

光伏发电技术系列讲座(1)

光伏发电原理及发展现状

王宏华

(河海大学 自动化工程系, 江苏 南京 210098)

摘要:阐述了太阳能光伏发电系统的基本结构和工作原理,综述了国内外光伏发电技术的发展现状及发展趋势。

关键词:太阳能; 光伏电池; 光伏阵列; 光伏发电系统

中图分类号:TK51 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2010)04-0186-04

The Series of Lectures on Photovoltaic Power Technology(Part 1)

Principle and Development of Photovoltaic Power

WANG Hong-hua

(Department of Automation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: This paper describes the principle and structure of photovoltaic power system, and presents the latest development trend and research progress of photovoltaic power technologies.

Key words: solar energy; solar cell; photovoltaic array; photovoltaic power system

0 引言

众所周知,太阳能是一种用之不竭、储量巨大的清洁可再生能源,每天到达地球表面的辐射能量相当于数亿万桶石油燃烧的能量^[1],太阳能开发与利用正逐步成为各国政府重点发展的战略。热能和光能利用是太阳能应用的两种重要形式。“光伏发电”是利用光伏电池的光伏效应将太阳光的光能直接转换为电能的一种可再生、无污染的发电方式,正在全球范围内迅猛发展,其不仅要替代部分化石能源,而且未来将成为世界能源供应的主体,是世界各国可再生能源发展的重点。本文阐述了太阳能光伏发电系统的基本结构和工作原理,综述了国内外光伏发电技术的发展现状及发展趋势。

1 光伏电池的原理及发展现状

1839年,法国的Edmond Becquerel发现了“光伏效应”,即光照能使半导体材料内部的电荷分布状态发生变化而产生电动势和电流。光伏电池是基于半导体P-N结接受太阳光照产生光伏效应,直接将光能转换成电能能量转换器。1954年,美国Bell实验室的G. Pearson等发明了单晶硅光伏电池,其原理如图1所示。

图1中,太阳光照射到光伏电池表面,其吸收具有一定能量的光子,在内部产生处于非平衡状态的电子-空穴对;在P-N结内建电场的作用下,电子、空穴分别被驱向N,P区,从而在P-N结附近形成与内建电场方向相反的光生电场;光生电场抵消P-N结内建电场后的多余部分使

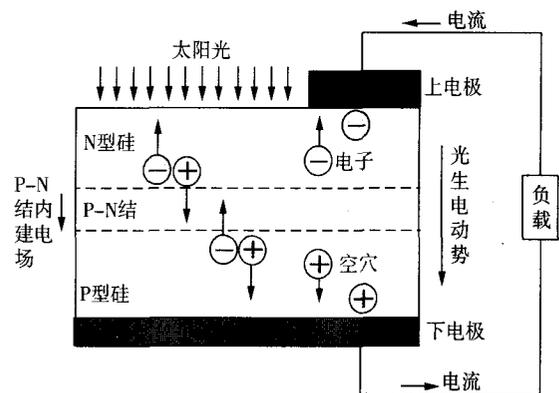


图1 单晶硅光伏电池发电原理

P,N区分别带正、负电,于是产生由N区指向P区的光生电动势;当外接负载后,则有电流从P区流出,经负载从N区流入光伏电池。

图2为光伏电池等效电路,其中, I_{ph} 为与光伏电池面积、入射光辐照度成正比的光生电流(1 cm^2 硅光伏电池的 I_{ph} 值为 $16\sim 30\text{ mA}^{[1]}$); I_D, I_{sh} 分别为P-N结的正向电流、漏电流;串联电阻 R_s 主要由电池体电阻、电极导体电阻等组成(R_s 一般 $< 1\ \Omega$);旁漏电阻 R_{sh} 由硅片边缘不清洁或体内缺陷所致(R_{sh} 一般为几 $\text{k}\Omega$); R_L 为外接负载电阻, I_L, U_o 分别为光伏电池输出电压、电流;当负载开路($R_L = \infty$)时, U_o 即为开路电压 U_{oc} ,其与环境温度成反比、与电池面积无关(在 100 mW/cm^2 的光谱辐照度下,硅光伏电池的 U_{oc} 一般为 $450\sim 600\text{ mV}^{[2]}$)。

与图2对应的光伏电池解析模型为^[1]:

