

极大规模光伏发电在我国的发展前景展望

胡学浩¹ 周孝信² 白晓民³ 张文涛⁴

(中国电力科学研究院, 副总工程师、博士生导师、教授级高工¹; 总工程师、博士生导师、教授级高工、中国科学院院士²; 副总工程师、博士生导师、教授级高工³; 教授级高工、咨询委员⁴ 北京 100085)

〔摘要〕 未来太阳能光伏发电有望得到大量应用并在能源结构中占有重要地位。对我国 21 世纪中叶的电力需求和发电能源结构进行了预测, 对极大规模光伏发电能源基地进行了初步选择, 分析了光伏发电的运行特性和电网对极大规模光伏发电的适应性, 探讨了极大规模光伏发电电力外送方案和开发利用极大规模光伏发电的经济技术瓶颈, 最后提出了发展我国大规模光伏发电及其电力系统的步骤和建议。

〔关键词〕 极大规模 光伏发电 电力系统 前景展望

〔中图分类号〕 TK

〔文献标识码〕 A

〔文章编号〕 1000-7857(2004)11-0004-04

DEVELOPMENT PROSPECTS FOR THE VERY LARGE-SCALE PHOTOVOLTAIC POWER GENERATION AND ITS ELECTRIC POWER SYSTEMS IN CHINA

HU Xue-hao ZHOU Xiao-xin BAI Xiao-min ZHANG Wen-tao

(China Electric Power Research Institute, Beijing 100085, China)

Abstract: Solar energy photovoltaic power generation is hopeful to be applied in a large amount and possesses an important position in the future energy sources. In this paper, the electric load demand and the energy structure of power generation in the mid 21st century are forecasted, the energy bases for Very Large Scale Photovoltaic (VLS-PV) power generation are preliminarily selected, the operation characteristics of PV power generation and the adaptability of electric power grid for the VLS-PV power generation are analyzed, the schemes for transmitting large amount of PV power and the economic and technical bottlenecks for applying VLS-PV power generation are discussed. Finally, the measures and suggestions for developing VLS-PV power generation in China are presented.

Key Words: very large scale, photovoltaic power generation, electric power system, development prospects

CLC Number: TK

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2004)11-0004-04

1 引言

太阳能光伏发电是一种将太阳光辐射能通过光伏效应、经太阳能电池直接转换为电能的新型发电技术。太阳能光伏发电发出的直流电可直接利用, 也可经能量变换、控制与保护、能量储存等环节, 向负载提供交流电能, 供人们使用。目前用于发电目的的光伏系统大多为小规模、分散式独立发电系统或中小规模并网式光伏发电系统^[1]。

光伏发电的成本至今仍然很高, 电池组件售价约为 3~3.5 美元/W_p (W_p, 峰瓦), 并仅占光伏发电系统总成本的 50%~70%, 其装机费用约相当我国目前燃煤发电的 10 倍; 发电效率有待提高, 目前约为 13%~17%; 年可利用小时数(年发电量/装机容量)低, 在我国大部分地区仅为 1 400 小时左右。这些都是影响太阳能光伏发电大量应用的主要障碍。尽管如此, 由于太阳能发电技术是一种洁净的可再生能

源技术, 加上非可再生能源的逐渐枯竭和环境问题的严峻, 这项发电技术正受到人们的青睐而发展迅速。据专家估计, 国际市场上太阳能电池组件售价 2010 年可降到 2 美元/W_p, 2020 年有望降到 1 美元/W_p, 其时, 发电成本约为每度电 6~8 美分, 稍高于我国目前核能发电成本。太阳能电池的效率也在不断提高, 目前正以每 10 年 2%~3% 的速度提高, 2020 年的转换效率估计可达到 18%~20%^[2-3]。

由于未来对能源的大量需求难以仅依靠目前传统的煤炭、水力、核电等方式来解决, 以及对环境保护的要求越来越严格, 所以经过 20~30 年或更长一些时间发展, 随着太阳能发电技术水平的提高和价格下降, 大规模光伏发电有望得到大量应用并成为能源结构中占有重要地位的一种新型替代能源。

