

F E N G L I F A D I A N

全国风力发电场培训教材

风力发电

尹 炼 刘文洲 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

全国风力发电场培训教材

风力发电

尹 炼 刘文洲 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书系统地论述了风力发电技术的基本原理。全书分10章。作者从能源战略和电力革命的角度,阐述了风力发电在电力结构调整中的重要性和产业化发展的必然性。通过分析风力发电的历史概况和现状,使广大读者对风力发电有一个初步了解。在讲述风的基本知识(包括风的形成、风的测量、风的统计理论和风能资源)的基础上,重点论述了风力机、风力发电机组和风力发电的基本原理。对于风电场选址、风力发电的匹配、风力发电的经济性及风力发电机组的安装和维护等问题,都有较深入的探讨。该书可作为风电场技术人员培训教材,还可作为工科大专院校电类专业选修教材,也可供从事风电研究的科研人员及广大风电爱好者参考。

图书在版编目(CIP)数据

风力发电/尹炼,刘文洲编著.-北京:中国电力出版社,
2001

全国风力发电场培训教材

ISBN 7-5083-0873-5

I.风... II.①尹... ②刘... III.风力发电-技术培
训-教材 IV.TM614

中国版本图书馆CIP数据核字(2001)第076400号

中国电力出版社

(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

实验小学印刷厂印刷

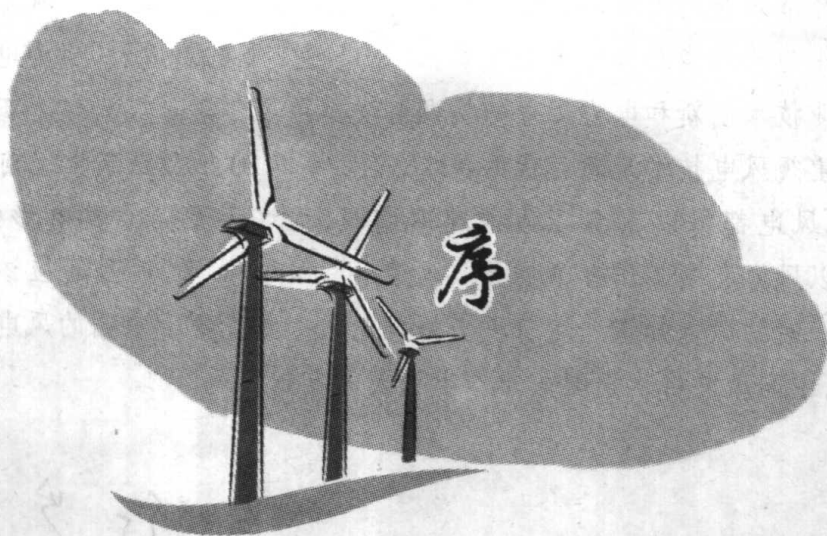
各地新华书店经售

*

2002年5月第一版 2002年5月北京第一次印刷
850毫米×1168毫米 32开本 7.125印张 187千字
印数0001—5500册 定价15.00元

版权专有 翻印必究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)



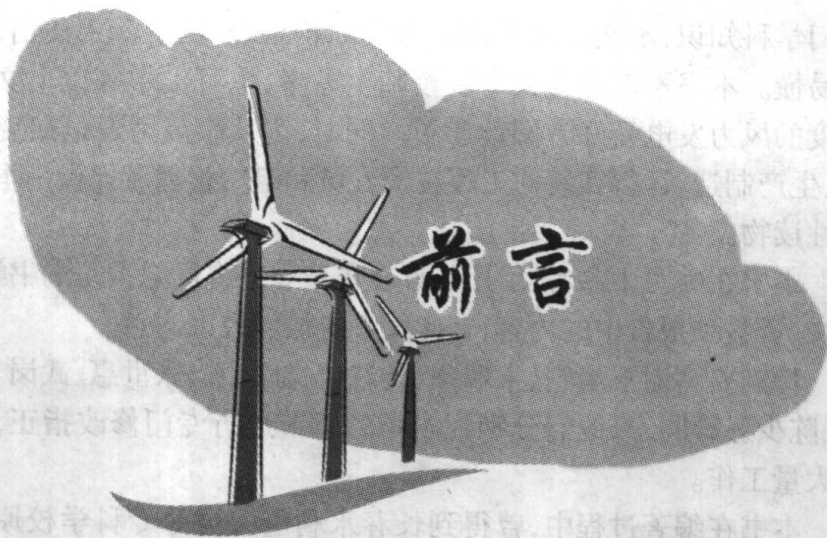
风力发电作为电力工业中电源的一个组成部分,在我国经过近 20 多年的发展,已逐步进入规模化、产业化发展阶段。如何开发我国丰富的风能资源?如何建设好风电工程?如何推进风电技术的进步?我认为首先必须造就一批从事风电工作的积极分子。这本书就是为广大风力发电积极分子迫切需要有一本中级培训教材而编写。风力发电是一门专业学科,有它自己的完整体系。本书是结合了风电工程技术的特点而编写的现代风电知识的培训教材,故针对性和实用性较强。它侧重讲述从事风电工作所需要的基本知识,以期用较少的学时掌握风电技术的基本原理和基本方法。同时,为了提高教材的先进性,本书还吸收了风电发达国家的先进经验。

