

DOI:10.3969/j.issn.1674-1951.2019.03.022

随坡安装山地光伏电站阵列间距的计算

Calculation of the array spacing of mountain PV power
plants installed with slopes

周建朋¹, 王明介²
ZHOU Jianpeng¹, WANG Mingjie²

(1. 江苏腾晖电力技术有限公司, 江苏 常熟 215500; 2. 阳光电源股份有限公司, 合肥 230088)
(1. Jiangsu Tenghui Power Technology Company Limited, Changshu 215500, China; 2. Sungrow Power
Supply Company Limited, Hefei 230088, China)

摘 要:推导出了随坡安装山地光伏电站阵列间距的计算公式,给出了光伏阵列在水平面投影参数的计算公式,并开发出了光伏电站阵列布置设计软件。以青海共和项目点为例,对公式计算和 PVsyst 软件模拟结果进行了对比分析,结果表明两者吻合度较高,间接地验证了公式的准确性。该研究的成果可用于指导光伏电站阵列间距计算和阴影分析等方面的工作。

关键词:山地光伏电站;阵列间距;随坡安装;阵列投影;PVsyst

中图分类号:TM 615 **文献标志码:**B **文章编号:**1674-1951(2019)03-0076-05

Abstract:Formulas for calculating the array spacing of mountainous PV power stations mounted on slopes are derived, and the calculation formulas for the projection parameters of the PV arrays on the horizontal plane are given. A software for the layout of the PV power station arrays is developed. Taking the project located in the Gonghe, Qinghai as an example, the formula calculation and PVsyst software simulation results are compared and analyzed, and the accuracy of the formula is verified indirectly. The research results can be used to guide the calculation of array spacing and shadow analysis of PV power plants.

Keywords:mountain PV power station; array spacing; installation with slop; array projection; PVsyst

0 引言

截至 2017 年年底,全球光伏装机容量已经达到 405 GW,国内装机容量也达到了 130 GW。这得益于光伏发电技术的发展和一系列光伏补贴政策的颁布。从 2013 年开始,国内制定了上网标杆电价,明确了光伏电站的补贴机制,极大地刺激了国内光伏市场的发展。随着西部地区限电的出现,光伏电站开始东移,同时光伏领跑者基地、光伏扶贫也成了国内光伏电站的发展方向。在这一过程中,电站的建设条件日趋复杂,山地光伏电站越来越多。如何在电站设计时确定合理的阵列间距,避免阵列前后排遮挡、减少发电量的损失,成为亟待解决的问题。行业内吴永忠等给出了平地光伏电站阵列间距的计算方法^[1]。张朝辉等研究了利用计算机数值迭代的方式确定南北坡光伏电站阵列间距的计算方法^[2]。张

文华等在影子倍率的计算中加入了空气折射率这一参数,并对太阳方位角和高度角计算公式进行修正^[3]。周长友等的研究给出了阶梯状安装山地光伏电站阵列间距的计算方法^[4],但是在实际应用中阶梯状的安装方式并不多见,应用更广的是随坡安装方式。本文将在上述研究的基础上,推导出任意坡面上随坡安装时光伏阵列间距的计算公式,并利用 EXCEL 开发出光伏电站阵列布置设计软件。

1 平地光伏电站阵列间距的计算

光伏电站设计国标中给出了光伏电站阵列间距的取值规定:光伏方阵各排、列的布置间距应保证每天 09:00—15:00(当地真太阳时)时段内前、后、左、右互不遮挡^[5]。根据太阳的运动轨迹,只要保证冬至日 09:00—15:00(当地真太阳时)时段内上述情形下不遮挡,则可满足全年这个时段不遮挡。如图 1 和图 2 所示,光伏阵列正南布置,阵列宽度为 l 、长度为 W ,安装倾角为 θ , L 为影子在地面的投影长度,

D_{ns} 为阵列间距,通常指的是前后排阵列南北方向的距离。从图 1 中可知,只要确定了光线的传播方向和遮挡物的相对高度 H ,就可以得到 L 和其南北方向的投影距离,即 D_{ns} 。光线的传播方向是由太阳的位置,即太阳高度角 α 和太阳方位角 β 两个参数共同决定的。

