

光伏组件横向和竖向布置技术经济对比分析

李顺, 贺广零, 任要中, 田景奎, 杨威

(中国电力工程顾问集团华北电力设计院有限公司, 北京 100120)

摘要: 为分析光伏组件在横向和竖向布置条件下的技术经济差异, 文章以 1 MWp 光伏发电单元为研究对象, 结合内蒙古苏尼特右旗光伏一期 10 MWp 发电项目的光伏组件设备参数和水文地质条件, 分别建立了光伏组件横向和竖向布置发电模型与支撑结构模型, 并分析了两种布置方式在总体经济指标上的差异。结果表明, 对于平坦地区光伏电站, 光伏组件采用竖向布置在经济性上略优于横向布置, 但二者相差无几。然而, 对于山地、屋顶、分布式光伏电站, 因光伏阵列间距较小引起遮挡严重时光伏组件的布置, 则需要专题分析。

关键词: 光伏组件; 竖向布置; 横向布置; 发电量

中图分类号: TM615

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2017)04-0113-05

Technical Economics Comparison Between PV Module Under Vertical & Horizontal Arrangement

LI Shun, HE Guangling, REN Yaozhong, TIAN Jingkui, YANG Wei

(North China Power Engineering Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Beijing 100120, China)

Abstract: To analyze the differences of PV module under vertical and horizontal arrangement in technical economics, 1 MWp PV array generating capacity models and support structure models were promoted based on the PV module parameters and the geological and hydrological conditions in Sonid Right Banner of Inner Mongolia. According to the results, PV module under vertical arrangement is slightly prior to the one under horizontal arrangement in technical economics.

Key words: PV module; vertical arrangement; horizontal arrangement; generating capacity

在光伏发电设计领域, 竖向布置和横向布置是光伏组件放置的两种设计方案。据调研, 目前采用光伏组件竖向布置的电站更多一些, 主要原因在于竖向布置的光伏组件安装较为方便, 而采用横向布置会导致光伏支架最上排组件的安装比较麻烦, 从而对施工进度存在一定的影响。然而, 这一使得施工安装成本看似较优的设计举措, 却有可能会降低光伏组件全天的发电量^[1-5]。因为在实际工程中, 囿于土地面积, 光伏阵列间距依据规范只要求冬至日 6 h 不遮挡, 对于 6 h 外可能受到局部遮挡的光伏组件, 横向布置光伏组件利用率高于竖向布置。

大量文献^[2-4]已经对上述问题进行了系统的研究, 但大都只是局限在发电量、工程量的差异方面, 鲜有文献在技术经济范畴对上述问题进行综合对比分析。

本文以 1 MWp 光伏发电单元为研究对象, 建立光伏组件横向布置和竖向布置的发电量模型, 并基于内蒙古苏尼特右旗光伏一期 10 MWp 发电项目的地质、气象资料, 进行相应的光伏组件支撑结构数值计算, 进而对比两种光伏组件布置方式的总体经济性。

1 光伏组件布置模型

光伏组件均采用普通多晶硅组件, 功率为 260 Wp, 结构尺寸为 1 650 mm × 992 mm × 35 mm。以 1 MWp 为基本发电单元, 分别采用以下两种光伏

组件布置模型:

1) 光伏组件横向布置模型(模型一): 光伏发电单元由 88 个光伏阵列组成, 每个光伏阵列的光伏组件布置为 4 行 11 列共 44 块光伏组件, 两个组串(图 1), 其中上方 2 × 11 块组件构成一个组串, 下方 2 × 11 块组件构成一个组串。每个光伏发电单元共 3 872 块光伏组件。

2) 光伏组件竖向布置模型(模型二): 光伏发电单元由 88 个光伏阵列组成, 每个光伏阵列的光伏组件布置为 2 行 22 列共 44 块光伏组件, 两个组串(图 2), 其中上方 22 块组件构成一个组串, 下方 22 块组件构成一个组串。每个光伏发电单元共 3 872 块光伏组件。

