

风电消纳与能源管理研究

范利国 著

天津出版传媒集团

天津科学技术出版社

风电消纳与能源 管理研究

范利国◎著

天津出版传媒集团

 天津科学技术出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

风电消纳与能源管理研究 / 范利国著. -- 天津 :
天津科学技术出版社, 2017. 1

ISBN 978-7-5576-2208-4

I. ①风… II. ①范… III. ①风力发电—能源管理—
研究 IV. ①TM614

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 025592 号

责任编辑: 方 艳

天津出版传媒集团

 天津科学技术出版社出版

出版人: 蔡 颢

天津市西康路 35 号 邮编 300051

电话 (022) 23332695 (编辑部)

网址: www.tjkjcs.com.cn

新华书店经销

天津午阳印刷有限公司印刷

开本 787×1092 1/16 印张 6.75 字数 100 000

2017 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

定价: 30.00 元

前言

伴随着人类社会的迅猛发展，能源与发展、能源与环境日益成为全球经济社会发展的重要议题。从 20 世纪 50 年代开始，以石油、天然气、煤炭为代表的传统化石能源消耗量大增，这不仅导致了世界经济的发展对这些非可再生能源的过度依赖，而且也造成了严重的环境污染。据统计，全球范围内绝大多数的环境污染问题均与人类对传统化石能源的过度开采与使用有着直接的关系，其中雾霾的主要污染物大多来自于石油、煤炭的燃烧。面对能源与环境的突出问题，对于新能源的有效开发成为世界各国亟待解决的问题。相比于传统能源，新型能源一般具有储量大、污染小的特点，这对于解决当今世界各国的传统非可再生能源日益枯竭和严重的环境污染问题具有十分重要的意义。

目 录

第 1 章 风电的发展现状与展望.....	1
1.1 风能的历史.....	2
1.2 风电机组的技术发展.....	6
1.3 国内外风电产业的发展状况.....	8
1.4 风力发电产业发展因素.....	43
第 2 章 风电特点及风电系统的发展.....	47
2.1 风电的特点.....	47
2.2 风电对电力系统的影响.....	49
2.3 风电对电力系统的影响.....	53
第 3 章 弃风问题产生的成因.....	59
3.1 世界部分国家风电弃风现状及成因.....	59
3.2 我国弃风问题分析.....	65
第 4 章 消纳风电弃风技术方案分析.....	75
4.1 风电弃风的原理.....	75
4.2 系统调峰能力分析.....	76
4.3 消纳弃风的方案分析.....	91

第 5 章 基于电锅炉及储热技术的风电接纳的效益分析 95

5.1 热电联产机组电热特性及运行机制..... 95

5.2 热电厂配置电锅炉及储热方案..... 96

5.3 电锅炉及储热装置提升风电消纳方式..... 97

5.5 结论 98

参考文献 101

第 1 章

风电的发展现状与展望

电力行业是能源消耗的重要行业，特别是在我国，装机容量中火力发电装机容量比重过大。截至 2015 年底，全国发电装机容量已经突破 150 673 万千瓦，其中火电装机容量达到 99 021 万千瓦，占全部装机容量的 65.7%。2015 年全国发电总量为 56045 亿千瓦时，其中火力发电量为 39307 亿千瓦时，占全国发电总量的 70%。火电巨量的装机容量和发电量均是以消耗煤炭为代价，造成的环境污染（空气污染、水污染等）问题也越来越严重，越来越多的环境污染事件也将电力行业推向了风口浪尖，公众对于电力行业环保的关注度愈加提高，对电厂的环保、减排要求也更加严苛。2012 年 1 月 1 日起，我国开始实施《火电厂大气污染物排放标准》，要求现有火力发电锅炉及燃气轮机对烟尘、二氧化硫、氮氧化物和烟气黑度必须达到排放标准。国内火电厂被迫开始了大规模的环保改造。

