

# 光伏电站设计中组件串联数的计算优化

中国电子工程设计院有限公司 ■ 赵霞\* 于金辉 李晗 翟云飞 牛利芳 梁芳 王靖

**摘要:** 为提高光伏电站的发电效率,进一步降低光伏电站的投资成本,提高整体经济性,针对目前光伏电站设计中组件串联数计算存在的问题和影响因素进行了探讨和分析,提出了优化后的计算方法;并结合实际设计算例,以系统效率和投资成本为目标进行了对比计算,优化后的计算方法可提升发电效率约 0.25%。

**关键词:** 光伏电站;光伏组件;优化;串联数;发电效率;投资成本

## 0 引言

我国光伏产业经过多年发展,技术不断创新突破,装机容量持续增加至全球领先的规模,光伏产业链已趋成熟完善。当前,提质增效成为光伏产业新发展阶段的重要任务。因此,在安全高效的前提下,光伏电站的设计更需要考虑“降低发电成本、减少补贴依赖、优化发展规模”等因素,以提高电站运行质量,推动行业有序及高质量的发展。本文将从光伏电站设计中阵列设计,即组件串联数的计算这一细节入手,探讨其计算过程中存在的问题并进行优化,以有效降低光伏电站的建设成本,优化电站建设规模。

## 1 光伏电站设计中组件串联数计算存在的问题分析

目前,常规光伏电站中的光伏组件串联数是根据 GB 50797-2012《光伏发电站设计规范》<sup>[1]</sup>

中的组串计算公式来计算,即:

$$N \leq \frac{V_{\text{dmax}}}{V_{\text{oc}}[1+(t-25)K_v]} \quad (1)$$

$$\frac{V_{\text{mpptmin}}}{V_{\text{pm}}[1+(t'-25)K'_v]} \leq N \leq \frac{V_{\text{mpptmax}}}{V_{\text{pm}}[1+(t-25)K'_v]} \quad (2)$$

式中,  $V_{\text{dmax}}$  为逆变器允许的最大直流输入电压, V;  $V_{\text{mpptmax}}$  为逆变器 MPPT 电压最大值, V;  $V_{\text{mpptmin}}$  为逆变器 MPPT 电压最小值, V;  $V_{\text{oc}}$  为光伏组件的开路电压, V;  $V_{\text{pm}}$  为光伏组件的最佳工作电压, V;  $K_v$  为光伏组件的开路电压温度系数;  $K'_v$  为光伏组件的工作电压温度系数;  $N$  为光伏组件串联数,  $N$  取整;  $t$  为工作状态下光伏组件的极端低温, °C;  $t'$  为工作状态下光伏组件的极端高温, °C。

从上述公式可以看出,组件串联数需保证同时满足逆变器的直流 MPPT 电压和最大直流允许电压的要求。

但该计算方式存在的问题是:在常规计算过

收稿日期: 2019-05-31

通信作者: 赵霞(1987—),女,研究生,主要从事清洁能源、微电网等方面的研究。zhaoxia@ceedi.cn



程中, 式中的  $t$  值一般取项目所在地的极端最低气温, 而实际上极端低温  $t$  应该取工作条件下组件的极端低温, 即有光照时组件的最低温度。然而现实中, 在组件工作条件下, 当阳光照到光伏组件上时, 结温会立刻升高, 并随着辐照度的增加而增加。因此, 计算中取全天的环境极端低温直接计算, 显然  $t$  值会偏低。

以上因素造成在利用常规算法进行计算和设计时, 存在极端低温取值偏低、开路电压偏大、组件串联数取值偏保守的问题。组件串联数偏小会导致在同样的设计容量下组串数增多, 从而使组串汇流电缆增多、支架数量增多、用地增加, 最终导致电站投资增大。因此, 在实际设计过程中, 可在常规算法的基础上根据实际运行环境优化计算。

