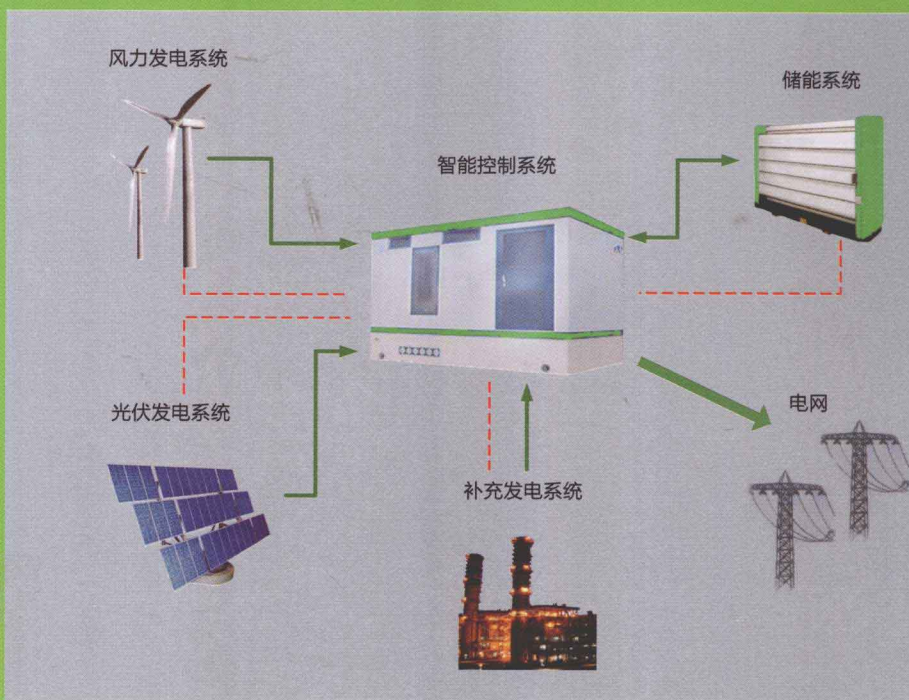


吴佳梁 曾赣生 余铁辉 等编著

# 风光互补与储能系统

FENGGUANG HUBU YU  
CHUNENG XITONG

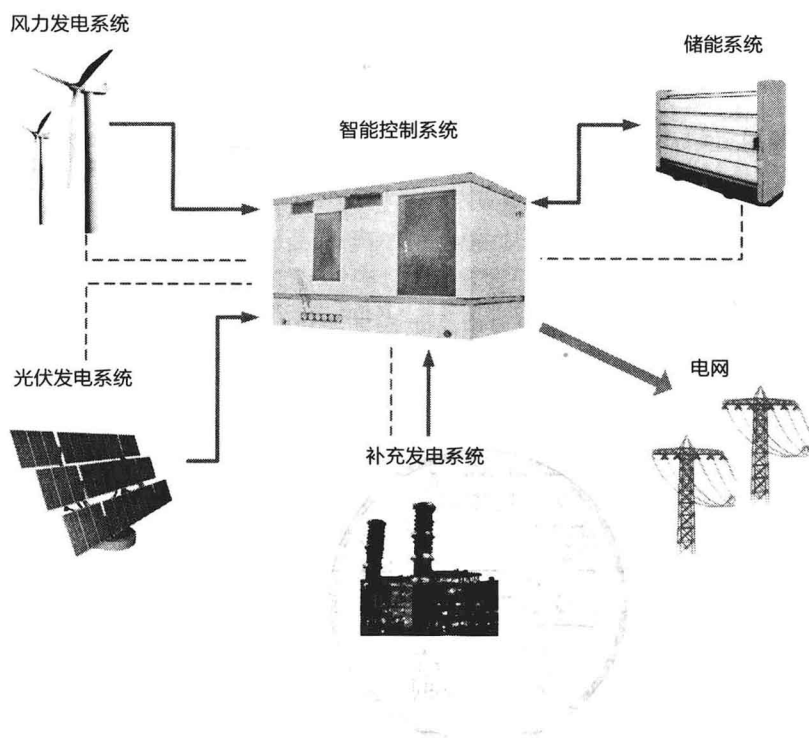


化学工业出版社

吴佳梁 曾赣生 余铁辉 廖晶晶 编著

# 风光互补与储能系统

FENGGUANG HUBU YU  
CHUNENG XITONG



化学工业出版社

· 北京 ·

# 前 言

能源是国民经济发展和人民生活赖以生存的物质基础，在过去的几百年里，建立在煤炭、石油、天然气等化石燃料基础上的能源体系极大地推动了人类社会的发展。但是在人类使用化石燃料的同时，对地球的环境和生态系统也造成了巨大的破坏。近年来，世界各国逐渐认识到清洁能源对人类的重要性，采取多种方式治理日益恶化的环境，并将开发利用可再生能源作为可持续发展的重要内容。风能与太阳能作为清洁能源的代表，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、最具商业化发展条件的新型能源。

风光互补与储能系统也称为风光储系统，是利用风能和太阳能资源的互补性，以及储能系统的蓄能特性，将三者有机结合为完整系统，使可再生能源更加稳定高效。关于风光互补与储能结合的研究与应用，我国主要集中在小型离网系统，对于大规模并网及微网系统的研究还处于起步阶段，针对后者的文献特别是书籍比较有限。这里，我们以风电机组、太阳能系统与储能系统为基础，结合对系统的理论研究和实践经验，归纳整理编撰了此书，以期对从事相关行业的研究人员有一定的帮助。

