

文章编号: 1006-4729(2001)04-0023-06

21 世纪太阳能发电的展望

杨金焕, 陈中华

(上海电力学院 信息与计算科学系, 上海 200090)

摘要: 概述了太阳能发电的特点及重要性, 介绍了太阳能发电的历史和现状, 并对其发展动向和前景进行了分析. 指出太阳能发电有着巨大的潜在市场, 将逐步在能源消费结构中占有显著的份额. 本世纪内, 太阳能发电将成为全球的主要能源之一.

关键词: 太阳能; 光伏; 分散发电; 系统成本

中图分类号: TM615 **文献标识码:** A

引 言

人类社会已进入 21 世纪. 在新千年开始之际, 人们正面临着一系列重大的挑战. 全球经济发展, 人口迅速增加, 需要提供更多的食物、住房和原料, 因而对能源的需求量也不断增加. 在过去 20 年中, 全世界能源消耗量增加了 40%, 其中 85% 以上使用的是矿物燃料. 这些矿物燃料燃烧时要产生大量温室气体, 全球单是 CO₂ 排放量每年就超过 500 亿 t, 而且还在不断扩大.^[1] 形成的酸雨造成土壤退化, 危害动植物. 全球气候变暖可能会产生灾难性后果, 必须采取坚决措施, 减少温室气体的排放. 因此, 治理环境污染, 已成为当务之急. 同时, 矿物燃料的储藏量是有限的, 按目前探明的储量与开发速度的比例计算, 地球上可再开采的能源, 石油为 40 年, 天然气约为 60 年, 煤炭为 200 年. 如不采取有效措施, 到本世纪中叶, 人类必将面临矿物燃料枯竭的严重局面.

为了减少大气污染、保护人类生态环境、保证能源的长期稳定供应, 必须实施可持续发展战略, 逐步改变现有的能源结构, 大力开发利用新能源. 这已成为各国的共识.

在新能源中, 公认技术含量最高、最有发展前途的是太阳能发电. 太阳能发电可分为太阳能光伏发电(又称光伏发电)和太阳能热发电两大类. 后者由于技术比较复杂, 只能用于比较大的容量, 因

而应用受到一定限制, 至今很少实际应用. 本文主要讨论前者.

1 光伏发电的特点

目前实际应用的太阳电池是一种半导体器件, 受到太阳光照时能产生光伏效应, 将太阳光能转变成直流电能. 在使用时要将太阳电池封装成组件, 然后根据需要将组件串并联组成方阵. 通常需要用蓄电池等作为储能装置, 才能随时供给负载使用. 如果是交流负载, 则还需要通过逆变器将直流电变成交流电. 整个光伏系统还要配备控制器等附件. 光伏发电具有很多独特的优点.

1 太阳能取之不尽, 用之不竭, 照射到地球上的太阳能要比人类消耗的能量大 6 000 倍. 只要在美国阳光丰富的西南部沙漠地区, 建立一个面积为 100 mile × 100 mile 的巨型光伏电站, 所发电力可以满足全美国的用电需要. 太阳能发电安全可靠, 不会遭受能源危机或燃料市场不稳定的冲击.

2 太阳能随处可得, 可就近供电, 不必长距离输送, 因而避免了输电线路等电能损失.

3 太阳能不用燃料, 运行成本很小.

4 太阳能发电没有运动部件, 不易损坏, 维护简单.

5 太阳能发电不产生任何废弃物, 没有污染、噪声等公害, 对环境无不良影响, 是理想的清

洁能源. 安装 1kW 光伏发电系统, 每年可少排放 CO_2 600~2 300kg, NO_x 16kg, SO_x 9kg 及其他微粒 0.6kg. 一个 4kW 的屋顶家用光伏系统, 可以满足普通美国家庭用电需要, 每年少排放的 CO_2 数量, 相当于一辆家庭轿车每年的排放量.

6 太阳能发电系统建设周期短, 由于是模块化安装, 不仅可用于小到太阳能计算器的几个毫瓦, 大到数十兆瓦的光伏电站, 而且可以根据负荷的增减, 任意添加或减少太阳能电池容量. 既方便灵活, 又避免了浪费.

