

2015~2022 年中国太阳能热发电发展情景分析及预测

■ 王志峰¹ 杜凤丽^{2,3*}

(1. 中国科学院电工研究所; 2. 国家太阳能光热产业技术创新战略联盟;
3. 中国可再生能源学会太阳能热发电专业委员会)

摘要: 对我国太阳能热发电市场的发展情景进行了分析。首先, 分析了 2015~2021 年我国太阳能热发电市场的动态, 指出 2019 年是太阳能热发电产业发展的低迷期, 并对产生这种现象的原因进行了分析; 其次, 对 2020 年我国太阳能热发电产业可能出现的主要事件进行了预测; 然后, 分析了 2022 年我国太阳能热发电产业将大规模起步的原因; 最后, 分析了影响我国太阳能热发电产业发展的几大因素。

关键词: 能源; 太阳能热发电; 发展情景; 预测

0 引言

2016 年, 在国家发展改革委和国家能源局的共同努力下, 我国启动了首批 20 个太阳能热发电示范项目, 总规模达 1349 MW, 标志着我国太阳能热发电的商业化进程开始起步。这 20 个示范项目中 3 个项目已于 2018 年年底建成投产, 总装机量达 200 MW, 占整批示范规模的 14.8%。这 3 个示范项目分别为: 青海中广核德令哈 50 MW 槽式太阳能热发电站, 于 2018 年 10 月 10 日投运; 首航节能敦煌 100 MW 塔式太阳能热发电站, 于 2018 年 12 月 28 日并网发电; 青海中控太阳能德令哈 50 MW 塔式太阳能热发电站, 于 2018 年 12 月 30 日并网发电。另外, 还有 5 个示范项目正加紧建设, 计划最晚于 2020 年 6 月底前并网, 总装机量为 300 MW, 占整批示范规模的 22.2%。这 5 个示范项目分别为: 中国能建哈密 50 MW 塔式太阳能热发电站、中国电建共和 50 MW 塔式太阳能热发电站、内

蒙古乌拉特中旗 100 MW 槽式太阳能热发电站、兰州大成敦煌 50 MW 熔盐线性菲涅尔式太阳能热发电站、玉门鑫能 50 MW 二次聚光塔式太阳能热发电站。

除太阳能热发电示范项目外, 在国家能源局公布的多能互补集成优化示范项目中, 鲁能海西州格尔木 50 MW 塔式熔盐太阳能热发电项目已于 2019 年 9 月底并网发电。

在与其他国家合作的太阳能热发电项目方面, 2018 年上海电气与 ACWA Power 公司合作, 成功中标迪拜水电局 (DEWA) “一塔三槽” 700 MW 太阳能热发电项目, 上海电气为该项目的联合投标方和工程总承包方 (EPC)。

通过首批太阳能热发电示范项目的建设, 我国建立了太阳能热发电全产业链。根据国家太阳能光热产业技术创新战略联盟发布的《2018 年度太阳能热发电及采暖技术产业蓝皮书》^[1] 的统计数据, 在我国与太阳能热发电产业相关的行业数量如图 1 所

收稿日期: 2019-10-09

通信作者: 杜凤丽 (1980—), 女, 硕士, 主要从事太阳能热发电政策和发展战略方面的研究。du.fengli@mail.ice.ac.cn

示, 太阳能热发电产业关键部件、材料的年产能数据如表 1 所示。

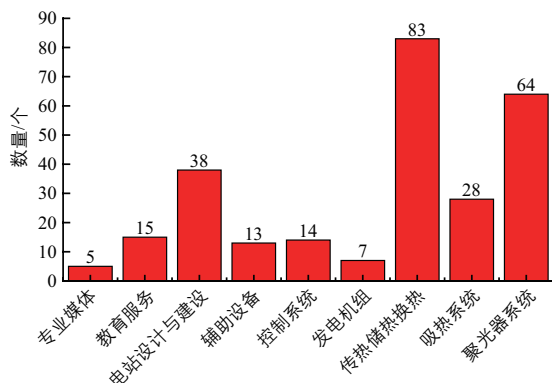


图 1 我国太阳能热发电产业相关行业的数量情况^[1]

表 1 我国太阳能热发电产业关键部件、材料的年产能数据^[1]