本文所讨论的极大规模光伏发电系统 (Very Large-Scale Photovoltaic Power Generation System) 是指容量范围从

收稿日期: 2004-09-15。

作者简介: 胡学浩, 男, 1946~, 北京市中国电力科学研究院(100085), 主要从事电力系统规划及运行模型、计算机程序开发、核电站数学模型及中期动态稳定程序开发、需求侧管理及节能技术、大规模电力系统的动态等值、分布式发电技术、国家中长期科学和技术发展规划战略等方面研究, E-mail: xhhu@epri.ac.cn。

10MW 至几个 GW、集中布置在面积为 0.2km² 到几十 km² 的多个太阳能电池阵列所组成的系统。

国际能源理事会 (International Energy Agency, IEA) 的光伏发电系统项目 (Task-VIII, “Very Large-Scale PV Power Generation Utilizing Desert Areas”, 1999~2002 年) 对此进行了专门的研究, 并写出了研究报告^[4]。该项目的出发点是基于未来 30~50 年甚至更长的时间, 即 21 世纪中期能源需求大大增加而环保要求更为严格的基础上, 研究如何将太阳能光伏发电由目前的小规模利用发展成未来的大规模应用。报告为未来的能源开发提供了一条全新的思路。

就目前的太阳能电池的制造技术水平而言, 按每 m² 太阳能电池组件能发出 100W (峰值) 电力计, 则 1km² 的平板式布置的太阳能电池组件阵列能发出 0.1GW 的电力; 在一个 2km×10km, 即 20km² 土地面积内布置的太阳能电池阵列 (电池面积按总土地面积的 1/2 计) 组成的发电厂将达到 1GW 的发电水平, 其发电量也是相当可观的 (按年可利用 1 400 小时计, 约相当等容量常规电源的 1/3)。

2 2050 年我国电力需求和发电能源结构估计

经初步统计, 2003 年全国能源消费总量为 16.78 亿 t 标煤。至 2003 年底, 我国发电设备总装机容量已达 391.4GW, 总发电量为 19 052 亿 kWh。其构成情况大致为: 火电装机容量 (其中燃煤约占 93%, 其余为燃油和燃天然气) 为 289.8GW (占总量 74.0%)、发电量为 15 790 亿 kWh (占总量 82.9%); 水电装机容量为 94.9GW (占总量 24.2%)、发电量为 2 813 亿 kWh (占总量 14.8%); 核电装机容量为 6.2GW (占总量 1.58%)、发电量为 438 亿 kWh (占总量 2.3%)^[5]。可见, 目前的发电能源结构基本上以煤电和水电为主。

据估计, 2020 年全国能源消费总量为 25~33 亿 t 标煤 (均值为 29 亿 t 标煤)。据专家预测^[6], 2020 年电力供应的发电装机容量组成情况大致如下: 煤电为 563GW (占总量 58.6%); 水电为 260GW (占总量 27.1%); 核电为 40GW (占总量 4.2%)。可见, 能源过于依赖煤炭的状况有所改善, 但煤电装机容量 58.6% 的比例仍然较大。

据原能源部“中国能源战略研究 (2000~2050 年)”^[7] 的预测数据, 2050 年能源需求总量约为 46 亿 t 标煤, 为 2003 年的 2.74 倍。其中对年需电量和发电装机容量的预测, 2050 年的需电量为 116 000 亿 kWh, 发电装机容量为 2 300GW。若按另一种更为粗略的算法估计, 即按 2050 年时我国人口达 16 亿、人均装机 1.5kW 计 (2002 年底我国人均装机容量为 0.278kW/人, 美国为 3.06kW/人), 则需装机总量 2 400GW, 该数据与上述文献^[7] 中的预测数相当接近。因此, 进一步分析 2050 年发电能源结构可按总装机容量 2 400GW 考虑。若煤电比例从 2020 年的 58.6% 降到 40%, 则装机容量为 1 000GW; 水电按最大可能开发容量考虑, 则装机容量约为 360GW; 核电、气电分别按占总容量 10% 和 5% 计, 则装机容量分别为 240GW 和 120GW。对余下占总量 30% 的 720GW 发电容量的缺口可有不同的解决方案, 本文设想为依靠发展可再生能源发电解决, 详见表 1。

按资源和技术发展前景预测, 到 2050 年可大规模利用的非水能的可再生发电能源主要为风能和太阳能。我国风电资源丰富, 据测算, 陆地上可开发的风电资源近 250GW, 加上近海的风电资源, 我国可开发风电资源总量估计在 1 000GW