本书分为5章，系统介绍了风光互补与储能系统的背景和技术，内容包括风光互补与储能系统的定义与分类，风机发电技术、光伏发电技术、储能技术三大基础技术，以及风能、太阳能、储能联合发电的核心技术和关键部件。本书重点介绍以风能、太阳能为分布式电源的微网型发电系统技术，并通过实例分析系统核心内容 and 应用前景。在最后一章还介绍了国内外风光互补与储能系统的发展现状与相关规划。

本书所涉及内容对相关部门及企业具有一定的参考价值，对于促进可再生能源的发展具有一定的现实意义。可作为从事风能、太阳能、储能及其他可再生能源相关领域工作的技术人员、科研人员和管理人员的技术指导书，也可作为高等院校相关专业师生的参考书。

本书由吴佳梁、曾赣生、余铁辉、廖晶晶编著。在编写过程中，还得到了三一电气自动化子公司领导和同事的大力支持和帮助，提出了宝贵的修改意见和建议，在此表示感谢。

鉴于作者水平有限，书中难免有不妥之处，欢迎读者指正。

编著者  
2011年11月

# 目 录

<b>第 1 章 风光互补与储能系统的背景和概念</b> .....	1
1.1 能源背景 .....	1
1.1.1 国外能源背景 .....	1
1.1.2 我国能源背景 .....	3
1.2 可再生能源发展背景 .....	6
1.2.1 国外发展背景 .....	6
1.2.2 我国发展背景 .....	7
1.3 风、光能源背景 .....	9
1.3.1 风、光资源丰富 .....	9
1.3.2 风电、光电问题 .....	9
1.3.3 解决方法 .....	12
1.4 风光互补与储能系统的概念与分类 .....	16
1.4.1 风光互补与储能系统概念 .....	16
1.4.2 风光互补与储能系统的分类 .....	17
<b>第 2 章 风光互补与储能系统的基础技术</b> .....	18
2.1 风机发电技术 .....	18
2.1.1 风机技术发展现状 .....	18
2.1.2 风机结构与发电特点 .....	20
2.1.3 风机的机型分类 .....	24
2.2 光伏发电技术 .....	27
2.2.1 光伏发电技术发展现状 .....	27
2.2.2 光伏发电原理 .....	31
2.2.3 光伏系统 .....	34
2.3 储能技术 .....	57
2.3.1 储能技术背景与现状 .....	57
2.3.2 铅酸电池技术 .....	59
2.3.3 锂离子电池技术 .....	61
2.3.4 NaS 电池技术 .....	64
2.3.5 全钒液流电池技术 .....	68

2.3.6	压缩空气储能 (CAES) 技术 .....	70
2.3.7	飞轮储能技术 .....	73
2.3.8	超级电容储能技术 .....	75
<b>第 3 章</b>	<b>风光互补与储能系统的核心技术和关键部件 .....</b>	<b>78</b>
3.1	风光互补与储能系统的分类与结构 .....	78
3.1.1	大规模并网型风光互补与储能系统 .....	78
3.1.2	分布式微网型风光互补与储能系统 .....	79
3.2	核心技术分析 .....	84
3.2.1	调度平滑技术 .....	84
3.2.2	功率预测技术 .....	84
3.2.3	电池管理技术 .....	86
3.2.4	能量转换技术 .....	105
3.2.5	微网技术 .....	112
3.3	关键部件分析 .....	120
3.3.1	风光储监控系统介绍 .....	120
3.3.2	风光储监控系统设计 .....	121
3.4	风光互补与储能系统技术指标分析 .....	145
3.4.1	风光储一体化智能监控系统 (变电监控) .....	145
3.4.2	风电对风机控制要求 .....	145
3.4.3	子系统技术要求 .....	146
<b>第 4 章</b>	<b>风光互补与储能系统实例 .....</b>	<b>155</b>
4.1	实例介绍 .....	155
4.1.1	系统背景 .....	155
4.1.2	系统介绍 .....	156
4.1.3	系统目标 .....	157
4.2	主要研究内容 .....	157
4.2.1	主要内容 .....	157
4.2.2	核心技术 .....	160
4.2.3	创新点 .....	161
4.3	系统实现 .....	162
4.3.1	研究方法 .....	162
4.3.2	技术路线 .....	163
4.4	系统结果分析 .....	164
4.4.1	技术指标 .....	164
4.4.2	经济指标 .....	166

4.4.3 成果分析 .....	166
4.5 系统应用前景 .....	167
4.5.1 国内外应用市场现状 .....	167
4.5.2 潜在用户与市场前景 .....	168
4.5.3 经济和社会效益 .....	169
<b>第5章 发展与展望</b> .....	<b>170</b>
5.1 风光互补与储能系统的项目发展 .....	170
5.1.1 国外发展现状 .....	170
5.1.2 我国发展现状 .....	171
5.2 风光互补与储能系统相关标准的发展 .....	176
5.2.1 欧盟公共供电系统的电压特性标准 .....	176
5.2.2 我国分布式储能在建标准 .....	178
5.2.3 我国相关项目规划 .....	178
5.3 相关领域发展 .....	179
5.3.1 国外智能电网发展 .....	179
5.3.2 国内智能电网发展 .....	180
<b>参考文献</b> .....	<b>185</b>

