

# 光伏组件倾角和阵列间距的多因素综合计算方法

叶任时,刘海波,李 德,曾 杰,苏 毅

(长江勘测规划设计研究有限责任公司,湖北 武汉 430010)

**摘要:**合理确定光伏电站组件的安装倾角和阵列间距,对提高光伏电站发电效益至关重要。综合考虑了组件全年运行时间内的阴影损耗、光伏发电单元直流电缆用量、直流电缆线损、光伏阵列占地面积多因素,提出了一种确定组件的安装倾角和阵列间距综合的计算方法,以追求发电效益最大化。该方法在提高发电量的基础上,实现了光伏电站的“紧凑化”设计,不仅节省了单位兆瓦光伏发电单元的占地面积,提高了土地利用率,且增加了发电效益。

**关 键 词:**组件倾角;阵列间距;交叉反馈;多因素;光伏电站

**中图法分类号:**TV734.2

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.05.008

光伏发电工程设计中,在确定光伏组件最佳安装倾角时,一般采用《光伏发电站设计规范》中的光伏阵列最佳倾角推荐值,或根据只考虑太阳辐射量最大的理论计算公式来计算,然后基于最佳倾角,根据阵列间距理论计算公式计算出阵列最佳间距。目前,尚没有针对工程实际综合考虑影响发电量和建设成本等多方面因素的工程计算方法应用于实际。

固定式光伏阵列是将光伏组件安装在固定结构件上的一种安装运行方式,在北半球,其以一定的安装角度面向南方<sup>[1]</sup>。通常利用太阳逐日小时平均辐射数据,通过专业软件进行计算,选择接受辐射量最大的倾斜面作为光伏组件的安装倾角<sup>[1]</sup>。然后根据当地冬至日9:00~15:00时段内光伏组件不受前后组件阴影影响的原则计算光伏组件间距。

在设计中,常采用以下方法对光伏组件的安装倾角和安装间距进行优化:①采用当地纬度或在当地纬度基础上加上几度的方法,并经计算机辅助软件修正后作为光伏组件安装的倾角<sup>[1]</sup>;②综合考虑光照入射角影响、组件连接损耗、电池板不匹配损耗、电池衰减损耗、组件遮挡损耗、温度影响、电气设备损耗、设备故障维护损耗等多种因素来确定组件倾角、阵列间距方案<sup>[2-3]</sup>;③考虑组件的风负荷,通过风洞试验确定阵列系统的最佳排布与倾角,以及支架结构,以达到系统

长期稳定可靠性。

在上述计算方法中,均未考虑组件在全年运行时间内的阴影损耗、光伏发电单元直流电缆用量、直流电缆线损等因素的影响。

本文在确定光伏组件最佳安装倾角和阵列前后间距时,综合考虑组件在全年运行时间内的阴影损耗、光伏发电单元直流电缆用量、光伏阵列占地面积、直流电缆线损等因素,提出一种以追求发电效益最大化的确定组件安装倾角和阵列间距的综合计算公式。

## 1 多因素综合计算方法

笔者基于大量的光伏电站工程设计实践,提出一种综合考虑阵列全年时间内阴影损耗、阵列占地面积、直流电缆线路损耗及工程量等因素,确定组件最佳安装倾角和阵列最佳间距的工程计算方法——光伏组件倾角和阵列间距交叉反馈多因素综合计算方法。计算包括以下步骤。

(1) 组件安装倾角初算。根据当地的太阳辐照数据,采用太阳能光伏发电系统专用设计软件PVsyst校核,得出不同倾斜平面上受到的平均年太阳辐射量,以受到辐射量最大为原则,选定组件安装倾角初值。

(2) 阵列间距初算。基于当地冬至日真太阳时9:00~15:00时间段内光伏方阵前后排之间应无阴影

遮挡的原则,采用 PV<sub>syst</sub> 计算光伏阵列间距初值,得到的阵列间距作为阵列间距的初值。

(3) 阵列间距优化。建立确定组件最佳安装倾角和阵列最佳间距的度电成本模型,以单位电能静态投资最小为目标,提出一种综合考虑阵列全年运行时间内阴影损耗、阵列占地面积、直流电缆线路损耗及直流电缆工程量多因素的,确定组件最佳倾角和阵列最佳间距的工程计算方法,计算公式为

$$A = [C + C_a(d)] / \{P(d, \alpha) [1 - \eta(d, \alpha)] [1 - \eta_y(d, \alpha)]\}$$

(1)

