

“十二五”国家重点图书

新能源与建筑一体化技术丛书

太阳能—风能互补发电 技术及应用

Application of Hybrid Solar-Wind Power
Generation Technologies



杨洪兴 吕琳 马涛 ○ 著

中国建筑工业出版社

“十二五”国家重点图书
新能源与建筑一体化技术丛书

太阳能—风能互补发电技术及应用

**Application of Hybrid Solar-Wind Power
Generation Technologies**

杨洪兴 吕琳 马涛 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

太阳能—风能互补发电技术及应用/杨洪兴, 吕琳, 马涛著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2014. 12

“十二五”国家重点图书·新能源与建筑一体化技术丛书
ISBN 978-7-112-17328-0

I. ①太… II. ①杨…②吕…③马… III. ①太阳能发电②风力发电 IV. ①TM61

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 226798 号

本书主要总结了作者近些年在太阳能—风能互补系统方面的理论研究和实际工程经验。重点介绍了太阳能光伏与风力发电技术及其应用范围、独立离网型系统、储能技术和大型并网系统, 并通过工程实例阐述了太阳能—风能互补系统的设计方法及运行情况。此书能够让读者了解国内外最新的有关风光互补技术的发展情况, 掌握设计风光互补发电系统工程的设计方法。此外, 此书也能够给从事相关行业的研究人员和工程人员提供一定的参考。

责任编辑: 张文胜 姚荣华

责任设计: 张 虹

责任校对: 陈晶晶 刘梦然

“十二五”国家重点图书
新能源与建筑一体化技术丛书
太阳能—风能互补发电技术及应用
杨洪兴 吕琳 马涛 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)
各地新华书店、建筑书店经销
霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版
北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 10 $\frac{3}{4}$ 字数: 257 千字

2015 年 1 月第一版 2015 年 1 月第一次印刷

定价: 35.00 元

ISBN 978-7-112-17328-0

(26085)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)



出版说明

能源是我国经济社会发展的基础。“十二五”期间我国经济结构战略性调整将迈出更大步伐，迈向更宽广的领域。作为重要基础的能源产业在其中无疑会扮演举足轻重的角色。而当前能源需求快速增长和节能减排指标的迅速提高，不仅是经济社会发展的双重压力，更是新能源发展的巨大动力。建筑能源消耗在全社会能源消耗中占有很大比重，新能源与建筑的结合是建设领域实施节能减排战略的重要手段，是落实科学发展观的具体体现，也是实现建设领域可持续发展的必由之路。

“十二五”期间，国家将加大对新能源领域的支持力度。为贯彻落实国家“十二五”能源发展规划和“新兴能源产业发展规划”，实现建设领域“十二五”节能减排目标，并对今后的建设领域节能减排工作提供技术支持，特组织编写了“新能源与建筑一体化技术丛书”。本丛书由业内众多知名专家编写，内容既涵盖了低碳城市的区域建筑能源规划等宏观技术，又包括太阳能、风能、地热能、水能等新能源与建筑一体化的单项技术，体现了新能源与建筑一体化的最新研究成果和实践经验。

本套丛书注重理论与实践的结合，突出实用性，强调可读性。书中首先介绍新能源技术，以便读者更好地理解、掌握相关理论知识；然后详细论述新能源技术与建筑物的结合，并用典型的工程实例加以说明，以便读者借鉴相关工程经验，快速掌握新能源技术与建筑物相结合的实用技术。

本套丛书可供能源领域、建筑领域的工程技术人员、设计工程师、施工技术人员等参考，也可作为高等学校能源专业、土木建筑专业的教材。

中国建筑工业出版社

前言

开发利用可再生能源已成为当前世界各国保障能源安全、加强环境保护、应对气候变化的重要措施。我国作为世界上最大的发展中国家，能源发展面临巨大挑战，能源结构及能源安全的问题正日益突出。随着经济社会的发展，我国能源需求持续增长，能源供应和环境污染问题越来越严重，加快开发利用可再生能源已成为我国应对日益严峻的能源环境问题的必由之路。

2006年1月1日国家实施了《中华人民共和国可再生能源法》（主席令第三十三号），促进了可再生能源的开发利用，目的在于增加能源供应、改善能源结构、保障能源安全、保护环境，以实现经济社会的可持续发展。《可再生能源发展“十二五”规划》中也规定了到2015年可再生能源发电量争取达到总发电量的20%以上，同时强调了分布式可再生能源应用应该形成较大规模，以解决电网不能覆盖区域的无电人口用电问题。