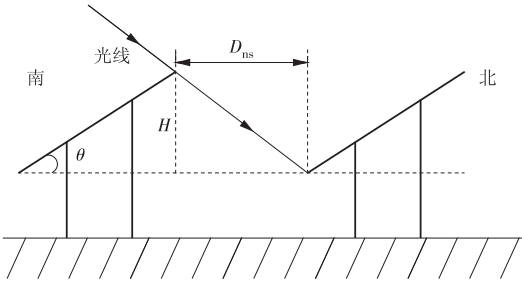


图 1 平地光伏阵列侧视图
Fig.1 Flat PV array side view

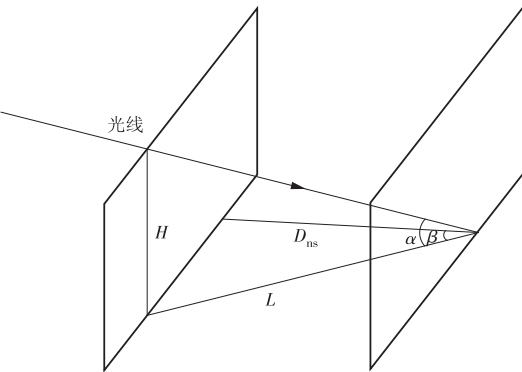


图 2 平地光伏阵列间距计算
Fig.2 Flat PV array spacing calculation

根据图 2 中几何关系可知,

$$L = H / \tan \alpha, \tag{1}$$
$$D_{ns} = L \times \cos \beta = H / \tan \alpha \times \cos \beta, \tag{2}$$
$$H = l \times \sin \theta, \tag{3}$$
$$D_{ns} = H \times R, \tag{4}$$

式中: R 为影子倍率, $R = \cos \beta / \tan \alpha$ 。
太阳高度角^[6]
 $\alpha = \arcsin(\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega), \tag{5}$
太阳方位角
 $\beta = \arcsin(\cos \delta \sin \omega / \cos \alpha), \tag{6}$
式中: φ 为当地纬度, ($^{\circ}$); δ 为赤纬角, ($^{\circ}$); ω 为时角, ($^{\circ}$)。

2 山地光伏电站阵列间距的计算

2.1 坡面的分类

任何坡面可以由坡度和坡向 2 个参数描述,相关规定如下:南坡的坡度角为正,北坡的坡度角为负,正南坡的坡向为 0° ;向西坡向为正,向东坡向为负。

按照坡面朝向的不同,可分为正南坡、正北坡、正东坡、正西坡、东南坡、西南坡、西北坡和东北坡 8 种情况。

2.2 坡面的分解

坡面除了用坡度和坡向表示外,还可用南北坡度分量和东西坡度分量表示: i 为坡度,南北坡度分量用 i_{ns} 表示,南为正,北为负;东西坡度分量用 i_{ew} 表示,西为正,东为负。

如图 3 和图 4 所示,坡度角为 γ 、坡向为 φ_1 的坡面,分解得到

$$i_{ns} = \tan \gamma \times \cos \varphi_1, \tag{7}$$

东西坡度分量

$$i_{ew} = \tan \gamma \times \sin \varphi_1. \tag{8}$$

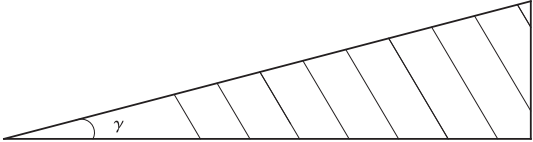


图 3 坡度角
Fig.3 Slope angle

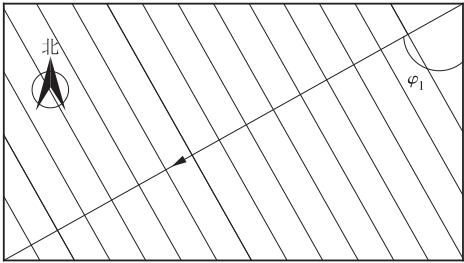


图 4 坡向
Fig.4 Slope direction

2.3 阶梯状安装光伏阵列间距的计算

图 5 ~ 图 6 给出了光伏阵列阶梯状安装的示意。根据式(4)推导出 D_{ns} 。

正北坡时,

$$D_{ns} = \frac{(l \times \sin \theta + i \times l \times \cos \theta) \times R}{1 - i \times R}, \tag{9}$$