作者简介:王宏华(1963—),男,江苏泰州人,博士,现为河海大学教授、博士生导师。研究方向为新型交直流电力传动等。

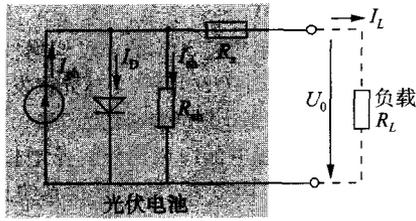


图2 光伏电池等效电路

$$I_L = I_{ph} - I_D - I_{sh}$$

$$I_{ph} = I_{sc} \frac{S}{1000} + C_T (T - T_{ref})$$

$$I_D = I_{D0} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 e^{\frac{qE_g}{nk} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right)} \left[e^{\frac{q(U_o + I_L R_s)}{nkT}} - 1 \right]$$

$$I_{sh} = \frac{U_o + I_L R_s}{R_{sh}}$$

上式中, I_{sc} 为 $R_L = 0$ 时的短路电流(A); T 为环境温度(K); T_{ref} 为参考温度(一般取 298 K); S 为实际太阳光辐照度(W/m^2); C_T 为温度系数(A/K); $q = 1.6 \times 10^{-19} C$; $k = 1.38 \times 10^{-23} J/K$; n, I_{D0} 分别为二极管排放系数、反向电流; E_g 为表征半导体禁带宽度的常量(V)。

实用中, 为了满足负载需要的电压、电流, 需将多个容量较小的单体光伏电池串、并联成数瓦到数百瓦的光伏模块(其输出电压一般在十几~几十V), 进一步可将多个光伏模块串、并联成光伏阵列。图3为在环境温度 25 °C ($T = 298 K$), 太阳光辐照度 $S = 1000 W/m^2$ 条件下某光伏模块(其解析模型参数参见文献[1])的仿真输出特性。

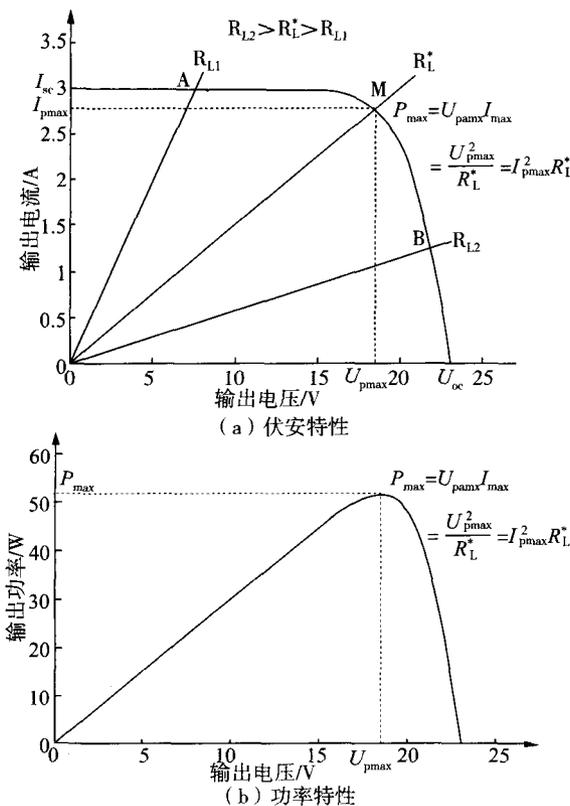


图3 光伏电池输出特性

图3表明, 一定的温度、照度下, 光伏电池对应存在一个可能的最大功率输出运行点($P_{max} = U_{pmax} I_{pmax}$), 但实际工作点则是光伏电池伏安特性与负载伏安特性的交点。图3(a)中, 给出了3条不同阻值 R_{L1}, R_L^*, R_{L2} 的电阻负载伏安特性($R_{L1} < R_L^* < R_{L2}$), 其与光伏电池伏安特性的3个交点 A, M, B 则为对应的3个实际工作点, 只有当负载电阻 $R_L = R_L^*$ 时光伏电池才运行在最大功率点 M, 输出最大功率 P_{max} ($U_{pmax} I_{pmax}$)。事实上, 光伏电池的短路电流与辐照度成正比, 开路电压与温度成反比, 辐照度增加、温度降低将使其最大功率增加^[1-3, 12], 故随着天气(辐照度、温度)变化, 应实时调整负载的伏安特性使其相交于光伏电池伏安特性的最大功率输出点处, 以实现“最大功率点跟踪(MPPT)”。