太阳能与风能，作为可再生能源系统中最重要的组成部分，具有资源分布广、开发潜力大、环境影响小、可持续利用等特点，已经成为可再生能源领域中开发利用水平最高、技术最成熟、应用最广泛、并开始商业化的新型能源。同时，由于太阳能和风能具有天然的资源互补性，将二者进行有机的结合，使可再生能源系统的运行更加稳定和高效。当前独立运行的离网型太阳能—风能互补发电系统和储能技术已经得到了广泛应用，能有效地解决偏远山区、移动基站、部队边防哨所等地方的供电问题。同时，太阳能—风能互补发电系统也促进了这些地方分布微电网的发展。大型光伏和风电场的发展，促进了大规模并网和智能电网的需要，太阳和风能系统的电力输出互补特性能有效地提高并网的质量和电网的稳定性。

本书主要总结了笔者近年来在太阳能—风能互补系统方面的理论研究和实际工程经验。重点介绍了太阳能光伏与风力发电技术及其应用范围，独立离网型系统，储能技术和大型并网系统，并通过工程实例阐述了太阳能—风能互补系统的设计方法及运行情况。本书能够让读者了解国内外最新的有关风光互补技术的发展情况，以及掌握设计风光互补发电系统工程的设计方法。本外，本书也能够给从事相关行业的研究人员和工程人员提供一定的参考。本书在写作中尽量做到有针对性和实用性，在保证科学性的同时，注意通俗易懂。

本书由香港理工大学杨洪兴教授、吕琳副教授和马涛博士合作编著，参加本书写作的还有香港理工大学可再生能源研究室的王海、綦戎辉和车全德、彭晋卿、罗伊默博士，以及高小霞、张文科、陈奕、张甜甜、胡彦、蒋宇、王德琦等博士生。本书在资料收集和技术交流上都得到了国内外专家学者和同行的大力支持。同时，本书在写作的工程中，还得到了香港理工大学同事的大力支持和帮助，提供了宝贵的修改意见和建议，在此一并表示感谢。

由于编写时间仓促，加之作者水平有限，书中难免有不妥之处，敬请广大读者批评指正。

目 录

第 1 章	太阳能—风能互补发电技术的背景和概念	1
1.1	风光互补发电系统——新能源利用的“风光”之路	1
1.1.1	太阳能和风能的特点	2
1.1.2	风光互补系统的提出及发展	3
1.2	风光互补发电系统技术导论	5
1.2.1	风光互补发电系统概述	5
1.2.2	风光互补发电系统的现实意义及其优势	6
1.2.3	利用风光互补发电系统的合理性	7
1.3	我国风光互补发电系统的背景及发展	8
1.3.1	多重因素推动风光互补技术的发展	8
1.3.2	近年来我国风光互补市场快速稳定发展	9
1.3.3	我国风光互补发电系统的发展	10
	本章参考文献	12
第 2 章	太阳能和光伏发电技术	14
2.1	太阳能资源	14
2.1.1	太阳能资源分布	14
2.1.2	太阳能资源计算	14
2.1.3	太阳能资源的评估	19
2.2	太阳能光热利用	20
2.2.1	太阳能热水器	20
2.2.2	太阳能海水淡化技术	22
2.2.3	太阳能光热发电	23
2.3	太阳能发电技术	26
2.3.1	太阳能电池	26
2.3.2	太阳能电池的组成与分类	27
2.3.3	太阳能电池组件	31
2.3.4	太阳能光伏发电系统	33
2.4	太阳能光伏发电的现状与前景	35
	本章参考文献	36
第 3 章	风能和风力发电技术	37
3.1	风力资源	37

3.1.1	风的形成	37
3.1.2	风的种类	37
3.1.3	风速的概率分布	38
3.1.4	风力等级	39
3.1.5	风的变化	40
3.1.6	风能的计算	41
3.1.7	风能的优点和局限性	42
3.2	风资源评估方法	43
3.2.1	风资源评估综述	43
3.2.2	风资源评估指导原则	44
3.2.3	测风数据要求	45
3.2.4	测风数据处理	45
3.2.5	我国风能资源	48
3.3	风力发电技术	50
3.3.1	风力发电技术的划分	50
3.3.2	风力发电的优势	51
3.3.3	风力发电机的构成	51
3.3.4	几种典型的风力发电系统及其特性	53
3.4	国内外风力发电市场的发展情况探讨与展望	56
3.4.1	世界风电发展概况	56
3.4.2	国外风力发电现状和市场前景	56
3.4.3	国内风力发电现状和前景	57
	本章参考文献	57