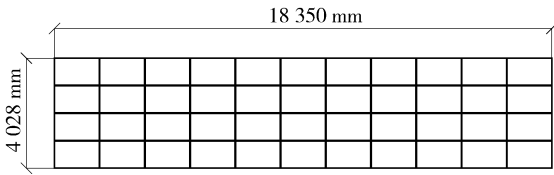


图 1 光伏组件横向布置模型

Fig. 1 Model of horizontally arranged PV module

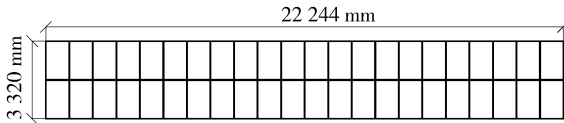


图 2 光伏组件竖向布置模型

Fig. 2 Model of vertically arranged PV module

2 光伏发电量计算

2.1 光伏组件基本参数

标准测试条件下光伏组件基本参数如表 1 所示。

表 1 标准测试条件下光伏组件基本参数

Tab. 1 Basic parameters of PV module under standard test condition

参数名称	参数值
最大功率 P_{max}/Wp	260
功率公差 P_{max}/W	0 ~ +5
最大功率点的工作电 P_{app}/V	30.5
最大功率点的工作电 I_{app}/A	8.52
开路电压 V_{oc}/V	37.6
短路电流 I_m/A	9.10
组件效率 $\eta_m/\%$	15.8

2.2 光伏组件数学模型

在光照不均匀的条件下, 可能发生热斑效应, 即当光伏电池部分被遮蔽时, 被遮蔽部分的光伏电池就会成为负载而发热。当该部分电池的负压达到一定程度时, 就会发生反向雪崩击穿进而损坏电池^[6-7]。因此, 有必要在传统光伏电池的等效模型基础上考虑反向雪崩击穿效应。

图 3 为光伏电池元双二极管等效电路模型^[8], 该模型考虑了反向雪崩击穿效应。其中, I_{ph} 为光伏电池元光生电流; I_{D1} 为流过二极管 D_1 的电流; I_{D2} 为流过二极管 D_2 的电流; I_p 为反向雪崩击穿电流; R_{sh} 为光伏电池元的等效并联电阻; R_s 为光伏电池元的等效串联电阻; V 为光伏电池元的输出电压; I 为光伏电池元的输出电流。

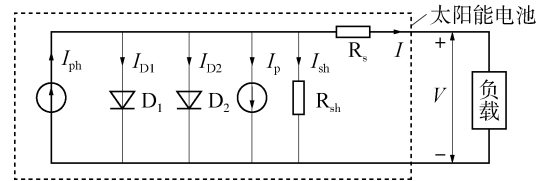


图 3 光伏电池元等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of PV cell

依据上述等效电路, 可获得考虑了反向雪崩击穿效应的光伏电池元的数学模型:

$$\begin{aligned}
 I &= I_{ph} - I_{D1} - I_{D2} - I_{sh} - I_p \\
 &= I_{ph} - I_{s1} \left\{ \exp \left[\frac{q(V + IR_s)}{A_1 kT} \right] - 1 \right\} - \\
 &I_{s2} \left\{ \exp \left[\frac{q(V + IR_s)}{A_2 kT} \right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} - \\
 &a(V + IR_s) \left(1 - \frac{V + IR_s}{V_{br}} \right)^{-nn} \quad (1)
 \end{aligned}$$

式中: I_{s1} 为二极管 D_1 的反向饱和电流; I_{s2} 为二极管 D_2 的反向饱和电流; A_1 、 A_2 为相应的品质因子; V_{br} 为雪崩击穿电压, 其取值范围为 -30 ~ -14 V; a 、 nn 为雪崩击穿特征常数; T 为光伏电池元温度; q 为电子的电荷量; k 为波尔兹曼常数。