太阳能发电的缺点是:

1 地面应用时有间歇性, 发电量与气候条件有关, 在晚上或阴雨天就不能发电或很少发电, 与负荷用电需要常常不相符合, 因此, 通常要配备储能装置;

2 能量密度较低, 在标准测试条件下, 地面上接收到的太阳辐射强度为 $1\ 000\text{W}/\text{m}^2$, 大规模使用时, 需要占有较大面积, 由于各地太阳辐射强度不同, 所以在应用时要经过较复杂的设计计算;

3 目前价格仍较贵, 为常规发电的 2~5 倍, 初始投资高, 影响了其大量推广应用.

2 光伏发电的历史及现状

1954 年美国贝尔实验室制成了世界上第一个实用的太阳电池, 效率仅为 4%, 后经过改进, 1958 年应用到美国的先锋 1 号人造卫星上. 由于太阳能发电的特殊优越性, 各国普遍将其作为航天器的首选动力. 迄今为止各国发射的数千颗航天器中, 绝大多数都用太阳电池. 太阳电池在人类对空间领域的探索中发挥了十分重要的作用.

由于价格昂贵, 早期的太阳电池只是在空间应用. 后来由于材料、结构、工艺等方面的不断改进, 产量逐年上升, 价格也在逐渐下降, 现在太阳电池的价格还不到 70 年代的 1%. 70 年代后期开始太阳电池进入地面应用, 起初是在航标灯、铁路信号等特殊用电场合应用, 后来逐渐发展到在微波通信中继站、防灾应急电源、石油及天然气管道阴极保护电源系统等较大规模的工业中应用. 太阳能计数器、手表、收音机等更是到处可见. 在无电地区的乡村, 太阳能家用电源、光电水泵等也已经广泛使用, 并且有了很好的社会效益和经济效益. 中小型太阳能光伏电站正在迅速增加, 在不少地方已经可以取代柴油发电机. 以上这些类型属

于独立光伏系统的应用. 并网的太阳能发电系统也已在很多地区推广应用. 到 1996 年全世界安装的光伏组件容量已超过 600MW, 1995 年发电量为 8 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$. 自 1988 年以来安装的光伏系统所发电力可满足美国 15 万户家庭的用电需要, 到 1998 年光伏发电已形成大约 15 亿美元的产业.

至今全世界还有 20 亿人用不上电, 我国现在还有 2 300 万人居住在无电地区, 他们大多数生活在偏远山区. 没有电力严重制约着当地经济的发展, 由于居住分散, 交通不便, 很难通过延伸公共电网来解决用电问题. 光伏发电在这些地区大有用武之地, 具有巨大的潜在市场.

3 光伏发电的动向及前景

3.1 太阳能屋顶计划正在实施

尽管光伏发电在很多地方已经取得了一定的经济效益, 但由于价格偏高, 无法真正进入庞大的电力市场, 因而发展不快, 陷入了“要使市场扩大, 太阳电池应当降价, 太阳电池要进一步降价, 就要大规模生产, 又要依赖于市场的扩大, 而市场的扩大又总不能满足进一步降价的要求”这样的“怪圈”中. 然而最近几年, 这个怪圈正在被打破. 在 90 年代的最后 3 年, 全世界太阳电池产量年增长率由前些年的大约 12% 一举超过了 25%, 2000 年达到了 42.9%. 其主要原因是由于一些国家实施屋顶计划的推动.

在城镇建筑物屋顶上安装的光伏系统, 通常采用与公共电网并网的形式. 并网光伏系统不需要配备蓄电池, 这样可以节省投资, 同时由于不受蓄电池荷电状态的限制, 能够充分利用光伏系统所发出的电力; 而且在夏季用电高峰时, 正好太阳辐射量最大, 光伏系统发电量最多, 这对电网还可以起到调峰作用. 建筑物上有大量空置的屋顶及外墙空间, 可以安装光伏组件, 这样就不需要占用土地资源. 这类屋顶光伏系统的发电成本可比独立光伏系统降低约 20%. 这种屋顶分散的发电不需要长途输送, 节省了输配电设备, 减少了电力损耗. 在有自然灾害和战争等特殊情况下, 更能体现出分散发电的优越性. 户用并网屋顶光伏系统的推广, 是光伏发电由偏远无电地区进入城镇的转折点, 预示着一一种新的分散供电方式正在形成, 其广阔的应用前景, 受到了人们极大的关注.