表 1 2050 年发电装机结构估计

种类	装机容量 (GW)	占总量百分比 (%)
煤电	960	40
水电	360	15
核电	240	10
气电	120	5
可再生能源发电	720	30
总计	2 400	100

以上。然而风电机组的年可利用小时数在 2 190~3 500 小时之间, 约为常规火电机组的 50%。因此, 即使我国风电资源的 1/2 被开发用于发电, 即开发 500GW, 也只相当于常规发电装机的 250GW。所欠缺的 720GW 装机还有 470GW 有待补充, 这只有依靠发展太阳能发电解决。470GW 电力按我国发电设备多年平均发电小时数 4 457 小时^[8] 折合, 发电量为 2 094.8TWh。

由于太阳能光伏发电的年可利用小时约为 1 400 小时, 对应于上述 2 094.8TWh 的发电量, 约需光伏发电装机容量为 1 500GW。如其中 2/3, 即 1 000GW 可考虑采用设置在建筑物的“建筑一体化光伏发电” (屋顶或墙壁) 等靠近用电负荷处的光伏发电的方式, 则余下的 1/3, 即 500GW, 可考虑为处于沙漠等地的大规模光伏发电的方式。

3 极大规模光伏发电能源基地选择及光伏发电运行特性分析

3.1 我国沙漠及沙漠化土地资源概况 我国沙漠和沙漠化土地的分布范围相当广阔, 总面积约 85 万 km², 断续展布于我国北部的干旱、半干旱地区。其中沙漠总面积约 52 万 km², 主要由塔克拉玛干、古尔班通古特、巴丹吉林、腾格里、乌兰布和、库布其等大沙漠组成。另外, 沙漠化土地约为 17.6 万 km², 潜在沙漠化土地已达 15.8 万 km², 两者总面积达 33.4 万 km²。

3.2 建立沙漠能源基地的设想 鉴于采用大规模光伏发电技术需占用较大土地面积, 且需要尽可能长的日照时间, 光伏发电站可考虑优先布置在我国沙漠、沙漠化土地的荒漠地区。如按 20km² 可布置 1GW 光伏发电装机容量计算, 100GW 光电仅需 2 000km² 土地, 我国 85 万 km² 的沙漠面积足以满足我国 2050 年及以后相当长时间对发电能源的需求。

我国沙漠及沙漠化土地主要位于我国北部的内蒙古和西北的新疆、甘肃、青海等地区, 上述地区均可考虑作为我国未来的大规模太阳能光伏发电的能源基地。其中内蒙古地区的沙漠及沙漠化土地面积虽然相对较小, 但也足以满足上 10 亿 kW 光伏发电的土地需要, 尤其是一些被称为戈壁滩的荒漠地区特别适宜布置大规模光伏发电。此外, 内蒙古地区离负荷中心和电力系统主网架较近, 有利于大规模光伏电力的外送, 因此, 宜将内蒙古地区的戈壁滩作为太阳能光伏发电能源基地的首选地点。

3.3 大规模太阳能光伏发电电站的选点及光伏发电特性分析 美国国家航空和宇航局 (NASA) 基于卫星测得的地表太阳能数据 (SSE)^[9] 覆盖的地区范围很广 (地球上的任意地点), 其数据包括太阳辐射能、辐射功率、云和风的资料等, 是以所指定地点为中心向东西南北各 0.5 经纬度的方形区域内 10 年或多年统计值。本文根据 NASA 数据, 初选以下几个地理位置作为光伏发电电站的候选点: 内蒙 A (北纬 42°, 东经 111°), 位于戈壁滩, 包头市与二连浩特市中间,

在四子王旗附近,距离超高压主电网约 200km,距离华北电网负荷中心约 400km;内蒙 B(北纬 40°,东经 101°),位于巴丹吉林沙漠,甘肃张掖市北约 100km,酒泉东约 150km;新疆 A(北纬 45°,东经 87°),位于古尔班通古特沙漠,乌鲁木齐与克拉玛依市之间。

分析所提供的地表太阳能数据,可获得以下一些信息。

(1)在地表,无论是光照强度还是光照能量,按季节论,最大值在夏季 6、7 月份,最小值在冬季 12 月份;按每天论,最大值在中午 12 时 30 分左右。(2)夏季 6、7 月份的日照较长,有 14~15 小时,从早上 6 时到晚上 20 时;但冬季日照较短只有 8~9 小时,从早上 8 时到下午 16 时。(3)内蒙 A 与新疆 A 的经度差别为 24°,因此两地时差约为 1.5 小时。