21 世纪初的 10 年,将是我国电力工业体制改革和电力增长的关键时期。电力工业发展与改革的前提和基础,要依靠技术创新和管理创新,通过创新优化电力工业产业结构,重视电力工业自

1999/5

身经济效益的提高,同时重视电力工业社会效益的进步。风力发电作为清洁能源和可再生能源,以及电力工业的新成员,将为电力工业技术创新和电力工业结构调整发挥重要作用。广大电力工作者重视风电技术是新时代的要求,全世界近20年乃至新世纪前20年,风电都将以15%以上的速度增长,远远高于其他发电形式。所以风力发电工作者不但要具备常规的电业知识,而且还应该掌握一定的风电知识。随着更多的风电热心人投身于中国的风电建设,中国风电将为中国电业作出更大的贡献。

陆延奇



能源开发和供应的可持续发展对国民经济的可持续发展影响巨大。在化石燃料开发利用的有限性和对环境污染与破坏的双重压力下,选择可持续的能源开发和供应在新世纪越来越重要。中国幅员广阔,风能资源丰富,开发利用风能资源是新世纪初能源政策战略选择的必然。20世纪后20年,在高科技推动下,风力发电技术有了历史性的突破。全世界拥有近1400万kW风电装机容量,近10多年来风力发电以平均15%以上的速度增长,充分显示出风力发电给能源和电力结构所带来的调整。风力发电作为电力生产的一种类型,也逐步形成了自身的理论基础和科学体系。为了给广大电力工作者和从事、爱好风力发电的积极分子提供具有一定指导性的中级读物,我们编辑了这本教科书。由于水平有限,资料不全,错讹疏漏在所难免,欢迎批评指正。

本书按风能资源利用、风力发电系统、风力发电的技术经济性和风力发电的安装运行的基本原理和重点特性进行讲授。同时,介绍了国外风力发电发展、技术水平、经济性等状况与趋势。由于风力发电技术涉及到空气动力学、机械、发电、材料、气象、控制等

多门学科知识,本文注意了理论与实际相结合,尽量深入浅出,通俗易懂。本书不仅可为大专院校师生参考,也可供中等以上文化程度的风力发电爱好者阅读学习。同时,为从事风力发电研究设计、生产制造、运行安装的工程技术人员和组织管理者提供一本专业性读物。

本书在编写中参考、引用了许多单位和许多同志撰写的书籍、论文、资料和报告中的内容,在此编者向他们致以谢意。

特别要感谢王承煦、朱瑞兆、类慧英、施鹏飞、张世惠、武岗、路峰、陈少毅等同志,他们分别为本书各章节进行专门修改指正,做了大量工作。

本书在编著过程中,曾得到长春水利电力高等专科学校原校长赵明华、中华电力教育联合会许应才司长、长春工程学院副教授贾振国、副教授张立臣的支持和帮助,编者在此一并谨表谢意。

21世纪是风力发电的世纪,让我们一起展望中国风力发电的未来。

编 者

2001年8月16日



目录

序
前言

第一章 绪论——迎接 21 世纪中国风能时代	1
第二章 风力发电的现状与展望	10
第一节 风力发电的历史概况	10
第二节 世界风力发电现状	29
第三节 中国风力发电现状及展望	34
第三章 风	55
第一节 风的形成	55
第二节 风的测量	57
第三节 风的统计理论	74
第四节 风能资源	90
第四章 风力机	98
第一节 风力机的分类	98