式中,  $A$  表示该光伏发电项目的单位电能静态投资;  $P(d, \alpha)$  表示组件前后排间距为  $d$ 、组件安装倾角为  $\alpha$  的条件下,该光伏电站不计阴影损失以及直流电缆线损的年发电量;  $C$  表示阵列前后排间距为初值条件下该光伏发电项目的建设成本;  $C_a(d)$  表示组件前后排间距为  $d$  的条件下,该光伏发电项目电缆用量和光伏阵列占地面积增加所导致的成本增量;  $\eta(d, \alpha)$  表示直流汇流线路损耗率;  $\eta_y(d, \alpha)$  表示阴影损耗率。

在最佳安装倾角初值附近,组件安装倾角初值以角度为单位变化,对发电量的影响远小于阵列间距初值以 0.5 m 为单位变化。为简化计算过程并提高计算效率,提出以单位电能静态投资最小为目标,基于组件安装倾角初值,优先确定阵列最佳间距的度电成本计算简化模型,计算公式为

$$A = [C + C_a(d)] / \{P(d, \alpha_0) [1 - \eta(d, \alpha_0)] [1 - \eta_y(d, \alpha_0)]\}$$

(2)

式中,  $\alpha_0$  为组件倾角初值。

通过分析阵列前后排间距与线路损耗、占地面积及建设成本的关系可知:在光伏阵列前后排间距较小时,随着间距增加,由于发电量增加较快,单位电能静态投资下降十分明显;在间距达到一定长度后,发电量增幅逐渐减小至极限,单位电能静态投资随着电缆用量和线路损耗的增加缓慢增长;利用 PV<sub>syst</sub> 根据最小单位电能静态投资计算出最优阵列间距  $D$ 。

(4) 组件安装倾角优化。在步骤(3)最优阵列间距  $D$  的基础上,考虑到全年运行时间内的阴影遮挡损失随着组件安装倾角的减小而减少,同时光伏组件接受的太阳辐射量亦是随倾角的减小而降低,利用 PV<sub>syst</sub>,可计算得到最优组件安装倾角。

2 实例应用

上述计算方法已应用到格尔木某大型地面光伏电站项目。具体计算过程如下。

2.1 确定间距倾角初值

依据格尔木气象站 2001 ~ 2010 年每小时的辐照

数据,采取 PV<sub>syst</sub> 软件以及 ABB 太阳能发电专用软件校核,计算得出不同角度倾斜面上受到的年平均辐射量。计算结果见表 1。

表 1 不同角度倾斜面年平均辐射量

角度/ (°)	年平均辐射量/ (kW · h · m <sup>-2</sup> )	角度/ (°)	年平均辐射量/ (kW · h · m <sup>-2</sup> )
26	2265.55	31	2290.51
27	2271.31	32	2294.35
28	2277.07	33	2296.27
29	2282.83	34	2298.19
30	2286.67	35	2296.27

由表 1 可以看出,在仅考虑不同角度倾斜面接受太阳辐射量大小的情况下,该工程固定式光伏组件的最佳安装倾角为 34°。按照 34°固定倾角放置的平板光伏电池每年可接受的太阳辐射量为 2 298.19 kW · h/m<sup>2</sup>。该工程在确定光伏组件阵列间距后对安装倾角进行了进一步优化。

在确定光伏组件前后间距时,根据当地场区情况,每排光伏组件由 9 组单元光伏串列并排组成,两排光伏阵列东西向之间设置变电中心。光伏串列中,光伏组件尺寸为 1 650 mm × 990 mm。

以上述串列尺寸及光伏组件 34°安装倾角为参数,采用 PV<sub>syst</sub> 设计软件及相关太阳能专业计算软件校核验算,得出支架间光伏阵列前后排最小距离(前后排最小间距)为 4.12 m。

2.2 确定阵列间距最优值

考虑到西北地区地广人稀,征地费用相对不高,且在优化方案中对实际占地面积影响相对不大,故暂不考虑光伏组件前后排间距对光伏电站占地面积以及征地成本的影响。

以该工程为例,选取其中固定式光伏阵列单位兆瓦容量组件作为研究对象,经计算可得,组件前后排间距与发电量的关系见表 2 和图 1。

表 2 不同间距单位兆瓦容量对应年发电量

间距/ m	年平均发电量/ (GW · h)	间距/ m	年平均发电量/ (GW · h)
4.1	1.6403	5.3	1.6588
4.3	1.6471	5.5	1.6599
4.5	1.6516	5.8	1.6613
4.8	1.6549	6.0	1.6626
5.0	1.6570		