类别	年产能
槽式真空集热管	可装备 5 GW 电站 (不带储热)
槽式集热器	可装备 2 GW 电站 (不带储热)
塔式定日镜	可装备 1 GW 电站 (不带储热)
菲涅尔聚光器	可装备 0.2 GW 电站 (不带储热)
熔盐	16 万 t
导热油	110 万 t
聚光器跟踪减速器	34 万台 (可装备约 1.7 GW 电站)
高温集热镀膜钢管	120 km
超白玻璃	8000 万 m ² /年, 可装备约 10 GW 电站
各种反射镜	可装备 2 GW 电站 (不带储热)
控制器	2 万套

由图 1 和表 1 可知, 我国的太阳能产业链已经覆盖了太阳能热发电的多个环节, 即我国太阳能热发电的产业链已经形成, 但其中的多个行业类别仍是其他国家占主导地位。例如熔盐材料方面, 智利 SQM 公司为全球主要供应商; 熔盐吸热器的供应商主要是比利时的 CMI 公司; 电站系统设计方面也多以西西班牙企业为主。

1 2015~2021 年我国太阳能热发电市场动态

与所有能源一样, 随着政策的变化, 我国太阳能热发电市场的发展也经历了起伏。在首批

太阳能热发电示范项目中, 只有 3 个示范项目在 2018 年底投产, 而对于逾期投产的示范项目将实施何种电价政策一直悬而未决; 至于国家对太阳能热发电项目的后续政策也无明显迹象。于是, 因示范项目培养起来的建设团队处于无事可干的状态, 整个太阳能热发电产业也处于“沉寂”状态。行业内参加太阳能热发电相关会议的人数较前两年也有所减少, 因此, 我国太阳能热发电产业在经历了 2016 年的热潮后于 2019 年陷入了发展的低迷期。

2020~2021 年期间, 国家首批太阳能热发电示范项目将基本划上句点, 面临“十三五”结束和“十四五”即将开局的节点, 在多方因素驱动下, 关于太阳能热发电的相关规划、政策将逐步明晰; 如果相关激励政策出台, 2022 年将是太阳能热发电大规模产业化发展的起始年。

2015~2021 年我国太阳能热发电市场的动态情况为:

- 1) 2015 年, 国家能源局启动首批太阳能热发电示范项目的申报工作, 市场进入准备阶段;
- 2) 2016 年, 国家发展改革委和国家能源局分别公布了示范项目名单和电价, 市场开始启动;
- 3) 2018 年, 少数示范项目建成, 并不断进行调试;
- 4) 2019 年, 是我国太阳能热发电产业发展最为困难的一年, 主要原因在于针对延期投产项目及未来项目的政策尚不明朗;
- 5) 2020 年, 太阳能热发电技术基本成熟, 对于成本下降空间和降低成本的方式较为了解;
- 6) 2021 年, 产业内部将不断降低成本, 外部将多方争取政策方面的支持, 产业蓄势待发;
- 7) 2022 年, 将是我国太阳能热发电大规模产业化发展的起始年。

2 2019 年是我国太阳能热发电发展最困难时期的原因分析

- 1) 只有极小部分示范项目建成 (3/20), 导致

社会各层面对太阳能热发电技术产生了质疑；

2) 关于延期投产示范项目电价的政策未出台，造成未开工项目融资困难；

3) 由于建成的项目仍处于调试期，尚无电站连续运行 12 个月后的发电量数据，导致出台第二批示范项目电价政策的依据不足；

4) 由于国家未公布明确的电价机制，金融机构、央企、国有企业的投资受到较大约束，整个太阳能热发电产业缺少现金流；

5) 已建成项目的工程建设方在无新开工项目时仍需维持昂贵的人员费用，压力巨大；

6) 央企投资的大部分项目还未建成，比如，中国能建哈密 50 MW 塔式太阳能热发电站、中国电建共和 50 MW 塔式太阳能热发电站、内蒙古乌拉特中旗 100 MW 槽式太阳能热发电站等项目，这些项目预计在 2019 年底才能建成，导致 2019 年国家投资的项目整体发声不足。