斜北坡时,

$$D_{ns} = [(l \times \sin \theta + l \times \cos \theta \times i_{ns} + D_{ew} \times i_{ew}) \times R] / [1 - i_{ns} \times R]. \tag{10}$$
$$\tan \gamma = i, \tag{11}$$

因此可以进一步推导出正南坡时,

$$D_{ns} = \frac{(l \times \sin \theta - i \times l \times \cos \theta) \times R}{1 + i \times R}. \tag{12}$$

式(9)与式(12)只是坡度前边的符号取值不一样。如果规定南坡坡度为正,北坡坡度为负,则南北坡前后排阵列间距的计算公式可以统一为式(12)。

2.4 随坡安装光伏阵列间距的计算

阵列阶梯状安装在实际应用中并不多见,随坡

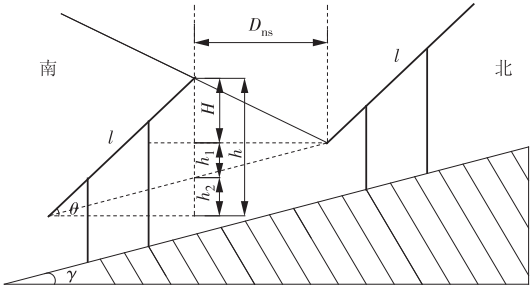


图 5 正南坡阵列间距计算示意
Fig. 5 Calculation of the array spacing
on the south slope

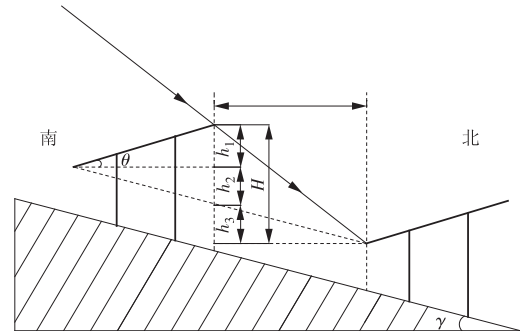


图 6 正北坡阵列间距计算示意
Fig. 6 Calculation of the array spacing
on the north slope

安装可以减少场平工作量,降低施工成本和难度,是当前山地光伏电站最为常见的安装方式。

随坡安装指同一个光伏阵列的高程随着斜坡变化,但是光伏阵列总朝南,如图 7 所示。



图 7 随坡安装山地电站现场

Fig. 7 Mountain power station installed along the slope

如图 8 ~ 图 9 所示,光伏阵列随坡安装时从南向北观测,假设光线沿 AB 方向传播, A 点为前排阵列斜面的左后侧角,光线经过 A 点落在左后排阵列的 B 点,此时阵列 B 点以上部分是没有任何遮挡的, AB 在东西方向上的投影距离为 D_{ew} 。

A 、 B 两点的高程差为 H ,由 h_1, h_2, h_3 组成。

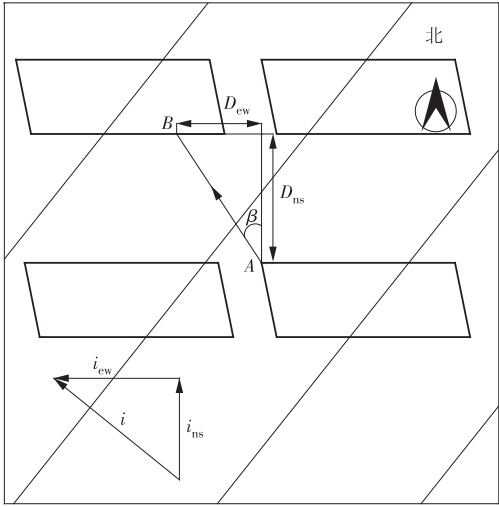


图 8 随坡安装间距计算模型示意
Fig. e 8 Calculation model of the installation
distance with the slope