# 第 1 章

## 风光互补与储能系统的背景和概念

2011 年 3 月 11 日，日本发生了当地历史上最强烈地震——里氏 9.0 级地震，引致福岛核电厂停产，发生了局部爆炸，对其中数座厂房造成了严重损害，核电站放射性物质污染由大气扩散至土壤和海洋。截至 2011 年 3 月 21 日，已有一百多人受到核辐射，人类赖以生存的食物也遭遇了核危机。此次地震对人类环境及海洋生物的影响“目前尚无法测定和评估”。电力能源的安全与污染问题再次被敲响警钟，清洁安全的可再生能源越来越受到关注。

除了自然灾害、人为原因导致的核辐射污染以外，温室效应导致的大气污染问题一直是世界各国关注的重点。特别是随着全球经济的高速发展和工业化程度的提高，大气中 CO<sub>2</sub> 浓度急剧升高，给地球环境温度带来了巨大影响。国际社会正通过政治、经济和科技手段，努力减少 CO<sub>2</sub> 排放。目前碳减排问题已经成为国际政治经济活动的热点话题。同时西方国家开始尝试碳排放配额、征收碳排放税以及碳排放转让机制。“碳货币”有可能成为未来经济发展战略的制高点。发展低碳经济、使用清洁能源、促进能源节约以及加强 CO<sub>2</sub> 的固定与转化是解决 CO<sub>2</sub> 排放问题的根本出路。

### 1.1 能源背景

能源是经济社会发展的重要物质基础。工业革命以来，世界能源消费剧增，煤炭、石油、天然气等化石能源资源消耗迅速。发达国家的能源消费基数大，增长相对缓慢，发展中国家的能源消费基数低，增长比例大。图 1-1 和图 1-2 为世界能源需求具体数据及其增长比例。

#### 1.1.1 国外能源背景

可再生能源与新能源，特别是风能、水电、太阳能和生物质能的发展，是欧盟理事会能源政策的中心目标。欧盟于 1997 年发表了《能源的未来：可再生能源》的白皮书，2000 年发表了《朝着欧盟能源供应安全的战略》的绿皮书，并采取了一些政策鼓励各国更多使用可再生能源电力。2007 年春季欧盟理事会上各成员国通过了到 2020 年实现可再生能源利用占总能源的 20%，并且生物

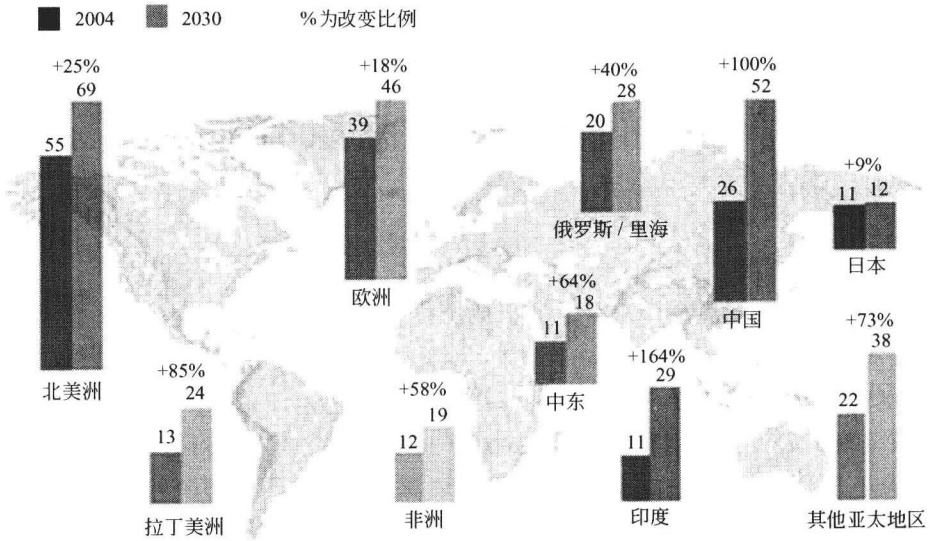


图 1-1 世界能源需求 (一)

说明：数据为每天消耗的百万原油桶数

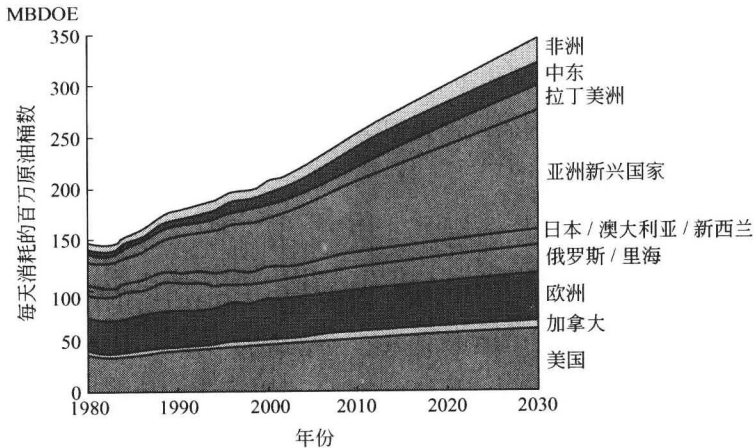


图 1-2 世界能源需求 (二)

说明：MBOE 为每天消耗的百万原油桶数

燃料能源利用占 10% 的发展目标，确定可再生能源成为欧洲未来能源供应的支柱。

2007 年 11 月 22 日，欧盟理事会提交欧洲能源技术战略规划 (the European Strategic Energy Technology Plan, SET-Plan)。规划中提出，欧盟实现 2020 年和