第4章 太阳能与风能的互补性和典型气象年的选择

59

4.1	资源互补性的案例研究	59
4.1.1	案例1: 赤峰地区风能、太阳能资源分布	59
4.1.2	案例2: 辽宁风能、太阳能资源分布	60
4.1.3	案例3: 香港特区风能、太阳能资源分布	60
4.2	太阳能和风能相关性系数	61
4.2.1	相关性系数计算方法	61
4.2.2	案例1: 伊朗 Mahshahr 地区	63
4.2.3	案例2: 我国香港晨曦岛	63
4.3	典型气象年的选择	63
4.3.1	适用于风光互补发电系统的典型气象年	64
4.3.2	案例分析及与其他典型气象年的比较	66
4.4	小结	67
	本章参考文献	68

第 5 章	太阳能—风能互补发电技术、系统配置及其优化	69
5.1	风光互补发电技术和系统	69
5.2	风光互补发电系统的数学模型与运行特性	70
5.2.1	离网型风光互补发电系统结构	70
5.2.2	光伏发电的数学模型	71
5.2.3	风力发电系统的数学模型	74
5.2.4	蓄电池充放电的数学模型	75
5.3	风光互补发电系统优化设计	77
5.3.1	基于 LPSP 的系统可靠性模型	78
5.3.2	基于 ACS 的系统经济性模型	79
5.3.3	基于遗传算法的优化模型	80
5.4	基于遗传算法的风光互补系统优化设计案例分析	82
5.4.1	系统介绍	82
5.4.2	现场测量数据对模拟模型的验证	88
5.4.3	混合系统的综合性能分析	90
5.5	小结	93
	本章参考文献	93
第 6 章	太阳能—风能互补发电中的储能技术	94
6.1	储能技术概述	94
6.1.1	储能系统的作用	94
6.1.2	离网型风光互补系统中储能技术的重要性	95
6.1.3	国内外储能技术的现状与发展	95
6.2	储能技术的分类与特征	96
6.2.1	化学储能	96
6.2.2	物理储能	100
6.2.3	电磁储能	102
6.2.4	主要储能技术的比较	105
6.3	混合储能系统	107
6.3.1	蓄电池和超级电容混合储能	108
6.3.2	混合储能典型案例研究	109
6.4	储能技术的应用研究	111
6.4.1	储能系统的优化配置	111
6.4.2	储能系统的运行策略	112
6.4.3	储能系统的控制策略	112
6.5	储能系统中存在的问题及展望	112
	本章参考文献	113

第7章 太阳能—风能互补发电中的并网技术	114
7.1 风光互补发电系统并网技术	114
7.1.1 逆变器	115
7.1.2 监控器	117
7.1.3 通讯系统	118
7.2 风光互补型电网规划设计典型方案	119
7.2.1 小型风光互补并网系统设计	119
7.2.2 大型风光互补并网系统规划设计	121
7.3 并网型风光互补发电系统存在的问题及展望	122
7.3.1 可调度型风光互补并网发电系统	122
7.3.2 不可调度型风光互补并网发电系统	122
7.3.3 风光互补电站并网发展的建议	123
本章参考文献	124
第8章 太阳能—风能互补发电系统的设计与应用实例	125
8.1 风光互补发电系统设计的基本原则	125
8.2 设计实例简析	126
8.2.1 离网型风光互补通信基站设计实例	126
8.2.2 风光互补 LED 路灯设计实例	128
8.3 商业软件设计实例	130
8.3.1 HOMER 软件介绍	130
8.3.2 系统简述	131
8.3.3 系统负荷和可再生资源	132
8.3.4 系统组件信息	133
8.3.5 模拟结果分析	135
8.4 风光互补发电系技术的应用实例	138
8.4.1 风光互补发电系统实际案例介绍	138
8.4.2 数据采集系统	141
8.4.3 系统运行结果与分析	142
8.4.4 小结	148
本章参考文献	149
第9章 太阳能—风能互补发电技术的经济环境效益和市场前景分析	150
9.1 风光互补发电系统的能源、经济及社会环保效益	150
9.1.1 能源效益	150
9.1.2 经济效益	151
9.1.3 社会及环保效益	153
9.2 风光互补技术中存在的难度、问题及解决方法	155
9.2.1 蓄电池的寿命问题	155

9.2.2 经济因素	155
9.2.3 系统的管理和控制问题	155
9.2.4 能源输出的不稳定性问题	156
9.2.5 小型风力发电机的可靠性问题	156
9.3 风光互补发电系统应用前景	156
9.3.1 满足缺电农村的用电	157
9.3.2 室外 LED 照明	157
9.3.3 监控摄像机电源中的应用	158
9.3.4 船标应用	158
9.3.5 抽水蓄能电站	158
9.3.6 通信基站	159
9.4 小结	159
本章参考文献	160

