

# 光伏发电单元布置及容量优化设计

苏 毅, 刘海波, 汪 建, 覃琳捷, 叶任时

(长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430010)

**摘要:**在光伏电站的每个光伏发电单元内,考虑到不同布置格局的光伏发电单元直流汇流电缆工程量差别大,不同装机规模对工程建设成本及发电量的影响,需合理配置光伏阵列与逆变器容量。通过设计分析及工程实践,提出光伏发电单元应尽量布置成正方形格局、将逆变小室布置在光伏发电单元的几何中心、采用单位兆瓦的装机规模、装机容量大于逆变器额定容量的设计理念。按此优化设计可减少单位兆瓦光伏发电单元的电缆用量,降低功率损耗,提高设备利用率。

**关键词:**光伏发电单元; 装机规模; 正方形布置; 几何中心; 容量配置

**中图法分类号:** TV734.2

**文献标志码:** A

**DOI:**10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.05.009

光伏发电单元是一个光伏电站中的基本组成。通常每个光伏发电单元配置一台变压器和若干台逆变器<sup>[1-6]</sup>。在实际工程中,一个光伏发电单元的光伏装机容量没有定式,可按照500 kW<sub>p</sub>、1 MW<sub>p</sub>、2 MW<sub>p</sub><sup>[7]</sup>等规模来设计。

由于光伏组件需要尽量避免被阴影遮挡,因此,通常将安装有逆变器、升压变压器和配套开关柜的逆变小室布置在整个光伏发电单元的外侧。同时,将多个光伏发电单元的逆变小室安放在场区主干道的两侧,可以减少场区中道路的建设,降低建设成本。相关研究及文献提到光伏阵列尽量布置成矩形<sup>[1,4]</sup>,但是并未对逆变器的合理布置进行深入分析。

由于光伏电站每个光伏发电单元的占地面积很大,电缆用量多,相关研究人员已经开展了对光伏电站直流侧汇流电缆根据线损进行经济截面选择的研究<sup>[8]</sup>,但是仅对汇流箱至逆变器配电柜之间的直流电缆的选择进行了分析,尚未对直流侧所有直流电缆进行分析。

综合比较光伏发电单元电缆用量和光伏电站变压器等设备用量,本文阐述了采用1 MW容量设置一个光伏发电单元的布置形式。同时,通过分析发现,将逆变小室布置在光伏发电单元外围,虽然减少了场区内

道路建设成本,但是增加了电缆用量,增加的成本更多。若将逆变小室布置在光伏发电单元的几何中心,虽然增加了场区内道路建设成本,但是因减少电缆用量降低的成本更多,且减少电缆用量可有效降低线路上的功率损耗,进而提升光伏电站的发电效率。

## 1 光伏发电单元设计

### 1.1 采用正方形布置格局

根据现场场地条件,可将光伏发电单元布置成矩形、圆形甚至不规则形状。在面积一定的条件下,圆形的周长最短,正方形次之。布置成圆形时,光伏发电单元中的电缆布线可能比矩形的布置用量少,但是从实际工程角度考虑,圆形布置的光伏发电单元施工不便,且相邻光伏发电单元之间的空地都被浪费。因此,光伏发电单元应尽量布置成规则的长方形格局。

### 1.2 逆变小室居中布置

逆变小室可布置在光伏发电单元几何中心,称为居中布置(见图1),或布置在光伏发电单元外围(见图2),称为靠边布置。

按照图1居中布置形式,在逆变小室旁建设通道至主干道。按照图2布置的光伏发电单元中,逆变小

室可直接布置在主干道旁,减少了道路建设成本。为便于比较,假定图 1 和图 2 中的光伏发电单元容量为 1 MW<sub>p</sub>,每一横排光伏组件之间的间距为 5 m。可以估算出按照图 2 布置方式比图 1 的布置方式减少道路约 270 m,相应节省道路建设成本约 5 000 元。