在改造火电排放的同时，继续大力发展清洁型能源、发展大规模清洁型能源并网发电，也是电力行业必需的课题。用清洁型能源代替目前大量使用的不可再生资源，才是解决世界环境问题的根本方法。

新能源浪潮也在重新塑造电力工业，使得电力工业在可持续发展与安全环保谋求新的出路。作为近些年间迅速发展并不断成熟、具有大规模发展潜力的风能发电，在未来有可能成为重要的化石燃料替代能源。与化石燃料不同的是，风能是一种储藏量很大的、清洁的、可再生的新型能源。利用这种清洁能源来进行发电，能够使环境污染降至最低，也使得人们的健康和地球上其他生命免受不良影响。

1.1 风能的历史

风能是地球表面大量空气流动所产生的动能。由于地面各处受太阳照射后气温变化不同和空气中水蒸气的含量不同，因而引起各地气压的差异，在水平方向高压空气向低压地区流动，即形成风。风能资源决定于风能密度和可利用的风能年累计小时数。风能密度是单位迎风面积可获得的风的功率，与风速的三次方和空气的密度成正比关系。风能资源受地形的影响较大，世界风能资源多集中在沿海和开阔大陆的收缩地带，比如西欧的北海地区、北欧的一些国家及中国的东南沿海、新疆、甘肃、内蒙古一带的风能资源就非常丰富。

人类利用风能的历史可以追溯到几千年前，那时人类利用风帆来推动船只航行。后来，人类利用风能来为谷物研磨磨坊和风力机系统提供动力。根据中国和埃及的文献记载，三千年前风力机就被使用过。由过去粗重的机器演变为今天精密化的设备，风能技术发展经历了许多不同的阶段。

最早有记录的风车可以追溯到公元前 200 年，当时波斯人利用风车来研磨谷物。这类风车是垂直轴的，轴上的帆由成束的芦苇或者木材做成。研磨谷物的石头连在垂直轴上，帆通过水平支杆连接在中心竖轴上。

帆的大小由制造它们的材料决定，通常 5m 长，9m 高。后来又有很多关于风力利用的记载，比如阿拉伯冒险家伊斯塔库里在大约公元 950 年记载了现今伊朗和阿富汗边境地区使用的碾磨粮食的垂直轴风力机，这些类似功能的设备直到今天仍在该地区使用。又比如有记录显示公元 1000 年左右东波斯的锡斯坦地区使用的风力扬水机，还有同时期在埃及使用风力机用于灌溉的记录。

根据相关史料可考，公元 1105 年风力机开始在欧洲第一次被使用，最早的风力机主要用于扬水和灌溉。到 13 世纪，在欧洲的大部分地区用于研磨谷物的风力机已经非常常见。和波斯人设计的垂直轴风力机不同，欧洲的风力机多采用水平轴设计，这些立柱式的风力机构造样式要求立塔截面形状一般为圆形或者多边形，利用木材或者砖头建成。这样的构造形式可以方便叶轮通过调整尾舵进行手动对风，通过把叶轮从风中偏出或者移去覆盖叶轮的帆布进行收帆，避免大风对风车的损害。公元 1439 年荷兰制造出了最初用于碾磨粮食的风力机，在荷兰风力机应用的过程中，荷兰人在风力机设计上进行了许多有效的改进，发明了多种不同类型的风力机，例如斯莫克风力机和用来排水的风力机。叶轮开始采用原始的翼型，以提高效率。除了研磨谷物，风力机还用来在荷兰低洼的沼泽地进行排水。在当时的欧洲，对于风力机的研究非常兴盛。大约公元 1500 年列奥纳多·达芬奇在他的绘画作品中就有相关风力机的绘画，之后 1665 年英国萨里制造出了碾磨机，1745 年英国的埃顿蒙多利和 1750 年安多留梅依库鲁相继发明了可以自动调节风向的风力机，1759 年英国的斯米顿关于风力机和扬水机的研究获得了英国皇家索萨埃蒂金牌。到 18 世纪中期，荷兰移民把风车技术带到了美国。到 19 世纪初，在英国和荷兰使用的风力机数量达到 1 万台以上，主要作为动力源被使用，风力机的直径为 20m，风速为 7m/s 时的最大输出功率可达 20kW，年平均输出功率大约为 10kW。