第二节	风力机的基本理论	102
第五章	风力发电	115
第一节	风力发电的基本原理	115
第二节	风力发电系统的种类	116
第三节	风力发电的特点	118
第六章	风力发电机组	120
第一节	小型风力发电机组	120
第二节	大中型风力发电机组	127
第三节	大中型风力发电机组的主要零部件工作原理及设计	130
第四节	大中型风力发电机组的安全保护	178
第七章	风电场选址	179
第一节	风电场选址简述	179
第二节	风电场选址步骤	181
第三节	WASP 软件简介	184
第八章	风力发电的匹配问题	187
第一节	风力发电机组与风电场风资源的匹配	187
第二节	风电场与电网的匹配	189
第九章	风力发电的经济性	192
第一节	风力发电的经济性指标	192
第二节	影响风力发电经济性的主要因素	195
第三节	风力发电的经济性	196
第十章	大中型风力发电机组的安装及维护	201
第一节	大中型风力发电机组的安装	201
第二节	大中型风力发电机组的维护	203
附录一	风力机名词术语国家标准	205
参考文献	218



第一章

绪论

——迎接21世纪中国风能时代

纵观社会的发展，科学技术作为第一推动力，当科学技术发展到足够的阶段时，将带来人类社会突飞猛进的发展。这一事实，在20世纪表现得越来越明显，这一推动力的作用越来越突出。

正当人们迈向21世纪时，科学技术的长足进步，促使世界各地各类产业都进入了结构调整时期。结构调整与重组已使那些最传统、最垄断的产业也发生了人们难以预想到的变化。社会发展将在大重组、大调整的过程中走向新时代。

从能源、电力产业看，20世纪90年代，世界能源、电力市场发展最迅速的已不再是石油、煤和天然气，太阳能发电、风力发电等可再生能源异军突起。全世界风力发电容量从1990年的200万kW，发展到1998年的960万kW。因此，在20世纪末，国际一些能源专家预言：就能源、电力方面而言，21世纪将是可再生能源的世纪，能源、电力的开发利用将面临历史的变革。

一、新的能源、电力革命正在孕育之中

1. 新能源的强大生命力

现代能源、电力技术的发展，使风能的利用在人们还认为她微不足道的时候，便具备了根植于新时代的强大生命力。多少年来以煤炭、石油为主体的能源结构将被新型能源，特别是可再生

能源的利用所替代，从而使能源结构从集中转变为分散。如同计算机工业从大型工业主机转变为个人电脑一样，新的能源技术将走进千家万户。而这种能源的利用和能源经济方式，将使自然界最丰富的、取之不尽、用之不竭的资源——风能走向能源的主导地位。

以欧、美一些发达国家为代表，从能源战略高度越来越意识到风能利用的重要性，在政府发展战略的指导下，得以强力推进。从80年代初开始到90年代，政府与企业、金融与企业合作，共同投资、联合开发风力发电。生产制造设备的变革已经呈现——风力发电的新能源装置制造产业作为高科技、环保产业，不断发展壮大，日新月异；一些开发、生产大型火力发电设备和核能发电设备的厂家也纷纷转轨，转而生产、制造新能源发电设备。

不可否认，目前能源界存在两种观点：一是新能源仍然微不足道，也不可能满足几十亿人对能源的需求；二是现有的能源技术系统是可靠的、经济的、完全成熟的，全球能源技术和系统不会在短期内发生变化——石油、煤炭、天然气、水力发电、火力发电仍主宰能源事业，不会被替代。今天，社会的可持续发展已成为政治问题，新技术、产业调整以及更为严厉的环境政策，必将推动世界能源和能源经济的变革。

20世纪中电子技术、新材料和生产技术取得了长足进步，并在能源产业得到广泛的应用，各国政府对新能源技术的研究和发展给予了不同于常规能源技术的大力支持，技术、科技的进步将使风能在不久的将来被大规模应用。

