



第三批光伏发电“领跑者”项目的技术分析

特变电工新疆新能源股份有限公司 ■ 王忆麟

摘要：针对第三批光伏发电“领跑者”项目大量采用“双面双玻光伏组件+单轴跟踪”技术方案的特点，进行了技术性、经济性的研究，通过分析得出，该技术方案使未来光伏发电系统平价上网、脱离政府补贴成为可能。

关键词：光伏发电；领跑者；双面双玻光伏组件；单轴跟踪系统；度电成本

0 引言

根据2015年1月8日国家发展和改革委员会等7部门联合发布的《能效“领跑者”制度实施方案》，“能效领跑者”是指在同类可比范围内，能源利用效率最高的产品、企业或单位。光伏发电“领跑者”计划是在此基础上发展而来，该计划是国家能源局自2015年起实施的专项光伏计划，每年都筛选一批具有技术先进性的光伏基地。在“领跑者”计划中，项目所采用的技术和使用的光伏组件都是在行业中技术绝对领先的技术和产品。

2017年发布的《国家能源局关于推进光伏发电“领跑者”计划实施和2017年领跑基地建设有关要求的通知》(国能发新能[2017]54号)(下文简称“通知”)，对推进光伏发电“领跑者”计划提出了具体要求，指出“光伏发电‘领跑者’计划和基地建设以促进光伏发电技术进步、产业升级、市场应用和成本下降为目的，通过市场支持和试验示范，以点带面，加速技术成果向市场应用转化，以及落后技术、产能淘汰，实现2020年光伏发电用电侧平价上网的目标”^[1]。

本文对第三批光伏发电“领跑者”项目采用的技术方案进行了技术性和经济性的研究，

并通过实际项目对采用该技术方案的数据进行了分析。

1 光伏发电系统的设计

根据通知中的技术要求，要建设拥有最先进技术产品的光伏发电示范基地和最先进工艺技术应用示范工程，此类项目充分代表了行业最先进的设计技术，依托技术创新，一方面提高发电量，另一方面降低建设成本，从而达到降低光伏发电系统度电成本的目的。

1.1 组件选择

光伏发电系统中最重要的发电单元是光伏组件，而光伏组件是由大量的太阳能电池组合构成的。在组件的选择上，需考虑目前已商业化应用的各种光伏组件的产业形势、技术成熟度、运行可靠性、未来技术发展趋势等，并参考“领跑者”项目的技术要求，通过技术性和经济性的综合比较，选择适合大型集中式并网光伏发电系统使用的光伏组件类型。

目前光伏组件的类别主要有：晶体硅(包括单晶硅、多晶硅)光伏组件和薄膜(包括非晶硅、硒化铜铟、碲化镉)光伏组件。当前市场生

收稿日期：2019-01-07

通信作者：王忆麟(1981—)，男，工程师，主要从事太阳能光伏电站系统集成方面的研究。wang-yi-lin@163.com

产和使用的光伏组件大多数是晶体硅光伏组件，其比例约占 87%。“领跑者”项目中对于光伏组件的工艺要求主要集中在晶体硅电池的发射极及背电极钝化技术 (PERC)、异质结技术 (HIT)、叉指背接触技术 (IBC)、电极绕通背接触技术 (MWT)，以及硅片的黑硅、n 型技术。但是由于电池的产业化要求和工艺复杂性，目前仅 PERC 工艺取得了商业化进展，其他工艺还有待优化。因此，目前折中的方法是对 PERC 工艺和 HIT 工艺进行升级，最终采用以玻璃背板代替传统 PVC 背板的双面双玻光伏组件。

双面双玻光伏组件的优点主要为：1) 双面发电可以带来更多的发电量；2) 双玻光伏组件可以带来更高的耐用性，较传统背板而言，还具有零透水、抗 UV 老化和抗降解腐蚀的特征。