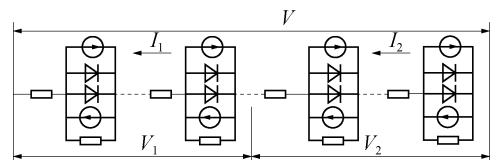


图 4 部分遮挡的光伏组件等效电路

Fig. 4 Equivalent circuit of PV module partly in the shade

图 4 为光照不均匀的光伏组件等效电路。其中, I_1 为通过未被遮挡电池元的电流; I_2 为通过被遮挡电池元的电流; V_1 、 V_2 是相对应的电压; I 、 V 分别是整个光伏组件输出的电流和电压。

根据图 4 可得:

$$I = I_1 = I_2 \quad (2)$$

$$V = V_1 + V_2 \quad (3)$$

$$I_1 = I_{ph1} - I_{s1} \left\{ \exp \left[\frac{q \left(\frac{V_1}{m_1} + I_1 R_s \right)}{A_1 k T} \right] - 1 \right\} - I_{s2} \left\{ \exp \left[\frac{q \left(\frac{V_1}{m_1} + I_1 R_s \right)}{A_2 k T} \right] - 1 \right\} - \frac{V_1}{m_1} \frac{+ I_1 R_s}{R_{sh}} - a \left(\frac{V_1}{m_1} + I_1 R_s \right) \times \left(1 - \frac{V_1}{m_1} \frac{+ I_1 R_s}{V_{br}} \right)^{-nn} \quad (4)$$

$$I_2 = I_{ph2} - I_{s1} \left\{ \exp \left[\frac{q \left(\frac{V_2}{m_2} + I_2 R_s \right)}{A_1 k T} \right] - 1 \right\} - I_{s2} \left\{ \exp \left[\frac{q \left(\frac{V_2}{m_2} + I_2 R_s \right)}{A_2 k T} \right] - 1 \right\} - \frac{V_2}{m_2} \frac{+ I_2 R_s}{R_{sh}} - a \left(\frac{V_2}{m_2} + I_2 R_s \right) \times \left(1 - \frac{V_2}{m_2} \frac{+ I_2 R_s}{V_{br}} \right)^{-nn} \quad (5)$$

式中: m_1 为未被遮挡电池元的数量; I_{ph1} 为未被遮挡电池元的光生电流; m_2 为被遮挡电池元的数量, I_{ph2} 为被遮挡电池元的光生电流。光生电流与光强近似成正比。

根据式(2)~式(5), 利用牛顿迭代法即可获得整个光伏组件的数学模型。

2.3 发电量技术指标

依据上述式(1)~式(5)进行计算, 两种模型发电量主要技术指标如表 2 所示, 年发电量-时间关系曲线见图 5。计算结果显示, 横向布置的年平均发电量和 25 年总发电量均高出竖向布置约 0.12%, 这表明光伏组件采用横向布置确实可以提

高光伏组件的发电小时数, 但提高的效果非常有限, 因此光伏组件选择横向布置或是竖向布置对发电量的影响非常有限。值得说明的是, 两种支架形式间距均按照冬至日 9 点至 15 点(真太阳时)无遮挡进行设置。

表 2 两种模型发电量主要技术指标

技术指标	横向布置	竖向布置	误差
25 年平均发电量/kWh	1 529 471	1 527 611	0.12%
25 年总发电量/kWh	38 236 775	38 190 265	0.12%