上述原因导致 2019 年成为我国太阳能热发电产业自国家启动首批太阳能热发电示范项目并给予标杆电价以来发展最困难，也是最困惑的一年。

3 2020 年我国太阳能热发电产业的主要事件预测

2020 年是“十三五”结束，“十四五”开始的年份。在这一年，我国已投产及处于调试的首批太阳能热发电项目与多能互补项目将达到 550 MW。根据国际上太阳能热发电站的投产经验及对各示范项目业主的调研，截至 2020 年底，这些电站预计将全部可以达到设计发电量。

首批多能互补集成优化示范项目中的鲁能海西州格尔木 50 MW 塔式熔盐太阳能热发电项目将在 2020 年显示出调峰功能，这将引起电力行业很大的兴趣，青海附近也将兴起一批太阳能热发电站的建设，为青海成为可再生能源电源基地提供支撑。

以风电和光伏发电为主的新能源电力已成为

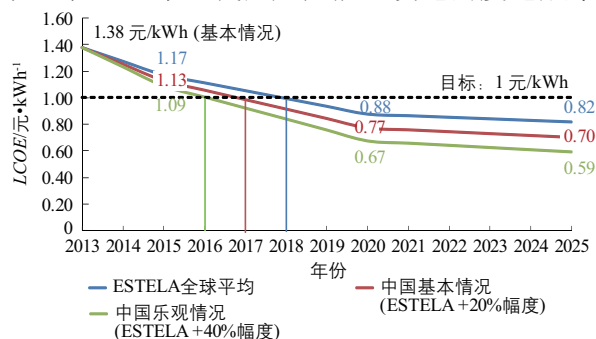
我国第二大电源。然而，高比例的可再生能源电力接入电网给能源转型中的电力系统带来了重大技术挑战，面临的问题包括风能、太阳能资源的波动性和随机性，以及风电、光伏发电设备的低抗扰性和弱支撑性，因此，风电、光伏发电的高效消纳和安全运行等将是我国新能源电力系统长期面临的重大挑战^[3]。而太阳能热发电是集发电和储能为一身的可再生能源发电方式，其具有电力输出稳定、可靠、调节灵活的特性，可提供可靠的电力保障，即 100% 参与电力平衡，不需要额外配备储能设备，能够解决目前风电和光伏发电并网面临的消纳与安全运行问题。

4 2022 年将成为我国太阳能热发电大规模产业化发展的起步年份的基本判断

1) 经过 2 年左右的性能爬坡期及经验积累，预计到 2022 年，并网的太阳能热发电示范项目的年发电量将达到设计值，装备和运维技术也将逐步成熟，可为后续电价的出台提供基本依据，为民众和决策者提供信心；

2) 已投运的电站全天候 24 h 连续发电的优势，让人们从实际应用中看到了带有储能功能的太阳能热发电站的运行优势。

3) 度电成本大幅降低。国家太阳能光热产业技术创新战略联盟于 2013 年组织编制的《中国太阳能热发电产业政策研究报告》对太阳能热发电电价的预测与当前我国太阳能热发电产业的实际发展情况吻合度很高。据此报告预测，到 2021 年，我国太阳能热发电的度电成本



注：ESTELA 是指欧洲太阳能热发电协会

图 2 太阳能热发电的 LCOE 发展路线图^[2]

(LCOE) 在 0.65 ~ 0.76 元 / kWh 之间^[2]。度电成本的降低将极大促进我国太阳能热发电产业商业化的开展。

4) 强大的“国家队”集体发声。2021 年, 国家投资的太阳能热发电项目将集体达标, 届时中广核、中国能建、中国电建、中船重工等央企项目运行, 会带动更高地启动下一批太阳能热发电项目的呼声。首航节能和中控太阳能的热电站运行达标后可能会出售给央企, 届时电站业主的主流将全部变为实力和话语权强大的国企、央企。

5) 随着光伏发电的装机量猛增, 预计其每年的装机量都会超过 43 GW, 电网的净负荷曲线, 即“鸭型曲线”(实际电力需求与供给量之间的曲线变化, 反映了峰值需求与可再生能源生产之间的时间不平衡) 的曲率会日益明显, 需要缩小供需差距, 而带有储能功能的太阳能热发电站可以改善“鸭型曲线”。目前, 摩洛哥和阿联酋已成功实施了装机规模为 500 ~ 950 MW 的“光伏发电 + 太阳能热发电”混合电站, 二者都充分发挥了各自的优势。