风能成功利用的另外一种形式就是后来发展的风力提水机。19 世纪

中期，美国为了发展农业及畜牧业，研制了一种轻便的美式多叶片风力机，这种风力机叶轮相对较小，直径范围 1 米至几米，使用金属叶片，工程设计优良，主要用于将水从低于地面几米的地方抽出以供农业及畜牧业使用。从 1850 年到 1930 年，仅美国就安装了超过 600 万台的此类风力机。即使到现在，世界许多地方还在广泛使用此类设备。

风力应用于发电的先驱者是丹麦的 Poul la Cour 教授，1891 年他获得了丹麦国家的补助金，在丹麦 Askov 成立了风力发电研究所，安装了试验用的风力发电机，这个风力发电机具有 4 个叶片，半径为 5.8m，向乡村地区提供电力。到 1897 年，又安装了直径 22.8m 的大型风力发电机组。同一时期美国的俄亥俄州的克利夫兰也建成了一台具有 17m 长叶片的大型风电机组，额定功率达到 12kW。这一时期，风力机的工程设计采用了更多的系统化方法来进行改进，比如通过采用低实度叶轮和空气动力学设计叶片，进一步提高了风电机组的现场实际运行性能。到 1908 年，丹麦已有 10—20kW 级的风力发电机组 72 台，1910 年达到 120 台，1918 年达到了几百台，这些机组用于向一些乡村地区供应电力。到 1925 年风力发电机组已经开始在美国市场商业化。但随着第一次世界大战结束后，使用交流发电机的大规模火力发电公司如雨后春笋般的相继成立，风力发电开始遭遇困境。直到第二次世界大战期间，由于丹麦燃料供应紧张，风力发电再次蓬勃发展起来，1940 年 20kW 级的风力发电机组达到 16 台，到 1944 年达到了 90 台。同时大容量风电机组也相继被开发出来，前苏联于 1931 年在黑海岸边建成了一台 100kW 的风电机组，专门用于公共设施系统的供电，年发电量可达 28 万 kWh，并且将其与相隔 35km 的 2 万 kW 的火力发电厂相连。其后，安装有大容量风电机组的实验性风电场开始在美国、丹麦、德国、法国及英国相继建成，1930 -1960 年，研究开发与商业电网相连的输出功率在 100kW 以上的大型风力发电项目就达到十余个。1941 年在美国佛蒙特州的拉特兰建造并投入运行了一台输出功率为 1250kW 的风电机组，这是世界上第一台兆瓦级的风力发电

机组，直径为 53m，带有两个不锈钢叶片，每个叶片的重量达到了 8t。遗憾的是到 1945 年该机组商业化运行一个月就因为叶片脱落而停止运行，该项开发研究就此中断，但这台机组的运行成功地证明了大型风力发电机组在技术上的可行性。

对风力发电的深入研究开始于 20 世纪 50 年代，提出了高叶尖速比低实度风电机组的概念。随着 20 世纪 50 年代开始，以石化燃料为原料的大型火力发电厂提供更加廉价和可靠的电能，风力发电的发展又一次遇到了困难。当时火力发电成本大约为 3 美分/kWh 到 6 美分/kWh，而风电的成本大约在 12 美分/kWh 到 30 美分/kWh。价格低廉、供应充足的化石燃料以及后来核能发电的广泛开展，人们对风电的兴趣逐渐减弱。直到 1973 年全球石油危机的发生，人们开始反思对于化石燃料的过度依赖问题，同时核能的安全问题也开始纳入到公众的考虑之中，这些因素都迫使人们对风能的再次关注，从 20 世纪 70 年代后期又一次开始对大型风力发电机组的研究开发。比如美国委托其国家航空和航天管理局对大型风电机组的开发，成功地开发出一系列水平轴风电机组。1986 年德国开发出了轻质恒速叶轮，采用玻璃钢叶片，安装在由拉索固定的构造简单的中空塔架上，叶轮直径最大可达 15m，输出功率为 100kW。其后一些创新的概念在风能的研究和开发中被提出，包括涡流风力机、缪斯格罗夫叶轮设计、水平轴叶轮设计等，同时建立了样机并进行了相关测试。