2. 产业重组和调整推动能源利用的变革

电力行业一直属于国家拥有或控制的垄断企业。随着产业发展规模越来越大，这种垄断导致规模庞大、效率低下、技术因循守旧，对新技术的研究、开发和应用非常迟钝。英国在80年代中期带头从事电力工业结构的重组，随之，巴西、印度、波兰、日本和美国，对电力、铁路等公用事业进行民营化（私有化）。

把垄断的电力行业进行网厂分开，许多国家将发电厂转而成为独立的电厂，实行竞价上网。电力竞争市场的形成，使电力工业的属性从过去单一的公用性转向与商业性相结合。这种重组和调整，形成了电力改革的新浪潮。独立的发电商大量涌现，为了提高自身竞争力，他们都在不断提高效率，降低成本。以政府支持小型、污染少的发电技术为契机，纷纷建立小型发电厂。随着国家垄断企业的分解，独立发电商采用了新的经营策略，建设大批新能源工程，使政府的可持续发展战略与能源、电力企业可持续经营战略有机地统一起来。

3. 风力发电利于环境的保护

人类强烈地意识到对已遭破坏的地球环境必须进行保护，为此，必须对能源、电力的应用进行变革。由于世界上许多国家对火电厂废气废物的排放都有明确的法律规定，使火电厂生产成本大大提高。核能由于造价高和具有危险性，也难以大规模应用。

能源发展是一个公共政策问题。1981年在内罗比举行的联合国新能源和可再生能源开发利用大会，强调替代能源和可再生能源可减轻对石油依赖的重要性。1992年里约热内卢环境与发展大会（UNCED）、1993年维也纳人权大会、1994年开罗人口与发展大会、1995年哥本哈根世界社会首脑大会和北京第四届世界妇女大会、1996年伊斯坦布尔人类居住区会议和罗马世界食物供应保障首脑会议，都提到了能源问题。会议制定的行动纲领明确指出能源利用对人类健康和环境的负面影响，支持发展高效能源技术和利用可再生能源。此外，还有三个与能源密切相关的公约：气候变化框架公约（FCCC）、长距离跨国界空气污染公约和防止沙漠化公约。这些公约里面都强调了能源利用与环境问题。

此外，联合国大会47/190号决议强烈要求联合国组织及计划采取必要措施，继续研究里约会议关于环境与发展的宣言及21世纪议程。21世纪的能源、人口环境问题已成为世界公共政策的重要组成部分。

政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 的观点是: 人类活动将使温室气体的浓度继续增加, 导致气候发生显著变化 (全球变暖)。然而, 有许多不确定因素使人们难以研究人类影响的程度以及对未来的规划。显然, 目前以化石燃料为主的能源消费方式需要改变。若保持不变, 到 2100 年, CO₂ 排放量可能增加到目前的 3 倍。IPCC 认为, 排放量必须大大低于目前水平, 以稳定大气中 CO₂ 的浓度。

在 1992 年的里约会议上, IPCC 的研究结果促使各国政府签订了联合国气候变化框架公约 (PCCC)。对此, 迄今已有 4/5 以上的联合国成员国 (1996 年底有 164 个国家) 认可。UNFCCC 是各国自愿对稳定 CO₂ 排放作出承诺, 不受约束。目前, 各国正在协商减排的目标和时间表。实际上, 大多数工业国家达不到他们自定的 2000 年排放量限制在 1990 年水平的目标。目前的能源消费方式使全球气候受到威胁, 与可持续发展背道而驰。

4. 技术革命过程中的“断续性平衡”已在能源、电力产业中发生

美国哈佛大学生物学家斯蒂芬·古尔德指出, 在特种突变前往往要经历漫长的静态平衡时期, 在这段时期内, 进化过程似乎是如冰河期一样的稳定与漫长。但是, 一旦气候骤变或者其他突变使环境发生巨大变化, 物种就会在短暂时期内发生突变。古尔德的这一理论被称为“断续性平衡”理论, 并为生物学界广泛接受。

在技术革命过程中, “断续性平衡”的现象同样会发生。例如电话, 在 19 世纪末发展迅速, 而到 20 世纪中期, 其发展速度明显减慢。如今, 电话的发展又呈现大爆炸时期。新型数码式、无绳式和便携式电话不断出现, 电话已向多功能、智能化方向发展, 电话不再仅仅是传递声音的工具, 它已经成为从传真文件到信贷交易的多用途通信工具。