本文选用 6 月(光照强度全年最大值的月份)和 12 月(光照强度全年最小值的月份)到达地表面太阳光辐射能随时间的全天变化数据,绘制出这些地区地表太阳能日变化曲线(见图 1、图 2)。

以内蒙 A 的数据为例,其地表太阳能 6 月和 12 月日变化曲线见图 3。夏季到达地表面的太阳光辐射能在正午时的最大值为 0.73kW/m² 左右,如效率按 15% 的平均值考虑,则太阳能电池的发电峰值为 0.1093kW/m²,即每 m² 的发电峰值仍可按 100W 考虑。冬季到达地表面的太阳光辐射能在正午时的最大值为全年最小,只有 0.23kW/m² 左右,如效率也按 15% 的平均值考虑,则太阳能电池的发电峰值为

0.0345kW/m²,即每 m² 的发电峰值只有 34.5W。

4 2050 年我国电网对极大规模光伏发电的适应性分析

若优先考虑将内蒙古的沙漠地区作为极大规模太阳能光伏发电基地,则电力外送的主要方向应为我西北、华北地区,并进而包括华中和华东地区。

2050 年上述各地区电网的装机容量按下表 2 估计^[7],其中各地区夏季最大负荷按各地区的装机容量的 85% 计。

表 2 2050 年 4 个地区的装机容量和夏季最大负荷 (GW)

地区	装机容量	夏季最大负荷
西北	209	178
华北	289	245
华中	336	286
华东	456	388
4 个区域总加	1 290	1 097

参考目前各地区的夏季日典型负荷曲线推算出 2050 年各地区的夏季日负荷曲线,再考虑该 4 个地区联网运行,将 4 条负荷曲线合并为 4 个地区日负荷曲线总加图。2050 年时各地区冬季的最大负荷按目前的夏季及冬季日负荷曲线中最大负荷的比例来推算,再参照目前各地区的冬季日典型负荷曲线形状来绘制,同样可画出各地区的冬季日负荷曲线及 4 个地区的日负荷曲线总加图。考虑该 4 个地区电网装有 10% 的核电,即地区电网总装机容量 1 289GW 中的 10% (128.9GW) 为核电,并以基荷方式发电。光伏发电装机容量分别按 100GW、300GW 和 500GW 几种情况来取值,并考虑电力全部外送的情况,研究在不同情况下对区域负荷曲线的影响,以观察该地区的负荷是否有能力消纳太阳