第1章 太阳能—风能互补发电技术的背景和概念

能源是国民经济和人类发展赖以生存的物质基础,是经济和社会前进的动力。当前在人类生活和生产中非常重要的常规性能源有五类:石油、煤炭、天然气、水和核裂变能。现今,世界上所需的能源消耗几乎全靠这五大能源来支撑。随着世界经济爆炸式的发展和工业在国际范围内的现代化,资源越来越匮乏,环境的污染也日渐严重,在保持现有人类生存环境的同时,如何解决能源日渐紧缺的危机、满足人们日常生活的需要,是全世界人类都应该不断思考的问题^[1]。

近年来,随着世界经济的发展,各国对能源的依赖的比重越来越大,经济的发展越来越快,但同时环境的破坏也日渐严重,硫氧化物和氮氧化物等有害气体的大量排放,未经处理的有害物质使得环境日渐恶化。日渐破坏的环境使得人们越来越认识到环境的重要性,也促使人们开始对常规能源危害的认识越来越深刻,使得人们的环保意识日渐增长。对提高生活质量的需求,要求减少常规能源对自然生态环境的污染,优先使用清洁型能源,发展可再生能源,已成为急需解决的问题。

我国对新能源的开发利用起步较晚,但随着政府的不断重视,国内新能源产业规模逐步扩大、技术逐步提升,发电成本逐步下降。按照《可再生能源发展“十二五”规划》提出的目标,到2015年,风电将达到1亿kW,年发电量1900亿kW,其中海上风电500万kW;太阳能发电将达到1500万kW,年发电量200亿kW。从长远来看,预期到2020年,中国大批新能源技术达到商业化水平,新能源占一次能源总量的18%以上,到2050年,将全面实现新能源的商业化,大规模替代化石能源,并在能源消费总量中达到30%以上^[2]。

随着可再生能源规模化发展,“十二五”期间,我国可再生能源应用形式和领域将呈现多元化发展趋势。应用形式方面,新能源发电仍然是新能源主要应用方式,新能源发电将由“十一五”的集中大型应用向分布与集中应用并行发展。其中,风光互补发电系统和风光储一体化应用系统将成为“十二五”可再生能源发电应用的重点之一。

1.1 风光互补发电系统——新能源利用的“风光”之路

太阳能—风能互补发电系统(简称风光互补系统)是对太阳能发电和风力发电的综合应用。风光互补发电系统主要由太阳能发电组件、风力发电机组、系统控制器、逆变器和蓄电池组(离网系统)或者并网控制器(并网系统)等几部分组成。由于风光互补应用综合了风力发电和太阳能发电的优势,提高了资源的利用效率,也很好解决了单独使用风力发电或太阳能发电受季节和天气等因素制约的问题,使得两种可再生能源发电形成了很强的互补性,提高了供电的可靠性。因此,风光互补系统是可再生能源领域的重点研究方向之一。

目前国内大型风力发电与并网太阳能光伏发电或太阳能光热发电的风光互补应用尚处于起步阶段,而主流的风光互补应用是指中小型风力发电机发电(一般单机装机容量在

100kW 及以下) 与太阳能光伏发电的离网综合应用, 即本书重点研究的风光互补能源技术。

1.1.1 太阳能和风能的特点

可再生能源主要包括风能、太阳能、生物质能、水力发电、海洋能和海浪能等。如表 1-1 所示^[3], 而在可再生能源中, 太阳能和风能潜力最大。因此, 太阳能和风能的利用受到人们越来越多的重视, 成为最有发展潜力的两种自然能源。太阳能和风能具有如下特点: 取之不尽, 用之不竭; 就地取材, 不需运输; 分布广泛, 分散使用; 不污染环境, 不破坏生态; 周而复始, 可以再生^{[4][5]}。相对于有限的化石燃料来说, 太阳辐射能堪称无限的能源。而风能在一定程度上可以说是太阳能的延伸, 因为地球围着太阳转再加上地球本身的自转, 使得日地距离和方位总在不停变化, 这就使得地球上不同纬度地区接受的太阳辐射强度不同, 从而地表温度也不同, 冷热交替, 形成空气的对流, 从而产生风能。

全球可再生能源一览		表 1-1
可再生能源	总功率(W)	可用功率(W)
太阳能	1.8×10^{17}	6.7×10^{15}
风能	3.6×10^{15}	1.3×10^{14}
水能	9.0×10^{12}	2.9×10^{12}
地热能	2.7×10^{13}	1.3×10^{11}
潮汐能	3.0×10^{12}	6.0×10^{11}

太阳能和风能是可再生能源中储能最大、无污染且无需购买的清洁资源。理论上讲, 人类的能源需求同太阳能和风能的总存储量相比, 仅仅是很少的一部分。因此, 怎样利用风能和太阳能、如何合理地利用风能和太阳能得到世界各国广泛的重视。