在目前技术可行的情况下，第三批光伏发电“领跑者”项目的投标单位大部分都采用了双面双玻光伏组件。

1.2 支架方式

光伏发电系统常见的支架方式分为固定倾角支架系统和自动跟踪支架系统两大类。其中，自动跟踪支架系统可分为单轴跟踪支架系统和双轴跟踪支架系统，按照控制方式又可分为主动跟踪支架系统、被动跟踪支架系统及复合式跟踪系统。

在第三批光伏“领跑者”项目中，为了满足技术领跑的要求，在提升发电量方面，项目一般采用自动跟踪支架系统。其中，单轴跟踪支架系统以最佳倾角固定的方式自东向西跟踪每天的太阳轨迹；双轴跟踪支架系统在跟踪每天太阳轨迹的基础上，还可根据太阳轨迹的季节性位置调节支架的倾角。

根据太阳轨迹的季节性位置，不同纬度地区的最佳倾角也不同，因此，采用不同的跟踪方式得到的发电量提升的程度也不同。根据以往的经验，以及大量已建成的光伏电站的发电量数据，结合目前几种支架方式商业化设计的成熟度情况、占地面积及安装运维情况等，对几种支架方式进行了比较，结果如表 1 所示。

表 1 各种支架方式的比较

项目	固定倾角	水平单轴	斜单轴	双轴
发电量比例 /%	100	110 ~ 120	125 ~ 130	130 ~ 135
1 MW _p 光伏电站占地 面积 /m ²	24000	32000	48000	50000
运行维护	免维护	电机维护	电机维护	电机维护
安装要求	简单	较复杂	较复杂	复杂
成熟度	很成熟	成熟	成熟	不成熟

注：“发电量比例”为采用其他支架系统时的发电量与采用固定倾角支架系统时的发电量的对比值

由于大多数“领跑者”项目采用了双面双玻光伏组件，支架再选择一种合适的跟踪系统，可以进一步提升组件背面的发电量。从第三批“领跑者”项目的技术方案来看，大多数项目选择了单轴跟踪支架系统。

2 “双面双玻光伏组件 + 单轴跟踪支架系统”技术方案的数据分析

通过实际光伏发电项目对“双面双玻光伏 + 单轴跟踪支架系统”技术方案(下文简称为“‘双面双玻 + 单轴跟踪’方案”)的数据进行分析。笔者于 2017 年 7 月 12 日对内蒙古自治区鄂尔多斯市杭锦旗独贵塔拉镇的亿利 200 MW_p 库布其沙漠生态太阳能治沙发电项目进行了考察。该项目中有 336 kW_p 采用了“双面双玻 + 单轴跟踪”的形式，笔者选择此试验区域进行数据分析。

由于此“双面双玻 + 单轴跟踪”集成方案示范区在笔者去考察前的 6 月份刚刚并网，因此现场只收集了 2017 年 6 月 24 日~7 月 11 日的发电量数据。将本方案的数据与同项目中采用“常规多晶硅光伏组件 + 固定倾角支架系统”技术方案(下文简称为“‘常规多晶硅 + 固定倾角’方案”)的部分进行对比，具体情况如图 1 所示。

从图 1 可以看出，随着太阳辐照度的变化，2 种技术方案的发电量变化率也不相同。太阳辐照度越低，2 种技术方案的发电量差距越小；随着太阳辐照度的增强，2 种技术方案的发电量差距也在增大。其中，“双面双玻 + 单轴跟踪”方

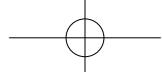


图 1 2 种技术方案的发电量数据对比

案的优势明显。

为了方便分析太阳辐照度的变化与“双面双玻 + 单轴跟踪”方案增加的发电量的相关性，计算出同一天内“双面双玻 + 单轴跟踪”方案的发电量与“常规多晶 + 固定倾角”方案的发电量的电量差，然后用该差值与太阳辐照度做出散点图，以分析二者的相关性，具体如图 2 所示。由图 2 可知，二者之间的相关性基本可以证明之前提出的“采用单轴跟踪系统可以进一步提升双面组件的发电量”这一观点。