2050年战略目标,需要从4个方面着手:一是在能源工业领域制定新措施,加大财力和人力投入,提高能源利用研究和技术创新能力;二是建立欧盟能源科研联盟,加强大学、科研院所和专业机构间的科研合作;三是改造和完善欧盟能源基地设施,建立新的欧盟能源技术数据系统;四是建立由欧盟理事会和各成员国参加的欧盟战略能源技术小组,以协调欧盟与成员国间的政策和计划。2008年1月23日,欧盟理事会又颁布了可再生能源框架指令(Renewable Energy Framework Directive)。欧盟各国的可再生能源发电比例从1997年的13.9%增加到2010年的22.1%,且欧盟15个成员国(EU15)(这里指2004年前欧盟的15个成员国,因为新加入的成员国的可再生能源的利用和潜力情况在参考文献中未统计)的可再生能源工业的目标是:至2020年可再生能源发电量达到总发电量的33%。在一系列能源政策的引导下,欧洲以分布式发电为发展方向。与此相适应,研究重点也集中在动力与能源转换设备、资源深度利用技术、智能控制与群控优化技术和综合系统优化技术上。其中与电网相关的研究主要是分布式发电系统的电网接入研究,以解决分布式发电与现有电网设施的兼容、整合和安全运行等问题。

在文献中制定的欧盟2020年的可再生能源发展目标,指出欧盟15个成员国(EU15)从1995年到2020年可再生能源发电情况以及欧盟总的可再生能源发电情况,如表1-1、表1-2所示。

表1-1 欧盟15个成员国(EU15)的可再生能源发电装机情况(1995~2020年)

类型	1995年 发电装机 /GW	2001年发 电装机 /GW	年增长率 (1995~ 2001年)/%	预计2010 年装机/GW	年增长率 (2001~ 2010年)/%	预计2020年 装机/GW	年增长率 (2010~ 2020年)/%
风能	2.5	17.2	37.9	75	17.8	180	9.1
水电	87.1	91.7	0.9	100	1.0	109	0.9
光电能	0.04	0.26	36.6	3	31.2	35	27.8
生物质能	6.1	8.7	6.1	27	13.4	54	7.1
地热能	0.5	0.65	4.5	1	4.9	2	7.1

### 1.1.2 我国能源背景

随着中国经济的稳步增长,工业化和城镇化进程加快,经济社会发展对能源的需求不断增大,能源行业处于快速发展态势。

中国能源消费缺口不断扩大。2007年中国一次能源生产总量为23.7亿吨标准煤,同比上升7.2%,是2001年13.74亿吨标准煤的1.7倍,期间年均增长9.5%;

表 1-2 欧盟可再生能源发电电量情况 (1995~2020 年)

类 型	1995 年	2000 年	2010 年	2020 年预计
风能/TW·h	4	22.4	168	444
光电能/TW·h	0.03	0.1	3.6	42
生物质能/TW·h	22.5	39.2	141	282
水电/TW·h	290.2	321.5	355.4	384
地热能/TW·h	3.5	4.8	7	14
合计/TW·h	320.2	388	675	1166
总发电能(2030 年趋势)/TW·h	2308.3	2574	3027	3450
可再生能源发电的比例/%	13.9	15.1	22.3	33.8

同期一次能源消费总量从 14.32 亿吨标准煤增加到 26.5 亿吨标准煤, 年均增长 10.8%。2007 年供需缺口为 2.8 亿吨标准煤 (图 1-3), 比 2006 年上升 9.4%。从 2001 年到 2007 年, 虽然中国能源生产持续增长, 但其增长速度小于能源消费的增长速度, 因此能源缺口不断扩大。

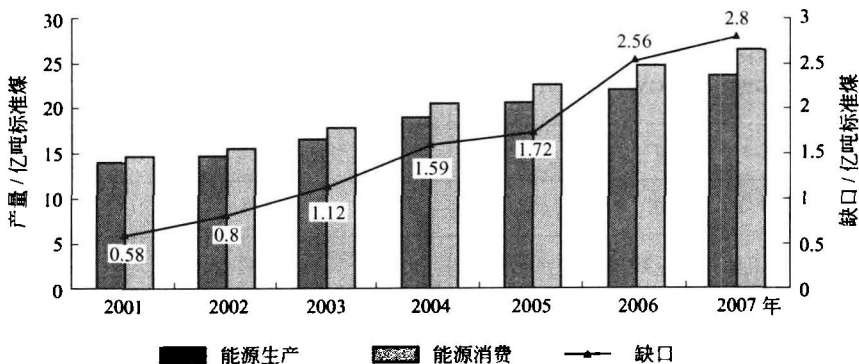


图 1-3 2001~2007 年中国一次能源生产和消费

中国以煤为能源消费主体的格局还将持续很长一段时间。中国是世界上少数几个以煤为主的能源消费国, 2001~2007 年, 在中国一次能源构成中, 煤的比例从 66.7% 上升到 69.1%, 石油的比重从 22.9% 下降到 19.4%, 天然气从 2.5% 上升到 3.6%, 水电、核电、风电三者所占比例从 2001 年的 7.9% 下降到 2003 年的 6.8%, 到 2007 年又回升到 7.9% (图 1-4)。