风力发电是指利用风力发电机组直接将风能转化为电能的发电方式。在风能的各种利用形式中，风力发电是风能利用的主要形式，也是目前可再生能源中技术最成熟、最具有规模化开发条件和商业化发展前景的发电方式之一。

1.2 风电机组的技术发展

20 世纪 80 年代以后,随着风力发电机组的迅速普及,促进了人们对于经济效益的追求,其成果促使商业使用的风力发电机组走向大型化。到 1990 年末,出现了多个生产兆瓦级风力发电机组的制造商。风力发电机组的安装场址也不仅局限于平坦沿海岸地带、不断扩大到山脉及海上。进一步,发电方式从传统的、利用感应发电机的失速型控制方式逐步转变为利用变流装置的变速型连接方式。发电成本逐渐减少,甚至在具有良好风况的场址可以取得和火电同样的效率。

(1) 大型化

风力发电机组的风轮直径和输出功率趋向大型化。近几年,风电机组的风轮直径一般达到 90~120m,输出功率达 3MW 的风电机组成为主力机组,最大风电机组的风轮直径可达 141m,输出功率可达 7.5MW。

(2) 控制输出系统

桨距控制可以最大限度地捕获风能,是风力发电机组的关键技术之一。早期的风力发电机组均采用定桨距的失速控制方式对风电机组进行控制,其风轮叶片直接固定在轮毂上,叶片的桨距角在安装时确定,当风速变化时,桨叶的迎风角不能随之变化。定桨距是利用风轮叶片翼型的气动失速特性来限制叶片吸收过大风能,风力发电机的功率调节由风轮叶片来完成,其优点是控制简单,可靠性高,维修费用低;但风机叶片本身结构复杂,成型工艺难度较大,限制了风机的大型化。随着风力发电机组大型化、兆瓦级机组商业化的发展,变桨距控制变得越来越重要,其叶片通过轴承固定在轮毂上,可以绕叶片的展向轴向转动,借助

控制技术来调整其桨距角，通过变距调节机构使风轮叶片的安装角随风速变化而变化，从而达到调节功率的目的，特别是在低风速时，可使桨叶保持良好的攻角，实现比定桨距失速调节更好的能量输出，非常适合于在平均风速较低的地区安装。这类风电机组的变距调节机构非常复杂，同时由于风轮叶片是大惯性环节，不当的调节可能会引起灾难性后果。

（3）变速风电机组

早期的风电机组多采用固定转速运行方式的感应发电机，以保持与电网频率的一致。现代兆瓦级以上的大型并网风力发电机组多采用变速运行的工作方式，风力机变速运行时，与其连接的发电机也做变速运行，需采用电力电子变频设备，保证在变速运行时发出恒压恒频的电，实现与电网的连接，这种运行方式可以实现优化风力发电机组部件的机械负载及优化机组系统的电网质量。

（4）直接驱动方式

对于传统的风电机组，其风力机的叶轮和发电机之间配备齿轮箱部件用于增速传动，这种设计增加了风电机组的重量，噪音也较大。直接驱动技术于2005年进入开发阶段，在大型风力涡轮尺寸方面可与齿轮传动风力涡轮技术进行竞争，现代大型风电机组多采用多级低转速发电机与叶轮直接连接的驱动方式，省略了易于损耗并且难以维护的齿轮箱部件，提高了发电效率，易于安装及维护，具有机组寿命长、体积小、全寿命周期成本低等优点。