然而, 虽然风能和太阳能都是无污染、取之不尽的可再生能源, 但是两者有共同的劣势, 具体表现为能量密度低和稳定性差。

(1) 能量密度低: 空气在标准状况下的密度为水密度的 1/773, 所以在 3m/s 的风速时, 其单位面积能量功率密度为 16.254W/m², 而水流速度为 3m/s 时, 单位面积能量密度为 12.564kW/m²。在相同的流速下, 要获得与水能同样大的功率, 风轮直径为水轮的 27.8 倍。太阳能在晴天单位面积平均接收太阳辐射密度远小于太阳常数 1353W/m², 并随区域变化, 其能量密度也很低, 故必须配备足够大的受光面积, 才能得到足够的功率。由此可见, 不论是风能还是太阳能都是一种能量密度很低的能源, 给推广利用带来了困难。

(2) 能量稳定性差: 不论是风能还是太阳能, 都随天气和气候的变化而变化。虽然各地区的太阳辐射和风力特性在一较长的时间内有一定的统计规律可循, 但是风力和日照强度在不断地变化。不但各年间有变化, 甚至在很短的时间内还有无规律的脉动变化。这种能量的不稳定性也给这两种能源的使用带来了困难^[6]。单独使用光伏发电或是风力发电都存在着输出电量不稳定的缺陷, 光伏发电易受阴雨天气的影响, 而且在晚上的时候, 光伏发电处在停止状态。而风力发电的输出功率随着风速的变化, 也不能稳定地输出。因此, 这使得风力发电或光伏发电系统中的蓄电池组工作在非常不稳定的条件下, 蓄电池未

能充满时就放电，甚至是长期处于过放电或是过充电的状态。这种非理想的工作环境使得蓄电池的工作寿命大大缩短，而目前蓄电池的价格又非常昂贵，使得风力发电系统或者是光伏发电系统的蓄电池使用成本非常高，甚至高于单独购买光伏组件和风力发电机的成本^[7]。

1.1.2 风光互补系统的提出及发展

由上一节可以看出，无论是单独的风电系统还是单独的太阳能发电系统，都受到自然条件的制约，由于这些不利因素的存在，在单独利用其中一种能源转变为经济可靠的电能过程中存在着很多技术问题。这也是几个世纪以来，两种能源利用发展比较缓慢的原因之一。但是，如果能够合理地利用，把两者的长处加以结合，发挥各自的特点，就能很好地解决能源的随机性和不稳定性等问题。随着现代科学技术的发展，风能和太阳能利用在技术上都有突破和进展，特别是将风能、太阳能综合利用形成互补系统，充分利用它们在很多方面的互补性，可以建立起更加稳定可靠、经济合理的能源系统。

由于风能的产生是源于太阳能照射在地面上产生的气压差，因此，风能和太阳能的相互结合有着根本上的天然优势。通过长期的数据采集发现，太阳能和风能具有很好的互补性，如图 1-1 和图 1-2 所示^[8]。

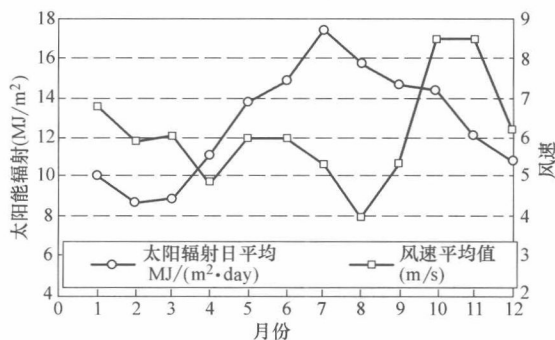


图 1-1 太阳能和风能的季节互补

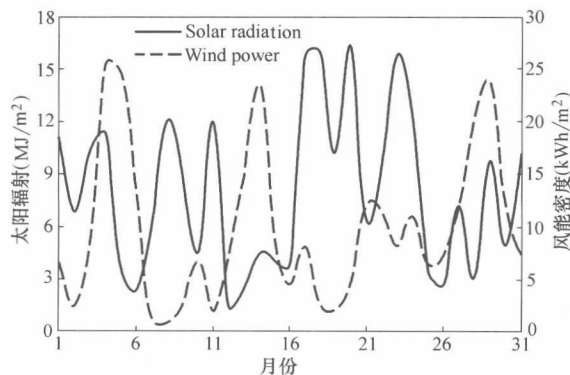


图 1-2 太阳能和风能的日夜互补特性

一方面，风能和太阳能在季节上存在很强的互补性，从全年的角度看，通常太阳能夏

天比较充裕,而风能冬天则比较丰富。另一方面,从一天的角度讲,对于太阳能比较充裕的天气晴朗的日子,风力通常则较差。另外,在阴雨天和夜晚,太阳能辐射弱和没有太阳辐射的时候,风速一般比较大,此时风能发的电量占主要地位;而当晴空当头的白天,风速比较小,太阳能发电占主导地位。另外,根据我国香港的气象数据可以发现,风力主要出现在夜间和凌晨,而此时几乎没有太阳辐射,种种迹象说明了这两者之间的互补特性。