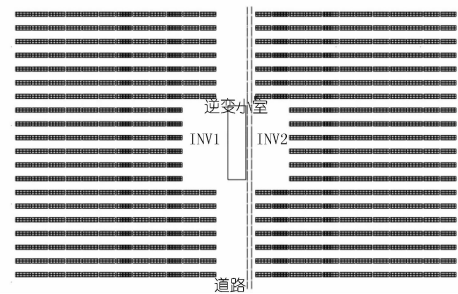


图 1 逆变小室居中布置

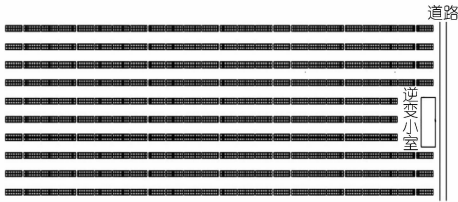


图 2 逆变小室靠边布置

但是,对比图 1 和图 2 布置方式中的电缆用量,假定直流电缆全部采用 2 × 6 mm<sup>2</sup> 规格的光伏专用电缆,汇流箱和逆变小室之间采用 1 × 50 mm<sup>2</sup> 规格的电力电缆,则可计算得到电缆用量分别如表 1 所示。

表 1 兆瓦光伏发电单元电缆用量比较 m

布置型式	2 × 6mm <sup>2</sup> 电缆	1 × 50mm <sup>2</sup> 电缆
逆变小室居中	14650	1480
逆变小室靠边	14650	3770

从表 1 中可以看到,逆变小室靠边布置外围主要增加了汇流箱至逆变小室的汇流电缆的用量,每兆瓦发电单元增加约 2 300 m 长的汇流电缆。这带来以下两个问题。

(1) 电缆用量增加所带来的成本增加远大于少建道路带来的成本减少。

(2) 按照光伏组件满功率运行考虑,汇流电缆上的电流约为 96 A,而 1 × 50 mm<sup>2</sup> 规格汇流电缆的电阻率为 0.387 Ω/km,因此每兆瓦发电单元因为增加电缆用量带来的功率损耗约为:96<sup>2</sup> × 0.387 × 2.3 = 8 203 W,按照 1 MW<sub>p</sub> 光伏发电功率计算,线路上的损失约增加 0.82%。

因此,综合考虑,逆变小室居中布置在光伏发电单元几何中心经济性更好,电站发电效率更高。

1.3 采用 1 MW 装机规模

每个光伏发电单元的光伏组件装机容量没有典型

设计方案,本文通过对 0.5,1,2 MW 和 3 MW 光伏发电单元的成本变化和发电量进行对比分析,以确定最优的布置规模。

根据逆变小室尽可能布置在光伏发电单元几何中心的原则,设计 500 kW、2 MW 和 3 MW 规模的发电单元和 1 MW 布置类似,区别仅在于容量越大的光伏发电单元占地面积更大,汇流箱相对而言更分散。

1.3.1 对成本的影响

光伏发电单元虽然装机容量不同,但是单位兆瓦的光伏组件及光伏支架的成本基本相同,区别主要在于单位兆瓦的电缆成本及变压器成本。

(1) 电缆成本对比。同样假定直流电缆全部采用 2 × 6 mm<sup>2</sup> 规格的光伏专用电缆,汇流箱和逆变小室之间采用 1 × 50 mm<sup>2</sup> 的电力电缆,则不同光伏发电单元的电缆用量及等效单位兆瓦电缆用量计算如表 2 所示。

表 2 不同规格电缆用量统计

光伏发电单元规格/MW <sub>p</sub>	2 × 6mm <sup>2</sup> 电缆/m		1 × 50mm <sup>2</sup> 电缆/m	
	实际用量	等效单位兆瓦用量	实际用量	等效单位兆瓦用量
0.5	6950	13900	620	1240
1	14650	14650	1480	1480
2	29300	14650	4820	2410
3	43950	14650	10000	3333

从表 2 中可以看到,不同装机容量的光伏发电单元直流电缆用量几乎相当,因为虽然光伏发电单元容量不同,但是每个光伏支架上的光伏组件数量基本相同,而且每个汇流箱的位置在光伏发电单元中的位置基本一致,因此直流电缆用量基本一致。不同光伏发电单元的电缆用量差异主要体现在汇流箱至逆变小室的电缆用量。