由图 1 可知,单位兆瓦容量的发电量随着光伏组件前后排间距的增加而增加,但是增量呈逐渐减小趋势。最大发电量不超过不计阴影影响的理论值 1.698 GW · h。

同时,选择不同的阵列间距,对光伏电站的建设

成本和电气效率会产生影响。组件阵列间距增加,会导致电缆用量和阵列占地面积增加,从而增加建设成本和线路损耗。故在该工程中,通过分析组件阵列间距与线路损耗以及建设成本的关系,以确定相对最优的阵列间距。如表 3 所示。

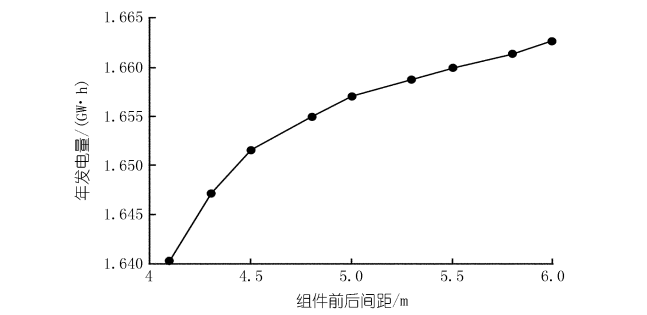


图 1 不同间距单位兆瓦容量年发电量

表 3 单位兆瓦不同间距电缆成本及汇流线路损耗率		
间距/ m	线路损耗率/ %	成本增减/ 元
4.1	1.55	0
4.3	1.60	4000
4.5	1.69	7000
4.8	1.76	14000
5.0	1.88	17000

由表 3 可以看出,电缆用量增加的成本和发电量线损与阵列间距基本上成线性关系。

将上述各元素代入前文所述单位电能静态投资公式并计算,可以得到不同阵列间距的单位电能静态投资,如表 4 所示。

表 4 不同阵列间距单位电能静态投资	
间距/ m	单位电能静态投资/ 元·(kW·h) <sup>-1</sup>
4.1	10.385
4.3	10.343
4.5	10.322
4.8	10.310
5.0	10.308

由表 4 可以看出,在光伏组件阵列间距较小时,随着间距增加,由于发电量增加较快,单位电能静态投资下降十分明显。在间距达到一定长度后,发电量增量逐渐减小至极限,单位电能静态投资随着电缆用量和线路损耗的增加缓慢增长。考虑工程施工的便利性,该项目最终确定光伏阵列阵列间距为 5 m。

2.3 确定组件倾角最优值

如上文所述,在仅考虑不同倾斜面接受太阳辐射量大小的情况下,该工程固定式光伏组件的最佳安装倾角为 34°。此时可以注意到,这里所说的组件的最佳安装倾角为 34°是指在不考虑其他因素的情况下,

该倾斜面上接受到的太阳辐射量最大。但是在实际工程中,由于太阳能光伏电站由众多子阵列组成,阵列之间不可避免地产生阴影遮挡。在此倾角下,根据冬至日真太阳时 9:00 ~ 15:00 时间段内光伏组件阵列无阴影遮挡的条件,以及结合电缆用量、线损、光伏阵列占地面积等因素,确定光伏组件阵列间距为 5 m。

然而在确定阵列间距为 5 m 的基础上,考虑到全年时间内的阴影遮挡损失随着组件安装倾角的减小而减少,同时光伏组件接受到的太阳辐射量亦是随倾角的减小而降低。因此,对组件的倾角进行重新校核计算是十分必要的。

以前后排间距 5 m 及各安装倾角为参数,并考虑阴影损耗后,采用 PVsyst 设计软件及相关太阳能专业计算软件重新计算在各安装倾角光伏组件上获得的太阳辐射量,计算结果见表 5。

表 5 不同倾斜面年平均辐射量					
角度/ (°)	年平均辐射量/ (kW·h·m <sup>-2</sup> )	阴影损耗/ %	角度/ (°)	年平均 辐射量	阴影损耗/ %
26°	2224.77	-1.8	31°	2233.25	-2.5
27°	2225.88	-2.0	32°	2233.55	-2.7
28°	2231.53	-2.0	33°	2233.12	-2.8
29°	2232.61	-2.2	34°	2232.69	-2.9
30°	2234.08	-2.3	35°	2229.68	-2.9