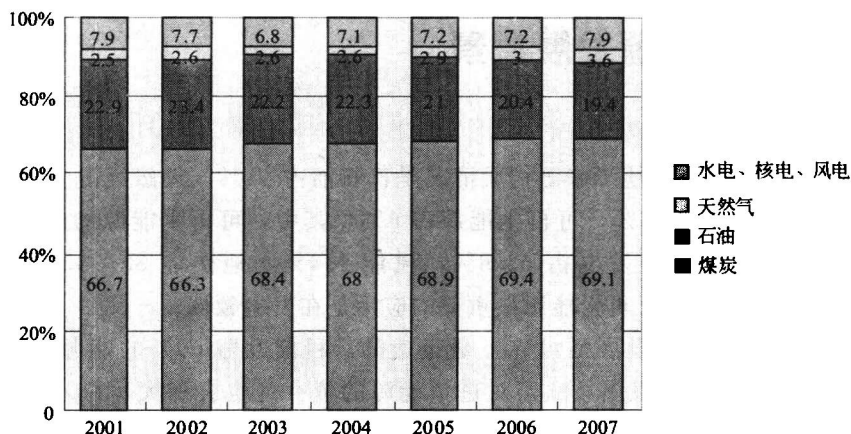


图 1-4 2001~2007 年中国能源消费结构变化

能源问题不仅仅是供需缺口问题，我国能源工业除了要满足不断增长的能源需求外，还面临两大挑战：能源发展和环境保护的矛盾更加突出；能源效率低成为制约能源和经济社会可持续发展的关键。能源生产和消费所带来的环境问题不容忽视。多年来，我国在保护环境、实施能源可持续发展方面采取了一系列行动，但与发达国家相比，能源生产和利用技术落后仍是环境污染的重要因素。随着人民生活水平不断提高，社会对环境保护的要求越来越高。未来能源发展如何兼顾经济性和清洁性的双重要求，是摆在我们面前的重大课题。

我国对碳减排高度重视，出台了应对气候变化的国家方案。我国政府有关领导多次公开表示，要抓住当今世界开始重视低碳经济发展的机遇，加快发展太阳能、风能等可再生能源，加快开发洁净煤、智能电网、新能源汽车、碳捕捉等技术，加快建筑节能步伐，实现经济社会的可持续发展。我国将大力发展清洁能源，到2020年单位国内生产总值CO<sub>2</sub>排放比2005年下降40%~45%。

在过去的十几年中，新型可再生能源（新型可再生能源包括风能、太阳能、地热、潮汐、生物质发电和液体燃料等）的开发和利用得到长足发展。随着石油价格快速上升，风能、太阳能和生物质能等可再生能源的市场竞争力有所提高，产业发展步伐加快。2005年国家颁布了《新能源法》，2006年出台了《可再生能源法》，2007年11月发布《可再生能源中长期发展规划》，明确了可再生能源发展的指导思想、主要任务、发展目标、重点领域和保障措施，我国可再生能源的发展进入了新阶段。根据国家颁布的《可再生能源中长期发展规划》要求，到2020年我国非化石能源比例应占到总能源消耗的15%，其中水电应达到3.5亿千瓦，风电应达到1.5亿千瓦，太阳能发电应达到2000万千瓦，我国未来新能源市场空间广阔，新能源产业将迎来重大发展机遇。

## 1.2 可再生能源发展背景

### 1.2.1 国外发展背景

2010年,欧盟一次能源来源构成情况是:石油占41%,天然气占22%,核能占15%,固体燃料占16%,可再生能源占6%。其中,可再生能源的内部构成情况是:生物质和废弃物发电占63.6%,风能1.4%,地热能3.6%,水力发电31%,太阳能0.4%。可再生能源最重要的应用是在发电领域。

欧盟可再生能源的发展是世界上最迅速的。目前欧盟50%的能源需要进口,而随着欧盟经济的持续发展,欧盟对进口能源的依存度也会加大,在未来20~30年,这一数字将会达到70%。目前,欧盟消耗原油总量的45%来自中东,40%的天然气来自俄罗斯。随着国际市场原油价格的持续攀升,欧盟能源安全问题越来越令人关注。对此,欧盟制订了相应战略,积极开发新能源和可再生能源,实现可持续发展、保障能源安全、改善生态环境、减少二氧化碳排放。欧盟1997年颁布可再生能源发展白皮书,提出到2050年可再生能源在整个欧盟国家的能源构成中要达50%,成为重要的战略能源。1999年欧盟发布的《欧洲共同体战略起飞白皮书》中提出了2010年将可再生能源在欧盟成员国内能源构成中的份额提高一倍(即从目前的6%上升至12%),包括时间表和行动计划。白皮书所提到的行动计划包括欧盟内部的市场手段;进一步鼓励可再生能源利用的政策;加强成员国之间的合作;鼓励各国在可再生能源领域内的投资,并加强可再生能源的信息服务,以及可再生能源的信息传播。

欧盟各个成员国也采取了对应的措施。德国和英国承诺,2010年和2020年可再生能源发电量的比例将分别达到10%和20%。西班牙表示,2010年其可再生能源发电的比例将达29%以上。北欧部分国家提出了利用风力发电和生物质发电逐步替代核电的战略目标。德国政府2002年承诺,在5年内投入10亿欧元与其发展伙伴进行可再生能源的开发。2004年,德国政府再次承诺,在未来5年中,再投入5亿欧元用于支持发展中国家的可再生能源开发。欧洲银行将能源投资额度的50%用于可再生能源的开发利用。