根据目前 1 × 50 mm<sup>2</sup> 规格的电力电缆价格 30 元/m 计算,1 MW<sub>p</sub> 光伏发电单元电力电缆成本约为 44.4 万元,0.5,2 MW<sub>p</sub> 和 3 MW<sub>p</sub> 光伏发电单元等效每兆瓦电力电缆成本相比 1 MW<sub>p</sub> 光伏发电单元变化分别为(1 240 - 1 480) × 30 = -0.72 万元、(2 410 - 1 480) × 30 = 2.79 万元、(3 333 - 1 480) × 30 = 5.56 万元。即光伏发电单元规模越大,电缆用量越大。

(2) 变压器成本对比。不同光伏发电单元可采用不同容量的升压变压器,即 0.5,1,2 MW 和 3 MW 光伏发电单元分别可采用 0.5,1,2 MVA 和 3 MVA 变压器。根据当时市场价格推算,这 4 种变压器的价格分别约为 12,21,37 万元和 50 万元,对应单位兆瓦光伏装机容量的变压器成本分别为 24,21,18.5 万元和 16.33 万元,即变压器容量越大,单位兆瓦的成本越

低。

兆瓦级光伏发电单元在  $1 \times 50\text{mm}^2$  规格电缆和变压器上的综合成本差异很小,经济性相当,其中 0.5 MW 规模的光伏发电单元单位兆瓦成本最高,主要在于无法体现光伏电站布置的规模化优势。

1.3.2 对发电量的影响

(1) 线损对比。按照光伏组件满功率运行考虑,光伏组件的最大输出电流约为 8 A,汇流电缆上的电流约为 96 A。由于单位兆瓦光伏发电单元的一级直流电缆用量相当,因此线损也相当,主要线损差别体现在二级汇流电缆上。

根据  $1 \times 50 \text{ mm}^2$  汇流电缆的电阻率为  $0.387 \text{ }\Omega/\text{km}$  计算和表 2 的统计,不同规模的光伏发电单元单位兆瓦装机容量的汇流电缆上的功率损耗分别为:0.5 MW 规模为  $96^2 \times 0.387 \times 1.24 = 4\,422 \text{ W}$ ;1 MW 规模为  $96^2 \times 0.387 \times 1.48 = 5\,278 \text{ W}$ ;2 MW 规模为  $96^2 \times 0.387 \times 2.41 = 8\,596 \text{ W}$ ;3 MW 规模为  $96^2 \times 0.387 \times 3.33 = 11\,877 \text{ W}$ 。可见,由于规模越大的光伏发电单元汇流电缆用量越多,因此线损也越大。线损的增加降低了光伏电站的能量转换效率,从提高太阳能利用效率的角度考虑,采用较小规模的光伏发电单元更有利于提高光伏电站的发电量。0.5 MW 与 1 MW 规模 2 级直流汇流线损差别较小;仅与 2 MW 规模发电单元比较,1 MW 规模发电单元线损减少约 0.33%。

(2) 光伏逆变器最大功率跟踪 (MPPT) 效果对比。光伏变流器采用最大功率跟踪控制,其实质是一个自寻优过程,即光伏变流器不断调节工作点电压,使其向峰值功率点靠拢。当逆变器输入侧的多组光伏组件串输出电压不一致时,变流器的工作点电压无法同时与所有输入侧光伏组件串的最大功率输出点匹配,从而降低了变流器的工作效率。

对比 0.5,1,2 MW 和 3 MW 规模的光伏发电单元,最短的汇流电缆长度均为 21 m,最长的汇流电缆长度分别为 45,54,98 m 和 145 m。按照汇流电缆规格为  $1 \times 50 \text{ mm}^2$ ,电阻率为  $0.387 \text{ }\Omega/\text{km}$  计,最大的电压降落分别为 1.7,2.0,3.6 V 和 5.4 V。由此可见,光伏发电单元规模越大,汇流箱至逆变器端口间的电压差别越大,那么难以工作于最大功率跟踪点附近的光伏组件就越多,从而影响整个光伏电站的总发电量。