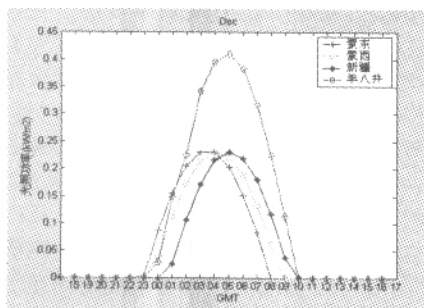


图 1 6 月份地表太阳能日变化曲线

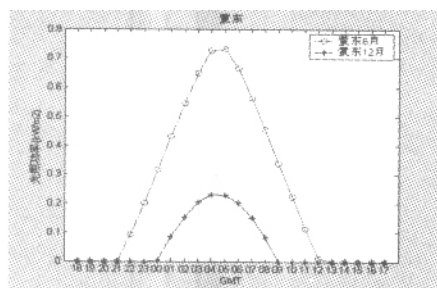


图 2 12 月份地表太阳能日变化曲线

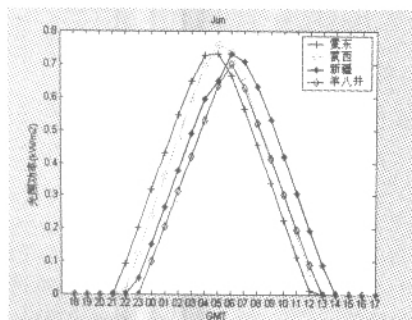


图 3 内蒙 A 地表太阳能 6 月和 12 月日变化曲线比较

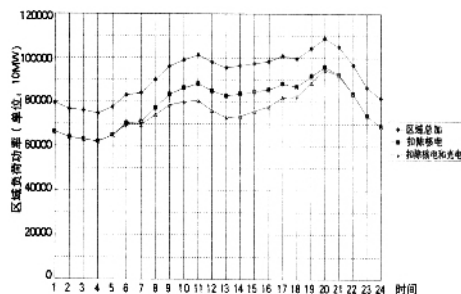


图 4 2050 年夏季光电外送 100GW

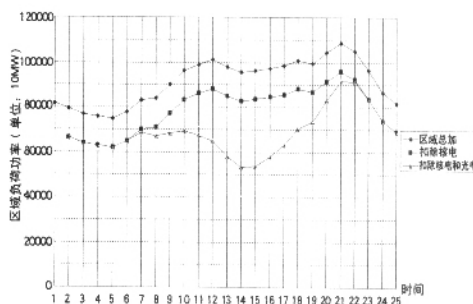


图 5 2050 年夏季光电外送 300GW

能光伏发电的电力,具体参见图 4、图 5。

由图 4、图 5 可以看出:(1)太阳能光伏发电是在白天发电,大多时间内它和电力负荷有较好的相重特性;(2)一般负荷早高峰出现在上午 9~11 时,太阳能光伏发电能较好地为其提供相当数量的电力和电量,但负荷晚高峰往往出现

在晚上 7~9 时,此时太阳能光伏发电的能力已大大减弱,甚至全无,故难以解决负荷的晚高峰问题;(3)建于新疆荒漠地区的大规模光伏发电电站所发的电力从时差角度看,可以部分缓解上述地区负荷的晚高峰问题,但终因距离太远而难以解决输电问题;(4)在光电外送 300GW 的情况下,受电地区负荷曲线的峰谷差已达 42%,接近电网常规发电机的调节极限,因此单从电网负荷承受能力的角度考虑,大规模太阳能光伏发电电力的远距离、大容量的外送,也会有一定的限度,即此时电网大致能消纳 300GW 的内蒙古太阳能光伏发电基地的外送电力,但不能满足消纳 500GW 电力的要求;(5)如要增加电网消纳光电的能力,则必须考虑采用储能手段,或进一步扩大联网送电范围。

我国西北地区黄河上游的一些水电站(从龙羊峡至青铜峡),包括已建的、在建的或将建的总计有 10 多座(规划在 2020 年左右总装机容量将达 14GW),利用龙羊峡(247 亿 m^3 库容)、刘家峡(57 亿 m^3 库容)、大柳树(174 亿 m^3 库容)等水电站水库的调节能力实现日调节和年调节,作为大规模光伏发电系统的储能手段,不失为一种优选的方案。但这些水库只能配合上千万 kW 级的太阳能发电,为了进一步满足更大容量太阳能发电的储能需要,可以再建设相当数量的抽水蓄能电站与其配合。目前,对我国西北部地区建设抽水蓄能电站的可行性尚未进行详细的研究,能建设多大容量的抽水蓄能电站群以满足多少太阳能发电的储能需要尚不清楚,但在考虑地区水电站水库、抽水蓄能等储能手段及与其它地区电网联网后,该地区接受光电能力还可提高。

据国外有关资料报道,目前 1 个电网的发电容量中的光伏发电容量比例一般不宜超过 10%~15%^[10],否则难以运行。但如采用各种储能手段(集中式常规水电和抽水蓄能电站、用户侧分散式储能、电力制氢作为替代燃料等),则此比例可进一步提高,但需对各种储能方法进行深入的研究。

5 极大规模光电外送方案设想

若采用常规输电技术,可考虑采用 $\pm 800\text{kV}$ 的高压直流输电(目前世界水平为 $\pm 600\text{kV}$),主送上述 4 个区域电网。若设想每回线的输送电流为 5 000A(目前世界水平为 3 000A),则 1 回 $\pm 800\text{kV}$ 高压直流线可送 8GW,送电 300GW 需用数量高达 38 回的 $\pm 800\text{kV}$ 高压直流输电线路。如用高压交流输电技术,采用西北地区即将建成的 750kV 电压等级的输电线路,再利用串联电容补偿技术,则每回线能送 4GW,较适宜于供给西北地区的负荷。若采用未来新型高温超导输电技术,设想每回线可送 10GW~20GW,送电 300GW 亦需用 30~15 回线。可见大规模利用内蒙古光伏电力的最大技术障碍是超大规模的电力输送。如考虑尽量多地就地消纳光伏发电的电力和电量,采取就地建设高耗能工业或用于电解制氢并经压缩后转运等,不但可减少外送电力数量,还可使外送电力随时间变化的曲线趋于平缓。