可以肯定地说, “断续性平衡”现象也在能源、电力领域发生。当某一领域内的突破改变了长期占主导地位的资源竞争

力，即使被替代者仍然具有丰富储藏量，也丝毫改变不了发展的进程。当石油时代来临时，并未顾及煤炭的储藏量。石油时代的来临并不是因为石油的发展，因为石油很早就被人类所发现。而其真正的原因则是内燃机的发明，它使石油具有了更为广泛的用途。于是，转眼间，2500万匹马都“失业”了。我们从能源、电力清楚地看到，早在1890~1910年间创造发明就层出不穷。在那短短的20年里，城市里发生了天翻地覆的变化——四轮马车被汽车代替，电灯取代了煤气灯。虽然马车和煤气灯使用历史很长，但由于一场技术革命，其以惊人的速度被淘汰了。一个世纪的变化是如此的相似。今天，能源、电力工业也正处在类似的转折点上，能源、电力的转型时机已经成熟。一方面，人们需要更清洁的环境，纷纷叫喊“缺氧”。他们要求以更少的花费、更灵活的方式、更优质的产品来满足能源需求。另一方面，具有划时代意义的新能源技术出现了，在美国、法国、加拿大、德国、丹麦和荷兰等国，力图保有旧体制的能源产业已经感到了越来越大的压力。新能源技术及风力发电的商业化、规模化已不再是科学家和幻想家们的研究领域，已经以现代巨人的姿态向世人走来。美国《经济学家》预言，在未来的一个世纪里，庞大的矿物燃料工业将败下阵来。1998年公布的欧盟能源战略白皮书宣布，到2050年，可再生能源在欧盟成员国能源供应结构中将达50%。美国和日本也宣布下一世纪能源的增长主要考虑清洁的可再生能源。

二、中国 21 世纪将进入风能时代

在可持续发展中，最佳的能源利用方式是充分发挥电能的作用。除了煤炭、石油利用大户积极采取环保措施以外，还应通过广泛应用电能提高能源效率。与此同时，电能为广泛应用各种可再生能源和新能源创造了广阔的机会。

1. 风力发电——时代的选择

我国资源与环境状况决定了21世纪中国能源资源的利用将走向风能时代。资源是人类社会赖以生存发展的物质基础，是可

可持续发展的客观条件。可持续发展实质上是以实现资源的可持续利用来保证人口、经济、社会 and 环境的相互协调与发展的。江泽民同志在《正确处理社会主义现代化建设中的若干重大关系》中指出：“我国耕地、水和矿产等重要资源的人均占有量都比较低，今后随着人口增加和经济发展，对资源总量的需求更多，环境保护的难度更大。必须切实保护资源和环境，不仅要安排好当前的发展，还要为子孙后代着想，决不能吃祖宗饭，断子孙路。”中国资源总量虽大，但人均仍居世界后列，各类可更新资源人均值的总排序约 120 位，不可更新和再生的矿产资源人均值居第 80 位。从人均值上看，我们只是“资源小国”。在严峻的资源形势面前，我们不可盲目乐观，不能承袭发达国家过去那种以高消耗资源为代价换取经济高增长的模式，否则将难以实现可持续发展，甚至会造成更大的灾难。中国作为能源电力资源开发大国，要把握世界经济大调整、产业结构重组的大改革机遇，走高科技、低污染的能源，电力产业跨越式的发展之路，必然选择风能等可再生能源和新能源。

2. 风力发电——21 世纪经济发展的客观需要

电力技术是一种灵活、有效利用可再生能源的能量形式。电力技术提出了三个“E”，即能量（Energy）、经济（Economy）和环境（Environment）间的平衡。从减少温室气体排放的角度看，以风能为主的可再生能源等发电技术是很有前途的选择，在缓解未来世界经济活动不断发展与一次能源，特别是化石燃料等不可再生能源，供应方面的矛盾起到了重要作用。风能的选择是 21 世纪经济发展的客观需要。特别是像我国这样经济高速增长的国家，为了未来社会的可持续性，在所采纳的技术中作出有远见的选择是不可回避的。代表能源、经济 and 环境的“3E”应该以一种和谐、相互支持的方式结合为协同作用的一个整体，而进一步结合成国家和国际政策的一个整体，以作为可持续发展的长期基础。