美国作为世界上人均温室气体排放水平最高的国家,也在努力寻求可持续发展道路。自2001年以来,美国已在开发可再生能源方面投入了近100亿美元。为了确定今后美国绿色能源的发展方向,美国近年来又出台了多项能源政策,主要目的是扩大可再生能源的使用并提高燃油效率,降低美国对其他国家的能源依赖。到2005年底,美国可再生能源生产总量已达到2.18亿吨标煤,约为当年美国一次能源生产总量的6%,GDP单位能耗与20世纪70年代相比下降了50%,人均能源消费量30年来基本保持不变,能源利用效率处于世界先进水平。据预测,未来20

年,美国 GDP 单位能耗指标将以年均 1.6% 的速度下降,可再生能源的比重将逐年上升。可再生能源和节能已成为发展前景广阔的新兴产业,并将为保护环境、应对气候变化、实现可持续发展发挥重要作用。为了使美国的可再生能源和节能的技术居于世界领先地位,美国政府十分重视可再生能源和节能的技术研发,仅每年用于技术研发的费用就达 30 亿美元。据美国能源情报署预计,到 2030 年美国电力供应量约 40% 将来自于可再生能源发电,采取各种措施可实现减排目标约 12 亿吨碳/年。

其他国家也都在制定相关政策与规划,积极推进本国可再生能源的发展。

### 1.2.2 我国发展背景

我国有丰富的可再生能源资源:水能可开发资源为 3.78 亿千瓦,目前已开发利用 11%;生物质能资源包括农作物秸秆、薪柴和各种有机废物,利用量约为 2.6 亿吨标准煤,占农村生活能源消费的 70%,整个用能的 50%;我国的太阳能年总辐射量超过  $60 \times 10^4 \text{ J/cm}^2$ ,开发利用前景广阔;风能资源总量达几十亿千瓦;地热资源尚待继续勘探,目前已探明的地热储量约为 4626 亿吨标准煤,现利用的仅约十万分之一;我国海洋能源资源亦十分丰富,其中可开发的潮汐能就有 2000 万千瓦以上。

在过去的十几年中,新型可再生能源的开发和利用得到长足发展。随着石油价格快速上升,风能、太阳能和生物质能等可再生能源的市场竞争力有所提高,产业发展步伐加快。2005 年国家颁布了《新能源法》,2006 年出台了《可再生能源法》,2007 年 11 月发布了《可再生能源中长期发展规划》,明确了可再生能源发展的指导思想、主要任务、发展目标、重点领域和保障措施,我国可再生能源的发展进入了新阶段。

我国可再生能源的门类齐全,从生物质能、水电、风能、太阳能热和发电到地热,已经实现可再生能源供应多元化。其中,热利用居首位,发电次之,汽车燃料为第三。“十一五”期间,我国进入了可再生能源快速发展时期。2005 年、2006 年和 2007 年,可再生能源(不包括传统方式利用的生物质能)年利用量分别为 1.66 亿吨标准煤、1.8 亿吨标准煤和 2.2 亿吨标准煤,约占我国一次能源消费总量的 7.5%、7.4%和 8.2%;2005~2006 年,我国的可再生能源投资约为 60 亿美元,成为世界上在该领域投资最多的国家之一。2005 年,我国的可再生能源利用量(不包括传统方式利用可再生能源)约占世界的 13%,能源消费量中可再生能源的比例高于 5.7%的世界平均水平。2006 年,风能、太阳能和生物质能等新型可再生能源仅占 0.93%。随后的两年,水电和风电增长较快,其装机容量分别增长 13%和 94%。由于煤电装机容量也快速增长,可再生能源发电装机容量占总装机容量的份额相对稳定。2006~2007 年,我国可再生能源发电与核电的装机容量之和约占全国总装机容量的 22.3%和 22.6%,其中水电装机容量为 1.28 亿千瓦和 1.45

亿千瓦，占 20.6% 和 20.3%，核电占 1.1% 和 1.2%（发电量比重约占 2%），风电约占 0.4% 和 0.8%。与世界平均水平相比，我国可再生能源发电占电力供应的比例较高，核电则远低于 15% 的世界平均水平。到 2008 年底，可再生能源年利用量总计约为 2.5 亿吨标准煤（不包括传统方式利用的生物质能），约占一次能源消费总量的 9%，比 2005 年的 7% 左右上升了 2 个百分点，其中水电为 1.8 亿吨标准煤，太阳能、风电、现代技术生物质能利用等提供了相当于 7000 万吨标准煤的能量，向 2010 年实现可再生能源占全国一次能源的比例达到 10% 的战略目标走出了坚实的一步。同时已经实施的《可再生能源法》标志着我国可再生能源发展进入了一个新的历史阶段。