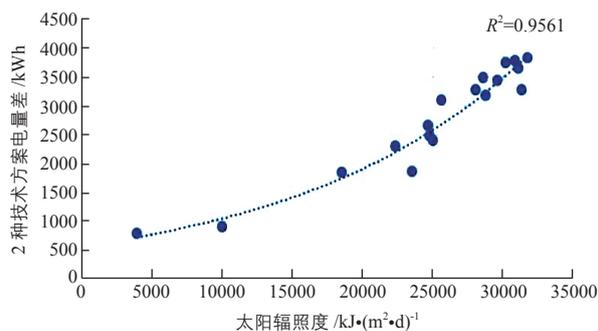


图 2 2 种技术方案的电量差与太阳辐照度的相关性

从现场运维人员处了解到，在现有数据中，“双面双玻 + 单轴跟踪”方案的发电数据为逆变器侧读数，“常规多晶 + 固定倾角”方案为关口表读数。考虑到由逆变器到箱变、箱变到关口表的损耗，按常规设计时的线损计算，取值为 3%。

2 种技术方案发电量提升比例的计算式为：

$$\text{发电量提升比例} = \frac{\text{2 种技术方案电量差}}{\text{2 种技术方案电量和}} \times 100\% - 3\% \quad (1)$$

计算后可得出，发电量的提升区间为 16.16% ~ 23.9%。

3 经济性分析

在第三批光伏发电“领跑者”项目中，选择内蒙古自治区达拉特旗库布其沙漠经济先导区光伏发电应用“领跑者”基地规划为例进行分析。该项目基地的投标报价均价为 0.393 元 / kWh，其中，特变电工新疆新能源股份有限公司（以下简称“特变电工”）的报价为 0.32 元 / kWh。从报价结果来看，该基地基本具备平价上网的可能。

根据林洋新能源研究院^[2]公布的数据显示，截至目前，若采用“双面双玻 + 单轴跟踪”方案，基础管桩数 + 跟踪支架的综合造价为 1.35 元 / W_p ，双面双玻光伏组件的造价为 3.2 元 / W_p 。相同容量下，比采用传统光伏组件时的建设成本增加了 0.7 元 / W_p ，再结合发电量 16.16% ~ 23.9% 的提升区间，可推导出“双面双玻 + 单轴跟踪”方案的度电成本 (LCOE) 下降空间在 0.03 ~ 0.09 元 / kWh 之间。

根据以上分析，当时该项目还不足以支撑特变电工报出的 0.32 元 / kWh 的低价。支撑该公司报出低价的最大可能原因是由未来技术发展而引起的成本大幅降低。

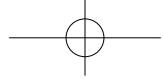
4 存在的问题

虽然，第三批光伏发电“领跑者”项目普遍采用了“双面双玻 + 单轴跟踪”方案，但其还存在一定的限制条件，具体包括：

1) 背面发电量的增益与地面反射介质有关。采用该运行模式时必须对项目所在地情况十分了解，才能将背面增益估计准确。

2) 单轴跟踪支架系统安装受地形限制。根据厂家技术给出的条件，单轴跟踪支架系统不能在坡度大于 15° 的场所运行，必须是在平缓区域运行。而目前运用在山地项目中的单轴跟踪支架系统，还没有成熟可用的技术。

3) 光伏行业自身正在通过技术的创新不断进行优化设计，一方面，行业在不断提升光伏电站的发电量；另一方面，行业在不断控制电站成本。通过对度电成本计算式的分子、分母（转第 47 页）



据实测功率曲线重新进行风速区间划分,使用连续 2 个 Bin 区间的统计中心值形成新的年发电量计算风速区间 $[V_{i-1}, V_i)$, 使用该区间上 2 个风速在实测功率曲线上对应的算数平均值作为该区间的平均功率。而考虑到实测功率曲线的非线性特征,使用该平均功率很难准确表示出对应风速区间的功率均值。