因此,从 MPPT 跟踪控制的角度考虑,光伏发电单元的规模越小,越有利于提高单位兆瓦光伏装机容量的发电量。

综上所述,光伏发电单元的规模越小,越有利于提高单位兆瓦光伏组件的发电量。但是,0.5 MW 光伏发电单元的工程成本太高,因此,采用 1 MW 的光伏发

电单元能在发电量和工程造价之间取得良好的平衡。

1.4 光伏组件容量超配

光伏电站中光伏组件和逆变器的典型配置是使二者功率匹配,即每 500 kWp 的光伏装机容量配置一台 500 kW 的逆变器。

但从实际运行状况分析,受实际运行条件、光伏资源条件的限制,1 MWp 装机容量的光伏组件无法达到 1 MW 的额定输出功率,因此,逆变器绝大部分时间在小于额定功率的情况下运行。如光伏资源越差的地区,光伏组件的输出功率越小,逆变器实际使用的容量越低。

查阅逆变器的说明书可知,光伏逆变器的输入功率允许大于其额定功率。此外,根据逆变器的效率曲线(见图 3)分析,光伏逆变器的输出功率在超过 50% 以后,其效率变化很小,基本稳定在同一个值,即在安全情况下增加逆变器输入端的光伏组件装机容量,不会降低逆变器的工作效率。因此,每台逆变器可接入大于其额定功率的光伏组件,即使光伏组件因为效率的限制达不到额定功率,逆变器的总输出功率也大于只配置 500 kWp 光伏组件时的输出功率,且不会损坏逆变器。

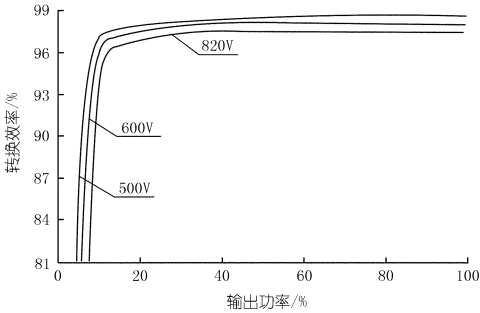


图 3 光伏逆变器的效率曲线

逆变器实际可接入的光伏组件装机容量可根据光资源条件和现场环境进行适度调整。光资源条件较差,光伏组件运行时最大输出功率小于额定功率较多时,逆变器输出侧接入的光伏组件功率可适当增加,如可按照逆变器额定容量的 1.2 倍甚至更高比例配制光伏组件;当地光资源条件较好,光伏组件运行时最大输出功率较高时,可减少逆变器输入侧光伏组件超配的额度(例如按照光伏组件容量:逆变器额定容量 = 1.05:1),以避免逆变器实际输入功率超过逆变器安全限值。

以 500 kW 逆变器配置 550 kW 光伏组件装机容量,计算光伏组件装机容量和逆变器额定容量之比为 1.1:1,20 台逆变器共可接入 11 MWp 光伏组件。而按照常规布置方式,11MWp 光伏组件需配置 22 台逆

变器和 11 台升压变压器。因此逆变器超配光伏组件的设计节省了两台逆变器、一台变压器及其配套的开关柜等,经计算约减少 200 万元的成本支出。

## 2 应用实例

依据兆瓦级光伏发电单元最大化设计理念,在格尔木某 10 MW 并网光伏发电工程在设计过程中根据现场条件进行优化。

由于项目场址平整,规划范围为较为整齐,因此该电站按照每 1 MW 一个光伏发电单元的规模总计布置了 10 个光伏发电单元,每个光伏发电单元建造一座逆变小室,每个逆变小室内装有两台 500 kW 的光伏逆变器,其中 3 个光伏发电单元的排列布置如图 4 所示。光伏发电单元依次排列,逆变小室分别置于每个光伏发电单元的几何中心,3 个逆变小室通过道路和场区主干道相连。