比较光伏组件安装倾角为 30°和 34°时接受太阳辐射量的情况发现,不考虑阴影遮挡损失时,30°时倾斜面接受年平均太阳辐射量为 2 286.67 kW·h/m<sup>2</sup>,34°时倾斜面接受年平均太阳辐射量为 2 298.19 kW·h/m<sup>2</sup>;当考虑到阴影遮挡损失时,选择 30°作为安装倾角的年平均阴影损耗为 2.3%,年平均太阳辐射量降为 2 234.08 kW·h/m<sup>2</sup>,而选择 34°作为安装倾角时,年平均阴影损耗为 2.9%,年平均太阳辐射量降为 2 232.69 kW·h/m<sup>2</sup>。

由此可知,对于固定式光伏阵列,当前后排间距为 5 m 时,考虑阴影遮挡损失后,固定安装倾角为 30°时反而能获得最大的太阳辐射量。故在该工程中,安装倾角并未如同相邻地区同类光伏发电电站一样选择 34°<sup>[5]</sup>,而是选定 30°作为光伏组件安装倾角。

2.4 效果分析

格尔木光伏发电工程应用此计算方法,阵列前后排间距选用 5 m,组件倾角选用 30°。

同期同地区其他光伏电站多选用 6 ~ 8 m 阵列间距<sup>[5-7]</sup>,采用 5 m 阵列间距优化方案后,减少了电缆用量,降低了线路损耗,并且减少了征地费用。

同期同地区多选用 34°~ 40°倾角<sup>[4-7]</sup>,如中节能锡铁山二期工程选择 37°,采用 30°倾角优化方案后降低了阴影损耗。

格尔木光伏发电工程最后根据本文所提出的综合计算方法,采用  $30^\circ$  安装倾角优化方案阴影损耗降低约 0.6%,提高发电效率约 0.062%。与 4.12 m 阵列间距初值方案相比,采用 5 m 阵列间距优化方案后,虽然单位兆瓦增加投资约 1.7 万元,线换增加约 0.33%,但年发电量提高约 1.02%,提高发电效率约 0.75%。考虑 1.15 元/(kW·h)的发电效益,采用本计算方法可直接创造经济效益约 300 万元。

### 3 结 语

本文建立了确定光伏组件最佳安装倾角和阵列最佳间距的度电成本模型,提出一种综合考虑阵列全年时间阴影损耗、阵列占地面积、直流电缆线路损耗及工程量多因素,来确定光伏组件最佳安装倾角和阵列最佳间距的工程计算方法。

基于度电成本计算简化模型,提出交叉反馈综合计算方法,该方法依次计算组件安装倾角初值、阵列间距初值、阵列最佳间距之后,再根据最佳间距,最后确

定组件最佳倾角。

该方法成功应用于格尔木某光伏电站工程,在提高发电量的基础上实现了光伏电站的“紧凑化”设计,提高了土地利用效率。

#### 参考文献:

- [1] 杨金焕,陈中华,汪征红.光伏方阵最佳倾角的计算[J].新能源,2000,22(5):6-9,12.
- [2] 董霞威,庞春,苏国梁.光伏并网电站光伏组件安装倾角的选择设计[J].中国电力,2010,43(12):70-73.
- [3] 沈辉,曾祖勤.太阳能光伏发电技术[M].北京:化学工业出版社,2005.
- [4] 范相林.光伏电站建设及运营管理研究[J].电子世界,2012(17):8-11.
- [5] 黄亮.太阳能光伏并网发电项目设计方案[J].能源与节能,2013(7):14-17.
- [6] 杨静涛,贾晖杰,吕国东.并网光伏电站发电量影响因素分析[J].太阳能,2013,(17):15-19.
- [7] 王鹏,景鹏.太阳能发电项目光伏系统安装布置探讨[J].机电信息,2013,(30):12-14.

(编辑:赵凤超)

## Multiple factors integrated computing method to determine angle and array spacing of PV modules

YE Renshi, LIU Haibo, LI De, ZENG Jie, SU Yi

(Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan 430010, China)

**Abstract:** The reasonable determination of the angle and array spacing of PV station module is crucial to the improvement of generation benefit. By comprehensive consideration on the multiple factors of the annual shadow loss, the amount of DC cable, DC cable loss and the land occupied by the PV plant, a kind of integrated computing method to determine the angle and array spacing of the modules is presented for pursuing the maximum efficiency. Besides the increase of the generation capacity, the compact design of PV power station is realized, which saves the area covered by PV power generation unit per MW and increases the land utilization rate.

**Key words:** angle of PV modules; spacing of solar cell array; cross feedback; multi factors; integrated computation