6 开发利用极大规模光伏发电的经济技术瓶颈

目前光伏发电的大规模应用尚存在经济、技术上的障碍和瓶颈,主要为如何解决大幅度降低造价和每度电成本以及远距离、大容量电力外送及大规模太阳能储存的难题。此外,还需解决光伏发电能量转换效率的提高、大功率电力电子及控制技术、大面积太阳能电站群的运行维护、大规模太阳能电

力的调度和控制保护、大规模制氢和储运等技术瓶颈。

7 发展我国大规模光伏发电的步骤

为使大规模光伏发电在我国尽早得到应用,国家应立即开展在我国北方内蒙古沙漠地区建设大规模光伏发电的可行性研究。在上述研究的基础上,在该地区建设 10~100MW 级的大规模光伏发电示范电站,并用 110kV 及以上等级交流输电线路,将其电力输往 100~200km 外的内蒙古主网,以便了解大规模太阳能光伏发电的运行特性以及与电网调度、电力负荷等的配合问题,该项目争取在 2015~2020 年内完成。在 2030 年左右,在我国北方沙漠地区建设 GW 级的大规模光伏发电电站群,并用超高压交流或直流输电线路,将电力输往 500km 外的华北网。在 2040 年左右,在我国北方沙漠地区建设 10GW 等级的极大规模光伏发电电站群,并用超高压交流或 $\pm 800\text{kV}$ 直流输电线路或用高温超导输电将其电力输往 500km 外的主网。在 2050 年左右,在我国北方沙漠地区建设 100GW 级的极大规模光伏发电电站群,并用 $\pm 800\text{kV}$ 直流输电线路或用高温超导输电的国家主干网将其电力输往几百至几千 km 外的电网。

8 结论和建议

(1)太阳能光伏发电是一种很有发展前途的新能源技术。预计未来二三十年或更长的时间对能源的大量需求难以完全依靠常规的能源来解决,且随着太阳能光伏发电成本的下降和效率的提高,太阳能光伏发电有望在未来的能源结构中占有重要地位。研究和探讨极大规模光伏发电(10GW~100GW 级发电容量)在我国应用的可行性是很有必要的。

(2)按 2050 年全国能源需求总量 46 亿 t 标煤及发电装机容量 2 400GW 估计(按常规发电能源结构计),考虑到各种常规能源可能提供的数量,约占总量 30%,即 720GW 的发电装机容量需依靠非水能的可再生能源提供。若考虑风电开发解决 250GW,则需光伏发电装机容量约 1 500GW(合常规发电容量 470GW),其中 1/3,即 500GW 可考虑为处于沙漠等地的大规模光伏发电的方式。

(3)鉴于大规模光伏发电所占面积较大,且需要尽可能长的日照,大规模光伏发电电站群可考虑优先布置在我国沙漠及沙漠化土地地区。内蒙古地区的戈壁滩可作为大规模太阳能光伏发电基地的首选地点。

在内蒙古地区的戈壁滩开发大规模太阳能光伏发电的潜力巨大,在 2 000 km^2 的戈壁滩面积上可布置 100GW (1 亿 kW) 的光电装机。消纳其电力的方式有二。其一为电力外送,主送方向为西北、华北、华中和华东地区的联合运行电网。上述地区承受内蒙古太阳能光伏发电的大规模电力外送能力大致为 300GW。如考虑地区水电站水库、抽水蓄能等储能手段,并考虑该地区与其它地区电网联网,可将部分电力转送,则接受光电能力还可增加。其二为就地消纳光伏发电的电力和电量,如采取就地建设高耗能工业或用于电解制氢并经压缩后转运等。

(4)建议从现在开始就大力研究解决未来光伏发电大规模应用的经济、技术上的瓶颈,以便大幅度降低造价和每度电成本并解决远距离、大容量电力外送及大规模电能储存等难题。在研究的基础上建设大规模的光伏发电示范电站,并将光电送往负荷中心。

对银河系中心超大质量黑洞候选体 Sgr A* 的 VLBI 观测研究

沈志强

(中国科学院上海天文台, 研究员、博士生导师

上海 200030)