5 影响我国太阳能热发电产业发展的几大因素

影响我国太阳能热发电产业发展的因素主要包括: 国家宏观政策、能源生产与消费革命、其他可再生能源电力的联合发展、与自身产业链建设的关系、能源的梯级利用带来的效率和成本优化。

5.1 国家宏观政策

公用事业规模的光伏发电成本极其低廉, 仅次于陆上风电。光伏发电的度电成本上限为 43 ~ 53 美元 / MWh^[4]。太阳能发电增长了 3000 万 t 油当量, 仅低于风电 (3200 万 t 油当量), 并贡献了超过 40% 的可再生能源增长^[5]。图 3 为 2018 年全球各类能源的消费情况, 从图中可看出, 在全球范围内, 亚太地区的可再生能源发展最快, 其中中国的贡献最大。我国在宏观政策层面对可

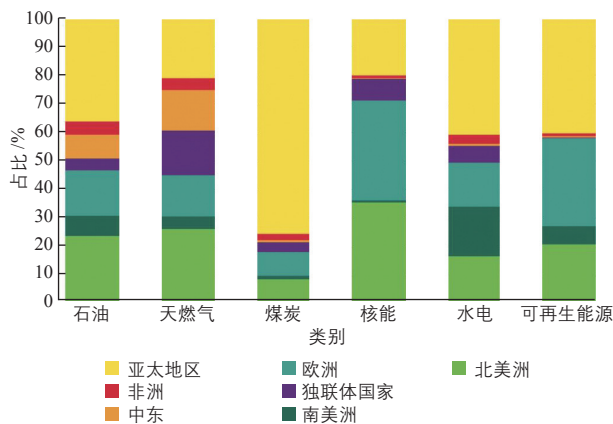


图 3 2018 年全球不同地区的能源消费情况^[5]

再生能源的支持力度是不言而喻的。

5.2 能源生产与消费革命

自 2015 年起, 可再生能源的新增装机量首次超过化石能源的新增装机量, 且可再生能源装机量超过了所有化石能源发电的装机量总和, 全球电力系统发生了结构性转变。由于太阳能资源的广泛性, 其在我国电力结构中具有举足轻重的地位。图 4 为我国电力结构中各种能源贡献的现状和发展态势, 从图中可知, 未来太阳能的贡献最大。

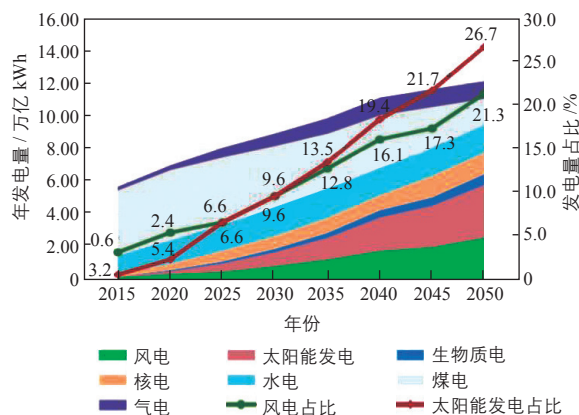


图 4 不同能源形式的发电量情况及预测^[6]

5.3 其他可再生能源电力的联合发展

太阳能热发电系统由于带有储能装置, 因此其可与风电和光伏发电组合, 以增加可再生能源电力的上网比例。

根据中国电力科学研究院新能源研究所的研究成果, 风电和光伏发电与太阳能热发电相结合

的发电方式,可显著降低电站的弃风、弃光率。表2为电力系统中弃风、弃光率,以及太阳能热发电站与风电和光伏发电结合后的弃风、弃光情况。从表中的数据可以看出,当400 MW的风电装机量与200 MW的光伏发电装机量及50 MW的太阳能热发电装机量相配合时,其外送通道容量占比较单一的风电或光伏电站有大幅提高,弃风、弃光率也有大幅下降。

表2 太阳能热发电站与风电和光伏发电结合后的弃风、弃光情况^[7]

风电装机容量/MW	光伏发电装机容量/MW	太阳能热发电装机容量/MW	外送通道容量占比/%	弃风、弃光率/%
400	—	—	160	25.8
—	200	—	50	26.1
400	200	—	240	11.9
400	200	50	260	7.3