正是由于太阳能和风能具有如此好的互补性,将两者结合形成的风光互补发电系统,可以充分弥补风能和太阳能在单独提供能量时产生的间歇性和随机性等缺点,保证了更高的发电稳定性。有鉴于此,风能、太阳能的综合利用研究开始广泛开展起来。

有关风光互补发电系统的研究始于 20 世纪 80 年代初期。1981 年,丹麦的 N. E. Busch 和 K. P. I. N. Bach 提出了太阳能和风能混合利用的技术问题,最初的风光互补发电系统只是将风力机和光伏组件进行简单的组合^[9]。随后,美国的 C. I. Aspliden 研究了太阳能和风能混合转换系统的气象问题。原苏联的 N. Aksarni 等人根据概率原理,统计出近似的太阳能和风能潜力的估计值,为风光互补发电系统的研究和利用提供了科学的数据支持。1982 年,我国的余华扬等提出了太阳能和风能发电机的能量转换装置,风光互补发电系统的研究从此进入实际利用阶段^[10]。香港理工大学杨洪兴教授率领的可再生能源研究小组(RERG)在 21 世纪初开始研究和推广太阳能—风能互补发电技术,在研究能量转换、能量储存、系统设计、运行模拟、优化和实际应用中做了大量的开创性工作,研究成果得到了同行的肯定和大量引用^{[11][12][13]}。

近年来,国外对风光互补发电系统的研究主要集中在系统的优化设计和合理配置、计算机仿真计算以及实际应用研究等方面。在国外,加拿大 Saskatchewan 大学 Rajesh Kar-ki 等人研究了独立小型风光发电系统的成本及可靠性,得出根据负载和风光资源条件合理配置发电系统,是降低发电成本、提高系统可靠性的重要途径,并指出互补发电系统扩容的可行性。意大利人 A. N. Celik 对独立运行的风电、光电和风光互补发电进行对比,结果证明风光互补发电是最优越的新能源发电方案,并对该风光互补发电系统的优化设计做了经济分析。Markqvart T. 利用遗传算法开发了一套优化软件,通过仿真研究证实了风光互补发电比单独发电系统更具有优势。

从 20 世纪 90 年代末,我国开始对风光互补发电项目进行研究,所做的研究主要集中在系统部件的模型、系统的优化设计、计算机仿真计算以及实际应用研究方面,但是研究仍处于初级阶段。2004 年,天津大学环境科学与工程学院结合微型计算机控制技术,设计开发了风光互补发电的监测与控制系统,并进行了实际的应用测试,效果较理想。香港理工大学同中国科学院广州能源所、半导体研究所合作提出了一整套利用 CAD 进行风光互补发电系统优化设计的方法。该方法提出了更精确地表征光伏组件特性及评估实际获得的风光资源的数学模型,目的是找出以最小设备投资成本满足用户用电要求的系统配置。本书也探讨了基于抽水蓄能的离网型风光互补系统的可行性,研究发现这种蓄能方式优于电池系统且这套系统能有效地给偏远的山区和岛屿供电^[14]。另外,合肥工业大学能源研究所提出了风光发电系统的变结构仿真模型,用户可以重构多种结构的风光复合发电系统并进行计算机仿真计算,从而能够预测系统的性能、控制策略的合理性以及系统运行的效率等。华南理工大学设计了新型无刷双馈发电机,并通过权值调节方式实现太阳能逆变器最优功率传输。中国卫星通信集团公司对青海“村村通”工程中的风光互补发电系统实际

运行情况进行了分析，系统经过一年的运行，完成了计划任务并显现出很好的经济效益，同时也指出系统在准确性和可靠性上仍存在问题。

由于风能和太阳能具有资源丰富、无地域界限等特点，使得风光互补发电系统适合在用电量不大且远离电网的地区使用，对提高无电地区居民生产和生活水平、促进当地经济发展起到重要作用。风光互补发电技术在我国多作为独立的供电系统，用于远离电网的地区，如部队的边防哨所、邮电通讯的中继站、公路和铁路的信号站、地质勘探和野外考察的工作站、偏远山区及海岛的照明等。我国风光互补发电场主要集中在青藏高原、内蒙古自治区等偏远地区，采用独立式发电；在城市中，风光互补发电系统的应用主要是使用于城市路灯和道路监控设备。