2010 年我国可再生能源呈加快发展之势，能源结构不断优化。全年电源工程建设完成投资 3641 亿元，其中，水电 791 亿元，火电 1311 亿元，核电 629 亿元，风电 891 亿元，非化石能源建设投资占电源建设总投资的比重达到 63.5%，比上年提高 4.8 个百分点。云南小湾、四川瀑布沟、青海拉西瓦、贵州构皮滩等一批水电项目陆续投产。截至 2010 年底，全国水电总装机超过 2.1 亿千瓦，占电力总装机的 22%，水电在能源结构调整中的作用更加突出。秦山核电站二期三号机组和岭澳核电站三号机组投产，结束了核电 3 年没有新增装机的局面，总装机达到 1080 万千瓦；核电在建机组 28 台 3097 万千瓦，在建规模世界第一。风电新增并网装机 1399 万千瓦，累计并网装机 3107 万千瓦，装机规模仅次于美国，居全球第二，全年发电量 501 亿千瓦时，比上年增长 81.4%。太阳能发电新增装机 40 万千瓦，累计装机达到 70 万千瓦。我国能源规划报告指出，随着可再生能源发展“十二五”规划全面实施，七个战略新兴产业发展规划全面启动，2011 年新能源和可再生能源将迎来新的发展机遇期。水电重点流域开发力度继续加大，预计开工规模超过 2000 万千瓦，总装机容量将达到 2.2 亿千瓦。核电机组建设工作加快推进，岭澳核电站二期二号机组实现投产，核电总装机将达 1174 万千瓦。新疆哈密、内蒙古开鲁、吉林通榆、甘肃酒泉、江苏海上风电等项目开工建设，预计全年新增风电装机超过 1400 万千瓦。

我国具备发展可再生能源的丰富的资源条件和一定的产业基础，近年来可再生能源处于快速发展阶段，其中一些技术已经达到或接近商业化发展水平，从资源、技术和产业的角度，在近期都有大规模发展的潜力。政府对可再生能源的发展给予了充分的重视，根据我国制订的发展目标，2020 年可再生能源的发电比例可以达到 15% 以上，2040 年之后可以达到 30% 或更高的水平，成为重要的替代能源。经过近年来的培育，可再生能源已经开始在我国的能源供应中发挥作用，今后 5~10 年将是我国风电、光伏发电和生物质能大规模利用的起步阶段，能否抓住机遇，打牢基础，迅速形成可再生能源市场和产业，是推动可再生能源规模化应用的关键所在。总之，我国可再生能源发展潜力巨大、前景广阔，但是技术和产业的发展方面

还存在诸多障碍，任重而道远，需要政府的积极扶持，需要产业、研究机构等社会各界持之以恒的努力。

## 1.3 风、光能源背景

### 1.3.1 风、光资源丰富

在可再生能源中，太阳能与风能的开发与利用日趋受到各国的普遍重视，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，最具商业化发展条件的新型能源。

太阳能是取之不尽的可再生能源，可利用量巨大。太阳向宇宙空间发射的辐射功率为  $3.8 \times 10^{23}$  kW 的辐射值，其中 20 亿分之一到达地球大气层。到达地球大气层的太阳能，30% 被大气层反射，23% 被大气层吸收。47% 到达地球表面，其功率为  $8 \times 10^{13}$  kW，也就是说太阳每秒钟照射到地球上的能量就相当于燃烧 500 万吨煤释放的热量。全球人类目前每年能源消费的总和只相当于太阳在 40min 内照射到地球表面的能量。太阳的寿命至少尚有 40 亿年，相对于人类历史来说，太阳可源源不断供给地球的时间可以说是无限的。相对于常规能源的有限性，太阳能具有储量的“无限性”，取之不尽，用之不竭。我国幅员辽阔，有着十分丰富的太阳能资源。据估算，我国太阳年辐射总量达  $35 \sim 37$  kJ/( $\text{cm}^2 \cdot \text{年}$ )，中值为  $36$  kJ/( $\text{cm}^2 \cdot \text{年}$ )。年日照时数在 2200h 以上的地区约占土面积的 2/3 以上。

风是地球上的一种自然现象，它是由太阳辐射热引起的，每年来自外层空间的辐射能的 2.5% 能量被大气吸收，产生丰富的风能。根据相关资料统计，全球范围内距离地面 80m 处的观测点中，有 13% 可以达到 3 级风以上，即风速为 6.9m/s，非常适合风能的采集利用。在距离地面 10m 高处的观测点中，整体平均风速为 3.31m/s，3 级及以上风区平均风速为 6.53m/s。据此，按在 80 米高度处 6.9m/s 的风速来计算，全球风能可利用资源量为 72 万亿千瓦。即使只成功利用了其中的 20%，依然相当于世界能源消费量的总和或电力需求的 7 倍。据气象局测算，按离地 10m 高度估算全国陆地风能资源总量约 2.26 亿千瓦，海上风能储量约 7.5 亿千瓦。所以说我国是一个非常适合利用太阳能和风能的国家，高效地利用太阳能及风能资源将有效地缓解资源危机和环境污染等问题。

### 1.3.2 风电、光电问题

#### 1.3.2.1 风光波动大，利用率低

风力资源具有明显的波动性和周期性，风机的满功率输出率仅 20%~30%。如果电网按照风场满功率发电要求进行装机，则电网的年平均负荷也仅为 20%~30%，极大地浪费了公共网络资源。图 1-5 是典型时段的电力输出曲线。