〔摘要〕 位于银河系中央的极其致密的非热射电源 Sagittarius A* (Sgr A*), 被公认为是最佳的超大质量黑洞候选体, 其质量约为 400 万个太阳质量。甚长基线干涉测量 (VLBI) 技术以其独有的高空间分辨率为我们提供了唯一可以探讨 Sgr A* 位于几个史瓦西 (Schwarzschild) 半径区域内天体物理性质的手段。介绍了对 Sgr A* 的 VLBI 研究现状和最新进展, 着重论述了毫米波和亚毫米波 VLBI 观测对研究 Sgr A* 的辐射区域的真实形状和大小, 以及探索其结构随时间变化的重要性。Sgr A* 无疑是检验广义相对论效应的亚毫米波 VLBI 实验的最佳目标。

〔关键词〕 甚长基线干涉测量 (VLBI) 银河系中心 超大质量黑洞 毫米波

〔中图分类号〕 P14 〔文献标识码〕 A 〔文章编号〕 1000-7857(2004)11-0008-04

VLBI OBSERVATIONS OF SGR A*: A SUPERMASSIVE BLACK HOLE CANDIDATE AT THE GALACTIC CENTRE

SHEN Zhi-qiang

(Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China)

Abstract: There is compelling evidence that the extremely compact non-thermal radio source at the center of our Milky Way Galaxy, Sagittarius A* (Sgr A*), is a best known supermassive black hole candidate with a dark mass of 4 million solar masses. Very Long Baseline Interferometry (VLBI) technique, with its high-resolution imaging capability, is proved to be the most powerful tool for probing the region of a few Schwarzschild radii of Sgr A*. This paper updates the progress in the VLBI observations of Sgr A*, with the emphasis on the importance of the millimeter and sub-millimeter VLBI observations in the detection of the intrinsic structure of Sgr A* and in our ongoing effort to search for the structural variability. There is no doubt that Sgr A* would be the most important target for the future sub-millimeter VLBI experiment to test the General Relativity.

Key Words: Very Long Baseline Interferometry (VLBI), Galactic Centre, supermassive black hole, millimeter wave

CLC Number: P14 **Document Code:** A **Article ID:** 1000-7857(2004)11-0008-04

1 银河系中心

Sagittarius A* (Sgr A*) 是位于我们银河系中央的一颗极其致密的非热射电源, 在其被观测发现之前就被理论天体物理学家推测为黑洞^[1]。介于银河系中心区域和地球上观测

者之间的尘埃和气体的消光作用, 使得 Sgr A* 的光学辐射根本无法被探测到, 而其致密的射电结构使得只有在高分辨率的射电干涉观测成为可能之后, 人们才在 1974 年将其发现, 并认为 Sgr A* 实际上定义了银河系的中心^[2]。最近的几年中, 借助于新的空间 X 射线望远镜和地面的大型观测

收稿日期: 2004-08-19。

作者简介: 沈志强, 男, 1965~, 研究员, 中国科学院上海天文台 (200030), 主要研究方向为射电天文学中的甚长基线干涉测量 (VLBI) 技术及其在天体物理学中的应用, E-mail: zshen@shao.ac.cn。

参考文献 (References)

- [1] 孔力. 电工高新技术丛书第 2 分册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.155~162
- [2] Mohammad Shahidehpour, Fred Schwartz. Don't Let the Sun Go Down on PV[J]. IEEE Power & Energy, 2004, 2(3): 40~48
- [3] Sandia National Laboratory. The U.S. Photovoltaic Industry Roadmap[C]. <http://www.sandia.gov/pv>, 2001
- [4] Kazuhiko Kato, et al. Energy from the Desert[M]. James & James (Science Publishers) Ltd., Camden High Street, London, NW1 0JH, UK, 2003, 8~12
- [5] 中国电力企业联合会统计信息部. 2003 年电力工业统计资料

提要[R], 2004

- [6] 吴敬儒, 邱言文. 确保国内生产总值翻两番的 2001~2020 年电力工业发展研究[J]. 电网技术, 2003, 27(4): 1~6
- [7] 中国能源战略研究课题组. 中国能源战略研究 (2000~2050 年) [M]. 北京: 中国电力出版社, 1997
- [8] 中国电力企业联合会统计信息部. 2002 年电力工业统计资料提要[R], 2003
- [9] <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>
- [10] Edward S. Cassedy. 可持续能源的前景[M]. 段雷等译. 北京: 清华大学出版社, 2002, 74~75

(责任编辑 肖庆山)