额定输出功率/kW	10	50	1700
风力机成本/美元	32500	110000	2074000
安装费用/美元	25100	55000	782000
总成本/美元	57600	165000	2856000
每千瓦成本/美元	5760	3300	1680

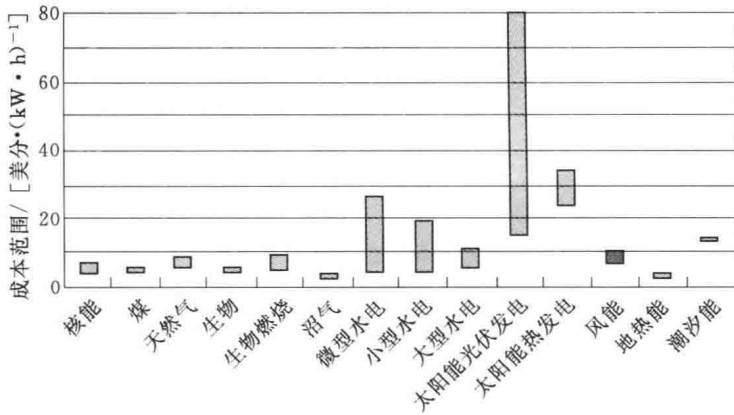


图 1-8 不同能源的发电成本范围

1.1.6 交流与直流并网风力发电系统

一般情况下, 风电场采用高压交流输电形式 (HVAC) 并网, 无论在技术上还是实际工程中都是最简单可行的方式。风力发电机组输出的电能通过一次升压, 汇集至风电场的升压站进行二次 (或三次) 升压, 然后并入交流电网, 如图 1-9 所示。然而大规模海上风电场往往距离陆上变电站较远, 且海底电缆对地电容比架空线大得多, 交流并网方式受到输电距离的约束, 此时直流并网方式得到广泛应用。

在高压直流输电中最常用的有两种技术方案: 一是采用晶闸管的电流源变流器的高压直流输电系统 (LCC-HVDC), 如图 1-10 所示; 二是采用 IGBT 的电压源变流器的高压直流输电系统 (VSC-HVDC), 如图 1-11 所示。

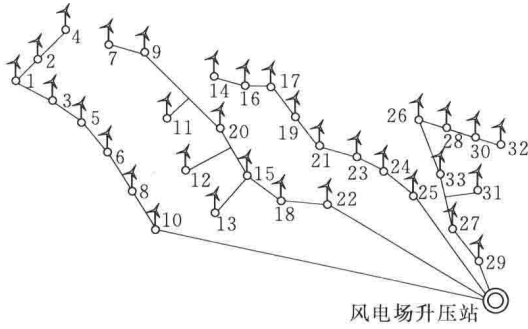


图 1-9 交流并网风力发电系统

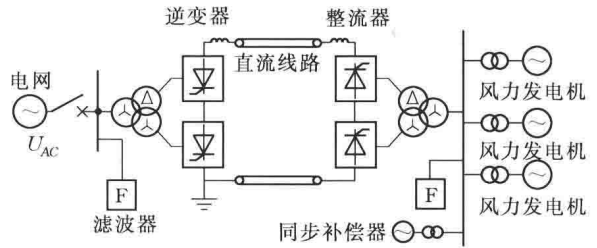


图 1-10 采用 LCC-HVDC 的风电场接入系统方案示意图

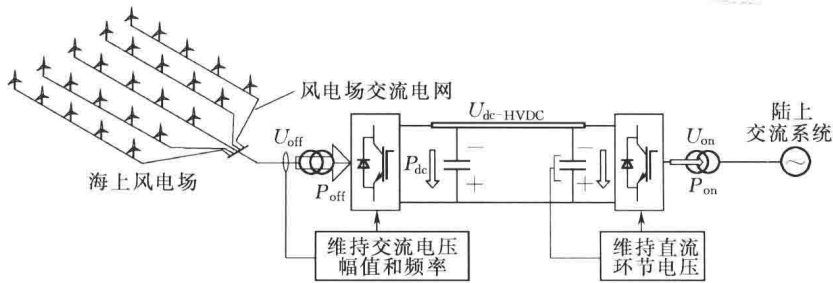


图 1-11 采用 VSC-HVDC 的风电场接入系统方案示意图

对 HVAC、LCC-HVDC 和 VSC-HVDC 并网进行技术比较时，应考虑容量、损耗、近海安装规模、对电网的影响和实施等方面，每一种基础方案又都可以添加额外设备来获得更好的技术水平，很难统一表述，表 1-7 仅对标准输电方案进行简单技术特点比较。