## 2 组件串联数计算优化

### 2.1 光伏组件相关特性分析

光伏组件的电流主要受辐照度的影响, 电压主要受组件工作温度的影响<sup>[2]</sup>, 如图 1 所示; 辐照度也会对电压有一定的影响。在组件串联个数计算中, 主要用到的组件参数是组件开路电压、组件最大功率点电压。

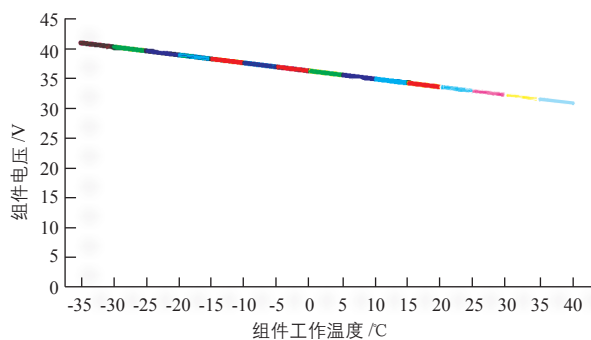


图 1 组件电压和组件工作温度的关系曲线

为了使光伏组件输出功率  $P$  最大, 需要通过最大输出功率点跟踪方法, 使电压  $V$  维持在最大功率点附近。在光伏发电系统中, 由逆变器 MPPT 实现这一功能。组件输出功率与电压的关系曲线示意图如图 2 所示<sup>[3]</sup>。

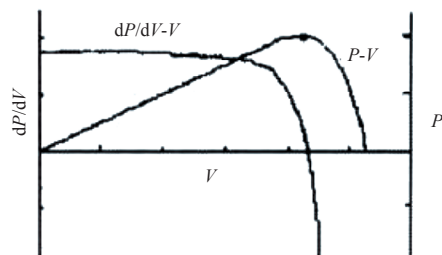


图 2 组件输出功率与电压的关系曲线

### 2.2 逆变器相关特性分析

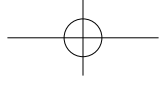
逆变器 MPPT 控制的作用是调整电压至组件的最大功率点电压。以某 500 kW 逆变器参数为例, 其主要参数数据如表 1 所示。

表 1 某 500 kW 逆变器主要参数

参数名称	参数值
逆变器功率/kW	500
最大输入电压/V	1000
MPPT 电压范围/V	480~850
最低工作电压/V	480

在光伏发电系统中, 随着太阳辐照度从日出开始逐渐增强, 组件发电产生的电压也慢慢增大, 当电压进入逆变器工作电压范围时, 逆变器开始工作, 整个系统进入发电状态; 当组件电压继续升高进入逆变器 MPPT 电压范围时, MPPT 会调整电压至最大功率输出点电压, 使该路 MPPT 下所接组串产生最大功率。中午到傍晚的变化也是相同, 随着太阳辐照度降低, 组件电压减小, 当电压低于逆变器最低工作电压时, 逆变器停止运行。工作电压范围决定了逆变器每天启动与停止运行的时间, 同理, 满载 MPPT 电压范围则决定了 MPPT 满负荷运行的时间, 这个范围越宽, 逆变器获得的发电效率越高。

在组件串联数的计算中, 主要用到的逆变器参数是逆变器直流侧最大开路电压和 MPPT 电压范围。从式 (1) 和式 (2) 可以看出, 式 (1) 决定了组串最大电压在极端低温条件下不会超过逆变器最大直流输入电压, 式 (2) 决定了组串在极端高温和极端低温条件下电压位于逆变器



MPPT 电压范围。而用常规算法计算时,限制组件串联数上限的往往是逆变器 MPPT 电压范围的上限。

值得注意的是,当组串电压高于 MPPT 电压范围的上限而低于逆变器最大直流输入电压时,逆变器仍具备对直流侧电压的控制能力。因此,通过电压控制功能,MPPT 会将直流电压逐渐拉回 850 V 以下的正常工作范围内。一旦直流输入电压低于 MPPT 电压范围的上限,MPPT 控制就会调整电压至最大功率点电压。