为了减少温室气体的排放, 推广利用新能源, 1990 年德国率先提出并实施“一千屋顶计划”, 在居民住宅屋顶上安装容量为 1~5kW 的光伏并网系统. 由于采取了一些优惠政策, 项目结束时共安装屋顶光伏系统 2 056 套. 以此为契机, 德国在 1995 年安装了光伏系统容量 5MW, 1996 年增加了一倍, 达到 10MW, 1999 年扩大为 15.6MW. 1997 年在慕尼黑贸易展览中心安装了世界上最大的屋顶并网光伏系统, 容量为 1.016MW. 1999 年 1 月德国开始实施“十万屋顶计划”. 2000 年安装光伏系统容量超过 40MW.^[3] 现在德国的光伏发电市场已从探索阶段发展成为繁荣的专业市场.

1997 年 6 月 26 日美国总统克林顿在联合国

环境发展会议上宣布, 为了达到 2010 年使温室气体排放量比 1990 年减少 7% 的目标, 采取的一项重要措施是实施“百万太阳能屋顶计划”, 提出到 2010 年要在全国的住宅、学校、商业建筑和政府机关办公楼屋顶上安装 101.4 万套太阳能装置, 光伏组件累计用量将达到 3 025MW, 产生的电力相当于新建 3~5 个燃煤发电厂, 每年可减少 CO₂ 排放量 351 × 10⁴t, 增加就业人数 7 万人. 通过大规模应用将促使光伏组件成本下降, 光伏发电价格将从 1997 年的 22 美分/kW·h, 到 2010 年降至 7.7 美分/kW·h. 其具体指标见表 1. 计划由能源部负责组织实施. 在 1998 年有 36 个电力公司、能源供应商、州政府等承诺安装的屋顶光伏系统超过 90 万套. 此计划正在顺利实施.

表 1 美国百万太阳能屋顶计划实施方案

年份	合作单位 个	太阳能屋顶 万个	系统容量 kW	每年增加容量		系统安装成本 US \$/W	电 价 美分/kW·h	每年减少 CO ₂ 排放 kt	就业人数 万人
				MW					
1999	25	2.35	1	15	25	4.9	16.9	39	0.38
2000	52	5.1	2	55	80	4.3	14.8	11.1	1.10
2005	200	37.6	3	270	820	2.9	10.6	103.7	4.00
2010	325	101.4	4	610	3025	2.0	7.7	3510	7.15

日本是个缺乏能源的岛国, 20 世纪 70 年代世界石油危机后, 投入大量资金, 开展研究和发展光伏发电, 连续制订和实施了几个光伏发展 5 年计划. 日本到 1996 年底已安装 2 700 套并网户用光伏系统, 每套容量平均为 3 kW, 到 1997 年末为 1 万套, 在政府支持下, 又开展了“普及住宅光伏系统计划”, 在 1999 年底, 已在 3 万户住宅屋顶安装了 120MW 太阳电池组件. 现在日本的光伏组件产量已超过美国而占世界第一位. 随着大量推广应用, 光伏系统的价格也在不断下降. 表 2 列出了户用屋顶并网光伏系统价格的变化情况. 通产省提出的“新能源推广的基本原则”要求到 2010 年安装光伏容量累计达到 4 600MW, 后来又修改为 5 000MW.^[3] 其规模都远远超过美国的百万屋顶计划.

欧盟在 1997 年 11 月 26 日发表了名为《能源的未来: 再生能源》的欧盟战略与行动白皮书提出, 到 2010 年在欧盟范围内要安装 100 万套光伏系统, 其中 50 万套为屋顶并网光伏系统, 需要光伏组件 1 000MW, 另外 50 万套是为乡村供电的独立光伏系统. 这就需要目前 30MW 的光伏组件

的年产量扩大 100 倍(3GW). 此外, 还要有相近数量的组件出口到其他国家.^[4]

表 2 日本 3kW 屋顶并网户用

光伏系统历年价格统计 百万日元

年 度	价 格	年 度	价 格
1993	11.00	1997	3.10
1994	6.00	1998	3.05
1995	4.30	1999	2.85
1996	3.50	近期	1.05

由上可知, 到 2010 年, 仅美国、日本和欧盟预计安装的光伏系统总量就达 11GW, 而 1999 年全球的光伏组件产量仅为 201.5MW. 可以预计, 近年光伏组件的产量将会大幅度增长, 发电成本也将逐步下降到可与常规发电相竞争. 随着屋顶光伏系统的逐渐推广应用, 将逐步改变传统的由电站集中供电的方式, 使供电结构更趋合理.