与风电相似，受时间段和气象条件的限制，光电具有明显的时间性，输出功率

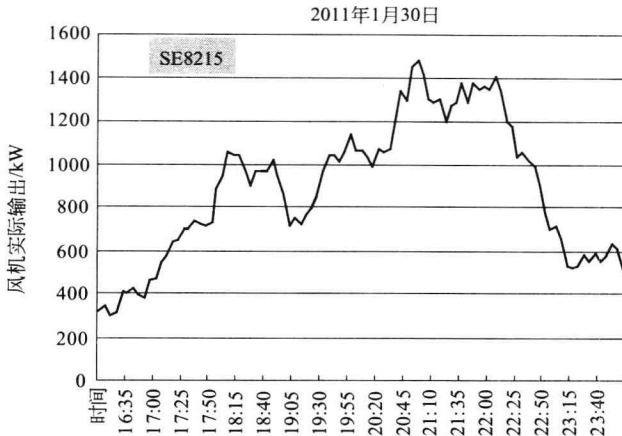


图 1-5 典型时段的电力输出曲线

与太阳高度和天气状况存在明显的关联关系，光电也是一种间断的不稳定能源。图 1-6 是典型的光伏发电功率曲线。

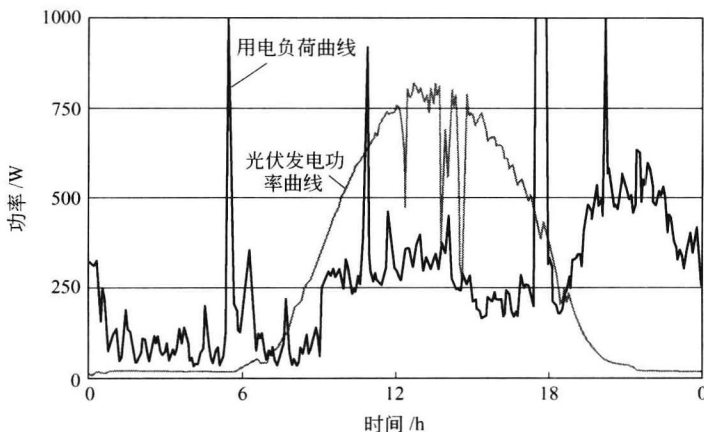


图 1-6 典型的光伏发电功率曲线与用电负荷曲线

与风电相似，光电的年发电平均发电小时数一般在 2300h（年辐照量小于  $2320\text{kW}\cdot\text{h}/(\text{年}\cdot\text{m}^2)$ ）以下，输变配电设施的利用率仅为 20% 左右。如果输变配电系统按照光伏电站的装机容量来配置，其系统利用率也仅 20% 左右。

### 1.3.2.2 电网效益低

对于如今大规模的风电场或光伏电站生产的低质量的电能，电网需要其他形式的能源来加以“平衡”。常规来说，建设一个风场，则需要配有相应的火电“平衡”电厂。为了负荷调峰和“平衡”可再生能源，我国火电的平均满功率发电时间不足 4500h。一般认为电网容纳可再生能源的比例是 5%，然而我国风力资源丰富的地区与电力主要消费区域距离遥远，加大了电网对这种不稳定电力的容纳能力。因此



尽管国家出台了《可再生能源法》，但电网企业对风电发展的积极性不高。目前正在制定的风电并网标准可能更会体现电网企业的这种诉求。

对于小规模的风机，光伏系统直接接入用户配电侧，可能使配网的某些设备闲置或成为备用。如：当风力发电和光伏发电运行时，与配电系统相连的配电变压器和电缆线路常常因负荷小而轻载，导致配电系统部分设备成为相应的风力发电和光伏发电的备用设备，从而使配电网的成本增加，供电局的效益下降。另外还可能使配电系统负荷预测更加困难。同时，这样的风力发电和光伏发电形式影响系统的潮流分布，因为电网的损耗主要取决于系统的潮流，因此风力发电和光伏发电的接入必然影响电网的损耗。风力发电和光伏发电可能增大也可能减小系统网损，取决于风力发电和光伏发电的位置、容量与负荷量的相对大小以及网络的拓扑结构等因素。

### 1.3.2.3 可靠性差

风力发电和光伏发电并网对可靠性产生不利的影响为：①大系统停电时有些风力发电和光伏发电也会同时停运，仍无法提高供电的可靠性；②风力发电和光伏发电与配电网的继电保护配合不好，可能使继电保护误动作，反而使可靠性降低；③不适当的安装地点、容量和连接方式会使配网可靠性变坏。

### 1.3.2.4 稳定性差

由于单相负荷的存在和低压线路不对称的分布，带有风力发电和光伏发电装置的配电系统经常运行在不平衡的状态下，这样，三相电压和三相电流的相角相差经常不是 $120^\circ$ 。换流器和其他电子装置对电压畸变是很敏感的，3%左右的电压畸变就会让它们把风力发电和光伏发电装置切除。风力发电和光伏发电并网引起的稳定问题主要是电压稳定问题，其对系统电压稳定的影响主要包括以下几个方面：①普通的风力发电和光伏发电机组无功补偿方式为电容器补偿，补偿量与接入点的电压的平方成正比，当系统电压水平降低很多时，无功补偿量下降很多，而风力发电场对电网的无功需求反而上升，进一步恶化电压水平，严重时会造成电压崩溃，风力发电和光伏发电机组被迫停机；②变速恒频风力发电机组虽然可采用电力电子技术来控制无功功率，但其定子侧无功功率只能在一定范围内进行调节，受风力发电机组转子转速和转子侧有功功率变化情况的影响；③在故障和操作后未发生失稳的情况下，部分风力发电和光伏发电机组由于自身的保护而停机，风力发电和光伏发电有功输出相应减少；④故障切除不及时，会发生暂态电压失稳；⑤风力发电和光伏发电出力过高有可能降低电网的电压稳定裕度，容易导致电压崩溃；⑥风速和光照的波动性和随机性引起风力发电和光伏发电出力多变，导致其接入系统的电压稳定裕度难以预测。

综上，并网型风力发电和光伏发电对电网稳定性的一个主要威胁是风速的波动性和随机性引起风力发电场出力变化过频，以及光照强度随日照、天气、季节、温