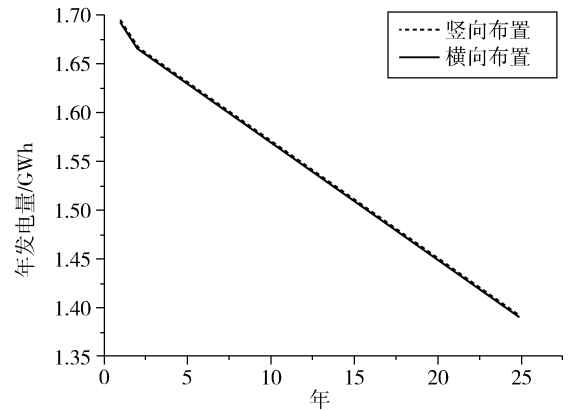


图 5 两种模型年发电量-时间关系曲线

Fig. 5 Two kinds of models' yearly generated energy-time curve

3 光伏组件支撑结构

3.1 工程地质

光伏场地地貌属高平原, 地形较平坦, 稍有起伏, 地势西高东低, 北高南低, 由西北像东南倾斜。场地地面高程在 1 070.0~1 081.0 m 之间。

根据现场钻探所揭露的地层, 上部为第四系上更新统冲洪积的砾砂、细砂, 下部为第四系中更新统残积成因粉质粘土。依据地层地质时代、地质成因、岩性及工程特性划分为三大层, 自上而下分述如下:

第一层砾砂(层号①): 第四系上更新统(Q_3)洪积成因, 黄褐~黄色, 密实, 稍湿, 混多量粉砂, 粉砂含量约 30%~40%, 零星可见少量角砾, 顶部 30 cm 为含植物根系耕植土。该层仅场地北部有分布, 层厚约 1.0~1.8 m, 平均约 1.5 m。

第二层细砂(层号②): 第四系上更新统(Q_3)冲洪积成因, 褐黄色~黄褐色, 稍湿, 密实, 该层

顶部夹粉质粘土薄层,中部及下部砂质较纯净。该层仅场地北部有分布,层厚约0.5~3.5 m,平均约2.0 m。

第三层粉质粘土(层号③):第四系中更新残积成因(Q₂),局部为粘土,坚硬,棕红色~棕黄色,土质较均匀,含黑色铁锰。该层5m深度内未揭穿。

表3 光伏场地各层土桩基参数推荐值

Tab. 3 recommended pile parameters of PV field

地层 编号	地基土 名称	钻孔灌注桩		干作业钻孔灌注桩	
		桩极限侧 阻力标准 值/kPa	桩极限端 阻力标准 值/kPa	桩极限侧 阻力标准 值/kPa	桩极限端 阻力标准 值/kPa
①	砾砂	120	—	—	—
②	细砂	85	800	85	—
③	粉质粘土	95	1 200	105	1 600

光伏场区地下水位埋深大于20 m,基础设计、施工可不考虑地下水影响。

光伏场地地基土对混凝土结构有微腐蚀性;对钢筋混凝土结构中的钢筋有微腐蚀性;光伏场地北部地基土对钢结构具微~弱腐蚀性,中部及南部地基土对钢结构具强腐蚀性。

场地不存在地震液化问题,建筑场地类别为II类,属于对建筑抗震有利地段。场区地震动峰值加速度为0.05 g,相应地震基本烈度为VI度。

拟建场地地基土季节性冻土标准冻结深度为2.40 m,且场地土不冻胀。

3.2 支撑结构建模

光伏组件支撑结构包括光伏支架及其基础两部分。

由于本项目采用固定可调支架,光伏支架均为单立柱型式。基于PKPM软件2010 V2.2版本,针对横向布置和竖向布置分别建立光伏支架结构平面模型,如图6和图7所示。其中,光伏支架结构设计主要考虑的荷载有:①结构自重荷载;②基本风压取 0.65 kN/m^2 (50年一遇),换算为25年一遇的风压为 0.60 kN/m^2 ;③基本雪压取 0.20 kN/m^2 (50年一遇),换算为25年一遇的雪压为 0.19 kN/m^2 。荷载组合法则依据《光伏电站设计规范》(GB 50797—2012)确定。光伏支架采用冷弯薄壁型钢,材质为Q235B。光伏支架主要是截面强度及挠度控制,主要构件的应力比均控制在0.85~0.90之间,受弯构件的挠度容许值为 $L/250$ 。