3.2 大规模应用促进降价

随着各国屋顶计划的实施, 所需的光伏组件数量激增, 大规模批量生产, 将使其价格进一步下降. 根据计算, 太阳电池组件产量每增加一倍, 生

产成本可降低 20%。光伏系统售价如能降到 3US \$/W(太阳电池组件的成本大约占系统的 50%),发电价格将与常规电力相当,就可以普遍推广应用。

英国 BR Solar 公司在 1997 年 6 月发表论证报告,认为以现在的技术,建立年产量为 500MW 的单晶硅组件的超级生产厂是完全可能的,这需投资 7.84 亿美元,雇员 3 000 人,这样大规模生产可以将光伏组件的成本降到 1 欧元/W 以下。^[5]

美国 Siemens Solar 公司前年宣布准备进入“太阳能世纪”,计划太阳电池组件年增长率至少达到 15%~25%。这样,到 2025 年或 2040 年,其光伏发电量将占世界总发电量的 1%。这意味着在 2025 年发电量要达到 300TW·h 或者在 2040 年要达到 350TW·h。为此,需要累计安装光伏组件 300GW,以后每年要销售 50GW。这是该公司目前产量的 500 倍,为此总共需要增加约 1 000 亿美元的投资。当然其效益也是巨大的,世界发电量的 1%中,只要 1/3 就可以满足全球 20 亿无电人口的基本用电需要。^[6]

3.3 太阳能发电正在进入电力市场

要使光伏发电真正大规模应用,必须进入庞大的电力市场,国外不少电力公司正在大力开展光伏应用。其中有,美国萨克拉门托市政公司管辖区(SMUD)在美国最大电网中位居第 5,有 110 万用户,覆盖面积 2 590km²,装机容量 2 600MW,1992 年关闭了分别建于 1984 年和 1986 年的两座容量均为 1.23MW 的核电站,致力于发展新能源。1993 年开始推出“光伏先驱者”项目,在 100 户志愿者屋顶上安装并网光伏系统,每套容量为 3~4kW。以后每年发展 100 户,实行“绿色电价”。在 2002 年以前,每月要额外多交纳 4 美元的电费。这一项目得到了用户的积极响应,每年有 500~1 000 个用户报名参加。到 1997 年底,已经安装了 600 套光伏系统,总容量为 7MW。其中,户用屋顶并网光伏系统超过 550 套,其余为商业建筑、停车场、太阳能路灯和光伏电站等。在 1998~2002 年的第二个 5 年计划中,将安装 3 000 套屋顶并网光伏系统,总容量为 10MW。预计 2002 年光伏系统的安装价格将低于 3US \$/W。根据国家百万屋顶计划的要求,到 2010 年将安装 2.5 万套屋顶光伏系统。为了满足推广光伏系统的要求,在萨克拉

门托兴建了一座年产量为 7~10MW 的太阳电池生产厂,增加了 100~200 个就业岗位。^[7]

美国洛杉矶自来水电力局(LADWP)1998 年 4 月末开始安装 12 套 2kW 的户用屋顶并网光伏系统,这是第一批 125 套 2kW 系统的一部分。每户平均发电量为 10kW·h/天,是洛杉矶居民用电量的 2/3,1998 年一共推广 200 套,2010 年的目标要推广 10 万套。