自 1954 年实用光伏电池问世至今, 晶体硅光伏电池占了光伏电池总产量的 80% 以上, 广泛应用的单晶硅光伏电池光电转换效率已接近 25%; 多晶硅光伏电池的光电转换效率虽较低, 但其材料成本较低, 可望成为主导产品之一^[1-2, 5]。随着光伏产业的迅猛发展, 具有半导体材料消耗少、易批量生产、低成本、对弱光转化率高、易实现光伏建筑一体化等优势薄膜光伏电池成为第二代光伏电池研发的重点, 其中, 1976 年问世的非晶硅薄膜光伏电池实验室效率已达 12.8%^[2]; 20 世纪 80 年代兴起的铜铟硒(CIS)多晶薄膜光伏电池实验室效率已接近 20%^[5]。进入 21 世纪, 以提高光电转换效率、降低成本为目标的第三代光伏电池, 如叠层、玻璃窗式、纳米光伏电池等研究方向未艾^[1, 5]。

2 光伏发电系统的结构和工作原理

2.1 离网型光伏发电系统

离网型光伏发电系统亦称为独立光伏发电系统, 图4为其典型结构示意图。

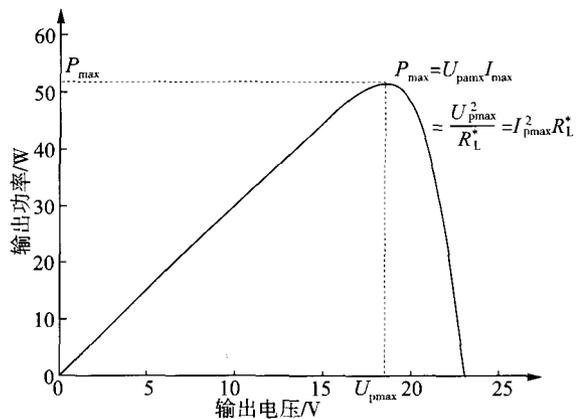


图4 离网型光伏发电系统

图4中的蓄电池是离网型光伏发电系统中必不可少的储能器件, 光伏阵列受太阳光照发出的电能通过控制器、DC/DC 变换器对蓄电池进行高效、快速充电; 而蓄电池储存的电能可通过放电器向直流负载馈电或经 DC/AC

变换向交流负载供电。控制器根据当前工况通过对 DC/DC 变换器控制调整光伏阵列等效负载的大小,实现 MPPT;另一方面,控制器采用正弦波调制 (SPWM) 或空间矢量脉宽调制 (SVPWM) 技术对电压源型 DC/AC 逆变器进行控制以输出总谐波畸变率低、稳定可靠的交流电。防反充二极管可防止蓄电池对光伏阵列放电,以避免反向电流损坏光伏阵列。

离网型光伏发电系统主要应用于远离公共电网的无电地区^[2]或容量较小(一般不超过几百瓦)的户用光伏系统^[1]。

2.2 并网型光伏发电系统

并网型光伏发电系统与公共电网相联接,其典型结构示意图如图 5 所示。

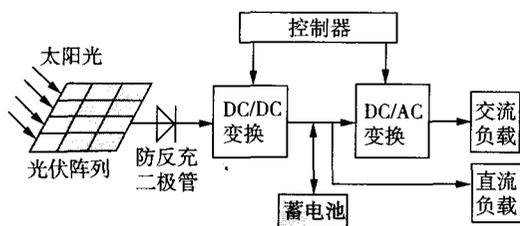


图 5 并网型光伏发电系统(两级式)

图 5 中,实现 MPPT 的前级 DC/DC 变换控制与实现逆变、并网控制的后期 DC/AC PWM 控制独立,降低了后期逆变器并网工作与光伏阵列输出功率的相互影响,在提高太阳能利用率的同时,提高并网电流品质^[12]。

并网型光伏发电系统具有太阳能利用率高、可省略蓄电池储能环节、发电成本较独立型光伏发电显著降低等优点^[10],其是光伏发电技术发展的趋势,主要有大型联网光伏电站和住宅联网型光伏系统两大类,其中,光伏系统与建筑相结合(BAPV)的住宅屋顶联网型光伏系统已成为光伏产业的一个热点^[2,4]。