### 2.3 优化建议

在光伏电站设计过程中,建议组件串联数的确定应该以同时满足以下条件作为取值标准:1) 计算组串最高电压,并根据环境极端低温修正到电池结温;2) 组串在任何发电运行工况下,电压都不超过逆变器允许的直流输入电压范围(工作电压范围);3) 组件串联数的取值应统筹考虑电站整体发电量。

光伏组串的最高电压  $V_{OCARRAY}$  等于最低工作温度下的开路电压<sup>[4]</sup>,计算式为:

$$V_{OCARRAY}=V_{oc}[1+(t-25)K_v]N \quad (3)$$

光伏组串的最低电压  $V_{mARRAY}$  为:

$$V_{mARRAY}=V_{pm}[1+(t'-25)K_v']N \quad (4)$$

光伏组件的串联数应满足:

$$\frac{V_{mpptmin}}{V_{pm}[1+(t'-25)K_v']} \leq N \leq \frac{V'_{dcmax}}{V_{oc}[1+(t-25)K_v]} \quad (5)$$

式中,  $V'_{dcmax}$  为逆变器和光伏组件允许的最大系统直流电压,取二者较小值, V。

### 3 两种计算方法的设计结果对比

以某光伏电站为例,采用 2 种计算方法分别计算并进行对比。该项目地的极端最高气温为 38 ℃,极端最低气温为 -20 ℃。采用 290 W<sub>p</sub> 多晶硅光伏组件,组件开路电压为 39 V,峰值功率电压为 33 V,开路电压温度系数为 -0.0033,工作电压温度系数为 -0.0041。每 1 MW 为 1 个方阵,采用 500 kW 逆变器 2 台,逆变器最大直流输入电压为 1000 V,MPPT 电压范围为 450 ~ 820 V。

1) 常规计算方法:即组件串联数需保证同时满足逆变器的直流 MPPT 电压和最大直流允许电压的要求。采用式 (1) 和式 (2) 计算,可得最大组件串联数为 20 个。

2) 优化后的计算方法:由于此项目地极端最低温度为 -20 ℃,非极寒地区,且达到极端最低气温的天数极少,因此,采用式 (5) 进行计算,即组件串联数保证满足最大直流允许电压的要求,略高于逆变器的直流 MPPT 电压最大值,可得最大组件串联数为 22 个。

#### 3.1 系统效率对比分析

两种计算方法得出的组件串联数不同,因此同等容量下的组串数量不同,使得线损不同,导致发电效率有差别,从而影响最终发电量。组件串联数越大,组串电压越高,线损越低,从而可提升发电效率。

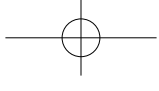
在本案例中,两种计算方法的系统效率对比结果如表 2 所示。

表 2 两种计算结果对系统效率的影响

	常规计算方法 (20 个 / 串)	优化后的计算方法 (22 个 / 串)	差异
组串电压	20 块组件并联	22 块组件并联	电压提高 10%
组件至汇流箱线损	与电压平方成反比	与电压平方成反比	降低 21%
发电效率提升	假设直流线损占总发电量的 1%	假设直流线损占总发电量的 1%	效率提升约 0.25%

由此可见,在本案例中,采用优化后的计算方法可以使组串电压提高 10%,线损减少 21%,发电效率提升约 0.25%。因此,在同等辐照度和

相同容量条件下,优化后的算法可使发电量提升约 0.25%。



### 3.2 投资成本对比分析

两种计算结果对投资成本的影响主要体现在光伏发电系统直流侧的成本和支架土建基础的成本。

在本案例中,两种计算方法的投资成本对比结果如表3所示。可知,采用优化后的计算方法,

每个发电单元节省了16个支路,可节约1台汇流箱,直流电缆减少了9.2%的用量;同时,虽然每个发电单元节省了16个支路,但支架大小有所增加,整体支架钢材的用量变化不大,而支架土建基础投资会减少约9.2%。