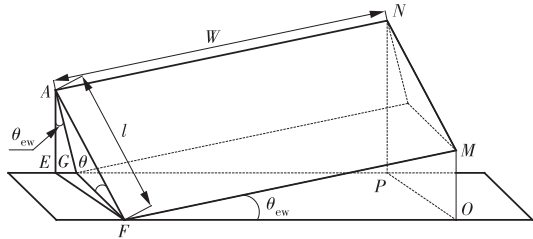


图 9 随坡安装阵列投影示意
Fig. 9 Projection of the array mounted on the slope

考虑东西坡度分量的影响,阵列倾角引起的高程差

$$h_1 = AE = \frac{l \times \sin \theta}{\cos \theta_{ew}} \quad (13)$$

南北坡度分量引起的高程差(南坡时 i_{ns} 为正)

$$h_2 = - (l \times \cos \theta + D_{ns}) \times i_{ns} \quad (14)$$

东西坡度分量引起的高程差(太阳方位角 β 偏西为正,地形为西坡时 i_{ew} 为正)

$$h_3 = - D_{ns} \times \tan \beta \times i_{ns} \quad (15)$$

A 、 B 两点的高程差为

$$H = h_1 + h_2 + h_3 \quad (16)$$

再结合(4)式可得,

$$D_{ns} = \frac{\left(\frac{l \sin \theta}{\cos \theta_{ew}} - l \cos \theta \times i_{ns} \right) \times R}{1 + (i_{ns} + \tan \beta \times i_{ew}) \times R} \quad (17)$$

从图 9 可知,东西坡度分量的存在会导致光伏阵列 $AFMN$ 斜面在水平面的投影发生改变。没有东西坡度分量时,投影为矩形。有东西坡度分量存在时,投影变为平行四边形 $EFOP$ 。

投影短边和长边的夹角

$$\angle EFO = \angle EFG + \angle GFO \quad (18)$$

其中

$$\angle GFO = 90^\circ \quad (19)$$

$$\angle EFG = \alpha \tan(EG/GF) \quad (19)$$

$$EG = AG \times \sin\theta_{ew} = l \times \sin\theta \times \sin\theta_{ew}, \quad (20)$$

$$GF = l \times \cos\theta,$$

$$\angle EFO = \angle EFG + 90^\circ。 \quad (21)$$

投影短边长

$$EF = \frac{GF}{\cos \angle EFG} = \frac{l \times \cos\theta}{\cos \angle EFG}, \quad (22)$$

投影长边长

$$FO = W \times \sin\theta_{ew},$$

式中: θ_{ew} 为东西向坡度的角度值,($^\circ$),西坡取值为正,东坡取值为负。

以上推导结果可用于指导随坡安装山地光伏电站桩基的定位和放点工作。

假设光伏阵列由 40 块组件组成,分上下两排组件竖向排列,组件长 1.96 m,宽 0.99 m,相邻两块组件之间间距为 0.02 m,则图 9 中光伏阵列斜面南北长(l)为 3.94 m,东西宽(W)为 20.18 m。

表 1~表 6 分别给出了组件倾角为 $15^\circ, 25^\circ, 30^\circ$,安装在东西坡度为 $0^\circ, -5^\circ, \pm 10^\circ, \pm 20^\circ$ 以及 $\pm 30^\circ$ 坡面上时光伏阵列投影参数。

表 1 倾角 15° 时西坡和平地光伏阵列投影参数

Tab.1 Projection parameters of the west slope and flat PV array at a inclination angle of 15°

投影参数	坡角/($^\circ$)			
	0	10	20	30
投影夹角/($^\circ$)	90	92.66	95.24	97.63
短边长度/m	3.81	3.81	3.82	3.84
长边长度/m	20.18	19.87	18.96	17.48

表 2 倾角 15° 时东坡光伏阵列投影参数

Tab.2 Projection parameters of the east slope PV array at a inclination angle of 15°