考虑到青海省光照条件较好,光伏组件的输出功率接近其标称的额定功率,因此每个 1 MW 的光伏发电单元实际装机容量设定为 1.1 MW<sub>p</sub>,即完全按额定功率输出使光伏组件的输出功率达到 1.1 MW。光伏组件装机容量和逆变器额定输出功率的比为 1.1:1,大于逆变器的额定输入功率,且小于逆变器最大允许输入功率。

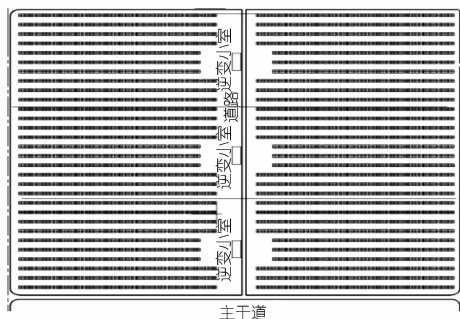


图 4 3 组光伏发电单元布置

经此优化设计后,节省工程直接投资约 200 万元,综合提高光伏电站发电效率约 1.5%,最终降低了光伏电站的度电成本,提高了光伏电站的发电效益。基于实际发电数据,考虑 1.15 元/kWh 的上网电价,采用此项优化设计,25 a 累计经济效益超 600 万元。

## 3 结语

光伏发电单元尽量布置成正方形格局,逆变器应尽可能布置在光伏发电单元的几何中心,通过这种布置方式使电缆总用量最小,减小线损,提高光伏电站的能量转换效率,并使单台逆变器输入端的光伏组件功率宜按逆变器额定功率的 1.1 倍配置,充分利用逆变器的可接入超过额定功率光伏组件的特性,提高逆变器的输出功率。本研究首次系统地分析了影响光伏发电单元发电效益的 4 个主要因素,成果的成功应用对合理规划光伏发电单元具有重要的指导意义,为光伏电站的规模化建设提供了坚实的技术支撑。

### 参考文献:

- [1] 徐永邦,苏兴锋.一种地面光伏电场阵系的排列方法:中国,CN200910182120.7[P].2009-12-9.
- [2] 廖镔,李时华.大型光伏并网电站设计方法探讨[C]//2011年全国风力发电工程信息网年会,三亚,2011:182-191.
- [3] 张湛,吕丹,何惧.某光伏电站总图设计及布置探讨[J].太阳能,2014,(10):24-26.
- [4] 李润生,胡庆,宋杨,等.光伏方阵:中国,CN201320417574.X[P].2014-3-5.
- [5] 王超.基于汇流箱布置对光伏区电缆敷设成本的研究[J].科技创新与应用,2014,(19):182.
- [6] 谢丹,鞠健,于苗苗,等.光伏电池阵列布置模式的探讨[J].太阳能,2013,(23):28-31.
- [7] 杨建,郭志,杨宇东.光伏电站两兆瓦逆变升压集成单元系统:中国,CN201320348579.1[P].2013-11-27.
- [8] 张彦昌,石巍.光伏电站直流汇流电缆选型[J].电力建设,2014,35(2):113-116.

(编辑:赵凤超)

## Optimal design of unit layout and capacity for PV power generation

SU Yi, LIU Haibo, WANG Jian, QIN Linjie, YE Renshi

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

**Abstract:** In each power generation unit of photovoltaic power station, a reasonable allocation of photovoltaic array and inverter capacity are needed by considering the different lengths of DC bus cable due to the different arrangements and the influences of different installed capacities on construction cost and generation capacity. In view of design analysis and engineering practice, this paper proposes that the units should be arranged as a square with the inverter room in the geometric center of each unit, and the idea of MW-level PV installation capacity (more than the inverter rated capacity) is adopted. It is indicated that the optimal design can lessen the amount of cable in MW-level PV power generation unit, reduce power consumption and improve the equipment utilization rate.

**Key words:** photovoltaic power generation unit; installation capacity; square layout; geometric center; capacity allocation