注:外送通道容量占比为配套输电线路容量占多能互补电站装机量的比例

目前,全球已实施和正在实施的“光伏发电+太阳能热发电”项目中,摩洛哥总装机量为580 MW的Noor Ouarzazate项目为全球最大。该项目的第1期Noor 1槽式太阳能热发电站(160 MW)已于2016年开始运行,第2期Noor 2槽式太阳能热发电站(200 MW)及第3期Noor 3的塔式太阳能热发电站(150 MW)先后于2018年并网。

摩洛哥Noor Midelt“光伏发电+太阳能热发电”项目的第1期总装机量为825 MW,其中包含300 MW的太阳能热发电及525 MW的光伏发电。Noor Midelt项目的第2期也同样将采用此发电形式,并已于2019年7月9日发布了招标公告,Noor Midelt项目两期的总装机量高达1030 MW。

迪拜太阳能主题公园项目由迪拜水电局(DEWA)实施,总投资达33亿美元。该项目的电量结构采用“光伏发电+太阳能热发电”方案,总装机量为1100 MW,其中包括1座100 MW

的塔式太阳能热发电站和3座200 MW的槽式太阳能热发电站,太阳能热发电总装机量为700 MW,每座太阳能热发电站均配置11~15 h的储热系统。在电量结构中,太阳能热发电的占比为88%,光伏发电的占比为12%。电价体现了太阳能热发电的储能调峰优势和价值:在为期7个月的夏季时间段的10:00~16:00,购电方收购的太阳能热发电电价为29美元/MWh,在其他时间段的电价为92美元/MWh。

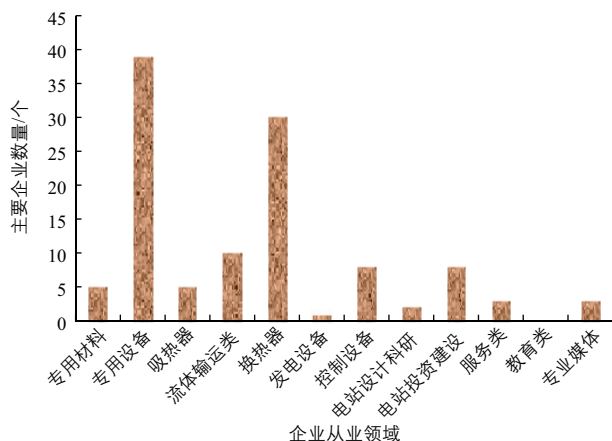
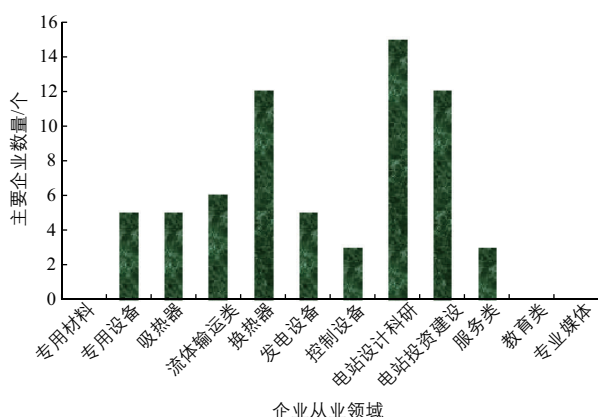
鲁能集团实施的海西州多能互补集成优化示范工程是国家能源局于2017年1月25日公布的首批23个多能互补集成优化示范工程之一^[8]。该项目包括50 MW的太阳能热发电、200 MW的光伏发电、400 MW的风电及50 MWh的磷酸铁锂电池储能电站,项目已于2019年9月全部完成。该项目中采用的技术可对风电、光伏发电、太阳能热发电、储电等组合方案进行实时柔性控制和智能调控,能最大限度地减少弃光、弃风率。

华源电力有限公司、绿巨人新能源有限公司和张北县瑞凯新能源有限公司共同实施开发的张家口张北县风光热储输多能互补集成优化示范项目也属于国家能源局的首批多能互补集成优化示范工程之一,工程总装机量为475 MW,包括50 MW的太阳能热发电、250 MW的光伏发电及25 MWh的蓄电池储能电站。