常见的光伏支架基础型式有螺旋钢桩基础、钢筋混凝土灌注桩基础、独立基础、条形基础等。由于光伏场地北部地基土对钢结构具微~弱腐蚀性,中部及南部地基土对钢结构具强腐蚀性,不宜采用螺旋钢桩基础。对灌注桩基础、独立基础、条形基础三者进行经济性对比,发现灌注桩基础最优,故最终采用灌注桩基础。灌注桩基础混凝土强度等级为C30,钢筋强度等级为HRB400,含筋率取值为 80 kg/m^3 。

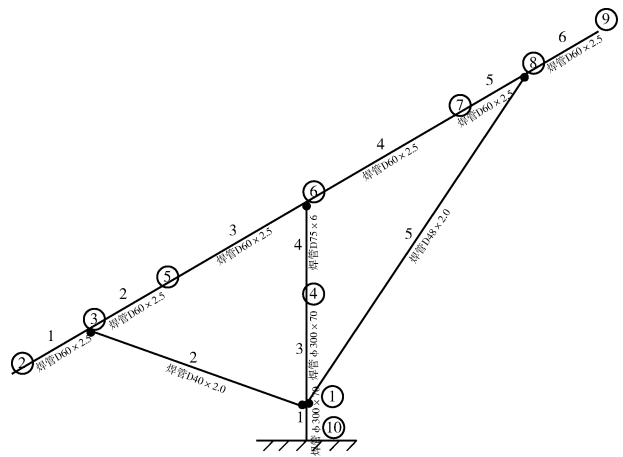


图6 光伏组件横向布置的支架计算简图

Fig. 6 Calculating diagram of support structure with PV module horizontally arranged

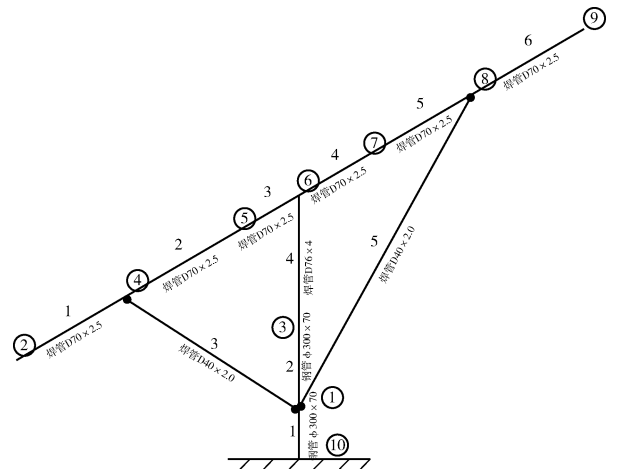


图7 光伏组件竖向布置的支架计算简图

Fig. 7 Calculating diagram of support structure with PV module vertically arranged

3.3 支撑结构工程量

依据PKPM软件2010 V2.2版本进行结构计算,可得到两种模型光伏支架和基础的工程量如表4所示。计算结果表明,横向布置光伏支架工程量

较多,多于竖向布置5.6%。然而,横向布置的基础工程量及钢筋量较少,少于竖向布置17.1%。

表4 两种模型支撑结构工程量表

Tab. 4 Engineering quantity of two kinds of models' support structure

模型	钢材 Q235B	混凝土 C30	钢筋
横向布置	39.5/t	97.7 m ³	7.82 t
竖向布置	37.3/t	114.4 m ³	9.15 t
误差	5.6%	-17.1%	-17.1%

4 技术经济对比分析

4.1 电价收益

根据表2给出的两种模型25年的年发电量,并结合现有的光伏发电政策和市场行情(前20年的电价取为0.9元/kWh,后5年的电价取为0.4元/kWh),得出横向布置和竖向布置25年的折现总值分别为1453万元和1451万元,即横向布置的电价收益比竖向布置高出约0.13%。