并网型光伏发电系统的关键技术包括光伏阵列 MPPT、逆变、并网控制、并网保护及孤岛效应检测等^[1,11-12]。

3 光伏发电技术的发展趋势

光伏发电技术研究始于 1839 年“光伏效应”的发现。1954 年, G. Pearson 等开发出光电转换效率为 6% 的单晶硅光伏电池,其为现代晶体硅光伏电池的雏形。目前,高效晶体硅光伏电池和各类薄膜光伏电池是世界光伏产业的热点之一^[13]。

在光伏发电技术开发之初的 20 世纪 70 年代,由于制造成本高,光伏发电仅用于人造卫星、海岛灯塔等场所,1976 年全球光伏电池年产量仅几百千瓦^[2]。20 世纪 80 年代以来,随着光伏电池技术的不断进步、成本不断降低(2003 年,国际市场光伏模块的售价已降至 2.5~3 美元/瓦;2008 年,美国 First Solar 公司 CdTe 薄膜光伏电池成本为 1 美元/瓦),光伏产业迅猛发展,1997 年全球光伏电池

年产量为 163.3 MW,2007 年则增至 3 733 MW^[1-2]。近年来,世界光伏产业以每年超过 30% 的速度递增,成为发展速度最快的行业之一。到 2009 年底,全球光伏发电装机容量累计达 2 300 万千瓦,当年新增装机约为 700 万千瓦^[6]。

近年来,并网光伏发电的应用比例快速增长,已成为光伏发电的主导市场。1996 年,并网光伏系统比例仅为 7.9%,而 2007 年则增加至 80% 左右。目前,光伏与建筑相结合的分布式并网系统市场份额远大于大型联网光伏电站;而大型联网光伏电站是可再生能源发电的重要发展方向,其容量可达 MW 或 GW 级,所发电能可直接并入高压电网^[7,11]。据国际能源组织(IEA)预测^[13]:2020 年世界光伏发电的发电量占总发电量的 1%,2040 年则占总发电量的 20%。

我国对光伏电池的研究始于 1958 年。20 世纪 80 年代以前,光伏电池年产量一直低于 10 kW。进入 21 世纪以来,我国光伏产业的生产能力快速扩大,2000 年光伏电池年产量猛增至 3 MW;2007 年,成为世界最大的光伏电池生产国,占世界总产量的 27.2%;2008 年产量达 2 000 MWP,仍居世界第一^[15]。2007 年,无锡尚德位居世界光伏电池生产厂产量第 3。2007 年,我国光伏发电装机容量累计达 10 万千瓦;2008 年约为 15 万千瓦;2009 年则增为 31 万千瓦。目前,我国光伏发电系统主要为离网型,今后将逐步向并网型光伏发电系统方向发展。据《可再生能源中长期规划》,到 2020 年全国建成 2 万个屋顶光伏发电项目,总容量 100 万千瓦^[2]。

综观世界光伏发电技术几十年来的发展历程,呈现出如下发展趋势^[12,13-17]:晶体硅光伏电池光电转换效率和生产技术水平持续提高;随着晶体硅光伏电池的硅片厚度不断降低,硅材料消耗不断减小,光伏电池生产成本大幅降低;CdTe、非晶硅、CIS 等薄膜光伏电池已逐步进入市场,随着薄膜光伏电池技术不断进步,薄膜光伏电池的市场份额将快速增长;多晶硅薄膜光伏电池的光电转换效率不断接近晶体硅光伏电池,成本远低于晶体硅光伏电池,发展前景广阔;叠层、量子点、多能带、热光伏、多载流子光伏电池等方兴未艾的新一代光伏电池将克服第一代硅光伏电池成本高、第二代非晶硅等薄膜光伏电池光电转换效率低的局限,且有原材料丰富、无毒等优点;光伏发电产业专用设备和仪器制造技术不断进步,光伏电池生产规模及生产能力快速增长,光伏模块价格大幅降低;并网型光伏发电的应用比例不断增加,逐步成为光伏发电的主流,光伏系统与建筑相结合的太阳能建筑逐步进入商品化生产时期。

尽管与传统发电方式相比,目前光伏发电的成本仍偏高,尚不具备大规模商业开发的条件,但以太阳能为主体的新能源将成为 21 世纪世界能源供应的主体,可以预测随着光伏产业的快速发展,光伏发电的成本将不断下降并逐步逼近传统发电成本的水平,从而成为具备竞争能力的可再生能源^[13]。

参考文献:

- [1] 赵争鸣,刘建政,孙晓瑛,等. 太阳能光伏发电及其应用[M]. 1 版. 北京:科学出版社,2005.