5.4 与自身产业链建设的关系

随着2016年我国启动太阳能热发电示范项目建设,太阳能热发电产业链逐步形成,截至目前,该产业链已经成熟。图5和图6为民营企业、央企和国企在太阳能热发电产业链上的分布情况。从图中可以看出,我国各类企业侧重点不同,但民企、央企和国企的结合构成了我国太阳能热发电产业完整的产业链,这个链条为我国的太阳能热发电产业发展提供了至关重要的基础,是国家启动首批太阳能热发电示范项目的重大成果。

未来在更多项目的拉动下,在这些已经形成的基础上,我国太阳能热发电产业的发展会更加迅

图5 民营企业在太阳能热发电产业链上的分布^[1]图6 央企和国企业在太阳能热发电产业链上的分布^[1]

猛，会使度电成本的下降幅度更大。镜场在太阳能热发电站投资中的占比近 50%，因此未来太阳能热发电站度电成本下降的突破口在于聚光器的总体设计，主要包括降低用钢量和降低传动成本两方面。

5.4 能源的梯级利用带来的效率和成本优化

将太阳能热发电的余热用于采暖及海水淡化可大幅提高太阳能热发电系统的综合能源利用效率。将我国采暖负荷区与太阳能资源情况进行对比可以发现，太阳能资源丰富地区一般也是冬季需要进行采暖的地区。

在太阳能海水淡化方面包括太阳能热发电的电水联产，美国能源部 (DOE) 启动了 2100 万美元的科技项目支持太阳能海水淡化，旨在加快太阳能热发电海水淡化技术的创新突破，降低海水淡化的成本，将大容量、低盐度的海水淡化处理成本降至 0.5 美元 /m³。项目的具体内容包括 4 方面：

1) 太阳能热发电海水淡化技术创新；2) 低成本的太阳热能收集和存储技术；3) 集成的太阳能热发电海水淡化系统；4) 太阳能热发电海水淡化过程中分析工具的开发。

以上研究对推动太阳能热发电的电水联产技术进步有明显推动作用。

6 结论

通过首批太阳能热发电示范项目的建设，我国建立了太阳能热发电的全产业链。然而由于逾期投产的示范项目将实施的电价政策，以及国家对于太阳能热发电产业的后续支持政策一直悬而未决，导致整个太阳能热发电产业处于“沉寂”状态，2019 年成为我国太阳能热发电产业发展的低迷期。我们期待在多方因素驱动下，关于太阳能热发电产业发展的相关规划、政策能够逐步明晰；如果相关激励政策出台，2022 年将是我国太阳能热发电大规模产业化发展的起始年。

未来非水可再生能源发电装机量占高比例的电力系统必须要有更多可靠、灵活的电源和储能电站提供电力保障。太阳能热发电是集发电和储能为一体的可再生能源发电方式，其可与风电和光伏发电组合，以解决目前大规模风电和光伏发电并网带来的消纳和安全运行问题。希望政府相关职能部门能够关注太阳能热发电的电力品质，充分发挥太阳能热发电站作为调峰电源且兼具储能功能的优势，尽快出台相关的支持政策。

参考文献

- [1] 国家太阳能光热产业技术创新战略联盟. 2018 年太阳能热发电及采暖技术产业蓝皮书 [R]. 北京, 2018.
- [2] 国家太阳能光热产业技术创新战略联盟. 中国太阳能热发电产业政策研究报告 [R]. 北京, 2013.
- [3] 王伟胜. 太阳能热发电在新能源电力系统中的作用 [R]. 杭州, 2019.
- [4] Deloitte Touche Tohmatsu. 全球可再生能源趋势 [R]. 美国: Deloitte, 2018.
- [5] British Petroleum. BP 世界能源统计年鉴 [R]. 英国, 2019 年.
- [6] 周孝信. 能源转型中构建我国新一代电力系统 [A]. 第四届中国太阳能热发电大会 [C]. 呼和浩特, 2018.