美国奥斯汀能源、威斯康星公共服务、荷兰阿姆斯特丹 REMU 等也都在积极推行将光伏电力引入电网。

此外,光伏扩容及支持系统等也已在电力部门开始采用。

3.4 与建筑一体化成为热点

光伏与建筑相结合,是光伏系统应用由边远农村地区进入城镇的重要标志,具有巨大的潜在经济价值,现已成为能源和建筑界关注的焦点。建筑界提出“21 世纪建筑”的一个特点,是建筑物能产生能源,美国有超过 1 亿座建筑物,所消耗的电力占全国电力总量的 2/3,美国提出的目标是新建筑物要减少能源消耗 50%,并逐步进行改造,使得国家现有的 1 500 万个建筑物减少能耗 30%。

近年来,国外推行的光伏与建筑相结合,极大地推动了光伏并网系统的发展。现在已研制出了多种光伏与建筑材料一体化(BIPV)产品,可以用光伏组件代替屋顶、窗户、遮阳板、屋檐、护围栏和外墙(特别是价格不菲的幕墙玻璃)等。为了与周围环境协调,还生产出多种色彩的光伏组件,供建筑师选择。这类产品既可以当建材,又能发电,这样就能进一步降低造价。如瑞士联邦银行新建大楼的屋顶上安装了 100kW 光伏方阵,外墙安装了 82 kW 光伏与建筑集成的材料,增加了建筑物的“绿色外观”。光伏系统的安装成本小于 6US \$/W,全部光伏系统的费用还不到建筑物总造价的 1%。^[8]

总之,光伏与建筑集成的 BIPV 产品,作为庞大的建筑市场和潜力巨大的光伏市场两者的结合点,有着无限广阔的发展前景,新的产品还在不断涌现。

3.5 新型廉价的太阳电池正在出现

要大幅度降低光伏系统造价的根本办法,还

在于采用新型的廉价太阳能电池, 目前普遍应用的晶体硅太阳能电池虽具有转换率较高、性能稳定等优点, 但由于采用复杂的半导体制造工艺, 生产成本较高, 而且硅材料消耗量大, 一般的非晶硅太阳能电池虽成本较低, 但效率不高, 性能不很稳定。多年来, 各国都在致力于新型太阳能电池的开发研究, 其目标是太阳能电池转换率较高, 性能稳定, 生产成本接近于 1US \$/W, 并且适合于大规模生产。经过 20 多年的开发研究, 目前最有希望的太阳能电池主要有以下几种。

1 硒钢铜(CIS)太阳能电池 实验室效率已达到 18.8%, 组件效率最高已到 11%, 并已开始进入市场。计划到 2003 年将建成年生产能力为几兆瓦的生产线。

2 碲化镉(Cd Te)太阳能电池 实验室效率已达到 16%, 组件效率已达到 9%。有一家公司已能做到每 30s 生产一个大的组件。这意味着年产量可达到 100MW。这种电池已接近商业化的边缘。

此外, 有些企业对薄膜多晶硅太阳能电池、多结非晶硅太阳能电池等已经投入了试生产。近年来, 染料敏化太阳能电池的实用化已取得进展, 如果开发顺利的话, 光伏系统安装成本达到 3US \$/W 的目标将很快实现。

3.6 光伏空间电站正在研制

太阳光经过大气层照射到地面时能量大约要损失 1/3, 而且太阳能电池在晚间和阴雨天不能发电。1968 年美国工程师 Peter Glaser 提出了建造空间太阳能电站的设想。发出的电力可以通过微波的方式输回地球, 再将微波转换成电能供人类使用。后来, 美、日、俄等国都相继开展了大量的研究, 也提出了多种方案, 并正在付诸实施。随着光伏及航天技术的发展, 预计最迟到 2020 年, 光伏空间电站就能升空发电。这将是一项人类寻求自然界永久性能源的宏伟工程, 具有非常重大的意义。

4 光伏发电展望

世界能源消费结构正发生变化, 廉价的石油时代已经结束, 光伏发电正在迅速崛起, 并起到越来越重要的作用。美国能源部(DOE)发表的 2000~2020 年光伏产业指南提出的目标是:

1 保持太阳能电池生产 25% 的年增长率;

2 在 2020 年太阳能电池产量为 7GW, 其中在国内安装 3.2GW;

3 降低用户端光伏系统的成本(包括运行和维护), 2010 年将降为 3US \$/W, 2020 年要进一步降到 1.5US \$/W。

美国能源部新的太阳能技术局(OSET)提出的近期 2004 年的目标是, 太阳能电池成本要降低 40%, 从平均 2.5US \$/W 降到 1.5US \$/W。年增长率为 25%, 届时, 美国累计销售达 1GW。^[9]