- [2] 王长贵,王斯成. 太阳能光伏发电实用技术[M].2版.北京:化学工业出版社,2009.
- [3] 冯焯生,主编,宋金莲,赵慧,林珊,等编著. 太阳能发电原理与应用[M].1版.北京:人民邮电出版社,2007.
- [4] 蔡宣三. 太阳能光伏发电发展现状与趋势[J]. 电力电子, 2007(2):3-6.
- [5] 殷志刚. 太阳能光伏发电材料的发展现状[J]. 可再生能源, 2008(5):17-20.
- [6] 王乾坤,方形. 世界太阳能光伏发电发展剖析[N]. 国家电网报,2010-05-27.
- [7] 尹璐,赵争鸣. 光伏并网技术与市场——现状与发展[J]. 变频器世界,2008(10):34-39.
- [8] 刘道春. 太阳能光伏发电技术及其发展前景[J]. 大众用电, 2009(3):19-20.
- [9] 庾晋. 太阳能光伏发电存在的问题及促进措施[J]. 光源与照明,2010(1):42-44.
- [10] 尹淞,郝继红. 我国太阳能光伏发电技术应用综述[J]. 电力技术,2009(3):1-8.
- [11] 尹淞. 太阳能光伏发电主要技术与进展[J]. 电力技术, 2009(10).
- [12] 李崎勇. 基于模糊控制的最大功率点跟踪三相光伏发电系统研究[D]. 南京:河海大学博士学位论文,2010.
- [13] 赵玉文,吴达成,王斯成,等. 中国光伏产业发展研究报告(2006—2007)(上)[J]. 太阳能,2008(6):11-18.
- [14] 马胜红,李斌,陈东兵,等. 加速开拓国内光伏市场的可行性分析[J]. 太阳能,2009(12).
- [15] 马胜红,李斌,陈东兵,等. 加速开拓中国国内光伏市场的必要性和紧迫性[J]. 太阳能,2009(10).
- [16] 杨萍. 薄膜太阳能电池市场发展评析[J]. 太阳能,2009(11).
- [17] 邓菊莲,崔海昱,王志刚,等. 第三代太阳能电池技术[J]. 太阳能,2008(3).

收稿日期:2010-07-19

更正

刊登在本刊2010年第3期第61页上的图4应为:

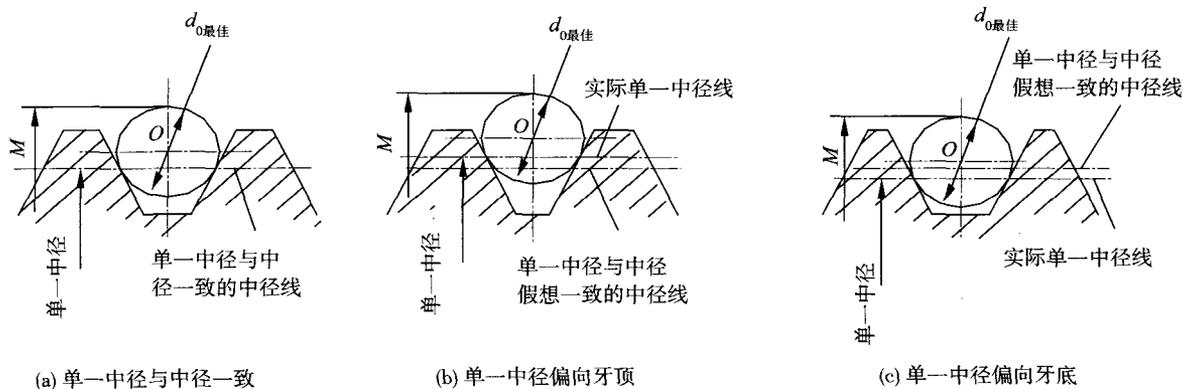


图4 三针法测量同一种螺纹单一中径三种情况的单针局部图

公式 $d_{0最佳} = \frac{P}{2\cos\alpha/2}$ 应为: $d_{0最佳} = \frac{P}{2\cos\alpha/2}$ (3)

特此更正,并向作者表示歉意。