投影参数	坡角/($^\circ$)			
	-5	-10	-20	-30
投影夹角/($^\circ$)	88.66	87.34	84.76	82.37
短边长度/m	3.81	3.81	3.82	3.84
长边长度/m	20.10	19.87	18.96	17.48

表 3 倾角 25° 时西坡和平地光伏阵列投影参数

Tab.3 Projection parameters of the west slope and flat PV array at a inclination angle of 25°

投影参数	坡角/($^\circ$)			
	0	10	20	30
投影夹角/($^\circ$)	90.00	94.63	99.06	103.12
短边长度/m	3.57	3.58	3.62	3.67
长边长度/m	20.18	19.87	18.96	17.48

从表 1~表 6 的计算结果可以看出:当阵列安装在西坡时,阵列投影夹角为钝角,投影夹角随着坡度增加而增大,投影短边随之增大,长边随之减小;

表 4 倾角 25° 时东坡光伏阵列投影参数

Tab.4 Projection parameters of the east slope PV array at a inclination angle of 25°

投影参数	坡角/($^\circ$)			
	-5	-10	-20	-30
投影夹角/($^\circ$)	87.67	85.37	80.94	76.88
短边长度/m	3.57	3.58	3.62	3.67
长边长度/m	20.10	19.87	18.96	17.48

表 5 倾角 30° 时西坡和平地光伏阵列投影参数

Tab.5 Projection parameters of the west slope and flat PV array at a inclination angle of 30°

投影参数	坡角/($^\circ$)			
	0	10	20	30
投影夹角/($^\circ$)	90.00	95.73	101.17	106.10
短边长度/m	3.41	3.43	3.48	3.55
长边长度/m	20.18	19.87	18.96	17.48

表 6 倾角 30° 时东坡光伏阵列投影参数

Tab.6 Projection parameters of the east slope PV array at a inclination angle of 30°

投影参数	坡角/($^\circ$)			
	-5	-10	-20	-30
投影夹角/($^\circ$)	87.12	84.27	78.83	73.90
短边长度/m	3.42	3.43	3.48	3.55
长边长度/m	20.10	19.87	18.96	17.48

当阵列安装在东坡时,阵列投影夹角为锐角,投影夹角随着坡度绝对值的增加而减小,投影短边随之增大,长边随之减小。

3 理论计算与 PVsyst 软件模拟结果的对比

3.1 对比参数

为验证式(17)的准确性,选择青海共和互助县作为项目地点进行对比。地理位置为北纬 36.82° ,东经 101.95° 。光伏阵列宽度 3.94 m,组件倾角 23° 。

分别取 5 种类型的坡进行对比,具体参数见表 7。

表 7 5 种坡的对比参数

Tab.7 Comparison parameter of 5 slopes ($^\circ$)

类型	坡度	坡向	南北坡度	东西坡度
平地	0.00	0.00	0.00	0.00
正南坡	10.00	0.00	100.00	0.00
正北坡	-5.00	0.00	-5.00	0.00
西南坡	9.40	58.10	5.00	8.00
东北坡	10.74	-159.00	-10.00	-4.00