达到这一点的关键因素是“经济有效性”，用通俗的话来说，

就是以比较小的投入和最小的环境负担来生产更多的产品。由于运行中的高效能和排放的可控制性，相信电力技术是增强经济有效性，促进“3E”之间的平衡，并作为可持续发展基础的有希望的选择方案。许多发达国家正是基于这一战略思考，选择了风能转换成电能，使电力结构得以调整。中国煤炭开采和利用为世界第一大国，发电装机容量和发电量是世界第二大，一次能源以煤炭为主。能源结构的调整，能源利用技术的改造是21世纪的重点任务。

3. 丰富的风能资源也是开发风力发电的一个重要原因

中国蕴藏丰富的风能资源，现估计实际可开发量2.53亿kW，为可再生能源和新能源利用技术提供了强大的资源条件。两大风能地带——西北、华北、东北和东南沿海为风能资源丰富区，跨全国21个省、市、自治区。到1999年底已开发微小户用型风力发电机16万台，并网型风电场24座，总装机容量26万kW。毫无疑问，中国风能等可能再生能源的利用受到一系列因素的限制，其中包括资金和技术资源供应的不足、政策的不相配套等。和常规资源相比，它还缺乏竞争力。但从可持续发展的目的出发，从中央到地方的各级政府已对这些资源的开发给予了关注。

4. 电能能为环境保护作出贡献

电力技术在解决气候变化问题中所起的作用目前已成为人们讨论的热点议题。我们相信电能及其相关技术在缓解气候变化方面有着关键的作用。也就是说，“电能不是问题所在，与其他能源相比，它更是解决办法的一部分”。

电能是经济增长、技术进步和环境改善的一个基本手段。电能及其相关技术的推广是减少全球温室气体排放策略的主要部分。从供应方面看风能等可再生能源和新能源发电技术不存在碳(C)的排放。世界各国都在仔细地规划，积极地选择适当时机引入可再生能源的发电技术和实际应用。从需求方来看，更广泛地应用有效电力技术将在缓解全球气候变化和大城市污染方面起

越来越大的作用。这是因为电力技术提供了传递准确可控数量能源，即什么时候和在哪里准确需要多少能量，有没有任何限制有害排放的手段。作为电力工业界，愿意与政府和社会一起为提高效率和减少电力生产过程中的排放作出有效行动；与设备制造厂合作，自愿采取有责任心的行动，把一种清洁的和灵活的能源形式——电力技术的潜力挖掘出来。为了迎接这一挑战，电力工业界要推进可持续的一次能源发展；要推进消费层上的可持续能源方案的开发和商业化；要鼓励最广泛意义上的能源保护，包括节电和环境优先的原则；要积极寻求已成熟技术，以有效和经济途径从发达国家获得技术转让。

5. 积极行动起来，迎接风能时代的到来

人类活动对自然环境的影响已成为越来越深刻和复杂的活动。可持续、高质量的生活方式需要建立新的线索和思路。这就清楚地告诉我们，这将是一场变革。以下三个因素将决定我们可持续发展的经济过渡的速度，也是我们决定行动的原则。

(1) 技术改造。在一个市场驱动的环境中，技术革新正在快速发展着。先进的技术必定减少单位国内生产总值的环境冲击，也还可能会出现新的受欢迎的效应。更何况中国当前风能发电技术经济性与常规电源还有相当的差距。

(2) 法规和制度的完善与重组。适当的法规和正确的鼓励性政策对变革的方向是至为重要的。不能让市场推动力放任自流。这只无形的手只能在为责任心和社会凝聚力提供基础的道德氛围中才可能做出有益的事情。当然，竞争激励创新，而当它真正取得经济效益时，一个可靠的市场是打不垮的，中国风能发电技术的发展在这两个方面都面临难题。

(3) 转变观念和改革习俗。实际上是态度和既有利益必须改变。这对整个社会和个人同样适用。生产者只能对明天的消费者的偏爱进行猜测。但消费者有两种需求，一方面，消费者渴望低廉的价格；另一方面，当在生产过程中对环境造成影响时，他们却又越来越对此感到不满和谴责。我们可以从英国的电力市场的