表 1-7 三种并网方案的技术特点

项目	并网方案		
	HVAC	LCC-HVDC	VSC-HVDC
每个系统的最大容量	200MW, 150kV	~1200MW	350MW
电压水平	达到 245kV	达到 ±500kV	达到 ±150kV
传输容量是否与距离相关	是	否	否
系统总损耗	取决于距离	2%~3% (加上近海辅助设备的需求)	4%~6%
是否黑启动能力	是	否	是
故障级别	比高压直流方案高	比高压直流方案低	比高压直流方案低
电网支撑的技术能力	有限	有限	可能性范围很广
近海变电站是否在运行	是	否	规划中 (2005 年)
近海变电站的空间需求	小	取决于容量，变流器比 VSC 型大	取决于容量，变流器比 LCC 型小但比高压交流电站大

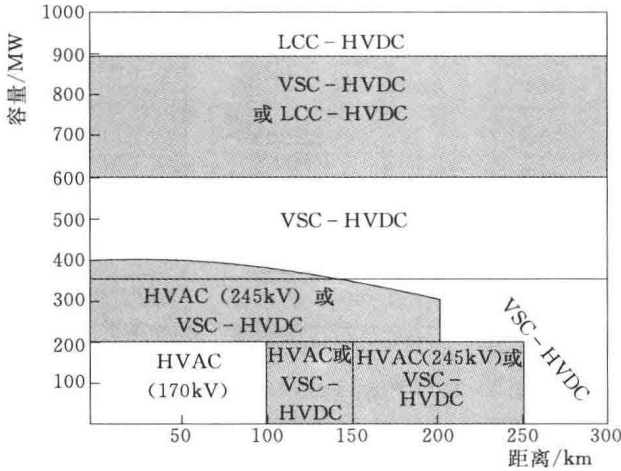


图 1-12 根据不同容量和陆地并网点距离的全系统经济性选择并网方案

系统成本由投资成本与运行成本构成。这些成本都会因容量、并网点远近而产生差异，经济分析仍然应该个案分析。图 1-12 仅给出一般性的经济结论。

对不同并网方案进行经济比较时，需要考虑传输等量电能和相等距离的总成本，表 1-8 给出了针对 1GW 的海上风电场 3 种并网方案的总系统成本。工程的总成本包含了系统中每个部件（电缆、变压器、换流站等），但不包含附加设备的成本，如海上平台和风电场的集电系统。

表 1-8 不同并网方案的总系统成本

输电距离/km	HVAC/£m	LCC-HVDC/£m	VSC-HVDC/£m
50	276	318	222
100	530	440	334
150	784	563	446
200	1037	685	557
250	1538	808	669
300	2433	930	781
350	2835	1053	893
400	3638	1175	1005

另外，海上风电场并网系统也可研究考虑多端高压直流输电方案，如图 1-13 所示。不管是 LCC-HVDC、VSC-HVDC 还是混合技术都可以被应用于多端结构中。在基于 LCC-HVDC 的多端系统中，变流器是串联的；而基于 VSC-HVDC 的多端系统中，变流器是并联的。多端高压直流输电技术目前还没有被广泛应用。

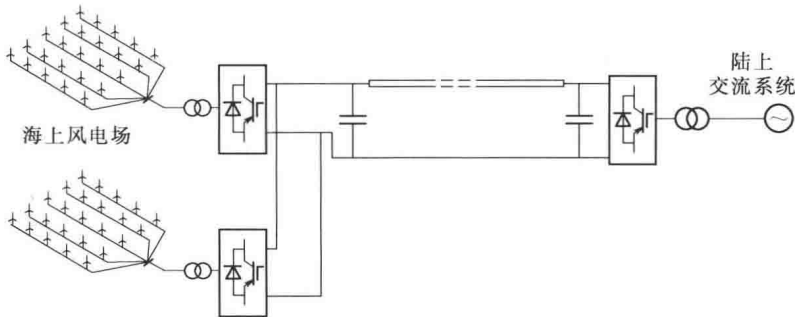


图 1-13 基于 VSC-HVDC 技术的多端结构的风电场并网示意图