3.2 对比方法

为快速计算,基于式(1)~式(22),利用 EXCEL 工具开发了光伏电站阵列布置软件。软件的计算过程如图 10 所示。

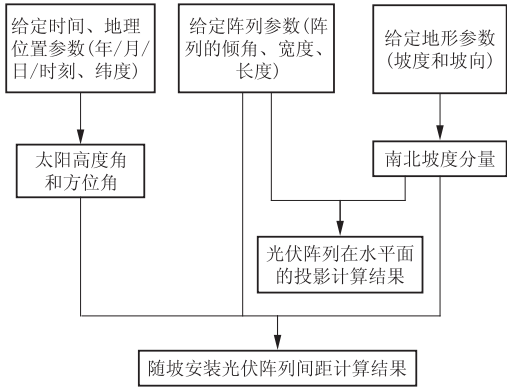


图 10 光伏电站阵列布置软件计算流程

Fig. 10 Software calculation process of PV power plant array layout

PVsyst 为一款光伏设计软件,可以建立光伏电

站的模型进行阴影分析,但是不能直接计算出不遮挡阵列间距数值。只能在建模时先给定某一个间距值,通过遮挡损失曲线来验证所给定数值的准确性。

具体的对比步骤是:(1)利用光伏阵列布置软件计算出冬至日 09:00—15:00 不遮挡时的阵列中心距;(2)在 PVsyst 软件中建立模型,将步骤(1)得到的阵列中心距作为参数输入模型中,利用软件自带的阴影分析工具,得到冬至日遮挡曲线;(3)观察遮挡曲线,如果结束遮挡时刻恰好是 09:00 或开始遮挡的时刻为 15:00,则可证明光伏电站阵列布置软件计算所得的结果是正确的,进而间接验证式(17)的正确性。

3.3 对比结果

从表 8 中的对比结果可以看出两种方法的计算结果相互吻合。图 11 为坡度角 9.40°、坡向 58.10°的西南坡的 PVsyst 模拟结果。

表 8 PVsyst 模拟结果

Tab. 8 Simulation results of PVsyst software

类型	坡度/(°)	坡向/(°)	公式计算中心距/m	PVsyst 模拟结果
平地	0.00	0.00	7.5	09:00—15:00 恰不遮挡
正南坡	10.00	0.00	5.2	09:00—15:00 恰不遮挡
正北坡	-5.00	0.00	9.6	09:00—15:00 恰不遮挡
西南坡	9.40	58.10	7.1	09:00 开始不遮挡
东北坡	10.74	-159.00	17.6	15:00 开始遮挡

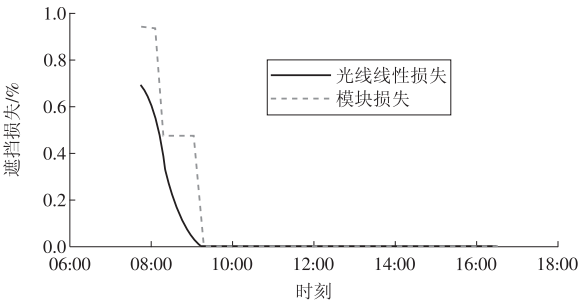


图 11 PVsyst 软件模拟的冬至日阴影遮挡损失曲线

Fig. 11 Shadow loss curve on winter solstice simulated by PV syst software

4 结论

随坡安装山地光伏电站阵列间距可以由光伏阵列宽度 l 、安装倾角 θ 、东西坡度角 θ_{ew} 、东西坡度分量 i_{ew} 、南北坡度分量 i_{ns} 、太阳方位角 β 、影子倍率 R 等参数求出。当斜坡存在东西坡分量时,光伏阵列在水平地面的投影形状将变成平行四边形,形状随着坡度的大小而变化。这对实际安装工程中光伏阵列桩基定位和放点具有非常重要的指导意义。利用 EXCEL 工具开发的光伏电站阵列布置设计软件可

极大方便光伏电站的设计工作。

参考文献:

[1] 吴永忠,邹立珺. 光伏电站太阳能电池阵列间距的计算[J]. 能源工程,2011,(1):39-40.
[2] 张朝辉,白永祥,焦翠坪,等. 坡面光伏阵列间距确定[J]. 电力科学与工程,2014,30(5):50-54.
[3] 张文华,司德亮,徐淑通,等. 太阳影子倍率的计算方法及其对光伏阵列布局的影响[J]. 太阳能,2011(9):28-31.
[4] 周长友,杨智勇,杨胜铭. 北坡场地光伏电站阵列间距设计[J]. 华电技术,2013,35(6):14-17.
[5] 光伏发电站设计规范:GB 50797—2012[S].
[6] 李英姿. 太阳能光伏并网发电系统[M]. 北京:机械工业出版社,2013.

(本文责编:陆华)

作者简介:

周建朋(1985—),男,河北石家庄人,工程师,工学硕士,从事光伏电池和电站的研究设计工作(E-mail:zhou066004@163.com)。

王明介(1986—),男,四川成都人,工程师,从事光伏电站设计方面的工作(E-mail:907306831@qq.com)。