（5）风电机组的翼型和叶片

风力发电机组早期的叶片翼型采用低速航空翼型，这种翼型一般具有较好的气动性能，因而在风电叶片设计中得到了广泛的应用，但由于这些翼型的雷诺数相对较高且厚弦比较小，往往难以在大型风电叶片的

根部区域直接应用。现代大型风电机组叶片为了在低雷诺数内获得较高的升阻比，往往采用专用风电机组的翼型。

1.3 国内外风电产业的发展状况

20 世纪 70 年代后期，在全球能源危机及核能安全问题等多因素影响下，风力发电又一次进入到人们的视野中，风能作为商业上可行、经济上有竞争力的可再生能源形式，其重要性越来越突出。

1. 3.1 风电产业的发展阶段

（1）1980—1990 年

美国和欧洲开发并安装了一些大型风电机组，其容量多为 500~3200kW，风电产业开始迎来发展机遇。

（2）1990—2000 年

到 1995 年，全世界安装风电机组为 22 000 台，装机容量达到 4800MW，风电产业继续快速增长，单个风电机组容量从 200kW 增至兆瓦级，欧洲制造商主宰了大型风电机组市场，欧洲开始建造海上风电场，同时在美国和欧洲之外的国家也陆续开始建造风电场，到 2000 年末，印度安装了 1220MW 机组。

（3）2000—2010 年

从 2000 年开始，风电机组的规划建设已成为很多国家电力系统规划的重要内容，欧洲在装机容量、兆瓦级风电机组的研发及制造方面仍处于领先地位。

1. 3.2 风力发电的发展回顾

目前，风能是世界上增长最快的能源形式。近几年来，风电在全球范围内得到了快速发展。

(1) 2004 年

截至 2004 年，全球风电总装机容量为 47692MW，其中欧洲以 34605MW 的装机容量占据首位，占全球风电装机总量的 72.6%。北美地区以 7814MW 位居第二，占全球风电装机总量的 16.4%。亚洲以 4726MW 位居第三，占全球风电装机总量的 9.9%。大洋洲为 547MW，占比 1.1%。其中德国、西班牙、美国、丹麦和印度排在风力发电的前 5 位，中国当年的风电装机容量为 764MW，见表 1-1。

由于欧盟国家强有力的补贴措施，到 2004 年底风能发电已占到欧盟总发电量的 5%，比 2000 年增长了 154%，风能新增发电能力占整个欧盟同期新增发电能力的一半以上，风力发电已成为欧盟内部非常重要的发电形式。

(2) 2005 年

根据欧洲风能协会的统计数据，2005 年全球新增风力发电装机容量 11800MW，达到了 59322MW，比 2004 年增长了 24.4%。全球风电装机容量前 6 位的国家依次是德国（18428MW）、西班牙（10027MW）、美国（9149MW）、印度（4430MW）、丹麦（3122MW）和意大利（1717MW），包括英国、荷兰、中国、日本、葡萄牙等国风电装机容量也均超过了 1000MW。

截至 2005 年底，欧洲风电装机容量达到 40 500MW，提前实现了到 2010 年风电装机容量达到 40 000MW 的目标，占全球风电装机总容量的 68%，提供了欧盟约 3% 的电量需求，是风电市场的领导者。北美地区风电装机容量达到 9 832MW，比 2004 年增长了 37%，占全球风电装机总

容量的 16.6%，美国 2005 年新增风电装机容量 2431MW，增量居世界第一。亚洲风力发电市场增长强劲，新增风力发电装机容量占世界新增风力发电装机容量的 20%，印度增长最快，新增容量 1430MW，中国风力发电装机容量在国家《可再生能源法》的推动下达到了 1 260MW。