根据统计, 2000 年美国发电装机容量为 776GW, 预计每年增加 1%~3%, 到 2020 年大约要增加 21.5GW。1998 年美国太阳能电池的产量为 60MW, 如按 25% 的年增长率计算, 到 2020 年产量将为 7GW, 其中在国内安装 3.2GW, 约占美国当年新增发电装机容量的 15%。届时, 美国累计生产太阳能电池总量约为 36GW, 在国内累计安装 15GW, 约占全世界太阳能电池安装总量(约 70GW)的 20%。对环保的效益, 相当于减少了 100 万辆汽车的 CO₂ 排放量。到 2030 年, 美国当年安装太阳能电池总量约为 9GW, 约占美国当年新增发电装机容量的 25%。累计安装容量将超过 25GW, 将减少 CO₂ 排放量 2.22 亿 t, 相当于 5 000 万辆汽车的排放量。2020 年光伏市场直接产值将达 270 亿美元, 间接产值将增加一倍。目前光伏产业的从业人员为 2 万人, 到 2020 年将增加到 15 万人, 规模相当于现在玻璃行业的人数。太阳能发电将发展成为全球最重要的产业之一。

5 结束语

在可以预期的将来, 常规发电成本不大可能大幅度下降, 尽管现在还无法精确地预言光伏发电的价格低于常规发电价格的确切日期何时到来, 但最迟不会超过本世纪 20 年代, 太阳能发电将逐渐在世界能源消费结构中占有越来越多的份额, 成为重要的替代能源。用户光伏屋顶发电将成为一种新的分散供电模式。太阳能发电将成为全球主要的能源供给形式之一。

在本世纪中叶以后, 将会看到很多建筑物上都有太阳能电池, 一些乡村的小型工厂、医院、通讯、照明及日常用电, 都由光伏供给, 不必从远处架设输电线路。移动的通信及交通工具不少都由太阳能充电, 空间太阳能电站将供应人们大量电力, 一个“处处阳光处处电”的太阳能时代很快就

会到来。

参考文献:

- [1] Singh D, et al. Can solar photovoltaic become the major source of energy for village electrification and significantly contribute towards the reduction of greenhouse gas emissions in the 21st century? 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion[C] . 1998; 3 313 ~ 3 316.
- [2] Gabler H. Grid-connected photovoltaics[J] . Solar Energy. 2001, 70(6): 455~ 456.
- [3] Kurokawa K, Ikki O. The Japanese experiences with national PV system programmes[J] . Solar Energy. 2001, 70(6): 457~ 466.
- [4] Haas R, et al. Socio-economic aspects of the Austrian 200kW photovoltaic-rooftop programme[J] . Solar Energy. 1999, 66(3): 183 ~ 191.
- [5] Tim Broton. A study of the manufacture at 500MW of crystalline silicon PV module. 14th European PV Conference[J] . Barcelona a 1997.
- [6] Oswald G J. The PV-Industry moving into the "Solar Century". 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion[C] . 1998. 3 321~ 3 323.
- [7] Osborn D E. Commercialization and business development of grid-connected PV at SMUD. Proceedings of the 1998 annual conference American Solar Energy Society[C] . Albuquerque NM. 1998. 545 ~ 551.
- [8] Tonly Schoen. Building-integrate PV in Europe[J] . Solar Today. 1998. 22 ~ 24.
- [9] Rannels J. The DOE office of solar energy technologies vision for advancing solar technologies in the new millenium[J] . Solar Energy. 2000, 69(5): 363 ~ 368.

Prospect of Photovoltaic in 21st Century

YANG Jin-huan, CHEN Zhong-hua

(Department of Information and Computing Science, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: This paper discusses the features and significance of photovoltaic, introduces its history and present condition, and also analyses its developmental trends and prospects, which indicates that the photovoltaic power source having tremendous potential market, will gradually occupy a remarkable portion in the energy consuming structure. In this century, photovoltaic will become one of the major energy sources of the whole world.

Key words: solar energy; photovoltaic; distributed generation; system cost