表3 两种计算结果对投资成本的影响

	常规计算方法 1(20 个 / 串)	优化后的计算方法 (22 个 / 串)	材料减少 / %
组件功率 / $W_p$	290	290	0
组串数量 / 个	173	157	9.20
汇流箱 (12 汇一) / 个	11	10	9.10
组件至汇流箱直流电缆 / 根	346	314	9.20
汇流箱至逆变器直流电缆 / 根	11	10	9.10
支架土建基础 / 组	173	157	9.20

## 4 结论

本文探讨了光伏电站设计中组件串联数的计算方法,对现有计算方法存在的问题进行了分析,提出了优化建议,并对两种计算方法产生的结果进行了系统效率和投资成本方面的对比分析。采用优化后的计算方法可在光伏电站设计中降低投资成本,同时提升系统效率;但也存在极少数极端天气情况下,逆变器无法输出最大功率的风险。因此,在实际设计过程中,需要进行气象条件分析,根据项目地的实际极端气温、出现时间点及

天数,从系统效率、投资成本和极端低温运行减损的发电量几个方面进行综合对比,从而选择最具经济性的方案。

### 参考文献

- [1] GB 50797-2012, 光伏发电站设计规范 [S].
- [2] 于佳禾, 许盛之, 韩树伟, 等. 太阳能电池与光伏组件的温度特性及影响因素的分析 [J]. 太阳能, 2017, (7): 29 - 36.
- [3] 王环, 金新民. 光伏并网逆变器最大功率点的跟踪控制 [J]. 技术与应用, 2004, (2): 88 - 90.
- [4] IEC 62548-2016, Photovoltaic(PV)arrays-design requirements[S]. 太阳能
- [J]. 科技视界, 2016, (7): 280 - 310.
- [4] 孟广双. 荒漠光伏太阳能电池板表面灰尘作用机理及其清洁方法研究 [D]. 西宁: 青海大学, 2012.
- [5] 高贵生, 宋理明, 马宗泰, 等. 青海省降尘量时空分布及其影响因素分析 [J]. 中国沙漠, 2013, 7(33): 1124 - 1130.
- [6] Hard R J, Soddon A B. A hypothesis on the griffith's cracks in alkali silicate and silica glasses [J]. Physics and Chemistry of Glasses, 1997, 38(1): 11 - 14.
- [7] 赵建兴, 方华, 潘新征, 等. 光伏玻璃防雾研究 [J]. 电动力学报, 2013, (5): 101 - 105.
- [8] 王大勇, 冯吉才. 杨氏方程的能量求解法及润湿角计算模型 [J]. 焊接学报, 2002, (6): 78 - 85.
- [9] 焦云龙, 刘小君, 刘焜, 等. 离散型织构表面液滴铺展及其接触线的力学特性分析 [J]. 力学学报, 2016, 3(48): 353 - 360.
- [10] 严迎杰, 王永丰, 刘玲玲, 等. 影响玻璃表面亲疏水性因素的研究 [A]. 第 14 届中国光伏大会 (CPVC14) [C]. 北京, 2014. 太阳能

(接第 59 页) 促进组件表面的腐蚀损伤。

3) 采用高透光率的自清洁防尘光伏玻璃, 可在保证光伏组件出厂功率的基础上提高光伏电站组件的清洁效率, 降低清洁成本并提升发电量。

### 参考文献

- [1] Khadija K K. Performance evaluation for PV systems to synergistic influences of dust, wind and panel temperatures: Spectral insight[A]. IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)[C]. Portland, Oregon, 2016, 1715 - 1718.
- [2] 温岩, 赵东, 袁春红, 等. 积尘对光伏系统发电的影响研究综述 [J]. 太阳能, 2014, (11): 36 - 41.
- [3] 汪继伟, 徐立军, 黄鹏, 等. 浅谈光伏组件清洁方法与展望