（3）2006 年

根据全球风能协会的报告显示，2006 年世界上已有 70 多个国家参与风能开发，涵盖世界各大洲，并呈现快速增长态势，全球新增风力发电装机容量 15191MW，总容量达到了 74513MW，比 2005 年增长了 25.6%。全球风电装机容量前 6 位的国家依次是德国（2 0621MW）、西班牙（11 615MW）、美国（11 603MW）、印度（6 270MW）、丹麦（3 136MW）和中国（2 604MW）。2006 年风电装机容量超过 1 000MW 的国家已由 2005 年的 11 个增加到 2006 年的 13 个。其中欧洲国家包括德国、西班牙、丹麦、意大利、英国、荷兰、葡萄牙、法国，共 8 个国家；北美包括美国和加拿大，共 2 个国家；亚洲包括印度、中国和日本，共 3 个国家。欧洲地区继续保持领先地位，北美地区发展速度减缓，而亚洲地区风力发电产业的发展势头强劲，正成长成为风力发电产业的新生力量。

截至 2006 年底，欧洲地区新增风电装机容量 7710MW，风电装机容量达到 48 550MW，比 2005 年增长 18.7%，占世界风电装机容量的 65.2%，所占比重比 2005 年回落 2.8%，继续保持世界领先地位。其中德国和西班牙风电装机容量分别增长了 12%和 15.8%，居世界前两位；法国和葡萄牙的风电装机容量增长速度较快，分别增长了 107%和 68%，分别达到了 1 567MW 和 1 716MW；风机传统生产大国丹麦风电装机容量增长出现停滞，仅增长了 0.3%，达到 3 136MW。

截至 2006 年底，美洲地区新增风电装机容量 3 530MW，风电装机容量达到 13 570MW，比 2005 年增长 38%，继续保持快速增长，占世界风电装机容量的 18.3%，所占比重比 2005 年上升 1.3%。其中 96%的风

电装机容量集中在美国和加拿大。美国风电装机容量为 11 603MW, 当年新增容量 2 454MW, 比 2005 年增长 27%, 稳居世界第 3 位; 加拿大风电装机容量为 1 459MW, 当年新增容量 776MW, 比 2005 年增长 114%; 巴西风电装机容量为 237MW, 当年新增容量 208MW, 比 2005 年增长 717%。

截至 2006 年底, 亚太地区新增风电装机容量 3790MW, 风电装机容量达到 11 670MW, 比 2005 年增长 48%, 继续保持快速增长, 占世界风电装机容量的 15.7%, 所占比重比 2005 年上升 2.4%。其中 84% 的风电装机容量集中在印度和中国。印度风电装机容量为 6 270MW, 当年新增容量 1 840MW, 比 2005 年增长 41.5%, 居世界第 4 位; 中国风电装机容量为 2 604MW, 当年新增容量 1 344MW, 比 2005 年增长 106.7%; 日本风电装机容量为 1 394MW, 当年新增容量 333MW, 比 2005 年增长 31.4%。

截至 2006 年底, 非洲及中东地区新增风电装机容量 172MW, 风电装机容量达到 441MW, 比 2005 年增长 62.7%, 保持快速的的增长, 占世界风电装机容量的 0.6%。非洲国家拥有良好地风能资源, 一些国家如摩洛哥、埃及等具备建设大型风电场的条件, 由于相应的资金及技术限制, 与世界其他地区相比, 非洲的风电产业发展相对缓慢。

(4) 2007 年

2007 年世界风电市场的发展呈现出一些新的变化, 随着风电技术水平的不断进步, 风电机组单机容量越来越大, 从 20 世纪 90 年代末到 21 世纪初的以 750kW~1MW 的机组为主, 逐渐开发出成熟的以 1~2MW 的大型风电机组为主。另外由于桨叶翼型的改进和单机功率的进一步提高, 使得机组每平方米扫掠面积的年发电量增加; 采用更高的塔架及可靠性的提高, 使得发电成本进一步降低。这些变化都对全球风电产业的发展带来了利好因素。

根据全球风能协会的数据显示, 2007 年全球风力发电装机容量继续