(转第 69 页)

但全年的波动仅在 20% 以内, 有较稳定的发电表现。

3.2 安装朝向和安装角度对光伏幕墙系统发电性能的影响

光伏组件的最大输出功率 $P_{\max}$ 和太阳辐照度 I_t 的关系式为:

$$I_t = \frac{1000P_{\max}}{1 - 0.0047(T - 25)P_{\text{peak}}} \quad (1)$$

式中, T 为光伏组件的温度; P_{peak} 为标准测试条件 ($I_t = 1000 \text{ W/m}^2$, $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$) 下光伏组件的最大功率; -0.0047 为组件的峰值功率温度系数, 均由组件生产商准确测试并提供。

当仅考虑光伏幕墙的安装朝向对发电性能的影响时, 经计算, 安装朝西的 CIGS 幕墙系统的月发电量数据的波动范围与日照时数的波动范围基本一致; 而安装朝南的 c-Si 幕墙系统的月发电量数据的波动范围却与日照时数的波动范围明显不符, 这主要是由于太阳高度角的变化所产生的影响。

对比测试结果也可以发现, c-Si 幕墙系统在运行中受安装倾角的影响显著, 特别是在夏季时段或辐照度较高时, 其发电能力大为减弱。另一方面, 安装朝西的 CIGS 幕墙系统对安装倾角影响的敏感度弱于 c-Si 幕墙系统, 尽管其夏季时段的发电量也明显低于冬季时段, 但相差程度不大。

3.3 电池弱光性能对光伏建筑构件的作用

如前文所述, 2 种幕墙系统中组件的安装角度分别为 85° 和 90° , 显然与最佳安装倾角的差距甚大, 导致光伏组件上的直接辐射量减少。此外不容忽视的是, 从图 3c 和图 4c 可以看出, 在傍晚时段, 安装朝西的 CIGS 幕墙系统以其较优异的弱光性能可持续发电, 使该光伏幕墙系统在

全年有较好的发电性能。

4 结论

本文研究的光伏幕墙系统是 BIPV 的充分应用, 既体现了光伏发电在发电性能上的优势, 又保证了建筑对于美观、光线、换气等一系列的需求, 具有建筑空间最大利用率、发电即用、补充能源等优势。对该光伏幕墙系统的运行数据进行分析与研究后, 得到了如下结论:

1) 双玻单晶硅组件和 GIGS 薄膜组件均能很好地满足建筑设计的要求, 实现了光伏建筑一体化, 达到了节能、美观的目的。

2) c-Si 幕墙系统的发电量对安装倾角、辐照度的变化非常敏感。

3) CIGS 幕墙系统对安装倾角的敏感度不高, 能够有较稳定的发电表现, 具有广泛应用于 BIPV 的巨大潜力。

4) 对于昆明这样干、湿季分明、辐照度强的地域, 垂直安装的光伏发电系统在冬季能够有较好的表现, 而在夏季不能获得较好的发电性能。

综上所述, 随着 BIPV 技术的日益成熟, 基于 BIPV 技术的光伏幕墙系统将有更加广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 段光复, 段伦. 薄膜太阳能电池及其光伏电站 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [2] Chamoun R, Chakroun W. Cost-efficiency study of BIPV systems in Qatar residential houses [J]. International Journal of Renewable Energy Research, 2014, 4(3): 571 - 579.
- [3] 陈维, 沈辉, 刘勇. 光伏阵列倾角对性能影响实验研究 [J]. 太阳能学报, 2009, 30(11): 1519 - 1522.
- [4] 张传升. 北京地区多种光伏组件发电性能对比实验研究 [J]. 可再生能源, 2016, 34(8): 1117 - 1123.
- [5] 臧建彬, 王亚伟, 王晓东. 灰尘沉积影响光伏发电的理论和试验研究 [J]. 太阳能学报, 2014, 35(4): 624 - 629.
- [6] 马铭, 廖华, 李景天, 等. 云南师范大学 120 kW 光伏玻璃幕墙实践 [J]. 云南师范大学学报, 2015, 35(2): 27 - 31. 太阳能

(接第 10 页)

- [7] 李湃, 王伟胜. 青海海西多能互补集成系统储能容量优化配置 [A]. 第四届中国太阳能热发电大会 [C]. 呼和浩特, 2018.
- [8] 国家能源局. 国家能源局关于公布首批多能互补集成

优化示范工程的通知 [EB/OL]. http://zfxgk.nea.gov.cn/auto82/201702/t20170206_2500.htm, 2017-01-25. 太阳能