1.2 风光互补发电系统技术导论

1.2.1 风光互补发电系统概述

所谓风光互补（太阳能风能互补能源技术），本质就是将风能和太阳能连接起来，相互补充共同供电，从而提供稳定的电量满足负载需求。

风光互补发电系统的运行方式主要分为离网运行和并（联）网运行两大类。没有连接公共电网的称为离网型风光互补发电系统，即风光互补独立发电系统，主要运用于一些特殊场合，如远离公共电网的无电地区，主要是偏僻农村、高原、海岛、牧区、荒漠等电网无法覆盖的地区，在这些地方安装独立发电系统可以为用户提供照明、电视和通信等的基本生活用电。而与公共电网相连接的风光互补供电系统称为并网型风光互补发电系统，主要是大型系统。

典型的风光互补独立发电系统包括发电部分（光伏电池阵列、风力发电机组）、蓄电池、整流装置、控制器（可为独立风能，太阳能或风光互补控制器）、DC/AC 逆变器和负载等，最基本的系统结构图如图 1-3 所示。

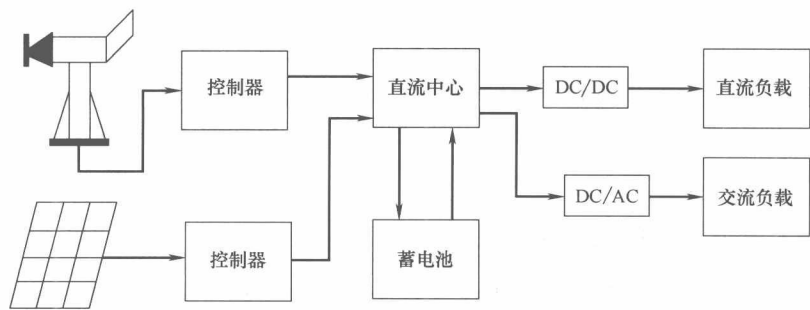


图 1-3 典型的风光互补发电系统结构示意图

风光互补发电系统由三个环节构成，分别是能量产生环节、能量存储转化环节与能量消耗环节。能量产生环节有风力发电和光伏发电两部分组成，分别将风力、日光照射能源转化成为日常生活可用的电力能源；能量的存储环节主要由蓄电池组来完成，引入蓄电池组的原因就是为了消除由于天气、气候原因而引起的能量供应和需求的不平衡，在整个系

统中起调节能量和平衡负载的作用；能量消耗就是各种用电负载，可以分为直流负载和交流负载两种类型，交流连入电路是需要用到逆变器。整个系统可以分为以下四个部分：发电部分、储能部分、控制部分及逆变部分。

1. 发电部分

光伏发电部分是利用太阳能电池板的光电效应（photoelectric effect），将光能转换成电能；风力发电部分是先利用风力机组叶片将风能捕捉转换成机械能，再通过风力发电机将机械能转换成电能，小型风力发电机组的输出电流为直流。在风光互补发电系统中，风能和太阳能可以独立发电也可以混合共同发电，根据风能和太阳能在时间和地域上的互补性，合理地将二者进行最佳匹配，既可实现供电的可靠性，又能降低发电系统的综合成本。

2. 储能部分

由于风能和太阳能的不稳定性和间歇性，供电时会出现忽高忽低、时有时无的现象。为了保证系统供电的可靠性，应该在系统中设置储能环节，把风力发电系统或太阳能发电系统供给负载之后多余的电能储存起来，以备供电不足时使用。目前，最常用的储能方式是采用铅酸蓄电池储能，在系统中蓄电池除了将电能转化成化学能储存起来，使用时再将化学能转化为电能释放出来外，还起到能量调节和平衡负载的作用。此外，其他储能方式比如燃料电池、压缩空气和抽水蓄能等也是近年来的研究重点。

3. 控制部分

控制部分主要是根据风力大小、光照强度及负载变化情况，不断地对蓄电池组的工作状态进行切换和调节。风光互补控制器是整个系统中最重要的核心部件，对蓄电池进行管理与控制，一方面把调节后的电能直接送往直流或交流负载，另一方面把多余的电能送往蓄电池组储存起来，当发电量不能满足负载需要时，控制器把蓄电池储存的电能送给负载。在这一过程中，控制器要控制蓄电池不被过充或过放，从而保证蓄电池的使用寿命，同时也保证了整个系统工作的连续性和稳定性。