4.2 建设成本

基于表4给出的支撑结构工程量,光伏支架的单价取9300元/t,混凝土单价取650元/m³,钢筋单价取5300元/t,则横向布置和竖向布置单个光伏阵列的工程造价分别约为47.2万元和42.1万元,即横向布置的建设成本比竖向布置高出约10.8%。

4.3 技术经济分析

综合考虑两种模型在建设成本和电价收益上的差异,在不考虑运营成本等其它因素的条件下,横向布置和竖向布置25年总利润分别约为1405.8万元和1408.9万元,即竖向布置比横向布置的利润高出3.1万元,约占总利润的0.2%。虽然竖向布置在经济性上略优于横向布置,但考虑到总利润的基数较大,因此两者之间实际上差别不大。

5 结论

本文以1MWp光伏发电单元为分析对象,比较了光伏组件在横向和竖向布置下的技术经济指标,得出了以下结论:

1)在建设成本上,光伏组件采用横向布置比竖向布置高出约10.8%;对于1MWp光伏发电单元而言,二者相差约5.1万元。

2)在25年总发电量上,光伏组件采用横向布

置比竖向布置高出约0.12%,故而光伏组件布置方式对发电量的影响非常有限。

3)在25年总利润上,光伏组件采用横向布置比竖向布置低约0.2%,两者在经济性上差别不大。

有关上述结论,需要补充以下说明:

1)上述结论仅适用于平坦地区、土地面积宽裕的光伏电站。对于山地、屋顶、分布式光伏电站,因客观条件限制,光伏阵列间距较小引起遮挡严重时光伏组件的布置,则需要专题分析。

2)本文采用了较为简易的数学模型进行发电量计算,没有考虑光伏场区温度变化、光照强度变化等因素对实际发电量的影响。有必要结合具体工程的实际发电技术指标,沿着这一领域对光伏组件在横向和竖向布置下的技术经济差异进行深入研究。

参考文献:

- [1] 刘阳,李爱武.光伏组件对阴影敏感度的测试及分析应用[J].可再生能源,2014,32(9):1263-1266.
LIU Y, LI A W. Analysis and application of PV modules' sensitivity to shadow [J]. Renewable Energy Resources, 2014, 32(9): 1263-1266.
- [2] 肖景良,徐政,林崇,等.局部阴影条件下光伏阵列的优化设计[J].中国电机工程学报,2009,29(11):119-124.
XIAO J L, XU Z, LIN C, et al. Optimal design of photovoltaic arrays under partial shading [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(11): 119-124.
- [3] 云志刚,杨宏,李文滋.光伏组件中电池遮挡与I-V曲线特性变化关系[C]//第八届全国光伏会议暨中日光伏论坛论文集.深圳:[出版者不祥],2004.
- [4] 赵争鸣,刘建政,孙晓瑛,等.太阳能光伏发电及其应用[M].北京:科学出版社,2005.
- [5] MISHINA T, KAWAMURA H, YAMANAKA S, et al. A Study of the automatic analysis for the i-v curves of a photovoltaic subarray [C]. Conference Record of the 29th IEEE: Photovoltaic Specialists Conference. Piscataway NT, USA, 2002.
- [6] HERRMANN W, WIESNER W, WAASSEN W. Hot spots investigations on PV module design with respect to bypass diodes [C]//IEEE. Conference Record of the 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Anaheim, CA. U. S. A.; IEEE, 1997.
- [7] QUASCHNING V, HANITSH R. Numerical simulation of current-voltage characteristics of photovoltaic systems with shaded solar cells [J]. Solar Energy, 1996, 56(6): 513-520.
- [8] 冯宝成,苏建徽.部分遮挡条件下光伏组件的建模与仿真研究[J].电气传动,2011,41(7):61-64.
FENG B C, SU J H. Research on model and simulation of PV module under partially shaded conditions [J]. Electric Drive, 2011, 41(7): 61-64.

(责任编辑 张春文)