通过对实测功率曲线计算流程的分析不难发现,在最终得到的实测功率曲线上,每个点都已经带有区间属性。例如表 1 中实测功率曲线上的点 (3.0 m/s, 32.2 kW), 其代表的是风速区间 [2.75, 3.25) 的计算结果。因此,结合概率论的知识和年发电量的计算原理,可将式 (1) 优化为:

$$AEP = N_h \sum_{i=1}^N [F(V_{mi}+0.25) - F(V_{mi}-0.25)] P_i \quad (5)$$

由式 (5) 可知,优化算法使用的就是实测功率曲线上的点,无需初始条件的假设,可避免因引入初始条件而导致的计算误差。

同时基于本文的改进方法,在年发电量不确定度的评估公式方面,虽然仍沿用式 (3), 但是其计算条件却发生了变化。优化算法计算时取 $f_i = F(V_{mi}+0.25) - F(V_{mi}-0.25)$, 无需引入计算初始条件 $V_0 = V_1 - 0.5$ m/s, 从而保证了计算公式本身的完整性,避免了因计算初始条件假设引入的计算误差。

根据表 1 所示的实测功率曲线数据,利用优化算法计算得到该风电机组的年发电量及不确定度,并将计算结果和标准算法的计算结果进行比较,对比如表 2 所示。表中,测试时的空气密度为 1.225 kg/m^3 , 场地的年平均风速为 6.4 m/s 。

(接第 31 页) 不断双向优化,从而达到度电成本接近平价,为 2020 年光伏“去补贴”做好技术准备。

5 总结

第三批光伏发电“领跑者”项目普遍采用了“双面双玻光伏组件+单轴跟踪”技术方案,本文对该技术方案进行了技术性和经济性研究,并通过实际项目对技术方案的数据进行了分析,其可使未来光伏发电系统平价上网成为可能。

表 2 2 种算法的年发电量和不确定度计算结果

计算方法	年发电量 /MWh	不确定度 /%
标准算法	7207.28	7.34
优化算法	7310.89	7.27

从表 2 的计算结果可以看出,使用优化算法计算出的结果的不确定度较标准算法略低。

3 结语

本文在 IEC 61400-12-1 标准中关于实测功率曲线统计和年发电量计算方法的基础上,结合概率论的相关知识,对标准算法进行了优化改进。通过对比分析表明,优化算法能够更加准确地给出年发电量的计算值,且在计算过程中无需进行初始条件的假设,在保证计算公式本身完整性的同时,也使算法变得更加简便。

参考文献

- [1] IEC 61400-12-1, Wind energy generation systems-Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines (Edition 2.0) [S].
- [2] 李翠萍, 俞黎萍. 湍流强度修正风电机组功率曲线的研究 [J]. 可再生能源, 2014, 32(4): 466 - 468.
- [2] 李庆. 风电机组和风电场的功率特性及电能质量测试研究 [D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2006.
- [3] 陈旸. 风电机组功率特性测试及外推方法研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2013.
- [4] 陈庆斌. 风电机组和风电场的功率特性测试研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
- [5] 李倩倩. 风电机组的功率特性测试与研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2011.
- [6] GB/T 18451.2-2012/IEC 61400-12-1:2005, 风力发电机组功率特性测试 [S]. 太阳能

参考文献

- [1] 国家能源局关于推进光伏发电“领跑者”计划实施和 2017 年领跑基地建设有关要求的通知 (国能发新能 [2017]54 号) [EB/OL]. http://zfxgk.nea.gov.cn/auto87/201709/t20170922_2971.htm, 2017-09-22.
- [2] 林洋新能源研究院. 平单轴到底划算不划算? 我们给您算个账 [EB/OL]. https://mp.weixin.qq.com/s?src=11×tamp=1547556749&ver=1317&signature=Ux0umdY2KvkyKNnyG0FJ0zk4IqiJFp0T5pseVt9lFWAeD00YgmO4*i53NXSGWPoTVK6rBCO6XHNtQD7Rg6ZkZiUk-SgsEfVt5RMBxqNd18DFI9eInLcPJE-178oIyrc&new=1, 2018-03-30. 太阳能