4. 逆变部分

由于蓄电池输出的是直流电，因此只能给直流负载供电。而在实际生活和生产中，用电负载有直流负载和交流负载两种，当给交流负载供电时，必须将直流电转换成交流电提供给用电负载。逆变器就是将直流电转换为交流电的装置，这也是风光互补发电系统的核心部件之一，系统对其要求很高。此外，逆变器还具有自动稳压的功能，可有效地改善风光互补发电系统的供电质量。

1.2.2 风光互补发电系统的现实意义及其优势

风光互补不仅利用自然界的风能和太阳能辐射能这两种可再生资源，而且两者资源的互补性提高了产品的使用性能，满足了使用者的需求，扩大了市场的应用范围，降低了产品的成本。风光互补发电技术实现了两种新能源在自然资源的配置方面、技术方案的整合方面、性能与价格的对比上达到了对新能源综合利用的最合理。因此，从节能角度看，风能和太阳能转化为电能，用自然的可再生能源，取之不尽、用之不竭；从环保角度看，无污染、无辐射；从安全角度看，低压直流电，无触电、火灾等意外事故；从方便角度看，安装简洁、无需架线或“开膛破肚”施工，无停电、限电顾虑；从寿命角度看，科技含量

高,控制系统智能化,独立自主知识产权,性能稳定可靠,寿命长达15~20年;从品位角度看,绿色能源、绿色照明,提升使用者和使用地的档次,标志性强;从投资角度看,一次性投资,无限产出,不用市电长期受用,维护费用偏低;从适应性强、适应范围广角度看,风光互补克服了环境和负载的限制,应用范围十分广泛。迎合国家大力提倡和鼓励使用新能源的政策,开辟“节能、降耗、减排”新的天地,更为政府大力提倡“绿色能源、绿色照明”树立标志性的直观场景。

国内外的研究结果都表明,在满足偏远无电地区居民生产和生活用电以及向偏远地区的通信系统供电方面,风光互补发电往往被证明是一种比单一光伏或风力发电以及其他能源方式(如柴油机发电)更经济、可靠的选择。它是将中小型风电技术和太阳能技术整合在一起,且运用了各领域的新技术。如果是单独的风能和太阳能的话,是无法避免各自存在的一些弊端,而将风电技术和光伏技术两者结合在一起,扬长避短,发挥互补性的作用,不仅能实现了两种新能源在自然资源配置上的优化,且同时能达到技术方案的整合,让性能与各方面的对比都达到了对新能源的最合理利用。采取风光互补发电并加入储能装置,形成风光储能联合发电系统,既可以充分利用风能和光能在时间及地理上的天然互补性,也可以利用储能系统的充放电改善风光互补发电系统的功率输出特性,减缓风光发电的波动性和间歇性,并实现功率的供需平衡,降低其对电力系统的不利影响,增加电力系统对可再生能源的吸收接纳程度。

概括来说,风光互补系统具有如下几个优点:

(1) 环保:风能、太阳能是绿色能源,不产生污染。小型风力发电机噪声小,不会产生噪声污染。

(2) 可靠:根据风光自然资源的天然互补性,风能和太阳能的相互结合,使得系统的供电稳定性增强,季节稳定性和昼夜稳定性均能得到大幅提高,互补储供电系统可在有光无风、有风无光情况下,持续稳定地提供电能输出。

(3) 高效:中小型风力发电机起动风速较低,风能利用效率高,自身耗能低,低速发电性能好,适合风能资源相对匮乏的地区。风光互补控制器对蓄电池进行监测,在蓄电池满足正常供电要求的情况下充分利用可再生能源。

(4) 节省机组和蓄电池容量,便于安装维护:针对区域性风能和太阳能的资源情况,加上当地的环境气候状况,进行互补系统的优化设计,可以大大节省风力发电机和光伏电池的设计容量,获得很好的性价比,从而减小各部件体积,便于安装使用;还可以节省蓄电池的设计容量,并可延长系统的使用寿命。

1.2.3 利用风光互补发电系统的合理性

1. 资源利用的合理性

太阳能和风能是最普遍的自然资源,也是取之不尽的可再生能源。太阳能是太阳内部连续不断的核聚变反应过程产生的能量,风能则是太阳能在地球表面的一种表现形式,由于地球表面的不同形态(如沙土地面、植被地面和水面)对太阳光照的吸收能力不同,所以在地球表面形成温差,从而形成空气对流而产生风能。太阳能和风能在时间分布上有很强的互补性。白天太阳光最强时,风很小,到了晚上,光照很弱,但由于地表温差变化大而风能有所加强;在夏季,太阳光强度大而风小,冬季,太阳光强度弱而风大。太阳能和